
PESANDO GIGANTES NO CÉU: COSMOLOGIA COM AGLOMERADOS DE GALÁXIAS

AS ASTROCIENTISTAS

✉ **Maria E. S. Pereira**

Universidade de Hamburgo,
Hamburgo, 21029, Alemanha
mariaeli@hs.uni-hamburg.de

RESUMO

Este texto foi gerado¹ a partir da transcrição das principais partes do seminário da Dr. Maria Elidaiana da Silva Pereira na conferência *As Astrocientistas: 1 Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Cosmologia e Gravitação*, proferida virtualmente no dia 11/02/2021. A Dr. Maria Elidaiana da Silva Pereira é atualmente pós-doutoranda na Universidade de Hamburgo, na Alemanha, atuando principalmente no estudo de aglomerado de galáxias e lentes gravitacionais fracas.

Palavras-chave astrofísica, aglomerado de galáxias, lentes gravitacionais.

1 Introdução

Há uma pergunta que provavelmente todas as pessoas já pensaram a respeito algum dia, cuja a resposta é muito difícil de se obter. *De onde nós viemos?*

Se pudéssemos voltar no tempo, veríamos que diversas sociedades com suas próprias culturas têm diferentes explicações para a existência do Universo ao nosso redor. Em algum momento da nossa história, o ser humano começou a desenvolver dispositivos científicos que ajudam a entender melhor o que está acontecendo lá fora, no espaço. O telescópio é um exemplo deste tipo de tecnologia. Ao apontarmos os telescópios para o céu profundo, coletamos a luz proveniente do Universo, que nos fornece dados para tentar entender melhor o funcionamento deste e testar nossas teorias.

A Fig. 1 ilustra a evolução do Universo de acordo com o modelo cosmológico padrão. Chamamos de *Big Bang* o começo do Universo — um ponto singular de onde surgiu o espaço e o tempo. Na prática, não temos observações deste instante de tempo inicial, portanto, só podemos conjecturar e criar modelos para descrever o Big Bang. Mas temos informações sobre o que ocorreu uma fração de segundo após o Big Bang. Embora muito denso e com altas temperaturas, o Universo começou a se expandir exponencialmente, passando por uma fase que chamamos de *inflação*. Foi nesta expansão que gerou-se pequenas flutuações de densidade que serviram de sementes para a formação de estruturas no nosso Universo. Nesta época, toda a matéria existente estava concentrada numa região tão pequena que a luz não conseguia atravessá-la. O Universo era opaco!

Em 380 mil anos após o Big Bang, um tempo curto em termos cosmológicos, a luz começou a se separar da matéria. O universo se acendeu. Chamamos esta primeira luz de *radiação cósmica de fundo*. Cerca de 200 milhões de anos após o Big Bang, as primeiras estrelas e galáxias se formaram. Esta é uma fase muito importante para o Universo, pois a partir de então os aglomerados de galáxias começaram sua evolução sob a influência da gravidade até o momento que estamos hoje, aproximadamente 14 bilhões de anos após o instante inicial.

Podemos entender uma galáxia como uma coleção de estrelas e um aglomerado como uma coleção de galáxias. Nossa galáxia se chama Via Láctea e ela também faz parte de um aglomerado. Estamos em um dos braços da Via Láctea, no terceiro planeta de um sistema solar, orbitando uma estrela que chamamos de Sol. Esta é uma breve apresentação da história do Universo de acordo com o melhor modelo que temos até o momento, o que mais se encaixa nas observações.

¹Transcrito por Rodrigo von Marttens, editado por Carla Rodrigues Almeida.

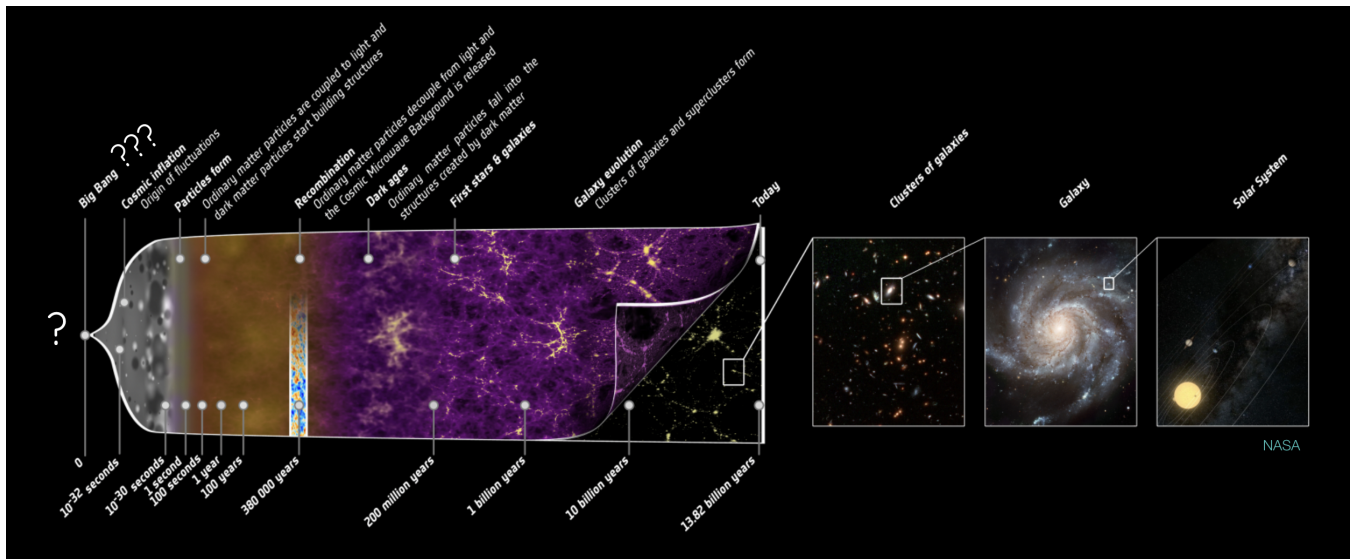


Figura 1: Esquema ilustrativo da evolução do Universo de acordo com o modelo cosmológico padrão. Crédito: NASA.

A Cosmologia é a ciência que estuda a origem, composição, estrutura e evolução do Universo como um todo. O modelo ilustrado na Fig. 1, denominado modelo Λ CDM, possui o status de modelo cosmológico padrão e é a descrição mais aceita para o Universo. O modelo Λ CDM, além de estar de acordo com grande parte das observações atuais, também pode ser usado para fazer previsões que podem ser testadas, o que é fundamental para a ciência.

Para aprendermos mais sobre o Universo, é fundamental entendermos sobre o conteúdo energético que temos hoje. Existem basicamente três componentes chaves do Universo. A primeira é o que chamamos de matéria convencional, que compõe tudo aquilo que conhecemos, por exemplo, estrelas, galáxias e até nós mesmos. Este é aproximadamente 5% do conteúdo total do Universo. A maior parte do Universo está na forma de uma matéria invisível, chamada de *matéria escura*. Como sabemos que a matéria escura existe se não podemos vê-la? A resposta é: observamos os movimentos das estrelas, galáxias e aglomerados e percebemos que seria preciso uma quantidade de matéria muito maior do que podemos ver para explicar o comportamento das suas trajetórias. Esta matéria adicional deve, portanto, ser escura. No entanto, a natureza da matéria escura é ainda desconhecida.

A evolução de galáxias e aglomerados sob a influência da gravidade é apenas metade do mistério do Universo. Esperava-se que a gravidade, uma força de caráter atrativo, superasse a expansão do Universo em algum momento e que, a partir de então, o Universo iria começar a se contrair até o colapso. Porém, as observações indicam que isto não está acontecendo. Na realidade, as galáxias estão rapidamente se afastando umas das outras. Isso indica que existe uma “força” exótica que repele as coisas umas das outras. Esta força repulsiva é denominada *energia escura*. Também não conhecemos a sua natureza.

Matéria convencional, matéria escura e energia escura. Além dessas três componentes, há também uma outra de radiação que dominou o Universo no passado. Hoje em dia ela representa uma fração ínfima de tudo o que há. Então, esta é basicamente a composição do Universo. A matéria e energia escuras compõem juntas aproximadamente 95% do Universo e não temos ideia do que elas realmente são.

Há algumas questões que, se respondidas, nos ajudariam a entender melhor o que são a matéria e energia escuras. Por exemplo, quais são as propriedades da matéria escura? Ou então, quais mecanismos podem realmente fazer o Universo se expandir de forma acelerada? Nós, físicos e físicas, criamos modelos matemáticos com parâmetros que, quando variados, resultam em descrições ligeiramente diferentes do Universo. As observações nos ajudam a ajustar estes valores. Em particular, há dois parâmetros muito importantes que estamos tentando medir atualmente na cosmologia: a constante de Hubble H_0 , que mede a taxa de expansão atual do Universo, e a amplitude das flutuações da matéria S_8 .

A Fig. 2 mostra diferentes medidas para o parâmetro de Hubble obtidas de diferentes maneiras. A ponte da esquerda, chamada de *early route* em inglês, representa os resultados obtidos através de medidas do Universo primordial no modelo Λ CDM. A outra ponte, *late route* em inglês, representa os resultados obtidos através de medidas do Universo recente, que não dependem de um modelo em particular. Como podemos ver, há uma diferença considerável entre os dois resultados. Entender esta discrepância é um dos grandes desafios da Cosmologia atualmente.

²Há inúmeros outros modelos para descrever o Universo, por exemplo, baseados em teorias de gravitação diferentes da teoria da relatividade geral de Einstein, mas esses modelos não serão abordados neste trabalho.

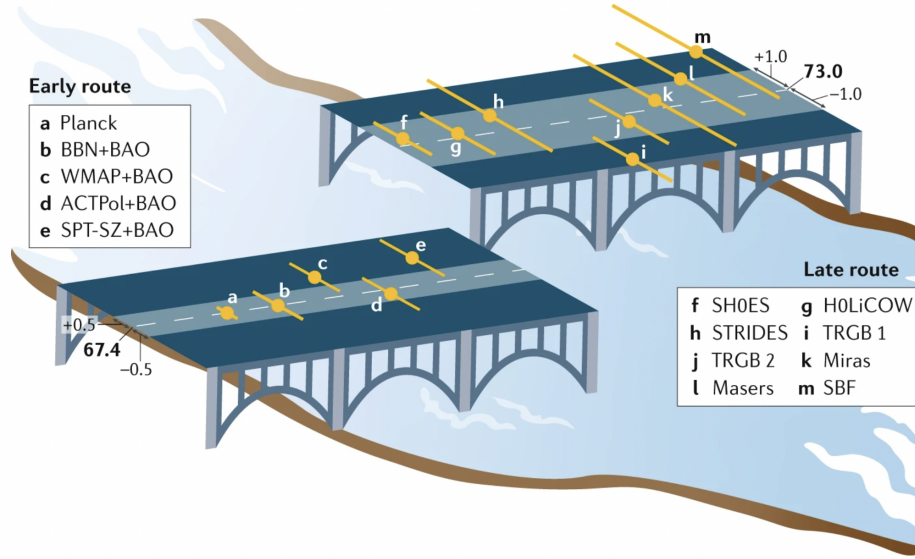


Figura 2: Diferentes medidas do parâmetro de Hubble, H_0 (retirado de [1]).

Já a Fig. 3 mostra um compilado das diferentes medições da quantidade S_8 feito a partir de diferentes levantamentos. Em termos mais simples, este parâmetro fornece uma indicação de como a matéria se aglomera, ou seja, de como as estruturas crescem. Um valor baixo de S_8 , por exemplo, $S_8 = 0.8$, implica em estruturas menos massivas formadas, enquanto um valor alto de S_8 implica numa maior formação de estruturas massivas. A configuração da esquerda na Fig. 4 ($S_8 = 0.8$) possui menos estruturas e, portanto, é mais próxima do caso homogêneo. No outro caso, há mais estruturas destacadas, o que corresponde a um cenário mais heterogêneo. Este parâmetro S_8 está relacionado ao número de aglomerados de galáxias. A maior parte dos pontos da Fig. 3 são obtidos através de análises do Universo tardio, e apenas os pontos em magenta foram obtidos da análise do Universo primordial. Tal como o caso do H_0 , parece haver uma incompatibilidade entre os resultados em tempos remotos e tempos recentes. Caso essa discrepância se confirme, isso pode significar que temos uma nova física que ainda não entendemos.

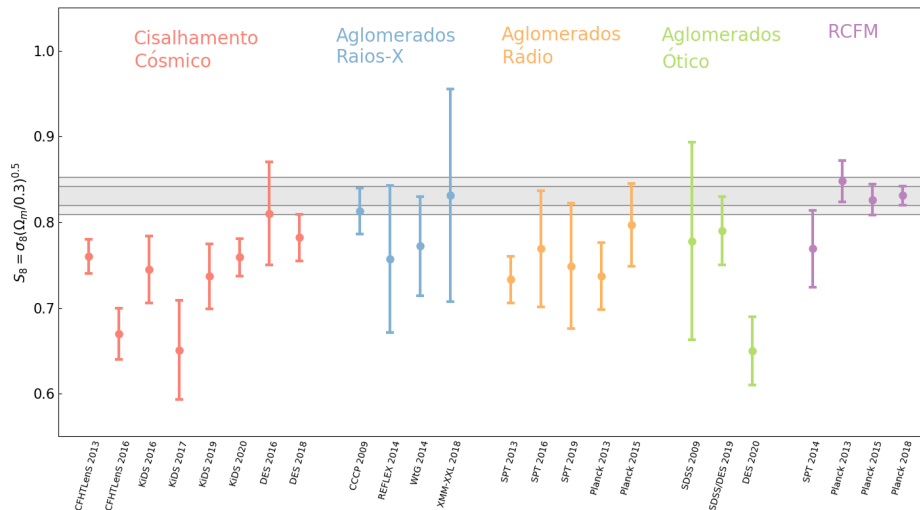


Figura 3: Diferentes medidas para o parâmetro S_8 . Crédito: M.E.S. Pereira, 2020.

Há também a possibilidade de falha na medição destas quantidades. Talvez haja algum tipo de erro sistemático ainda desconhecido por nós. No laboratório, toda medição tem um valor médio e um erro em sua estimativa, que podem surgir de duas fontes diferentes. A primeira é o erro estatístico, causado por eventos aleatórios. Para minimizar o erro estatístico, é preciso repetir a medida inúmeras vezes, já que eventos aleatórios raramente se repetem. O outro tipo de erro é o que chamamos de sistemático.

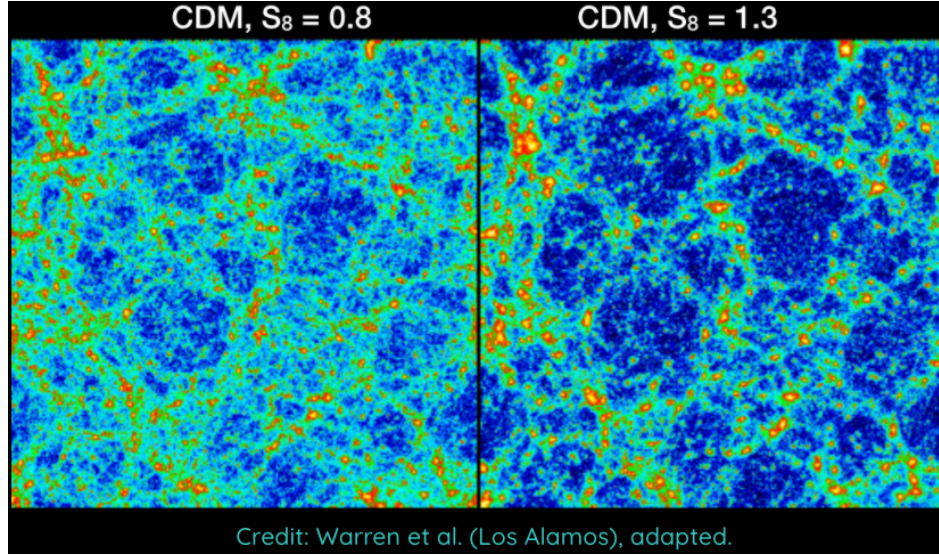


Figura 4: Comparação entre dois valores diferentes de S_8 . No quadro esquerdo, um universo mais homogêneo. À direita, observamos um universo mais heterogêneo, com estruturas mais massivas destacadas. Crédito: Blackmore *et. al*, 2010.

Este não é um erro aleatório, mas um relacionado ao planejamento do experimento, a coleta de dados, ou a suposições erradas. A única coisa que podemos fazer para eliminá-los é corrigir as medidas do experimento.

Um esquema de erros estatísticos e sistemáticos está ilustrado na Fig. 5. No quadro da esquerda temos um grande erro estatístico, uma vez que o número de medições é pequeno. O quadro central apresenta um erro estatístico menor, pois o número de medições é suficientemente grande. Já o terceiro quadro mais à direita indica um erro sistemático considerável, que permanece mesmo depois de um número muito grande de medições. Uma coisa que os/as cientistas almejam é entender todas as possíveis variáveis que influenciaram suas medidas, que podem afastá-las da realidade. Por isso, compreender os erros sistemáticos é importante.

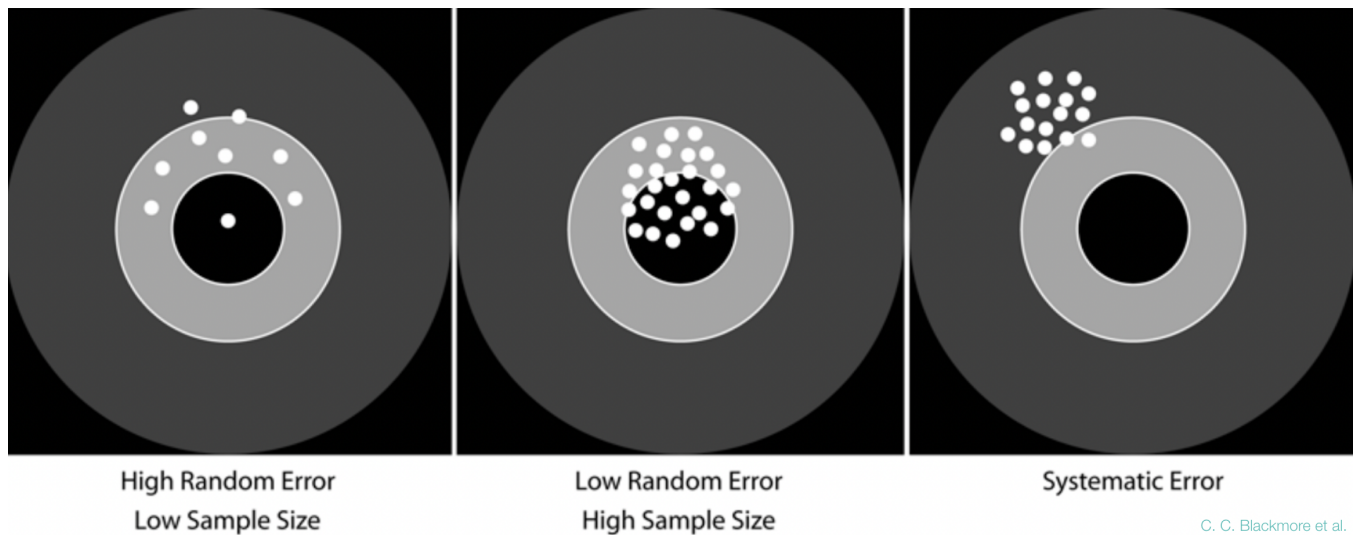


Figura 5: Esquema ilustrativo dos erros estatístico e sistemático. *Quadro esquerdo*: amostra com poucas medições e, portanto, alto erro estatístico. *Quadro central*: amostra com muitas medições e, portanto, baixo erro estatístico. *Quadro direito*: amostra com alto erro sistemático.

2 Os gigantes: aglomerados de galáxias

Os aglomerados de galáxia são ambientes extremos onde gás, galáxias, matéria escura e gravidade interagem, então são muito importantes para a astrofísica e cosmologia. Eles são grandes. Muito grandes, com massas de aproximadamente $10^{14} M_{\odot}$ (10^{14} massas solares) e tamanho entre 2 Mpc e 10 Mpc.³ São formados em sua maioria por galáxias luminosas vermelhas (galáxias elípticas) onde já não ocorre mais formação estelar. No meio intra-aglomerados também há a presença de gases com altas temperaturas e aproximadamente 80% da matéria nos aglomerados de galáxias é composta de matéria escura. Através da contagem de aglomerados, podemos inferir o valor do parâmetro S_8 .

Como podemos identificar um aglomerado de galáxias? De modo geral, há duas maneiras. Como já mencionei, a maior parte dos aglomerados são formados por galáxias luminosas vermelhas. Então, um método seria buscar por aglomerado destas galáxias em uma dada direção do céu, pois é provável que se trate de um aglomerado. Outra forma seria levar em conta, ao invés da cor, a densidade da galáxia. Assim, podemos identificar uma região com uma maior população de galáxias. A Fig. 6 ilustra essas duas diferentes técnicas para a identificação de aglomerados de galáxias.

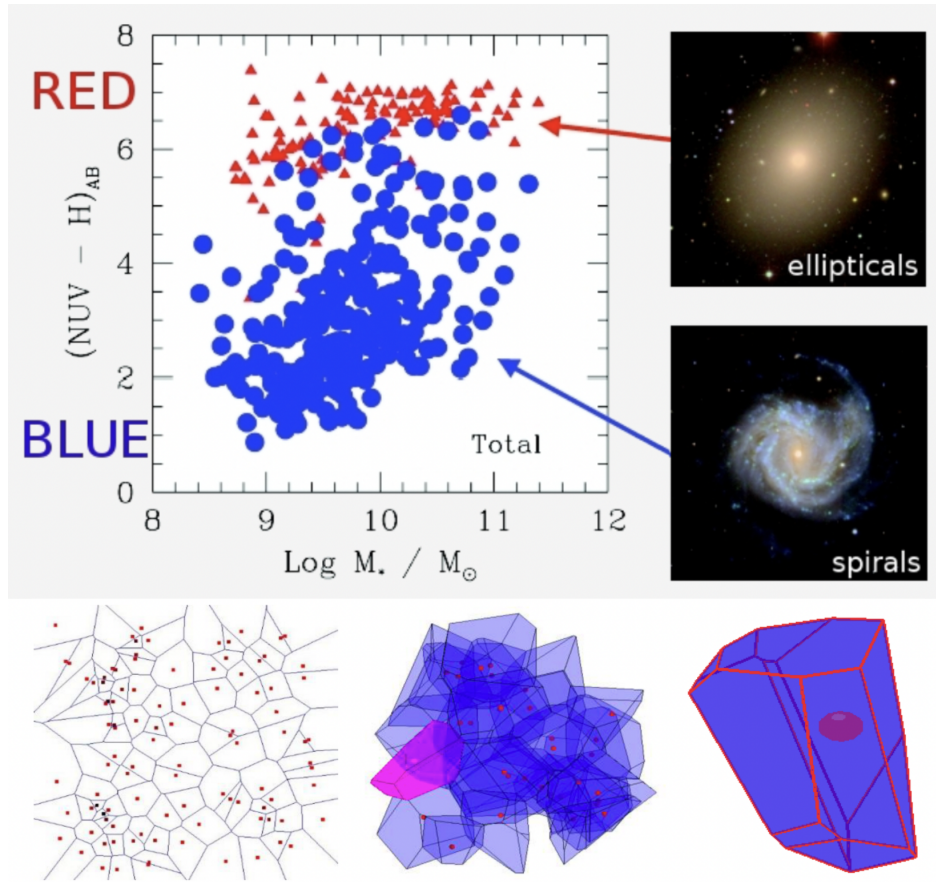


Figura 6: Métodos para identificação de aglomerados de galáxias. *Quadro acima*: identificando grupos de galáxias luminosas vermelhas. Crédito: T. Hughes. *Quadro abaixo*: método de identificação baseado na densidade de galáxias. Crédito: Ying *et. al*, 2015.

Também é importante obtermos a distância desses aglomerados de galáxias, que é feito através da medição do desvio para o vermelho na espectroscopia da galáxia, o que também chamamos de *redshift*. Este conceito é parecido com outro mais conhecido chamado de efeito Doppler, que é a aparente mudança na frequência de uma onda causada pelo movimento relativo entre a fonte da onda e o observador. Medindo o quando o comprimento de onda muda em relação ao que se mede em laboratório, podemos determinar o quão longe os objetos celestes estão de nós. No caso da cosmologia, os objetos de estudo se afastam por causa da ação da própria estrutura do espaço-tempo, que está em expansão.

³Em unidades métricas, $M_{\odot} \approx 10^{30} \text{kg}$ e $1 \text{ Mpc} \approx 10^{22} \text{m}$.

A medição do redshift funciona assim: quando observamos a luz podemos decompô-la num espectro. Este espectro eletromagnético possui linhas de emissão ou absorção em determinadas posições dependendo do elemento químico presente na natureza. Posições estas que são conhecidas através de experimentos em laboratório. À medida que uma galáxia se afasta de nós, estas linhas podem se mover para a parte mais vermelha do espectro. Medindo-se a diferença entre o comprimento de onda observado e no laboratório, determina-se o redshift cosmológico de um dado objeto. A Fig. 7 ilustra este conceito para objetos em diferentes distâncias.

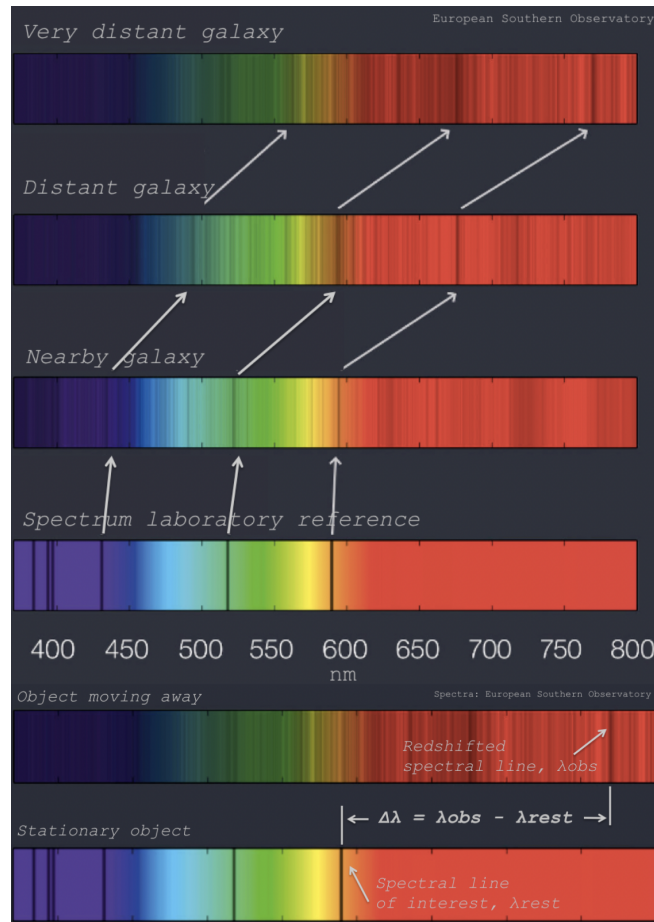


Figura 7: Desvio para o vermelho cosmológico. Crédito: ESO.

Esta técnica de medição é experimentalmente custosa, pois precisamos colocar um aparelho especial de fibra ótica para captar a luz por um tempo prolongado. Isso limita o uso do telescópio, já que o número de fibras é finito. A técnica é muito precisa, mas bem cara. Para contornar esse problema, os astrônomos usam uma outra técnica chamada de redshift fotométrico. Neste caso, ao invés de captar a luz de uma única galáxia, usa-se diferentes filtros numa região do céu para captar diferentes comprimentos de onda. Isso nos permite observar múltiplas galáxias de uma só vez. Em geral, são necessários muitos filtros para cobrir toda a faixa de comprimento de onda, o que possibilita a observação de galáxias em diferentes distâncias. A Fig. 8 mostra o fluxo em seis filtros que cobrem a região do óptico. Embora a técnica possibilite a observação de mais galáxias, ela possui uma precisão menor.

3 Como pesar aglomerados de galáxias?

Pesamos as galáxias através de um fenômeno conhecido como *lenteamento gravitacional*. Nós, como observadores na Terra, apontamos telescópios para as galáxias muito distantes. Se não houver obstáculos no caminho, a luz se propagará em linha reta até chegar a nós. No entanto, a luz sofrerá um desvio se houver, por exemplo, um aglomerado de galáxias entre a Terra e a fonte da luz. Isso acontece por causa do intenso campo gravitacional do aglomerado. Como consequência desse desvio, observamos distorções que podem ser tão sutis que não vemos, ou tão fortes que formam os chamados *arcos gravitacionais*. A Fig. 9 ilustra essa última situação. À esquerda, vemos um esquema do fenômeno de lenteamento gravitacional para o caso em que a Terra, a

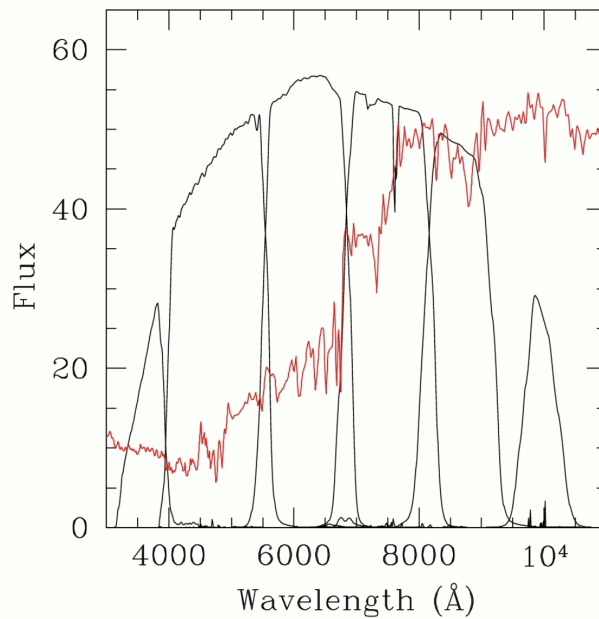


Figura 8: Fluxo medido em seis diferentes filtros na região do óptico. A linha vermelha representa o espectro de um objeto. Crédito: LSST.

galáxia observada e o aglomerado estão alinhados. Este é um caso raro e costuma ter um sinal de lenteamento mais forte. O quadro à direita mostra a famosa imagem do sorriso cósmico criado por arcos gravitacionais. O mais comum de acontecer é uma ligeira mudança na forma da galáxia, uma que não podemos ver a olho nu. Neste caso, o procedimento a ser feito é medir muitas formas de galáxias para obter sinais de efeitos de lente.

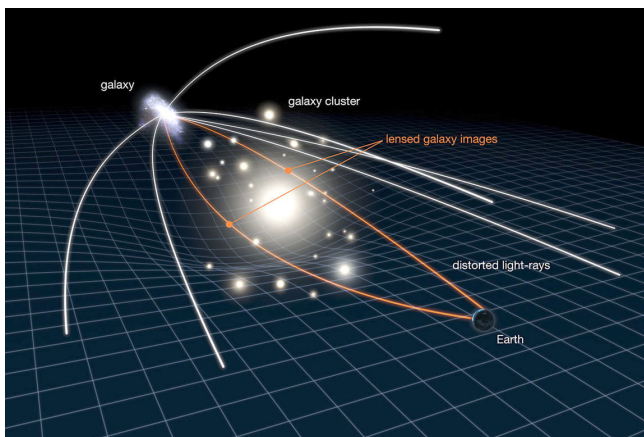


Figura 9: Lenteamento gravitacional. *Quadro esquerdo*: ilustração do efeito de lenteamento gravitacional quando a Terra, a galáxia observada e o aglomerado de galáxias estão alinhados. Crédito: NASA/ESA. *Quadro direito*: arcos gravitacionais. Crédito: ESA/Hubble

Quanto mais massivo for o aglomerado, maior será o efeito de lenteamento, ou seja, mais distorcida a imagem fica. Então, medindo a distorção das galáxias, podemos inferir a massa do aglomerado que está entre o observador e a galáxia observada ao fundo. Devemos lembrar também que o efeito de lente gravitacional não é sensível apenas à matéria visível do aglomerado de galáxias, mas também à matéria escura presente no seu interior.

Uma curiosidade interessante é que o efeito de lenteamento gravitacional foi confirmado em um eclipse solar em 1919 que foi observado na África e no Brasil. No nosso país, ele foi realizado numa pequena cidade chamada Sobral no Ceará, bem perto de onde eu nasci. Naquela época havia um grande debate sobre qual deveria ser o valor do ângulo de deflexão da luz devido ao efeito de lente gravitacional. A teoria Newtoniana tinha uma previsão diferente da teoria da relatividade geral de Einstein.⁴ A medição precisa do ângulo de deflexão confirmou as previsões da relatividade geral. O céu na África estava nublado e dificultou a observação, então o resultado crucial para uma das confirmações da relatividade geral aconteceu aqui no Brasil e é um motivo de grande orgulho para a comunidade brasileira. A partir deste evento, a temática das lentes gravitacionais passou a ser alvo de intensas pesquisas.

4 Cosmologia com aglomerados de galáxias

Agora que sabemos como identificar os aglomerados, como medir a distância até eles e como medir suas massas, podemos finalmente usá-los para obter vínculos observacionais. Um destes vínculos é o que chamamos de *contagem de aglomerados* N , que é a quantidade de aglomerados de uma determinada massa a uma certa distância. Este é proporcional ao parâmetro S_8 que foi discutido anteriormente. Portanto, ao fazermos as contagens de aglomerados, podemos determinar o valor de S_8 para o nosso modelo.

Uma dificuldade de medir o número N é que não é possível medir exatamente a massa real dos aglomerados, mas apenas obter uma aproximação através das lentes gravitacionais. Por isso, precisamos de algum tipo de informação que possa nos dar uma indicação do quão massivo é um aglomerado de galáxias. Nesta análise, podemos agrupar os aglomerados que têm aproximadamente a mesma massa e que estão mais ou menos à mesma distância. Uma maneira de fazer isso é procurar o número de galáxias vermelhas nos aglomerados, o que chamamos de *riqueza de um aglomerado*. Se um aglomerado possui mais galáxias vermelhas, então dizemos que ele é mais rico, e consequentemente, mais massivo.

Também podemos mapear a luminosidade dos aglomerados no espectro de raio-x e o conteúdo estelar para estabelecer uma relação linear do observável em questão, como, por exemplo, riqueza e luminosidade, com a massa do aglomerado que produz o efeito de lenteamento. A Fig. 10 ilustra o que temos nessa análise. O quadro esquerdo mostra a situação ideal, onde há uma relação linear perfeita do observável com a massa do aglomerado. No quadro central, vemos um cenário mais realista, onde há um espalhamento dos dados observacionais. No quadro da direita, além do espalhamento dos dados, leva-se em consideração as limitações de observação do mapeamento através de uma função de seleção. Podemos dizer que esta análise corresponde à uma calibração da massa dos aglomerados. Suspeitamos que ela seja a fonte mais provável de erros sistemáticos que não conhecemos. Por isso, é fundamental melhorarmos nosso entendimento sobre esta análise.

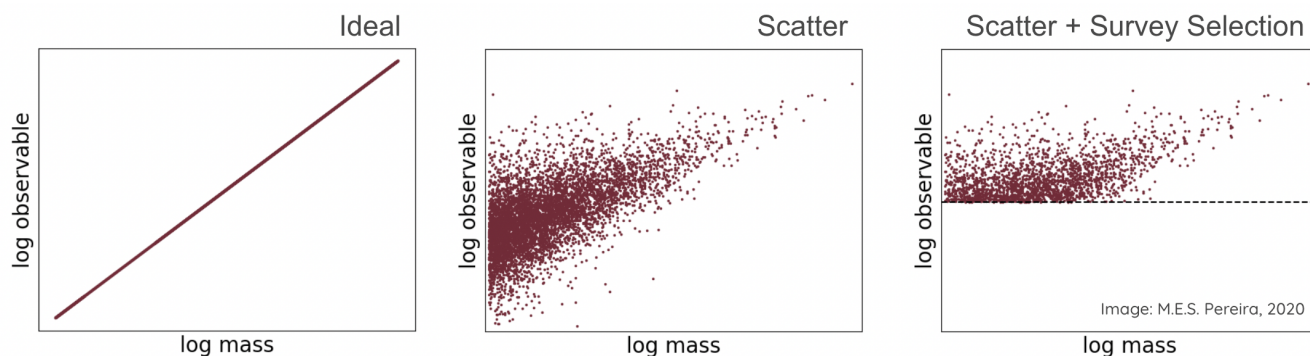


Figura 10: Relação entre observável e massa. *Quadro esquerdo*: situação ideal. *Quadro central*: espalhamento dos dados observacionais. *Quadro direito*: situação de espalhamento dos dados observacionais com efeito de seleção, levando em conta a limitação das observações.

Existem diferentes grupos mapeando aglomerados de galáxias em todas essas etapas citadas: identificação, medida de distância, medida de massa e calibração. Em particular, faço parte do DES, sigla do termo em inglês *Dark Energy Survey*. Este é um projeto astronômico para obter imagens do céu do hemisfério sul, cujo maior objetivo é medir a expansão do Universo através da análise das estruturas em largas escalas no Universo. O DES utiliza diferentes métodos além da observação de lentes gravitacionais, como, por exemplo, a observação de supernovas e, mais recentemente, ondas gravitacionais. A região observada possui cerca de 5.000 graus quadrados, que são observados com uma câmera de 500 megapixels e cinco filtros para obter os redshifts

⁴Basicamente, a previsão da teoria da Relatividade Geral era o dobro da previsão Newtoniana.

fotométricos. O experimento observou por seis anos, e atualmente estamos analisando dados do terceiro ano. Já estudamos aproximadamente 100 milhões de galáxias das 500 milhões que foram observadas até o final do projeto.

A observação destas galáxias com o DES poderá nos ajudar a medir a massa dos aglomerados. Para os resultados do primeiro ano de funcionamento do DES, identificamos cerca de 6.000 aglomerados através da técnica de identificar conjuntos de galáxias vermelhas. Como isso, é possível definir a riqueza dos aglomerados, ou seja, o número de galáxias vermelhas. Então, dividimos estes 6.000 aglomerados em grupos com aproximadamente o mesmo redshift e a mesma riqueza para medir a massa. Estes resultados foram apresentados em [2] e está ilustrado no quadro esquerdo da Fig. 11. Mais precisamente, o resultado do DES é mostrado na área vermelha, na qual a largura da área representa o erro da medida. Em comparação com dados anteriores, o DES possui medidas bem mais precisas. Com este resultado, é possível estimar a massa de lenteamento para cada aglomerado cuja riqueza é conhecida.

Finalmente, uma vez que sabemos a massa dos aglomerados, podemos ter uma projeção de suas contagens e, portanto, um valor para o parâmetro S_8 . Este estudo foi apresentado em [3] e está ilustrado no quadro direito da Fig. 11. A melhor projeção encontrada para S_8 com os dados do primeiro ano de funcionamento do DES está representado pela linha preta vertical tracejada. Os erros são dados pela região cinza. Neste caso, o valor de S_8 encontrado é bem baixo em comparação a outros valores já obtidos para o modelo Λ CDM, principalmente em comparação com os resultados da CMB.

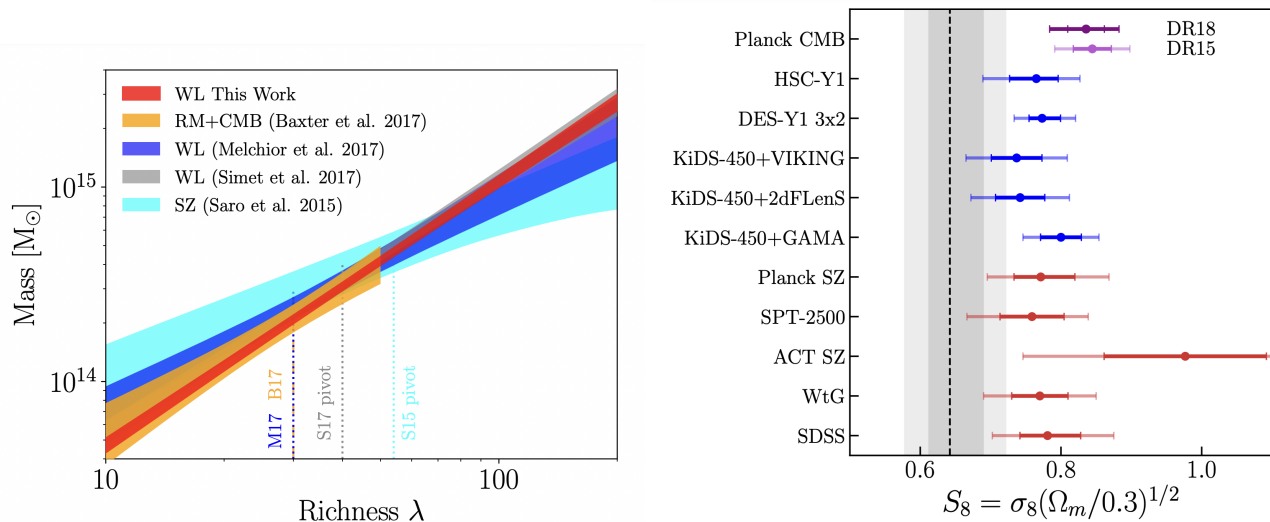


Figura 11: Resultados da análise dos dados do primeiro ano de funcionamento do DES. *Quadro esquerdo*: calibração da massa de aglomerados de galáxias. *Quadro direito*: estimativa do parâmetro S_8 .

Este foi um resultado muito surpreendente, mas não podemos tirar conclusões precipitadas. Na referência [3], onde o resultado foi apresentado, muitos testes foram feitos para tentar descobrir se o valor encontrado é realmente verdadeiro. Se for o caso, isso significaria que a matéria aglomera menos que o previsto pelo modelo Λ CDM. No entanto, suspeitamos que essa diferença deve ser devido a algo que não estamos considerando nas medições, algum erro sistemático. Neste momento, tentamos entender que tipo de erro sistemático seria responsável por tornar nosso valor tão diferente das outras medidas que temos agora. Este é um trabalho árduo, que envolve o esforço de muitas pessoas.

No contexto de aglomerados de galáxias, há um muitas possibilidades para erros sistemáticos, mas vou mencionar apenas duas delas aqui. A primeira possibilidade é devido a incertezas na medida das distâncias das galáxias. Podemos considerar de maneira equivocada que uma galáxia pertence ao conjunto de galáxias que sofre lenteamento gravitacional. Neste caso, o sinal desta galáxia vai diluir o efeito estatístico do lenteamento gravitacional, fazendo-o parecer menor do que realmente é. Um dos motivos que leva a este erro é o fato de usarmos o redshift fotométrico, que, como já mencionado, são menos precisos que o redshift espectroscópico. Para tentar corrigir este defeito, é necessário estimar o quanto devemos aumentar o sinal do lenteamento para compensar este efeito. A Fig. 12 ilustra esta situação.

Uma segunda possibilidade de erro sistemático está relacionada com a medida da forma das galáxias de fundo, aquela atrás do aglomerado. Sabemos que as galáxias são como as apresentadas no primeiro quadro da Fig. 13. No entanto, o efeito das lentes gravitacionais as faz ter uma forma como ilustrado no segundo quadro. Como observamos galáxias através de telescópios baseados na Terra, o efeito da atmosfera desfoca a imagem, de forma que ela se parece com a ilustração no terceiro quadro da Fig. 13. Por fim, as câmeras usadas para a observação de galáxias são pixeladas e possuem ruídos (quadro cinco e seis, respectivamente), de forma que a imagem final observada se torna bem diferente da original. Todos estes fatores

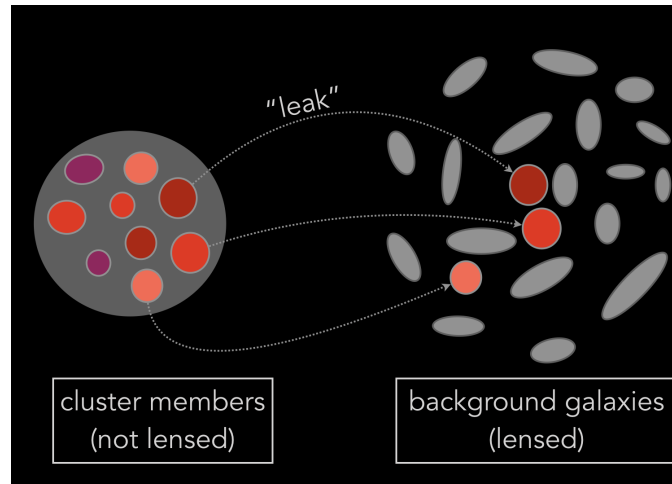


Figura 12: Erro sistemático devido ao redshift fotométrico. A correção pode ser feita através do aumento do sinal de lentes (*boost factor*, em inglês). Crédito: M.E.S. Pereira.

dificultam a determinação das formas das galáxias, consequentemente, enviesando o sinal de lentes usado para medir a massa dos aglomerados.

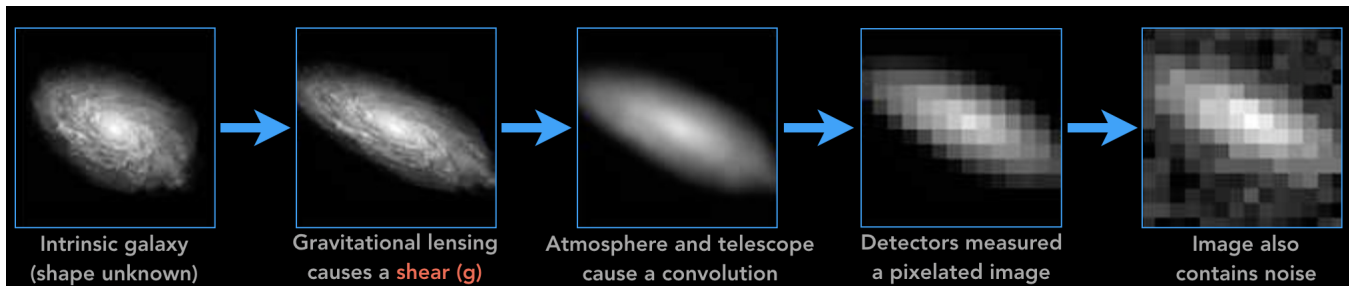


Figura 13: Erro sistemático devido a limitações na determinação das formas das galáxias. Crédito: Bridle *et. al*, 2008.

5 Conclusão

Resumindo, aprendemos o que são aglomerados de galáxias, quais são seus constituintes e como podemos identificá-los no céu. Descobrimos que podemos medir a distância até eles através do método de medição de redshift fotométrico e usar o efeito de lenteamento gravitacional para estimar suas massas, usando a luz de galáxias de fundo. Com isso conseguimos vínculos observacionais como a contagem de aglomerados, que pode ser usada para ajustar modelos cosmológicos. Erros sistemáticos precisam ser levados em consideração ao abordar nossas medidas.

Há muitos detalhes que devem ser levados em consideração ao analisarmos os dados e que tornam altas as chances de tirarmos conclusões imprecisas. Neste momento, estamos trabalhando com os dados do terceiro ano de funcionamento do DES (20.000 aglomerados de galáxias) e tentando melhorar nossa descrição dos erros sistemáticos. Sabemos que há correções a serem feitas, mas a nossa principal preocupação é com os erros sistemáticos que não conhecemos ainda. Uma das principais diferenças para a análise destes novos dados é que mantivemos a massa como parâmetro livre, enquanto usamos sinal do lenteamento gravitacional diretamente junto com as contagens. Também estamos investigando outras metodologias para estudarmos cosmologia com aglomerados, algo que poderá ser usado como teste de consistência dos métodos.

Referências

- [1] Adam G. Riess. The Expansion of the Universe is Faster than Expected. *Nature Rev. Phys.*, 2(1):10–12, 2019.
- [2] T. McClintock et al. Dark Energy Survey Year 1 Results: Weak Lensing Mass Calibration of redMaPPer Galaxy Clusters. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 482(1):1352–1378, 2019.

- [3] T. M. C. Abbott et al. Dark Energy Survey Year 1 Results: Cosmological constraints from cluster abundances and weak lensing. *Phys. Rev. D*, 102(2):023509, 2020.