

# A Energia Escura e os Desafios da Cosmologia Observacional na Próxima Década: “White Paper” para a Comissão Especial de Astronomia (CEA)

L. Raul Abramo e Élcio Abdalla  
Dep. de Física Matemática, Universidade de São Paulo  
CP 66318, CEP 05314-970 São Paulo (SP)

Ioav Waga, Maurício O. Calvão, Miguel Quartín e Ribamar R. R. Reis  
Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro  
CP 68528, CEP 21941-972, Rio de Janeiro (RJ)

Laerte Sodré Jr., Cláudia M. Oliveira e Reuven Opher  
Dep. de Astronomia, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo  
R. do Matão 1226, CEP 05508-090, São Paulo (SP)

Jailson Alcaniz e Renato Dupke  
Observatório Nacional  
R. General José Cristino 77, CEP 20921-400, Rio de Janeiro (RJ)

Marcelo Rebouças  
CBPF - Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas  
R. Xavier Sigaud 150, CEP 22290-180, Rio de Janeiro (RJ)

Reinaldo de Carvalho e Hugo V. Capelato  
Divisão de Astrofísica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Av. dos Astronautas 1758, CEP 12227-010,  
São José dos Campos (SP)

**Resumo:** A natureza da aceleração cósmica é atualmente o maior mistério da Cosmologia – e talvez de toda a Física. Sua solução poderá levar a uma revisão radical não só da teoria da gravitação, mas até mesmo do Modelo Padrão da Física das Partículas Elementares. Porém, para alcançar esse objetivo será necessário um imenso esforço em termos de observações astronômicas. Esse esforço será concentrado em duas vertentes: a dos **métodos** e a dos **objetos**.

Quanto aos **métodos**, há um consenso mundial de que há quatro técnicas superiores para estudar a natureza da energia escura. São elas: supernovas Ia; oscilações acústicas de bárions; mapas de cisalhamento de lentes gravitacionais fracas; e contagem de aglomerados de galáxias. Todos esses métodos subentendem levantamentos (*surveys*) de *grande volume*, o que implica tanto numa área muito grande do céu quanto em altos *redshifts* ( $z \gtrsim 0,5$ ). Portanto, para implementar essas técnicas, há a necessidade de instrumentos dedicados (ou semi-dedicados) com grandes campos de visão.

É evidente que esses quatro métodos não prescindem de uma excelente compreensão dos **objetos** observados nesses mapas (supernovas, galáxias luminosas vermelhas, galáxias azuis de campo, galáxias Ly- $\alpha$ , regiões HII, grupos e aglomerados de galáxias etc.). Portanto, há também uma enorme sinergia dessas técnicas com outras estratégias de Astronomia em instrumentos de campo pequeno, que permitam o estudo detalhado desses objetos – assim como a identificação das novas classes de objetos que se tornarão centrais nas estratégias do futuro.

Neste *White Paper*, cujo objetivo é servir de subsídio para o planejamento do futuro da Astronomia brasileira promovido pela CEA (Comissão Especial de Astronomia do Ministério da Ciência e Tecnologia), argumentamos que os grandes projetos em Cosmologia observacional relacionados à energia escura se tornaram centrais nas estratégias de Astronomia a nível mundial. Portanto, para que a Astronomia brasileira se destaque cada vez mais internacionalmente é indispensável que aumentemos e diversifiquemos nossa participação em grandes projetos na área de Cosmologia observacional.

## I. INTRODUÇÃO: O QUE É A ENERGIA ESCURA?

Na última década as evidências dando conta da aceleração cósmica se multiplicaram: além das supernovas Ia [1, 2, 3, 4], todas as observações astronômicas que dependem de algum modo da taxa de expansão parecem dar suporte à conclusão de que não vivemos mais num universo dominado por matéria e, portanto, desacelerado [5, 6, 7, 8, 9]. Contudo, a fonte dessa aceleração permanece essencialmente desconhecida. No contexto da Teoria da Relatividade Geral (TRG), a explicação mais simples é associá-la à densidade de energia do vácuo ou constante cosmológica ( $\Lambda$ ), caracterizada pelo parâmetro da equação de estado (razão entre pressão e densidade de energia) constante,  $w = p/\rho = -1$ . Uma alternativa interessante à constante cosmológica é um campo escalar extremamente leve (quintessência ou k-essência) que se comporta efetivamente como um termo cosmológico variável. Outra proposta, bastante explorada recentemente, é que a aceleração cósmica poderia ser a primeira evidência de que a TRG deve ser substituída por uma teoria modificada da gravitação, tais como os modelos  $f(R)$  (onde  $R$  é o escalar de curvatura de Ricci), que descreveria melhor o universo em suas maiores escalas. Uma outra possibilidade para a aceleração cósmica são as teorias com dimensões extras, nas quais a matéria ordinária estaria confinada a uma “brana” de dimensionalidade 3+1, que por sua vez estaria contida em um espaço-tempo com ao menos uma dimensão espacial a mais, chamado de *bulk*. Qualquer uma das alternativas acima (que denominaremos genericamente como “energia escura”, por simplicidade) representa uma mudança radical em nosso conhecimento sobre a matéria, a energia e o espaço-tempo.

Grandes esforços, tanto teóricos quanto observacionais, têm sido dedicados ao entendimento da natureza da energia escura. Instrumentos sofisticados estão sendo planejados e construídos, cujo objetivo científico principal é determinar as propriedades da energia escura, e que nos próximos 10 anos produzirão os mais detalhados catálogos de galáxias e de uma gama de outros objetos distantes.

É importante que esses levantamentos tenham uma estratégia de observação que permita a combinação de diversos testes cosmológicos. Diferentes testes usualmente apresentam uma distinta sensibilidade à energia escura e estão sujeitos a diferentes erros sistemáticos. Portanto, para obtermos resultados robustos essa combinação é fundamental. Além disso, é necessário considerar tanto testes que medem a história da expansão do universo (geralmente determinada por medidas da distância de luminosidade, distância de diâmetro angular etc., como função do desvio para o vermelho  $z$ ) (testes cinemáticos), como aqueles sensíveis a taxa de crescimento de estruturas (testes dinâmicos) que, em geral, diminui quando a energia escura começa a dominar o conteúdo cósmico. Considerar os dois tipos de testes (ci-

nemáticos e dinâmicos) é crucial se desejamos descobrir se a aceleração cósmica é proveniente de uma componente exótica com pressão negativa ou de uma gravitação modificada.

Note que, ao delimitarmos as propriedades da energia escura, estaremos ao mesmo tempo testando a própria TRG. Poderemos distingui-la de outras teorias de gravitação, comparando, por exemplo, previsões para a equação de estado advindas de testes que só envolvem a história da expansão cósmica [essencialmente o parâmetro de Hubble,  $H(z)$ ], com aquelas que dependem da taxa de crescimento de estruturas. Finalmente, essas mesmas observações também serão capazes de testar uma das outras hipóteses mais fundamentais da Cosmologia – a da *métrica* de Friedman-Robertson-Walker (FRW), que codifica a suposta homogeneidade e isotropia do universo.

Em linhas gerais, os principais objetivos da pesquisa em energia escura são:

- a) determinar com a melhor precisão possível se a aceleração cósmica é consistente com a constante cosmológica, isto é, com uma equação de estado constante  $w = -1$ ; caso  $w$  não seja igual a  $-1$ , determinar sua dependência com o *redshift*;
- b) buscar possíveis falhas da TRG checando a consistência dos testes cinemáticos e dinâmicos; e
- c) medir as densidades de energia da matéria e da energia escuras – essencialmente, medir  $\Omega_m$  e  $\Omega_e$ , onde  $\Omega_{m,e} = \rho_{m,e}/\rho_c$  e  $\rho_c = 3H^2/(8\pi G)$  é a densidade crítica.

Na Fig. 1 mostramos alguns vínculos recentes sobre o parâmetro de densidade da matéria,  $\Omega_m$ , e a equação de estado da energia escura,  $w$  [10]. Abaixo discutiremos em mais detalhes as duas técnicas utilizadas nos vínculos mostrados na Fig. 1 (supernovas Ia e oscilações acústicas de bárions, ou “BAOs”), mas por enquanto o que desejamos ilustrar é a **complementaridade** entre os diferentes métodos. Como se nota da Fig. 1, os diversos observáveis astronômicos apresentam sensibilidades diferentes com relação aos principais parâmetros cosmológicos – em especial aqueles relacionados à energia escura. A principal mensagem dessas figuras, que vale de um modo bastante geral, é a seguinte: nenhum método é capaz de, individualmente, impor limites significativos aos modelos de energia escura e/ou gravidade modificada; apenas a combinação de vários testes vai permitir uma investigação profunda e completa da natureza da energia escura.

## II. MÉTODOS PARA ESTUDAR A NATUREZA DA ACELERAÇÃO CÓSMICA

Ao mesmo tempo em que a descoberta da aceleração cósmica foi se confirmando, um consenso foi sendo construído em torno dos métodos e técnicas que atualmente

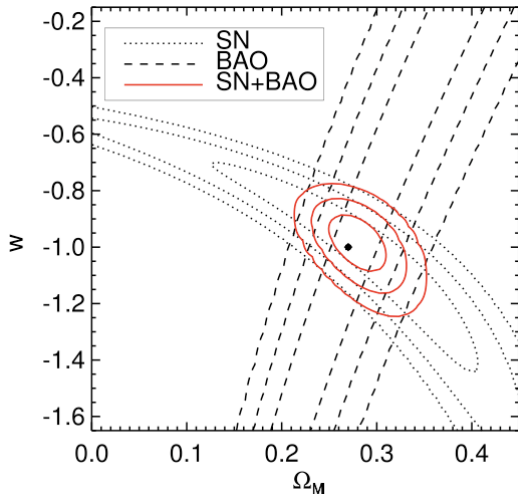


Figura 1: Vínculos de observações de SN Ia e de oscilações acústicas de bárions (BAOs) em  $1\sigma$ ,  $2\sigma$  e  $3\sigma$  (contornos de dentro para fora) sobre a equação de estado  $w$  (suposta constante) e a densidade de matéria,  $\Omega_m$  [10]. Na derivação destes vínculos foi assumido que não há curvatura espacial, de modo que o parâmetro de densidade de energia escura é dado por  $\Omega_e = 1 - \Omega_m$ , e todos os outros parâmetros cosmológicos foram “marginalizados” ou seja, a variância adicional nesses vínculos acarretada pela incerteza nos parâmetros ocultos foi contabilizada.

são considerados mais promissores para desvendar sua natureza. Esse consenso tem se concentrado em quatro observáveis astronômicos [11].

### A. Supernovas Ia

Observacionalmente, as SN Ia são definidas como as supernovas que não apresentam linhas do hidrogênio em seu espectro, mas que possuem uma acentuada linha de absorção do silício. Acredita-se que uma SN Ia tenha origem em um sistema binário de estrelas em que uma anã branca extrai massa da companheira. Quando a massa da anã branca aproxima-se do chamado limite de Chandrasekhar (cerca de  $1,4 M_\odot$ ) uma explosão termonuclear tem início. O fato de todas as progenitoras das SN Ia possuírem massas muito semelhantes é um fator relevante para explicar a razão desses objetos serem excelentes velas-padrão. A utilização de SN Ia como velas-padrão (a rigor *padronizáveis*) é que permitiu a descoberta da aceleração cósmica em 1998. Técnicas empíricas que relacionam a forma das curvas de luz da SN Ia com o pico de seu brilho intrínseco permitem reduzir a dispersão no pico para 0,1 - 0,15 magnitudes. Isso implica numa precisão na determinação de distâncias de 5 a 7%, tornando as SN Ia excelentes objetos para investigarmos a história da expansão cósmica, bem como para determinarmos o valor da constante de Hubble.

A técnica envolvendo SN Ia é atualmente a mais poderosa, desenvolvida e bem sucedida que dispomos para investigar a natureza da energia escura e deve ser parte integrante de qualquer grande estratégia que objetiva investigar a energia escura. Vários levantamentos de supernovas têm sido levados a cabo, como o Sloan Digital Sky Survey II, o Supernova Legacy Survey e o ESSENCE Supernova Survey, entre outros.

Dado o enorme número de supernovas que serão descobertas no futuro próximo, a questão central não está mais relacionada às incertezas estatísticas mas ao desenvolvimento de novas técnicas que possibilitem reduzir ainda mais possíveis erros sistemáticos. Na verdade, esse é um problema que já está presente nos levantamentos mais recentes. Por exemplo, uma das grandes dificuldades atuais, e que necessita ser melhor compreendida, é que diferentes métodos de ajuste de curva de luz de SN Ia podem resultar em diferentes vínculos sobre parâmetros cosmológicos [12, 13]. Outros aspectos relevantes são o problema da contaminação da amostra de supernovas – isto é, a identificação correta de que a supernova observada é do tipo Ia – bem como a determinação acurada de seu desvio para o vermelho. Isso é fundamental para que a descoberta de uma supernova possa resultar em dados úteis para a Cosmologia. Nesse sentido, uma área de grande interesse para a comunidade astronômica brasileira é a determinação de desvios para o vermelho espectroscópicos de supernovas (ou de suas galáxias hospedeiras) observadas pelos futuros experimentos como o LSST (*Large Synoptic Survey Telescope*), o JDEM (*Joint Dark Energy Mission*) da NASA ou o Euclid da ESA (esses dois últimos, telescópios espaciais que inclusive ainda podem vir a se juntar numa só missão). Esse programa de *follow-up* poderia ser feito aproveitando também instrumentos dos quais o Brasil já participa, como Gemini e SOAR, ou ainda por meio de novos instrumentos que estão sendo propostos, como o telescópio robótico – veja o *White Paper* de Antônio Canaan *et al.*

Outra área de interesse são as simulações numéricas. Uma ferramenta bastante poderosa para implementação de simulações e para análise de dados de supernovas é o pacote público SNANA [31], que tem sido usado pelos grupos de supernovas do SDSS-II e do DES, e pode ser configurado para simular qualquer levantamento, desde que seja alimentado com informações sobre o instrumento e as condições de observação.

À medida que as missões espaciais JDEM ou Euclid definirem de forma mais definitiva a configuração de seus instrumentos, devemos buscar também participar dessas colaborações, passando a incluir esses instrumentos em um programa de simulações. Especificamente uma de nossas metas deve ser adaptar e desenvolver o pacote SNANA objetivando obter previsões de vínculos sobre os parâmetros de diversos modelos cosmológicos a partir das especificações técnicas dos levantamentos de SN Ia do LSST e do JDEM/Euclid, bem como analisar os dados gerados por esses experimentos tão logo se tornem disponíveis.

Sugerimos que, inicialmente, a comunidade brasileira interessada em supernovas dirija seu foco para o LSST, com o objetivo geral de ingressar como *membros* da colaboração. O LSST será uma fenomenal ferramenta para a *descoberta* de supernovas (a uma taxa de milhares por dia), mas serão necessários grandes esforços de *follow-up* espectroscópico (ou espectrofotométrico) dessas supernovas para tipificação e a extração dos *redshifts* [14]. Dentro de uma colaboração poderíamos, a curto prazo, participar do planejamento desse levantamento, através por exemplo de simulações que ajudem a definir a melhor estratégia de observações e *follow-ups*.

Quanto a essa estratégia de *follow-up*, um instrumento que já tem sido bastante utilizado é o espectrógrafo de campo integral, que é desenhado para obter um espectro em vários pontos em um campo de visão (tipicamente de abertura angular de poucos segundos de arco até um máximo de trinta segundos de arco) em uma única exposição, o que nos permitiria, em princípio, sondar tanto a supernova quanto o ambiente circundante. O uso de um espectrógrafo de campo integral no SOAR, no Gemini ou ainda em um futuro telescópico robótico, deve ser investigado. De fato, há interesse dentro da comunidade astronômica brasileira na construção de um telescópio robótico de 2-3m e que tenha também capacidade espectroscópica/espectrofotométrica – veja também o *white paper* de Laerte Sodré *et al.* Evidentemente, as características de um futuro telescópio robótico brasileiro a ser construído dependem da ciência que se deseja fazer com ele, mas é do nosso interesse que ele possa ser usado também para o acompanhamento de SN.

## B. Oscilações acústicas de bárions (BAOs)

De forma semelhante às SN Ia que são, efetivamente, *velas-padrão*, as BAOs (*Baryon Acoustic Oscillations*) definem, num sentido estatístico, uma *régua-padrão*. Para compreender isso, lembramos que antes da recombinação a matéria ordinária no universo estava na forma de um plasma quente com fótons e bárions interagindo fortemente e formando, efetivamente, um único fluido. Consideremos então a propagação de uma perturbação esférica no fluido cósmico (matéria escura fria, neutrinos e o fluido de bárions-fótons). A matéria escura é fria, assim ela praticamente não se propaga, enquanto que a perturbação nos neutrinos, já desacoplados, segue livre com velocidade próxima à da luz e tende a diluir-se. Já a perturbação no plasma de bárions e fótons propaga-se como uma onda sonora (com uma velocidade  $c_s = c/\sqrt{3(1 + 3\rho_b/\rho_\gamma)}$ ), afastando-se do centro, onde há uma maior concentração de matéria escura.

Quando o universo atinge uma temperatura  $T \sim 0.3$  eV, a matéria bariônica forma átomos neutros e, conseqüentemente, os fótons desacoplam, dando origem à radiação cósmica de fundo em microondas (RCF). Após esse desacoplamento, não há mais a pressão da radiação sobre os bárions, e assim estes não mais se propagam

como uma onda acústica – ou seja, os bárions “estacionam” depois do desacoplamento. Os bárions são então influenciados pela, e influenciam também, a matéria escura, participando do processo de formação das estruturas em grandes escalas.

O horizonte acústico, como é conhecida a distância percorrida por essa onda acústica até a *parada* dos bárions (que corresponde a uma distância comóvel da ordem de 150 Mpc), fica impresso na RCF como uma anisotropia primária, mas aparece também como um pequeno excesso de densidade na distribuição de bárions na escala desse horizonte acústico. Essa escala pode ser observada nas funções de correlação de galáxias, floresta de Ly- $\alpha$ , supernovas etc. De fato, ela foi detectada pelos levantamentos de galáxias Sloan Digital Sky Survey (SDSS) e Two Degree Field Galaxy Redshift Survey (2dFGRS), tanto espectroscopicamente como fotometricamente [6, 15, 16, 17, 18] – veja também [19] para uma boa revisão.

As BAOs podem nos dar informações preciosas sobre a energia escura. De fato, o comprimento comóvel dessa *régua-padrão* pode ser calculado de forma simples e direta, e determinado a partir das flutuações de temperatura da RCF. O tamanho físico dessa escala depende de  $z$  e será distinto para diferentes cosmologias. A escala das BAOs pode ser medida em vários valores de  $z$  a partir da correlação de galáxias nas direções ao longo da linha de visada [proporcional a  $1/H(z)$ ] e transversal [proporcional à distância de diâmetro angular,  $d_A(z)$ ], nos dando informação sobre a história da expansão cósmica. Note que, como a escala comóvel das BAOs também é determinada pela RCF, as quantidades  $H(z)$  e  $d_A(z)$  podem ser determinadas independentemente, o que permite um controle de consistência das BAOs. Embora os resultados obtidos até agora com o teste das BAOs não sejam muito restritivos, ele é considerado extremamente robusto e o menos suscetível às incertezas sistemáticas dentre os testes cosmológicos [11].

O aumento na função de correlação de galáxias devido às BAOs é muito pequeno ( $\sim 1\%$ ) e, portanto, para que esse observável seja útil para a Cosmologia é preciso medir com muita acurácia o desvio para o vermelho e a posição de um enorme número de galáxias em uma região muito ampla do céu. Não é tão importante a precisão nas medidas de magnitude das galáxias mas sim, no caso de levantamentos fotométricos, nas medidas de cor. Há na atualidade diversos levantamentos sendo construídos ou planejados para medidas das BAOs (ou então que obterão essas medidas como subproduto), envolvendo diferentes objetos-alvo. Alguns exemplo são: Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS), Dark Energy Survey (DES), Javalambre Physics of the Accelerating Universe Survey (J-PAS) [20], LSST, JDEM/Euclid, Wide Field Multi-Object Spectrograph (WFMO) e Square Kilometer Array (SKA).

### C. Cisalhamento pelo efeito de lentes fracas (*weak lensing*)

A força gravitacional provocada pelas grandes estruturas do universo, tais como aglomerados de galáxias, distorcem os caminhos dos raios de luz entre objetos distantes e a Terra. Esses desvios podem ser medidos, num sentido estatístico, ao se mapear as orientações aparentes de objetos tais como galáxias, que adquirem uma tendência sutil de se alinhar com as lentes, num efeito conhecido como *cisalhamento*. Por depender da massa *total* (bariônica e escura) das lentes, o cisalhamento é um observável particularmente poderoso. Além disso, teorias alternativas da gravidade, construídas para explicar a aceleração do universo, tendem a prever efeitos de lentes gravitacionais claramente distingüíveis da Relatividade Geral de Einstein – veja, e.g., [21].

Um dos mais promissores testes que podem ser feitos com os dados de cisalhamento é a tomografia por lentes gravitacionais [22, 23]. A tomografia por lentes permite mapear diretamente as *massas* das estruturas em grandes escalas de forma tridimensional a partir do cisalhamento em diversos *redshifts*, desde que se conheçam as distâncias das fontes (e.g., galáxias distantes) às lentes gravitacionais (e.g., aglomerados de galáxias), e das lentes à Terra. Apesar do imenso potencial dessas observações, elas são extremamente sensíveis a diversas fontes de erros sistemáticos e observacionais, em particular erros de *redshifts* fotométricos [24]. Devido a esse motivo, existem *surveys* otimizados para a tomografia de lentes fracas [25], com características distintas dos *surveys* dedicados a medir BAOs, por exemplo.

A estratégia observacional adequada para mapas de weak lensing é clara: instrumentos com excelente *seeing*, capazes de imagear com precisão as orientações de galáxias a altos redshifts. Para uma descrição das estratégias observacionais mais adequadas para esse método, veja [25].

### D. Contagem de aglomerados

A formação de estruturas no universo procede por meio da contínua união de objetos (halos) menores, formando objetos maiores. Esse progressivo aglomeramento dos halos fica registrado na *função de massa*, que diz como a matéria se distribui entre as diversas estruturas, em todas as escalas. Essa função de massa contém informação não apenas sobre a quantidade total de matéria, mas também sobre sua distribuição e taxa de crescimento.

A função de massa pode ser medida fazendo-se um censo desses objetos e de suas massas – ou seja, contando grupos e aglomerados de galáxias, e classificando-os conforme suas massas. Essas massas podem ser estimadas de diversos modos: contando galáxias e suas velocidades, e impondo certas condições dinâmicas tais como o equilíbrio virial; medindo a temperatura do gás intra-aglomerado através de medidas de raios-X; observando o

efeito Sunyaev-Zel’dovich, que é a distorção na radiação cósmica de fundo causada pelo gás ionizado do aglomerado [26]; e até mesmo por medidas de lentes fracas [27]. Além disso, um grande esforço teórico é necessário na simulação de grandes volumes do universo e até na inclusão de efeitos hidrodinâmicos relacionados à matéria bariônica, para obter uma função de massa teórica com precisão suficientemente boa e que permita fazer a comparação com as observações – veja, e.g., [28]. É também relevante mencionar aqui o método da fração bariônica ( $f_b$ ) em aglomerados [29]. Assumindo que  $f_b$  em aglomerados é idêntica a  $f_b$  no universo como um todo, esse método permite impor limites em  $\Omega_m$  [30].

Para o método de contagem de aglomerados existem diversas estratégias possíveis (e complementares), em uma grande variedade de comprimentos de onda. Porém, por ser um método de contagem, e portanto sujeito a flutuações com a estatística de Poisson, essa técnica só traz resultados úteis quando se contabiliza um número muito grande de aglomerados – e para chegar no nível de precisão necessário para estudar a energia escura, isso significa ao menos  $\mathcal{O}(10^5)$  aglomerados. Além disso, a maior sensibilidade do teste de contagem de aglomerados para a energia escura está no *formato* da função de massa para halos no intervalo de  $10^{13} - 10^{15} M_\odot$ . é isso que implica na necessidade de observar num só *survey* muitos (da ordem de dezenas ou de centenas) aglomerados raros, com massas ao redor e acima de  $10^{15} M_\odot$  – o que aponta para a necessidade tanto de telescópios de grande porte (capazes de detectar galáxias muito distantes) quanto instrumentos que possuam grandes campos de visão (capazes de mapear uma grande área do céu).

## III. A ASTRONOMIA DA ENERGIA ESCURA

### A. Instrumentos

No momento há diversos instrumentos em funcionamento ou planejados, com orçamentos que vão desde alguns milhões de dólares até cifras bilionárias. Uma lista (incompleta) é apresentada na Tabela I. Note que não estamos apresentado o poder de discriminação de cada instrumento, apenas quais dentre os quatro testes descritos na Seção anterior eles serão capazes de conduzir, *independentemente*. Então, por exemplo, o DES e o LSST serão ótimos instrumentos para o descobrimento de supernovas, mas eles sozinhos não poderão tipificá-las (o que acarretaria uma contaminação inaceitável de supernovas Ib/c entre as Ia putativas).

Além dos projetos descritos na Tabela I, existem também *surveys* mais focados, tais como os de lentes gravitacionais fortes que estão sendo propostos por membros da comunidade brasileira, que pretendem se utilizar da recente instalação de óptica adaptativa no telescópio SOAR. Esses projetos (SOGRAS e 250-stripe) buscam detectar eventos de lentes gravitacionais fortes (tipicamente, algumas dezenas a algumas centenas) em aglome-

Tabela I: Projetos de Cosmologia observacional com maior relevância para o estudo da energia escura/aceleração do universo (lista *incompleta*). B, W, C e S correspondem respectivamente a oscilações acústicas de bárions, lentes fracas, contagem de aglomerados e supernovas. \* Note que tanto o DES quanto o LSST terão relevância para supernovas, mas necessitarão de extensos programas de follow-up com outros instrumentos para tipificar essas supernovas. † O J-PAS, por ser espectrofotométrico, não só descobrirá um grande número de supernovas, como também talvez seja capaz de tipificá-las.

Projeto	Testes	Fase	Custo
BOSS	B,C	Funcionando(2009)	~ 20 M US\$
DES	B,W,C,S*	Comiss.(2010)	~ 35 M US\$
J-PAS	B,C,S†	Projeto(≥2012)	~ 23 M US\$
WFOS	B,C	Projeto(>2013)	≥ 50 M US\$
BigBOSS	B,C	Projeto(>2015)	?
LSST	B,W,C,S*	Projeto(>2016)	≥ 500 M US\$
Euclid/JDEM	B,W,C,S	Projeto(>2017)	≥ 1 G US\$

rados de galáxias pré-identificados por outros instrumentos, o que pode ser utilizado, por exemplo, na calibração das massas desses aglomerados, tornando-os de utilidade no estudo da energia escura através do teste de contagem de aglomerados descrito acima.

Ao menos dois instrumentos de grande porte da Tabela I merecem um maior detalhamento neste documento [32], por sua relevância concreta ou potencial para a Cosmologia brasileira: o DES (Dark Energy Survey) e o J-PAS (Javalambre Physics of the Accelerating Universe Survey).

O DES é uma colaboração internacional com instituições de diversos países e terá relevância em todos os quatro observáveis astronômicos discutidos neste documento (somente a busca por Supernovas terá que ser suplementada por observações em outros instrumentos). Quando instalado no telescópio Blanco de 4 metros no CTIO, a câmara do DES (DECam) fará um levantamento durante cinco anos em 5.000 graus quadrados, com medidas fotométricas do desvio para o vermelho de galáxias no intervalo  $0,2 < z < 1,3$ . Algumas das responsabilidades do DES-Brasil incluem a participação (em alguns casos a coordenação) de diversos grupos de trabalho (de lentes fortes e Via Láctea a redshifts fotométricos e evolução de galáxias, entre outros); a criação e manutenção do “Science Portal” (<http://www.des-brazil.org>); e a validação de ferramentas com os dados simulados e redução dos dados.

O J-PAS será um levantamento fotométrico que, durante quatro anos de observações em um instrumento dedicado, cobrirá uma área de 8.000 graus quadrados e medirá a posição e o desvio para o vermelho ( $0,1 < z < 0,9$ ) de mais de 14 milhões de galáxias luminosas vermelhas [20]. O levantamento será realizado com um telescópio de 2,5 m localizado na Serra de Javalambre (em Teruel, na

Espanha), que contará com uma câmara com 14 CCDs de  $10,5k \times 10,5k$  pixels e um campo de visão de 6 graus quadrados. A câmara, que deverá ser construída no Brasil, será equipada com um conjunto de ~42 filtros cobrindo a faixa de comprimentos de onda 3.000 - 9.000 Å. Essas características permitirão que, quando completado o levantamento (2016-2017), as medidas de BAOs obtidas sejam as mais acuradas disponíveis – para mais detalhes, veja o *white paper* de Renato Dupke *et al.* Note também que existe uma proposta brasileira de clonar os equipamentos e estratégias do J-PAS para realizar um *survey* no céu inteiro do hemisfério Sul (desde a Argentina ou o Chile) – veja o *white paper* de Laerte Sodré Jr. *et al.*

## B. Estratégias para o futuro e ações propostas

As características comuns entre as estratégias delineadas acima são o **grande volume** e o **imenso número de objetos** necessários para se chegar ao nível de precisão que permite estudar a energia escura. É fácil entender essa necessidade: as quantidades cuja influência é mais evidente (tais como a taxa de expansão,  $H_0$ ), estão no topo da hierarquia dos parâmetros cosmológicos e portanto suas medidas necessitam de dados relativamente pouco detalhados. Porém, à medida que descemos do topo dessa hierarquia e tentamos visualizar a “estrutura fina” da Cosmologia, somos também obrigados a aumentar nossas amostras e controlar cada vez melhor todas as fontes de erros – estatísticos e sistemáticos.

O papel dos grandes números envolvidos em qualquer estratégia de sucesso na Cosmologia é minimizar os erros estatísticos – e é isso que implica na necessidade de instrumentos com grandes campos de visão (ou seja: capazes de mapear grandes áreas do céu) e grande área coletora (ou seja: capazes de ir até altos *redshifts*). Note que o caráter “democrático” dos *surveys* cosmológicos de grande escala implica que eles também são excelentes ferramentas para o estudo da Via Láctea, da evolução de galáxias, de populações estelares, do Sistema Solar e muitas outras áreas da Astronomia que à primeira vista não estão conectadas diretamente com a Cosmologia.

É claro que todas as estratégias que dependem de *surveys* devem necessariamente ser complementadas com o controle rigoroso dos erros sistemáticos – o que significa a observação detalhada de uma boa amostra dos objetos mapeados, e instrumentos de uma natureza distinta daqueles utilizados nos *surveys*. Em alguns casos esses objetos são razoavelmente bem conhecidos (como talvez seja o caso das galáxias luminosas vermelhas e dos aglomerados de galáxias), mas em outros ainda há muito espaço para um estudo mais aprofundado dos objetos (como é o caso de SN Ia, quasares e até os *bursts* de raios-gama, por exemplo). Finalmente, é claro que somente o estudo detalhado de objetos individuais pode levar a uma situação em que alguns desses objetos se tornem classificáveis e sua caracterização detalhada (magnitudes, dimensões, espectros etc.) permita discernir quais deles podem vir a

ser as ferramentas astronômicas e cosmológicas do futuro.

Essas duas tarefas paralelas (Astronomia de *surveys* e Astronomia extragaláctica de objetos) têm que caminhar lado-a-lado, e a comunidade astronômica brasileira não pode se permitir ficar à margem de nenhuma dessas linhas. Isso significa investir desde já tanto na participação em instrumentos que permitirão fazer esses dois tipos de ciência, quanto na formação de recursos humanos.

Entretanto, um plano equilibrado para a Cosmologia observacional e Astrofísica extragaláctica implica não apenas em participar de colaborações internacionais a nível científico ou de *software*: devemos sempre que possível (ou prático) buscar também um papel bem definido na construção desses novos instrumentos, sob o risco de criarmos uma comunidade excessivamente carregada nos aspectos teóricos, e portanto mais distante das grandes descobertas.

É importante também notar que o tipo de investimento nessas áreas é pautado por projetos de alto custo, mas que envolvem um grande número de pesquisadores durante um longo período (geralmente vários anos), e cujo retorno vem na forma de artigos de altíssimo impacto (o SDSS é o *survey* de mais alto impacto na Astronomia mundial) e formação de recursos humanos com competitividade internacional. Essas considerações devem es-

tar presentes em qualquer comparação competitiva entre projetos na área de Astronomia.

Como ações concretas para os próximos dez anos, propomos que o Brasil participe como membro **ativo em pelo menos dois novos** projetos de Cosmologia observacional, e busque um papel de **liderança em ao menos um projeto**. Idealmente essa participação deveria ser escalonada, o que otimizaria o uso dos recursos humanos disponíveis no país. Também idealmente, em ao menos um desses projetos a participação brasileira incluiria a área de instrumentação, de forma a acelerar a autonomia tecnológica brasileira para projetos futuros de caráter nacional; além disso, pelo menos um projeto deveria ser de grande envergadura, como o LSST e/ou Euclid/JDEM, o que permitirá a atualização dos cientistas brasileiros com o estado-da-arte internacional.

Em resumo: a fascinação da Sociedade internacional com os mistérios do universo em que vivemos tem levado a uma demanda crescente por conhecimento e por profissionais em Astrofísica extragaláctica e Cosmologia observacional. É nossa tarefa reconhecer essa evolução da Astronomia mundial e estimular a comunidade brasileira a refletir essas tendências.

- 
- [1] Supernova Cosmology Project, S. Perlmutter *et al.*, *Astrophys. J.* **517**, 565 (1999), astro-ph/9812133.
- [2] Supernova Search Team, A. G. Riess *et al.*, *Astron. J.* **116**, 1009 (1998), astro-ph/9805201.
- [3] Supernova Search Team, A. G. Riess *et al.*, *Astrophys. J.* **607**, 665 (2004), astro-ph/0402512.
- [4] ESSENCE, W. M. Wood-Vasey *et al.*, *Astrophys. J.* **666**, 694 (2007), astro-ph/0701041.
- [5] The SNLS, P. Astier *et al.*, *Astron. Astrophys.* **447**, 31 (2006), astro-ph/0510447.
- [6] SDSS, D. J. Eisenstein *et al.*, *Astrophys. J.* **633**, 560 (2005), astro-ph/0501171.
- [7] WMAP, D. N. Spergel *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **170**, 377 (2007), astro-ph/0603449.
- [8] Y. Wang and P. Mukherjee, *Astrophys. J.* **650**, 1 (2006), astro-ph/0604051.
- [9] E. L. Wright, *Astrophys. J.* **664**, 633 (2007), astro-ph/0701584.
- [10] M. Hicken *et al.*, *Astrophys. J.* **700**, 1097 (2009), 0901.4804.
- [11] A. Albrecht *et al.*, (2006), astro-ph/0609591.
- [12] R. Kessler *et al.*, *Astrophys. J. Suppl.* **185**, 32 (2009), 0908.4274.
- [13] J. Sollerman *et al.*, *Astrophys. J.* **703**, 1374 (2009), 0908.4276.
- [14] Y. Gong, A. Cooray, and X. Chen, (2009), 0909.2692.
- [15] The 2dFGRS, S. Cole *et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **362**, 505 (2005), astro-ph/0501174.
- [16] SDSS, N. Padmanabhan *et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **378**, 852 (2007), astro-ph/0605302.
- [17] W. J. Percival *et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **381**, 1053 (2007), 0705.3323.
- [18] W. J. Percival *et al.*, (2009), 0907.1660.
- [19] B. A. Bassett and R. Hlozek, (2009), 0910.5224.
- [20] N. Benitez *et al.*, (2008), 0807.0535.
- [21] L. Amendola, M. Kunz, and D. Sapone, *JCAP* **0804**, 013 (2008), 0704.2421.
- [22] W. Hu, *Phys. Rev.* **D66**, 083515 (2002), astro-ph/0208093.
- [23] M. Takada and B. Jain, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **348**, 897 (2004), astro-ph/0310125.
- [24] Z.-M. Ma, W. Hu, and D. Huterer, *Astrophys. J.* **636**, 21 (2005), astro-ph/0506614.
- [25] A. Amara and A. Refregier, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **381**, 1018 (2007), astro-ph/0610127.
- [26] C. Shang, Z. Haiman, and L. Verde, (2009), 0908.2012.
- [27] L. Mariani, R. E. Smith, and G. M. Bernstein, *Astrophys. J.* **698**, L33 (2009), 0811.1991.
- [28] A. Jenkins *et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **321**, 372 (2001), astro-ph/0005260.
- [29] S. D. M. White, J. F. Navarro, A. E. Evrard, and C. S. Frenk, *Nature (London)* **366**, 429 (1993).
- [30] A. Vikhlinin *et al.*, *Astrophys. J.* **640**, 691 (2006), arXiv:astro-ph/0507092.
- [31] <http://sdssdp47.fnal.gov/sdsssn/SNANA-PUBLIC/>
- [32] Foi informado a alguns dos autores deste *White Paper* que pesquisadores brasileiros também “participam ativamente” do BOSS, como parte da participação brasileira no SDSS-III. Por comunicação pessoal de um dos integrantes do time brasileiro no SDSS-III, consta que pesquisadores brasileiros estariam participando do BOSS nas áreas de BAOs, aglomerados de galáxias, evolução de galáxias e lentes fortes.