



Universidade Estadual de Maringá  
Centro de Ciências Exatas  
Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

# **Análise de Redshift de Quasares Acoplados em Galáxias**

Acadêmica: Fernanda Tiemi Karia

Orientador: Prof. Dr. Marcos Cesar Danhoni Neves

Maringá, 11 de maio de 2022



Universidade Estadual de Maringá  
Centro de Ciências Exatas  
Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

## **Análise de Redshift de Quasares Acoplados em Galáxias**

TCC apresentado ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá, sob orientação do professor Dr. Marcos Cesar Danhoni Neves, como parte dos requisitos para obtenção do título de Licenciada em Física

Acadêmica: Fernanda Tiemi Karia

Orientador: Prof. Dr. Marcos Cesar Danhoni Neves

Maringá, 11 de maio de 2022

# Sumário

Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract	vii
Introdução	1
Objetivos	2
Metodologia	3
1 O que são quasares?	7
2 Efeito Doppler, Redshift e Blueshift	10
2.1 Desenvolvimento do Redshift como Efeito Doppler . . . . .	12
2.2 Análise de dados usando da teoria do Efeito Doppler para a luz. . . . .	14
3 Modelo de Redshift a partir da métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)	18
4 Luz Cansada	22
5 Redshift Intrínseco e Redshift Quantizado	26
5.1 Análise das teorias . . . . .	29
Considerações Finais	30
Referências Bibliográficas	31

# Lista de Figuras

1	Galáxia NGC 0622, é uma galáxia espiral com o centro em forma de barra (barrada), localizada na constelação de Cetus. . . . .	4
2	NGC 470, uma galáxia em espiral localizada na constelação de peixes. . . .	4
3	NGC 1073, é um exemplar de uma galáxia em espiral localizada na constelação de Cetus, na imagem é possível verificar três pontos, que devido aos seus altíssimos redshifts, seriam quasares. . . . .	5
4	NGC 3842, é uma galáxia elíptica localizada na direção de Leo. . . . .	5
5	NGC 7319, é uma galáxia espiral barrada. A ceta presente na figura aponta um quasar. . . . .	6
6	NGC 7319, a figura mostra uma grande região de emissão ao centro, e logo abaixo, próximo a região central, temos uma menor fonte de emissão. . . .	6
1.1	Representação de núcleo galáctico ativo . . . . .	8
2.1	Representação do efeito Doppler para as ondas sonoras. . . . .	11
2.2	Representação do efeito Doppler-Fizeau ou efeito Doppler para a luz. . . . .	12
2.3	Raias espectrais de absorção e emissão do hidrogênio. . . . .	12
2.4	Representação do <i>redshift</i> e do <i>blueshift</i> em comparação com as raias de absorção (estacionárias) de um elemento. . . . .	13
2.5	Velocidades dos objetos normalizadas pela velocidade da luz ( $\beta$ ) X redshift ( $z$ ). . . . .	16
3.1	Representação da expansão do universo no modelo FLRW, usando da representação figurativa do preparo de um pão com passas. . . . .	19
3.2	Modelo de Friedmann crítico. . . . .	20
3.3	comparação entre FLRW Crítico, e aproximado por série de Taylor de primeira ordem. . . . .	21
4.1	Luz Cansada . . . . .	23
4.2	Comparação entre os modelos de redshift . . . . .	24
5.1	NGC 4319, uma galaxia espiral barrada e seu companheiro aparente <i>Margarian 205</i> , localizados na constelação de Draco. . . . .	27

5.2	Borda da galáxia NGC 4319 e quasar <i>Markarian 205</i> com filtro, ressaltando possível ligação física. . . . .	27
-----	--	----

# Lista de Tabelas

1	Galáxias, quasares e seus redshifts. . . . .	3
2.1	Velocidade de recessão normalizada pela velocidade da luz. . . . .	15
2.2	Velocidades de quasares em relação a velocidade da galáxia. . . . .	17

# Agradecimentos

Ao meu Pai Emílio que me apoiou nessa jornada, fazendo de tudo possível para me dar a oportunidade de ter um ensino de qualidade. Ao meu irmão, que mesmo sem saber me ajuda em muitas questões pessoais. A minha *Batian*, mulher forte e empoderada nos seus modos, que me é o maior e melhor exemplo em todos os dias da minha vida.

Aos meus amigos, os quais tenho certeza que no teste de diplomacia devo ter tirado algo próximo 7 no D20, pois são poucos, porém os levo com muito carinho em minha vida.

*To my Darling*, que sempre me ajuda da forma que pode, sempre contribuindo com minhas teorias e análises físicas, e sempre tentando me animar.

Os meus mais sinceros agradecimentos aos professores que fizeram parte da minha graduação, em especial ao Prof. Dr. Marcos Cesar Danhoni Neves, o qual foi meu tutor durante minha estadia no PET-Física UEM, e que aceitou ser o orientador do presente trabalho, e também ao Prof. Dr. Breno Ferraz de Oliveira e ao Prof. Dr. Jurandir Hillmann Rohling por aceitarem fazer parte da banca de defesa.

Por último, mas não menos importante, o maior dos obrigados a quem me ajudou de alguma forma a concluir esse trabalho!

# Resumo

Este trabalho foi realizado a partir da análise de diferentes fontes bibliográficas com o intuito de uma melhor compreensão e discussão sobre a natureza do redshift, tanto como fenômeno quanto das diversas teorias que tentam interpretá-los. Os resultados apresentados serão alicerçados à luz da epistemologia da ciência.

**Palavras chave:** Redshift, Cosmologia, Astrofísica, Efeito Doppler.



# Abstract

This work was made from the analysis of different bibliographic sources with the aim of a better understanding and discussion about the nature of redshift, both as a phenomenon and the different theories that try to interpret them. The results presented will be based on the light of the epistemology of science.

**Keywords:** Redshift, Cosmology, Astrophysics, Doppler Effect.

# Introdução

O ser humano desde sua longa luta evolucionária tenta entender o Cosmos. Primeiro, a partir do conhecimento mágico-mistérico num universo e natureza povoados por deuses. Estes deuses, que foram por nós criados, se conectam entre os diversos ciclos como: dia-e-noite, fases lunares, estações do ano, nasceres helíacos de estrelas, ajudavam a compreender o incompreensível.

Os astros regiam a vida de todos: os diversos marcadores astronômicos presentes em todas as culturas humanas assim o provam. Desde Stonehenge, o disco de Nebra, de 4 mil anos, até as grandes pirâmides do Complexo de Gizé no Egito, prefigurando o cinturão de Órion na Terra, com o rio Nilo refletindo o difuso brilho de nossa galáxia. Não cessaram de construir templos e mais templos, da Ásia à América Latina (maias, astecas, incas), quando já reconheciam as datas de solstícios e equinócios para prever o grande ciclo cósmico. E, a cada milênio as observações e os modelos cosmológicos foram refinando-se a fim de compreendermos a nós mesmos, numa esperança de nos encontrarmos entre as estrelas.

Graças aos avanços dos últimos 400 anos, após o aperfeiçoamento do pérspicillum (telescópio) por Galileo Galilei, pudemos olhar mais longe, encontrando objetos dignos de assombro, espanto, confusão, admiração e paixão, como nosso satélite natural, e nossos vizinhos planetas que apresentam anéis. A compreensão da grandeza do Universo, se finito ou infinito, ainda que atrelado a um paradigma evolucionista (“Big Bang”), nos levou a uma odisséia na ciência para a construção de grandes telescópios terrestres, e mais recentemente (últimos 40 anos) de telescópios e sondas espaciais que ampliaram nossos limites na busca da compreensão dos mecanismos escondidos do Cosmos.

E por esse salto na tecnologia pudemos ver o que nunca se tinha observado antes, como as belíssimas galáxias, as impressionantes nuvens de poeira e gás, gradiosos aglomerado de objetos, variadas estrelas e , e objetos minúsculos porém super massivos, além desses, temos ainda os objetos que são ‘barulhentos’ como os quasares.

Nesta odisséia, ainda que com um paradigma quase “idealizado”, continuam grandes dúvidas a serem sanadas pela Cosmologia e Astrofísica nas próximas décadas. Da matéria e energia escura à compreensão dos mecanismos que produzem os “deslocamentos para o vermelho” (redshift).

# Objetivos

Os objetivos do presente trabalho concentrar-se-ão na análise dos redshifts de quasares que parecem acoplados a galáxias (e não acoplamentos apenas visuais, mas ligados fisicamente às estruturas galácticas), tentando avaliar se o fenômeno é de natureza astronômica (posicionamento) ou cosmológica (ligado ao Nascimento do Universo).

# Metodologia

A metodologia utilizada para realizar o presente trabalho está alicerçada em pesquisas bibliográficas, a partir de livros, artigos e periódicos, a fim de reunir com diversidade algumas compreensões acerca da natureza dos redshifts. Os dados que vamos usar durante todo o trabalho são apresentados na tabela 1:

Tabela 1: Galáxias, quasares e seus redshifts.

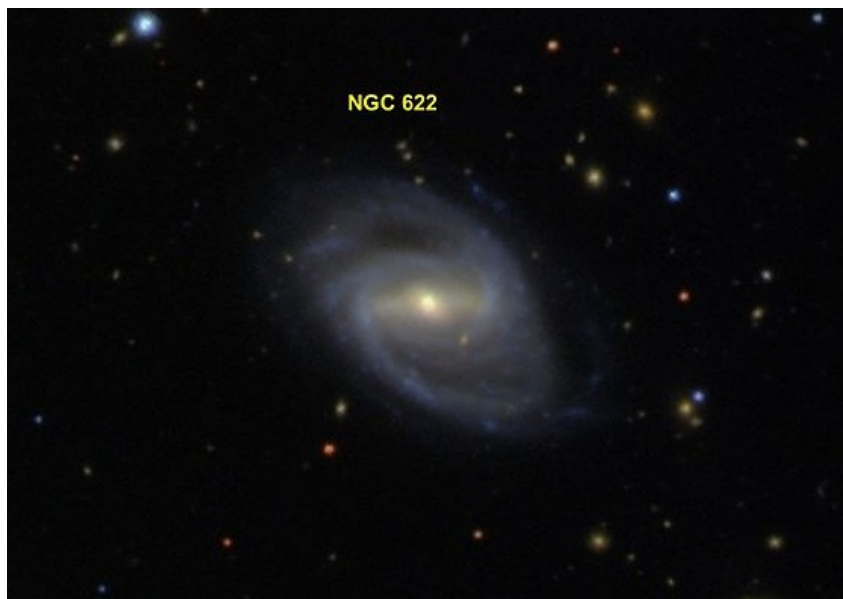
Galáxia	Redshift da galáxia ( $z$ )	Quasares	Redshift dos quasares ( $z$ )
NGC 622	0,018	UB1	0,91
		BS01	1,46
NGC 470	0,009	68	1,88
		68D	1,53
NGC 1073	0,004	BS01	1,94
		BS02	0,60
		RS0	1,40
NGC 3842	0,020	QS01	0,34
		QS02	0,95
		QS03	2,20
3C 303	0,141	UV#C	1,57
NGC 7319	0,022	ULX	2,11

Fonte: Tabela adaptada de [1].

Para efeito de cálculos, ou confecção de gráficos usou-se como valor da constante de Hubble:  $H_0 = 73,4$  de acordo com Pantheon+ publicado em 08/02/2022 [2], e  $c = 299.792,458 \text{ km/s}$

Nas paginas que se seguem, apresentamos algumas das galáxias que trataremos no presente trabalho.

Figura 1: Galáxia NGC 0622, é uma galáxia espiral com o centro em forma de barra (barrada), localizada na constelação de Cetus.



Fonte: commons.wikimedia.org<sup>1</sup>

Figura 2: NGC 470, uma galáxia em espiral localizada na constelação de peixes.



Fonte: stringfixer.com<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup>Disponível em [https://pt.wikipedia.org/wiki/NGC\\_622#/media/Ficheiro:NGC\\_0622\\_SDSS.jpg](https://pt.wikipedia.org/wiki/NGC_622#/media/Ficheiro:NGC_0622_SDSS.jpg). Acessado em 22/03/2022

<sup>2</sup>Disponível em [https://stringfixer.com/pt/NGC\\_470](https://stringfixer.com/pt/NGC_470). Acessado em 22/03/2022.

Figura 3: NGC 1073, é um exemplar de uma galáxia em espiral localizada na constelação de Cetus, na imagem é possível verificar três pontos, que devido aos seus altíssimos redshifts, seriam quasares.



Fonte: <https://esahubble.org><sup>3</sup>

Figura 4: NGC 3842, é uma galáxia elíptica localizada na direção de Leo.

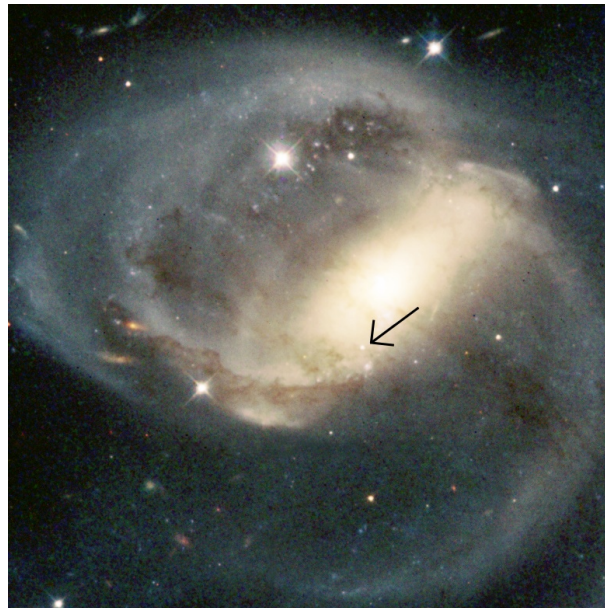


Fonte: <https://en.wikipedia.org><sup>4</sup>

<sup>3</sup>Disponível em <https://esahubble.org/images/heic1202b/>. Acessado em (25/03/2022) .

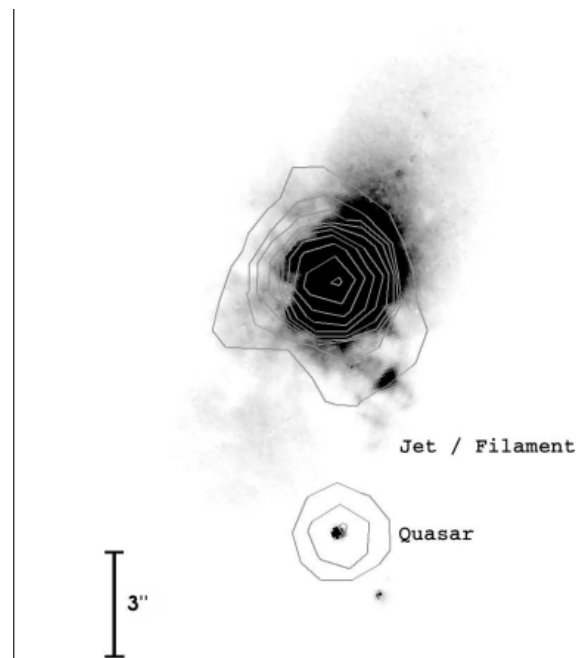
<sup>4</sup>Disponível em [https://en.wikipedia.org/wiki/NGC\\_3842](https://en.wikipedia.org/wiki/NGC_3842). Acessado em: 25/03/2022.

Figura 5: NGC 7319, é uma galáxia espiral barrada. A ceta presente na figura aponta um quasar.



Fonte: <https://commons.wikimedia.org> <sup>5</sup>

Figura 6: NGC 7319, a figura mostra uma grande região de emissão ao centro, e logo abaixo, próximo a região central, temos uma menor fonte de emissão.



Fonte: Galianni, 2005, p. 90.<sup>6</sup>

<sup>5</sup>Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spiral\\_galaxies\\_NGC\\_7319.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spiral_galaxies_NGC_7319.jpg).  
Acessado em: 24/03/2022

<sup>6</sup>GALIANNI, Pasquale et al. The discovery of a high-redshift x-ray-emitting QSO very close to the nucleus of NGC 7319. *The Astrophysical Journal*, v. 620, n. 1, p. 90, 2005.

# Capítulo 1

## O que são quasares?

Quasares, são objetos quase estelares, de dimensões razoáveis mas com brilhos tão intensos como de uma galáxia. Constituem-se nos mais intrigantes objetos do Universo. O primeiro quasar só foi observado a partir da sua incrível fonte de rádio.

Os quasares ou Quasi-Stellar Radio Source (fonte de rádio quase estelar) ou então quasi stellar object QSO, foram observados com o advento dos radiotelescópios, entre os anos 1950 e 1960. Alguns dos primeiros objetos detectados foram as galáxias, que também emitem ondas eletromagnéticas de rádio na forma de ‘lufadas’<sup>1</sup>. No entanto, existiam outras fontes misteriosas. Contudo, essas fontes não apresentavam lufadas, e pareciam vir de um ponto pequeno, bem localizado. Uma possível explicação era a de que a fonte das ondas eletromagnéticas de rádio deveriam estar muito muito distantes.

Esses pontos de rádio foram catalogados em uma lista e, então, o astrônomo Allan Rex Sandage, a fim de continuar o trabalho de Hubble, procurou estudar tais rádio-fontes. Ao estudar uma das fontes de rádio listadas, 3C 48 no catálogo da Rádio Observatório de Cambridge, descobriu que a fonte era algo parecido com uma estrela fraca, porém as estrelas não costumam emitir ondas de rádio, e, dessa maneira, tínhamos o mais novo componente do estranho Universo que habitamos.

Ao verificar os espectros da estrela franzina, deparou-se com um espectro incomum, uma vez que as estrelas têm normalmente um espectro muito específico. O espectro do objeto era, porém, deveras diferente. O objeto que Sandage estava observando não era uma estrela! O espectro eletromagnético também permitiu ao astrônomo conhecer a composição química da estrela em questão. Entretanto, o espectro obtido não correspondia a nenhum elemento químico familiar.

Então, em 1963 o astrônomo Maarten Schmidt procurou estudar o Quasar 3C 273, e ao analisar o seu espectro visível percebeu que ele se assemelhava com um espectro ordinário, porém deslocado. O espectro do quasar em questão, tinha cerca de 16% de deslocamento para comprimentos de onda maiores. Schmidt então, levando em consideração

---

<sup>1</sup>Lufadas, vento forte, rápido e intermitente; Sopro forte de vento.

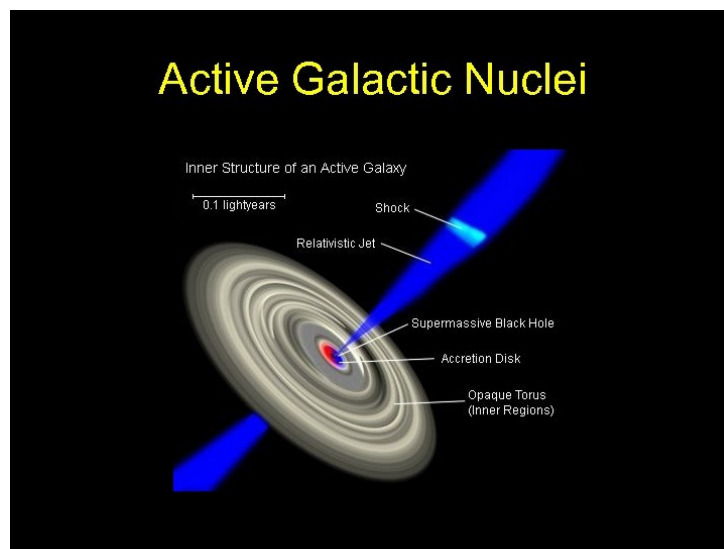


a lei de Hubble, que diz que o universo se expande em uma certa taxa, descobriu que o Quasar 3C 273 que estava estudando deveria estar a cerca de 3 bilhões de anos luz de distância da Terra. Ao revisitar o quasar de Sandage, descobriu que ele apresentava 37% de deslocamento para comprimentos de onda maiores, o que significaria estar localizado a cerca de 5 bilhões de anos luz de distância.

Dessa forma, com tanta distância e com tantas ondas de raios eletromagnéticos esses objetos deveriam ser muito energéticos, para que o brilho fosse visível nessa distância. O objeto teria que apresentar um brilho de cerca de 1000 galáxias para ser observado, e para que suas ondas de rádio pudessem ter uma explicação plausível.

Além disso, esses quasares possuíam uma variável em relação à luz emitida, que variava em questão de meses. Essa variação repentina de luz emitida pode ser explicada pelo tamanho do objeto que está no centro, que deveria ser muito pequeno, uma vez que, o efeito observado não poderia se propagar numa velocidade maior que a da luz. Dessa forma, a dimensão de um objeto  $L$ , tem que ser da ordem de  $c.t$  ( $c$  = velocidade da luz e  $t$  = tempo da variação), se o objeto tem a variação de luz em 1 mês, então teremos que o tamanho do objeto em questão tem que ser equivalente a 1 mês-luz.

Figura 1.1: Representação de núcleo galáctico ativo



Fonte: <https://en.m.wikiversity.org/><sup>2</sup>

Entretanto, o que são, em realidade, os quasares? A teoria mais aceita atualmente, diz que são buracos negros supermassivos [3] que captura todo o gás presente em sua volta e, ao ser capturado, esse gás transforma energia potencial gravitacional em energia cinética ao cair no buraco negro. Sendo essa energia cinética muito grande, forma-se um disco de gás em volta do buraco negro. Esse disco terá órbitas, onde as órbitas mais próximas

<sup>2</sup>Disponível em [https://en.m.wikiversity.org/wiki/File:Active\\_Galactic\\_Nuclei.jpg](https://en.m.wikiversity.org/wiki/File:Active_Galactic_Nuclei.jpg) Acessado em: 20/04/2022.

do buraco negro teriam uma maior velocidade e, dessa maneira, essa velocidade decairia conforme o aumento da distância da órbita de gás em relação ao buraco negro.

No limiar entre uma órbita e outra teremos uma diferença de velocidade, o que poderá gerar atrito entre as órbitas. Esse atrito geraria um aumento na temperatura e um superaquecimento do disco. Com esse disco de gás em altas temperaturas haveria a emissão de grandes quantidades de energia, fazendo com que o gás se torne incandescente.

Por consequência, fótons escapariam antes que o gás pudesse adentrar no buraco negro, permitindo, dessa forma, a visualização do quasar. Hoje em dia, temos alguns tipos de quasares, sendo os Radio-Loud QSO, que seriam quasares que emitem muitas ondas eletromagnéticas de rádio, e os Radio-Quiet QSO, os quais emitem poucas ondas eletromagnéticas de rádio. A maioria dos quasares na atualidade são descobertos por meios ópticos, sendo cerca de 90% do total, e somente 10% dos quasares são grandes fontes de ondas eletromagnéticas de rádio.

## Capítulo 2

# Efeito Doppler, Redshift e Blueshift

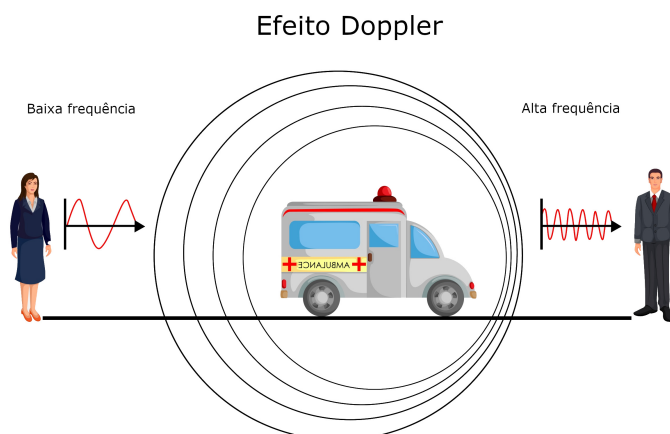
Christian Doppler (1803-1853), desde criança manifestou facilidade para a Matemática, o que lhe valeu uma vaga para estudos no Instituto Politécnico de Viena pela recomendação do matemático Simon Von Stampfer (1792-1864). Após a conclusão de seus estudos de graduação em 1825, tornou-se assistente do professor Adam Von Burg que lecionava Matemática Avançada na Universidade de Viena.

Porém, infelizmente um período de decadência se instaurou na sua vida, até que em 1835 foi-lhe oferecido o cargo de professor de Matemática e Geometria na Escola Secundária de Praga. Finalmente, em 1841, entregou o trabalho pelo qual teria sob seu nome ligado a um efeito que o homenageia. O trabalho tinha como título: *Über das farbige Licht der Doppelsterne* (em tradução livre seria: Sobre as luzes coloridas das estrelas duplas), no qual ele tenta explicar sobre o porquê de algumas estrelas parecerem mais azuladas e outras mais avermelhadas. Doppler acreditava que as estrelas que brilhavam em azul estavam se aproximando de um observador, e por isso seu comprimento de onda deveria ser mais curto, enquanto uma estrela que estaria se afastando de um observador, teria seu comprimento de onda mais longo, portanto a estrela pareceria mais vermelha para o observador. Doppler também acreditava que esse efeito se estenderia para todo e qualquer onda.

Hoje em dia, o Efeito Doppler é amplamente conhecido por explicar o comportamento das ondas sonoras, porém também é usado para outros fins, como, por exemplo, entre os anos de 1960 e 70, foram desenvolvidos estudos sobre o uso do efeito Doppler para descobrir o fluxo sanguíneo.

Para melhor explicar o efeito Doppler da luz que temos entendimento hoje em dia, explicaremos inicialmente o efeito Doppler para as ondas sonoras, que, na verdade, só foi provado experimentalmente por Buys Ballot em 1845. O efeito consiste numa fonte de onda sonora, como, por exemplo, um carro de ambulância, que se move em relação ao observador.

Figura 2.1: Representação do efeito Doppler para as ondas sonoras.



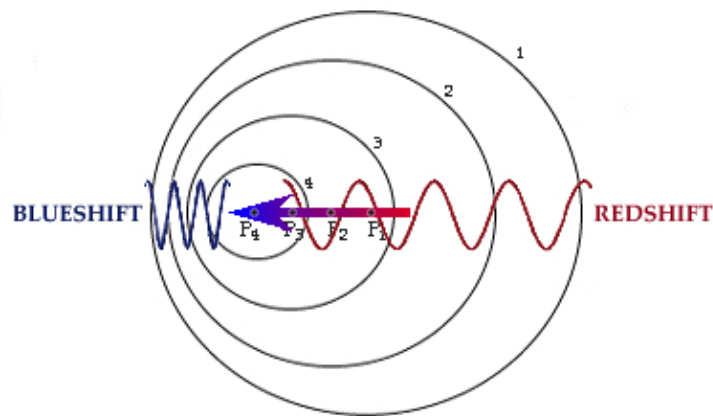
Fonte: <https://brasilecola.uol.com.br><sup>1</sup>

Perceba que quando a ambulância se aproxima do observador indo em direção a ele o som é agudo, que corresponde a uma alta frequência e um comprimento de onda pequeno. Seria como se a fonte sonora estivesse ‘empurrando’ as ondas sonoras ‘comprimindo’ o comprimento de onda. E quando a ambulância se distancia do observador percebemos um som grave, que corresponde a uma frequência mais baixa e um comprimento de onda maior, que seria como se as ondas sonoras fossem ‘deixadas para trás’ e assim sendo ‘esticadas’. Um exemplo cotidiano no qual podemos pensar é a sirene de uma ambulância, algo recorrente que faz parte da vida da maioria das pessoas. Quando a ambulância vem na direção do observador, pode-se perceber um som mais agudo. Isso acontece pois a fonte ‘empurra’ às ondas sonoras fazendo com que elas tenham uma maior frequência resultando em um som mais agudo. Agora, quando a ambulância passa pelo observador, a onda sonora acaba sendo ‘deixada para trás’ aumentando, dessa forma, seu comprimento de onda fazendo com que sua frequência diminua e causando a percepção de um som mais grave.

Como a luz se comporta como uma onda, teremos um efeito parecido com o discutido acima, porém, como a luz é cerca de 881 mil vezes mais rápida que o som, para perceber esse efeito precisamos de distâncias e velocidades astronômicas. De forma análoga ao que havia pensado Doppler em 1841. Dessa forma, quando um objeto celeste estivesse se afastando do observador, a luz emitida por esse objeto seria deslocada no espectro eletromagnético para o vermelho, pelo fato de seu comprimento de onda estar sendo deixado para trás, efeito conhecido como redshift. Por outro lado, quando um objeto celeste estivesse se aproximando, a luz emitida por esse objeto seria deslocada no espectro eletromagnético para o azul, efeito conhecido como blueshift, de acordo com a Figura 2.2:

<sup>1</sup>Disponível em <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-efeito-doppler.htm>. Acessado em 25/03/2022.

Figura 2.2: Representação do efeito Doppler-Fizeau ou efeito Doppler para a luz.

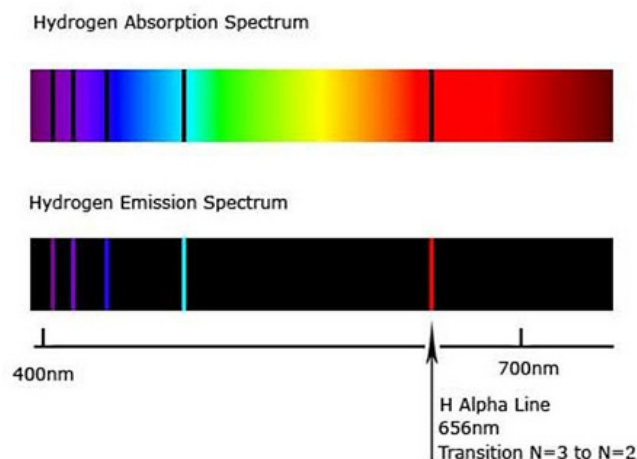


Fonte: if.ufrgs.br<sup>2</sup>

## 2.1 Desenvolvimento do Redshift como Efeito Doppler

Em 1848, o físico francês Hippolyte Fizeau percebeu que o espectro das estrelas estava desviado para o vermelho, apontado que esse seria uma espécie de efeito Doppler. As raias espectrais de um elemento são como a assinatura do mesmo, sendo elas muito bem definidas ( Figura 2.3 )

Figura 2.3: Raias espectrais de absorção e emissão do hidrogênio.



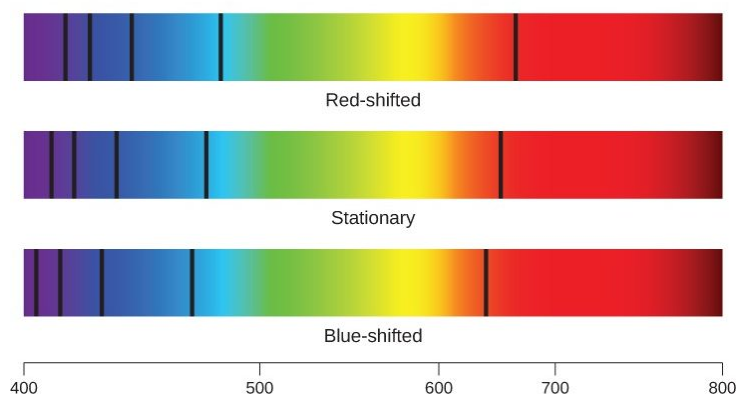
Fonte: if.ufrgs.br<sup>3</sup>

<sup>2</sup>Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/oei/cgu/doppler.htm>. Acessado em 20/04/2021.

<sup>3</sup>Disponível em <http://www.if.ufrgs.br/cref/camiladebom/Aulas/Pages/3.html>. Acessado em 18/04/2021.

Quando o objeto de estudo (uma estrela, um quasar ou uma galáxia), está muito distante, essas raias são deslocadas conforme o movimento que o objeto realiza em relação ao planeta Terra: caso o objeto esteja se aproximando teremos um blueshift, e caso o objeto esteja se afastando teremos um redshift. Tais deslocamentos podem ser conferidos na Figura 2.4.

Figura 2.4: Representação do *redshift* e do *blueshift* em comparação com as raias de absorção (estacionárias) de um elemento.



Fonte: noic.com.br<sup>4</sup>

Em maio de 1868 William Huggins publicou o artigo [4] no qual era determinada a velocidade de recessão de uma estrela fixa usando a comparação das raias espectrais dos elementos presentes na Terra com as raias espectrais que chegavam das estrelas.

Em 1912, o astrônomo Vesto Slipher, observou algumas galáxias do formato espiral, e descobriu que as mesmas apresentavam um redshift considerável, chegando a calcular as velocidades de algumas galáxias nos anos que se seguiram.

Para calcular a velocidade, podemos partir do efeito Doppler da luz, onde o redshift é inicialmente calculado como:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \quad (2.1)$$

em que  $\lambda$  é o comprimento de onda recebido do objeto em movimento, e  $\lambda_0$  é o comprimento de onda, se o objeto observado estivesse parado em relação ao observador.

Segundo a teoria do efeito Doppler para a luz, quando temos desvios pequenos com  $z \ll 1$  teremos que a seguinte expressão:

$$z = \frac{v}{c} \quad (2.2)$$

sendo  $v$  a velocidade do objeto e  $c$  a velocidade da luz.

<sup>4</sup>Disponível em <https://noic.com.br/materiais-astronomia/curso-noic-de-astronomia/seletivas-online/redshift-e-lei-de-hubble/>. Acessado em: 18/04/2021.

Para desvios muito grandes precisamos corrigir a relação relativisticamente, desse modo ficamos com a expressão para o redshift da forma:

$$z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1 \quad (2.3)$$

onde o redshift defini-se em função da velocidade de recessão e a velocidade da luz.

## 2.2 Análise de dados usando da teoria do Efeito Doppler para a luz.

Nesta seção, iremos analisar e interpretar dados de redshifts obtidos de quasares associados a galáxias. Nesse sentido, entende-se como ‘associação’ o quasar que está ligado fisicamente a uma galáxia. Os dados estão disponíveis na Tabela 1, e foram coletados de [1].

Pela interpretação a partir do efeito Doppler para a luz, podemos ver que os redshifts das galáxias e seus respectivos quasares resultam em velocidades muito diferentes. Entretanto, considerando suas ligações físicas, temos que o efeito Doppler já não seria mais capaz de explicar tal controvérsia.

Vamos agora a partir da Equação 2.3 fazer os seguintes desenvolvimentos:

Primeiro definiremos que  $\beta = \frac{v}{c}$

A partir disso ficamos com:

$$z = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} - 1 \quad (2.4)$$

Adicionando +1 em ambos os lados da igualdade ficamos com:

$$z + 1 = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} \quad (2.5)$$

Ao elevar os dois lados da equação ao quadrado ficaremos com:

$$(z + 1)^2 = \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \quad (2.6)$$

Agora, multiplicando ambos os lados por  $(1 - \beta)$  teremos:

$$(z + 1)^2(1 - \beta) = 1 + \beta \quad (2.7)$$

Fazendo a multiplicação do lado esquerdo da igualdade, e colocando  $\beta$  em evidência teremos:

$$(z + 1)^2 - 1 = [(z + 1)^2 + 1]\beta \quad (2.8)$$

Agora, isolando  $\beta$ , teremos:

$$\beta = \frac{(z + 1)^2 - 1}{(z + 1)^2 + 1} \quad (2.9)$$

Chegamos, portanto, aos seguintes valores de  $\beta$ , calculados e apresentados na Tabela 2.1

Tabela 2.1: Velocidade de recessão normalizada pela velocidade da luz.

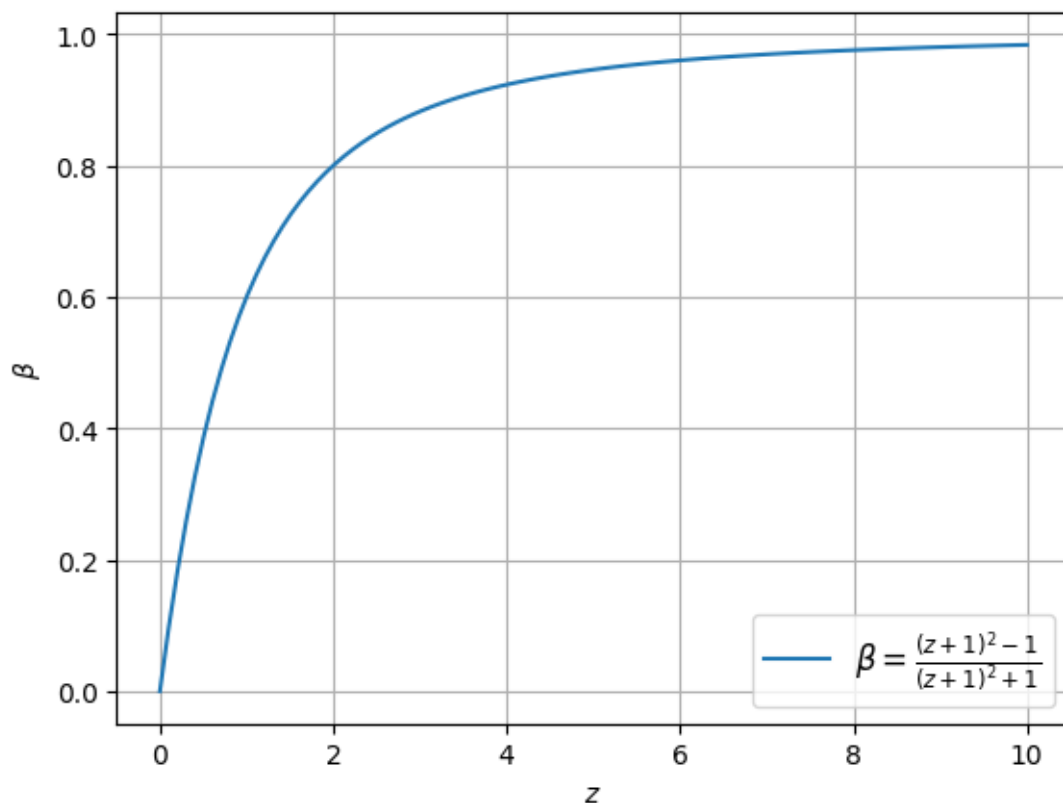
Galáxia	$\frac{v}{c} = \beta_G$	Quasares	$\frac{v}{c} = \beta_Q$
NGC 622	0,017838	UB1	0,569717
		BS01	0,716376
NGC 470	0,0089595	68	0,784817
		68D	0,729763
NGC 1073	0,003992	BS01	0,792609
		BS02	0,438202
		RS0	0,704142
NGC 3842	0,0198	QS01	0,28459
		QS02	0,58355
		QS03	0,827995
3C 303	0,00449	UV#C	0,069414
NGC 7319	0,021758	ULX	0,81259

Fonte: Autoria própria.

A Figura 2.5 nos mostra como é a relação que temos de como o valor do redshift cresce conforme a velocidade do objeto aumenta.



Figura 2.5: Velocidades dos objetos normalizadas pela velocidade da luz ( $\beta$ ) X redshift ( $z$ ).



Fonte: Autoria própria.

Temos que, teoricamente, a curva nunca chegará a ter o valor de 1 no eixo de  $\beta$ , já que nenhum objeto é capaz de chegar à velocidade da luz, a não ser a própria luz.

Dessa forma, ao calcularmos  $\frac{\beta_Q}{\beta_G}$  teremos quantas vezes o quasar é mais rápido que a galáxia (ver Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Velocidades de quasares em relação a velocidade da galáxia.

Galáxia	Quasar	$\frac{\beta_Q}{\beta_G}$
NGC 622	UB1	31,93832
	BS01	40,16007
NGC 470	68	87,59602
	68D	81,45125
NGC 1073	BS01	198,54924
	BS02	109,77010
	RS0	176,38828
NGC 3842	QS01	14,373207
	QS02	29,47218
	QS03	41,518304
3C 303	UV#C	15,460174
NGC 7319	ULX	37,34687

Fonte: Autoria própria.

Pelos valores apresentados e tabelados podemos perceber que há uma grande diferença entre os redshifts e as velocidades das galáxias e dos quasares. Mas o que isso pode significar?

Que hipótese poderíamos levantar além daquela que os objetos, quasares e galáxias, estarem muito distanciados uns dos outros?

Afinal, é isso que mostra a associação dos deslocamentos para o Vermelho de cada objeto. Caso não seja isso, uma outra hipótese possível é a de suas associações, ou seja, quasar e galáxias estão ligados intrinsecamente, de forma física, e seus redshifts muito conflitantes nada tem a ver com o efeito Doppler. A hipótese é aquela que De Broglie nos anos 1950 havia batizado de “tired light model”, ou, “modelo da luz cansada”, considerando que os fótons interagem no meio intergaláctico e enfraquecem suas energias. O qual discutiremos em uma próxima seção.

## Capítulo 3

# Modelo de Redshift a partir da métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)

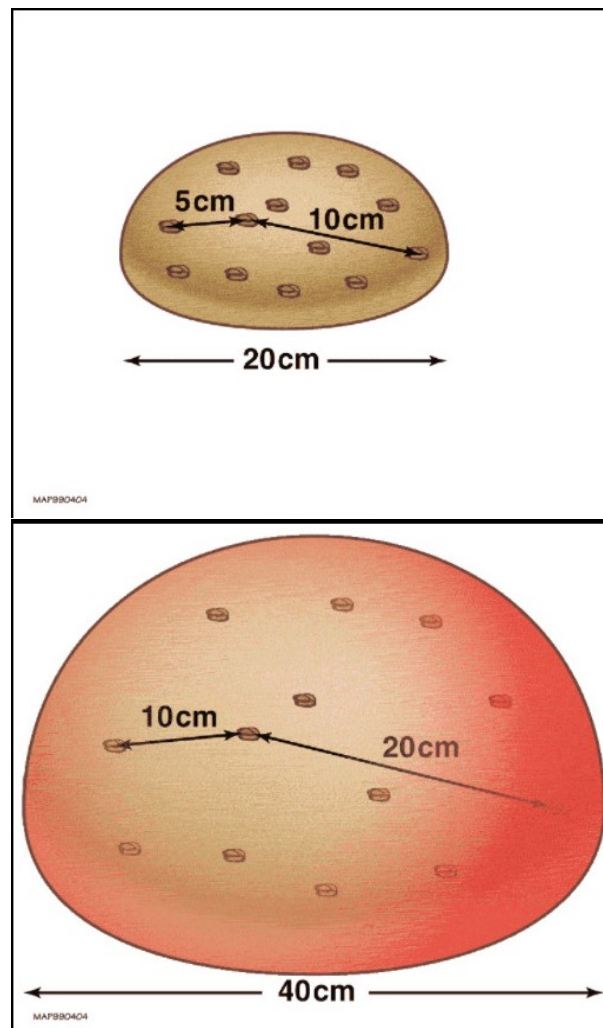
Alexander Friedmann (1888- 1925), foi um importante matemático e cosmólogo russo, foi responsável por solucionar as equações da Relatividade Geral de Einstein no início da década de 1920. Seu trabalho foi, postumamente, complementado por Georges Lemaître (1894-1966), padre, físico, cosmólogo e astrônomo belga; Howard Percy Robertson (1903 - 1961) matemático e físico estadunidense; e Arthur Geoffrey Walker (1909 - 2001) matemático britânico, que desenvolveram as equações também entre os anos de 1920 e 1930, de forma independente. Chegaram a resultados muito parecidos com o que Friedmann havia encontrado. E assim surge a métrica do espaço-tempo FLRW, a qual prevê o Big Bang, e que atualmente é o modelo padrão (ou paradigma) da Cosmologia. Esse modelo prevê três casos de universo: i) o universo fechado e esférico; ii) o universo aberto e hiperbólico, iii) e o universo crítico plano. Para os propósitos deste TCC discutiremos o último caso.

Para dar reforço ao Modelo FLRW, em 1929, Edwin Hubble, depois de algumas observações sobre o movimento, distância e a velocidade das galáxias, teve a percepção de que o Universo estava se expandindo de uma forma parecida ao efeito de Sitter. Isso deixou muitos dos cientistas que apoiavam a ideia de um universo em expansão bem animados. É válido ressaltar que o modelo FLRW descreve o Universo de forma homogênea, isotrópica e em expansão, ou seja, considerando todo o Universo, ele apresentaria a mesma quantidade de matéria por toda a sua extensão, não importando por onde se olhasse, encontrando sempre a matéria igualmente distribuída, mesmo com a expansão do espaço.

Um exemplo desse universo isotrópico e homogêneo seria: imagine que você está fazendo um pão. Você prepara a massa e resolve adicionar passas à massa para dar sabor e texturas diferentes. Então, você mistura até que as passas pareçam estar distribuídas de forma homogênea por toda a massa. Dessa forma, as passas estarão a uma certa

distância entre elas. Depois, você coloca o seu pão com passas para assar, e conforme o pão vai assando e crescendo como um todo, a distância entre as passas irá aumentar. Dessa maneira, sob a perspectiva de um universo em expansão, seria como se os corpos extragalácticos fossem as passas, e o pão, ao crescer assando, seria o Universo que está expandindo 3.1.

Figura 3.1: Representação da expansão do universo no modelo FLRW, usando da representação figurativa do preparo de um pão com passas.



Fonte: <https://medium.com> Adaptado<sup>1</sup>

Nesse modelo o redshift é uma consequência da expansão métrica do espaço. Isso significa que, mesmo que o observador e o objeto estejam estacionários, por causa da expansão do universo, o observador irá perceber o redshift do objeto observado, uma vez que o espaço intermediário entre eles estará se expandindo também.

O redshift pela teoria FLRW, também conhecido com *redshift cosmológico*, pode ser calculado para o caso crítico, de maneira aproximada pela equação 'A(8)' de [5], que é

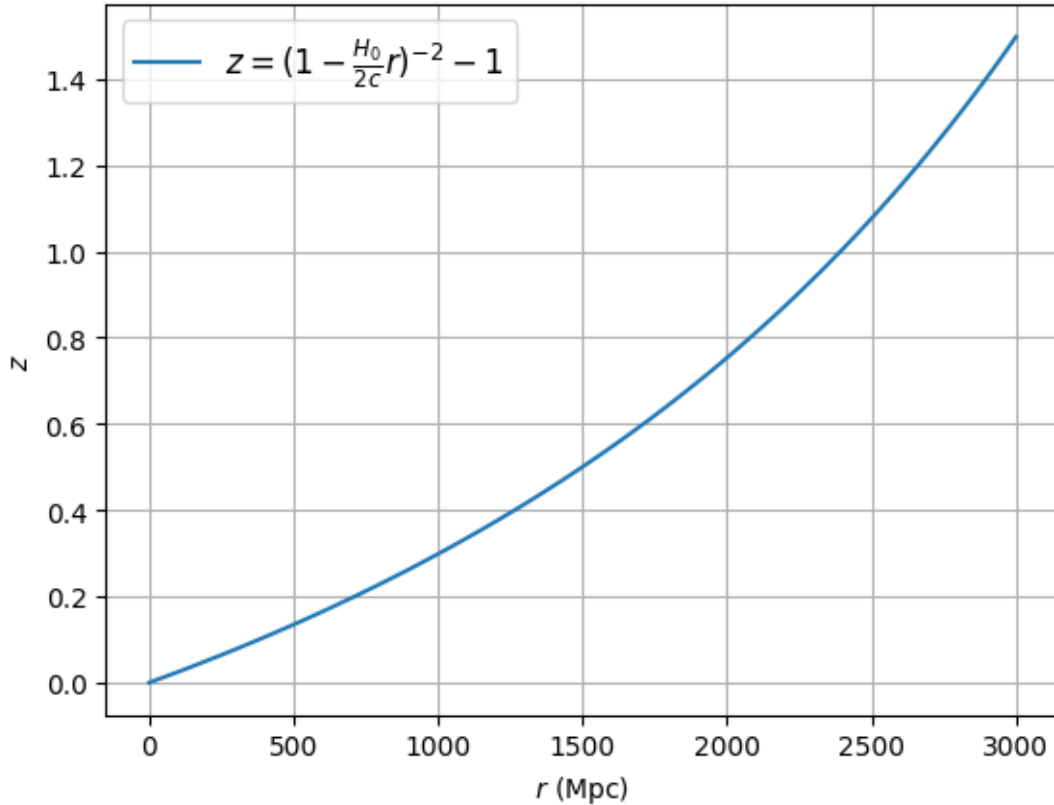
<sup>1</sup>Disponível em <https://medium.com/@eltonwade/se-o-universo-est%C3%A1-se-expandindo-por-que-n%C3%A3o-estamos-9fce82fb1f1>. acessado em: 23/03/2022.

dada por

$$z = \left(1 - \frac{H_0 r}{2c}\right)^{-2} - 1 \quad (3.1)$$

Em que  $H_0$  é a constante de Hubble,  $r$  é a distância entre objeto observado e observador, e  $c$  a velocidade da luz. A equação nos fornece o gráfico exibido na Figura 3.2.

Figura 3.2: Modelo de Friedmann crítico.



Fonte: Autoria própria a partir da equação (3.1)

Uma outra aproximação que conseguimos fazer a partir da equação 3.1, em relação a  $r$  (distância entre o observador e o objeto) é:

$$\frac{dz}{dr} = 2\left(1 - \frac{H_0 r}{2c}\right)^{-3} \left(-\frac{H_0}{2c}\right). \quad (3.2)$$

Ficamos então com;

$$\frac{dz}{dr} = \left(1 - \frac{H_0 r}{2c}\right)^{-3} \left(-\frac{H_0}{c}\right), \quad (3.3)$$

resolvendo com  $r = 0$  teremos;

$$\frac{dz}{dr} = \left(-\frac{H_0}{2c}\right). \quad (3.4)$$

Fazendo a expansão de Taylor até a primeira ordem, ficamos com:

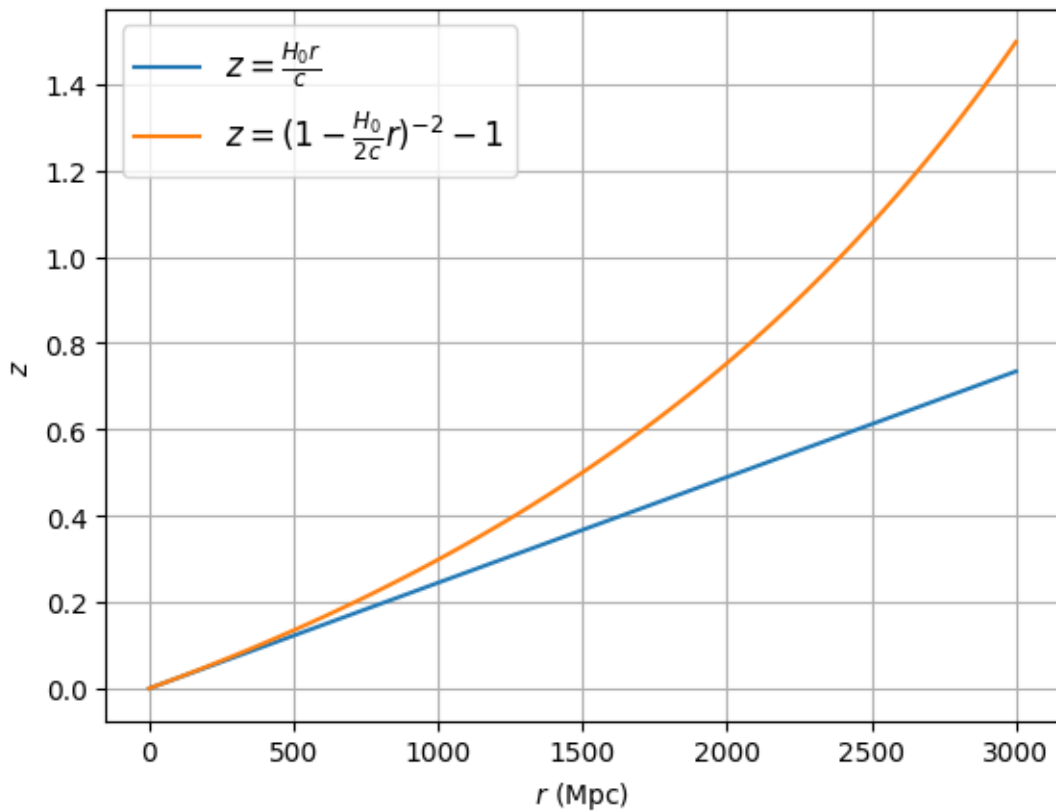
$$z \approx z(0) + \frac{dz}{dr}(0)(r - 0) \quad (3.5)$$

resultando em um redshift aproximado de:

$$z \approx \frac{H_0}{c} r \quad (3.6)$$

Sendo assim, a nossa aproximação gráfica fica ilustrada no gráfico da Figura 3.3.

Figura 3.3: comparação entre FLRW Crítico, e aproximado por série de Taylor de primeira ordem.



Fonte: Autoria própria

Importante ressaltar que a aproximação é válida para  $r < 500$  Mpc.

Por meio dos gráficos expostos aqui podemos perceber que o redshift cósmico para o caso crítico, conforme a distância aumenta o redshift também aumenta, o que significa que quanto mais distante um objeto celeste estiver maior será seu redshift. Dessa forma, pelos dados da nossa Tabela 1, temos que os quasares ainda estariam atrás das suas respectivas galáxias, mesmo aparentando opticamente estar juntos em um mesmo plano. Porém, esse modelo não depende do comprimento de onda, o que é bem interessante uma vez que estamos tratando do fenômeno de um redshift.

# Capítulo 4

## Luz Cansada

A teoria da luz cansada foi publicada em 1929 pelo astrônomo Fritz Zwicky, que foi publicado no mesmo volume dos *Anais da Academia Nacional de Ciências dos Estados Unidos* que publicara o artigo de Edwin Hubble que apresentava sua relação de ‘velocidade de recessão das galáxias’. Zwicky, estava preocupado com o fato do desvio para o vermelho escalar conforme a distância, e que a partir de observações do seu contemporâneo Milton Humason, ficou ainda mais sério pois o desvio era enorme, e para Zwicky isso não fazia sentido, assim sendo, passou a acreditar que deveria ter algo a mais a incrementar que resultasse em um valor tão alto de redshift. Nasce assim a teoria da Luz Cansada.

Nessa teoria, a luz ao viajar vai progressivamente perdendo energia, ou por meio da interação com outros objetos pelo caminho, ou mesmo pela interação com outros fótons. Então Zwicky partiu da equação do comprimento da onda, a fim de encontrar alguma relação que poderia resultar no aumento do comprimento de onda.

Portanto, pela equação do comprimento de onda temos que:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (4.1)$$

em que,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $c$  é a velocidade da luz, e  $\nu$  é a frequência de onda.

Como a velocidade da luz,  $c$ , é bem definida e quase não varia viajando pelo vácuo, temos que o que variaria possivelmente na equação 4.1 seria a frequência de onda. Partindo do suposto de que, a frequência de onda variaria, e isso resultaria em uma perda energética.

$$E = h\nu, \quad (4.2)$$

onde,  $E$  é a energia do foton e  $h$  é a constante de Plank.

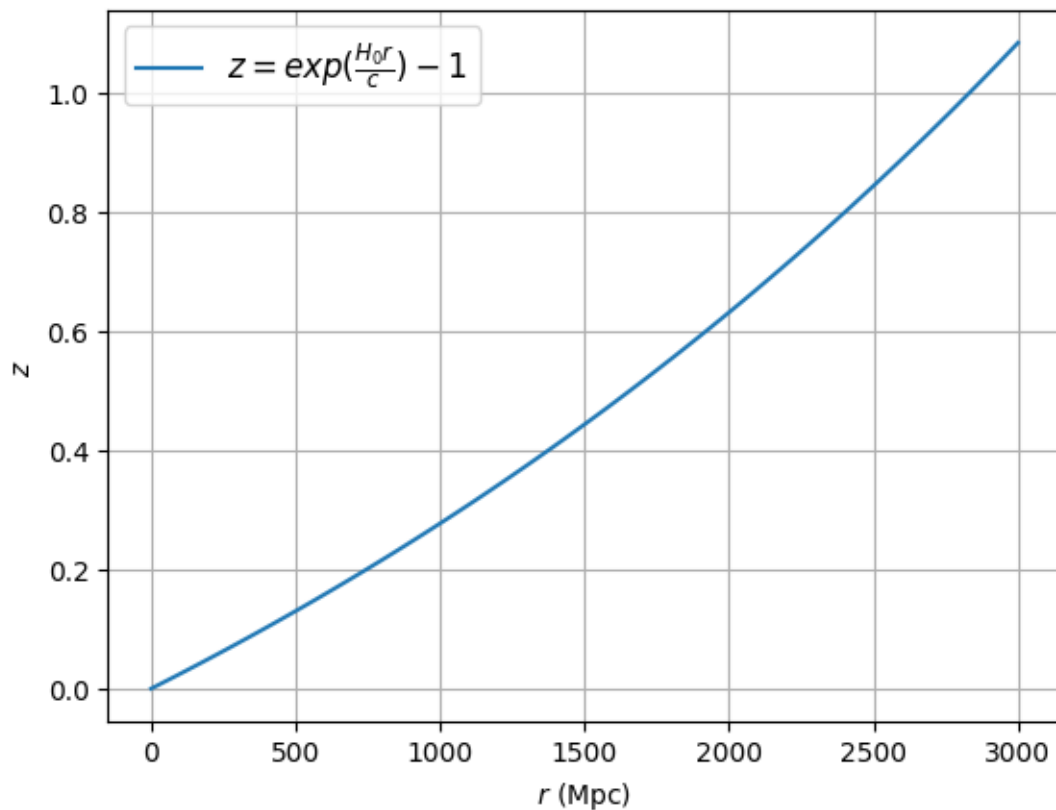
Por meio da Equação (4.2), temos justamente a ligação do comprimento de onda com a energia do fóton, ou seja, o que quer que seja que está afetando o fóton durante a sua viagem universo a fora, está ocorrendo algo com seu comprimento de onda.

Porém, a questão que se levanta é: como o fóton pode perder energia? Zwicky então propôs que a luz sofresse um fenômeno análogo ao do efeito Compton, porém relacionado à gravidade, o que seria equivalente a um arraste gravitacional, devido a toda matéria presente durante sua viagem até o observador. Sendo assim, usando da equação para a luz cansada (tired light model) de [6], teremos:

$$z = e^{\left(\frac{H_0 r}{c}\right)} - 1 \quad (4.3)$$

O que graficamente está representado na Figura 4.1:

Figura 4.1: Luz Cansada

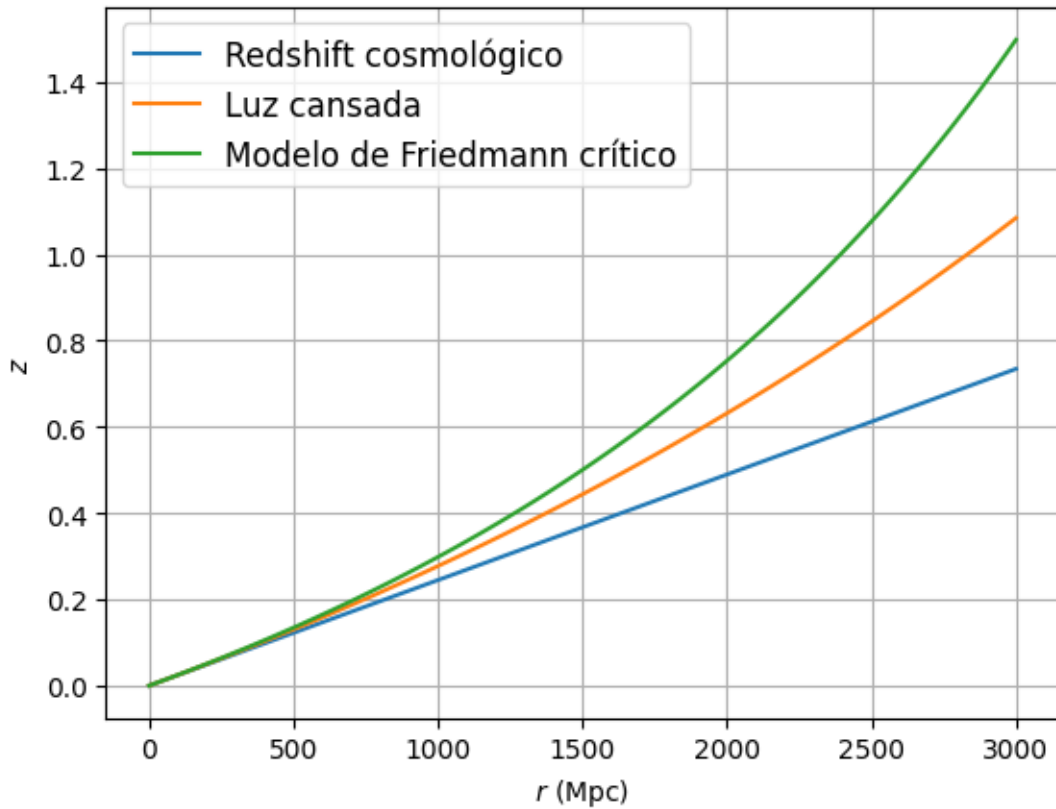


Fonte: Autoria própria

Estamos, pois, entre o redshift do modelo padrão da cosmologia para o caso crítico, e o redshift aproximado pela expansão em série de Taylor. Dessa forma, obtemos o gráfico da Figura 4.2.



Figura 4.2: Comparação entre os modelos de redshift



Fonte: Autoria própria

Ao abordarmos a teoria da luz cansada para explicar o redshift, temos os seguintes prós elencados por [6]:

“[...] (a) o efeito depende do fluxo da fonte de radiação de acordo com a lei de Hubble, dada pela Eq. (9.2) da Ref. [1];

(b) o desvio para o vermelho não depende — ou depende muito pouco — do comprimento de onda da radiação;

(c) o efeito é quantizado ([15], [16] e referências citadas).

(d) o efeito não causa o espalhamento da luz que é, em geral, seletivo, *i.e.*, dependente do comprimento de onda.

Caso contrário, as imagens de fontes extensas distantes seriam “borradas”, como se estivessem fora de foco, o que não é observado” (Soares, D.O paradigma da luz cansada revisitado. Cadernos de Astronomia, v. 2, n. 1, p. 124 (2021))

Outro ponto válido a se ressaltar, é aquele no qual os teóricos favoráveis à teoria da luz cansada chegaram a valores muito próximos do conhecido hoje como temperatura da radiação cósmica de fundo, tratado com maior profundidade em [7].

Concluindo essa seção, a teoria da luz cansada, para valores de  $r < 500$  Mpc, funciona de forma muito parecida com a do modelo padrão da cosmologia, e insere a questão do

cansaço da luz, apesar de não oferecer uma prova desse arrastão gravitacional. Particularmente é bem interessante a questão da perda de energia. A grande questão aqui é que, apesar de inserir o conceito de luz cansada, ainda não explica os quasares observados próximos, ou acoplados em galáxias, por meio de ligações físicas.

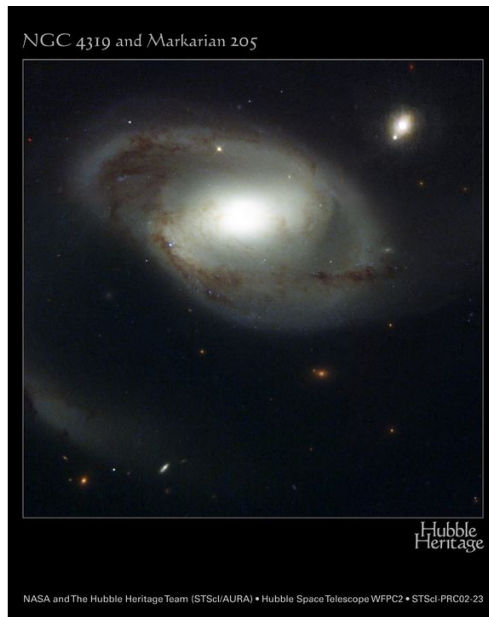
## Capítulo 5

# Redshift Intrínseco e Redshift Quantizado

Para contextualizar um pouco melhor sobre o que é o *redshift intrínseco* devemos falar um pouco de Halton Arp. Halton Cristian Arp (1923-2013), foi um astrônomo estadunidense que durante toda a sua carreira, produziu diversos trabalhos, como por exemplo o *‘Atlas of peculiar Galaxies’* que até atualmente é amplamente usado por astrônomos de todo o mundo. Além disso, publicou livros como *‘Seeing Red: Redshifts, Cosmology and Academic Science’* e *‘Quasars, Redshifts and Controversies’* onde fez duras críticas a teoria do *‘Big Bang’*, por meio de dados que ele próprio havia observado.

Arp após catalogar e estudar diversas galáxias, percebeu que algumas delas era acompanhada de galáxias companheiras, e que em muitas das vezes havia a presença de algum objeto muito brilhante por perto. Depois de ler alguns trabalhos, Arp percebeu que alguns desses objetos brilhantes foram catalogados como *Quasi-Stellar radio source*, e então passou a perceber e estudar um pouco mais sobre estes objetos. Um dos objetos que mais ficou famoso foi o *Markarian 205*, tanto que virou até capa de seus livros *‘Quasars, Redshifts and Controversies’* e *Catalogue of Discordant Redshift Associations*, pois o inegável quasar parecia estar ligado por meio de uma ‘ponte’ com a galáxia próxima NGC 4319 (Figura 5.1).

Figura 5.1: NGC 4319, uma galáxia espiral barrada e seu companheiro aparente *Markarian 205*, localizados na constelação de Draco.



Fonte: [hubblesite.org](http://hubblesite.org)<sup>1</sup>

Figura 5.2: Borda da galáxia NGC 4319 e quasar *Markarian 205* com filtro, ressaltando possível ligação física.



Fonte: [discordancy.report](http://discordancy.report)<sup>2</sup>

Por mais que os dois objetos parecessem opticamente próximos, seus redshifts diziam exatamente o oposto: a NGC 4319 com  $z = 0,0045$ , e o Markarian 205 com  $z = 0,072$ ,

<sup>1</sup>Disponível em <https://hubblesite.org/contents/media/images/2002/23/1244-Image.html?news=true>. Acessado em: 24/03/2022

<sup>2</sup>Disponível em <http://discordancy.report/ngc-4319-and-markarian-205/>. Acesso em 24/03/2022

o que resultaria em uma velocidade do quasar quinze vezes maior que a da galáxia (calculando por meio do efeito Doppler da luz). Por sua vez, a distância entre a galáxia e o nosso planeta seria de aproximadamente 18,38 Mpc, enquanto em relação ao o quasar estaria a uma distância de aproximadamente 294,07 Mpc (também calculados por meio do efeito Doppler da luz)! Arp, grande conhecedor dos objetos quase estelares, preferiu adotar uma posição não paradigmática, ou seja, de quasars acoplados às galáxias, devendo existir algo intrínseco nos pareamentos, explicando os altos redshifts observados.

Com isso em mente, Halton Arp, desenvolveu a ideia de redshifts intrínsecos, baseando-se na teoria de Fred Hoyle (1915-2001) e Jayant Narlikar (1938- ) para a gravitação que se baseia na Física de Ernst Mach.

A explicação de Arp para os redshifts discordantes de quasares que estavam aparentemente ligados a galáxias era a de que todo material surge com um redshift alto, pois ainda não tem massa e, conforme o decorrer do tempo, esse material passa a ter massa e assim ele tende a ter o mesmo redshift de um objeto ou material semelhante a ele. A partir disso, as galáxias seriam as responsáveis por ejetar matéria nova e quasares de tempos em tempos, e isso explicaria quão perto esses objetos estariam, e seus redshifts altíssimos mesmo estando próximos de galáxias com valores inferiores de redshift.

Mesmo sofrendo sofrendo grandes críticas, e ainda mais por abraçar outras teorias que são contrárias ao Big Bang, continuou defendendo suas ideias até o fim de sua vida. Ideias baseadas na ejeção de massa de núcleos ativos de galáxias. No caso da NGC 4319, nota-se claramente que um dos braços espiralados da galáxia está destruído, exatamente onde se concentram os objetos Markarian (quasars).

Por volta dos anos 1970, surgiu a teoria do *redshift quantizado*, uma das teorias apoiadas por Halton Arp, que prediz o seguinte: O redshift que percebemos seria a junção de vários efeitos não cosmológicos, como por exemplo, o *redshift cosmológico* e o *redshift intrínseco*.

Recentemente, por volta da década de 1990, K. G. Karlsson, obteve resultados a partir de sua fórmula, chamada de *fórmula karlsson*, originada de forma empírica. Desde 1976 Burbidge & Burbidge, notaram que existia uma certa frequência em que o valor de redshift  $z=1,95$  aparecia. A partir de observações de picos de redshift que se repetiam, Karlsson anuncia então sua equação com base nos sete maiores picos de redshifts que apareciam com frequência, eram eles:

$$z = 0,06; z = 0,30; z = 0,60; z = 0,96; z = 1,41; z = 1,96; z = 2,64$$

Destes, a equação obtida foi:

$$(1 + n_i)(1,288) = (1 + n_{i+1}), \quad (5.1)$$

ou seja, ao colocar um valor  $n_i$  de redshift que corresponde a um dos valores de Karlsson, resolvendo a conta, encontramos o próximo valor  $n_{i+1}$ , que seria o próximo valor dos

picos de redshifts de Karlsson, sendo o valor 1,288 uma constante encontrada a partir das observações deste cosmólogo.

A teoria ainda permite fazer transformações de redshifts de quasares em função das galáxias, como sugeriu Arp & Narlikar (1993), por meio da função:

$$(1 + z_0) = \frac{1 + z_Q}{1 + z_G} \quad (5.2)$$

onde o  $z_0$ , representa o redshift do quasar em função do redshift da galáxia. A teoria também permite obter resíduos de desvio para o vermelho que estejam em função da velocidade por meio da função:

$$(1 + z_V) = \frac{1 + z_0}{1 + z_K} \quad (5.3)$$

Neste caso, principalmente para clusters, onde calculamos  $z_0$  para cada quasar, ou galáxia companheira, após isso, usamos  $z_k$  como o valor de pico de Karlsson mais próximo de  $z_0$ , e assim descobrimos a componente residual de velocidade  $z_v$ .

## 5.1 Análise das teorias

Diferente das teoria vistas anteriormente, O redshift quantizado tem uma maior possibilidade de explicar o redshift com diversas componentes, sendo elas o redshift intrínseco, efeito Doppler, mesmo o redshift causado por arrasto gravitacional entre outros fatores que não imaginamos ainda, assim como movimentos mecanicos que levamos encontra outros efeitos para que possa se descrever o movimento com maior precisão. Entretanto, é pequena a parcela da comunidade científica que desenvolve teorias que estão fora do padrão ou que procura se informar sobre elas. É a força do paradigma que, segundo Kuhn, aposenta ou negligencia todas as ideias que se lhes opõem. Será necessário mais anomalias além da Markarian 205.

# Conclusão

Durante todo o trabalho a autora expôs teorias e/ou hipóteses conflitantes na compreensão do Cosmos, especialmente ligado às dualidade: expansão/não-expansão; Doppler/não-Doppler. O debate que deveria haver na comunidade infelizmente se coloca muito raramente.

Mesmo Hubble, nunca afirmou que o redshift fosse um efeito de “velocidade de afastamento”, mas um termo ligado à aparente recessão das galáxias. Quando obteve um redshift de cerca de 14% a velocidade da luz, chegou a afirmar que isso ou seria um autêntico fenômeno de recessão das galáxias ou que estaríamos, como nos tempos de Copérnico, diante de um novo princípio da Natureza, ainda totalmente desconhecido.

O Big Bang (BB), segundo sua própria evolução como teoria/paradigma, não chegou a cem anos de desenvolvimento desde os trabalhos de Hubble de 1929. Até aquela época acreditava-se que todo o Universo fosse a Via Láctea. Seria extremamente imprudente fechar a ciência para uma investigação recém-iniciada e elevar o BB à categoria de modelo padrão.

Dessa forma, considerando o que foi apresentado neste TCC, vemos a pluralidade com que um efeito pode ser interpretado, sendo como o movimento dos objetos de aproximação ou distanciamento em relação aos observadores, ou então a expansão do espaço, os fótons cansados de sua grandiosa jornada, e a ideia de um redshift quantizado que parece abranger de forma mais ampla o redshift. No entanto, é muito cedo para abraçar uma teoria única e descartar outras possibilidades que possam fazer a Cosmologia se consolidar com múltiplas visões de nossa própria Cosmogonia.

# Referências Bibliográficas

- [1] H. C. Arp, *Quasars, redshifts and controversies*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- [2] D. Brout *et al.*, “The pantheon+ analysis: Cosmological constraints,” *arXiv preprint arXiv:2202.04077*, 2022. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2202.04077>. Acesso em: 05/04/2022.
- [3] C. A. Milone *et al.*, *Introdução à Astronomia e Astrofísica*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2018.
- [4] W. Huggins, “Xxi. further observations on the spectra of some the stars and nebulæ, with an attempt to determine therefrom whether these bodies are moving towards or from the earth, also observations on the spectra of the sun and of comet ii., 1868,” *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, no. 158, pp. 529–564, 1868.
- [5] M. Lopez-Corredoira, “Alcock–paczyński cosmological test,” *The Astrophysical Journal*, vol. 781, no. 2, p. 96, 2014.
- [6] D. Soares, “O paradigma da luz cansada revisitado,” *Cadernos de Astronomia*, vol. 2, no. 1, pp. 121–126, 2021.
- [7] A. K. T. Assis and M. Neves, “The redshift revisited,” *Astrophysics and Space Science*, vol. 227, no. 1, pp. 13–24, 1995.
- [8] H. Arp, “Cosmologia e física,” *Acta Scientiarum. Technology*, vol. 22, pp. 1281–1284, 2000.
- [9] H. Arp, *Seeing Red: Redshifts, Cosmology and Academic Science*. Montreal: Apeiron, 1998.
- [10] H. C. Arp, *Catalogue of discordant redshift associations*. Montreal: Apeiron, 2003.
- [11] K. Kellermann, J. Condon, A. Kimball, R. Perley, and Ž. Ivezić, “Radio-loud and radio-quiet qos,” *The Astrophysical Journal*, vol. 831, no. 2, p. 168, 2016.



- [12] L. Marmet, “On the interpretation of red-shifts: A quantitative comparison of red-shift mechanisms,” 2013. Acesso em: <https://arxiv.org/abs/1801.07582>. Acesso em: 20/04/20/21.
- [13] M. C. D. Neves, “A questão controversa da cosmologia moderna: Uma teoria e suas incongruências parte 1,” *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. 17, no. 2, pp. 189–204, 2000.
- [14] M. C. D. Neves, “A questão controversa da cosmologia moderna: Uma teoria e suas incongruências parte 2,” *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, vol. 17, no. 2, pp. 205–228, 2000.
- [15] P. Galianni *et al.*, “The discovery of a high-redshift x-ray-emitting qso very close to the nucleus of ngc 7319,” *The Astrophysical Journal*, vol. 620, no. 1, p. 88, 2005.
- [16] G. R. Rocha, “Controvérsias científicas: O caso do modelo padrao da cosmologia,” *Caderno de física da UEFES*, vol. 7, no. 1, pp. 65–85, 2009.
- [17] H. Arp and J. Sulentic, “Three quasars near the spiral arms of ngc 1073,” *The Astrophysical Journal*, vol. 229, pp. 496–502, 1979.
- [18] J. Narlikar and H. Arp, “Flat spacetime cosmology: a unified framework for extragalactic redshifts,” *Astrophysical Journal*, vol. 405, p. 51, mar 1993.
- [19] W. S. Adams, “No. 22. preliminary catalogue of lines affected in sun-spots.,” *Contributions from the Mount Wilson Observatory/Carnegie Institution of Washington*, vol. 22, pp. 1–21, 1908.
- [20] W. S. Adams, “Preliminary catalogue of lines affected in sun-spots region lambda 4000 to lambda 4500,” *The Astrophysical Journal*, vol. 27, p. 45, 1908.
- [21] V. M. Slipher, “The radial velocity of the andromeda nebula,” *Lowell Observatory Bulletin*, vol. 2, pp. 56–57, 1913.
- [22] V. M. Slipher, “Spectrographic observations of nebulae,” *Popular astronomy*, vol. 23, pp. 21–24, 1915.
- [23] E. d. C. Andrade, “Doppler and the doppler effect,” *Endeavour*, 1959.
- [24] D. H. Evans, “From coloured stars to colour flow imaging – or when is ‘doppler’ not doppler?,” *Ultrasound in Medicine & Biology*, vol. 45, p. S20, 2019.
- [25] H. Arp, C. Fulton, and D. Carosati, “Intrinsic redshifts in quasars and galaxies,” 2013. Disponível em: [https://www.haltonarp.com/articles/intrinsic\\_redshifts\\_in\\_quasars\\_and\\_galaxies.pdf](https://www.haltonarp.com/articles/intrinsic_redshifts_in_quasars_and_galaxies.pdf). Acesso em: 20/03/2022.

- [26] J. Stainer, “Astronomia: Uma visão geral ii - aula 6 - parte 1 - quasares,” 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=s81VFWtilAU>. Acesso em: 10/04/2021.
- [27] J. Stainer, “Astronomia: Uma visão geral ii - aula 6 - parte 2 - quasares,” 2013. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=x8nV1y\\_oitM](https://www.youtube.com/watch?v=x8nV1y_oitM). Acesso em: 10/04/2021.
- [28] J. Stainer, “Astronomia: Uma visão geral ii - aula 7 - núcleos ativos de galáxias,” 2013. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=lsBVQ9QDdG4>. Acesso em: 10/04/2021.