



CURSO DE ASTRONOMIA GERAL

IOTA



UNIVERSO



CURSO DE ASTRONOMIA GERAL

versão iota – outubro de 2012

volume V : universo

escrito por:

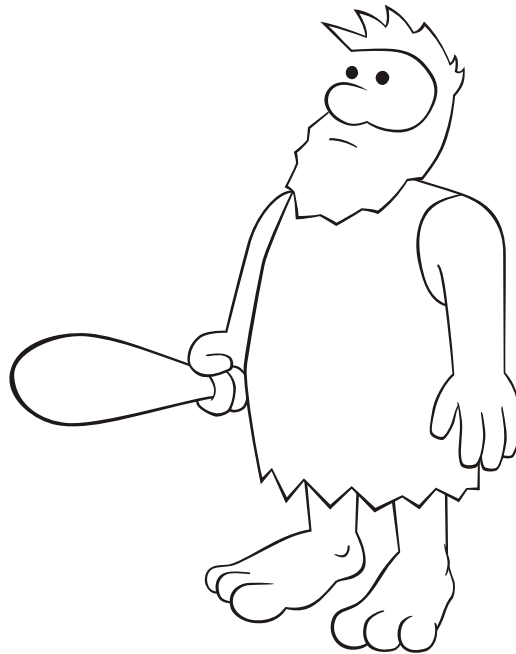
Alexandre Bagdonas

Bruno L' Astorina

Fabrício Caluza Machado

Victória Flório Andrade

Vinícius Miranda Bragança



Casa de Canos Dinamarqueses

Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica

Todos os volumes desta obra são licenciados como Creative Commons (CC BY-SA 3.0). Isso significa que você é livre para copiar, distribuir, transmitir ou adaptar este trabalho, desde que citada a fonte (Curso de Astronomia Geral do CCD-OBA) e que qualquer trabalho derivado deste seja liberado com a mesma licença.

Sumário

I	Cosmologia	5
1	Qual o tamanho do Universo?	8
1.1	Paradoxo de Olbers	10
1.2	Tamanho da Galáxia	11
1.3	Olhando em Escalas	14
1.3.1	Mapeamento do Universo	15
2	A Lei de Hubble	19
2.1	Primeira Versão	19
2.2	Antecedentes	20
2.3	Interpretação	21
2.4	Versão Generalizada	22
3	O que é o Espaço?	23
3.1	Dimensões do Espaço	25
3.1.1	O Hipercubo	26
3.2	Espaço Curvo	29
3.3	Expansão do Espaço	30
4	O Universo é regido por que leis?	33
4.1	Princípio Cosmológico	33
4.2	Relatividades de Einstein	34
4.2.1	Colapso e Constante Cosmológica	35
4.2.2	O Universo de De Sitter	36
4.2.3	Modelo de Friedmann	37
4.3	Modelo Padrão	38
5	Como o Universo nasceu?	41
5.1	O início: Lemaître	41
5.2	Big Bang	43
5.3	Universo Estacionário	44
5.4	Radiação Cósmica de Fundo	46
5.4.1	Satélites	48
5.5	Big Bang Brasil	50
6	O que existe dentro do Universo?	54
6.1	Matéria e Energia	54
6.1.1	Partículas Fundamentais	54
6.2	Matéria Escura	57
6.2.1	Curva de Rotação da Galáxia	57

6.2.2	Lentes Gravitacionais	60
6.2.3	Aglomerado da Bala	61
6.3	Energia Escura	62
6.4	Uma nova imagem	68
7	Uma Biografia do Unvierso	71
7.1	Biografia em Prosa	71
7.1.1	Passado	71
7.1.2	Presente	73
7.1.3	Futuro: Universo Fechado	73
7.1.4	Futuro: Universo Marginalmente Aberto	74
7.1.5	Futuro: Universo Aberto	75
7.2	Biografia em Verso	75
II	Universidade e Pesquisa	77
8	A Universidade	81
8.1	Ciencias Naturais	81
8.2	Matemática	82
8.3	Humanidades	83
8.4	Artes	84
8.5	Aplicações	85
9	Fazer Astronomia	87
9.1	Como ser astrônomo / cientista?	87
9.2	Instituições de Pesquisa	88
9.3	Instituições de Divulgação	90
10	A Pesquisa Atual	91
10.1	Rochas e Vida	91
10.2	Estrelas e Galáxias	92
10.3	Cosmologia	93
10.4	Desenvolvimento Técnico	94
10.5	Ciências Humanas	94
10.6	Panorama	95
III	Apêndices	97
A	Referenciais e Relatividade	99
A.1	Referenciais e Movimento	99
A.2	Transformações de Galileu	101
A.3	Newton, Maxwell e Lorentz	103
A.4	A Construção do Espaço-Tempo	110
A.5	Mecânica Newtoniana como caso limite	112

Prefácio

Provavelmente, isso é tudo o que se pode pedir das histórias, sobretudo da história das idéias: não solucionar as questões, mas elevar o nível do debate.

Albert Hirschman

Estas são as apostilas do Curso de Astronomia Geral do CCD-OBA, versão *ι*. Nosso objetivo principal, com o curso, é enriquecer a *formação* dos seus participantes. Por “*formação*”, referimo-nos a um processo que é, em sua essência, individual e único, composto amplamente pelo conjunto de experiências vividas por alguém. Citando Hans-Georg Gadamer, “Não é casual que a palavra *formação* se pareça, neste aspecto, ao grego *physis*. Como a natureza, a *formação* não conhece objetivos que lhe sejam exteriores.”

Isso quer dizer que a postura que procuraremos desenvolver se fundamenta na *autonomia intelectual*: cada indivíduo é senhor sobre a formação de seu próprio conhecimento. Tudo o que podemos fazer, enquanto organizadores do curso, é dar incentivo, buscando fornecer uma visão mais ampla a partir de nossas próprias experiências.

Convidamos para este curso pessoas que têm grande vontade de saber, esperamos fornecer conhecimento até elas saciarem essa vontade e, então, perceberem que ter aprendido aquilo tudo não faz sentido se, de alguma forma, não for passado adiante. Com isso o processo se retroalimenta, individual e coletivamente. Individual porque sempre aprendemos muito quando alguém nos ensina, mas aprendemos ainda mais quando nós ensinamos alguém, quando fazemos o esforço de pôr nosso conhecimento em frases organizadas e compreensíveis. Coletivamente porque os que aprenderem conosco agora estarão ensinando depois, como nós. Essa é precisamente a origem da CCD: ex-alunos da olimpíada que aprenderam muito, sozinhos e com a ajuda de livros, professores e astrônomos, e acabaram decidindo que precisavam escrever e organizar cursos com tudo o que sabiam. Dentre os autores desta versão *ι* do Curso, há nomes de pessoas que, um ano atrás, eram alunos felizes e curiosos pelo que viria a seguir.

Nesse contexto, a Astronomia, por mais encantadora e atraente que seja para a maioria de nós, não é pensada como um fim em si próprio, mas como um lugar de articulação de saberes. Mostramos, ao longo das apostilas, o quanto a astronomia tem a ver com o desenvolvimento da física, da química e da matemática; mas, mais do que isso, quais são suas relações com a história, a filosofia, as religiões, as diferentes expressões artísticas e, enfim, com as diferentes visões de mundo que surgiram aqui e ali ao longo das histórias humanas. Em suma, não queremos Astronomia pela Astronomia, mas Astronomia por Tudo!

Assim, pretendemos desenvolver uma visão melhor e mais completa do mundo natural e, através disso, do mundo humano também. Fazemos isso, em particular, buscando desenvolver as seguintes habilidades/características individuais:

- Articulação lógica e formal (que tem a ver com a LINGUAGEM)
- Capacidade de abstrair e imaginar (relacionado ao PENSAMENTO)

- Cultura Experimental (característica da CIÊNCIA)
- Reflexão crítica sobre o conhecimento (papel da FILOSOFIA)
- Contemplação estética (o que chamamos de ARTE)

O material está dividido em cinco volumes, na ordem em que os assuntos pareceram mais naturais para nós. O Volume I, *Céu*, discute tudo o que pode ser observado. Discute também algumas interpretações, míticas, poéticas e teóricas, sobre as observações. Toda a matemática desenvolvida nele, portanto, está ligada à geometria dos céus, a Geometria Esférica. Talvez seja o volume com conteúdo mais diferente do que normalmente é visto no colégio. O Volume II, *Medidas*, está mais ligado à idéia e à prática dos experimentos; sua introdução a como tratar dados experimentais é uma introdução à abordagem algébrica que virá nos volumes seguintes. Além disso, ele procura desenvolver uma intuição sobre as técnicas e medição e os instrumentos (em particular os telescópios) necessários para se desenvolver qualquer outro instrumento astronômico. O Volume III, *Mecânica*, é o primeiro que trata de física. Ele introduz a mecânica aprendida no colégio, mas com as intuições nascidas da nossa própria experiência. Discute também a física no contexto da mudança da visão sobre o universo nos séculos XVI e XVII, que culmina com o nascimento da Mecânica Celeste. Discute, finalmente, a construção da própria Mecânica Celeste, com uma abordagem geométrica (que é clássica mas também incomum nos estudos de física de hoje em dia) e procurando criar uma boa intuição sobre movimentos livres em campos gravitacionais. O Volume IV, *Astrofísica*, também fala de física, mas de um caráter bem diferente: da constituição material do mundo, do caráter da luz e das interações atômicas. Nesse sentido, é um volume bastante ligado à química. Ele culmina com o estudo detalhado, dos pontos de vista teórico, experimental e observacional, de alguns objetos de interesse astronômico, passando por estrelas e sua evolução, mas também por aglomerados, galáxias e asteróides. Por fim, o Volume V, *Universo*, trata principalmente de Cosmologia, ou seja, da discussão sobre o universo como um todo. Como não poderia deixar de ser, ele alterna entre discussões filosóficas e matemáticas densas, pontuadas por alguns *insights* poéticos. Na segunda parte, há dois capítulos discutindo sobre a situação atual da pesquisa em astronomia no Brasil – o que é especialmente interessante para quem tem alguma pretensão de estudar ciência na universidade.

Além dessas apostilas, enviaremos outros materiais, como referências e algumas atividades práticas ao longo do curso. Incentivamos que as façam, de forma a complementar o conteúdo das apostilas. Aplicaremos também uma ou duas provas para selecionar os estudantes para a *International Olympiad on Astronomy and Astrophysics* (IOAA) e para a *Olimpiada Latinoamericana de Astronomía y Astronáutica* (OLAA). Além disso, esperamos engajar os participantes em algumas práticas, ligadas à noção de responsabilidade intelectual discutida acima: ensinar colegas, em discussões de grupo, aulas preparatórias para a próxima OBA ou aulas motivadoras em colégios de baixa renda; observar o céu com outros, em clubes de astronomia amadora e em *star parties*; envolver-se em projetos de pesquisa, junto a astrônomos amadores, professores universitários ou membros do CCD; integrar-se, por fim, ao nosso próprio grupo.

A primeira olimpíada internacional de astronomia foi fundada em 1996; é dois anos mais antiga, portanto, que a sua versão brasileira. Desde a fundação da OBA, há o compromisso de enviar times anualmente à olimpíada internacional – pelo qual sempre foi necessário fazer uma seleção justa e eficiente para montar as equipes. Este curso nasceu dessa necessidade: precisávamos, afinal, fornecer bases de conhecimento necessária aos que tivessem as habilidades e os interesses necessários. Nossos objetivos, contudo, já ultrapassaram em muito os objetivos da seleção. É o que esperamos que fique claro ao longo das páginas que se seguem.

Unidade I

Cosmologia

Existe uma teoria que diz que, se um dia alguém descobrir exatamente para que serve o universo e por que ele está aqui, ele desaparecerá instantaneamente e será substituído por algo ainda mais estranho e inexplicável. Existe uma segunda teoria que diz que isso já aconteceu.

Douglas Adams, *O Restaurante no Fim do Universo*

“De onde surgiu o Universo? Por que o Universo existe? Por que algo deve existir? Por que as coisas são como são?” Todos nós já nos fizemos perguntas como estas, principalmente quando crianças. No entanto, poucos gastam muito tempo refletindo sobre isso. Os adultos, quanto tem que responder este tipo de pergunta para crianças, muitas vezes não as levam a sério, e desencorajam essa curiosidade natural.

De fato, os cientistas não podem fornecer respostas para este tipo de pergunta, mas podem encontrar uma outra maneira de formulá-las e tentar colocá-las dentro de uma perspectiva científica, de modo a fazer com que esses conceitos possam ser trabalhados pela ciência. É isso que permite tornar a cosmologia uma disciplina da ciência. “Perguntas científicas” que a cosmologia tenta responder (e que ocasionalmente também são perguntadas pelas crianças) seriam: “O que é o Universo? Podemos defini-lo como tudo aquilo que existe? Como determiná-lo empiricamente? O universo é eterno, foi criado, terá um fim? É finito ou infinito? É limitado? Qual é a sua forma? Como se distribui a matéria nele? Como o Universo ficou dessa forma? Como isso se combina com o céu que observamos à noite?”.

Tais questões estão intimamente relacionadas com algumas outras de que já tratamos em capítulos anteriores: O que é o céu? Qual o lugar da Terra na ordem das coisas? Qual o papel do Sol, da Lua, das Estrelas? O que são as estrelas, do que elas são feitas? Do que são feitas todas as coisas, como é composta a matéria que preenche todo o universo? E a matéria que preenche o meu almoço? São perguntas que a física inteira ou, indo mais longe, todas as ciências naturais¹, estão empenhadas em resolver.

Mas estas grandes perguntas nunca são encaradas de frente nas ciências naturais; os cientistas sempre saem pela tangente e elucidam essas questões indiretamente, criando leis para os movimentos e para as interações, investigando o funcionamento das ligações químicas, trabalhando enfim durante a maior parte do tempo nas questões mais específicas que, quando são enxergadas todas juntas, fazem lembrar o gosto das perguntas que fazemos desde o Hug-Bug.

A cosmologia não oferece essa possibilidade de fuga das questões fundamentais. Os problemas cosmológicos dizem respeito diretamente ao *universo como um todo*, ou ao *universo em si*, o único universo que existe (ou pelo menos o único que conseguimos estudar). As perguntas fundamentais estão ali, jogadas na cara dos cosmólogos durante todo o tempo. Sendo assim, esta será a nossa atitude nos próximos capítulos: vamos encarar de frente todas as discussões fundamentais em que apenas tocamos nos outros volumes.

¹Uma classificação bastante comum das ciências consiste em dividi-las em dois grupos: as CIÊNCIAS NATURAIS (física, química, biologia...) e as CIÊNCIAS DO ESPÍRITO OU CIÊNCIAS HUMANAS (filosofia, história, ciências sociais...). Note que, ao contrário de como se costuma referir nos cursinhos, artes NÃO são ciências humanas; artes são artes, po.

Capítulo 1

Qual o tamanho do Universo?

A grandeza do Universo sempre foi um dos aspectos mais atraentes e intrigantes ligados ao céu. Todos já passamos, pelo menos uma vez, por aquela sensação de “o universo é tão imenso, e nós somos tão insignificantes perto dele!” Mesmo a versão do universo tradicional de Aristóteles e Ptolomeu é desorientadora. Isso pode ser visto em um texto do século XII, do filósofo judeu Moisés Maimônides, chamado *Guia dos Perplexos*:

Para formar uma estimativa correta de nós mesmos, precisamos considerar os resultados das investigações que foram feitas sobre as dimensões e distâncias das esferas e das estrelas. Mostrou-se que a distância entre o centro da Terra e o ponto mais alto da esfera de Saturno é uma viagem de cerca de oito mil e setecentos anos de 36 dias, supondo que alguém caminhe quarenta léguas por dia. (...) Essa grande distância que foi mostrada é, no entanto, apenas um mínimo; pois a distância do centro da Terra até a parte côncava da esfera das estrelas fixas não pode ser menor e pode ser muitas vezes maior. (...) Como para a esfera das estrelas fixas, sua espessura tem de ser pelo menos tão grande quanto uma das estrelas contidas nela, das quais cada uma tem um volume que excede aquele do globo terreste mais de noventa vezes; e é possível que a esfera em si seja ainda muito mais espessa. Da nona esfera, que comunica seu movimento diurno a todas as demais, não se conhece a medida; pois, como elas não contêm estrelas, não temos meios de julgar acerca de sua magnitude. Considere-se, então, quão imenso é o tamanho desses corpos e quão numerosos eles são. E se a Terra não é de fato maior do que um ponto em relação à esfera das estrelas fixas, qual deve ser a proporção da espécie humana em relação ao conjunto total do universo criado? E como qualquer um de nós pode pensar que essas coisas existem para o seu bem e que devem servir a suas necessidades?

Ou, aos que preferem um modo poético, podemos citar poesia inglesa do século XVI – o autor é Guillaume Du Bartas (1544-1590)¹:

The least star that we perceive to shine
Above, disperst in th'arches crystalline,
(If, at the least, star-clarks be credit worth)
Is eighteen times bigger then all the earth ...
Yea, though a king by wile or war had won

¹Citado de Lovejoy, A. *A Grande Cadeia do Ser*. São Paulo, Palíndromo. p. 102.

A menor estrela que percebemos brilhar / No alto, perdida nas abóbadas cristalinas, / (Se, pelo menos, os entendidos de estrelas merecem crédito) / É dezoito vezes maior que a terra inteira ... / Sim, mesmo que um rei por astúcia ou guerra tenha submetido / Toda a terra ao seu domínio, / Eis agora a recompensa por seus gloriosos esforços: / A ponta de uma agulha, um cisco, uma bagatela é o que ganha / uma lêndea, um nada (é tudo que possui).

All the round earth to his subjection,
Lo, here the guerdon of his glorious pains:
A needle's point, a mote, a mite, he gains,
A nit, a nothing (did he all possess).

Embora, contudo, esse universo invocasse imensa grandeza, ele ainda era simples e essencialmente compreensível. Citando Arthur Lovejoy:

O homem do século XV vivia ainda num universo murado, bem como em cidades muradas. E – ao contrário das cidades medievais e de outras coisas medievais – esse esquema cósmico tinha as qualidades essenciais de uma obra de arte clássica; na verdade, pode-se dizer que a coisa mais clássica na Idade Média foi o universo. Os homens preferiam realizar seus cultos em igrejas góticas, mas a arquitetura dos céus não era uma obra com desenho gótico – o que não é surpreendente, posto que se tratava, de fato, de um edifício grego. O mundo tinha uma clara unidade estrutural inteligível, e não somente uma forma definida, mas que era considerada ao mesmo tempo a mais simples e perfeita forma, tal como tinham todos os corpos que o compunham.

Essa forma clássica foi apedrejada e destruída, em um processo que acompanhamos no Volume II. O novo universo que surgiu não possuía forma nem estrutura, nem sequer podia ser compreendido pelo pensamento – posto que era infinito. A figura aqui que merece destaque é a de Giordano Bruno, que foi o grande evangelista das teses cosmológicas citadas um pouco acima. De fato, ele escreveu e falou muito sobre o universo infinito, por toda a Europa Ocidental, e foram os argumentos dele que ficaram mais populares para a aceitação do novo universo. Seguindo o historiador Alexandre Koyré, citamos Bruno a partir de seu *De l'infinito universo e mondi*, escrito em 1584:

Há um único espaço universal, uma única e vasta imensidão que podemos chamar livremente de o Vazio; nele existem inúmero globos como este em que vivemos e crescemos; declaramos ser este espaço infinito, uma vez que nem a razão, nem a conveniência, nem a percepção sensível nem a natureza lhe conferem um limite. Pois não há razão, nem defeito nos dons da natureza, nem poder ativo ou passivo que possam impedir a existência de outros mundos através do espaço, que é idêntico, em seu caráter natural, a nosso próprio espaço, isto é, por toda parte cheio de matéria, ou, pelo menos, de éter.

É claro que a posição de Giordano Bruno não é inocente; pelo contrário, é regada por diversos debates filosóficos. Lovejoy cita um princípio por trás de seus argumentos, que ele chama de como PRINCÍPIO DA PLENITUDE. Esse princípio basicamente diz que a Natureza existente deve corresponder à potência de Deus, ou que “Deus criou tudo o que ele poderia ter criado”, ou ainda “Tudo o que *pode* existir, *deve* existir. Assim, a concepção de Universo de Bruno está intimamente ligada à sua concepção de Deus – o que ajuda a explicar seu fervor religioso na defesa da sua visão. Voltando a citá-lo:

Por que devemos ou como podemos supor que a potência divina seja ociosa? Porque devemos dizer que a bondade divina, que é capaz de comunicar-se a uma infinidade de coisas e de difundir-se sem limite, é avara? Por que esse entro da divindade, que é capaz de expandir-se (se assim se pode exprimir) em uma esfera infinita, deve permanecer estéril, como se fosse invejoso?

Não há fins, termos, limites ou muralhas que no possam usurpar a multidão infinita das coisas ou privar-nos dela. Por isso a Terra e o oceano são fecundos; por isso

o clarão do Sol é eterno; por isso há eternamente provimento de combustível para as fogueiras vorazes e a umidade restaura os mares exauridos. Porque do infinito é engendrada uma abundância sempre renovada de matéria.

É assim que a excelência de Deus se exalta e que a grandeza de seu reino se manifesta; Ele é glorificado não em um único mas em incontáveis sóis; não em uma única Terra, mas em mil - que digo? - numa infinidade de mundos.

1.1 Paradoxo de Olbers

Analisada minuciosamente, contudo, a idéia de um universo infinito (bem como a idéia de qualquer coisa infinita) leva a algumas contradições. A mais famosa delas provavelmente é o PARADOXO DE OLBERS: se o universo é infinito, em qualquer direção que olhássemos, fatalmente veríamos alguma estrela, pois naquela direção o universo se estende indefinidamente. Dito de outro modo: apesar da intensidade da luz cair com o quadrado da distância, a densidade de estrelas (o quanto de estrelas existem em um determinado pedaço do céu) aumenta com o mesmo, ficando com a mesma intensidade para qualquer região do céu que se olhe². Assim, mesmo durante a noite, o céu deveria ser claro; ou pior, arder como a superfície de uma estrela! Uma analogia simples é comparar com uma floresta: se estivermos no meio desta, ao nosso redor vemos as árvores bem espaçadas entre si; contudo, quanto mais longe olhamos, mais diminui o espaçamento entre as árvores – de forma que, no limite da nossa linha de visada, as árvores estão todas juntas e nada podemos ver além delas.

Olbers propôs que a poeira interestelar absorveria a luz das estrelas, mas essa explicação não é fisicamente aceitável, pois nesse caso a matéria interestelar entraria em equilíbrio térmico com as estrelas e passaria a brilhar tanto quanto elas. Até o início do século XX, existiam outros dois tipos de explicações para esse paradoxo: ou o universo teria sido criado em um tempo não muito remoto, e ainda não houvera tempo da luz de todas as estrelas chegar a nós; ou, mesmo que ele fosse eterno, a distribuição do conteúdo material do universo não era homogênea, mas limitada a uma certa região do espaço infinito – a região da Via Láctea. Nesse contexto, todas as nebulosas seriam partes da Galáxia, e não haveria galáxias diferentes. Contudo, como veremos, o norte-americano Edwin Hubble, a partir da observação de cefeídas em M31 e M32, concluiu definitivamente a favor dos universos-ilha, acabando com a segunda explicação. Dessa forma, a eternidade do universo (que sempre foi um tópico de acirradas discussões) parecia comprometida.

É importante notar que uma abordagem matemática mais refinada (e mais contemporânea) permite evitar o paradoxo de Olbers mesmo que o universo e o número de estrelas sejam infinitos, e mesmo que seja também eterno. De fato, o matemático francês Benoît Mandelbrot, famoso pelos seus trabalhos com geometria fractal, escreveu um artigo usando sua geometria para um modelo da distribuição das galáxias no universo. Entre outras coisas, fica demonstrado que, se as galáxias se distribuírem na forma de um fractal, elas não ocupariam a área toda do céu, e poderiam manter a maior parte deste escuro, mesmo sendo infinitas e distribuídas em todas as direções de forma, em larga escala, homogênea.

Para esclarecer a idéia, vamos citar o exemplo mais simples de fractal: o Conjunto de Cantor. Ele é produzido da seguinte forma: tomemos o intervalo $[0, 1]$. Agora arranquemos o terço central do intervalo, ficando com o conjunto $[0, 1/3] \cup [2/3, 1]$. Agora, tiremos o terço central de cada um dos pedaços restantes. Então, o novo conjunto será $[0, 1/9] \cup [2/9, 3/9] \cup [6/9, 7/9] \cup [8/9, 1]$.

²Note-se que este paradoxo envolvia o absoluto desconhecimento da origem da energia das estrelas – e, portanto, de sua duração.

Prosseguindo infinitamente com isso, o que resta de todos os (infinitos) passos é o Conjunto de Cantor. Os pontos do Conjunto de Cantor estão distribuídos por todo o intervalo e é fácil ver que se tratam de infinitos pontos. Por outro lado, nem todos os pedaços da reta possuem elementos do conjunto (os terços centrais tirados) e podemos mostrar que o comprimento total dos pedaços retirados do intervalo $[0, 1]$ mede exatamente 1; ou seja, o comprimento do Conjunto de Cantor (o que sobrou) é zero!

Da mesma forma, as galáxias no universo, mesmo que sejam um número infinito delas e mesmo que elas estejam distribuídas por todos os lados, elas podem se organizar em padrões fractais (que, aliás, são padrões muito encontrados na natureza) tais que a projeção de todas elas na esfera celeste é zero (na medida em que sejam considerados corpos pontuais)! Claro que galáxias não são pontuais (em especial as mais próximas); mas elas podem então ocupar uma área pequena do céu, mesmo sendo infinitas delas. É contra-intuitivo, num primeiro momento, mas um refinamento no nosso raciocínio matemático pode fazer ficar natural. O paradoxo de Olbers, então, não é realmente um paradoxo, mas algo mais parecido com o paradoxo de Zenão, discutido no Volume II: este é rapidamente desfeito usando-se a idéia de limite infinitesimal. Novamente, no caso do Olbers, o infinito aparece nos pregando uma peça e jogando na nossa cara o quanto somos despreparados para lidar com ele.

1.2 Tamanho da Galáxia

De qualquer forma, a noção de escala na cosmologia não foi um tema simples e de comum acordo entre os astrônomos, principalmente na última metade do século XIX e início do século XX. Em parte, isso acontecia pela dificuldade enfrentada pelos pesquisadores para a determinação de distâncias a nebulosas e aglomerados. A paralaxe trigonométrica heliocêntrica, o melhor método disponível à época, tinha um alcance que de forma alguma ultrapassaria os 100 pc³; qualquer que fosse a hipótese, a distância desses aglomerados era muito maior que isso. Outra maneira de inferir a distância é usando a informação contida na luz que a estrela emite, porém não podemos tentar compreender as distâncias usando a diferença que observamos no brilho das estrelas, como se todas tivessem a mesma luminosidade (o que não é verdade) e as mais brilhantes estivessem mais próximas e as menos brilhantes mais distantes. Essa idéia faz sentido, mas ela não é verdadeira, porque as estrelas não tem todas a mesma luminosidade.

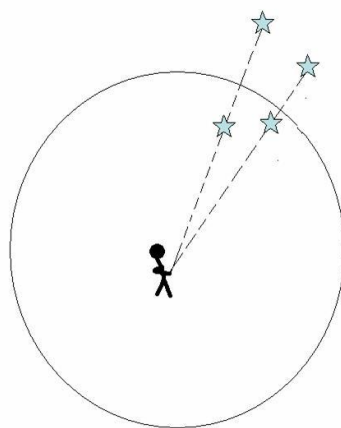


Figura 1.1: Como na imagem, não temos noção da profundidade das estrelas que se apresentam na esfera celeste. É preciso usar informações a respeito da luz e do meio que a luz percorreu até nos atingir para determinar essa distância.

Então devemos usar a relação entre a sua magnitude aparente (que observamos) e a magnitude intrínseca (verdadeira) da estrela, sendo que também devemos levar em conta os obstáculos

³O alcance de 100 pc só pôde ser conseguido com esta técnica graças ao satélite *Hipparcos*, que operou por três anos, a partir de 1989.

pelos quais a luz passa até nos atingir (principalmente quando passa pelo plano da Galáxia): as nuvens de absorção do meio interestelar. Elas provocam o “avermelhamento” (Av) da magnitude aparente (a luz perde um pouco da sua energia ao passar por uma nuvem interestelar), sendo que ela chega até nós enfraquecida. Hoje sabemos que esse método, conhecido como paralaxe espectroscópica⁴, é bom para determinar a distância de estrelas que estão até a 10.000 pc de nós, depois disso, ele se torna um pouco impreciso. No início do século XX as dimensões da nossa Galáxia se estendiam por cerca de 10.000 pc, (Lembre-se que, atualmente consideramos que a Galáxia tem aproximadamente 30.000 pc) não era necessário adotar outro método, porque não se imaginava que houvesse objetos mais distantes, tampouco se conhecia as limitações desse. Mas, se as espirais fossem objetos externos à Via Láctea, então suas distâncias deveriam ser maiores que 10.000 pc. Mas como se poderiam determinar essas distâncias?

O método que salvou o dia foi o das estrelas variáveis, descoberto em 1912 pela astrônoma Henrietta Leavitt (1868-1921) do *Harvard College Observatory*. Era o que o norte-americano Harlow Shapley usaria nos seus estudos dos aglomerados globulares. Mas não foram só as cefeidas; outro tipo de estrela variável usada para calcular distâncias foram as estrelas “Novas”⁵. Em 1885 a primeira nova foi identificada por Julius Scheiner em Andrômeda, a *S Andromedae*, ela teve sua magnitude elevada até a ordem 7, o que significava que brilhava de maneira equivalente a 50 milhões de Sóis. Em 1917 o astrônomo norte-americano George Willis Ritchey, que estudava placas fotográficas de nebulosas espirais (para detectar seu movimento interno e pontos que pudessem ter movimentos próprios medidos), acabou identificando numa delas uma “Nova” (na espiral NGC 6946). Depois disso, Ritchey e o astrônomo Heber Curtis encontraram muitas outras novas em espirais, essas mais fracas que a de 1885. As novas forneciam distâncias de corpos celestes mais distantes porque brilhavam com uma intensidade muito maior (O astrônomo Knut Lundmark chegou a afirmar em 1920 que algumas novas deveriam fornecer medidas de distância para objetos de até milhões de anos luz).

A questão foi tão quente que a *Academia Nacional de Ciências* dos EUA resolveu promover um debate público sobre o tema, no seu encontro de 1920, em Washington. O título original do debate era *The Scale of the Universe*, mas hoje ele é mais conhecido com o nome genérico de “O Grande Debate”. Os debatedores eram: de um lado o Harlow Shapley, do Observatório de Monte Wilson, EUA, o maior do mundo na sua época⁶; de outro, Heber Curtis do Observatório de Lick. Suas opiniões sobre o tamanho do universo e da Galáxia, e sobre o que as Nebulosas têm a ver com isso, eram muito diferentes.

Shapley defendia que as nebulosas seriam nuvens de gás relativamente próximas, e que o Universo era composto de apenas uma grande Galáxia. Na versão publicada do debate, Shapley usou variáveis cefeidas de aglomerados globulares para derivar um valor para a extensão da Via Láctea (~ 100.000 parsec, o maior resultado apresentado até então), numa Galáxia tão grande não havia espaço para nada que fosse exterior, ela deveria ser todo o Universo conhecido, com os aglomerados globulares e as nebulosas próximas, dentro da Galáxia ou muito perto dela.

Como os aglomerados globulares estavam distribuídos simetricamente em relação ao centro da Galáxia, Shapley deduziu que o Sol estaria a cerca de 8 Kpc desse centro (~ 30.000 anos luz), uma mudança dramática, já que nos tirava do centro do Universo.

Para se decidir sobre a pertinência das espirais à nossa Galáxia, Shapley usou resultados de movimento de rotação de espirais obtidas por Adrian van Maanen e ignorou a possibilidade de que as espirais fossem galáxias externas.

⁴Ver Unidade II do Volume III

⁵O fenômeno súbito de uma nova, se deve ao aumento da luminosidade de uma estrela anã branca (mais de seis ordens de grandeza) seguido de seu decréscimo, que é mais lento. O aumento da luminosidade na estrela acontece porque a temperatura na sua superfície torna-se mais alta (cerca de 10^7 K) provocando a queima nuclear de uma camada de hidrogênio depositada na superfície pela companheira da anã branca.

⁶Fundado e financiado pelo astrônomo George Ellery Hale em 1904.

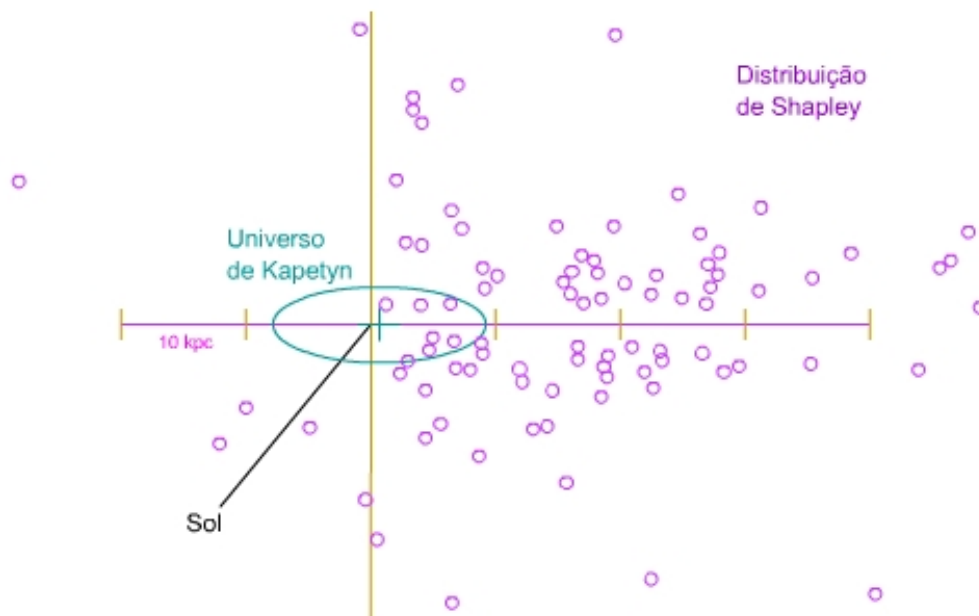


Figura 1.2: A distribuição de aglomerados globulares observada por Harlow Shapley. Observe que a Terra dista cerca de 30.000 anos luz do centro da Galáxia.

Heber Curtis por outro lado, acreditava que a Galáxia fosse menor. Ele criticou a calibração de Shapley da curva de período-luminosidade usada para determinar a distância às cefeidas, argumentando que as cefeidas não seriam bons indicadores de distância tampouco os resultados de van Maanen para a rotação das espirais. Sustentou um valor de $\sim 10,000$ parsec para a extensão da Galáxia, para ele as espirais estariam fora dos domínios da Galáxia e que fossem elas mesmas “Universos Ilha”. Para defender seu ponto de vista, Curtis apresentou evidências, sendo uma delas a determinação de altas velocidades radiais para as nebulosas espirais⁷ e o uso de estrelas Novas para o cálculo de distâncias.

A solução desta controvérsia ocorreu alguns anos mais tarde, quando foram construídos grandes telescópios e foi possível observar essas nebulosas com uma ampliação muito maior, e perceber que elas eram conjuntos de estrelas, e não nuvens de gás. Pouco tempo depois, Edwin Hubble (1889-1953), na década de 20, conseguiu medir as distâncias de algumas “nebulosas” e calculou uma distância de cerca de 900 mil anos luz para a cefeida que observara na galáxia de Andrômeda (a distância conhecida atualmente da galáxia de Andrômeda é de cerca de dois milhões de anos luz). Como o valor de distância encontrado é muito maior do que o das estrelas da Via Láctea, a descoberta de Hubble foi vista como um indício de que Andrômeda é um corpo exterior a nossa galáxia. Com o tempo constatou-se que o mesmo ocorria para outras “nebulosas”, ou seja, as nebulosas eram outras galáxias.

⁷Essas velocidades radiais das nebulosas espirais foram determinadas por V. M. Slipher e foram importantes para a criação da teoria do universo em expansão.

1.3 Olhando em Escalas

A questão sobre o tamanho do Universo ainda não é bem resolvida, mas ela deixou de ser um problema para a pesquisa. O que fazemos hoje é lançar mão de um conceito operacional que compartimenta os objetos de estudo no tamanho que precisamos. Vamos explicar melhor: tomemos um astrônomo e seu objeto de estudo. Para melhorar sua capacidade de elucidar os fenômenos que interferem neste objeto de estudo, ele pode imaginar uma esfera de raio R , envolvendo o objeto e as vizinhanças dele, de forma que, nesta esfera, estejam contidas todas as coisas capazes de perturbar significativamente o objeto (para os propósitos que o astrônomo estuda). Isto é, em primeira aproximação, todas as interações oriundas de objetos localizados fora da esfera podem ser consideradas desprezíveis. Podemos então nomear esse raio R (ou a ordem de grandeza dele) como a *escala de distância* usada pelo astrônomo para estudar um dado objeto.

Agora a pergunta a fazer é: quais são as escalas típicas dos estudos cosmológicos? Vamos começar a responder esta pergunta olhando primeiro outros objetos típicos. Tomemos, inicialmente, o Sistema Solar. Para um estudo do Sistema Solar como um todo, precisaríamos de uma esfera cujo raio fosse grande o suficiente para incluir, ao menos, a Nuvem de Oort – cuja distância ao nosso planeta é de aproximadamente um ano-luz. Esta distância é suficiente para estudarmos a dinâmica dos corpos que orbitam o Sol, dado que outros objetos da galáxia não alteram significativamente as órbitas destes (a menos de eventos catastróficos).

Por outro lado, se desejarmos estudar o funcionamento de aglomerados estelares, sejam os abertos ou os globulares, precisamos observar e analisar regiões muito maiores. O valor do raio R da nossa esfera imaginária teria que ser de algumas centenas ou até milhares de parsec.

Numa escala acima dos aglomerados estelares, encontram-se as galáxias, cujas escalas de tamanho variam de algumas dezenas de parsec até centenas de milhares de parsec (se quisermos estudar fenômenos internos às galáxias, geralmente não precisamos levar em conta as influências das galáxias vizinhas). Já para estudar fenômenos de interação *entre* galáxias, precisamos levar em conta conjuntos maiores: grupos de galáxias (como o Grupo Local), aglomerados (como o de Virgo) ou superaglomerados de galáxias, todos estes necessitam de análises na escala dos megaparsec, ou seja, da ordem de um milhão de parsecs.

Indo ainda mais longe, podemos analisar os conjuntos de aglomerados e superaglomerados de galáxias. De acordo com o que indicam as observações contemporâneas, a partir destas escalas (dezenas de megaparsec), encontramos curiosas estruturas de filamentos:

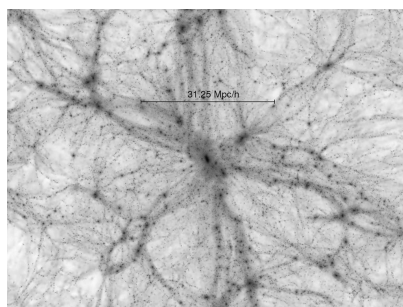


Figura 1.3: Universo em larga escala. A barra informa uma escala de 31,25 Mpc/h onde h é uma constante cujo valor está entre 0 e 1, que serve para nos informar, para quem já se deparou com a lei de Hubble, o valor da constante de Hubble em unidades de 100 (km/s)/Mpc. Atualmente estima-se que h seja maior que 0,5 e menor que 0,8.

Para estudar o conjunto desses filamentos, os astrônomos precisam analisar distâncias da ordem de centenas de megaparsec, onde uma estrutura de rede nos fornece informações sobre a

dinâmica do universo em larga escala.

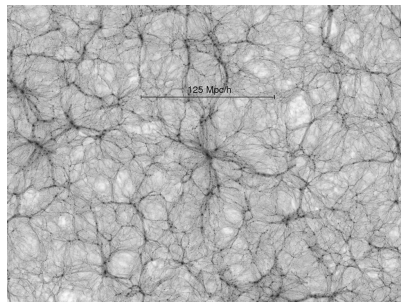


Figura 1.4: Universo em escala ainda maior! A barra informa uma escala de 125Mpc/h.

Universo em larga escala: eis o que os cosmólogos desejam descrever. Para isso, eles precisam entender não só a dinâmica dos filamentos que formam essa “esponja de matéria”, mas também a evolução da própria rede de todos os filamentos. Aqui se fazem necessárias observações na escala de várias centenas de megaparsec e até gigaparsec. Essa escala começa a se aproximar do tamanho estimado do próprio universo observável! A suposição, então, é que o universo não apresenta estruturas maiores que as redes de filamentos; esta zona de escalas, portanto, pode ser considerada o domínio dos cosmólogos.

Definida assim, cada uma dessas escalas apresenta problemas diferentes aos seus cientistas que, a princípio, podem ser resolvidos por sistemas teóricos diferentes. Daí que faz sentido dizer que usamos três mecânicas (quântica, clássica e relativística): cada uma responde a problemas específicos das suas escalas. Alguns físicos insistem na necessidade de uma Teoria de Tudo, uma única teoria que abarque todos os fenômenos; é uma exigência válida, razoável, mas muito mais estética do que pragmática⁸. Mas o fato é que, compartilhando grandes teorias ou não, nichos físicos e astronômicos, tanto teóricos como observacionais, trabalham em algumas escalas específicas e respondendo a problemas específicos.

1.3.1 Mapeamento do Universo

Mas como podemos saber como o Universo é nas escalas da cosmologia? Observando, oras.

A era dos computadores mudou completamente a maneira de fazer ciência. Essa frase hoje parece banal, mas é de importância fundamental para a história da ciência, da astronomia, da cosmologia. Das românticas noites de observação e confecção de filmes fotográficos nos telescópios, passamos a uma astronomia automatizada, com rotinas programadas remotamente, telescópios robóticos (muitos deles flutuando no espaço), enviando quatrilhões de dados para computadores que os processam imediatamente (algo que somos totalmente incapazes de fazer), fazendo emergir daí uma rede de padrões e correlações possivelmente relevantes. Hoje, os dados não estão mais em uma tabela a partir da qual se faz um desenho, mas em dezenas de megabytes de bancos de dados na internet, que são apenas manipulados indiretamente, por meio de programas que podem tratá-los. Nesse sentido, todo astrônomo, hoje, precisa ser também um programador.

Nos últimos quinze anos foram criados programas impressionantes de mapeamento galáctico, como o projeto *2df Galaxy Redshift Survey*, que mapeou mais de 221.000 galáxias e o *The Sloan Digital Sky Survey*, que mapeou aproximadamente 675.000 galáxias e 90.000 quasares e que

⁸Essa necessidade é mais no sentido de se criar uma visão de mundo unificada, e geralmente é defendida por aqueles que esperam da ciência alguma representação da “realidade em si”, mesmo que de forma aproximada. Para os que não têm esta ambição iluminista com relação à ciência, fica muito mais simples admitir trabalhar com teorias diferentes em escalas diferentes e pronto. Alguns teóricos inclusive, como Paul Feyerabend, insistem nos grandes ganhos que teríamos se nos mantivéssemos sempre trabalhando com teorias diferentes, que não se encaixam umas nas outras, paralelamente.

pretende, ao final de 2008, chegar à incrível marca 860.000 galáxias e 105.000 quasares mapeados. Que imagem do universo ele mostrou? Estruturas filamentosares, cujos elementos principais são galáxias, aglomerados de galáxias e superaglomerados de galáxias, cercadas por regiões escuras. Nesta seção, apresentaremos uma técnica de observação cujos resultados corroboram esta visão do global da distribuição de matéria luminosa do cosmos. Esta técnica consiste em criar um mapa tridimensional da localização de galáxias no Universo, a partir da medição do *redshift* da luz oriunda destes objetos.

Na figura abaixo encontra-se o mapa obtido pelo projeto *2df Galaxy Redshift Survey*. Observe que o número de galáxias diminui com a distância, o que é compreensível devido a limitações de magnitude do telescópio. Quanto mais longe observamos, maior deve ser a luminosidade absoluta da galáxia para que sua magnitude aparente seja menor que o limite de observação do telescópio o que resulta num menor número de galáxias observadas. Mesmo com essa limitação a estrutura filamentar é visível ao longo de todo o mapa.

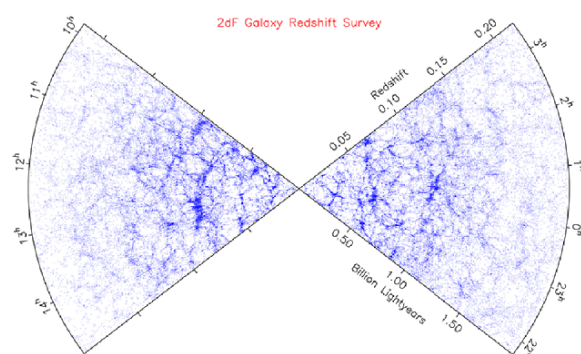


Figura 1.5: Mapa obtido pelo projeto *2df Galaxy Redshift Survey*.

Ao analisarmos esta figura, é interessante notar que o eixo radial tem como coordenada o desvio espectral para o vermelho observado na luz galáctica, em vez da distância destes objetos até o nosso planeta. É um fato curioso, dado que o objeto principal dos projetos citado é criar um mapa tridimensional da distribuição de matéria luminosa no espaço, merecendo, portanto, uma justificativa. A razão para esta escolha de coordenadas está intimamente relacionada com a dificuldade de medição de distâncias de objetos longínquos e a limitada precisão das técnicas padrões de inferência deste parâmetro⁹.

O Princípio Cosmológico, portanto, só é exigido nessas grandes escalas, em que galáxias são pontuais e podem ser tratadas como um fluido, ou uma estrutura fractal. Para efeito de comparação, veja uma foto em uma escala típica da *astronomia galáctica*; nessa escala, as coisas claramente não são homogêneas nem isotrópicas.

De forma similar às escalas espaciais, existe também o problema das escalas temporais. Para os que defendem o princípio cosmológico perfeito, portanto, em escalas de tempo cosmológicas, o universo deve se manter sob o mesmo aspecto. Entretanto, a teoria dominante hoje – o Modelo Padrão da Cosmologia – não defende esse princípio; pelo contrário, defende um universo que teve um começo e vem crescendo deste então. Para ajudar na visualização, quatro imagens de simulação são expostas abaixo, representando a estrutura em larga escala do universo em quatro datas distintas da sua história. Os dados utilizados para a criação das imagens referem-se a uma simulação utilizando supercomputadores na Alemanha e na Inglaterra, num projeto conhecido como *Consórcio de Virgo*. O objetivo desse grupo é reconstruir toda a história do universo utili-

⁹Exemplos de técnicas de medição de distâncias: paralaxe, observação de estrelas variáveis e supernovas Ia, observação de curvas de rotação de galáxias, Lei de Hubble.

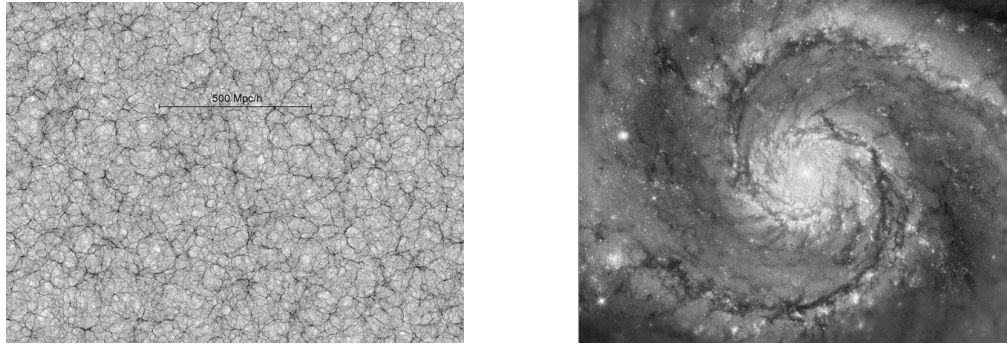
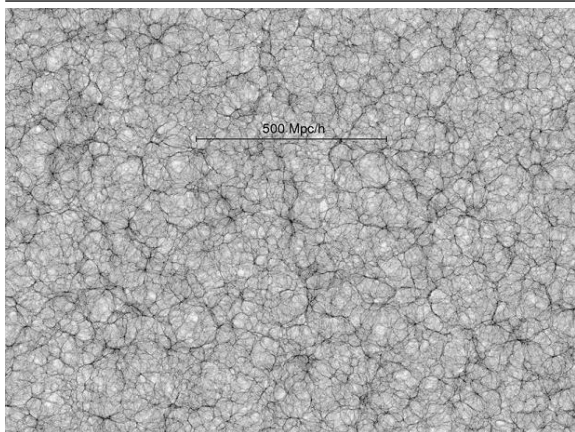


Figura 1.6: Universo em escala de 500 Mpc/h! E, a título de comparação, a visão frontal de uma galáxia espiral.

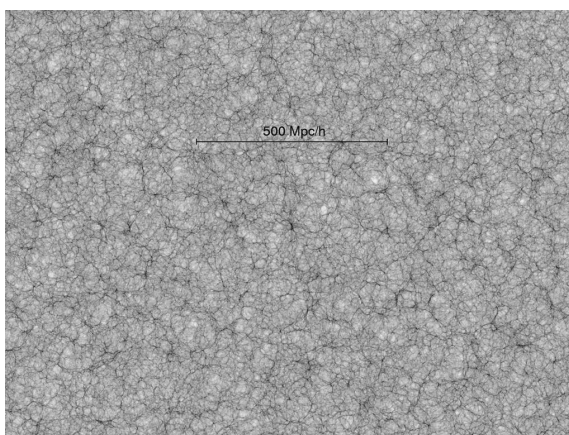
zando o modelo padrão e os dados mais precisos que dispomos para parâmetros cosmológicos relevantes.

É fundamental assimilarmos essas fotos à nossa imagem mental da dinâmica do universo. Vendo-as, conseguimos nos convencer que tratar matéria em larga escala como um fluido perfeito (i.e., sem viscosidade¹⁰), não é, pelo menos em primeira aproximação, uma idéia absurda. É uma conclusão totalmente informal, sem nenhum rigor matemático ou físico; serve apenas como auxílio à intuição.

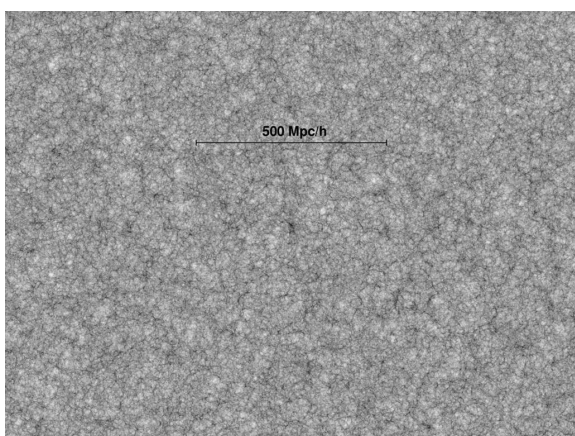
¹⁰A VISCOSIDADE de um fluido mede o quão “pegajoso” ele é. Mel de abelha, por exemplo, é um fluido com viscosidade muito alta; água, por outro lado, tem viscosidade baixa (mas não nula). Se deixarmos cair mel no braço, ele ficará todo melado e grudento: o mel não só vai recobrir a parte do braço onde cair, como vai grudar também em qualquer outra coisa em que o braço melado encoste. Já quando derramamos água no braço, ficam grudadas neste apenas algumas gotas, que saem assim que o balançamos. Contudo, se deixássemos o hipotético “fluido perfeito” (com viscosidade nula) cair em nosso braço, ele escorreria imediata e completamente para o chão, não deixando nenhum resíduo. Líquidos sem viscosidade também podem ser pensados como líquidos que não interagem por atrito.



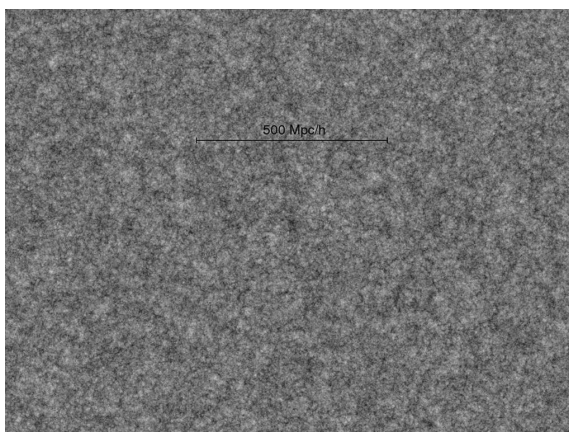
Universo Atual



Universo com 4,7 bilhões de anos de existência



Universo com 1 bilhão de anos de existência



E com 210 milhões de anos de existência

Capítulo 2

A Lei de Hubble

Antes de continuarmos nossas perguntas, temos que analisar um resultado empírico singular para nossa atual compreensão do universo: a Lei de Hubble.

2.1 Primeira Versão

A Lei de Hubble é uma lei empírica que relaciona a velocidade de uma galáxia na direção da linha de visada¹ com a sua distância ao nosso planeta. Ela é considerada um dos pilares da cosmologia moderna, em especial pela interpretação do universo em expansão que ela de certa forma sustentou.

Para entendê-la, imagine o seguinte experimento mental: suponha que é dado a você um telescópio, um espectrômetro e a tarefa de analisar o espectro das galáxias vizinhas a nossa, cuja distância é conhecida pelo método das cefeidas. Você observa o espectro de Andrômeda, por exemplo, e nota que ele está deslocado para o azul. Interpretando esse desvio do espectro como sendo causado pelo Efeito Doppler, isso indica que Andrômeda está se aproximando do Sol, com uma enorme velocidade de 300km/s! Simulações modernas indicam que no futuro haverá uma grande colisão entre Andrômeda e a Via Láctea. Supondo que nosso planeta não se encontra num local privilegiado do cosmos, ou seja, que a distribuição de galáxias no universo é isotrópica, devemos esperar que o número de galáxias se afastando seja igual ao de galáxias se aproximando.

Esse experimento foi feito por alguns astrônomos no começo do século XX. Os resultados encontrados foram surpreendentes: a quase totalidade das galáxias vizinhas – exceto algumas muito próximas e, portanto, para as quais as influências gravitacionais locais são mais significativas que os efeitos globais – tinham um espectro desviado para o vermelho, ou seja, as galáxias não pertencentes ao grupo local estão todas se afastando de nós! Além disso, o afastamento de galáxias é independente da direção no céu, e quanto mais distante maior o desvio para o vermelho, maior a velocidade! Sua descoberta pode ser sintetizada, como foi feito por Hubble, no enunciado a seguir:

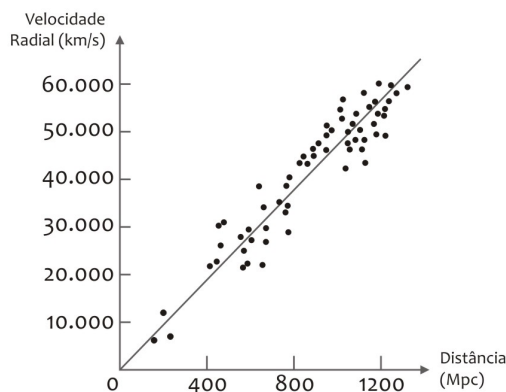
As galáxias se afastam da Terra com velocidade proporcional a distância que nos separa.

$$V_{\text{radial}} = H_0 \cdot d$$

Onde V_{radial} é a velocidade radial da galáxia, d a distância da mesma e H_0 uma constante, chamada constante de Hubble.

Aqui vai um gráfico como o que Hubble construiu:

¹LINHA DE VISADA é uma reta que liga o centro da Terra ao centro de galáxia!



- 1- Estime a faixa de erro do gráfico acima, de lei de Hubble. Porque só é confiável usar a lei para prever distâncias de galáxias muito distantes (ou muito velozes)?
- 2- Tomando a constante de Hubble $H = 100 \text{ km/s}\cdot\text{Mpc}$:
 - (a) Calcule a distância de uma galáxia cujo desvio para o vermelho aponta uma velocidade de afastamento de 10.000 km/s .
 - (b) Quanto deve aumentar estatisticamente o redshift do espectro, se quisermos aumentar o valor da distancia encontrado na letra (a) em 1×10^6 parsecs?

Mas qual foi a grande sacada que levou Hubble a fazer um experimento que ninguém nunca tinha imaginado e, com isso, mudado para sempre a história da cosmologia? Será que foi algum sonho que ele teve, alguma dessas sacadas de gênio que permanece incompreendida para os meros mortais? Uma galáxia que caiu na sua cabeça enquanto ele fazia um piquenique?

Responderemos a essa pergunta negando a maior parte das palavras usadas na pergunta. Elas carregam várias concepções ingênuas de como a ciência é feita: por gênios isolados, a partir de lampejos geniais, fazendo experiências que contrariam toda teoria. Essa visão menospreza boa parte do trabalho científico que é feito coletivamente, por muitos cientistas discutindo, debatendo, montando novos experimentos e novas interpretações teóricas. Se quisermos de fato entender o surgimento de novas idéias na ciência, é pra esses longos debates que devemos olhar.

2.2 Antecedentes

Hubble sequer foi o primeiro a realizar um experimento de *redshift* versus distância, para galáxias. Em 1912, Vesto Slipher já tinha conseguido medir o *blueshift* de Andrômeda, possivelmente ainda no contexto do Grande Debate sobre a natureza da galáxia. Em 1925, Slipher medira o desvio no espectro de 45 corpos não-estelares cuja distância era conhecida, tendo encontrado 41 *redshifts* e somente 4 *blueshifts*. Em 1923, Silberstein, de forma similar, analisou espectros de corpos e encontrou, explicitamente, a relação linear entre redshift e distância; mas como ele excluiu alguns dados que não apoiavam a relação, acabou sendo ridicularizado pela comunidade científica.

Isso tudo vinha chamando atenção de diversos astrônomos, mas se tornou importante para a cosmologia quando a discussão teórica alcançou o problema. Em 1917, o holandês Wilhelm De Sitter publicou seu modelo cosmológico em que previa teoricamente que corpos distantes deviam apresentar desvios para o vermelho. Na época, ainda era consenso que o universo deveria ser estático. Mas outras pessoas, por razões principalmente teóricas (veremos isso melhor no

próximo capítulo), começaram a apoiar a idéia de um universo em expansão ou contração. Em 1825, o belga Georges Lemaître publicou um famoso trabalho em que analisava as soluções das equações de Einstein que levavam a universos em expansão. Ele então deduziu *teoricamente* a futura Lei de Hubble – que podia muito bem ser conhecida como Lei de Lemaître:

$$v_{\text{radial}} = \frac{c}{R_0\sqrt{3}}d$$

Onde c é a velocidade da luz, R_0 é o raio de curvatura do universo, e d é a distância do corpo. Vemos que comparando esta equação com a Lei de Hubble, a constante de Hubble foi deduzida por Lemaître.

Assim, tentativas experimentais já existiam, e a lei já tinha sido deduzida da teoria. Mas Edwin Hubble trabalhava no grande observatório de Mount Wilson, nos EUA e, com isso, conseguiu medidas de distâncias para corpos mais distantes do que se conseguira até então. Seu famoso trabalho foi publicado então em 1929; nele eram apresentados dados de 46 galáxias, 20 das quais, entretanto, tinham medidas razoavelmente confiáveis de distância. Além disso, muitos destes redshift foram obtidos a partir dos trabalhos de Slipher (é normal, em trabalhos científicos, partir de outros trabalhos já feitos em vez de começar do nível zero). Com esses dados, e sem roubar, ele chegou à relação linear entre os redshift das galáxias e a sua distância, que acabou ficando conhecida com o seu nome.

2.3 Interpretação

Depois de estabelecido o resultado experimental, resta saber como interpretá-lo. Como dissemos, hoje em dia quase todos interpretam a Lei de Hubble como evidência da expansão do universo. No entanto, o próprio Hubble não acreditava que as galáxias estivessem realmente se afastando. Em seus trabalhos, usava o termo “velocidades aparentes” para as velocidades inferidas a partir do desvio espectral. Hubble continuou receoso em relação a idéia de um universo em expansão até o final de sua vida, e apesar de reconhecer que até o momento não era possível uma conclusão segura sobre o assunto, ele demonstrava uma preferência pela idéia de um universo estático, pois acreditava que os modelos de universos em expansão fossem uma interpretação forçada dos dados experimentais (Assis et al 2008). Ele escreveu numa carta a De Sitter, “a interpretação (dos redshift das galáxias) dever ser deixada para você e os outros poucos capazes para discutir esta questão com autoridade”.

Houve algumas teorias alternativas para explicar o *redshift* observado das galáxias. Em 1929, Fritz Zwicky propôs que a luz sofresse um arrasto gravitacional, perdendo energia para meio interestelar conforme atravessava o espaço. Como energia (E) e frequência (f) estão relacionadas de relação $E = h \cdot f$, então, conforme a luz perde energia, sua frequência diminui. Isso explicaria os *redshifts*. Zwicky deduziu quantitativamente a relação entre redshift e distância, chegando a um resultado semelhante à Lei de Hubble.

Outra abordagem para explicar os redshifts foram teorias influenciadas por Arthur Eddington, que propunham que as constantes fundamentais variavam com o tempo. Com isso, o redshift variaria com o tempo também, dado que quando olhamos para o céu estamos vendo o passado. De qualquer forma, a reflexão sobre constantes variáveis é bastante interessante.

Esses são bons exemplos de que, dado um conjunto de dados experimentais, é possível haver mais de uma teoria que se propõe a explicá-los, e que a competição entre teorias rivais é um processo muito complicado na prática. Por uma série de motivos, a interpretação da expansão foi preferida a estas, que foram encaradas pelos seus rivais como *ad hoc*² ou desnecessárias.

²As modificações *ad-hoc* são alterações das teorias sem conseqüências testáveis experimentalmente, e são um conceito

2.4 Versão Generalizada

Nos modelos mais recentes e em escalas maiores (na casa dos gigaparsec), a velocidade radial deixa de ser uma função linear do desvio para o vermelho, tornando-se uma função $V(z)$ complicada, dependente de parâmetros de difícil medição como a densidade de massa média do universo. Como consequência, a constante de Hubble H_0 é substituída por uma função $H(z)$ também complicada e dependente desses mesmos parâmetros. Nós podemos trabalhar também com a função $H(z(t))$ ou simplesmente $H(t)$, dado que existe uma relação unívoca entre os parâmetros z e t (se quiser pensar assim, a função $z(t)$ é a que dá os desvios para o vermelho ao longo da história do universo). A seguir você verá as vantagens interpretativas em se trabalhar H como função do tempo e não do desvio para o vermelho, relacionando-a com a expansão do universo (fator de escala). Por enquanto, vamos ficar com a enunciação da nova forma da lei:

Lei de Hubble generalizada (necessária a partir dos Gigaparsec):

As galáxias se afastam da Terra com velocidade proporcional a distância que nos separa.

$$V_{\text{radial}} = H(t) \cdot d$$

Onde $H(t)$ é uma função do tempo conhecida como parâmetro de Hubble

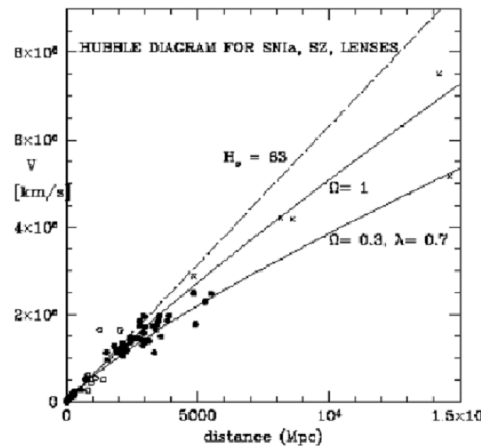


Figura 2.1: A linha tracejada representa a Lei de Hubble Linear. Esta aproximação não ajusta os dados de supernovas distantes; é preciso trabalhar com a Lei de Hubble generalizada. As duas linhas cheias representam previsões, para diferentes parâmetros cosmológicos, da função $H(t)$.

controverso. Um exemplo de hipótese ad-hoc é a frase que aparece no início desta Unidade, do Douglas Adams. Para o filósofo da ciência Karl Popper, as modificações ad-hoc são feitas para proteger as teorias de falsificações potenciais, e não devem ser aceitas pelos cientistas. Já para o Paul Feyerabend, na competição entre teorias “vale tudo”, inclusive propaganda e modificações ad-hoc.

Capítulo 3

O que é o Espaço?

Uma grande dificuldade em se entender as idéias cosmológicas, como a de expansão do Universo, está na visualização dessa expansão, afinal, para onde o espaço se expande? A nossa primeira tentativa de entender isso geralmente é respondendo “para fora”, e imaginamos o espaço se expandindo para algum outro espaço pré-existente... Mas isso não faz sentido, nesse caso o espaço já estaria lá!! E se você imaginar o espaço se expandindo para alguma direção em especial, aumentando seu volume (portanto, não-infinito, segundo o Big Bang) você necessariamente também estará imaginando um centro para o universo, e o espaço deixaria de ser isotrópico.

O que é o espaço? Usamos a palavra espaço para nos referirmos aos tamanhos e às dimensões dos objetos. Com certeza você já ouvi essa palavra da sua mãe, quando levou para casa algo que ocupava muito espaço. A metáfora que mais usamos para espaço é o vazio dentro de um copo ou um barril: é algo *a ser preenchido* por matéria. O espaço tem a ver com o vazio. Mas um rápido exame filosófico mostra que isso não faz muito sentido, afinal, o que é o vazio? É aquilo que não é nada. O grego Parmênides de Samos, no século -6, já dizia que aquilo que não-é, não pode existir – do contrário, teríamos uma contradição nos termos. O Vazio, portanto, não pode existir.

Isso foi defendido por muitos filósofos ao longo da história. Para eles, então, o universo deveria ser completamente preenchido. Vimos um desses filósofos (René Descartes), na discussão sobre o mundo mecânico, no Volume III. Mas mesmo alguns filósofos mais tradicionais, como Platão e Aristóteles, tinham horror, um horror lógico, à idéia de vazio – uma das razões pelas quais eles eram tão contrários à filosofia dos atomistas.

Uma solução para o problema é admitir que o espaço não existe mesmo, mas é só um objeto da nossa imaginação, um conceito abstrato que usamos para compreender melhor o mundo. O filósofo Immanuel Kant já dizia isso. Ele postulava que quase todo o conhecimento que temos vinha através dos nossos sentidos, das experiências que tínhamos na nossa vida. Quase todo, mas não todo; seria necessário, para que *algum* conhecimento fosse produzido, que já existissem algumas idéias bem fundamentais, a partir das quais os primeiros dados empíricos fossem interpretados. Dentre esses conceitos *a priori*, estariam os conceitos de espaço e de tempo¹:

O espaço não é um conceito empírico abstraído de experiências externas. Pois a representação de espaço já tem que estar subjacente para certas sensações se referirem a algo fora de mim (isto é, a algo num lugar do espaço diverso daquele em que eu me encontro), e igualmente para eu poder representá-las como fora de mim e uma ao lado da outra e, por conseguinte, não simplesmente como diferentes, mas como situadas em *lugares* diferentes. (...) O espaço é uma representação *a priori* necessária, que subjas a todas as intuições externas. Jamais é possível fazer-se uma representação

¹Kant, Immanuel. *Crítica da Razão Pura*. Coleção Os Pensadores. São Paulo: Editora Abril, 1983 (2ª edição), p. 41.

de que não há espaço algum, embora se possa muito bem pensar que não se encontre objeto algum nele. Ele é, portanto, considerado a condição da possibilidade dos fenômenos e não uma determinação dependente destes.

O psicólogo Jean Piaget mostrou, no meio do século XX, através de alguns experimentos, que o conceito de espaço não é tão inato assim. Segundo ele, as crianças nascem com um conceito muito diferente de espaço e de tempo, e que idéias bem simples como a permanência dos objetos no espaço (isto é, você pressupor que um objeto continua existindo mesmo depois de, digamos, ele ser escondido atrás de outro objeto) não nascem junto com as crianças. Os conceitos normais de espaço e de tempo, segundo ele, são adquiridos ao longo dos dois primeiros anos de vida.

Outra saída para o problema do espaço é transformá-lo em um objeto físico, com propriedades. Isso foi feito, também, por muitos filósofos ao longo da história. Para citar poucos, podemos ficar em Newton, que também já citamos no Volume III. Para ele, o espaço era um ente absoluto e imutável, que não interagira com nada. Mas ele desempenhava um papel importante na ordem das coisas: como Deus é onipresente, ele está, de alguma forma, em cada ponto do espaço. Assim, Deus sabe, a todo instante, a posição de toda porção de matéria no Universo. Desta forma, podemos dizer que o espaço é como se fosse o órgão sensível de Deus.

No século XIX, também, o espaço era imaginado como preenchido de um fluido muito sutil, chamado ÉTER LUMINÍFERO, que se confundia com o próprio espaço. Esse seria o fluido do qual as ondas eletromagnéticas, como a luz, seriam vibrações. Entretanto, as tentativas de detecção deste éter foram fracassadas; a idéia foi abandonada por isso e também porque as idéias físicas sobre o espaço mudaram rapidamente, no início do século XX.

Com a Relatividade Geral formulada por Albert Einstein, o espaço e o tempo (mais precisamente, pensados juntos - o espaço-tempo) deixavam de ser repositórios absolutos e pré-fixados, como concebido por Newton; porque, agora, *espaço e tempo são moldados pela matéria e pela energia que nele estão contidas, e passam a ser, eles mesmos, personagens ativos na dinâmica do universo*².

O próprio tempo, nesse universo, passa a ser pensado como mais uma dimensão. Assim, em vez de pensarmos em um universo que tem um espaço de três dimensões e no qual o tempo flui, pensamos logo em um espaço-tempo de quatro dimensões. A idéia de tratar o tempo como similar a uma dimensão espacial não é nova (certamente é mais antiga que Einstein); ela já é naturalmente sugerida pela nossa linguagem; no dia-a-dia, usamos muitos termos espaciais para caracterizar relações temporais. Isso aparece quando dizemos que alguém está “à frente do seu tempo”, ou que uma mágoa passada “ficou para trás”, ou ainda quando falamos em viagens no tempo. É seguindo o mote deste último assunto que aparece, em um romance de ficção científica do século XIX, uma explicação do espaço + tempo como um espaço quadridimensional que não poderíamos deixar de citar:

- Um cubo instantâneo pode existir?
- Não consigo seguir você, – disse Filby.
- Um cubo que não dure absolutamente nenhum tempo pode ter uma existência real? Filby ficou pensativo.
- Claramente, qualquer corpo real deve se estender em quatro direções: deve ter Comprimento, Largura, Espessura e Duração, – prosseguiu o Viajante do Tempo – Mas por uma enfermidade natural da carne, a qual vou lhes explicar em um momento, tendemos a passar por cima desse fato. Há, na realidade, quatro dimensões, três das quais chamamos de planos do espaço, e uma quarta, o Tempo. Existe, no entanto,

²Uma das inúmeras consequências disso é que a homogeneidade e a isotropia do espaço-tempo passam a estar diretamente associadas à homogeneidade e à isotropia da própria distribuição da matéria-energia. Se a matéria se concentra mais em uma certa parte do espaço, essa parte fica mais deformada que as outras.

uma tendência a formar distinção irreal entre aquelas três dimensões e esta, porque nossa consciência se move intermitantemente em um único sentido, ao longo dessa última dimensão, do começo ao fim de nossas vidas.

– Isso – disse um homem muito jovem, fazendo esforços espasmódicos para acender seu cigarro sobre o lampião – isso... está muito claro, realmente.

– Agora, é interessante que isso seja tão amplamente negligenciado – continuou o Viajante do Tempo, com um leve acesso de alegria – Eis realmente o que se entende por Quarta Dimensão, embora algumas pessoas que dela falam não saibam o que dizem. É apenas uma outra maneira de olhar para o Tempo. Não há nenhuma diferença entre Tempo e qualquer uma das três dimensões do Espaço, exceto a de que nossa consciência se move ao longo dela. Mas alguns tolos tomaram conta do lado errado da idéia.

H. G. Wells, *A Máquina do Tempo*

Mas para entender melhor essa idéia, precisamos entender melhor a idéia de dimensão³.

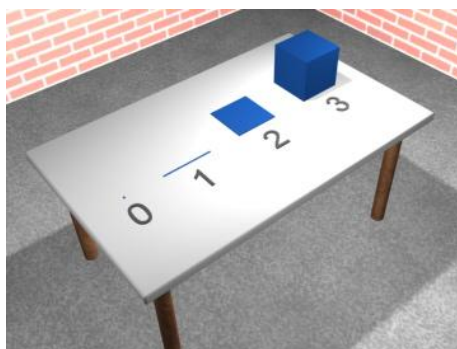
3.1 Dimensões do Espaço

Uma definição não rigorosa de dimensão seria “uma direção na qual certo objeto possui uma medida, um comprimento”, assim existem corpos que se entendem por uma, duas, três, quatro, ... n dimensões.

Uma linha só possui uma dimensão, podemos medi-la em metros, e em qualquer outra direção será infinitamente fina, com comprimento nulo.

Um quadrado já possui duas dimensões, pode ser medido em metros quadrados e possui comprimento e largura, porém também não possui altura. Note que, a partir da segunda dimensão, já podemos imaginar outras formas para uma figura contida nele (triângulos, círculos...) quanto mais dimensões tiver um espaço, maior variedade de formas teremos.

Um cubo possui todas as 3 dimensões a que estamos acostumados, e pode ser medido em metros cúbicos. Uma linha pode ser colocada em um plano ou em um espaço, assim como um triângulo pode ser desenhado dentro de um cubo, mas não o contrário, pois não é possível encaixar um objeto em um espaço que tenha um número menor de dimensões.



Também podemos associar a cada dimensão um eixo que se estende por essa direção; assim, toda vez que quisermos incluir uma nova dimensão, basta desenharmos um novo eixo perpendicular a todos os outros já desenhados! Simples, não?

³O texto da seção seguinte foi baseado no site <http://www.silvestre.eng.br/astrologia/artigos/bigbang/> e caso você tenha se interessado pela 4ª dimensão, você pode encontrar mais detalhes e informações lá.



Nessa figura vemos 3 eixos perpendiculares entre si, portanto, uma figura que representa um espaço tridimensional, semelhante ao nosso. Se quisermos imaginar uma quarta dimensão, precisamos incluir um quarto eixo que seja perpendicular a esses três, tente imaginá-lo!

Por mais que você procure, não vai encontrar. Não há lugar para ele, ou, melhor dizendo, não há espaço para ele. Isso está ligado a uma característica física do nosso espaço, e como nós vivemos nele, jamais seremos capazes de visualizar uma quarta dimensão. Porém isso não nos impede de imaginarmos as características dos objetos de 4 dimensões.

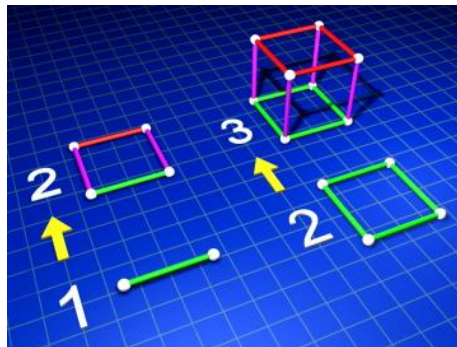
O truque está em fazermos analogias com as dimensões que já conhecemos, e assim “avancarmos um passo” para a quarta dimensão. Por exemplo, como já foi dito, linhas são medidas em m , quadrados em m^2 , cubos em m^3 . O próximo objeto da série é algo a que chamamos de hipercubo e tem um hipervolume medido em m^4 .

Mais uma analogia: dois segmentos de reta (1D) podem ser ligados através de um ponto (0D), e sua rotação em torno desse ponto é possível em um plano (2D). Da mesma forma, dois quadrados (2D) podem ser ligados através de um segmento de reta (1D) e só poderão girar em um espaço (3D). O próximo passo é imaginar dois cubos (3D) que podem ser unidos através de quadrados (2D), e de alguma forma eles podem girar em torno dessa junção, entrando em um mundo 4D. Nós não podemos ver isso, assim como a rotação de dois quadrados no espaço 3D seria impossível para um ser que vivesse em duas dimensões e não conhecesse a terceira.

3.1.1 O Hipercubo

Um hipercubo tem uma dimensão extra, a quarta. Ele é muito mais do que um cubo. Para ter uma pálida idéia do que ele é, saiba que um hipercubo é tão mais do que um cubo quanto um cubo é mais do que um quadrado. Se você fatiar um cubo com cortes planos paralelos a uma face, pode obter uma infinidade de quadrados. Da mesma forma, se você fatiar um hipercubo adequadamente, pode obter uma infinidade de cubos. O problema aqui é que, se você usou um plano (2D) para cortar um cubo, vai ter que usar um espaço 3D (hiperplano) para cortar um hipercubo. Se a sombra de um cubo é uma figura plana, com área (2D), então a sombra de um hipercubo é um sólido comum, com volume (3D). Como a sombra de um cubo pode ser um quadrado, a sombra de um hipercubo pode ser um cubo, dependendo apenas das circunstâncias. Mas, se você projetou a sombra de um cubo sobre um plano, vai ter que projetar a sombra de um hipercubo sobre um espaço tridimensional.

Um ponto só possui um vértice. Quando ele é deslocado no comprimento ele cria um segmento de reta, com dois vértices. Quando o segmento é deslocado na largura ele cria um quadrado, com quatro vértices, e esse quadrado cria um cubo com 8 vértices, quando deslocado na altura. Assim, um hipercubo é formado deslocando-se um cubo na quarta dimensão, e terá 16 vértices.



Agora as arestas: Um segmento de reta possui uma aresta e dois vértices, quando desloca-se para formar um quadrado o seu segmento forma outro segmento, e cada um dos seus vértices também cria um segmento, formando o quadrado com 4 segmentos. Quando o quadrado desloca-se para criar o cubo, cada um de seus 4 segmentos forma um novo segmento, assim como seus 4 vértices, criando 8 novas arestas, o cubo possui 12 arestas. Se o cubo for deslocado para a quarta dimensão para criar o hipercubo, ele terá mais 12 arestas, e outras 8 arestas, ligadas aos 8 vértices do cubo original, portanto o hipercubo possui 32 arestas.

O cálculo das faces é igual. Um quadrado possui uma face, ao formar o cubo a sua face criará uma nova face, assim como suas 4 arestas, então o cubo possui 6 faces. Quando o cubo criar o hipercubo, suas 6 faces criarão mais 6 faces, e suas 12 arestas também criarão 12 faces, então o hipercubo possui 24 faces.

O hipercubo possui algo novo: células. O cubo possui 1 célula, que criará uma nova célula cúbica no hipercubo, assim como suas 6 faces, portanto o hipercubo possui 8 células.

Cada vértice do cubo está ligado a 3 arestas (os 3 eixos perpendiculares), então cada um dos vértices do hipercubo estão ligados a 4 arestas; cada uma das arestas estão ligadas a 3 faces e cada uma das faces estão ligadas a 2 células (lembre-se que dois cubos ligados por uma face podem girar livremente pela 4ª dimensão!)

Existe outra maneira de calcular estes elementos, usando o formalismo da Álgebra Linear (planos cartesianos, coordenadas, etc.) e assim podemos até mesmo estender nosso raciocínio a mais dimensões, sem nos forçarmos a "imaginar" um mundo com várias dimensões. É interessante notar que apesar de nossa imaginação nos abandonar no estudo de múltiplas dimensões, a nossa matemática continua funcionando perfeitamente.

Imagine um quadrado de lado 1. Repare que podemos colocar este quadrado na origem de um plano cartesiano, de forma que um de seus vértices esteja na origem, no ponto (0,0). Assim, seus outros três vértices serão os pontos (0,1), (1,0) e (1,1). Podemos fazer o mesmo com um cubo, em um sistema de três eixos: seus vértices serão representados por (0,0,0), (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1), (1,1,0), (1,0,1), (0,1,1), (1,1,1). Ou seja, serão representados pelas trinas (u_1, u_2, u_3), onde cada variável pode assumir dois valores (zero ou um). Isso dá $2 \cdot 2 \cdot 2 = 2^3 = 8$ vértices. Daqui fica fácil ver que os vértices do hipercubo podem ser representados por quádruplas (u_1, u_2, u_3, u_4), variando desde (0,0,0,0) até (1,1,1,1) - que são dois vértices opostos, ligados por uma hiperdiagonal. Então, serão $2^4 = 16$ vértices. Para um cubo de n dimensões, fica fácil ver que serão 2^n vértices.

Já para as arestas, o jogo é um pouco mais sutil. Primeiro, poderíamos pensar que arestas são segmentos que ligam vértices; mas nem *todo* par de vértices é ligado por arestas (um contra-exemplo foi o citado acima, com a hiperdiagonal, ou qualquer outra diagonal). Refinando isso, dá pra dizer que arestas são segmentos que ligam vértices que só têm uma coordenada diferente.

Uma aresta transforma um 0 em um 1.

Então fazemos assim: existem as arestas que mudam a primeira coordenada, que podemos representar da forma (x, u_2, u_3, u_4) , em que x é a coordenada mudada por estas arestas (0 para 1). Computando u_2, u_3 e u_4 , vemos que são 8 arestas desse tipo. Mas podemos repetir o mesmo argumento com as outras quatro coordenadas, e então seriam $4 \cdot 8 = 32$ arestas. Para n dimensões, nosso argumento levaria a $n \cdot 2^{n-1}$ arestas.

Podemos argumentar de outra forma também: em um N-Cubo, de cada vértice saem n arestas, pois são n coordenadas a serem modificadas. Isso vale pra todas as 2^n arestas, mas no fim temos que dividir o resultado por dois (já que, fazendo assim, acabamos contando todas as arestas duas vezes, saindo de A para B e de B para A). E chegamos ao mesmo resultado.

Com as faces, fazemos algo análogo, sabendo que cada face é definida por quatro vértices, que são todos os que variam duas coordenadas específicas. Assim, podemos representar na forma (x, y, u_3, u_4) , tomando todos os pares de vértices para variarmos. Assim, teríamos $6 \cdot 2 \cdot 2 = 24$ faces. Para quem já estudou análise combinatória, é fácil ver que, em N dimensões, o número de faces é $(N, 2 \text{ a } 2) \cdot 2^{n-2}$ faces, o que resulta em $n \cdot (n-1) \cdot 2^{n-3}$ faces. Podemos também pensar que de cada aresta partem $N-1$ faces, que são as variações de coordenadas de seus dois vértices. Depois, é só dividir por 4, pra descontar o fato de que cada face foi contada 4 vezes.

Fazemos o mesmo tipo de raciocínio pro que quisermos, até chegarmos ao LADO. Podemos definir como lados de um n-cubo os objetos $(n-1)$ -dimensionais nos quais ele pode ser dividido. Assim, os lados de um quadrado são arestas, como os lados de um cubo são faces (quadrados), e os lados de um hipercubo são cubos.

n-Cubos são nada mais que pedaços fechados de espaço, cercados por $(n-1)$ -Cubos encaixados. Assim, precisamos de dois $(n-1)$ -Cubos encaixados para cada dimensão que tivermos, se quisermos criar um interior fechado. Assim, um quadrado possui duas arestas fechando na vertical, encaixadas em outras duas que fecham na horizontal. O mesmo pra um cubo, nos três eixos. Assim, um n-Cubo possui $2n$ lados. Um hipercubo possui 8 cubos.

Podemos, ainda, pensar nas projeções. Imagine um cubo com uma lâmpada em cima, veja como ficaria sua sombra no plano 2D:

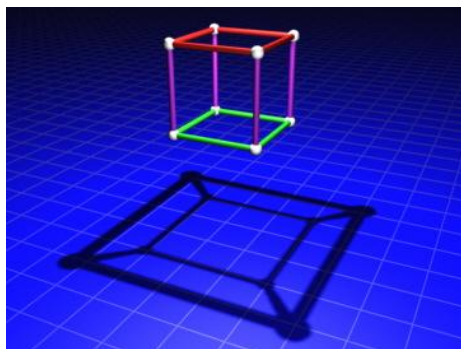


Figura 3.1: Um cubo e sua sombra em um plano

Na figura seguinte, vemos como seria a sombra de um hipercubo no espaço 3D. Essa é a melhor forma de representarmos um hipercubo; podemos até contar o número de vértices, arestas, faces e células. Mas isso NÃO é um hipercubo, é impossível para nós visualizarmos um hipercubo! Isso é apenas uma sombra distorcida de um hipercubo em um espaço tridimensional. Os ângulos não são perpendiculares, e nem todas as arestas são do mesmo tamanho. Dizer que isso é um hipercubo seria a mesma coisa que dizer que aquela sombra da figura de cima é um cubo!

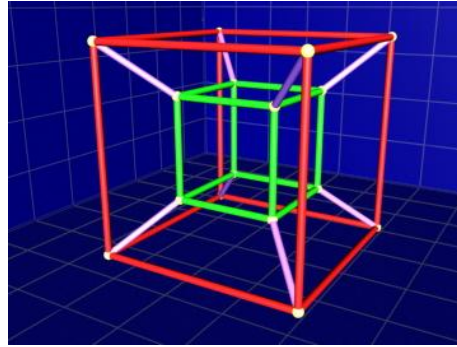


Figura 3.2: A sombra de um hipercubo em um espaço

3.2 Espaço Curvo

Agora que já temos alguma noção da 4ª dimensão, podemos tentar entender expressões como “espaço curvo”. Novamente, vamos usar a ajuda da segunda dimensão em nossa analogia:

Imagine um universo 2D, infinitamente plano, com seres acostumados a ele, e que portanto, não conhecem a terceira dimensão. Um dos seus habitantes poderia se deslocar infinitamente por alguma direção... Agora, imagine uma situação semelhante em uma superfície curva, um universo 2D finito, com raio constante. Nós, seres 3D, sabemos que essa forma é uma superfície esférica, mas um ser 2D contido nela não conseguirá visualizá-la. Se ela tiver um raio de curvatura muito grande, confundirá os que nela vivem, que pensarão estar sobre um plano, do mesmo modo como a Terra parece plana no nosso quintal. Esse ser iria girar eternamente sobre ela, sem poder abandoná-la, pensando que está sobre uma reta e quase enlouquecendo quando volta ao ponto de partida.

Nem existem linhas retas verdadeiras, do senso comum, nessa superfície. As suas “retas” são círculos máximos, como a linha do equador e os meridianos da Terra, suposta esférica. É o mais reto que se pode andar sem sair daquele universo. Essas linhas mais retas são chamadas de geodésicas, correspondem à menor distância entre dois pontos da superfície e são uma melhor definição, mais geral, para reta.

Esse espaço também apresentaria propriedades estranhas, por exemplo, nem todo triângulo possui ângulos cuja soma seja 180° ! A soma de seus ângulos internos passa a depender de seu tamanho (porém se esse espaço for muito grande, essa é uma propriedade difícil de se verificar)

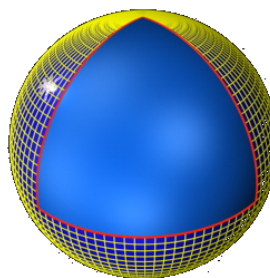
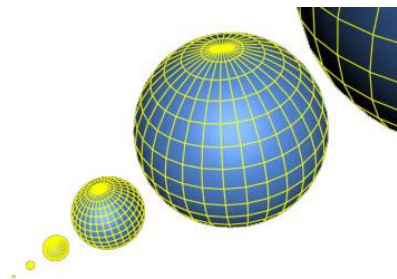


Figura 3.3: Triângulo com 3 ângulos de 90° , ou seja, sua soma é 270° !

Um espaço 2D é uma superfície colocada em um espaço 3D (pelo menos). Imagine, então, um universo 3D infinito, no qual exista um ponto singular, de grande densidade e grande temperatura, que vai gerar um universo com a forma de uma *superfície esférica*. Pense bem nisso, pois

se o universo que vai nascer é 2D, o espaço 3D vazio ao redor daquela singularidade não pode ser visto como espaço comum, já que os futuros seres 2D não terão acesso direto a ele. Por isso, é melhor que ele seja encarado apenas como “o grande nada para onde o universo 2D bebê vai poder crescer”. Para um futuro ser 2D inteligente desse universo, a época de existência da singularidade poderá ser apontada como *a época em que não havia espaço*, já que nenhuma superfície estava presente ali.



Note como é possível o universo se expandir sem a existência de um “centro” dentro desse universo. Os seres bidimensionais não possuem acesso à terceira dimensão, apesar de seu espaço ser curvo, ele é apenas composto pela superfície da esfera, portanto os seres desse espaço continuam presos a uma superfície. Assim, o Big Bang pode ser entendido como a superfície de uma esfera que se expande, porém no nosso caso a esfera seria uma hiperesfera e estaríamos confinados ao seu volume.

Porém, o fato do espaço poder ser curvo e estar se expandindo não significa necessariamente que ele seja semelhante a uma esfera. Ele pode ter outras curvaturas, inclusive negativas, gerando outros formatos.

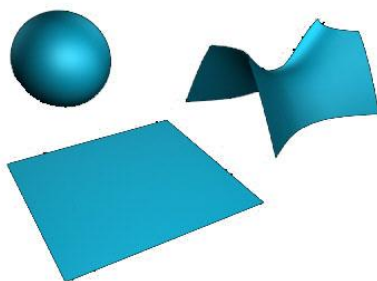


Figura 3.4: Diferentes curvaturas para o universo

Segundo a Relatividade Geral, a matéria influenciaria nessa curvatura, por isso que a medição de parâmetros como a densidade de matéria e energia do universo influenciam tanto nas equações cosmológicas. (e a gravidade passa a ser entendida como os efeitos locais da deformação do espaço por uma concentração de matéria).

3.3 Expansão do Espaço

Vamos ver em mais detalhes, então, como funciona a interpretação da expansão. Para isso, precisamos primeiro definir o termo de forma mais precisa: vamos realizar um experimento mental de fácil visualização (os mais céticos fiquem incentivados a realizá-lo na prática). Imagine

uma folha tamanho A4 feita de uma camada fina de borracha, presa em um tabuleiro de metal bem maior que este papel. Para quem nunca realizou um experimento térmico com borracha, vamos enunciar uma propriedade muito interessante: ao ganhar calor borracha se contrai; ao se resfriar, ela se dilata!

Podemos medir a distância entre dois pontos quaisquer dessa folha (chamemos de pontos i e j) por dois métodos distintos. No primeiro, criamos um sistema de coordenadas, desenhando um par de eixos perpendiculares, X e Y , na folha e associamos dois números, (x_i, y_i) e (x_j, y_j) , a cada um dos pontos. A distância dos dois pontos neste caso, pelo Teorema de Pitágoras, é igual a

$$S_{xy} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$$

No segundo método, nós medimos a distância entre esses pontos diretamente, usando uma régua que esteja à temperatura ambiente. Ao medir diretamente, obtemos um valor que denominaremos S_r . A pergunta central deste experimento consiste em questionar se é verdade afirmar que $S_r = S_{xy}$, desde que calibremos os eixos do sistema de coordenadas e a régua no mesmo sistema de unidades.

Para responder a essa pergunta, vamos deixar o tabuleiro de metal dentro de uma bacia de água, cuja temperatura nós podemos controlar. Vamos então resfriar a água em cinco graus, medir S_r e S_{xy} ; depois resfriar em mais cinco graus, medir novamente, continuar repetindo esse processo até a água atingir zero grau Celsius. (Lembre-se de que é fundamental manter a régua à temperatura ambiente!) Feito isso, nos deparamos com uma conclusão interessante: Enquanto S_r cresce com a diminuição de temperatura (devido à dilatação da borracha em relação à régua), S_{xy} se mantém inalterada! Se, ao invés de resfriar, tivéssemos aquecido a água de cinco em cinco graus até ela atingir cem graus Celsius, então nós concluiríamos (i) que a borracha derrete antes de cem graus, e (ii) que S_r decresce com o aumento de temperatura enquanto S_{xy} se mantém o mesmo.

Lei empírica:

Um processo de expansão (contração) de uma superfície se caracteriza pela seguinte relação entre S_r e S_{xy} :

$$S_r = a(t)S_{xy}$$

Onde $a(t)$ é uma função crescente (decrescente) no tempo

Ao inflar um balão de ar, também observamos uma variação da distância entre dois pontos medida diretamente por uma régua, sem que se altere a medida inferida por um sistema de coordenadas em sua superfície.

Repare que a velocidade de afastamento ou aproximação entre os dois pontos, medindo com a régua, é dada pela variação temporal de S_r :

$$V = \frac{dS_r(t)}{dt} = \frac{da}{dt} S_{xy}$$

Uma consequência imediata do resultado empírico é a lei de Hubble, agora vista sob um novo prisma.

Lei de Hubble para expansão:

Num processo de expansão (contração) de uma superfície, a velocidade de afastamento (aproximação) entre os pontos é proporcional à distância entre eles, isto é

$$V = H(t) \cdot S_r(t)$$

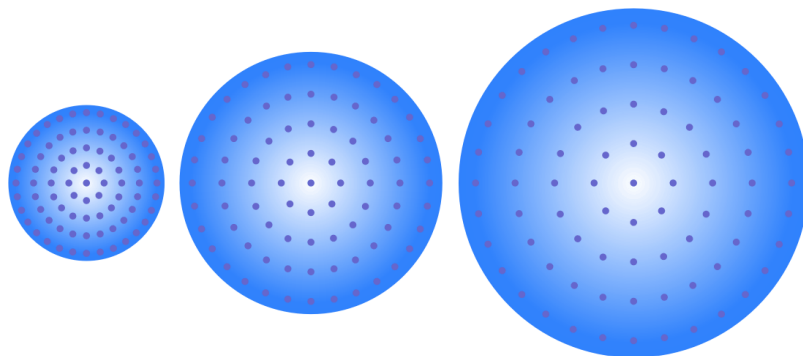


Figura 3.5: Universo-Balão em expansão.

Para a expansão do universo, as idéias são as mesmas. A função $a(t)$, nesse caso, é chamada FATOR DE ESCALA. Usando as equações da Relatividade Geral, podemos relacionar $a(t)$ com a densidade de massa do universo, e assim determinar, a partir da interação da matéria, a evolução do universo em larga escala.

Capítulo 4

O Universo é regido por que leis?

Mas afinal, o que faz o universo funcionar? Nos Volume III e IV vimos várias teorias sobre como a natureza funciona. Vimos também que as teorias científicas pressupõem sempre que o universo funciona seguindo leis simples. Dentro desse quadro, faz sentido perguntar quais são as leis que funcionam para o universo em grandes escalas, bem como quais leis regem o funcionamento do espaço e do tempo! Vejamos a seguir.

4.1 Princípio Cosmológico

O PRINCÍPIO COSMOLÓGICO é o nome contemporâneo do pressuposto mais básico da cosmologia contemporânea. Sua formulação é bem simples: o Universo é homogêneo e isotrópico. *Homogeneidade* quer dizer que todos os pontos do universo são equivalentes, não há nenhum observador privilegiado. Já assumir a *isotropia* significa dizer que todas as direções de observação são iguais. Em termos mais técnicos: ser isotrópico é ser invariante por rotação; ser homogêneo, invariante por translação. Repare que um universo que seja isotrópico em todos os seus pontos é necessariamente homogêneo.

Os conceitos de HOMOGENEIDADE e ISOTROPIA não tratam apenas de como a matéria se distribui dentro do Universo; esperamos homogeneidade e isotropia *das próprias leis físicas*, bem como do próprio espaço. Há ainda uma outra versão mais forte do Princípio Cosmológico, o chamado *Princípio Cosmológico Perfeito*, segundo o qual não só o espaço mas o tempo é também homogêneo e isotrópico. Isso quer dizer que todos os instantes de tempo devem ser equivalentes, ou seja, que não há nenhum observador privilegiado no tempo. Dessa forma, o universo deve ter tido sempre o mesmo aspecto, em larga escala. Esse ponto de vista está relacionado à teoria do ESTADO ESTACIONÁRIO, conflitante com a teoria do BIG BANG (conflito que será explorado nos próximos capítulos).

Repare que o universo aristotélico definitivamente não era assim. As leis físicas não eram as mesmas em todos os lugares, nem em todas as direções; eram umas para cima, nos céus, e outras abaixo, na terra. E o próprio fato de ser um universo esférico o fazia geometricamente inhomogêneo e anisotrópico. Sem falar na tendência de todos os corpos caírem para o centro do universo, o que tornava essa direção manifestamente diferente das outras, do ponto de vista físico. Na verdade, a exigência dessas características é outra novidade da cosmologia pós-renascimento, mais especificamente de Giordano Bruno: um universo infinito, em que o nosso sistema de esferas é só mais um dentre outros inumeráveis que existem em volta de cada uma das estrelas visíveis no céu. Um universo em que, estando em qualquer lugar e olhando para qualquer direção, as mesmas coisas são vistas (ele mesmo faz especulações sobre o que veriam nos céus habitantes de outros sistemas estelares).

Mais tarde, a exigência nesse sentido aumenta: para Galileu era fundamental que todo o universo estivesse submetido às mesmas leis físicas, aspecto que já exploramos no Volume II (Lembre-se que a idéia de lei natural ainda não era uma idéia corrente na época de Giordano Bruno). O universo de Newton é a concretização dessas duas concepções. O próprio espaço, pensado como algo absoluto, era infinito, “igualmente estendido em todas as partes”, usando as palavras dele. No universo newtoniano, mesmo que toda a matéria estivesse concentrada em um bastão, ainda assim o espaço seria homogêneo e isotrópico porque, em princípio, o bastão não teria nenhum lugar especial para ocupar, nem nenhuma direção preferencial ao longo da qual se estender. Para Newton, era justamente nessa indiferença espacial que residia a liberdade criadora de Deus¹.

4.2 Relatividades de Einstein

A física newtoniana é suficiente para descrever o mundo a que estamos acostumados, porém em situações que envolvem altas energias (grandes velocidades e massas) o mundo se torna um pouco diferente do qual o nosso senso comum está acostumado. Assim, para a compreensão do universo em uma escala cosmológica, precisamos de uma nova mecânica. Este papel é suprido pelas Relatividades.

A partir do famoso trabalho de Einstein em 1905, a concepção moderna de espaço e de tempo foi sendo modificada. Aquela teoria exigia, para que os fenômenos (especialmente os eletromagnéticos) funcionassem de acordo com a Teoria de Maxwell, bem como de acordo com os novos experimentos, era necessário que as medidas de tempo fossem diferentes para cada observador, dependendo de sua velocidade. Esta foi a Primeira Relatividade, depois conhecida como RELATIVIDADE RESTRITA. Os detalhes quantitativos disto são desenvolvidos no Apêndice A.

Mas o que interessa para a discussão cosmológica é a Segunda Relatividade, ou RELATIVIDADE GERAL, desenvolvida também por Einstein e publicada em 1917. Se a primeira relatividade adaptava as três leis de Newton ao novo contexto de tempo variável e de uma nova forma de encarar como se mede fenômenos físicos, então a segunda relatividade adapta a estes princípios uma Teoria da Gravitação. É nessa teoria que o espaço-tempo passa a ser um ente ativo, na interação com a matéria. Nesse tipo de universo, a gravitação mesmo passa a poder ser pensada de outra forma, como resultado de deformações na geometria do espaço-tempo (acho que todos conhecem a imagem clássica de uma bola de boliche pousada sobre um tecido, alargando o tecido em volta dela). Ou, nas palavras do Range:

A gravidade não é uma força, é uma experiência. É um conjunto de ações e comportamentos observados. O papel da ciência é formular uma teoria para explicar coerentemente o que está por trás dessas observações e experiências. Newton propôs uma explicação: uma força que se propaga instantaneamente, inerente à massa. Einstein propôs uma explicação alternativa, a curvatura do espaço-tempo.

Ao contrário da Relatividade Restrita, que pode ser compreendida por qualquer estudante de ensino médio, a Relatividade Geral introduzirá dificuldades matemáticas consideráveis. Ela tem que lidar com conjuntos de quatro coordenadas (três espaciais e uma temporal) que se transformam em cada ponto. Então, todas as suas equações são escritas usando um tipo de matriz

¹Isso aparece na análise de Koyré das cartas entre Newton e Leibniz. Leibniz advogava uma *necessidade* racional para cada coisa existente, não tendo Deus criado algo de certa forma, se pudesse criar de qualquer outra. Foi isso que o levou a defender que espaço e tempo são apenas grandezas relativas, medidas umas em relação a outras - Deus não teria *razão* por ter posto as coisas em uma posição ou em outra. Os newtonianos, por outro lado, defendiam a *liberdade* de Deus em criar. Ele não precisa de uma razão para fazer algo; ele pode escolher. Desse modo, a defesa da liberdade leva à defesa do empirismo: se as ações não são determinadas pela razão, só podemos conhecê-las observando.

generalizada (que poderia ser representada por um hipercubo, enquanto matrizes podem ser representadas por quadrados – números em linhas e colunas), chamada *tensor*. Compreender uma dinâmica escrita sob forma tensorial exige muito tempo de treinamento matemático específico, e definitivamente não é uma leitura acessível a qualquer um. Provavelmente, este aspecto ininteligível da Relatividade Geral contribuiu para a mitificação da teoria como algo sobre-humano e de Einstein como um gênio sem precedentes.

Além disso, na medida em que a Relatividade pretendia descrever a própria natureza, sua dificuldade matemática fez com que as discussões cosmológicas adentrassem um círculo fechado, acessível apenas aos iniciados. A partir de então, palavras podiam ajudar pouco a cosmologia; os filósofos já não tinham mais papel também nesta área. Assim nasce o que se chama *cosmologia moderna*, e os únicos autorizados a explorá-la eram os membros de departamentos de física das universidades e centros de pesquisa.

Vamos então ver os primeiros modelos de Universo desenvolvidos a partir da Relatividade Geral.

4.2.1 Colapso e Constante Cosmológica

Uma história que muitos devem conhecer é a de que as soluções originais das equações de Einstein levavam a um modelo de um universo que estaria se contraindo pela sua própria gravidade. Isso é natural de se pensar, mesmo em um universo newtoniano: se toda a massa tende a se atrair, a distribuição total de massa no universo deve assumir volumes cada vez menores. E como a geometria do espaço-tempo, na Relatividade, é determinada pela sua distribuição de massa, então o universo como um todo deve se contrair.

O próprio Newton já havia percebido o problema do colapso de um universo regido pela gravidade, e propôs que o Universo fosse infinito, com infinitas estrelas cercando um certo corpo. Assim, a força gravitacional total se anularia. Houve ainda alguns autores que propuseram alterações na fórmula matemática da força gravitacional, como Von Neuman e Seeliger, que no fim do século XIX propuseram uma queda exponencial da força gravitacional com a distância (perceptível apenas em distâncias muito grandes).

$$F = \frac{GMm}{d^2} e^{-\Lambda d}$$

Seeliger havia estudado contagens das estrelas em 1911, que indicavam que a densidade do Universo tenderia a zero para distâncias maiores do que aproximadamente 8000 anos-luz do nosso Sistema Solar (como vimos, isto está associado ao Grande Debate, aos limites da nossa própria galáxia). Einstein conhecia estas tentativas de alterar a gravitação de Newton. Ele talvez não conhecesse esses dados observacionais, mas este era o estado do conhecimento científico em sua época.

Então, para evitar esta contração prevista pelas equações, Einstein inseriu arbitrariamente uma CONSTANTE COSMOLÓGICA, negativa, que neutralizasse o efeito gravitacional global, levando de volta à solução razoável de um universo estático. Essa constante cosmológica não poderia ser medida localmente, mas só se manifestaria como um efeito global. Citando Roberto Martins:

Assim, o que Einstein fez foi introduzir um ‘truque’ na teoria, que não tinha justificativa física nenhuma, pois jamais se havia observado nenhum tipo de repulsão associada à gravitação. Não havia justificativa física para introduzir essa idéia. Nesse sentido, a introdução da ‘constante cosmológica’ não foi muito bem recebida. No entanto, como era uma alteração aceitável, do ponto de vista matemático, acabou sendo admitida – não como uma realidade, mas como uma possibilidade a ser investigada.

Mas, por essas imprevisibilidades que marcam a história das idéias humanas, pouco tempo depois a idéia de universo em expansão passou a ser dominante, contando mesmo com o apoio observacional da Lei de Hubble. Einstein, antes um defensor fervoroso da idéia de que o Universo é estacionário, veio a se retratar diante da comunidade científica e do público (do público, sim, porque então, já nos EUA, Einstein se tornou uma grande celebridade da mídia), dizendo que a constante cosmológica tinha sido “o maior erro de sua vida”. Contudo, de forma ainda mais curiosa, a idéia de uma constante cosmológica repulsiva voltou à cosmologia contemporânea, a partir do problema da Energia Escura. Voltaremos a isto daqui a alguns capítulos.

4.2.2 O Universo de De Sitter

Os trabalhos citados de Einstein (a Relatividade Geral em 1917 e o modelo de universo com constante cosmológica em 1919) foram publicados durante a Primeira Guerra Mundial; desta forma, em um primeiro momento, estes trabalhos não ficaram muito conhecidos fora da Alemanha. No entanto, como a Holanda manteve-se neutra durante a guerra, o cientista holandês Willem de Sitter pôde manter contato com Einstein.

De Sitter encontrou outra solução para as equações de Einstein, que inicialmente chamou de solução B (a solução de Einstein era a solução A), hoje conhecida como *Universo de De Sitter*. Este modelo consiste num Universo sem matéria!

Pode parecer bobo fazer contas para um Universo sem matéria, mas na verdade a densidade de matéria no Universo é muito pequena, de forma que considerar essa densidade nula pode ser uma aproximação razoável. A solução de De Sitter também continha a constante cosmológica, cujo efeito seria equivalente a uma força repulsiva, numa analogia newtoniana. Funciona do seguinte modo: uma partícula observada à distância r de um observador pareceria afastar-se aceleradamente com o tempo. A aceleração correspondente valeria:

$$a = \frac{\Lambda c^2 r}{3}$$

Uma distinção pode ser feita agora entre os modelos de universo propostos por Einstein e por de Sitter. O universo de Einstein era “matéria sem movimento” enquanto que o universo de De Sitter era “movimento sem matéria”.

Mas De Sitter não interpretou isso como se os corpos estivessem realmente se afastando por causa da expansão do espaço; para ele, isso era um efeito particular da métrica do espaço-tempo descrevendo esse tipo de universo. Ele escreveu: “As linhas espectrais de várias nebulosas distantes devem, portanto ser sistematicamente desviadas em direção ao vermelho, dando origem a uma velocidade radial falsa” (no original, *spurious radial velocity*), o que ficou conhecido como EFEITO DE SITTER. Esse é o mesmo efeito que foi comprovado observacionalmente mais tarde e ficou conhecido como “Lei de Hubble”, como discutido no último capítulo.

Modernamente, interpretamos o Universo de De Sitter como um Universo em expansão, cujo raio aumenta exponencialmente.

De Sitter fazia parte da Royal Society de Londres, uma importante academia científica britânica, da qual Newton já tinha sido presidente. Após publicação de De Sitter, seu modelo de Universo (e, de carona, o de Einstein) tornaram-se populares no meio científico; vários outros pesquisadores passaram a investigar soluções para as equações de Einstein. Dentre eles, podemos citar Friedmann, Robertson, Walker, Tolman, Lemâitre, Eddington, McCrea e Mc Vittie (estudantes de Eddington). De qualquer forma, o que ficava estabelecido é que, então, “modelos de universo” passam a ser sinônimos de “soluções tensoriais para as equações de Einstein da Relatividade Geral”.

4.2.3 Modelo de Friedmann

Os modelos que se tornaram mais importantes na cosmologia das décadas seguintes foram os do matemático russo Alexander Friedmann. Ele trabalhou com modelos de universos em expansão que desaceleravam pela gravidade. A taxa de desaceleração dependeria da quantidade de massa no universo. No entanto, sua teoria é muito mais matemática do que física. Ele estava interessado em explorar as soluções das equações de Einstein, mas não em interpretá-las fisicamente. Tanto que em seu trabalho há soluções cuja densidade é negativa, que não tem significado físico. Ele acreditava que o conhecimento disponível na época sobre o universo não seria suficiente para decidir qual das possíveis soluções seria a correspondente ao nosso universo. Assim, não se pode dizer que Friedmann descobriu o universo em expansão, mas sim *um* universo em expansão.

Para uma abordagem simplificada da idéia, suponhamos um universo inicialmente esférico, com densidade uniforme e que obedeça à mecânica newtoniana (apesar de Friedmann ter deduzido seu modelo da Relatividade Geral, como dito). Tomemos, então, uma partícula a uma distância r do centro dessa esfera. Se ela tiver, graças à expansão do universo, uma velocidade menor que sua velocidade de escape, ela (e o resto do universo) começará a ser puxada para o centro, com o universo se contraindo até colapsar. Se a velocidade for igual ou maior, o universo continua se expandindo indefinidamente. Em termos algébricos: a velocidade necessária para a partícula escapar da gravidade gerada pela parte interna do universo, relativa a ela, seria:

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

onde M é a massa interna à nossa partícula, $M = \frac{4}{3}\pi\rho_{crit}r^3$, e ρ_{crit} é a densidade crítica do universo, para a qual nossa partícula tem de fato velocidade de escape. Assim, escrevemos:

$$v = \sqrt{\frac{8\pi G\rho_{crit}r^2}{3}} \implies \rho_{crit} = \frac{3}{8\pi G} \cdot \frac{v^2}{r^2}$$

Substituindo ainda a Lei de Hubble:

$$H_0 = \frac{v}{r} \implies \rho_{crit} = \frac{3H_0^2}{8G\pi}$$

Temos nossa estimativa para a densidade crítica. Fizemos várias hipóteses não muito confortáveis, e também usamos a Gravitação Universal de Newton em vez da Relatividade Geral de Einstein. Apesar disso tudo, os cálculos relativísticos (feitos *depois* de Friedmann; na época dele, não existia constante de Hubble) não dão um resultado muito diferente².

Assim, dependendo da densidade crítica, temos três tipos de geometrias de universo, como mostrados no gráfico abaixo: o *fechado*, em que o universo pára de se expandir em algum instante e passa a colapsar; o *marginalmente aberto* (ou *fechado*), de geometria plana, que continua a se expandir, e tende se tornar estático quando sua idade tende a infinito (isto é, tem o universo estático como limite); e o *aberto*, cuja velocidade de expansão continua sempre crescendo, desaceleradamente.

Aproveitando essa analogia com a gravitação newtoniana, podemos comparar os 3 possíveis casos de evolução do universo com os de um objeto sob um campo gravitacional, por exemplo, uma pedra sendo jogada para cima. O mais comum é que ela seja desacelerada pela gravidade, até parar de subir e depois cair (universo fechado), porém, se sua velocidade for igual a velocidade de escape, sua velocidade irá tender a zero, mas a pedra nunca vai voltar a cair (universo marginalmente aberto); se sua velocidade for ainda maior, a pedra irá escapar da Terra ainda com velocidade positiva (universo aberto). Entretanto, o que observamos no universo atual não

²Veja uma descrição mais completa da primeira equação de Friedmann no capítulo ??.

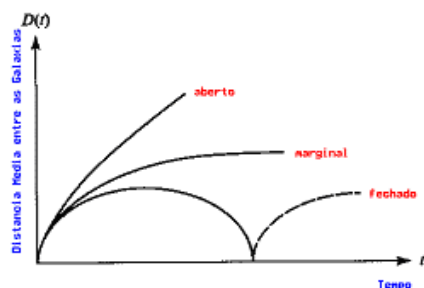


Figura 4.1: Possíveis evoluções do universo.

é nenhuma dessas três coisas, mas algo mais bizarro: ao invés de ser desacelerada, a pedra acelera mais e mais, enquanto sobe! Esse é o estranho problema da Energia Escura, ao qual ainda voltaremos.

Vemos ainda na figura que o universo tem um começo no tempo. Esta idéia de idade do Universo foi uma novidade discutida por Friedmann; ele chegou a estimá-la em dezenas de bilhões de anos, mas reconhecendo que os dados experimentais disponíveis na época não eram adequados para se fazer uma estimativa precisa.

Vemos ainda no gráfico que, quando o tempo tende a zero, o raio do universo tende a zero. Exatamente no início, o raio do Universo seria nulo, o que corresponde a uma densidade infinita! Esse estágio inicial do universo muito denso e com raio muito pequeno ficou conhecido como *singularidade*. O conceito aparece nos trabalhos de Friedmann mas não é explorado por ele.

Einstein leu os trabalhos de Friedmann no começo da década de 20 e enviou respostas. Conforme dissemos, Einstein achava abominável a idéia de um universo em expansão. Inicialmente, alegou haver erros nas contas de Friedmann, mas este as defendeu adequadamente, mostrando que as contas estavam corretas. Einstein então se retratou, mas só admitiu a possibilidade *matemática* das soluções de universo em expansão; continuou adepto do universo estacionário.

No entanto, apesar de terem sido publicados numa revista de prestígio, e terem recebido duas respostas de Einstein (que já era uma celebridade internacional), seu trabalho não teve nenhum impacto na época, sendo reconhecido tardiamente. É tentador vê-lo como um visionário, mas devemos ser cautelosos para não olhar para os resultados de seu trabalho com a visão contemporânea.

4.3 Modelo Padrão

Hoje em dia prevalece na cosmologia um **MODELO PADRÃO**, resultado de todos os debates realizados nos capítulos anteriores. Suas hipóteses fundamentais são as seguintes:

- O universo é, em larga escala, homogêneo e isotrópico;
- A gravitação funciona segundo a Teoria da Relatividade Geral;
- A matéria do universo na escala de centenas de megaparsec se comporta como um fluido perfeito (i.e., sem viscosidade), cujos componentes interagem apenas através da interação gravitacional.
- O universo teve um início, um instante inicial de criação. Esse instante sintetizou os elementos químicos fundamentais do universo.

Em outras palavras, o modelo padrão se sustenta numa pilha de pressupostos teóricos, montados um em cima do outro: Princípio Cosmológico → Relatividade Geral → Modelos de Friedman, Robertson e Walker → Teoria do Big Bang. Esta última, como vimos, se sustenta sob três pilares observacionais: Lei de Hubble, Abundância de Elementos no Universo, Radiação Cósmica de Fundo.

Portanto, já que usa o Big Bang e teorias de nucleossíntese primordial, o Modelo Padrão se sustenta nas duas grandes teorias físicas do século XX: a Relatividade Geral e a Mecânica Quântica. Pelo lado da primeira teoria, vejamos suas equações básicas.

Primeira equação de Friedmann

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3}\rho(t) - \frac{Kc^2}{a^2(t)},$$

onde $H(t)$ é o parâmetro de Hubble, G a constante da Gravitação, c a velocidade da luz, $a(t)$ é o fator de escala (discutido no capítulo 2), $\rho(t)$ é a densidade de energia (que inclui a densidade de massa) e K é a constante geométrica, que nos diz o quão curvado é o espaço-tempo em determinada região.

Analisando o caso de um universo onde a constante geométrica K é igual a zero, essa equação nos informa como a densidade de energia do universo se relaciona com o parâmetro de Hubble (quando falamos da Lei de Hubble, nós adiantamos que $H(t)$ dependia da densidade de massa, que é uma componente da densidade de energia do universo).

Caso particular da primeira equação de Friedmann: Num universo onde $K=0$,

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3}\rho(t)$$

Ainda precisamos conceituar de forma mais precisa densidade de energia. Diferentemente da densidade de massa, esse termo leva em conta não só a massa do universo. Ele também leva em conta a soma da energia de todas as partículas do cosmo, que inclui a energia cinética, energia potencial e energia térmica, por exemplo. Para entender como a energia dos átomos, moléculas, planetas, estrelas, galáxias, quasares, etc. influencia o comportamento do universo em larga escala, vamos lançar mão de uma das fórmulas mais famosas da física, abaixo.

Lei da Relatividade Especial

Existe uma relação entre a energia de um corpo e sua massa inercial, dada pela seguinte fórmula:

$$E = mc^2$$

Princípio de Equivalência

A razão entre a massa inercial de um corpo e sua massa gravitacional é sempre igual a 1.

Essas duas leis, interpretadas em conjunto, nos informam que a energia uma partícula também deve ser levada em conta na hora de calcular sua massa gravitacional. Isto significa, por exemplo, que a energia cinética, potencial e térmica de um corpo contribuem para o aumento da força gravitacional exercida por ele em outras partículas. Entendida a interpretação física dessas leis, a presença da densidade de energia nas equações da cosmologia é melhor justificada.

Antes de introduzir a segunda equação de Friedmann, uma observação é pertinente. Utilizando a definição do parâmetro de Hubble, nós podemos relacionar, sem rigor, a primeira equação de Friedman ao teorema de conservação da energia mecânica de Newton.

$$\frac{\dot{a}^2(t)}{2} - \frac{G \left(\frac{4\pi a^3(t)}{3} \right) \rho(t)}{a(t)} = -Kc^2$$

$$\frac{\dot{a}^2(t)}{2} - \frac{GM}{a(t)} = -Kc^2$$

Essa analogia newtoniana nos permite utilizar conceitos da mecânica celeste para obter certa intuição sobre a relação entre a “massa gravitacional do universo” e o seu destino futuro. Órbitas fechadas, parabólicas ou hiperbólicas obtidas nos casos $E < 0$, $E = 0$ e $E > 0$ representam nesse contexto os três futuros previstos por Friedmann, como vimos anteriormente.

Segunda equação de Friedmann

$$\frac{\frac{d^2 a(t)}{dt^2}}{a(t)} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho(t) + \frac{3p(t)}{c^2} \right)$$

onde $H(t)$ é o parâmetro de Hubble, G a constante da Gravitação, c a velocidade da luz, $a(t)$ é o fator de escala, $\rho(t)$ é a densidade de energia (que inclui a densidade de massa) e $p(t)$ é densidade de pressão exercida pelo “gás de galáxias”.

Uma consequência das duas leis de Friedmann é o valor da derivada da função de Hubble:

$$\frac{dH(t)}{dt} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho(t) + \frac{3p(t)}{c^2} \right)$$

Esta equação será explorada quando falarmos de energia escura.

Capítulo 5

Como o Universo nasceu?

O Universo teve uma origem ou sempre existiu? Essa é uma das questões mais antigas sobre o Universo em geral. Enquanto um Universo que existe desde sempre pode ser angustiante, um Universo criado traz problemas filosóficos difíceis: Quem criou o Universo? E quem criou o criador do Universo? Um debate parecido com esse foi firmado ao longo do século XX entre os cosmólogos. Vejamos em mais detalhes.

5.1 O início: Lemaître

Georges Lemaître foi um padre cosmólogo belga, que reproduziu os resultados obtidos por Friedmann, sem conhecê-los. No entanto, a abordagem do seu trabalho é diferente da de Friedmann, uma vez que ele queria explicar o universo real, não apenas investigar possibilidades matemáticas. É provável que ele tenha sido um dos primeiros a interpretar o *redshift* das galáxias como velocidades reais; ou seja, ele acreditava realmente que o universo estava se expandindo.

Em 1927, Lemaître publica um modelo cosmológico, correspondente a um universo estático (semelhante ao de Einstein) que entretanto saiu do equilíbrio e passou a se expandir, tendendo, no limite, ao universo de De Sitter, cujo raio aumenta exponencialmente. No entanto, ele publicou o trabalho em um jornal pequeno, de pouco impacto. Talvez ele tenha feito isso intimidado por Einstein (que na época já estava ganhando grande projeção no meio acadêmico), ou por ter reconhecido na época que Friedmann já havia obtido suas soluções (mas lembremos que sem as importantes interpretações físicas).

Lemaître fora aluno de um famoso cosmólogo britânico, o já citado Arthur Eddington, que nessa época estava à procura de algum modelo cosmológico para substituir os modelos de Einstein e De Sitter. Ele estava em dúvida se colocava movimento no modelo estático de Einstein ou matéria no universo vazio de De Sitter. Somente em 1930 Eddington se deu conta que o trabalho de Lemaître de 1927, que ele já havia lido mas não dera a devida atenção, era a resposta que estava procurando. A partir de então, o trabalho de Lemaître ficou famoso, e o trabalho de Hubble passou a ser visto como evidência experimental da expansão do universo.

Assim, para resumir a história do universo em expansão, podemos dizer que a idéia surgiu como hipótese matemática em 1922 com Friedmann, ganhou apoio observacional com Hubble em 1929, e passou a ser aceita na comunidade científica na década de 1930, com a divulgação dos trabalhos de Lemaître.

Estabelecida a idéia de expansão, o passo seguinte parece natural: se o universo está se expandindo, ele então teve um início, um momento de criação. Era a postura que ele mesmo defendia. Seu modelo de 1927, publicado junto com Eddington e conhecido como *modelo de*

Lemaître-Eddington, não continha referência a um início do universo; ele começava do modelo estático de Einstein.

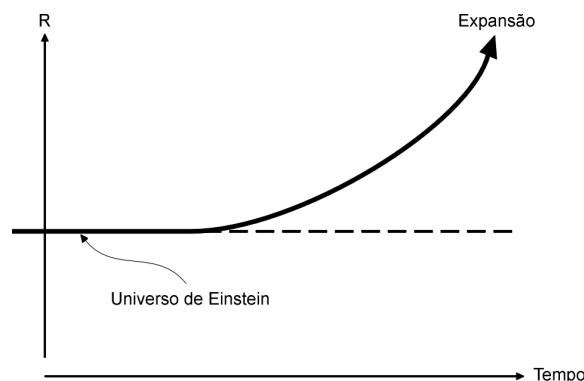


Figura 5.1: Modelo de Lemaître-Eddington.

Contudo, discordando de seu antigo orientador, o padre publicou outro modelo, em 1931, contendo um nascimento para o Universo, um instante de “universo sem ontem”, um átomo primordial. A esse respeito, Lemaître publicou um texto curto na revista *Nature*, contendo o seguinte trecho:

Filosoficamente, a noção de um começo da ordem atual da natureza é repugnante para ele. Eu estou inclinado a pensar que o estado atual da teoria quântica sugere um começo do mundo bem diferente da atual ordem da Natureza. (...) podemos conceber o começo do universo na forma de um único átomo, cujo peso atômico é dado pela massa total do universo. Este átomo altamente instável, teria começado a se dividir, fragmentando em pedaços cada vez menores numa espécie de super processo radioativo.

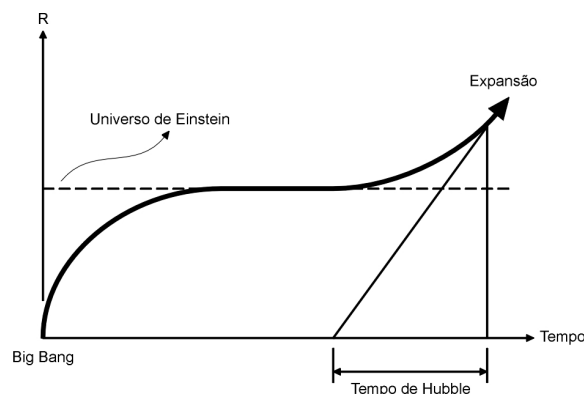


Figura 5.2: Modelo de Lemaître, com o início do Universo.

É importante lembrar que, até o final da década de 1940, a cosmologia ainda era pouco valorizada e quase não recebia apoio institucional. Não havia cosmólogos, pois os poucos cientistas que se dedicavam a problemas cosmológicos só o faziam em parte do seu tempo de trabalho, enquanto continuavam a realizar pesquisas em áreas do conhecimento mais tradicionais como a astronomia, física e matemática.

Como Lemaître era padre, é tentador ver sua teoria do átomo primordial como projeção de sua visão religiosa sobre a criação do Universo, já que sua teoria estaria de acordo com o

Genesis bíblico. Porém, Lemaître não era um cristão fundamentalista e era contrário à idéia de se interpretar a bíblia literalmente. Ele acreditava que Deus deu ao homem faculdades intelectuais, tornando possível descobrir todos os aspectos do Universo, de forma que não poderia haver contradição entre o Cristianismo e a cosmologia científica – mas isso não quer dizer que ele tenha criado uma teoria cosmológica *de acordo* com sua visão religiosa. Pelo contrário, Lemaître tinha a opinião de que a ciência e a teologia eram campos distintos que, embora tivessem objetivos semelhantes, não deveriam ser misturados.

Apesar disso, o Papa Pio XII, numa dessas mancadas que grandes líderes dão de vez em quando, acabou inflamando o debate e enfiando de vez a discussão religiosa no meio da discussão cosmológica dos físicos. Em 1951, ele publicou uma carta defendendo os novos avanços das ciências – incluindo a idéia de Lemaître e Gamow de que o universo teve um início. Dentre outras frases constrangedoras, a carta continha:

Portanto, com aquela concretude que é característica das provas físicas, foi confirmada a contingência do universo e também a bem fundamentada dedução da época em que o mundo saiu das mãos do Criador.

Por isso, a criação existiu. Nós dizemos: portanto há um Criador. Portanto, Deus existe!

Desnecessário dizer que a carta provocou reação imediata do setor ateu dos cientistas – principalmente daqueles contrários à idéia de que o Universo poderia ser criado. Agora o papa resolveu entrar nos debates científicos, e cancelar, com a suposta voz de Deus, qual teoria deve ser mais válida?

Assim formaram-se os dois partidos sobre a origem do universo: de um lado, George Gamow, com seu modelo de 1946 sobre a nucleossíntese primordial, sustentando o que ficou conhecido depois como *Big Bang*. Do outro, Bondi, Gold e Hoyle, defensores do Princípio Cosmológico Perfeito e, desde 1948, do modelo do *Estado Estacionário*.

5.2 Big Bang

George Gamow (1904-1968) era um físico soviético naturalizado norte-americano. Em 1946, ele propôs um modelo de universo cujo começo era muito quente e denso. A matéria era formada por uma espécie de gás de nêutrons e fótons, chamada “ylem”, que passou esfriar com a expansão. Os nêutrons sofriam reações nucleares (decaimento β), dando origem a prótons e elétrons. Seu modelo era basicamente um modelo de física nuclear para o estágio inicial do universo, que então passava a expandir de acordo com as equações de Friedmann-Lemaître. Essa idéia de produção nuclear de elementos já vinha da astrofísica estelar, como vimos no Volume IV. A idéia é que os elementos químicos são forjados a partir de elementos mais simples, nos núcleos das estrelas. Mais especificamente, os elementos são produzidos em estrelas grandes e que morrem rápido; a maior parte das estrelas só transforma hidrogênio em hélio. Mas de onde veio todo o hidrogênio?

Esse é o problema da “síntese primordial dos elementos”, colocado por Gamow. Assim, em 1948 foi publicado outro artigo, “The Origin of Chemical Elements”, assinado por Alpher, Bethe e Gamow¹. Admitindo a expansão do Universo e utilizando as descobertas da física nuclear,

¹Ralph Alpher (1921-2007) era aluno de George Gamow, tendo trabalhado junto com seu orientador neste problema. Já Hans Bethe (1906-2005), outro importante cosmólogo alemão (mais ou menos da mesma idade de Gamow) não teve nada a ver com o trabalho, mas o nome dele foi colocado no artigo só pelo trocadilho com as primeiras letras gregas - alpha, beta e gama. Um célebre exemplo do papel dos trocadilhos na história da ciência. Mais tarde, Hans Bethe de fato passou a trabalhar na nucleossíntese primordial. Já Alpher, junto com R. C. Herman, fizeram outros cálculos mais tarde, usando um computador eletrônico, que corroboravam as abundâncias observadas dos elementos. Segundo Gamow, entretanto, Herman se recusou a mudar seu nome para “Delter”.

o artigo propõe que os elementos leves que existem hoje no Universo (como se acredita e a astrofísica parece corroborar, hidrogênio e hélio devem ser 99% em massa da composição do universo) teriam sido sintetizados nas condições extremas de pressão e temperatura do pequeno universo primordial.

A idade do universo pode ser estimada a partir das observações da expansão do universo, dadas pela Lei de Hubble. A forma mais simples de fazer isso é supor que a velocidade de expansão do universo foi a mesma ao longo de sua evolução. Assim, tomemos um objeto que está a uma distância D da Terra, com uma velocidade de recessão V dada pela Lei de Hubble. Podemos facilmente calcular quanto tempo esse objeto demorou para chegar a essa distância D de nós; em outras palavras, há quanto tempo aquele objeto, nós, e o resto do universo estávamos todos em um mesmo ponto:

$$T = \frac{D}{V} = \frac{D}{H_0 D} = \frac{1}{H_0}$$

O inverso da constante H_0 nos dá uma estimativa da idade do Universo! Assim, a estimativa da idade do universo dependia das medidas da constante de Hubble, o que no início foi um problema; graças as imprecisões na medida desta, os primeiros valores estimados para a idade do Universo eram da ordem de 2 bilhões de anos. Já nesta época, era consenso entre os geólogos que a Terra tinha pelo menos 4 bilhões de anos. Novas medidas de H_0 , entretanto, acabaram levando a estimativas melhores. Com as medidas atuais, a estimativa fica em torno de 13,7 bilhões de anos para o universo.

O nome “big bang” originalmente foi dado por Fred Hoyle, o grande defensor da teoria rival, em uma fala durante um programa de rádio. Na ocasião, por força de retórica, ele se referiu à teoria como “this big bang thing” (essa coisa de grande explosão). A partir daí, o nome acabou pegando.

Contudo, interpretar o Big Bang pelo significado literal do termo pode levar a uma concepção inadequada do problema. Uma explosão é a liberação violenta de energia por um processo súbito. Como a formação do Universo teria ocorrido com a violenta liberação de uma quantidade anormalmente grande de energia de modo súbito, o nome “grande explosão” pode ser associado, de certo modo, a esse processo. No entanto, há um limite importante a ser distinguido. Entendemos bem o que é uma explosão por vê-la ocorrer no espaço tridimensional onde existimos (no caso comum, uma explosão é um processo químico que ocorre em alguma região desse espaço). No caso da explosão do big-bang, por outro lado, não existe essa referência, pois ela teria criado *tudo*, inclusive o espaço e o tempo. Não podemos visualizar o Big Bang de fora (como se tenta fazer em filmes e documentários) pois não existe um “fora”; do mesmo modo, não podemos nos perguntar o que havia antes do big bang, pois não havia um “antes”. Novamente, nos deparamos com teorias não visualizáveis pela nossa intuição comum, nem adequadamente apreensíveis pelas nossas palavras usuais.

5.3 Universo Estacionário

A teoria rival veio de Cambridge, Inglaterra. Os astrofísicos austríacos Hermann Bondi (1919-2005) e Thomas Gold (1920-2004) estudaram em Cambridge, onde conheceram o físico e astrônomo inglês Fred Hoyle (1915-2001). Eles frequentemente tinham conversas informais sobre cosmologia, a partir das quais acabaram desenvolvendo em conjunto um novo modelo de universo em expansão. A Lei de Hubble era consensualmente aceita na época, como prova da expansão do Universo. Logo, não se poderia defender um universo estático, como colocado por Einstein no seu primeiro modelo. Mas isso não quer dizer que ele não possa ser *estacionário*. Sistemas podem ser estáveis e manter seus aspectos externos mesmo que, por baixo da aparente estabilidade, estejam em mudança contínua. O exemplo mais simples é o de um rio correndo, da famosa

metáfora de Heráclito, da Grécia: embora ele sempre mantenha a mesma aparência, nunca se banharás na mesma água. Da mesma forma, seres vivos são seres em *contínuo desequilíbrio*: sempre consumindo mais energia e gastando mais energia, mas nos mantendo com aproximadamente a mesma consistência química e termodinâmica. Embora todas as moléculas do nosso corpo se renovem em muito pouco tempo, nos mantemos quase os mesmos por anos, até que morremos e o equilíbrio estático é finalmente estabelecido.

A idéia de estabilidade estacionária não era nova na física: trocas de calor e reações químicas já eram concebidas assim. As moléculas em um sistema trocam continuamente de energia entre si e com eventuais meios externos, mesmo que a temperatura global do sistema pareça sempre a mesma. Da mesma forma, aprendemos na escola que o que determina o equilíbrio de uma mistura química é que uma determinada transformação de um em outro componente ocorra com a mesma velocidade que a transformação reversa, de forma que, embora as moléculas estejam se transformando o tempo todo, as porcentagens permanecem as mesmas. Do mesmo modo, se o universo está se expandindo mas, ao mesmo tempo, matéria está sendo criada continuamente por toda sua extensão, então a densidade do universo permanece constante. A taxa de criação de matéria foi estimada na época, mas era tão baixa que não poderia ser detectada experimentalmente na época. Apesar de lenta, a criação é contínua, de forma que conduz à formação de novas galáxias.

Assim, se preserva o Princípio Cosmológico Perfeito: o universo se parece o mesmo para qualquer observador em qualquer ponto do espaço mas também em qualquer instante no tempo. Não existe um momento distinto de criação do universo; ele está constantemente *se criando*. Note ainda que, mesmo se expandindo, ele não aumenta de tamanho: algo infinito crescendo continua infinito.

Ao contrário do que a maioria pensava na época, a versão de Hoyle da teoria do Estado Estacionário não violava a conservação da energia. Em vez disso, o que ele fez foi alterar as equações de Einstein da Relatividade Geral, desta vez não para pôr uma constante cosmológica freando a expansão, mas substituindo-o por um tensor de criação de matéria, C_{mn} . Ele usou o termo “criação” em vez de outros mais neutros (como formação ou origem) pensando na criação de partículas e anti-partículas, uma idéia que já era amplamente utilizada por físicos quânticos e de partículas. Com suas equações, pôde fazer previsões quantitativas de grandezas mensuráveis, como, por exemplo, a densidade do universo. Para esta, Hoyle obteve um valor de $\sim 5 \cdot 10^{-28} \text{ g/cm}^3$, 1000 vezes maior que a densidade estimada a partir das observações. Essa discrepância não parecia tão problemática para o físico; ele apenas imaginou que só um milésimo da matéria do universo estaria na forma condensada. Além disso, os modelos de Einstein e De Sitter previam densidades da mesma ordem de grandeza. Outras grandezas testáveis, produzidas pela teoria, eram a densidade de radiação e as idades observadas das galáxias.

Gold e Bondi não concordaram com a tentativa de Hoyle, uma vez que não tinham problemas em abandonar a conservação da energia numa escala cósmica. Eles criaram uma versão da teoria do Estado Estacionário mais qualitativa, fazendo uso mais explícito de argumentos filosóficos. Assim, houve pelo menos duas teorias do estado estacionário, que acabaram sendo enxergadas como uma só.

Além disso, havia ainda a questão religiosa: se Lemaître era padre e seus modelos cosmológicos podem ser facilmente associados com sua visão religiosa (apesar da discordância dele quanto a isso), os criadores da Teoria do Estado Estacionário eram ateus e hostis a todas as religiões organizadas. Ainda que a motivação para a criação da Teoria do Estado Estacionário não tenha sido estritamente antirreligiosa, eles certamente ficaram satisfeitos ao formular uma teoria em que não havia espaço para o Criador. Fred Hoyle, de todos os defensores do Estado Estacionário, era o mais ferrenho ateu, e defendeu posições bastante polemicas, como a de que, para resolver os conflitos religiosos na Irlanda, bastava prender todos os padres e clérigos. Com relação ao

Big Bang, ele mencionou ter objeções estéticas a um começo no tempo e, em outra ocasião, escreveu que essa idéia “é uma noção típica de pessoas primitivas, que postulam a criação de deuses para explicar o mundo físico”. Embora a controvérsia religiosa seja importante para entender o debate cosmológico, é importante não reduzir este debate a tal controvérsia. Embora posições religiosas possam inflamar certos autores na defesa de suas posições, sempre é possível fazer interpretações distintas nesse sentido. Havia ateus defensores do Big Bang, bem como religiosos partidários do Estado Estacionário – dentro deste último grupo, podemos citar Bernard Lovell, que via na criação contínua de matéria do Estado Estacionário a forma através da qual Deus está continuamente intervindo no universo.

Na década de 1950, então, a teoria do Estado Estacionário se estabeleceu como uma alternativa viável para a teoria do Big Bang. Um ponto importante é que tanto Fred Hoyle quanto George Gamow se esforçavam em escrever livros de divulgação científica. Com isso, as duas posições, bem como a controvérsia entre elas, acabaram atraindo atenção do público em geral. Talvez sirva como lição: se quer ganhar apoio para a sua teoria, trabalhe muito bem sua publicidade.

Novamente a comunidade científica esteve dividida entre duas teorias diferentes que coexistiam como formas de explicar o universo. Como vocês já devem ter percebido esse tipo de debate é comum em ciência e a distinção entre a teoria “certa” e a “errada” é algo muito complicado na prática. Geralmente essa tarefa fica a cargo de experimentos que testam as explicações das teorias: eventualmente, algum experimento dará preferência a uma ou outra teoria. Mas não se deve acreditar tão ingenuamente na importância dos experimentos, por dois motivos. Primeiro porque teorias não são objetos estáticos e acabados; elas muitas vezes podem ser adaptadas a novas situações experimentais. Segundo que todo experimento depende das teorias, que fornecem em primeiro lugar a linguagem a partir da qual eles são formulados, a forma como são montados. Além disso, há as teorias auxiliares, que explicam todos os passos da interação entre o objeto observado, o aparelho de medidas e o ser que observa.

No caso da cosmologia, como vimos, os dados experimentais são quase todas observações da luz vinda de galáxias e outros objetos muito distantes, de forma a fornecer noções sobre o universo em larga escala². Assim, uma observação deste tipo, exigida por algum modelo cosmológico, inclui as seguintes teorias auxiliares: uma óptica que explique como a luz se comporte; um modelo astrofísico dos meios pelos quais a luz passa (ela pode ser absorvida, polarizada, etc. em nuvens no caminho); um modelo da atmosfera terrestre através da qual a luz passará; um modelo óptico e eletrônico de como funcionam os telescópios, as placas de CCD e os computadores associados a elas. Se um experimento produz um resultado que não concorda com a previsão teórica, o problema pode ser da teoria principal, mas pode ser também de qualquer uma das auxiliares.

A história tradicional da cosmologia fala sobre um novo dado observacional que teria decidido o debate entre as duas teorias: a Radiação Cósmica de Fundo (RCF). Embora tenhamos que tomar os cuidados acima mencionados, vejamos o papel que essas novas observações desempenharam.

5.4 Radiação Cósmica de Fundo

A RCF foi detectada acidentalmente nos anos 60, por dois pesquisadores da *Bell Telephone*, Arno Penzias e Robert Wilson, enquanto se esforçavam por eliminar todo o ruído das antenas

²Não se pode realizar experimentos em laboratório, reproduzindo as condições do universo primordial, mas é possível testar alguns aspectos das teorias que embasam as teorias cosmológicas, como a física de partículas que é testada nos grandes aceleradores. Um famoso acelerador de partículas é o LHC (Large Hadron Collider), que começou a funcionar em 2008. Foi bastante difundida na imprensa a idéia de que seriam ali recriadas as condições iniciais do universo; mas argumentos filosóficos simples mostram que isso não faz sentido. De fato, o LHC vai atuar em energias bastante elevadas, que só foram atingidas quando o universo era muito menor que o atual. Mas apenas as energias são iguais; a densidade de matéria, por exemplo, era muito maior no universo primordial.

de rádio. Porém, por mais que se trabalhasse, continuava sobrando ruído; em especial, havia um resíduo que era detectado em toas as direções! Mais assustadora é a conclusão que se chega medindo-se o espectro desta radiação: Nenhuma outra radiação emitida por um corpo jamais se ajustou de forma tão precisa a uma curva de corpo negro!

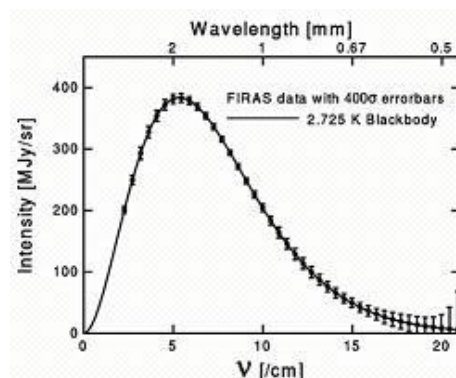


Figura 5.3: O espectro da R.C.F. A concordância é quase perfeita entre o espectro teórico de um corpo negro a 2.725K de temperatura e o espectro observado. Para se ter uma idéia da precisão experimental dessa observação, foi preciso desenhar barras de erro aproximadamente 400 vezes maior para que eles se tornassem visíveis neste gráfico. Mesmo tendo tamanho mínimo, o gráfico de um corpo negro teórico passa dentro de todas as barras dos dados!

O caráter (pelo menos, em primeira aproximação) isotrópico da RCF aponta facilmente para uma interpretação cosmológica desta, a partir do princípio cosmológico. De fato, se o fluxo vem de todas as direções, é quase evidente que se trata de algum fenômeno ou gerado pela Terra (possibilidade que, em princípio, pode ser descartada, se confiamos nos nossos modelos da atmosfera e no trabalho minucioso de Penzias e Wilson para limpar ruídos locais) ou de larga escala do universo, ou seja, global.

Ao tomar conhecimento das novas observações, Gamow logo chamou para si a prerrogativa, alegando que já havia previsto essa radiação (o que é verdade; isso foi feito por Alpher e Hermann em 1956). Uma radiação como esta, isotrópica e correspondente a uma temperatura de corpo negro muito baixa, era explicada sem grandes dificuldades pelo Big Bang.

Segundo a teoria da Grande Explosão, embora o tamanho do universo sempre aumente ou diminua, sua quantidade de matéria-energia é estritamente constante, constituindo para eles um princípio fundamental de conservação. Isso significa que, na fase em que o universo tinha um tamanho muito pequeno, a densidade de matéria e energia nele devia ser muito alta. Tão alta que os próprios fótons deviam ficar sendo constantemente absorvidos e reemitidos, como acontece, por exemplo, nos interiores das estrelas. Num universo desse tipo, com mares de fótons distribuídos em todas as direções, não seria possível distinguir visualmente nenhum objeto; ele seria um todo incandescente (assim seria se nadássemos dentro de uma estrela, ou se fosse confirmada a tenebrosa conclusão de Olbers).

Dessa forma, deve ser possível calcular um *limite de transparência* do universo: um momento a partir do qual os fótons passaram a poder fluir livremente pelo universo e este tenha ficado transparente à distinção de objetos. Assim, observando objetos mais distantes no céu (isto é, mais antigo), seria esperado que esbarrássemos em um limite visível do universo, quando estivéssemos olhando à distância correspondente a esse momento de início de transparência. Supondo isotropia e homogeneidade, esse tipo de “radiação fóssil” deveria vir igualmente de todas as direções – Exatamente como a RCF detectada.

Além disso, sendo a radiação proveniente de toda a matéria do universo, compactada com uma grande densidade, é bastante natural que ela tenha um perfil de corpo negro. Vindo de tão

longe, pela Lei de Hubble, é a radiação com o maior *redshift*³ de todos. Assim, embora seja de uma fase muito quente do universo, essa radiação deveria pertencer a uma curva de corpo negro muito deslocada, tanto que seu pico está na faixa de rádio!

A temperatura de corpo negro medida na RCF de Penzias e Wilson (que é a própria temperatura de fundo do universo) é de 2,7 K. A previsão teórica feita por Alpher e Herman em 1949 aponta para uma temperatura maior ou igual a 5 K. O “maior ou igual” vem do fato de que 5 K é a temperatura que eles encontraram para a radiação vinda da época da condensação; mas há mais radiação no universo, vinda das estrelas e todos os objetos luminosos espalhador por aí. Além disso, o próprio Gamow fez estimativas posteriores, uma com o resultado de 7 K e outra com o resultado díspar de 50 K!

De fato, outros físicos já haviam feito previsões para a “temperatura de fundo do universo”, baseados no fluxo médio proveniente das estrelas, nos raios cósmicos e ainda em radiação gerada por campos magnéticos. Muitas dessas previsões não levam em conta esse efeito de radiação primordial, ou seja, corroboram de alguma forma um estado estacionário de universo. Muitos deles são críticos à idéia de se interpretar redshifts cosmológicos como Efeito Doppler, invocando outros efeitos físicos em seu lugar (como interações entre fótons, ou de fótons com outras partículas, ou efeitos de “luz cansada”). Muitas dessas previsões eram melhores que as do time de Gamow. Como exemplos, a de Erich Regener (1933) e a de Walther Nernst (1937), ambos prevendo 2,8 K para temperatura de fundo.

Assim, não dá pra dizer que a RCF decidiu definitivamente em favor do Big Bang, embora Gamow tenha defendido isso e embora a comunidade científica tenha, crescentemente, preferido apoiar o Big Bang.

5.4.1 Satélites

Aqui, novamente, a diferença foi marcada pelo surgimento da computação. No início, tínhamos o Hubble com observações de distância e redshift de menos de vinte galáxias, feitas uma a uma nas suas noites no Monte Wilson. Depois, o ruído da RCF, detectado por acidente. Então, com algum esforço, conseguiu-se medidas confiáveis da RCF em alguns (menos de dez) comprimentos de onda diferentes, o que permitiu plotar sua curva de corpo negro. Mas o debate mudou de figura quando se lançou o COBE: um satélite para varrer o céu inteiro, medindo, pixel a pixel da Esfera Celeste, a radiação incidente em rádio, descontando todos os efeitos locais (terrestres, solares, galácticos, extragalácticos), até obter um mapa completo da RCF e suas anisotropias. O WMAP só fez produzir um mapa mais preciso, de forma igualmente assustadora.

Assim, o que deu a vitória para o Big Bang foram as medições contemporâneas mais precisas feitas pelo satélite COBE (*Cosmic Background Explorer*), da década de 90, e confirmadas com mais precisão pelo WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) a partir de 2001. Essas observações detectaram pequenas anisotropias da RCF, isto é, flutuações pequenas no fundo isotrópico, da ordem de um milionésimo de grau kelvin. É um valor ínfimo em relação à temperatura do corpo negro que melhor ajusta seu espectro; contudo, pensando na teoria do Big Bang, a presença dessas anisotropias é justamente o que permite o surgimento de estruturas: aglomerados de galáxias, galáxias, estrelas e planetas. Se o universo fosse perfeitamente homogêneo, objetos astronômicos não teriam surgido.

Mas a história não acabou (nunca acaba fácil assim). Como era de se esperar, as teorias de Estado Estacionário se adaptaram; hoje existe uma *Teoria do Universo Quase Estacionário*, que continua prevendo a criação de matéria, mas com o estabelecimento de uma oscilação cósmica em torno da solução estacionária das equações cosmológicas. Dai o nome “quase estacionário” para a teoria. O universo presentemente estaria numa época de expansão, que seria seguida de uma contração, e assim sucessivamente. O período de oscilação é da ordem de 20-30 bilhões de

³O espectro da RCF mostra um redshift fantásticamente alto: com $z = \Delta\lambda/\lambda = 1100$.

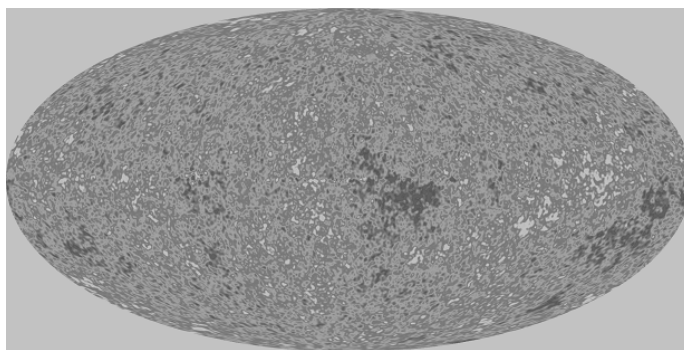


Figura 5.4: Mapa do universo com os dados obtidos pelo WMAP, satélite lançado no início do século XXI para fazer medidas de grande precisão – entre elas, medir as anisotropias da R.C.F.

anos. Como já vimos com os modelos de Friedmann, a idéia de um universo oscilante nem é completamente nova. Ainda hoje, a teoria do Big Bang não é a única capaz de explicar os dados cosmológicos, entretanto, é a teoria mais aceita entre os físicos (a quase totalidade deles). É assim que ela acabou se integrando ao “modelo padrão” da cosmologia, como vimos no capítulo anterior.

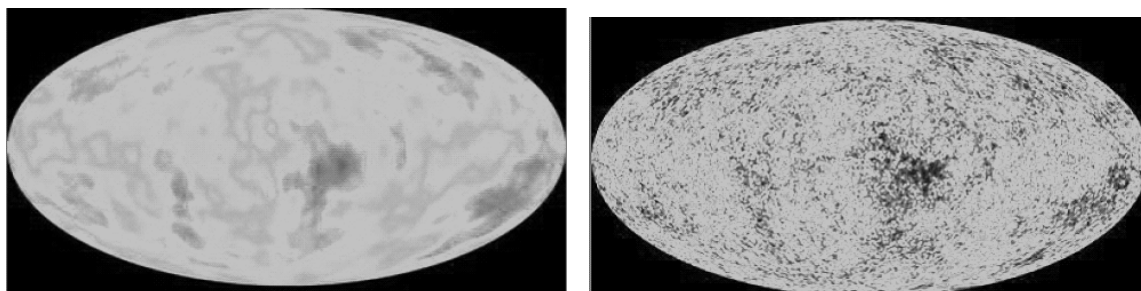


Figura 5.5: Comparação entre mapa da RCF feito a partir de observações do COBE e o mapa feito a partir do WMAP.

5.5 Big Bang Brasil

Se você não teve paciência de ler toda a apostila, aqui vai um resumo dos principais embates entre cosmólogos no século XX, na forma de um programa televisivo: o Big Bang Brasil!

Bial - Olá, pessoal! Está começando mais uma edição do nosso BBB! É o Big Bang Brasil...

Bial - Vamos lá, então, que o programa está quente, muito quente hoje. Quente e denso. A casa andou fervendo nos últimos dias. Mas, antes de tudo, vamos ver como estão os nossos "brothers"... E aí, alemão?

Einstein - Pois é, Bial, a coisa aqui está quente mesmo.

Bial - Mas o que aconteceu para te deixar assim?

Einstein - Bem, tudo começou em 1915, quando eu desenvolvi minha teoria da relatividade geral. Ela revelou uma coisa muito incômoda, que deixou todo mundo meio perturbado aqui...

Bial - Vish, alemão, o que você aprontou aí?

Einstein - Você sabe, na relatividade geral eu costurei espaço, tempo, matéria, energia e gravidade, tudo no mesmo pacote. Aí, sabe como é, sem muita coisa para fazer aqui dentro da casa, decidi iniciar uma continha. Coisa simples, para flexionar os músculos cerebrais.

Bial - Noooooossa... que conta foi essa, seu Einstein?

Einstein - Bem, decidi aplicar as equações da relatividade geral ao universo inteiro – como se eu fosse calcular o que acontece com o cosmos todo se ele for representado pela minha teoria. E aí aconteceu uma coisa bem desconfortável.

Bial - Eita, esse alemão, viu...

Einstein - Pois é, o que minhas contas mostraram é que o universo não podia estar parado – ele devia estar ou se contraindo, ou se expandindo.

Bial - Que absurdo, alemão!

Einstein - Concorde. Tanto que decidi mudar a teoria no ano seguinte para impedir isso, incluindo uma letra lambda nas equações, de modo a fazer com que o universo ficasse paradinho, do jeito que devia...

Friedmann - Mas alemão, as suas contas estavam certas! A equação original era a mais bonita, você deveria ter acreditado no que ela sugeria... eu mesmo conferi os cálculos.

Bial - Nossa, que polêmica, hein? Para resolver, vamos chamar agora um brother zen, o nosso monge... George Lemaître! E aí, George?

Lemaître - Fala, Bial!

Bial - Tudo bom aí?

Lemaître - Mais ou menos, Bial. É o alemão, ele andou me colocando contra todo mundo. Diz que as minhas idéias são absurdas. E olha que elas nasceram da própria teoria dele!

Einstein - O nosso querido padre belga devia ficar mais no confessionário, isso sim. Depois de fazer cálculos com base na minha relatividade, em vez de adotar a versão com o lambda, ele apostou na versão original da teoria e agora defende a idéia de que o universo inteiro nasceu de algo como um "átomo primordial", que explodiu e deu origem a tudo que vemos. Uma bobagem.

Lemaître - Alemão, pára com isso. Você me magoa quando diz que minhas conclusões não têm valor.

Bial - Vish, que bagunça. Fecha o som da casa! Agora vamos ver uma coisa que aconteceu em 1931, com um dos nossos brothers mais queridos, Edwin Hubble.

Hubble - Ih, olha isso aqui! Veja só, eu estava analisando a luz dessas galáxias e parece que todas elas estão se afastando de nós. Que estranho.

Bial - E agora, o que pode ser isso? Vamos dar uma espiadinha!

Einstein, Lemaître, Friedmann e Hubble discutem.

Bial - E aí, quem é que vai se explicar? Hubble?

Hubble - Eu não. Eu só fiz as medidas. Não gosto de me intrometer nessas discussões cosmológicas.

Bial - Monge?

Lemaître - É óbvio, Bial! Se as galáxias parecem estar todas se afastando de nós, é claro que elas já estiveram muito mais próximas antes.

Einstein - Tá, eu tenho de admitir que essas espiadas do Hubble parecem apontar para o fato de que o universo já foi no passado muito mais compacto, e não dá para negar que ele está hoje em expansão.

Bial - Ih, alemão, então aquele negócio de lambda era tudo bobagem?

Einstein - Pois é, Bial. O maior erro da minha carreira.

Bial - - Olhaí... Confissões no BBB! Mas que bom, parece que tudo se acomodou, com os brothers todos aceitando que o universo nasceu de um ponto muito pequeno e denso...

Hoyle - Todos não, Bial! Esse negócio de Big Bang é tudo bobagem!

Bial - Ué, mas e as espiadelas do Hubble?

Hoyle - Elas mostram que o universo é dinâmico, mas eu acho um absurdo dizer que ele *nasceu* num ponto do tempo, a partir de um *átomo primordial*, como sugere o monge. Isso é coisa de religioso mesmo.

Lemaître - Ei, peraí, peraí. Você sabe muito bem que eu não misturo a minha fé com a cosmologia – minhas conclusões sobre o átomo primordial derivam da teoria do alemão!

Bial - Esse é o nosso Fred Hoyle, sempre polêmico!

Hoyle - Polêmico não, Bial. É que esse papo de Big Bang não convence mesmo. Mas eu tenho a resposta. Desenvolvi em 1948 uma ótima teoria, chamada de teoria do estado estacionário. Ela sugere que o universo na verdade sempre foi assim. As galáxias se afastam mesmo umas das outras, mas matéria surge do nada entre elas para criar novas galáxias, e o universo continua nesse esquema, eterno e sempre parecido.

Gamow - Tsc, tsc, tsc...

Bial - Ih, parece que o George Gamow não concorda. O que foi, George, para você ficar ressabiado assim?

Gamow - Bial, a teoria do Hoyle não está com nada. Ela não explica como surgiram os atuais átomos do universo. Já o meu modelo do Big Bang explica como apareceram os átomos de hidrogênio e hélio, exatamente nas proporções que existem hoje no cosmos!

Hoyle - Nem vem, seu Gamow, nem vem. Você sabe muito bem que essa explicação não serve de nada, pois não explica como surgiram os outros átomos, além do hidrogênio e do hélio. O que explica isso na verdade é a minha teoria sobre a formação de núcleos atômicos no interior das estrelas! É de lá que nasceram os elementos químicos mais pesados que o hidrogênio e o hélio!

Bial - Ih, que confusão, que confusão! Fecha o som da casa! O Big Bang Brasil está pegando fogo! Vamos deixar os brothers lá se matando, porque daqui a pouco tem o paredão! Gamow e Hoyle vão se enfrentar! Qual teoria vence? A teoria padrão do Big Bang, desenvolvida por Gamow, ou a do estado estacionário, por Hoyle? Vamos dar uma espiadinha?

Einstein, Friedmann, Lemaître, Gamow e Hoyle estão discutindo, quando Robert Dicke decide entrar na conversa.

Dicke - Já sei! Tem uma coisa que pode confirmar se o universo “nasceu” de um ponto muito denso e quente, como diz a teoria do Big Bang de Gamow, ou se ele vive num estado estacionário, como diz o Hoyle. Se ele tiver “nascido” do Big Bang, ele deve ter uma radiação vinda de todas as direções – uma espécie de eco dessa fase altamente compacta do universo.

Gamow - Grande novidade! Eu já tinha previsto isso em 1948, e você apresenta essa idéia como se fosse nova. Tsc, tsc, tsc. . .

Dicke - Ei, nem sabia que você já tinha dito isso, George.

Gamow - Pois é, se alguém puder detectar essa radiação de fundo. . .

Bial - E aí, Dicke, você vai dar uma espiadinha nessa radiação?

Dicke - Vou, Bial. Já estou desenvolvendo um aparelho para detectá-la, se ela existir mesmo. . .

Penzias - Póparar, póparar! Olha aqui o que eu detectei na antena em que trabalho lá nos Laboratórios Bell!

Dicke - Ih, fomos furados, rapazes.

Bial - Que moraaaal! Arno Penzias diz ter encontrado a radiação cósmica de fundo, uma relíquia de uma época apenas 300 mil anos após o Big Bang.

Penzias - Eu e o meu amigo Wilson detectamos esse negócio meio sem querer, mas agora não temos dúvidas: é a radiação do Big Bang.

Gamow - CQD, amigo Hoyle, CQD.

Hoyle - Absurdo. Esse Big Bang é absurdo. As coisas podem parecer boas para a sua teoria-zinha agora, mas veja só: eu acabo de desenvolver a minha sensacional teoria do estado quase estacionário, que responde até pela radiação cósmica de fundo!

Bial - Ih, Hoyle, você não está forçando a barra, não?

Gamow - É, Bial, o cara não desiste.

Hoyle - Não adianta. A radiação me pegou de surpresa, mas existe um problema que ninguém está mencionando. A radiação aparece exatamente com a mesma intensidade em todas as direções do universo. Isso indica que o universo foi muito homogêneo no passado e, se isso é resultado de um Big Bang, o universo hoje jamais teria as galáxias que têm, pois era homogêneo demais para evoluir para o mundo de hoje, que é cheio de vazios, com algumas poucas regiões concentradas de matéria.

Gamow - Calma, Hoyle. As variações na radiação cósmica vão aparecer. Falta apenas desenvolver os instrumentos para detectar essas flutuações diminutas.

Bial - Fecha o som da casa! Quem será que tem razão, Gamow ou Hoyle? Vamos dar um espiadinha. . .

Einstein, Friedmann, Lemaître, Gamow, Hoyle e Dicke estão discutindo, quando George Smoot decidiu entrar na conversa.

Smoot - Então, eu desenvolvi um projeto aqui que pode resolver a parada...

Todos se viram para Smoot.

Smoot - Um satélite. Um satélite para detectar com alta precisão potenciais variações na radiação cósmica de fundo.

Gamow - Parece uma ótima idéia. Só no espaço para evitar a interferência gerada pela atmosfera nessas observações delicadas.

Bial - Mas e aí, Smoot, vai rolar?

Smoot - Olha, faz tempo que tenho o projeto, mas a explosão do ônibus espacial Challenger, em 1986, está adiando tudo. Tivemos de cortar o tamanho do Cobe. . .

Bial - O que é Cobe?

Smoot - É o nome do satélite.

Bial - Ahh... vamos continuar espiando.

Smoot - Mas agora ele está pronto. Vamos lançar e, em 1992, devemos fechar um mapa detalhado da radiação cósmica de fundo.

Bial - Fecha o som da casa! E agora? Estamos chegando ao emocionante final! Quem vai continuar na casa, Gamow ou Hoyle? Vamos ver as torcidas aqui no nosso estúdio!

Torcida do Gamow - ÊÊÊÊÊÊÊÊÊ! Big Bang! Big Bang! Big Bang!

Torcida do Hoyle - Êêêê.

Bial - Vamos dar uma espiadinha. E aí, Gamow, está pronto para ver sua família?

Gamow - Nossa, vamos lá!

Batimentos cardíacos de Gamow vão a mil, enquanto ele olha para a tela.

Gamow - Olha lá, todo mundo veio! Mamãe Gamow, tio Gamow, vovô Gamow, vovó Gamow!

Bial - E aí, Hoyle, preparado?

Hoyle - Eu sei que está todo mundo contra mim, Bial, mas vamos lá.

Bial - Olha aí a sua torcida, Hoyle!

Batimentos cardíacos de Hoyle vão a mil.

Hoyle - Puxa, mamãe Hoyle, tio Hoyle, vovô Hoyle, vovó Hoyle!

Bial - Chegou o grande momento, hein? Estão preparados?

Gamow - Sim, Bial.

Hoyle - Manda ver, Bial.

Bial - E atenção. O George Smoot acaba de enviar aos estúdios da Globo o resultado da medição da radiação cósmica de fundo de 1992. Foi uma disputa acirrada, viu? Mas, com uma diferença de uma parte em cem mil, o Cobe encontrou variações que suportam o... Big Bang!

Gamow - Ah, eu sabia, eu sabia, eu sabia!

Hoyle fica com cara de fossa. Einstein, Friedmann, Lemaître, Gamow, Dicke e Smoot vão abraçar Gamow. Hoyle deixa a casa e vai para o palco com Bial.

Bial - E aí, Hoyle, tudo bem?

Hoyle - É a vida, né, Bial?

Bial - Pois é. Mas veja aqui a sua torcida, que veio te receber.

Hoyle - Ih, Bial, pode ficar sossegado. Eles acham que sabem de tudo. Hoje quase todos acreditam que o universo como o conhecemos surgiu num ponto denso e quente e expandiu a partir dali – essa idéia que eu apelidei de Big Bang lá atrás. Mas ainda tem muita água para correr por baixo da ponte da cosmologia. E mal sabem eles que estão apenas procurando cordas para se enforcar.

Bial - É isso aí. Muito já aprendemos sobre a natureza e o surgimento do universo, mas ainda há muito mais pela frente. Pode continuar espiando...

Capítulo 6

O que existe dentro do Universo?

6.1 Matéria e Energia

Agora que já discutimos extensivamente a dança do espaço-tempo e suas propriedades (seu tamanho, seu movimento, sua história), vamos voltar aos olhos para o que há dentro do Universo. O Volume IV foi dedicado especialmente a esse tema: a natureza da matéria. Mas muito mudou ao longo do século XX, com o advento da física nuclear – que, como vimos, foi bastante importante para a cosmologia. Essa física acabou levando a um modelo bastante diferente sobre a natureza da matéria e dos seus constituintes fundamentais.

6.1.1 Partículas Fundamentais

O modelo padrão da cosmologia utiliza um outro modelo padrão, o das partículas elementares. Da mesma forma que as equações de Friedmann não são o único modelo possível fundamentado na Relatividade Geral, as partículas fundamentais não são a única teoria possível, fundamentada na Mecânica Quântica. De fato, há modelos alternativos às partículas, mas quase ninguém discorda de fundar os modelos na citada mecânica.

No modelo padrão, prevalece o ponto de vista atomista, de que existem de fato **PARTÍCULAS FUNDAMENTAIS**, indivisíveis, bem como **FORÇAS FUNDAMENTAIS**. Mas existem muitas teorias alternativas que tem números próximos de adeptos, como a famosa “teoria das cordas”, que prefere imaginar as partículas fundamentais como entes cuja única propriedade é vibrar – cordas, numa analogia simples. Há ainda os seguidores da tradição do Schrödinger, usando padrões de onda e redes de interferência como fundamentadoras de todo tipo de matéria. Por simplicidade e por ser uma taxonomia divertida, vamos ficar aqui com o modelo padrão de partículas, mesmo.

Quanto às forças, fizemos um leve esboço no início da lista de física básica. Elas são de quatro tipos: a **NUCLEAR FORTE**, a **NUCLEAR FRACA**, a **ELETROMAGNÉTICA** e a **GRAVITACIONAL**. Cada uma das interações fundamentais age entre corpos que possuem qualidades específicas para tal ação; isto é, entre corpos que possuem uma *carga específica*. Para a força gravitacional, essa carga é a massa gravitacional; para eletromagnética, é a carga elétrica; para a força nuclear forte, a cor; para a nuclear fraca, o sabor¹. O que quer dizer que só corpos que têm massa interagem gravitacionalmente, só os que têm cor trocam interação forte, etc. Além disso, usando a flexibilidade conceitual que a física quântica permite, costumamos pensar, quando conveniente, nas

¹Não custa reforçar que essa cor e esse sabor não têm nada a ver com a cor e o sabor que os nossos sentidos produzem. O nome tem uma explicação sociológica: a comunidade científica contemporânea, em particular a norte-americana, tem um certo costume de não ligar muito pros significados mais profundos das teorias científicas; por isso, ao nomear coisas, os cientistas têm preferido nomes bonitinhos ou engraçadinhos. O mesmo raciocínio se aplica ao nome ‘quark’.

forças como mediadas por trocas de partículas. Assim, cada força fundamental pode ser representada por um tipo de 'partícula de interação'. No caso da força nuclear forte, essas partículas são chamadas glúons; da nuclear fraca, são os bósons W^+ , W^- e Z ; da eletromagnética, os fótons; da gravitacional, os supostos grávitons...

Agora, à matéria. Segundo o modelo padrão, são duas classes básicas de partículas, QUARKS e LÉPTONS, e seis espécies de cada classe: dos quarks, temos up, down, charm, strange, top e bottom; quanto aos léptons, são o elétron, o múon, o tau e mais três tipos de neutrinos, um para cada um dos três primeiros léptons. Veja a tabela abaixo. Em cada coluna, o da primeira linha é o mais leve; o da última, mais pesado. Os valores ao lado de cada nome são as cargas elétricas (em unidades da carga do próton).

Quarks			
up (u)	+2/3	down (d)	-1/3
charm (c)	+2/3	strange (s)	-1/3
top (t)	+2/3	bottom (b)	-1/3
Léptons			
elétron (e)	-1	neutrino do elétron (ν_e)	0
múon (μ)	-1	neutrino do múon (ν_μ)	0
tau (τ)	-1	neutrino do tau (ν_τ)	0

Já falamos muito sobre as cargas da força gravitacional e da força elétrica; cada partícula fundamental tem um valor fixo de massa e de carga elétrica. Existe um só tipo de massa, mas dois tipos de carga elétrica (que chamamos *positiva* e *negativa*) e três tipos da cor (vermelho, verde e azul)! A cor de cada quark é algo variável, que muda conforme os quarks interagem entre si, isto é, trocam glúons. É sob esse tipo de interação que os quarks se unem, formando uma grande variedade de outras partículas.

Os quarks se agrupam preferencialmente em duas formas: grupos de três quarks ou duplas de um quark e um antiquark². Entretanto, entre os quarks, o up e o down são muito mais estáveis que os outros; portanto, as partículas formadas por eles são mais estáveis – na verdade, as únicas que são estáveis o suficiente para formar outras estruturas. Elas são dois agrupamentos de três quarks: o PRÓTON, formado de dois quarks up e um down (uud), e o NÊUTRON, formado de um up e dois down (udd)³.

Esses prótons e nêutrons, por sua vez, também conseguem se unir de forma estável, através da força forte residual da união de seus quarks. Assim, eles formam os NÚCLEOS ATÔMICOS, que podem ser de uma grande variedade, como pode ser visto em qualquer tabela periódica.

Já os léptons preferem navegar sozinhos. Novamente neste caso, o mais leve é o mais estável: taus costumam decair em múons, que costumam decair em elétrons, que ficam flinando por aí até que muitos acabam capturados eletromagneticamente pelos núcleos atômicos, trocando bósons de força fraca, e fótons (o princípio das linhas espectrais); formando deste modo os ÁTOMOS. Assim, da floresta de partículas, apenas três formam todos os objetos conhecidos.

Os átomos são ainda mais estáveis, porque, como um todo, são eletricamente neutros (isto é, têm menos formas de interagir com outras partículas). Mas os átomos mesmo podem se ligar a outros átomos, de duas formas principais: fazendo agrupamentos de núcleos iguais, numa estrutura geométrica que se repete indefinidamente, dentro dos quais os elétrons ficam todos

²Uma *antipartícula* tem todas as mesmas características físicas que sua partícula correspondente, exceto pela carga elétrica, que tem o mesmo valor mas o sinal oposto. Assim, o antielétron (ou pósitron) tem a mesma massa e as mesmas características do elétron, mas possui carga elétrica +1. As antipartículas também trocam cores diferentes das cores das partículas; elas são antivermelho, antiverde e antiazul, ou ciano, amarelo e magenta (sistema CYM).

³Enquanto é difícil encontrar uma partícula formada de quarks que dure mais de centésimos de segundo sem se desintegrar, um nêutron livre consegue resistir por enormes dez minutos!, e o próton parece nunca se desintegrar espontaneamente.

livres (os *cristais e metais*) ou compartilhando elétrons com outros átomos, não necessariamente iguais, formando novas unidades, ainda maiores: as MOLÉCULAS.

Repare que partimos de objetos fundamentais muito simples, cada um possuindo apenas quatro características (uma cor, um sabor, uma carga elétrica, uma massa). A partir delas, fomos construindo várias outras, cada uma possuindo novas características, sendo as partículas fundamentais da sua escala, de seu nível de complexidade. Assim percorremos a escala das partículas fundamentais, a dos núcleos atômicos, a dos átomos, a das moléculas. Estas últimas, agrupadas, formam as SUBSTÂNCIAS e os OBJETOS do nosso mundo visível. Neste nível, em particular, surgem características que a matéria apresenta na nossa escala, que sempre achamos estranho não encontrarmos nas escalas menores: *tangibilidade, rigidez, forma, cor* (agora no sentido mais habitual), *aspereza*. Por isso, ao se perguntar sobre qual o tamanho ou o formato de um elétron, lembre-se que essa pergunta não faz sentido: tamanho e forma não são características definíveis para elétrons.

As formas mais complexas, justamente por serem mais complexas, são muito raras – e devem ser assim. Sabemos que a entropia (a desordem) do universo, por uma questão de probabilidade (existem muito mais estados desordenados que ordenados⁴), deve sempre aumentar – esse é o nosso PRINCÍPIO DA ENTROPIA, sobre o qual já comentamos em outros lugares. Então, o surgimento de estruturas mais complexas (o que significa uma diminuição local da entropia, um aumento na ordenação das coisas) tem que acontecer às custas de um aumento global da entropia (nem que seja liberando energia, algo que sempre acontece quando passamos a um estado mais estável). Isso faz com que, necessariamente, as estruturas complexas sejam uma minoria no universo; quanto mais complexas, mais minoritárias.⁵ Portanto, se queremos conhecer o tipo de objeto que povoa o universo como um todo, devemos esperar encontrá-los em níveis bem mais simples.

Como *estabilidade* é, ela própria, uma característica que não está presente nas partículas fundamentais, devemos esperar que o universo, em grande escala, seja povoado por núcleos atômicos. Como a maior parte dele está a uma temperatura muito baixa, em torno de 3 K, é altamente provável que a maior parte desses núcleos tenha capturado elétrons, formando átomos.

Mas como esses átomos estariam dispostos? Para responder a isso, voltemos às interações fundamentais. Das quatro interações, podemos destacar a gravitacional por uma característica que só ela possui: ser *cumulativa*. Para esclarecer, tomemos um objeto carregado eletricamente, por exemplo, um quark up. Não é difícil perceber que, com uma combinação adequada (no nosso caso, juntando dois quarks down, por exemplo), é possível anular a carga elétrica do quark up, formando um objeto neutro (um nêutron). Com a interação gravitacional, contudo, não é possível proceder assim. O fato de só existir um tipo de massa faz com que, juntando dois objetos quaisquer, não importam as características dele, o objeto resultante tem uma massa maior que a massa de cada um dos dois que o compuseram. Isto é, juntar objetos, construir objetos maiores, significa sempre construir objetos mais massivos.

Essa característica da gravidade tem duas conseqüências fundamentais. A primeira é: dado que *toda partícula elementar possui massa*, então todo objeto do universo também tem que possuir massa (Repare que o mesmo não vale para carga elétrica; existem muitos corpos neutros). A segunda vem do seguinte: todo objeto com muitos átomos tem necessariamente muita massa; mas, se for formado por átomos aleatórios, a probabilidade é muito grande de que sua carga elétrica seja muito baixa ou nula. Ou seja, como observado em escalas cosmológicas, *a gravidade deve ser a força dominante em grandes escalas*. Assim, esperamos que as grandes escalas do universo

⁴Para entender porque os estados desordenados são mais prováveis, basta pensar, por exemplo, nos estados possíveis do seu quarto :P De fato, existem muito mais formas de deixá-lo bagunçado que de deixá-lo arrumado. Para os que pretendem uma utilização prática desse princípio, aqui vai uma dica de quem já tentou: as mães nunca caem nessa!

⁵De fato, uma minoria bem pequena dos átomos do universo formam moléculas; uma minoria insignificante delas forma células, e uma minoria ainda menor de células forma seres multicelulares; dentre eles, as mais diversas espécies, apenas uma delas é de seres humanos.

sejam preenchidas por grandes conjuntos de átomos onde impere a gravitação – ou seja, corpos que devem ser, preferencialmente, esféricos. É assim que concebemos as estrelas e os planetas!

Estrelas e planetas são, por sua vez, átomos de estruturas maiores. Eles se movem uns em relação aos outros não por movimentos térmicos caóticos, como os átomos, nem por movimentos direcionados, como os seres vivos, mas por movimentos simples e bem determinados pela interação gravitacional entre eles (o que restringe os movimentos a curvas cônicas). Assim, os conjuntos de estrelas, as GALÁXIAS, têm no movimento gravitacional um elemento fundamental – há inclusive uma categoria delas, as espirais, em que os movimentos gravitacionais das estrelas ocorrem juntos; essas têm forma preferencialmente plana (sendo mais preciso, em espiral plana) e têm rotação como um todo. As galáxias, por sua vez, são os constituintes dos aglomerados de galáxias, que são constituintes dos aglomerados de aglomerados de galáxias, etc. Esses aglomerados, muito provavelmente contendo tipos bem diversos de galáxias, são bem parecidos entre si. Além disso, interagindo única e exclusivamente de forma gravitacional, eles podem ser, no máximo mais densos ou mais rarefeitos, mais ou menos brilhantes, dependendo de suas estrelas. Com essa simplicidade fundamental do universo em larga escala, faz sentido esperar a simplicidade fundamental do todo: um fluido que seja, em larga escala, homogêneo e isotrópico.

6.2 Matéria Escura

A determinação da quantidade de massa no universo é um problema chave na cosmologia. Segundo soluções teóricas da Relatividade Geral, diferentes valores para a densidade de massa hoje resultam em evoluções dinâmicas muito distintas para o nosso Universo. Sem uma estimativa precisa do seu valor, é impossível prever o futuro das estruturas em larga escala.

Uma maneira simples de calcular a densidade de massa no universo consiste em estimar massa média de uma estrela, o número médio de estrelas numa galáxia e o número médio de galáxias por unidade de volume do espaço. Este cálculo pode ser aprimorado usando técnicas estatísticas mais sofisticadas visando diminuir os erros aleatórios, dado que as diferentes galáxias do céu não possuem o mesmo número de estrelas, e as estrelas não possuem a mesma massa.

No entanto, mesmo reduzindo a zero a magnitude dos erros aleatórios, a precisão do método de contagem ainda é reduzida devido aos limites observacionais dos nossos telescópios. Estes não são capazes de detectar toda a massa de uma galáxia, mas apenas uma fração capaz de emitir luz com uma intensidade suficientemente grande. A diversidade de emissão luminosa dos objetos do cosmo, indo desde as brilhantes Supernovas até os escuros Buracos Negros, gera uma fonte de erro sistemático na estimativa de massa.

Considerando a impossibilidade de se construir um telescópio perfeito, capaz de detectar qualquer intensidade de luz, uma nova abordagem se faz necessária para cálculo de massa do universo. Podemos estender para muitas galáxias a técnica que foi usada para calcular a massa da Via Láctea: traçar sua CURVA DE ROTAÇÃO.

6.2.1 Curva de Rotação da Galáxia

Como o Sol e os planetas gasosos, a Galáxia não tem um mesmo período de rotação em todas as suas partes; cada uma das fatias se move em uma órbita kepleriana, atraída por toda a massa que está no interior desse anel. Assim, medindo a velocidade de rotação desses anéis, podemos calcular a massa da Via Láctea! Tomemos o Sol como exemplo. Sabendo que sua velocidade de rotação é de aproximadamente $v = 220 \text{ km/s}$ (ou $2,2 \cdot 10^5 \text{ m/s}$), e igualando a atração gravitacional à Força Centrípeta:

$$G \frac{M_S M_G}{R^2} = M_S \frac{v^2}{R}$$

onde M_G é a massa procurada, M_S é a massa do Sol, R é a distância deste ao centro galáctico (aproximadamente 8500 pc, que dá $2,6 \cdot 10^{20}$ m) e G é a constante gravitacional universal.

Isolando M_G , chegamos em:

$$M_G = \frac{v^2 \cdot R}{G} \rightarrow \begin{cases} v = 2,2 \cdot 10^5 \text{ m/s} \\ R = 2,6 \cdot 10^{20} \text{ m} \\ G = 6,67 \cdot 10^{-11} (\text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2) \end{cases}$$

Substituindo os valores, chegamos em $M_G = 1,9 \cdot 10^{41}$ kg, que dá aproximadamente $10^{11} M_S$. Considerando o Sol como uma estrela de massa típica, a Via Láctea teria aproximadamente 100 bilhões de estrelas!

Contudo, o valor calculado é menor que a massa “real”, pois considera apenas a massa interna à órbita do Sol. Para se conhecer a massa existente além da órbita do Sol, precisa-se medir o movimento de objetos localizados a distâncias maiores do centro galáctico. Usando observações em rádio, os astrônomos mediram o movimento do gás no disco até distâncias além do limite visível da Galáxia, e criaram a citada curva de rotação da Galáxia. O que é isso? É só um gráfico que mostra a velocidade de rotação em função da distância ao centro da galáxia.

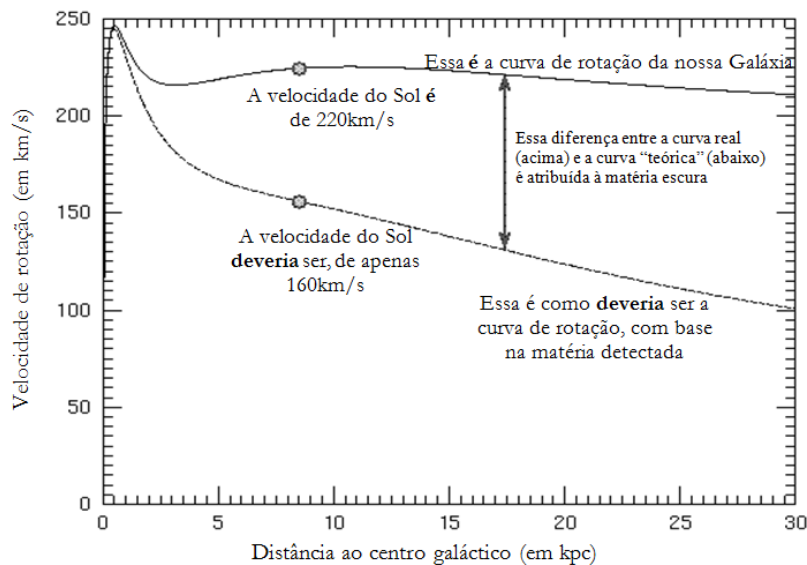


Figura 6.1: Curva de Rotação da Via Láctea.

No gráfico acima, podemos ver duas curvas: Uma delas, a superior, é a curva medida experimentalmente, ou seja, a partir da medição direta das velocidades dos corpos. A curva de baixo é a curva que seria esperada, a partir da quantidade de estrelas e gás que medimos na Galáxia. Percebemos, dessa forma, que a matéria que emite energia luminosa, e que é, por isso, detectada por nós, não é suficiente para explicar as altas velocidades orbitais dos corpos do Sistema Solar. Essa foi a primeira indicação de um problema muito maior, a tal da matéria faltante (ou MATÉRIA ESCURA, pois não emite luz). Uma parte do problema parece ter sido resolvida com a hipótese, praticamente certa, de que há um gigantesco buraco-negro no núcleo de nossa galáxia, responsável pela grande quantidade de massa desse núcleo. Ele foi detectado a partir da medida das velocidades de estrelas muito próximas ao centro, que nos permitiram a determinação da massa concentrada aí.

A curva mostra, entretanto, que a massa contida dentro do raio de 15 kpc (quase duas vezes a distância do Sol ao centro galáctico) é o dobro da massa contida dentro da órbita do Sol. Essa

distância de 15 kpc é aproximadamente o limite da estrutura espiral que pode ser observada (seja em rádio, no visível, enfim, em qualquer comprimento de onda). Logo, era de se esperar que a partir desse ponto a curva de rotação passasse a decrescer, pois se a maior parte da massa da Galáxia estivesse dentro desse raio, o movimento dos objetos mais distantes deveria ser mais lento, assim como a velocidade dos planetas diminui conforme aumenta sua distância ao Sol. Mas, na verdade, acontece o contrário: a curva de rotação aumenta, indicando que a quantidade de massa continua a crescer! A conclusão é que nossa Galáxia contém matéria não-visível que se estende muito além da matéria visível – e que constitui, no mínimo, dois terços da massa total da Galáxia!

A técnica é bastante promissora também se aplicada a outras galáxias. Vejamos um exemplo para outra galáxia espiral:

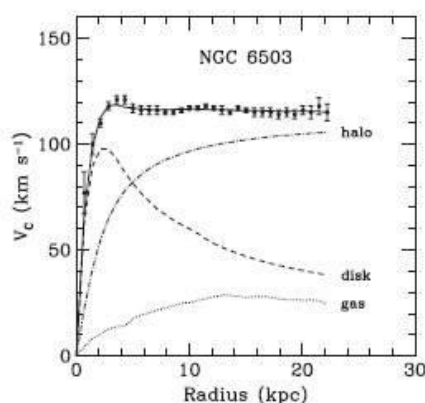


Figura 6.2: Curva de Rotação de NGC 6503.

Na figura acima, apresentamos um gráfico da velocidade de rotação de astros luminosos *versus* a distância deles ao centro de massa galáctico. A curva cheia, sobreposta aos pontos observados, representa o melhor ajuste aos dados da NGC 6503. As duas curvas mais baixas representam as previsões teóricas devidas, de baixo para cima, à quantidade de gás e de matéria no disco galáctico, estimados por observação direta (incluindo as possíveis discrepâncias geradas por remanescentes frios de estrelas e poeira fria). A terceira curva, que indica a matéria contida no “halo” galáctico, é na verdade a subtração entre a curva dos dados observacionais de uma das previsões teóricas. Compare as quantidades! Para observações em larga escala (de aglomerados de galáxias e aglomerados de aglomerados de galáxias), o problema é maior ainda: a estimativa do excesso de massa (a matéria escura) chega a ser dez vezes maior que toda a massa comum (prótons, nêutrons e elétrons) prevista pela física de partículas e pela cosmologia!

A princípio, a hipótese mais simples a ser considerada para explicar este estranho fenômeno é a existência de grandes erros sistemáticos na construção das curvas de rotação. Observações astronômicas são complicadas, pois, ao contrário do que ocorre nas experiências em laboratório, não temos controle sobre as condições físicas dos astros que emitem a luz que observamos nem sobre as condições do gás interestelar.

É uma crítica conservadora do ponto de vista dos teóricos, mas de fato precisamos ser cautelosos ao reprovar teorias inteiras, mesmo que o problema seja grande como o que parece ser. Dentre outras coisas, devemos procurar observar o mesmo fenômeno através de dados observacionais os mais diversos possíveis, como as lentes gravitacionais e a R.C.F. Por enquanto elas confirmam a discrepância, jogando na nossa cara que não conhecemos 90% da matéria do universo. Apesar das várias tentativas, nem o modelo padrão nem a teoria das cordas nem nenhuma das con-

correntes conseguiu apresentar ainda uma explicação satisfatória para o fenômeno. O problema continua completamente em aberto, aguardando sugestões.

6.2.2 Lentes Gravitacionais

Uma das previsões mais surpreendentes da Teoria da Relatividade Geral é o fenômeno de lentes gravitacionais. Segundo a teoria de Albert Einstein, um raio de luz, ao passar perto de um corpo massivo sofre um desvio contínuo na sua trajetória: em vez de atravessar em uma linha reta, o raio percorre uma trajetória semelhante à trajetória hiperbólica de um planeta⁶.

Este desvio nos permite observar quasares a distâncias maiores que as impostas pelas limitações dos nossos telescópios, ampliando nossa região de observação, pois a luz de tais objetos, ao passar por uma galáxia massiva mais próxima, sofre um efeito de convergência – efeito este semelhante ao obtido quando raios de luz atravessam por uma lente convergente. Para nos beneficiarmos desse efeito, recebendo luz de quasares longínquos e antes inobserváveis, é necessário apenas que nos localizemos perto do foco desta lente natural!

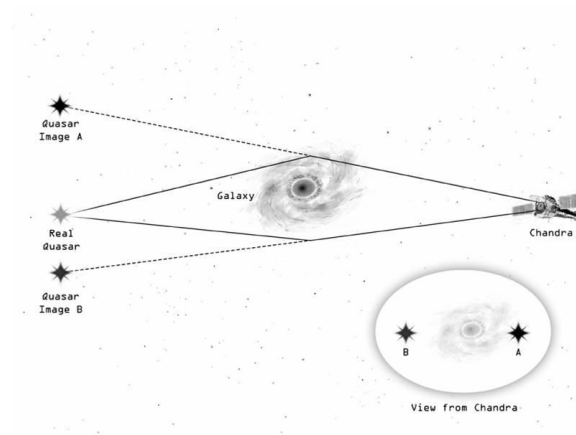


Figura 6.3: Esquema simples mostrando o funcionamento da lente gravitacional.



Figura 6.4: Foto do telescópio espacial Hubble mostrando uma lente gravitacional.

⁶A analogia com o movimento planetário tem suas limitações. Ao contrário do que acontece com planetas, a relatividade geral não prevê um desvio forte o suficiente para que o feixe de luz entre em uma órbita fechada.

A foto 6.4, tirada pelo telescópio espacial Hubble, nos fornece uma evidência visual do efeito de lente gravitacional. Uma análise das distorções produzidas é capaz de estimar a massa da galáxia ou do aglomerado de galáxias responsável pelo efeito de lente. Isto nos possibilita obter uma determinação independente da quantidade de matéria escura existente no universo. A concordância com o valor previsto na análise das curvas de rotação de galáxias é um fato notável e uma indicação da ausência de erros sistemáticos significativos em ambas às observações.

6.2.3 Aglomerado da Bala

O aglomerado da Bala é formado por dois aglomerados de galáxias, sendo um deles muito menor que o outro, que colidiram há aproximadamente um bilhão de anos. Colisões entre galáxias e aglomerados de galáxias são relativamente frequentes no universo – a nossa própria galáxia, como vimos, encontra-se em rota de colisão com nossa vizinha Andrômeda. Entretanto, essas colisões aparecem para nós nos mais variados ângulos com a nossa linha de visada; observar uma colisão ocorrida num plano perpendicular à linha de visada é um fenômeno raro – e precioso para análise dinâmica deste tipo de evento. O aglomerado da bala é um exemplo desse fenômeno, o que o torna especialmente interessante para o estudo do problema da matéria escura.

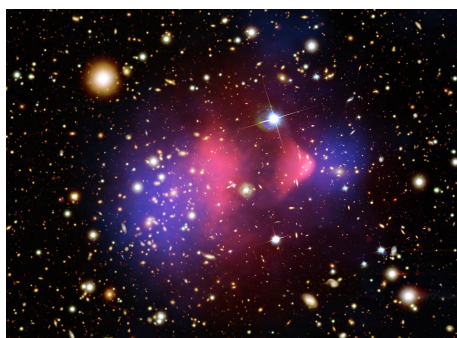


Figura 6.5: O Aglomerado da Bala.

A foto 6.5 consiste de uma superposição de duas fotografias do aglomerado da bala, uma tirada na faixa ótica e outra em raios X. A emissão de raios X é proporcional na foto à intensidade da cor vermelha, indicando a localização do gás intergaláctico, principal emissor desse tipo de radiação. A intensidade da imagem roxa é proporcional à quantidade de massa no aglomerado, inferida via lentes gravitacionais. As galáxias se encontram no interior dessa imagem porque a interação entre galáxias é menos intensa que a colisão do gás intergaláctico quando dois aglomerados se chocam. É como se o gás ficasse grudado no local do choque enquanto as galáxias o atravessam. Entretanto, é improvável que estas galáxias sejam a fonte de toda a massa inferida pelo método de lentes, pois em aglomerados a maioria da matéria luminosa se encontra no gás e não nas estrelas.

A existência de uma onda de choque, na forma de um cone de gás, localizado no aglomerado menor (à direita na imagem acima) nos permite concluir que este atravessou o aglomerado maior de maneira análoga a uma bala. Para exemplificar melhor esta analogia, a figura abaixo mostra uma reconstituição computacional aproximada deste evento.

As diferenças na intensidade de cor vermelha e azul na Figura 6.5 são um fenômeno curioso. Ou se trata de um aglomerado atípico, com pouquíssimo gás, ou a não-coincidência entre o centro de massa do aglomerado e o centro de massa do gás é uma indicação da presença de enormes quantidades de matéria escura não só no halo das galáxias, mas *entre* elas!

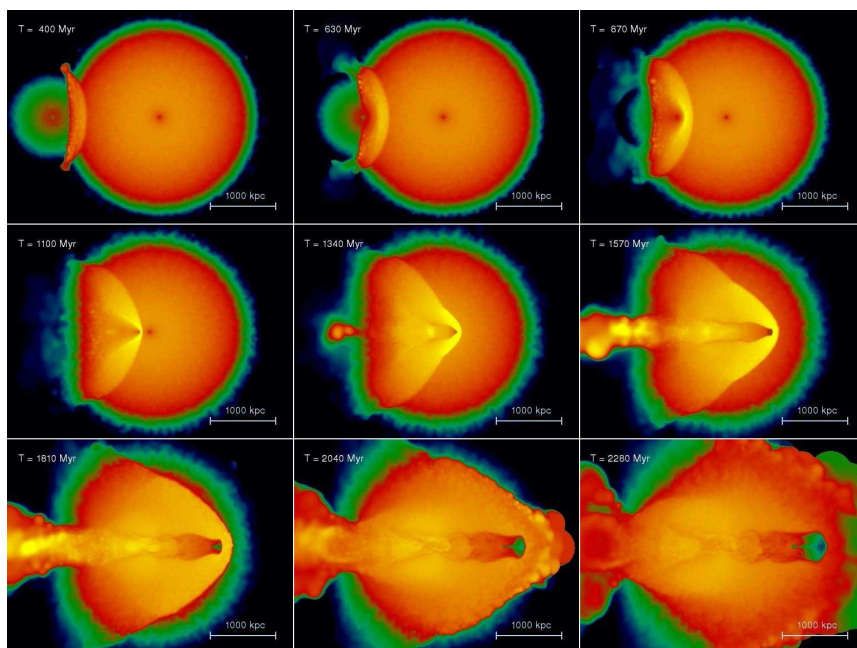


Figura 6.6: Simulação simplificada da colisão ocorrida no aglomerado da bala. A intensidade de vermelho está relacionada à temperatura da matéria. Referência: astro-ph/0703232

6.3 Energia Escura

Para compreendermos a interpretação dos dados oriundos de observações de Supernovas tipo Ia⁷, é necessário discutir com mais detalhes alguns conceitos ligados à dinâmica do nosso universo.

Como vimos, o modelo padrão prevê que diferentes valores para a densidade de energia total do universo resultam em evoluções muito distintas para o nosso cosmos. Por outro lado, a Lei de Hubble leva à conclusão de que o universo está se expandindo. Por ora, precisamos apenas saber da coisa mais ou menos óbvia de que a intensidade da expansão é proporcional ao valor da função de Hubble, $H(t)$.

O valor de $H(t)$, hoje, é igual a aproximadamente $(75 \text{ km/s})/\text{Mpc}$. Esse valor, não sendo constante no tempo, suscita uma pergunta crucial: Será que a função de Hubble irá assumir valores negativos em algum momento do futuro, induzindo um efeito de aproximação entre todas as galáxias do universo? Segundo o modelo padrão, a resposta depende apenas da densidade de energia total do universo – que, conforme dito, será discutida com mais detalhes mais tarde. Nesse momento vamos nos concentrar num resultado do modelo padrão, enunciado a seguir:

Se a matéria, ao longo de toda a história do universo, possui em larga escala densidade de energia e pressão positivas então, independentemente de quão massivo seja o nosso cosmo, $H(t)$ é uma função estritamente decrescente no tempo.

Nesse contexto, iremos analisar duas possibilidades de futuro para a dinâmica do nosso universo na parte final dessa lista. Essas possibilidades dependem fundamentalmente do valor limite de $H(t)$ ⁸. No primeiro caso a ser analisado, o valor limite da constante de Hubble é igual a zero, indicando que iremos observar indefinidamente um afastamento das galáxias distantes segundo lei de Hubble. No segundo caso, o valor limite é “ $-\infty$ ”, significando que o futuro as galáxias

⁷Para informações sobre essas supernovas, veja o Volume IV, capítulo 6

⁸valor limite de $H(t)$ é o valor que constante de Hubble tende a se aproximar no futuro.

distantes começarão a se aproximar segundo uma lei de Hubble onde módulo de $H(t)$ cresce com o tempo.

A surpresa dos astrônomos ao observar supernovas tipo Ia consiste no fato de elas indicarem que o melhor ajuste às observações acontece quando se assume uma função de Hubble que, a partir de um instante no futuro, irá parar de decrescer, tornando-se constante no tempo e diferente de zero, em contradição com a previsão do modelo padrão. Essa é uma observação de alto impacto, pois uma das consequências desse ajuste é que o universo atualmente está em expansão acelerada!

- 3- O brilho de uma supernova Ia aparece maior ou menor em um universo em expansão acelerada do que em um se desacelerando? Por quê?

Abaixo uma figura com os dados coletados pelo *Supernova Cosmology Project*, um dos dois grupos de cientistas que no final do século XX (em 1998) observaram o fenômeno de expansão acelerada. A primeira e a segunda linhas, de cima para baixo, são modelos de universo com expansão acelerada. Elas se ajustam aos dados observacionais de maneira mais precisa que os modelos sem aceleração, apresentados na terceira e quarta linhas, de cima para baixo.

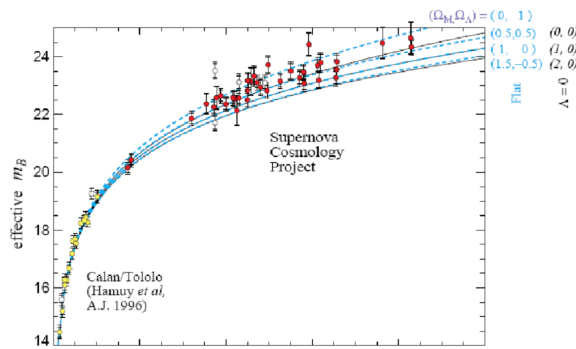


Figura 6.7: Dados coletados do *Supernova Cosmology Project* e tentativas de plotagem desses dados.

Devido ao alto impacto das observações de supernova, devemos agir prudentemente. Conforme dito na seção de curvas de rotação de galáxias é tentador, mas enganoso, arruinar numa única observação uma teoria tão sólida como o modelo padrão. Devemos buscar outros indícios. Eles, de fato, existem, como na R.C.F. O problema da expansão acelerada, mantendo-se o modelo padrão, leva à imediata pergunta: “o que está acelerando a expansão?”, e cria um problema quase tão estranho quanto o da matéria escura: o problema da ENERGIA ESCURA.

A segunda equação de Friedmann nos informa como a densidade de energia do universo e a densidade de pressão modificam a taxa de variação do parâmetro de Hubble no tempo. Com base nessa equação, podemos entender as conclusões obtidas a partir das observações de supernovas tipo Ia. Elas indicam que no futuro

$$\frac{dH(t)}{dt} = 0 \Rightarrow p(t) = -c^2 \rho(t)$$

Essa é uma relação entre a densidade de energia e a densidade de pressão cujas consequências são estranhas. No nosso dia-a-dia, estamos acostumados a associar pressão à dificuldade de se comprimir um gás. É a pressão exercida pelo ar dentro de um pneu que o impede de ser esmagado pelo peso de um carro. É a pressão interna exercida pelos gases contidos no nosso

corpo que impede a atmosfera de nos esmagar com o peso das muitas toneladas de ar que pairam sobre nossas cabeças. É a pressão exercida por milhares de litros de água que explica o porquê não podermos mergulhar muito fundo no mar sem passar muitos dias nas conhecidas cabines de pressurização.

Fisicamente, essa associação entre pressão e dificuldade de compressão é feita através do sinal da imagem da função $p(t)$. Para explicar toda gama de fenômenos do nosso dia-a-dia, é necessário exigirmos que este sinal seja positivo. No caso relativístico, no entanto, as pressões, quando possuem valores muito altos, contribuem também para o aumento da interação gravitacional e isto implica que a associação entre pressão e colapso de um sistema depende fundamentalmente do balanço entre a dificuldade de compressão exercida por pressões positivas e o aumento da intensidade do campo gerado por efeitos relativísticos. Este balanço pesa para o lado da gravitação no caso do universo em larga escala, obrigando-nos a, para explicar o fenômeno de expansão acelerada, lançar mão de um gás dominante contendo pressões negativas (!). A este estranho ente do universo que gera pressão negativa e acelera a expansão do universo, denominamos ENERGIA ESCURA.

Mesmo possuindo propriedades paradoxais quando comparados aos gases do nosso dia-a-dia, as observações de larga escala nos obrigam a iniciar uma busca por possíveis candidatos. Apesar de possuímos alguns palpites, este é ainda um problema totalmente em aberto na cosmologia, fonte de alguns dos debates científicos mais quentes da atualidade. Mesmo não sabendo a origem física da relação $p(t) = -c^2\rho(t)$, nós podemos estudar seus efeitos gravitacionais. Paradoxalmente, ao resolver as equações da relatividade geral conclui-se que o universo sente a presença desta “Energia Escura” através da existência de uma Constante Cosmológica (desde que a equação relacionando a densidade de pressão e energia seja a citada no início deste parágrafo). O “maior erro da vida de Einstein” volta à cena na cosmologia moderna!

Originalmente, a Constante Cosmológica foi inventada por Albert Einstein para modificar suas equações da Relatividade Geral, visando criar um modelo cosmológico estático, de acordo com as convicções filosóficas do próprio. Algumas soluções simples das equações da Relatividade Geral levavam a um universo que só era estável se estivesse se expandindo; considerando isso uma premissa absurda sem nenhuma sustentação científica, Einstein teve de introduzir nas equações uma constante para contrabalançar esse efeito, que ficou conhecida como CONSTANTE COSMOLÓGICA. Mais tarde, entretanto, o jogo virou: veio a Lei de Hubble em 1929, e logo depois a interpretação da expansão do universo. Arrependido e resignado com o fato de novas observações apoiarem justamente a hipótese que ele tentou evitar, Einstein declarou que aquela constante teria sido “o maior erro de sua vida”.

Se futuras observações confirmarem a existência de uma energia escura que obedece à equação $p(t) = -c^2\rho(t)$ (onde $p(t)$ e $\rho(t)$ são a densidade de energia e a densidade de pressão do universo, respectivamente), então surge uma questão interessante a respeito da evolução do cosmo. Os primeiros cálculos sobre o conteúdo energético do universo consideravam que a radiação eletromagnética (luz!) e a matéria usual, formada por prótons e nêutrons, forneciam as maiores contribuições no cálculo da função $\rho(t)$. Existiam outros elementos, como os neutrinos, mas eles não eram levados em conta⁹. Mas agora uma situação muito diferente aparece.

Mesmo não conhecendo a natureza dos dois novos ingredientes apresentados neste capítulo – a matéria escura e a energia escura –, podemos estimar a contribuição energética delas a partir das curvas de rotação de galáxias e das medidas de brilho das supernovas tipo IA. Ao refazer os cálculos da função $\rho(t)$, os cosmólogos se depararam com um fato assustador: a matéria e a energia escura contribuem com 90% da quantidade de energia disponível no espaço, o que significa que conhecemos a natureza de apenas 10% da energia de todo universo!!

Nosso quadro atual é então descrito da seguinte maneira: o universo é composto majoritari-

⁹Por muito tempo acreditou-se que a massa de repouso do neutrino (isto é, a massa da partícula parada, sem energia cinética) era nula.

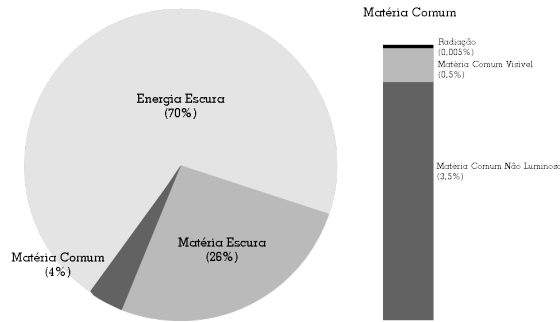


Figura 6.8: Pizza da distribuição de matéria no universo para cada classe.

amente por radiação eletromagnética (luz), matéria bariônica¹⁰, matéria escura e energia escura. Cada componente pode ser modelada em larga escala de maneira análoga a um gás, possuindo uma densidade de energia ($\rho(t)$) e pressão ($p(t)$), além de uma equação que relaciona $\rho(t)$ e $p(t)$. Cada um desses “gases” possui um comportamento distinto e eles contribuem de forma desigual no cálculo da densidade total de energia e pressão.

$$\rho_{univ.}(t) = \rho_{rad.}(t) + \rho_{mat.bar.}(t) + \rho_{mat.esc.}(t) + \rho_{en.esc.}(t)$$

Falta então entender como cada uma dessas componentes se comporta ao longo da história do nosso universo. Parece abstrato, mas na prática é bem simples: o número de prótons, nêutrons, elétrons e fótons se conservam ao longo do tempo. Então, com o aumento do tamanho do universo, a densidade desses elementos diminui. Todo o problema se concentra em entender como o fator de escala $a(t)$ (lembre-se da discussão sobre expansão!) modifica as densidades de cada ingrediente.

Neste momento, estamos prontos para enunciar a questão colocada pelas observações de supernovas IA: por que o parâmetro de Hubble no futuro irá parar de decrescer? Para responder essa questão, três idéias têm que estar claras na nossa mente:

- As equações de Friedmann nos informam que, para determinar o comportamento do parâmetro de Hubble $H(t)$, precisamos conhecer o quão energéticos são os ingredientes que compõem o universo – isto é, as densidades de energia $\rho(t)$ – e o quão grande é a pressão exercida por cada ingrediente – as densidades de pressão $p(t)$.
- Como acontece com os gases do nosso dia a dia, a pressão exercida por cada ingrediente que compõe o universo depende do quão energético ele é. Por exemplo, para a energia escura:

$$p(t) = -c^2 \rho(t)$$

- Acreditamos que todos os ingredientes que compõem o universo, à exceção da energia escura, obedecem à lei de conservação de energia. Por isso, em três dos casos, as densidades de energias dependem apenas do volume do universo: se este aumenta de tamanho, então a densidade diminui. Ainda não ensinamos com se calcula o volume do universo; ele é aproximadamente igual ao fator de escala ao cubo:

$$V_{universo} \approx a(t)^3$$

¹⁰Toda matéria constituída por prótons e por nêutrons, que são *bárions*. A Matéria Bariônica inclui, além destes, todos os elétrons e seus semelhantes, os léptons. Para mais detalhes, ver seção ??.

Para simplificar nossa análise, vamos relacionar as densidades de energia diretamente com o fator de escala $a(t)$. Cálculos simples mas sem relevância para este capítulo demonstram que:

$$\text{Radiação Eletromagnética: } \rho(t) \propto a(t)^{-4}$$

$$\text{Matéria Bariônica: } \rho(t) \propto a(t)^{-3}$$

$$\text{Matéria Escura: } \rho(t) \propto a(t)^{-3}$$

$$\text{Energia Escura: } \rho(t) = \text{Constante}$$

Usando a informação da tabela acima, podemos responder nossa pergunta referente ao parâmetro de Hubble e encerrar a seção de cosmologia teórica. Abaixo há um gráfico para ajudar na visualização. A partir dele concluímos que no início do universo a radiação era o ingrediente mais energético e a evolução do parâmetro de Hubble dependia basicamente do comportamento dela. Conforme o tempo passa, a radiação perde importância em apenas algumas centenas de milhares de anos a partir do Big Bang. Atualmente ela contribui com menos de 0,01% da densidade total de energia.

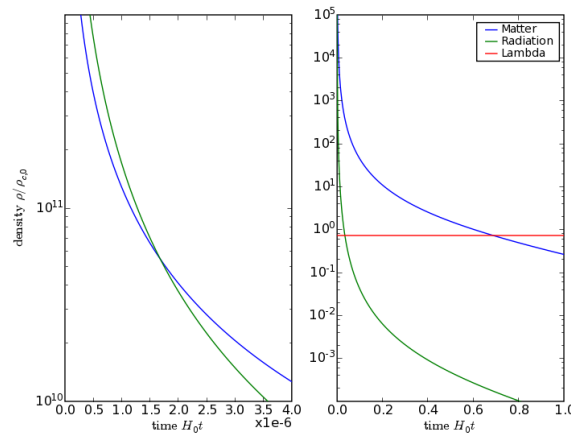


Figura 6.9: Evolução das densidades de matéria, radiação e energia escura.

Apesar de insignificantes no início do universo, a importância da matéria bariônica e da matéria escura aumenta com a queda da radiação, dominando a evolução do parâmetro de Hubble até um passado recente (uns cinco bilhões de anos atrás). A partir daí a energia escura passa a contribuir majoritariamente. Hoje 75% de toda a densidade de energia do universo é devido à densidade de energia da energia escura.

Analisando o futuro nos deparamos com um cenário sombrio. Conforme o fator de escala cresce, as contribuições da radiação, da matéria bariônica e da matéria escura diminuem cada vez mais. A estranhíssima propriedade da energia escura de manter, num universo em expansão, sua densidade constante no tempo nos leva inexoravelmente a um futuro assustador, dominado por algo cuja natureza é totalmente desconhecida!

Quando esse futuro sombrio se concretizar, a densidade de energia de todo universo será aproximadamente igual à densidade de energia da energia escura. Todo o universo obedecerá à equação:

$$p(t) = -c^2 \rho(t)$$

Num universo com densidade de radiação e matéria praticamente nulas, o parâmetro de Hubble não muda com o tempo (devido a segunda equação de Friedmann). Nosso futuro está fadado a obedecer a relação:

$$\frac{dH(t)}{dt} = 0$$

Mas o que isso significa? Este resultado implica primeiramente que o fator de escala irá se expandir eternamente de forma exponencial, isto é:

$$H(t) = \tilde{H} = \text{constante} \Rightarrow a(t) = e^{\tilde{H}t}$$

Neste momento já estamos em condições de refinar um pouco mais nossa discussão a respeito da necessidade de existência da energia escura. Nós afirmamos na parte observacional do capítulo, e reafirmamos no parágrafo anterior, que este problema estava ligado ao comportamento da função de Hubble e seu limite constante. Esta afirmação é apenas parcialmente verdadeira, pois o verdadeiro vilão não é tanto a constante de Hubble, mas a aceleração do fator de escala – apesar de nosso postulado a respeito do comportamento de $H(t)$ estar correto. Ele é apenas incompleto, pois existem casos derivados das equações de Friedmann em que $H(t)$ é estritamente decrescente e, mesmo assim, a presença da energia escura se faz necessária.

O postulado mais geral a respeito desse problema defende que, se a matéria, ao longo de toda a história do universo, possui em larga escala densidade de energia e pressão positivas então, independentemente de quão massivo seja o nosso cosmo, a aceleração do fator de escala $a(t)$ é uma função cujos valores são sempre não positivos. A existência da energia escura se faz necessária quando o universo possui aceleração do fator de escala positiva e é justamente esse sinal positivo que as observações de supernovas indicam. Leitores com conhecimentos mais avançados de matemática (que dominem cálculo diferencial) podem demonstrar, a partir da definição de $H(t)$ que:

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \Rightarrow \frac{dH(t)}{dt} = \frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} - H^2(t) < 0$$

Donde o comportamento de $H(t)$ (estritamente decrescente) sai como um corolário. A partir deste resultado, dois futuros são possíveis no modelo padrão. No primeiro futuro, o valor da função de Hubble tende a menos infinito, indicando que no futuro o universo começará a se contrair e a velocidade desta contração crescerá com o tempo. No segundo cenário, a função de Hubble tende a um valor constante sem, no entanto, parar de decrescer. Nesse caso dizemos que a função de Hubble tem um valor assintótico constante. Para os alunos que nunca estudaram o conceito de valor assintótico, desenhamos a seguir um exemplo matemático de uma função com valor assintótico zero, mas sempre decrescente.

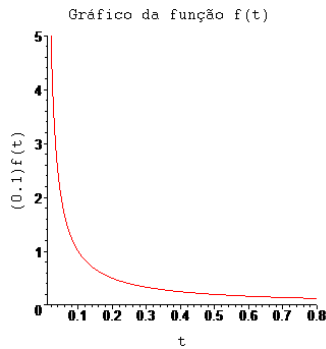
$$f(t) : \begin{array}{ll} \mathbb{R}^+ & \rightarrow \mathbb{R}^+ \\ f(t) & = t^{-1} \end{array}$$

Conforme o leitor pode perceber, a formulação geral envolve propriedades do fator de escala, que é uma função cuja definição é muito mais abstrata que a função de Hubble, o que justifica a intenção dos autores de trabalhar o máximo possível com a formulação restrita do problema. Também é possível mostrar, através da segunda equação de Friedmann, que equações de estado do tipo

$$p(t) = -wc^2\rho(t)$$

com $-1 < w < -1/3$ geram acelerações positivas e funções de Hubble estritamente decrescentes.

O problema teórico resultante das observações de supernovas é que elas demonstram que o universo está em expansão acelerada. É um bom exercício reparar que uma expansão acelerada não implica necessariamente numa função de Hubble constante ou crescente no tempo. No entanto, o modelo que melhor se ajusta aos dados observacionais preve que num futuro distante,

Figura 6.10: Gráfico da função $f(t)$.

mas não infinitamente distante, a função de Hubble se tomará constante no tempo, o que significa

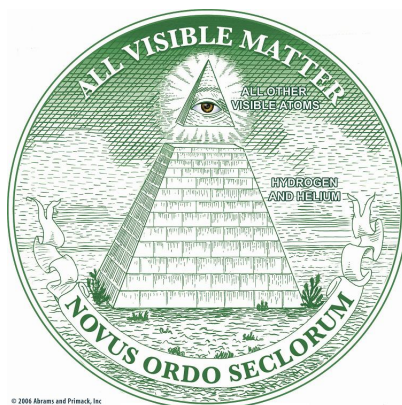
$$\frac{dH(t)}{dt} = 0.$$

6.4 Uma nova imagem

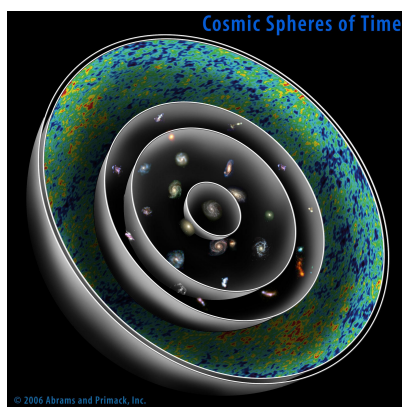
Um problema particular da cosmologia científica é que, em grande medida, ela se afastou do papel mais tradicional da cosmologia que é fornecer uma visão compreensível do universo, para as pessoas em geral. No máximo, fornece uma visão esmagadora da infinitude espacial e temporal do universo diante da nossa desprezível existência. Mas há tentativas em contrário por parte de alguns cosmólogos, incluindo até mesmo as novas idéias de matéria e energia escura.

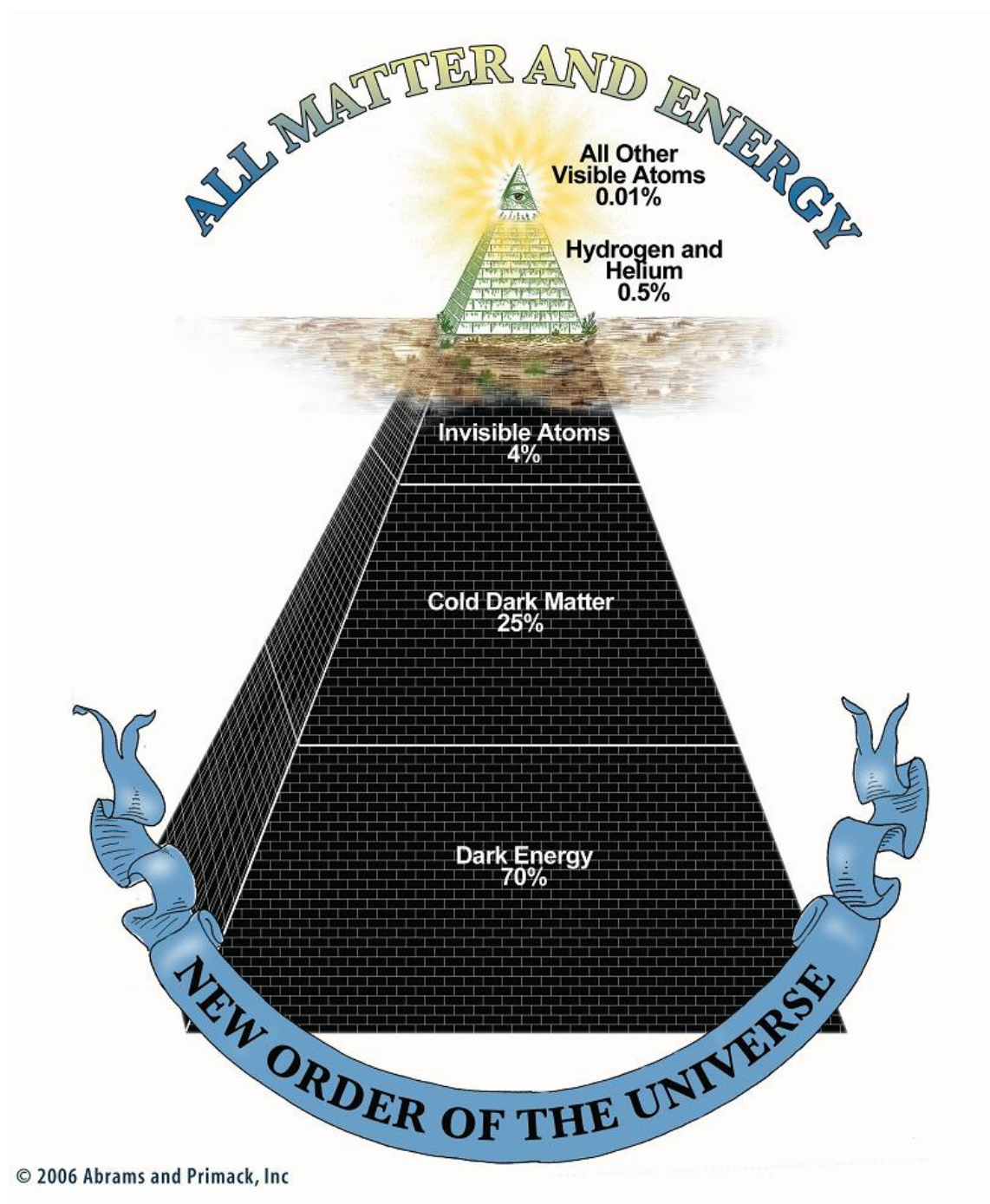
Nesse sentido, há um livro traduzido recentemente no Brasil, do cosmólogo americano Joel Primack, intitulado *The View from the Center of the Universe* (Panorama Visto do Centro do Universo). Ele procura recuperar algumas imagens simbólicas comuns na nossa tradição, associando-as às idéias cosmológicas contemporâneas e, com isso, procurando dar algum sentido “espiritual” (amplamente falando) a elas. Um dos símbolos é o da pirâmide, como as que aparecem nas notas de dólar. Se pensarmos que grande parte do universo é composto de estruturas muito mais simples que nós, então podemos nos ver como estando no topo de uma pirâmide, de estruturas muito raras e muito complexas.

Ele faz então a pirâmide da matéria visível e a pirâmide da densidade cósmica :



Outra imagem que ele usa tem a ver com nos enxergarmos ou não no centro do universo. Existe de fato uma centralidade na nossa posição, que não pode ser proclamada sem alguma circularidade: estamos no centro do universo visível. À primeira vista parece idiota, e talvez seja mesmo; mas não deixa de ser interessante notar que, do nosso ponto de vista, estamos cercados por cascas esféricas de idades diferentes, cada vez mais voltadas ao passado. O limite, a casca esférica suprema do universo visível, é aquela da Radiação Cósmica de Fundo .





Capítulo 7

Uma Biografia do Unvierso

7.1 Biografia em Prosa

Agora que já vimos as equações de Friedman e alguma coisa sobre partículas elementares e o Modelo Padrão, vejamos como eles tentam explicar e prever a dinâmica do universo. Aqui é importante enfatizar que o modelo-padrão, bem como todo modelo, não é perfeito. Este não é capaz de explicar o conjunto de observações que indicam um universo acelerado regido no futuro por uma Energia Escura. Devido ao intenso debate científico vigente e a lançamentos programados de novos satélites, devemos ser especialmente prudentes ao ler este capítulo. Há possibilidade de mudanças radicais, nos próximos anos, na forma como contamos a nossa própria história cósmica.

7.1.1 Passado

Pensando segundo nossa física atual, não podemos falar, *stricto sensu*¹, de um instante inicial. É um resultado geral do modelo padrão que, em um universo dominado apenas pela matéria bariônica, matéria escura e radiação, o fator de escala é nulo no instante inicial. Tal evento é denominado *singularidade*. Apenas com Relatividade Geral, portanto, falar em Big Bang é falar em singularidade inicial. Mas isto não faz muito sentido, pois grandezas físicas relevantes como a densidade de energia do universo “explodem”, isto é, tomam valores infinitos.

Mesmo dentre os cientistas que aceitam o Modelo Padrão, ainda há divergências sobre o que teria acontecido nos instantes iniciais do universo. O físico francês Levy Leblond, por exemplo, aponta que de acordo com a teoria da relatividade, corpos com massa não podem chegar a velocidades superiores à da luz. Quando se fornece energia para um corpo, aumentando sua velocidade, sua massa inercial também aumenta, de forma que quanto maior a velocidade atingida, mais energia é necessária para aumentar esta velocidade. Assim, a velocidade da luz pode ser vista como uma grandeza “infinita”, por que não pode ser atingida.

Porque utilizamos instrumentos de medida e unidades contingentes, nós encontramos um valor finito. Mas, na realidade, é um infinito. O mesmo vale para a idade do Universo: pode-se afirmar que o Universo há vinte bilhões de anos é uma medida convencional e dizer que sua idade é infinita é uma significação profunda, conceitual da teoria. [...] Precisa-se sair da falsa ideia de que o Big Bang seria um instante. O Big Bang é uma fase, a fase mais explosiva da vida do Universo, que começou em um tempo infinito e, deste ponto de vista, de que o Universo sempre existiu.²

¹*stricto sensu* é uma expressão latina que quer dizer “em sentido estrito”. É usada em oposição a *lato sensu*, “em sentido amplo”.

²Levy- Leblond apud Neves 2000, p. 226

Tampouco podemos nós, com a física atual, fazer previsões até o instante em que a temperatura do Universo é da ordem dos 10^{32} K. Essa impossibilidade se deve à falta de qualquer teoria que modele os efeitos gravitacionais na escala de distâncias dominada pela mecânica quântica.

Entretanto, a partir desse instante (que chamaremos de $t = 0$), já é possível usar o modelo padrão das partículas elementares. Ele prevê, para os primeiros instantes que podem ser previstos, um mar mais ou menos homogêneo de quarks, e duas forças diferenciadas: gravitacional e eletro nuclear (eletromagnética + nuclear fraca + nuclear forte).

Chegando a $t = 10^{-30}$ segundos, quando a temperatura tiver caído para 10^{27} K, a força nuclear forte se diferencia das demais. Então teria início um declínio assimétrico de partículas que só existem em temperaturas realmente elevadas. Esta assimetria dá origem à preponderância da matéria sobre a antimatéria, ao gerar mais quarks que anti-quarks.

Em $t = 10^{-11}$ segundos, a temperatura do meio passa a 10^{13} K, baixa o suficiente para que o eletromagnetismo e a força nuclear fraca passem a atuar como forças distintas.

Em um milionésimo de segundo ($t = 10^{-3}$ s), os quarks se agregam para formar os nêutrons e prótons de nossos átomos atuais. Os anti-quarks formam antiprótons e antinêutrons. Matéria e antimatéria se aniquilam reciprocamente, restando um pequeno excesso de matéria. Esta aniquilação produz radiação na forma de fótons. A proporção entre matéria e radiação agora é de 1 para 1 bilhão. Este resultado da teoria possui boa concordância com as razões observadas.

Entre 10 e 500 segundos acontece a chamada SÍNTESE PRIMORDIAL de alguns elementos: cerca de 25% dos núcleos existentes de Hidrogênio (isto é, prótons livres) são convertidos em Hélio. Um milésimo por cento (0,001%) é convertido em Deutério, e menos de um milionésimo por cento ($> 0,000001\%$) é convertido em Lítio.

O grande passo seguinte desta história se dá muito depois. Somente quando o Universo já possui a respeitável idade de 300.000 anos a temperatura é baixa o suficiente para que os átomos de fato se formem. Isto porque, a elevadas temperaturas, os átomos não mantêm elétrons. Num Universo muito quente, os núcleos atômicos não conseguiam segurar os elétrons de forma a construírem átomos eletricamente neutros. Nesta idade, entretanto, tal formação se torna possível – então dizemos que a matéria não mais é afetada pela radiação. É neste momento que o universo se torna transparente e a radiação começa a vagar livremente por aí – até que a detectamos e batizamos de Radiação Cósmica de Fundo. O Universo então segue uma evolução mais familiar a nossa intuição, continuando sua expansão, formando os objetos e as estruturas que hoje conhecemos: estrelas, galáxias, aglomerados de galáxias.

É importante lembrar que ainda não existiam elementos químicos mais pesados que o lítio, e assim, as primeiras populações estelares foram feitas unicamente de hidrogênio e hélio, sem nenhum átomo de carbono, oxigênio, metais, urânio... elementos relativamente abundantes no nosso Sol. Só após muitas gerações de estrelas e de explosões de supernova é que o meio interestelar foi se enriquecendo com os diversos elementos. Deste modo, há 5 bilhões de anos, a nuvem que formou o Sistema Solar já possuía uma quantidade razoável de elementos mais pesados.

Enquanto o gás se condensava em uma esfera que seria o Sol, as moléculas mais pesadas, sais de silício e de carbono, concentraram-se mais próximos ao Sol; já as mais leves, contendo nitrogênio e oxigênio, principalmente, ocuparam uma periferia mais distante. Há 4,6 bilhões de anos, o terceiro planeta rochoso do Sistema se formava. Em 3,5 bilhões, surgiam as primeiras formas de vida, baseadas em longas cadeias de carbono. Os primeiros espécimes dos dois grandes reinos de seres vivos, *Animalia* e *Plantae*, surgiram há 570 milhões de anos; os mamíferos, depois de 140 milhões.

Em 1,5 milhão, surgem os primeiros *Homo Erectus*. Os primeiros assentamentos agrícolas surgem há 10 000 anos; a escrita, 3 ou 4000. As primeiras observações de cometas pelos chineses têm 2 600 anos; o modelo geocêntrico de Ptolomeu, 1 800; a mecânica newtoniana, apenas 320 anos. A observação dos redshifts por Hubble faz pouco menos de 80 anos.

7.1.2 Presente

Dizem que a vida é curta, mas isso não é verdade. A vida é longa pra quem consegue viver pequenas felicidades. E, essa tal felicidade anda por aí disfarçada, como um criança traquina, brincando de esconde-esconde.

Infelizmente, às vezes não percebemos isso. E passamos nossa existência colecionando nãoos. A viagem que não fizemos; O presente que não demos; A festa a qual não fomos; O ensinamento que não aprendemos; A oportunidade que não aproveitamos.

A vida é mais emocionante quando se é ator e não espectador. Quando se é piloto e não passageiro; pássaro e não paisagem. E como ela é feita de instantes, não pode e não deve ser medida em anos ou meses, mas em minutos e segundos.

O que você vai fazer com cada minuto de 2010?

VISA: Porque a vida é agora³.

7.1.3 Futuro: Universo Fechado

Neste caso, o universo se expandiria até um certo ponto, e logo começaria a se contrair, até retornar ao seu estado inicial. De qualquer forma, para um observador começar a perceber a contração, demoraria um bom tempo. Como ele observa sempre o passado do universo, notaria primeiro o *blue-shift* das galáxias mais próximas e, depois de algum tempo, das mais distantes.

Uma outra característica da contração seria a elevação da temperatura da radiação cósmica de fundo. No começo, seria uma elevação de apenas uns poucos graus; com o passar do tempo, contudo, a RCF ficaria mais e mais quente – impossibilitando, num futuro distante, a existência de qualquer forma de vida não-torrada.

Avançando ainda mais no tempo, a contração consumirá o universo de maneira cada vez mais veloz, aquecendo-o a taxas cada vez maiores. A poucos milhares de anos do fim, a temperatura média será tão alta que ionizará todos os átomos existentes, tornando nosso universo novamente opaco, como nos primórdios. Nos últimos minutos, os núcleos atômicos se desintegrarão, e a matéria será re-conduzida a um sopão de partículas elementares (prótons, nêutrons e elétrons), destruindo em poucos segundos o trabalho de bilhões de gerações estelares.

Nos segundos finais, nem os prótons e nêutrons suportarão a enorme pressão, desintegrando-se em quarks.

Nas proximidades do instante final, as forças fundamentais da natureza voltariam a se unir, formando a Força Grã-Unificada. Mas, antes disso, nossa física volta a falhar, impedindo-nos de continuar a partir daqui. É o *Big Crunch* (Grande Colapso).

O colapso não é inteiramente o filme da criação passado para trás. Há pelo menos uma característica do universo que tem estritamente um sentido: a *entropia*. É justamente a entropia que nós garante o sentido único da seta do tempo: não podem ocorrer fenômenos que globalmente, levem à diminuição da entropia. Assim, esse universo menor do fim terá uma entropia muito maior que o inicial correspondente – o que deve significar, no mínimo, anisotropias menores, um universo ainda mais homogêneo.

Repare ainda que, já que não podemos dizer nada sobre o comportamento do universo depois de um certo instante, é perfeitamente concebível (no nível das especulações gratuitas) que possa haver um novo Big Bang e uma nova criação. Essa idéia se alinha ao já mencionado princípio da plenitude: se é possível que esse novo universo exista, então ele deve existir. Mais diretamente, a idéia se alinha à concepção tradicional hindu (e de outros lugares) sobre um universo cíclico. Esta visão tradicional vem da universalização dos ciclos repetitivos da natureza: o próprio conjunto

³Veja o vídeo correspondente a esse texto em <http://www.youtube.com/watch?v=1LsKzehS6kw>

de toda a criação está sujeito também a ciclos, criando-se e destruindo-se como o acordar e o dormir novamente de uma criatura. Ou para citar um texto hindu clássico:

Quando esse Deus [Brahman] desperta, então o mundo se coloca em movimento. Quando adormece pacificamente, então tudo se dissolve. Em seu tranqüilo sono, os seres corpóreos feitos para a ação deixam de agir, e o espírito deles cai nas trevas. Quando todos juntos se dissolvem nessa grande alma, então ela, a alma de todos os seres, dorme feliz, em paz.

Mas não precisamos aderir ao princípio de plenitude, nem ao universo cíclico. Podemos dizer que nosso universo, em sua efêmera existência, é apenas um acontecimento isolado, dentro de um conjunto maior (uma espécie de *multiverso*) em que outros eventos sempre acontecem. Assim, criamos mais um conjunto, um substrato que sempre existe e é sempre igual a si mesmo (ou seja, que obedece ao princípio cosmológico perfeito), aproximando-nos, sob um novo viés, das exigências filosóficas de Fred Hoyle e o pessoal do Estado Estacionário.

Ou podemos, ainda, rebater para o fim o argumento de Levy Leblond sobre o início, dizendo que a contração da singularidade se retarda por um tempo infinito. Assim, tudo continua sempre existindo, só que, em tempo infinito para trás e para frente, sob a forma do Brahman que dorme. O drama da matéria bariônica (ou como diriam os hindus, a dança dos deuses) duraria apenas um pequeno instante. Ainda assim, essa concepção é compatível com a do multiverso, considerando que a seta do tempo, que usamos para contar a história do universo, só faz sentido dentro de cada bolha. Talvez haja bolhas sem temporalidade, ou com mais de uma dimensão temporal... Que estranhas e misteriosas criaturas o futuro do debate cosmológico nos revelará?

7.1.4 Futuro: Universo Marginalmente Aberto

Na situação da densidade média do universo ser igual à densidade crítica, como podemos ver nos modelos de Friedmann, o cosmos continuaria se expandindo, mas a uma taxa cada vez menor, tendendo a um tamanho limite. Assim, com o tempo, a influência da expansão seria cada vez menor e o universo seria “deixado em paz” com sua vidinha.

Mas a própria evolução química do universo determina um futuro para ele. As anãs vermelhas, além de ter uma evolução muito longa, não expelem muito gás no seu fim. As gigantes e supergigantes retêm uma quantidade considerável de matéria nos seus remanescentes (anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros). A cada nova geração estelar, é menor a matéria disponível para renovação. A quantidade de gás nas galáxias vai então diminuindo, levando junto a taxa de formação de estrelas. As populações galácticas migrariam todas para o tipo II, e além.

Depois de alguns trilhões de anos, mesmo as últimas anãs vermelhas estariam morrendo. Anãs brancas seriam o último reservatório de calor do universo. Mas mesmo elas esfriam com o tempo, tornando-se acinzentadas, até apagarem-se completamente sob a forma de anãs negras. Dentre os poucos átomos restantes no meio interestelar, existirão muitos de elementos pesados; enquanto, no início, só havia hidrogênio, hélio e lítio.

Mais ainda há algo pior por vir: a desintegração nuclear. Mesmo os prótons têm um tempo de meia-vida⁴, que é da ordem de 10^{32} anos. Sobraria só a matéria exótica (ou seja lá o que é aquilo) dos buracos negros; mas eles mesmos, num tempo da ordem de 10^{100} anos, evaporariam.

A segunda lei da termodinâmica diz que é impossível realizar um processo que tenha, como único resultado, transferir calor de uma fonte mais fria para uma mais quente. Ou seja, com o passar do tempo, a temperatura do universo se tornaria cada vez mais homogênea, e as trocas de calor, cada vez menos frequentes. A seta da entropia segue impávida. O universo estaria em

⁴Meia-vida é o tempo necessário para que metade de uma determinada massa de próton no universo se desintegre, virando radiação.

uma desordem cada vez maior, até chegar ao ponto em nenhum processo térmico mais ocorreria: é a *morte térmica do Universo*. Tudo ficaria indiferenciado, morno, sem graça...

7.1.5 Futuro: Universo Aberto

Aqui a situação seria ainda pior que a anterior; além da morte térmica, a expansão do universo continuaria indefinidamente. A radiação cósmica de fundo ficaria cada vez mais “fria”, acelerando o fim das formações estelares. Acabam os nascimentos de estrelas, acabam as próprias estrelas, acabam as anãs brancas, acaba a matéria como conhecemos, acabam até as bizarrices dos buracos negros! E o universo continua se expandindo, inerte, preenchido apenas por um mar de radiação fria, esfriando cada vez mais.

7.2 Biografia em Verso

Podemos escrever essa biografia de forma mais sucinta e mais poética, ressaltando melhor o quanto o Big Bang faz parte do senso comum sobre o universo, hoje. Para isso, usaremos a letra da música *The History of Everything*, da banda canadense *The Barenaked Ladies*. A música é também o tema de abertura do seriado *The Big Bang Theory* – seriado que muitos devem conhecer, por ser um símbolo da cultura nerd. O slogan é “Smart is the new sexy”. Vamos ao texto⁵:

Our whole universe was in a hot dense state,
Then nearly fourteen billion years ago expansion started. Wait...
The Earth began to cool,
The autotrophs began to drool,
Neanderthals developed tools,
We built a wall (we built the pyramids),
Math, science, history, unraveling the mysteries,
That all started with the big bang!

“Since the dawn of man” is really not that long,
As every galaxy was formed in less time than it takes to sing this song.
A fraction of a second and the elements were made.
The bipeds stood up straight,
The dinosaurs all met their fate,
They tried to leap but they were late
And they all died (they froze their asses off)
The oceans and pangea
See ya, wouldn’t wanna be ya
Set in motion by the same big bang!

It all started with the big BANG!

It’s expanding ever outward but one day
It will cause the stars to go the other way,
Collapsing ever inward, we won’t be here, it won’t be hurt
Our best and brightest figure that it’ll make an even bigger bang!

Australopithecus would really have been sick of us
Debating out while here they’re catching deer (we’re catching viruses)
Religion or astronomy, Encarta, Deuteronomy

⁵Ver música e um vídeo bem feito acompanhando, em http://www.youtube.com/watch?v=Aym8_S3BXKw

It all started with the big bang!

Music and mythology, Einstein and astrology

It all started with the big bang!

It all started with the big BANG!⁶

⁶Nosso universo inteiro estava em um estado quente e denso / Então há cerca de 24 bilhões de anos a expansão começou. Peraí... / A Terra começou a esfriar / autótrofos começaram a babar / Neandertais desenvolveram ferramentas / Construímos a Muralha (construímos as pirâmides) / Matemática, Ciência, História / desvelando os mistérios / Tudo isso começou com o Big Bang!

“Desde a aurora da humanidade” não faz tanto tempo assim / Já que cada galáxia foi formada em menos tempo que se leva para cantar essa música / Uma fração de segundos e os elementos foram feitos / Os bípedes se ergueram eretos / Os dinossauros todos conheceram seu destino / Eles tentaram pular fora, mas estavam atrasados / e eles morreram todos (eles congelaram o cu) / Os oceanos e Pangéia / Até mais, eu não quer ia ser vocês / Posto em movimento pelo mesmo Big Bang! Tudo isso começou com o Big BANG!

Tudo está se expandindo cada vez mais para fora, mas um dia / Isso fará as estrelas irem para o outro lado / Colapsando para dentro, nos não estaremos aqui, não vai doer / Nosso melhor e mais brilhante chute é que haverá um ainda maior big bang!

Australopitecos ficariam realmente de saco cheio da gente / Debatendo enquanto aqui eles caçam cervos (nós caçamos vírus) / Religião ou astronomia, Encarta, Deuteronômio / Tudo começou com o Big Bang! Música e mitologia, Einstein e astrologia / Tudo isso começou com o Big Bang! / Tudo isso começou com o Big BANG!

Unidade II

Universidade e Pesquisa

O maravilhoso não é a vastidão das estrelas, mas sim que o homem a tenha medido.

Anatole France

Mesmo depois de ler e estudar bastante, muitas perguntas inocentes que já estavam presentes antes das leituras insistem em incomodar, mesmo quando insistimos em ignorá-las (chamando-as de irrelevantes, descabidas ou qualquer coisa do tipo). É esse tipo de pergunta que crianças espertas fazem e que deixam os adultos desconcertados. Duas fundamentais no nosso assunto (claro, não tão fundamentais quanto a “será que vai chover?”) são: o que é astronomia? O que raios faz um astrônomo?

Para ajudar a entender o que os astrônomos fazem hoje, vale a pena saber o que os astrônomos antigos já faziam. Em outras palavras, o que faz com que consideremos aqueles homens como antepassados da nossa prática e, inversamente, nos consideramos herdeiros da ciência deles? Olhando por esse lado, espanta perceber que o trabalho fundamental dos astrônomos permanece o mesmo: fazer observações sistemáticas do Céu (o trabalho prático) e organizar / resumir essas observações em sistemas explicativos racionais (o trabalho teórico).

Do ponto de vista prático, a única coisa que aconteceu foi termos diversificado os tipos de observação sistemática do céu. As observações clássicas eram, principalmente, a observação de posições das estrelas da Esfera Celeste e das outras coisas que se moviam de forma diferente da esfera (Sol, Lua, planetas, cometas). Hoje em dia essas observações já são bem conhecidas, e já temos um esquema explicativo bastante estável para organizar essas informações (em vez de fundamentado em uma “Esfera Celeste”, ele parte da idéia de um “Sistema Solar”). Ademais, existem muito mais objetos conhecidos (aqueles que chamamos de asteróides, também as nebulosas, aglomerados, galáxias etc). e suas medidas de posição são muito mais precisas. Para organizar esses dados, usamos versões análogas da nossa idéia de sistema solar (corpos descrevendo elipses em torno de um corpo central, ou outras variações usando a teoria física da gravitação), que se mostrou bastante elegante para descrever movimentos celestes em geral.

Além disso, temos formas completamente novas de fazer observações dos astros. Não nos contentamos em observar diretamente a luz e as imagens dos objetos; em vez disso, decompomos, filtramos, ampliamos essa luz. Mais do que isso, não precisamos muito mais dos nossos olhos para observar: criamos versões novas de olhos, eletrônicas e de silício, que captam as imagens e as enviam para um computador processar, entregando-nos a informação na forma de gráficos e tabelas de dados.

Mas a forma de organizar as informações mudou bastante. Como dito, o esquema grego das esferas cristalinas era um meio *geométrico* de deixar tudo muito bonito e elegante. Junto com as teorias de como os céus interagiam com a terra (a “ciência dos astros” – astrologia), elas forneciam um bom esquema. Hoje em dia, entretanto, pouca gente ainda usa geometria como esquema mental (infelizmente, diriam alguns). Entre outras coisas, porque passamos a usar uma forma muito mais poderosa de organizar os dados: as teorias matemáticas da ciência moderna. A grande produtora desses modelos, consagradamente, é a física. Portanto, as observações astronômicas hoje não são mais organizadas *geométrica* ou *astrologicamente*; em vez disso, são organizadas *fisicamente*. Por isso o uso do termo “astrofísica”.

Pensando desse jeito, não dá pra dizer que a astronomia é um capítulo da física; física e astronomia têm suas tradições próprias distintas (embora com interseções em alguns momentos muito importantes) e as teorias físicas são uma das maneiras que os astrônomos usam hoje para organizar as observações celestes, das quais eles sempre foram produtores e guardiões. De fato, existem outras maneiras alternativas à física para organizar as observações, que motivam termos como *astroquímica*, *astroestatística* e mesmo a *astrologia* que, de alguma forma, continua viva por aí.

Capítulo 8

A Universidade

Um problema para os estudantes escolherem seu curso de graduação é que, antes de entrar na universidade, eles não sabem quase nada sobre ela. As disciplinas do colégio não ajudam muito também, pois seu tratamento mais comum é muito diferente dos cursos universitários correspondentes. O curso de matemática, por exemplo, não tem a ver com um monte de contas com números. Matemáticos, no seu cotidiano, raramente lidam com números. Da mesma forma, física não é um monte de fórmulas abstratas sobre blocos e polias, como química não tem a ver com cálculos estequiométricos. História e Literatura não são um monte de datas, nomes e listas de características de movimentos e grupos. Letras, por sua vez, tem pouco a ver com as regras arbitrárias da gramática¹.

Para uma abordagem rápida, vamos dar um panorama de elementos são importantes na formação em cada grande área. Começaremos com as diferentes áreas de pesquisa científica / acadêmica, para depois falar das aplicações.

8.1 Ciências Naturais

As principais ênfases na formação são:

- **MATEMÁTICA.** Pelo menos hoje em dia, é a língua das ciências naturais; uma forte formação matemática é fundamental. A base é Cálculo (derivadas, integrais, essas coisas q tem nos apêndices da apostila), Álgebra Linear (espaços vetoriais e essas coisas e finalmente um lugar onde matrizes e determinantes são úteis pra alguma coisa) e Estatística (fazendo estimativas com números grandes de coisas).
- **PRÁTICA EXPERIMENTAL.** Uma versão mais aprofundada e mais diversificada do Volume II.
- **TEORIAS PARADIGMÁTICAS DA ÁREA.** As teorias dominantes de cada área (ou, nas palavras de Richard Dawkins, “o melhor que nossa melhor ciência produziu até hoje”). Assim, em um curso de física há matérias como Mecânica Clássica, Termodinâmica, Eletromagnetismo, Mecânica Quântica ... Se for química, será Química Quântica, Química Orgânica, Bioquímica ... Se biologia, Teoria da Evolução, Genética, Bioquímica, Biologia Ambiental, etc.

Como se estuda? Fazendo contas, resolvendo exercícios e problemas. Nas disciplinas experimentais, estuda-se no laboratório, fazendo experimentos, e depois em casa, tratando os dados e interpretando-os. Modelo de aula.

¹Uma abordagem mais interessante das letras e das línguas é dada pela Olimpíada Brasileira de Linguística. Procure no Google e participe! (link patrocinado)

Áreas Aplicadas. As aplicações das ciências naturais são geralmente chamadas de *engenharia*. Nelas, a formação básica é a mesma das ciências naturais; as teorias paradigmáticas, em especial, variam dependendo da ênfase (engenheiros civis e mecânicos vêm mais Mecânica Clássica; engenheiros elétricos e eletrônicos vêm mais Eletromagnetismo; engenheiros químicos vêm mais ciências dos materiais).

8.2 Matemática

Nos cursos de matemática, trabalha-se apenas com a língua das ciências naturais. Mas para eles, é muito mais que só uma língua. É o próprio jogo de assumir consequências a partir de pressupostos, de construir edifícios lógicos, importantes pela sua aplicação mas, principalmente, pela sua beleza implícita. Na língua alemã, essa idéia é expressa de maneira mais clara: para os alemães, existe uma divisão tradicional entre *Naturwissenschaft*, ciência da natureza, e *Geisteswissenschaft*, ciência do espírito, ou ciência humana. A matemática, teoria da informação e outros parentes, neste esquema, formam um terceiro grupo, chamado *Strukturwissenschaft*, ciência de estrutura.

O que se precisa aprender num curso de matemática é, então, como jogar o jogo das estruturas. Por isso matemáticos não fazem contas, não usam números; em vez disso, eles entendem a linguagem dos axiomas, teoremas e demonstrações – ou, em outras palavras, “como extrair todas as consequências lógicas interessantes de um grupo finito de regras”. As diferentes matérias na matemática servem de apresentação às diferentes áreas em que se costuma jogar (Lógica, Álgebra, Análise, Geometria, Topologia) e a diferentes tipos de solução que se pode obter.

Como se estuda? Matemáticos estudam provando teoremas. Aulas de matemática são feitas apresentando definições novas, discutindo teoremas interessantes a partir dessas definições, e eventualmente discutindo algumas demonstrações desses teoremas.

Um trabalho interessante que muitos matemáticos fazem é “limpar a casa” para os cientistas. Físicos teóricos, por exemplo, muitas vezes criam protótipos de objetos matemáticos, que aparecem com necessários no seu desenvolvimento teórico; muitas vezes, mesmo satisfazendo a intuição do físico, esses objetos não são totalmente coerentes com os outros objetos matemáticos. Então algum matemático precisa criar um corpo lógico que justifique e permita aquele tipo de variável, como um legislador que cria um novo código para legitimar velhos hábitos. O contrário também acontece bastante: matemáticos em seus jogos criam modelos altamente excêntricos, e eventualmente um deles é usado por um físico, um neurologista, um economista, um programador de computadores.

Mas matemática, ainda mais que a ciência, uma carreira como a de modelo ou jogador de futebol. Como elas, a matemática depende do frescor e do vigor da juventude, de uma boa capacidade de processamento e uma mente apta a fazer novas conexões. Por isso que na matemática, e quase só na matemática, acontece de pessoas começarem ou terminarem seus doutorados com 15 anos, e ter sua vida produtiva quase toda concentrada até os 30 anos – depois disso, fica-se colhendo os frutos do trabalho da juventude. Alguns dos principais prêmios de matemática do mundo, como a *Medalha Fields*, só podem ser ganhos por pessoas com menos de 35 anos de idade. Claro, nada disso significa que você não possa começar numa idade razoável (digamos, começar a faculdade com 18 anos) e ainda assim fazer coisas bastante relevantes para a matemática.

Áreas Aplicadas. As principais são as áreas em torno de *economia* e de *computação*. O fato de ambas serem financeiramente interessantes talvez esteja relacionado ao fato de que poucas pessoas têm uma formação média ou boa em matemática.

De um ponto de vista mais amplo, a ciência teórica pode ser vista também como uma área aplicada da ciência. Hoje em dia acontece com muita frequência, especialmente nas áreas ainda

pouco matematizadas, ou que exigem uma matematização muito complexa, como é o caso da biologia. Os matemáticos, mais treinados em enxergar a estrutura, trabalham nas ciências para enxergar as relações e quantificá-las. É assim que equações diferenciais podem modelar dinâmicas de colônias de bactérias ou de ecossistemas, ou que curvas geométricas refinadas podem modelar o formato de uma molécula ou uma célula. Os modelos biológicos, hoje, são uma importante frente da matemática aplicada.

8.3 Humanidades

A tradição humanística é diferente da tradição científica. Baseada principalmente na reflexão conceitual sobre questões especificamente humanas, tem origem na filosofia e na literatura gregas e prossegue na filosofia e na literatura atuais. A história é um dos grandes expoentes das humanidades, mas também são a ciência política, a antropologia, etc.

Entretanto, em algum momento se pretendeu que a tradição científica fosse a única forma legítima de conhecer as coisas. Disso surgiram as chamadas “ciências sociais”, que pretendiam analisar os problemas humanos pelos métodos vistos como científicos pelos positivistas. O símbolo disso é a sociologia (em seu início, chamada de *física social*) que foi fundada a partir de estudos experimentais estatísticos sobre grandes quantidades de pessoas. Psicologia, Antropologia e Pedagogia também são, nesse sentido, ciências sociais.

As ênfases da formação são:

- **FILOSOFIA.** Quase todos os cursos de humanidades tem que ter pelo menos algumas matérias básicas de filosofia – já que a filosofia é, por definição, a reflexão conceitual sobre as coisas. Dá pra dizer que a filosofia é a matemática das humanidades.
- **TRADIÇÃO DA PRÓPRIA ÁREA.** Nas humanidades, a idéia de teoria paradigmática não é tão importante quanto a idéia de tradição. Autores escrevem sobre um assunto, outros autores escrevem sobre os primeiros, e assim faz-se um debate contínuo e longamente estendido entre os autores. Assim, o que se espera de um humanista (filósofo, historiador ou literata) é que saiba se inserir no debate da própria área e, com isso, dar respostas interessantes aos problemas colocados pelos seus antecessores (o que, eventualmente, leva à formulação de novos problemas). No mínimo, o estudante precisa conhecer os autores e os clássicos da sua área, e os debates clássicos. Assim, os estudantes de história precisam conhecer os textos de Ranke, Vico e Marx, nas suas formulações sobre o que é a história; mas precisa conhecer também os que desenvolvem História Econômica, História Cultural, Micro-história ... Um estudante de filosofia, por outro lado, precisa conhecer os filósofos existencialistas (Heidegger, Kierkegaard, Sartre), os epistemólogos (Popper, Kuhn, Feyerabend), etc.
- **TRADIÇÃO DAS OUTRAS ÁREAS.** Nas humanidades nunca houve a especialização que funciona nas ciências; aqui, sua área não é um terreno bem delimitado, mas o ponto de vista que você toma para discursar sobre todo o resto. Obras literárias têm muitas reflexões filosóficas, além de muito valor para se estudar determinada época (para os historiadores) ou cultura (para os antropólogos). Formulações culturais, por outro lado, são importantes para entender as obras literárias ligadas a elas, mas também para entender dinâmicas históricas, idéias filosóficas abstratas ou linguagem. A história, similarmente, manifesta-se em todos esses outros campos. Um crítico literário, quando fala de história, é reconhecido como crítico pelo seu ponto de vista, provavelmente baseado nos autores clássicos daquela época e nas idéias clássicas da crítica literária. O mesmo pra as outras áreas. Assim, quanto mais erudição você tiver, mais de outras áreas souber, melhores (mais ricas e mais completas) ficam as intervenções na sua tradição.

- *Línguas.* Como filosofia se faz com palavras das línguas humanas (em vez de símbolos arbitrariamente definidos da matemática), estudantes de humanidades precisam conhecer línguas. Pelo menos inglês todos têm que saber (isso vale para as ciências naturais). Mas muitos grandes autores escrevem também em francês ou alemão, ou muitas vezes em italiano; então você tem que saber essas duas também (especialmente se estudar filosofia – os filósofos clássicos são quase todos gregos ou alemães). Mas muitas obras são traduzidas só pro espanhol, então é fundamental você saber se virar com ele também. Dependendo da época de que forem os autores e da sutileza do tema tratado, é bastante importante também saber latim e grego. E, claro, se você for antropólogo e estudar outras culturas, é preciso saber um mínimo da língua daquelas pessoas (seja uma tribo indígena, seja a China). A questão fundamental é que tradução é uma arte muito difícil, na qual as idéias são inevitavelmente perdidas ou transformadas. Nesse processo, pode ser perdida exatamente a idéia que você procura.

Como se estuda? Lendo e discutindo o que se leu. Nas aulas de ciências naturais, a aula vem antes do estudo: o professor discute algumas idéias abstratas, faz umas contas difíceis, depois o aluno tenta reproduzir seus resultados. Em ciências humanas, isso não faz sentido, porque não há resultados a serem reproduzidos. O que há são textos a serem digeridos. Assim, no início de semestre, normalmente há uma lista dos textos correspondentes a cada aula; os textos devem ser lidos antes para que, na aula, possam ser discutidos.

A formação humanística, a rigor, nunca acaba. Quanto mais você lê, mais erudição ganha, melhores ficam suas análises. Era comum, até pouco tempo, os doutorados em ciências humanas serem terminados aos 40 ou 50 anos de idade; há os que dizem que as primeiras obras realmente maduras de um autor vêm depois dos 60 anos. As exigências aqui são opostas às da matemática – o que não significa que não sejam escritos textos relevantes durante a juventude.

Áreas Aplicadas. Direito, Relações Internacionais, Gestão Pública, Comunicação. As áreas aplicadas também possuem suas próprias tradições, que dialogam com as outras (historiadores e cientistas políticos têm que discutir frequentemente com os juristas). O que as diferencia é que são tradições é seu maior poder de intervenção na sociedade. Os julgamentos de um historiador não podem prender pessoas; os de um juiz podem.

8.4 Artes

No seu significado antigo, “arte” era algo próximo de “trabalho feito com dedicação e esforço, produtos das habilidades das mãos”. Com o tempo, o termo restringiu-se aos trabalhos com notável valor estético e, depois disos, tomou feições mais abstratas e subjetivas. Mas a raiz da palavra não perdeu totalmente o sentido: as faculdades de artes não são para aprender a pensar melhor, mas a fazer melhor. Os enfoques da formação são:

- *TÉCNICAS.* Trabalho, trabalho, trabalho! Se for pintura, pinte muitas telas; se for música, treine muitas peças; se for arquitetura, construa muitos projetos.
- *PERCEPÇÃO* – porque claro que a arte não é só a técnica. A técnica é apenas o meio; o importante é a luz que a arte emana. Técnica é o que se precisa aprender e praticar a maior parte do tempo; é fundamental, contudo, saber transformar boas idéias em boas obras. Assim, obras consagradas e artistas experientes podem fornecer ótimos insights.
- *TRADIÇÃO*, ou como as humanidades contaminaram a arte. Todo curso de arte tem história da pintura ou da música, pra que o artista possa aprender como suas obras se inserem no diálogo com as obras clássicas.

- **CIÊNCIA**, ou como as ciências contaminaram a arte. É importante entender sobre luz e cores, sobre a química dos pigmentos ou sobre acústica; mas também sobre fisiologia, teorias da percepção, associações simbólicas mentais.

Como se estuda? Estudar?

Áreas Aplicadas. Pode parecer que artistas morrem de fome, mas não é bem assim. As artes aplicadas são bastante importantes na nossa sociedade; elas são normalmente chamadas de *design*. Assim, pode-se dizer que engenharia cuida do que está dentro enquanto design cuida do lado de fora. Isso fica evidente em áreas como a automobilística, na qual tanto o engenheiro mecânico quanto o designer de automóveis são essenciais. Expandindo um pouco o conceito, é possível chamar moda de “design de roupas”, arquitetura de “design de exteriores” e publicidade de “design de idéias”.

Mesmo os artistas “puros” têm seu nicho social. É verdade que seu trabalho tem pouca ou nenhuma utilidade prática; por isso mesmo, esse trabalho pode ser contemplado e comprado por aqueles que têm poucas necessidades (madames da alta sociedade, por exemplo). Mas é possível argumentar que, em um nível mais elementar, a fruição estética é uma necessidade prática como as outras – é assim que rádios e gravadoras de CD se sustentam. Embora arriscadas (porque dependem de talento, aceitabilidade, bons contatos, etc.), as carreiras estéticas oferecem grandes margens de lucro.

8.5 Aplicações

Uma divisão básica que existe, implícita ou explicitamente, em todas as universidades, é a divisão entre “ciência pura” e “ciências aplicadas”. Funciona como os próprios nomes dizem: as segundas são vistas como aplicações das primeiras. A formação das ciências aplicadas é, portanto, bastante similar à das ciências puras, pelo menos nos primeiros anos dos cursos.

Mas boa parte dos profissionais “aplicados” discorda ou ri desse esquema, porque sabe que nenhuma profissão é uma aplicação de idéias que nascem na cabeça de meia dúzia de teóricos desocupados. Cada profissão tem sua sabedoria prática, que se aprende enquanto se faz (da mesma forma que aprendiam os aprendizes das corporações profissionais medievais). Então todos os cursos aplicados, além da formação teórica pura, dedicam um bom tempo ao aprendizado dessa sabedoria prática. Sobre isso, é comum escutar estudantes de engenharia dizendo: “as matérias de física básica não servem pra nada; são idealizações toscas sem senso de realidade. O curso começa a ficar bom a partir do quarto período, quando começamos a estudar engenharia *de verdade*.” Em outra área aplicada da ciência, a Medicina, isso é ainda mais forte: os futuros médicos precisam aprender um monte de técnicas que os biólogos não sabem como, por exemplo, operar pessoas, detectar anomalias doenças sem dissecar o corpo, etc.

Muita dessa sabedoria prática da área é aprendida, bem, na prática. É o que chamam de *estágio*: os alunos trabalham meio período, durante a graduação, em alguma empresa da sua área. Lá eles acompanham o trabalho dos profissionais e, com isso, aprendem como as coisas funcionam. Com muita frequência, o ambiente de estágio é completamente destoante do que se aprende na universidade.

Por fim, revertendo o jogo, as áreas puras também podem ser encaradas como aplicadas, porque também envolvem uma sabedoria prática que lhe é própria. Os estudantes também precisam aprender isso ao longo do curso, sobretudo na versão acadêmica do estágio: a *iniciação científica*. Nela, o estudante recebe do governo uma bolsa (de valor próximo a R\$ 300) para desenvolver um mini-projeto de pesquisa, junto a algum cientista (que, nessa dinâmica, é chamado de *orientador*).

Por fim, é importante citar que esse esquema é apenas isso: um esquema. Existem muitas interfaces e áreas mistas: podemos falar de biofísica, bioquímica, engenharia de produção, para se restringir às ciências naturais. Ou, para citar um exemplo mais radical, há a Psicologia. Existem as teorias psicológicas fornecidas pela filosofia e pela sociologia (e as pesquisas em “psicologia social”), mas também existe a psicologia “científica”, ligada aos avanços da neurologia, da ciência cognitiva, dos sentidos, do comportamento, etc. Além disso, a maioria dos alunos da psicologia a encara como uma área aplicada, que trará a possibilidade de montar consultórios e ouvir seus clientes. Ou, mais radical ainda, as Letras. Por um lado, a Literatura, irmã da Filosofia e da História, é um dos ramos mais tradicionais das humanidades, tratando do melhor que a nossa tradição intelectual nos deixou. Por outro lado, a literatura mesma é uma prática artística das mais valorizadas; embora ninguém ensine ninguém a escrever poesias nas matérias da Letras, é fácil esbarrar, na faculdade, com grupos de poesia ou de teatro. Por um terceiro lado, a Linguística é uma ciência natural, na sua interface com neurologia e cognição, mas também é uma ciência das estruturas, na sua interface com lógica e computação.

Capítulo 9

Fazer Astronomia

A pergunta seguinte que alguns talvez queiram fazer é: se eu quiser ser astrônomo, como faço? Dá pra fazer isso no Brasil?

9.1 Como ser astrônomo / cientista?

Em primeiro lugar, faça uma faculdade de ciências. Pode ser de Astronomia mesmo, mas pode também ser Física, Química ou Matemática, dependendo do seu enfoque preferido. Se você for estudar astrobiologia, fazer faculdade de Biologia também serve. Existem muitas boas universidades no Brasil, mas também muitas boas fora. Como a comunidade astronômica é relativamente pequena, só existem cursos de graduação em astronomia em duas universidades no Brasil: na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e na Universidade de São Paulo (USP); além dessas, existem rumores de que a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) também está abrindo a sua.

Depois da faculdade (graduação), você precisa fazer a pós-graduação, em alguma universidade ou centro de pesquisa em que haja pesquisadores que pesquisem o que você quer estudar. Primeiro um Mestrado, em dois anos, onde você escolherá um tema bem específico e explorará, à exaustão, todos os detalhes desse tema. Depois disso, o Doutorado, em quatro anos, em que você ampliará um tema (muitas vezes, a continuação do seu tema de mestrado) e defenderá uma tese científica nova. Hoje em dia, todo cientista tem de passar por todo esse processo¹; faz parte do caminho natural de formação acadêmica. Repare, então, que um cientista leva $4 + 2 + 4 = 10$ anos para se formar. Isso é tanto quanto um médico, que faz seis anos de graduação e quatro de residência médica!

Depois de formado, o caminho natural é entrar para um grupo de pesquisa, em alguma instituição de pesquisa. Você pode fazer isso fazendo um concurso público ou, o que é mais comum antes disso, conseguindo uma bolsa de pós-doutorado. Nessa fase, você é mais ou menos como um “pesquisador junior”: você recebe uma bolsa, com um valor razoável de salário, por um ou dois anos, para que você pesquise naquela instituição. Geralmente, os estudantes brasileiros fazem pos-doc em outros países, o que é incentivado: é importante valorizar o intercâmbio de idéias, principalmente no início da vida de pesquisa. Não há número limitado de pos-docs que alguém pode fazer. Algumas pessoas preferem fazer vários pos-docs em lugares diferentes, vivendo e experimentando vários países. Outros preferem procurar logo um emprego estável, fazendo concurso para alguma universidade, para poder casar, constituir família, etc.

¹Uma maneira ilustrada e divertida de ver esse caminho pode ser vista em <http://matt.might.net/articles/phd-school-in-pictures/>

9.2 Instituições de Pesquisa

Existem dois tipos de instituição de pesquisa no Brasil: as Universidades, submetidas ao Ministério da Educação (MEC), e os Centros de Pesquisa, submetidos ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). A diferença básica entre os dois é que a Universidade possui cursos de graduação, os centros de pesquisa não. Isso significa que se você se tornar um pesquisador da universidade, será também um professor de alguma faculdade.

Em astronomia, as principais instituições, entre institutos universitários e centros de pesquisa, são:

- OBSERVATÓRIO NACIONAL (ON), no Rio de Janeiro. Criado em 1827 pelo imperador Pedro II (na época era chamado de *Imperial Observatório do Rio de Janeiro*). Ainda funciona no Rio de Janeiro e é um instituto de pesquisa astronômica. O seu pátio com telescópios antigos é um charme, apesar de esses telescópios não serem mais usados para observação profissional. Tem pesquisa em basicamente todas as áreas. Hoje, possui 63 pesquisadores. Mais detalhes em <http://www.on.br>
- OBSERVATÓRIO DO VALONGO da UFRJ (OV-UFRJ), no Rio de Janeiro. Criado em 1881 como observatório da antiga Escola Politécnica do Rio de Janeiro. Depois a Escola Politécnica, levando seu observatório, uniu-se à Faculdade de Medicina e à Faculdade Nacional de Direito para fundar a UFRJ. Desde 1958 até poucos anos atrás, o Observatório do Valongo era o único lugar do Brasil que oferecia curso de graduação em Astronomia. Mais em <http://www.ov.ufrj.br>
- INSTITUTO ASTRONÔMICO E GEOFÍSICO da USP (IAG-USP), em São Paulo. Começou em 1927 como um órgão do Estado de São Paulo: a *Diretoria do do Serviço Meteorológico e Astronômico* do Estado. Quando foi criada a USP, em 1934, o órgão foi incorporado a ela. Apesar de ser décadas mais recente que os dois observatórios do Rio de Janeiro, o IAG hoje tem o maior contingente de pesquisadores: 120 pessoas, o dobro que o ON. Há poucos anos, possui também sua graduação em astronomia. Mais em <http://www.iag.usp.br>
- LABORATÓRIO NACIONAL DE ASTROFÍSICA (LNA), em Itajubá, MG. Foi fundado recentemente, em 1985, a partir de uma ramificação do ON e com o objetivo de ser a interface observacional da astronomia brasileira. Sua sede, no perímetro urbano de Itajubá, é onde trabalham seus 13 astrônomos permanentes e demais técnicos e funcionários administrativos. Além disso, faz parte do LNA o *Observatório do Pico dos Dias* (OPD-LNA), em um pico isolado no município vizinho de Brasópolis; para lá vão astrônomos de todo o país fazer suas observações. Além disso, é o LNA que coordena a participação brasileira nos consórcios dos telescópios SOAR (*Southern Astrophysical Observatory*) e Gemini, ambos situados no Chile². Mais em <http://www.lna.br>.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), em São José dos Campos, SP. Nasceu em 1968, da *Comissão Nacional de Atividades Espaciais*. Suas linhas de pesquisa são menos ligadas à astronomia teórica e mais à astronáutica e exploração espacial. Apesar disso, há uma *Divisão de Astrofísica* que faz pesquisa menos aplicada. Dentre os recentes resultados deles, está o lançamento de balões atmosféricos para medir radiação de objetos astrofísicos muito energéticos e de interesse cosmológico. Mais em <http://www.inpe.br> ou, mais especificamente, em <http://www.das.inpe.br>

²Para saber mais sobre a participação brasileira no Gemini, ver http://www.lna.br/gemini/gem_hist.html; sobre o SOAR, ver http://www.lna.br/soar/soar_hist.html



Figura 9.1: Telescópio principal do Observatório do Pico dos Dias, em Itajubá, MG. Seu espelho principal mede 1,6m.

Existem ainda astrônomos espalhados por várias outras universidades; as que possuem os maiores grupos, além da USP e da UFRJ, são a UFRGS e a UFRN, com 26 pesquisadores cada. Além disso, em centros de pesquisa em física, existem linhas de pesquisa muito ligadas a temas astronômicos. É o caso, principalmente, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) no Rio de Janeiro, e do Instituto de Física Teórica da UNESP (IFT-UNESP), em São Paulo, cada um com 24 pesquisadores ligados à astronomia. Como institutos de física teórica, ambos possuem grandes grupos de pesquisa em cosmologia. No total, existem cerca de 500 astrônomos pesquisando no Brasil.

No total, existem 17 programas de pós-graduação em Astronomia, ou em Física contendo astrônomos, no Brasil. Os centros de pesquisa que possuem tais programas são ON, LNA, INPE e CBPF. As universidades que possuem tais programas são, do sul para o norte: UFRGS (Porto Alegre, RS); UFSM (Santa Maria, RS); UFSC (Florianópolis, SC); USP, UNESP e UNICSUL (Cruzeiro do Sul), todas em São Paulo, SP; UNIVAP (Vale do Paraíba: São José dos Campos, SP); UFRJ (Rio de Janeiro, RJ); UNIFEI (Itajubá, MG); UFMG (Belo Horizonte, MG); UESC (Estadual de Santa Cruz: Ilhéus, BA); UFRN (Natal, RN); UERN (Mossoró, RN).

Além disso, independente de onde estejam, todos os astrônomos brasileiros fazem parte da Sociedade Astronômica Brasileira (SAB). Da mesma forma, existem Sociedades Brasileiras de Física, de Química, de Matemática... Quem organiza a OBA, por sinal, é a Comissão de Olimpíada da SAB. A Sociedade se reúne anualmente, num evento chamado Reunião Anual da SAB. A Escola de Astronomia do CCD, antigamente, costumava acontecer junto com essa reunião. Como outras sociedades astronômicas de outros países, a SAB e seus membros são filiados à *International Astronomical Union* (IAU), que é o órgão máximo de astronomia no mundo. A IAU também possui suas General Assembly, mas que acontecem a cada três anos. A última dessas, em 2009, aconteceu no Rio de Janeiro, Brasil! A próxima ocorrerá em 2012, em Beijing, China.



Figura 9.2: Logo da SAB

Outra super-instituição astronômica no Brasil é a Agência Espacial Brasileira (AEB), que já citamos quando falamos de telescópios espaciais. A AEB é a equivalente brasileira da NASA, nos Estados Unidos, e da ESA, na União Européia. Nossa prima brasileira é ainda jovem e pouco experiente, mas já realiza coisas importantes. Por exemplo, a AEB tem cinco satélites de pesquisa: os da linha SCD (Satélite de Coleta de Dados), 1 e 2, e os da linha CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite), 1, 2 e 2B, que realizam atividades de sensoriamento remoto e monitoramento do clima no território brasileiro. Além disso, ela gerencia o uso dos dois centros de lançamento de veículos espaciais que o Brasil possui, um em Alcântara, MA, e outro na Barreira do Inferno, RN.



Figura 9.3: Logo da AEB

9.3 Instituições de Divulgação

Além disso, o Brasil possui outros tipos de instituição astronômica, mais voltadas ao ensino e à divulgação de astronomia. O mais famoso desses tipos é o planetário. No Brasil há 28 planetários, muitos pertencentes à prefeitura de seus municípios, mas a maioria é parte de universidades³. No estado de São Paulo, por exemplo, há planetários em Campinas, Americana, Brotas e Itatiba, além de dois na capital (no Parque do Ibirapuera e no Parque do Carmo).

Existem também os observatórios didáticos⁴. Eles existem por uma razão histórica interessante: são os telescópios que já foram profissionais um dia, mas que hoje não são grandes o suficiente (ou bem localizados o suficiente) para produzir mais muitos resultados. É o caso, por exemplo, do telescópio do Observatório do Valongo; seu maior telescópio tem diâmetro de 0,42 m, apenas um pouco menor que dois dos telescópios ativos no Pico dos Dias (ambos de 0,6 m). Entretanto, sua localização no centro da cidade do Rio de Janeiro impossibilita qualquer uso profissional do mesmo. Similarmente, os telescópios do IAG-USP não teriam muito uso na cidade de São Paulo; hoje há um deles no Observatório do Pico dos Dias e outro no campus de São Carlos da USP.

Há também observatórios criados com fim didático, como os de escolas e clubes. Só para citar dois exemplos, o Colégio 7 de Setembro, em Fortaleza, CE, e o Colégio Militar de Porto Alegre, RS, são dois colégios que possuem observatórios próprios; há membros do CCD que estudaram em ambos os colégios.

³Para mais informações, visite a página da Associação Brasileira de Planetários: <http://www.planetarios.org.br/>

⁴Uma lista completa dos observatórios didáticos e profissionais pode ser acessada em <http://www.uranometrianova.pro.br/observatorios/obsbrasil.htm>

Capítulo 10

A Pesquisa Atual

Diante de tudo o que foi estudado, podemos discutir alguns dos problemas atuais da astronomia. Vamos proceder dos mais próximos aos mais distantes.

10.1 Rochas e Vida

Podemos começar com o Sistema Solar. Os modelos de formação do nosso sistema ainda são relativamente precários, e devem mudar bastante nos próximos anos. Entre as novidades observacionais que contribuirão para isso são a descoberta ainda muito ativa de asteróides (no Cinturão Principal ¹, no Cinturão de Kuiper, na Nuvem de Oort, nas vizinhanças da Terra), e a obtenção de dados detalhados sobre a forma (imageamento) e composição química (espectrometria) de muitos planetas, asteróides e satélites, a partir das sondas que temos mandado pelo Sistema Solar. Sobre o Cinturão de Kuiper e os planetas-anões daquela região, hoje ainda sabemos muito poucos. Agora é que estamos obtendo as primeiras informações sobre formatos, massa e composição química deles.

Em particular, estudar os pequenos corpos do Sistema Solar é importante para entender os processos de acreção no disco protoplanetário, os diferentes materiais que se condensaram, e mesmo a origem e o transporte da vida entre os corpos do Sistema Solar (como foi que ela chegou até a Terra, se ela veio de fora, se chegou a existir em outros planetas vizinhos). Os modelos de mecânica celeste, incluindo os da formação das famílias de asteróides, desempenham um papel importante nessa compreensão.

Na Reunião da IAU 2009, no Rio de Janeiro, houve um simpósio de planetologia; foi o Symposium 264: *Icy Bodies of Solar System*. Esse simpósio buscava discutir a presença de água no Sistema Solar, como ela se distribui e como contribuiu para os processos de formação. Algumas perguntas que orientaram o simpósio: qual a estrutura interior das luas geladas? Como algumas delas conseguiram preservar água líquida? De onde veio a água líquida da Terra (já que o nosso planeta está em uma região em que a água não pode se condensar)? Como deviam ser as condições primitivas da água e do gelo no disco protoplanetário, e como isso, junto com a radiação UV, contribuíram para a formação dos compostos de carbono? Como os novos dados de Titã, obtidos pela sonda Cassini-Huygens, podem ajudar a responder essas perguntas? Como os novos dados de cometas, e o que estamos começando a saber sobre o Cinturão de Kuiper, podem ajudar?

Na área de Planetologia, os principais grupos são os liderados pela Daniela Lazzaro, no ON, e pelo Sylvio Ferraz Melo, no IAG-USP. O primeiro desses grupos, acabou de fundar o IMPACTON: um telescópio robótico no município de Itacuruba, PE, que fará busca sistemática de NEOs no hemisfério sul². A representante do Brasil na Olimpíada Internacional (IOAA), Thaís

¹Ver vídeo

²Mais sobre esse projeto em <http://www.on.br/impacton/>

Mothé-Diniz, é professora do Observatório do Valongo e faz pesquisa nessa área.

Além de tudo, os planetas hoje não são estudados só no Sistema Solar. A pesquisa em exoplanetas é uma das que mais cresce hoje em dia. Eles são detectados basicamente pelos mesmos métodos usados para estudar sistemas duplos (variações na curva de brilho e mudanças de posição). Um grande projeto atual para busca de exoplanetas é o satélite francês CoRoT (*Convection, Rotation et Transit planetaires*), liderado pelo CNES (Centre National d'Études Spatiales) mas com participação também expressiva da ESA, da agência holandesa, de outros laboratórios europeus e, também, da comunidade astronômica brasileira³. O satélite funciona desde 2007; apenas entre janeiro e junho de 2010, 46 novos exoplanetas foram descobertos. Tais planetas são depois reobservados por grandes telescópios terrestres, que confirmam suas características físicas (massa, parâmetros orbitais, etc.). Diversos astrônomos brasileiros têm publicado no tema, como a Adriana Válio do CRAAM (Centro de Rádio-Astronomia e Astrofísica Mackenzie) e todos do grupo do José Renan de Medeiros, da UFRN.

Outra área nova e quente é a da Astrobiologia, a pesquisa de vida fora da Terra. Existem pesquisas teóricas (sobre fatores bioquímicos, atmosféricos e estelares que sejam ou não compatíveis com seres vivos), pesquisas experimentais (em laboratórios de química e biologia) e observações astronômicas (em especial com as sondas que foram a Europa, Io, Titã, etc.) Essa área é nova em todos os lugares. Houve uma Special Session na IAU sobre esse tema, com diversos trabalhos ousados. No Brasil, grupos de pesquisa situam-se em torno de Eduardo Janot Pacheco, no IAG, de Gustavo Porto de Melo, no OV-UFRJ, e de Cláudia Lage, no Instituto de Biologia da UFRJ.

10.2 Estrelas e Galáxias

A astrofísica estelar ainda possui a maior quantidade de pesquisadores (incluindo a esmagadora maioria dos pesquisadores brasileiros). Hoje ela tem bases teóricas relativamente estáveis; como vimos, os processos de evolução estelar são razoavelmente bem entendidos hoje. Mas há alguns aspectos importantes ainda obscuros.

Um tema que recebeu atenção na IAU 2009 foi o das estrelas variáveis (no Symposium 264: *Solar and Stellar Variability*). Hoje temos dados muito precisos sobre a variação de brilho das estrelas, em diferentes comprimentos de onda. Sabemos até que o Sol é uma estrela variável! Entender os mecanismos que causam a variação das estrelas ajuda a refinar os modelos de como as estrelas funcionam e ajudam também nos modelos de formação planetária e, eventualmente, na formação de vida. O tema é bastante atual, principalmente nos debates climáticos: qual o papel das variações de luz e de campo magnético solares nas variações da atmosfera terrestre e na formação de eras geladas no nosso planeta? Quanto do aquecimento global atual é causado pela produção humana e quanto está relacionado com ciclos naturais do Sol e da Terra?

A ligação entre o Sol e as outras estrelas também é um tópico ainda amplo. Só recentemente é que as observações em UV e Raios X tem permitido detectar manchas e zonas de convecção em outras estrelas, similares às do Sol; similarmente, foram observadas também as misteriosas coroas estelares em outras estrelas além do Sol.

Outro problema é o das estrelas que são de tipos ou fase muito brilhante – como as binárias muito próximas, as estrelas do Ramo Assintótico e outras muito massivas. Embora elas sejam uma pequena minoria das estrelas, seu brilho é ordens de grandeza maior que o das outras estrelas, de forma que elas dominam o cenário luminoso das galáxias, se olhadas de longe. Assim, temos um duplo problema: elas são raras, então há poucas na nossa galáxia para estudarmos, mas dominam o brilho da maior parte das galáxias distantes que observamos.

³Para saber sobre a participação brasileira no CoRoT, veja

Além disso, essas estrelas grandes e raras explodem rápido, contribuindo muito fortemente para a distribuição de elementos químicos. Por isso, o estudo detalhado desses objetos tem muito a contribuir para as idéias sobre evolução química das galáxias. Há novos dados sendo produzidos, principalmente nas observações do infra-vermelho curto e médio.

Sobre isso, na IAU 2009, houve o Symposium 262: *Stellar Populations - planing for the next decade*. Segundo os organizadores do simpósio, as perguntas que procuraram ser respondidas nessa área eram: Os processos de formação de estrelas vistos em galáxias anãs também são típicos das galáxias gigantes? O que determina o limite de massa galáctica para que o resfriamento rápido na formação estelar seja efetivo? As gigantes elíptica se formaram monoliticamente, por processos de fusão entre galáxias, ou por ambos? Existem padrões de abundância química que podem decidir em favor ou contra um desses cenários? Como podemos poroduzir modelos confiáveis para a emissão UV das galáxias jovens? A matéria escura desempenha algum papel na evolução das populações estelares? Quão universal é o IMF? O que nós sabemos sobre populações estelares do tipo III?

Evolução química de galáxias é o tópico estudado pelos grupos do Walter Maciel, no IAG-USP e, da Heloísa Boechat e Gustavo Porto de Melo, no OV-UFRJ.

Astrofísica Galáctica também possui muitos adeptos. Com telescópios maiores, podemos observar galáxias no céu mais profundo, além de ver mais detalhes nas galáxias já conhecidas. Tudo isso faz com que os modelos de formação de galáxias ainda passem por muitas mudanças. Os modelos envolvem tanto formação dinâmica (interação gravitacional entre as estrelas e das estrelas com os núcleos galácticos) quanto formação química (evolução estelar e evolução das populações estelares da galáxia). Um tipo de galáxia particularmente pouco entendido hoje são as galáxias elípticas gigantes, que ficam no centro dos aglomerados de galáxias.

Além das outras galáxias, precisamos entender a nossa própria. Por melhores que sejam nossos instrumentos atuais, observar a Via Láctea ainda é tarefa difícil. Inevitavelmente, os dados são distorcidos a favor das estrelas mais próximas do Sol e contra tudo o que há no disco, encoberto pela poeira. Lidar com essas distorções só é possível com bons modelos da Via Láctea. Hoje, os telescópios superaram os modelos, de forma que são estes os principais obstáculos para se produzir conhecimento sobre a Galáxia. Mas para melhorar os modelos, são necessários dados mais numerosos e mais acurados (de posições, espectros e movimentos próprios de estrelas da galáxia). Os bancos de dados estão crescendo, atingindo a ordem das bilhões de estrelas catalogadas.

Para citar dois grupos importantes de Astronomia Galáctica e Extra-Galáctica, citamos o do IAG-USP (Vera Jatenco-Pereira, Walter Maciel, Amâncio Friaça e outros) e o do ON (Luiz Nicol-lace, Marcio Maia, Paulo Pellegrini e outros).

10.3 Cosmologia

Na cosmologia, a busca agora é por Matéria e Energia Escura – tópicos que, muito provavelmente, ainda causarão mudanças teóricas radicais na física fundamental. Alguns tópicos bastante estudados são: medidas de distância de Supernovas Ia cada vez mais distantes (para ajustar parâmetros cosmológicos)

No Brasil, os grupos de cosmologia têm crescido bastante. Dentre os mais destacados, podemos citar o do Mario Novello, no CBPF; do Ioav Waga, no Instituto de Física da UFRJ; do Jorge Horvath, Laerte Sodré Jr. e outros, no IAG-USP; o grupo de cosmologia observacional do Carlos Alexandre Wuensche, no INPE; e ainda muitos outros. O vice-coordenador da OBA, Jaime Rocha da Uni-Rio, faz pesquisa em gravitação e cosmologia teórica, buscando soluções exóticas da Relatividade Geral.

10.4 Desenvolvimento Técnico

Uma área pequena mas sempre presente é a da astrometria, ou medição precisa de posições estelares. Conseguimos dados de posição, paralaxe e movimento próprio cada vez mais precisos. Para alguns modelos, especialmente quando se trata de mecânica celeste – em que pequenas diferenças de posição podem levar a resultados completamente distintos.

Outra área é a da chamada instrumentação astronômica. Como fazer telescópios maiores evitando os problemas físicos de objetos muito grandes? Como fazer telescópios estáveis em órbita, ou em outros lugares do espaço? Como fazer sondas resistentes às diferentes condições físicas encontradas nos seus alvos (planetas muito quentes, planetas muito frios, cometas)? Todas essas questões são fundamentais para a pesquisa astronômica.

A IAU 2009 contou com uma sessão especial interessante sobre isso: *Astronomy in Antarctica*. Dentre as vantagens do continente gelado, podemos citar: baixa temperatura (bom para conservar os equipamentos); baixa umidade (baixa *seeing*); pouco vento no topo do planalto; noites que duram meses; as vastas camadas de gelo podem ser satisfatoriamente usadas para absorver partículas que interagem pouco (é como detectamos neutrinos da Terra). Além das instalações já bem sucedidas (como os norte-americanos CARA (*Center for Astrophysical Research in Antarctica*) e AMANDA (*Antarctic Muon and Neutrino Detection Array*)), alguns grupos buscam novos sítios antárticos.

No Brasil, os esforços de instrumentação se concentram no LNA, nos observatórios-parceiros fora do Brasil e, principalmente, no desenvolvimento de equipamentos e veículos aeroespaciais, no INPE.

10.5 Ciências Humanas

Além disso, existe a história da astronomia, filosofia da ciência. Qual a relação exata entre teoria e experimento? Qual foi a influência de fatores pessoais da vida dos cientistas nas suas obras? E a relação com a produção de tecnologia, com as situações e mudanças políticas de cada sociedade, com as correntes filosóficas e ideológicas predominantes? Como tudo isso afeta a ciência que é produzida hoje?

Na IAU 2009, houve uma sessão especial de história em comemoração dos 400 anos do *Astronomia Nova* de Kepler. O objetivo era reunir as pesquisas sobre o astrônomo; a esse propósito, foi criado um *working group* especial para o tema.

Se a astronomia é uma área relativamente pequena, a história da ciência, pelo menos no Brasil, é ainda menor. O principal grupo está na UFBA, em Salvador, BA, e é liderado pelo Olival Freire Jr., tendo como tema majoritário a História da Mecânica Quântica, de seus conceitos e formulações. Outros grupos incluem Roberto Martins (história da mecânica e do universo) e os pesquisadores do CLE (Centro de Lógica e Epistemologia), ambos da Unicamp; o Antônio Augusto Videira (que estudou, entre outros temas, o relativismo epistemológico do Boltzmann), na Uerj; Luiz Peduzzi (História e Ensino de Física), na UFSC.

Existe também a pesquisa em ensino de astronomia. Qual a relevância da Astronomia para a vida das pessoas comuns? Por que e como ela deve se inserir na educação básica? Como são as concepções das crianças, e dos adultos, sobre a Terra, as estrelas e o Universo? Como as concepções dos professores afetam o ensino de ciências em geral, e como melhorar essas concepções? Que ênfases são mais indicadas para o ensino de ciência: as aplicações prática, a relação com filosofia e história, a relação com tecnologia e sociedade? Como estimular mais carreiras científicas no país? Como melhorar a formação dos cientistas? Que papéis as olimpíadas científicas desempenham em todas essas questões? O ensino foi um dos grandes focos do ano internacional e foi extensamente debatido durante a IAU 2009.

No Brasil, o ensino de ciências provavelmente se concentra na USP, no Programa Interunidades de Ensino de Ciências; há outros, entretanto, que pesquisam em ensino de astronomia, dentre eles o Coordenador Nacional da OBA, João Canalle e o líder brasileiro na OLAA, Julio Cesar Klafke. Podemos citar também o trio composto por Paulo Bretones (UFSCar), Luis Carlos Jafelice (UFRN) e Jorge Horvath (IAG-USP), editores da *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia*.

10.6 Panorama

Uma maneira panorâmica de ver as áreas de atuação é saber como a IAU classifica as áreas. A IAU tem 55 Comissões e mais diversos *Working Groups* (que existem temporariamente para resolver problemas de interesse global), reunidos em 12 divisões. Abaixo vão listadas as divisões e suas respectivas comissões:

- I - ASTRONOMIA FUNDAMENTAL: Efemérides (C4); Mecânica Celeste e Astronomia Dinâmica (C7); Astrometria (C8); Rotação da Terra (C19); Tempo (C31); Relatividade na Astronomia Fundamental (C52). WG: Segunda Realização do Sistema de Referência Celeste Internacional; Padrões Numéricos em Astronomia Fundamental; Astrometria a partir de Telescópios Terrestres Pequenos.
- II - SOL E HELIOSFERA: Atividade Solar (C10); Radiação e Estrutura Solar (C12); Heliosfera e Plasma Interplanetário (C49). WG: Comunicando Heliofísica; Mínimos Solares Comparados; Eclipses Solares; International Solar Data Access; Colaboração Internacional em Space Weather.
- III - CIÊNCIAS DOS SISTEMAS PLANETÁRIOS: Estudo Físico de Cometas e Pequenos Corpos (C15); Estudo Físico de Planetas e Satélites (C16); Posição e Movimentos de Pequenos Corpos, Cometas e Satélites (C20); Meteoros, Meteoritos & Poeira Interplanetária (C22); Bioastronomia (C51); Planetas Extra-Solares (C53). WG: Nomenclatura de Pequenos Corpos; Nomenclatura de Sistemas Planetários; Coordenadas Cartográficas e Elementos Rotacionais; Satélites Naturais.
- IV - ESTRELAS: Estrelas Duplas e Múltiplas (C26); Espectro Estelar (C29); Constituição Estelar (C35); Teoria das Atmosferas Estelares (C36); Classificação Estelar (45). WG: Estrelas Massivas; Abundâncias [Químicas] em Gigantes Vermelhas.
- V - ESTRELAS VARIÁVEIS: Estrelas Variáveis (C27); Estrelas Binárias Próximas (42). WG: Estrelas B Ativas; Ap e Estrelas Relacionadas.
- VI - MATÉRIA INTERESTELAR: Matéria Interestelar (C34). WG: Astroquímica; Nebulosas Planetárias.
- VII - SISTEMA GALÁCTICO: Estrutura e Dinâmica do Sistema Galáctico (C33); Aglomerados Estelares (C37). WG: Centro Galáctico.
- VIII - GALÁXIAS E O UNIVERSO: Galáxias (C28); Cosmologia (C47). WG: Supernovas.
- IX - TÉCNICAS ÓPTICAS E INFRAVERMELHAS: Radiação de Fundo Galáctica e Extragaláctica (C21); Fotometria e Polarimetria Estelares (C25); Velocidades Radiais (C30); Interferometria Óptica e Infravermelha (C54). WG: Óptica Adaptativa; Astronomia no Infravermelho; Projetos de Grandes Telescópios; Instrumentos para Testar Sítios; Projetos de Pequenos Telescópios; Sky Surveys; Astronomia a partir da Lua; Encorajando o Desenvolvimento Internacional da Astronomia Antártica.

- X - RADIO ASTRONOMIA: Radio Astronomia (C40). WG: Global Very Long Base Interferometry; Mitigação de Interferência; Linhas Espectrais Astrofisicamente Importantes.
- XI - ESPAÇO E ASTROFÍSICA DE ALTAS ENERGIAS: Espaço e Astrofísica de Altas Energias (C44). WG: Astrofísica de Partículas.
- XII - UNION-WIDE ACTIVITIES: Documentação e Dados Astronômicos (C5); Telegramas Astronômicos (C6); Dados Atômicos e Moleculares (14); História da Astronomia (C41); Ensino e Desenvolvimento de Astronomia (C46); Proteção de Sítios Observacionais Existentes e Potenciais (C50); Comunicando Astronomia ao Público (C55). WG: Johannes Kepler; História da Radio Astronomia.

Unidade III

Apêndices

Apêndice A

Referenciais e Relatividade

O conhecimento é uma vaca sagrada. O problema é como ordenhá-la sem levar uma chifrada.

Albert Szent-Gyorgyi

Talvez você já tenha ouvido falar em expressões ligadas à Teoria da Relatividade, tais como o “espaço-tempo”, ou ainda que o tempo seja relativo e dependa do observador, o que até poderia levar à possibilidade de viagens no tempo. Esses conceitos não fazem parte de nosso senso comum e tampouco estão ligados à nossa vida cotidiana – em parte porque nosso senso comum e nosso cotidiano foram moldados pela concepções físicas “clássicas” (newtonianas). Para compreender melhor essas novas concepções então, devemos fazer hipóteses adicionais sobre a natureza do espaço e do tempo. A mecânica clássica construiu uma noção de espaço e tempo como entidades físicas absolutas, que não são influenciáveis por qualquer processo físico. Ou, na formulação que Newton dá nos *Principia*:

O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza flui igualmente sem relação com nada de externo (...)

O espaço absoluto, por sua própria natureza, sem relação com nada eterno, permanece semelhante e imóvel.

Neste contexto, é natural supor que o universo é infinito e sempre existiu.

Entretanto, uma série de fatos tornam razoavelmente problemáticas nossas tentativas de modelar o universo através das leis de Newton e da Gravitação Universal. Por exemplo, ao fazer medições da precessão do periélio de mercúrio é possível detectar um erro na previsão da mecânica newtoniana, da ordem de 1% . É um erro pequeno, mas suficiente para indicar que a Lei da Gravitação Universal não descreve bem o comportamento da matéria sob a ação de campos gravitacionais fortes. O fenômeno de lentes gravitacionais, inexplicável sob o aparato da mecânica newtoniana, é outro exemplo da necessidade de alterarmos certos conceitos que para nós sempre foram intuitivos. Essa alteração foi criada pelo famoso físico Albert Einstein com as Teorias das Relatividades Restrita e Geral. A primeira altera a noção de tempo, criando um novo espaço-tempo, e a segunda altera o conceito de gravitação, explicando essa força através desse novo espaço-tempo. Discutiremos nesse apêndice a Relatividade Restrita.

A.1 Referenciais e Movimento

Primeiramente, devemos notar a importância de adotarmos um certo referencial para qualquer observação. Esse conceito já foi discutido no Volume II; mas vamos rediscuti-lo aqui, sob novos olhos. Podemos começar com uma definição bem simples e eficiente:

Um sistema de referência é um conjunto de réguas e relógio que nos permite medir distâncias e intervalos de tempo

Devemos visualizar estes conceitos em termos bem concretos. Por exemplo, três barras rígidas, definindo um sistema cartesiano de eixos, que podem ser tomadas de comprimento unitário, para medidas de coordenadas, e um relógio, para medida de tempo. Quando afirmamos que um carro se move a determinada velocidade, estamos medindo esta grandeza com relação a um determinado conjunto particular de réguas e relógio, isto é, a um determinado sistema de referência. Quase todos os conceitos da mecânica são fundamentados nas idéias de espaço e de tempo (ver Análise Dimensional) e consequentemente dependem do referencial utilizado.

Por exemplo, imagine dois carros, A e B, cada um com uma certa velocidade em relação a um referencial parado na estrada que liga o Rio de Janeiro e São Paulo. Se ao invés de descrevermos o movimento destes dois carros usando este referencial, nós decidíssemos descrevê-lo em relação a um conjunto de réguas e relógios dentro de um dos carros, digamos o carro A, nós obteríamos valores para as grandezas típicas da mecânica (tais como posição, velocidade e momento) do carro B bem diferentes do primeiro caso. Entretanto, se ambos os carros andam em movimento retilíneo uniforme em relação ao referencial parado na estrada, os valores de algumas outras grandezas, como aceleração e força, se mantêm inalteradas quando passamos a descrever o movimento do carro B usando um referencial dentro do carro A.

Façamos então um exercício. Suponhamos dois referenciais, A e B, e uma partícula que, vista do referencial A, encontra-se em movimento retilíneo e uniforme. Qual será o movimento da partícula, vista do referencial B, se o referencial B estiver executando um movimento circular uniforme em torno de A?

Vamos começar de uma forma simples e mais rigorosa. Vamos definir o eixo horizontal como a reta que é paralela ao movimento da partícula. Então, do referencial A, veríamos descrevendo uma reta paralela ao eixo $\hat{x}$, mantendo um valor y constante (cujo valor corresponde à distância entre a trajetória da partícula e a origem do referencial). No entanto, o referencial B, em movimento circular uniforme em torno de A, veria algo um pouco mais complicado, como na figura

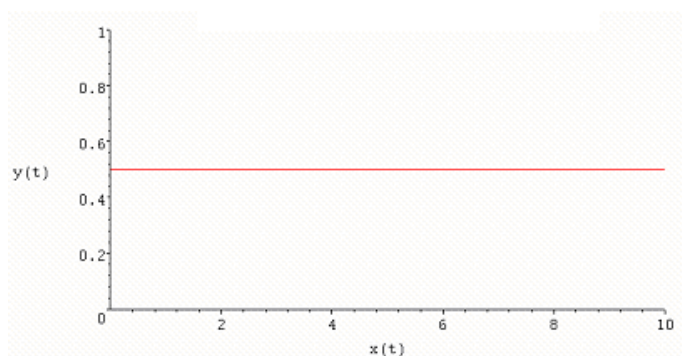


Figura A.1: Movimento horizontal de uma partícula visto de um referencial inercial

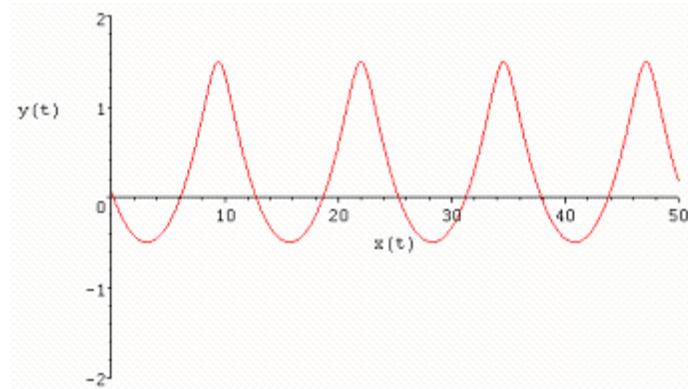


Figura A.2: Movimento horizontal de uma partícula visto de um referencial em movimento circular uniforme

A.2 Transformações de Galileu

Os resultados do exercício enunciado na seção anterior nos permitem concluir que mesmo na ausência de força resultante, o movimento de uma partícula não é retilíneo e uniforme quando visto por um referencial acelerado. Na verdade, dependendo da aceleração do referencial, este movimento pode ser bastante complicado. Essa análise é contraditória ao postulado da primeira lei de Newton, que afirma que na ausência de forças uma partícula executa um movimento retilíneo e uniforme. Isso é o que exige a inclusão de "forças fantasma" em certos referenciais, conforme já explicamos no volume II.

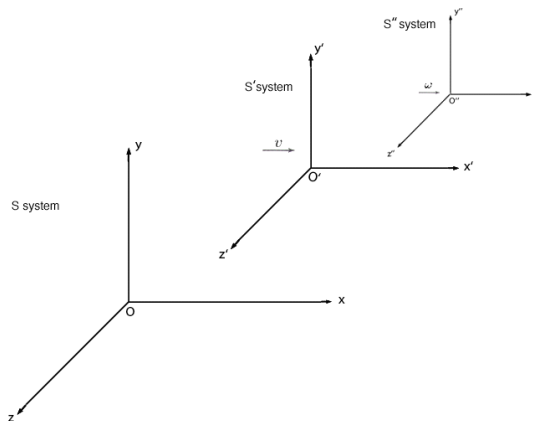
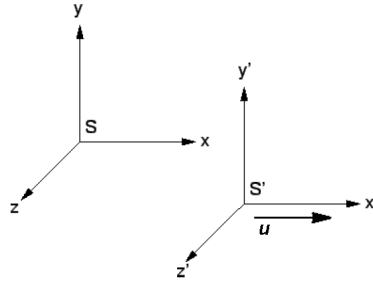


Figura A.3: três referenciais inerciais S , S' e S'' observam o movimento dos corpos no mundo. Devemos enunciar uma maneira de comparar as medições (x, y, z, t) , feitas por S , com as medições (x', y', z', t') feitas por S' e com as medições (x'', y'', z'', t'') , feitas por S'' .

Para prosseguirmos nossa discussão sobre a relação entre diferentes referenciais, vamos estabelecer a maneira pela qual diferentes referenciais inerciais relacionam entre si suas medidas de distância e tempo. É preciso existir uma receita que permita relacionar as medições de B com as medições de A para podermos compará-los. Esta tradução é feita através das TRANSFORMAÇÕES DE GALILEU.

Sejam dois referenciais inerciais S e S' com suas respectivas réguas e relógios (x, y, z, t) e (x', y', z', t') e suponhamos que S' tem velocidade constante u em relação a S , na direção do eixo



x. Então as Transformações de Galileu afirmam que as coordenadas de S são transformadas para as coordenadas de S' da seguinte forma:

$$x' = x - ut \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = t$$

Repare que a escolha do eixo x foi totalmente arbitrárias. Na verdade, podemos dizer que *definimos* o eixo x, nos dois referenciais, na reta em que está a velocidade relativa entre S e S'. Assim, de maneira mais simples, isso só quer dizer o intuitivo e óbvio que, ao medir a posição de um objeto em S' a partir de S, temos que subtrair a distância percorrida por S' (visto de S). Mas é importante formalizarmos isso porque as coisas se tornarão menos intuitivas em breve.

Suponha agora que uma partícula com coordenadas (x, y, z, t) em S, esteja em movimento retilíneo e uniforme, com velocidade $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$ com respeito a S. Vamos demonstrar que ela também está em movimento retilíneo e uniforme com respeito a S'.

Para isso, lembremos que para medir uma velocidade, precisamos marcar as coordenadas de um corpo em dois instantes diferentes, digamos (x_1, y_1, z_1, t_1) e (x_2, y_2, z_2, t_2) . Com isso, calculamos a velocidade média em cada um dos três eixos, dando-nos um vetor da velocidade média no espaço. Além disso, a velocidade instantânea nada mais é que a velocidade média em um intervalo muito pequeno, em que o instante final se aproxima bastante do instante inicial. Em termos algébricos:

$$\vec{v} = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}, \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1}, \frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \right)$$

ou

$$v_x = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \right)$$

$$v_y = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \right)$$

$$v_z = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \right)$$

Vejamos então, componente a componente, a velocidade da partícula no referencial S'.

$$\begin{aligned} v'_x &= \lim_{t'_2 \rightarrow t'_1} \left(\frac{x'_2 - x'_1}{t'_2 - t'_1} \right) \\ &= \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{(x_2 - u \cdot t_2) - (x_1 - u \cdot t_1)}{t_2 - t_1} \right) \\ &= \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \right) - u \cdot \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{t_2 - t_1}{t_2 - t_1} \right) \\ &= v_x - u \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v'_y &= \lim_{t'_2 \rightarrow t'_1} \left(\frac{y'_2 - y'_1}{t'_2 - t'_1} \right) \\
&= \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} \right) \\
&= v_y
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v'_z &= \lim_{t'_2 \rightarrow t'_1} \left(\frac{z'_2 - z'_1}{t'_2 - t'_1} \right) \\
&= \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \right) \\
&= v_z
\end{aligned}$$

E agora, por último, vamos calcular a aceleração da partícula no referencial S' .

$$\begin{aligned}
a'_x &= \lim_{t'_2 \rightarrow t'_1} \left(\frac{v'_{x2} - v'_{x1}}{t'_2 - t'_1} \right) = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{[v_{x2} - u] - [v_{x1} - u]}{t_2 - t_1} \right) = a_x = 0 \\
a'_y &= \lim_{t'_2 \rightarrow t'_1} \left(\frac{v'_{y2} - v'_{y1}}{t'_2 - t'_1} \right) = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{v_{y2} - v_{y1}}{t_2 - t_1} \right) = a_y = 0 \\
a'_z &= \lim_{t'_2 \rightarrow t'_1} \left(\frac{v'_{z2} - v'_{z1}}{t'_2 - t'_1} \right) = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \left(\frac{v_{z2} - v_{z1}}{t_2 - t_1} \right) = a_z = 0
\end{aligned}$$

Donde concluímos que, se uma partícula está em movimento inercial (i.e., retilíneo e uniforme) em relação a S , então ela também o está em relação a S' . Assim, sendo construídas em um referencial inercial, as Leis de Newton valem então para todos os outros referenciais inerciais existentes!

A.3 Newton, Maxwell e Lorentz

O objetivo desta seção consiste em discutir uma incompatibilidade teórica entre a mecânica newtoniana e o eletromagnetismo de Maxwell, que irá modificar de maneira profunda a maneira pela qual referenciais inerciais relacionam entre si suas medidas de tempo e distância. Na seção anterior vimos que a velocidade de um certo corpo depende do referencial que o observa – não tendo, então, caráter absoluto – mas o eletromagnetismo trata a velocidade da luz como uma constante da natureza, sendo independente do referencial que a observa¹!

Esse tratamento entra em franca contradição com as transformações de Galileu; não pode haver uma velocidade absoluta! Vejamos: se a luz é observada a uma velocidade qualquer, digamos $c_s \hat{x}$, em um referencial S , então, em relação a um outro referencial S' (que tem velocidade $v \hat{x}$ com relação a S), de acordo com as fórmulas apresentadas na seção anterior, a luz terá uma velocidade de propagação $c_{s'} = c_s - v$.

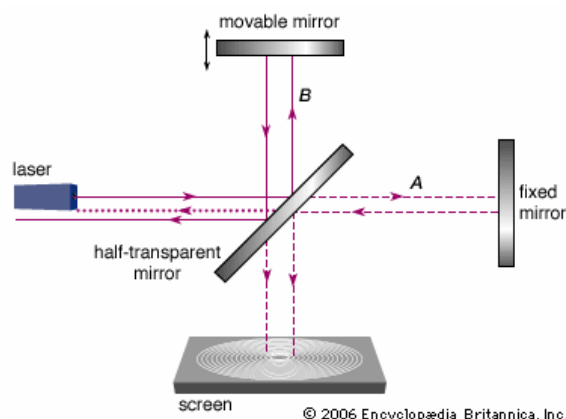
Para a mecânica clássica, uma onda é um movimento oscilatório que se propaga em algum meio – como as ondas sonoras que se propagam no ar. Neste último caso, o referencial do ar é naturalmente privilegiado em relação a outros referenciais e o valor da velocidade do som, igual a 300 m/s, é válido apenas nesse referencial especial. Mas o que acontece com a luz, que percorre muitos anos-luz, sozinha, no espaço escuro, até chegar até nós? Por esse ponto de vista, é natural

¹Veja essa discussão mais detalhada no capítulo de Luz do Volume IV.

supor a existência de um meio material muito sutil, que não interage gravitacionalmente, mas no qual a luz se propaga. Ele ficou conhecido como ÉTER LUMINÍFERO.

O eletromagnetismo, ao contrário, defende que a luz é capaz de se propagar no vácuo absoluto, através de vibrações de uma entidade física de natureza muito distinta do éter: o campo eletromagnético. Nesse contexto, nenhum referencial inercial é privilegiado e todos deveriam observar a luz com velocidade constante e igual a trezentos mil quilômetros por segundo. Mais: se referenciais diferentes medirem valores diferentes para a velocidade da luz, as Leis de Maxwell (que têm c como uma constante) ficam diferentes em cada referencial.

O problema é resumido (e resolvido) em um famoso experimento para medir a velocidade da luz: o Interferômetro de Michelson-Morley.



© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

Acima, um esquema de um aparato capaz de reproduzir a experiência de Michelson-Morley. O feixe de laser incide em um espelho que reflete 50% da intensidade da luz e transmite outros 50%. Tanto o feixe A quanto o B retornam ao espelho original após serem refletidos por espelhos auxiliares, tendo novamente 50% das suas intensidades refletidas e 50% transmitidas. Uma tela compara os feixes originados de A e B na busca por padrões de interferência. Se a teoria eletromagnética estiver certa, nenhum padrão de interferência será observado: os feixes chegarão rigorosamente ao mesmo tempo.

Na página (http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/mmexpt6.htm) existe uma animação que possibilita o visitante refazer este experimento supondo várias condições para a velocidade do éter em relação ao referencial do laboratório.

A física subjacente à experiência de Michelson-Morley é simples e ao mesmo tempo capaz de testar a validade das transformações de Galileu. Se a interpretação mecânica estiver correta, existindo um meio, o éter, no qual a luz se propaga, então ela possuirá velocidade c apenas no referencial co-móvel a este meio.

O que as transformações de Galileu nos fazem esperar é o seguinte: existindo uma velocidade v horizontal entre o referencial do éter e do laboratório, o feixe A terá sua velocidade perturbada. Indo do espelho principal ao secundário, ele se propagará com velocidade $\vec{c} = (\tilde{c} + v, 0)$; refletido e voltando dele, virá com velocidade $\vec{c} = (\tilde{c} - v, 0)$. O índice $\tilde{c}$ indica o valor da velocidade da luz no referencial do laboratório. Supondo que a distância entre os dois espelhos é igual a l_1 , o tempo necessário para percorrer esse trajeto é, no referencial do laboratório, igual a:

$$t = \frac{l_1}{\tilde{c}_{ida}} + \frac{l_1}{\tilde{c}_{volta}} = \frac{l_1}{c+v} + \frac{l_1}{c-v} = \frac{2l_1}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

O feixe B, por sua vez, se propaga no referencial do laboratório na direção perpendicular a do feixe A. Visto do referencial do éter, este feixe percorre uma trajetória oblíqua. A intensidade da velocidade da luz resultante é igual a $\vec{c} = (v, \tilde{c})$ na ida e $\vec{c} = (v, -\tilde{c})$ na volta e a distância entre os espelhos, principal e secundário, é l_2 . O tempo t , no referencial do laboratório, gasto neste percurso é igual a

$$t = \frac{2l_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l_2}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Entretanto, caso a luz não se propague como uma onda mecânica, mas de acordo com a teoria eletromagnética de Maxwell, não haverá diferença no tempo de chegada entre os feixes A e B. Considerando o Sol em repouso com o suposto éter, nós podemos considerar a velocidade v igual a 30km/s , que é a velocidade média de translação do nosso planeta. É essa última conclusão que o experimento suporta: que a luz tem a mesma velocidade para todos os referenciais.

Esta natureza absoluta do valor de pelo menos uma velocidade na natureza (a da luz) exige que os referenciais inerciais comparem suas medidas de tempo e distância por uma nova receita, diferente das Transformações de Galileu. Este novo conjunto de regras é conhecido como TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ e elas irão modificar de maneira profunda nossa concepção a respeito da natureza do espaço e do tempo.

A principal diferença a partir de agora é que o espaço e o tempo deixam de ter o seu significado absoluto, com o qual estamos acostumados. O tempo se torna relativo e passa a depender do referencial adotado. Para mostrar isso, vamos montar um relógio de luz num referencial S' , formado por dois espelhos separados por uma distância vertical L . Nós vamos enviar um pulso de luz a partir do primeiro espelho, que será refletido pelo segundo espelho e então retornará ao primeiro espelho. A figura A.4 mostra como o referencial S' , onde o relógio está em repouso, e um outro referencial S , onde o relógio se movimenta com velocidade v , observam esta sequência de fatos.

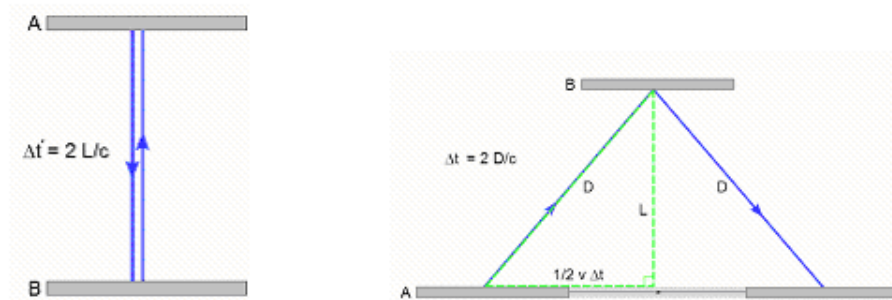


Figura A.4: Na imagem da esquerda, o caminho do pulso de luz visto no referencial S' , enquanto que na da direita observamos o pulso visto do referencial S . Ambos os comprimentos são denominados pela letra L porque não existe discrepância em medidas de distâncias nas direções perpendiculares ao movimento relativo entre S e S' .

O tempo $\Delta t'$ para o pulso de luz percorrer todo o caminho no referencial S' é igual a $\frac{2L}{c}$, enquanto o tempo Δt necessário para o pulso percorrer todo o caminho no referencial S é igual a $\frac{2D}{c}$. Como, claramente, $D > L$, chegamos ao estranho resultado de que $\Delta t > \Delta t'$, ou seja, referenciais diferentes medem intervalos de tempo diferentes para um mesmo fenômeno!

Para encontrarmos uma exata relação entre os dois intervalos de tempo, podemos usar a relação trigonométrica:

$$D^2 = L^2 + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{4}$$

$$\frac{c^2 \cdot \Delta t^2}{4} = \frac{c^2 \cdot \Delta t'^2}{4} + \frac{v^2 \cdot \Delta t^2}{4}$$

$$(c^2 - v^2) \cdot \Delta t^2 = c^2 \cdot \Delta t'^2$$

E, finalmente:

$$\Delta t = \Delta t' \cdot \sqrt{\frac{c^2}{c^2 - v^2}}$$

ou

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Esse fenômeno é conhecido como DILATAÇÃO TEMPORAL, porque, como se pode ver pela equação, os relógios de referenciais em movimento marcam intervalos de tempo maiores que os relógios em repouso em relação ao fenômeno (que marcam o que podemos chamar de *tempo próprio* do fenômeno).

Além disso, essa diferença nas marcações de tempo se torna tão maior quanto mais próxima da velocidade da luz estiver o movimento. Assim, um viajante que viajasse a uma velocidade próxima a da luz (relativística) pareceria envelhecer mais lentamente do que alguém que ficasse parado; do ponto de vista do viajante, ele diria que "viajou para o futuro".

Além do tempo, também as medidas de comprimento se tornam relativas. Com as transformações de Galileu, as medidas de posição já eram relativas, dependentes de onde fixamos a origem do sistema; as medidas de velocidade também eram, dependendo da velocidade própria do referencial. Mas uma barra de dois metros permanece sendo, em qualquer referencial, independente da sua posição e velocidade, uma barra de dois metros. Isso acontece porque os *intervalos de espaço* são absolutos, pois os efeitos causados pelo movimento do referencial se anulam, quando se subtrai duas medidas de espaço.

Contudo, isso não acontece mais nas novas transformações. Para demonstrar isso, vamos trabalhar novamente com o conjunto de dois espelhos, mas suponha dessa vez que eles estejam na horizontal, no sentido do seu movimento. Um pulso de luz partirá de um espelho, refletirá no outro e voltará para o primeiro espelho. Esses eventos serão vistos por dois observadores, o primeiro em um referencial S em que o conjunto de espelhos possui velocidade v e o outro em um referencial S' , onde os espelhos estão em repouso.

No referencial S' o tempo gasto pelo pulso de luz pode ser facilmente relacionado com a distância percorrida:

$$\Delta t' = \frac{2L'}{c}$$

E no referencial S a relação dependerá da velocidade do conjunto de espelhos:

$$\Delta t = \Delta t_{ida} + \Delta t_{volta} = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} = \frac{2L}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

Como já foi demonstrado, as medições de tempo divergem entre dois referenciais em movimento relativo e podem ser relacionadas pela expressão:

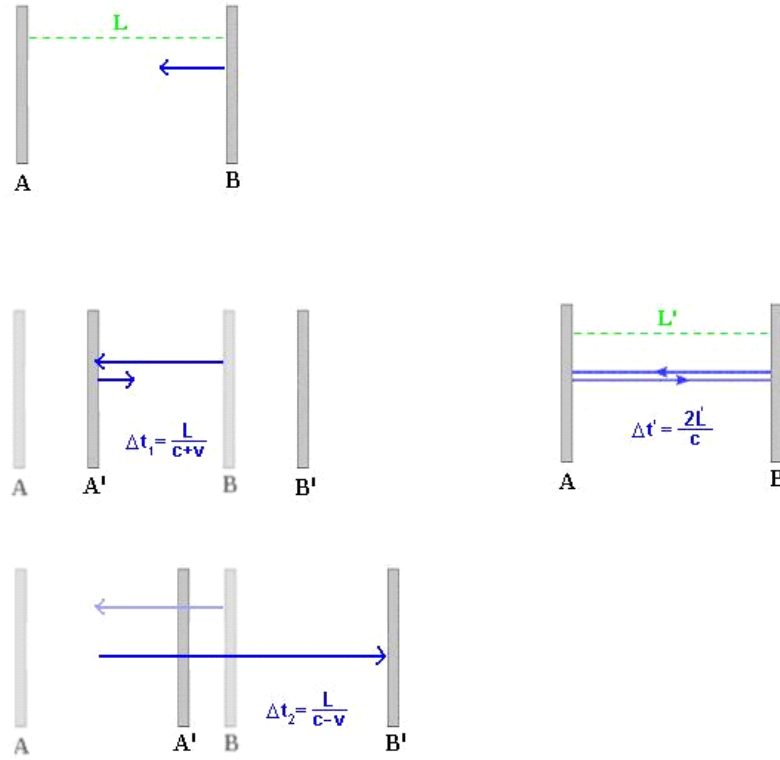


Figura A.5: O caminho do pulso de luz visto pelos dois referenciais: à esquerda, no referencial S com os espelhos em movimento e à direita, no referencial S' com o espelho em repouso.

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Substituindo as expressões de tempo em ambos os referenciais:

$$\frac{2L}{c \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = \frac{2L'}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$L = L' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Os referenciais também não concordam quanto a medida de comprimento. Novamente, apesar das medições de comprimento divergirem entre dois referenciais em movimento relativo, leis físicas que sejam equivalentes em todos os referenciais inerciais devem afirmar, necessariamente, que ambos os estão corretos. O valor das medidas de comprimento não são mais absolutos, dependendo agora do estado de movimento de quem observa as partículas do mundo. Para completar nossa análise, é simples demonstrar que, nas direções perpendiculares ao movimento relativo, não existe divergência nas medidas de comprimento.

Podemos resumir a relatividade das medidas de distância e tempo da seguinte maneira: Dados dois referenciais, S e S' , a transformação dos intervalos de comprimento e de tempo entre os

referenciais obedece às seguintes equações:

$$\Delta t_S = \frac{\Delta t_{S'}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad L_S = L_{S'} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

onde v é a velocidade relativa entre os referenciais S e S' . O que nos leva às já citadas **TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ**: Se dois referenciais inerciais S e S' com suas respectivas réguas e relógios (x, y, z, t) e (x', y', z', t') observam o movimento dos corpos na natureza, e se S' possui uma velocidade v , digamos na direção do eixo x , em relação a S , então as Transformações de Lorentz afirmam que:

$$x' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (x - vt) \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

Para deixar a notação mais condensada, podemos escrever as transformações em forma matricial. Assim, sendo dois referenciais com velocidade relativa v ao longo dos seus eixos x , o vetor (x, y, z, t) é transformado no vetor (t', x', y', z', t') , segundo as Transformações de Galileu, como:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -v \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}$$

E, segundo as Transformações de Lorentz, como:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} & 0 & 0 & \frac{-v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{-\frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}$$

Repare que a última transformação é de certa forma mais simétrica: as medidas de t são modificadas por x , da mesma maneira que as medidas em x são modificadas por t (como já era na de Galileu). Além disso, todos os valores são divididos por $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$, aquele fator que é responsável

pelas expansões e contrações espaço-temporais. Repare que este fator é aproximadamente igual a 1, quando v é muito menor que c . É assim que os efeitos relativísticos não se fazem sentir no nosso cotidiano. Voltaremos a isso; por ora, batizemos esse fator de γ , de forma que a transformação pode ser escrita, de forma mais leve, como:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ t' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & 0 & 0 & -v \cdot \gamma \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{vx}{c^2} \cdot \gamma & 0 & 0 & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}$$

Demonstrado como comprimentos e intervalos de tempo medidos por diferentes referenciais são relacionados, podemos usar as transformações de Lorentz para também transformar velocidades de uma partícula. Supondo a existência de dois referenciais, S e S' com velocidade relativa v entre si, na direção horizontal, e supondo que em S' a velocidade de uma partícula é igual a $\vec{u}'$:

COMPONENTE X

$$\begin{aligned}
u'_x &= \frac{\Delta x'}{\Delta t'} = \frac{\frac{(\Delta x - v\Delta t)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}}{\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(\Delta t - \frac{v\Delta x}{c^2} \right)} \\
&= \frac{(\Delta x - v\Delta t)}{\left(\Delta t - \frac{v\Delta x}{c^2} \right)} = \frac{\left(\frac{\Delta x}{\Delta t} - v \right)}{1 - \frac{v\Delta x}{c^2 \Delta t}} \\
&= \frac{(u_x - v)}{\left(1 - \frac{vu_x}{c^2} \right)}
\end{aligned}$$

COMPONENTE Y

$$\begin{aligned}
u'_y &= \frac{\Delta y'}{\Delta t'} \\
&= \frac{\Delta y}{\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(\Delta t - \frac{v\Delta x}{c^2} \right)} = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta t}}{\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(1 - \frac{vu_x}{c^2} \right)} \\
&= \frac{u_y}{\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(1 - \frac{vu_x}{c^2} \right)}
\end{aligned}$$

COMPONENTE Z

$$\begin{aligned}
u'_z &= \frac{\Delta z'}{\Delta t'} \\
&= \frac{\Delta z}{\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(\Delta t - \frac{v\Delta x}{c^2} \right)} = \frac{\frac{\Delta z}{\Delta t}}{\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(1 - \frac{vu_x}{c^2} \right)} \\
&= \frac{u_z}{\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(1 - \frac{vu_x}{c^2} \right)}
\end{aligned}$$

É interessante observar que mesmo componentes perpendiculares a direção da velocidade relativa entre os referenciais sofrem modificações; isto se deve puramente ao efeito de mudança nos intervalos de tempo.

Aqui uma pergunta que podemos fazer é: Será que para uma velocidade u , medida em S e menor que a velocidade da luz, existe uma velocidade v , menor que a velocidade da luz, tal que S' o observará com velocidade maior que a da luz? A resposta é não! Para simplificar a prova, suponha que a componente nas direções y e z são iguais a zero.

$$u'_x = \frac{(u_x - v)}{\left(1 - \frac{vu_x}{c^2} \right)} = c^2 \frac{(u_x - v)}{(c^2 - vu_x)} \leq c^2 \frac{(u_x)}{(c^2 - vu_x)} \leq \frac{c^3}{(c^2 - vu_x)} \leq c$$

Outra pergunta interessante: caso S meça $u_x = c$, qual será a velocidade vista por S' . O postulado de Maxwell nos informa que também deve ser c . De fato,

$$u'_x = \frac{(u_x - v)}{\left(1 - \frac{vu_x}{c^2} \right)} = \frac{(c - v)}{\left(1 - \frac{vc}{c^2} \right)} = c \frac{\left(1 - \frac{v}{c} \right)}{\left(1 - \frac{v}{c} \right)} = c$$

Também outras grandezas físicas, construídas a partir de posições e velocidades, se tornam estranhas e diferentes. Ao estender a análise para as transformações na quantidade de movimento e na energia, veremos que esses valores se transformam também – e que, na verdade, as próprias medidas de *massa* se tornam mutáveis! De fato, é através dessa análise que chegamos à mais famosa equação de todas, $E = mc^2$. Mas isso ficará para uma próxima edição.

A.4 A Construção do Espaço-Tempo

Na seção anterior, a universalidade da velocidade da luz nos obrigou a repensar a maneira pela qual diferentes referenciais inerciais relacionam entre si suas respectivas medidas de comprimento e tempo. Na relatividade restrita, medidas de tempo e espaço não são mais absolutas, mas relacionam-se entre si e são dilatadas ou comprimidas, relativamente à velocidade entre os referenciais inerciais. Assim, as medidas temporais passam a se transformar da mesma forma que medidas espaciais; mais do que isso, temos que tratá-las juntas, já que elas estão relacionadas. Essa é a intuição física que esperamos. Agora sigamos desenvolvendo as ferramentas matemáticas para suportar essa intuição.

Para analisarmos esta estrutura geométrica conhecida como ESPAÇO-TEMPO DE MINKOWSKI, vamos imaginar observadores em dois referenciais S e S' observando uma lâmpada emitir um flash. Como a velocidade da luz é constante, ambos os observadores verão uma onda esférica de luz se expandir com a mesma velocidade, e nós poderemos relacionar as coordenadas² dessa onda em cada referencial.

Considerando (x, y, z, t) como coordenadas da frente de onda esférica em S e (x', y', z', t') como coordenadas dessa mesma frente em S' :

$$\begin{cases} c^2 t^2 = x^2 + y^2 + z^2 \\ c^2 t'^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0 \\ x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0 \end{cases}$$

Donde podemos concluir que para um frente de luz,

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2$$

Agora vamos à geometria. Uma das melhores maneiras de visualizar movimentos ainda é a de Descartes, ou melhor dizendo, do seu plano cartesiano. Então podemos estender essa idéia, desenhando um plano quadridimensional para estudarmos movimentos no espaço-tempo. Contudo, como discutido no apêndice anterior, nossos cérebros têm sérias dificuldades com desenhos quadridimensionais; então podemos fazer algo simplificado, bidimensional, representando só os eixos x e t . Um exemplo de gráfico desse tipo está na figura A.6.

Existe um outro postulado importante da relatividade restrita que não foi claramente explicitado na seção anterior: que a velocidade da luz, além de ser constante para qualquer referencial, também é a maior que pode ser atingida. Ou seja, existe um certo tempo para a “conexão” entre dois pontos no espaço, antes do qual nada que ocorra em um ponto poderá interferir nos acontecimentos de outro ponto. Na relatividade restrita, as relações de causa e efeito não podem acontecer imediatamente: elas são separadas pelo tempo em que a informação (sob qualquer forma que seja) leva para se propagar entre dois pontos.

Para visualizar melhor o problema, podemos usar o nosso plano do espaço-tempo, mas agora com 3 coordenadas (x, y, t) , obedecendo a igualdade deduzida mais acima, no caso em que $z = 0$. Neste caso, o nosso problema da “expansão de uma onda esférica” seria visto como a “expansão

²Para quem tiver dificuldades em estabelecer as coordenadas de uma onda esférica, lembramos que a distância entre dois pontos pode ser escrita como: $d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ e ainda que podemos escrever essa distância d como $c \cdot t$, chegando em: $c^2 t^2 = x^2 + y^2 + z^2$

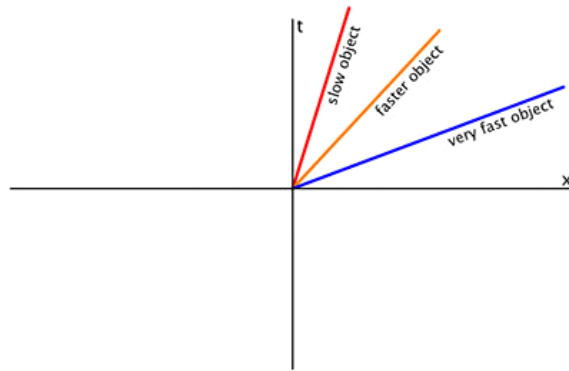


Figura A.6: Gráfico do espaço-tempo, com o eixo t na vertical (que é o modo mais comum de representar). Quanto mais horizontal a reta, maior a velocidade da partícula que realiza o movimento uniforme.

de uma onda circular”, em que em cada instante nós teríamos um “círculo de luz” maior, o que forma um cone, o famoso CONE DE LUZ.

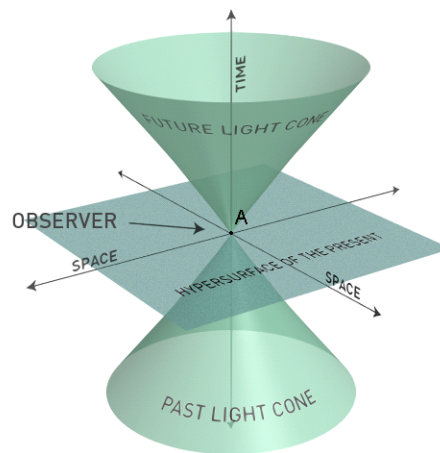


Figura A.7: Esquema de como conceitos de presente, passado e futuro de um evento, causalidade e não causalidade são visualizados de forma simples nessa visão geométrica da teoria da relatividade que está sendo construída ao longo desta seção. Esses desenhos descritos por uma coordenada temporal e todas as outras espaciais são conhecidos como diagramas de espaço-tempo.

Podemos identificar três regiões, de acordo com o nosso intuitivo conceito de passado, presente e futuro. A primeira região é formada por um plano onde se localiza o ponto A e onde a coordenada t é constante. Nela estão contidos todos os eventos simultâneos ao evento A , como se tivéssemos tirado uma fotografia: essa região representa o que chamamos de presente. Acima deste plano estão localizados pontos que determinam todos os eventos futuros a A e abaixo deste plano estão pontos que representam todos os eventos passados ao evento A . Pense nessa geometria como uma interpretação gráfica de todo o universo, em todos os instantes de tempo, cuja ligação entre dois pontos está limitada pela velocidade da luz. Neste momento surge uma pergunta interessante: Quais são os eventos do passado que podem ter influenciado o evento A e quais são os eventos do futuro que A poderá influenciar?

Quem responde essa pergunta é o cone desenhado pela equação de propagação da frente de luz. Dado que nenhuma informação pode viajar mais rápido que a luz, todos os pontos localizados fora do cone ou não podem ser influenciados por A , caso estejam no futuro, ou não puderam

influenciar A , caso estejam no passado. Apenas os pontos internos ao cone e que estejam localizados no passado podem ter influenciado A , assim como apenas os pontos internos ao cone e que estejam localizados no futuro podem ser influenciados por A . Matematicamente, a diferença entre estas regiões onde existe causalidade e onde não existe causalidade com o evento A envolve as seguintes desigualdades:

$$\begin{aligned} \text{Região onde existe causalidade envolvendo o evento } A: & \quad x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 < 0 \\ \text{Região onde não existe causalidade envolvendo o evento } A: & \quad x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 > 0 \end{aligned}$$

Esta é uma restrição forte e que gera um interessante problema para a cosmologia. Como vimos, a cosmologia supõe que o universo é aproximadamente homogêneo e isotrópico quando visto em escalas muito grandes, da ordem de grandeza do gigaparsec. Entretanto, de acordo com nosso melhor modelo, não houve tempo, desde a criação do cosmos, para a luz conectar fisicamente todas as regiões. Então, conexão causal, não faz sentido falar em equilíbrio térmico do universo. Nesse caso, é quase um milagre que sua temperatura seja praticamente homogênea³.

A partir da definição das regiões de causalidade, podemos inferir se dois eventos quaisquer podem se influenciar olhando apenas suas coordenadas. Dados dois eventos, A e B , com coordenadas (x_1, y_1, z_1, t_1) e (x_2, y_2, z_2, t_2) e com $t_2 < t_1$, o evento A poderá influenciar a dinâmica do evento B se e somente se $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2 \leq 0$. O mesmo vale para $t_1 < t_2$, onde neste caso B poderá influenciar A se e somente se a desigualdade acima também for satisfeita.

Toda essa discussão nos sugeriu conferir ao termo $(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2$ um sentido geométrico. No caso de um feixe de luz, já demonstramos que o valor desta expressão de fato independe do referencial a ser utilizado. Definiremos, assim, a “distância” entre dois pontos no espaço de coordenadas como:

$$L^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 - c^2(t_2 - t_1)^2$$

Onde é (x_1, y_1, z_1, t_1) , representam as coordenadas do primeiro evento e (x_2, y_2, z_2, t_2) , representam as coordenadas do segundo evento. Essa definição de distância pode parecer um pouco estranha, já que o lado direito da equação pode até ser negativo e certas distâncias serão representadas por números imaginários! Mas, apesar dessa estranheza, essa definição garante algumas propriedades interessantes. A primeira nós já vimos: ela vale para todos os referenciais. Além disso, a distância entre dois pontos ligados por um feixe de luz é sempre zero. As distâncias imaginárias são aquelas sem conexão causal, enquanto as distâncias que sejam números reais são interiores aos cones de luz. Além disso, é fácil perceber que, a distância entre dois pontos que estejam em um mesmo instante ($\Delta t = 0$) é a forma usual, da geometria euclidiana, de medir distâncias – o que prova que nossa forma de medir é uma generalização da forma usual, para um conjunto mais amplo de possibilidades.

Fica para uma próxima versão uma exploração melhor dessa idéia; por enquanto, você pode ir brincando em casa.

A.5 Mecânica Newtoniana como caso limite

A relatividade especial representa o fim da teoria newtoniana? O nosso senso comum a respeito do funcionamento do mundo responde intuitivamente que não. Quando viajamos de avião

³Existe uma teoria mais recente que tenta explicar esse equilíbrio: a teoria da INFLAÇÃO CÓSMICA diz que, em seus instantes iniciais, o universo teria sofrido uma curta fase de inflação, que teria elevado exponencialmente seu horizonte; com isso, regiões que hoje nos parecem desconectadas teriam, antes desta fase, tido tempo de se homogeneizar

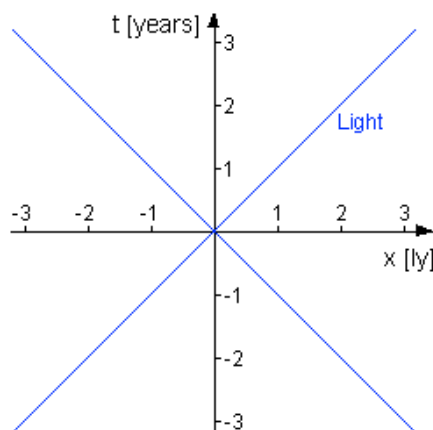


Figura A.8: Olhando o novamente para o cone de luz, só que agora fatiando ele por um plano perpendicular ao plano XY , iremos observar duas retas inclinadas. Todos os pontos ao longo de cada uma dessas retas têm distância zero segundo a nossa nova definição.

ou carro no nosso dia a dia, nós não observamos mudanças na velocidade com que nossos relógios marcam o tempo quando os comparamos, no início e fim da viagem, as horas com amigos e parentes que permanecerem o tempo todo em repouso. Tampouco observamos mudanças no comprimento dos objetos. As empresas responsáveis pelo fornecimento de transporte ferroviário nas grandes cidades não sentem um aumento do consumo de energia elétrica devido ao aumento da massa inercial dos passageiros num trem acelerado.

Nosso dia a dia é regido pelas transformações de Galileu e a física tem que levar isso em conta na hora de modelar o mundo. Não vale dizer que todos os efeitos relativísticos estão ali, na nossa cara, e que nossos sentidos imperfeitos são incapazes de detectá-los. Isso significa em termos práticos, que a relatividade geral tem que ter como algum caso particular as leis de Newton.

Quando comparamos nosso mundo habitual com os fenômenos onde os efeitos relativísticos desempenham papel central – tal como meia vida de raios cósmicos e de partículas em velocidades altíssimas nos aceleradores ultra potentes – a diferença mais gritante é a magnitude das velocidades médias dos objetos quando comparadas com a velocidade da luz. Enquanto nossos carros e aviões nos aceleram a velocidades que sequer chegam a $0,1c$, os aceleradores são capazes de imprimir velocidades cuja magnitude alcança a incrível marca de $0,99c$. Postulamos, então, que a relatividade especial e todos os seus fenômenos derivados devem, no limite quando as velocidades são da ordem de 1% da velocidade da luz ou menores, ser indistinguíveis da mecânica newtoniana.

De fato, quando a razão (v/c) é menor que 0,1 as diferenças entre os valores fornecidos pelas transformações de Lorentz e de Galileu são, para efeitos práticos, imperceptíveis. A demonstração desse fato envolve uma matemática um pouco elaborada (séries de Taylor) mas convido o leitor a testar essa afirmativa numericamente. Supondo dois referenciais S e S' , com coordenadas (x, t) e (x', t') você pode começar calculando, para diferentes valores de coordenadas (x', t') a diferença dos valores fornecidos tanto por Lorentz quanto por Galileu para as coordenadas (x, t) . Outro cálculo interessante consiste em estimar numericamente a diferença da medida de intervalos de tempo e comprimento entre estes referenciais. Abaixo, desenhamos desenhar o gráfico do termo $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ que mostra de maneira clara o limite newtoniano da relatividade especial para baixas velocidades.

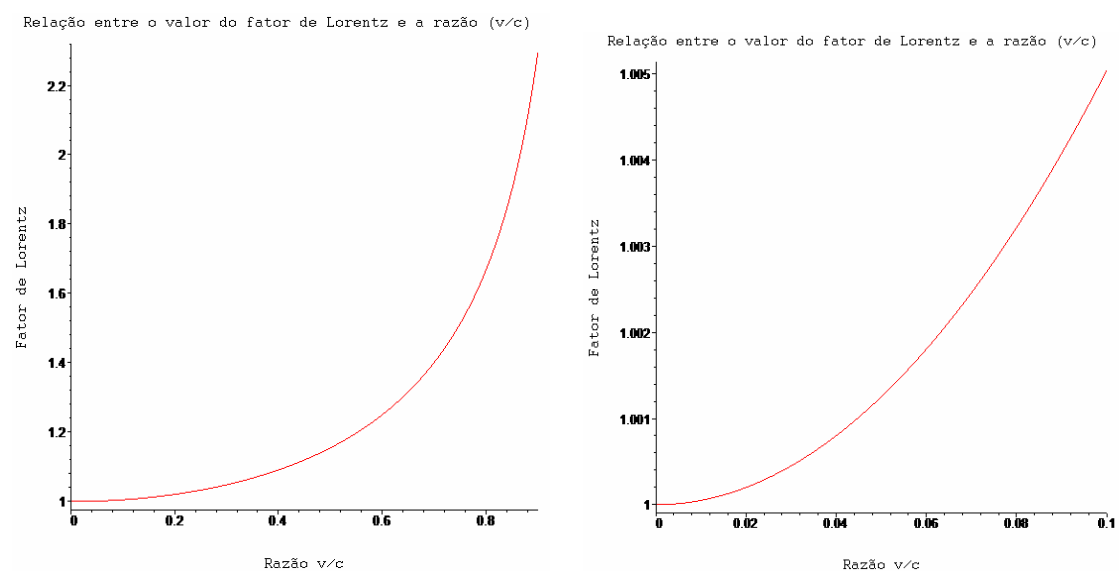


Figura A.9

Índice Remissivo

- aglomerados
 - de galáxias, 14, 61
 - estelares, 14
- Alpher, Ralph, 43
- Astrofísica, 79
- bósons, 55
- Bala, aglomerado da, 61
- Barenaked Ladies
 - The History of Everything*, 75
- Bethe, Hans, 43
- Big Bang, 43
- Big Crunch, 73
- Bruno, Giordano, 9
- Cantor, conjunto de, 10
- COBE, 48
- cone de luz, 111
- Consórcio de Virgo, 16
- constante
 - cosmológica, 35, 64
- cosmologia moderna, 35
- curva de rotação, 57
 - da Via Láctea, 58
- curvatura, 30, 39
- De Sitter
 - universo de, 36
 - Wilhelm, 20
- densidade crítica, 37
- Eddington, Arthur, 41
- Efeito Doppler, 19
- Einstein
 - Albert, 34, 99
- Einstein, Albert, 50
- energia escura, 64
- entropia, 56, 73
- espaço curvo, 29
- eter luminífero, 24, 104
- experimentos, 46
- fótons, 55
- fator de escala, 32, 66
- Feyerabend, Paul, 15
- forças - tipos, 54
- fractal, 10
- Friedmann
 - modelo, 37
 - primeira equação, 37, 39
 - segunda equação, 40, 63
- gás intergaláctico, 61
- Galileu, 34
- Gamow, George, 43
- glúons, 55
- grávitons, 55
- hipercubo, 26
- Hipparcos (satélite), 11
- homogeneidade e isotropia, 33
- Hubble
 - constante de, 19
 - Edwin, 10, 13
 - lei de
 - conceito, 19
 - generalizada, 22
 - linear, 19
- inflação cósmica, 112
- Kant, 23
- léptons, 55
- Leavitt, Henrieta, 12
- Leblond, Levy, 71
- Lemaître
 - Georges, 21
 - lei de, 21
- Lentes Gravitacionais, 60
- LHC, 46
- Maimônides
 - Guia dos Perplexos*, 8
- Mandelbrot, Benoît, 10
- matéria escura, 58

- meia-vida, 74
- Michelson-Morley
 - interferômetro de, 104
- Minkowski, espaço-tempo, 110
- modelo padrão
 - da cosmologia, 16, 38
 - das partículas elementares, 54
- multiverso, 74
- Nernst, Walther, 48
- Newton, 34
- Newton
 - Principia, 99
- observáveis, 39
- Olbers
 - paradoxo de, 10
- paralaxe
 - espectroscópica, 12
- partículas fundamentais, 54
- Penzias, Albert, 46
- planetário, 90
- Primack
 - esferas cósmicas, 69
 - Joel, 68
 - pirâmide da densidade cósmica, 69
- princípio
 - cosmológico Perfeito, 33
 - cosmológico perfeito, 45
 - de aumento da entropia, 56
 - de plenitude, 9
- quarks, 55
- Radiação Cósmica de Fundo, 46
- referencial, 99
- Regener, Erich, 48
- síntese primordial, 72
- Scheiner, Julius, 12
- Schrödinger, 54
- singularidade, 38, 71
- Slipher, Vesto, 20
- Sloan, 15
- supernovas Ia, 62, 64
- tensor, 35
- teoria das cordas, 54
- teoria de tudo, 15
- The Big Bang Theory (seriado), 75
- Transformações
 - de Lorentz, 108
- transformações
 - de Galileu, 101
 - de Lorentz, 105
- Universo
 - Estacionário, 44
 - Quase Estacionário, 48
- valor assintótico, 67
- viscosidade, 17
- Wells, H.G., 25
- Wilson, Robert, 46
- WMAP, 48
- Zwicky, Fritz, 21