

ALMA Mater Studiorum  
Universita' degli di Studi Bologna

---

---

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea in Astronomia

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Caratteristiche principali dell'emissione di  
galassie ellittiche

25 giugno 2015

Elaborato Finale

Candidato:

Matteo Angelinelli

Relatore:

Chiar.mo Prof.:

Daniele Dallacasa



---

---

Sessione 1^  
Anno Accademico 2014/2015

# Introduzione

In questo elaborato esporrò i principali meccanismi di emissione delle galassie ellittiche. Ho deciso di riportare prima dei meccanismi di emissione quelle che sono le tre leggi fondamentali per la descrizione di una galassia ellittica.

L'elaborato ha lo scopo di spiegare cosa noi capiamo dai vari tipi di emissione e quali conclusioni possiamo trarne, senza entrare nei dettagli di quelli che sono le leggi che descrivono il singolo processo. Vengono comunque introdotti i concetti fondamentali per i meccanismi di Corpo Nero, Bremsstrahlung e Sincrotrone, attraverso i quali descriverò tre bande osservate: ottica, raggi X, radio.

# Indice

<b>1</b>	<b>Struttura delle Galassie e leggi fondamentali</b>	<b>1</b>
1.1	Classificazione di Hubble . . . . .	1
1.2	Leggi Fondamentali . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Processi di Emissione</b>	<b>7</b>
2.1	Banda Ottica . . . . .	8
2.2	Banda X . . . . .	10
2.3	Banda Radio . . . . .	13
	<b>Bibliografia</b>	<b>16</b>

# Capitolo 1

## Struttura delle Galassie e leggi fondamentali

### 1.1 Classificazione di Hubble

La divisione delle galassie in Spirali, Irregolari ed Ellittiche è una classificazione dovuta a Edwin Hubble, sviluppata intorno al 1936. Tale classificazione fu fatta su basi teoriche completamente sbagliate. Hubble infatti riteneva che lo schema da lui proposto fosse una sequenza evolutiva delle galassie. Nell'immagine seguente riporto la classificazione di Hubble.

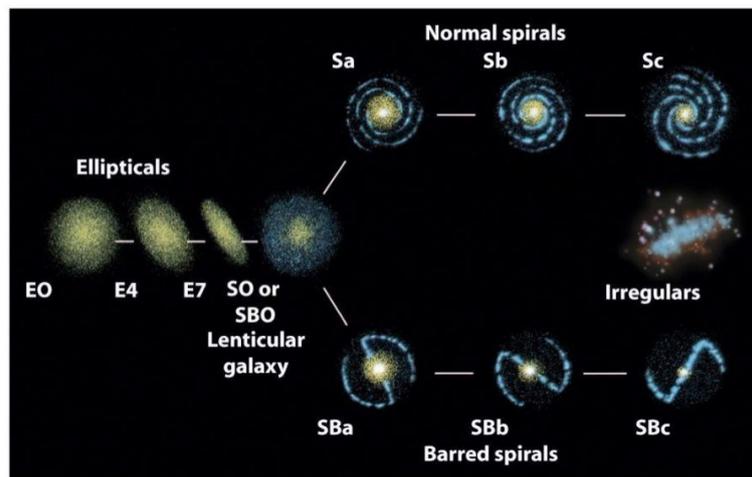


Figura 1.1: Classificazione delle galassie di Hubble - Sito Web University of Georgia - [physast.uga.edu](http://physast.uga.edu)

La divisione in E0, E1 e seguenti è fatta definendo l'*ellitticità* come:

$$\epsilon = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)$$

dove  $a$  è il semiasse maggiore e  $b$  è il semiasse minore.

Dalle osservazioni non si sono mai viste galassie ellittiche con indice di ellitticità maggiore di 7. Questo infatti è il limite oltre il quale dinamicamente la galassia tenderebbe a disgregarsi per instabilità.

Per quanto riguarda la popolazione stellare presente nelle galassie ellittiche, si osservano tipicamente stelle di tipo K e M (stelle rosse), che rappresentano un popolazione molto vecchia. Ciò è anche indice di un basso rate di formazione stellare.

Lo studio delle Supernovae invece ci mostra come siano presenti solo quelle di tipo Ia, mentre quelle di tipo II non si sono mai osservate. Dobbiamo anche però precisare che le stelle delle galassie ellittiche presentano una metallicità elevata benché di formazione antica. All'interno delle galassie ellittiche troviamo poco gas freddo, costituito da polveri e gas di idrogeno, mentre nell'alone che le circonda si osserva gas molto caldo ( $10^6 - 10^7$  °K) responsabile come vedremo dell'emissione in banda X.

## 1.2 Leggi Fondamentali

Lo studio di Galassie ellittiche ha portato alla formulazione di alcune leggi empiriche, che ne descrivono le caratteristiche in base a grandezze osservate e ne permettono un studio dinamico ed evolutivo dettagliato.

Sul finire degli anni '40 Gérard De Vaucouleurs, andando contro l'usanza del tempo di fittare i dati sperimentali per sviluppare argomenti teorici, formulò la legge empirica che da lui prende il nome.

De Vaucouleurs misurò la *luminosità totale dell'oggetto* in questione, assumendone una simmetria sferica e applicò la formula:

$$L_t = 2\pi \int_0^\infty R I(R) dR$$

Successivamente misurò e definì il *raggio effettivo*  $R_e$  come:

$$\frac{L_t}{2} = 2\pi \int_0^{R_e} R I(R) dR$$

ovvero il raggio a cui si misura metà della luminosità dell'oggetto.

Costruendo il profilo di brillantezza delle galassie osservate dove nell'asse Y posizionò la brillantezza normalizzata alla brillantezza centrale e nell'asse X il raggio normalizzato al raggio effettivo  $R_e$ , ottenne il seguente grafico:

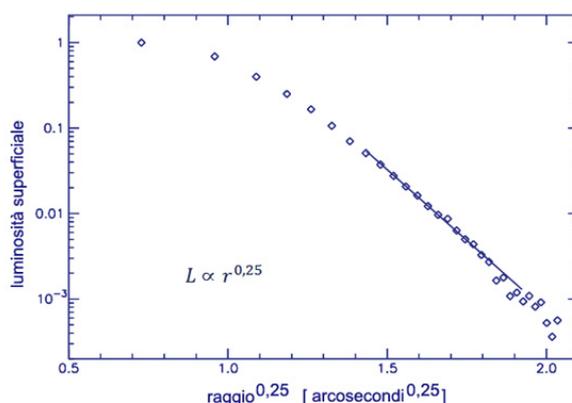


Figura 1.2: Legge di De Vaucouleurs - Sito Web Associazione Culturale il Sestante - ac-ilsestante.it

Come già riportato nel grafico tale profilo prende il nome di *Profilo di De Vacouleurs*, che si scrive nella forma:

$$I(R) = I_0 e^{-7.67(\frac{R}{R_e})^{\frac{1}{4}}}$$

Nota come *Legge di De Vacouleurs* o *Legge  $R^{\frac{1}{4}}$* .

Intorno al 1975, in seguito a studi sulla dispersione delle velocità di rotazione delle stelle nelle galassie ellittiche, fu pubblicato da Sandra Faber e Robert Earl Jackson una seconda legge empirica riguardante tali galassie, la quale pone in relazione *luminosità totale assoluta e dispersione di velocità* secondo la seguente proporzionalità:

$$L \propto \sigma^4$$

Da cui si ottiene il grafico:

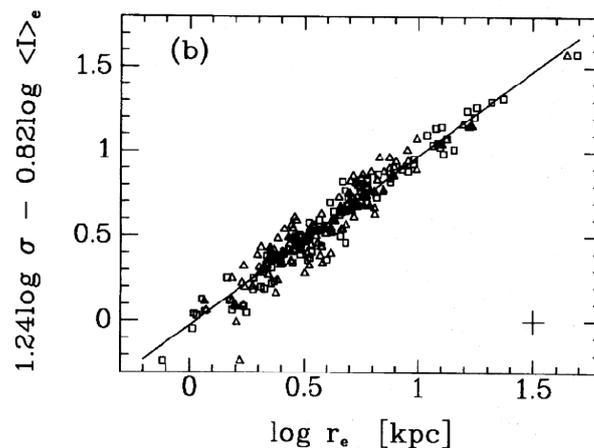


Figura 1.3: Legge di Faber-Jackson - Sito Web Durham Universtiy - [icc.dur.ac.uk](http://icc.dur.ac.uk)

L'importanza di tale legge risiede nel fatto che conoscendo la luminosità assoluta e quella osservata (semplicemente con una osservazione al telescopio) posso costruire la *scala delle distanze*.

Il problema della Faber-Jackson è che il profilo nel diagramma  $\log L$ - $\log \sigma$  non è rappresentato da una linea ma da una banda di larghezza  $\frac{\Delta L}{L}$  circa 0.4. Ciò

significa che a data  $\sigma$  non siamo in grado di determinare  $L$  con una precisione migliore di un fattore 2, il quale si ripercuote poi nel calcolo della distanza. Negli stessi anni di Faber e Jackson, John Kormendy trovò una terza legge empirica la quale questa volta lega *luminosità assoluta* e *raggio effettivo* e li lega in proporzione secondo:

$$L \propto R_e$$

Che genera un grafico:

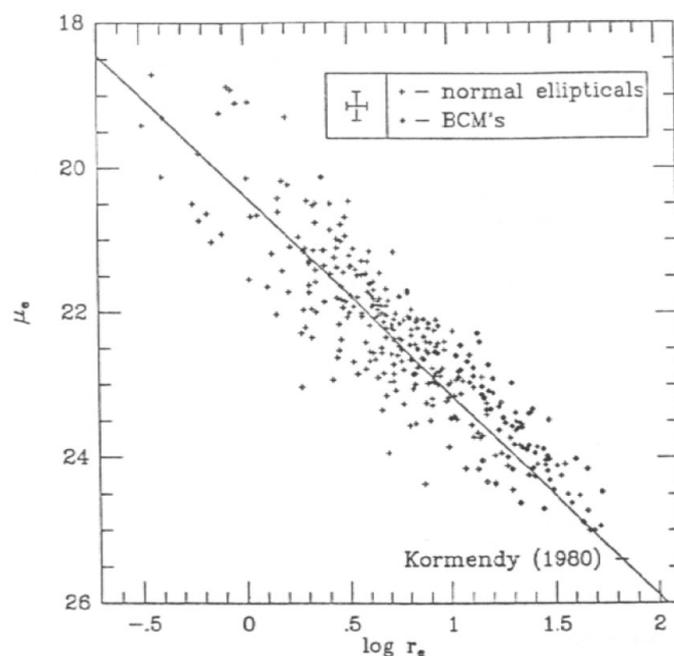


Figura 1.4: Legge di Kormendy - Sito Web Cosmos - astronomy.swin.edu.au

ovvero galassie più luminose hanno un raggio effettivo più grande. Anche in questo caso però nel profilo non si ha una linea netta, ma una banda. Negli anni successivi si cercano altre leggi empiriche per descrivere la dinamica delle galassie ellittiche ma senza risultati. Negli anni '80 si decise quindi di utilizzare un strumento statistico noto come *Principal Component Analysis (PCA)* usando come parametri le caratteristiche delle galassie.

Si scoprì che solo  $L$ ,  $\sigma$ , e  $R_e$  sono grandezze correlate da una relazione:

$$\alpha \log L + \beta \log \sigma + \gamma \log R_e = c$$

noto come *Piano Fondamentale delle Galassie Ellittiche*. L'importanza di tale piano è che riduce gli errori di stima dal 40% al 3 – 4%. Inoltre si nota come il sistema descritto da tale piano sia un sistema virializzato, ma che senza tenere conto del modello unico per l'evoluzione delle galassie, e considerando come era stato fatto solo il Teorema del Viriale, non si spiega la natura delle galassie ellittiche descritte nel piano.

## Capitolo 2

### Processi di Emissione

Le galassie ellittiche vengono studiate in diverse tipi di bande osservative. Di seguito vengono analizzate tre bande diverse: ottica, X, radio. Ad ogni banda in emissione è associato un meccanismo emissivo diverso e nei paragrafi seguenti ne analizzerò le caratteristiche principali e le informazioni che ne traiamo. Riporto una SED (Spectral Energy Distribution) della galassia M87, nota con il nome di Virgo A, una delle più massive galassie ellittiche osservate da Terra.

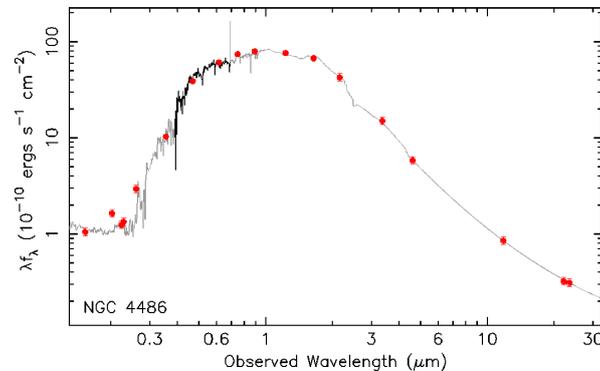


Figura 2.1: SED M87 - Sito Web NED - sed.ipac.caltech.edu

## 2.1 Banda Ottica

Il principale meccanismo responsabile dell'emissione in banda ottica è l'emissione di *Corpo Nero*. Tale emissione è descritta dalla formula scoperta da Max Planck intorno 1900, la quale è:

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

se espressa in funzione della frequenza di emissione  $\nu$ , mentre è:

$$B(\lambda, T) = 2 \frac{hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{-\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \frac{W}{m^2 sr \mu m}$$

se espressa in funzione della lunghezza d'onda  $\lambda$ .

L'importanza di tale legge è che ci permette di graficare la *Brillanza Superficiale* in funzione di  $\lambda$  o di  $\nu$ . Da tali grafici possiamo vedere come la dipendenza dalla temperatura modifichi il colore dell'oggetto che stiamo vedendo. Come si nota dall'immagine sotto, vediamo che oggetti più freddi hanno colori più tendenti al rosso, mentre più la temperatura sale e più il corpo è blu.

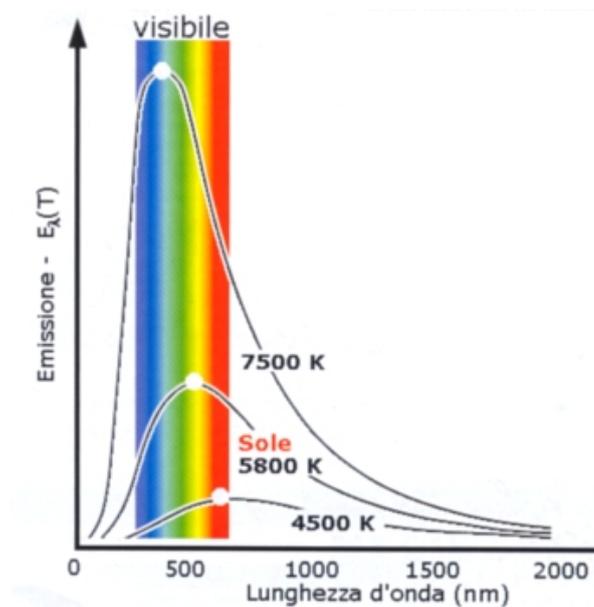


Figura 2.2: Curve di Corpo Nero - Sito Web Kerna Italia - news.kerna.it

Dall'analisi fotometrica delle galassie ellittiche si vede come queste siano di colore rosso. Ciò significa che le stelle che le compongono sono di classe spettrale K e M, ovvero a bassa temperatura. Questo perché il continuo di Corpo Nero che si vede in una SED di una galassia è irradiato dalle stelle che compongono la galassia stessa.

L'analisi spettroscopica però ci mostra come la curva di Corpo Nero non sia perfettamente continua, ma presenta alcune *righe* dette righe di *emissione* o di *assorbimento*. La radiazione che giunge ai nostri strumenti di rilevazione, come detto prodotta dalle stelle, deve attraversare il mezzo interstellare. Tale mezzo, composto da gas e polveri, interagisce con la radiazione che vi incide attraverso meccanismi di assorbimento ed emissione. Queste fenomeni provocano un cambiamento nello spettro, perché in base alla densità e natura del mezzo, generano rispetto al continuo dei cambi di intensità della luminosità. Conoscendo, da studi in laboratorio, le righe di emissione e assorbimento dei vari elementi, è possibile confrontando i dati sperimentali con i dati di laboratorio, risalire alla composizione chimica del mezzo che circonda le galassie. Si è notato che nelle galassie ellittiche rispetto alla galassie a spirale la presenza di ISM freddo (InterStellar Medium) è notevolmente inferiore, pressoché assente.

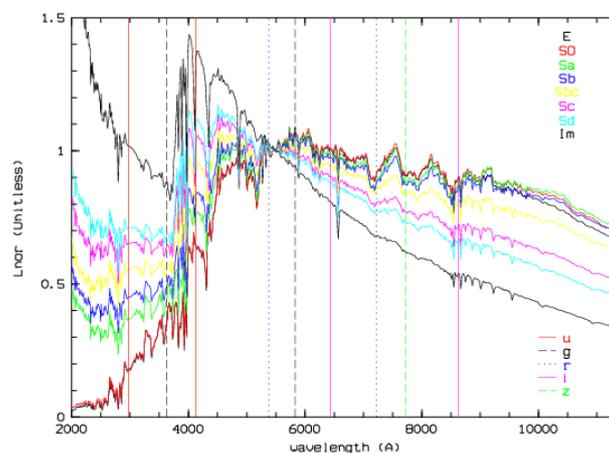


Figura 2.3: Confronto tra SED di Galassie Ellittiche e Galassie a Spirale - Sito Web Astronomy Astrophysics - aanda.org

Dai grafici sopra si vede come la luminosità della galassia ellittica abbia il picco a lunghezze d'onda inferiori, e come gli effetti dell'emissione e assorbimento in riga siano decisamente meno marcati rispetto ai grafici delle galassie a spirale.

Le righe presenti comunque ci permettono di affermare che il poco ISM freddo presente è principalmente costituito da HI, CO e polveri.

## 2.2 Banda X

L'emissione in tale banda è dovuta alla *Bremsstrahlung termica* compiuta nell'alone di gas che circonda le galassie ellittiche. Tale alone composto da Hot Ionized Medium (HIM), circonda completamente la galassia stessa e si espande spazialmente ben oltre il raggio limite a cui si trovano le stelle. Nell'immagine sotto si nota questa caratteristica.

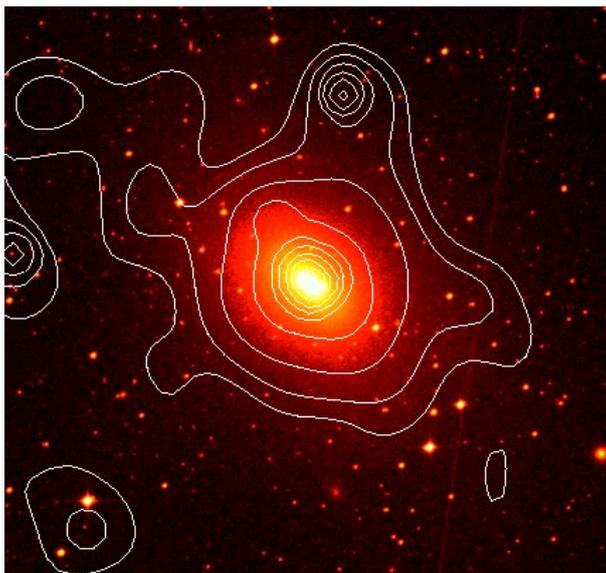


Figura 2.4: Emissione X di NGC 3923 (i bordi bianchi delimitano l'emissione X, mentre il fondo è costituito dall'immagine ottica) - Sito Web X-ray Astropysics - sr.bham.ac.uk

La radiazione emessa dall'accelerazione di una carica in un campo coulombiano di un'altra carica è detta *Bremsstrahlung* o emissione free-free. Nel-

l'HIM infatti il gas è alla temperatura di circa  $10^7$  K, la quale è ampiamente al di sopra del limite di ionizzazione per l'idrogeno (circa  $10^4$  K). In tale situazione il gas è quindi ionizzato e si ha un'elevata presenza di elettroni liberi e ioni. All'interno del plasma quindi si hanno interazioni tra cariche positive (ioni) e cariche negative (elettroni). Le cariche meno massive (gli elettroni) in tali interazioni subiscono quindi un'accelerazione e emettono radiazione.

L'emissività totale della nube è quindi data dalla formula:

$$J_{br}(\nu, T) = 6.8 \cdot 10^{-38} n_e n_z z^2 g_{ff}(\nu, T) T^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad \frac{erg}{s \text{ cm}^3 \text{ Hz}}$$

Dalla formula sopra si nota come l'emissività abbia due dipendenze forti: la temperatura e il termine esponenziale noto come *cut-off*. Gli altri termini infatti sono costanti ( $n_e$  e  $n_z$  sono il numero di elettroni e di ioni) o fattori correttivi ( $g_{ff}$  è il fattore di Gaunt che serve per le correzioni relativistiche).

Possiamo graficare il continuo di bremsstrahlung in piano emissività-frequenza:

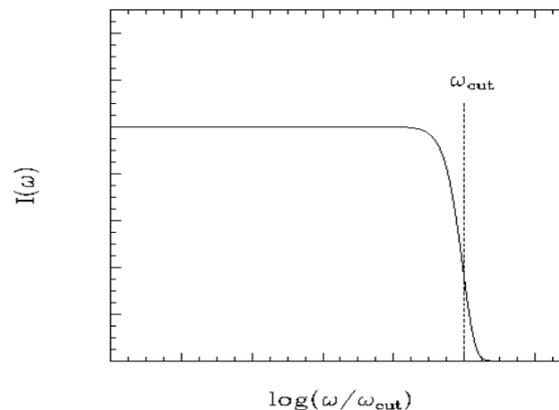


Figura 2.5: Diagramma Intensità-Frequenza per la Bremsstrahlung - Slide del Professore Dallacasa

Dove vediamo che l'emissività è praticamente costante in funzione della frequenza a meno del punto di cut-off. Grazie a questo comportamento dell'emissività riusciamo a sfruttare il cut-off in campo osservativo, in quanto conoscendo la frequenza siamo in grado, ponendo l'esponente del cut-off uguale a 1, di determinare la temperatura del plasma che stiamo osservando.

L'importanza della temperatura si nota invece quando passiamo da esprimere  $J_{br}$

da una funzione di  $v$  e  $T$ , alla sola variabile temperatura. Ciò è possibile perché l'emissività ha dipendenza dalla frequenza nel solo cut-off. Prendiamo quindi una determinata velocità per le particelle del plasma e esprimiamo la frequenza in funzione di tale velocità:

$$\frac{1}{2} m V^2 = h \nu$$

procediamo integrando tra una velocità minima uguale a 0 e una massima posta infinita (assurdo fisico ma permesso in matematica), la funzione  $J_{br}$ , ottenendo quindi l'energia emessa per unità di volume:

$$J_{br}(T) = 2.4 \cdot 10^{-27} n_e n_z z^2 \bar{g}_{ff}(T) T^{\frac{1}{2}} \quad \frac{erg}{s \text{ cm}^3}$$

Siamo quindi in grado di calcolare un parametro fondamentale che analizzato ci permetterà di capire un aspetto fondamentale della natura emissiva del HIM delle galassie ellittiche.

Definiamo il *tempo di raffreddamento* come il rapporto tra l'energia termica del plasma e la perdita per radiazione, e lo esprimiamo come:

$$t_{br} = \frac{E_{th}}{J_{br}} = \frac{\frac{3}{2} (n_e + n_p) kT}{J_{br}} = \frac{1.8 \cdot 10^4}{n_e \bar{g}_{ff}} T^{\frac{1}{2}} \quad [s]$$

o in anni che è più rappresentativo:

$$t_{br} = \frac{6 \cdot 10^3}{n_e \bar{g}_{ff}} T^{\frac{1}{2}} \quad [yr]$$

Inserendo nella formula temperature tipiche dell'HIM si vede che il tempo di raffreddamento è relativamente breve rispetto all'età delle galassie stesse. Ciò significa che noi non dovremmo essere in grado di osservare l'emissione per bremsstrahlung perché il gas dovrebbe già essersi raffreddato. Ma nella formula compare anche la densità del gas, la quale deve essere bassissima per permettere tempi di raffreddamento così elevati.

Lo studio del continuo di bremsstrahlung ci ha quindi permesso di ricavare importanti informazioni sulla natura del gas dell'alone galattico, come la sua densità e temperatura.

## 2.3 Banda Radio

Bisogna precisare che l'emissione in tale banda si osserva in quelle che vengono chiamate *Radio Galassie*. A questa famiglia di galassie sono associati i Quasar e gli AGN (Active Galactic Nuclei). I primi studi risalgono alla seconda metà del Novecento quando si ebbe lo sviluppo della radio-astronomia.

Da immagini in falsi colori vediamo come le Radio Galassie presentino una forma tra loro simili, costituite da un Nucleo Centrale e due Lobi dove si osserva il fenomeno dei Getti. Tale struttura è rappresentata nell'immagine sotto.

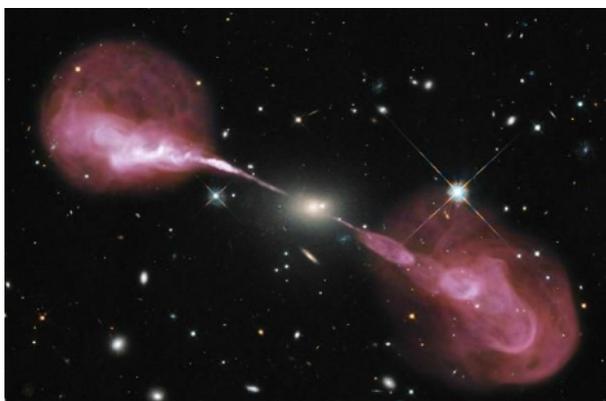


Figura 2.6: Radio Galassia in falsi colori - Sito web Galaxy Zoo - [blog.galaxyzoo.org](http://blog.galaxyzoo.org)

L'emissione osservata in questo tipo di galassie è da ricondurre a due fenomeni Sincrotrone e Inverse-Compton. Per entrambi questi processi si necessita di elettroni altamente relativistici, che si pensa siano prodotti da meccanismi di accelerazione di Fermi nei getti.

La radiazione di Sincrotrone è la radiazione di un elettrone ultrarelativistico la cui traiettoria è curvata da un campo magnetico. In tali condizioni si ha una emissività per il singolo elettrone pari a:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{2}{3} \frac{q^4}{m^2 c^2} \beta^2 \gamma^2 H^2 \sin^2 \theta \quad \frac{erg}{s}$$

Dove vediamo la dipendenza dalla velocità dell'elettrone ( $\beta$  e  $\gamma$ ), dal campo magnetico ( $H$ ). Come detto questa è l'emissività per il singolo elettrone, ma

noi dobbiamo considerare una nube di elettroni con una distribuzione spettrale di energia descritta da:

$$N(\epsilon) d\epsilon = N_0 \epsilon^{-\delta} d\epsilon$$

La quale ci porta a un'emissività totale della nube che è descritta da:

$$J_s(\nu) \sim N_0 H^{\frac{\delta+1}{2}} \nu^\alpha$$

E chiamiamo  $\alpha$  Indice Spettrale di Radiazione di Sincrotrone e lo definiamo come  $\frac{\delta-1}{2}$ . Sotto riporto un grafico dell'emissività in funzione della frequenza:

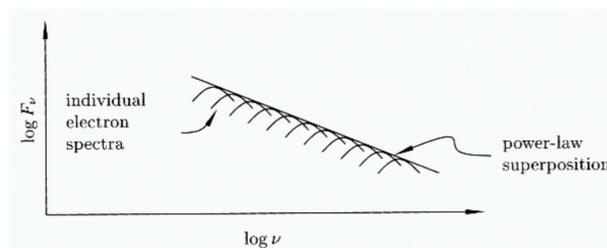


Figura 2.7: Relazione Emissività-Frequenza per la radiazione di Sincrotrone - Slide del Professore Dallacasa

Lo studio della radiazione di sincrotrone è fondamentale perché analizzando diversi spettri si è visto che vi è una relazione tra la forma dello spettro e la vita dell'oggetto osservato. Infatti se nello spettro troviamo dei punti di break o di cut-off (modifiche dell'indice spettrale e irripidimento o termine della curva) possiamo affermare che nella sorgente vi una continua emissione di particelle ultrarelativistiche, oppure se l'oggetto in questione non produce più particelle ed è al termine della sua fase evolutiva.

Come detto all'inizio della sezione dobbiamo descrivere un altro processo che è l'Inverse Compton. Tale processo descrive l'interazione tra gli elettroni ultrarelativistici e i fotoni poco energetici prodotti per sincrotrone dagli stessi elettroni. In tali condizioni si parla di Sincrotron Self Compton. Scriviamo la relazione di guadagno energetico per l'inverse compton:

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{4}{3} c \sigma_t \gamma^2 \beta^2 U_p h$$

dove notiamo una dipendenza da  $\gamma$  al quadrato e ne deduciamo che è provocata da cambiamenti energetici rilevanti. Il ruolo fondamentale di tale fenomeno è dunque quello di aumentare l'energia dei fotoni emessi per sincrotrone e quindi diminuire il flusso di fotoni radio che giungono a noi, aumentando i fotoni in banda X.

Lo studio in banda radio rapportata alla banda X viene utilizzata attraverso l'equipartizione per determinare il campo magnetico presente nella radio sorgente e ottenere quindi informazioni sulla natura della sorgente stessa.

# Bibliografia

Testi e Riferimenti:

Appunti delle lezioni del Professore Luca Ciotti

Appunti delle lezioni del Professore Daniele Dallacasa

The Nature of Elliptical Galaxies, Proceedings of the Second Strom-  
lo Symposium - Eds. M. Arnaboldi, G.S. Da Costa, P. Saha

Astrophysics processes di Brandt H.

Theoretical astrophysics vol. 3 (galaxies and cosmology) di Padmanabhan  
T.

Immagini:

1.1 Classificazione di Hubble

1.2 Legge di De Vacouleurs

1.3 Legge Faber-Jackson

1.4 Legge di Kormendy

2.1 SED M87

2.2 Curve di Corpo Nero

2.3 Confronto tra SED di galassie ellittiche e a spirale

2.4 Emissione X su immagine ottica

2.5 Diagramma intensità-Frequenza per la Bremsstrahlung - Slide delle lezioni del Professore Dallacasa

2.6 Radio Galassia

2.7 Grafico Emissività-Frequenza per il Sincrotrone - Slide delle lezioni del Professore Dallacasa