

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Astronomia

## Caratteristiche principali dell'emissione di galassie ellittiche

Presentata da:  
Ilaria Del Rosso

Relatore:  
Chiar.mo Prof.  
Daniele Dallacasa

Sessione III  
Anno accademico 2019-2020

## Sommario

Le galassie sono gli elementi costitutivi del nostro universo e questo elaborato vuole, in particolare, studiare le galassie ellittiche nella loro morfologia e la fisica che governa i processi d'emissione di radiazione che avvengono al loro interno. A tale proposito, dopo aver descritto la forma e la struttura delle galassie ellittiche (Sezione 1) e introdotto alcune delle leggi empiriche più importanti (Sezione 2), si porrà l'attenzione sui processi radiativi che caratterizzano tali galassie nella banda ottica, X e radio (Sezione 3), proponendo infine un esempio concreto facendo riferimento alla galassia ellittica M87 (Sezione 4).

# Indice

<b>1</b>	<b>Classificazione morfologica</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Leggi empiriche</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Emissione di radiazione</b>	<b>6</b>
3.1	Banda Ottica . . . . .	7
3.2	Banda X . . . . .	9
3.3	Banda Radio . . . . .	10
3.4	UV upturn . . . . .	11
<b>4</b>	<b>M87</b>	<b>12</b>

# 1 Classificazione morfologica

Una classificazione basata sulle varie forme delle galassie è quella avanzata da *Edwin Hubble* nel 1926. In Figura 1 è riportata la *sequenza di Hubble*, dove è possibile distinguere i tre tipi principali di galassie: *ellittiche*, *lenticolari* e *spirali*; inoltre Hubble introdusse anche una categoria di galassie *irregolari*.

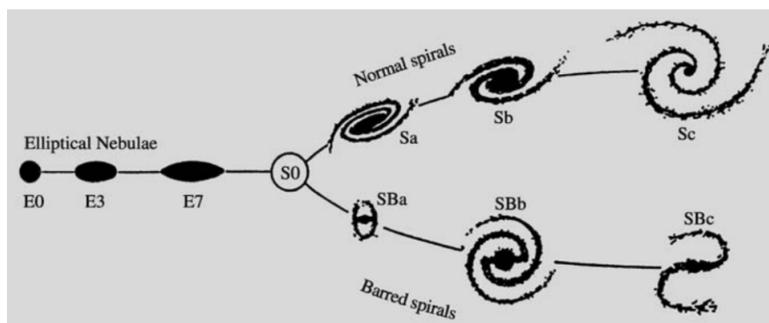


Figura 1: Sequenza di Hubble: la presenza a sinistra delle galassie ellittiche indicava, *erroneamente*, che queste, insieme alle lenticolari, si evolvessero in galassie a spirale (normali o barrate). Per tale motivo vennero definite *early – type* e *late – type*.

In questa trattazione verranno espone le galassie ellittiche, definite anche *early – type*. Le ellittiche differiscono l'una dall'altra solo per la forma e vengono classificate come E0, E1, ..., E7. Siano  $a$  e  $b$  rispettivamente il semiasse maggiore e minore dell'ellisse, si definisce ellitticità il valore  $\epsilon = 1 - \frac{b}{a}$ , e si ottiene il valore al pedice di E moltiplicando  $\epsilon$  per 10.

Una galassia E0 apparirà circolare in cielo, pertanto valori maggiori del pedice indicano una forma più ellittica della galassia considerata: una galassia E7 è infatti più "allungata" di una E3 (Figura 1).

Osservativamente non sono mai state identificate galassie con valore del pedice maggiore di 7 e uno studio sull'instabilità dinamica dimostra che non è possibile costruire un'ellisse con  $E > 7$  senza che questa si rompa; inoltre anche statisticamente possiamo affermare che non esistono tali galassie poiché altrimenti sarebbero già state osservate.

Successive considerazioni hanno permesso di suddividere le galassie ellittiche in:

- Galassie ellittiche "normali": sono oggetti compatti con dimensioni tipiche di massimo un centinaio di kpc.
- Galassie ellittiche "cD": sono oggetti giganti e molto brillanti, con dimensioni tipiche che possono raggiungere il Mpc. Sono state osservate al centro di ammassi di galassie.
- Galassie ellittiche "nane": sono gli oggetti più piccoli e meno brillanti tra le ellittiche.

Per quanto riguarda invece le masse delle ellittiche, queste vanno tipicamente dalle  $10^5 M_\odot$  alle  $10^{13} M_\odot$  (valori di massa così grandi sono raggiunti solamente dalle BCG, *Briggest Cluster Galaxy*, ovvero galassie giganti situate al centro della buca di potenziale di ammassi di galassie.)

## 2 Leggi empiriche

Nonostante le diversità morfologiche delle galassie ellittiche, queste presentano degli elementi comuni emersi da studi di tipo empirico:

- **Legge di De Vaucouleurs**

L'astronomo francese Gérard de Vaucouleurs determinò una delle principali leggi empiriche per la comprensione della fisica delle galassie ellittiche. Questa legge permette di ottenere il profilo di brillantezza ( $I(R)$ ), ovvero l'energia emessa nell'unità di tempo e di area, in funzione della distanza dal centro della galassia.

Definendo  $I_0$  la brillantezza centrale specifica della galassia e  $R_e$  il raggio entro il quale è contenuta metà della luminosità totale, si ha:

$$I(R) = I(0)e^{-7.67(R/R_e)^{1/4}} \quad (1)$$

De Vaucouleurs notò che, anche se singolarmente le galassie avevano tutte dei profili differenti, graficando  $\frac{I(R)}{I(0)}$  in funzione di  $\frac{R}{R_e}$ , i profili di brillantezza assumevano tutti la stessa forma, ovvero le galassie ellittiche sono tutte variazioni di uno stesso modello intrinseco.

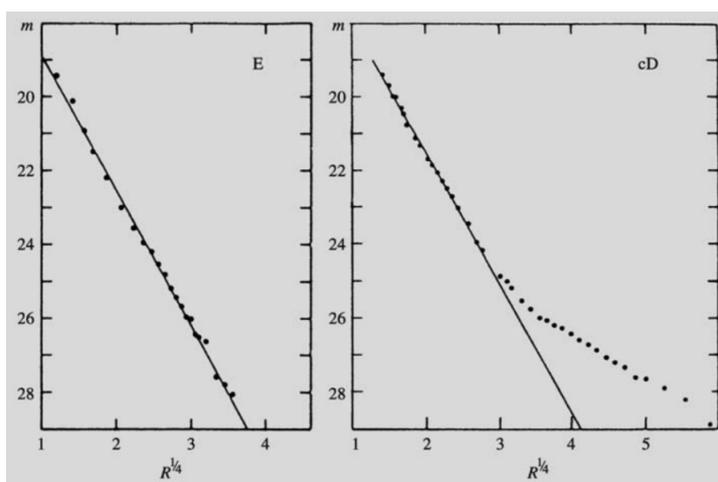


Figura 2: Distribuzione della brillantezza superficiale in galassie E e cD.

- **Legge di Faber-Jackson**

La luminosità bolometrica di una galassia ellittica è proporzionale alla quarta potenza della sua dispersione di velocità:

$$L \propto \sigma^\alpha, \quad \alpha \approx 4 \quad (2)$$

Tale relazione costituisce un ottimo strumento per la determinazione delle distanze delle galassie ellittiche: conoscendo il valore della dispersione delle velocità (determinato dall'allargamento delle righe spettrali), e quello del flusso  $l$  (misurato con un fotometro), si ricava la distanza  $d$  dalla relazione  $l = \frac{L}{4\pi d^2}$

- **Legge di Kormendy**

La luminosità bolometrica di una galassia ellittica è proporzionale al suo raggio effettivo:

$$L \propto R_e^\alpha, \quad \alpha \approx 1 \quad (3)$$

- **Piano Fondamentale**

Attraverso la tecnica PCA (Principal Component Analysis) si è ottenuta una relazione logaritmica tra i valori di *luminosità*, *raggio effettivo* e *dispersione di velocità*:

$$\alpha \log L + \beta \log \sigma + \gamma \log R_e = e \quad (4)$$

Essa rappresenta l'equazione di un piano nello spazio  $(\log L, \log \sigma, \log R_e)$  chiamato Piano Fondamentale delle galassie ellittiche, sul quale appunto giacciono tali galassie. Tale piano ha uno spessore del 3-4% e si nota che non è parallelo a nessuno dei tre piani dello spazio pertanto se si proiettano sul piano  $(\log L, \log \sigma)$  i punti dello spazio  $(\log L, \log \sigma, \log R_e)$  che rappresentano le galassie ellittiche, si ottiene la fascia di pendenza logaritmica  $\sim 4$  descritta dalla legge di Faber-Jackson. Analogamente si ottiene la pendenza della legge di Kormendy proiettando sul piano  $(\log L, \log R_e)$ .

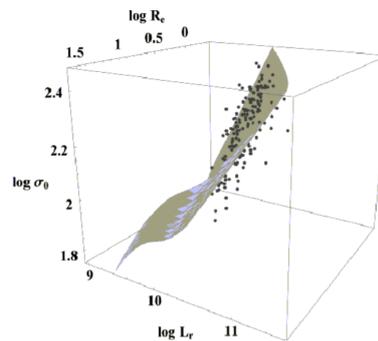


Figura 3: Piano fondamentale

### 3 Emissione di radiazione

Lo spettro tipico di una galassia ellittica è riportato in Figura 4, dove si possono notare profonde righe in assorbimento di elementi pesanti come il calcio e magnesio, tipico di stelle di classe K.

Sotto i 3500 Å si osserva una radicale decrescita del flusso, segno che negli ultimi 1-2 Gyr la formazione stellare è stata pressochè assente; è noto infatti che solo stelle con massa inferiore alle  $2M_{\odot}$  riescono a vivere oltre il miliardo di anni, emettendo la maggior parte della loro luce come stelle rosse dopo che hanno lasciato la sequenza principale. Pertanto si può affermare che la luce proveniente dalle ellittiche è dovuta principalmente a giganti rosse o stelle del ramo asintotico delle giganti (AGB) e che le galassie ellittiche, mancando di polvere e gas ionizzato freddo non presentano formazione stellare e quindi mancano di stelle giovani e blu.

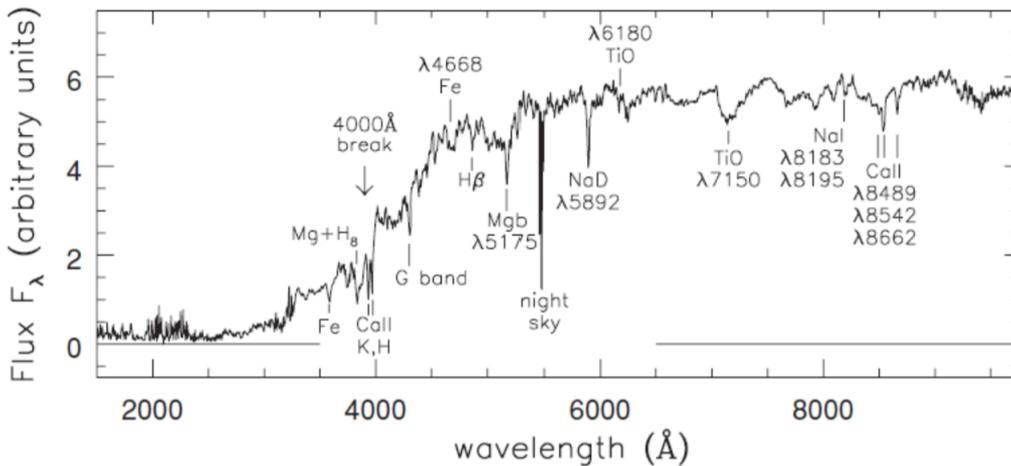


Figura 4: Spettro di una galassia ellittica

Lo studio della radiazione elettromagnetica, che si distribuisce in uno *spettro* di frequenze o lunghezze d'onda, proveniente dalle galassie ellittiche permette di ricostruire i processi fisici che avvengono al loro interno. Di seguito verranno analizzati i principali meccanismi d'emissione di radiazione nella banda ottica, radio ed X di una galassia ellittica. In particolare ci si riferirà alla **SED** (*Spectral Energy Distribution*) ovvero alla distribuzione del flusso in funzione della frequenza. Il flusso è definito come  $F(\nu) = \frac{L(\nu)}{4\pi D^2}$ , con  $L(\nu)$  luminosità della sorgente e  $D$  distanza tra sorgente e osservatore.

### 3.1 Banda Ottica

L'emissione in banda ottica delle galassie ellittiche è dovuta principalmente alle stelle; in particolare la SED è ottenuta dalla somma degli spettri relativi alle singole stelle, che emettono per *corpo nero*.

Un corpo nero è un sistema ideale in grado di riemettere isotropicamente tutta la radiazione elettromagnetica che vi incide. Riferendoci al teorema di Kirchhoff:

$$\frac{P_{em}(\nu, T)}{P_{ass}(\nu, T)} = F(\nu, T) \quad (5)$$

dove  $P_{em}(\nu, T)$  è il potere emissivo e  $P_{ass}(\nu, T)$  il potere assorbente del corpo e la funzione  $F$  è una funzione universale (ovvero non dipende dalle proprietà dell'oggetto in considerazione ma esclusivamente dalla frequenza della radiazione e dalla temperatura del sistema all'equilibrio termico), si definisce allora il corpo nero come il sistema per il quale il potere assorbente vale 1 per ogni frequenza e temperatura. La determinazione della funzione  $F$  si basa su considerazioni di tipo quantomeccanico: si può associare ad ogni fotone un oscillatore armonico e determinare l'energia elettromagnetica complessiva del corpo nero come somma di energie di oscillatori armonici. Si ottiene che la radiazione emessa ha una forma caratteristica detta *Plankiana*:

$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (6)$$

Si noti come, essendo  $h=6.603 \cdot 10^{-27}$  erg · s la *costante di Plank*,  $c=3 \cdot 10^8$  m/s la *velocità della luce nel vuoto* e  $k=1.38 \cdot 10^{-16}$  erg/K la *costante di Boltzmann*, la brillantezza superficiale dipenda esclusivamente dai valori della frequenza (o lunghezza d'onda) della radiazione e della temperatura del corpo.

Come si nota in Figura 5, i profili di brillantezza dei corpi neri presentano un picco che è possibile determinare derivando la funzione  $B(\lambda, T)$  e cercando il suo massimo; si trova che la lunghezza d'onda corrispondente al massimo è  $\lambda_{max} = \frac{0.29}{T[K]}[cm]$ , nota come *Legge di Wien*.

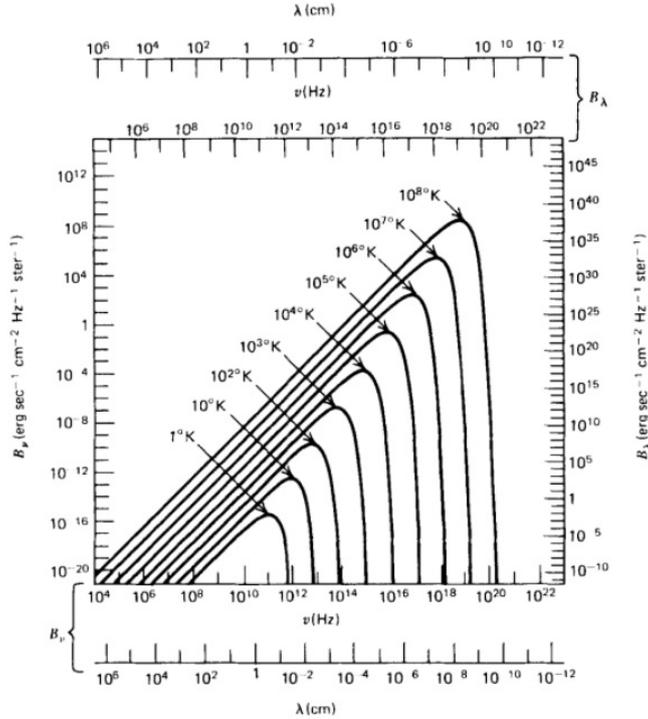


Figura 5: Brillanze superficiali generate da diversi corpi neri con temperature crescenti, in funzione di frequenza e lunghezza d'onda

Poichè ad ogni temperatura corrisponde una sola curva e le curve di CN non si intersecano mai, è possibile determinare la temperatura del corpo dato un solo punto nel plot. Corpi *reali* che approssimano adeguatamente un corpo nero sono le stelle che, come citato precedentemente, sono le principali responsabili di emissione di radiazione in banda ottica. Per questi corpi è possibile, dalla teoria del corpo nero, determinare la temperatura e di conseguenza la loro storia evolutiva descritta dal diagramma HR.

Nell'ottico le galassie ellittiche appaiono rosse poichè l'analisi spettroscopica mostra delle temperature superficiali delle stelle comprese tra 3500K e 4500K, ovvero sono stelle di tipo K ed M con picchi d'emissione nel rosso ( $\lambda \approx 6000 \text{ \AA}$ ) e nel vicino infrarosso ( $\lambda \approx 8000 \text{ \AA}$ ), ad eccezione delle galassie definite *starburst* che sono caratterizzate da un forte tasso di formazione stellare con conseguente presenza di stelle giovani blu e brillanti.

Lo spettro ottico di una galassia ellittica, come si vede in Figura 4, mostra la presenza di un *continuo* e di *righe* in assorbimento, ma finora il meccanismo di emissione del corpo nero è stato in grado di spiegare solamente l'andamento del continuo. Senza entrare troppo nel dettaglio, sappiamo che le righe in assorbimento si generano quando una par-

te del continuo viene sottratta dai fotoni che dalla fotosfera delle stelle viaggiano verso l'atmosfera e attraverso processi che selezionano solamente determinate frequenze o lunghezze d'onda (*processi discreti*) della luce viene assorbita dal gas, andando a formare le righe.

### 3.2 Banda X

Le galassie ellittiche, come anticipato, non presentano gas freddo utile alla formazione stellare ma sono dominate dalla presenza di gas ionizzato molto caldo e poco denso (*Hot Ionized Medium*) con temperature tipiche di  $10^6 - 10^7\text{K}$  e densità di circa  $10^{-2} - 10^{-4}$  particelle per  $\text{cm}^3$ . Il gas caldo è prodotto in seguito alle esplosioni di supernovae che lo arricchiscono di materiale pesante (SNe Ia) e di materiale più leggero come idrogeno e ossigeno (SNe II). Il gas è talmente diffuso che alle lunghezze d'onda tipiche della banda ottica o del radio risulta praticamente invisibile, pertanto, a queste temperature, il processo principale di raffreddamento è la ***bremstrahlung termica***, che produce tipicamente radiazione X.

La radiazione di bremsstrahlung si genera, nel caso più semplice, quando una particella carica si trova nel campo coulombiano di uno ione.

Nel caso in considerazione è presente un gas nello stato di plasma (ovvero le cariche elettriche sono separate e ciascuna si muove all'interno del campo elettromagnetico prodotto dalle altre) e si suppone che le cariche che lo compongono siano complessivamente all'equilibrio termico, pertanto seguiranno la distribuzione delle velocità di Maxwell-Boltzmann:

$$f(\nu) = 4\pi\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}}v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (7)$$

L'emissività specifica, ottenuta integrando su tutte le possibili velocità, di una nube con densità di elettroni  $n_e$  e densità di ioni  $n_z$  è:

$$J_{BR}(\nu, T) = 6,8 \cdot 10^{-38} T^{-1/2} e^{\frac{h\nu}{kT}} n_e n_z Z^2 g_{FF}(\nu, T) \quad (8)$$

Dove

- $g_{FF}(\nu, T)$  rappresenta un fattore correttivo quantistico.
- La dipendenza dalla densità del plasma indica come un aumento di questa implichi una maggiore emissività.
- Il termine esponenziale rappresenta il "cut-off" delle alte energie ed è direttamente proporzionale alla temperatura del plasma: con  $h\nu = kT$  si ha la condizione per definire la frequenza del cut-off, oltre la quale le emissioni da parte degli elettroni tendono a diminuire. Con le caratteristiche temperature dell'*HIM* di circa  $10^7\text{K}$ , si ottiene  $\nu_{cut-off} \sim 10^{18}\text{Hz}$ , frequenza caratteristica appunto della banda X.

Integrando su tutte le frequenze si ottiene l'emissività totale, ovvero l'energia totale emessa per unità di volume:

$$J_{BR}(T) = 1.4 \cdot 10^{-27} T^{1/2} n_e n_z Z^2 \bar{g}_{FF}(\nu, T) \quad (9)$$

Da questa formula è chiara la diretta proporzionalità dalla temperatura e che dunque i plasmi più caldi emettono ad energie più elevate.

Infine, è interessante definire il *tempo di raffreddamento* del plasma come il rapporto tra l'energia termica totale del plasma e la quantità di energia persa per bremsstrahlung:

$$t_{BR}(T) = \frac{6 \cdot 10^3}{n_e \bar{g}_{FF}(T)} T^{1/2} yr \quad (10)$$

Per il plasma astrofisico in considerazione, l'*Hot Ionized Medium*, è facile verificare che con temperature dell'ordine di  $10^6 - 10^7$  K e densità di circa  $10^{-3} \text{ cm}^{-3}$  si abbiano dei tempi di raffreddamento estremamente lunghi, dell'ordine di  $10^{10}$  anni ovvero circa il tempo di Hubble. E' pertanto possibile concludere che le galassie ellittiche emetteranno sempre perchè non si raffreddano.

### 3.3 Banda Radio

L'emissione in banda ottica e X, come già discusso, è legata a processi di tipo termico ma nelle galassie ellittiche sono stati osservati anche fenomeni fisici legati a processi non termici.

Alcune sorgenti come galassie "cD" in ammassi, osservate in banda radio, presentavano le seguenti caratteristiche:

- *Lobi*: due strutture ellissoidali estese, poste simmetricamente rispetto all'oggetto ottico associato ed allineate con questo su distanze che vanno da qualche decina al milione di pc.
- *Hot-Spot*: una regione di piccolo diametro (al più qualche kpc) e più brillante dei lobi.
- *Nucleo*: componente centrale molto compatta coincidente col centro dell'oggetto ottico.
- *Getti*: strutture strette ed allungate, di geometria cilindrica o conica, che partono dal nucleo e puntano approssimativamente alle hot-spot.

Tali galassie sono state definite *radiogalassie*, e le loro regioni centrali sono chiamate "Nuclei Galattici Attivi" (AGN), nelle quali sono presenti buchi neri supermassicci (SM-BH) con masse di milioni o miliardi di masse solari. In queste zone, meccanismi di Fermi e onde d'urto nei quali non si entrerà in dettaglio, permettono agli elettroni del plasma di

raggiungere energie ultra-relativistiche distribuite secondo una legge di potenza. Questi elettroni, interagendo col forte campo magnetico presente in queste zone e prodotto dalla rotazione del SMBH, emettono radiazione elettromagnetica e tale processo è definito di *sincrotrone*.

Gli elettroni ultra-relativistici distribuiti secondo una legge di potenza del tipo  $N(\epsilon)d\epsilon = N_0\epsilon^{-\delta}d\epsilon$  irradiano una potenza (emissività specifica) pari a:

$$J_s(\nu) = N_0 H^{\frac{\delta+1}{2}} \nu^{-\frac{(\delta-1)}{2}} \quad (11)$$

Dove  $N_0$  e  $\delta$  sono delle costanti e  $H$  è il valore del campo magnetico che di solito è stimato attraverso l'equipartizione dell'energia tra energia magnetica ed energia in particelle:

$$H_{eq} = \text{cost} \cdot \left(\frac{L}{V}\right)^{2/7} \quad (12)$$

Dove  $L$  e  $V$  sono rispettivamente luminosità e volume della sorgente.

E' interessante definire, come è stato fatto anche nel caso della bremsstrahlung, il tempo di raffreddamento  $t^*$  definito come il rapporto tra l'energia totale delle particelle e il tasso di perdita di tale energia:

$$t^* = \frac{\epsilon_0}{d\epsilon/dt} = \frac{1}{C_{sync}\epsilon_0 H^2 \sin^2(\theta)} \quad (13)$$

Ossia si nota che  $t^* \propto \frac{1}{\epsilon_0}$  ovvero che elettroni più energetici perderanno energia più rapidamente.

### 3.4 UV upturn

L'UV upturn è un irripidimento del flusso tra il limite di Lyman e 2500 Å (si faccia riferimento allo spettro in Figura 4). Tale crescita corrisponderebbe all'emissione di stelle blu con temperature di  $20000 \pm 3000\text{K}$ , ma l'assenza di giovani stelle blu nelle galassie ellittiche dovrebbe manifestarsi con l'assenza di emissioni nell'UV. Pertanto si vorrebbe presentare un modello in grado di spiegare tre osservazioni base:

- L'UV upturn è presente nei nuclei di galassie ellittiche luminose, la cui brillantezza nell'ottico si sa essere dominata da stelle vecchie e ricche di metalli.
- Correlazione positiva tra l'UV upturn e le righe dei metalli.
- Intervallo ristretto di temperatura delle sorgenti UV.

L'UV upturn è tipicamente osservato nelle galassie ellittiche tuttavia la sua natura rimane ancora sconosciuta nonostante siano state avanzate diverse ipotesi che sostengono ad esempio che l'emissione derivi da stelle anziane e ricche di metalli che hanno perso il loro envelope lasciando scoperto il nucleo, o che questo fenomeno sia dovuto all'abbondanza di elio nei centri degli ammassi di galassie dove si osservano le BCGs (*Brigheest Cluster Galaxies*).

## 4 M87

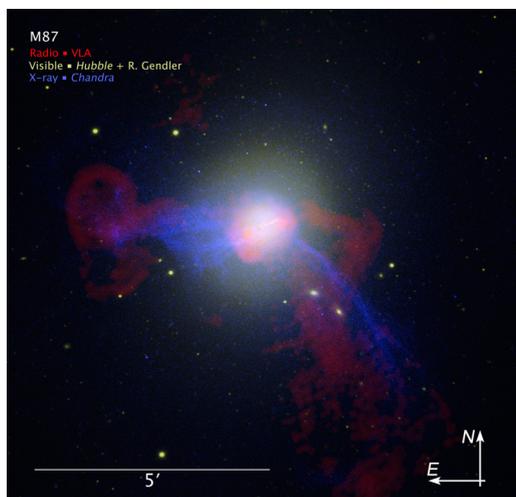


Figura 6: Immagine radio/X/ottica di M87

In Figura 6 un immagine ottenuta da un insieme di dati ottici, radio ed X della galassia ellittica gigante M87. Essa si trova a 16 Mpc dalla Terra ed è la più grande dell'ammasso della Vergine in cui si trova. A tutte le lunghezze d'onda sono ben visibili i jet luminosi che provengono dal buco nero supermassiccio al centro della galassia. L'emissione X (in blu) si estende su gran parte dell'ammasso ed è dovuta all'enorme nube di gas caldo. L'emissione radio (in rosso), anch'essa molto estesa, è visibile nei lobi di gas relativistico che emettono per sincrotrone.

In figura 7 si vede M87 a varie lunghezze d'onda: a destra un'immagine ottica ottenuta

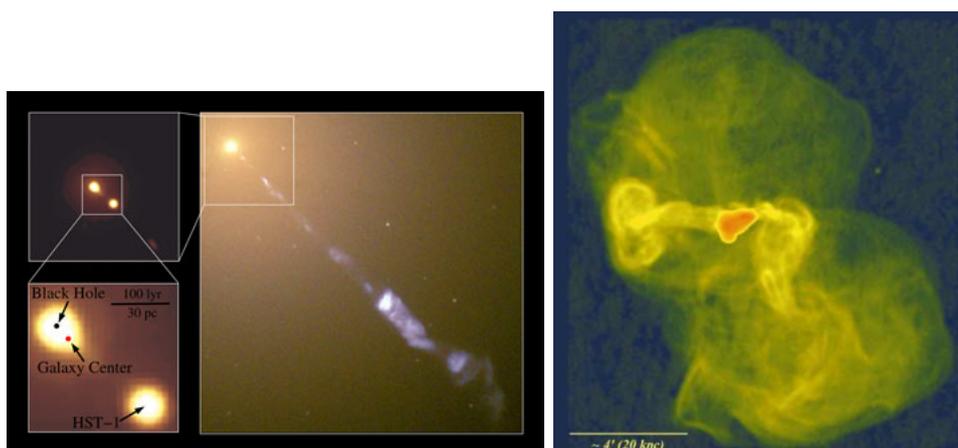
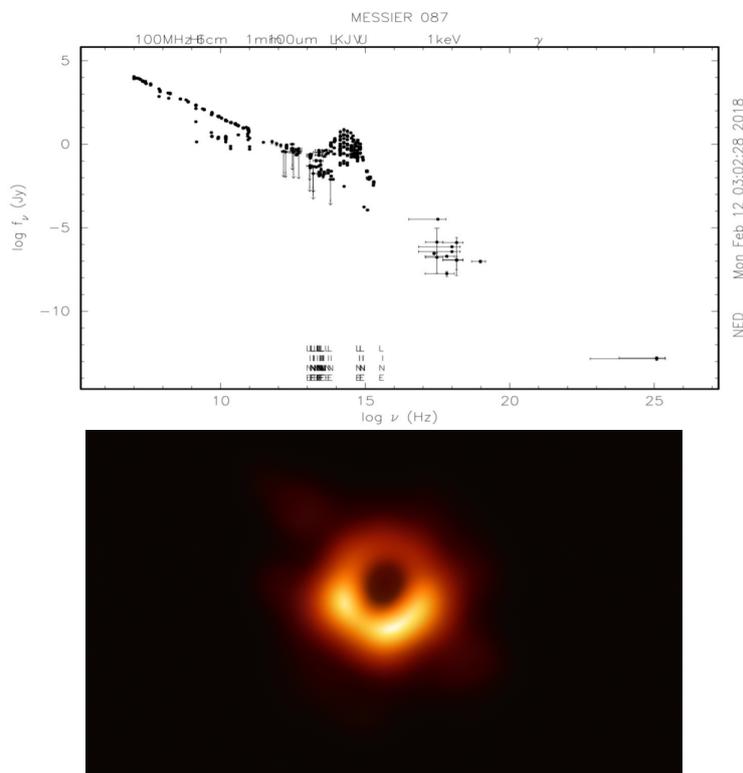


Figura 7: Immagini ottica e radio di M87

da Hubble Space Telescope in cui la galassia ci appare solamente come una lunga macchia estesa, a sinistra un'immagine radio a 90cm in cui si vede (in falsi colori corrispondenti all'intensità dell'energia emessa) l'emissione radio generata dai getti di particelle provenienti dal buco nero.

Infine, di seguito sono riportate la SED di M87, dove è possibile riconoscere le tre bande dello spettro elettromagnetico che abbiamo analizzato( ottica, X e radio) con i rispettivi spettri descritti, e il buco nero supermassiccio al centro di M87: si tratta della prima immagine di un buco nero, realizzata dal progetto Event Horizon Telescope e pubblicata il 10 aprile 2019.



## Riferimenti bibliografici

- [1] L.Ciotti, *Astrofisica Extragalattica*, appunti, 2019-2020.
- [2] L.Ferrari, *Struttura della Materia*, appunti, 2019-2020.
- [3] F.R.Ferraro, *Astrofisica Stellare*, appunti, 2019-2020.
- [4] D.Dallacasa, *Processi di radiazione e MHD*, appunti, 2019-2020.
- [5] H. Karttunen et al., *Fundamental Astronomy*, Springer, 2016.
- [6] C.Fanti, R.Fanti, *Una finestra sull'Universo "Invisibile"*,2012.
- [7] L.S.Sparke, J.S.Gallagher, *Galaxies in the Universe, An Introduction*, Cambridge University Press, 2010.
- [8] S.K.Yi,J.Lee,Y. Sheen, H. Jeong, H. Suh, K. Oh, *The Ultraviolet Upturn in elliptical galaxies and environmantal effects*, 2011.
- [9] Sukyoung K. Yi,Suk-Jin Yoon, *UV Upturn in Elliptical Galaxies:Theory*,2006.