

BUSCA DE INDÍCIOS DE ANISOTROPIA CÓSMICA A PARTIR DO ESTUDO DE GALÁXIAS

Nícolas O. L. de Oliveira^{1*}, Roberto dos S. Menezes Jr.²

1. Estudante de IC da Licenciatura em Física do IFBA

2. Professor Doutor - Departamento de Física do IFBA / Orientador

Resumo:

Anos de pesquisas cosmológicas apontam para um Universo descrito pelo Modelo Padrão da Cosmologia (Modelo Λ CDM), construído sobre os pressupostos contidos no Princípio Cosmológico (PC): a homogeneidade e a isotropia do Universo em grandes escalas.

Buscamos, com esta pesquisa, investigar indícios de anisotropias cósmicas (e consequente violação do PC) a partir de observações de distribuições de galáxias. Particularmente, analisamos a distribuição dos ângulos de posição dessas galáxias, a fim de verificar a existência de algum padrão nessa distribuição e, caso exista, se esse poderia ter sido gerado aleatoriamente ou, de fato, seria decorrente de alguma causa cosmológica.

Encontramos uma grande não uniformidade da distribuição de AP para o total de galáxias contidas no catálogo. Para as galáxias separadas por tipo morfológico, ainda encontramos uma não uniformidade para as espirais e elípticas. No caso das irregulares, essas mostraram uma distribuição que se enquadra na uniformidade.

Palavras-chave: Astronomia; anisotropia; galáxias.

Apoio financeiro: Fapesb e IFBA

Introdução:

Compreender o Universo é um esforço que nos foi legado por antiguidade que se perde na história do tempo. O desenvolvimento científico e tecnológico nos possibilitou alguns avanços nesta jornada.

As observações astronômicas de galáxias, supernovas, radiação cósmica de fundo - entre outras -, parecem convergir para um modelo (o Modelo Cosmológico Padrão) no qual o Universo possui geometria plana, está atualmente em expansão acelerada, é constituído de cerca de 70% de uma componente denominada energia escura e 30% de matéria [1]. Este modelo, também denominado Modelo Λ CDM (constante cosmológica + *cold-dark-matter*), pressupõe

que o Universo seja homogêneo e isotrópico em grandes escalas (acima de cerca de 300 milhões de anos-luz) [2]. Tais pressupostos compõem a essência do chamado Princípio Cosmológico.

Contudo, a partir da década de 40 do século passado, anisotropias começaram a ser propostas para explicar rotação de galáxias e modelos cosmológicos anisotrópicos começaram a ser estudados [3]. Em 1982, por exemplo, o astrônomo P. Birch identificou a existência de uma anisotropia ao analisar a radiação proveniente de galáxias, atribuindo este efeito a uma rotação cósmica [4].

Nesta perspectiva, buscamos neste trabalho apresentar os resultados de uma pesquisa de iniciação científica realizada no Instituto Federal da Bahia cujo objetivo foi investigar indícios de anisotropia cósmica a partir de observações de distribuições de galáxias. Especificamente, estudamos a distribuição dos ângulos de posição (AP) - ângulo formado pela projeção do eixo axial do plano galáctico e o norte celeste - de aproximadamente 3 milhões de galáxias coletadas na base de dados do HyperLeda [5]¹, a fim de verificarmos a existência de algum padrão na distribuição dessa amostra.

Metodologia:

Realizamos, inicialmente, uma pesquisa em catálogos de galáxias a fim de compreender suas características e selecionar aqueles que possuíam os atributos necessários para os objetivos da pesquisa. Optamos, então, pelos dados do HyperLeda, que nos possibilitou um acesso a uma amostra de 2.798.412 galáxias, composto por elípticas, espirais e irregulares.

A ferramenta de análise estatística escolhida para a análise dos dados foi o teste do χ^2 (*chi-quadrado*), expressa matematicamente pela equação [6,7]

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(f_i - f_m)^2}{f_m}, \quad (01)$$

¹ <http://leda.univ-lyon1.fr/>

onde f_i é a quantidade de AP que se enquadram na i -ésima categoria e f_m é a frequência média, ou seja, $f_m = N/C$, com N sendo o número de AP e C o número de categorias. Podemos notar que pequenos valores de χ^2 conduzem a uma distribuição uniforme², uma vez que $f_i \rightarrow f_m$, nesse caso.

O teste do χ^2 estabelece parâmetros de análise dos desvios da uniformidade de uma determinada distribuição de dados, utilizando como critério um valor- p igual a 5%³. Em outras palavras, testa a probabilidade de uma distribuição ser ou não aleatória. No caso em questão, buscamos verificar se os AP das galáxias apresentavam ou não uma distribuição aleatória no universo.

Para realização do teste, utilizamos como ferramenta o Fortran, no qual desenvolvemos uma rotina para ler os dados e calcular o χ^2 -quadrado da amostra.

O primeiro passo foi aplicar o teste a toda a amostra, o que corresponde a um $N = 2.798.412$ galáxias, e dividimos esses dados em $C = 36$ categorias (correspondente a intervalos de 5°).

Em seguida, dividimos o catálogo de acordo com a classificação morfológica das galáxias (com a finalidade de verificar algum viés observacional associado à sua morfologia), o que resultou em uma segunda amostra de 301.567 dados, uma vez que nem todas as galáxias coletadas inicialmente apresentaram classificações definidas. Dessas, 112.740 são galáxias elípticas, 185.456 são galáxias espirais (incluindo as espirais barradas) e apenas 3.371 são galáxias irregulares. Obtivemos o χ^2 -quadrado para cada uma das categorias. A seguir, geramos 5.000 amostras, com 3 milhões de AP aleatórios cada, para as quais calculamos o valor do χ^2 -quadrado. Por fim, pudemos comparar os resultados observacionais e teóricos.

Resultados e Discussão:

Ao realizar o teste do χ^2 -quadrado para a amostra completa (a distribuição de AP pode ser observada na Figura 1), obtivemos o valor

$$\chi_t^2 = 5605.$$

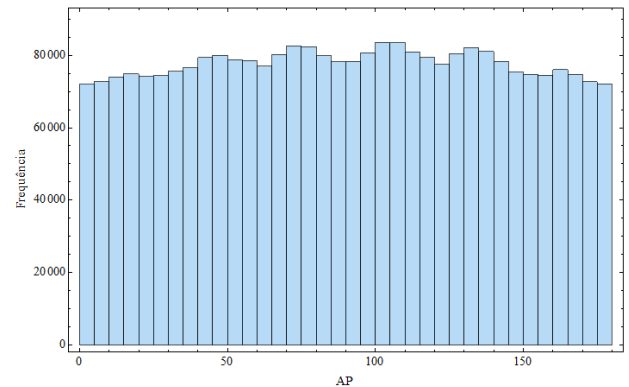


Figura 1. Histograma da amostra total.

A fim de avaliar esse resultado, foi gerado o histograma da distribuição dos χ^2 -quadrados obtidos a partir das aleatorizações ilustrado na Figura 2. A Figura 3 revela uma amostra de AP gerados aleatoriamente.

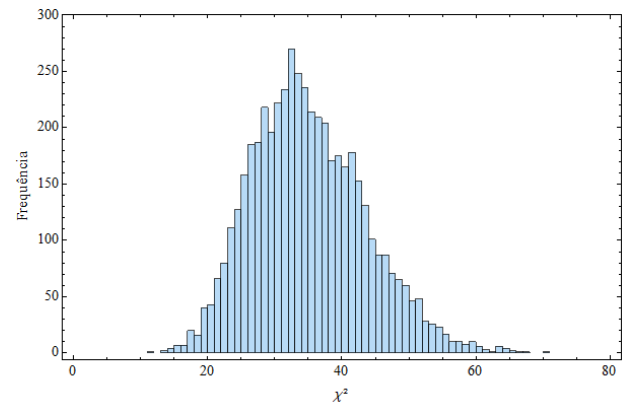


Figura 2. Histograma dos χ^2 -quadrados gerados aleatoriamente.

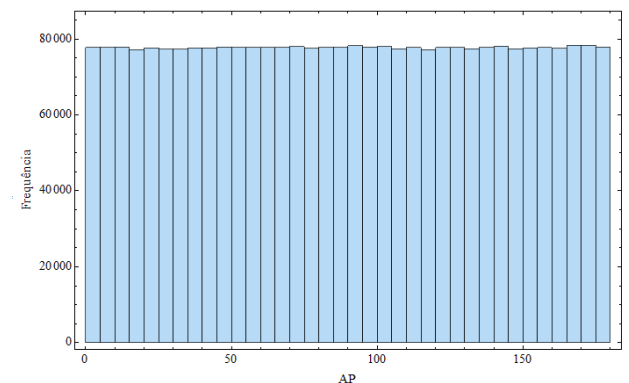


Figura 3. Histograma de AP gerados aleatoriamente, cujo valor $\chi^2 = 37$.

Do histograma de χ^2 foi possível obter aquele correspondente a uma fração de 5% dos dados:

$$\chi_{ref}^2 = 50.$$

Esse valor indica que apenas 5% dos valores de χ^2 de distribuições aleatórias se encontram acima de 50. Em outras palavras, se fossem criados 100 universos ao acaso, em

² Notemos que uniformidade aqui implica na aleatoriedade dos dados, uma vez que cada AP se torna igualmente provável.

³ Valor- p corresponde a uma probabilidade de referência através da qual pode-se estabelecer se a hipótese nula (uniformidade dos dados, em nosso caso) pode ou não ser rejeitada.

apenas 5 deles o χ^2 da distribuição dos ângulos de posição das galáxias que o constitui se encontraria acima de χ_{ref}^2 . Comparando o valor de χ_{ref}^2 com o χ_t^2 , notamos que $\chi_{ref}^2 \ll \chi_t^2$, o que indica uma grande não uniformidade na distribuição dos AP do catálogo.

Repetindo o teste para as amostras separadas de acordo com a classificação morfológica, obtivemos os valores para os *chi*-quadrados encontrados na Tabela 1.

Tabela 1. *Chi*-quadrados por tipo de galáxia.

Tipo de galáxia	Quantidade	χ^2
Espirais	185.456	137
Elípticas	112.740	83
Irregulares	3.371	37

Observamos que apenas o conjunto das galáxias irregulares apresenta um valor de χ^2 abaixo do χ_{ref}^2 , sendo, portanto, o único grupo de dados que pode ser considerado uniforme por esse teste.

As distribuições dos ângulos de posição dessas subcategorias encontram-se nas Figuras 4, 5 e 6.

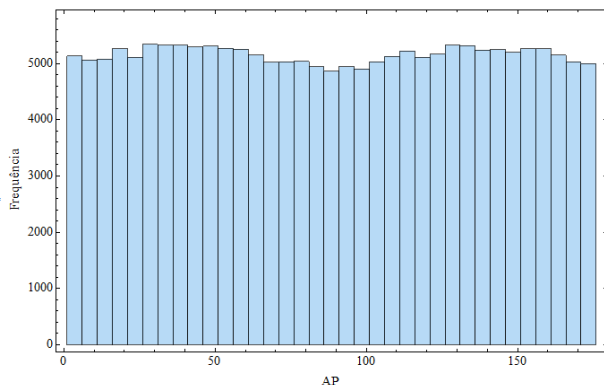


Figura 4. Histograma das galáxias espirais.

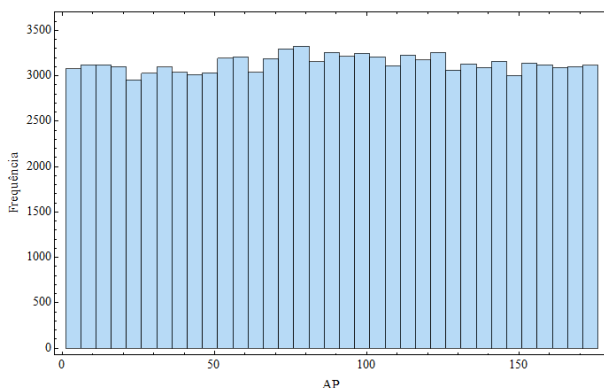


Figura 5. Histograma das galáxias elípticas.

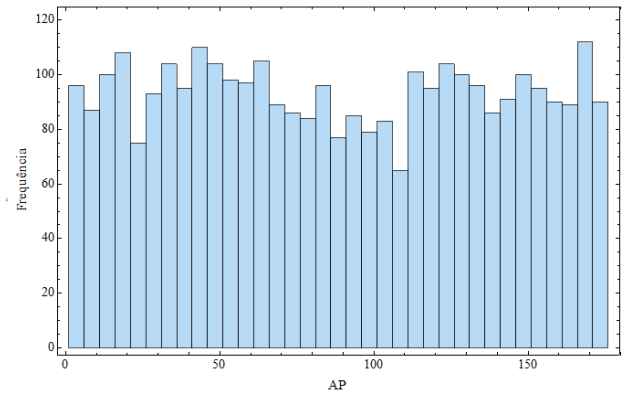


Figura 6. Histograma das galáxias irregulares.

Apesar dos histogramas aparentemente apontarem para uma maior variação de ângulos de posição por categoria para os dados das galáxias irregulares, devemos levar em consideração que a quantidade de dados desse tipo de galáxia é bem menor que as demais (ver Tabela 1), ou seja, uma pequena flutuação no histograma das espirais e elípticas corresponde a uma flutuação bem maior que as maiores visualizadas no histograma das irregulares.

Conclusões:

A partir da análise dos dados através do teste de *chi*-quadrado é possível inferir que a amostra completa apresenta um indício de anisotropia cósmica, visto que a distribuição dos dados apresenta uma estatística não aleatória. De igual modo, também verifica-se indícios anisotrópicos para as amostras divididas pela classificação morfológica, com exceção do grupo das galáxias irregulares.

As galáxias estudadas estão situadas dentro de um *redshift* $z < 0,5$, que corresponde a cerca de 1890 Mpc (~ 6161 milhões de anos-luz) de distância, garantindo a amostra dentro de escalas consideradas cosmológicas.

Os resultados apontam para uma forte não uniformidade na distribuição dos AP quando observados da Terra, entretanto é necessário aplicar à amostra novos testes estatísticos de modo a estudar mais profundamente tais indícios.

Referências bibliográficas

- [1] ADE, P. et al. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. *Astron. & Astrophys.*, v. 594, p. A13, 2016.
- [2] RYDEN, B. *Introduction to Cosmology*. Athens: Ed. Addison Wesley, 2003.
- [3] GAMOW, G. Rotating universe? *Nature*, v. 158, p. 549, 1946.
- [4] BIRCH, P. Is the universe rotating? *Nature*, v. 298, n. 29, p. 451-454, 1982.

[5] PATUREL, G. et al. HYPERLEDA. I. Identification and designation of galaxies. *Astron. & Astrophys.*, v. 412, p. 45-55, 2003.

[6] PRESS, W. H. et al. *Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing*. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

[7] RAO, J. S. Some variants of chi-square for testing uniformity on the circle. *Z. Wahrsch. verw. Geb.*, v. 22. p. 33-44, 1972.