

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
INSTITUTO DE FÍSICA

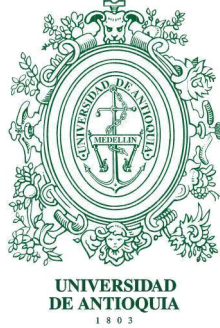
ALINIAMIENTO DE AGNs CON SU ENTORNO A GRAN ESCALA

Daniel Esteban Montenegro Taborda

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Instituto de Física

Asesor: Sebastian Bustamante-Jaramillo

Co-asesor: Juan C. Muñoz



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
INSTITUTO DE FÍSICA

ALINIAMIENTO DE AGNs CON SU ENTORNO A GRAN ESCALA

Daniel Esteban Montenegro Taborda

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Instituto de Física

Asesor: Sebastian Bustamante-Jaramillo

Co-asesor: Juan C. Muñoz

Estudiante

Asesor

Co-asesor

Medellín, Noviembre 2018

*Este trabajo esta dedicado a mi amada abuela y madre. Por su lucha
incansable para que todo esto se hiciera posible.*

Resumen

Los actuales desarrollos en los modelos de estructura del Universo a gran escala, observaciones y las últimas simulaciones con un poder de resolución mayor, a su vez muestran un Universo distribuido en regiones (estructuras). Estas estructuras se distribuyen de una manera compleja y en forma de filamentos. Dichos filamentos representan una sobre densidad de materia y son producto de la no linealidad del sistema. La estructura que conforman el universo se le denomina la red cósmica.

La estructura del Universo plantea una duda que es el problema que se pretende resolver. ¿Es posible encontrar una relación de las estructuras del Universo con las galaxias, o para ser más específico con el spin de la misma? Este trabajo nace la categorización del mismo Universo, la particularidad de ciertas regiones da indicios de la relación entre entorno galaxia; es por esto que se quiere conocer si la "mejorrelación es por parte del spin de las galaxias.

La presencia(existencia) de las regiones(estructuras) son resultado de la evolución del universo.

En estas regiones de sobre densidad se agrupan gran cantidad de materia que está constituida por cúmulos o agrupaciones de galaxias. Como su nombre lo dice, los cúmulos o agrupaciones de galaxias son agrupaciones de galaxias debido a la interacción gravitacional entre los cuerpos. Además, se conoce la existencia de los agujeros negros al interior de las galaxias, el cual tiene asociado un spin.

La motivación de este trabajo es poder encontrar una relación entre

.....

Agradecimientos

.....

Sinceramente,
Daniel Montenegro
septiembre 2018

Índice general

Índice de figuras	vii
1 Cosmología y Formación de Estructuras.	1
1.1 Relatividad General en el ámbito cosmológico (Universo homogéneo e isótropo)	1
1.2 Geometría	3
1.2.1 Métrica	3
1.3 Ecuaciones de Friedmann	6
1.4 Régimen Lineal Para la Formación de Estructuras.	8
1.4.1 Régimen Newtoniano.	8
1.5 Régimen no lineal Para la Formación de Estructuras.	10
1.5.1 Aproximación de Zeldovich	11
2 Teoría sobre AGN.	15
2.1 Introducción a AGN's	16
2.1.1 Historia	16
2.1.2 Propiedades fundamentales de los Cuásares	17
2.1.3 Cuásares, radio fuentes.	18
2.1.3.1 Clasificación de las fuentes de radio.	18
2.1.3.2 Radiación Sincrotrón	18
2.2 Tipos de AGN's	19
2.2.1 Quasi-Stelar Objects.	19
2.2.2 Galaxias Seyfert.	19
2.2.3 Radio Galaxias	20

ÍNDICE GENERAL

2.2.4	Variables Ópticamente Violentas	20
2.2.5	Objetos BL Lac	20
2.3	El Enigma Central: La existencia de un Agujero Negro	21
2.3.1	La Existencia de los Agujeros Negros	22
2.3.2	Acreción.	23
2.3.3	Generación de Jets.	23
2.3.4	Formación de Lóbulos.	24
2.4	Modelo Unificado	25
3	Modelo de Spin.	27
4	Algoritmo y Modelación.	29
5	Clasificación entorno cosmológico (Cosmic Web)	31

Índice de figuras

1.1	<i>Superficie de una esfera, representación del diferencial de línea para simetría esférica.</i>	4
1.2	<i>Tres espacios con curvatura constante, esfera con curvatura positiva (izquierda), hiperboloide con curvatura negativa y plano con curvatura cero (derecha).</i>	5
2.1	<i>Espectro combinado de varios QSOs, usando el Large Bright Quasar Survey</i>	17
2.2	<i>Los diferentes tipos de AGNs solo dan información de que lugar del AGN se está observando</i>	21
2.3	<i>Bosquejo del modelo de la estructura del núcleo del AGN, donde se puede ver el mecanismo de Blandford- Znajek</i>	24
2.4	<i>Simulación de un AGN. En la parte central se encuentra el BH, los jets son por donde se desplaza la materia y los lóbulos son los grumos donde se aglomera la materia que viene del núcleo.</i>	24

Cosmología y Formación de Estructuras.

1.1 Relatividad General en el ámbito cosmológico (Universo homogéneo e isótropo)

En la naturaleza existen cuatro fuerzas fundamentales. Al considerar un sistema donde interactúan dos ó más cuerpos con masa, la fuerza que intermedia entre las partículas es la fuerza de gravedad. Es por eso que cuando se pretende abordar el estudio de la dinámica de este tipo de partícula se debe remitir a la teoría de la gravedad. En la actualidad la teoría de la gravedad que mejor reproduce los fenómenos del universo es la Teoría de la Relatividad General de Albert Einstein.

En el camino de poder estudiar la dinámica del universo, un paso obligado es conocer las ecuaciones de Einstein y poder encontrar sus soluciones, que son de gran importancia porque relaciona la estructura del espacio-tiempo, su contenido de materia y su energía. Estas ecuaciones no pueden dar una solución exacta, pues si así lo hicieran se podría describir todo los fenómenos del universo (determinismo). La cosmología pretende describir el funcionamiento (dinámica) del universo a muy

1. COSMOLOGÍA Y FORMACIÓN DE ESTRUCTURAS.

grandes escalas, donde las contribuciones de las galaxias, estrellas y otras cosas son despreciables y sea posible llegar a una solución a las ecuaciones de Einstein.

Aunque la cosmología pueda describir los eventos a grandes escalas es necesario partir de algo. Es obligatorio conocer las condiciones iniciales de cualquier sistema para poder hacerlo evolucionar. Por esto, la cosmología parte de dos principios fundamentales. El primer principio cosmológico habla sobre la distribución de la materia y la forma del universo. A medida que evoluciona el universo, si se toma un punto cualesquiera, la distribución de los puntos alrededor es invariante en el tiempo sin importar la dirección en la cual se observe. Una forma más estricta de decir este principio es:

Principio cosmológico: *El cualquier momento, el universo es homogéneo e isótropo a muy grandes escalas.* (Autor,año,p. pag)

Cuando se cuenta con un espacio el cuál es homogéneo e isótropo este espacio presenta un máximo de simetría. Matemáticamente, nos dice que la métrica es invariante bajo cualquier rotación o traslación.

Que tan cierto puede llegar a ser esto, ¿ el universo sí es homogéneo e isótropo ? Cuando se observa el universo, la materia tiende a estar concentrada, las estrellas se concentran en galaxias, las galaxias en cúmulos de galaxias y a su vez estos cúmulos en otros súper cúmulos. Entonces, ¿que tan cierto es que el universo sea homogéneo? Para que se tenga un universo homogéneo e isótropo se debe tener observaciones a una escala mucho mayor (en el orden de 10^9 años luz), un ejemplo de ellos es la radiación cósmica de fondo, que corresponde a la radiación térmica proveniente del origen del universo, la cual tiene una anisotropía del orden de $\Delta T/T \approx 10^{-5}$.

El segundo principio cosmológico trata sobre dinámica de las sobre densidades en el universo, cuyo movimiento es despreciables cuando se compara con el movimiento cosmológico. El segundo principio se denomina como Postulado de Weyl el cual dice:

Postulado de Weyl: *La materia a escalas cosmológicas se comporta como un fluido perfecto, cuyas componentes se mueven a lo largo de geodésicas temporales,*

que no se intersectan, salvo (posiblemente) en un punto en el pasado. (Autor,año,p. pag)

El postulado de Weyl implica una idea muy importante de la cosmología, los observadores privilegiados. Estos observadores se encuentran en reposo con respecto al fluido lo cual implica que su movimiento es con respecto a la evolución del universo. El nombre que se le dan a estos observadores son los observadores comóviles. Cuando se define este tipo de observadores también se define un tiempo cosmológico, que corresponde a la dirección temporal del observador comóvil.

1.2 Geometría

1.2.1 Métrica

En la relatividad general la métrica permite definir distancias, ángulos y volúmenes en un espacio Euclideo. Además juega un papel importante porque convierte las coordenadas dependientes del observador $X^\mu = (t, x^i)$ en elementos de línea invariante

$$ds^2 = \sum_{\mu,\nu}^4 g_{\mu\nu} dX^\mu dX^\nu \equiv g_{\mu\nu} dX^\mu dX^\nu . \quad (1.1)$$

La métrica tiene una dependencia espacial y temporal $g_{\mu\nu}(t, \mathbf{x})$, entonces dependerá de donde estamos y en que momento. Debido a esta dependencia espacio-temporal la métrica también dependerá de la distribución de la materia y la energía, debido a que esta debe reproducir los efectos de la gravedad.

La elección de métrica es la responsable de poder describir el universo que queremos. Para un universo homogéneo e isótropo se puede considerar un sistema con simetría esférica. La expresión para describir el diferencial de longitud entre dos puntos sobre la superficie de una esfera se escribe de la forma

$$dl^2 = R_c^2 d\theta^2 + R_c^2 \sin^2 \theta d\phi^2 , \quad (1.2)$$

donde R_c es el radio de curvatura de la esfera. La figura (1.1) presenta el diferencial de línea para una simetría esférica.

1. COSMOLOGÍA Y FORMACIÓN DE ESTRUCTURAS.

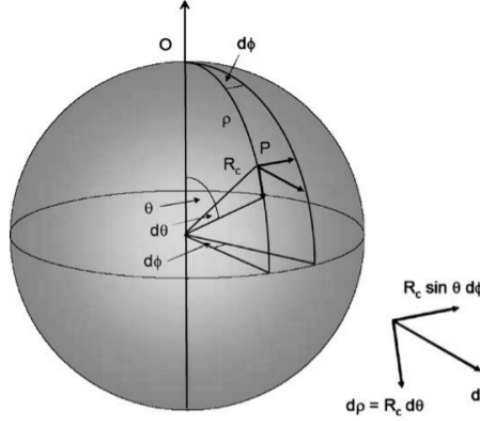


Figura 1.1: Superficie de una esfera, representación del diferencial de línea para simetría esférica.

Usando la figura (1.1) se construye un arco ρ entre los puntos O y P cuya distancia es $\rho = \theta R_c$, entonces la ecuación (1.2) puede reescribirse de la forma

$$dl^2 = d\rho^2 + R_c^2 \sin^2 \left(\frac{\rho}{R_c} \right) d\phi^2. \quad (1.3)$$

Una forma alternativa de escribir la métrica es introduciendo una distancia

$$x = R_c \sin \left(\frac{\rho}{R_c} \right), \quad (1.4)$$

al calcular la diferencial y elevando al cuadrado se obtiene

$$dx^2 = \left[1 - \sin^2 \left(\frac{\rho}{R_c} \right) \right] d\rho^2, \quad d\rho^2 = \frac{d^2}{1 - kx^2}, \quad (1.5)$$

donde $k = 1/R_c^2$ es el parámetro de curvatura.

Por lo tanto la métrica se puede escribir de la forma

$$dl^2 = \frac{dx^2}{1 - kx^2} + x^2 d\phi^2. \quad (1.6)$$

Se debe recordar que la curvatura k puede representar tres geometrías. Cuando se tiene una curvatura positiva se obtiene simetría esférica cerrada, con curvatura cero se obtiene el espacio Euclideo plano y si es negativo se tiene una geometría hiperbólica abierta. Ver figura (1.2).



Figura 1.2: Tres espacios con curvatura constante, esfera con curvatura positiva (izquierda), hiperboloide con curvatura negativa y plano con curvatura cero (derecha).

Extrapolando el diferencial de línea a tres dimensiones en termino de las coordenadas polar esférica (ρ, θ, ϕ) se llega a

$$dl^2 = d\rho^2 + R_c^2 \sin^2 \left(\frac{\rho}{R_c} \right) [d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi], \quad (1.7)$$

y como se hizo anteriormente también se puede llegar a la ecuación en termino de x, θ, ϕ

$$dl^2 = \frac{x^2}{1 - kx^2} + x^2 [d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi]. \quad (1.8)$$

Ahora se puede dar el salto de escribir la métrica considerando el tiempo y llegar a una métrica espacio-temporal

$$ds^2 = dt^2 - \frac{1}{c^2} dl^2. \quad (1.9)$$

Para un modelo isotrópico, se tiene una función que permite describir como cambia la distancia entre dos observadores cualesquiera en un instante de tiempo. $a(t)$ es conocida como el factor de escala y viene dada por

$$\rho(t) = a(t)r, \quad (1.10)$$

r es llamada la *coordenada radial de distancia comóvil*. Se establece que $a(t) = 1$ si $t = t_o$ que equivale al universo de hoy.

Llamando $R_c(t_o)$ como el radio de curvatura para la presente época entonces, \mathfrak{R} se relaciona de la forma

1. COSMOLOGÍA Y FORMACIÓN DE ESTRUCTURAS.

$$R_c = a(t)\mathfrak{R}. \quad (1.11)$$

Sustituyendo ρ y R_c en la métrica (1.9) y considerando $d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2$ se obtiene

$$ds^2 = dt^2 - \frac{a^2(t)}{c^2} [dr^2 + \mathfrak{R}^2 \sin^2(r/\mathfrak{R}) d\Omega^2]. \quad (1.12)$$

Esta es la métrica de Robertson-Walker. Es importante notar que $a(t)$ describe la dinámica del universo y \mathfrak{R} describe la curvatura espacial del universo en la presente época.

Otra forma de representar la métrica es usando *diametro angular comóvil* $r_1 = \mathfrak{R} \sin(r/\mathfrak{R})$

$$ds^2 = dt^2 - \frac{a^2(t)}{c^2} \left[\frac{dr_1^2}{1 - kr_1^2} + r_1^2 d\Omega^2 \right], \quad (1.13)$$

donde $k = 1/\mathfrak{R}^2$.

Retomando la ecuación inicial (1.1) el tensor métrico $g_{\mu\nu}$ sería

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-a^2(t)}{1-kr^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a^2(t)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a^2(t) \sin^2(\theta) \end{bmatrix}. \quad (1.14)$$

1.3 Ecuaciones de Friedmann

En Relatividad General, las ecuaciones de campo de Einstein brindan información muy importante sobre la relación entre la energía, masa y la geometría del espacio-tiempo, es dada por

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad (1.15)$$

donde $R_{\mu\nu}$ es el tensor de Ricci, R es el escalar de Ricci, $g_{\mu\nu}$ es la métrica, Λ constante cosmológica y $T_{\mu\nu}$ es el tensor momentum-energía.

El tensor y escalar de Ricci se pueden calcular de la siguiente manera

1.3 Ecuaciones de Friedmann

$$R_{\mu\nu} \equiv \partial_\lambda \Gamma_{\mu\nu}^\lambda - \partial_\nu \Gamma_{\mu\lambda}^\lambda + \Gamma_{\lambda\rho}^\lambda \Gamma_{\mu\nu}^\rho - \Gamma_{\mu\lambda}^\rho \Gamma_{\nu\rho}^\lambda, \quad (1.16)$$

$$R = R^\mu{}_\mu = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}, \quad (1.17)$$

donde

$$\Gamma^\nu{}_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} g^{\mu\sigma} (\partial_\beta g_{\sigma\alpha} + \partial_\alpha g_{\sigma\beta} - \partial_\sigma g_{\alpha\beta}). \quad (1.18)$$

Debido a la isotropía del espacio en la métrica *Robertson-Walker* no es necesario calcular las componentes $R_{i0} = R_{oi}$. Las componentes que no se hacen cero del tensor de Ricci son

$$R_{00} = -3 \frac{\ddot{a}}{a}, \quad (1.19)$$

$$R_{ij} = - \left[\frac{\ddot{a}}{a} + 2 \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + 2 \frac{k}{a^2} \right] g_{ij} \quad i, j = 0, 1, 2, \quad (1.20)$$

$$R_{\mu\nu} = R_{00} + R_{ij}, \quad (1.21)$$

y el escalar de Ricci queda

$$R = -6 \left[\frac{\ddot{a}}{a} + \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + \frac{k}{a^2} \right]. \quad (1.22)$$

En cosmología cuando se pretende calcular el tensor momentum-energía se considera para un fluido perfecto, se tomando el tensor como la suma de sus componentes $T_{\mu\nu} = T_{ij} + T_{i0} + T_{0j} + T_{00}$. Debido a la isotropía se tiene que $T_{i0} = T_{0j} = 0$. Al considerar la isotropía y la homogeneidad se tiene

$$T_{00} = \rho(t), \quad T_{i0} = 0, \quad T_{ij} = -P(t)g_{ij}(t, \mathbf{x}). \quad (1.23)$$

Remplazando (1.23), (1.22) y (1.17) en la ecuación (1.15), se permiten llegar a dos ecuaciones escalares acopladas

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3P}{c^2} \right) + \frac{c^2 \Lambda}{3}, \quad (1.24)$$

1. COSMOLOGÍA Y FORMACIÓN DE ESTRUCTURAS.

$$\frac{\ddot{a}}{a} + 2 \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 + 2k \left(\frac{c}{a} \right)^2 = 4\pi G \left(\rho - \frac{P}{c^2} \right) + c^2 \Lambda, \quad (1.25)$$

donde ρ es la densidad y P es la presión.

La importancia de estas ecuaciones radica en que permiten conocer la evolución del universo (homogéneo e isótropo) usando el factor de escala.

1.4 Régimen Lineal Para la Formación de Estructuras.

Buscando poder demostrar un modelo que permita modelar la estructura del universo a gran escala, se hace uso de la *Inestabilidad de Jeans*. Esta teoría representa la evolución del universo, partiendo de los principios fundamentales (homogeneidad e isotropía).

1.4.1 Régimen Newtoniano.

Con el propósito de poder reconstruir la estructura del universo en cualquier instante t se considera lo siguiente:

Al observar el pasado, se debe considerar que existieron pequeñas desviaciones en la homogeneidad en la materia del universo. A medida que el tiempo pasaba, estas desviaciones incrementaban, debido a la fuerza gravitacional. Esto fue generando una acumulación de materia cada vez mayor, desencadenando la formación de estructuras, que dieron origen a las primeras galaxias.

Se debe tener presente que la teoría del régimen lineal solo se cumple para desviaciones pequeñas, osea, para un universo muy joven. Para poder reproducir las estructuras del universo que se observan hoy en día es necesario considerar una teoría de régimen no lineal.

Al considerar la perturbación en la métrica $g_{\mu\nu}$ y su fuente $T_{\mu\nu}$ se tiene

$$g_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} + \delta g_{\mu\nu} \quad T_{\mu\nu} = T_{\mu\nu} + \delta T_{\mu\nu}. \quad (1.26)$$

Como se supone que las perturbaciones son pequeñas se puede linealizar la ecuación de Einstein

1.4 Régimen Lineal Para la Formación de Estructuras.

$$\hat{\mathcal{L}}(g_{\mu\nu})\delta g_{\mu\nu} = \delta T_{\mu\nu}, \quad (1.27)$$

donde $\hat{\mathcal{L}}$ es el operador diferencial lineal que depende del espacio-tiempo.

Una forma simple de poder calcular la formación de perturbaciones es suponiendo que el radio de la perturbación es menor al radio de Hubble. Al suponer esto se puede obviar del caso relativista y considerarlo meramente Newtoniano. Al suponer esto, se puede considerar la materia en universo como un fluido Newtoniano que colisiona, para ello se puede usar las ecuaciones de un fluido Newtoniano:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0, \quad \text{Ecuacion de continuidad} \quad (1.28)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{\nabla p}{\rho} - \nabla \Phi, \quad \text{Ecuacion de Euler} \quad (1.29)$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho, \quad \text{Ecuacion de Poisson} \quad (1.30)$$

$$(1.31)$$

Cuando se aplica las pequeñas perturbaciones cuasiestáticas a la densidad ($\rho = \rho_o + \delta\rho$), velocidad ($v = \delta v$), presión ($p = p_o + \delta p$) y al potencial gravitacional ($\Phi = \Phi_o + \delta\Phi$). Remplazando esto en las ecuaciones (1.29, 1.30, 1.31)

$$\frac{\partial \delta \rho}{\partial t} + \rho_o \nabla \cdot (\delta v) = 0, \quad (1.32a)$$

$$\frac{\partial \delta v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right) \nabla \delta \rho + \nabla \delta \Phi = 0, \quad (1.32b)$$

$$\nabla^2 \delta \Phi - 4\pi G \delta \rho = 0. \quad (1.32c)$$

Ahora el propósito es poder resolver las ecuaciones con perturbaciones (1.32b, 1.32c, 1.32c). Para resolver estas ecuaciones se puede suponer soluciones de ondas planas¹.

$$\delta u_i = \delta_i e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}, \quad (1.33)$$

donde $\delta u_i = \delta \rho, \delta v, \delta \Phi$ y se entiende que δ_i equivale a las amplitudes.

¹Cuando se supone un universo plano, se consideró la aparición de las ondas planas

1. COSMOLOGÍA Y FORMACIÓN DE ESTRUCTURAS.

Al considerar la inestabilidad gravitacional, se puede obtener unos resultados muy interesantes sobre la formación de estructura. Entonces Considerando lo siguiente:

Para un fluido homogéneo e isotrópico, Jeans dice que a medida que el sistema va evolucionando se van generando pequeños cambios de densidad $\delta\rho$ y en la velocidad δv .

De igual manera Jeans plantea que la aparición de una inhomogeneidad en la distribución de materia $\delta\rho$ generará un cambio en la fuerzas que preservan la homogeneidad. Entonces si $\delta\rho > 0$ la fuerza de gravitación F_g deberá ser mayor que la fuerza de presión F_p ($F_g > F_p$). Esta ultima afirmación da la condición necesaria para la formación de estructuras. Usando esta idea se puede determinar el radio necesario para el cuál se cumple la desigualdad, también conocido como el radio de Jeans λ .

$$F_g \approx G\rho\lambda \quad y \quad F_p \approx \frac{v_s^2}{\lambda} \quad (1.34)$$

$$\lambda^2 > \frac{v_s^2}{G\rho}, \quad (1.35)$$

de una forma similar se puede llegar al tiempo gravitacional de caída libre

$$\tau_{f-f} \approx \frac{1}{(G\rho)^{1/2}}. \quad (1.36)$$

1.5 Régimen no lineal Para la Formación de Estructuras.

Cuando se observo el universo en sus etapas tempranas, antes de la era de la recombinación ¹, donde se consideró que las fluctuaciones δ en la materia eran despreciables ($\delta \ll 1$). Esta suposición permite facilitar muchos cálculos, pero restringe

¹Instante en el universo donde la temperatura bajo lo suficiente para poder permitir la combinación de los electrones con los nucleos generando los primeros átomos. Antes de este instante se conoce como la época dominada por la radiación, electrones y protones libres.

1.5 Régimen no lineal Para la Formación de Estructuras.

el tiempo de evolución del universo. sin embargo, si se pretende determinar la evolución y estructuras a escalas mayores como en la actualidad, donde $\delta \gg 1$, es necesario hacer uso de otro método que permita reconstruir la dinámica del universo. Para ello se hace uso del régimen no lineal. Cabe resaltar que esta técnica es altamente complicada donde es necesario hacer aproximaciones y muchas veces no es posible llegar a soluciones analíticas, por esto se hace uso de los métodos numéricos que permiten encontrar aproximaciones a las soluciones.

1.5.1 Aproximación de Zeldovich

Bajo el régimen no lineal es posible llegar a resultados importantes de una forma analítica, asumiendo ciertas aproximaciones. Un caso particular es la aproximación de Zeldovich, que además de presentar unos resultados muy congruentes con lo observacional permite llegar a ellos de una forma analítica.

La aproximación de Zeldovich, es posible si se supone que las escalas de la perturbación son menores que la distancia d_H ¹, con ello es posible usar un análisis Newtoniano. La aproximación Zeldovich además comienza con suponer un universo homogéneo, con densidad uniforme $\rho_b(t)$, el cual presenta pequeños crecimiento en las perturbaciones. Considerando la posición de cada partícula $\mathbf{r}(t)$ en coordenadas Lagrangianas relacionadas con la posición inicial \mathbf{q}

$$\mathbf{r}(t) = a(t)\mathbf{q}. \quad (1.37)$$

Bajo la aproximación lineal, lo necesario para poder reproducir un crecimiento de las perturbaciones es adicionar un función separable dependiente de t y \mathbf{q} , $f(t)\mathbf{p}(\mathbf{q}) = a(t)b(t)\mathbf{p}(\mathbf{q})$, que se puede representar de la forma

$$\mathbf{r}(t) = a(t)\mathbf{x}(t) = a(t)[\mathbf{q} + b(t)\mathbf{p}(\mathbf{q})] \quad (1.38)$$

donde \mathbf{X} representa la coordenada comovil, $a(t)\mathbf{q}$ representa la expansión cosmológica, $b(t)\mathbf{p}(\mathbf{q})$ representa la perturbación. Se sabe además que $b(t)$ crece de una manera mayor, debido a la inestabilidad gravitacional. La ecuación (1.38) es capaz de describir la evolución lineal.

¹radio de Hubble.

1. COSMOLOGÍA Y FORMACIÓN DE ESTRUCTURAS.

Para poder demostrar que la ecuación (1.38) corresponde a la evolución lineal, es necesario poder conocer cómo evolucionan las perturbaciones de densidad de cada partícula, bajo el régimen de la ecuación (1.38). Considerando a $\bar{\rho}$ como la densidad inicial sin perturbación. Entonces, por conservación de la masa se obtiene lo siguiente

$$\underbrace{\rho(\mathbf{r}, t) d^3 \mathbf{r}}_{\text{Masa en cualquier instante}} = \underbrace{\bar{\rho} d^3 \mathbf{q}}_{\text{Masa inicial}}. \quad (1.39)$$

Por lo tanto

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \bar{\rho} \det(\partial q_i / \partial r_j) = \frac{\bar{\rho} / a^3}{\det(\partial x_j / \partial q_i)} = \frac{\rho_b(t)}{\det(\delta_{ij} + b(t)(\partial p_j / \partial q_i))}, \quad (1.40)$$

donde $\rho_b(t) = \bar{\rho} / a^3(t)$. Calculando el Jacobiano de primer orden a la perturbación

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = \frac{(\rho - \rho_b)}{\rho_b} = -b(t) \nabla_{\mathbf{q}} \cdot \mathbf{p}. \quad (1.41)$$

Cuando se observa el resultado de la teoría lineal se tiene

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = g(t) = \sum_{\mathbf{k}} \mathbf{A}_{\mathbf{k}} \exp(i\mathbf{k} \cdot [\mathbf{q} + b(t_i)\mathbf{p}(\mathbf{q})]), \quad (1.42)$$

donde $g(t)$ describe la evolución del contraste de densidad, y $\mathbf{A}_{\mathbf{k}}$ es la transformada de Fourier del contraste de densidad inicial. Para un tiempo inicial se tiene que $b(t)\mathbf{p} \ll \mathbf{q}$

$$\mathbf{p}(\mathbf{q}) = \sum_{\mathbf{k}} \frac{i\mathbf{k}}{k^2} \mathbf{A}_{\mathbf{k}} \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{q}). \quad (1.43)$$

Esta última ecuación implica que la ecuación (1.38), sí es capaz de reproducir el régimen lineal. De igual manera, usando el resultado anterior es posible escribir $\mathbf{p}(\mathbf{q})$ de la forma

1.5 Régimen no lineal Para la Formación de Estructuras.

$$\mathbf{p}(\mathbf{q}) = \nabla_q \Phi_0(q), \quad (1.44)$$

donde

$$\Phi_0(q) = \sum_k \frac{\mathbf{A}_k \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{q})}{k^2}. \quad (1.45)$$

Usando la ecuación de Einstein $\ddot{a} = -(4\pi G \rho_b a)/3$ es posible escribir la ecuación

$$\nabla_q^2 \Phi_0 = \frac{4\pi G a^2 (\rho - \rho_b)}{3a\ddot{a}}. \quad (1.46)$$

Con ello se obtiene la forma del potencial gravitacional perturbado

$$\nabla_x^2 \phi = 4\pi G a^2 (\rho - \rho_b), \quad (1.47)$$

donde $\phi = 3a\ddot{a}\Phi_0$. Entonces Φ_0 es proporcional al potencial gravitacional de la teoría lineal y $\mathbf{p}(\mathbf{q})$ es proporcional al campo de velocidad peculiar de la teoría lineal.

Por lo tanto, $\mathbf{p}(\mathbf{q})$ es un gradiente de una función escalar, el Jacobiano de la ecuación (1.40) da como resultado una matriz simétrica; esta puede ser diagonalizada en cada punto \mathbf{q} , para producir un conjunto de autovalores. Ahora, si los autovalores del Jacobiano $(\partial p_i / \partial q_i)$ son de la forma $[-\lambda_1(\mathbf{q}), -\lambda_2(\mathbf{q}), -\lambda_3(\mathbf{q})]$ entonces la densidad de perturbación esta dada por

$$\rho(\mathbf{r}, t) = \frac{\rho_b(t)}{(1 - b(t)\lambda_1(\mathbf{q}))(1 - b(t)\lambda_2(\mathbf{q}))(1 - b(t)\lambda_3(\mathbf{q}))}. \quad (1.48)$$

Esta ecuación representa los cambios producidos por la deformación de un cubo infinitesimal, siendo consecuente con los cambios en la densidad. A medida que aumenta la perturbación, la función $b(t)$ también cambia con el tiempo. Además el signo de los autovalores proporcionan información de la dinámica del sistema.

1. COSMOLOGÍA Y FORMACIÓN DE ESTRUCTURAS.

Cuando se tiene que $\lambda > 0$ indica que el autovalor va en contra del campo de densidad, entonces colapsa. Si $\lambda < 0$ entonces van en la misma dirección, lo cual conlleva a una expansión. Los autovalores se pueden diferenciar uno del otro, de la forma $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$. El valor particular de cada autovalor λ_i , proporcionará información de la dinámica (colapso o expansión) de la materia en ciertas regiones del espacio.

Teoría sobre AGN.

Al observa la luz de las galaxias en el óptico e infrarrojo cercano, se ve que es dominado mayormente por estrellas con una pequeña contribución de polvo y gas. Partiendo del hecho de que el espectro de las estrellas puede ser considerado como un espectro de Plank, el cual depende de la temperatura y a su vez de la masa y edad estelar. Entonces es posible considerar el espectro de una galaxia como la superposición de espectros de estelares. Bajo esta aproximación se puede además decir que el espectro de las galaxias sería la superposición de espectros de Plank definido en un rango de temperaturas.

Sin embargo, algunas galaxias presentan anomalías en los espectros, presentando una distribución de energía mucho mayor. Algunas presentan líneas de emisión en zonas poco comunes y otras en un rango muy amplio, desde las longitudes de onda del radio hasta rayos-X y algunas hasta rayos gamma. Ver figura (2.1). Además estas emisiones se origina en regiones muy centrales de la galaxia, por lo cual se les dio el nombre de Nucleo Activo de Galaxias (AGN's por sus siglas en ingles).

Se considera que el causante de la activación de los AGNs son las interacciones gravitacionales. La interacción debida a la fuerzas de marea o la fusión de galaxias genera una turbulencia en el potencial gravitacional que provoca que el gas empiece a colapsar hacia el centro de la galaxia.

2. TEORÍA SOBRE AGN.

En la actualidad se existe una distinción para los AGN's, entre ellas están los cuásares. Los cuásares son objetos muy luminosos, su luminosidad puede superar por un factor de cien la luminosidad de su galaxia huésped. Los procesos que ocurren al interior de un AGN son los más energéticos en el ámbito de la astrofísica.

2.1 Introducción a AGN's

Los AGNs son considerados los motores centrales de las galaxias. Su actividad nuclear esta patrocinada por la acreción de materia.

2.1.1 Historia

En la época de 1908, se observaron que la galaxia NGC 1086 ue presentaban fuertes lineas de emisión poco comunes. En 1943, Carl Seyfert a través de un análisis sistemático pudo identificar una nueva clase de galaxia, que llevan su nombre. Los núcleos de las galaxias activas Seyferts presentan un muy alto brillo superficial, cuyo espectro en la región central esta dominado por fuertes líneas de emisión y de alta extinción.

Al tener los catálogos 3C y 3CR (Catálogos en infrarrojo). ¹ fue posible encontrar objetos muy puntuales con una muy alta línea de emisión. Por tan alta emisión no era posible determinar la forma del objeto que hospedaba dicha fuente. Solo fue cuando se tubo telescopios con un poder de resolución mayor que se pudo ratificar que eran fuentes puntuales y pudieron medir su magnitud aparente $m = 16$. A medida que fue pasando el tiempo y con la mejora en las observaciones se empezaron a encontrar más fuentes con estas características. A estos cuerpos se les denomino Cuásar².

Los cuásares son un tipo específico de AGN. Sin embargo, una buena forma de conocer las propiedades y tipos de AGN's, es identificando las propiedades de los cuásares. Es por esto que a continuación se presenta una clasificación sobre los tipos de cuásares.

¹Catálogo de observaciones hechas con el Cambridge four-element interferometer a una frecuencia de 159MHz

²Cuásar viene del ingles Quasars (quasi-stellar radio source)

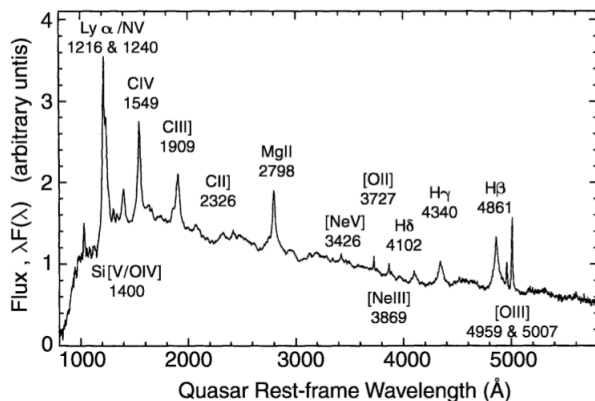


Figura 2.1: Espectro combinado de varios QSOs, usando el Large Bright Quasar Survey

2.1.2 Propiedades fundamentales de los Cuásares

Por lo general los cuásares presentan una serie de propiedades que son comunes en varios tipos de AGN's, las propiedades, entre las que se destacan:

- Fueron descubiertos por ser fuentes de radio muy puntual
- Emite en todas las longitudes de onda, desde el radio a los rayos-X principalmente.
- El flujo de la fuente varía en casi todas las frecuencias y longitudes de onda.
- En general se encuentra que la escala de tiempo de variabilidad es más pequeña y su amplitud más grande, cuando se va ha frecuencias más altas.
- El espectro óptico es muy azul $U - B < -0,3$. La mayoría de los cuásares presentan un corrimiento a rojo alto $z \lesssim 2$.
- El espectro continuo de un cuásar puede ser descrito por una ley de potencias, sobre un rango de frecuencias muy alto.

$$S_\nu \propto \nu^{-\alpha}, \quad (2.1)$$

donde α indica el índice espectral. Cuando $\alpha = 0$ entonces se tiene un espectro plano, si $\alpha = 1$ se tiene un espectro en el cual la misma energía es emitida en cada intervalo de logarítmico de las frecuencias.

2. TEORÍA SOBRE AGN.

2.1.3 Cuásares, radio fuentes.

La morfología de los cuásares en el régimen del radio, depende de la frecuencia observada, que a su vez puede presentar un morfología compleja. La morfología del cuásar en una forma simple se puede ver constituida por varias fuentes extendidas y un núcleo central muy compacto, ver figura (2.4). En algunas ocasiones es posible observar unas fuentes extendidas llamadas lóbulos, que se extienden de manera simétrica a lo largo de una línea recta. Estos lóbulos se encuentra conectados con el núcleo central por cuenta de los jets, que consiste en la región donde salen despedidas las partículas altamente cargadas proveniente del núcleo. El tamaño del sistema en general puede alcanzar hasta 1 Mpc de largo. La posición óptica coincide con la fuente de radio compacta, cuyo tamaño es mejor a un segundo de arco ($\theta < 1''$).

2.1.3.1 Clasificación de las fuentes de radio.

Las fuentes de radio extendidas se dividen en dos tipos:

Fanaroff-Rile Tipo I (FR I), son fuentes más brillantes cerca al centro, su brillos superficial decrece hacia el exterior. Poseen una luminosidad típica de $L_\nu(1,4GHz) \lesssim 10^{32} \text{erg}^{-1} \text{Hz}^{-1}$.

Fanaroff-Rile Tipo II (FR II), son fuentes que presentan características contrarias a las (FR I). Su brillo incrementa hacia el exterior, presentan un brillo mayor que las (FR I) $L_\nu(1,4GHz) \gtrsim 10^{32} \text{ergs}^{-1} \text{Hz}^{-1}$, a menudo estas fuentes de radio presentan jets (Subsección 2.3.3).

2.1.3.2 Radiación Sincrotrón

La forma espectral y el alto grado de polarización son considerados como consecuencias de la emisión de radio, producida por la radiación sincrotrón ¹ de electrones relativistas. Se tiene entonces que los electrones se propagan a través de un campo magnético, a lo largo de un helicoide, produciendo una fuerza de Lorentz, que hace que los electrones sean emitidos a través de la radiación sincrotrón.

El grado de polarización de un conjunto de electrones depende de la complejidad del campo magnético. Si el campo es homogéneo la medida de polarización

¹Radiación producida al someter a partículas cargadas a velocidades muy altas (cercanas a la velocidad de la luz)

observada puede ser mayor al 75 %. La radiación sincrotrón sigue una ley de potencias si la distribución de energía de los electrones también se comportan como una ley de potencias.

2.2 Tipos de AGN's

Se debe tener muy claro que la diferencia entre los AGN's no radica necesariamente en su forma física. En el contexto de poder unificar los AGN's, su clasificación esta altamente orientada en la dirección de la fuente con la línea de visión del observador.

2.2.1 Quasi-Stelar Objects.

Una pequeña cantidad de cuásares presentan un inusual color azul. La presencia de estos objetos en regiones fuera del rango radio presentan un gran problema para poderlos observar, siendo fuentes muy puntuales.

Las propiedades ópticas de estos objetos son casi indistinguibles de los cuásares. En particular, tienen distribución de energías hacia el azul lo cual es resultado de la forma de búsqueda, además presenta fuertes y anchas líneas de emisión y en general un alto corrimiento al rojo. Por sus propiedades tan parecidas a los cuásares son llamados como *radio-quiet quasars* ó *quasi-stelar objects*, QSOs. Los QSOs son los AGNs que mayor luminosidad, su luminosidad en el núcleo puede ser 1000 veces más que la luminosidad de la galaxia donde se hospeda

2.2.2 Galaxias Seyfert.

Como se discutió anteriormente las galaxias Seyferts fueron los primeros AGNs descubiertos. La luminosidad de las Seyferts es considerablemente menor que la de los QSOs. Las observaciones en el óptico permiten identificar que las Seyferts son objetos que se encuentra en el centro de las galaxias espirales, presentando un núcleo extraordinariamente brillante, con líneas de emisión fuertes y anchas.

Se conocen dos tipos de galaxia Seyfert, las Tipo 1 y las Tipo 2. Las Tipo 1 presentan líneas de emisión muy anchas, lo que da un indicio de velocidades de

2. TEORÍA SOBRE AGN.

rotación mayor. Las Tipo 2 presentan líneas de emisión más estrechas. Al observar el espectro en el óptico en las Seyfert 1 se identifica que son muy similares a los QSOs. No se conoce una diferencia física entre estos dos objetos, la única diferencia es debida a la luminosidad en sus núcleo.

2.2.3 Radio Galaxias

Las radio galaxias son galaxias elípticas que tienen como huésped un AGN. Entre las radio galaxias más conocidas se encuentran Cygnus A y Centuari A. Al igual que se hizo con las galaxias Seyferts, las radio galaxias también presentan una clasificación debida al ancho de sus líneas de emisión. Están las radio galaxias de línea ancha (BLRG) y las radio galaxias de línea estrecha (NLRG).

En general los dos tipos de radio galaxias se pueden considerar como radio fuerte Seyfert 1 y Seyfert 2, la única diferencia entre Seyfert y radio galaxia es la morfología de la galaxia donde estás hospedadas.

2.2.4 Variables Ópticamente Violentas

Existe otra clase de QSOs, que están caracterizados por su fuerte y rápida variabilidad en su radiación óptica. Son conocidas como OVVs¹ (Variables Ópticas Violentas). Estos objetos presentan una variabilidad en escala de tiempo de días. Además de su alta variabilidad, también presentan una muy alta polarización de la luz óptica y fuertes emisiones en radio. Estas fuentes presentan longitudes de onda fuera del rango óptico, aumentando su radiación, con escalas de tiempo más cortas y amplitudes más grandes, a medida que se mueve a frecuencias más altas.

2.2.5 Objetos BL Lac

Los BL Lacs son AGNs con una muy fuerte variabilidad en la radiación, como los OVVs, pero sin fuertes líneas de emisión y absorción, haciendo casi imposible la determinación de su corrimiento al rojo z . La luminosidad óptica de algunos BL Lacs varia en varias magnitudes si se observa durante periodos de tiempo muy largos.

¹Del ingles Optically Violently Variables

2.3 El Enigma Central: La existencia de un Agujero Negro

Algo notable de vez en cuando es el bajón en la luminosidad, a veces se observan líneas de emisión y luego aparece un BL Lac como un OVV. Por este extraño motivo a los OVV y BL Lacs se les denomina Blazars. Los Blazars son fuentes de radio, con variabilidad violenta y radiación energéticamente fuerte (radiación γ).

Es importante recordar que la diferencia de los tipos de AGN radica en la dirección de observación en la cual se ve el AGN. En general el AGN es el mismo, solo que esta siendo observado en lugares diferentes que presentan características específicas, como se observa en la figura (2.2).

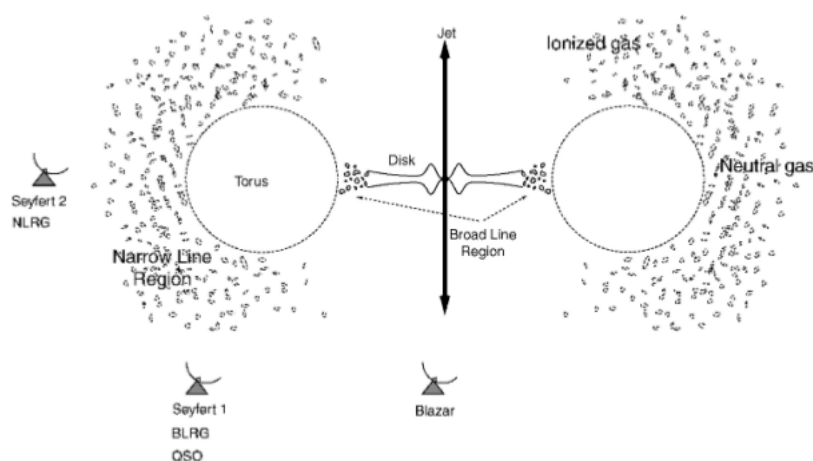


Figura 2.2: Los diferentes tipos de AGNs solo dan información de que lugar del AGN se está observando

2.3 El Enigma Central: La existencia de un Agujero Negro

En la teoría de los AGNs ha existido una duda sobre el proceder de la energía que estos emanan, en especial ¿Cómo es producida? Entonces debido a esto, se plantea que dicha energía es originada por un objeto muy masivo en su interior y muy cercano al centro. El objeto propuesto lleva el nombre de Agujero Negro Súper Masivo (SMBH de sus siglas en ingles), objeto altamente compacto que acreta materia de su alrededor. A continuación se presentan una serie de propiedades observacionales de los AGNs que dan pie a la existencia de un SMBH.

2. TEORÍA SOBRE AGN.

- Se encuentran fuentes de radio en AGNs que pueden alcanzar un tamaño aproximadamente mayor a 1 Mpc. Usando esta escala de longitud es posible medir el tiempo en que ha estado activa la fuente. Para esta escala de longitud se tiene que el tiempo de vida es mayor a 10^7 años.

-La luminosidad de los QSOs es aproximadamente $L_{bol} \sim 10^{47} \text{ ergs}$. Asumiendo que la luminosidad no cambia sustancialmente durante el tiempo de vida de la fuente, es posible medir la energía total

$$E \gtrsim 10^{47} \text{ erg/s} \times 10^7 \text{ yr} \sim 3 \times 10^{61} \text{ erg} . \quad (2.2)$$

-Para escalas de tiempo de días, se tiene que la luminosidad de los AGNs varia en un %50. Estas variabilidades permiten encontrar un límite superior para la extensión espacial de la fuente. Para una fuente puntual se tiene que la extensión es $R \lesssim 1 \text{ día luz} \sim 3 \times 10^{15} \text{ cm}$.

2.3.1 La Existencia de los Agujeros Negros

Usando la información observacional expuesta anteriormente y suponiendo que la producción de energía es de naturaleza gravitacional, es posible derivar la energía básica en el AGN. Suponiendo lo anterior la forma clásica más eficiente de generación es por medio de la fusión nuclear.

La fusión del hidrógeno, produce 8Mev/nucleon. La máxima eficiencia de fusión nuclear es $\epsilon \lesssim 0,81 \%$. Donde ϵ es la fracción de masa del combustible que es convertido en energía. De acuerdo con

$$E = \epsilon mc^2 , \quad (2.3)$$

la energía por fusión es $E = 3 \times 10^{61}$. Entonces la masa que produce el combustible necesitaría ser

$$m = \frac{E}{\epsilon c^2} \sim 4 \times 10^{42} \text{ g} \sim 2 \times 10^9 M_{\odot} . \quad (2.4)$$

Al suponer que la naturaleza de la energía es meramente gravitacional, se tiene entonces que a medida que la materia cae dentro del agujero negro(BH) pierde energía potencial pero adquiere energía cinética . Al convertir la energía cinética en energía interna(calor) que puede ser emitida en forma de radiación.

2.3 El Enigma Central: La existencia de un Agujero Negro

Sin embargo, los BH no son la única solución simple para las ecuaciones de Einstein. La existencia de un SMBH es posible al conocer la naturaleza de la distribución de masa compacta. También se ha encontrado evidencia observacional que ratifica la existencia de estos objetos super masivos.

2.3.2 Acreción.

A medida que el gas cae hacia un objeto compacto, las partículas de gas pierden energía potencial que a su vez se convierte en cinética. al conocer que el momento angular es finito, se tiene que el gas no puede caer directamente hacia el objeto. A medida que el gas cae, siente una fricción por la interacción con las otras partículas circundantes, lo que se traduce en una transferencia de momentum, que dará como resultado la formación de un disco de acreción perpendicular al momento angular. La fricción en el disco sera la responsable de desacelerar la velocidad de rotación de las partícula haciendo que estas caigan hacia el centro.

De acuerdo con el teorema del virial, la mitad de la energía potencial se ha cambiado en energía cinética. En este caso, la mitad de la energía se ha convertido en energía de rotación. Así, la mitad de la energía potencial se convirtió en energía interna.

La energía generada por la viscosidad en el disco, no cuenta con la suficiente energía para poder escapar, pero aun así es capaz de producir calor que genera un engrosamiento en el disco.

2.3.3 Generación de Jets.

Los lóbulos radiales son producidos por partículas cargadas eyectadas desde el centro del AGN, a velocidades relativistas. Estas partículas son aceleradas desde el núcleo en dos direcciones opuestas. El impulso es producido por la extracción de energía cinética de rotación del BH a través del mecanismo de Blandford- Znajek. Ver figura (2.3).

Al observar un AGN es inevitable ver que los jets producidos son extremadamente delgados y muy rectos. Lo cual implica que los procesos generadores ocurren muy al interior del disco y el núcleo es el responsable de colimar estos rayos de alta energía. Es importante aclarar que este mecanismo no reproduce los flujos

2. TEORÍA SOBRE AGN.

de materia relativista; sin embargo hay una nueva rama que pretende dar solución a este problema. La hidrodinámica es la responsable de reproducir los fenómenos con una mayor precisión, pero con el costo de poder computacional.

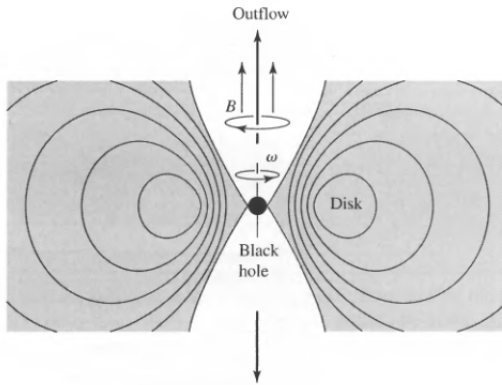


Figura 2.3: Bosquejo del modelo de la estructura del núcleo del AGN, donde se puede ver el mecanismo de Blandfort- Znajek

2.3.4 Formación de Lóbulos.

Cuando los jets expulsan las partículas, estas llevan consigo una energía cinética. Estas partículas a medida que se desplazan por el medio interestelar se van desacelerando. Las partículas que van adelante del flujo de materia, son las que más siente la interacción con otras partículas y se van ralentizando, formando un frente de choque. Este frente de choque provoca que las partículas se vayan esparciendo de forma desordenada generando los lóbulos, como se observa en la figura (2.4).

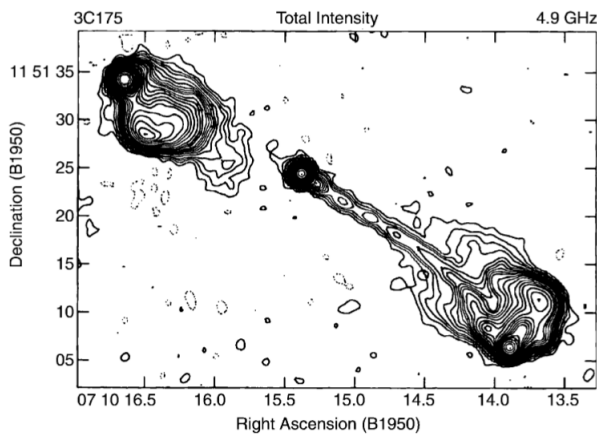


Figura 2.4: *Simulación de un AGN. En la parte central se encuentra el BH, los jets son por donde se desplaza la materia y los lóbulos son los grumos donde se aglomera la materia que viene del núcleo.*

2.4 Modelo Unificado

Conforme a todo lo presentado, se puede identificar que los AGNs presentan cierta similitud, pero de igual manera diferencias considerables. Al conocer su naturaleza, se pretende presentar a los AGNs como objetos con morfología equivalentes, pero observados en líneas de visión diferentes. Mirar figura (2.2).

Como ya se ha dicho y mostrado los AGNs presentan propiedades en común.

- Todas los AGNs hospedan un SMBH en su interior.
- Todos los AGNs tiene un disco de acreción que alimenta el BH.
- Todos los AGNs van a estar caracterizados por la masa del BH M_{BH} y de la rata de acreción \dot{m} . M_{BH} permite relacionar la luminosidad máxima del SMBH.
- La morfología de la galaxia anfitriona también permite clasificar. Las radio galaxias están en galaxias espirales, mientras que las Seyferts en galaxias espirales.

CHAPTER

3

Modelo de Spin.

CHAPTER

4

Algoritmo y Modelación.

CHAPTER

5

Clasificación entorno cosmológico (Cosmic Web)

