

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

Caratteristiche principali dell'emissione di galassie a spirale

Tesi di laurea

Presentata da:
Gabriele Comella

Relatore:
Chiar.ma Prof.ssa
Marcella Brusa

Anno Accademico 2021/2022

Indice

1	Morfologia delle galassie a spirale	2
2	Composizione delle galassie a spirale	4
2.1	Mezzo interstellare	4
2.1.1	Hot Ionized Medium	5
2.1.2	Warm Ionized Medium	6
2.1.3	Warm Neutral Medium	6
2.1.4	Cold Neutral Medium	6
3	Emissioni nello spettro elettromagnetico	7
3.1	Raggi Gamma	7
3.1.1	Raggi cosmici	8
3.1.2	Bremsstrahlung relativistica	9
3.1.3	Inverse Compton	9
3.2	Raggi X	9
3.2.1	Bremsstrahlung termica	10
3.3	Radiazione Ultravioletta	11
3.4	Spettro Visibile	11
3.4.1	Corpo nero delle stelle	12
3.5	Radiazione Infrarossa	12
3.6	Banda Radio	13
3.6.1	Onde Radio $3\text{Hz} \leq \nu \leq 30\text{GHz}$	13
3.6.2	Onde millimetriche e submillimetriche $30\text{GHz} \leq \nu \leq 300\text{GHz}$	14
3.6.3	Sincrotrone	15
4	Onde gravitazionali	16

Introduzione

Le galassie sono i mattoni fondamentali dell'Universo, isole autogravitanti composte da stelle, gas, polvere e materia oscura. Non solo al loro interno si formano le stelle e i metalli necessari per la creazione di pianeti ed organismi, ma da esse possiamo studiare la geometria dello spazio-tempo.

Uno degli astronomi più importanti che modificò la visione del cosmo fu **Edwin Hubble**, che intorno al 1920 classificò le galassie in base alla loro morfologia. La sequenza di Hubble suddivide le galassie in quattro grandi categorie: ellittiche, lenticolari o S0, irregolari e a spirale. Saranno proprio queste ultime l'oggetto di studio di questo elaborato. Dopo una breve descrizione della morfologia e della composizione delle galassie a spirale, andremo ad analizzarne le emissioni in tutto lo spettro elettromagnetico.

Infine parleremo brevemente di un altro tipo di emissioni che può essere rilevata attraverso gli interferometri, cioè le emissioni di onde gravitazionali.

1 Morfologia delle galassie a spirale

Le galassie a spirale si dividono in due rami, spirali barrate e spirali normali, a seconda della presenza di una struttura a barra riconoscibile. In letteratura queste galassie vengono designate con la lettera *SB*, per le spirali barrate, o semplicemente *S* per quelle normali. Queste sigle possono essere seguite dalle lettere "a,b,c", che rappresentano le tre classi ottenute in base ai seguenti 3 criteri:

- la dimensione relativa della regione del bulge, rispetto all'intera galassia;
- l'avvolgimento dei bracci intorno al bulge;
- la risoluzione dei bracci in sottostrutture (stelle, regioni HII, polveri, nubi, ecc.).

La struttura delle galassie a spirale, molto più complessa della struttura di quelle ellittiche, presenta una forma a disco caratterizzata da una protuberanza centrale, detta *Bulge*. Dalla protuberanza si diramano dei *bracci a spirale* che si avvolgono più o meno strettamente intorno all'area centrale. Descriviamo più nello specifico le diverse parti:

1. **Bulge**: regione interna estremamente densa al cui interno troviamo stelle molto vecchie e gas caldo. Al centro è presente un buco nero supermassiccio la cui massa è circa un millesimo della massa totale del bulge.
2. **Disco**: struttura che avvolge il bulge. Viene distinto in *thin disk* e *thick disk*. Il disco sottile è quello più vicino al piano di rotazione della galassia e presenta una densità maggiore rispetto al thick disk. L'elevata densità di questa zona è dovuta alla presenza di nubi molecolari fredde, regioni HII e polveri. Ospita inoltre i bracci,

perturbazioni che ruotano intorno al bulge, i quali generano stelle attraverso il collasso gravitazionale del gas freddo.

Il disco spesso, al contrario, è meno denso ma molto più esteso, e può arrivare ad avere anche uno spessore di $\approx 1kpc$. In questo disco sono presenti stelle più vecchie che nel tempo si sono allontanate dal disco sottile.

3. **Alone:** è la parte più esterna che avvolge completamente la galassia. Questa è formata principalmente da stelle vecchie, ammassi globulari, gas freddo e materia oscura.

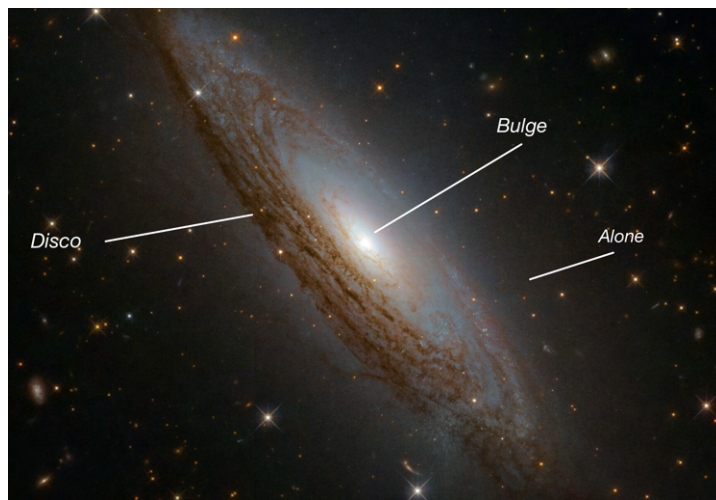


Figura 1: Galassia a spirale "ESO 021-G004", immagine catturata dalla Wide Field Camera 3 a bordo del telescopio spaziale Hubble. Fonte: Esa/Hubble & NASA, D. Rosario et al.

2 Composizione delle galassie a spirale

Descriviamo subito le principali componenti in grado di emettere radiazione all'interno di una galassia a spirale.

- **Stelle:** queste galassie sono composte da una grande varietà di stelle, le quali rappresentano la maggior parte della massa visibile. All'interno del bulge, e disseminate nell'alone, troviamo stelle molto vecchie, di conseguenza di una colorazione verso il rosso e con una bassa metallicità. Il disco, invece, è caratterizzato da una colorazione blu dovuto alla presenza di stelle giovani, di classe O-B, con un'elevata frazione di metalli al loro interno. Infine, all'interno delle galassie a spirale sono osservabili le supernovae: esplosione delle stelle più massicce al termine della loro vita.
- **Gas:** nonostante siano le stelle a costituire la frazione fondamentale della massa in una galassia a spirale, è il gas ad occuparne il volume maggiore. Con una massa che varia dal 5% al 10% della massa globale della galassia, il gas è composto da atomi di H(90%), He(9%), Z(1%) (Z rappresenta la frazione di elementi più pesante dell'He) e da molecole. Il gas è distribuito in funzione della distanza, con un'elevata densità nel centro galattico fino a scemare ed espandersi oltre i confini visibili del disco.
- **Polvere:** la polvere è costituita da granelli di ghiaccio di varie specie: grafite, silicati, olivina e altri metalli. Hanno dimensione dell'ordine del micrometro e si trovano a temperatura che vanno da $30K$ a $100K$. Si presentano sotto forma di grandi nubi scure nel caso in cui le stelle dietrostanti emettono radiazione a lunghezze d'onda minore delle dimensioni tipiche della polvere. Altrimenti, nel caso di nebulose a riflessione, le nubi brillano per la luce di stelle vicine. Possiamo pensare alle polveri come corpi grigi: corpi aventi emissività inferiore all'unità, i quali assorbono la radiazione incidente e la riemettono termicamente a lunghezze d'onda maggiori, principalmente nell'infrarosso (IR).

L'unione di polveri e gas costituisce il **Mezzo Interstellare** (ISM). La *Figura 2*, ottenuta dalla missione Gaia dell'ESA, mappa l'assorbimento della luce da parte dell'ISM nella nostra galassia.

2.1 Mezzo interstellare

Attraverso 2 quantità principali, *temperatura* e *densità*, possiamo dividere l'ISM in 4 fasi diverse, tutte approssimativamente in equilibrio di pressione:

1. **Hot Ionized Medium (HIM):** $T = 10^6 \sim 10^7$ K, $n \sim 10^{-2} - 10^{-4} \text{ cm}^{-3}$

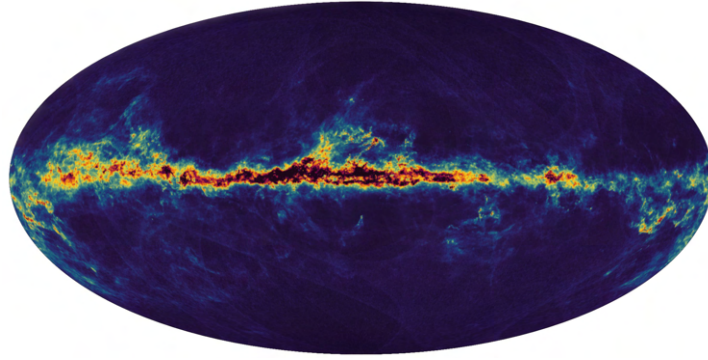


Figura 2: Mappa generata attraverso i rilevamenti della missione Gaia. E' rappresentata la polvere interstellare che riempie la Via Lattea. Le regioni scure al centro del piano galattico sono le regioni con molta polvere interstellare che sfumano nel giallo man mano che la quantità di polvere diminuisce. Le regioni blu scuro sopra e sotto il piano galattico sono regioni dove c'è poca polvere. Fonte: ESA/GAIA, [5].

2. **Warm Ionized Medium (WIM):** $T \sim 10^4$ K, $n \sim 1 - 10^3$ cm^{-3}
3. **Warm Neutral Medium (WNM):** $T = 100 \sim 10000$ K, $n \sim 0.1 - 1$ cm^{-3}
4. **Cold Neutral Medium (CNM):** $T = 10 \sim 100$ K, $n \sim 1 - 10^3$ cm^{-3}

dove n rappresenta il numero di particelle per cm^{-3} .

Queste quattro tipologie possono essere trovate all'interno delle galassie a spirale. Nel bulge troviamo HIM e nei bracci è presente WIM solitamente circondato dal CNM, il quale può formare grandi nubi molecolari. Mentre il WNM è diffuso su tutto il disco galattico, con una concentrazione maggiore nel thick disk.

2.1.1 Hot Ionized Medium

Questa è la fase più calda; di conseguenza i tempi di raffreddamento saranno più lenti e perciò costituirà una grande frazione di tutto l'ISM della galassia. Le principali fonti di riscaldamento sono le onde d'urto originate da esplosioni di supernovae (SN), i venti solari violenti e, in alcuni casi, la collisione fra vecchi resti di SN, i quali generano ulteriori onde d'urto. Le onde d'urto create dalle esplosioni possono generare temperature anche $> 10^7 K$, mentre quelle generate dalle collisioni non raggiungono i $10^6 K$. A temperature così elevate il principale processo di raffreddamento è la *bremsstrahlung termica*, che emette nei raggi X. Si avrà successivamente emissione per ricombinazione, dovuta a processi di *transizione libero-legato*, con emissione nei raggi X "soffici" ($0.2 - 2keV$), e *transizioni legato-legato* con emissione nell'ottico.

2.1.2 Warm Ionized Medium

La seconda fase è composta da gas ionizzato (idrogeno ed elio). La ionizzazione è dovuta alle forti emissioni nella banda dell'ultravioletto che vengono generate dalle stelle giovani (di classe O-B), create nelle regioni di formazione stellare (SFR). Il WIM costituisce circa il 2% – 4% dell'ISM e si osserva nelle regioni di HII. Abbiamo evidenza di questa fase attraverso le forti *righe di emissione* dell'idrogeno e dell'ossigeno. Inoltre possiamo ancora osservare *processi di Bremsstrahlung*, i quali formano il continuo negli spettri. Possiamo quindi ricercare questa fase in diverse regioni dello spettro elettromagnetico: radio, IR, submm e ottico. Infine, il WIM è caratterizzato da un equilibrio tra fotoionizzazione del gas neutro e ricombinazione del gas ionizzato, dovuto dalla temperatura stabile a $\approx 10^4$.

2.1.3 Warm Neutral Medium

Il mezzo neutro temperato, costituito prevalentemente da idrogeno atomico (HI), rappresenta il 30% – 60% del volume totale del ISM. Le perturbazioni dovute alle SN non raggiungono questo mezzo, il quale ha bisogno di altri meccanismi per acquisire energia e riscaldarsi. I metodi sono: l'assorbimento di raggi X "soffici", l'assorbimento di raggi cosmici di bassa energia, le turbolenze interstellari e il campo magnetico. Nessuno di questi fa raggiungere il fattore di riempimento del mezzo caldo, portando alla conclusione che il riscaldamento è dovuto principalmente alla luce stellare.

L'emissione più importante di questo mezzo è la *riga a 21 cm dell'idrogeno*. Questa particolare emissione ci permette di studiare diverse proprietà delle galassie a spirale, tra cui: la curva di rotazione del disco, le dimensioni della galassia e una stima della massa. La riga 21 cm è facilmente osservabile da terra in quanto non viene alterata dagli effetti della polvere e dalle molecole dell'atmosfera.

2.1.4 Cold Neutral Medium

Il principale composto di questa fase è l'idrogeno atomico neutro, il quale è condensato in nubi ($T \approx 100K$) in equilibrio di pressione con ISM, ma si può trovare anche idrogeno molecolare molto più freddo e denso ($T \approx 10K$). Come l'WIM, il CNM rappresenta il 2% – 4% del ISM e si trova anch'esso nella SFR. La principale fonte di riscaldamento sono le ionizzazioni dovute ai raggi cosmici di bassa energia. Questa fase è rilevabile attraverso osservazioni nel mm/submm/radio, dove si possono riscontrare *righe di emissione*.

3 Emissioni nello spettro elettromagnetico

La principale fonte di informazione per gli astronomi sono i fotoni, pacchetti di energia che viaggiano alla velocità della luce. Il tipo di fotone, che giunge al nostro sistema di rilevamento, dipende fortemente dalle condizioni fisico-chimiche della fonte in cui è stato generato e dal mezzo che ha dovuto attraversare.

Per realizzare una descrizione sistematica dei principali emettitori di informazioni, andremo a delineare i principali processi, sia riga che nel continuo, che definiscono ogni banda dello spettro elettromagnetico e citeremo le principali fonti di suddetti processi. Definiamo le due categorie di processi citati:

- **processi nel continuo:** attraverso questo processo i fotoni emessi occupano un vasto intervallo di lunghezze d'onda. Possono essere prodotti da:

- *processi termici:* la distribuzione dei fotoni emessi segue quella di Maxwell-Boltzmann

$$f(v)dv \sim v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv$$

Sono i processi di emissione di corpo nero e bremsstrahlung.

- *processi non termici:* la distribuzione segue una legge di potenza. I processi tipici di questa emissione sono: sincrotrone, compton inverso e bremsstrahlung relativistica.

- **processi in riga:** in questo caso i fotoni emessi, o assorbiti, non coprono più una vasta regione dello spettro ma sono concentrati in transizioni discrete. Non abbiamo più uno spettro continuo ma presenta righe date dalle transizioni.

3.1 Raggi Gamma

Definiamo Raggi Gamma (raggi γ) tutti quei fotoni aventi energia $> 100keV$, quindi con una frequenza $\nu \geq 3 \times 10^{19}$ Hz. Lo studio di questa radiazione deve essere eseguito al di fuori dell'atmosfera. Al suolo si può riscontrare solo la radiazione Cerenkov degli elettroni e dei positroni ultra-relativistici prodotti dagli sciami creatisi dall'interazione dei raggi γ , con $E \geq 10^{11}eV$, con l'atmosfera superiore.

Le principali sorgenti che emettono in questa banda sono: esplosioni di supernovae, stelle di neutroni e pulsar, buchi neri e nuclei galattici attivi (AGN). In questi luoghi i fotoni acquisiscono energia attraverso processi di **Bremsstrahlung relativistica** e, in piccola parte, per **Inverse Compton**. Il principale processo di emissione dei raggi γ , però, rimane la collisione dei **Raggi cosmici** con l'ISM.

In questa banda si possono inoltre osservare i Gamma-Ray Bursts (GRB o lampi gamma), intensi lampi di raggi gamma che rappresentano uno dei fenomeni più energetici osservati nell'universo.

Come mostrato nella *Figura 3*, avremo una grande concentrazione di emissione da parte del piano galattico dovuta all'interazione dei raggi cosmici con il mezzo interstellare. Inoltre si possono osservare, nella parte destra dell'immagine, tre pulsar, visibili come nodi luminosi di emissione nel piano galattico.

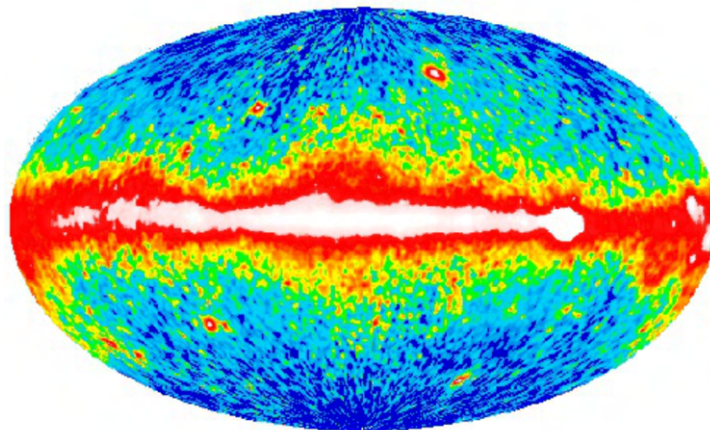


Figura 3: L'immagine rappresenta una mappa del cielo di fotoni con energia > 100 MeV. E' stata prodotta combinando le osservazioni EGRET del primo anno di attività dell'Osservatorio Compton. Fonte: NASA/EGRET, [4].

3.1.1 Raggi cosmici

I raggi cosmici sono particelle ultra-relativistiche ad alta energia (possono andare dai 0.511 MeV ai 10^{20} eV) formate da protoni e nuclei atomici per il 98% e da elettroni per il 2%.

I raggi cosmici possono essere divisi in due categorie:

- *componente primaria:* è la componente inalterata, formata prevalentemente da protoni, nuclei di elio, elementi più pesanti e, in piccola frazione, da elettroni;
- *componente secondaria:* è quella che nasce attraverso gli urti che avvengono tra le particelle della componente primaria con le molecole dell'atmosfera terrestre. Da queste collisioni nascono muoni, elettroni, positroni, neutrini e fotoni. La componente secondaria può essere generata anche attraverso la collisione con l'ISM. Dalle collisioni con il mezzo interstellare all'interno della galassia si possono formare pioni (positivi, negativi, neutri). Il pione neutro decade e produce 2 raggi gamma.

Lo spettro energetico dei raggi cosmici segue approssimativamente una legge di potenza spezzata della forma:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

con γ indice spettrale con un valore che varia da $\simeq 2.7$ a $\simeq 3.1$.

3.1.2 Bremsstrahlung relativistica

Gas caldo emette sempre per Bremsstrahlung, parola tedesca che significa "radiazione di frenamento". Questa emissione avviene quando un elettrone, essendo accelerato dal campo coulombiano di uno ione, irradia, e pertanto viene "frenato". Fra elettrone e ione, la componente che considereremo emettitrice di radiazione sarà sempre l'elettrone. Si tratta di un'emissione del tipo free-free, nel senso che l'elettrone perde energia passando da uno stato non legato ad un altro stato non legato.

Se l'elettrone possiede una velocità prossima a quella della luce ($v \approx c$) parliamo di Bremsstrahlung relativistica. L'emissività $J(\nu)$ di questo processo, contrariamente alla Bremsstrahlung classica, non dipende dalla temperatura del mezzo. Inoltre, se l'energia degli elettroni relativistici segue una distribuzione a legge di potenza, $n_e(E) \approx n_{e,0} E^{-\delta}$, otteniamo che anche lo spettro di emissione per Bremsstrahlung relativistica seguirà una legge di potenza dipendente dall'esponente dell'energia degli elettroni:

$$J_{br,rel}(\nu) \approx \nu^{-(\delta-1)}$$

3.1.3 Inverse Compton

L'Inverse Compton è un processo di scattering in cui un elettrone relativistico, con energie cinetica maggiore di quella di un fotone, collide con quest'ultimo e gli cede parte della sua energia accelerandolo. L'energia ricevuta è strettamente collegata all'angolo di scattering. La massima quantità di energia trasferita si ha quando avviene un urto frontale, e vale:

$$\epsilon_f \approx 4\gamma^2 \epsilon_i$$

dove ϵ_i rappresenta l'energia del fotone prima dell'urto.

Attraverso questo processo, i fotoni con frequenza nel visibile possono diventare raggi γ .

3.2 Raggi X

Con energia leggermente inferiore ai raggi γ troviamo i raggi X, onde elettromagnetiche con frequenza fra 3×10^{16} e 3×10^{19} Hz. Come per i raggi γ , anche questa banda deve essere osservata fuori dall'atmosfera a causa di fenomeni di assorbimento che ne impediscono la rilevazione dalla superficie terrestre.

La sorgente principale di questa radiazione è l'HIM presente nel bulge delle galassie, ossia dove il gas raggiunge temperature di $\sim 10^7$ - 10^8 . I processi che portano all'emissione di raggi X in questa regione sono principalmente due: la bremsstrahlung termica, la quale fornisce un'emissione nel continuo, e le transizioni bound-bound, che generano emissioni in riga.

Anche le stelle binarie, formate da una stella di neutroni rotante magnetizzata o da un buco nero, creano una forte sorgente di raggi X. La fonte è la caduta di materia trasferita dalla stella primaria, attraverso il processo noto come accrescimento. Infine tutte le stelle, in funzione della loro temperatura, emettono radiazione X.

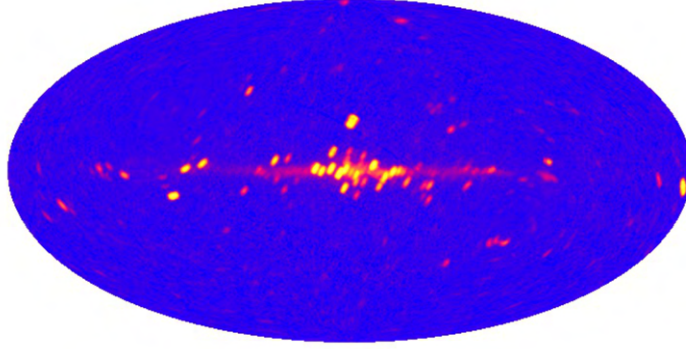


Figura 4: L'immagine mostra le sorgenti a raggi X più brillanti nella Via Lattea. I raggi X osservati (energie da 1-60 KeV) sono prodotti da nane bianche, pulsar, resti di supernovae. Fonte: NASA/HEAO-1 A2, [6].

3.2.1 Bremsstrahlung termica

Parliamo di Bremsstrahlung termica quando gli ioni e gli elettroni, che compongono la nube di gas, si trovano all'equilibrio termodinamico. In questa situazione le velocità delle particelle seguiranno la distribuzione di Maxwell-Boltzmann.

Le due particelle, elettrone e ione, interagiscono fra di loro in un tempo della durata di $\delta t = 2b/v$, dove b rappresenta il parametro di impatto, cioè la distanza minima fra le 2 particelle se non cambiassero traiettoria. Durante questa interazione, l'emissività specifica di una nube che emette per Bremsstrahlung termica è:

$$J_{br}(\nu, T) = 6.8 \cdot 10^{-38} T^{-1/2} e^{-h\nu/kT} n_e n_z Z^2 \bar{g}_{ff}(\nu, T)$$

dove l'esponenziale deriva dalla distribuzione di Maxwell-Boltzmann, \bar{g} rappresenta il fattore di Gaunt medio, n_e e n_z sono le densità numerica di elettroni e dei nuclei. Possiamo riscrivere l'emissività solo in funzione delle quantità variabili, ricordando che in astrofisica solitamente abbiamo che $n_e \simeq n_z$:

$$J_{br}(\nu, T) \propto n_e^2 T^{-1/2} e^{-h\nu/kT}$$

3.3 Radiazione Ultravioletta

L'atmosfera è principalmente opaca alla radiazione Ultravioletta (UV), quindi le osservazioni dovranno essere svolte al di sopra dell'atmosfera. Infatti, con una frequenza $10^{15} \leq \nu \leq 3 \times 10^{16}$ Hz, la radiazione UV viene assorbita dalle molecole di ozono, le quali permettono solo al 9% della radiazione di arrivare sulla superficie terrestre.

Una fonte di radiazione nel lontano UV sono i nuclei galattici attivi. Oltre alla radiazione osservabile direttamente, la radiazione continua, emessa dagli AGN, eccita un'ampia gamma di ioni e atomi che emettono forti righe di risonanza visibili in questa banda.

Altre fonti emettitrici in questa banda sono: nane bianche calde, stelle calde e giovani. Queste fonti ci permettono di individuare facilmente le regioni di formazione stellare all'interno dei bracci della spirale.

Un problema di compiere osservazioni nell'UV è dato dall'assorbimento fotoelettrico da parte dell'idrogeno neutro per lunghezze d'onda inferiori a 91.2 nm.

3.4 Spettro Visibile

I fotoni della banda ottica hanno una frequenza compresa fra 3×10^{14} e 10^{15} Hz. Osservando la galassia in questo spettro vedremo la luce proveniente dalle stelle, le quali hanno un'emissione nel continuo simile all'emissione di un corpo nero. Data la lunghezza d'onda ancora piccola, avremo degli oscuramenti nelle osservazioni delle galassie dovuti agli ammassi di polvere che assorbono o riflettono la luce incidente, quindi non tutte le fonti di "luce visibile" saranno osservabili. Oltre alle stelle, anche le regioni di HII emettono radiazione nella banda ottica.

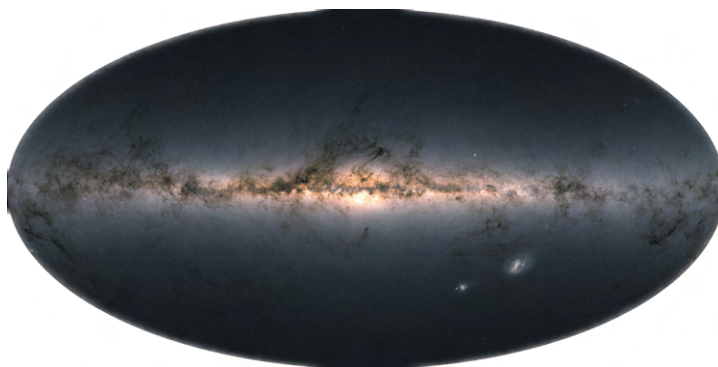


Figura 5: Mappa dell'intero cielo ripreso dal satellite Gaia dell'ESA. La luminosa struttura orizzontale che domina l'immagine è il piano della nostra galassia, il quale racchiude la maggior parte delle stelle della Via Lattea. Le regioni più scure del piano galattico corrispondono a nubi di ISM, che assorbe la luce delle stesse poste in secondo piano rispetto alle nubi. Fonte: ESA/Gaia EDR3, [3].

3.4.1 Corpo nero delle stelle

L'emissione di fotoni dalla fotosfera delle stelle è molto vicina all'emissione di corpo nero. Un corpo nero è un corpo ideale, in grado di assorbire tutta la radiazione incidente senza rifletterla; la radiazione viene poi riemessa dalle pareti fino a quando, dopo un certo intervallo, si raggiunge l'equilibrio termico. Operato un piccolo foro sulla superficie del corpo e prelevando un campione della radiazione interna all'equilibrio, notiamo che la radiazione misurata sarà dipendente esclusivamente dalla temperatura, T , e dalla frequenza, ν . Inoltre l'andamento di questa radiazione verrà descritto dalla funzione di Planck:

$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

con h costante di Planck, c velocità della luce e k costante di Boltzmann. Dalle osservazioni sperimentali si possono ricavare 2 leggi per i corpi neri:

- Legge di Stefan-Boltzmann: afferma che l'energia, $u(T)$, irradiata nell'unità di tempo e superficie è proporzionale alla quarta potenza della temperatura;

$$u(T) \propto T^4$$

- Legge dello spostamento di Wien: afferma che i massimi della distribuzione di energia in funzione della lunghezza d'onda seguono la legge di proporzionalità

$$T\lambda_{max} = 0.29K \cdot cm$$

3.5 Radiazione Infrarossa

La radiazione infrarossa (IR) rappresenta l'intervallo di frequenza tra 300 GHz e 3×10^{14} Hz. Rispetto alla radiazione ottica, quella infrarossa subisce in misura minore gli effetti dell'estinzione dovuti alle polveri interstellari, tuttavia difficilmente la radiazione arriva a terra e quindi bisogna utilizzare satelliti o palloni sonda per rilevarla.

Gli emettitori di IR sono tutti oggetti relativamente freddi, $10 < T < 1000$ K, come: pianeti, stelle fredde, nane brune, protostelle, involucri di giganti rosse fredde, ma anche nuclei galattici attivi. Per lunghezze d'onda superiori ai $3\mu m$ diventano forti emettitori infrarossi anche i granelli di polvere del mezzo interstellare.

Il processo per il quale i granelli di polvere emettono radiazione nello spettro infrarosso viene chiamato reddening, o arrossamento, degli spettri. Consiste nell'assorbimento di raggi ottici e UV da parte della polvere e la conseguente emissione nello spettro IR. La riemissione segue l'andamento di corpo grigio in quanto le polveri non si trovano a temperature uniformi.

Possiamo considerare la radiazione infrarossa divisa in tre parti: far (vicina alle microonde), mid, near (vicina alla banda della luce visibile). Osserveremo principalmente

le near-IR nei bracci della spirale, dovute alle stelle, mentre le far-IR saranno concentrate prevalentemente nelle regioni centrali dei nuclei galattici attivi.

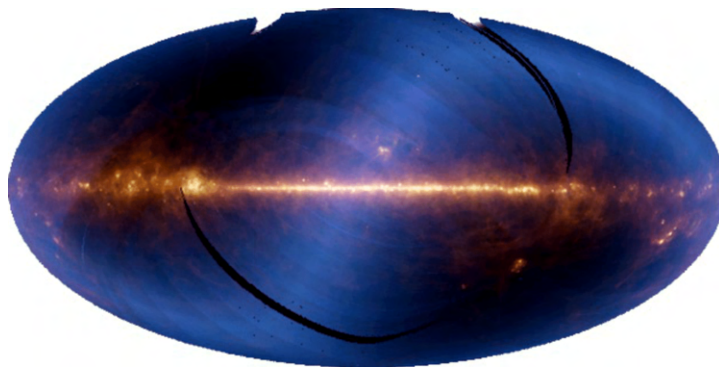


Figura 6: Immagine della Via Lattea, vista nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso, assemblata da dati dell'Infrared Astronomical Satellite (IRAS). Il blu rappresenta una lunghezza d'onda di 12 micron; il verde 60 micron e il rosso 100 micron. Quindi gli oggetti più caldi appaiono blu o bianchi, mentre quelli rossi sono più freddi. La banda luminosa orizzontale è il piano della Via Lattea, con il centro della Galassia situato al centro dell'immagine. Gli oggetti celesti visibili nella foto sono regioni di formazione stellare nella costellazione di Ofiuco (direttamente sopra il Centro Galattico) e Orione (i due punti più luminosi sotto il piano, all'estrema destra). Le strisce nere sono regioni del cielo che non sono state scandite dal telescopio nei suoi primi sei mesi di funzionamento. Fonte: ESA, [7].

3.6 Banda Radio

La banda delle onde Radio si estende dai $3Hz$ ai $300GHz$; in questo intervallo sono comprese le onde lunghe, medie, corte e le microonde. Le onde Radio di origine estraterrestre vennero scoperte da Jansky nei primi anni del 1930 attraverso esperimenti a terra, ma ha basse frequenze ($1 - 10 MHz$) le osservazioni diventano difficili a causa della presenza della ionosfera.

3.6.1 Onde Radio $3Hz \leq \nu \leq 30GHz$

Le emissioni radio provengono da fonti astronomiche molto diverse fra di loro, infatti alcuni processi di emissione possono essere associati a fenomeni osservati nello spettro visibile, come il processo free-free o il processo di bremsstrahlung di elettroni caldi in regioni di idrogeno ionizzato. La maggior parte delle onde provengono da sorgenti che emettono attraverso radiazione di sincrotrone di elettroni ultra-relativistici, i quali si muovono a spirale nei campi magnetici. Queste emissioni non sono originate dalla galassia

stessa, ma provengono principalmente da enormi lobi radio, che si estendono anche oltre i confini della galassia.

Altre fonti da cui provengono emissioni radio consistenti sono: i resti di SN, le quali emettono per sincrotrone, e le quasar (quasi-stellar radio sources).

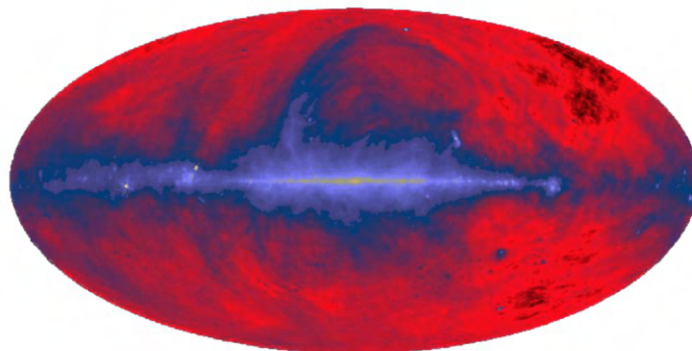


Figura 7: Immagine di tutto il cielo alla frequenza di 408 MHz. Le onde radio vicine a questa frequenza sono generate da processi di sincrotrone. Nell'immagine il piano galattico corre orizzontalmente attraverso il centro. Le sorgenti luminose vicine al piano sono pulsar distanti, regioni di formazione stellare e resti di supernovae. Le grandi strutture ad anello sono pezzi di bolle esplose dall'attività stellare locale. Fonte: NASA, [2].

Oltre ad avere emissioni nel continuo, questa banda è caratterizzata da un'emissione in riga molto importante per lo studio della struttura e della dinamica delle galassie a spirale, la riga a 21 cm dell'atomo di idrogeno neutro (1420 MHz), *Figura 8*. In un atomo di H, quando gli spin relativi del protone e dell'elettrone cambiano, si avrà emissione di energia. Il fotone emesso da questo processo avrà una lunghezza d'onda pari a 21 cm.

Anche se questa transizione è proibita, riscontriamo così tanto idrogeno neutro che la transizione diventa facilmente rilevabile. La maggior concentrazione di HI si ha nel WNM, cioè nel disco della galassia. Mentre si osserva una deficienza di idrogeno nel bulge, soprattutto nel caso di galassie con un cospicuo rigonfiamento centrale.

Infine si possono osservare righe di emissione del radicale idrossile, OH, nel range 1.6–1.7 GHz.

3.6.2 Onde millimetriche e submillimetriche $30\text{GHz} \leq \nu \leq 300\text{GHz}$

Questa banda è caratterizzata dalla presenza di righe molecolari, associate a transizioni roto-vibrazionali, e dalla Cosmic Microwave Background Radiation (CMBR), diffusa uniformemente con uno spettro di corpo nero perfetto a una temperatura di radiazione di 2.728 K. Dato che in questo spettro le onde vengono facilmente assorbite dalle molecole

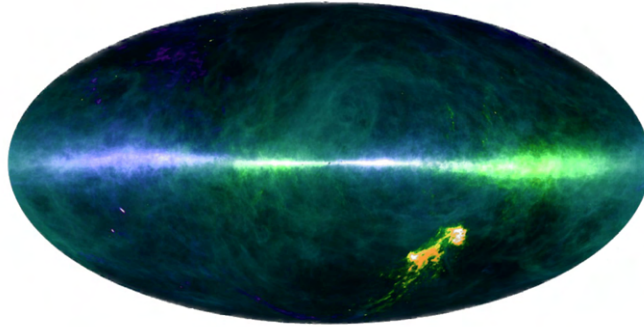


Figura 8: Osservazione della Via Lattea alla frequenza di 1420 MHz (lunghezza d'onda di 21cm) mette in risalto la presenza dell'idrogeno. Viene mostrata l'abbondanza dell'HI con la luminosità, mentre la velocità con il colore. La banda al centro rappresenta sempre il piano della nostra galassia. Fonte: NASA, [1]

presenti nella nostra atmosfera, le osservazioni devono essere svolte da siti elevati e secchi, o addirittura al di fuori dell'atmosfera terrestre.

Le righe di emissione molecolari si osservano sul disco della galassia, sono particolarmente intense nelle regioni di formazione stellare e nelle nubi molecolari di gas freddo. Le molecole più comuni rilevabili sono l'idrogeno molecolare e il monossido di carbonio, CO.

3.6.3 Sincrotrone

La radiazione di sincrotrone avviene quando una carica ultra-relativistica interagisce con un campo magnetico. La radiazione così creata non è isotropa ma viene emessa principalmente nella direzione della velocità. Questo effetto viene chiamato beaming relativistico. La potenza emessa per ogni singola particella, la quale segue la formula di Larmor, può essere scritta:

$$P = \frac{2q^4}{3m^2c^3} \beta^2 H^2 \sin^2 \theta$$

Inoltre possiamo individuare una frequenza caratteristica per l'emissione di un singolo elettrone, la quale è proporzionale al fattore di Lorentz al quadrato e al campo magnetico:

$$\nu_s \simeq 4.2 \cdot 10^{-9} \gamma^2 H$$

se il campo magnetico viene misurato in microGauss otterremo una frequenza in GHz. L'inversa di questa relazione è molto importante in quanto osservando la frequenza caratteristica si può calcolare una stima approssimativa del campo magnetico in cui è stata prodotta la radiazione.

4 Onde gravitazionali

Fino ad ora abbiamo parlato delle emissioni osservabili attraverso le onde elettromagnetiche. Ma negli ultimi anni, attraverso la creazione degli interferometri LIGO e VIRGO, siamo in grado di rilevare ed analizzare un altro tipo di emissione prodotta dai corpi che compongono le galassie. Stiamo parlando delle **onde gravitazionali**, "increspature" nello spazio-tempo causate da alcuni dei processi più violenti ed energetici dell'Universo. Il primo a predirle fu Albert Einstein nel 1916 nella sua teoria della relatività generale. Attraverso la matematica di Einstein si arrivò alla conclusione che oggetti massicci in accelerazione (come coppie orbitanti di buchi neri e stelle di neutroni, o esplosione di stelle massicce) dovrebbero produrre queste "increspature" cosmiche che viaggiano alla velocità della luce e trasportano informazioni, sia sulle loro origini che sulla natura della gravità stessa.

Sebbene Einstein avesse predetto l'esistenza delle onde gravitazionali nel 1916, la prima rilevazione effettiva avvenne circa 100 anni dopo. Esattamente il 14 settembre 2015, LIGO percepì fisicamente le ondulazioni nello spazio-tempo causate dalle onde gravitazionali generate da due buchi neri in collisione.

I ricercatori che operano con LIGO hanno definito quattro categorie di onde gravitazionali in base alla fonte generatrice:

- **Continuous Gravitational Waves:** si ipotizza che le onde gravitazionali continue siano generate da un singolo corpo massiccio rotante (come una stella di neutroni) avente protuberanze o imperfezioni nella sua forma sferica;
- **Compact Binary Inspiral Gravitational Waves:** tutte le emissioni rilevate, finora, da LIGO rientrano in questa categoria. Queste onde sono generate da sistemi binari rotanti di oggetti massicci e densi, come stelle nane, buchi neri e stelle di neutroni. Anche se il sistema binario è formato da oggetti differenti, il meccanismo di generazione delle onde è lo stesso e viene chiamato "Inspiral";
- **Stochastic Gravitational Waves;**
- **Burst Gravitational Waves.**

Le galassie a spirale, come già detto in precedenza, sono formate da una grande varietà di corpi, non è quindi strano trovare eventi da cui nascono onde gravitazionali. Attraverso il continuo perfezionamento degli strumenti di rilevamento e con una sempre maggiore comprensione di queste "increspature", sarà più facile captare queste emissioni ed analizzarle, che siano esse provenienti dalle galassie a spirale o altre strutture dell'Universo.

Bibliografia

- [1] *Astronomy Picture of the Day. HI4PI: The Hydrogen Sky.* url: <https://apod.nasa.gov/apod/ap161024.html>.
- [2] *Astronomy Picture of the Day. The Radio Sky: Tuned to 408MHz.* url: <https://apod.nasa.gov/apod/ap050205.html>.
- [3] *The colour of the sky from Gaia's Early Data Release 3.* url: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/12/The_colour_of_the_sky_from_Gaia_s_Early_Data_Release_3.
- [4] *EGRET All-Sky Map.* url: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/cgro/cgro/egret_allsky.html.
- [5] *Gaia map of interstellar dust in the Milky Way.* url: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2022/06/Gaia_map_of_interstellar_dust_in_the_Milky_Way.
- [6] *HEAO-1 A2 World Wide Web GIF image browser.* url: https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/hea01/hea01a2_gifbrowser.html.
- [7] *Infrared All-Sky survey by IRAS.* url: <https://sci.esa.int/web/herschel/-/59596-infrared-all-sky-survey-by-iras>.
- [8] *LIGO Caltech.* url: <https://www.ligo.caltech.edu/page/gw-sources>.
- [9] J.J. Binney and S. Tremaine. *Galactic Dynamics*. Princeton University press, 2008.
- [10] E. Ceccotti. *Processi di radiazione e MHD*. Dispense, 2017.
- [11] L. Ciotti. *Astrofisica extragalattica*. Appunti, 2022.
- [12] D. Dallacasa. *Processi di radiazione e MHD*. Dispense e Appunti, 2021.
- [13] C. Fanti and R. Fanti. *Una finestra sull'Universo "Invisibile"*. Lezioni di radioastronomia, Bologna, 2012.
- [14] C. Gruppioni. *On the absorption and emission properties of interstellar dust grains*. Dispense, 2013.
- [15] P.W. Hodge. *Galaxies*. Harvard University Press, 1986.
- [16] H. Mo, F. van den Bosch, and S. White. *Galaxy formation and evolution*. Cambridge University Press, 2010.

- [17] A.M. Rossi. *Lo spettro elettromagnetico*. Dispense Fisica generale II, Corso di Laurea in Fisica, 2009/2010.