

# **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”**

**Corso di Laurea in Astronomia**

**Tesi di Laurea**

## **Il Modello Unificato dei Nuclei Galattici Attivi**

**Relatrice**

**Dott.ssa Giulia Rodighiero**

**Laureando**

**Marco Gazzetta**

**N° Matricola:1164113**

**Anno Accademico 2023/2024**

# INDICE

## Abstract

### 1. I Nuclei Galattici Attivi: caratteristiche e classificazione

- 1.1. [Breve introduzione storica](#)
- 1.2. [Proprietà fondamentali degli AGN](#)
- 1.3. [Classificazione degli AGN](#)
  - 1.3.1. [Galassie Seyfert di tipo I, II](#)
  - 1.3.2. [Quasar](#)
  - 1.3.3. [Blazar](#)
- 1.4. [Accenno sulle Radio-Galassie RG](#)
- 1.5. [Tabella riassuntiva sugli AGN](#)

### 2. Il Modello Unificato degli AGN

- 2.1. [La traccia del Modello Unificato](#)
- 2.2. [La struttura Toroidale Centrale](#)
- 2.3. [La grande "Unificazione"](#)

## Conclusioni

## Bibliografia

*Into the Sky, we fly,  
Into the Void, we dream,  
Into the Sun, we burn.*

# Abstract

Uno degli oggetti astrofisici che più hanno catturato l'attenzione per le loro peculiari caratteristiche e proprietà fin dagli anni '50 sono i cosiddetti Nuclei Galattici Attivi, riconosciuti più generalmente con il loro acronimo inglese, AGN, (Active Galactic Nuclei). Questi sistemi astrofisici sono stati, e lo sono tutt'ora, oggetto di studio e di analisi da parte della gran parte della comunità scientifica grazie alla loro straordinarie caratteristiche come la luminosità, di tipo bolometrico, di molti ordini superiore rispetto una galassia normale come la nostra Via Lattea, dalla esistenza di getti di radiazione-materia che vengono proiettati nello spazio con velocità ultra-relativistiche e che trasportano tra i più alti quantitativi di energia sprigionati tra tutti i corpi astrofisici scoperti nell'Universo e dall'enorme varietà di AGN scoperti. L'obiettivo di questa tesi è quello di presentare le caratteristiche di questi sistemi astrofisici complessi, classificare la vasta gamma di AGN scoperti in gruppi, in base alle loro peculiarità e proprietà osservative ed infine esporre il Modello Unificato, teoria che si propone nel racchiudere l'immensa varietà dei Nuclei Galattici Attivi sotto un'unica famiglia di oggetti del nostro Universo.

Tutti gli argomenti citati sopra verranno frazionati in questo Lavoro di Tesi nel seguente modo.

La prima parte sarà centrata nel fornire una panoramica sui Nuclei Galattici Attivi. In questa prima sezione verranno presentate le caratteristiche astrofisiche generali di questi sistemi complessi, analizzandone le proprietà comuni per poi concentrare lo studio effettuando una differenziazione sulla vasta gamma di AGN scoperti, raggruppandoli in classi o famiglie, le quali verranno separatamente citate e in seguito esaminate.

Il secondo capitolo invece sarà incentrato nell'esibire, con i suoi punti di forza e debolezza, il Modello Unificato nelle sue 2 forme teorizzate, rispettivamente: "Modello di Unificazione Debole" nella quale si sottolinea la presenza in tutti gli AGN scoperti di una serie di strutture e elementi comuni, e il "Modello di Grande Unificazione", il quale si propone, proprio come sottolinea il nome, una teoria che racchiude la vasta gamma di Nuclei Galattici Attivi conosciuti, rappresentando e visualizzando lo scheletro di quest'ultima.



# Capitolo 1

## *I Nuclei Galattici Attivi: caratteristiche e classificazione*

### 1.1. Breve introduzione storica

Già a partire dei primissimi anni del XX secolo, i fisici e gli astronomi avevano puntato i loro strumenti verso l'Universo alla ricerca di oggetti astrofisici da studiare, con lo scopo di studiarne le loro proprietà e caratteristiche. L'evidenza di oggetti astrofisici particolarmente brillanti risale già nel 1907, ben più di cento anni fa, grazie a Edward Arthur Fath, 1880-1959, astronomo di nazionalità tedesca, che fu il primo a osservare e a ottenere lo spettro a bassa risoluzione di alcune galassie a spirale, inclusa M31.

Susseguirono molti astronomi, catalogando nuove galassie a spirale luminose nelle decadi successive ma fu il 1943, grazie a Carl Keenan Seyfert, l'anno di svolta nella classificazione di questi oggetti astrofisici estremi.

Nell'anno sopra menzionato, Seyfert individuò, studiò e fu il primo a catalogare 9 galassie, come per esempio NGC 4151, con caratteristiche fisiche e di luminosità ben distinte dalle altre già scoperte in precedenza e le classificò come Seyfert's Galaxy, che poi verranno definite come una sottoclasse di Nuclei Galattici Attivi con un nucleo estremamente brillante e con uno spettro con linee di emissione incredibilmente larghe.

Dai risultati ottenuti, fu lo stesso Seyfert ad avanzare una proposta di differenziazione di queste galassie luminose da quelle già scoperte, ipotesi rafforzata poi anche da altri astronomi che nello stesso periodo ne individuarono altre, dalle simili proprietà e "anomalie" spettrali. Dalla prima ipotesi di una diversa famiglia di galassie luminose proposta dallo stesso Seyfert, rafforzata dalle anomalie riscontrate nelle sue osservazioni effettuate anche negli anni successivi, seguirono l'idea dell'astronomo statunitense ed incorporarono i loro lavori e osservazioni numerosi astronomi e astrofisici, tra cui ricordiamo Grote Reber e Martin Ryle, i quali sono ricordati tutt'ora come tra i precursori della Radio-Astronomia, in quanto furono tra i primi ad elaborare una mappa e una survey radio del nostro cielo.

La Radio-Astronomia poi, nelle decadi successive, è stata di fondamentale importanza nella rilevazione e nello studio di questi oggetti astrofisici estremi grazie la quasi totale assenza di fenomeni di assorbimento di fotoni con energie e lunghezze d'onda che cadono nel dominio radio ed anche perché questi sistemi luminosi sono forti emettitori che possono essere pure considerati candeled Radio, quindi strutture grazie alla quale poter calcolare con accuratezza la distanza di luminosità a parità del Redshift e altre proprietà astrofisiche e cosmologiche, se non rappresentare essi stessi una finestra sul passato del nostro Universo.

Infatti, alcuni AGN scoperti risultano essere anche alcuni degli oggetti più distanti a noi come PSO J030947.49+271757.31, ad oggi conosciuto tra i Blazar più distanti dalla Terra, con un redshift  $z=6.1$ , corrispondente a una distanza di circa  $d_L = 12.7 Gly$ .

## 1.2. Proprietà fondamentali degli AGN

I Nuclei Galattici Attivi sono sistemi astrofisici unici che popolano il cosmo.

Questi oggetti astrofisici sono, come sottolinea il nome stesso, galassie, principalmente a spirale, con una struttura toroidale di polveri e gas attorno al nucleo, che si differenziano da M31 o M33 per la straordinaria quantità di energia, e conseguentemente dalla luminosità, prodotte, di numerosi ordini superiori rispetto alle sopra elencate, fino ad energie superiori di 1KeV in emissione.

Storicamente, durante le osservazioni di questi oggetti, gli astronomi, data l'elevata luminosità concentrata in una regione di spazio ben risolta e molto ristretta, valutarono questi sistemi astrofisici come stelle estremamente luminose.

Scoprirono più tardi, con l'evoluzione degli strumenti di osservazione, che si trattavano di galassie, ove la quasi totalità della luminosità rilevata dagli strumenti proveniva dalle regioni centrali, grazie alla presenza di uno degli oggetti più enigmatici nell'nostro Universo, un Buco Nero SuperMassiccio, (in inglese SMBH, Super-Massive Black Hole), con una massa di almeno  $M_{SMBH} \geq 10^7 M_{\odot}$ .

Questi quantitativi di energia derivano da processi di cattura di materia (come, per esempio, gas interstellare o freddo, polveri o corpi celesti) e accrescimento, causa l'immensa forza gravitazionale del Buco Nero, dalla quale neanche la radiazione elettromagnetica può sfuggirli, sebbene come quest'ultima sia, per definizione, priva di massa.

In questi processi di accrescimento del disco di materia attorno al Buco Nero si stima infatti che, della totalità della massa di gas, polveri e altri oggetti catturati, nella caduta nella buca di potenziale del SMBH, dal 5% al 42% o superiore, di questa sia convertita in energia.

In termini pratici, affinché il Buco Nero Supermassiccio sovrasti, nel dominio ottico o infrarosso, la luminosità totale della galassia che lo ospita, è sufficiente che l'accrescimento di materia verso la buca di potenziale infinita del SMBH sia almeno  $1 M_{\odot} YR^{-1}$ , che corrisponde ad una massa della Luna ( $M_L = 7.348 \cdot 10^{22} kg$ ) al secondo.

Grazie a questi enormi quantitativi di energia, gli AGN risultano gli oggetti extragalattici più luminosi (escludendo tutti i fenomeni di tipo esplosivo come le Supernove o le Iperнове, capaci di generare energie superiori a  $10^{42} J$ ).

In particolare, nello studio di un AGN, è utile introdurre un parametro di luminosità speciale, chiamata luminosità (limite) di Eddington ( $L_{edd}$ ).

Questa luminosità è, per definizione, la quantità di luminosità massima che può essere emessa attraverso fenomeni di accrescimento gravitazionale, applicabile, quindi per corpi estremamente massivi e densi, come stelle di neutroni (quindi corpi degeneri, prodotto terminale del ciclo stellare di una stella con una massa  $M_s \geq 8M_{\odot}$ ) e appunto SMBH.

In altri termini, la luminosità-limite di Eddington è il limite superiore di luminosità che si può ottenere e misurare nel nostro cosmo, caso particolare a cui si associa con un completo equilibrio tra forza di pressione della radiazione elettromagnetica uscente e la forza gravitazionale esercitata dello stesso corpo, che obbliga la materia catturata in orbite che concluderanno inevitabilmente nella caduta oltre l'orizzonte degli eventi del SMBH.

Presentando la forza di pressione di radiazione e la forza gravitazionale come:

$$F_{rad} = \frac{L_B}{4\pi c R_{bh}^2} \sigma_t \quad (1.2.1)$$

$$F_{grav} = g \frac{m_{disco} M_{BH}}{R_{BH}^2} \quad (1.2.2)$$

Si verifica accrescimento di materia nei pressi del Buco Nero se e solo se è rispettata la seguente disequazione:

$$F_{grav} > F_{rad} \quad (1.2.3)$$

Le due quantità possono essere sommate e rinominate come forza totale:

$$F_T = F_{grav} + F_{rad} \quad (1.2.4)$$

La luminosità-limite di Eddington è quel valore di  $L$  tale da essere pari alla forza totale sopra menzionata, ovvero è la quantità di luminosità per cui si ha equilibrio tra forza di radiazione di pressione e forza gravitazionale, presentata qui sotto come:

$$L_{edd} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{4\pi G c m_p M_{BH}}{\sigma_t} \cong 10^{38} \left( \frac{M_{BH}}{M_\odot} \right) \text{ erg}(s^{-1}) \quad (1.2.5)$$

Nella circostanza in cui la luminosità prodotta dal Buco Nero  $L_{BH}$  ecceda la luminosità-limite di Eddington  $L_{edd}$ , essendo essa stessa un limite superiore, quindi un tetto fisico-numerico oltre quale vengono violate le leggi fisiche, allora entra in gioco la forza di pressione di radiazione, che agisce come un freno sulla materia in caduta, rallentandone la velocità e il moto, obbligando il gas e le polveri ad orbite più larghe rispetto all'orizzonte degli eventi del SMBH.

Meno materia cade oltre l'orizzonte degli eventi, minore sarà la quantità di energia prodotta e quindi luminosità emessa; quindi, la luminosità del Buco Nero scenderà al di sotto del valore-limite  $L_{edd}$ , ritornando così ad un equilibrio tra le due forze.

La luminosità di Eddington viene spesso usata, non solo per il riconoscimento di AGN da galassie non attive, ma può essere usata anche per una stima della massa del Buco Nero centrale, essendo presente un evidente proporzionalità lineare tra le quantità:

$$L_{edd} \propto M_{BH} \quad (1.2.6)$$

Fornita la definizione di Luminosità di Eddington ed introducendo il parametro  $\eta$  come parametro di conversione massa-luminosità, si può esplicitare inoltre il tasso di accrescimento  $\dot{M}_E$ , che fornisce il quantitativo di materia necessaria (in  $M_\odot/yr^{-1}$ ) per ottenere il valore limite di  $L_{edd}$ , come segue:

$$\dot{M}_E = \frac{L_{edd}}{\eta c^2} \cong 3 \cdot (10^8 M_\odot) (\eta/0.1)^{-1} M_\odot/yr^{-1} \quad (1.2.7)$$

Un'altra caratteristica che contraddistingue e differenzia gli AGN con tutti i sistemi astrofisici galattici conosciuti è il distintivo continuum spettrale, sia termico che no, spettro che si sviluppa su quasi tutto il dominio elettromagnetico, con maggior assiduità, dall'Infrarosso al dominio dei Raggi X, in rari casi fino ai Raggi  $\gamma$ .

Lo spettro dei Nuclei Galattici Attivi è unico tra tutti gli oggetti astrofisici nell'Universo; infatti, nel continuum di questi corpi si possono osservare sia righe di assorbimento, particolarmente ampie, con larghezze (in termini di velocità, per effetto Doppler) che possono raggiungere o superare i  $10^2 km(s^{-1})$ , che righe di emissione, elemento invece raro se non quasi totalmente assente negli spettri di galassie a spirali.

Di particolare rilevanza nell'analisi e studio delle energie e degli spettri degli AGN sono i domini dell'Ottico-Infrarosso ed Ultravioletto e gli intensi flussi Radio e onde X che non trovano riscontro nei processi e meccanismi stellari.

---

$M_\odot$  è il simbolo usato per indicare la massa del Sole che equivale a  $M_\odot = 1.98 \cdot 10^{30} kg$ .

$\sigma_t$  rappresenta la sezione d'urto Thomson, particolare tipo di scattering elastico, indipendente da frequenze, di radiazione elettromagnetica, quindi di un fotone, con una particella elettrica libera. Vale numericamente  $\sigma_t = 6.6 \cdot 10^{-25} cm^{-2}$ .

$R_{bh}$  figura il raggio del Buco Nero, mentre  $G$  è la costante di gravitazione universale e  $c$  è il simbolo che individua la velocità della luce pari a  $c = 299792458 ms^{-1}$ .

### 1.3. Classificazione degli AGN

Come sopra menzionato nel capitolo [1.2](#), gli AGN si differenziano dalle galassie a spirali non attive, ovviamente per la loro attività, ma soprattutto per il loro distintivo continuum spettrale, che presenta notevoli elementi degni di nota e merito.

Dall'analisi spettroscopica di un AGN si possono individuare righe di assorbimento ed emissione più o meno ampie, individuando inoltre righe di transizione semi-proibite o addirittura proibite, dovute principalmente ai processi di interazione atomica tra i fotoni, altamente energetici, prodotti dal Buco Nero Supermassiccio del AGN con la struttura toroidale che circonda il nucleo della galassia attiva, che in alcuni casi può oscurare quasi completamente la radiazione elettromagnetica lungo la linea di vista tracciata dalla propagazione in linea retta del fotone verso di noi osservatori.

Sulla base dell'analisi spettrale dell'continuum spettrale e dall'analisi fotometrica vi è la possibilità di distinguere diverse famiglie di AGN, che saranno presentate e studiate nei seguenti sottoparagrafi.

Per ogni sottoparagrafo verranno inoltre accennati ed esibiti alcuni spettri, mappe e imaging di AGN scelti al fine di sottolineare gli elementi che caratterizzano ogni tipo di Galassie Attive esposte.

#### 1.3.1. Galassie Seyfert di tipo I, II

La prima famiglia di Galassie Attive che saranno presentate in questo lavoro di Tesi sono le Galassie Seyfert (in inglese Seyfert's Galaxies), scoperte per la prima volta nel 1943 da Carl Keenan Seyfert.

Questo gruppo di galassie attive, che costituiscono circa il 10% delle galassie scoperte nel nostro Universo, sono sistemi astrofisici caratterizzati da luminosità molto elevate ( $10^{10} \sim 10^{12} L_{\odot}$ ) e dalla presenza, nello spettro, di righe spettrali, più o meno ampie, di gas ad alta ionizzazione come *HeI*, *HeII* (entrambe visibili nel dominio elettromagnetico Ottico), la *Ly $\alpha$*  (ultravioletto), righe di emissione e righe proibite come il doppietto dell'ossigeno ionizzato due volte OIII (4958.911 Å, 5006.843 Å) e del azoto ionizzato NII.

Dall'anno della scoperta e denominazione, Seyfert e altri astronomi catalogarono oltre mille galassie nelle seguenti decadi, riscontrando sempre più spesso degli elementi discordanti all'interno del continuum spettrale di questi sistemi astrofisici luminosi.

Notarono come alcune di queste Galassie Attive presentavano righe di emissione e proibite più o meno ampie o addirittura molto simili in alcuni casi, riscontrando valori di larghezza a metà altezza (dall'inglese *FWMH*, *Full Width at Half Maximum*) che si traducevano in velocità che variavano in un range molto ampio, nell'ordine  $10^4 \sim 10^5$  km/s.

Dell'enorme quantitativo di Galassie Seyfert osservate e studiate si verificò come fosse necessaria una differenziazione all'interno di questa famiglia, suddivisione accettata nel 1974, dal quale possiamo annunciare la Galassie Seyfert di tipo I e le Galassie Seyfert di tipo II.

Le **Galassie di Seyfert di tipo I** presentano le seguenti caratteristiche:

- Spettro caratterizzato dalla co-presenza di righe di emissione e righe semi-proibite e proibite; le prime, righe di emissione permesse, risultavano incredibilmente larghe ( $\max v \leq 10^5$  km/s) mentre le seconde, proibite, sono più strette.
- Le righe, permesse e proibite, provengono entrambe dal nucleo delle Galassie Seyfert di tipo I ma da due regioni distinte:
  - Le righe più larghe provengono direttamente dalla regione centrale del nucleo delle Galassie Seyfert, denominato *Broad Line Region* (BLR). In questa regione, responsabile della fotoionizzazione del gas e polveri interstellari, le righe larghe sullo spettro derivano direttamente dall'attività del Buco Nero, grazie alla caduta del denso disco di accrescimento in estrema vicinanza all'orizzonte degli eventi del SMBH.

- Le righe proibite, più strette, invece, provengono dalla cosiddetta NLR, *Narrow Line Region*.

Questa regione, meno densa rispetto alla BLR, si può individuare in una distanza dal centro del Buco Nero (varia da AGN a AGN):

$$d_{BLR} \cong [10 \sim 15 \text{ pc}, 1 \text{ Kpc}]$$

A differenza della BLR, ben riconoscibile nelle Galassie Seyfert di tipo I ma oscurata da polveri sottili per le Galassie Seyfert II, la NLR caratterizza entrambe le due sottoclassi. Nella NLR sono presenti più polveri interstellari, quindi è necessario una correzione dello spettro per arrossamento.

Le **Galassie di Seyfert di tipo II**, invece, si possono differenziare dalle precedenti per le seguenti caratteristiche:

- Elementi in comune:
  - Spettro in cui si possono individuare sia righe permesse sia righe proibite.
  - Si può sempre localizzare la NLR.
  - Luminosità molto elevata, concentrata nelle regioni centrali della galassia; picco fotometrico nelle frequenze del dominio ottico e ultravioletto.
- Elementi in disaccordo:
  - Le *FWMH* delle righe permesse e proibite, nell'analisi spettrale di una Galassia Seyfert II, risultano molto simili.
  - La BLR è oscurata da una coltre di polveri interstellari e sottili posti tra BLR e NLR, che bloccano la radiazione elettromagnetica ad alta energia prodotta dal Buco Nero centrale, impedendone così la propagazione e l'analisi nello spettro.

Presenteremo ora gli spettri analizzati (in ottico  $\lambda \sim (3300|7200)\text{\AA}$ ) di due Galassie Seyfert di tipo I e II: Messier 77 (M77 o NGC 1068) classificata come Galassia Seyfert I e NGC 0034, Seyfert tipo II.

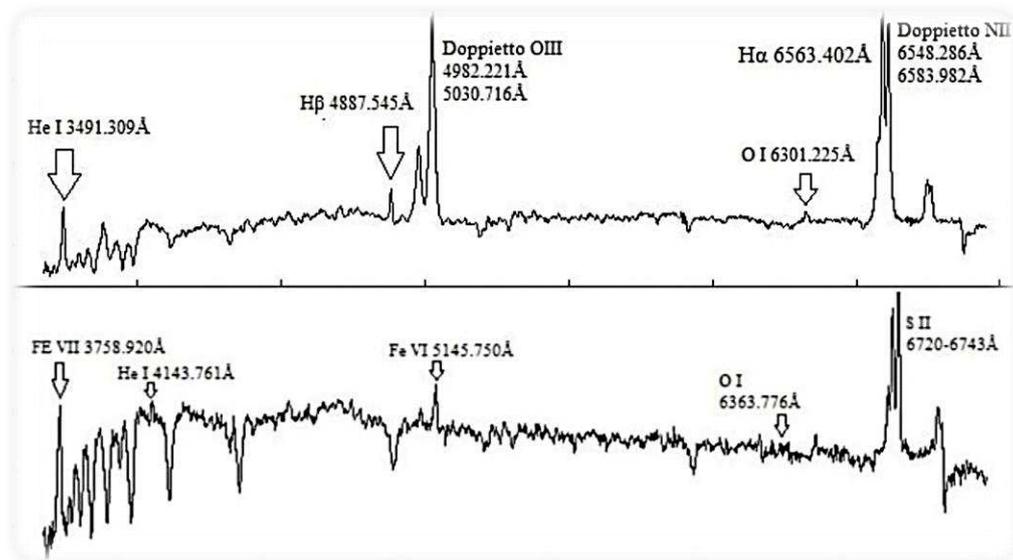


Figura 1.1: Spettri di M77 (sopra) e NGC 0034 (sotto)

Come si può osservare, le righe spettrali tra M77 e NGC 0034 risultano diverse, sia in termini di larghezza (FWMH) che nei termini di righe permesse e proibite: mentre nello spettro di M77 dominano i doppietti OIII e NII, provenienti dalla BLR, nello spettro di NGC 0034, invece, queste righe sono molto deboli se non quasi totalmente assenti, causa l'oscuramento delle polveri interstellari poste tra BLR e NLR per le Galassie Seyfert II.

### 1.3.2. Quasar

I quasar, abbreviazione dal nome in inglese *Quasi-Stellar Radio Source*, sono una sottofamiglia di AGN speciali.

Questi oggetti astrofisici sono unici in tutto il nostro Universo; sono i detentori di numerosi "record" astronomici, come per esempio, il ben noto, quasar *TON 618*, il quale ospita il Buco Nero più massiccio mai scoperto, con una massa stimata di almeno 66 miliardi di volte la massa del nostro Sole o oppure il quasar più distante mai scoperto, *J0313-1806*, scoperto nel 2021, con un redshift calcolato di  $z \cong 7.65$ , quindi formatosi circa 400 milioni di anni dopo il Big Bang.

Lo studio di questi oggetti astrofisici offre una panoramica sul passato del nostro Universo, in quanto, per tali elevati valori di redshift, la presenza del Quasar apre una vasta gamma di teorie sulla sua formazione, sulla formazione di Buchi Neri Supermassicci nelle prime fasi dell'Universo, quindi giocando un ruolo fondamentale all'interno della Cosmologia.

La presenza di Quasar "primordiali" inoltre rappresenta un punto di forza per la moderna teoria di formazione dell'Universo, la teoria del Big Bang, contro la teoria di Fred Hoyle, chiamata Teoria dello Stato Stazionario, basato sul Principio Cosmologico Perfetto, idealizzato dallo stesso Hoyle, in cui l'idea principale è che l'Universo preservi tutte le sue proprietà chimico-fisiche nel tempo indefinitamente e non è considerato né un inizio né una fine.

Oltre a questi record, i Quasar sono gli oggetti più persistenti e luminosi di tutto il cosmo, grazie all'estrema e intensa attività del Buco Nero centrale, incredibilmente massiccio, e a fenomeni astrofisici che si verificano e che si possono studiare solo in condizioni fisiche estremamente energetiche, verificate proprio nel cuore dei Quasar.

Ciò che rende i Quasar tra gli oggetti astrofisici più enigmatici e affascinanti è il loro esteso continuum spettrale e la luminosità che essi emettono e noi riceviamo e studiamo.

Riguardo al continuum spettrale dei Quasar, è utile elencare le varie caratteristiche che lo contraddistinguono da uno spettro di una Galassia non attiva:

1. Spettro che si estende dall'Infrarosso al Dominio Radio e in rari casi al dominio dei Raggi  $\gamma$ :
  - a. La maggior parte dei Quasar scoperti mostrano un eccesso nella banda dell'Ultravioletto, traducendosi nello spettro con una tendenza verso il blu, quasi surclassando la luminosità in tutte le altre bande dello spettro elettromagnetico; il 10% circa di Quasar osservati invece ha picco nelle frequenze Radio (QSO, *Quasi-Stellar Object*).
2. Presenza di righe di emissione sia permesse sia proibite in tutte le bande sopra elencate:
  - a. Per un Quasar "Ottico" le righe di emissioni dominanti sono generalmente le righe della serie di Balmer per l'idrogeno H e righe proibite come il doppietto OIII o anche NII.
  - b. Per gli spettri dei QSO, invece, annoveriamo la presenza della famosa riga 21 cm (riga HI con lunghezza d'onda a riposo:  $\lambda_{rip} = 1420.41 \text{ MHz}$ ) ma anche le righe di Deuterio (D I), elio (He I) o righe di molecole come vapore acqueo o particelle più pesanti.
3. Linee di emissione, in tutte le bande, incredibilmente larghe:
  - a. La larghezza delle righe di emissione, in alcuni casi, può raggiungere valori superiori a  $v \cong 10^5 \text{ km/s}$ , sia nel caso di un Quasar visibile nell'ottico o nell'Ultravioletto ma anche per un QSO. L'anomala larghezza di queste righe è causa dell'estrema energia prodotta e rilasciata dal Buco Nero, dell'enorme distanza dell'oggetto astrofisico, fino a raggiungere valori di redshift maggiori di  $z \geq 7$ , ma anche eventuali fenomeni di interazione del fotone energetico con la materia lungo la linea di vista, come per esempio un altro corpo massivo, causando possibili lenti gravitazionali.

Come sopra, appena accennata, la seconda caratteristica che differenzia i Quasar da ogni altra Galassia, attiva e no, è la luminosità.

I Quasar vengono considerati come gli oggetti più luminosi in tutto il cosmo, rafforzato dal fatto che la luminosità media di un Quasar è di  $L_{quasar} \cong 10^{13} L_{\odot}$ , che corrisponde, in termini di magnitudine apparente, a parità di redshift, a valori  $m_{app,quasar} \geq 13$ .

Il Quasar più luminoso mai scoperto fino ad oggi è il Quasar APM 08279+5255, con una luminosità stimata di  $L_{APM} \sim 10^{15} L_{\odot}$ , a parità di redshift calcolato di  $z \cong 3.9$ .

Oltre ad essere tra gli oggetti o in assoluto le galassie attive più luminose, la peculiarità dei Quasar è la variabilità di tale luminosità, a tutti i flussi osservati, nella maggior parte dei casi senza regolarità.

Questo tratto caratteristico dei Quasar, riscontrato in una buona percentuale di Quasar osservati e studiati, è un fenomeno ancora poco studiato e compreso; la luminosità può fortemente variare, di alcuni ordini di grandezza, con un periodo relativamente breve, nel giro di minuti, ore o addirittura giorni.

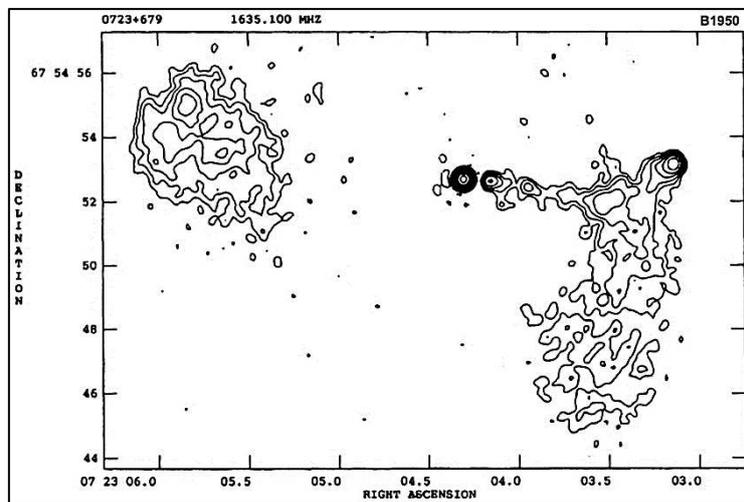
Un'altra peculiarità, che però si può riscontrare in tutti i Nuclei Galattici Attivi, più o meno presenti, sono la presenza di getti altamente energetici uscenti dai poli del Buco Nero di plasma ad altissima temperatura che si propagano nell'Universo a velocità ultrarelativistiche, orientati grazie agli intensi campi magnetici generati dal nucleo.

L'osservazione e lo studio di questi intensi flussi, ai limiti della fisica classica, in alcuni casi, ha disorientato la comunità scientifica.

Tra i vari Quasar i cui getti energetici ha portato disordine e agitazione nella comunità scientifica, presenteremo il caso di Quasar 3c 179.

3c 179 è un Quasar molto attivo e luminoso, in particolare è una radiosorgente (QSO) molto importante per la Radioastronomia, con redshift di  $z \cong 0.844$ , da cui, dal nucleo, ove risiede un Buco Nero Supermassiccio, fuoriescono due lobi di plasma asimmetrici, ad altissima temperatura.

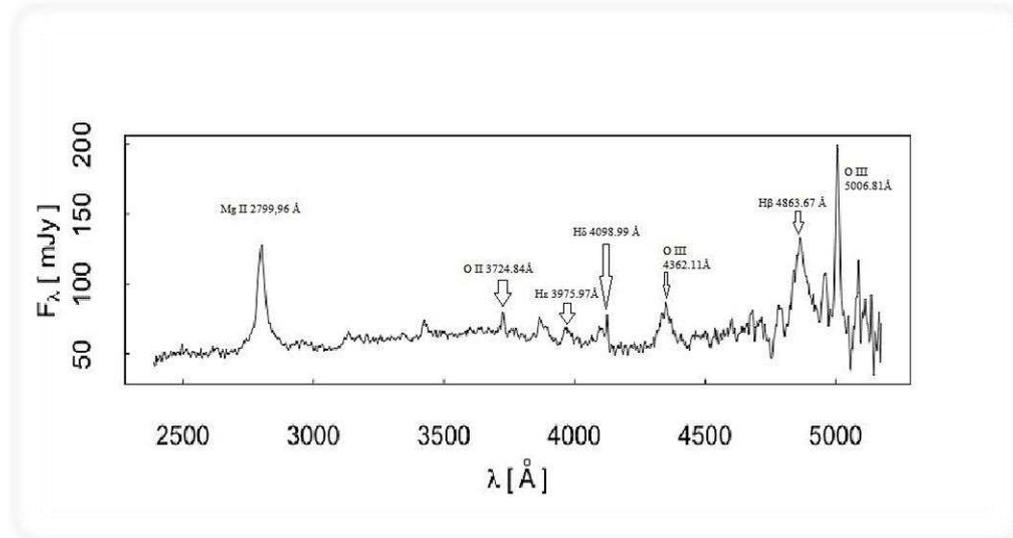
Dalla struttura a due lobi asimmetrica deriva un'intensa radiazione che cade nelle frequenze Radio, nell'ordine di GHz, grazie al quale è possibile effettuare un'elaborazione grafica della struttura di questi due getti, presentata in Figura 1 qui sotto:



*Figura 1.2: Radio Mappa (1635 MHz) ad alta risoluzione dei due getti bipolari altamente energetici di 3c 179. I due getti fuoriescono rispettivamente dai poli Nord-est e Sud-est del SMBH di 3c 179 propagandosi nello spazio a velocità ultrarelativistiche. Il getto Nord-est è caratterizzato da un Hotspot (HS), mentre il flusso a Sud-est si diffonde in un mezzo interstellare denso.*

La peculiarità di questi flussi di plasma, in particolare del flusso uscente dal polo Nord, è la sua velocità apparente, stimata essere di  $v_{jet} \cong 7.6c$ .

La velocità apparente superiore al limite della velocità della luce è ovviamente una velocità non permessa per la Fisica; la correzione di tale misurazione va ricercata nei fenomeni di creazione di tali flussi (ancora in fase di studio) e in un probabile effetto di lente gravitazionale, che può, in alcuni casi, anche decuplicare la velocità della radiazione emessa. Per quanto concerne lo spettro, verrà presentato lo spettro di 3c 179 (in infrarosso-ottico, lunghezza d'onda  $\lambda \sim (2200 \sim 5500 \text{Å})$ ), in figura 2:



*Figura 1.3: Spettro integrato in banda ottica in cui si possono individuare le righe della Serie di Balmer ( $H\beta$ ,  $H\delta$ ,  $He$ ) e righe proibite di Ossigeno ionizzato una volta ( $OII$ ) e due volte ( $OIII$ ). Particolarmente larghe risultano le righe di Magnesio ionizzato una volta ( $Mg II$ ), molto presente in galassie con alto tasso di formazione stellare con basso grado di metallicità, e la riga  $H\beta$ .*

### 1.3.3. Blazar

Altra sottoclasse di AGN, fondamentali per lo studio di fenomeni ad alte energie e per l'Astronomia Extragalattica, sono i cosiddetti Blazar (*Blazing Quasi-Stellar Object*).

Scoperti nei primi anni del 1960, conati nel 1978 da Ed Spiegel, astronomo statunitense, deceduto nel 2020, i Blazar rappresentano un gruppo di galassie attive dalle caratteristiche molto varie e uniche, non riscontrabili in altri AGN.

Sono Galassie Attive con redshift  $0.5 \leq z \leq 4$ , di varia forma morfologica, dalle Lenticolari alle Irregolari, di dimensioni galattiche simili alle Galassie come Via Lattea o M33.

Sono AGN che presentano un nucleo (SMBH) molto compatto, che non supera i  $10^{-3} pc$  di diametro, caratterizzato da un disco di accrescimento molto denso e caldo, la cui temperatura può raggiungere le decine di miliardi di gradi Celsius, costituito da gas interstellare, materia ionizzata e plasma.

Dal Buco Nero fuoriescono, come anche per i Quasar, dei flussi polarizzati dai due poli del SMBH, guidati dalle linee di campo magnetico intenso generato dal nucleo, che si propagano nello spazio a velocità ultrarelativistiche ( $0.95c \leq v_{jet} \leq 0.999c$ ).

Come sarà presentato e spiegato nel Capitolo 2, nel Modello Unificato dei Nuclei Galattici Attivi, l'angolo di osservazione e la presenza del flusso energetico di una Galassia Attiva rispetto alla linea di vista dell'osservatore, risultano fattori cruciali per la determinazione e la classificazione del AGN.

Nel caso specifico dei Blazar, tale getto altamente energetico si ritiene propagarsi perpendicolarmente dal disco di accrescimento, quindi ortogonale al Buco Nero, lungo la nostra linea di vista e di osservazione; quindi, ogni qualvolta si osserva un Blazar, ciò che si nota e che permette la determinazione di tale Galassia Attiva è proprio il getto relativistico, diretto proprio verso di noi osservatori.

Oltre alla propagazione diretta del getto verso di noi, esistono altri dettagli, degni di nota, che permettono di identificare e classificare un AGN in un Blazar.

I Blazar sono Galassie Attive molto luminose, la cui luminosità, però, non è quasi mai costante, bensì può variare anche molto rapidamente e violentemente, raggiungendo valori di luminosità dimezzati (rispetto alla luminosità massima) per un certo periodo temporale.

Questa repentina variabilità di luminosità è la caratteristica tipica degli oggetti OVV, uno dei due sottotipi di Blazar, chiamati *Quasar Ottici Violentamente Variabili*.

Un Quasar OVV, sebbene sia classificato in primis come QSO, spesso viene inserito in questa sottoclasse della famiglia dei Blazar, per la peculiare variabilità di luminosità in banda ottica, come sottolinea in nome spesso, che può cambiare repentinamente in breve periodo. Inoltre, i Quasar OVV sono Radiosorgenti molto luminose e possiedono due flussi uscenti estremamente polarizzati e uno spettro caratterizzato da linee di assorbimento ed emissione larghe.

I Quasar OVV rappresentano una piccola percentuale all'interno della famiglia dei Blazar; la maggior parte di Galassie Attive che vengono raggruppate sotto questo nominativo sono i cosiddetti *oggetti BL Lacertae*, abbreviato spesso come BL Lac.

Queste speciali Galassie Attive sono oggetti incredibilmente luminosi, in alcuni casi variabili e con un disco di accrescimento tra i più densi tra tutti gli AGN.

Questo particolare gruppo di Galassie Attive si differenziano da ogni altro tipo di AGN per le seguenti caratteristiche:

1. *Spettro quasi totalmente privo di righe spettrali, sia di assorbimento che di emissione.*

La presenza di righe spettrali (del getto) molto deboli, se non quasi assenti, di questo particolare tipo di Blazar risiede nel processo con la quale viene generato il flusso altamente energetico e polarizzato, diretto lungo la linea di vista. Il principale processo di emissione è la Radiazione di Sincrotrone, radiazione elettromagnetica creata da particelle elementari o adroniche, che si muovono a velocità molto vicine a quella della luce, in traiettorie curve o orbite chiuse magnetiche create proprio dal Buco Nero. Maggiore è la velocità della singola particella, minore è la lunghezza d'onda del fotone di sincrotrone emessa, quindi maggiore sarà l'energia trasportata.

2. *Variazioni irregolari di luminosità su tutto lo spettro elettromagnetico.*

A differenza dei Quasar OVV, la cui variazione di luminosità riguarda prettamente la banda ottica, nel caso delle BL Lae, si possono osservare variazioni anche significative ( $L_{BL\ Lae, Oss} \cong \frac{1}{2}L_{BL\ Lae, Max}$ ), irregolari, in tutte le bande elettromagnetiche.

Nel caso dei Blazar, si analizzerà il caso di MRK 501, oggetto BL Lacertae, galassia lenticolare con redshift  $z \cong 0.033$ , nella Costellazione di Ercole, in cui risiede un Buco Nero con massa di almeno  $10^9 M_{\odot}$ , da cui fuoriesce un getto di plasma (figura 2) e radiazione elettromagnetica, in moto con una velocità stimata di  $v_{jet} \cong 0.995c$ , estremamente energetico, con energia calcolata superiore ai 5 GeV.

Nella prima figura qui sotto (figura 1), sottolineeremo la prima caratteristica di BL Lac, osservando proprio uno spettro (in banda ottica) di MRK 501.

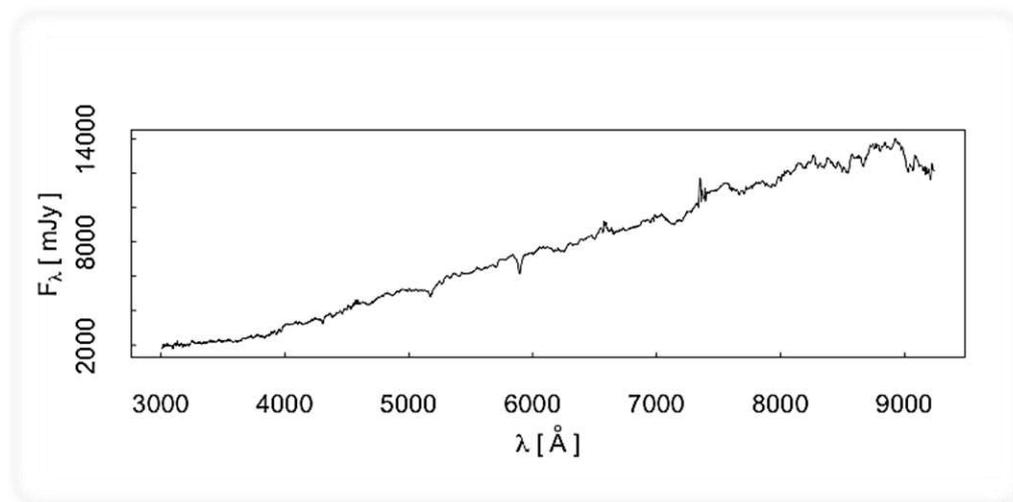
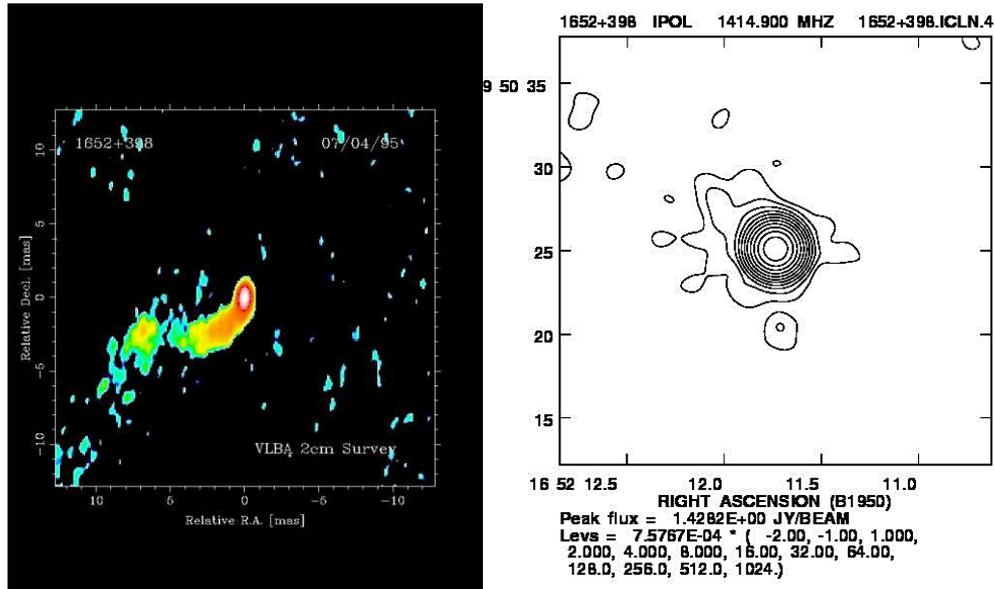


Figura 1.4: Spettro di MRK 501

Lo spettro integrato in banda ottica di MRK 501 risulta già a prima vista molto continuo e lineare, senza la presenza di righe marcate di assorbimento e soprattutto emissione, permesse e/o proibite, che sono tipiche di uno spettro di un Quasar o di una Galassia Seyfert, ove sono molto numerose e particolarmente larghe. Nell'intervallo 3000~5000 Å, lo spettro risulta quasi totalmente lineare e privo di righe, mentre aumentando lungo l'asse della lunghezza d'onda, si possono individuare, molto deboli, la riga NII ( $\lambda_{NII} \sim 6583 \text{Å}$ ) e il Doppietto SII ( $\lambda_{SII} \sim 6733 - 6747 \text{Å}$ ).

Nella figura 2, invece, presenteremo la mappa radio (1419 MHz, 20cm) della struttura di MRK 501 e un imaging (effettuato dal VBLA, a 2cm) del flusso di plasma e radiazione energetico uscente dal nucleo di MRK 501.



*Figura 1.5: Nell'immagine a sinistra vi è rappresentato, tramite imaging di VLBA a 2cm, il flusso uscente diretto verso di noi di MRK 501.*

*I colori usati sono fondamentali per la comprensione dell'imaging radio.*

*La zona centrale, circolare, di colore bianco, è la zona ove è stata rilevata la maggior quantità di emissione di onde radio (a 2 cm) prodotta dalla Galassia Attiva.*

*Si noti come questa zona circolare, particolarmente attiva e luminosa a queste lunghezze d'onda, corrisponda al nucleo di MRK 501, dal quale fuoriesce il getto relativistico diretto verso di noi.*

*Il getto però subisce una dispersione nel suo moto di propagazione, compiendo una traiettoria curva.*

*Uscendo dalla linea di vista che unisce MRK 501 a noi, in base anche all'angolo di osservazione, il flusso risulterà minore, fino ad arrivare al verde, ove il flusso misurato è notevolmente minore rispetto alla zona centrale.*

*L'immagine a destra invece è la Mappa Radio di MRK 501.*

## 1.4. Accenno sulle Radio-Galassie RG

In questo sottoparagrafo verranno esposte, nelle loro caratteristiche più salienti e importanti, una classe di Galassie Attive fondamentali per la Radio Astronomia, da cui prendono anche il primo nome, le Radio Galassie (*in inglese Radio Galaxies*).

Come suggerisce il nome stesso, questa famiglia di AGN sono galassie, generalmente di forma ellittica, che presentano un'intensa emissione di onde radio, di molti ordini superiori rispetto all'emissione in un qualsiasi altra banda elettromagnetica o in alcuni casi di interesse Galassie non Attive su tutte le frequenze.

La prima Radio Galassia fu osservata nel 1939 da Grote Reber, che in seguito la denominò come *Cygnus A*, estremamente attiva nella costellazione del Cigno.

Le Radio Galassie possono essere descritte attraverso i seguenti punti d'interesse:

1. *Intensa emissione di onde radio:*

L'intensità di emissione di suddette onde è tra le più alte e costanti mai rilevate da qualsiasi altro oggetto astrofisico nel nostro cosmo, tanto da renderle, in alcuni casi, "candele Radio", strutture scelte come unità di misura e comparazione nell'Universo con altri oggetti osservati.

Inoltre, si osservi come tale intensità, nella maggior parte delle osservazioni a medio-lungo tempo di esposizione su una Radio Galassia, l'intensità di emissione di onde radio rimane quasi sempre stabile, continuo e costante, vicino al 100%.

Questa peculiarità deriva dal processo di formazione delle onde radio energetiche; la Radiazione di Sincrotrone.

2. *Presenza di flussi uscenti dai poli del Buco Nero, i Radiolobi:*

I Radiolobi sono, similmente per i getti che si possono osservare in un Quasar o una Galassia Seyfert, flussi altamente energetici, uscenti dai due poli del Buco Nero, generalmente asimmetrici, generati e alimentati direttamente dalla caduta nella buca di potenziale infinito di materia del disco di accrescimento.

Da tali flussi, che nel caso specifico delle Radio Galassie vengono denominati come *Radiolobi*, emettono estreme quantità di radiazione elettromagnetica, per processo di Radiazione di Sincrotrone, principalmente nella banda Radio.

Nel dominio Radio, in particolare, la luminosità calcolata è la più alta tra tutte le sorgenti che emettono in frequenze radio, con valori di luminosità di  $L_{radio} \approx 10^{38} \sim 10^{41} W$ , con frequenze che partono da decine di Megahertz (MHz) fino a centinaia di Gigahertz (GHz).

I Radiolobi inoltre possono raggiungere dimensioni enormi, nell'ordine di decine o centinaia di kiloparsec, quindi strutture addirittura più grandi della galassia stessa.

3. *Spettro caratterizzato da deboli righe di assorbimento ed emissione, parziale dominio della radiazione di Sincrotrone:*

Le Radio Galassie possono essere viste come la classe di AGN intermedia tra i Quasar e i Blazar.

Infatti, lo spettro tipico di una Radio Galassia mostra righe di assorbimento e di emissione, sia permesse sia proibite, molto meno marcate e larghe di un Quasar o di una Galassia Seyfert ma sicuramente più presenti di un oggetto BL Lac.

Verrà presentato e analizzato in seguito lo spettro di 3c 66b, Radio Galassia, distante da noi circa 300 milioni di anni luce.

Inoltre, all'interno dell'insieme delle Radio Galassie vi è la possibilità di distinguere, in base a varie caratteristiche sulla forma dei Radiolobi e sulla luminosità bolometrica totale emessa dalla Galassia Attiva, diversi sottogruppi, che possono essere raggruppati in due grandi classi: le Galassie Radio-Attive (*Radio-Loud Galaxies*) e le Galassie Radio-Quiete (*Radio-Quiet Galaxies*).

Le Galassie Radio-Loud sono Radio Galassie estremamente energetiche, decine o centinaia di volte più violente e luminose della controparte Quiet; i Radiolobi delle Galassie Radio-Attive si estendono con velocità ultrarelativistiche fino a decine di Mega parsec dal nucleo del AGN, possono presentare Hotspot e la luminosità prodotta dall'energia che i Radiolobi trasportano nel cosmo rappresenta almeno il 75% della luminosità bolometrica totale dell'intera Galassia.

Per spiegare questo estremo quantitativo di energia (che si traduce in luminosità), si crede che in una Galassia Radio-Attiva, sia presente un Buco Nero centrale con una massa superiore a  $10^9 M_{\odot}$ , estremamente attivo.

La controparte delle Galassie Radio-Attive sono le Galassie Radio-Quiete.

Questo gruppo di oggetti astrofisici sono, in termini di energia, luminosità e dimensioni dei Radiolobi, inferiori, di vari ordini, rispetto alle Galassie Radio-Attive.

Nonostante la minor attività del nucleo, queste Radio Galassie sono forti emittori di onde Radio, radiazione elettromagnetica visibile anche a miliardi di anni luce da noi.

Come sopra accennato, ora verrà presentato il caso di 3c 66b, Radio Galassia-Attiva.

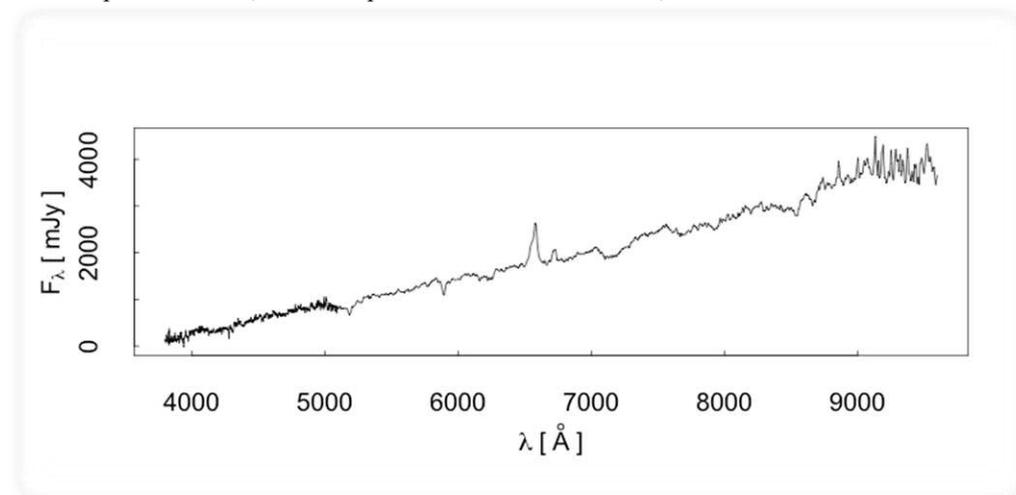


Figura 1.6: Spettro integrato (nucleo) in banda ottica di 3c 66b.

Lo spettro di 3c 66b, come prima menzionato, può essere interpretato come lo spettro intermedio tra Quasar e BL Lac. Infatti, lo spettro di 3c 66b presenta righe di assorbimento ed emissione, come la riga He I ( $\lambda \sim 5874 \text{Å}$ ) e la riga NI ( $\lambda \sim 8679 \text{Å}$ ), per poi arrivare a lunghezze superiori a 9000 Å ove lo spettro si infittisce. Da notare comunque, nella zona a sinistra dello spettro, la quasi totale assenza di righe spettrali, indice di una forte Radiazione di Sincrotrone, tipica di Radio Oggetti.

## 1.5. Tabella riassuntiva sugli AGN

<b><i>AGN: Nuclei Galattici Attivi</i></b>		
<b>Galassie Seyfert</b>	Tipo I	Luminosità media totale: $< L_{GS,I} \geq \cong 10^{12} L_{\odot}$ . Massa SMBH stimata: $M_{BH} \cong 10^9 M_{\odot}$ . Spettro dominato da righe (assorbimento ed emissione) incredibilmente larghe $v \leq 10^5 \text{ km/s}$ . BLR e NLR presenti.
	Tipo II	Luminosità media totale: $< L_{GS,II} \geq \cong 10^{11} L_{\odot}$ Massa SMBH stimata: $M_{BH} \cong 10^8 M_{\odot}$ Spettro dominato da righe (assorbimento ed emissione) larghe $v \leq 10^3 \text{ km/s}$ . NLR osservabile ma BLR oscurata da polveri (toro molecolare).
<b>Quasar</b>		Luminosità media totale: $< L_Q \geq \cong 10^{13} L_{\odot}$ ; luminosità variabile ed irregolare. Massa SMBH stimata: $M_{BH} \cong 10^{10} \sim 10^{12} M_{\odot}$ . Spettro: estensione su quasi tutte le bande elettromagnetiche; righe permesse e proibite incredibilmente larghe $v \cong 10^5 \text{ km/s}$ . Flussi, estremamente energetici, veloci e polarizzati, uscenti dai poli del Buco Nero.
<b>Blazar</b>	Quasar OVV	Radiosorgenti molto luminose, luminosità media totale $< L_{Q,OVV} \geq \cong 10^{12} L_{\odot}$ . Variabilità irregolare e violenta nella banda ottica. Doppio flusso uscente dal nucleo estremamente energetico, ultrarelativistico e polarizzato. Spettro caratterizzato da righe spettrali larghe.
	BL Lacertae	Oggetti molto luminosi, in alcuni casi la luminosità può subire variazioni significative. Spettro quasi totalmente privo di righe spettrali (assorbimento ed emissione). Dominio della Radiazione di Sincrotrone. Getti bipolari uscenti dal nucleo di BL Lac, velocità vicinissime a quelle della luce, propagazione irregolare.
<b>Radio Galassie</b>		Intensi emettitori di onde radio; galassie altamente energetiche e tra le più luminose in assoluto nel mondo della Radio Astronomia. Radiolobi: flussi visibili a lunghezze d'onda nell'ordine di MHz o GHz, che possono evolvere irregolarmente nello spazio per Mega parsec (Mpc), incredibilmente energetici. Spettro caratterizzato da righe spettrali deboli; la maggior componente radiativa è la Radiazione di Sincrotrone.

## Capitolo 2

### *Il Modello Unificato degli AGN*

Come giusto accennato nel primo capitolo di questo Lavoro di Tesi sugli AGN, in particolare nel sottoparagrafo [1.3.3](#), nel quale si è brevemente esposto uno dei punti cardine per il riconoscimento e classificazione di questi oggetti astrofisici estremi, in questa seconda sezione si procederà, in primis, nel presentare la struttura portante della Teoria di Unificazione dei Nuclei Galattici Attivi, che, oltremodo, si può dividere in Debole e Grande Unificazione, analizzandone i vari elementi in comune.

Verrà poi focalizzato poi lo studio, nel paragrafo [2.2](#), delle strutture di maggior rilievo per un Nucleo Galattico Attivo, ovvero il Disco di Accrescimento e il Toro Molecolare.

#### **2.1. La traccia del Modello Unificato**

Nelle decadi successive alle prime osservazioni di Seyfert e Grote, i primi astrofisici ad aver analizzato lo spettro delle prime Galassie Attive, il numero di Nuclei Galattici Attivi scoperti nel nostro cosmo, salì velocemente.

Immersi in una enorme varietà di Nuclei Galattici Attivi, con caratteristiche di luminosità, spettro, dimensioni ed emissioni di energia differenti, gli astrofisici proposero una bozza di Teoria di Unificazione già nei primi anni '90, continuamente rimodellata e aggiornata fino ai giorni d'oggi.

Il Modello Unificato dei Nuclei Galattici Attivi si propone come la teoria Unificatrice per questi oggetti astrofisici, che per quanto diversi tra di loro, in realtà sono lo stesso identico sistema galattico, che vengono classificate sotto nomenclatura distinta sulla base dei risultati osservativi della Galassia Attiva in questione.

La principale caratteristica di base per ogni tipo di Modello Unificato, sia Debole o Grande Unificazione, risiede nell' nucleo della galassia stessa, ovvero la presenza del Buco Nero Super Massiccio centrale, il quale, attirando verso di sé la materia catturata grazie alla forza gravitazionale esercitata dalla buca di potenziale infinita, genera quantitativi di energia non riscontrabili in altri sistemi galattici che, in alcuni casi, sono tali da aprire una finestra sulle prime fasi del nostro Universo, come nel caso, sopra accennato, PSO J030947.49+271757.31, il Blazar più lontano da noi mai scoperto.

L'esistenza di questo corpo degenerare estremo, derivante del collasso gravitazionale di una stella massiva nella sua ultima fase vitale, capace di curvare la traiettoria di ogni oggetto che entri nel raggio di azione del campo gravitazionale, inclusa anche la radiazione elettromagnetica, che per sua definizione è priva di massa, è stata lungamente materia di dibattito all'interno della comunità scientifica e astrofisica nelle decadi successive alle prime scoperte di galassie attive e no.

Ciò che concerneva gli astrofisici del tempo e che tutt'ora è oggetto di inchiesta e obiettivo di risoluzione, è la divergenza dei parametri fisici-termodinamici e alla violazione di principi fondamentali della fisica, associati al Buco Nero stesso.

Nel 1916, dopo la pubblicazione, nel 1915, del più grande trattato sulla Fisica, la Teoria della Relatività Generale, di Albert Einstein, Karl Schwarzschild fu il primo, calcolando una particolare soluzione dell'equazione differenziale a derivate parziali (EDP) non lineare, l'Equazione di Campo, a definire le caratteristiche chiave dei Buchi Neri, seguito poi dal lavoro del matematico Johannes Droste, suo allievo.

I risultati ottenuti sottolineavano, previsto già dalla teoria di Albert Einstein, come la materia gravitante sia capace di curvare lo spazio-tempo, inclusa la radiazione elettromagnetica,

deviandone il suo tragitto.

Un oggetto incredibilmente massiccio quindi, generando un enorme quantitativo di forza gravitazionale, può curvare il tessuto spazio-temporale e di conseguenza la traiettoria rettilinea in una traiettoria curva od eventualmente chiusa di un corpo con velocità arbitraria, in transito nella prossimità del primo.

Schwarzschild e poi Droste scoprirono che la deformazione dello spazio-tempo esercitata da un corpo estremamente denso e massivo, poteva risultare in una regione, delineata dal Raggio di Schwarzschild, in cui la radiazione elettromagnetica, con velocità pari a  $c$ , non potesse mai più uscire da quest'ultima, rimanendo intrappolata in orbite sempre più orientate verso il centro della deformazione del continuum spazio-temporale, impedendone così l'osservazione, perdendo così l'informazione che quel singolo fotone trasportava.

Dalla prima pubblicazione dei risultati ottenuti, seguirono, nei mesi successivi in poi, numerosi dibattiti e discussioni all'interno della comunità scientifica poiché, ammettere l'esistenza di questo corpo così denso violava il principio di conservazione dell'informazione, secondo il quale nessuna informazione, di qualsiasi tipo, può essere persa all'interno dell'Universo ma implicava anche accettare, come detto, divergenze asintotiche tendenti all'infinito di vari parametri termodinamici e fisici.

In termini pratici, analizzeremo la soluzione particolare, in simmetria sferica, in condizioni di vuoto, assenza di carica e rotazione, dell'Equazione di Campo di Einstein calcolata proprio da Karl Schwarzschild, risultato poi divenuto una delle metriche più importanti e usate nella descrizione spazio-temporale per qualsivoglia tipo di oggetto, ovvero la Metrica di Schwarzschild, di equazione:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{2M}{r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 (\sin \theta)^2 d\phi^2 \quad (2.1.1)$$

L'equazione metrica qui sopra esposta rappresenta la descrizione fisico-geometrica di una struttura spazio-temporale statica, simmetricamente sferica, invariante per coordinate temporali  $t$  e  $\phi$ , che consegue ad una conservazione dell'energia (per invarianza temporale) e alla conservazione del momento angolare rispetto all'asse  $z$  (invarianza dell'angolo  $\phi$  rispetto all'asse  $z$ ).

Come si può ben notare da una semplice analisi della formula, si possono evidenziare due singolarità, sulla base dei possibili due valori che può assumere, in base alle circostanze, il raggio  $r$ .

La prima singolarità, definita singolarità centrale, "eliminabile" effettuando un cambio di coordinate, coincide con il valor nullo per il raggio  $r = 0$ , in cui le geodetiche coincidono tutte in un unico punto di dimensione 0.

La seconda singolarità invece corrisponde al valore per il raggio  $R_s = 2M$ , che fu denominato con il nome di Raggio di Schwarzschild, rappresenta la dimensione caratteristica dell'orizzonte degli eventi del Buco Nero, limite superato il quale qualsiasi oggetto o corpuscolo che abbia valicato questo bordo, non potrà far più ritorno e la informazione che esso trasportava, verrà persa.

L'esistenza dei due stessi valori del raggio singolari delinea non solo la necessità di rivedere le leggi della gravitazione relativistiche nello studio di corpi incredibilmente massivi ma, come si può ovviamente osservare, semplicemente sostituendo i due valori del raggio all'interno dell'equazione, come i parametri metrici tendono a divergere molto velocemente, raggiungendo valori infiniti in congiunzione dei valori  $0, 2M$ .

Ciò complica notevolmente lo studio, poiché, per esempio in corrispondenza della prima singolarità  $r = 0$ , tutti i parametri fisici, come temperatura, densità, volume, divergono, violando così tutti i principi della fisica classica.

Per la seconda singolarità, il noto Raggio di Schwarzschild, invece si ha la violazione del principio di conservazione dell'informazione, che poi porta, sebbene non lo andremo a presentare in questo Lavoro di Tesi, al cosiddetto paradosso dell'informazione.

Sebbene siano passati più di cento anni dalle prime teorie ed osservazioni di questo corpo degenerare estremo, al giorno d'oggi, l'esistenza dei Buchi Neri è accettata, rafforzata da scoperte e osservazioni di importanza storica per la scienza e per l'Umanità.

Dalla componente chiave per ogni AGN, ovvero la presenza del Buco Nero posto al centro

di ogni struttura galattica attiva, conseguono tutti gli elementi e i processi chimico-fisici sopra descritti nel primo capitolo di questo Lavoro di Tesi; si può dire quindi, che senza l'esistenza e l'attività di questo corpo degenere e unico, non si potrebbe parlare di Nuclei Galattici Attivi ma neanche di Galassie, in quanto si crede che risieda, per ogni struttura galattica a spirale, un Buco Nero Supermassiccio.

Il secondo elemento che accomuna ogni AGN osservato, quindi anche per i due tipi di Modelli di Unificazione e che lo contraddistingue da un'analogia galassia non attiva, causa dell'estrema attività del Buco Nero, è la luminosità emessa da questi sistemi energetici, in tutto lo spettro elettromagnetico, con emissioni di energia miliardi di volte superiori a galassie non attive.

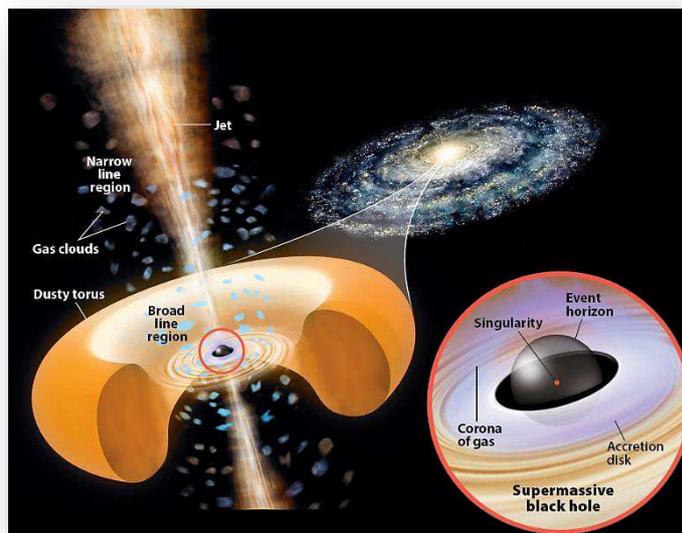
Le curiosità circa la luminosità di questi oggetti astrofisici non risiede solo nel valore assoluto, che, come visto nel caso dei Quasar, la classe di Nuclei Galattici Attivi più brillanti, che ha una media di  $10^{40}J$ , ma specialmente nell'emissione in tutto lo spettro elettromagnetico, con il peculiare spettro, costellato da righe di emissione e di assorbimento, come analizzato e presentato nei vari paragrafi del capitolo 1.

Il terzo elemento, che sarà elemento di analisi e studio nel seguente paragrafo 2.2, non è la struttura geometrica galattica del Nucleo Galattico Attivo, spirale o irregolare, ma bensì la regione che si comporta come "alimentatore cosmico" per il Buco Nero Supermassiccio, ovvero, già menzionato sopra, il Disco di Accrescimento.

Se il Buco Nero è il cuore pulsante per ogni AGN, il Disco di Accrescimento è invece il sangue, trasportando tutto il necessario, fornendo costantemente materia, plasma e radiazione ad altissima temperatura alla fucina cosmica.

Quindi, riassumendo attraverso un elenco, i principali punti per il riconoscimento, identificazione, classificazione e Unificazione di questi sistemi galattici attivi sono tre:

- Presenza di un Buco Nero Supermassiccio centrale con massa  $M_{BH} > 10^8 M_{\odot}$ , estremamente attivo e denso.
- Intensa luminosità al quale si associa uno spettro in tutte le bande elettromagnetiche
  - Spettro caratterizzato da righe di emissione e assorbimento.
- "Motore cosmico" dato dalla presenza del Disco di Accrescimento che avvolge il Buco Nero.



*Figura 2.1: Rappresentazione artistica della struttura interna ed esterna di un Nucleo Galattico Attivo*

Evidenziati i punti chiave per entrambi i Modelli di Unificazione, è giunto il momento di definire le distinzioni e le caratteristiche intrinseche per entrambe le due Teorie,

soffermandoci, nel paragrafo 2.1, sul Modello di Unificazione Debole per poi concludere, raggiungendo il paragrafo 2.3 di questo Lavoro di Tesi, con il Modello Generale, che si propone essere il Grande Unificatore, agglomerando il primo.

Il Modello di Unificazione Debole nasce da una semplice domanda, poi verificata sperimentalmente attraverso le osservazioni e le analisi spettroscopiche: *i due tipi di Galassie Seyfert possono essere lo stesso tipo di Nucleo Galattico Attivo, osservate e studiate da una angolazione diversa, con caratteristiche spettrali distinte ma con le stesse identiche componenti strutturali?*

Nel paragrafo 1.3 in cui sono state presentate e analizzate le Galassie Seyfert, di tipo 1 e 2, ove sono elencate le caratteristiche in comune e quali no, la domanda sopra esposta sorge spontanea.

In termini di luminosità, energia emessa e massa del Buco Nero centrale, tra le due galassie attive non vi è molta disparità, ove si può solamente sottolineare come le Galassie Seyfert di tipo 2, risultano essere di poco meno estese, massive, luminose ma più dense delle gemelle Seyfert di tipo 1 ma la vera distinzione risiede nell'analisi spettrale di questi due sistemi astrofisici.

Sono due le differenze che si possono notare nello studio di due Galassie Seyfert, tipo 1 e 2:

1. Righe di emissione meno larghe per le Galassie Seyfert di tipo 2 rispetto alla FWHM delle righe di Galassie di tipo 1.
2. Continuo spettrale che risulta più debole delle Galassie Seyfert di tipo 1 per le Galassie di secondo tipo.

Da numerose osservazioni e catture spettrali di Galassie Seyfert di tipo 1 fortemente variabili, peculiari per la comparsa e scomparsa di alcune righe spettrali a intervalli in alcuni casi molto regolari, fu l'astronomo statunitense Donald Edward Osterbrock a formulare una prima ipotesi/teoria di Unificazione di queste due Galassie Attive.

Nel 1978, infatti, lo scienziato suppose che i due sistemi astrofisici di tipo 1 e 2, in realtà fossero lo stesso identico tipo di Galassia Seyfert, in particolare di tipo 1, ma visti da un'angolazione diversa.

A seconda della posizione dell'osservatore rispetto alla Galassia Seyfert di tipo 1, quindi lungo la linea di vista, si può incontrare o meno una struttura oscurante di geometria idealmente toroidale, costituita da polveri, molecole di varia natura e complessità ed elettroni liberi, chiamata toro molecolare, che polarizza, riflette o devia la radiazione elettromagnetica emessa dal Nucleo della Galassia Attiva verso l'osservatore, impedendone così l'osservazione e l'analisi delle righe spettrali.

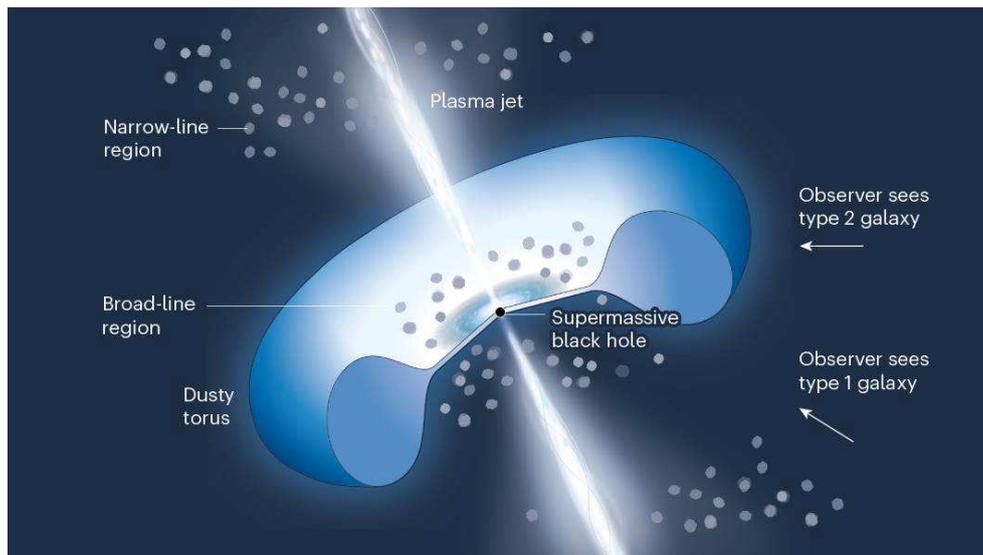
Sulla base di questa considerazione quindi l'osservatore potrà osservare, nel caso di una Galassia Seyfert di tipo 1, sulla base dell'angolo di osservazione fino ad arrivare all'asse sul piano del cielo, la Narrow Line Region (NLR) e la Broad Line Region (BLR), quindi con le caratteristiche righe spettrali altamente larghe ed energetiche, tipiche delle Galassie Seyfert di tipo 1, oppure solo la NLR, come nel caso delle Galassie Seyfert di tipo 2, ove la BLR risulta occultata dal toro molecolare.

Tale ipotesi soddisfa inoltre la seconda caratteristica sopra nominata, di un continuo più debole per le Galassie Seyfert di tipo 2 rispetto al tipo 1, a causa proprio del toro molecolare. Questa, come si vedrà meglio nel paragrafo 2.2, è una struttura estesa, con un raggio di circa un parsec, di massa che si aggira a  $M_{toro} \cong 10^9 M_{\odot}$ , opaco su quasi tutto lo spettro elettromagnetico.

Coprendo un ampio angolo, con una stima angolare di  $\theta \sim 30^\circ$ , il toro molecolare oscura una grande quantità di radiazione elettromagnetica prodotta ed emessa dal nucleo della Galassia Attiva, riducendone così, di fatto, il numero di fotoni che raggiungeranno l'osservatore, con un minor flusso osservato e quindi un continuo più debole.

Come esposto nel paragrafo 1.3.1, per le due Galassie Seyfert, di tipo 1 e 2, la luminosità, in termini di luminosità della nostra stella, il Sole, con  $L_{\odot} \cong 3.917 \cdot 10^{26} W$ , è significativamente diversa.

Le Galassie Seyfert di tipo due risultano mediamente meno brillanti di almeno un ordine di grandezza, sebbene queste risultano più lucenti in alcune bande elettromagnetiche.



*Figura 2.2: Rappresentazione artistica della struttura di una Galassia Seyfert di tipo 1. In base all'angolo e all'occultamento, lungo la linea di vista, del toro molecolare della BLR, si può osservare lo spettro di Galassia di tipo 1 a Galassia Seyfert tipo 2, con conseguente differenziazione.*

## 2.2. La struttura Toroidale Centrale

In questo paragrafo saranno concentrate le analisi e i più noti studi e ipotesi sulla struttura che circonda e alimenta il nucleo di ogni Nucleo Galattico Attivo, che può essere suddivisa in due elementi, idealmente concentrici al Buco Nero SuperMassiccio:

1. Disco di Accrescimento
2. Toro Molecolare

Le due strutture che, rispettivamente in ordine di vicinanza al Buco Nero Supermassiccio centrale, sono il Disco di Accrescimento e poi il Toro Molecolare, rappresentano, insieme, una regione di vitale importanza per un Nucleo Galattico Attivo, poiché senza questa, non si avrebbe il flusso di materia in caduta verso la buca di potenziale infinito dal quale poi si ha la generazione di energia e radiazione elettromagnetica che noi, tutt'ora, osserviamo attraverso i nostri telescopi e spettroscopi e non si potrebbero neanche osservare le differenze nello spettro delle varie Galassie.

Riprendendo la metafora esposta nel capitolo 2, paragrafo [2.1](#), se il Buco Nero è il cuore pulsante della Galassia Attiva e la materia del Disco di Accrescimento il suo sangue, in analogia con la vita e l'anatomia moderna, se viene a mancare il cuore, tutto cessa ma la stessa cosa accade anche se smettesse di scorrere il sangue verso il cuore; senza flusso costante e continuo, il cuore smetterebbe di battere, portando così alla cessazione dell'attività elettromagnetica del Nucleo della Galassia Attiva.

Prima di addentrarci nella sezione più pratica e fisica, nella quale verranno esposte e studiate le equazioni che calcolano la geometria, massa, luminosità e temperatura del Disco di Accrescimento, l'esistenza di questa struttura risulta fondamentale non solo per i Nuclei Galattici Attivi ma si può osservare in altri numerosi casi, dai dischi proto-planetari, a sistemi stellari in formazione, stelle binarie, sebbene dai primi a questi ultimi, sono molte le differenze.

Come suggerisce il nome stesso, stiamo trattando di una struttura a forma di disco, in alcuni casi geometricamente molto sottile, densa, viscosa, concentrica rispetto al Buco Nero, il cui appiattimento è fortemente influenzato dalla densità superficiale e dalla ionizzazione dei gas, otticamente spesso e in rapido movimento.

La formazione di questa struttura astrofisica si verifica quando materia, polveri e gas freddo in caduta/cattura da parte di un oggetto o più oggetti massivi, si posiziona lungo il piano della galassia, mantenendo invariato almeno l'80% del momento angolare iniziale.

L'elevata viscosità del materiale catturato del Disco di Accrescimento, che può essere assimilato in prima approssimazione ad un fluido, determina un trasporto del momento angolare alle regioni più esterne della struttura, garantendo così un moto a spirale della materia più vicina al Buco Nero.

Durante tale processo fisico, diretto verso il centro, la materia cede una porzione di energia gravitazionale, oltre ad energia cinetica.

Questo quantitativo di energia viene convertito, in parte, in luce emessa; si ha infatti un'elevata emissione di radiazione elettromagnetica, con un'efficienza relativamente alta.

Per una descrizione formale di tutte le caratteristiche per un Disco di Accrescimento geometricamente sottile, otticamente spesso, sono necessari diversi parametri ed equazioni fondamentali, le quali includono elementi fisici di notevole importanza, come vedremo il tasso di accrescimento o anche la massa in caduta nel Buco Nero.

Le seguenti dimostrazioni e formule sono *Time-Independent*; ci soffermeremo quindi al caso di un disco otticamente spesso e geometricamente sottile statico, in condizione di stazionarietà.

Sia  $M$  la massa del disco,  $\rho_r$  la densità del fluido,  $dr$  spessore radiale,  $v_r$  la velocità del fluido,  $\Sigma$  densità superficiale.

Considerando un elemento infinitesimo di massa  $dM$  come

$$dM = 2\pi r \Sigma dr \quad (2.2.1)$$

l'equazione di continuità, espressione differenziale che descrive a livello locale il

comportamento del sistema fisico e stabilisce se vi è conservazione delle leggi fisiche, può essere riscritta dalla sua forma standard nel seguente modo:

$$\frac{\partial \rho(r)}{\partial t} + \vec{\nabla}[\rho(r)\overrightarrow{v(r)}] = 0 \xrightarrow{\text{sostituzione}} 2\pi r \frac{\partial \Sigma}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(2\pi r \Sigma v_r) = 0 \quad (2.2.2)$$

In condizione di stazionarietà, la derivata temporale  $\partial/\partial t$  si annulla; grazie a questa caratteristica, diventano indipendenti dal tempo la densità e con essa la densità superficiale, semplificando notevolmente l'equazione di continuità.

Con  $(\partial/\partial t) = 0$ , si può risolvere l'equazione sopra e quindi calcolare la massa che si muove diretta verso il centro; in altri termini la massa della materia che supera l'orizzonte degli eventi, cadendo nella buca di potenziale infinita del Buco Nero.

Chiameremo la massa in caduta dentro il Buco Nero con la notazione  $\dot{M}$  e ha equazione:

$$\dot{M} = -2\pi r \Sigma v_r \quad (2.2.3)$$

Si possono sottolineare due caratteristiche di questa equazione:

1. La presenza del segno meno, legata al verso della velocità radiale della massa in caduta, specifica proprio il verso e direzione del moto a spirale, diretto verso il centro dell'attrazione gravitazionale.
2. Il valore numerico per  $\dot{M}$  risulta, in condizioni di un disco statico, costante.

Per quanto riguarda la luminosità emessa dal Disco di Accrescimento, si consideri una struttura otticamente spessa, geometricamente sottile nella quale vige la conservazione dell'energia. Ciò implica che a tale conservazione, si ha una completa e totale conversione, senza alcun tipo di dispersione, dell'energia potenziale, gravitazionale e cinetica rilasciata dalla materia in moto in radiazione elettromagnetica.

Sotto queste condizioni, l'energia emessa è data principalmente da due contributi, rispettivamente:

- $L_{Grav}$  è la luminosità associata alla cessione di energia gravitazionale del materiale in caduta verso il centro.
- $L_{LT}$  è la luminosità data dal momento torcente locale della materia associato al momento angolare conservato del Disco di Accrescimento, distribuito maggiormente nelle regioni più esterne della struttura che circonda il centro gravitazionale.

Per quanto riguarda le due quantità, le equazioni sono le seguenti:

$$L_{Grav} = -\dot{M} \frac{GM}{r^2} \quad (2.2.4)$$

$$L_{LT} = -\dot{M} \frac{GM}{r} f(r) \quad (2.2.5)$$

L'energia emessa o radiata dal Disco di Accrescimento, come detto sopra, è la somma di questi due contributi, con l'unica problematica che vi è la necessità di differenziare lungo tutto il raggio  $r$ .

In termini infinitesimali, il contributo di luminosità emessa di una porzione di disco approssimabile a  $dr$  sarà data quindi dalla derivata della somma totale dei due contributi, scritta come  $L_T$ , quindi:

$$\frac{dL_T}{dr} = \frac{3GM\dot{M}}{2r^2} f(r) \quad (2.2.6)$$

*$f(r) = 1 - (r_{int}/r)^2$  è una funzione in dipendenza di un raggio  $r_{int}$  di una particella del disco di Accrescimento rispetto al raggio del suddetto rispetto al centro del Buco Nero,  $r$ . Minore è il valore di  $r_{int}$ , più vicina è la particella al Buco Nero; quindi, la regione nella quale quella particella esiste, sarà più luminosa, calda ed emittente.*

Nel limite non-relativistico, l'equazione differenziale si risolve con un'integrazione su tutto il disco, quindi lungo tutto  $r$ , con il seguente risultato:

$$L_T = \frac{1}{2} \frac{GM\dot{M}}{r_{int}} \quad (2.2.7)$$

Si possono evidenziare diversi elementi degni di nota da questa equazione:

1. Sotto limite non-relativistico, il risultato ottenibile dalla presente formula rappresenta, mediamente, il 50% della effettiva e misurata luminosità radiata dal Disco di Accrescimento. Da questo fatto, evidenziamo come la parte relativistica e ultra-relativistica contribuisca significativamente alla luminosità totale e non può essere trascurata.  
La percentuale risulta ancora minore se si considera un Buco Nero rotante o per un Disco di Accrescimento che evolve nello spazio-tempo, quindi, nel momento in cui si esce dalla condizione di stazionarietà.
2. La proporzionalità tra  $L_T \propto r_{int}^{-1}$  si ritrova anche nel limite Newtoniano, evidenziano poi come ad un valore sempre più piccolo di  $r_{int}$  ( con  $0 \leq r_{int} \leq r$  ), quindi avvicinandosi sempre di più al pozzo gravitazionale, la luminosità della regione ove quella particella si trova, aumenta, fino a raggiungere valore infinito in corrispondenza dell'orizzonte degli eventi.
3. Si ha inoltre una proporzionalità diretta tra la massa del Buco Nero  $M$  e la massa del Disco di Accrescimento  $\dot{M}$ .  
All'aumentare della massa del SMBH, aumenta con essa la capacità di attrazione gravitazionale di materia nelle vicinanze, contribuendo così ad un aumento della mole del Disco di Accrescimento.  
Risulta, oltremodo, valido anche il ragionamento inverso: se un oggetto massivo errante viene catturato dal Buco Nero, questo verrà inevitabilmente distrutto dalle forze esercitate dal centro, diventando così "nutrimento" del SMBH, che accrescerà notevolmente la sua massa.

Un altro parametro molto importante che permette di comprendere il picco di emissione dello spettro del Disco di Accrescimento è la temperatura.

Come per la luminosità  $L_T$ , la dipendenza dal raggio  $r$  è di fondamentale importanza.

Partendo dalle più semplici equazioni per approssimare un elemento di interesse in sistemi fisici di questa complessità, si consideri la legge di Stefan-Boltzmann, che dichiara come l'emittanza termica sia proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta (in °K) del corpo che emette radiazione elettromagnetica.

Dalla formula base della legge di Stefan-Boltzmann, adattandola al nostro studio si ottiene:

$$F(r) = \sigma T^4(r) \xrightarrow{\text{diventa}} T(r) = \left( \frac{3GM\dot{M}}{8\sigma\pi r^3} f(r) \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.2.8)$$

Come menzionato nel paragrafo [1.2](#), la luminosità di Eddington è la quantità di luminosità per cui si ha equilibrio tra forza di radiazione di pressione e forza gravitazionale, è un limite superiore e si ha una proporzionalità diretta tra  $L_{edd} \propto M_{BH}$ .

Riprendendo  $\dot{M}_E$ , presentato come il tasso di accrescimento nel paragrafo [1.2](#), allora si può formulare una stima di una temperatura in dipendenza del valore del raggio.

Per semplificare notevolmente il calcolo e anche per poter normalizzare questa quantità fisica, è utile menzionare come, all'interno del raggio per un Disco di Accrescimento, esistano dei valori di  $r$  ove l'orbita di una qualsivoglia particella o oggetto poco massivo risulta stabile.

Naturalmente i valori di questi raggi "speciali" sono fortemente dipendenti da una

moltitudine di variabili; dal tipo di Buco Nero in questione (che possa essere statico e non elettricamente carico al caso di un SMBH massimamente rotante e carico) e del tipo di Disco di Accrescimento che si sta studiando, il cui raggio rappresenta il limite superiore.

Esiste, quindi, la possibilità di ottenere, con una buona approssimazione, l'orbita stabile più vicina al Buco Nero che si possa considerare valida e fisicamente possibile, che chiameremo, in questo Lavoro di Tesi, con la notazione  $r_{g,s}$ .

La formula di questo raggio massimamente vicino e stabile al Buco Nero può assumere diverse forme, ma per il nostro studio, ci adatteremo al caso di un SMBH statico, non rotante e non elettricamente carico, così da poter applicare, come fatto nel paragrafo [2.1](#), la metrica di Schwarzschild, ottenendo così:

$$r_{g,s} = \frac{6GM_{BH}}{c^2} = 3R_s \quad (2.2.9)$$

Come si può ben notare il valore di questo raggio massimamente vicino ma stabile al Buco Nero corrisponde esattamente a tre volte il valore del Raggio di Schwarzschild, quindi tre volte il raggio che delimita l'orizzonte degli eventi del SMBH.

Definito ora il raggio di massima vicinanza, tale da permette ad una particella di eseguire una rivoluzione stabile attorno al Buco Nero, è possibile ora calcolare come evolve la temperatura della materia radiante che costituisce il Disco di Accrescimento sulla base dell'rapporto del raggio stesso del Disco e di questo raggio  $r_{g,s}$ , che sarà proporzionale al rapporto tra la massa in caduta dentro il SMBH,  $\dot{M}$ , e il tasso di accrescimento,  $\dot{M}_E$ , come segue:

$$T_K \left( r/r_{g,s} \right) \propto (10^8 M_\odot)^{-\frac{1}{4}} \left( \dot{M}/\dot{M}_E \right)^{+\frac{1}{4}} \left( r/r_{g,s} \right)^{-\frac{3}{4}} f(r) \quad (2.2.10)$$

Nel caso di un Buco Nero con una massa stimata di  $M_{BH} \cong 10^8 M_\odot$ , con il valore di  $r_{g,s}$  sopra esposto, con le opportune sostituzioni e calcoli, si può osservare un gradiente di temperatura, ove questa, misurata in Kelvin, decresce da un valore di  $10^7$  °K, quindi con picco di emissione in X, fino ad arrivare a temperature di  $10^4 \sim 10^5$  °K, quindi verso le bande dell'Ultravioletto fino all'Ottico ed Infrarosso.

Ultimo elemento che andremo ad analizzare, più in forma teorica, tratta la geometria del Disco di Accrescimento, che generalmente si ipotizza essere un disco di forma appiattita, denso e viscoso, più o meno spesso sulla base di vari parametri e rapporti che ora andremo ad analizzare.

Fondamentali per lo studio sulla forma e struttura del Disco sono il rapporto  $\dot{M}/\dot{M}_E$  e l'opacità del disco stesso, quindi dalla composizione delle polveri e molecole presenti.

Qui sotto sono presentate le principali casistiche:

1.  $(\dot{M}/\dot{M}_E) < 1$ 
  1. Ci si trova in presenza di un Disco di Accrescimento ove il tasso di accrescimento è relativamente basso.  
Lo spessore del disco risulta quindi trascurabile rispetto al diametro totale.
  2. Per alti valori di opacità, si ha una differenziazione più marcata riguardo all'emissione e allo spettro emesso della regione centrale del Disco di Accrescimento rispetto a quella più esterna, fino a raggiungere il bordo.  
Per le regioni centrali si ha uno spettro ben visibile nel dominio Ultravioletto; si ha dominio Ottico per le zone più esterne.  
Per bassi valori di opacità, questa caratteristica tende a diminuire.
3.  $(\dot{M}/\dot{M}_E) > 1$ 
  - a. Per valori pari o superiori a uno del tasso di accrescimento, si verifica un maggiore afflusso di materia dall'esterno verso il centro del AGN.  
Per un elevato tasso di accrescimento, la materia catturata si orienta verso il Buco Nero su più livelli, non più sul piano del Disco di Accrescimento,

saturo di materia calda, causando così una struttura che si sviluppa in verticale, lungo la perpendicolare.

Lo spessore del Disco di Accrescimento aumenta considerevolmente, formando così una struttura che può essere assimilata a quella di un disco biconcavo, più sottile al centro e alto ai bordi.

Qui, il valore di opacità del Disco, basso o alto, comporta una minima variazione nel termine di luminosità in quanto lo spessore elevato del disco stesso rappresenta un significativo ostacolo fisico alla propagazione dei raggi luminosi emessi, impedendone così la trasmissione di una buona parte di questi.

#### 4. $(\dot{M}/\dot{M}_E) \ll 1$

- a. Se il tasso di accrescimento è ancora più basso, il disco si appiattisce ancor di più, con la possibilità di trovare una struttura con spessore estremamente piccolo.

Terminata questa panoramica sull'elemento più interno, dopo il Buco Nero centrale, ovvero il Disco di Accrescimento, segue, nel nostro viaggio verso le regioni più esterne di un Nucleo Galattico Attivo, struttura di vitale importanza per il riconoscimento e per l'Unificazione degli AGN, ovvero il Toro Molecolare.

Questo elemento è argomento di dibattito da molte decadi all'interno della comunità scientifica, riguardo alla sua composizione, struttura e formazione, ma ciò che si può affermare su questo Toro Molecolare è che, come già detto prima, è sicuramente una struttura che avvolge il Nucleo di una Galassia Attiva, costituita da molecole di vario tipo e formazione che impediscono la propagazione della radiazione elettromagnetica emessa.

Esistono diversi modelli che forniscono delle ipotesi sulla struttura geometrica di questo elemento astrofisico, partendo da una toroide uniforme esteso in un'ampia regione di spazio, di raggio di almeno cento parsec, fino ad arrivare agli ultimi modelli basati su spettri e mappature principalmente nel Medio Infrarosso e raggi X, in cui il raggio della toroide si riduce ad alcuni parsec.

La teoria più in accordo con i risultati ottenuti specifica come il Toro Molecolare è una struttura ad alta inhomogeneità, caratterizzata e costituita da nubi separate, di densità, composizione molecolare e forma diverse l'una dall'altra, distanti in alcuni casi anche diverse Unità Astronomiche UA, che, se viste in un unico insieme, tale figura assomiglia ad una toroide appunto.

Per quanto riguarda la composizione, come si può già ben comprendere dal nome stesso, ogni nube, di forma irregolare, è costituita da molecole di vario tipo e genere, dalle più leggere alle più complesse, con diversi gradi di polarizzazione e ionizzazione, fino a strutture microscopiche, come polveri o grani.

Affinché queste molecole non si dissocino a causa dell'elevata temperatura od energia della radiazione elettromagnetica emessa dal Nucleo, la condizione necessaria è che questa struttura si trovi ad una distanza tale da evitare il disaccoppiamento e ciò si verifica anche grazie alla presenza del Disco di Accrescimento.

Dalle ultime osservazioni e studi inoltre sono state ipotizzate o osservate inoltre altre due caratteristiche degne di nota:

- 1) Estinzione causata dal Toro Molecolare.
  - i) L'enorme varietà di materia molecolare, di vario tipo e genere, consegue ad un importante fenomeno di estinzione, con picchi massimi di 40-50 magnitudini.

Valori così alti di estinzione si spiegano solo attraverso gli elevatissimi fenomeni di assorbimento, re-emissione, scattering, polarizzazione e deviazione che si verificano all'interno delle nubi molecolari.

Per un singolo fotone, prodotto dal Nucleo, che possiede un certo quantitativo di energia, con la sua propria frequenza e lunghezza d'onda, la probabilità che questo esca dal Toro Molecolare completamente invariato è particolarmente bassa; è sufficiente un singolo fenomeno di polarizzazione del raggio di luce che può

comportare l'impossibilità di osservazione di quest'ultimo e quindi la perdita dell'informazione che esso trasportava.

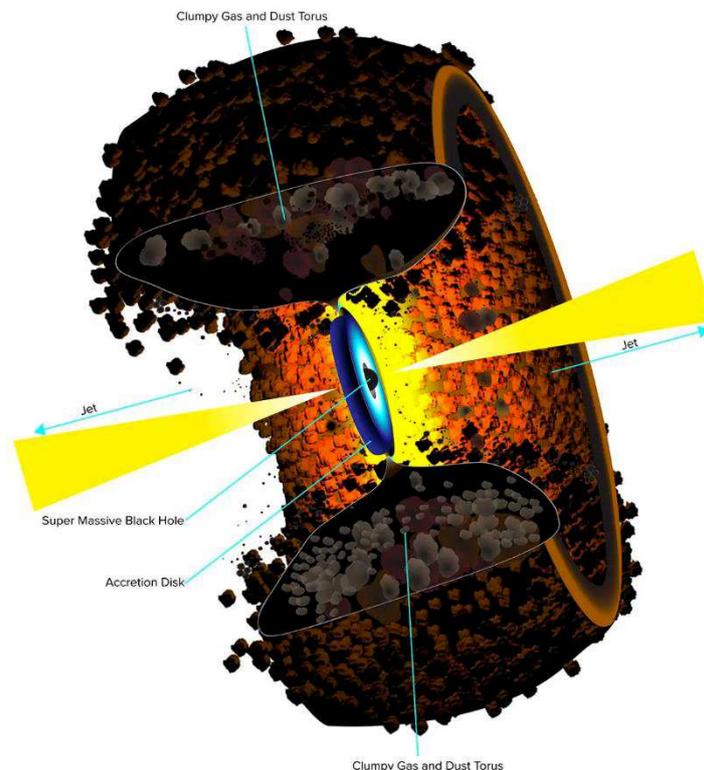
2) Differenziazione della struttura del Toro Molecolare.

- i) Gli ultimi studi e osservazioni suggeriscono inoltre una distinzione fisico-chimica, tra la regione che giace sul piano della Galassia, ovvero sul piano ove è presente anche il Disco di Accrescimento e la regione più lontana dal piano, sia lungo i bordi che ortogonalmente al suddetto piano.

Le nubi molecolari giacenti sul piano Galattico e quelle più vicine al Disco di Accrescimento sono le più esposte a fotoni altamente energetici e ionizzanti; risulta quindi maggiore la probabilità di disaccoppiamento delle molecole.

Con dissociazione si intende quel processo chimico-fisico nel quale una molecola subisce una scissione, che possa essere parziale o completa, portando alla rottura dei legami tra i vari atomi, formando ioni cationici e/o anionici.

Allontanandoci dal piano Galattico, invece, quindi salendo lungo l'asse ortogonale al primo, le nubi molecolari subiscono sempre meno questi fenomeni altamente energetici, ostacolando significativamente la propagazione della radiazione elettromagnetica verso noi osservatori.



*Figura 2.3: Rappresentazione artistica del Toro Molecolare che avvolge il Nucleo. Come da immagine, il Toro è costituito da una moltitudine di regioni nebulari di forme irregolari, responsabili, tra tutti gli altri fattori, dell'elevata estinzione.*

### 2.3. La grande “Unificazione”

In quest'ultimo paragrafo di questo Lavoro di Tesi, completeremo la panoramica sui Nuclei Galattici Attivi, riprendendo i punti salienti in tutti i paragrafi esposti, agglomerando questi nel Modello di Grande Unificazione, che si propone, come più volte sottolineato in questo prodotto, la teoria che unisce tutte le varie classificazioni di AGN sopra esposte sotto l'unico e solo nome di Nucleo Galattico Attivo.

L'idea di unificare tutti questi sistemi astrofisici altamente energetici sorse fin dai primi anni '50, ma fu proprio grazie al lavoro presentato da Osterbrock, nel 1978, ad aprire la strada a potenziali modelli di grande Unificazione.

Ricapitoliamo tutte le informazioni, tra tutti i tipi di AGN presentati lungo tutto il corso del Lavoro di Tesi qui sotto:

1. Tutte le Galassie Attive posseggono un Buco Nero centrale Supermassiccio, circondato da un Disco di Accrescimento e da un Toro Molecolare. Questi tre elementi sono la base, le fondamenta per qualsivoglia Modello di Unificazione; senza uno di questi, non si può più parlare di Nucleo Galattico Attivo.
2. Tutti gli AGN condividono le seguenti proprietà peculiari ed estreme, non riscontrabili in ogni altro sistema astrofisico:
  - 2.1. Luminosità intensa, visibile tutto lo spettro elettromagnetico, dalle onde Radio alle onde Gamma, con ordini di grandezza ben al di sopra delle corrispettive Galassie Non Attive.  
Luminosità in alcuni casi variabile, anche con periodi temporali ben definiti e costanti.
  - 2.2. Spettro che presenta sia righe di assorbimento che di emissione, con l'unica eccezione per gli Oggetti BL Lac.
  - 2.3. Presenza di uno o due getti/flussi di plasma e radiazione elettromagnetica ad altissima energia uscenti dal Nucleo, che si propagano a velocità ultrarelativistica, trasportando quantitativi di energia e quantità di moto non riscontrabili nell'cosmo.
  - 2.4. Estrema attività nelle regioni centrali del Nucleo Galattico Attivo; senza il fenomeno dell'accrescimento, processo regolato dal rapporto  $\dot{M}/\dot{M}_E$ , non si avrebbe i quantitativi di emissione energetica che noi oggi riscontriamo.

All'interno di questi punti sopra esposti, vi è un elemento fisico che può essere utilizzato come metro per la identificazione tra una Galassia Attiva e no, ma, nel caso del Modello di Grande Unificazione, proprio come parametro fondamentale, dal quale tutto deriva o viene derivato, che non è altro che la luminosità vera e propria del sistema astrofisico.

Nel corso di questo Lavoro di Tesi, la luminosità è stata largamente argomento e oggetto di analisi e studio, poiché proprio attraverso il valore ottenuto dagli strumenti, possiamo comprendere che tipo di oggetto astrofisico si sta studiando e classificarlo, da cui poi estrapolare lo spettro della Galassia, calcolare il SED, analizzare in quale banda elettromagnetica si ha maggior emissione e infine differenziarlo dalle Galassie non Attive. Sulla base del valore assoluto di luminosità ottenuta dalle osservazioni fotometriche e dalle analisi spettroscopiche, si può oltremodo differenziare da un AGN ad un altro, studiando l'angolo che esiste tra la linea che congiunge noi osservatori all'oggetto astrofisico in questione.

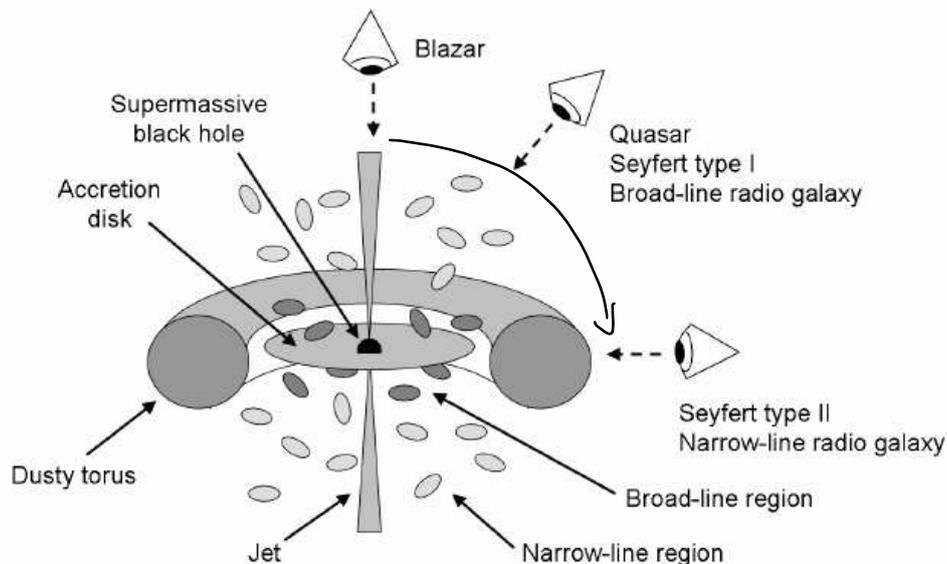
Come accennato nel paragrafo [1.3.3](#), nel caso dei Blazar, lungo la linea di vista incontriamo proprio lungo l'asse, il getto polarizzato ed energetico uscente dal Nucleo della Galassia Attiva; in questa circostanza, quindi, stiamo osservando un Nucleo Galattico Attivo, con un angolo di zero gradi rispetto alla linea di osservazione o con un angolo di novanta gradi rispetto al piano galattico, ovvero stiamo osservando la struttura galattica dall'alto, incontrando come primo elemento proprio il getto energetico, che si propaga a velocità ultrarelativistiche nello spazio, per diversi parsec, trasportando quantitativi di energia estremi, indice del intensa attività del Buco Nero Centrale.

Si noti però che, il valore medio di Luminosità di un oggetto attivo come un Blazar sia

minore rispetto ai valori osservati per un Quasar, sebbene il primo corrisponda ad un Nucleo Galattico Attivo osservato perpendicolarmente rispetto al piano Galattico, a causa di fenomeni di scattering particolarmente numerosi dei fotoni prodotti per radiazione di Sincrotrone con eventuali molecole o polveri lungo la linea di osservazione e per la presenza di nubi altamente ionizzate che ne ostacolano la propagazione all'interno di una struttura ideale, di forma conica attorno al jet energetico, chiamato cono di ionizzazione. Non appena si esce dal raggio del cono di ionizzazione del AGN, i fotoni irradiati dal Nucleo, diretti verso di noi osservatori, subiscono minori fenomeni di alterazione energetica, arrivando a noi con valori di energia e intensità maggiori.

In queste poche righe di spiegazione, si ha la distinzione tra Quasar e Blazar; entrambi sono due oggetti estremamente luminosi, osservati con angoli rispetto al piano galattico del AGN maggiori di quarantacinque gradi fino ad arrivare ai novanta gradi, ove aumentando sempre di più l'angolo, si hanno maggiori fenomeni di assorbimento e re-emissione con valori minori di energia, maggior estinzione, spettro sempre più privo di righe di emissione e assorbimento e picco di luminosità in diverse bande elettromagnetiche.

Immaginando quindi di circoscrivere una circonferenza attorno alla Galassia Attiva, il cui piano Galattico del AGN coincide con il diametro del cerchio ideale, un osservatore identificherà un Blazar se e solo se questo sta osservando dall'alto tale struttura, trovandosi a nord o ortogonalmente al piano, mentre classificherà tale oggetto come Quasar se si scende in senso orario lungo l'arco di circonferenza, dall'alto verso il basso, come da figura:



*Figura 2.4: Rappresentazione artistica semplificata del Modello di Unificazione Generale sulla base dell'angolo di osservazione, in senso orario, derivabile dal quantitativo di luminosità osservata e della struttura astrofisica che si può incontrare lungo la linea di osservazione.*

Seguono, dopo il Blazar e il Quasar, avvicinandoci al piano Galattico, quindi alle NLR e BLR, le Galassie Seyfert di tipo I e II.

Queste due Galassie Attive, come sottolineato nel paragrafo 1.3.2 e nel Modello di Debole Unificazione, paragrafo 2.1, sono strutture simili tra di loro, differenziabili per diversi elementi nello spettro e nel continuo e per la presenza o no della BLR, oscurato o meno dal Toro Molecolare, studiato nel paragrafo 2.2.

Data la condizione di oscuramento della BLR da parte del Toro Molecolare, è naturale, per un osservatore, identificare una Galassia Seyfert di tipo II, una struttura galattica vista di taglio, ovvero la cui linea di vista coincide ed incontra il piano Galattico del AGN, trovando così proprio il Toro Molecolare.

Poiché per le Galassie Seyfert di tipo I, la NLR e BLR sono ben riconoscibili, individua che

l'osservatore sta studiando e catturando la luce emessa dalla struttura astrofisica con un angolo intermedio rispetto all'angolo tipico per l'osservazione di un Quasar e la Galassia Seyfert di tipo II; la linea di osservazione dell'osservatore punta verso la struttura più interna del Nucleo, ovvero il Disco di Accrescimento, quindi evitando l'osservazione del Toro Molecolare.

In conclusione, come riassunto pratico dello studio effettuato sopra, forniremo delle stime angolari sulla base dei risultati osservativi, associando ad ogni intervallo (in gradi sessagesimali o *deg*), la classe e il tipo di Nucleo Galattico Attivo che si sta osservando e studiando.

Dall'analisi sopra, possiamo trarre in conclusione:

1.  $80^\circ \lesssim \theta \lesssim 90^\circ$  rispetto al piano galattico: Blazar, Oggetti BL Lac
2.  $60^\circ \lesssim \theta \lesssim 80^\circ$  rispetto al piano galattico: Quasar, Quasar OVV, Radio Sorgenti Attive.
3.  $30^\circ \lesssim \theta \lesssim 60^\circ$  rispetto al piano galattico: Galassia Seyfert di tipo I
4.  $0^\circ \lesssim \theta \lesssim 30^\circ$  rispetto al piano galattico: Galassia di Seyfert di tipo II, Radio Sorgenti Quiete.

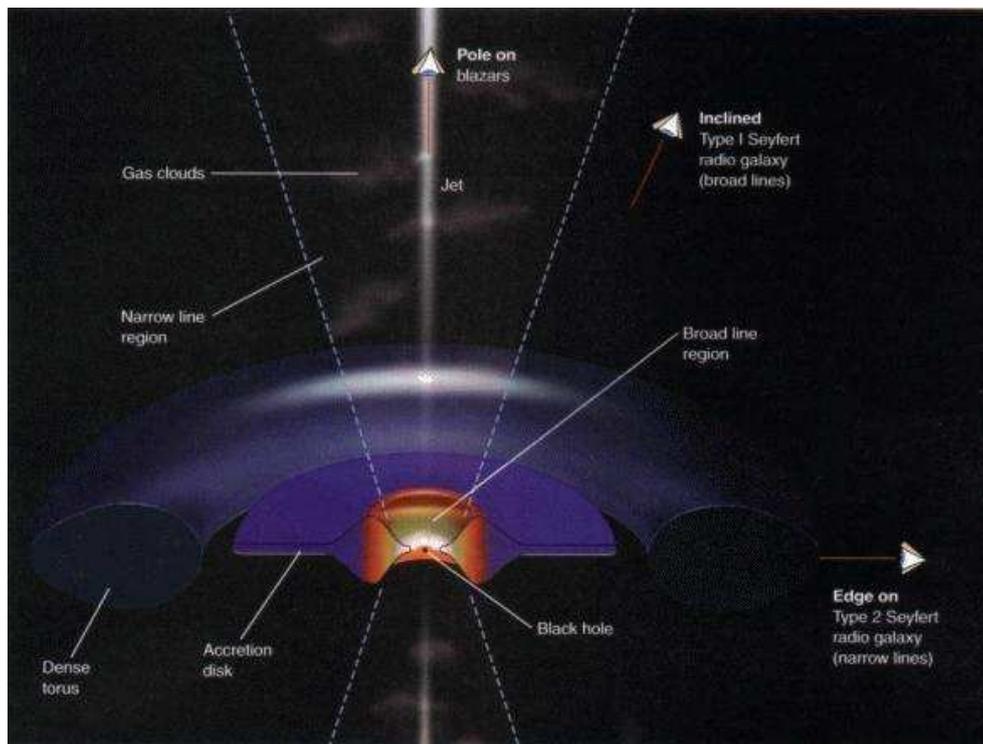


Figura 2.5: Ulteriore rappresentazione artistica legata al Modello di Grande Unificazione.

## Conclusioni

In questo Lavoro di Tesi è stata effettuata una breve panoramica su uno dei sistemi astrofisici più peculiari ed estremi che popolano il nostro Universo, ovvero i Nuclei Galattici Attivi, fornendo prima una panoramica sulla loro struttura e sulle loro caratteristiche intrinseche, tra le quali annoveriamo luminosità e spettro, per poi differenziare l'insieme di questi sistemi galattici in diverse sottoclassi o famiglie, per poi completare con la teoria che si propone come Unificatrice di questi oggetti fisici.

Ogni famiglia di AGN, rispettivamente Galassie Seyfert, Quasar, Blazar e Radio Galassie, possiedono caratteristiche specifiche non riscontrabili nelle altre differenziazioni né tanto meno nelle galassie normali, ma ciò che accumuna ciascuna di queste è la loro elevatissima luminosità prodotta, che, in alcuni casi estremi, apre una finestra sul Universo lontano a noi, nelle sue prime fasi di evoluzione, argomento studiato, analizzato e centro della Cosmologia. Nella seconda parte di questo Lavoro di Tesi, invece, lo studio si è concentrato su due argomenti principali, intrinsecamente legati l'uno all'altro, ovvero il Modello Unificato dei Nuclei Galattici Attivi e la struttura che avvolge il Buco Nero Centrale, che può essere visto come il suo motore.

Sebbene la Teoria di Unificazione dei Nuclei Galattici Attivi sia ancora in fase di sviluppo e completamento, è da sottolineare come questa rappresenti un primo passo per la comprensione e unificazione di una moltitudine di Galassie Attive che popolano il nostro Universo.

## Bibliografia

- [1] [John Moustakas and Robert C. Kennicutt, Jr. \(2006\) ApJS, \*\*164\*\*, 81](#)
- [2] C. R. Lawrence (1996), ApJS, **107**, 541 [\[1\]](#), [\[2\]](#), [\[3\]](#), [\[4\]](#)
- [3] [A. Reid, D.L. Shone \(1995\) As, 110, 213R](#)
- [4] *An introduction to active galactic nuclei*, Peterson B.M, Cambridge University Press (1997).
- [5] [Superluminal Expansion in 3C 179, Cambridge University \(2015\), R.W. Porcas](#)
- [6] *Padovani P. et al. (2016), The Astronomy and Astrophysics.*
- [7] *David M. Alexander, Ryan C. Hickox (2012), What Drives the Growth of Black Holes? <https://arxiv.org/abs/1112.1949v2>*
- [8] *Ryan C. Hickox, David M. Alexander, (2018), Obscured Active Galactic Nuclei, <https://arXiv:1806.04680v1>*