

# MC6 – ELAC 2015

© R.R.Rosa-INPE-MCTI

Proibida a reprodução sem a autorização do autor

## Tópicos de Cosmologia Computacional

Reinaldo Roberto Rosa

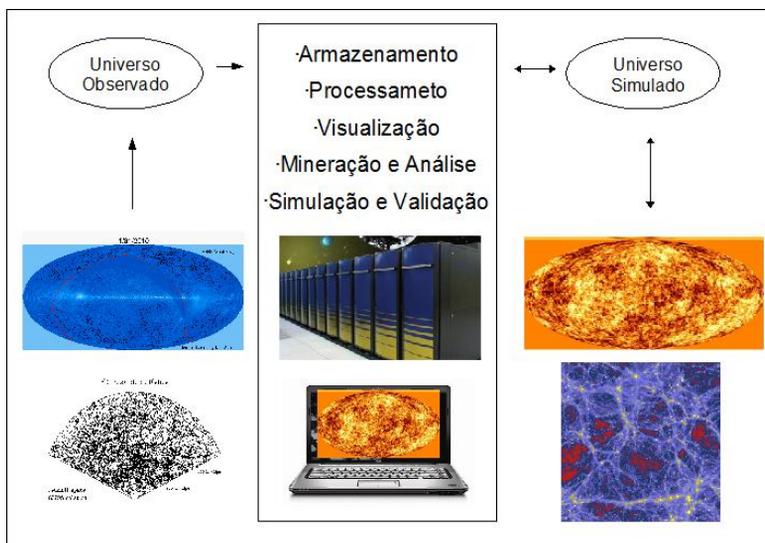
### *Resumo*

*Este Minicurso tenta apresentar, de forma introdutória e objetiva, os principais tópicos da cosmologia moderna abordados com o auxílio da matemática computacional e da computação de alto-desempenho. Os tópicos abordados estão dispostos em 2 partes. A Parte A, desenvolvida na presente edição compreende os seguintes tópicos: (i) Histórico da Cosmologia, Desafios Matemáticos e Computacionais; (ii) Gravitação e Física de Partículas: Espaço-tempo, Matéria e Energia nos Modelos Cosmológicos; A Parte B, apresentada apenas parcialmente na presente edição, compreende os tópicos: (iii) Observação e Simulação da Radiação Cósmica de Fundo; e (iv) Observação e Simulação da Formação de Estruturas em Grandes Escalas. Um último tópico, de caráter conclusivo, é apresentado na presente edição. Os textos referentes aos quatro últimos tópicos ainda estão em desenvolvimento e deverão ser concluídos até a próxima edição da Escola em 2011. De qualquer forma, todo material atualizado será disponibilizado na página da ELAC ao longo deste ano.*

### **11.1. Introdução ao Minicurso**

Um curso de Cosmologia moderna tem como grande desafio falar, como base em um imenso e complexo arsenal teórico e observacional, sobre a natureza do Universo. Hoje, mais do que nunca, a Cosmologia é uma ciência presente e fundamental na concepção de mundo dos indivíduos e das sociedades. Tem implicações diretas nos conhecimentos filosóficos, teológicos e socioculturais despertando debates profundos sobre a realidade e a existência humanas no Universo. Neste momento, quando recebemos sinais de partículas, estrelas e galáxias que existem apenas no passado, o conhecimento cosmológico pode contribuir para o despertar de uma nova consciência. Com uma envergadura tão extensa como essa, abordar os temas da ciência cosmológica em apenas seis horas torna-se impossível. Somos então obrigados a formular a seguinte questão: O que é imprescindível saber? Vislumbrando uma resposta, organizei este minicurso na forma de tópicos principais nos quais procuro destacar, quando for o caso, a componente computacional mais relevante. Hoje, a computação na cosmologia trata desde a coleta, processamento e

análise de dados observacionais até a simulação do Universo em diferentes fases da sua evolução. Como em qualquer outra área da ciência a computação atuará principalmente no armazenamento, tratamento e análise dos dados observados de forma a proporcionar um confronto detalhado e robusto com a teoria e dados obtidos através de experimentos numéricos, onde aparece novamente a computação de aplicada de forma contundente (ver Figura 1).



**Figure 11.1. Quadro da cosmologia computacional que será discutido como síntese deste Minicurso.**

Centenas de grupos de pesquisa internacionais dedicam-se ao estudo de assuntos profundamente específicos que vão da física de partículas até a colisão de galáxias e formação de grandes aglomerados que formam a estrutura do Universo observável. Nessa riqueza de escalas e processos, o conjunto de ingredientes teóricos fundamentais e interdependentes engloba a física de altas energias, a mecânica quântica relativística, a gravitação e teoria de campos, a física de plasmas e a física estatística. Portanto, o conhecimento físico subjacente a este *Tópicos* é de natureza multi e interdisciplinar, fortalecida pela presença imprescindível de métodos matemáticos e computacionais em praticamente todos os seus fundamentos. Como trata-se de um minicurso aberto ao público em geral, procurei evitar o uso de fórmulas matemáticas no texto principal. Um formalismo matemático mínimo e necessário será apresentado apenas na sala de aula (Este conteúdo será, na próxima edição, apresentado na forma de Apêndice).

Cabe aqui ressaltar que a elaboração deste minicurso foi motivada principalmente pelas pesquisas em cosmologia realizadas no Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada, o LAC ([www.lac.inpe.br](http://www.lac.inpe.br)). O LAC é um laboratório do INPE: um órgão civil do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) o qual congrega pesquisadores e tecnólogos, brasileiros e estrangeiros, em diversas áreas da ciência espacial. As pesquisas em cosmologia computacional no LAC, motivadas pelo extraordinário avanço da cosmologia, tiveram seu início em meados de 2001, através de colaborações com a Di-

visão de Astrofísica do INPE (DAS) e o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), localizado no Rio de Janeiro. O avanço espetacular da Cosmologia nas últimas duas décadas, quase um século após o nascimento da física moderna, deve-se sem dúvida aos grandes experimentos observacionais baseados na sofisticada tecnologia da informação desenvolvida nas últimas três décadas. Dessa forma, a importância da Cosmologia moderna no conjunto do conhecimento científico contemporâneo ficou estabelecida com o Prêmio Nobel de Física de 2006 outorgado aos cosmólogos americanos John Mather e George Smoot pela investigação da radiação cósmica de fundo (RCF) (*Cosmic Microwave Background radiation*, CMB): a assinatura da evolução do Universo, detectada em microondas, a partir de uma expansão abrupta conhecida como a *grande explosão* (*Big Bang*), já prevista em 1931 pelo astrofísico belga Georges Lemaitrè. A observação, processamento, visualização e análise minuciosa dos dados da RCF formam o principal sustentáculo para o modelo padrão que descreve o Universo após o Big Bang. Entretanto, a apreciação deste cenário cosmológico padrão, conhecido como  $\Lambda$ CDM, pressupõe uma aptidão matemática mínima, necessária e suficiente, para assimilar o conhecimento exposto ao longo deste minicurso. Portanto, antes de seguir viagem, dê uma paradinha no wikipedia e procure Lambda-CDM. Com o  $\Lambda$ CDM na cabeça, fica mais saborosa a degustação dos tópicos que seguem.

## 11.2. Histórico da Cosmologia, Desafios Matemáticos e Computacionais

A cosmologia, entendida como a ciência da origem e evolução do Universo físico-químico, começou bem antes de Lemaitrè. Sem dúvida, a ciência e a filosofia dos sumérios, assírios, babilônios e gregos, elaboradas cerca de 500 anos antes de Cristo, teve grande influência nas gerações seguintes, cujo maior legado foi a elaboração da *Revolução Copernicana*. Nicolau Copérnico (1473-1543) construiu uma das mais radicais revoluções científicas na medida em que alterou radicalmente a visão e o conhecimento sobre o Cosmos ao final da Idade Média. Segundo seus estudos criteriosos, o princípio da mobilidade da Terra em torno do Sol era mais plausível que a concepção aristotélica-ptolemaica que concebia um Universo esférico com a Terra imóvel no centro. Mas em 1460 já havia filosofias cosmológicas mais arrojadas. Nicolau de Cusa, por exemplo, admitia um Universo infinito não concêntrico. É importante mencionar que o paradigma geocêntrico aristotélico composto por 55 esferas incluindo a esfera metafísica da chamada *quintessência*, elaborado em 322 a.c., foi quebrado por Aristarco de Samos quando propôs um modelo Heliocêntrico experimental cerca de 2000 anos antes de Copérnico. Cabe a você, um estudante constantemente curioso, pesquisar e responder os motivos da ressurreição do paradigma geocêntrico.

Entretanto, foi apenas no Séc. XVI que Galileu Galilei (1564-1642) estabeleceu, de forma definitiva, os pilares da ciência moderna, desenvolvendo um sofisticado conhecimento observacional com bases matemáticas e físicas que permitiam a validação ou refutação parcimoniosa de qualquer teoria. Suas observações astronômicas e elaborações matemáticas rigorosas contribuíram decisivamente na defesa do heliocentrismo. Em março de 1610, em Veneza, publicou aquele que podemos considerar o primeiro livro da cosmologia moderna: *Sidereus Nuncius* (*O Mensageiro das Estrelas*).

Na continuidade histórica referente à Cosmologia, os principais fatos após Galileu podem ser resumidos listando cinco obras primas (duas delas escritas por Laplace), todas

elaboradas durante o Séc. XVIII:

- Em 1687, Sir Isaac Newton, físico e matemático inglês (1643-1727), publica *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. A obra descreve a lei da gravitação universal e as três leis básicas, que fundamentaram a mecânica clássica. Não mencionarei aqui, por razões didáticas, os importantes trabalhos de Tycho Brahe e Johannes Kepler, também fundamentais para a descrição dos movimentos sob a ação da força gravitacional. Hoje, os modelos computacionais que simulam a formação de estrutura em grandes escalas do Universo baseam-se em hipercubos contendo bilhões de objetos interagindo através da força gravitacional Newtoniana. O projeto Millennium, por exemplo, que será discutido na seção 5, gera cerca de 25 Tbytes em cada simulação.
- Em 1755, Immanuel Kant, filósofo alemão, publica sua tese de mestrado intitulada *História Geral da Natureza e Teoria do Céu*, onde explica que o Sistema Solar se formou a partir de uma nebulosa primordial, composta por gás e poeira em rotação, em contração devido à ação da força gravitacional. Com a contração, a velocidade de rotação tornou-se mais elevada e o calor da região central gerou luminosidade. A Teoria Kantiana para a explicação da formação do Sistema Solar foi aperfeiçoada pelo matemático, físico e filósofo francês Pierre Simon de Laplace (1749-1827). Kant também discute a existência da nossa galáxia e de outras galáxias, inspirando a realização de trabalhos observacionais detalhados sobre os objetos mais difusos e extensos observados ao telescópio.
- Em 1771, Charles Joseph Messier, astrônomo francês (1730-1817), publica nas *Mémoires de l'Académie de Paris* o primeiro catálogo de objetos astronômicos. A primeira edição continha 45 objetos. O arquivo final, compilado em 1782, continha 101 objetos difusos e difíceis de distinguir dos cometas pelos telescópios disponíveis naquela época. A obra ficou conhecida como Catálogo Messier e contém a nossa Galáxia vizinha denominada Andrômeda (a M31 no catálogo). Hoje, o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) possui mais de 230 milhões de objetos catalogados, entre os quais 1 milhão de galáxias contendo inclusive informações espectrais. Utiliza sofisticados recursos de software e hardware para armazenar e acessar os objetos observados.
- Em 1796, Laplace publica o livro *Exposition du Système du Monde* e, em 1825, conclui a sua obra monumental *Mecânica Celeste* distribuída em cinco volumes. Hoje, com base na moderna teoria da mecânica celeste, é possível simular a dinâmica de um objeto galáctico contendo cerca de 10 mil estrelas utilizando um Athlon XP 1.6GHz. Uma sequência de 25 quadros para visualizar a dinâmica gravitacional corresponde a uma sequência de 75 passos de integração realizados em apenas 2 horas de processamento. Uma simulação mais robusta, composta por mais de 100 mil objetos estelares, leva cerca de 12 dias para rodar em um sistema paralelo Cray T3E contendo 32 processadores WIL.

Laplace também introduziu o conceito de singularidades gravitacionais quando considerou a possibilidade de existirem estrelas com densidades tão altas que nem mesmo

a luz escaparia de sua atração gravitacional. Mais próximo da Cosmologia, Laplace ainda sugeriu que algumas nebulosas observadas poderiam ser extragalácticas, antecipando assim, em quase um século, as descobertas de Hubble realizadas entre 1924 e 1929.

Edwin Hubble (1889-1953) começou seus estudos observacionais de nebulosas em 1919 utilizando o maior telescópio refletor daquela época, recém-construído no Observatório do Monte Wilson na Califórnia. A partir da relação conhecida entre período e luminosidade das cefeidas (tipo de estrelas gigantes brilhantes que apresentam uma variação regular do brilho em função da sua luminosidade) localizadas na nebulosa de Andrômeda, Hubble calculou a distância entre Andrômeda e a Via Láctea, obtendo um valor de dois milhões de anos-luz. Isso situava Andrômeda bem além dos limites de nossa galáxia, cujo diâmetro é da ordem de cem mil anos-luz. Assim ficou provado que Andrômeda era uma outra galáxia, colocando fim a um longo debate sobre a existência de outras galáxias no Universo. Essa discussão ficou conhecida como *O Grande Debate*, encabeçado pelos astrônomos Harlow Shapley e Herbert Curtis em 1920. Aliás, Harlow Shapley em conjunto com a astrônoma Henrietta Leavitt, ambos da Universidade de Harvard, foram os responsáveis pela formulação da teoria das cefeidas, ainda utilizada para medir a distância de objetos cada vez mais distantes no Universo. Sem dúvida, os estudos sobre as cefeidas realizados por Leavitt, Shapley e Hubble consolidaram a fase inicial da Cosmologia contemporânea, a meu ver iniciada com William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907) que em 1901 publica um trabalho criterioso sobre o primeiro grande desafio científico de caráter genuinamente cosmológico: *O Paradoxo de Olbers*.

Uma questão ainda fundamental entre teólogos, filósofos, cosmólogos e físicos é sobre a origem e a extensão do Universo. No auge da revolução copernicana, o matemático e astrônomo inglês Thomas Diggs (1546-1595) postulou (talvez por razões mais teológicas que científicas) que o Universo é infinito e composto por uma quantidade infinita de estrelas. Entretanto, se o Universo sempre existiu e é infinito, como acreditam alguns, então porque o céu noturno é escuro? Nesse caso, ser infinito significa possuir uma quantidade infinita de estrelas emitindo fótons por uma eternidade. Se assim fosse, a distribuição e densidade de fótons que chega até a atmosfera do nosso planeta, após um tempo infinito, deveria ser infinitamente homogênea. Dessa forma, o céu noturno não seria escuro. Esse paradoxo, antes de Lord Kelvin, foi abordado também pelos astrônomos Johannes Kepler (1571-1630), Edmond Halley (1656-1742), Jean-Philippe Loys de Chéseaux (1718-1751) e Heinrich Wilhelm Olbers (1758-1840). Este último, um astrônomo alemão amador que, em 1826, formalizou o paradoxo que levou o seu nome. Na época, dois desafios matemáticos simples, que obviamente dispensavam o uso de computadores, foram lançados. Um a favor do postulado e outro contra. Vamos lá, cabe agora a você apresentar essas duas provas matemáticas: (i) Prove que não pode haver um universo estático e infinito contendo um número infinito de estrelas distribuídas regularmente; e (ii) Prove que pode haver um universo estático e infinito contendo um número infinito de estrelas.

Do ponto de vista físico, um defensor do postulado poderia dizer que parte da luz emitida é absorvida por nuvens de poeira cósmica distribuídas ao longo da linha de visada. Entretanto, tal argumento pode ser facilmente contestado considerando que nuvens de absorção são efêmeras e mesmo as mais estáveis absorveriam tanta luz que passariam a emití-la. Esse processo, conhecido como *radiação de corpo negro* ocorre devido à *Lei de Planck* (veja, Planck's Law no wikipedia), um dos pilares da teoria quântica. Um

outro argumento a favor do postulado de Diggs é que a distribuição de estrelas pode ser irregular (não-homogênea), de tal forma que em um universo infinito de baixa densidade em várias regiões, a média da radiação que chega ao observador é pequena. E isto pode também valer para um Universo finito. Entretanto, os melhores argumentos para explicar a escuridão da noite parecem ser aqueles relacionados ao fato de o Universo ter tido uma origem. Dessa forma, o Universo observável possui um tamanho proporcional ao seu tempo de vida. Conseqüentemente, como a velocidade da luz é finita, os fótons emitidos por objetos mais distantes ainda não chegaram por aqui. Os efeitos de um universo em expansão também contribuem, porém de forma menos importante que a sua idade (note que, o conceito de *idade* perde o sentido em um Universo infinito e eterno).

Nos últimos parágrafos aparecem dois aspectos importantes da cosmologia contemporânea: a quantidade e a expansão do conjunto de objetos cósmicos, onde os mais elementares são as estrelas. Mas afinal, quantas estrelas existem no Universo e do que é feito o tecido do Cosmos? Os fatos históricos ligados à natureza e quantidade de estrelas está relacionado com o nascimento das teorias quântica e relativística, que também, como a cosmologia contemporânea teve o seu estabelecimento ao longo do Séc. XX. O tecido do cosmo é compreendido hoje como um campo espaço-temporal gerado continuamente a partir de uma singularidade de densidade e temperatura infinitas. Aqui começa a discussão mais intrigante que será desenvolvida ao longo deste texto: a *teoria do Big Bang* sustentada pelas observações cosmológicas mais recentes. A Figura 2 mostra o Universo em expansão a partir de um início singular no qual o espaço-tempo e a energia total do Universo estão infinitamente confinados. Segundo a teoria, a singularidade primordial expande-se, proporcionando condições de temperatura e densidade que dão origem à matéria primordial composta pelas partículas elementares conhecidas pelos nomes de *quarks* e *glúons*. A criação da matéria, neste contexto, é explicada através das flutuações do *vácuo quântico* devido à existência de valores de *pressão negativa*. Antes da sopa quark-glúon, pode haver um outro nível mais fundamental de materialização. Mas não se assuste, vamos discutir isso em aula utilizando alguns *gadgets* didáticos que devem amenizar o sofrimento. A sopa de quarks e glúons (simulada atualmente através de sofisticados modelos computacionais) começa a resfriar-se permitindo que a troca ordenada de glúons entre os quarks organize a matéria. A matéria ordenada torna-se altamente instável ao confinamento e abruptamente se expande alcançando dimensões onde a métrica do espaço-tempo é necessária para entendermos as fases posteriores deste incrível ato de criação. Nessa fase, as Equações do "Tio" Einstein que você já viu no Apêndice, são imprescindíveis para 'rodar' o modelo.

Fecharemos este tópico introdutório, listando a seguir os principais acontecimentos que marcaram a cosmologia contemporânea, destacando, quando for o caso, os principais desafios matemáticos e computacionais relacionados a cada fato.

- 1915: Albert Einstein desenvolve as equações de campo da teoria geral da relatividade. O cálculo tensorial surge como um dos fundamentos da cosmologia teórica. Nas equações de campo da teoria geral da relatividade o chamado tensor energia-momento (*stress-energy tensor*) passa a ser a fonte do campo gravitacional, de forma equivalente à massa em um campo não-relativístico (Newtoniano).
- 1917: Willem de Sitter, com base na teoria geral da relatividade, introduz o primeiro

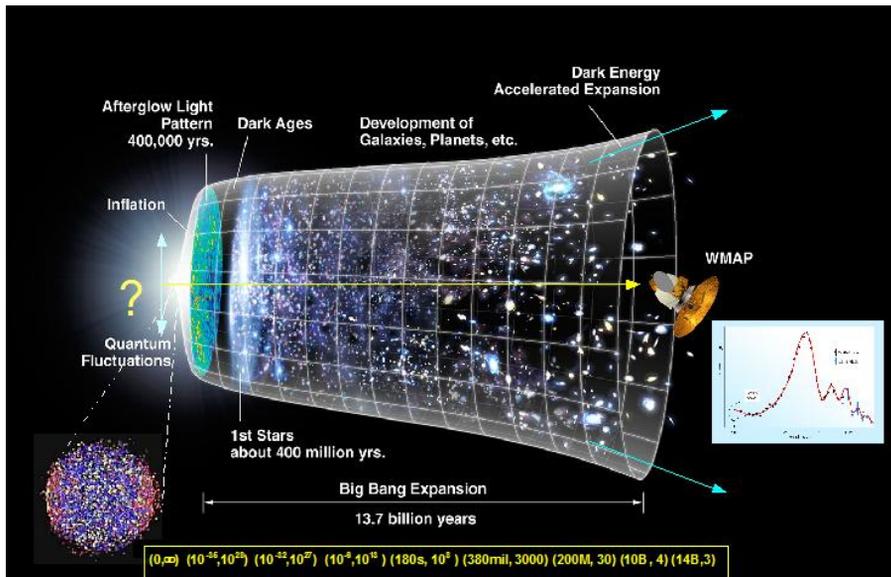


Figure 11.2. Universo em expansão segundo as teorias e observações mais atuais.

modelo cosmológico onde o espaço-tempo é plano e a expansão é regulada pela constante cosmológica das Equações de Einstein.

- 1924: A dinâmica cosmológica é apresentada assumindo um universo homogêneo e isotrópico governado pelas equações introduzidas por Alexander Friedmann.
- 1927: Lemaitrê teoriza o surgimento abrupto do Universo. O desafio matemático foi calcular a densidade e o raio do Universo atual inserindo no modelo de Friedmann os termos de pressão. Ele obteve os valores de  $1,5 \times 10^{-31} \text{gcm}^{-3}$  para a densidade e de  $1,8 \times 10^{28} \text{cm}$  para o raio.
- 1929: As observações de Hubble e Milton Humason confirmam a expansão do Universo. Seis anos depois Einstein aceitaria a teoria da expansão. Hoje, com o auxílio da computação, os astrofísicos calculam com grande precisão, tomando como base as observações dos objetos mais distantes, a constante de Hubble, que exprime com qual taxa o Universo de expande (medida em  $\text{km/s/Mpc}$ ).
- 1930: Surge o ciclotron, acelerador de partículas que dá início à investigação de fenômenos de altas-energias, cujos valores são comparáveis com aqueles previstos para a matéria do Universo em seus estados iniciais.
- 1934: E.A. Milne e W.H. McCrea apresentam um modelo cosmológico puramente Newtoniano. Neste mesmo ano Fritz Zwicky sugere a existência de *Matéria Escura*, ou seja, aquela que interage gravitacionalmente mas, por alguma razão, não são detectadas através de ondas eletromagnéticas.

- 1935: Com base nos trabalhos anteriores desenvolvidos por Friedmann e Lemaitre, a métrica para um Universo homogêneo e isotrópico é apresentada, de forma rigorosa, por Howard Percy Robertson and Arthur Geoffrey Walker. Nasce o *Modelo Padrão* da cosmologia contemporânea, comumente chamado de FLRW, ou simplesmente de *Métrica de Robertson-Walker*.
- 1948: George Gamow e Ralph Alpher introduzem a teoria Alpher-Bethe-Gamow sobre a criação, em proporções corretas, de hidrogênio, hélio e elementos mais pesados para explicar sua abundância no universo primordial. A teoria da nucleossíntese primordial foi desenvolvida mais tarde por Fred Hoyle, William Alfred Fowler e Subrahmanyan Chandrasekhar. Os dois últimos receberam o Prêmio Nobel de Física em 1983 pelo resumo da obra. Em 1948, Gamow e Alpher, junto com Robert Hermann, também sugerem a existência da Radiação Cósmica de Fundo.
- 1965: Observação da Radiação Cósmica de Fundo em microondas por Arno Penzias e Robert Woodrow Wilson, do Bell Telephone Laboratories. Ambos receberam, por esta descoberta, o prêmio Nobel de física em 1978.
- 1967: Steven Weinberg conclui seu trabalho sobre a unificação entre as forças fraca e eletromagnética. Assim, começa a surgir uma teoria robusta para o *modelo padrão* da física de partículas com implicações diretas na compreensão da matéria do Universo primordial.
- 1975: Kent Ford e Vera Rubin, estudando a translação de estrelas em galáxias, apresentam evidências observacionais para a natureza não-bariônica da matéria escura.
- 1981: Surge um momento *mágico* na cosmologia. O modelo inflacionário é proposto por Alan Harvey Guth do MIT (Massachusetts Institute of Technology). A teoria que descreve a inflação logo após o nascimento da estrutura espaço-temporal do Universo foi aprimorada por Stephen Hawking, Andrei Linde e Paul J. Steinhardt. Em 2006, as características previstas por esta teoria para a Radiação Cósmica de Fundo foram, em parte, confirmadas através dos dados gerados pela sonda WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*). A geração dos mapas da radiação cósmica de fundo pode ser considerado um dos mais belos trabalhos de matemática computacional na cosmologia.
- 1989: Entra em operação o COBE (Cosmic Background Explorer), primeiro satélite da NASA dedicado à cosmologia. Seu objetivo foi mapear com precisão as flutuações da radiação cósmica de fundo, remanescente prevista pelo modelo do Big Bang e observada em 1965 por Penzias e Wilson.
- 1994: Entra em operação o Consórcio Virgo, de computação em grade, para simulação do Universo em grandes escalas. Os principais nós do projeto entram em operação no Instituto de Cosmologia Computacional em Durham e no Instituto Max Planck de Astrofísica em Garching, ambos na Alemanha. Dois códigos específicos de simulação computacional são desenvolvidos no projeto: o GADGET e o MPI-HYDRA. Cabe destacar aqui que entre 2006 e 2009 o LAC-INPE participa das análises desses dados publicando dois artigos. Os detalhes desta pesquisa serão discutidos no último tópico deste minicurso, ainda em preparação.

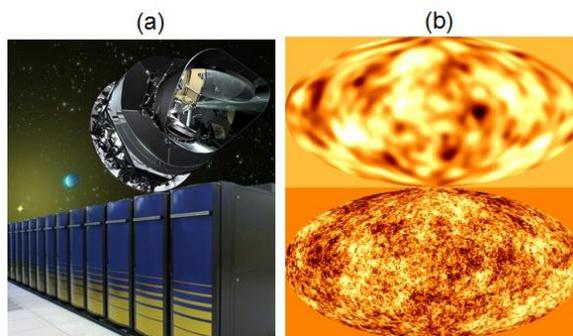
- 1999: Os estudos provenientes da observação sistemática de Supernovas do tipo Ia sugerem que o Universo em expansão está sendo acelerado por alguma forma de energia, batizada com o nome de *Energia escura* (interpretada como sendo a constante cosmológica  $\Lambda$ ).
- 2001: Em 30 de junho a sonda WMAP é lançada por um foguete Delta II de Cabo Canaveral nos Estados Unidos. Neste mesmo ano, entra em operação o *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), um consórcio internacional, entre os EUA, Japão, Alemanha e Inglaterra para, para a realização do maior levantamento de objetos celestes da astronomia moderna. O SLOAN já catalogou cerca de 230 milhões de objetos. Irá continuar catalogando, pelo menos, até 2014 (<http://www.sdss.org/>).
- 2003: O grupo australiano, liderado por Simon Driver, anuncia a primeira estimativa sistemática para a quantidade de estrelas existentes no Universo observável:  $7 \times 10^{22}$  objetos estelares. Você consegue ter uma noção concreta sobre esta quantidade? Vamos tentar percebê-la discutindo a quantidade de grãos de areia contida no recipiente da Figura 3.



**Figure 11.3. Quantas estrelas existem em nossa Galáxia e quantas Galáxias existem no Universo observável? Vamos fazer alguns cálculos?**

- 2006: Considerando os modelos atuais do universo, os dados do WMAP revelam, entre outros fatos, que a idade atual do universo é igual a 13,7 bilhões ( $\pm 200$  milhões de anos) e que a Constante de Hubble é igual a  $71 \pm 4 \text{ km/s/Mpc}$ . Entre os outros fatos, o mais importante é a consistência encontrada com um Universo plano composto por apenas 4% de matéria ordinária (barions), 22% de matéria escura e 74% de energia escura, responsável pela expansão acelerada do espaço-tempo.
- 2007: É finalizado, no Caltech, o primeiro mapeamento 3D da distribuição parcial de matéria escura que compõe o Universo observável. O projeto, pioneiro em assimilação de dados, combinou principalmente observações geradas através do telescópio espacial Hubble e dos instrumentos da missão XMM-Newton da Agência Espacial Européia. Para o projeto foram desenvolvidos dois softwares específicos: o SAS (*Scientific Analysis Systems*) e o SciSim (*Science Simulator*).

- 2008: Início do SDSS-III, a terceira fase do consórcio SLOAN. Até 2007 foram catalogados cerca de 230 milhões de objetos. A terceira fase irá até 2014. Neste mesmo ano, em 10 de setembro, entrou em funcionamento o Grande Colisor de Hádrons (LHC), capaz de gerar partículas e energias equivalentes àsquelas do Universo primordial. Os dados gerados pelo LHC serão processados por uma grade internacional de computadores contando com nós inclusive no Brasil.
- 2009: Os primeiros mapas da radiação cósmica de fundo que serão obtidos a partir da missão Planck, uma das sucessoras do WMAP, são simuladas com sucesso no Laboratório de Cosmologia Computacional de Berkeley nos Estados Unidos. Eles utilizaram um supercomputador Cray XT4, que composto por cerca de 38.000 processadores atinge um desempenho de 352 TFlops (Figura 4a). Na Figura 4b o mapa da RCF simulado para o Planck é comparado com o mapa obtido através do Projeto COBE.



**Figure 11.4.** (a) O Cray XT4, batizado pelo apelido de *Franklin*, no *Computational Cosmology Center* do Laboratório de Berkley nos EUA. (b) O mapa final observado pelo COBE em 1996 (em cima) e o mapa que será obtido pelo Planks, simulado pelo Franklin (em baixo).

### 11.3. Gravitação e Física de Partículas: Matéria e Energia Escuras nos Modelos Cosmológicos

No chamado modelo padrão da física das partículas de altas energias as partículas são agrupadas em três classes: quarks, léptons e bósons. Quarks são partículas que interagem através da força forte, Léptons são aquelas que interagem através das forças fraca e eletromagnética (já unificadas pelos físicos), enquanto os bósons são as partículas transportadores de força trocadas entre quarks, grupos de quarks (nucleons e mésons) e léptons. Na terminologia da física das altas energias, todas as partículas nucleares compostas por quarks são chamadas de hádrons. Os hádrons, quando compostos por apenas três quarks, são chamados de bárions. Portanto, prótons e neutrons são bárions. Portanto, em cosmologia, quando nos referimos a matéria bariônica falamos da matéria ordinária composta por átomos e moléculas que, em grandes quantidades de massas, compoem objetos que interagem gravitacionalmente. Nossa massa e a da Terra refletem as somas das massas dos bárions de cada sistema. Portanto, estamos presos à Terra basicamente devido à interação gravitacional entre as respectivas matérias bariônicas.

Assim como a cor, o spin e a carga, a massa é também uma propriedade de campo. Entre todas as propriedades é a mais fundamental e simples. Portanto deve existir o bóson do campo primordial contido no primeiro milésimo de segundo da expansão do Universo. Através dele, surgiram as primeiras partículas do universo: quarks e gluons. O bóson fundamental (conhecido como *bóson de Higgs*) é previsto pelo modelo padrão da física de partículas, e sua teoria, introduzida pelo físico americano Philip Anderson, foi apresentada em 1964 pelo físico britânico Peter Higgs.

Como descrito pelo modelo padrão em conjunto com as teorias de campos, todas as interações físicas no Universo estão relacionadas às interações entre partículas, em geral, quânticas e relativísticas. São quatro as interações físicas fundamentais no Universo, cada uma associada a um tipo de campo de força: (i) campo gravitacional, (ii) campo eletromagnético, (iii) campo nuclear forte e (iv) campo nuclear fraco. Em teoria, todos esses campos são manifestações de um único campo que permite a elaboração de uma teoria de unificação ainda não concluída. As quatro forças básicas atuam no interior dos sistemas atômicos determinando tanto os tipos de interações entre as partículas individuais como também o comportamento, em larga escala, da matéria e dos processos de transferências de energia no universo.

As partículas chamadas *bósons vetoriais* são aquelas trocadas entre partículas interagentes. Para cada campo de interação há um bóson vetorial específico. Em geral, bósons vetoriais são trocados entre férmions. Do ponto de vista do comportamento estatístico das partículas no nível quântico, quase todas podem ser classificadas em bósons ou férmions. Férmions tem spin semi-inteiro e obedecem à função de distribuição de Fermi-Dirac que estima o número médio de partículas em cada estado de energia. Férmions apresentam funções de onda anti-simétricas e obedecem o princípio da Exclusão de Pauli, ou seja, dois férmions não podem ocupar o mesmo estado de energia simultaneamente. Bósons tem spin inteiro e obedecem à função de distribuição de Bose-Einstein. Eles apresentam funções de onda simétricas e não obedecem o princípio da Exclusão de Pauli. As flutuações de Fermi-Dirac e Bose-Einstein dependem da temperatura e densidade. Ambas tornam-se flutuações de Maxwell-Boltzmann em condições de altas temperaturas ou baixas concentrações.

A Gravidade, de natureza apenas atrativa, é uma força transmitida pelo gráviton (o bóson vetorial, ainda hipotético que dá consistência ao campo gravitacional). A gravidade atua entre todos os bárions no universo, agregando a matéria e dando a ela a sua propriedade inercial (pêso é igual a massa multiplicada pela aceleração da gravidade). A matéria *não-bariônica* que apresenta interação gravitacional é, como já dissemos, conhecida como *matéria escura*. Embora a sua natureza ainda seja desconhecida, sua existência está comprovada através de observações e experimentos numéricos. No tópico 5 veremos que o modelo computacional construído para simular a formação de estruturas cosmológicas deve levar em consideração, para corresponder aos dados observacionais, a grande quantidade de matéria escura existente no Universo. Os resultados são insatisfatórios quando considera-se apenas matéria bariônica na simulação.

A força eletromagnética, de natureza atrativa e repulsiva, é transmitida pelo fóton (o bóson vetorial que dá consistência ao campo eletromagnético). Ela determina como ocorrem as interações entre partículas eletricamente carregadas. É a força responsável

por manter os elétrons em orbitais atômicos, regendo a estabilidade da sua estrutura externa. A força eletromagnética também determina o comportamento intrínseco da radiação eletromagnética. A emissão de fótons ocorre quando elétrons são acelerados.

A força forte, um pouco mais sutil e complicada, existe em dois tipos de interação. Um tipo corresponde à interação entre partículas nucleares por meio da troca de mésons, confinando prótons e nêutrons em núcleos atômicos. O outro tipo corresponde à interação entre quarks, que dá consistência ao campo que forma prótons e nêutrons. Quarks são partículas com spins semi-inteiros, possuem massa, carga elétrica e uma quarta propriedade mais exótica de interação chamada *cor*. Quarks interagem pela cor trocando glúons (o bóson vetorial que dá consistência ao campo cromodinâmico). A interação forte é a fonte básica das altas energias liberadas pelas reações nucleares, por exemplo, aquelas que ocorrem no interior das estrelas.

A força nuclear fraca é responsável pelos decaimentos radioativos que transformam os núcleos atômicos. Explica a nucleossíntese primordial e a síntese de elementos químicos no interior das estrelas. É transmitida pelas partículas W e Z (os bósons que dão consistência ao campo nuclear fraco). O hidrogênio, o deutério, o hélio 3, o hélio 4 e o lítio foram produzidos ainda no Universo primordial. Processos no meio interestelar produziram, e ainda produzem, mais lítio, berílio e boro. Entretanto, todos os elementos mais pesados que o boro foram criados por processos no plasma estelar.

A Figura 5 ilustra aspectos do formalismo da cromodinâmica quântica, teoria desenvolvida por Feynman e Gell-Man.

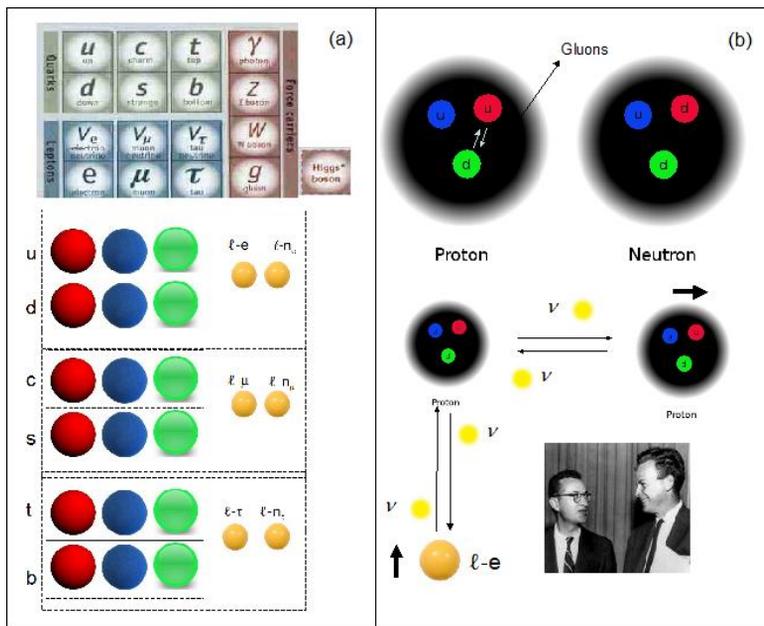


Figure 11.5. (a) Classificação das partículas elementares e suas principais propriedades. (b) Os bósons vetoriais na formação e interação de prótons e nêutrons.

### 11.3.1. Simulando a sopa primordial

O Laboratório Nacional de Brookhaven (LNB), em Upton nos Estados Unidos, opera o Colisor de Ions Pesados Relativísticos (Relativistic Heavy Ion Collider - RHIC) (Figura 6c), capaz de produzir, a partir da colisão de milhares de íons de Ouro, uma réplica experimental do estado fundamental do Universo imediatamente após a sua criação. Nesse período, entre  $10^{-35}$  s e  $10^{-32}$  s após a materialização do espaço-tempo, a temperatura estimada estaria entre  $10^{28}$  e  $10^{27}$  K e seria composta por uma sopa de quarks e glúons que, com o resfriamento devido à diminuição de densidade (expansão), formariam os primeiros prótons e neutrons. Os dados obtidos com o RHIC alimentam um supercomputador em Edinburgo na Escócia que contém 12.288 processadores ( $> 10$  Tflops) (Figura 6b). A arquitetura desta máquina simuladora é construída baseada nas unidades especializadas conhecidas como QCDSIP (*Quantum Chromodynamics on Digital Signal Processors*) (Boyle, 2004) (Figura 6a). Cada unidade roda em um Power-PC IBM e são interconectadas por uma rede 6D com topologia toroidal. A velocidade de cada unidade atinge 1 Gflops. A versão atualizada irá operar com 64.000 processadores e atingirá a velocidade de pico de 360 Tflops. O resultado da simulação é apresentado na Figura 5d.

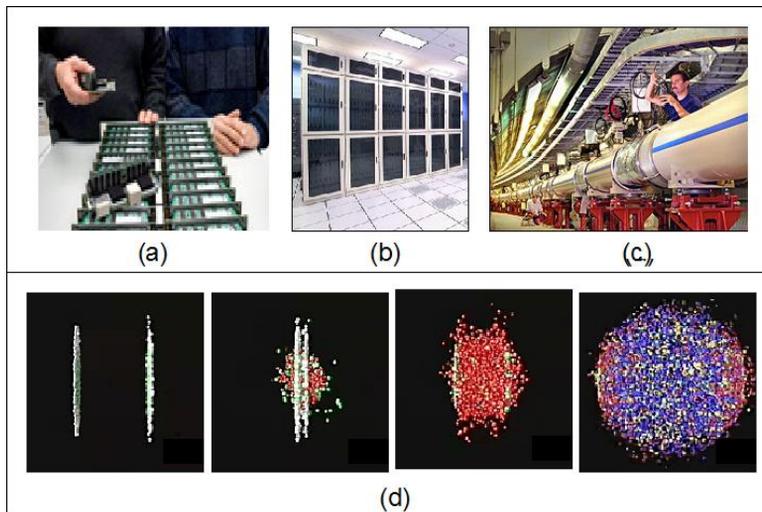


Figure 11.6. Simulação da colisão relativística entre íons de ouro produzindo uma sopa de quarks e gluons ao centro.

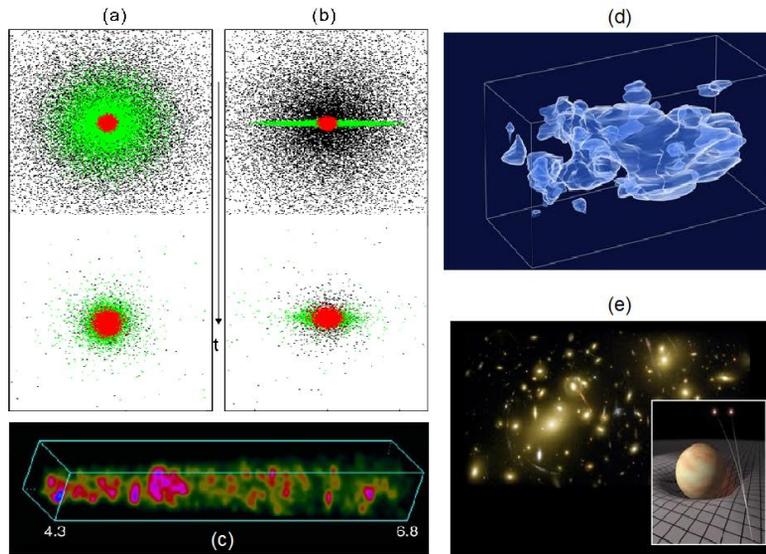
### 11.3.2. Matéria e Energia Escuras

A teoria da formação de estrutura em larga escala (que será discutida no tópico 1.5) sugere que a densidade da matéria contribui com apenas 30% da densidade crítica do Universo. O restante está associado à energia que acelera o Universo denominada *Energia Escura*. Enquanto a matéria (bariônica e escura) atua no sentido de aglomerar as estruturas e segurar a expansão do Universo, a energia escura atua no sentido de limitar a aglomeração devido à aceleração que impõe ao campo espaço-temporal. O primeiro mapeamento cosmológico 3D da distribuição parcial de matéria escura, supostamente composta por partículas exóticas não-bariônicas, é mostrado na figura 6d. Os softwares SAS e SciSim

do Caltech combinaram, além de observações obtidas pelo grandes telescópios em terra, observações geradas através do telescópio espacial Hubble e dos instrumentos da missão XMM-Newton da Agência Espacial Européia.

As simulações de formação de galáxias anãs, que incluem energia escura, representam melhor os objetos observados. As figuras 7a e 7b mostram o efeito da energia escura em duas simulações. Na Figura 7c temos o resultado de uma simulação mostrando a variação das velocidades de galáxias em aglomerados regidos pela presença de matéria escura.

A comprovação, observação e aprimoramento da teoria sobre o maior constituinte do Universo, a Energia Escura, são investigados no consórcio internacional denominado Dark Energy Survey (DES) (veja [www.darkenergysurvey.org](http://www.darkenergysurvey.org)). O LAC-INPE desenvolverá em 2010 colaboração na validação de modelos para simulação de arcos gerados por lentes gravitacionais (Figura 7d), previstos para serem observados pelos instrumentos do DES.

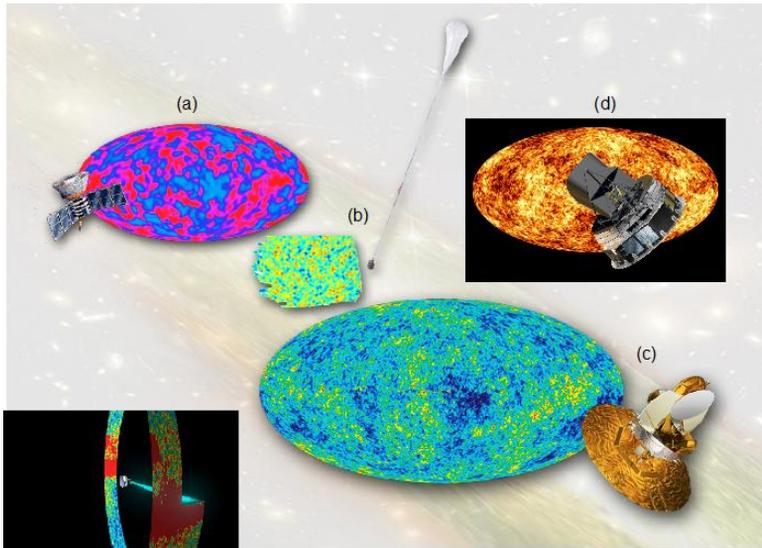


**Figure 11.7. (a-c) Exemplos de simulações considerando o efeito da energia escura (constante cosmológica) na dinâmica do sistema. (d) Arcos causados por lentes gravitacionais que serão simulados no consórcio DES.**

#### 11.4. Observação e Simulação da Radiação Cósmica de Fundo

Os primeiros dados robustos da radiação cósmica de fundo em microondas (20-100 GHz) foram obtidos através da sonda COBE no início da década de 90 (Figura 8a). As missões de mapeamento foram aprimoradas pelas missões Boomerang/Maxima (Figura 8b) e WMAP (Figura 8c), que serão complementados pela missão Planck (Figura 8d).

A primeira simulação da Radiação Cósmica de Fundo (energia em microondas equivalente a temperatura de corpo negro de  $\approx 3K^o$ ) foi realizada pelo Centro de Cosmologia Computacional do Laboratório americano Lawrence Berkeley. Julian Borril,



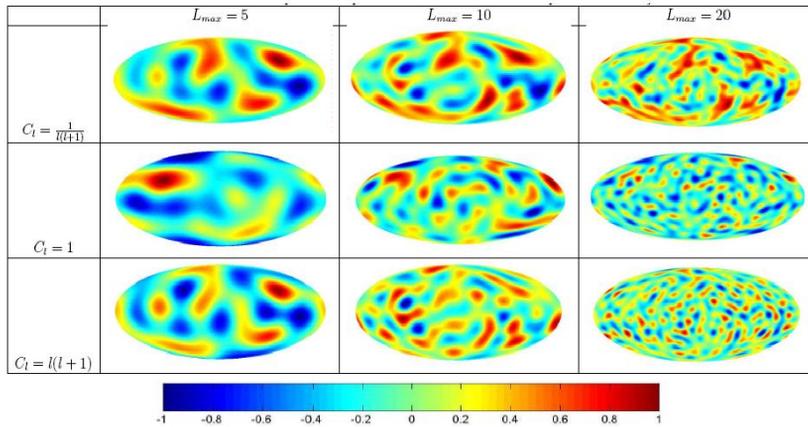
**Figure 11.8. Principais missões para mapeamento observacional da RCF: (a) COBE; (b) Boomerang/Maxima; (c) WMAP; (d) Planck.**

a partir de 1997, foi o principal responsável pelo desenvolvimento dos programas que permitiram produzir os primeiros mapas da Radiação Cósmica de Fundo. Borrill, Andrew Jaffe e Radek Stompor, criaram o pacote computacional MADCAP *Microwave Anisotropy Dataset Computational Analysis Package* que foi aplicado aos dados obtidos com as missões BOOMERANG and MAXIMA, das quais o INPE também participou. As análises foram realizadas utilizando um Cray T3E composto por 600 processadores. Como já mencionado, os mapas previstos para o Planck foram simulados em 2009 por um supercomputador Cray XT4 (Figura 4).

No LAC-INPE desenvolvemos as primeiras simulações puramente teóricas de mapas da RCF tomando como base a teoria da RCF cujo espectro foi descrito através de harmônicos esféricos com uma pixelização do tipo Igloo (Figura 9). Neste trabalho, um aspecto importante discutido foi a influência da topologia do Universo nos padrões de anisotropias da RCF (Camilo, 2005). Além da topologia, outro fator que também pode gerar anisotropia é o campo magnético primordial. Questões de caráter puramente geométrico que relacionam as anisotropias da RCF e a distribuição de matéria no Universo evoluído também são importantes. O Universo pode possuir uma estrutura fractal? Esta pesquisa também foi desenvolvida pelo grupo do LAC. Veja os detalhes nas referências Ramos et al. (2002) e Wuensche et al. (2004).

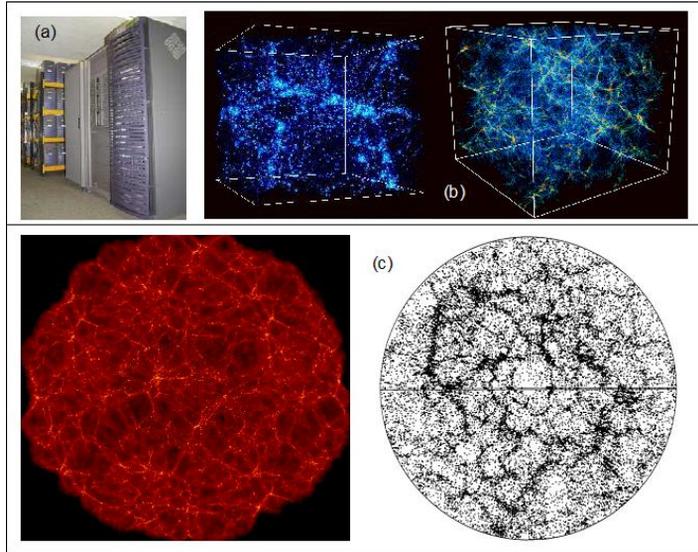
### **11.5. Observação e Simulação da Formação de Estruturas em Grandes Escalas**

O texto inicial deste tópico ainda está em desenvolvimento e será disponibilizado na página da ELAC até o final de junho de 2010. Aqui descreveremos as simulações realizadas através do consórcio Virgo. Veja as referências indicadas para maiores informações (Andrade et al., 2004, Caretta et al. 2008 e Rosa et al. 2009). Os dados analisados são



**Figure 11.9.** Simulação da RCF desenvolvida no LAC-INPE (Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada de Cristiane Pires Camilo)

simulados através do código GADGET desenvolvido pelo Instituto Max Planck. Um exemplo de simulação, utilizando o modelo  $\Lambda$ CDM é mostrado na figura 10.



**Figure 11.10. Simulações a partir do modelo  $\Lambda$ CDM. (a) Durham cluster composto por 792 cpus opteron e 500 processadores ultra-sparcIII. Trabalha em conjunto com o sistema Regatta da IBM composto por 816 processadores power-4 no Instituto Max-Planck em Garching. (b) Cubo com preenchimento de matéria equivalente a 43 Mpc de lado composto por matéria e energia escuras. (c) Volume de Hubble para o Universo observado, (d) dados do SLOAN assimilados por um simulador de volume de Hubble.**

## 11.6. Considerações Finais

Nesta última seção apresentaremos os principais resultados provenientes das pesquisas em cosmologia desenvolvidas no LAC. Além disso, trataremos de uma síntese da cosmologia computacional que envolve ferramentas e métodos computacionais específicos para armazenamento, processamento, análise e simulação de dados e processos previstos pelos modelos cosmológicos.

## References

- [1] Steven Weinberg, *Cosmology* (2008), Oxford University Press.
- [2] P.A. Boyle et al. (2004), QCDOC: A 10 Teraflops Computer for Tightly-Coupled Calculations, In: *Supercomputing, Proceedings of the ACM/IEEE SC2004 Conference*, pp. 40-46. *doi* : 10.1109SC.2004.46
- [3] J.A.L. Aguerri and A.C. González-García (2009) On the origin of dwarf elliptical galaxies: the fundamental plane, *A&A* 494, 891-904.
- [4] J.V. da Cunha Junior (2006), *Energia Escura: Origem, Candidatos e Vínculos Observacionais*. Tese de Doutorado, UFRN.
- [5] P. Coles, *The state of the Universe* (2005), *Nature* 433, 248-256.

- [6] V. Springel, C. S. Frenk, S. D. M. White, The large-scale structure of the Universe (2006), *Nature* 440, 1137-1144.
- [7] C.P. Camilo (2005), *Smulação e Análise Computacional das Anisotropias da Radiação Cós-mica de Fundo Usando o Modelo de Einstein-de Sitter*, Dissertação de Mestrado em Com-putação Aplicada, *INPE – 15381 – TDI/1400*.
- [8] F.M. Ramos, C.A. Wuensche, A.L.B. Ribeiro, R.R.Rosa (2002) Multiscaling and nonexten-sivity of large-scale structures in the Universe, *Physica D* 168, 404-409.
- [9] C.A. Wuensche, A.L.B. Ribeiro, F.M. Ramos, R.R.Rosa (2004) Nonextensivity and Galaxy Clustering in the Universe. *Physica. A* 344,743-749.
- [10] A.P. Andrade, R.R.Rosa, A.L. Ribeiro, Gradient pattern analysis of cosmic structure forma-tion: norm and phase statistics (2006) *Physica D* 221, 1-18.
- [11] C.A. Caretta, R.R.Rosa, F.M.Ramos, H.F.Campos Velho, M. Makler (2008), Evidence of turbulence-like universality in the formation of galaxy-sized dark matter haloes, *Astron. Astroph.* 487, 445-451.
- [12] R.R.Rosa, F.M.Ramos, C.A.Caretta, H.F. Campos Velho (2009), Extreme event dynamics in the formation of galaxy-sized dark matter structures, *Computer Physics Communications* 180, 621-624.