



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
CURSO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ALEANDRO DOS SANTOS OLIVEIRA

MENSURANDO A CORRENTE ELÉTRICA EM JATOS RELATIVÍSTICOS

CARAÚBAS – RN
2018

ALEANDRO DOS SANTOS OLIVEIRA

MENSURANDO A CORRENTE ELÉTRICA EM JATOS RELATIVÍSTICOS

Projeto de pesquisa apresentado ao Conselho do Bacharelado em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito parcial para elaboração do trabalho de conclusão de curso, sob a orientação do Prof. Dr. Mackson Matheus França Nepomuceno.

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

d48m dos Santos Oliveira, Aleandro.
Mensurando a corrente elétrica em jatos
Relativísticos / Aleandro dos Santos Oliveira. -
2018.
42 f. : il.

Orientador: Mackson Matheus França Nepomuceno.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2018.

1. Jatos relativístico. 2. Corrente elétrica.
3. Jatos astrofísicos . 4. Buracos negros. I.
Matheus França Nepomuceno, Mackson , orient. II.
Título.

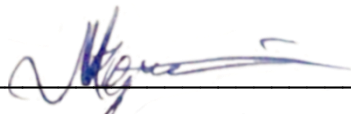
ALEANDRO DOS SANTOS OLIVEIRA

MENSURANDO A CORRENTE ELÉTRICA EM JATOS RELATIVÍSTICOS

Projeto de pesquisa apresentado ao Conselho do Bacharelado em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito parcial para elaboração do trabalho de conclusão de curso, sob a orientação do Prof. Dr. Mackson Matheus França Nepomuceno.

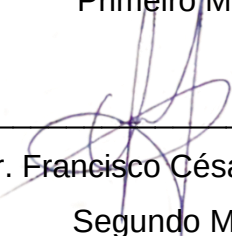
APROVADO EM: 16 / 04 / 2018

BANCA EXAMINADORA



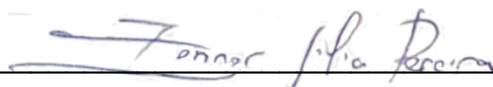
Prof.º Dr. Mackson Matheus França Nepomuceno

Primeiro Membro



Prof.º Dr. Francisco César de Medeiros Filho

Segundo Membro



Prof.º Dr. Zenner Silva Pereira

Terceiro Membro

AGRADECIMENTOS

Utilizo deste espaço para agradecer a todos aqueles que diretamente ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

- Ao meu pai Avelino Sebastião de Oliveira, que através de muito esforço consegui me manter durante todo esse tempo de minha caminhada.
- A minha família de modo geral que sempre me apoiou.
- A meus amigos que me ajudaram a fazer as atividades, relatórios e tarefas durante a época do tcc.
- A meu orientador Dr. Mackson Matheus França Nepomuceno, por me conceder a oportunidade e inspiração de se fazer ciência.
- Ao Prof. Dr. Francisco César de Medeiros Filho pela disponibilidade na composição da banca avaliadora do presente trabalho.
- Ao Prof. Dr. Zenner Silva Pereira pela disponibilidade na composição da banca avaliadora do presente trabalho.
- A minhas amigas formadas dentro da universidade

“Como conclusão para minha vida, é
melhor quebrar a cabeça do que quebrar
pedras”

Aleandro dos S. Oliveira

RESUMO

Neste trabalho é feito o estudo das partes constituintes para formação de jatos relativísticos de modo que a partir de uma mineração de artigos foi feito o levantamento dos dados necessários para mensurar a corrente elétrica de jatos astrofísicos em duas fontes, 3c 273 e Messier87, utilizando o método aplicado por Kronberg (2011) e também fazer a comparação do valor mensurado com a massa do buraco negro procurando por uma relação, já que o buraco negro é fundamental para a formação dos jatos em Kiloparsec (Kpc)

Com a inédita utilização de um telescópio virtual de diâmetro maior que o da terra feita no ano de 2018, sendo possível observar mais detalhes dos jatos astrofísicos, com observações será possível entender melhor essas estruturas e obter informações necessárias para mensurar a corrente elétrica desses jatos.

Palavras – chave: Jatos relativísticos, Corrente elétrica, Jatos astrofísicos, buracos negros.

In this paper is done the study of the constituent parts for the formation of relativistic jets so that from a mining of articles necessary data collection was done to measure the electric current of jets astrophysicists in two sources, 3C 273 and Messier 87, using the method applied by Kronberg (2011) and also make the comparison of the value measured with the mass of the black hole looking for a relationship, since the black hole is fundamental for the formation of jets at Kiloparsec (Kpc).

With the unprecedented use of a virtual telescope with a diameter greater than that of Earth made in 2018, it is possible to observe more details of the astrophysical jets, with observations it will be possible to better understand these structures and obtain information necessary to measure the electric current of these jets.

Key – words: Relativistic jets, Electric current, Astrophysics jets, Black holes.

LISTA DE SIMBOLOS

$M_{\odot}$ - refere-se a massa solar, unidade usual em astronomia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Jato e o núcleo central da Galáxia M87.....	8
Figura 2: Galaxia pictor A, essa imagem é composta pelo jato no espectro raio-x com o de ondas de radio, o feixe azul representa a imagem no espectro do raio-x e a vermelha no espectro do radio e o nome das respectivas partes constituintes desse fenomeno. É considerado maior jato registrado na historia.....	9
Figura 3: Estrutura e mecanismo dos jatos relativisticos.....	10
Figura 4: Representação do comportamento das linhas de campo magnético.....	12
Figura 5: Representação esquemática do modelo unificado de AGN. O tipo do objeto que se observa depende do angulo que esta sendo observado.....	14
Figura 6: Representação do efeito Faraday de quando uma onda eletromagnética polarizada E a uma velocidade v passa por um campo magnético B de comprimento d ela tem seu plano polarizado rotacionado a um ângulo β	16
Figura 7: Jato saindo do quasar 3C 273, superposição da imagem de radio (contorno) com imagem óptica (escala cinza).....	22
Figura 8: detalhes dos nós do jato no quasar 3C 273, superposição da imagem de radio (contorno) com imagem óptica (escala cinza).....	23
Figura 9: imagem do jato da M87 feita a partir de dados de 8 a 15 GHz.....	24
Figura 10: Rotação de Faraday na imagem do jato relativístico da 3C 303 no comprimento de ondas de rádio com resolução de $1'',5$. O gradiente transversal de RM foi encontrado no nó E3.....	26
Figura 11: Imagem de medida de rotação para 3c 273, com marcação de onde foi detectado o ∇RM	31

LISTA DE GRAFICOS

Grafico1: $\log(I_z) \times \log(M_{\odot})$ com 3C 303.....	34
Grafico 2: $\log(I_z) \times \log(M_{\odot})$ sem 3C 303	34

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	3
2.1.	OBJETIVO GERAL	3
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3.	JUSTIFICATIVA.....	4
4.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
4.1.	BURACOS NEGROS	5
4.2.	NÚCLEOS GALÁTICOS ATÍVOS (AGNs)	5
4.3.	JATOS RELATIVÍSTICOS	7
4.4.	MODELO UNIFICADO	13
4.5.	MEDIDAS DO ROTACIONAL DE FARADAY	15
4.6.	GRADIENTE TRANSVERSAL DA MEDIDA DE ROTAÇÃO DE FARADAY (∇RM)	17
4.7.	BATERIA CÓSMICA.....	18
4.8.	EQUAÇÕES DE MAXWELL	19
4.9.	QUASAR 3C 273	20
4.10.	MESSIER 87 (M87)	23
4.11.	MÉTODO UTILIZADO POR KRONBERG.....	25
5.	METODOLOGIA DA PESQUISA.....	28
5.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	28
5.2	OBJETOS ESTUDADOS.....	28
5.3	DADOS LEVANTADOS.....	28
6.	RESULTADOS.....	30
6.1	CORRENTE ELÉTRICA PARA O JATO DO QUASAR 3C 273.....	30
6.2	CORRENTE ELÉTRICA PARA O JATO DA GALÁXIA M87.....	32
6.3	COMPARAÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA DOS JATOS COM A MASSA DE SEUS RESPECTIVOS BURACOS NEGROS	33
7.	CONCLUSÕES.....	35
8.	REFERÊNCIAS.....	37

1. INTRODUÇÃO

Na década de 30 do século passado se deu início a radioastronomia por meio de um problema que surgiu na indústria de telecomunicações, um ruído de origem desconhecida que estava causando interferência nas comunicações de rádio transatlânticas, o engenheiro Karl Jansky que trabalhava para empresas Bell ficou encarregado de estudar a origem desse problema. Karl Jansky com o auxílio de antenas simples capturou sinais de onda de rádio que vinham de regiões distantes do centro da galáxia, as intensidades desses sinais eram superiores aos emitidos pelo Sol. Na época essa descoberta não foi dada tanta importância, só na segunda guerra com a construção de grandes radares, os estudos dessas fontes ganharam interesse. (VIEGAS, 2003)

Com construção dos grandes radiotelescópios, como por exemplo Radiotelescópio de Arecibo, Very Large Array (VLA), Observatório de Green Bank, os astrônomos puderam explorar o universo com outros olhos e desta forma foram descobertas várias galáxias chamadas de rádio galáxias, pois possuem intensa luminosidade na região do comprimento de ondas do rádio. Posteriormente com a instalação de telescópios na órbita da terra foi verificado que essas galáxias emitiam luz em vários comprimentos de onda. Com o surgimento de equipamentos mais precisos descobriu-se que essa atividade peculiar ocorre no seu núcleo e com isso elas ficaram conhecidas por núcleos galácticos ativos (AGN na sigla em inglês para Active Galactic Nucleus). (SEEDS ; BACKMAN, 2011, p. 356).

“[...]. O termo designa o objeto central de uma galáxia quando o objeto tem propriedades de um quasar, como uma aparência de uma estrela muito brilhante, linhas espectrais muito alargadas e mudanças de brilho observáveis”. (STEPHEN ,2012, p. 227).

Existem diversos tipos de núcleos galácticos ativos e todos têm algo em comum, no seu núcleo existe um buraco negro supermassivo e o mesmo torna possível que as AGN emitam essa intensa luminosidade causada pela matéria que está indo para dentro do buraco negro. “Se nenhuma matéria cai no buraco negro, ele não se revela produzindo um brilho, emissão de rádio, jatos de alta velocidade ou raios-x forte. [...]”. (STEPHEN, 2012, p. 229).

Segundo Kronberg et al. (2011), esses jatos começam em velocidades relativísticas, possuem baixa densidade e são canalizados por um campo magnético

direcionando o plasma. Ou seja, há um fluxo de energia na saída do disco de acreção na forma de um jato colimado pelo campo magnético toroidal como foi proposto por Lovelace (1976). Esse modelo admite a existência de corrente elétrica ao longo do jato astrofísico.

O presente trabalho busca encontrar em algumas AGN's, características em seus jatos astrofísicos similares ao da galáxia 3C 303 ou na forma das simulações de Lapenta e Kronberg (2005) (LK05). Os Jatos dessas AGN's serão analisados de forma que sejam encontrados parâmetros que torne possível determinar a corrente elétrica emitida por cada uma delas.

O estudo deste fenômeno, jatos relativísticos, é de suma importância na compreensão de sua formação, de como se comporta as estruturas magnéticas cósmicas, bem como a estimativa do valor destas correntes elétricas.

2. OBJETIVOS

Existem muitos artigos que citam a existência de corrente elétrica em jatos astrofísicos, no entanto estes autores geralmente não mensuram estes valores em seus trabalhos.

2.1. OBJETIVO GERAL

- Estimar o valor da corrente elétrica em jatos astrofísicos provenientes de AGN's.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar possíveis relações entre valor da corrente mensurada com massa do buraco negro associado;
- Utilização de equações do eletromagnetismo como forma de cálculo das correntes elétricas dos jatos astrofísicos;
- Comparar os valores das correntes obtidas com os poucos dados disponíveis na literatura;
- Comparar os métodos de Jafelice e Opher (1992) e Kronberg et al. (2011) para o cálculo de correntes elétricas.

3. JUSTIFICATIVA

Esse trabalho visa estudar o comportamento de jatos astrofísicos, um assunto pouco explorado no Brasil, que tem grande importância para a astrofísica sobre a compreensão do funcionamento deste fenômeno na natureza.

Uma listagem com os valores mensurados para a corrente elétrica dos jatos relativísticos tem grande importância para futuras pesquisas, pois serve como referência para trabalhos relacionados a estudos de fenômenos que ocorrem nos núcleos galácticos ativos.

Os estudos do trabalho proposto estão ligados diretamente a assuntos de eletromagnetismo aplicado a astronomia.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. BURACOS NEGROS

A compreensão sobre a natureza da gravidade vigente até o século passado era a visão de Isaac Newton, que a entendia como uma força. Já em 1916, Albert Einstein propõe que a gravidade se trata da distorção da malha espaço temporal, quanto maior for a massa desse corpo maior será a distorção causado por ele. Um exemplo extremo de um grande corpo capaz de causar essa deformação é o buraco negro, eles são corpos formados por uma grande quantidade de matéria, são encontrados principalmente no centro das galáxias e surgem da morte de estrelas supergigantes, a deformação do espaço-tempo causada por eles é tamanha que cria uma distorção infinita que nem a luz tem velocidade suficiente para escapar fenômeno que não poderia ser descrito pela teoria da gravitação de Isaac Newton. Devido a luz ser literalmente engolida, esses corpos são totalmente invisíveis na maioria das vezes se misturando com a escuridão do universo, por isso o nome buraco negro.

Como o buraco negro engole tudo que passa próximo deixando-o invisível, uma forma de identificá-lo é observando os fenômenos que ocorrem na sua vizinhança, mais precisamente no seu disco de acreção. O disco de acreção é formado por matéria que orbita o buraco negro, quando ocorre algum tipo de perturbação como uma estrela caindo no disco, cria uma nova distribuição do momento angular fazendo com que a matéria do disco comece espiralar em direção ao centro, essa matéria que está se aproximando do buraco negro aquece a temperaturas altíssimas irradiando luz em várias faixas do espectro.

Dependendo das dimensões do buraco negro, da existência do disco de acreção e a interação entre eles, pode ser criado o que chamamos de núcleos galácticos ativos que serão expressos na próxima seção deste trabalho.

4.2. NÚCLEOS GALATICOS ATÍVOS (AGN's)

As galáxias são estruturas formadas por uma enorme quantidade de objetos,

como estrelas, planetas, gás e poeira, unidos entre si por interações gravitacionais. Elas giram em torno de um núcleo central, que as dá a forma que conhecemos, com exceção das galáxias irregulares, pois não apresentam uma forma definida. Elas geralmente possuem uma grande quantidade de estrelas em sua região central fazendo dessa localidade terem intensidade luminosa superior que nas suas bordas. Grande parte da radiação emitida nas proximidades do núcleo é no espectro do visível, proveniente das estrelas que ali circundam. Porém algumas galáxias possuem um núcleo muito mais brilhante do que as estrelas podem proporcionar, para tal é necessário um fenômeno diferente capaz de criar essa intensa luminosidade.

Um núcleo galáctico como o nome já diz é o centro gravitacional da galáxia, e podem apresentar atividades em seu núcleo. Os núcleos galácticos ativos (AGN's) são núcleos de intensa atividade e apresentam fortes linhas de emissão. Isso ocorre devido a mecanismos em seu centro, em consequência os núcleos ativos possuem alta luminosidade a ponto de em alguns casos dificultar a observação da galáxia em que eles se encontram. Desde quando se começou a fazer observações das AGN's, elas foram classificadas de acordo com as propriedades observacionais. (MOTTER, 2012, p. 11)

A emissão de radiação dos núcleos galácticos ativos abrange todo o espectro, desde ondas de rádio até raios gama. Porém serão destacadas as seguintes faixas de comprimento de onda segundo González (2017. p. 2-3):

- Emissão de Rádio: pode ser identificada no jato relativístico e nos lóbulos. A emissão de rádio corresponde a uma pequena fração de luminosidade bolométrica., tanto para emissão de rádio fraca (RL) quanto para rádio forte (RQ);
- Emissão de infravermelho: toda a faixa de comprimento de onda do infravermelho corresponde a aproximadamente 30% da luminosidade bolométrica. Essa emissão é proveniente em grande parte da radiação sincrotron;
- Emissão óptica/UV: podem representar até 50% da luminosidade bolométrica dependendo apenas do tipo da AGN;
- Emissão de raios-X: fortes indícios indicam que essa emissão seja gerada no disco de acreção ao redor do buraco negro;

- Emissão de raios gama: esse tipo de emissão não foi detectado em todos os tipos de AGN's, os casos detectados são em BL Lacs.

Os AGN's são separadas em várias subclasses, mas podemos destacar as mais relevantes: Os Objetos quase-estelares (QSO) dos quais os mais luminosos são capazes de exceder o brilho de uma galáxia média, com massa de $2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$, tem aparência estelar, com emissão muito forte no comprimento de onda de rádio; BL Lacs, também conhecidos como blazares, mudam rapidamente o seu brilho, sendo até confundidos com estrelas variáveis, e possuem emissão intensa na faixa de rádio; Radiogaláxias como o nome já diz, galáxia de forte intensidade de emissão na região do rádio, de modo que essa radiação tem sua concentração na forma de jato e lóbulos; Galáxias Seyfert são galáxias espirais com o núcleos pontuais e de intensa luminosidade, com rápidas variações de seu brilho e linhas espectrais alargadas indicado movimentos extremamente rápidos dos gases internos. (MARAM, 2012, p.228)

O que se sabe e é mais aceito sobre os núcleos galácticos ativos é que a sua emissão de energia são superiores a de núcleos de galáxias normais não sendo proveniente de atividade estelar, o mais provável é a existência de um disco de acreção formado por materiais difusos em torno de um buraco negro supermassivo e a energia gerada por eles vem da queda gravitacional da matéria do disco acelerando-a e aquecendo a temperaturas altíssimas, convertendo matéria em energia e emitindo grande quantidade de radiação. (MOTTER, 2012, p. 11)

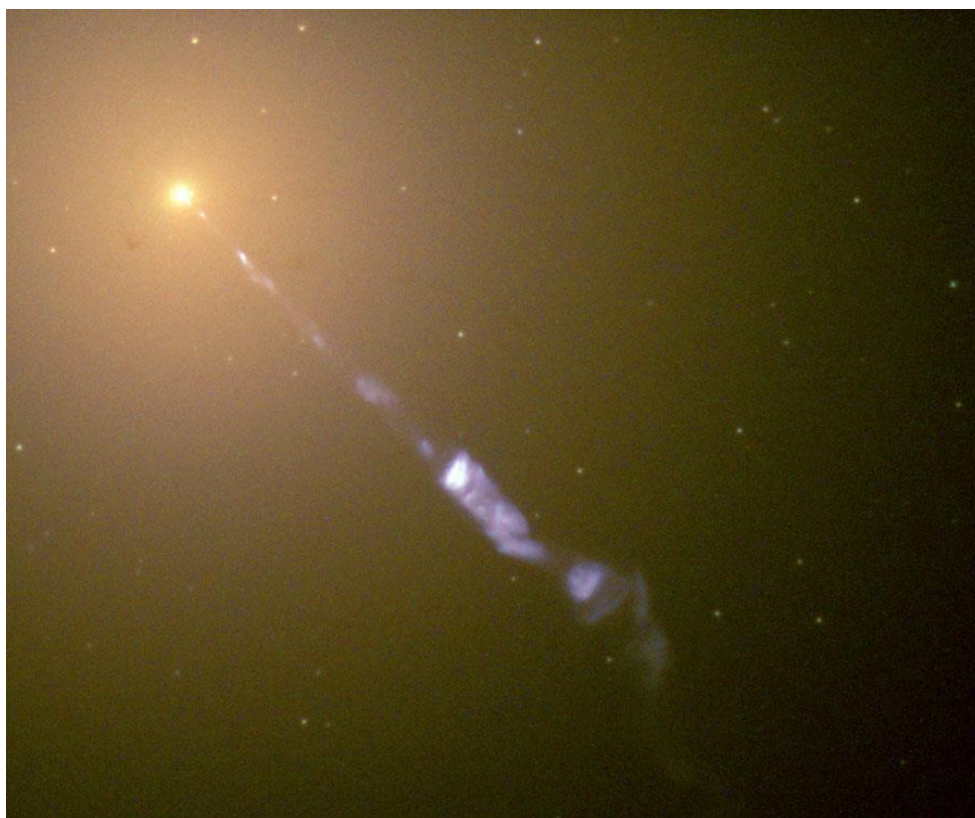
As AGN's são os núcleos compactos que darão início a formação dos jatos relativísticos, que é basicamente um feixe de plasma saído daquela região alinhado por um campo magnético, viajando no espaço por centenas de anos luz.

4.3. JATOS RELATIVISTICOS

O mais aceito atualmente que as galáxias que possuem um núcleo ativo contém um buraco negro supermassivo no seu centro com massa de milhões ou bilhões de massas solares. Em muitos casos enquanto a matéria está caindo para dentro do buraco negro, volta a ser expelida na forma de tipos especiais de radiação criando jatos que derivam de forças desconhecidas que aceleram a matéria chegando a grandes velocidades, gerando assim essas imensas e intensas emissões de energia. (ANANTUA, 2018)

Segundo Meier (2001) um jato é um fluxo de fluido, gás ou plasma colimado. Em 1918, foi descoberto o primeiro jato pelo astrônomo Haber Curtis, ele notou uma lamina de luz muito fraca saindo do centro da galáxia Messier 87 (M87) e descreveu como “*um curioso raio em linha reta conectada a um núcleo*”. O jato da M87 que pode ser visto na Figura 1, desde então é um dos mais estudados. Essa ejeção associada ao núcleo galáctico na M87 e em outras fontes são maiores em comprimento que o próprio diâmetro da galáxia a que pertence.

Figura 1: Jato e o núcleo central da Galáxia M87

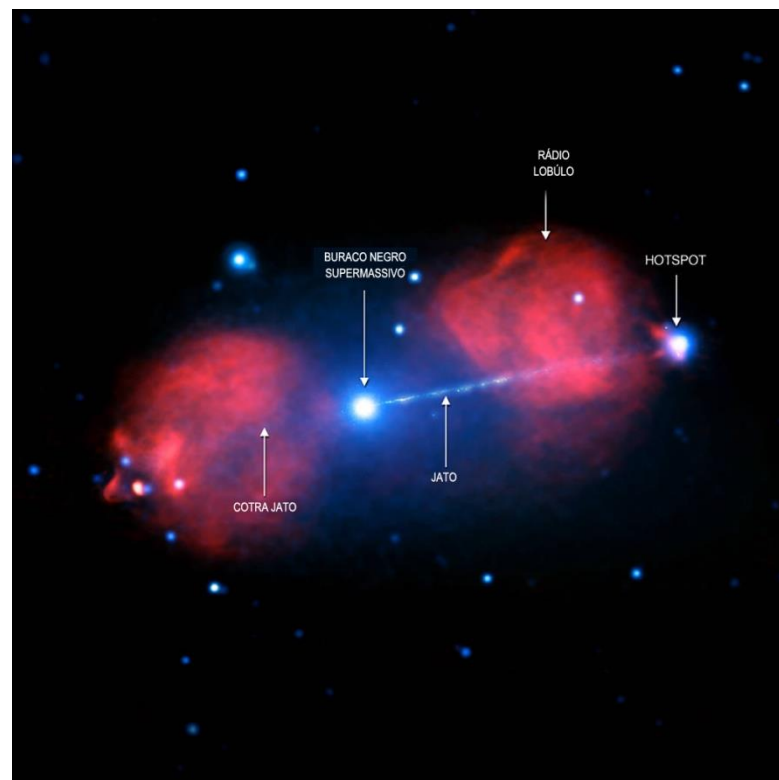


Fonte: NASA Hubble Space Telescope Imagens

“Jatos são estruturas caracterizadas pela sua forma bastante alongada e alinhada com o núcleo ativo da galáxia hospedeira onde ela se origina”. (VIEGAS, 2003, p.189). O jato da galáxia Pictor A (Figura 2) está sendo considerado o maior jato expelido por um buraco negro no universo conhecido, tendo 300 mil anos luz de comprimento. A galáxia hospedeira está a cerca de 500 milhões de anos luz de distância da terra, para se conseguir obter a Figura 2, os Hardcastle et al. (2015)

usaram o observatório de raio-X Chandra, fizeram a coleta de varias imagens durante 15 anos. As imagens em rádio foram obtidas pelo Austrália Telescope Array.

Figura 2: Galáxia pictor A, essa imagem é composta pelo jato no espectro raio-x com o de ondas de rádio, o feixe azul representa a imagem no espectro do raio-x e a vermelha no espectro do rádio e o nome das respectivas partes constituintes desse fenômeno. É considerado maior jato registrado na história.



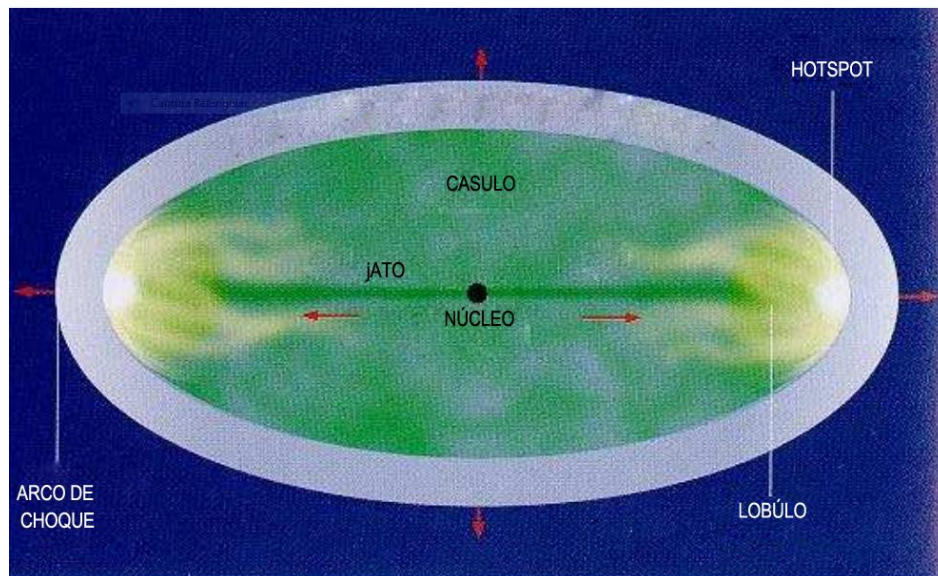
Fonte: https://www.nasa.gov/sites/default/files/thumbnails/image/pictora_annotated_1a.jpg

A estrutura desses jatos espelidos pelo buraco negro central, que abrangem desde ondas de rádio até ondas de raios gama, são formados pelos lóbulos de onda de rádio e no meio o jato de raio-X, quando o feixe passa pelo lóbulo é acelerado e quando o atravessa por completo, forma-se o que é chamado de Hotspot, o brilho intenso criado nesta região é causado pelo choque produzido pelo material do jato quando está sendo freado pelo meio externo (OLIVEIRA, F.& VIEGAS, S. M. M. 2003 .p. 189), o material freado no estágio final é “reciclado” retornando para a região central formando uma cavidade chamada de “casulo” como mostra a Figura 3.

O material que está sendo ejetado pelo jato preenche o casulo. O casulo e o jato estão relativamente em equilíbrio de pressões. (ESPINOSA, 2004)

A Figura 3 mostra o jato relativístico saindo do núcleo, na sua extremidade onde está sendo freado, formam-se os lóbulos e Hotspot, tudo ocorrendo dentro do casulo.

Figura 3: Estrutura e mecanismo dos jatos relativísticos.



Fonte: ESPINOSA, M. H.(2004) apud Bebelman e Rees(1996).

Os jatos astrofísicos aparentam transportar energia por meio de partículas carregadas que vem do núcleo galáctico ativo, elas caminham pelo espaço em forma de jato relativamente fino e ao chegar no seu ponto terminal, quando não existe mais um forte choque, o jato nesta região começa a se desfazer alargando-se conforme perde intensidade, formando os lóbulos também conhecidos como pluma.

Essas fontes de rádio de grandes dimensões muito maiores que a parte visível de sua galáxia podendo atingir centenas de milhares de anos luz. Tem como componente básico nestas regiões partículas carregado (elétrons) de alta energia e um campo magnético. No momento que um desses elétrons entra e se move no campo magnético, ela descreve uma trajetória espiral e irradia parte da sua energia cinética sob a forma de radiação eletromagnética. Essas partículas viajam a velocidades luminais sendo chamadas de partículas relativísticas, essas ondas eletromagnéticas emitidas apresentam características peculiares e são denominadas de radiação sincrotrônica. A partir do estudo da direção de vibração dos campos dessas ondas, em outras palavras, a sua polarização, podemos obter informações

sobre o campo magnético como sua intensidade e sua direção. (VIEGAS, S. M. M. 2003, p. 184)

O plasma nestes objetos contém elétrons de alta energia, aprisionados por um campo magnético e emitem grande quantidade de radiação sincrotron de rádio (MEIER, 2001) é possível encontrar emissão também no espectro do visível, no entanto tratasse de um fenômeno raro. Quando o jato se propaga pelo espaço, surge em sua estrutura 'nós' que são formados pela instabilidade de Kelvin-Helmholtz, devido a velocidade entre a superfície do jato e o meio intergaláctico, que podem ser observados em várias regiões do espectro e com os nós coincidindo independente do comprimento de onda usado na sua observação.

Na maioria dos casos de jatos relativísticos, existe evidências diretas ou indiretas da presença de campos magnéticos, e que o objeto central é compacto com acreção de matéria e momento angular. A combinação desses fenômenos, campo magnético e rotação são os responsáveis pela formação dos jatos relativísticos observados. (MEIER, 2001)

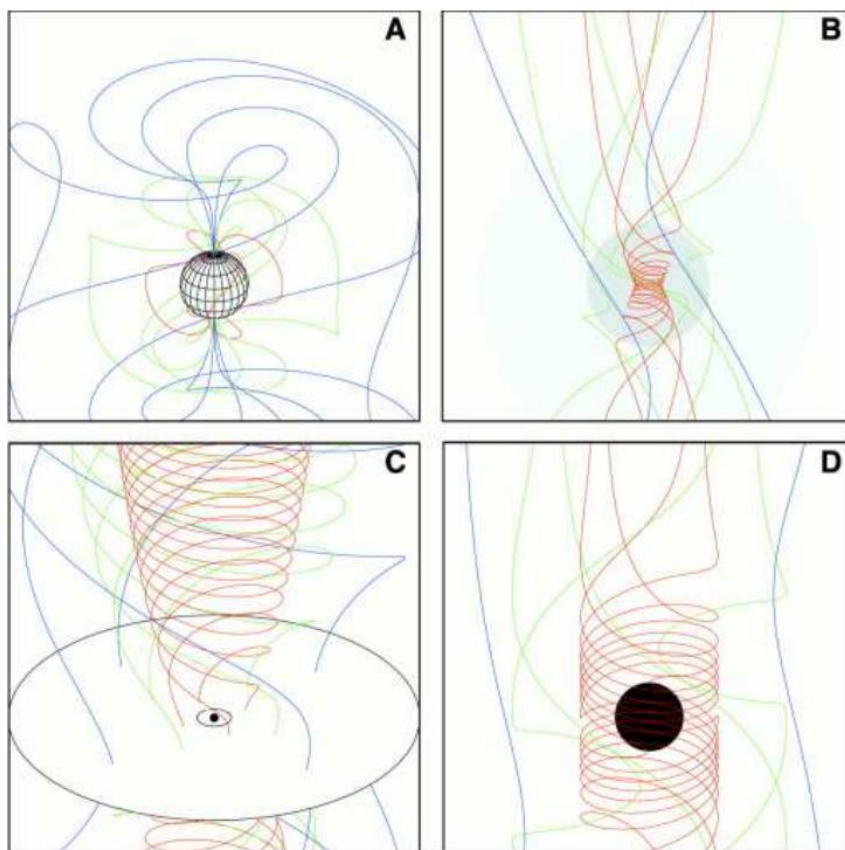
O modelo magnetohidrodinâmico (MHD) é o mais aceito, pois o mesmo é capaz de explica de forma aceitável de como a partir do colapso gravitacional é possível ocorrer colimação do plasma e de que forma si dá à aceleração do jato a velocidades relativísticas. A colimação está associada às linhas de campo magnético que direcionam o plasma, esse campo apresenta três propriedades apresentadas por Meier (2001):

- O plasma não encosta as linhas de campo, e caminha paralelamente, porque a pressão interna $p_{gas} = n_e K T_x$ é muito menor que a pressão magnética $\frac{B^2}{8\pi}$, quando isso ocorre o plasma que esta preso pelo campo magnético será arremessado para longe acompanhando as linhas de campo magnético que o colima; p_{gas} é a pressão interna do gás naquele volume, n_e densidade dos elétrons, T_x temperatura do plama e B campo magnético em torno do jato;
- Pode ocorrer que as linhas de campo poderão apertar-se a cada volta produzindo pressão sobre o plasma perpendicular às linhas de campo magnético com isso essas linhas podem juntar-se naturalmente aumentando a pressão sobre o jato, em outras palavras uma bobinagem toroidal com o acúmulo de linhas de campo ao longo de um eixo, com isso aumenta a pressão e a densidade de energia;
- E por último as linhas de campo chegam a um ponto de instabilidade e com

isso ocorre a “quebra” dessas linhas que rapidamente buscam alinha-se, esse processo produz enorme emissão, ejetando material ionizado de maneira abrupta em grande quantidade. (ESPINOSA, 2004)

A Figura 4 mostra com mais detalhes o comportamento das linhas de campo magnético. No quadro A mostra um campo bipolar em rotação, no quadro B o início do colapso torcendo as linhas de campo, C representa as linhas de campo poloidal proveniente do disco de acreção e na janela D um sistema inercial torcendo fortemente as linhas de campo magnético próximo ao buraco negro.

Figura 4: Representação do comportamento das linhas de campo magnético



Fonte: ESPINOSA, M. H (2004) p.14

Sabendo disso, para a formação do jato é preciso acelerar a matéria e colimá-la com campo magnético, o buraco negro supermassivo coleta o material que será ejetado, um campo magnético poloidal cria rotação diferencial no gás. As velocidades angulares diferentes criadas pelo campo poloidal criam uma hélice em torno do eixo de rotação, essa bobina de linhas de campo começam a conduzir o plasma preso para o eixo de rotação conforme as linhas estão se desenrolando. O

campo magnético toroidal vai se propagando ao longo do eixo e com ele o plasma na forma de jato. (MEIER, 2001)

Uma grande quantidade de simulações foram feitas usando essas definições. Uma delas foi a de Pudritz (2000) que obteve em suas simulações de discos de acreção magnetizados como fonte de alimentação dos jatos relativísticos resultados similares com dados observacionais.

Os jatos relativísticos foram vistos em uma grande quantidade de objetos celestes, de modo que todos eles apresentavam características similares, tais propriedades servem como indício de que estes corpos são do mesmo tipo devido as peculiaridades ali presentes, especificamente esses traços vistos foram usados para criar o modelo unificado dos núcleos galácticos ativos que é um tipo de esquema que descreve esses objetos celestes.

4.4. MODELO UNIFICADO

As galáxias ativas apresentam peculiaridades em relação as galáxias normais, a região nuclear prove grande quantidade de radiação advinda de processos físicos muito mais energéticos (AUDIBERT, 2015).

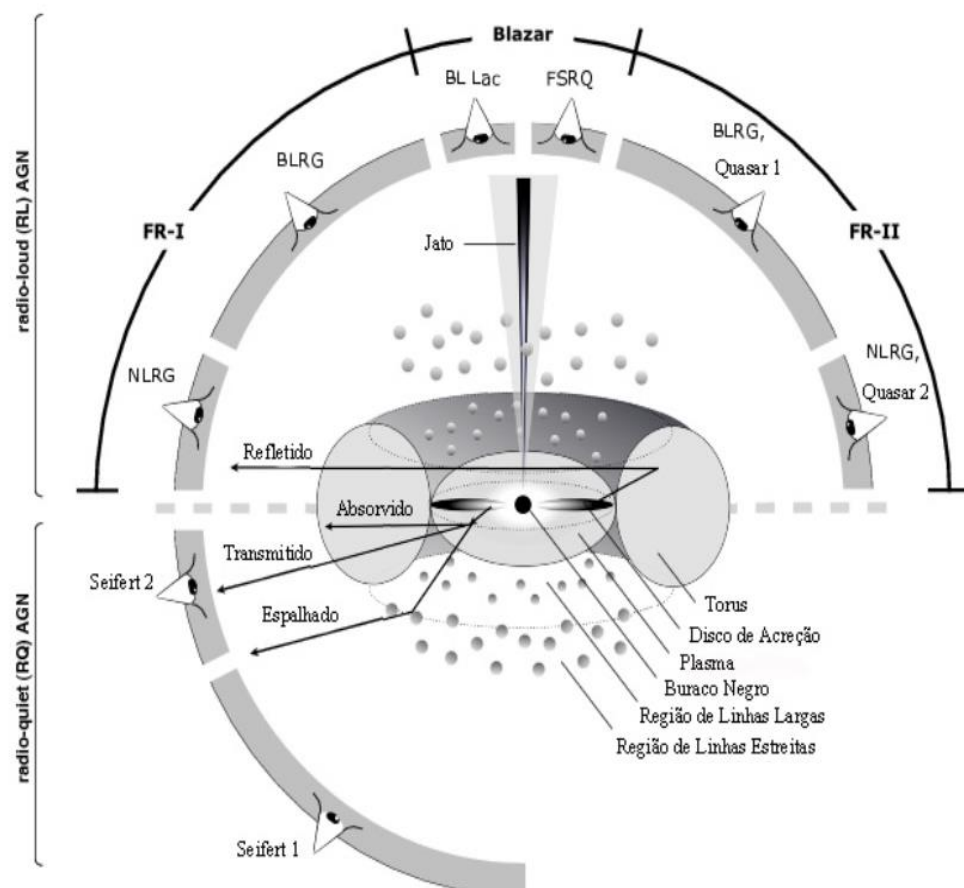
As AGN's possuem características semelhantes e são separadas em várias classes, foi proposto que a energia desses objetos é de mesma natureza. O Modelo Unificado de AGN's (MU), diz que a acreção de matéria por um buraco negro supermassivo de massa $M > \sim 10^8 M_{\odot}$ é convertido em energia térmica e eletromagnética. O MU também diz que as AGN's são o mesmo tipo de objeto e a diferença entre elas é a sua posição, com respeito a inclinação do disco de acreção em relação a linha de visada e a luminosidade da fonte, que é observada (AUDIBERT, 2015).

Segundo Rocha (apud CAOZZOLI 2005; URRY & PADOVANNI 1995; BARTHEL 1989), o Modelo Unificado é separado em duas categorias que levavam em conta a intensidade da emissão de rádio, os do tipo 1: com emissão forte de rádio (radio-loud ou RL), e os do tipo 2: com emissão fraca de rádio (radio-quiet ou RQ) e hoje é apenas considerado a inclinação que a fonte esta do observador.

O modelo unificado das AGN's tem que apresentar as seguintes partes: Um motor central formado por buraco negro supermassivo (SMBH) de massa $> 10^6 M_{\odot}$; matéria orbitando e caindo dentro do SMBH formando um disco de acreção

geometricamente fino, aqui a matéria que está caindo e tem sua energia cinética e potencial convertida a em radiação; Broad Line Region (BLR) região que produz linhas largas (óptico/ UV e próximo-IR), formado de nuvens de gás quente, denso e a velocidade altíssima; um toro formado por poeira obscurecida e gás com geometria toroidal circundando o buraco negro e a BLR; elétrons energéticos se espalham para fora da BLR e toro; e na região mais externa nos limites do torus nuvens de gás de baixa densidade, velocidade e temperatura muito inferior à da região BLR, formando o que se chama de Narrow Line Region (NLR) região que produz linhas estreitas; e em alguns AGN's apresentam jatos relativísticos que saem a partir do disco de acreção. (MO et al. 2010, p.623-650). Essa descrição pode ser vista na Figura 5 que também mostras como se dá a classificação dos objetos pela posição em que está sendo observado e também pela intensidade de emissão de rádio.

Figura 5: Representação esquemática do modelo unificado de AGN. O tipo do objeto que se observa depende do angulo que está sendo observado.



Fonte: GONZALEZ, J. G (2017)

Os núcleos galácticos ativos compartilham características das quais foram usadas para criar o modelo unificado, além das suas características físicas compartilhadas, como também os métodos de análise das suas estruturas, como: campo magnético, densidade de elétrons e polarização. Uma técnica utilizada para obter esses dados desses objetos é pela medida do rotacional de Faraday, que se aproveitam da relação da eletricidade e o magnetismo usado para mensurar o grau de polarização da luz.

4.5. MEDIDAS DO ROTACIONAL DE FARADAY (RM)

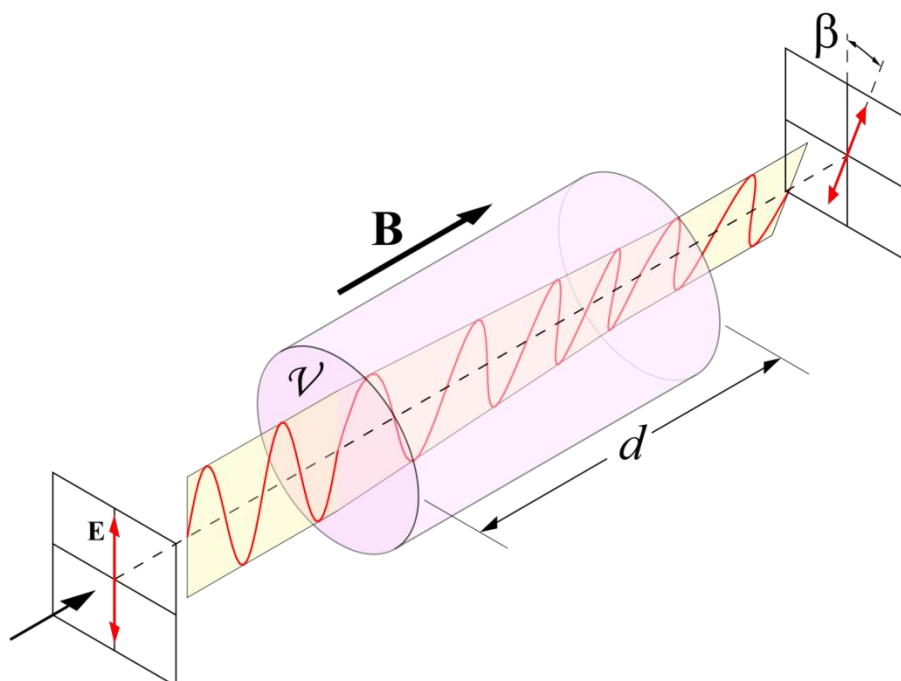
As observações do céu se estendem além do espectro do visível, as demais faixas de frequências podem fornecer grande quantidade de informações sobre os objetos celestes, técnicas de mapeamento são usadas para extrair o máximo de dados nessas novas regiões do espectro, uma delas é a observação da polarização em radiofrequência para que seja feito o estudo das imagens galácticas e extragalácticas dos seus campos magnéticos. Devido birrefringência do meio magnético-iônico, a região pela qual vai ser atravessada pela onda eletromagnética apresenta características anisotrópicas, ou seja, as propriedades do meio dependem da direção, o meio magnético-iônico possui mais de um índice de refração tornando possível à averiguação da diferença de ângulos de polarização em distintas regiões causados pela variação da velocidade onda polarizada, em outras palavras o ângulo de polarização da radiação linearmente polarizada é girado para esquerda ou direita em função da frequência enquanto está atravessando o plasma. (BRENTJENS, 2005)

Análise de distribuição da medida de rotação de Faraday sobre um jato astrofísico nos fornece informações da direção do campo magnético B nos auxiliando no entendimento da sua estrutura. O campo magnético B pode ser determinado de várias maneiras uma delas é pela observação do RM, que dá uma estimativa indireta do campo, pois a densidade de elétrons é determinada de forma independente, sendo dificultada em alguns casos a sua própria determinação (BONAFEDE, 2010).

O rotacional de Faraday ocorre da seguinte maneira, quando as ondas eletromagnéticas polarizadas passam através de um meio com campo magnético e

elétrons livres, elas sofrem uma rotação nos seus estados de polarização circular esquerdo ou direito como mostra a Figura 6. Em outras palavras, quando a luz polarizada atravessa um campo magnético, ela interage com o mesmo, girando o plano de polarização (CROKE, 2009). Esse fenômeno é conhecido como rotacional de Faraday (RM), recebe esse nome porque foi observado por Michael Faraday em 1845 ao estudar a influência do campo magnético sobre a luz.

Figura 6: Representação do efeito Faraday de quando uma onda eletromagnética polarizada E a uma velocidade v passa por um campo magnético B de comprimento d ela tem seu plano polarizado rotacionado a um ângulo β .



FONTE: https://pt.wikipedia.org/wiki/Efeito_Faraday

O ângulo em que é girado em um determinado comprimento de onda λ ao atravessar o campo magnético é proporcional a λ^2 . A medida de rotação de Faraday é proporcional a integral do campo magnético multiplicado pela densidade de elétrons livres, o comprimento de onda observado ao quadrado e um conjunto de constantes físicas, essa integral é tomada ao longo da linha de visada da fonte ao observador (MAHMUD, 2011).

$$\chi_{obs} - \chi_0 = \frac{e^3 \lambda^2}{8\pi\epsilon_0 m^2 c^3} \int n_e B \, dl = RM \lambda^2$$

χ_{obs} e χ_0 são os ângulos de polarização observados, e e m são a carga e a massa da partícula respectivamente, c representa a velocidade da luz, n_e a densidade de elétrons, $B dl$ é o elemento de campo magnético ao longo da linha de visada, λ é o comprimento de onda na qual a observação esta sendo feita.

A distribuição do rotacional de Faraday sobre a estrutura do jato podem descrever um gradiente desse rotacional, simulações pelo método de Monte Carlo feitas por Hovatta et al. (2012) mostram as características visuais que estes objetos apresentam e erros que podem surgir nas suas estimativas. A forma que está disposto esse gradiente pode fornecer informações sobre o sentido da corrente elétrica associada ao jato.

4.6. GRADIENTE TRANSVERSAL DA MEDIDA DE ROTAÇÃO DE FARADAY (∇RM)

A distribuição do RM na fonte pode formar gradientes do RM que pode ser causado por dois motivos conforme Gabuzda (2017), pelo gradiente da densidade eletrônica e/ou pelo campo magnético visto na linha de visada. Porém, apenas a densidade eletrônica não é capaz de criar variações no sinal do RM, isso quer dizer que tais modificações no sinal do RM só poderão ser causadas pelas mudanças das direções do campo magnético.

Segundo Motter (2016) na presença de um campo magnético helicoidal o gradiente transversal da medida do rotacional de Faraday poderá ser observado através do jato, devido as mudanças do campo magnético na linha de visada. De acordo com Perley (1984, apud Gabuzda, 2018) o primeiro caso de um gradiente do rotacional de Faraday foi observado em todo jato da NGC 6251 em 1984, e foi sugerido que poderia se tratar de um campo magnético helicoidal **B** associado ao jato em Kiloparsec (Kpc). Após este caso da NGC 6251 nenhum outro trabalho de observação do gradiente do rotacional de Faraday tinha sido feito até 2002 quando foi produzido o relatório do gradiente transversal em todo jato da 3C 273 por Assada et al.(2002), e desde então são feitos os estudos da disposição do RM em busca dos Gradientes do RM.

Esses gradientes são de grande importância, pois se torna um forte indicador da existência de um campo magnético toroidal, que está prendendo o jato. A direção

do ∇RM também nos fornece dados sobre a direção da componente do campo magnético toroidal, e por consequência sentido da propagação da corrente elétrica associada ao jato, usando apenas a regra da mão direita (KNUETTEL, 2017). O ∇RM também indica o sentido de rotação da polarização. Em escalas de parsec (pc) os objetos até hoje observados em sua maioria giram no sentido horário (do inglês clock wise CW) e a outra parcela no sentido anti-horário (do inglês counter clock wise CCW).

Mas a grande incógnita está na forma de como surge esse campo magnético que é medido pelo RM. A teoria aceita até então é a da bateria cósmica, que é responsável pela “semente” do campo magnético.

4.7. BATERIA CÓSMICA

A bateria cósmica é a teoria usada como interpretação da origem para a semente de campo magnético a partir de um plasma que tenha seu início desmagnetizado. Esse processo ganha essa nomenclatura devido uma analogia a uma bateria que a partir de uma reação não mecânica gera eletricidade. Os processos usados na bateria cósmica segue uma linha de raciocínio mostrada por Nelson (2011):

(...) que processo permite estabelecer um campo magnético em um meio? Aquele que permitir a produção de correntes. Como as correntes surgem do estabelecimento de movimento relativo entre as partículas positivas e negativas, mecanismos que atuem diferentemente sobre cada tipo de partícula (positivas, negativas) são fortes candidatos a conseguir estabelecer este movimento relativo acima citado e, portanto, estabelecer uma corrente no meio que será o agente da criação do campo magnético. (...)(NELSON, 2011)

Uma das explicações mais aceitas do surgimento de campos magnéticos fortes, ordenados em grandes escalas ao redor dos discos de acreção capazes de elucidar as características magnéticas observadas nos jatos relativísticos é a teoria da bateria cósmica. Esse mecanismo tem como base o arremesso de Poynting-Robertson nos elétrons do plasma para gerar correntes azimutais em larga escala nos discos de acreção. (CONTOPULOS, 1998)

De acordo com a bateria cósmica, a força de arrasto de Poynting-Robertson, os elétrons na borda interna do disco de acreção de um núcleo galáctico ativo cria uma corrente elétrica toroidal dando início as linhas de campo magnético poloidal

também na borda interna do disco com um dipolo magnético da ordem de μG . À medida que o mecanismo continua operando no disco, faz com que o fluxo magnético se acumule cada vez mais e mais próximo do buraco negro, campo interno sempre apontara na mesma direção da velocidade angular do disco de acreção. (CHRISTODOULOU, 2016)

Devido a bateria cósmica o fluxo campos magnéticos crescem continuamente, que de acordo com as simulações de Contopoulos (2015) esse mecanismo é de suma importância na geração do campo magnético em larga escala que jorra de discos para jatos relativísticos.

Sabendo da existência dos campos magnéticos em torno dos jatos, sua intensidade, direção, sentido que foram vistos até aqui, pode-se estimar a corrente elétrica a partir de adaptações das equações de Maxwell para obter-se esses valores.

4.8. EQUAÇÕES DE MAXWELL

James Clerk Maxwell (1831-1879) a partir de suas equações levou a descoberta das ondas eletromagnéticas. O seu trabalho teórico de cinco anos que unificava a eletricidade com o magnetismo. O que já era conhecido em sua época desde a parte experimental quanto teórica da eletricidade e magnetismo teve seus resultados compreendidos. Mas como ocorre em grandes achados da ciência, a sua teoria por muito tempo não foi amplamente aceita, isso só mudou quando foram geradas e detectadas as ondas de rádio pelo professor de física Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) comprovando a teoria de Maxwell. (SADIKU, 2012, p. 345)

Maxwell compilou as equações da eletricidade e do magnetismo que somavam por volta de 20 equações e 20 variáveis em apenas quatro. São elas:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4)$$

a lei de Gauss, demonstração da inexistência do monopólio magnético, Lei de Faraday e Lei circuital de Ampère respectivamente. O D é a densidade de fluxo elétrico, B é o campo magnético, E é o campo elétrico, J é a densidade de corrente, ρ é a densidade volumétrica de carga. (SADIKU, 2012)

A lei circuital de Ampere pela sua equação percebe-se que o campo magnetostático não é conservativo, isso quer dizer que o $\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \neq 0$, essa informação mostra que para um campo magnético que está rotacionando um material, nele será gerado uma densidade de corrente. Nos jatos relativísticos é encontrado campo magnético rotacionando o mesmo, levando em consideração o meio em que o jato percorre é um condutor, então fazendo uma analogia com a lei circuital de Ampère, pode-se concluir que a região que o jato percorre possui um fluxo de corrente.

Kronberg (2011) compara o jato astrofísico a uma linha de transmissão, que seria basicamente uma analogia a um fio condutor. Levando em consideração essa relação podemos analisar a equação da lei de ampere para um fio usando coordenadas cilíndricas, com isso percebe-se que para a determinação da corrente precisamos do campo magnético toroidal e o raio do meio que circula a corrente:

$$I_z \sim K H_\phi r \quad (5)$$

I_z é a corrente da direção do condutor neste caso o jato astrofísico, H_ϕ o campo magnético toroidal e r é o raio do jato relativístico, K uma constante.

A equação (5) é uma aproximação grosseira usando a equação de Maxwell para mostrar de forma simplificada a equação usada por Kronberg para determinar a corrente da Seyfert 3C 303. A aproximação aqui utilizada não levou em consideração que estamos tratando de um fluido, para tal usa-se uma adaptação das equações de Maxwell com mecânica dos fluidos conhecida como magnetohidrodinâmica (MHD).

Na magnetohidrodinâmica quando um campo magnético passa por um fluido condutor, a corrente elétrica será induzida no fluido, causando o aquecimento e o deslocamento do fluido conseqüentemente mudando a influência do campo magnético sobre o líquido, gás ou plasma.

Esses processos magnetohidrodinamicos são vistos nos objetos de estudo desse trabalho, nos jatos relativísticos do Quasar 3C 273 e no da galáxia Messier 87 (M87).

4.9. QUASAR 3C 273

O primeiro registro da 3C 273 foi datado em 1887, encontrado apenas pela sua elevada magnitude aparente igual a $-12,9$ que se destacava nas placas ópticas do Harvard College Observatory. No entanto sua Classificação como quasar só ocorreu em 1963. (ROCHA 2015, p. 34)

3C 273 se encontra em uma galáxia elíptica, de raio exterior de $15''$ e magnitude de $16,4$ (TURLER et al., 1999). Magnitude é uma escala logarítmica do brilho de um objeto celeste.

3C é uma sigla que para ao terceiro Catalogo de Cambridge, este catalogo são de fontes de rádio, composto por 471 fontes catalogadas. Essas fontes são observadas em 158 MHz, detectadas a um limite de 9 Janskys (Jy), e estão a declinação norte de -22° . De acordo com esse catalogo, 3C 273 se encontra a: $\alpha_{2000} = 12^h 29^m 06,7^s$, $\delta_{2000} = +02^\circ 03' 08,6''$, onde α_{2000} é a acessão reta e δ_{2000} é a declinação, equivalem a coordenada azimutal e o arco meridiano do astro compreendido entre o plano do equador celeste e o astro, o 2000 significa que são as coordenadas FK5, por estar próxima ao equador, é possível enxerga-la nos dois hemisférios. O quasar 3C 273 segundo a base de dados Simbad existem 119 identificações diferentes pra esse objeto. (ROCHA 2015, p. 34)

3C 273 é considerado um quasar do tipo radio-load e um AGN do tipo radio-quiet. Possui um jato relativístico. Por se tratar de um AGN a sua distribuição de energia espectral abrange todo o espectro eletromagnético. Está localizada na constelação de virgem, distante 633 Mpc, de magnitude absoluta de $-26,9$, e redshift $z = 0,158$. A velocidade da matéria que circunda o buraco negro central atinge a ordem de $v \sim 10^4 km/s$. O seu buraco negro tem massa de aproximadamente $10^9 M_\odot$. (ROCHA, 2015 p.35)

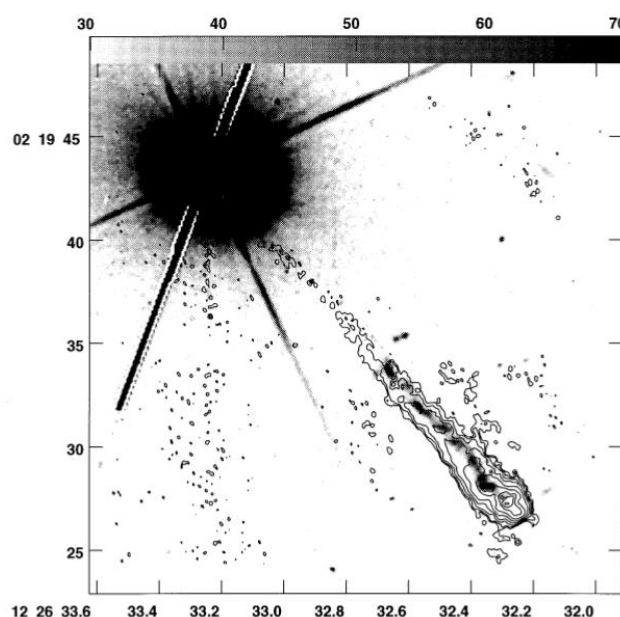
As emissões no espectro do visível nos jatos relativísticos é um fenômeno raro, mas, em 1963, Oke & Schmidt perceberam uma lamina advinda do núcleo do quasar 3C 273 (ROCHA, apud Oke & Schmidt). E como observado em outros casos, este também tem o seu jato óptico alinhado com o jato relativístico emitido em rádio. Segundo Petropoulou e Dimitrakoudis (2015) o acredita-se que o jato é de emissão sincrotrônica, radiação produzida por partículas carregadas em alta velocidade quando são desviadas por um campo magnético, e a radiação elevada começa a partir do choque do jato com o gás que o circunda. O jato aparenta ter apenas um lado, como mostra a Figura 7, onde a “bola” escura é o quasar e o feixe saindo da 3c

273 é o jato e com mais detalhes dos nós do jato podem ser vistos na Figura 8 com o jato óptico em escala cinza e rádio sendo o contorno. (ROCHA, N. M. N., 2015. p.37)

Estudos da estrutura do quasar 3c 273 no espectro do rádio, entre 1970 e 1977, descobriram que o jato estava se expandindo.

Hoje em dia, já se sabe que existe um jato em cada extremidade do eixo de rotação, o maior e outro muito menor, o jato maior é o visto na Figura 7, composto por nós conectados por uma emissão difusa. Uma para explicação para o contra jato ser tão pequeno é que um dos jatos é amplificado pelo fenômeno chamado de abrilhantamento Doppler e o outro não. (SANTOS, 2007, p.23).

Figura 7: Jato saindo do quasar 3C 273, superposição da imagem de rádio (contorno) com imagem óptica (escala cinza).

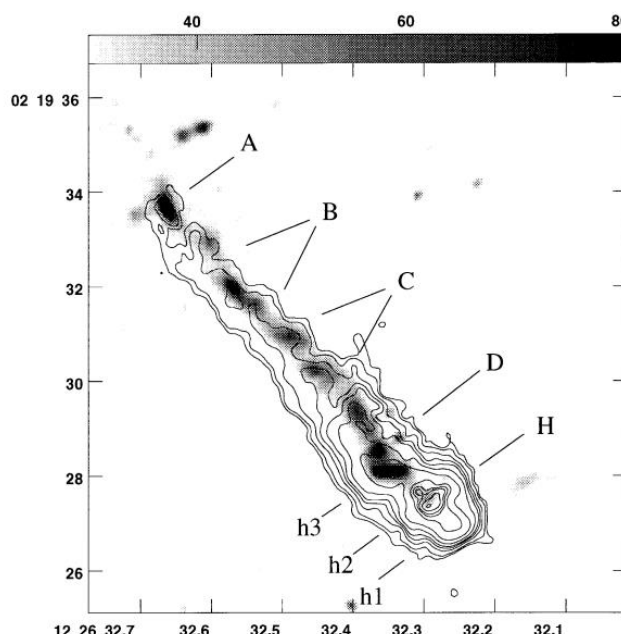


Fonte: Bahcall et al. (1995)

A partir de observações feitas pelo VLBA em altas frequências (12 – 22 GHz) Zavala (2005) confirmam a existência de um gradiente transversal do rotacional de Faraday no eixo do jato da 3c 273. O mesmo gradiente foi visto em épocas diferentes indicando sua estabilidade.

Zavala (2005) faz suas observações dos ângulos de polarização nas seguintes frequências: 12,1, 12,6, 14,9, 15.4 e 22.2 GHz, para poder mapear a estrutura do jato da 3C 273.

Figura 8: detalhes dos nós do jato no quasar 3C 273, superposição da imagem de rádio (contorno) com imagem óptica (escala cinza).



Fonte: Bahcall et al. (1995)

4.10. MESSIER 87 (M87)

A Messier 87 é uma galáxia elíptica que está localizada aproximadamente 55 milhões de anos-luz de distância da terra, se encontra na região da constelação de virgem num aglomerado de galáxias, sendo que a M87 é a segunda mais luminosa deste aglomerado. Tem em torno de 25 mil anos luz de diâmetro, devido suas dimensões ela é considerada uma galáxia supergigantes, ela está a $a_{2000} = 12^h 30^m 49,42^s, \delta_{2000} = +12^\circ 23' 28,04''$ podendo ser vista nos dois hemisférios já que se encontra relativamente próxima a linha do equador.

M87 foi descoberto por pelo astrônomo francês Charles Messier em 1781 quando o mesmo procurava por objetos de característica nebulosa que confundiam os caçadores de cometas, só para salientar, a existência de galáxias além da nossa só foi aceito na década de 20 a partir de pesquisas feitas por Edwin Powell Hubble.

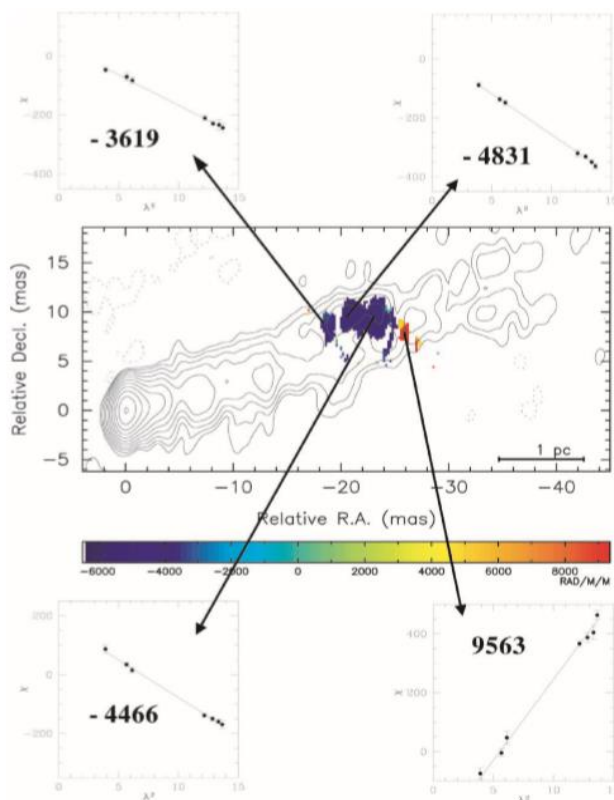
Como já foi falado, ela é uma galáxia elíptica supergigantes, isso quer dizer que ao contrário das galáxias espirais que possui faixas escuras (“braços”), a sua estrutura tem a forma elipsoidal e sua intensidade luminosa reduz conforme se afasta do núcleo. A distribuição das estrelas nesta galáxia e quase que esférica com maior concentração no seu núcleo. No seu centro possui um buraco negro

supermassivo de massa aproximada de $M = 3,5 \cdot 10^9 M_{\odot}$ (JONELLE. 2013) e em torno dele grande quantidade de poeira e gás que esta sendo engolida e emitindo radiação, sendo caracterizado como um núcleo galáctico ativo.

O primeiro caso registrado de um jato relativístico foi visto saindo da galáxia M87. A partir de exposições planimétricas do jato descobriu-se que a luz do mesmo é altamente polarizada típica da radiação sincrotron. Exibe um espectro contínuo. A grande turbulência do seu movimento na direção do eixo de propagação aparenta ter um movimento superluminal, causado por uma ilusão pelo fato dele esta quase apontada para nós.

O jato da M87 é em escala de parsec, e as suas medidas de rotação de faraday foram feitas por Zavala (2002) onde o mesmo mostra a existência de uma extrema variação na distribuição do RM sobre o jato projetado a 0.3 pc. A Figura 9 foi a mesma usada por Zavala (2002) usada nas medidas dos RMs no jato, a imagem mostra os valores encontrados para o rotacional nas regiões coloridas. A barra de cores indica o valor para o RM e varia de -6300 a 9300 rad/m/m.

Figura 9: imagem do jato da M87 feita a partir de dados de 8 a 15 GHz.



Fonte: ZAVALA (2002)

4.11. MÉTODO UTILIZADO POR KRONBERG

A partir de evidências consistente de fluxo de corrente elétrica visualizadas próximas a o buraco negro central nos gradientes transversais da medida de rotação de Faraday (ASADA et al. 2002), foi possível mensurar a corrente elétrica que ali estava confirmada.

Kronberg (2011) discutiu as imagens fornecidas pelo VLA nos parâmetros de Stokes I, Q e U, nas bandas de rádio 1,4, 4,9 e 15 GHz para a identificação da variação da polarização em cada banda e com isso determinar a rotação de Faraday e averiguar a existência do gradiente transversal de RM em um dos nós do jato do núcleo galáctico ativo da galáxia 3c 303.

Por meio de simulações feitas por Lapenta e Kronberg (2005) (LK05) ele pôde verificar a estrutura similaridades com as imagens reais, percebeu-se que existe apenas um jato unilateral com estruturas de nós repetidos que estavam presentes nas imagens de diferentes espectros e também na simulação, com isso foi possível fazer a determinação aproximada do nível zero da RM para se conseguir reduzir o erro na determinação *do gradiente transversal da média de rotação de Faraday*

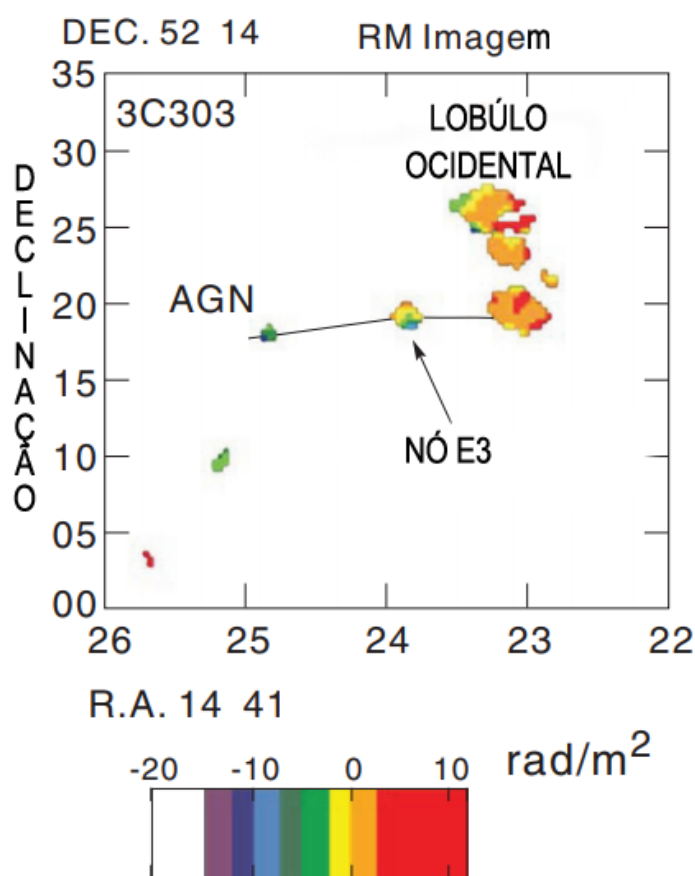
Segundo Kronberg (2011), com a combinação das imagens tornou-se possível a obtenção de parâmetros físicos do jato, citados em seções anteriores e a corrente elétrica de forma isolada, algo que de acordo com Contopoulos (2017) foi o primeiro caso de estimativa de corrente elétrica longitudinal em um jato de rádio em um núcleo galáctico ativo.

Com a recalibração da imagem do jato, para melhorar a sua definição, foi possível determinar o seu raio considerando que o jato tem formato cilindro e o sentido de propagação (z) do mesmo, para isso foi feito uma análise minuciosa de sua estrutura sendo feita a identificação dos “casulos” em torno do feixe, sendo que dentro deste casulo foi identificada a presença de plasma térmico a velocidades relativísticas e a presença de campo magnético, como foi previsto nas simulações de LK05.

Devido ao campo magnético a luz polarizada do jato foi rotacionando de tal maneira tornando possível a determinação do gradiente transversal da RM no jato, isso se deu pelo diagnóstico completo do plasma e de um nível zero, esse ocorrido é considerado uma oportunidade rara de medição e com isso foi possível pela primeira vez fazer a estimativa direta da magnitude e do sinal da corrente elétrica, o feito foi

percebido no terceiro nó como mostra a Figura 10 que pode ser visto as variações do rotacional de Faraday naquela região, desde o jato até o lóbulo. Infelizmente Kronberg (2011) não fornece detalhes do procedimento utilizado para mensurar o ∇RM

Figura 10: Rotação de Faraday na imagem do jato relativístico da 3C 303 no comprimento de ondas de rádio com resolução de $1'',5$. O gradiente transversal de RM foi encontrado no nó E3.



Fonte: Kronberg et al. (2011)

O campo magnético helicoidal do jato da 3C 303 foi determinado usando os métodos utilizados na simulação de LK05, que usou novas informações da polarização da luz na estrutura do jato para determinar a medida de rotação e fazer a estimativa da pressão do plasma e comprovar a predominância eletromagnética no fluxo de energia verificado, e como foi citado em outra seção RM é uma das técnicas utilizadas para encontrar o campo magnético.

Como Kronberg (2011) já possuía os dados do Rotacional de Faraday obtidos

por Simard-Normandin et al. (1981), que é uma tabela de RMs de precisão aceitável, e o campo magnético ele obteve das simulações LK5, tendo essas informações foi possível determinar a densidade do plasma n_e a partir da equação da medida de rotação de Faraday, que usualmente é utilizada para encontrar o campo magnético. Existem outros métodos para estimar o valor para n_e como, por exemplo: observando o grau de polarização em cima dos nós.

Um passo importante utilizado por Kronberg (2011) foi relacionar o gradiente do rotacional de Faraday a uma corrente axial. Sabendo que o gradiente

$$\nabla RM = B_\phi n_e \quad (6)$$

é perpendicular ao eixo do nó e ao eixo do jato tendo o comportamento esperado correspondente ao comportamento do RM em torno de uma corrente elétrica que flui ao longo de um eixo. B_ϕ é a componente toroidal do campo magnético.

A afirmativa que o jato da 3C 303 é de formato aproximadamente cilíndrico e que é capaz de transportar corrente elétrica, foi verificado por Kromberg (2011) ao medir o campo magnético azimutal no casulo que emitia radiação sincrotron notando ali a inversão do sinal do RM características que segundo ele confirmam a geometria e a condução dentro do jato. A corrente total (I_z) dentro da região estudada (casulo) por ele, pode ser inferida pela expressão

$$I_z \propto \left(\frac{y}{n_e}\right) \nabla RM \quad (7)$$

onde y é o raio do casulo. Para calcular a corrente no nó que se encontra o gradiente transversal foi utilizado a seguinte equação:

$$I_z \sim 7,7 \cdot 10^{18} \left(\frac{B_\phi}{mG}\right) \left(\frac{y}{0,5kpc}\right) A \quad (8)$$

Onde I_z é a corrente ao longo do eixo do jato, y é o raio deste jato levando em consideração que se trata de um cilindro. No jato da 3C 303 o seu ∇RM foi mensurado com sinal positivo isso significa que a corrente está saindo do núcleo para fora.

5. MÉTODOLOGIA DA PESQUISA

5.1. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Para esse trabalho foi feito um levantamento bibliográfico da temática, com o intuito de servir de embasamento teórico para o desenvolvimento do mesmo. Essa pesquisa utilizou uma gama de diferentes tipos de literaturas, como: artigos, monografias, dissertações, teses periódicos e páginas da internet.

O presente trabalho utilizou como base o artigo “MEASUREMENT OF THE ELECTRIC CURRENT IN A Kpc-SCALE JET” de Kronberg et al.(2011), neste artigo os autores conseguiram mensurar a corrente elétrica em um jato relativístico usando informações da polarização da estrutura do jato relativístico da galáxia 3C 303.

5.2. OBJETOS ESTUDADOS

Por meio de levantamento bibliográfico em uma infinidade artigos, com o intuito de encontrar os dados necessários para reproduzir o feito de Kronberg et al. (2011) aplicado em jatos relativísticos de outros núcleos galácticos ativos. Neste levantamento, foi possível encontrar os dados necessários para mensurar a corrente elétrica do jato destes dois objetos celestes; O quasar 3C 273 e da Galáxia elíptica Messier 87.

5.3. DADOS LEVANTADOS

As informações obtidas do quasar 3C 273 foram retiradas dos artigos de Gregory B., Taylor (1998) e Zavala R.T., Taylor, G. B. (2005). E para a galáxia M87 o artigo utilizado foi o de Zavala, R.T., Taylor, G. B. (2002).

Os dados levantados desses objetos foram o Gradiente transversal, raio do jato e a densidade de elétrons, sendo que o raio do quasar 3C 273 foi obtido diretamente pela Figura 11 considerando que o seu diâmetro equivale ao comprimento da marcação no local onde foi medido o gradiente do RM, pois o aparecimento do ∇RM indica que aquele local tem geometria cilíndrica como já foi citado em outras seções.

Uma diferença em relação ao artigo base é a forma da obtenção do campo magnético toroidal B_ϕ . Pois segundo Kronberg et al (2011) ele obtém esse dado da simulação LK05 e neste trabalho foi usado a equação (6) que ele mostrou em seu trabalho que é capaz de fornecer um resultado satisfatório mesmo com sua peculiaridade na sua análise dimensional que aparenta incongruências.

Por último foram aplicados aos dados até aqui obtidos de forma direta na equação (8) para a obtenção da corrente elétrica contida no jato.

6. RESULTADOS

Considerando o Modelo Unificado das AGN's, que diz que os núcleos galácticos ativos são o mesmo tipo de objetos e com isso afirmar a similaridade que os jatos relativísticos aqui estudadas apresentam similaridades em relação a 3C 303, para que seja possível aplicar o mesmo método utilizado por Kronberg (2011), e assim estimar o valor das correntes elétricas em x AGN's.

6.1. CORRENTE ELETRICA PARA O JATO DO QUASAR 3C 273

A partir de observações feitas pelo Very Long Baseline Array (VLBA) em alta frequência, Zavala e Taylor (2005) confirmaram a existência do *gradiente transversal do rotacional de Faraday* no eixo do jato e fizeram a sua estimativa de $\sim 500 \text{ rad m}^{-2} \text{ mas}^{-1}$. Para aplicar este valor é feita sua conversão para unidades apropriadas ficando com $\nabla RM \cong 19,8 \text{ rad cm}^{-2} \text{ Kpc}^{-1}$

Gregory e Taylor (1998) ao fazer o estudo do campo magnético em Quasares incluindo o Quasar 3C 273, para validar o seu resultado ele assume que a densidade de elétrons n_e seja igual a 10^4 cm^{-3} . Levando em consideração o modelo de jato na forma de um cilindro e a densidade igual ao longo do jato, que pode ser usado como uma aproximação para a densidade no nó que foi medido o *gradiente do RM*.

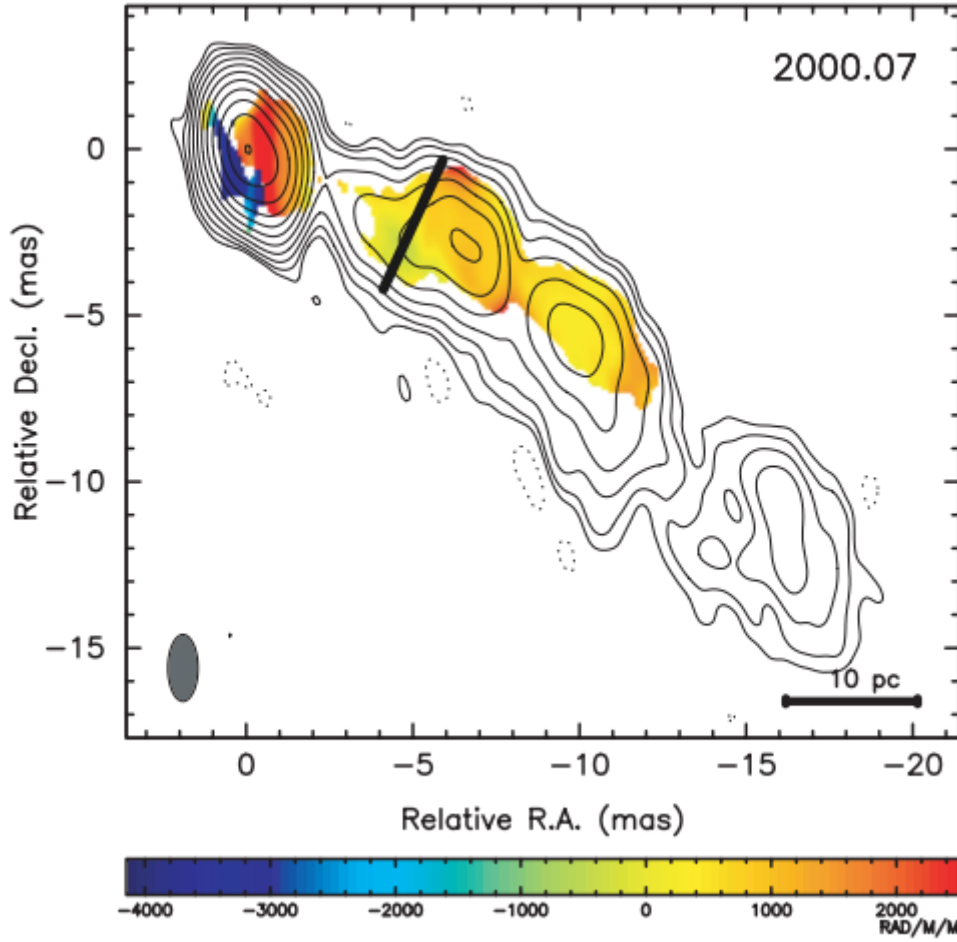
Com essas duas informações, ∇RM e n_e é possível encontrar o valor para o campo magnético toroidal B_ϕ pela relação da equação (6)

$$\begin{aligned} \nabla RM &= B_\phi n_e \\ B_\phi &= \frac{\nabla RM}{n_e} \\ B_\phi &= \frac{19,8}{10^4} \\ B_\phi &= 1,98 \text{ mG} \end{aligned} \tag{9}$$

O raio do jato relativístico foi estimado em $y = 2,1 \text{ pc}$ de forma direta na região que foi utilizada para medir o gradiente transversal da medida de rotação de Faraday por Zavala e Taylor (2005), mas específico na local onde se encontra uma marcação

com um traço como pode ser visto na Figura 11, essa imagem representa a distribuição do RM sobre o jato da 3C 273, e uma escala que varia de -4100 a 2450 rad/m/m.

Figura 11: Imagem de medida de rotação para 3c 273, com marcação de onde foi detectado o ∇RM



Fonte: Zavala (2005)

Os dados obtidos da 3C 273 já são o suficiente para estimar a corrente I_z que percorre o eixo do jato usando a equação (8)

$$I_z \sim 7,7 \cdot 10^{18} \left(\frac{B_0}{mG} \right) \left(\frac{y}{0,5kpc} \right) A \quad (8)$$

$$I_z \sim 7,7 \cdot 10^{18} \left(\frac{1,98mG}{mG} \right) \left(\frac{2,1 \cdot 10^{-3}Kpc}{0.5kpc} \right) A$$

$$I_z \sim 6,4 \cdot 10^{16} A$$

O valor estimado é uma aproximação e pode estar sujeita a variações, o campo magnético pode não ser simétrico ao eixo do jato causando mudanças no resultado final (KRONBERG, 2011). No entanto Wardle, J. (2018) a partir de implicações da estrutura do quasar 3C 273 ele estima que a corrente elétrica neste jato esteja próxima de $10^{17} A$.

6.2. CORRENTE ELETRICA PARA O JATO DA GALAXIA M87

Com a análise feita por Zavala e Taylor (2002) da polarização do jato da rádio galáxia M87, foi determinado o gradiente transversal de $\nabla RM < 2370 \text{ rad m}^{-2} \text{ mas}^{-1}$, para fins de cálculo sua conversão ficara $\nabla RM \cong 94,1 \text{ rad cm}^{-2} \text{ Kpc}^{-1}$.

Stauffer e Spinrad (1978) por meio de observações espectroscópicas do núcleo da M87, concluíram a partir da análise da intensidade das linhas de emissão que a densidade de elétrons naquela região é $n_e \sim 1100 \text{ cm}^{-3}$.

Pode-se estimar pela um campo magnético toroidal pelo mesmo procedimento utilizado anteriormente:

$$\begin{aligned} \nabla RM &= B_{\phi} n_e \\ B_{\phi} &= \frac{\nabla RM}{n_e} \\ B_{\phi} &\sim \frac{94,1}{1,1 \cdot 10^{-3}} \\ B_{\phi} &\sim 85,54 \text{ mG} \end{aligned} \tag{9}$$

O raio deste jato relativístico foi estimado em $y = 0,3 \text{ pc}$ de forma direta pela figura 9.

Os dados obtidos da M87 já são o suficiente para estimar sua corrente I_z que percorre o eixo do jato usando a equação (8).

$$\begin{aligned} I_z &\sim 7,7 \cdot 10^{18} \left(\frac{B_{\phi}}{\text{mG}} \right) \left(\frac{y}{0,5 \text{ kpc}} \right) A \\ I_z &\sim 7,7 \cdot 10^{18} \left(\frac{85,54 \text{ mG}}{\text{mG}} \right) \left(\frac{0,3 \text{ pc}}{0,5 \text{ kpc}} \right) A \\ I_z &\sim 1,98 \cdot 10^{17} A \end{aligned} \tag{8}$$

A corrente elétrica estimada para esse jato é $I_z \cong 1,98.10^{17}A$. Algaba et al. (2013) estimaram que a corrente de M87 de aproximadamente $I_z \sim 1 * 10^{18}A$.

6.3. COMPARAÇÃO DA CORRENTE ELETRICA DOS JATOS COM A MASSA DE SEUS RESPECTIVOS BURACOS NEGROS

Usando os valores das correntes mensuradas neste trabalho e com as poucas encontradas na literatura, Jafelice(1991), Kronberg (2011), para compara-las com a massa do buraco negro central responsável pela geração do seu respectivo jato como mostra a Tabela 1:

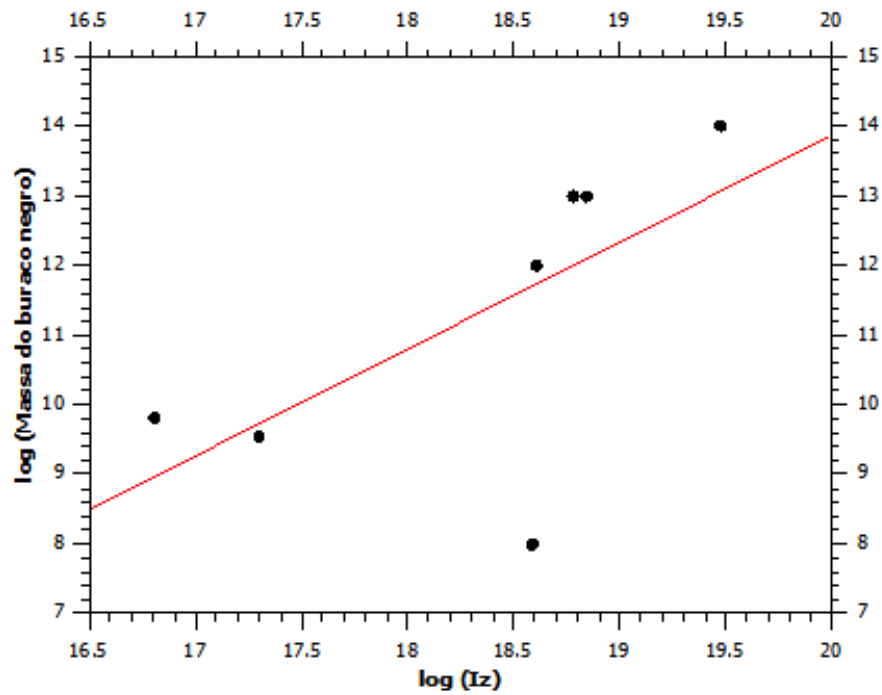
Tabela1: corrente elétrica dos jatos astrofísicos e a massa do buraco negro de suas respectivas fontes.

Objeto celeste	Corrente elétrica	Massa do buraco negro	Referência da corrente/Massa do buraco negro
3C 273	$\sim 6,4.10^{16} A$	$\sim 6,59.10^9 M_{\odot}$	Autoria própria/Paltani (2005)
M87	$\sim 1,98.10^{17} A$	$3,5.10^9 M_{\odot}$	Autoria própria/ Jonelle 2013
Cygnus A	$\sim 3.10^{19} A$	$\sim 10^{14} M_{\odot}$	Jafelice(1992)/ Jafelice(1992)
NGC 6251	$\sim 6.10^{18} A$	$\sim 10^{13} M_{\odot}$	Jafelice(1992)/ Jafelice(1992)
3C 465	$\sim 7.10^{18} A$	$\sim 10^{13} M_{\odot}$	Jafelice(1992)/ Jafelice(1992)
M84	$\sim 4.10^{18} A$	$\sim 10^{12} M_{\odot}$	Jafelice(1992)/ Jafelice(1992)
3C 303	$\sim 3,85.10^{18} A$	$\sim 10^8 M_{\odot}$	Kronberg(2011)/Kronberg(2008)

Fonte: Autoria própria

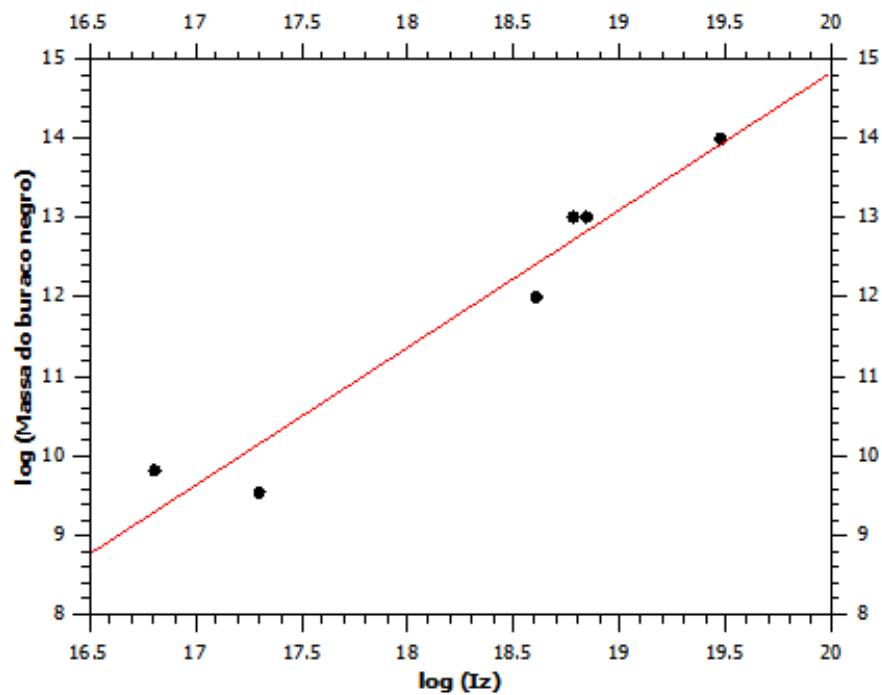
Para encontrar uma correlação entre a corrente e a massa do buraco negro foram feitos duas regressões lineares como mostra gráfico 1 e o gráfico 2. No gráfico 1 foram utilizados todos os dados da tabela 1 em escala logarítmica e visualmente percebe-se que a 3c 303 está muito fora da curva, o coeficiente de correlação com esse ponto é $R^2 = 0,42$ e a equação dessa regressão é $\log M_{\odot} = 1,53 \log I_z - 16,8$. O gráfico 2 retira 3c 303 devido ser o único calculado por kronberg (2011), que está fora curva, o coeficiente de correlação neste novo gráfico é de $R^2 = 0,95$ e sua equação tornou-se $\log M_{\odot} = 1,73 \log I_z - 19,9$.

Grafico1: $\log(I_z)$ x $\log(M_\odot)$ com 3C 303



Fonte: Autoria própria

Grafico 2: $\log(I_z)$ x $\log(M_\odot)$ sem 3C 303



Fonte: Autoria própria

7. CONCLUSÕES

As pesquisas dos gradientes transversais do RM estão a todo vapor considerando que eles voltaram a ser estudados em 2002 e até hoje trabalhos estão sendo publicado, porém durante esse tempo grande parte dos artigos encontrados só disponibilizam as fontes que possuem o ∇RM e onde estão localizadas a sua distribuição na fonte (GABUZDA et al., 2013), (GABUZDA et al., 2014), (MAHMUD et al., 2013), (CHISTODOULOU et al. 2016) entre outras, esse fato limitou os resultados desse trabalho para dois casos.

O método de Kronberg mostrou-se eficiente, pois os resultados obtidos para as correntes do Quasar 3c 273 e do jato da galáxia M87 foram satisfatórios, seus valores estão relativamente próximos de outros casos relatados na literatura (JAFELICE, 1998) (KRONBERG et al., 2011), (ALGABA et al., 2013) ,(WARDLE, 2018). Wardle (2018) faz a análise da distribuição e o mesmo confirma a existência de campo magnético toroidal ao fazer a distribuição dos gradientes transversais rotacional de Faraday, e no jato surge uma corrente elétrica em consequência desse campo, Wardle estima que essa corrente elétrica deva ter seu valor próximo $10^{17} - 10^{18} A$, e o valor obtido pelo método de Kronberg ficou perto deste intervalo. Algaba (2013) analisa a distribuição dos RM em 4 regiões diferentes e também conclui a existência do campo magnético toroidal e faz a sua estimativa para a corrente elétrica que também avizinhou do valor obtido neste trabalho. Tais comparações confirmam a fidedignidade do nosso resultado, levando em considerações supostos erros já que os dados usados para fazer as medidas foram determinados em outros trabalhos..

Ao fazer o levantamento de valores mensurados da corrente elétrica e compará-los com a massa de seu buraco negro, que é uma das partes mais importantes para a formação dos jatos, foram plotados seus valores em escala logarítmica, ao utilizar todos os valores encontrados na literatura juntamente com os dados mensurados neste trabalho notou-se uma tendência no crescimento da massa do buraco negro quando se aumenta a corrente elétrica do seu jato, no primeiro gráfico o ponto para 3C 303 ficou muito fora da curva podendo aumentar a imprecisão da equação da regressão linear devido limitação de dados, no entanto segundo gráfico ao retirar esse ponto da regressão linear encontrou-se uma forte tendência, com coeficiente de correlação de 0,95, essa informação nos mostra que

com o aumento da massa do buraco negro também é percebido um crescimento na corrente elétrica do jato associado, algo que faz muito sentido, já que com o aumento da $M_{\odot}$ existira uma expansão do disco de acreção e por consequência a amplificação na geração de campo magnético pela bateria cósmica, e mais plasma sendo ejetado intensificando o valor da corrente elétrica no jato astrofísico. A equação $\log M_{\odot} = 1,73 \log I_z - 19,9$ obtida na segunda regressão é uma nova forma de mensurar a massa de um buraco negro usando a corrente elétrica do jato associado ou vice versa.

Com o aumento de pesquisas e com a inédita utilização de um radiotelescópio virtual com diâmetro maior o da terra (GIOVANNINI, 2018) possibilitou fazer obtenção de imagens mais precisas de um jato relativístico, e estudos mais avançados de sua estrutura. Agora é só uma questão de tempo para que essa técnica seja utilizada em outras fontes, expandindo ainda mais as pesquisas nesta área.

8. REFERÊNCIAS

ALGABA, J. C.; ASADA, K.; NAKAMURA, M.. Helical magnetic fields in the M87 jet at arc-second scales. **Cornell University Library.** ., p. 1-20. 30 mar. 2016. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1308.5429>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

ANANTUA, Richard; BLANDFORD, Roger; TCHEKHOVSKOY, Alexander. Multiwavelength Observations of Relativistic Jets from General Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations. **Galaxies.** Basel, p. 1-10. 3 mar. 2018.

BLANDFORD, R. D.. Accretion Disc Electrodynamics: A Model for Double Radio Sources. **Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society.** Londres, p. 465-481. 1 set. 1976. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/176.3.465>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

BLANDFORD, R. D.; PAYNE, D. G.. Hydromagnetic flows from accretion discs and the production of radio jets. **Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society.** Londres, p. 883-903. 19 ago. 1981.

BONAFEDE, A. et al. The Coma cluster magnetic field from Faraday rotation measures. **Astronomy & Astrophysics.** ., p. 1-21. 27 jan. 2010.

CHRISTODOULOU, Dimitris M. et al. Dominance of outflowing electric currents on decaparsec to kiloparsec scales in extragalactic jets. **Astronomy & Astrophysics: Worldwide astronomical and astrophysical research.** ., p. 1-12. 13 jun. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527448>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

CONTOPOULOS, Ioannis. Electric Currents along Astrophysical Jets. **Galaxies.** Basel, p. 1-6. 25 out. 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2075-4434/5/4/71>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

GABUZDA, D. C.; CANTWELL, T. M.; CAWTHORNE, T. V.. Magnetic field structure of the extended 3C 380 jet. **Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society.**

Londres, p. 1-5. 19 nov. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/slt129>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

GABUZDA, Denise C.; MURRAY, Eamonn; CRONIN, Patrick. Helical magnetic fields associated with the relativistic jets of four BL Lac objects. **Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society**, Londres, v. 351, n. 4, p.89-93, 11 jul. 2018.

GABUZDA, D. C. et al. Parsec scale Faraday-rotation structure across the jets of nine active galactic nuclei. **Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society**. Londres, p. 1792-1801. 17 ago. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/stx2127>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

GABUZDA, D. C.; REARDON, Knuettel & B.. Transverse Faraday-Rotation Gradients Across the Jets of 15 Active Galactic Nuclei. **Cornell University Library**. , p. 1-10. mar. 2015.

GABUZDA, D. C.; REICHSTEIN, A. R.; O'NEILL, E. L.. Are spine–sheath polarization structures in the jets of active galactic nuclei associated with helical magnetic fields? **Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society**. Londres, p. 172-184. 13 ago. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/stu1381>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

GIOVANNINI, G. et al. A wide and collimated radio jet in 3c84 on the scale of a few hundred gravitational radii. **Nature Astronomy**. ,. 3 abr. 2018. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/sacani/a-wide-and-collimated-radio-jet-in-3c84-on-the-scale-of-a-few-hundred-gravitational-radii>>. Acesso em: 05 abr. 2018.

GONZÁLEZ, Judit García. **La emision infrarroja de galaxias activas**. 2017. 217 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciencias, Tecnologia y Computacion, Csic - Universidad de Cantabria, Cantabira, 2017.

HARDCASTLE, M. J. et al. Deep Chandra observations of Pictor A. **Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society**. Londres, p. 3526-3545. 13 ago. 2016.

HARDEE, Philip E.; HUGHES, Philip A.. THE EFFECT OF EXTERNAL WINDS ON RELATIVISTIC JETS. **The Astrophysical Journal**, ., v. 583, n. 1, p.116-123, 20 jan. 2003.

HOMAN, D. C.; LISTER, M. L.. MOJAVE: MONITORING OF JETS IN ACTIVE GALACTIC NUCLEI WITH VLBA EXPERIMENTS. II. FIRST-EPOCH 15 GHz CIRCULAR POLARIZATION RESULTS. **The Astronomical Journal**. U.s.a, p. 1262-1279. mar. 2006.

JAFELICE, Luiz C.; OPPER, Reuven. The origin of intergalactic magnetic fields due to extragalactic jets. **Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society**, Londres, v. 257, n. 1, p.135-151, 1 jul. 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/257.1.135>>. Acesso em: 7 abr. 2018

JOEL C. CARVALHO (São Paulo). Radiofontes Extragalácticas. In: VIEGAS, Sueli M. M.; OLIVEIRA, Fabíola de. **Decobrando o Universo**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2004. Cap. 17, p. 189.

KOIDE, Shinji; SHIBATA, Kazunari; KUDOH, Takahiro. RELATIVISTIC JET FORMATION FROM BLACK HOLE MAGNETIZED ACCRETION DISKS : METHOD, TESTS, AND APPLICATIONS OF A GENERAL RELATIVISTIC MAGNETOHYDRODYNAMIC NUMERICAL CODE. **The Astronomical Journal**. U.s.a, p. 727-752. 10 set. 1999. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1086/307667>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

KRASNOPOLSKY, Ruben; LI, Zhi-yun; BLANDFORD, Roger. MAGNETOCENTRIFUGAL LAUNCHING OF JETS FROM ACCRETION DISKS. I. COLD AXISYMMETRIC FLOWS. **The Astrophysical Journal**. U.s.a, p. 631-642. 1 dez. 1999.

KRONBERG, P. P.; NEWTON-MCGEE, K. J.. Remarkable Symmetries in the Milky Way Disc's Magnetic Field. **Astronomical Society Of Australia**. Australia, p. 171-176. 4 mar. 2010.

KRONBERG, P. P. et al. MEASUREMENT OF THE ELECTRIC CURRENT IN A kpc-SCALE JET. **The Astronomical Journal**. U.s.a, p. 1-4. 12 out. 2011. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/2041-8205/741/1/L15/meta>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

LAPENTA, G.; KRONBERG, P. P.. Simulation of Astrophysical Jets: Collimation and Expansion into Radio Lobes. **The Astronomical Journal**. U.s.a, p. 37-50. 20 maio 2005. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1086/429531>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

LOVELACE, R. V.. Dynamo model of double radio sources. **Nature**. New York, p. 649-652. 19 ago. 1976.

LOVELACE R. V.. Low-frequency stability of high-current particle rings. **The Physics Of Fluids**. U.s.a, p. 723-737. 22 dez. 1975.

MAHMUD, M. et al. Connecting magnetic towers with Faraday rotation gradients in active galactic nuclei jets. **Monthly Notices Of The Royal Astronomical Society**. Londres, p. 695-709. 1 maio 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/stt201>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

MARAN, Stephen P.. **Astronomia para Leigos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Altas Books, 2012. Tradução de: Ricardo Sanovik.

MEIER, David L.; KOIDE, Shinji; UCHIDA, Yutaka. Magnetohydrodynamic Production of Relativistic Jets. **Science**, New York, v. 291, n. 5501, p.84-92, 5 jan. 2001

MOTTER, Juliana Cristina; GABUZDA, Denise Carmen. 18–22 cm VLBA Observational Evidence for Toroidal B-Field Components in Six AGN Jets. **Galaxies**. , p. 1-6. 30 ago. 2016.

MOTTER, Juliana Cristina. **Estudos da estrutura e evolução de jatos em Núcleos Ativos de Galáxias usando técnicas de Interferometria de Longa Linha**

de Base. 2017. 252 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

OPPERMANN, N. et al. An improved map of the Galactic Faraday sky. **Astronomy & Astrophysics: Worldwide astronomical and astrophysical research.** ., p. 1-14. jun. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118526>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

PALTANI, S.; TÜRLE, M. The mass of the black hole in 3C 273. **Astronomy & Astrophysics,** ., v. 435, n. 3, p.811-820, 13 maio 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20041206>>. Acesso em: 5 abr. 2018.

PUDRITZ, Ralph E.. Jets from accretion discs. **The Royal Society.** ., p. 741-758. 15 fev. 2000.

ROCHA, Nathalia Mattos Novaes da. **Análise Wavelet da variabilidade do quasar 3C 273.** 2015. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

SEEDS, Michael A.; BACKMAN, Dana E.. **Foundations of Astronomy.** Boston: Brooks/cole, 2007. 674 p.

SIMARD-NORMANDIN, Martine; KRONBERG, Philipp P.; BUTTON, Stuart. THE FARADAY ROTATION MEASURES OF EXTRAGALACTIC RADIO SOURCES. **The Astrophysical Journal,** U.s.a, v. 45, n. , p.97-111, jan. 1981

TAYLOR, Gregory B.. Magnetic Fields in Quasar Cores. **The Astronomical Journal.** U.s.a, p. 637-646. out. 1998. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1086/306286>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

VIEGAS, Sueli M.m.; OLIVEIRA, Fabíola de. **Descobrimos o Universo.** 56. ed. São Paulo: Edusp, 2004.

WUENSCHÉ, Carlos Alexandre. **Processos Radiativos I**. São Carlos: Carlos Alexandre Wuensche, .. 90 slides, color.

ZAVALA, R. T.; TAYLOR, G. B.. Faraday Rotation Measure Gradients from a Helical Magnetic Field in 3C 273. **The Astrophysical Journal**. U.s.a, p. 73-76. 31 maio 2005. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1086/431901>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

ZAVALA, R. T.; TAYLOR, G. B.. FARADAY ROTATION MEASURES IN THE PARSEC-SCALE JETS OF THE RADIO GALAXIES M87, 3C 111, AND 3C 120. **The Astrophysical Journal**. U.s.a, p. 9-12. 18 jan. 2002.