

Parte 2

Desvendando o universo com grandes mapeamentos

Luiz Nicolaci da Costa (LIneA e ON/MCTI)

Paulo Pellegrini (ON/MCTI)

Marcio A. G. Maia (ON/MCTI e LIneA)

Desde o início dos anos 80 um grupo de pesquisadores do ON vem participando de grandes levantamentos com parceiros internacionais para estudos da evolução de galáxias e de sistemas de galáxias em razão da idade do universo, da distribuição de galáxias e da massa em grande escala, e a determinação de parâmetros cosmológicos. Além de ser a mola propulsora dos maiores avanços nos estudos da estrutura da Via Láctea e do universo em grande escala, os grandes mapeamentos astronômicos estimulam a colaboração entre pesquisadores, essencial para os desafios de grandes empreendimentos de longo prazo e promovem a formação de jovens pesquisadores e sua inserção no cenário internacional.

Introdução

O surgimento da pesquisa em **astronomia extragaláctica** e **cosmologia** no Observatório Nacional (ON), teve início em 1980. Sob coordenação de um dos autores deste texto (LNC), recém-chegado de um doutorado em física na Universidade de Harvard, um pequeno grupo de pessoas, ainda em formação, iniciou uma trajetória de pesquisa, através do envolvimento em grandes levantamentos astronômicos em parceria com instituições internacionais, o que levou à adoção de modelos pioneiros de atuação na astronomia brasileira.

A fase inicial de atividades desse grupo consistiu em tentar identificar o que poderia ser feito com os limitados recursos computacionais da época: um microdensitômetro PDS (*Photometric Data Systems*) Perkin-Elmer (P&E) no ON, capaz de digitalizar placas fotográficas, e o acervo de cópias de placas fotográficas (tipo *Schmidt*) do hemisfério sul celeste, em várias **bandas** fotométricas, produzido pelo *European Southern Observatory* (ESO) no Chile. Somava-se a isso, o recém-inaugurado telescópio P&E de 1,60 m do então Observatório Astrofísico Brasileiro (OAB)¹ do ON e a disponibilidade de um **espectrógrafo** com uma **resolução** adequada para trabalhos **extragalácticos**. Estes ingredientes formaram a base inicial de uma estratégia de curto e médio prazo.

Nesse cenário estimulante e promissor, os primeiros trabalhos científicos do grupo foram feitos utilizando as facilidades mencionadas acima e desenvolvendo *software* aplicativo para análise de imagens digitalizadas (ferramenta análoga e simplificada do que hoje em dia é o programa *SExtractor*²), com as quais foram concluídas as primeiras teses de mestrado e doutorado na área de astronomia **extragaláctica** do ON, a partir de 1983. Nesses trabalhos foram utilizadas placas fotográficas obtidas no OAB e cópias de placas fotográficas do ESO, digitalizadas no PDS, resultando na análise de propriedades estruturais de **galáxias** e de aglomerados de **galáxias**.

Deve-se lembrar que foi nesse período que uma série de estudos seminais foram realizados, entre eles: *i*) a aplicação da função de correlação de 2 pontos³

¹ Ver o Capítulo “O observatório de montanha” neste Volume.

² *SExtractor* é um algoritmo desenvolvido para fazer a identificação de objetos em imagens digitalizadas, medir várias propriedades tais como a posição, a magnitude, e até fornecer o grau de similitude de um objeto identificado com a de uma estrela, entre outros parâmetros importantes para análises astronômicas.

³ Em **cosmologia**, função de correlação de 2 pontos é uma metodologia para determinar a aglutinação de **galáxias**: uma estimativa da aglutinação relativa a determinada escala de distância pode ser feita contando-se todos os pares de objetos separados por esta distância. As **galáxias** estão mais correlacionadas (aglutinadas) em pequenas escalas.

para avaliar a aglomeração de **galáxias**, como nos trabalhos de Jim Peebles e colaboradores, p. ex., Peebles (1980); *ii*) a determinação da relação entre a morfologia e a densidade ambiental para **galáxias**; *iii*) as primeiras iniciativas de elaboração de *softwares* de análise bidimensional de grandes áreas de céu; *iv*) e o início do primeiro levantamento espectroscópico (ver **espectroscopia**) sistemático moderno, conhecido como o *CfA Redshift Survey*⁴, feito por uma pequena equipe do *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* (CfA).

Distribuição das galáxias

O primeiro envolvimento do grupo em grande projeto internacional foi através do acordo feito com o CfA, ainda em 1980, para a realização do *Southern Sky Redshift Survey* (SSRS), estendendo para o hemisfério sul celeste o *CfA Redshift Survey*, dominado no norte pelo aglomerado de **galáxias** de Virgem, procurando-se, desta forma, obter amostra mais representativa do universo.

Para levar esse projeto adiante, alguns aspectos pioneiros tiveram que ser introduzidos. Em primeiro lugar, tratava-se de cooperação internacional entre o ON e o CfA, que mais tarde contou com a participação de pesquisadores da *California Institute of Technology* (*Caltech*) e da Universidade de Cape Town. Essa cooperação foi fundamental porque permitiu realizar observações no Brasil (OAB), EUA (*Mount Hopkins Observatory*, AZ), Chile (*Las Campanas Observatory*) e África do Sul (*South African Astronomical Observatory*), compensando desta forma a baixa eficiência das campanhas observacionais no OAB devido a condições climáticas adversas.

Em segundo lugar, permitiu a participação de tecnólogos brasileiros no desenvolvimento de um sofisticado sistema de redução e análise de dados e de um detector contador de fótons de grande sensibilidade, precursor dos CCDs⁵ atuais, permitindo explorar um volume de espaço bem maior do que possível anteriormente usando placas fotográficas (ver o Capítulo “Desenvolvimento de instrumentação” neste Volume). Embora o nome original desse detector fosse *Z-machine*, no Brasil ele ficou conhecido como detector Reticon, nome do fabricante de um dos componentes (Figura 1).

⁴ Em **cosmologia**, o **redshift** é uma medida da distância das galáxias porque todas se afastam umas das outras devido à expansão do universo. *Survey* é um levantamento de dados (observações), em geral sistemático e extenso.

⁵ CCD = *Charge Coupled Device*.

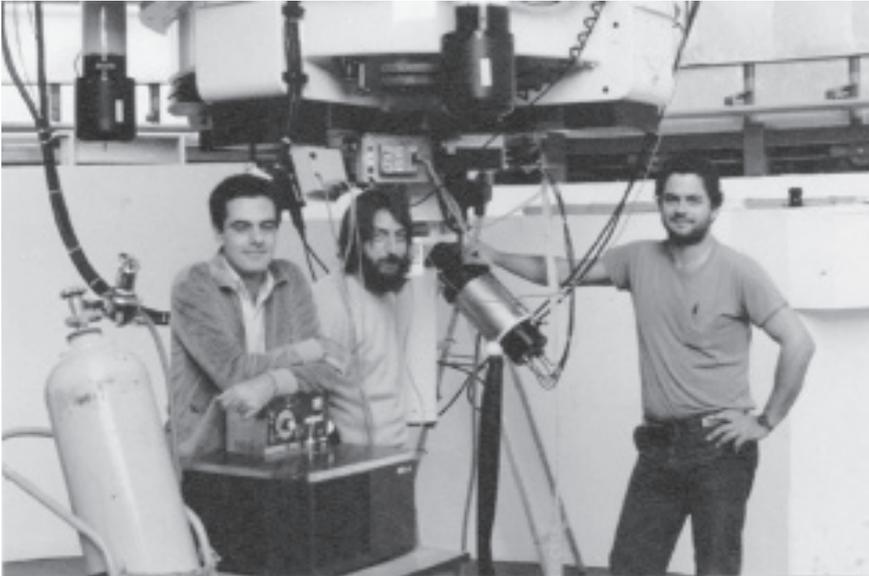


Figura 1. O detector Reticon acoplado ao **espectrógrafo Cassegrain**, no telescópio de 1,6 m do OAB. Da esquerda para a direita: Paulo Pellegrini, Luiz Nicolaci da Costa e Marcos Nunes (Foto Marcos Nunes)

A grande vantagem do instrumento, desenhado para observação de fontes fracas, era a possibilidade de observar o **espectro** sendo integrado em tempo real, o que minimizava o tempo gasto na observação. Além disso, o *software* associado permitia que o complexo processo de redução fosse feito de forma automatizada, apesar da precariedade dos computadores da época. Esta combinação de fatores tornava todo o processo extremamente eficiente e, até hoje, serve como referência no desenho de sistemas de redução e análise de dados. Outro aspecto que deve ser mencionado é que o levantamento só foi possível graças ao acesso, antes de sua publicação, ao primeiro catálogo de **galáxias** no hemisfério sul, similar àquele utilizado pelo *CfA Redshift Survey*.

O projeto trouxe ainda outra novidade para o cenário da astronomia nacional: um instrumento cujo desenvolvimento foi motivado por uma ciência específica, mas cuja versatilidade e eficiência permitiam o seu uso para uma variedade de outras aplicações científicas, especialmente pelo fato de o ON na época ser responsável por um telescópio de uso geral para toda a comunidade astronômica. Como de hábito nos observatórios internacionais, o projeto que desenvolve um instrumento motivado por um objetivo científico bem definido, tem sempre um tempo de telescópio garantido para esse

fim. Seguindo este modelo, o projeto SSRS utilizou uma fração do tempo útil do telescópio de 1,60 m no pico dos Dias (Brazópolis, MG) para garantir o sucesso do levantamento. Esta proposta, atualmente aceita por todos, foi na época mal compreendida, o que gerou grandes divergências na comunidade astronômica brasileira. Finalmente, uma solução foi encontrada, que permitiu o uso do detector pelos usuários do OAB.

É importante ressaltar que o detector Reticon teve grande impacto na astronomia brasileira. Por exemplo, num levantamento apresentado em reunião da Sociedade Astronômica Brasileira (SAB) no início dos anos 90, feito por iniciativa do pessoal do Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA, ex-OAB), foi mostrado que o detector Reticon foi o instrumento mais eficiente do observatório, tanto em número de publicações decorrentes de seu uso, quanto no de citações. Além disso, serviu para a formação de jovens pesquisadores que, logo depois de formados, participaram de programas de pós-doutoramento em importantes universidades americanas (p. ex., *Caltech*, Universidade de Cornell e Universidade da Califórnia). Quanto aos tecnólogos, estes não foram mais bem aproveitados em sua capacitação devido à crise econômica brasileira no fim da década de 80, que inviabilizou por alguns anos novos projetos de desenvolvimento instrumental.

Os resultados da primeira parte do levantamento SSRS, realizado entre 1982 e 1987, foram publicados a partir de 1988 e o catálogo, com cerca de 2 mil **galáxias** com medidas de velocidades **radiais** foi publicado em 1991. Convém mencionar que, na época, 2 mil medidas eram um número expressivo, considerando que as observações eram feitas de uma **galáxia** por vez. Essa limitação só seria superada bem mais tarde com a realização dos projetos *Las Campanas Redshift Survey*, *2dFGalaxy Redshift Survey*⁶ (2dF) no *Anglo-Australian Telescope* do *Anglo-Australian Observatory* (AAO) e o *Sloan Digital Sky Survey*⁷ (SDSS) no *Apache Point Observatory*, NM, EUA, utilizando sistemas de múltiplas fibras.

O projeto SSRS mostrou que o universo local⁸ na direção oposta ao aglomerado de Virgem é um pouco menos denso que o observado pelo CfA, propiciando a identificação de grandes regiões vazias de **galáxias** (*voids*) e grandes estruturas na forma de paredes (*walls*). Novos grupos e aglome-

⁶ www2.aao.fgov.au/2dFGRS/

⁷ www.sdss.org

⁸ Atualmente define-se o universo local como o volume esférico ao nosso redor com raio de cerca de 50 milhões a.l., dentro do qual as **galáxias** podem ser estudadas com razoável detalhe, além de conter os ambientes galácticos mais representativos, desde os vazios até os aglomerados mais massivos.

rados de **galáxias** foram identificados e suas propriedades globais determinadas. **Galáxias** com atividade nuclear (ver **Núcleo ativo de galáxia**) também foram descobertas durante o projeto, assim como uma **supernova**, esta última de modo casual, por ser mais brilhante que o núcleo da **galáxia** hospedeira.

Na tentativa de obter uma amostra representativa do universo local, um grande esforço foi realizado de forma a definir uma amostra de **galáxias** consistente com aquela observada na segunda fase do levantamento executado pelo CfA (*CfA2 Redshift Survey*). Essa amostra começou a ser observada a partir de 1987 e, numa tentativa de melhorar a eficiência do levantamento, o detector Reticon foi transferido para o *Complejo Astronomico El Leoncito* (CASLEO), situado próximo à cidade de San Juan, Argentina, em meados de 1988. Esta mudança foi motivada pela necessidade de melhorar a eficiência das observações que, na época, já incluíam objetos menos brilhantes, em um sítio mais promissor como aquele oferecido pelo CASLEO. Essa mudança foi promovida pelo então ministro da Ciência e Tecnologia, Renato Archer, e exigiu muita preparação, culminando com a realização de um *workshop* técnico/científico no CfA com a participação das equipes americana, brasileira e argentina para a transferência de conhecimento.

Velocidades **radiais** foram medidas para um total de 5.500 **galáxias** mais brilhantes do que a magnitude aparente 15,5 na **banda** B⁹. Os resultados do levantamento CfA2–SSRS2 foram publicados em 1994 e um mapa da distribuição de **galáxias** desse artigo é apresentado na Figura 2. Esse mapa foi o primeiro a proporcionar uma visão panorâmica e mais representativa do universo confirmando a existência de grandes regiões vazias, e que a chamada *Great Wall* (Grande Parede) não era uma estrutura atípica, nem seu aparecimento nos mapas era causado por problemas na seleção da amostra, mas sim que estruturas semelhantes existem em outras direções do espaço. Foi então, confirmada desta forma a conclusão anterior sobre a natureza das estruturas em grande escala e sua implicação sobre a origem e evolução do universo.

⁹ No sistema fotométrico UBV são usados três filtros que permitem a passagem da luz de um astro em três **bandas** do **espectro** eletromagnético: U (ultravioleta), B (azul) e V (luz visível).

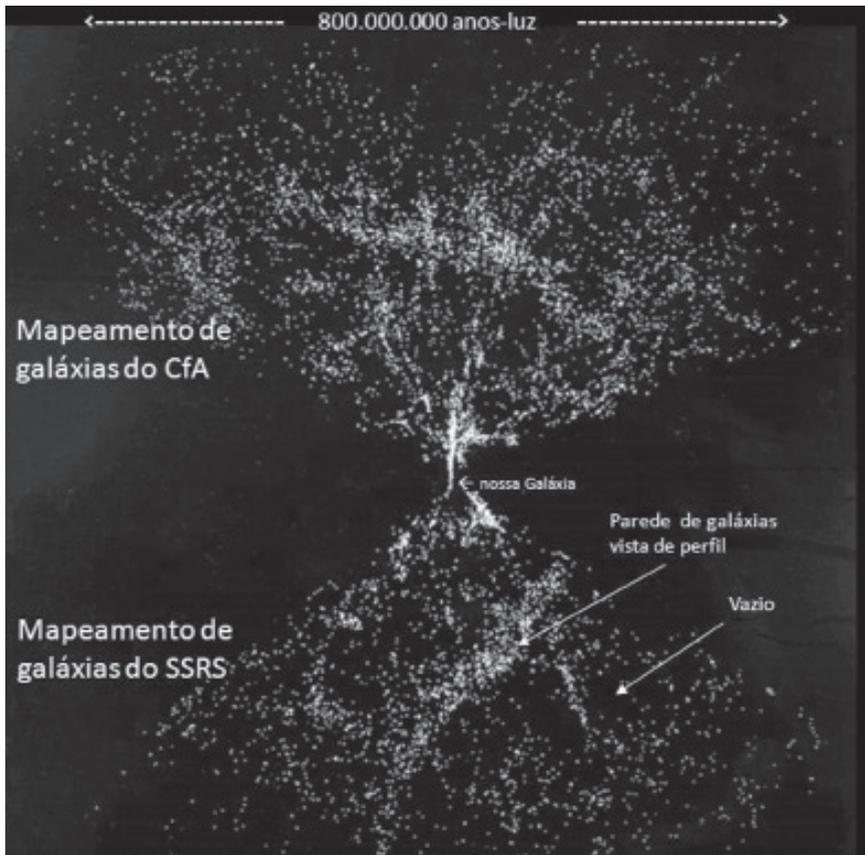


Figura 2. Distribuição de cerca de 15 mil **galáxias** dos mapeamentos *CfA2* e *SSRS2*. Cada ponto representa uma **galáxia**. Grandes estruturas como "paredes" e "vazios" são exemplificadas. Uma escala de distância em a.l. (anos-luz) é mostrada no topo (Adaptação: Paulo Pellegrini)

Os resultados obtidos tanto pelos participantes desse projeto, quanto pelos pesquisadores do outro projeto, representaram por mais de uma década a referência para as análises da estrutura em grande escala no universo e das relações entre propriedades das **galáxias** e o meio ambiente onde elas se encontravam. Em particular, os resultados dessas análises já mostravam um universo pouco denso, compatível com um modelo de matéria escura fria, com constante cosmológica¹⁰ (Figura 3).

¹⁰ Ver o Capítulo "Cosmologia teórica" neste Volume.

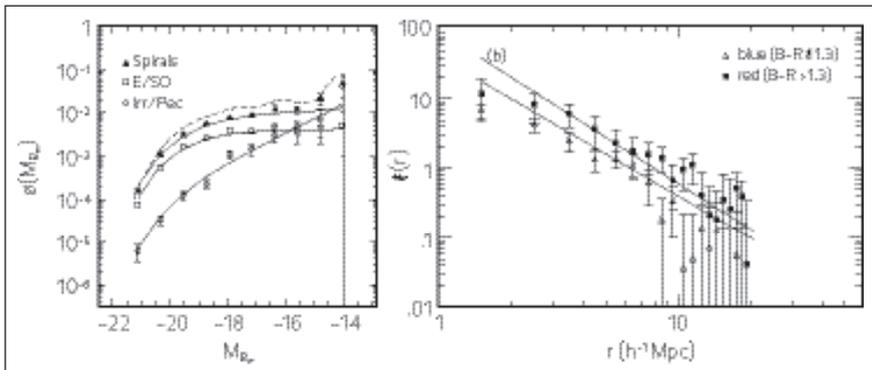


Figura 3. Funções de luminosidade¹¹ (à esquerda) e de correlação (à direita), obtidas com a amostra SSRS2 para diferentes tipos de galáxias contribuíram para quantificar as propriedades (quantidade e grau de aglutinação) desses objetos no universo local (Fontes: Marzke *et al.*, 1998 e Willmer *et al.*, 1998)

Mapeamentos adicionais foram realizados pelo grupo e, em particular, um efetuado na direção do aglomerado de *Hydra-Centaurus* revelou indícios que estudos posteriores identificaram como uma grande concentração de galáxias (oculta pela poeira da **Via Láctea**) que foi denominada “Grande Atrator”, tema este que dominou por algum tempo as discussões na área **extragaláctica**.

Concluindo este ciclo, em 1989 o grupo realizou uma reunião internacional denominada *Large-Scale Structures and Peculiar¹² Motions in the Universe*, no Rio de Janeiro, com a participação dos mais importantes pesquisadores em atividade nesse tema. O objetivo foi o de apresentar os resultados do levantamento recém-finalizado, avaliar as novas tendências da área e explorar a possibilidade da participação brasileira na construção de um radiotelescópio de grandes dimensões, similar àquele localizado em Arecibo, Porto Rico, a ser instalado no sul do Brasil denominado *Large Southern Radio Telescope* (LSRT, Figura 4). Infelizmente, apesar do apoio dado pelo *Decadal Survey* presidido por John Bahcall e o interesse de grande parte da comunidade brasileira, o então secretário de Ciência e Tecnologia optou por não dar prosseguimento ao estudo de sua viabilidade.

¹¹ Função de luminosidade de galáxias é a curva que mostra o número de galáxias por unidade de volume, para faixas sucessivas do valor da luminosidade.

¹² Ver Peculiar.

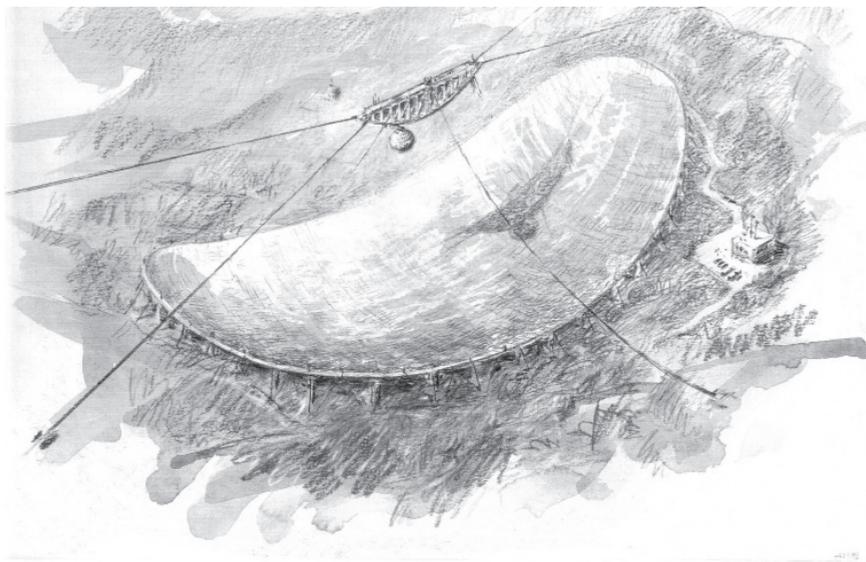


Figura 4. Concepção artística do LSRT (Arquivo dos autores)

Talvez o principal resultado da reunião de 1989 no Rio de Janeiro tenha sido a demonstração do uso de indicadores secundários de distância de **galáxias** que, combinados com a medida de velocidade **radial**, podiam determinar a componente **radial** da velocidade **peculiar** de uma **galáxia**. O importante é que, a partir do campo de velocidades **peculiares**, é possível mapear a distribuição de massa tanto luminosa (representada pelas **galáxias**) quanto escura¹³, pois esses movimentos são causados pelo campo gravitacional. Essa possibilidade abriu uma nova janela para medir os parâmetros cosmológicos que caracterizam o universo.

Uma das primeiras análises usando medidas de velocidades **peculiares** compiladas durante a década de 80, sugeria que as **galáxias** da nossa vizinhança apresentavam um movimento sistemático de grande amplitude na direção do aglomerado de *Hydra-Centaurus* (o Grande Atrator). Esse resultado sugeria um universo denso, discordando significativamente dos resultados obtidos a partir da distribuição de **galáxias**. Esta discordância causou grandes debates e motivou em grande parte o esforço observacional de vários grupos, inclusive do grupo brasileiro, de mapear o campo de velocidades **peculiares** de **galáxias**, procurando definir amostras em todo céu mais homogêneas, e com dados obtidos com instrumentação mais moderna.

¹³ Ver o Capítulo “Cosmologia teórica” neste Volume.

Essa e outras questões científicas motivaram o surgimento de projetos como o 2dF realizado entre 1997 e 2002 e especialmente o SDSS iniciado em 2000, significando mudança dramática na forma de se obter dados na área de astronomia **extragaláctica**. Utilizando **espectrógrafos** com centenas de fibras, a eficiência e qualidade de seus dados passaram a superar as iniciativas realizadas até então de determinações de **redshifts** individuais.

Distribuição da matéria (inclusive a escura)

Como dito antes, para mapear a distribuição de matéria no universo local é necessário, em primeiro lugar, mapear o campo de velocidades **peculiares**. O grande desafio é que esse tipo de estudo requer amostras cobrindo todo o céu, o que exige acesso a telescópios nos dois hemisférios do globo. Além disso, são necessárias observações espectroscópicas¹⁴ (no **óptico** e em ondas de rádio¹⁵), e fotométricas¹⁶ (no **óptico** e infravermelho). Para as **galáxias espirais**, utiliza-se como medida de distância a “relação *Tully-Fisher*” entre a **luminosidade** e a máxima velocidade de rotação da **galáxia**, e para as **elípticas**, a relação entre o diâmetro característico da **galáxia** e a dispersão de velocidades¹⁷ das estrelas que a constituem. O motivo de se usar estas duas amostras é o de poder verificar se os resultados são robustos, uma vez que estes dois tipos de **galáxias** estão localizados em ambientes distintos e dependem de diferentes observáveis.

Para atingir esse objetivo, duas colaborações foram formadas para obtenção dos dados necessários para as duas amostras consideradas. No caso da amostra das **espirais**, isso foi feito com um dos autores (LNC) participando de um projeto organizado no fim da década de 80 envolvendo: *i*) a obtenção de **curvas de rotação** no **óptico** realizadas na Austrália; *ii*) medidas fotométricas na **banda I**¹⁸ realizadas no *Cerro Tololo Interamerican Observatory* (CTIO) e no observatório do consórcio *Michigan-Dartmouth-MIT* (MDM) e *iii*) velocidades de rotação medidas em ondas de rádio a partir de observações realizadas no *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO) em Green Bank, WV, e no radiotelescópio de 300 m de Arecibo, Porto Rico.

¹⁴ Espectroscópico refere-se à **espectroscopia**.

¹⁵ Ver **radioastronomia**.

¹⁶ Fotométrico refere-se à **fotometria**.

¹⁷ Dispersão de velocidades é uma medida do espalhamento dos valores das velocidades em torno de um valor médio. No caso das **galáxias elípticas**, isto está associado ao movimento desordenado das estrelas que reflete a quantidade de matéria nesse objeto.

¹⁸ **Banda** fotométrica no infravermelho próximo.

No caso do projeto ENEAR (*Early-type NEARby galaxies*) liderado pelo grupo brasileiro, este teve novamente que inovar na sua estratégia. Para obter uma amostra significativa de objetos em todo o céu era necessário ter acesso a diferentes telescópios nos dois hemisférios. Para atingir este objetivo, um acordo iniciado pelo coordenador do projeto com o ESO, resultou na alocação de tempo do telescópio de 1,5 m do ESO no Chile para projetos de pesquisa do ON. Desta forma foi possível obter dados fotométricos (para medir os diâmetros característicos) e espectroscópicos (para determinar as velocidades **radiais** e dispersão de velocidades), para toda amostra selecionada. Isto foi possível graças a sucessivas missões observacionais nos telescópios do: *i) CASLEO; ii) CTIO; iii) ESO; iv) MDM; v) Mount Hopkins Observatory e vi) LNA.*

Esta iniciativa foi também benéfica para outros grupos brasileiros cuja pesquisa tivesse caráter de levantamento, promovendo colaborações entre pesquisadores do ON e de outros institutos, dando início a uma nova forma de atuação, similar àquela que já vinha sendo feita no exterior, e dando melhor aproveitamento ao tempo de telescópio.

Os resultados do projeto ENEAR mostraram que a distribuição da matéria escura segue essencialmente a da matéria luminosa, e que os espaços vazios de **galáxias** não são preenchidos por nenhuma matéria. Esses resultados eram coerentes com análise similar para as **galáxias espirais**, formando um quadro consistente para descrever a distribuição de matéria e o campo de velocidades em grande escala. Utilizando uma amostra maior, mais homogênea e com medidas de melhor qualidade, as discrepâncias entre as estimativas de densidade do universo baseadas no espectro de potência¹⁹ das **galáxias**, e aquelas inferidas a partir das velocidades **peculiares** foram resolvidas, indicando um universo plano e de baixa densidade (Figura 5). A hipótese de um universo plano e de baixa densidade foi confirmada de forma mais direta pelos resultados obtidos em 1998 a partir da medida das distâncias de **supernovas Ia**, que indicou que o universo está se expandindo de forma acelerada (**expansão acelerada**). A importância desta descoberta para a física fundamental foi reconhecida pela concessão do Prêmio Nobel de Física de 2011 para os líderes dos dois principais grupos envolvidos nessa descoberta.

¹⁹ Em **cosmologia**, o espectro de potência fundamenta uma metodologia para determinar o grau de aglutinação de **galáxias** (análoga à função de correlação de 2 pontos), que analisa a distribuição desses objetos, inversa à escala de tamanho, através do parâmetro chamado potência. Maior potência representa maior aglutinação.

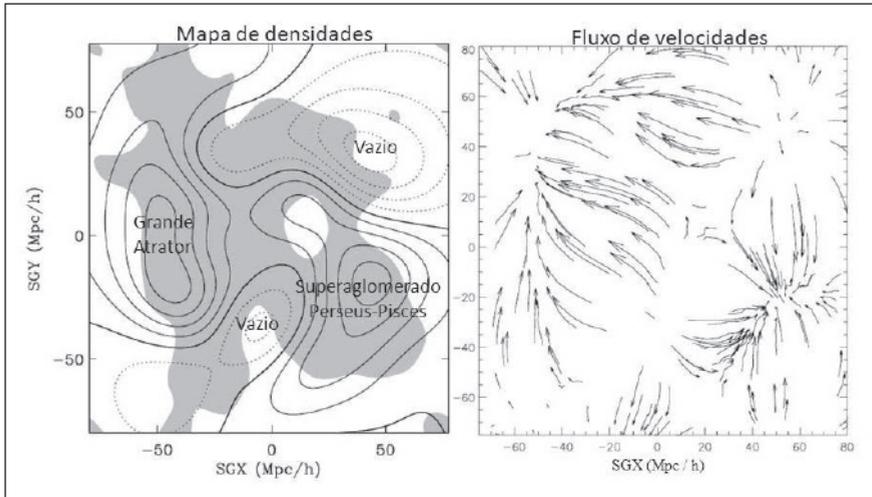


Figura 5. Mapa de densidades (à esquerda) reconstruído a partir do campo de velocidades (à direita) da amostra de **galáxias** do projeto ENEAR. Ambos os painéis são projeções da densidade e do fluxo de **galáxias** sobre um plano fictício, de coordenadas (SGX, SGY) denominado Plano Super Galáctico. Os máximos de densidade encontrados correspondem às grandes concentrações de **galáxias** conhecidas, que são indicadas no painel à esquerda (Zaroubi et al., 2001)

O projeto ENEAR também produziu dados que permitiram estudo mais detalhado de propriedades de **galáxias elípticas**, especialmente aquelas envolvendo relações entre a dispersão de velocidades estelares e a metalicidade²⁰ de suas estrelas, colocando alguns vínculos em modelos de formação de **galáxias**. Além disso, possibilitou a elaboração de uma das melhores bases de dados de **galáxias elípticas** do universo local, anteriores ao levantamento SDSS, englobando cerca de 1.200 determinações de dispersão de velocidades estelares e de parâmetros fotométricos para cerca de 1.300 **galáxias elípticas** e S0²¹. As últimas análises realizadas pelo grupo com esses dados datam de 2008.

Com o término de levantamentos como o Cfa2, SSRS2, ENEAR e os das **galáxias elípticas**, chegava ao fim a era da exploração do universo próximo

²⁰ A metalicidade de uma **galáxia** está relacionada com a proporção de elementos químicos diferentes do H e do He. O grau de metalicidade depende da quantidade de material que as estrelas devolvem ao meio interestelar através de processos diversos, entre eles, o da explosão de **supernovas**.

²¹ **Galáxias** classificadas como S0 são as lenticulares (com forma de lente), de morfologia intermediária entre **galáxias elípticas** e **espirais**. As lenticulares têm um disco achatado, mas nem sinal de braços espirais.

envolvendo observações de objetos individuais, correspondendo a amostras esparsas do universo local. Iniciava-se a era de levantamentos com instrumentos dedicados, com significativas melhorias na infraestrutura computacional, e a implantação de verdadeiras “linhas de montagem” para a redução de grandes volumes de dados. Esses dados são armazenados em bancos com interfaces cada vez mais sofisticadas, permitindo a garimpagem e uso para uma ciência além da prevista originalmente no projeto. Por outro lado, as colaborações passam a envolver centenas de participantes, e requerem acesso a grandes telescópios. Estas mudanças, ocorridas ao longo da década de 90, abriram nova janela de pesquisa e exigiram novo modelo operacional, em particular, para atacar problemas na chamada “**cosmologia** na era da precisão”. Assim, o grupo, para manter competitividade, teve que se adaptar aos novos tempos e participar de colaborações internacionais de grande porte descritas abaixo em maior detalhe.

Grandes levantamentos

Dark Energy Survey (DES)

A importância da descoberta da **expansão acelerada** do universo levou as agências financiadoras dos EUA a indicar um painel de cientistas, conhecido como o *Dark Energy Task Force* (DETF) para analisar o problema e sugerir formas de estudar a natureza deste fenômeno. Os resultados desta análise estão descritos no relatório²² preparado por este painel que inclui recomendações para projetos de pesquisa no tema. Este documento estabeleceu uma sequência temporal de metas a serem alcançadas através de projetos com um grau crescente de complexidade e de custos. Isto teve como consequência a formação de grandes consórcios internacionais, estreitando a colaboração entre físicos e astrônomos, tanto para arcar com os custos envolvidos, quanto para formar equipes cobrindo um amplo espectro de conhecimento, seja na área científica ou tecnológica. Em particular, a maioria dos projetos atuais são geradores de grandes volumes de dados que precisam ser armazenados, processados e analisados e exigem uma infraestrutura de *hardware* e *software* que permita analisá-los de forma eficiente.

Neste cenário, o grupo identificou no DES²³ uma continuidade natural de sua linha de atividade e *expertise*, além do fato de que este projeto é reconhecido como um dos levantamentos mais importantes da década. Este levantamento

²² <http://arxiv.org/abs/astroph/0609591>

²³ www.darkenergysurvey.org

fotométrico tem como objetivo cobrir entre 2013 e 2018, uma área de 5 mil graus quadrados²⁴ do céu, produzindo um acervo de dados sem precedentes em termos de área e profundidade. Do ponto de vista científico, o grande diferencial do projeto é a utilização de quatro diferentes técnicas combinadas para determinar as propriedades da energia escura²⁵ e a sua variação ao longo do tempo: *i*) a estatística de aglomerados de **galáxias**. *ii*) a escala característica da distribuição da matéria bariônica²⁶; *iii*) o efeito fraco de lentes gravitacionais²⁷; e *iv*) a distância de **supernovas**. Com seu sucesso observacional praticamente garantido, o acervo de dados do projeto DES, estimado em alguns PB²⁸, representará o maior conjunto de dados homogêneos na atualidade e conterà cerca de 300 milhões de **galáxias**, 20 mil aglomerados de **galáxias**, 2 mil detecções de **supernovas**, milhões de estrelas da **Via Láctea**, além de objetos do sistema solar, viabilizando estudos numa grande diversidade de temas na área de astronomia.

Em particular, sendo um levantamento fotométrico, o grupo poderá aproveitar a experiência adquirida por um dos autores (LNC) com o projeto *ESO Imaging Survey* (EIS), que coordenou por oito anos no *European Southern Observatory* (ESO). O projeto EIS utilizou várias combinações de telescópio e câmeras imageadoras no **óptico** e no infravermelho próximo para produzir a seleção de amostras adequadas para uso em programas observacionais da primeira geração de instrumentos dos telescópios de 8 m do ESO. Como o *software* desenvolvido para esses programas podia servir de ponto de partida para o desenvolvimento de *software* para o DES, isso foi usado para negociar a entrada de uma equipe de pesquisadores brasileiros na colaboração DES em 2006, quando esta ainda se encontrava em formação. Isto representou uma redução significativa do custo de participação.

Outra inovação foi a de criar consórcio de pesquisadores de diferentes instituições para formar uma rede de pesquisa denominada “DES-Brazil”. Nesse consórcio participam cientistas e tecnólogos de várias instituições brasileiras descritas abaixo. Desta forma, foi possível arregimentar um time com *experti-*

²⁴ Assim como o grau (°) mede uma parte do círculo, 1 grau quadrado — (1°)² — mede uma parte de uma esfera que subtende 1°x1°.

²⁵ Ver o Capítulo “Cosmologia teórica” neste Volume.

²⁶ Matéria bariônica é a matéria ordinária formada de prótons e nêutrons (ver **bárions**), distinta de formas exóticas de matéria.

²⁷ A presença de massa encurva a trajetória da luz que passa por suas proximidades e pode causar o efeito de lente gravitacional. Quando o efeito é forte, a luz de um objeto distante pode se apresentar na forma de arcos ou múltiplas imagens. Isso não acontece quando o efeito é fraco, no entanto, por técnicas estatísticas é possível determinar a massa causadora desse efeito.

²⁸ PB é abreviação de *petabyte*, unidade de informação equivalente a 1 quatrilhão de *bytes*.

ses complementares, viabilizando o aproveitamento máximo dos dados, já que estes permitem os mais variados tipos de análise, embora o foco principal do projeto seja o estudo da natureza da energia escura.

O DES é um experimento de Fase III²⁹ como definido pelo DETF, aprovado para financiamento norte-americano pelo *National Science Foundation* (NSF) e *Department of Energy* (DOE) e gerenciado através de acordo estabelecido entre os laboratórios nacionais americanos *Fermi National Accelerator Laboratory* (Fermilab), o *National Center for Supercomputing Applications* (NCSA), *Lawrence Berkeley National Laboratory* (LBL) e o *National Optical Astronomical Observatory* (NOAO). A colaboração internacional envolve centenas de pesquisadores, cerca de 30 instituições que contribuíram tanto financeiramente quanto em termos de trabalho, reconhecidos como essenciais para o projeto. O projeto envolveu: *i*) a construção de uma câmara imageadora de alta eficiência (DECam) de 570 *megapixels*³⁰, com componentes no estado da arte, utilizando 5 **bandas** ópticas; *ii*) a reforma do telescópio Blanco de 4 m do CTIO, no Chile, onde o projeto tem mais de 500 noites de observação alocadas; *iii*) o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento dos dados obtidos (DESDM) e *iv*) o desenvolvimento de um portal científico sendo usado para a validação das reduções, produção de catálogos e *workflows*³¹ para análise científica desenvolvido pela equipe brasileira.

Para minimizar o tempo de parada do telescópio Blanco para a montagem e testes da DECam, foi construído no Fermilab um simulador de telescópio (Figura 6). Só esse simulador custou US\$ 2 milhões e exemplifica uma das vantagens de se colaborar com os grandes laboratórios nacionais norte-americanos, que possuem excelente infraestrutura. O simulador foi construído com a finalidade de testar a integração da câmara ao ambiente do telescópio e treinar a equipe na montagem e na desmontagem da câmara. Outro exemplo das vantagens de uma colaboração mais ampla, é que os CCDs utilizados na câmara DECam foram produzidos no LBL, laboratório este possuidor de vasta experiência nessa área.

²⁹ A pesquisa está dividida em 4 fases. A Fase III compreende projetos de curto prazo e custo médio que estão sendo propostos.

³⁰ *Megapixel* = 1 milhão de *pixels*.

³¹ *Workflow* científico é o desenho ou esquematização de procedimentos sequenciais visando à execução de *pipelines* (ver adiante) ou análises para fins científicos.

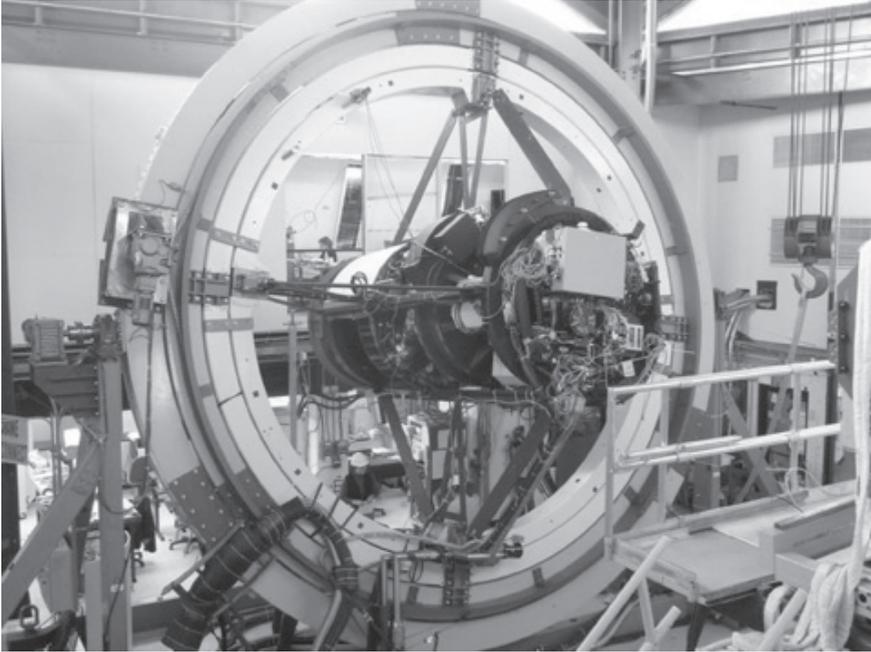


Figura 6. A DECam instalada no simulador do telescópio Blanco, construído no Fermilab (<http://www.darkenergysurvey.org/>)

O uso da DECam no telescópio Blanco teve início em setembro de 2012, produzindo imagens de alta qualidade em todo o seu campo focal, desde a primeira exposição. Os dois meses seguintes foram usados para testes de engenharia, que incluíram a verificação das inúmeras partes da câmara e do próprio funcionamento do telescópio e de seu novo sistema de controle. Nesse período foi instalado um dos *softwares* desenvolvido pela equipe brasileira, o *pipeline*³² *Quick Reduce* (QR), usado para verificar a qualidade das imagens obtidas pela DECam em tempo real (Figura 7).

³² *Pipeline* científico é uma sequência de procedimentos encadeados que são aplicados, geralmente a dados, transformando-os de um estágio mais simples para um mais elaborado.



Figura 7. O *pipeline Quick Reduce* desenvolvido pela equipe brasileira para a colaboração DES, em operação no telescópio Blanco no CTIO, Chile (Arquivo dos autores)

Entre novembro de 2012 e fevereiro de 2013 foi feita a verificação científica dos dados envolvendo a colaboração DES, a comunidade de usuários do CTIO e a equipe técnica do CTIO. Em março de 2013 a DECam (Figura 8) foi entregue para uso da comunidade e em setembro desse mesmo ano tiveram início as observações do projeto DES. Todo este processo ocorreu em tempo recorde, quando comparado com a disponibilização de outros instrumentos da mesma complexidade.

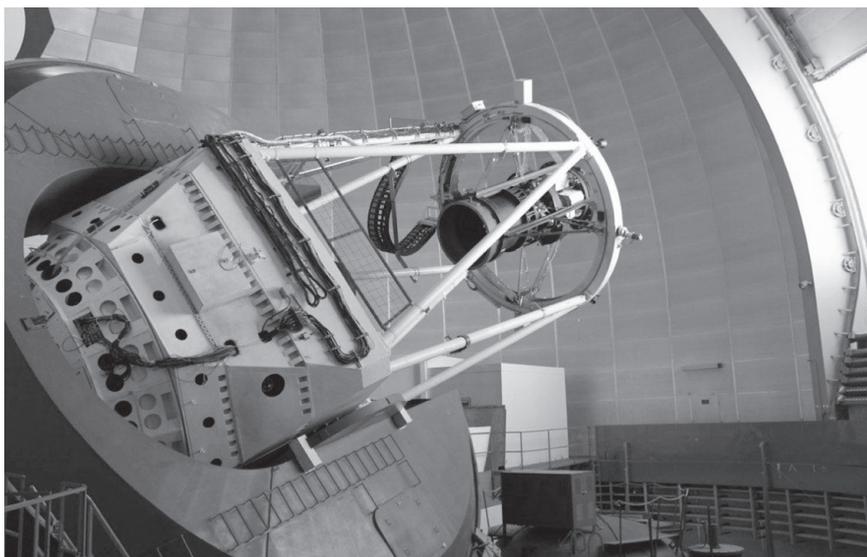


Figura 8. A DECam instalada no telescópio Blanco de 4 m do CTIO, Chile (<http://www.darkenergysurvey.org/>)

Os dados acumulados durante o período de verificação científica foram reduzidos pelo NCSA e distribuídos para a colaboração. Vários grupos estão analisando esse conjunto que já constitui a maior amostra disponível na profundidade considerada. Esses dados estão sendo usados pela equipe brasileira para testar os *pipelines* desenvolvidos para: *i*) identificar novos dados no banco do NCSA; *ii*) transferir catálogos e imagens para o Brasil; *iii*) ingerir os catálogos no banco de dados local; *iv*) avaliar a qualidade das reduções; *v*) preparar catálogos adequados para diferentes análises e *vi*) alimentar os *pipelines* de análise científica. Os *pipelines* de análise incluem: *i*) a estimativa de **redshifts** fotométricos por diferentes algoritmos; *ii*) o estudo da evolução de **galáxias**; *iii*) a identificação de aglomerados de **galáxias**, entre outros. Esses *pipelines* se encontram disponíveis num portal científico que é um sistema integrado para o gerenciamento de *workflows* desenhado para facilitar o manuseio de grandes volumes de dados. Esse portal será usado na operação do DES verificando a qualidade dos dados a serem liberados para a colaboração e mais tarde para o público. Ele fornece à colaboração os resultados dos testes, sendo o veículo responsável pela preparação dos catálogos oficiais para uso nas análises científicas.

Em fevereiro de 2014 o levantamento encerrou o primeiro ano de observações acumulando mais de 11 mil exposições ao longo de 105 noites, cobrindo uma área da ordem de 2 mil graus quadrados. Esses dados estarão disponíveis para análise pela colaboração a partir de agosto de 2014.

Sloan Digital Sky Survey III

Iniciado há mais de duas décadas o SDSS, além de ter sido o precursor dos grandes levantamentos envolvendo centenas de pesquisadores, ainda é um dos mais bem sucedidos projetos da astronomia atual, tendo em vista o impacto de seus resultados em diferentes áreas de pesquisa. Igualmente importante tem sido sua capacidade de evoluir, aprimorando e desenvolvendo **espectrógrafos** que abrem novas oportunidades de pesquisa, enriquecendo a infraestrutura já montada. Em particular, o SDSS ainda oferece o mais eficiente **espectrógrafo** de grande campo, o que define a estratégia científica adotada na escolha dos projetos de pesquisa apoiados. O projeto contabilizou em junho de 2013 mais de 5 mil publicações arbitradas que foram citadas cerca de 200 mil vezes. O SDSS representou na prática a transição para uma era de grandes colaborações internacionais e uma nova sociologia com respeito à forma de interação entre cientistas. O grande número de autores nos trabalhos produzidos é o resultado natural de uma concentração de alta capacitação (científica e técnica) e de re-

curso financeiros de diversas instituições. Sem ambos os fatores, dificilmente o impacto incontestável do projeto teria sido atingido.

O projeto SDSS-III é uma continuação do projeto inicial e consiste de quatro levantamentos distintos: *i*) BOSS que está mapeando a distribuição espacial de **galáxias**, **quasares** e sistemas Lyman-alpha para detectar a escala característica da distribuição de **bárions**; *ii*) SEGUE e *iii*) APOGEE para o estudo do **óptico** e no infravermelho, respectivamente, da estrutura cinemática e química da **Via Láctea**; e, por fim, *iv*) MARVELS para a busca e caracterização de planetas extrassolares e/ou estrelas de baixa massa (**anãs marrons**) e de suas estrelas hospedeiras, que auxiliam os estudos da formação de sistemas planetários.

O envolvimento do grupo com atividades em Astronomia Extragaláctica e Cosmologia do ON no SDSS-III foi fruto da busca por parcerias internacionais dos coordenadores do próprio projeto internacional. A afinidade com tópicos de subprojetos como o levantamento da distribuição de galáxias para o mapeamento do sinal da oscilação acústica de bárions tinha claras vantagens para a inserção deste grupo nesta colaboração internacional. Além disso, como visão de que a atuação do ON como uma instituição nacional deva ser consolidada em ações práticas, a participação num projeto com vertentes científicas nas áreas extragaláctica, estelar e planetária tornaram a participação no SDSS-III uma excelente oportunidade a ser coordenada pelo instituto. Assim, de uma forma também pioneira, um acordo de cooperação internacional concretizou a participação brasileira num projeto internacional, com contrapartida financeira do ON.

Tendo em vista a variedade de tópicos científicos e seguindo o exemplo adotado no caso do DES, um anúncio de oportunidade foi feito procurando identificar membros da comunidade interessados em participar deste projeto. Levando em conta o limite de participantes permitido pela colaboração internacional (correspondente ao valor pago), foi formada a rede denominada *Brazilian Participation Group* (BPG) constituída de pesquisadores, pós-doutorandos e alunos de diferentes universidades brasileiras e outras instituições. Este esquema tem permitido a participação brasileira proativa nos quatro experimentos, nas reuniões de colaboração e na publicação dos resultados em todos os levantamentos. Particularmente importante é a participação nos projetos BOSS e APOGEE que serão estendidos na próxima fase do projeto conhecida como SDSS-IV que terá três levantamentos (e-BOSS, APOGEE-2 e MANGA). No momento, a renovação da participação do BPG (com uma nova composição) está sendo negociada e, para reduzir os custos, o grupo brasileiro vem mantendo no Brasil um espelho do banco de dados primário do SDSS localizado na Universidade Johns Hopkins, visando atender às necessidades de pesquisadores brasileiros e como sistema de *backup* para aquela universidade.

Legado e visão de futuro

Esta trajetória de 35 anos, além de ter produzido resultados de impacto científico e de acompanhar as tendências da pesquisa internacional, mostrou a necessidade da criação de uma infraestrutura para apoiar projetos interinstitucionais. Para preencher essa lacuna foi criado em 2010 o Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia³³ (LIneA), que atualmente conta com a participação do Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC), do ON e da Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP) e do LNA, como convidado. O LIneA é um laboratório multidisciplinar e multiusuário de acesso internacional, criado para atender à demanda de pesquisadores, pós-doutorandos e alunos de institutos de pesquisa e departamentos universitários para lidar com o grande volume de dados gerados por levantamentos atuais como SDSS-III e DES e futuros como o *Dark Energy Spectroscopic Instrument*³⁴ (DESI) e o *Large Synoptic Survey Telescope*³⁵ (LSST).

As atividades do LIneA são apresentadas esquematicamente na Figura 9. Estas incluem: *i*) o desenvolvimento, manutenção e operação de um centro de dados para a transferência, armazenamento e processamento de grandes volumes de dados; *ii*) a distribuição de dados produzidos pelos levantamentos apoiados, bem como outros de relevância para análises científicas; *iii*) o desenvolvimento de algoritmos científicos, *pipelines* e um gerenciador de *workflows* científicos (Portal Científico); *iv*) o apoio logístico para o trabalho em rede e uma interface administrativa com as colaborações internacionais.

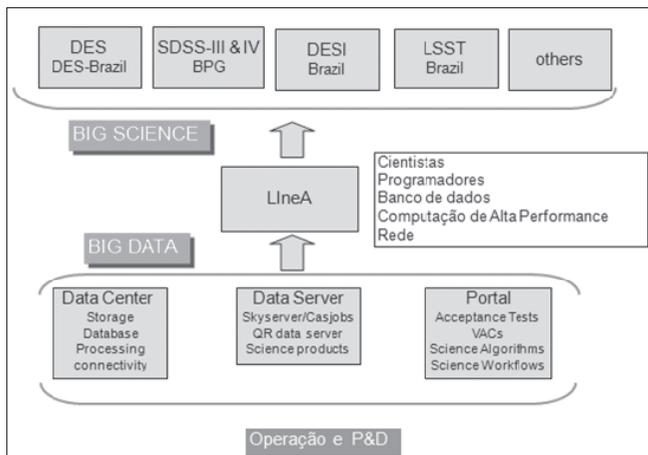


Figura 9. Esquema do LIneA que, através de sua infraestrutura de *Data Center*, *Data Server* e Portal Científico, apoia as atividades de ciência que envolvem grandes bases de dados (LIneA)

³³ www.linea.gov.br

³⁴ desi.lbl.gov

³⁵ www.lsst.org

A infraestrutura atual do LIneA consiste de dois ambientes, um de produção e outro para pesquisa e desenvolvimento. A natureza das atividades do laboratório exige alta capacidade de processamento e armazenamento e, para atender a essas necessidades, o ambiente de produção consiste de: *i*) um *cluster* de processamento; *ii*) um *cluster* dedicado ao sistema de compartilhamento de arquivos, essencial para a paralelização dos processos; *iii*) um sistema para o armazenamento de grandes volumes de dados; *iv*) um *cluster* de virtualização onde estão instalados os diversos serviços prestados aos usuários; *v*) uma máquina dedicada ao desenvolvimento de algoritmos; *vi*) um repositório de códigos para versionamento e preservação de código legado; *vii*) um *cluster* onde está instalado o sistema de gerenciamento de banco de dados usado para o DES; *viii*) um *cluster* onde estão instaladas as interfaces de acesso aos dados acumulados pelo SDSS ao longo dos últimos 14 anos; *ix*) *firewall*; *x*) uma máquina para o monitoramento da rede e *xi*) uma máquina dedicada à transferência de dados. Esta infraestrutura é permanentemente atualizada tentando atender às crescentes demandas.

Outro importante legado do trabalho foi a consolidação de redes de pesquisa como DES-Brazil e BPG. Nesses grupos participam tanto pesquisadores brasileiros com uma tradição de trabalho em diferentes áreas, quanto jovens pesquisadores e alunos que se aproveitam da exposição internacional que obtêm, através das teleconferências e reuniões internacionais para sua formação científica. Estes pesquisadores participam de grande número de reuniões organizadas pelas colaborações internacionais em diferentes locais, inclusive no Brasil (Figuras 10 e 11), apresentando seus resultados de pesquisa em diferentes grupos de trabalho. Esta interação constante e sistemática abre novos horizontes de pesquisa e fornece um aprendizado de trabalho em conjunto, ainda raro no Brasil, mas cada vez mais comum no cenário internacional. Destas redes participam pesquisadores, pós-doutorandos, alunos e tecnólogos de diferentes instituições que além do LNCC, ON e RNP incluem: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal Fluminense (UFF), Universidade de São Paulo (USP), Universidade Estadual Paulista (UNESP) (campus de São Paulo), *Leibniz Institute for Astrophysics Potsdam* (AIP), *Università di Padova* e *Observatoire de la Côte d'Azur* (OCA).



Figura 10. Participantes da reunião da colaboração DES patrocinada pelo DES–Brazil, realizada no Rio de Janeiro em 2009 (Arquivo dos autores)

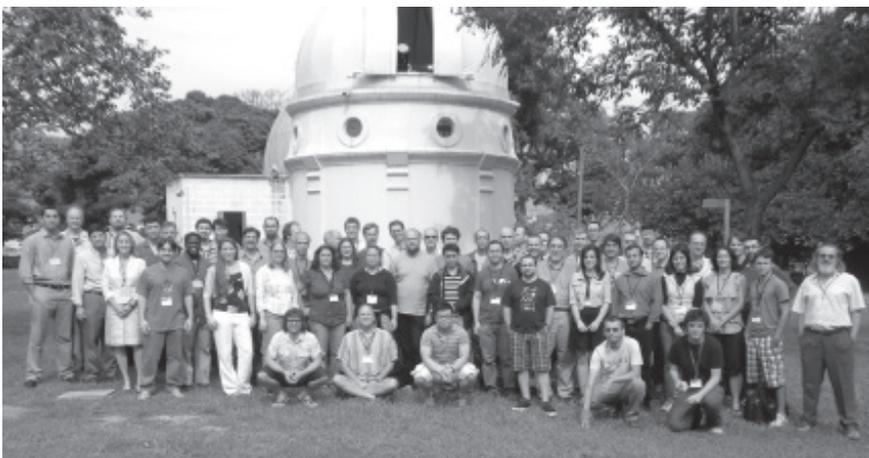


Figura 11. Participantes da reunião da colaboração SDSS–III, patrocinada pelo BPG, realizada no Rio de Janeiro em 2012 (Arquivo dos autores)

A experiência acumulada pela equipe do LIneA e dos consórcios DES–Brazil e BPG, e as lições aprendidas na execução dos respectivos projetos são um importante legado, pois habilitam a astronomia brasileira a se engajar em futuros levantamentos ainda mais ambiciosos. Além disso, a participação brasileira tanto no DES quanto no BPG foi paga, em parte, com o desenvolvimento de produtos como o portal científico, com a operação de um espelho do SDSS e com a implantação da infraestrutura computacional existente. Es-

tes investimentos são não só um legado para comunidade astronômica brasileira, mas também podem servir como moeda de troca para a entrada do Brasil em futuros projetos.

Um claro caminho para o futuro se abre com levantamentos como o SDSS-IV, DESI e LSST, todos com uma forte ênfase no estudo da natureza da energia escura, mas que geram dados que atendem às aspirações de inúmeras áreas de pesquisa. Também importante é o fato de que todos esses projetos fazem parte da estratégia de longo prazo desenvolvido pelo NSF e DOE. Esses projetos foram priorizados através de processos liderados pela comunidade científica como o *Decadal Survey*, conduzido pela comunidade astronômica norte-americana, e um processo semelhante (*Snowmass*) realizado pela comunidade norte-americana de físicos da área de **altas energias**.

O conhecimento científico que vem sendo acumulado com a participação brasileira no DES e o SDSS-III, somado à experiência técnica e ao patrimônio sendo instalado pelo LInEA, permite vislumbrar uma participação de jovens pesquisadores brasileiros extremamente proativa e competitiva para os próximos 25 anos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os pesquisadores e tecnólogos que colaboram ou colaboraram nos projetos acima mencionados.

Referências

Marzke, Ronald O.; da Costa, L. Nicolaci; Pellegrini, Paulo S.; Willmer, Christopher N. A. and Geller, Margaret J. (1998), The Galaxy Luminosity Function at $Z \approx 0.05$: Dependence on Morphology, *The Astrophysical Journal*, 503, 617–631.

Peebles, P. J. E. (1980), *The Large-Scale Structure of the Universe*, Princeton, NJ: Princeton University Press.

Willmer, Christopher N. A.; da Costa, L. Nicolaci and Pellegrini, Paulo S. (1998), Southern Sky Redshift Survey: Clustering of Local Galaxies, *The Astronomical Journal*, 115, 3, 869–884.

Zaroubi, S.; Bernardi, P. M.; da Costa, L. N.; Hoffman, Y.; Alonso, M. V.; Wegner, G.; Willmer, C. N. A. and Pellegrini, P. S. (2001), Large-scale power spectrum and structures from the ENEAR galaxy peculiar velocity catalogue, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 326, 375–386.