

Università degli Studi di Padova

SCUOLA DI SCIENZE
DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA
"GALILEO GALILEI"

LAUREA TRIENNALE IN ASTRONOMIA

Sorgenti Gamma nel Lockman Hole

Relatore: Ch.mo Prof. Piero Rafanelli

Correlatore: Dott. Giovanni La Mura

Laureanda: FRANCESCA ZANANDREA

A.A. 2014 - 2015

Alla mia famiglia

Indice

Introduzione	IV
1 Statistica sorgenti γ	2
1.1 Introduzione storica	2
1.2 Il motore centrale degli AGN	3
1.3 Modello unificato	4
2 Lockman Hole	10
2.1 Posizione e Scoperta	10
2.2 Assorbimento di radiazione	12
3 Elaborazione dei dati	16
3.1 Calcolo della densità di HI	16
3.2 Compilazione dei grafici sulla densità	19
3.3 Confronto delle bande spettrali X, radio, γ	20
3.4 Conteggi di sorgenti nel Lockman Hole	33
Conclusioni	39
A Grafici Gnuplot	42
B Topcat	44
C Programma per istogrammi bidimensionali	45
Bibliografia	52

Introduzione

La radiazione luminosa a diverse frequenze è uno dei veicoli attraverso i quali possiamo ricevere informazioni fisiche sugli oggetti che popolano l'Universo.

Non tutte le frequenze sono però ugualmente accessibili perché soggette a differenti fenomeni di interazione con la materia che permea l'ambiente Galattico e extragalattico.

Di conseguenza, l'osservazione di questi segnali richiede strumenti con diverse caratteristiche ed è soggetta a fenomeni di assorbimento da parte del mezzo interstellare.

In tal senso vi è differenza nel caso di assorbimento dovuto all'atmosfera terrestre e quello dovuto al mezzo distribuito su varie scale nell'Universo. Mentre ad esempio la luce visibile si propaga nell'atmosfera, arrivando fino al suolo, i raggi γ di più alta energia vengono schermati. Invece, nel mezzo interstellare, la radiazione γ non subisce assorbimento, attraversando anche regioni opache alle altre frequenze.

Per queste ragioni sono stati costruiti degli osservatori orbitanti non più limitati dalla prima fonte di assorbimento, la nostra atmosfera. Tuttavia alcune lunghezze d'onda subiscono effetti di assorbimento da parte del mezzo interstellare.

Sarebbe quindi auspicabile trovare delle regioni di cielo in cui il mezzo interstellare sia meno denso, in modo tale da avere il minor effetto di assorbimento e perciò una vista più profonda del campo.

Uno degli elementi presenti in tutto l'Universo che determina l'assorbimento di radiazione è ad esempio l'idrogeno neutro. Molti studi sono stati condotti sulla distribuzione e sulla densità di questo elemento, come i risultati ottenuti da Kalberla et al. (2005) nella mappa dell'intero cielo nella lunghezza

d'onda 21cm. Questa mappa mostra la distribuzione composita del mezzo interstellare in grandi nuvole di gas e polveri che hanno dimensioni superiori alle centinaia di anni luce.

Nel 1986 Lockman scoprì una regione di cielo, che successivamente prese il suo nome, in cui la densità della colonna di idrogeno Galattico lungo la linea di vista risultava essere molto bassa rispetto alle zone circostanti. Questa caratteristica fisica offre l'opportunità di migliorare le osservazioni extragalattiche minimizzando il limite dell'assorbimento dovuto al mezzo interstellare che invece oscura la visione di oggetti posti al di fuori della nostra Galassia lungo altre direzioni, in particolare in prossimità del piano della Via Lattea.

'Lockman Hole' è il nome di questa regione privilegiata dove studiare l'associazione delle sorgenti γ con la loro controparte ottica per sviluppare la conoscenza necessaria a catalogare questi oggetti anche quando vengono localizzati in regioni in cui l'identificazione della controparte risulta problematica.

Pertanto, in questo lavoro si cercherà di raffinare i criteri di ricerca, verificando quanto siano precisi nel caso di sorgenti già catalogate per poi applicarli a quelle ancora da catalogare nel campo del Lockman Hole.

Capitolo 1

Sorgenti γ extra-Galattiche

1.1 Introduzione storica

Nella metà degli anni Cinquanta del secolo scorso, l'Universo nella banda X diventò accessibile agli astronomi grazie alla progettazione di razzi e satelliti capaci di trasportare strumenti fuori dall'atmosfera terrestre. L'atmosfera costituisce infatti un filtro per tali lunghezze d'onda. Le osservazioni in questa banda spettrale portarono alla scoperta di una nuova componente di luce diffusa nel cielo, il fondo cosmico nei raggi X (Gursky et al., 1963). Con il migliorare delle tecnologie adottate per lo studio del cielo, furono osservate sempre più sorgenti in questa banda spettrale.

L'osservatorio a raggi X Uhuru (NASA) fu il primo satellite lanciato per effettuare una scansione dell'intero cielo nella banda 2 – 20keV, il cui risultato principale fu la conferma del fatto che le sorgenti di raggi X includevano oggetti extragalattici come quasar e galassie di Seyfert, o anche oggetti appartenenti alla nostra Galassia come stelle, stelle di neutroni, buchi neri galattici e resti di supernova (Giacconi et al., 1971).

Con l'avvento di ROSAT, il fondo cosmico in X fu indagato nella banda di energia 0.5 – 2keV, e mostrò delle sorgenti discrete tra cui principalmente Nuclei Galattici Attivi (AGN) (Hasinger et al., 1998). Questo fatto fu confermato anche nella banda 2 – 10keV dalle missioni nei raggi X Chandra e XMM Newton (Bauer et al., 2004; Moretti et al., 2003; Worsley et al., 2004). In aggiunta ai fotoni di alta energia, anche i raggi cosmici elettronici con

intervallo di energia tra 7GeV e 1TeV sono stati indagati da diversi satelliti. Queste particelle molto energetiche sono buoni indicatori perché, nonostante degradino la loro energia attraverso il viaggio nell'Universo e nella Galassia, possono essere rilevate con facilità. Diverse sono le sorgenti γ che emettono questo tipo di particelle, di cui circa un terzo sono AGN. Questa informazione è stata ottenuta nel 2010 grazie al satellite Fermi, lanciato l'11 Giugno 2008 in un'orbita circolare a 565 km di altezza.

I raggi cosmici perdono la loro energia tramite due processi fisici: emettendo radiazione di sincrotrone mentre attraversano i campi magnetici galattici e per effetto Compton inverso sul campo di radiazione interstellare. La tipica distanza alla quale le particelle dotate di energia pari a 1 TeV perdono metà della loro energia è stimata essere intorno ai 300–400pc nell'ambiente a circa 1kpc dal Sole. I raggi cosmici di minore energia invece, sono più facilmente influenzati da perdite di energia dovute alla diffusione e a processi convettivi nel mezzo interstellare.

Tutti questi processi possono quindi influenzare lo spettro dei raggi elettronici dopo che questi sono stati prodotti dalle rispettive sorgenti, e per questa ragione lo spettro osservato è sensibile al luogo dove sono stati originati, al modo in cui sono stati prodotti e all'ambiente in cui si sono propagati attraverso la Galassia (Ackermann et al., 2010).

1.2 Il motore centrale degli AGN

La comprensione teorica del meccanismo responsabile della produzione dell'intensa energia osservata sulle mappe che venivano prodotte dai satelliti, era di fondamentale importanza per poterli associare a singoli oggetti celesti. Nella tesi si prenderà in considerazione soltanto una particolare classe di emettitori di raggi γ , gli AGN, per i quali è possibile osservare anche un'emissione nella banda spettrale dei raggi X e del radio. Sebbene non tutti gli AGN siano rilevabili fino alle energie dei raggi γ , le sorgenti più brillanti sono associate ad una intensa emissione radio. Volendo quindi classificare sorgenti γ si devono cercare necessariamente le controparti tra le sorgenti radio.

Nel caso degli AGN, l'energia rilasciata sotto forma di radiazione γ illumina il

resto della galassia che ospita l'oggetto responsabile di tali emissioni intense. Inizialmente Salpeter mostrò che l'energia osservata poteva essere pensata come la trasformazione dell'energia potenziale del materiale che precipita sul buco nero centrale, in energia cinetica e successivamente riconvertita in energia termica, magnetica e, per finire, in radiazione (Salpeter, 1964).

Attualmente si conviene sull'esistenza di un disco caldo di accrescimento che circonda un buco nero super massiccio, sul quale cade il gas ultrarelativistico proveniente dalla materia interstellare che genera così delle emissioni molto intense e osservabili a distanze cosmologiche.

Una classe particolare di Nuclei Galattici Attivi sono i QUASAR, considerati una delle luci dell'Universo più giovane perché si osservano a redshift importanti. Per questa ragione sono tenuti in grande considerazione e vengono studiati come sorgenti di informazioni sulle origini del Cosmo.

Una particolarità di questa classe di galassie è la forte variabilità nello spettro osservato, che pone dei limiti sulla dimensione fisica della regione in cui la radiazione viene prodotta. Nel corso degli anni, dalla scoperta della prima galassia attiva, si è tentata una classificazione di tali oggetti secondo lo spettro che veniva prodotto. Tuttavia, la comunità scientifica si rese conto che lo sforzo di schematizzare questo tipo di galassie a volte era ambiguo. Un altro motivo per cui la suddivisione delle galassie attive in sottoclassi differenti appariva fuorviante, era l'identificazione di un principio comune all'origine della loro radiazione. Per tali ragioni si giunse ad un nuovo modello che descrivesse queste sorgenti.

1.3 Modello unificato

Inizialmente la distinzione e la successiva classificazione di questi oggetti avveniva valutando la presenza di righe di emissione larghe oppure strette nello spettro che si otteneva nei diversi casi. Questo metodo fu introdotto per distinguere galassie di Seyfert del tipo 1 e del tipo 2 (Khachikyan and Weedman, 1971), e questa classe di galassie attive è una delle più numerose insieme a quella dei quasar.

Questi oggetti si presentano nelle lunghezze d'onda del visibile come normali

galassie, ma rivelano delle caratteristiche particolari quando vengono indagate in altre bande spettrali, nelle quali sono dominate da un'intensa emissione nel nucleo, di luminosità pari a quella dell'intera galassia costituita dalle sue stelle.

A differenza dei quasar, le galassie di Seyfert sono generalmente più vicine, meno luminose e si può osservarne la galassia ospite. Una galassia di Seyfert di tipo 1 mostra delle righe di emissione molto larghe in aggiunta ad alcune righe strette. Queste ultime righe sono comunque più larghe di quelle che si osservano nelle galassie che non mostrano attività nucleare così intensa. Invece, una galassia di tipo 2 è caratterizzata esclusivamente dalla presenza di righe strette.

Nonostante le due classi sembrino molto diverse, in alcuni casi la classificazione in galassia di Seyfert 2 è stata usata soltanto perché non era possibile osservare le righe allargate, e per questa ragione si cominciò a pensare di essere in presenza dello stesso tipo di oggetto visto sotto una diversa angolazione. Infatti le righe allargate sono tipiche di oggetti che mostrano lungo la linea di vista il loro nucleo, mentre nel caso delle Seyfert di tipo 2 probabilmente il disco di polveri e idrogeno neutro che circonda il nucleo centrale, tende ad assorbire tali righe di emissione impedendone la rivelazione.

L'impressionante somiglianza nelle righe di emissione, nel continuo non termico e nella variabilità delle diverse sottoclassi di AGN portò a supporre che le differenze osservate potessero essere attribuite piuttosto ad effetti di orientazione che non a differenze intrinseche.

Questa idea si originò dal fatto che oggetti radio-loud e radio-quiet avevano proprietà spettrali ottiche indistinguibili e dal fatto ulteriore che coinvolgeva alcune Seyfert di tipo 2, le quali, se osservate in luce polarizzata, mostravano righe di emissione allargate simili alle Seyfert di tipo 1 (Antonucci, 1993), Fig. 1.1 e 1.2.

Questi fatti suggerivano la somiglianza intrinseca tra le due sottoclassi, manifestando così la condivisione dello stesso motore centrale e, in seconda battuta, anche una morfologia simile.

Altre classi di Nuclei Galattici Attivi sono i quasar come appena accennato; questi oggetti sono più distanti delle galassie di Seyfert e hanno una luminosità nucleare che supera anche di un fattore 100 quella dell'intera ga-

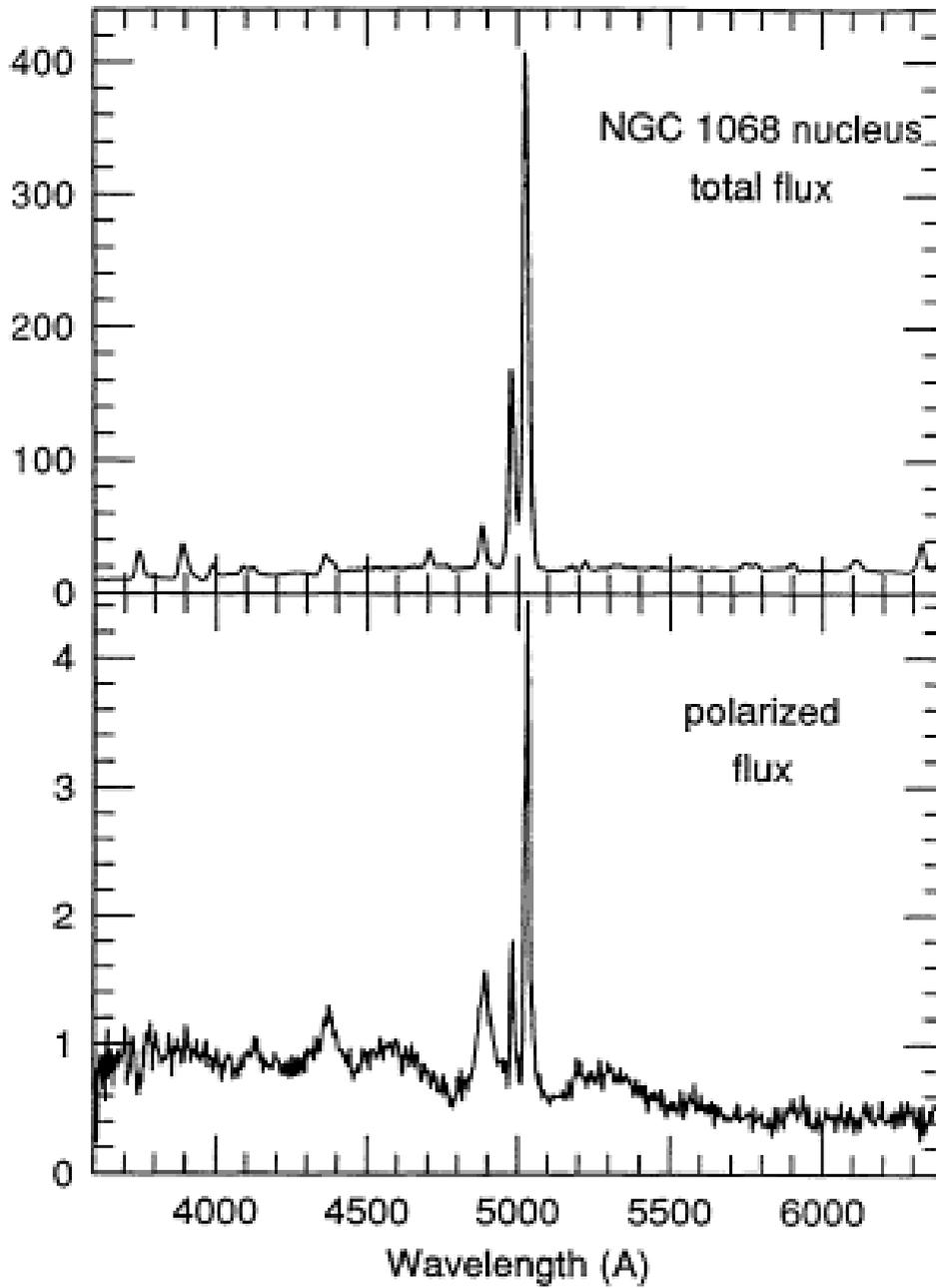


Figura 1.1: Il flusso totale dello spettro (alto) indica una classificazione come Seyfert 2, mentre il flusso polarizzato (basso) è indistinguibile da quello di una Seyfert 1, (Antonucci, 1993).

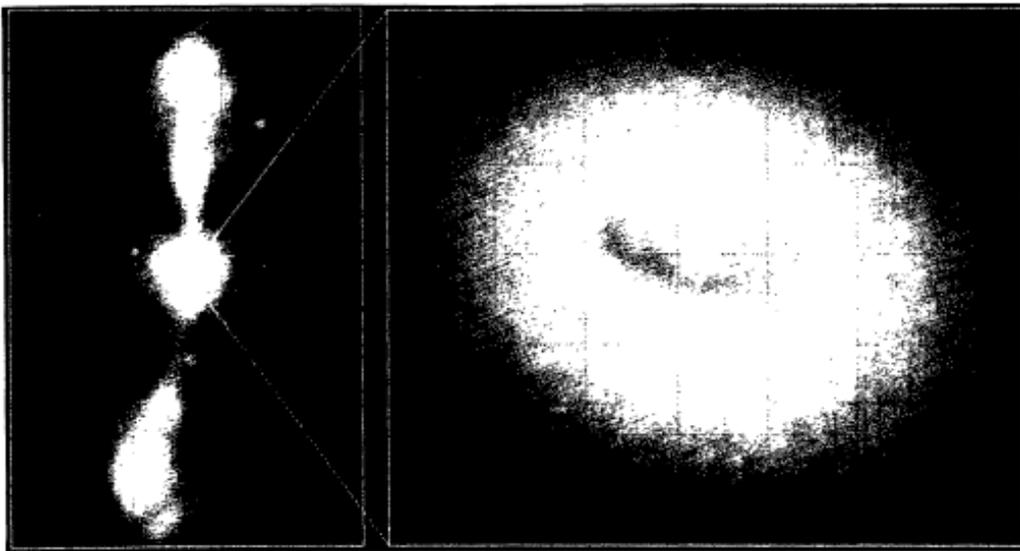


Figura 1.2: (Sinistra) Immagine di NGC 4261 tratta dal lavoro di Antonucci (1993) composta dal getto radio e dalla galassia ottica come osservata da terra a sinistra. (Destra) l'immagine in banda ottica ad alta risoluzione del nucleo mostra un toro di polveri il cui asse di simmetria appare compatibile con la direzione di propagazione dei getti. Immagine di Hubble Space Telescope dal lavoro di Jaffe et al. (1993).

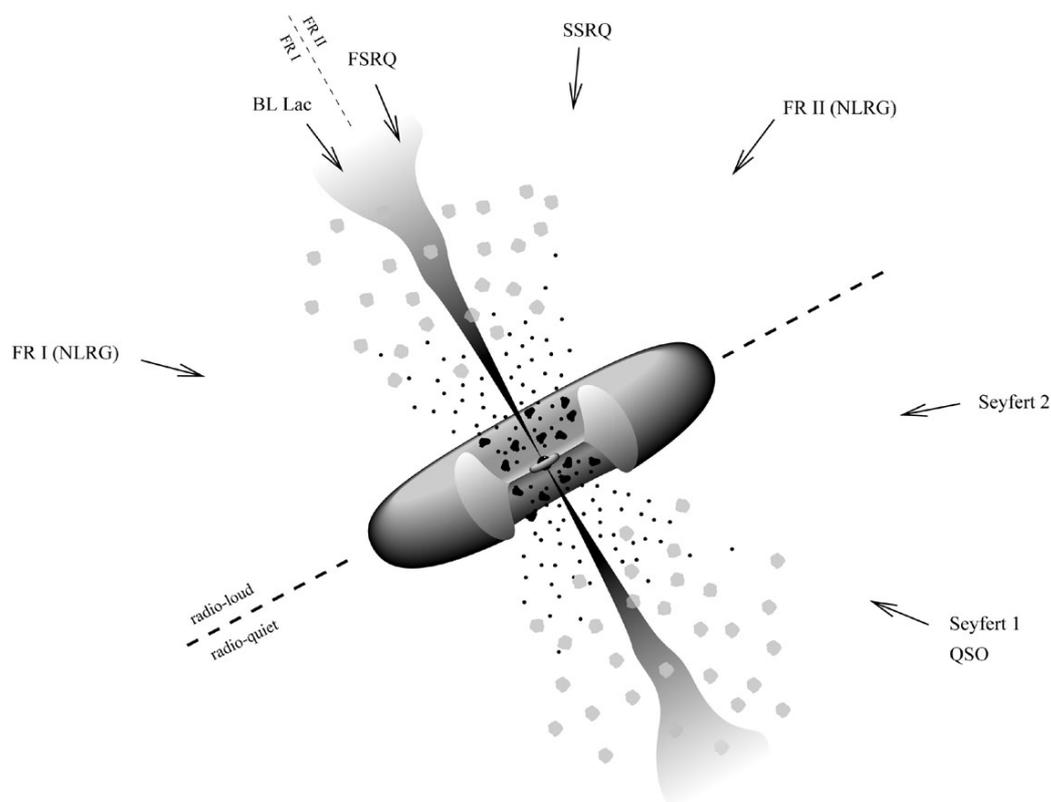


Figura 1.3: Schema della classificazione delle Galassie Attive, (crediti : <http://goo.gl/LvpIwi>)

lassia che, in questo tipo di oggetti, non è risolta. Nonostante siano stati identificati per la prima volta grazie alla loro emissione radio, solo una piccola percentuale di essi emette una frazione sostanziale di energia nel radio, mentre nella maggior parte l'energia emessa nel radio è trascurabile rispetto a quella irraggiata ad altre frequenze.

La classe di AGN più 'violenti' sono i blazar, le cui emissioni si spingono fino alla banda spettrale del γ estremo.

L'interpretazione del modello unificato assume che, muovendoci verso l'esterno di queste particolari galassie, le caratteristiche comuni per un AGN sono la presenza di un buco nero centrale super massiccio ($M > 10^{8-9} M_{\odot}$); un disco di accrescimento sottile ma otticamente spesso attorno al nucleo centrale, che produce un continuo ottico e UV, al di sopra del quale si trovano nuvole di gas ionizzato che irraggiano e formano la regione da cui si

originano le righe allargate di emissione, e una popolazione di elettroni che diffondono la radiazione emessa dal disco per effetto Compton inverso, emettendo radiazione X. Tutto questo sistema è circondato da un toro di polveri e gas molto opaco, responsabile dell'assorbimento della radiazione ottica che viene riemessa poi nell'infrarosso dallo stesso. Al di sopra del toro, infine, si scorgono delle nuvole di gas ionizzato che sono le sorgenti delle righe strette di emissione osservabili nelle lunghezze d'onda dell'ottico. Le emissioni alle lunghezze d'onda radio invece sono dovute alla radiazione di sincrotrone da parte di getti di particelle relativistiche che possono essere presenti o meno in alcuni oggetti di questa classe, Fig. 1.3.

Capitolo 2

Lockman Hole

2.1 Posizione e Scoperta

Il Lockman Hole è una regione di cielo, situata nella costellazione dell'Orsa Maggiore, quasi del tutto priva della contaminazione dovuta al mezzo interstellare e, per questa sua caratteristica, ideale per le osservazioni di galassie nell'Universo remoto, Fig. 2.1 e 2.2).

Le nuvole di idrogeno neutro presenti in ogni regione della Galassia, tendono a limitare la propagazione della radiazione a lunghezze d'onda UV e X, impedendo la vista di sorgenti lontane o troppo deboli. Tali nubi di idrogeno si concentrano maggiormente sul piano della Galassia.

Per questi motivi la regione sopracitata rappresenta una finestra trasparente per lo studio di oggetti molto lontani. Questa regione di cielo ha preso il nome dal suo scopritore Felix Lockman.

In Lockman et al. (1986) viene descritto lo studio a $\lambda = 21\text{cm}$ dell'area di cielo nord con la più bassa densità di idrogeno neutro. La regione di maggior interesse fu individuata attorno alle coordinate:

$$\alpha_{1950} = 10^h 45^m 00^s \qquad \delta_{1950} = +57^\circ 20' 00'' \qquad (2.1)$$

per cui era stato trovato un minimo nella densità di colonna di idrogeno con il seguente valore:

$$N_H = 5.9 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-2} \qquad (2.2)$$

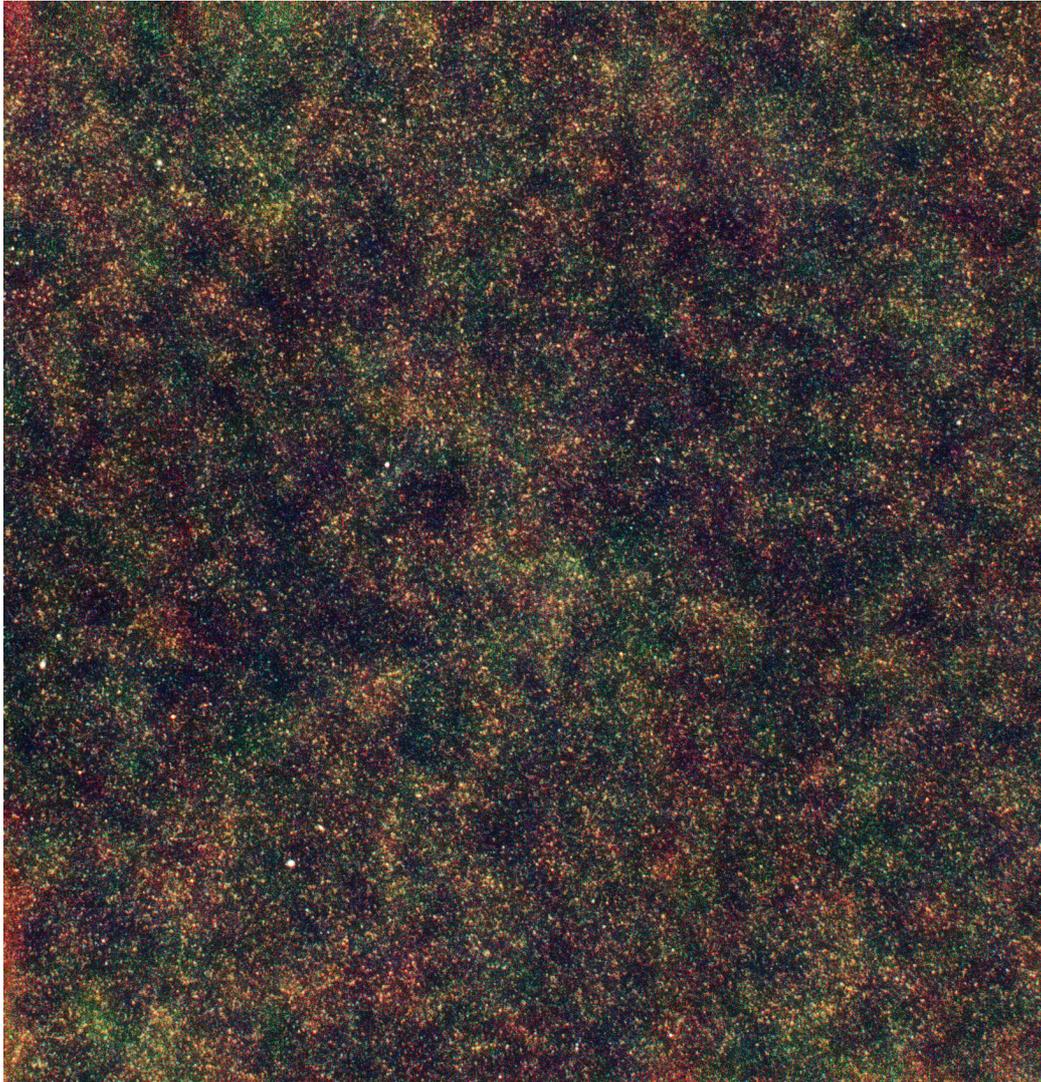


Figura 2.1: Vista del telescopio W. Herschel (La Palma, Canarie) del Lockman Hole nelle lunghezze d'onda del visibile e dell'infrarosso, crediti: NASA Herschel, <http://goo.gl/wQd2Sl>

Inoltre i dati raccolti furono corretti per la radiazione diffusa.

Due dei propositi fissati da Lockman e dai suoi collaboratori erano quelli di scoprire altre zone poco dense del cielo per poter comprendere l'organizzazione del mezzo interstellare su scale molto piccole e la ricerca di altre direzioni che avessero una bassa quantità di idrogeno neutro rappresentanti delle finestre per l'osservazione di oggetti extragalattici (Lockman et al., 1986).

Le direzioni di minor densità di idrogeno furono ricavate dalla survey prodotta con l'antenna Crawford Hill del AT&T Bell Laboratories con una risoluzione di soli $3^\circ \times 2^\circ$.

Inizialmente identificarono come target le coordinate galattiche

$$l = 150^\circ \qquad b = 53^\circ \qquad (2.3)$$

e siccome si misurava una locale diminuzione nella colonna di idrogeno, gli autori dell'articolo si riferirono ad esso come 'The Hole'.

I dati relativi a $\lambda = 21\text{cm}$ furono raccolti nell'Aprile del 1984 con il radiotelescopio di 43m del NRAO in West Virginia.

Nelle conclusioni di questo articolo gli autori erano ragionevolmente convinti che non potessero esistere altre zone con una densità più bassa del limite che avevano trovato di

$$N_H = 5.9 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-2} \qquad (2.4)$$

e che il mezzo interstellare era opaco ($\tau > 2$) alla radiazione extragalattica con energia tra $14 \div 100\text{eV}$.

2.2 Assorbimento di radiazione

Le interazioni tra materia e radiazione sono di diversa natura a seconda della banda energetica considerata e delle caratteristiche del mezzo in questione.

Il mezzo interstellare è maggiormente concentrato sul piano della Galassia ed è composto da una mistura di gas, il cui costituente principale è idrogeno neutro, e polveri.

Il mezzo interstellare è legato al ciclo di vita delle stelle, infatti le stelle nascono in regioni in cui si presenta un addensamento di nubi molecolari, e

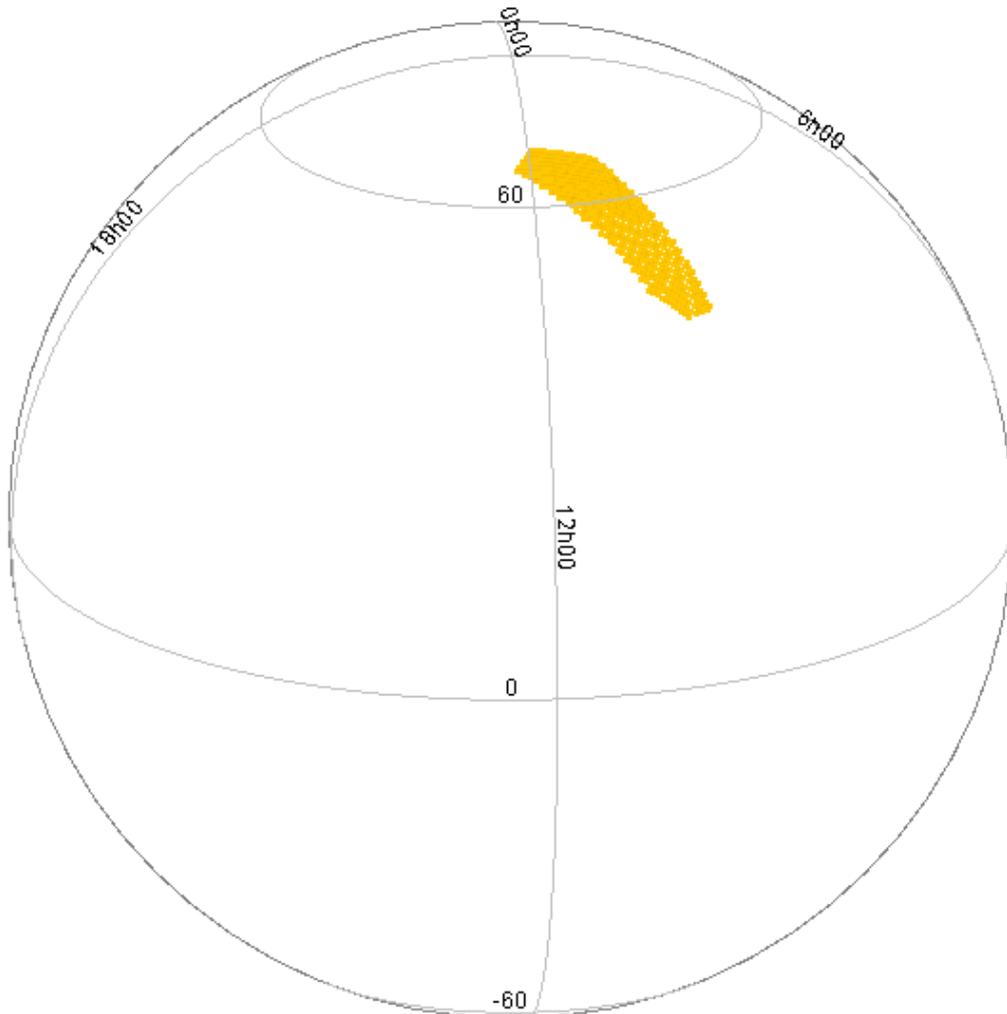


Figura 2.2: La regione del Lockman Hole in una mappa prodotta con il software Topcat

durante la loro fase iniziale ionizzano il gas presente producendo delle regioni HII. Così, ammassi di stelle giovani illuminano i resti delle nubi da cui si sono originate, dando luogo a nebulose a riflessione. Le stelle massicce terminando la loro evoluzione come eventi di supernovae, arricchiscono del loro materiale coronale il mezzo circostante e producono delle onde d'urto che comprimono il mezzo interstellare favorendo in questo modo una nuova fase di formazione stellare.

Gran parte della materia barionica dell'Universo, protoni, neutroni ed elet-

troni, è distribuita tra le stelle sotto forma di nubi gassose.

Quando si mescolano le polveri insieme al gas, si formano le cosiddette nubi molecolari, e queste nubi sono responsabili della diffusione della radiazione ottica che le investe. Per questa ragione si possono perdere le informazioni relative a sorgenti che si trovano lungo la linea di vista con le nubi di polveri e gas. La presenza del mezzo interstellare si può notare nelle lunghezze d'onda del visibile come delle fasce d'ombra proiettate sulla luce diffusa delle stelle della Galassia e l'effetto più forte si ha per la luce blu, mentre si attenua quando la radiazione è prossima al infrarosso.

Alle lunghezze d'onda dell'infrarosso, avviene il processo di riemissione della radiazione assorbita nell'ultravioletto, per cui le polveri diventano luminose e costituiscono uno sfondo omogeneo che ostacola l'osservazione delle sorgenti che si trovano al di là di esso.

I fotoni con una lunghezza d'onda inferiore o uguale a 912\AA invece, possono ionizzare l'idrogeno neutro presente nel loro cammino e, cedendo la loro energia alle particelle, vengono rimossi dal fascio di radiazione.

Poiché l'idrogeno tende a concentrarsi sul piano del disco galattico, lo spessore dello strato gassoso si assottiglia ad alte latitudini galattiche, per raggiungere un minimo in prossimità dei poli, anche se la concentrazione del gas in nubi può portare a fluttuazioni locali dello spessore. L'oscuramento della radiazione X può essere dovuto a processi intrinseci alla sorgente o indotto dal mezzo interstellare e intergalattico. In sostanza, le interazioni dei fotoni X, che portano ad assorbimento, possono essere descritte come uno scambio di energia tra fotoni ed elettroni. Il risultato di questo scambio dipende dall'energia del fotone incidente e dell'elettrone, e quindi anche dalla natura e densità del materiale assorbente. Quest'ultima è caratterizzata dal parametro di densità della colonna di idrogeno N_H , misurata in cm^{-2} , che esprime il numero di particelle che si trovano in un cilindro di base unitaria orientato lungo una determinata direzione.

Nel caso in cui l'energia del fotone, secondo l'ipotesi di Einstein, sia minore dell'energia di riposo dell'elettrone mc^2 , lo scattering tra le due particelle è di tipo elastico e non viene trasferita energia. Questo processo è il cosiddetto scattering di Thomson, e si può definire la profondità ottica del mezzo

attraverso

$$\tau_e = N_e \cdot \sigma_T \cdot l \quad (2.5)$$

dove N_e è la densità di elettroni in cm^{-3} , σ_T è la sezione d'urto di Thomson, ed l il libero cammino medio dell'elettrone. In questo regime di energia, il fotone può dissipare la sua energia nel processo fotoelettrico, nel quale viene assorbito da un elettrone legato ad un nucleo.

Il caso di un fotone X, invece, è differente per via della sua capacità di espellere un elettrone dal guscio più interno. Se poi l'energia del fotone supera l'energia a riposo dell'elettrone, interviene lo scattering Compton, nel cui processo l'elettrone può anche essere di valenza. Questo meccanismo diventa rilevante quando la profondità ottica del mezzo supera l'unità, e l'equazione sopra diventa:

$$N_H \cdot \sigma_T > 1 \quad (2.6)$$

cosa che si verifica quando:

$$N_H > 10^{24} \text{cm}^{-2} \quad (2.7)$$

Quindi lo spettro misurato, di una qualsiasi sorgente, è il risultato di scattering ripetuti di fotoni sugli elettroni.

In sostanza gli AGN con una grande densità della colonna di idrogeno lungo la linea di vista, $N_H > 10^{23} \text{cm}^{-2}$, possono risultare assenti nelle mappe X (nella banda energetica 0.5 – 2keV) a causa dell'assorbimento fotoelettrico. Invece sorgenti poste dietro colonne di idrogeno neutro con $N_H > 10^{24} \text{cm}^{-2}$, sono completamente assorbite per effetto dello scattering Compton.

Capitolo 3

Elaborazione dei dati

3.1 Calcolo della densità di HI

Sulla scorta del lavoro svolto da Lockman e collaboratori, si intende costruire una mappa dettagliata della densità di idrogeno nella regione del Lockman Hole, sulla base delle più recenti stime di densità di colonna, e confrontarla con la visibilità delle sorgenti extragalattiche situate in quella direzione. In tal senso consideriamo la tabella tratta dall'articolo di Lockman, Tab. 3.1, e allo scopo di incontrare meno idrogeno possibile e quindi di non essere limitati dal forte assorbimento dovuto al mezzo contenuto nella Galassia, ci soffermiamo soltanto sulla regione caratterizzata dal valore minore:

$$\alpha_{1950} = 10^h 45^m 00^s \qquad \delta_{1950} = +57^\circ 20' 00''$$

che come si vede dalla tabella, ha un valore di densità pari a $N_{HI} = 5.9 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-2}$. Nell'articolo originale, Lockman costruì un grafico bidimensionale, centrato nella regione che si è considerata anche in questa tesi, e studiò i valori dell'idrogeno nei dintorni, prendendo in considerazione un'apertura di 3° in declinazione e 4° in ascensione retta, Fig. 3.1.

Il primo passo per calcolare la densità di colonna dell'idrogeno nell'Hole è quello di correggere le coordinate selezionate per precessione, allo scopo di riportarle al sistema J2000 usando il portale 'NASA/IPAC EXTRAGALACTIC DATABASE' e precisamente servendosi dello strumento 'NED

l, b	α_{1950}	δ_{1950}	$\langle N_H \rangle (10^{19})\text{cm}^{-2}$
$0^\circ.0, +90^\circ.0$	$12^h 49^m 00^s$	$+27^\circ 24' 00''$	9.9
$56^\circ.0, +66^\circ.1$	$14^h 36^m 20^s$	$+34^\circ 08' 32''$	9.7
$85^\circ.6, +75^\circ.9$	$13^h 32^m 24^s$	$+38^\circ 08' 32''$	9.7
$100^\circ.7, +65^\circ.3$	$13^h 45^m 33^s$	$+49^\circ 33' 44''$	11.4
$133^\circ.3, -89^\circ.5$	$00^h 49^m 26^s$	$-26^\circ 52' 00''$	15.8
$150^\circ.5, +53^\circ.0$	$10^h 45^m 00^s$	$+57^\circ 20' 00''$	5.9
$160^\circ.0, +50^\circ.0$	$10^h 04^m 58^s$	$+53^\circ 53' 59''$	7.6
$182^\circ.0, +58^\circ.4$	$10^h 27^m 11^s$	$+39^\circ 10' 53''$	13.9
$199^\circ.8, +86^\circ.3$	$12^h 32^m 44^s$	$+28^\circ 10' 45''$	14.6

Tabella 3.1: Tabella delle coordinate delle regioni indagate e valori delle rispettive densità dell'idrogeno lungo la linea di vista (Lockman et al., 1986).

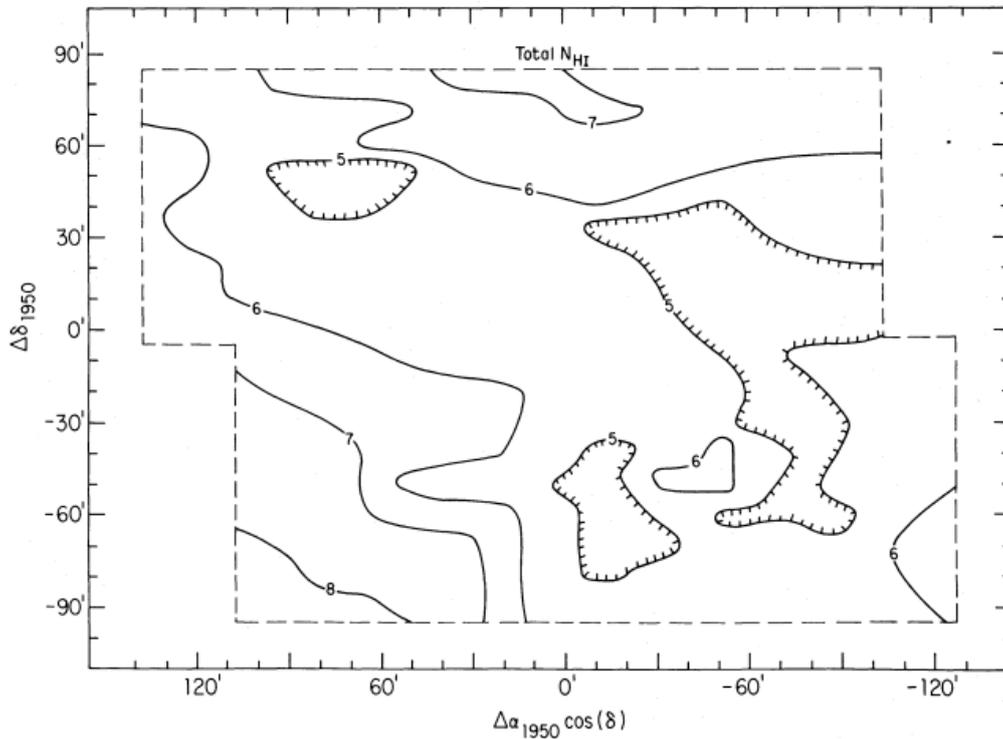


Figura 3.1: Mappa a curve di livello della densità dell'idrogeno nell'Hole tratto da Lockman (1986).

N_H
 Calculate the Total Galactic H I Column Density
 (Powered by [HEASoft](#))

Object Name or Coordinates:
 (e.g., Cyg X-1 or 101.295, -16.699 or 6 45 10.8, -16 41 58)

Name Resolver:

Coordinate System:

Equinox: (Only applies to Equatorial coordinates.)

Cone Radius: degrees

Map:

Figura 3.2: Dati di input per ‘NASA’s HEASARC tool’ per il calcolo della densità dell’idrogeno per un campo di $15^\circ \cdot 15^\circ$ attorno alle coordinate stabilite.

Coordinate & Extinction Calculator Results’. Le coordinate restituite dal procedimento sono le seguenti:

$$\alpha_{2000} = 10^h 48^m 06.40055^s \quad \delta_{2000} = +57^\circ 04' 09.0405'' \quad (3.1)$$

Per calcolare l’ammontare della colonna di idrogeno lungo la linea di vista in tali coordinate, si è usata una funzione nel sito ‘HEASARC’ della NASA, sotto la voce ‘nH column density: Determine neutral Hydrogen column density by target coordinates’, Fig. 3.2. Si è considerato un cono centrato nelle coordinate corrispondenti al valore di minima densità e di raggio 15° . All’interno di questo cono ogni punto ha un valore medio della densità dell’idrogeno calcolato in un’area di lato 0.675° . I valori si basano su misure di intensità della riga a $\lambda = 21$ cm dell’idrogeno neutro della Galassia.

La mappa dell’idrogeno di tutto il cielo è stata costruita unendo quella del cielo nord di Leiden e Dwingeloo, con quella del cielo sud dell’Istituto Argentino di Radioastronomia e questi dati sono stati corretti per la radiazione diffusa all’Istituto per la Radioastronomia dell’Università di Bonn, (Kalber-

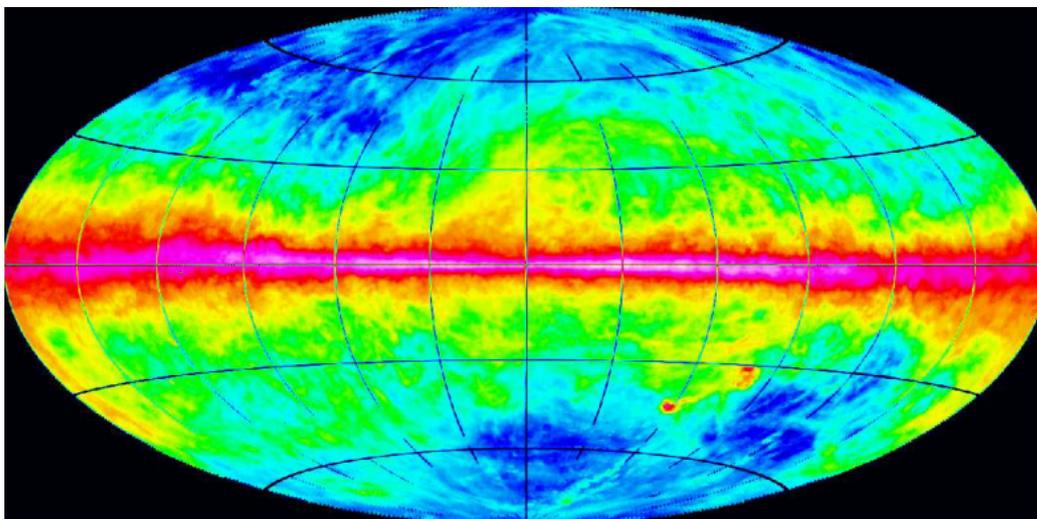


Figura 3.3: Emissione integrata di HI nell'intervallo di velocità tra $-400 < v < +400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ nella collezione di dati di Leiden-Argentine-Bonn (LAB). Immagine tratta da Kalberla et al. (2005)

la et al., 2005), Fig. 3.3. Oltre a questo catalogo, ne è presente un secondo a cui attingere i valori dell'idrogeno che si basa sul lavoro di Dickey & Lockman (1990).

In questa tesi ci serviremo dei risultati relativi al primo di questi due cataloghi perché più recente.

3.2 Compilazione dei grafici sulla densità

Grazie ai valori restituiti dal tool di 'HEASARC', si è potuto costruire un grafico tridimensionale sulla densità dell'idrogeno. Vengono qui descritti, nell'ordine, i passi che si sono resi necessari per la creazione di tale grafico:

- Estrazione dei valori della densità dell'idrogeno da 'HEASARC' e costruzione di una tabella leggibile da Gnuplot; in tale tabella vi sono due colonne relative alle coordinate celesti (AR DEC J2000), e due altre in cui vi sono la distanza e il valore della densità espressa attraverso le potenze di 10. Ogni colonna è stata separata attraverso il simbolo ';'.

- Costruzione delle linee di comando per il programma Gnuplot salvate con estensione '.plt'. In Appendice A è riportato il codice di programmazione, dove i segni di cancelletto (#) identificano righe di testo commentato che permettono di scrivere dei promemoria ignorati dal programma.
- Infine accedendo al programma Gnuplot, si richiama la directory in cui è stato salvato il file con estensione '.plt' attraverso il comando 'ChDir' e successivamente impartendo il comando load 'nome del file.plt' si ottiene il grafico.

Il risultato ottenuto attraverso questi passi è mostrato nelle due immagini in Fig. 3.4.

Nella prima di queste, è stata calcolata la distribuzione della densità dell'idrogeno usando il catalogo di Kalberla et al. (2005), mentre nella seconda si è usato il catalogo di Dickey e Lockman.

Come si può vedere, in prossimità delle coordinate considerate in questo lavoro, si osserva un vero e proprio imbuto. Tuttavia si notano delle differenze tra le stime dei due cataloghi imputabili ai diversi metodi usati per la determinazione della densità. Come già descritto, l'idrogeno è la componente più studiata del mezzo interstellare per la sua caratteristica di permeare in maniera diffusa tutto l'ambiente Galattico. Ecco perché la riga $\lambda = 21\text{cm}$ è un tracciante così importante. Nessuna regione del cielo infatti è totalmente priva di questo elemento.

3.3 Confronto delle bande spettrali X, radio, γ

Un ulteriore passo per giungere all'associazione tra una sorgente γ e la relativa controparte ottica, è quello di selezionare le regioni del campo con una densità tale che:

$$N_H < 9 \cdot 10^{19} \text{cm}^{-2} \quad (3.2)$$

Queste regioni, caratterizzate da un modesto assorbimento, verranno confrontate con il 'Fermi LAT second source catalog' (2FGL - Nolan et al.,

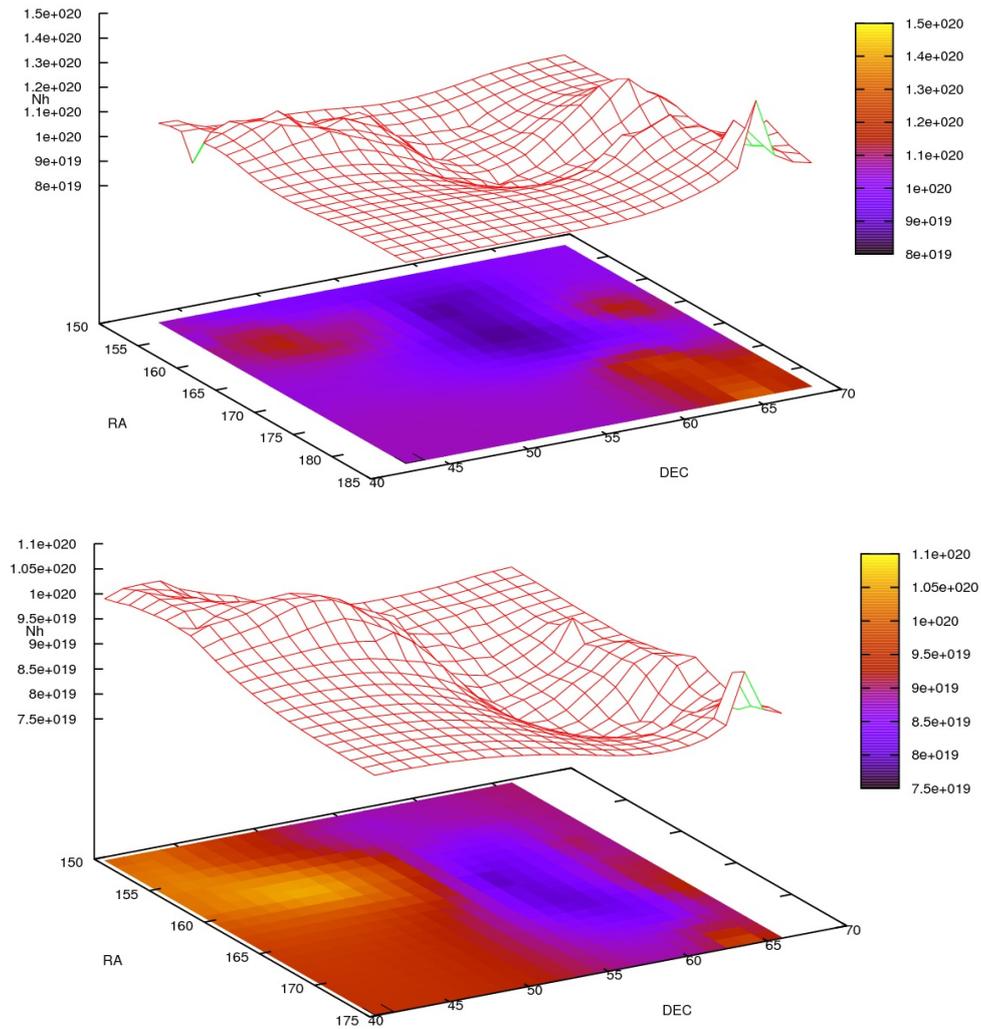


Figura 3.4: Densità di idrogeno per un campo di 15° di raggio calcolata con la mappa di Leiden Argentine Bonn (alto) e con la mappa di Dickey&Lockman (basso) in NASA's HEASARC tool

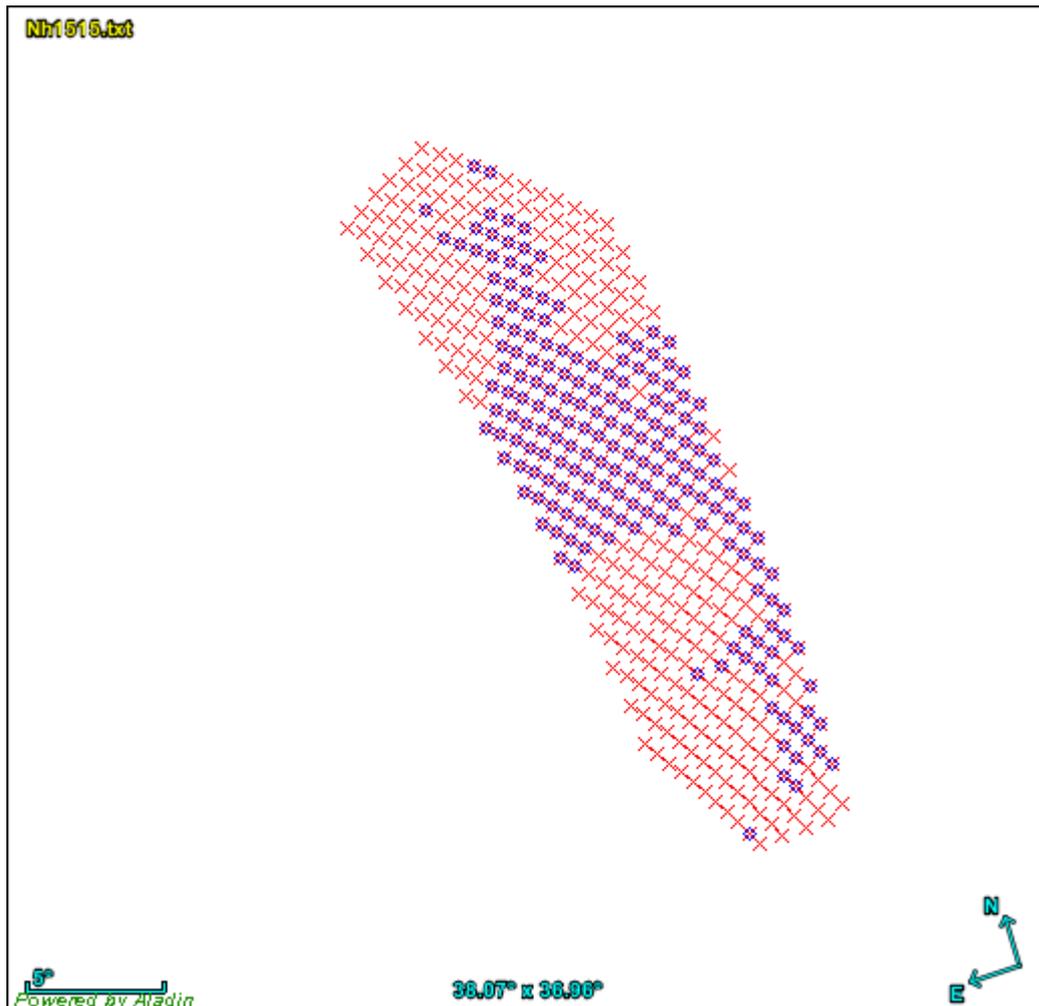


Figura 3.5: Campo del Lockman Hole con l'indicazione dei punti per i quali si rileva $N_H < 9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$

2012) che contiene una mappa delle sorgenti γ scoperte da Large Area Telescope (LAT) durante il lavoro di 24 mesi a cominciare dal 4 Agosto 2008 (15:43UTC) per terminare l'1 Agosto 2010 (01:17 UTC).

Per ogni arrivo di un fotone energetico nella banda $20\text{MeV} \div 300\text{GeV}$, LAT misura il tempo di arrivo, la direzione e l'energia. Le fasi di rivelazione e identificazione sono: l'identificazione di potenziali sorgenti denominate 'semi', la creazione di una ottimizzazione del modello di raggi gamma del cielo, ed infine la creazione di un 'residual test statistic' (TS). Questo parametro è di grande importanza nel rilevamento delle possibili sorgenti γ rispetto al rumore dovuto alla strumentazione o all'emissione diffusa. Viene definito come:

$$TS = 2\Delta \log_{10} L \quad (3.3)$$

dove L è la funzione di verosimiglianza che quantifica quanto sensibilmente una sorgente emerge dal background. Diremo di essere quindi in presenza di una sorgente γ reale quando questo parametro assume valori più grandi di 25. Nell'articolo di Nolan et al. (2012) viene fatta una distinzione netta tra 'associazione' e 'saldi identificazione' della sorgente γ con la controparte ottica. Rispetto al primo catalogo Fermi, sono 127 le sorgenti identificate di 1873 scoperte (Nolan et al., 2012).

In Tab. 3.2, tratta da Nolan et al. (2012), compaiono il numero di sorgenti identificate ed il tipo di oggetti cui sono associate.

Description	Identified		Associated	
	Designator	Number	Designator	Number
Pulsar, identified by pulsations	PSR	83	...	...
Pulsar, no pulsations seen in LAT yet	...	...	psr	25
Pulsar wind nebula	PWN	3	pwn	0
Supernova remnant	SNR	6	snr	4
Supernova remnant/pulsar wind nebula	...	...	†	58
Globular cluster	GLC	0	glc	11
High-mass binary	HMB	4	hmb	0
Nova	NOV	1	nov	0
BL Lac object type of blazar	BZB	7	bzb	429
FSRQ type of blazar	BZQ	17	bzq	353
Non-blazar active galaxy	AGN	1	agn	10
Radio galaxy	RDG	2	rdg	10
Seyfert galaxy	SEY	1	sey	5
Active galaxy of uncertain type	AGU	0	agu	257
Normal galaxy (or part)	GAL	2	gal	4
Starburst galaxy	SBG	0	sbg	4
Class uncertain	...	...	...	1
Unassociated	...	...	...	575
Total	...	127	...	1746

Tabella 3.2: Tabella da Nolan et al. (2012). Numero e tipo di sorgenti γ identificate alla controparte ottica nel catalogo 2FGL.

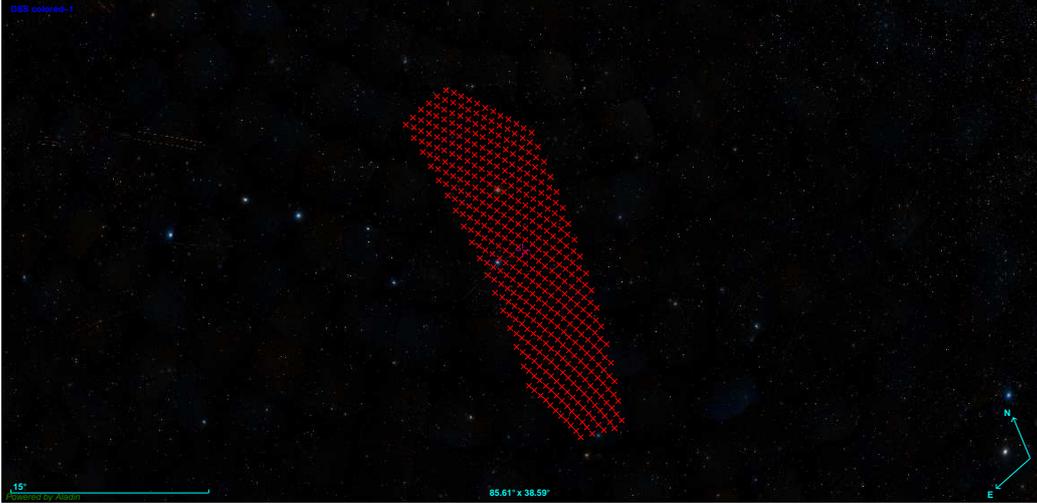


Figura 3.6: Campo $15^\circ \cdot 15^\circ$ del Lockman Hole sovrapposto alla Digitized Sky Survey. La dimensione del campo inquadrato è $85^\circ \cdot 38^\circ$.

Applicando il criterio riportato in Eq. 3.2 al campo del Lockman Hole, si ottiene una regione con le caratteristiche illustrate in, Fig. 3.5.

Salvando questi dati come un file `.txt` è possibile tramite Aladin vedere l'area interessata, sovrapposta eventualmente alla carta Digitized Sky Surveys (DSS) come si vede in Fig. 3.6.

Ora, caricando il catalogo 2FGL tramite il comando `File ↦ Load catalog ↦ VizieR`, si possono vedere le sorgenti γ che esistono all'interno della regione di interesse. Useremo tuttavia l'intero campo di 15° quadrati per aumentare la possibilità di osservare sorgenti in questa regione di cielo (Fig. 3.7). Nel catalogo vengono identificate le sorgenti con energia compresa nell'intervallo tra $100\text{MeV} \div 100\text{GeV}$ attraverso il loro flusso medio. La distribuzione spettrale di energia viene rappresentata in modo diverso, a seconda delle proprietà della sorgente: le pulsar sono modellate da uno spettro a legge di potenza tagliato esponenzialmente; altri oggetti sono riprodotti da una parabola logaritmica se è identificata statisticamente una curvatura, altri ancora hanno una semplice legge di potenza. Dopo aver calcolato la massima verosimiglianza, la soglia per l'inclusione è il test di probabilità statistica

$$TS > 25 \tag{3.4}$$

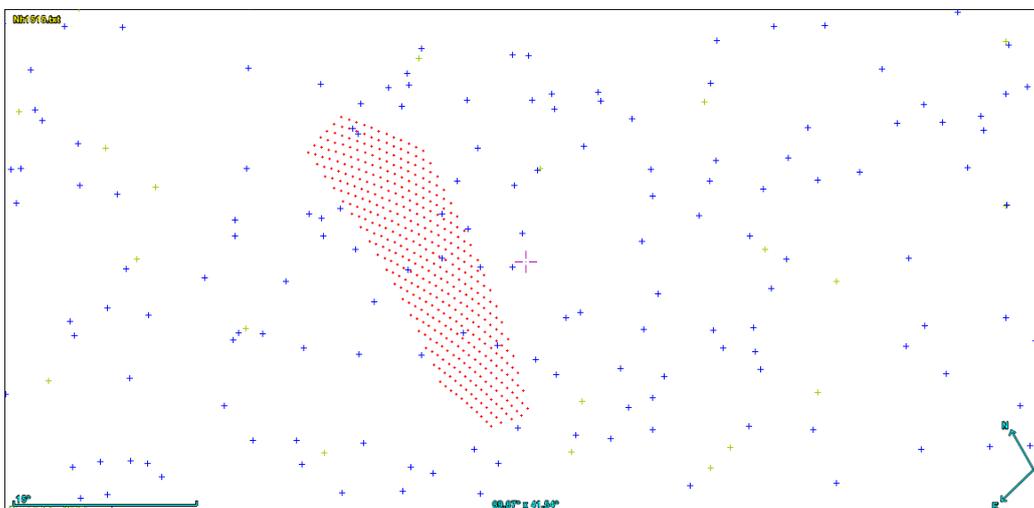


Figura 3.7: Sorgenti γ del catalogo 2FGL sovrapposte all'area del Lockman Hole. Le posizioni delle sorgenti γ sono indicate da una croce blu

Il catalogo 2FGL è diverso dagli altri per il fatto che, attraverso la funzione di probabilità, vengono misurati i picchi di intensità della radiazione γ in una determinata area del cielo. A causa della limitata risoluzione angolare del rivelatore, questi non sono sempre esattamente centrati sulla posizione effettiva della sorgente. Per questa ragione quando si individua un picco, seppur debole, viene aggiunta una candidata sorgente. Nel caso in cui questa associazione porti ad un aumento della funzione di probabilità, allora si può pensare di essere in presenza di una sorgente reale che si sovrappone all'emissione di fondo dovuta ad altri meccanismi.

Questo procedimento non ammette un unico flusso limite per l'identificazione delle sorgenti perché la sensibilità dipende dalla forma dello spettro della sorgente e dalla luminosità del fondo di emissione diffusa. L'associazione automatica tra diverse lunghezze d'onda, ad esempio, è operata tramite il confronto del catalogo 2FGL con altri cataloghi di sorgenti che emettono nella banda energetica del GeV. Delle 1873 sorgenti scoperte dal progetto Fermi, 575 sono rimaste non associate e un fatto interessante è dato dalla loro particolare distribuzione rispetto al piano Galattico. Il numero di sorgenti γ non associate ad una controparte ottica decresce con l'aumentare della latitudine Galattica e tale risultato si vede molto chiaramente in Fig. 3.8. Uno dei motivi per cui ciò accade è che lo sfondo della Galassia è brillante sia nel

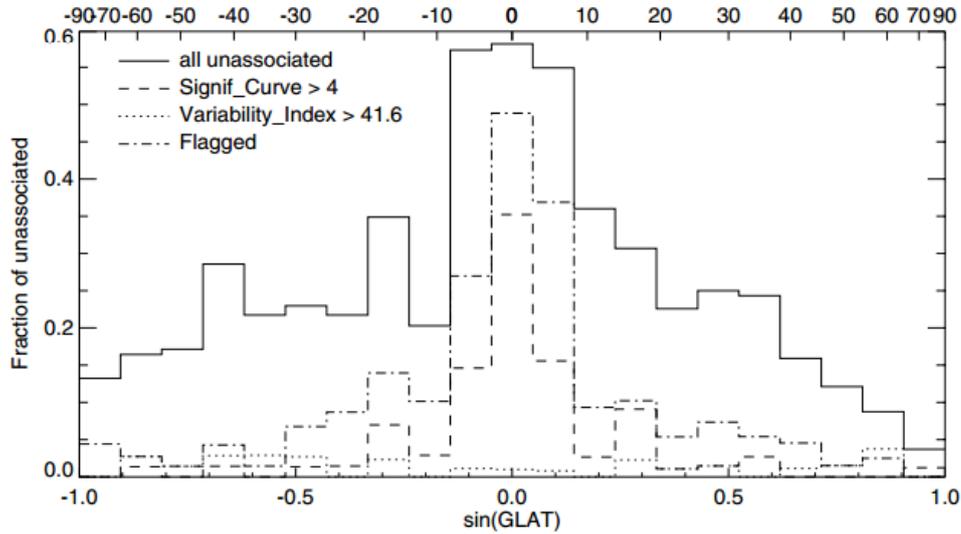


Figura 3.8: Conteggi delle sorgenti non associate ad una controparte ottica in funzione della latitudine galattica (Nolan et al., 2012)

radio, a causa dell'idrogeno del disco, sia nel γ , per l'elevata concentrazione di sorgenti galattiche e di processi di interazione fra raggi cosmici e mezzo interstellare. A questo si aggiunge l'estinzione della radiazione a bassa energia, che impedisce di vedere le controparti ottiche pregiudicando una semplice associazione.

Come sorgente di dati X dell'intero cielo si è usato il catalogo ROSAT, formato da una collezione di survey. Questo catalogo offre un'efficace insieme di dati per la generazione di grandi campioni di diversi oggetti astrofisici quali le galassie attive, gli ammassi di galassie, le binarie interagenti compatte, le corone stellari attive, usando il maggior potere risolutivo delle osservazioni nei raggi X. Inoltre per il fatto che viene coperta una grandissima area del cielo dalla survey, il ROSAT è una risorsa importante per studiare la grande varietà delle sorgenti di raggi X e per identificare tipi di sorgenti rare.

Volendo associare le sorgenti γ alle controparti nella banda spettrale X nel Hole, si è sovrapposto quest'ultimo catalogo X al precedente attraverso il software Aladin. Il risultato che si è ottenuto è illustrato in Fig. 3.9.

Infine l'ultima associazione che si vuole fare è quella con la banda spettrale radio, per la quale si è usato il catalogo 'NVSS' Condon et al., (1998). La NRAO VLA Sky Survey copre un'area di cielo a nord della declinazione

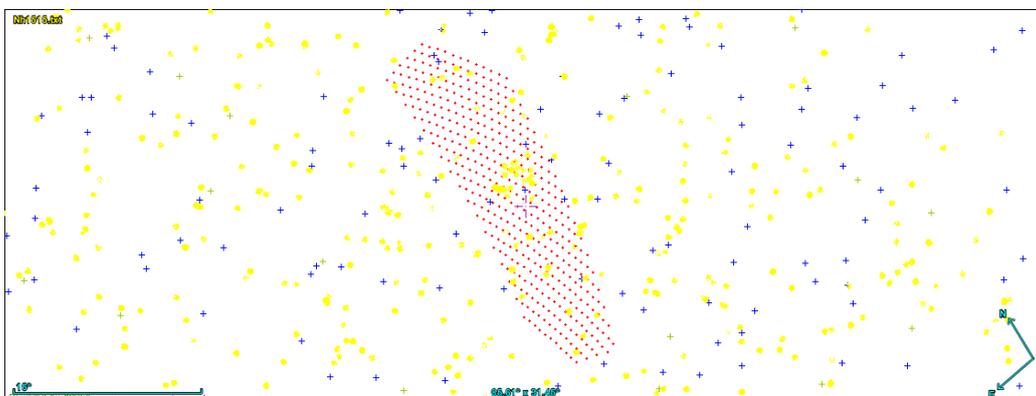


Figura 3.9: Sovrapposizione catalogo 2FGL (croci blu) e ROSAT (punti gialli), rispettivamente per le sorgenti γ e X nel Lockman Hole (area rossa).

$\delta = -40^\circ$ a 1.4GHz. Le immagini del catalogo sono insensibili a strutture radio smussate molto più grandi di parecchi minuti d'arco in entrambe le coordinate che sono normalmente dovute all'emissione diffusa di sincrotrone dalla Galassia oppure alla radiazione di fondo cosmico nelle microonde a 3K. In Fig. 3.10 si vede la sovrapposizione nelle tre bande energetiche differenti: X, radio, γ .

L'ultimo passaggio per arrivare a identificare le sorgenti ottiche associate alla controparte X, radio, γ è quello di combinare i diversi cataloghi, precisamente procedendo con i due più densi il ROSAT e l'NVSS, per poi incrociare il risultato ottenuto con il catalogo 2FGL.

Per questa operazione è stato usato il programma Topcat perché offre la possibilità di effettuare la sovrapposizione rispetto ad un'area ristretta e non sull'intero cielo, diminuendo in tal modo i tempi di esecuzione del calcolo.

Per studiare l'influenza del mezzo interstellare della Galassia sulla possibilità di associare sorgenti γ a diverse controparti, abbiamo esteso l'area della nostra analisi ad un quadrato di 30° di apertura, centrato sulla zona di minima densità della colonna di idrogeno.

I risultati ottenuti confrontando i cataloghi ROSAT ed NVSS con 2FGL sono stati confrontati con un altro catalogo, Atlas of Radio/X-ray associations (ARXA). Quest'ultimo è un catalogo di tutte le associazioni note tra sorgenti X e radio. Le sorgenti X provengono dai cataloghi XMM-Newton, Chandra e ROSAT, mentre le sorgenti radio vengono da NVSS, FIRST e SUMSS. Le

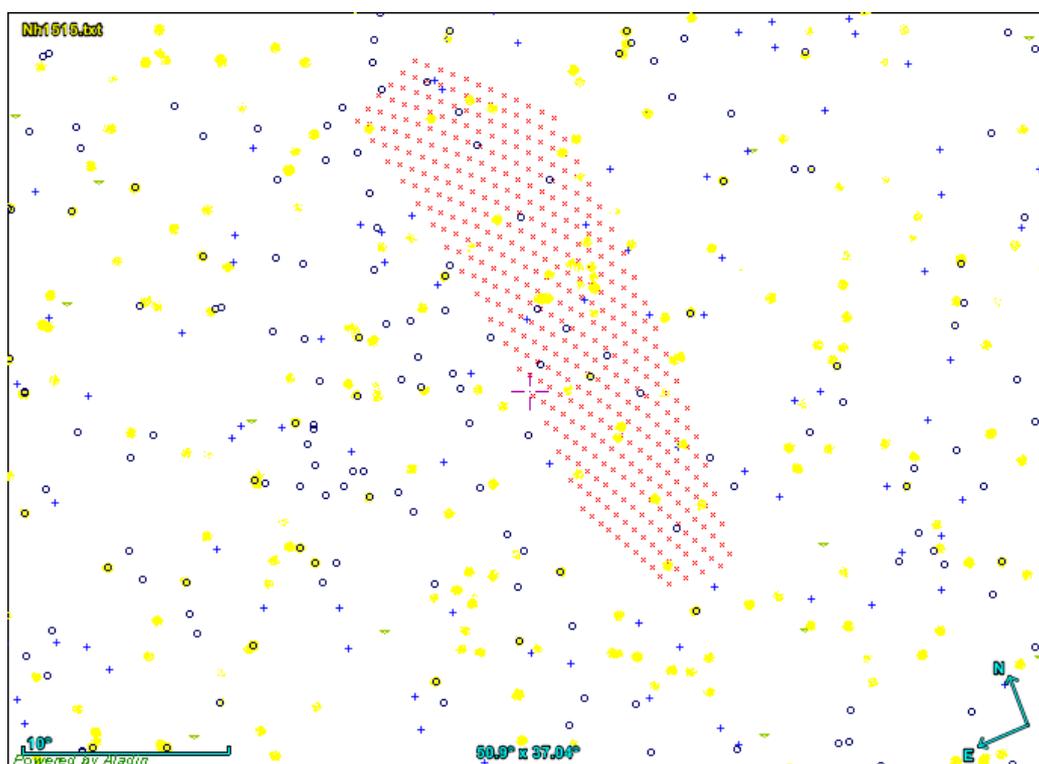


Figura 3.10: Sovrapposizione tra il catalogo 2FGL (croci blu), ROSAT (punti gialli) e NVSS (cerchi neri)

	RA	DE	2FGL	TS1	TS2	TS3
1	110.476	71.35	J0721.9+7120	38.5	65.5	64.2
2	115.652	54.713	J0742.6+5442	10.6	14.4	17.0
3	121.387	61.755	J0805.5+6145	9.5	13.0	6.8
4	122.46	52.308	J0809.8+5218	5.3	7.6	14.2
5	124.573	42.398	J0818.2+4223	15.8	27.6	32.4
6	140.236	44.697	J0920.9+4441	30.9	49.8	38.7
7	149.433	55.382	J0957.7+5522	16.8	39.6	45.4
8	153.788	49.432	J1015.1+4925	9.3	22.6	33.4
9	158.484	60.835	J1033.9+6050	14.2	27.2	26.0
10	162.087	71.738	J1048.3+7144	5.8	11.8	17.1
11	164.666	56.48	J1058.6+5628	9.5	19.4	24.9
12	166.12	38.213	J1104.4+3812	28.8	59.0	71.2
13	176.737	40.006	J1146.9+4000	8.4	14.7	13.2
14	182.215	54.691	J1208.8+5441	10.9	15.9	15.3
15	193.276	53.047	J1253.1+5302	5.9	16.5	18.6
16	198.212	48.472	J1312.8+4828	19.1	40.4	37.4
17	206.371	44.897	J1345.4+4453	10.4	18.1	12.4

Tabella 3.3: Tabella ottenuta tramite Topcat sulle associazioni tra sorgenti che hanno emissioni X, radio e gamma per un campo di raggio 30° centrato nel Lockman Hole.

associazioni alla controparte ottica catalogate sono quelle con una probabilità più alta del 40%. Per ogni oggetto ottico è stata calcolata la probabilità di essere un Quasi Stellar Object (QSO), una galassia, una stella, o un'erronea associazione X-radio ed indicata la fonte dell'associazione (Flesch, 2010).

L'incrocio con il catalogo 2FGL è stato ripetuto con il catalogo ARXA e sono state trovate 105 associazioni X radio γ . In Tab. 3.3 sono riportati soltanto gli oggetti con un valore di test statistico (TS) più grande di 20, o di poco inferiore. Quando infatti il TS è maggiore di 20 si è ragionevolmente sicuri di non incorrere in sorgenti non reali o in associazioni non corrette.

Si è quindi selezionata una famiglia di 17 oggetti nell'area di 30° di raggio centrata nel Lockman Hole, e per queste si sono studiate le identificazioni come catalogate nel database astronomico Simbad per avere un'informazione sulla tipologia di oggetti dominanti il campo considerato.

La tabella 3.4 riassume le denominazioni 2FGL degli oggetti presenti nel

	RA	DE	2FGL	type object
1	110.476	71.35	J0721.9+7120	BL Lac
2	115.652	54.713	J0742.6+5442	Quasar
3	121.387	61.755	J0805.5+6145	Quasar
4	122.46	52.308	J0809.8+5218	BL Lac
5	124.573	42.398	J0818.2+4223	BL Lac
6	140.236	44.697	J0920.9+4441	Quasar
7	149.433	55.382	J0957.7+5522	Quasar
8	153.788	49.432	J1015.1+4925	BL Lac
9	158.484	60.835	J1033.9+6050	Seyfert 1
10	162.087	71.738	J1048.3+7144	Quasar
11	164.666	56.48	J1058.6+5628	BL Lac
12	166.12	38.213	J1104.4+3812	BL Lac
13	176.737	40.006	J1146.9+4000	Quasar
14	182.215	54.691	J1208.8+5441	Quasar
15	193.276	53.047	J1253.1+5302	BL Lac
16	198.212	48.472	J1312.8+4828	Quasar
17	206.371	44.897	J1345.4+4453	Quasar

Tabella 3.4: Tabella relativa all'identificazione delle sorgenti γ della Tab. 3.3

campo ed il grado di significatività della loro identificazione.

La Fig. 3.11 mostra la raccolta delle controparti ottiche relative alle sorgenti identificate nella Tab. 3.3. La classe più numerosa risulta essere quella dei Quasar (quasi stellar radio source), oggetti caratterizzati da tipiche luminosità: $L \sim 10^{13}L_{\odot}$, corrispondenti a centinaia di galassie, e da redshift: $0.056 \leq z \leq 7.085$. La seconda classe più numerosa è quella dei BL Lacertae, che, assieme ai quasar γ emittenti costituiscono la famiglia dei blazar e sono tra gli oggetti più luminosi dell'Universo. Lo spettro di questi oggetti è continuo, in molti casi senza righe di assorbimento o emissione, subisce rapide variazioni di luminosità e la radiazione emessa è polarizzata. I getti relativistici di plasma che escono perpendicolarmente da questi oggetti, sono allineati lungo la linea di vista con la Terra e fanno sì che la luminosità osservata sia accentuata da un effetto di collimazione relativistica. Il principale meccanismo di emissione è la radiazione di sincrotrone, dovuta alle particelle cariche che interagiscono con il campo magnetico generato dal buco nero su-

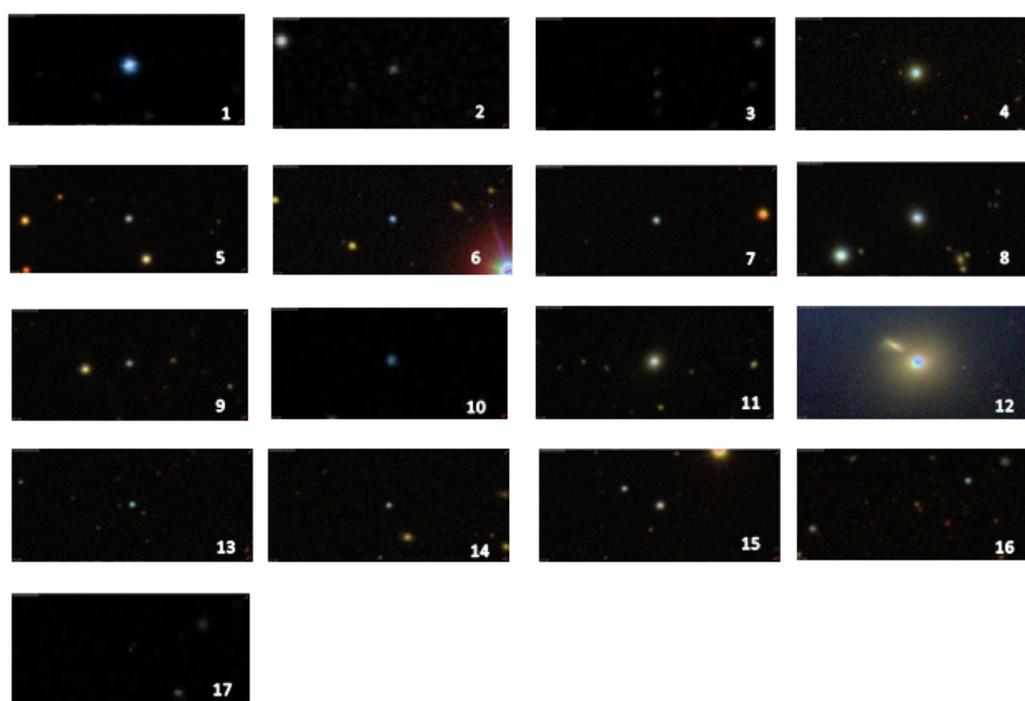


Figura 3.11: Raccolta delle controparti ottiche delle sorgenti identificate nella Tab. 3.3, estratte da Simbad.

permassiccio. A causa dell'effetto Compton inverso con le particelle presenti nel getto, l'energia dei fotoni può essere incrementata fino a valori dell'ordine del TeV, come dimostrato da diversi strumenti sensibili alle altissime energie.

3.4 Conteggi di sorgenti nel Lockman Hole

Un'informazione molto utile è quella del conteggio di sorgenti in funzione della distanza dalle coordinate di minima densità della colonna dell'idrogeno considerate all'inizio di questa tesi. In tal senso si vuole mostrare come, a seconda della banda spettrale di emissione, possono esistere dei fenomeni di assorbimento che non permettono di rilevare sorgenti troppo deboli.

Cercheremo di mostrare attraverso un grafico che le sorgenti nella banda spettrale del γ non subiscono fenomeni di assorbimento e il conteggio delle sorgenti non è influenzato dalla densità del mezzo interstellare. Per quanto riguarda gli oggetti che emettono nel soft-X invece, il fenomeno dell'assorbimento dovuto all'idrogeno neutro è molto intenso e per questa ragione il grafico dovrebbe mostrare un aumento del numero di sorgenti in corrispondenza del minimo della densità di idrogeno, dimostrando in seconda analisi il vantaggio che offre questa particolare, e pressoché unica, condizione fisica del Lockman Hole.

Per realizzare questi due grafici, si è usato inizialmente Topcat per estrarre i due cataloghi significativi ai fini della verifica sopra descritta, 2FGL e ROSAT, attraverso i seguenti comandi:

- Selezionando il menù VO \mapsto Vizier Catalogue Service;
- Impostando le coordinate del Lockman Hole e il raggio del campo entro il quale vogliamo avere le informazioni sulla posizione degli oggetti, e caricando i due cataloghi (Appendice B);
- Estraendo le tabelle contenenti soltanto le coordinate degli oggetti che si trovano entro l'area di raggio 30° attraverso il menù File \mapsto Save Table(s)/Session;

- Formattazione del file affinché sia leggibile dal programma (Appendice C) che restituisce un file con i conteggi di sorgenti in funzione delle coordinate.

In Fig. 3.12 si possono vedere le sorgenti X (alto) e γ (basso) su un campo di 30° di raggio per le prime e di 50° di raggio per le seconde. Già ad un primo sguardo si può notare come, nel caso degli oggetti che emettono nei raggi X, ci sia un addensamento in un determinato punto del grafico, che corrisponde proprio alle coordinate di interesse di questa tesi.

Ottenuti questi dati come tabelle delle coordinate degli oggetti attraverso Topcat, è stato calcolato il numero di sorgenti in funzione delle coordinate del campo con una cella di apertura pari a 3° .

Grazie a questi dati si sono potuti costruire i grafici tridimensionali rappresentanti i conteggi di sorgenti all'interno del Lockman Hole e nelle regioni ad esso adiacenti.

Confrontando le coordinate dove viene raggiunto il massimo numero di conteggi di sorgenti X con le coordinate del minimo valore della densità della colonna dell'idrogeno (Fig. 3.13) si può vedere come queste siano in buona corrispondenza.

Più precisamente, si intende far notare che non appena la colonna di idrogeno raggiunge il minimo si ha anche un massimo nel numero di sorgenti X in quella regione, a sottolineare quindi il vantaggio di poter osservare in una zona di cielo con una bassa densità di idrogeno lungo la linea di vista.

Un secondo aspetto da considerare è la distribuzione uniforme delle sorgenti γ . Il grafico in Fig. 3.13, pannello in basso, è infatti piatto rispetto a quello delle sorgenti X, e conferma quindi che la densità dell'idrogeno neutro non influenza la rilevazione di oggetti che emettono nella banda dei raggi γ .

Per essere sicuri di osservare delle sorgenti extragalattiche, si devono avere per lo stesso oggetto lo spettro sia nei raggi X che nel radio. Con questa associazione si può quindi studiare la distribuzione di questo tipo di oggetti nella regione del Lockman Hole per verificare il reale vantaggio di osservare in una regione con una bassa densità di colonna di idrogeno neutro.

Per arrivare a questo risultato ci serviamo di un nuovo grafico tridimensionale in cui si leggono sull'asse verticale il numero dei conteggi delle sorgenti.

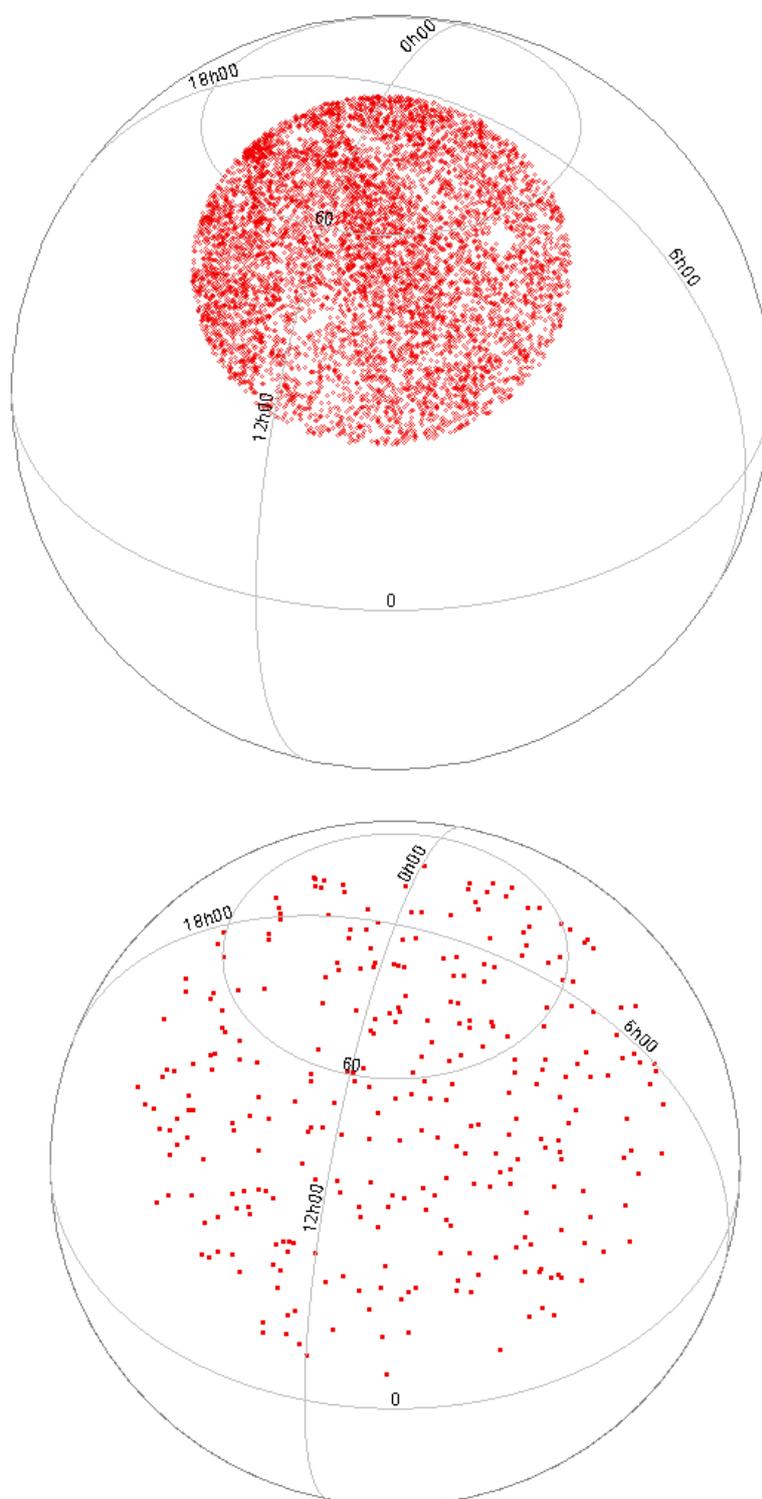


Figura 3.12: Sorgenti X dal catalogo ROSAT nel campo di apertura di 30° centrato nel Lockman Hole (alto); Sorgenti γ dal catalogo 2FGL nel campo di apertura di 50° nel Lockman Hole (basso).

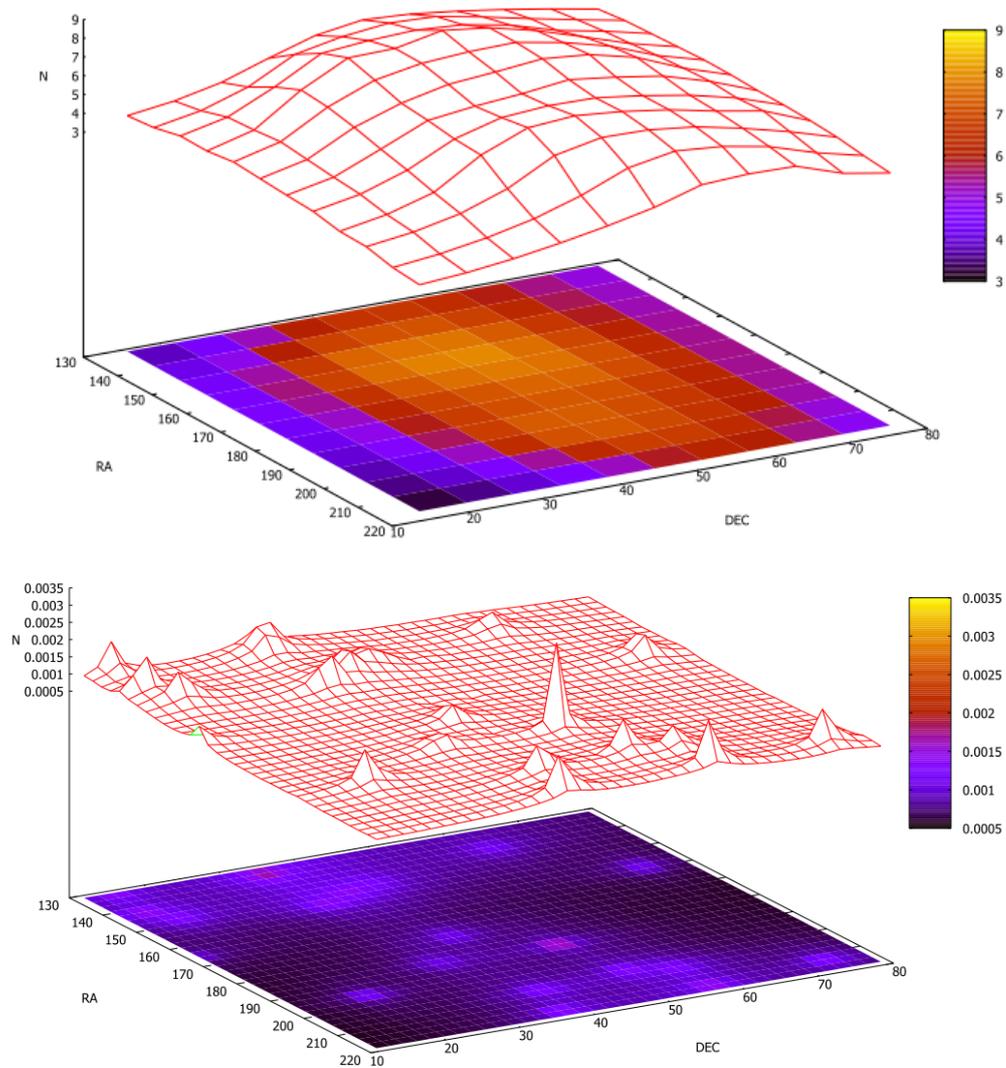


Figura 3.13: Grafico 3D dei conteggi delle sorgenti X del catalogo ROSAT (All Sky Survey faint source catalogue) di Voges (2000) in un campo di raggio 30° (alto); grafico 3D dei conteggi delle sorgenti γ del catalogo 2FGL di Nolan et al., 2012 in un campo di raggio 30° .

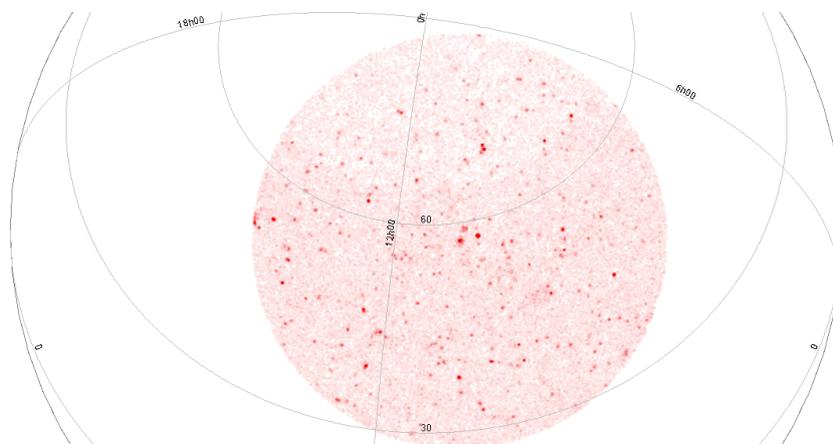


Figura 3.14: Sorgenti X e radio del catalogo ARXA su un campo di raggio 30° centrate nel Lockman Hole, ottenute con Topcat.

Come per i precedenti grafici, dapprima si è salvato il file contenente le coordinate delle sorgenti X e radio usando Topcat, e per questo tipo di oggetti ci si è serviti del catalogo ARXA, ‘An all-sky Atlas of Radio/X-ray Associations’, pubblicato da E. Flesch nel 2009. Questo catalogo comprende tutte le sorgenti radio e X del cielo, ed è più completo rispetto alla combinazione dei singoli cataloghi X e radio considerati in precedenza.

In Fig. 3.14 si vede il catalogo ARXA ristretto ad un’area di raggio 30° con centro sulle coordinate del Lockman Hole considerate in questo lavoro. Osservando questa immagine si notano immediatamente degli eccessi nella distribuzione di tali oggetti in alcune regioni, e sovrapponendo il campo del Lockman Hole selezionato in densità di colonna di idrogeno con il vincolo imposto dall’Eq. 3.2, si ha la conferma che tali addensamenti cadono proprio in corrispondenza dei valori minimi di N_H (Fig. 3.15). In modo rigoroso si vede invece dal grafico in Fig. 3.16 che effettivamente si apprezza un aumento del numero di sorgenti che emettono sia in X che nel radio, proprio in corrispondenza dell’intervallo di coordinate in cui si ha la più bassa densità della colonna di idrogeno e il più alto numero di conteggi di sorgenti che emettono negli X, come mostrato rispettivamente dalle Fig. 3.4 e 3.13. Risulta pertanto evidente come l’individuazione di oggetti che emettono sia nel radio che nell’X, risultando plausibili candidati ad una associazione con sorgenti γ , sia più facile nella regione di minima densità di colonna.

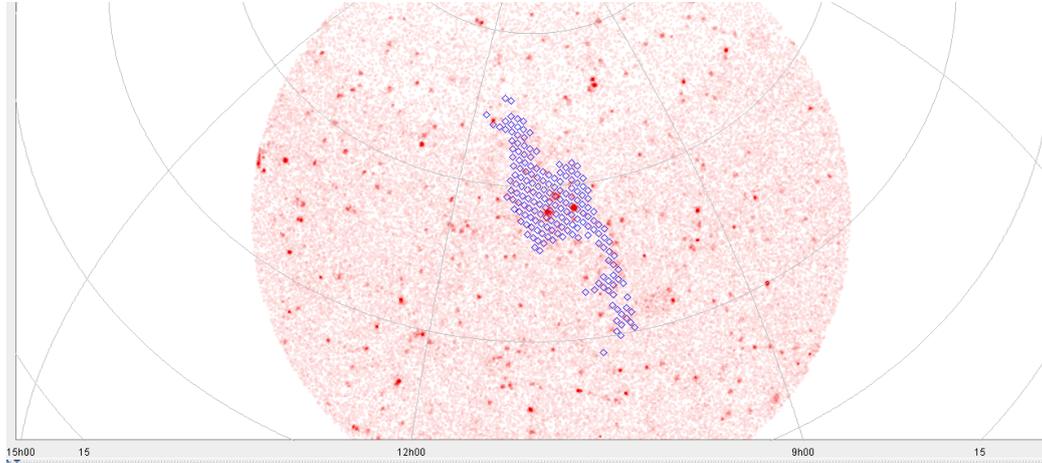


Figura 3.15: Sovrapposizione del catalogo ARXA sul campo del Lockman Hole selezionato in densità con raggio 30° , ottenuta con Topcat.

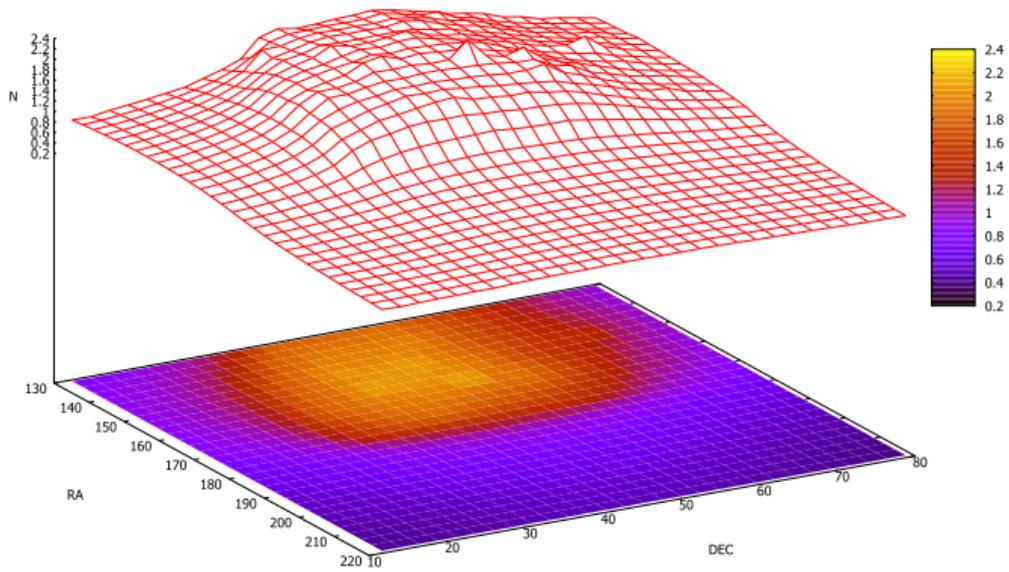


Figura 3.16: Grafico 3D dei conteggi del confronto tra le sorgenti X e radio dal catalogo ARXA sul campo del Lockman Hole di dimensione 30° . L'asse verticale esprime il numero dei conteggi delle sorgenti in una cella di lato $1^\circ.0$.

Conclusioni

L'assorbimento da parte del mezzo interstellare rappresenta una limitazione nella capacità di associare una sorgente γ alla propria controparte ottica perché la radiazione di alta energia non subisce alcuna interazione con la materia di cui è composto il mezzo interstellare. Al contrario le emissioni nell'ottico e negli X sono affette da diffusione, scattering ed assorbimento come descritto precedentemente.

Essendo l'idrogeno neutro il principale componente del mezzo interstellare e fattore di assorbimento per le lunghezze d'onda dei raggi X, si rende necessaria la ricerca di regioni in cui è meno denso per avere il minimo effetto di assorbimento e dunque il vantaggio di poter effettuare un'associazione precisa con la controparte ottica.

Questo è il motivo per cui il Lockman Hole rappresenta una regione di grande interesse astrofisico.

L'aver combinato poi l'emissione radio con quella X degli oggetti appartenenti al Lockman Hole attraverso il confronto tra cataloghi relativi a queste lunghezze d'onda, rappresenta un valido metodo per poter localizzare potenziali controparti di sorgenti γ . Lo spettro X e radio si genera per sincrotrone e questo meccanismo un tracciante di processi fisici di natura non stellare.

Sebbene alcune sorgenti di emissione X e radio siano presenti nella Galassia, in molti casi è possibile distinguerle da oggetti extra-Galattici a causa delle proprietà della controparte ottica.

I risultati ottenuti in questo lavoro si possono riassumere nel grafico illustrato in Fig. 4.1, nel quale si sovrappone la mappa della densità di colonna di idrogeno con il conteggio di sorgenti X e radio. Nelle aree interessate da un minore effetto di assorbimento, la concentrazione di queste sorgenti appare maggiore, a causa della possibilità di individuare anche oggetti particolar-

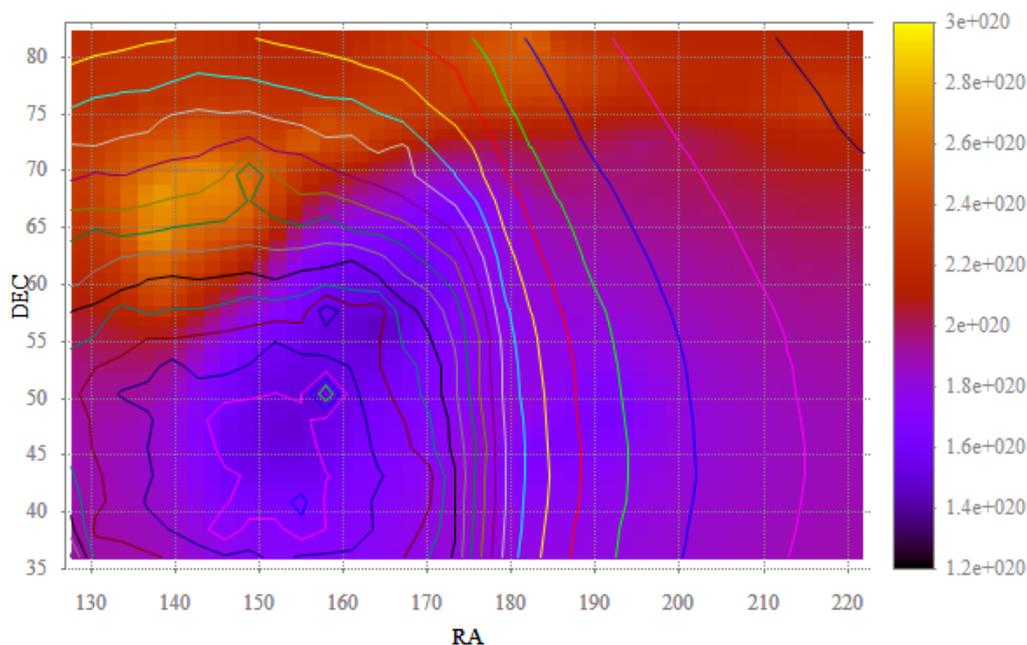


Figura 4.1: Grafico 2D della mappa dell'idrogeno neutro (colore) sovrapposta alle curve di isodensità dei conteggi delle sorgenti del catalogo ARXA.

mente deboli e lontani. Ciò rende il Lockman Hole una regione privilegiata per lo studio di controparti a bassa frequenza di sorgenti γ anche deboli. I risultati ottenuti in questo lavoro si possono riassumere nel grafico illustrato in Fig. 4.1, nel quale si sovrappone la mappa della densità di colonna di idrogeno con il conteggio di sorgenti X e radio. Nelle aree interessate da un minore effetto di assorbimento, la concentrazione di queste sorgenti appare maggiore, a causa della possibilità di individuare anche oggetti particolarmente deboli e lontani. Ciò rende il Lockman Hole una regione privilegiata per lo studio di controparti a bassa frequenza di sorgenti γ anche deboli.

Appendice A

Grafici Gnuplot

Vengono riportate le righe di comando per la costruzione dei grafici della tesi con il software Gnuplot, programma per la realizzazione di grafici di funzioni matematiche in due o tre dimensioni e la rappresentazione grafica di dati grezzi. Le istruzioni precedute da un segno di cancelletto (#) sono commenti ignorati dal software, che possono essere adoperati per descrivere le righe di comando sottostanti.

```
1 reset
2 #indicazioni per la costruzione degli assi del grafico e del
   titolo
3 set title "Grafico\341\ dell'idrogeno\ nel\ Lockman\ Hole\
   15\260x15\260\ Leiden\057 Argentine\057 Bonn"
4 set xlabel "RA"
5 set ylabel "DEC"
6 set zlabel "Nh"
7 set grid
8
9 #istruzioni per l'identificazione dell'elemento separatore
   delle colonne
10 set datafile separator ";"
11
12 #preparazione del grafico 3D
13 set dgrid3d 16,16 qnorm 3
14
15 set pm3d at b
16 set ticslevel 0.8
17 set isosample 16,16
```

```
18 |  
19 | #comando per plottare il grafico 3D (con le linee) della  
   | densit\ 'a dell'idrogeno  
20 | splot "Nh1515.LAB.dat" using 1:2:(log10($4)) w l title "  
   | Nh1515.LAB.dat"
```

Appendice B

Topcat

‘Tool for OPerations on Catalogues And Tables’.

È un software per la visualizzazione di grafica interattiva e editor per i dati tabulari. Il suo scopo è quello di fornire la maggior parte delle strutture di cui gli astronomi si servono per l’analisi e la manipolazione di cataloghi di sorgenti e tabelle, tuttavia può essere usato anche per dati non astronomici, Taylor (2011).

Nell’immagine si vede il menù ‘VizieR Catalogue Service’ dal quale si possono caricare i cataloghi.

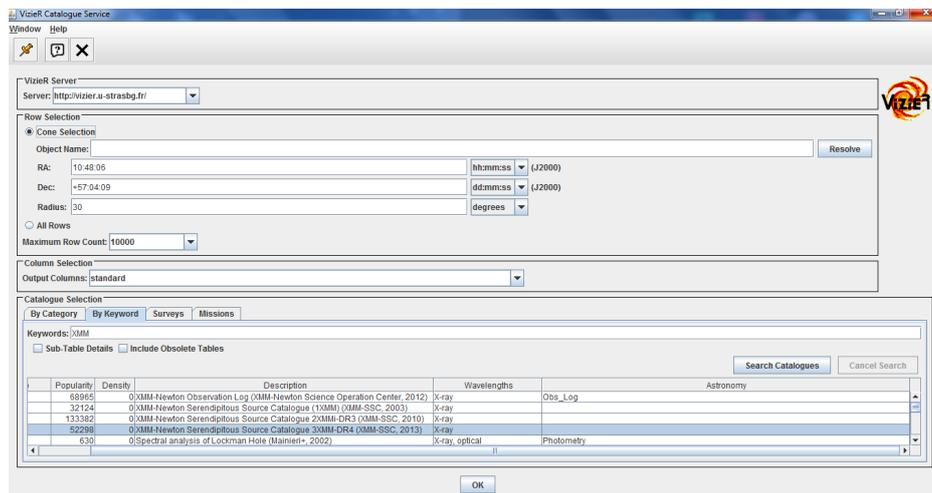


Figura B.1: Istruzioni per il software Topcat per caricare i cataloghi 2FGL e XMM nel campo con raggio 30°

Appendice C

Programma per istogrammi bidimensionali

Viene riportato di seguito il programma usato per ricavare le informazioni sul conteggio di sorgenti a partire da un file contenente le coordinate estratte da Topcat attraverso il salvataggio delle relative tabelle.

Queste righe di comando sono state scritte dal Dott. G. La Mura, assegnista del dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova.

```
1  #include <stdio>
2  #include "Matrix.h"
3
4  void BuildH2D(char** argv);
5
6  int main(int argc, char** argv) {
7      if (argc != 3) printf("ERROR: use \"Histogram2D_
8          TABLE_FILE_NAME OUTPUT_FILE_NAME\" \"\n");
9      else BuildH2D(argv);
10     //BuildH2D();
11     return 0;
12 }
13 void BuildH2D(char** argv) {
14     const char *inFileName = argv[1]; //"test.txt";
15     const char *outFileName = argv[2]; //"out.txt";
16     double xMin, xMax, xStep;
17     double yMin, yMax, yStep;
```

APPENDICE C. PROGRAMMA PER ISTOGRAMMI BIDIMENSIONALI46

```

18     double x, y;
19     int xBins = 0, yBins = 0;
20     int row, column;
21     Matrix *h2d;
22     FILE *pCfgFile = fopen("hconfig.txt", "r");
23     FILE *pInFile, *pOutFile;
24     if (pCfgFile != NULL) {
25         fscanf(pCfgFile, "%*s□*s□*s□%lf,%lf,%lf", &
                xMin, &xMax, &xStep);
26         fscanf(pCfgFile, "%*s□*s□*s□%lf,%lf,%lf", &
                yMin, &yMax, &yStep);
27         fclose(pCfgFile);
28         while (xMin + ((double)xBins * xStep) < xMax)
                xBins++;
29         while (yMin + ((double)yBins * yStep) < yMax)
                yBins++;
30         h2d = new Matrix(yBins, xBins);
31
32         pInFile = fopen(inFileName, "r");
33         if (pInFile != NULL) {
34             printf("Reading□input□file...\n");
35             while (!feof(pInFile)) {
36                 fscanf(pInFile, "%lf□%lf", &x
                        , &y);
37                 row = 0;
38                 column = 0;
39                 while (xMin + ((double)column
                        * xStep) < x) {
40                     column++;
41                     if (column == xBins -
                        1) break;
42                 }
43                 while (yMax - ((double)row *
                        yStep) > y) {
44                     row++;
45                     if (row == yBins - 1)
                        break;
46                 }
47                 h2d->IncrementValue(row,
                        column);
48             }

```

APPENDICE C. PROGRAMMA PER ISTOGRAMMI BIDIMENSIONALI47

```
49         fclose(pInFile);
50         printf("Generating %d x %d output
           table\n", yBins, xBins);
51         pOutFile = fopen(outFileName, "w");
52         fprintf(pOutFile, "Coord1\tCoord2\
           tValue\n");
53         for (int fi = 0; fi < yBins; fi++) {
54             for (int fj = 0; fj < xBins;
               fj++) fprintf(pOutFile, "
               %.3lf\t%.3lf\t%d\n", xMin
               + ((double)fj * xStep),
               yMax - ((double)fi * yStep
               ), h2d->GetValue(fi, fj));
55         }
56         fclose(pOutFile);
57         printf("Output file written.\n");
58     }
59     else printf("ERROR: File not found %s\n",
               inFileName);
60 }
61 else printf("ERROR: Could not locate configuration
               file hconfig.txt.\n");
62 }
```

Elenco delle figure

1.1	Il flusso totale dello spettro (alto) indica una classificazione come Seyfert 2, mentre il flusso polarizzato (basso) è indistinguibile da quello di una Seyfert 1, (Antonucci, 1993).	6
1.2	(Sinistra) Immagine di NGC 4261 tratta dal lavoro di Antonucci (1993) composita dal getto radio e dalla galassia ottica come osservata da terra a sinistra. (Destra) l'immagine in banda ottica ad alta risoluzione del nucleo mostra un toro di polveri il cui asse di simmetria appare compatibile con la direzione di propagazione dei getti. Immagine di Hubble Space Telescope dal lavoro di Jaffe et al. (1993).	7
1.3	Schema della classificazione delle Galassie Attive, (crediti : http://goo.gl/LvpIwi)	8
2.1	Vista del telescopio W. Herschel (La Palma, Canarie) del Lockman Hole nelle lunghezze d'onda del visibile e dell'infrarosso, crediti: NASA Herschel, http://goo.gl/wQd2Sl	11
2.2	La regione del Lockman Hole in una mappa prodotta con il software Topcat	13
3.1	Didascalia elenco figure	17
3.2	Dati di input per 'NASA's HEASARC tool' per il calcolo della densità dell'idrogeno per un campo di $15^\circ \cdot 15^\circ$ attorno alle coordinate stabilite.	18
3.3	Emissione integrata di HI nell'intervallo di velocità tra $-400 < v < +400 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ nella collezione di dati di Leiden-Argentine-Bonn (LAB). Immagine tratta da Kalberla et al. (2005)	19

3.4	Densità di idrogeno per un campo di 15° di raggio calcolata con la mappa di Leiden Argentine Bonn (alto) e con la mappa di Dickey&Lockman (basso) in NASA's HEASARC tool	21
3.5	Campo del Lockman Hole con l'indicazione dei punti per i quali si rileva $N_H < 9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$	22
3.6	Campo $15^\circ \cdot 15^\circ$ del Lockman Hole sovrapposto alla Digitized Sky Survey. La dimensione del campo inquadrato è $85^\circ \cdot 38^\circ$. .	25
3.7	Sorgenti γ del catalogo 2FGL sovrapposte all'area del Lockman Hole. Le posizioni delle sorgenti γ sono indicate da una croce blu	26
3.8	Conteggi delle sorgenti non associate ad una controparte ottica in funzione della latitudine galattica (Nolan et al., 2012) . . .	27
3.9	Sovrapposizione catalogo 2FGL (croci blu) e ROSAT (punti gialli), rispettivamente per le sorgenti γ e X nel Lockman Hole (area rossa).	28
3.10	Sovrapposizione tra il catalogo 2FGL (croci blu), ROSAT (punti gialli) e NVSS (cerchi neri)	29
3.11	Raccolta delle controparti ottiche delle sorgenti identificate nella Tab. 3.3, estratte da Simbad.	32
3.12	Sorgenti X dal catalogo ROSAT nel campo di apertura di 30° centrato nel Lockman Hole (alto); Sorgenti γ dal catalogo 2FGL nel campo di apertura di 50° nel Lockman Hole (basso).	35
3.13	Grafico 3D dei conteggi delle sorgenti X del catalogo ROSAT (All Sky Survey faint source catalogue) di Voges (2000) in un campo di raggio 30° (alto); grafico 3D dei conteggi delle sorgenti γ del catalogo 2FGL di Nolan et al., 2012 in un campo di raggio 30°	36
3.14	Sorgenti X e radio del catalogo ARXA su un campo di raggio 30° cenrtate nel Lockman Hole, ottenute con Topcat.	37
3.15	Sovrapposizione del catalogo ARXA sul campo del Lockman Hole selezionato in densità con raggio 30° , ottenuta con Topcat.	38

3.16	Grafico 3D dei conteggi del confronto tra le sorgenti X e radio dal catalogo ARXA sul campo del Lockman Hole di dimensione 30° . L'asse verticale esprime il numero dei conteggi delle sorgenti in una cella di lato $1^\circ.0$	38
4.1	Didascalia elenco figure	41
B.1	Istruzioni per il software Topcat per caricare i cataloghi 2FGL e XMM nel campo con raggio 30°	44

Elenco delle tabelle

3.1	Tabella delle coordinate delle regioni indagate e valori delle rispettive densità dell'idrogeno lungo la linea di vista (Lockman et al., 1986).	17
3.2	Tabella da Nolan et al. (2012). Numero e tipo di sorgenti γ identificate alla controparte ottica nel catalogo 2FGL.	24
3.3	Tabella ottenuta tramite Topcat sulle associazioni tra sorgenti che hanno emissioni X, radio e gamma per un campo di raggio 30° centrato nel Lockman Hole.	30
3.4	Tabella relativa all'identificazione delle sorgenti γ della Tab. 3.3	31

Bibliografia

- [1] Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W. B., et al. 2010. Fermi LAT observations of cosmic-ray electrons from 7 GeV to 1 TeV. *PRD*, 82(9), 092004.
- [2] Antonucci, R. 1993. Unified models for active galactic nuclei and quasars. *ARAA*, 31, 473-521.
- [3] Bauer, F. E., Alexander, D. M., Brandt, W. N., et al. 2004. The Fall of Active Galactic Nuclei and the Rise of Star-forming Galaxies: A Close Look at the Chandra Deep Field X-Ray Number Counts. *AJ*, 128, 2048-2065.
- [4] Condon, J. J., Cotton, W. D., Greisen, E. W., et al.(1998). The NRAO VLA Sky Survey. *AJ*, 115, 1693-1716.
- [5] Flesch E. 2010. An all-sky Atlas of Radio/X-ray Associations. *FINIRE*
- [6] Giacconi, R., Kellogg, E., Gorenstein, P., et al. 1971. An X-Ray Scan of the Galactic Plane from UHURU. *APJL*, 165, L27.
- [7] Gursky, H., Giacconi, R., Paolini, F. R., et al. 1963. Further Evidence for the Existence of Galactic x Rays. *Physical Review Letters*, 11, 530-535.
- [8] Hasinger, G., Giacconi, R., Gunn, J. E., et al. 1998. The ROSAT Deep Survey. IV. A distant lensing cluster of galaxies with a bright arc. *AAP*, 340, L27-L30.
- [9] Khachikyan, É. Y. and Weedman, D. W. 1971. A spectroscopic study of luminous galactic nuclei. *Astrophysics*, 7, 231-240.

- [10] Lockman, F. J., Jahoda, K., and McCammon, D. 1986. The structure of galactic HI in directions of low total column density. *APJ*, 302, 432-449.
- [11] Moretti, A., Campana, S., Lazzati, D., and Tagliaferri, G. 2003. The Resolved Fraction of the Cosmic X-Ray Background. *APJ*, 588, 696-703.
- [12] Nolan, P. L., Abdo, A. A., Ackermann, M., et al. 2012. VizieR Online Data Catalog: Fermi LAT second source catalog (2FGL) (Nolan+, 2012). *VizieR Online Data Catalog*, 219, 90031.
- [13] Salpeter, E. E. (1964). Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects. *APJ*, 140, 796-800.
- [14] Taylor, M. (2011). TOPCAT: Tool for OPERations on Catalogues And Tables. *Astrophysics Source Code Library*.
- [15] Worsley, M. A., Fabian, A. C., Barcons, X., et al. 2004. The (un)resolved X-ray background in the Lockman Hole. *MNRAS*, 352, L28-L33.