

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROJETO DE CICLO AVANÇADO

**Desvendando o Universo:
efeitos de parâmetros
cosmológicos em observações
astronômicas**

Aluno:

Nickolas KOKRON

N°USP: 8539579

nickolas.kokron@usp.
br

Orientador:

Dr. Rogerio ROSENFELD

rosenfel@ift.unesp.br
IFT-UNESP

Resumo

A Cosmologia entrou em uma era de medidas de precisão. A fim de resolver algumas das mais fundamentais perguntas sobre a natureza do Universo, grandes colaborações de pesquisadores estão realizando diversos levantamentos de observações astronômicas. Entre essas observações pode-se destacar: medidas das anisotropias da radiação cósmica de fundo, de supernovas distantes de tipo Ia e da distribuição em larga escala de estruturas no Universo (galáxias e aglomerados de galáxias).

O estado-da-arte da Física Teórica, tecnologia de ponta e ferramentas estatísticas avançadas são empregadas em conjunto para testar diversos modelos cosmológicos e teorias de gravidade modificada que tentam explicar o que observamos quando olhamos para o céu e além.

Este projeto de Iniciação Científica pretende introduzir o aluno às técnicas analíticas e computacionais empregadas na Cosmologia Observacional atualmente. Com isso, o aluno estudará o efeito de diferentes modelos cosmológicos em observações relacionadas principalmente à distribuição de matéria em grandes escalas o Universo, tanto em dados simulados quanto reais.

1 Introdução

A Cosmologia Observacional é uma área de pesquisa que cresceu tremendamente durante o século XX. Essencialmente inaugurada por um artigo de Edwin Hubble (Hubble (1929)), em menos de 100 anos foi possível desenvolver um modelo cosmológico elegante que explica a maioria dos fenômenos observados. Este modelo, denominado Λ CDM, postula que aproximadamente 70% da densidade de energia do Universo está na forma de uma constante cosmológica, denotada por Λ (Dodelson (2003); Planck Collaboration et al. (2015)). Uma forma desconhecida de partículas elementares, denominada matéria escura fria (CDM), compõe 25% da densidade de energia do Universo, e a matéria bariônica que de fato observamos é 5% desta densidade.

Para melhor entender o Universo, e onde o modelo Λ CDM poderia desviar das observações, são empregadas diversas sondas observacionais. Em destaque, temos (Lahav and Suto (2004)): medidas da anisotropia de temperatura da radiação cósmica de fundo (CMB), observações de supernovas

de tipo Ia, levantamentos de aglomerados de galáxias, observações de lentamento gravitacional fraco e de oscilações de acústicas de bárions (BAOs).

Em 1998, foi descoberto por dois grupos independentes (Riess et al. (1998); Perlmutter et al. (1999)) que a taxa de expansão do Universo estava acelerando. Isto é, o fator de escala $a(t)$ da métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) possui segunda derivada positiva. Isto implica que ou existe uma constante cosmológica, Λ , que atua de forma repulsiva de maneira constante em todos os locais do Universo (ou, de forma mais geral, na existência da chamada "Energia Escura"), ou o modelo de Relatividade Geral de Einstein está incorreto e precisa ser modificado. Compreender a natureza desta observação é atualmente um dos mais importantes problemas em aberto na Física.

Desta forma, inúmeros grupos e colaborações estão se esforçando para, a partir de diversos tipos de observações, determinar os valores de parâmetros observacionais importantes no modelo Λ CDM e outros modelos cosmológicos para melhor compreender a natureza destes elementos "escuras" do Universo. Em destaque temos o *Sloan Digital Sky Survey IV (SDSS-IV)* (Bundy et al. (2015)) e o *Dark Energy Survey (DES)* (The Dark Energy Survey Collaboration (2005)) que atualmente coletam dados, e no futuro levantamentos como o *Javalambre Physics of the Accelerated Universe (JPAS)* (Benitez et al. (2014)) e o *Large Scale Synoptic Telescope (LSST)* (Ivezic et al. (2008)).

De especial importância para este projeto de iniciação são os levantamentos de distribuição de aglomerados de galáxias. O *Dark Energy Survey*, do qual o orientador é membro e o orientando se tornará, realiza observações deste tipo para entender melhor como que a estrutura em grande escala do universo é distribuída. Esta estrutura pode ser caracterizada por métodos estatísticos.

A distribuição de matéria no universo pode ser descrita por um campo de contraste de densidade estocástico $\delta(\mathbf{x}, z) := \rho(\mathbf{x}, z)/\bar{\rho} - 1$, definido na posição \mathbf{x} e redshift z . Tendo caracterizado este campo, podemos definir a importante função de correlação de dois pontos

$$\xi(r, z) := \langle \delta(\mathbf{x}, z) \delta(\mathbf{x} + \mathbf{r}, z) \rangle,$$

e sua transformada de Fourier, o espectro de potências $P(k, z)$ que mede a amplitude do modo que possui número de onda k . Calcular a função de correlação de dois pontos a partir de um catálogo de galáxias é difícil, pois interações gravitacionais locais provocam desvios não-lineares no campo de

densidade. Uma maneira natural de estimar esta função é dada em diversos livros-texto, como o de Peacock (2010): assumindo que galáxias são distribuídas aleatoriamente no céu de acordo com um processo Poisson, é possível chegar em:

$$\xi(r, z) \approx \frac{DD(r, z)}{RR(r, z)} - 1,$$

em que $DD(r, z)$ é o número de pares de galáxias separados por uma distância r em um redshift z em um catálogo de dados reais e $RR(r, z)$ o número de pares que estão separados a uma distância r em um redshift z de um catálogo aleatório de galáxias.

Um problema na estimativa da função de correlação de dois pontos é que as galáxias são distribuídas dentro de grandes estruturas compostas de matéria escura, que não conseguimos detectar. De fato, as galáxias são *traçadores enviesados* do campo $\delta(\mathbf{x}, z)$, de tal forma que, o campo discreto observado δ_g se relaciona com o campo verdadeiro δ por meio de $\delta_g = b\delta$, onde b é um viés (*bias*) a ser determinado, que pode ou não ser constante dependendo se o regime for linear ou não. Desta expressão, podemos observar que a função de correlação que de fato observamos, ξ_g , se relaciona à verdadeira, ξ por meio de

$$\xi_g = b^2\xi.$$

Outros problemas surgem na hora de estimar a função de correlação de dois pontos, que são detalhados no review de Lahav and Suto (2004), são o *shot-noise* (flutuações estatísticas na amostragem discreta do campo contínuo), desvios da gaussianidade no campo δ , e problemas na amostra por ter profundidades não-homogêneas (que acabam por afetar as propriedades dos objetos estudados).

O método mais utilizado para estimar a função de correlação atualmente é o de Landy and Szalay (1993), que leva em conta alguns dos problemas mencionados acima. Estudar este método de estimativa em detalhes e compreender em que situações ele é ideal será uma parte importante deste projeto de Iniciação Científica.

Estudaremos também métodos de estimativa da projeção bi-dimensional da função de correlação, denominada função de correlação angular, e de sua transformada de Fourier, o espectro de potência angular. Esses são utilizados em levantamentos fotométricos, onde a medida do redshift de um objeto apresenta erros grandes comparados a levantamentos espectroscópicos. Desenvolveremos métodos de estimação baseados em mapas pixelizados da

distribuição de galáxias. Testaremos esses métodos tanto em simulações numéricas de N corpos (como MICE) quanto em dados reais do DES.

1.1 Trabalho Desenvolvido Anteriormente

O aluno, Nickolas Kokron, foi introduzido no primeiro semestre de 2015 aos tópicos teóricos essenciais para a execução do projeto pois acompanhou como ouvinte a disciplina de pós-graduação do Instituto de Física da USP **PGF5292 - Cosmologia Física I**. Esta disciplina tem como referência principal o livro-texto de Dodelson (2003), "Modern Cosmology", que é um texto canônico da área. Desta forma, ele possui prática no uso de programas relevantes na área, como o CAMB (Lewis and Bridle (2002); Lewis (2014)), e já desenvolveu alguns códigos numéricos próprios que podem ser utilizados ao longo de seu projeto de iniciação.

O aluno também foi introduzido, por meio do pós-doutor do Instituto de Física Teórica da UNESP Fabien Lacasa, ao software HEALPix¹ (Górski et al. (2005)), que será essencial para o projeto de pesquisa. O aluno possui domínio das funções de visualização e análise harmônica do pacote, porém ainda não trabalhou com mapas de céu-cortado ou conjuntos de dados reais. Isto caracteriza uma etapa importante do projeto de IC do aluno.

2 Objetivos

Os objetivos deste projeto de Iniciação Científica são:

1. Familiarizar o estudante com conceitos básicos de Cosmologia, estudando em detalhe os processos físicos que levam à distribuição de galáxias no Universo. Desta forma, o aluno pode melhor estudar o impacto de diferentes modelos e parâmetros cosmológicos nesta distribuição.
2. Estudar efeitos e fenômenos que dificultam a medida da função de correlação de dois pontos em amostras de dados reais. O estudante estudará e aprenderá a compensar por efeitos como: erros sistemáticos em levantamentos de aglomerados de galáxias, análise harmônica em mapas de céu-cortado, desvios de gaussianidade no campo de sobredensidade, *shot-noise* na contagem de galáxias, e profundidade não-homogênea em cones de luz de levantamentos.

¹<http://healpix.sourceforge.net>

3. Familiarizar o aluno com códigos utilizados na fronteira da pesquisa em Cosmologia Observacional. Visando isso, o Nickolas desenvolverá uma pipeline de códigos na linguagem Python para o portal da colaboração *DES-BR*², a partir de programas já existentes escritos na linguagem IDL. Com isso, ele irá adquirir experiência com estes códigos para poder trabalhar com dados recentes.
4. Usar dados recentes do *Dark Energy Survey*, ou de catálogos simulados como o MICE (Croce et al. (2010)) para extrair valores parâmetros cosmológicos através de medidas da função de correlação de dois pontos e do espectro de potências.

3 Cronograma de Execução

Agosto 2015 - Novembro 2015 - O aluno continuará aprofundando seus estudos em Cosmologia, tendo como referência livros-texto relevantes como os de Dodelson (2003), e Peebles (1993). O aluno também irá iniciar um estudo mais profundo sobre a função de correlação de n pontos (e suas aplicações no estudo de estruturas em grandes escalas do Universo) a partir dos capítulos 1, 2 e, principalmente, 3 de Peebles (1980). O aluno também deve começar a traduzir os códigos escritos em IDL para Python.

Novembro 2015 - Março 2016 - O aluno estará focado em desenvolver o pipeline de códigos para o portal da colaboração DES-BR. Simultaneamente, ele estudará os fundamentos teóricos em estatística para poder compreender e compensar pelos problemas mencionados na estimativa da função de correlação de 2 pontos, tendo como referência os textos de Sivia and Skilling (2006) e Hobson et al. (2014), além de artigos relevantes na literatura.

Março 2016 - Julho 2016 - Tendo os conhecimentos teóricos fundamentais necessários e experiência com os códigos relevantes, o aluno irá realizar estimativas da função de correlação de dois pontos e do espectro de potências em catálogos de galáxias simulados e dados reais do experimento *Dark Energy Survey*. A partir destes dados, o aluno vinculará valores de parâmetros cosmológicos.

²<http://des-brazil.linea.gov.br/>

4 Materiais e Métodos

Para as partes teóricas da primeira e segunda etapa propostas no cronograma, o aluno seguirá os livros indicados na seção 3 deste projeto de Iniciação. Para o desenvolvimento dos códigos, o aluno utilizará principalmente a linguagem de programação Python, que o aluno possui familiaridade por conta de sua formação prévia.

Para a terceira etapa do cronograma, o aluno usará ferramentas comuns da área. Além de utilizar o CAMB, com qual o aluno já tem experiência, ele também irá aprimorar suas habilidades com o pacote HEALPix. Por fim, o aluno também vai aprender a usar outras ferramentas como o CosmoSIS³ (Zuntz et al. (2015)) e o CosmoMC (Lewis and Bridle (2002)), para utilizar técnicas de MCMC que são tradicionais na determinação de valores de parâmetros cosmológicos.

O aluno possui um desktop e um notebook onde escreverá seus códigos. Além disso, ele terá acesso ao cluster computacional do Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia (LIInA⁴), onde os códigos desenvolvidos pelo aluno durante o projeto de Iniciação serão implementados para o uso de outros integrantes da colaboração DES-BR.

5 Forma de Análise dos Resultados

O experimento DES está no terceiro ano de tomada de dados. O aluno usará seus códigos para extrair os parâmetros cosmológicos a partir de dados reais, sendo que esses códigos serão validados primeiramente em dados simulados. Portanto, ao final do projeto o aluno terá como comparar os seus resultados com os mais recentes obtidos.

Para a parte numérica, o aluno pode comparar o desempenho dos códigos escritos em IDL com os escritos em Python para confirmar que ele adequadamente compreendeu o código e fez a tradução de forma correta.

³<https://bitbucket.org/joezuntz/cosmosis/wiki/Home>

⁴<http://www.linea.gov.br/>

Referências

- Benitez, N. et al. (2014). J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey. 1403.5237.
- Bundy, K. et al. (2015). Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory. *ApJ*, 798:7, 1412.1482.
- Crocce, M., Fosalba, P., Castander, F. J., and Gaztañaga, E. (2010). Simulating the Universe with MICE: the abundance of massive clusters. *MNRAS*, 403:1353–1367, 0907.0019.
- Dodelson, S. (2003). *Modern Cosmology*. Academic Press. Academic Press. ISBN: 9780122191411.
- Górski, K. M., Hivon, E., Banday, A. J., Wandelt, B. D., Hansen, F. K., Reinecke, M., and Bartelmann, M. (2005). HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere. *ApJ*, 622:759–771, astro-ph/0409513.
- Hobson, M. P., Jaffe, A. H., Liddle, A. R., Mukherjee, P., and Parkinson, D. (2014). *Bayesian Methods in Cosmology*. Cambridge University Press. ISBN: 1107631750.
- Hubble, E. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15(3):168–173, <http://www.pnas.org/content/15/3/168.full.pdf>.
- Ivezic, Z., Tyson, J., Allsman, R., Andrew, J., and Angel, R. (2008). LSST: from Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products. 0805.2366.
- Lahav, O. and Suto, Y. (2004). Measuring our universe from galaxy redshift surveys. *Living Reviews in Relativity*, 7(8).
- Landy, S. D. and Szalay, A. S. (1993). Bias and variance of angular correlation functions. *ApJ*, 412:64–71.
- Lewis, A. (2014). CAMB Notes. <http://cosmologist.info/notes/CAMB.pdf>.

- Lewis, A. and Bridle, S. (2002). Cosmological parameters from CMB and other data: a Monte- Carlo approach. *Phys. Rev.*, D66:103511, astro-ph/0205436.
- Lewis, A. and Bridle, S. (2002). Cosmological parameters from CMB and other data: A Monte Carlo approach. *Phys. Rev. D*, 66(10):103511, astro-ph/0205436.
- Peacock, J. A. (2010). *Cosmological physics*. Cambridge University Press.
- Peebles, P. J. E. (1980). *Large-Scale Structure of the Universe*. Princeton University Press. ISBN: 9780691082400.
- Peebles, P. J. E. (1993). *Principles of Physical Cosmology*. Princeton University Press. ISBN: 9780691019338.
- Perlmutter, S. et al. (1999). Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae. *Astrophysical Journal*, 517:565–586, astro-ph/9812133.
- Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N., Arnaud, M., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., Banday, A. J., Barreiro, R. B., Bartlett, J. G., and et al. (2015). Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. *ArXiv e-prints*, 1502.01589.
- Riess, A. G. et al. (1998). Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *Astronomical Journal*, 116:1009–1038, astro-ph/9805201.
- Sivia, D. S. and Skilling, J. (2006). *Data analysis : a Bayesian tutorial*. Oxford science publications. Oxford University Press, Oxford, New York. ISBN: 0198568320.
- The Dark Energy Survey Collaboration (2005). The Dark Energy Survey. *ArXiv Astrophysics e-prints*, astro-ph/0510346.
- Zuntz, J., Paterno, M., Jennings, E., Rudd, D., Manzotti, A., Dodelson, S., Bridle, S., Sehrish, S., and Kowalkowski, J. (2015). CosmoSIS: Modular cosmological parameter estimation. *Astronomy and Computing*, 12:45–59, 1409.3409.