

# Gravitação e cosmologia

Marcos D. Maia (IF/UnB)

Apresentamos um breve relato da área de gravitação e cosmologia após o surgimento do pensamento relativístico de Einstein. Incluímos breve histórico do desenvolvimento dessa área no Brasil, desde o fim da década de 1950 até o presente. Em particular, comentamos a importância da cosmologia experimental como base de uma nova ciência.

## Gravitação de Einstein

A concepção de um universo como espaço físico é bastante intuitiva e existem alusões a esse conceito desde a antiguidade. Em termos de documentação escrita, destacamos o texto de Lucrecio escrito em Roma em torno de 50 AEC (Lucretius Carus, 2008). Segundo ele, o universo que é composto de tudo o que conhecemos, não pode ter um contorno, pois se o tivesse, ele separaria o todo de algo externo, o que não é possível já que tudo o que é conhecido já faz parte do universo.

Daquele período pulamos diretamente para a idade média na Inglaterra, onde encontramos Thomas Bradwardine (c. 1295-1349) que sugeriu a possível existência de vários universos incluindo o nosso, cada um com um contorno, todos eles mergulhados em um vazio, compondo uma imagem do que chamaríamos hoje de um multiverso (Duhem, 1985).

Atualmente a nossa noção de universo se fundamenta no conceito de “variedade” (ou *Mannigfaltigkeit*) descrito pelo filósofo alemão Immanuel Kant em 1781. Uma variedade pode ser pensada como uma coleção de objetos e fenômenos observáveis, incluindo os próprios observadores com suas ferramentas e métodos de percepção (Kant, 2003). Eventualmente esse conceito nos conduziu à descrição atual do universo pela teoria do “espaço-tempo” (ver adiante) em grande escala, que se originou na teoria gravitacional de Einstein. Hoje temos uma ciência de precisão denominada **cosmologia** relativística, ou simplesmente **cosmologia**, que se consolidou como tal muito recentemente. Isso somente tornou-se possível depois dos avanços tecnológicos que permitiram a realização de medidas astronômicas profundas no espaço, usando telescópios em solo (ver **Astronomia terrestre**) e espaciais, operando em várias frequências do **espectro** eletromagnético. Tais medidas permitiram a descoberta de novos fenômenos até há pouco desconhecidos, conduzindo-nos a uma reavaliação de nossos conceitos atuais sobre os fundamentos da física e sobre o universo, conforme veremos a seguir.

Uma formalização matemática das variedades de Kant foi introduzida pelo matemático alemão Bernhard Riemann quase um século depois, no seu trabalho fundamental sobre geometria (Riemann, 1873). Riemann adicionou à ideia de variedade duas novas ferramentas necessárias para caracterizar a observação: uma “métrica” que dá uma noção de distância entre dois objetos da variedade e uma “topologia” que dá uma noção da forma local de um objeto. Com esses conceitos, um observador torna-se capaz de distinguir os tamanhos e diferenciar objetos, como uma galáxia de um átomo, bem como comparar suas formas.

A propriedade métrica da geometria de Riemann causou forte impacto na matemática desde o seu início, estabelecendo o que se considera hoje a geometria padrão, substituindo a geometria de Euclides e suas generalizações, como as geometrias de Lobachevsky e Bolyai. Por outro lado, o conceito de topologia está mais obscuro na apresentação original de Riemann, mas um pouco mais explícito no seu *Nachlass* tornado publico em 1876 em Leipzig e, posteriormente, com a publicação da análise detalhada feita por Veblen e Whitehead (Veblen and Whitehead, 1931; Scholz, 1999: 25).

Em 1916 Einstein introduziu uma simbiose entre a geometria de Riemann e a física, identificando a métrica de Riemann com o potencial gravitacional e substituindo o conceito de força gravitacional pelo de curvatura da variedade riemanniana, agora denominada espaço-tempo. Isso representou uma mudança conceitual extraordinária para a época, não somente porque generalizou a Relatividade Especial de 1905, mas principalmente por alterar a teoria newtoniana da gravitação, produzindo o que ele chamou de Relatividade Geral, como sendo a nova teoria da gravitação. A Relatividade Especial é um caso particular da Relatividade Geral quando a curvatura do espaço-tempo se anula. A gravitação newtoniana é também um limite da Relatividade Geral quando os movimentos se tornam de baixa velocidade relativamente à velocidade da luz e com a reintrodução do potencial estático newtoniano. O conceito relativista de Einstein introduziu uma “sociologia” no pensamento científico, através de uma seleção entre os observadores dada pela noção de simetria do espaço-tempo. Diferentemente do absolutismo newtoniano, o tempo passa a ser um parâmetro próprio de cada observador.

A Relatividade Especial é a teoria na qual se descreve a nossa conceituação atual das partículas elementares e de campos<sup>1</sup>. Ela é corroborada por sólida base experimental com observadores e observáveis definidos no **espaço-tempo de Minkowski** (Minkowski, 1923; Maia, 2011). Porém, a Relatividade Especial não inclui o campo gravitacional, o que foi feito na Relatividade Geral que possui ainda uma base experimental bastante limitada, sustentando-se principalmente nos chamados **testes clássicos**: o desvio da luz pela gravitação, o desvio gravitacional para o infravermelho e o avanço do periélio de Mercúrio.

---

<sup>1</sup> O conceito de campo é frequentemente atribuído a James Clerk Maxwell (1831-1879), depois que ele percebeu que o campo eletromagnético se propaga por si próprio mesmo no vácuo, independentemente da existência de um meio material. Matematicamente um campo corresponde a uma função de várias variáveis (campo escalar, como o campo gravitacional newtoniano), ou a um vetor função de várias variáveis (campo vetorial, como o campo eletromagnético) ou a uma matriz função de várias variáveis (um campo matricial), um tensor, um espinor e assim por diante. O campo gravitacional de Einstein é um campo tensorial.

A existência das **ondas gravitacionais** (ver o Capítulo “Ondas gravitacionais” neste Volume), que foi prevista pela teoria de Einstein, recebeu um suporte indireto com o importante trabalho de Hulse e Taylor sobre o **pulsar binário** PSR 1913+16 (Weisberg *et al.*, 1981), mas essas **ondas** ainda não foram detectadas diretamente (Camp and Cornish, 2009). Por outro lado, a teoria gravitacional de Einstein tem também encontrado dificuldades em explicar alguns efeitos gravitacionais observados na **astrofísica extragaláctica**, como a descrição das **curvas de rotação** de estrelas situadas nos braços das **galáxias espirais**, inclusive de estrelas da nossa própria **Galáxia**, bem como a **expansão acelerada** do universo.

Muitos consideram o maior desafio teórico da gravitação de Einstein a sua incompatibilidade com a teoria quântica. A importância da gravitação quântica está na necessidade de se tratar o efeito gravitacional ao mesmo nível das outras **forças fundamentais** (a eletromagnética e as nucleares), sob as mesmas condições dadas pela mecânica quântica, geralmente válida em pequenas escalas de comprimento. Supostamente, no universo primordial todos esses campos teriam exercido papel importante na explicação da formação de estruturas (partículas elementares, átomos, moléculas, nebulosas, estrelas e **galáxias**). Hoje podemos contar cerca de vinte diferentes propostas de teoria de gravitação quântica, quase todas elas válidas apenas no chamado **regime de Planck**, sem suporte experimental.

## Cosmologia relativística

Levando em conta as atuais observações, o universo concebido no contexto da Relatividade Geral é representado por uma solução das equações de Einstein<sup>2</sup>, onde se aplica o “Princípio Cosmológico”: segundo esse Princípio, na escala de distâncias espaciais do universo observado (não contando o tempo), a matéria é uniformemente distribuída em todas as regiões (isto é, um universo homogêneo sem estruturas isoladas) e em todas as direções (isto é, um universo **isotrópico**, sem direções privilegiadas). As **galáxias**, nebulosas, estrelas, planetas e satélites que vemos no céu são estruturas caracterizadas em uma escala local, muito menor que a escala cosmológica considerada acima e, portanto, são ig-

<sup>2</sup> Trata-se de um sistema de equações diferenciais de 2ª ordem composto por 13 equações, uma delas sendo não linear. O lado esquerdo dessa equação contém a geometria do espaço-tempo e o lado direito, a fonte material que produz a gravitação. Não existe força gravitacional e, em seu lugar, postula-se a curvatura do espaço-tempo. Devido à não-linearidade do sistema de equações, a teoria permite a existência de gravitação mesmo no vazio, sem fonte material.

noradas na escala estabelecida pelo Princípio Cosmológico. Essas estruturas foram formadas durante a evolução do universo, quando a homogeneidade e a isotropia deixam de valer. Mas isso ainda não está completamente entendido.

O primeiro modelo cosmológico relativístico foi sugerido pelo próprio Einstein, sob a suposição de que o universo sempre existiu e sempre existirá. Tal universo estático pode ser gerado por uma constante que Einstein denominou “constante cosmológica”, geralmente denotada pela letra grega  $\Lambda$ . Assim, em 1917 Einstein modificou a sua teoria gravitacional original, a Relatividade Geral, incluindo essa constante. Logo em seguida, em uma segunda publicação no mesmo ano, ele afirmou a sua célebre frase dizendo que a introdução daquela constante teria sido um erro, o maior de sua vida, e subsequentemente removeu aquela constante. Uma provável explicação para essa atitude é que a presença de  $\Lambda$  impede o surgimento do **espaço-tempo de Minkowski** como solução das equações da gravitação, tornando a teoria incompatível com a Relatividade Especial. Duas soluções das equações de Einstein modificadas pela presença de  $\Lambda$  são conhecidas como o universo de Sitter, gerado por um  $\Lambda$  positivo, e o universo anti-de Sitter tendo  $\Lambda$  negativo. Este último tem a propriedade de permitir a existência de linhas temporais fechadas. Isto é, a variável temporal nesse espaço-tempo forma um círculo, de modo que o tempo torna-se periódico (Hawking and Page, 1983), o que, em princípio, quebra o princípio de causa e efeito, um dos poucos guardiões remanescentes da lógica na construção de teorias.

O modelo considerado padrão da **cosmologia** relativística, conhecido pela sigla FLRW formada pelas iniciais dos seus autores, foi proposto independentemente durante um período de quinze anos (Friedmann, 1922; Lemaitre, 1933; Robertson, 1936 e Walker, 1937). Trata-se de uma solução das equações de Einstein originais (sem a constante cosmológica), com fonte material composta por um fluido perfeito, caracterizado por uma pressão proporcional à sua densidade. Essa solução é interessante porque prevê um universo que se originou em uma região muito densa e quente, a qual se expandiu como uma explosão termonuclear denominada por Lemaitre *Big Bang*<sup>3</sup>. A partir daquele instante inicial, a solução descreve um universo em expansão, como se constata pela observação do desvio para o vermelho da radiação de **galáxias** distantes.

<sup>3</sup> O modelo padrão da **cosmologia** e as medições da **radiação cósmica de fundo (CMBR)** indicam que o universo se originou em uma região pequena e muito quente no evento denominado *Big Bang*. Trata-se de uma singularidade para as equações de Einstein, que pode ter ocorrido há cerca de 13 bilhões de anos. Contrariamente ao que muitos pensam, uma singularidade de uma equação dinâmica não é um ponto, mas sim, uma região de convergência de curvas temporais. Ver, p. ex., Hawking and Ellis, 1973.

As medidas preliminares da **Radiação Cósmica de Fundo**, **CMBR** na sigla em inglês (Penzias and Wilson, 1965), dão um forte suporte experimental para o modelo padrão. Entretanto, até recentemente, a expectativa era de que a expansão deveria cessar pelo esfriamento natural do universo em expansão quando, então, a gravitação passaria a ter efeito dominante, causando uma contração do universo. Mas, em 1998 as observações de **supernovas** distantes do tipo Ia mostraram algo surpreendente: em vez de diminuir, a expansão do universo está aumentando aceleradamente. Até o presente não se sabe o que causa essa aceleração, mas ela passou a ser atribuída a uma entidade hipotética denominada “energia escura”. As estimativas mais recentes baseadas em nove anos de observação da sonda *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP) e, mais recentemente, do observatório espacial Planck, dizem que 68,3% da energia do universo é devida a essa energia escura (Komatsu *et al.*, 2011; Planck Collaboration, 2013). Ao tentarmos entender esse fenômeno, somos levados naturalmente à conclusão de que o universo se expande aceleradamente, procurando preencher aquele vazio imaginado por Bradwardine.

Uma possível explicação para a aceleração do universo pode ser obtida com a reintrodução da constante cosmológica de Einstein com uma nova interpretação. Usando a teoria quântica de campos, onde o vácuo é descrito como sendo o menor estado de energia dos campos (e, portanto, diferente do vazio clássico), as estimativas teóricas calculadas indicam que a energia do vácuo computada desde um período muito próximo ao *Big Bang*, teria estrutura formal semelhante à constante cosmológica de Einstein (Zeldovich and Novikov, 1983). Assim, é comum ouvirmos que a constante cosmológica é o mesmo que a energia do vácuo, que seria a responsável pela **expansão acelerada** do universo. Entretanto, o valor da constante cosmológica necessário para a aceleração do universo é muito menor que o valor calculado para a energia do vácuo. Ou seja, a energia do vácuo produziria uma aceleração absurdamente maior que a observada. A dificuldade reside no fato de que não se conhece meios dentro da teoria de campos ou da teoria gravitacional para reconciliar essa diferença. Isso ficou conhecido como o problema da constante cosmológica (Weinberg, 1987; Weinberg, 1989), que é considerado por muitos como sendo o mais difícil problema conceitual da física atual (Padmanabhan, 2003).

Outra explicação para a **expansão acelerada** do universo consiste em substituir, no lado direito das equações de Einstein, a constante cosmológica por uma função que decai com o tempo, atuando como fonte de gravitação repulsiva. Mas, as especulações sobre a **expansão acelerada** do universo

vão muito mais adiante, como exemplifica o persistente debate filosófico sobre o uso do Princípio Antrópico como solução do problema da constante cosmológica. Segundo esse Princípio, o nosso entendimento do universo somente é possível porque os valores das constantes fundamentais da física são apropriados à nossa existência. Para outros valores dessas constantes, a emergência de seres inteligentes poderia até ser possível, mas a percepção e o entendimento dos conceitos deles sobre o universo poderiam ser muito diferentes dos nossos. Assim aquele multiverso imaginado por Brdwardine seria composto de diferentes universos, cada um parametrizado por diferentes constantes fundamentais, com estruturas físicas distintas e, possivelmente, com civilizações estruturadas com diferentes percepções da realidade.

Outro problema gravitacional resultante das observações refere-se à velocidade orbital das estrelas em torno do núcleo de **galáxias espirais**. Essa velocidade é suficientemente elevada (em torno de 700 km/s para algumas **galáxias** típicas) para que as estrelas permaneçam em órbita graças à atração gravitacional produzida somente pela matéria visível que, supostamente, compõe aquelas **galáxias**. Então, em 1933 o astrônomo Fritz Zwicky, trabalhando nos observatórios de Monte Wilson e Palomar na Califórnia, sugeriu a existência de uma matéria adicional invisível (isto é, que não interage com o campo eletromagnético que descreve a luz), e cujo campo gravitacional se adicionaria ao da matéria comum, de modo a manter as estrelas em suas respectivas órbitas (Zwicky, 1933). Essa suposta matéria foi denominada “matéria escura” por Vera Rubin (Rubin, 1997). Sucede que, dentro do modelo padrão das partículas elementares e campos que compõem a matéria convencional relativística, tal matéria não existe. Originalmente pensou-se que a pequena massa dos **neutrinos** poderia explicar a matéria escura. Outra explicação considerada foi a de que existiriam planetas de grande diâmetro, formados de matéria ordinária, mas que estariam muito distante de estrelas para que pudessem ser detectados pela luz que refletissem. Entretanto, as atuais estimativas feitas com base nas medidas do observatório Planck mostram que a quantidade da suposta matéria escura corresponde a 26,8% da massa total do universo (contra apenas 4,9% de matéria ordinária estimada no universo), o que torna a hipótese da massa dos **neutrinos** ou dos planetas gigantes irrealista.

Por outro lado, em uma teoria de partículas mais ampla que a definida pelo mencionado modelo padrão, é admissível que essa exótica matéria escura de fato exista, mas possua uma interação muito fraca com a matéria ordinária e com o campo eletromagnético, tornando-se efetiva apenas quan-

do considerada em grandes quantidades, como nas **galáxias**. Tal concepção é chamada WIMP, sigla em inglês de *Weakly Interacting Massive Particles*. Entretanto, como a gravitação produzida pela matéria escura não segue as mesmas hipóteses feitas para o modelo cosmológico padrão (FLRW), i. é, as condições de isotropia e homogeneidade do Princípio Cosmológico, cogita-se que a matéria escura já existiria desde o início do universo e que, portanto, ela poderia ser responsável também pela formação de estruturas como nebulosas e **galáxias**, no universo primordial. Assim costuma-se ouvir que a matéria escura seria necessária para permitir a formação de estruturas em um estágio remoto do universo. Um grande número de simulações numéricas tem sido apresentado, mostrando como seria aquela matéria escura, por vezes com auxílio de efeitos cinematográficos de grande impacto, frequentemente deixando de salientar que se trata de uma mera simulação numérica.

Em outra vertente teórica, como o efeito observado da matéria escura é de natureza gravitacional, cogita-se também que o fenômeno da matéria escura denuncia uma deficiência da teoria gravitacional de Einstein, ou do seu limite newtoniano. Assim, existem estudos de modificação da teoria de Einstein que são capazes de explicar as **curvas de rotação** das **galáxias espirais**. Um modelo bastante conhecido é baseado em uma alteração da teoria de Newton e chama-se MOND (*Modified Newtonian Dynamics*), ou seja, uma modificação da dinâmica newtoniana.

Entre outras modificações propostas para a Relatividade Geral podemos citar um complexo modelo designado TeVeS (*Tensor-Vector-Scalar Gravity*), que é uma teoria relativística de gravitação envolvendo campos vetoriais e escalares, além do tradicional campo tensorial da teoria de Einstein (Milgrom, 1983; Bekenstein, 2004). Entretanto os dados observacionais apontam para um efeito gravitacional não relativístico, geralmente denominado matéria escura fria ou CDM, sigla de *Cold Dark Matter*, que é a designação do paradigma atual. Portanto, o problema da matéria escura é complexo, pois alia-se e coexiste com o problema da **expansão acelerada**. Este último tem, como única explicação aceita atualmente, a inexplicável constante cosmológica  $\Lambda$ . Assim, a sigla  $\Lambda$ CDM combina o paradigma mais amplo para a **expansão acelerada** do universo dada por  $\Lambda$ , e a formação de estruturas e a dinâmica das **galáxias** dada pela matéria escura não relativística (CDM).

Como se percebe, o repertório de virtudes e problemas teóricos e observacionais da **cosmologia** é bastante extenso e eles se misturam com os problemas e virtudes da teoria de partículas e campos (Ellis *et al.*, 1993; Goenner, 2010).

## Gravitação e cosmologia no Brasil

A história da física no Brasil mostra que, a partir da década de 1930, houve forte influência europeia em pesquisas na área de partículas e campos, notadamente na área de **raios cósmicos** (Moraes, 1994; Hamburguer, 2002; Lopes, 2004; ver também o Capítulo “Pesquisas em raios cósmicos”, neste Volume).

Mas, enquanto na Europa e na América do Norte, a gravitação de Einstein estava em pleno desenvolvimento entre 1916 e 1950, inclusive com o estudo de diferentes modelos cosmológicos, como o já mencionado modelo de Einstein-de Sitter, o modelo de universo em rotação de Milne (Milne, 1935), o modelo de Gödel (Gödel, 1949) e o atual modelo padrão, no Brasil, naquele mesmo período, o estudo sobre a gravitação de Einstein e a **cosmologia**, de modo geral era muito pouco disseminado (ver o Capítulo “Positivismo e utilidade da astronomia” no Volume I).

A primeira publicação brasileira sobre a teoria da relatividade, com o título “Introdução à Teoria da Relatividade” por Amoroso Costa (Costa, 1922; Eisenstaedt e Fabris, 2004), apareceu em 1922. Outra menos conhecida é devida a Pedro Rache, em Minas Gerais (Rache, 1932). Mas somente a partir da década de 1940 apareceram contribuições originais em **astrofísica**, como os trabalhos de Mário Schenberg e colaborações (Schoenberg, 1941; Gamow and Schoenberg, 1940; Gamow and Schoenberg, 1941 e Schönberg and Chandrasekhar, 1942) (ver “Mário Schenberg, pioneiro da astrofísica teórica brasileira” no Capítulo “Astrofísica” no Volume I).

Tomando o surgimento de programas acadêmicos de pesquisa e pós-graduação no Brasil como início da pesquisa sistemática em gravitação e **cosmologia**, somente no fim da década de 50 surgiu um programa dessa natureza na Universidade Federal do Paraná (UFPR), liderado por Hugo Frederico Kremer. O programa do professor Kremer foi bastante ativo, com a participação de pesquisadores brasileiros em estágios e congressos no exterior e contava com pesquisadores visitantes, como M. A. Tonnelat e S. Mavridés, do *Institute Henri Poincaré* de Paris. Infelizmente, em 1969, o programa foi abruptamente interrompido após o trágico falecimento do professor Kremer. Alguns participantes daquele programa, como José Plínio Baptista (1934-2006) e Antônio Brasil Batista, ou foram para o exterior ou outras instituições e, somente anos depois, se fixaram na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Vale lembrar que, naquela mesma época, a ciência brasileira nos institutos de pesquisa e universidades federais entrava num período crítico com o advento do golpe militar de 1964, quando muitos docentes e pesquisadores foram exonerados, presos ou exilados do país. Alguns centros de pesquisa que

estavam sendo implementados, foram fechados e posteriormente alterados, como foi o caso da Universidade de Brasília (UnB), criada em 1962 para ser o paradigma da modernização das universidades brasileiras.

O Instituto Central de Física da UnB inaugurou um programa de Física de **Altas Energias**, incluindo o convênio entre a UnB e o CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) sob a liderança de Roberto Salmeron. Esse programa da UnB inaugurou de modo efetivo o binômio ensino-pesquisa, e foi nesse clima que surgiu um grupo de estudos teóricos sob a liderança de Jayme Tiomno (1920-2011), que incluía a teoria de campos, gravitação e **cosmologia**, teoria e experimentos em partículas elementares e física nuclear.

Como sabemos, a experiência original da UnB durou muito pouco, com o fechamento da universidade em 1965. O ensino de graduação na UnB foi reaberto em 1966 com um novo corpo docente, em grande parte despreparado para ocupar as funções dos que tinham sido exonerados e, para piorar, a nova UnB tinha estrutura diferente da original. Posteriormente, a universidade que era uma fundação pública se tornou uma universidade federal, perdendo com isso o seu ímpeto original. Aquela longa noite sem estrelas, para usar as palavras de José Leite Lopes (1918-2006) (Hamburger, 2002), durou vinte anos e causou enorme prejuízo ao desenvolvimento da ciência brasileira como um todo (Salmeron, 2012).

Os estudantes que estavam em Brasília em 1965 tiveram que procurar outros orientadores para completar seus estudos. Entre aqueles, os que tinham interesse explícito em se dedicar à **cosmologia** e gravitação estavam Mario Novello que seguiu para Genebra, na Suíça, para estudar com I. M. Jauch, e o autor deste texto que seguiu para São Paulo em busca de orientação com Mario Schenberg<sup>4</sup>.

Apesar das dificuldades acadêmicas dos anos 60, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) fundados em 1951 continuavam ativos. Eram ainda instituições de pequeno porte comparadas às dimensões atuais (o CNPq sediado no Rio de Janeiro contava com poucas dezenas de

<sup>4</sup> Em 1966 procurei o professor Schenberg na USP para um programa de pós-graduação e fui informado que ele estava impedido de frequentar a Universidade, mas que ele poderia me atender na sua residência. Lá ele me apresentou a um oficial de justiça que estava na sala sentado, tomando um cafezinho. Ele me disse que aquela pessoa estava lá para prendê-lo e que, portanto, somente poderia me orientar se eu também fosse preso, na mesma cadeia. Quem salvou a situação foi a esposa de Schenberg ao chegar da feira segurando um peixe embrulhado em um jornal. Ela interrompeu a conversa e me pediu para ver o olho do peixe e se, na minha opinião, ele estaria fresco. Assustado, disse que não entendia muito de peixes. Fiquei mudo por um instante e disse que o momento não parecia apropriado e que retornaria depois. No mesmo dia segui para o Rio de Janeiro e infelizmente nunca retornei.

funcionários). Essas instituições financiavam professores visitantes estrangeiros, concediam bolsas de mestrado e doutorado, e promoviam eventos científicos.

No Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) do Rio de Janeiro, em 1966 Colber Gonçalves Oliveira (1931-1985) retornava do seu doutorado em Syracuse, NY, e naquele mesmo ano iniciou o segundo programa de pós-graduação efetivo em gravitação e **cosmologia** no Brasil, após o efêmero início no Paraná. Mas, de fato, foi no programa do CBPF que Colber Oliveira começou a orientação sistemática de mestres e doutores em gravitação e **cosmologia**, como os mestrados de Nilton O. Santos, Nazira Tamimura e Ivano Soares entre muitos outros que se seguiram.

Após o fechamento da UnB, Jayme Tiomno permaneceu temporariamente no Brasil como professor titular na USP, mas em 1971 migrou para a Universidade de Princeton, EUA, regressando em 1973 para a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/RJ), a convite de Antonio Luciano L. Videira. A PUC/RJ desempenhou papel importante na manutenção das pesquisas em toda a física teórica no Brasil durante o período militar. Por se tratar de instituição particular, ela acolheu diversos pesquisadores que, por motivos políticos e até salariais, saíram do CBPF. Assim, a PUC/RJ tinha condições de produzir importantes contribuições, convidar visitantes estrangeiros para seminários, *workshops* e minicursos em todas as áreas da física. Sob tais condições favoráveis, Erasmo Madureira Ferreira realizou na PUC/RJ uma série anual de eventos, o “Simpósio Brasileiro de Física Teórica”. Na sua primeira edição em 1969, Silvestre Ragusa apresentou um minicurso sobre gravitação e Leite Lopes outro minicurso sobre simetrias. Na edição de 1970 Jayme Tiomno apresentou um segundo minicurso sobre gravitação.

As pesquisas em gravitação e **cosmologia** na Universidade de São Paulo (USP) iniciaram na década de 1940 com Mário Schenberg, principalmente relacionadas com a teoria de partículas e campos e a teoria geométrica iniciada por ele (Schönberg, 1958). O programa acadêmico em **cosmologia** na USP iniciou só na década de 1970 com Henrique Fleming no Instituto de Física (IF). O programa procurava fortalecer a interação entre a **cosmologia** e a teoria de campos, algo que viria tornar-se importante mais tarde no estudo de modelos de unificação da física e do universo primordial. Em 1972 o IF/USP procurou desenvolver um programa mais amplo de pós-graduação na área de gravitação e **cosmologia**, mas o exíguo número de doutores então existentes em todo o Brasil naquela área não permitiu alcançar uma massa crítica. De fato, estima-se (não havia um levantamento oficial) que em 1972 existiam cerca de 200 doutores em física e 100 doutores em matemática em todo o Brasil. Na área específica de gravitação e **cosmologia** chegava-se a uma dezena, se tanto. Assim, na época da fundação do Departamento de Física-Matemática na USP em 1977, a área de gravitação

e **cosmologia** ficou excluída, essencialmente por falta de pesquisadores que dejassem migrar para São Paulo, o que ocorreu somente a partir de 1987, com o início da contratação de recém-doutores provenientes do exterior. Compete mencionar que a área de **astrofísica** teve mais sucesso na década de 70 com a departamentalização do Instituto Astronômico e Geofísico (IAG) da USP em 1972 (ver “O Instituto Astronômico e Geofísico da USP” no Capítulo “Chegada da astronomia oficial a São Paulo” no Volume I e “40 anos de pós-graduação em astronomia no IAG/USP: uma história de sucessos” no Capítulo “Pós-graduação em astronomia” neste Volume), tendo José Antonio de Freitas Pacheco como iniciador do programa de pós-graduação em astronomia naquele Instituto.

Por outro lado, em 1973 o Instituto de Física Teórica (IFT) de São Paulo iniciou com Rubem Aldrovandi, após o regresso de seu doutorado na França, amplo programa sobre teorias alternativas de gravitação (relativamente à teoria de Einstein), usando conceitos da teoria de calibre<sup>5</sup>. Motivado pela perspectiva de obter uma gravitação quântica, esse programa teve condições de crescer no ambiente do IFT e perdura até os dias atuais. A **cosmologia** no IFT tomou pé com a contratação a partir de 1975 de Helio Vasconcelos Fagundes, que desenvolvia um programa de **cosmologia** observacional em que a geometria, encarada como base da gravitação, deveria ser objeto de observação e não mera linguagem matemática. Atualmente se desenvolvem no IFT importantes estudos em **astrofísica**, inclusive sobre possíveis modelos de matéria escura. Vale citar que a partir de 2012 o IFT também abriga o *South American Institute for Fundamental Research* (SAIFR), um importante centro de pesquisas teóricas filiado ao *International Center for Theoretical Physics* (ICTP) da UNESCO, sediado em Trieste, na Itália.

Em 1971 o Departamento de Matemática da UnB iniciou um programa de matemática aplicada incluindo a física-matemática, coordenado pelo autor deste texto após o retorno do seu doutorado. O programa de Brasília tinha caráter interdisciplinar inspirado no tradicional esquema europeu, onde se estuda teorias de campos e gravitação nos departamentos de matemática (e não de física, como é a tradição brasileira). Em 1973 Colber Oliveira se transferiu para o Departamento de Física da UnB para participar daquela atividade interdisci-

---

<sup>5</sup> Existem quatro **forças fundamentais** na natureza, todas dependentes de um potencial. Todas, excluindo a gravitação, se enquadram no que Hermann Weyl em 1918 definiu como sendo teorias de calibre, no sentido de que essas forças dependem de uma calibração do potencial. Essas forças foram incorporadas num esquema geométrico por C. N. Yang e R. Mills em 1954 e formam o que hoje se denomina teoria de Yang-Mills que é, portanto, sinônimo de teoria de calibre. A gravitação de Einstein não se enquadra no esquema de Yang-Mills e não é uma teoria de calibre. Mas, uma das possíveis teorias gravitacionais que se estuda, inclusive no Brasil, é uma teoria de calibre da gravitação.

plinar. Com auxílio do ICTP e da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), o programa prosperou com a participação de diversos visitantes estrangeiros para o oferecimento de minicursos avançados em gravitação e teoria de campos. Os recursos da FINEP e da UnB permitiram também a contratação de novos professores para os Departamentos de física e matemática como Patrício Letelier (1943-2011) em 1978. Em 1988 Letelier transferiu-se para a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) onde consolidou o programa de gravitação e **cosmologia** no Departamento de Matemática daquela instituição.

Com a mudança de Colber Oliveira para Brasília, o programa de gravitação e **cosmologia** do CBPF teve continuidade com o retorno de Mario Novello em 1972, que imprimiu naquela instituição uma forte ênfase à **cosmologia** de Gödel, caracterizada pela existência de uma rotação da matéria e de linhas temporais fechadas. Já contando com melhores condições financeiras, em 1978 o CBPF inaugurou a “Escola de Cosmologia e Gravitação do CBPF”, que representou importante marco para o desenvolvimento da **cosmologia** no Brasil. Essa Escola desempenhou e ainda desempenha importante papel na formação de novos cosmólogos, principalmente pelas características do evento que inclui visitantes que permanecem por duas semanas em contato direto com os estudantes e demais participantes da Escola. O ambiente informal permite um contato de grande valor para todos. Lembro-me dos debates extra-classe com o físico soviético Evgeni Lifschitz (1915-1985) fazendo analogias entre conceitos da física de estado sólido e os fundamentos da física de campos. Ele se referia a uma possível explicação do **regime de Planck** como análogo a um ponto tríplice da transição de fase em física do estado sólido. No caso do **regime de Planck**, o ponto tríplice ocorreria entre três teorias distintas: a Relatividade Especial, a gravitação newtoniana e a mecânica quântica. Outro exemplo que me ocorre foi o debate com o físico canadense, Werner Israel, acerca da interface entre dois espaços-tempos, um problema matemático que posteriormente se tornaria importante no desenvolvimento da **cosmologia** multidimensional<sup>6</sup>.

Em São Paulo, o Departamento de Astronomia do Instituto de Astrono-

---

<sup>6</sup> A **cosmologia** relativística fundamentada na teoria gravitacional de Einstein define um universo geométrico de quatro dimensões. Como a teoria de Einstein não é uma teoria de calibre (ver nota de rodapé anterior), essa limitação de dimensionalidade é apenas um postulado. Isso permite considerações sobre espaços-tempo e modelos cosmológicos com mais de quatro dimensões. O exemplo mais antigo data de 1920, com a proposta de Theodore Kaluza e Oskar Klein (este último em 1926). Hoje em dia a “teoria das cordas” e os desenvolvimentos mais recentes (teoria de branas) lideram as especulações sobre a existência de uma física multidimensional. Trata-se de um divisor de águas, pois, para muitos, uma física em mais de quatro dimensões é inadmissível.

mia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da USP desenvolveu um programa de **astrofísica** bastante intenso a partir de 2002 quando Reuven Opher, percebendo que o universo não podia ser estudado apenas como disciplina isolada, iniciou importante projeto interdisciplinar denominado a “Nova Física no Espaço” contando com a contribuição de cosmólogos, físicos experimentais de altas energias, matemáticos, astrônomos e estatísticos. Essa visão interdisciplinar da **cosmologia** impactou o desenvolvimento da **cosmologia** no Brasil, no sentido de que ela expõe toda a complexidade do entendimento do universo, partindo de pontos de vista diferentes, em oposição à sistemática muito verticalizada dos congressos tradicionais.

A partir de 1994 o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos, SP, iniciou duas grandes contribuições brasileiras à **cosmologia**: a primeira com investimentos na pesquisa da **CMBR**, incluindo a sua medição na superfície da terra e em balões estratosféricos no projeto GEM (*Galactic Emission Mapping*), uma colaboração internacional com o intuito de mapear a emissão de ondas de rádio e micro-ondas provenientes da nossa própria **Galáxia**, permitindo assim obter melhor precisão nas medidas da **CMBR**. A outra contribuição do INPE é a do desenvolvimento de um grupo de pesquisa sob a liderança de Odylio D. de Aguiar sobre **ondas gravitacionais**, inclusive com o desenvolvimento de um detector esférico dessas ondas, o detector Mario Schenberg, projetado e construído no Brasil (ver o Capítulo “Ondas gravitacionais” neste Volume).

Mais recentemente, outras instituições de pesquisa do Rio de Janeiro e de outros estados, particularmente a Universidade Federal Fluminense (UFF), Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) têm investido na formação de grupos de pesquisa em gravitação e **cosmologia**. No caso da UFRJ, Ioav Waga iniciou um programa de **cosmologia** voltado a pesquisas sobre a expansão do universo com base no modelo padrão, com a inclusão de um termo cosmológico dependente do tempo<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Em 1993 diversos pesquisadores brasileiros estavam em visita ao FERMI LAB, perto de Chicago, incluindo Ioav Waga, o autor deste texto, Vanda Silveira e Guilherme Silva trabalhando em possíveis generalizações da constante cosmológica. O progresso das pesquisas era apresentado periodicamente em seminários informais criados por Michael Turner e coordenados por Edward Kolb, astrofísicos da Universidade de Chicago. Em um desses seminários, falei sobre um possível termo cosmológico decaindo com o tempo. Michael Turner comentou que a constante cosmológica estava fora de moda desde que Einstein a banuiu em 1917 e que, portanto, não via sentido naquele estudo. Vários membros na audiência, incluindo Ioav Waga e Josh Friemann explicaram que se tratava de uma função cosmológica e não uma constante. Algum tempo depois Turner publicou um trabalho importante intitulado *The cosmological constant is back* (Krauss and Turner, 1995). Aquele seminário ocorreu antes da observação da expansão acelerada do universo em 1998.

No mesmo sentido, o Observatório Nacional (ON) do Rio de Janeiro, que é nossa mais antiga instituição voltada ao universo, ampliou o seu programa de estudos nos fundamentos da **cosmologia**, inaugurou a Escola Jayme Tiomno de Cosmologia, que se aprofunda na busca de soluções para os problemas mais agudos da **astrofísica**. Atualmente o ON tem se concentrado na análise qualitativa de modelos de universo quando confrontados com os dados observacionais (ver “Desvendando o universo com grandes mapeamentos” no Capítulo “Empreendimentos internacionais” neste Volume).

## Perspectivas

O entendimento da luz como fenômeno eletromagnético e as implicações posteriores para o entendimento das interações nucleares produziram um inegável salto científico e tecnológico para a civilização, a partir do pensamento relativístico de Einstein em 1905. Entretanto a extensão daquela ideia de incluir a gravitação em 1916 não acompanhou o mesmo salto, essencialmente por falta de dados experimentais. Mas, do ponto de vista teórico houve um enorme progresso na teoria de Einstein nos quase cem anos desde a sua inauguração.

Essa limitação quase que exclusivamente de natureza teórica mudou mais recentemente, graças à astronomia **extragaláctica** e o desenvolvimento de telescópios espaciais que permitiram aprimorar a medição de efeitos gravitacionais em escala cosmológica. Entre esses efeitos destacamos as **curvas de rotação** nas **galáxias espirais** e a **expansão acelerada** do universo, os quais não são explicados pela teoria gravitacional de Einstein. Por isso mesmo, a **cosmologia** atual tornou-se o grande laboratório da gravitação, permitindo testar teorias alternativas à teoria de Einstein.

Pelos dados mais recentes do observatório Planck, temos um total de 68,3% da chamada energia escura contribuindo para o total da energia do universo, sem explicação na teoria gravitacional de Einstein. Indo mais adiante, o entendimento da formação de estruturas no universo jovem requer uma gravitação quântica que possa interagir efetivamente com o eletromagnetismo e as forças nucleares. Novamente o observatório Planck aponta para uma contribuição de 26,8% da chamada matéria escura, restando apenas 4,9% de matéria ordinária formada por átomos, que gera o campo gravitacional descrito por Einstein.

Portanto a moderna **cosmologia** fundamentada nas observações, sugere a necessidade de uma teoria da gravitação que possa explicar esses novos fenômenos gravitacionais. Nesse sentido, o estudo da **cosmologia** passa a ter um novo sentido, assumindo papel fundamental na física de modo geral, e não

apenas astronômico. Ou seja, os problemas da **cosmologia** atual indicam que o entendimento da física local passa pelo entendimento do universo.

Com esse ponto de vista avaliamos que, após o conturbado início dos programas acadêmicos no Brasil nos anos 50 e 60, o desenvolvimento da gravitação e **cosmologia** no Brasil passa por período de crescimento. De fato, em rápida avaliação podemos concluir que a gravitação e **cosmologia** no Brasil atingiu a maturidade. Estimamos atualmente algo em torno de 130 doutores e doutorandos nessa área espalhados pelas universidades e institutos de pesquisa, realizando pesquisas teóricas e experimentais.

Outro indício mais recente encontra-se nas pesquisas sobre generalizações do princípio variacional de Einstein, as chamadas teorias  $F(R)$ , além das diferentes tentativas de formular teorias quânticas de gravitação partindo de princípios bem diferentes daqueles imaginados por Einstein e Newton, como a “teoria de cordas” ou mesmo teorias que dispensam o contínuo espaço-temporal, atualmente praticadas em várias instituições brasileiras. Nesse sentido, observando o que aqui acontece e comparando com outros países, notamos que a maioria dos pesquisadores brasileiros está engajada em programas de pesquisa originais e atuais, acompanhando os avanços observacionais.

Este desenvolvimento é recente e ele se deve em parte à existência de diversos órgãos de fomento federais e estaduais que são bastante ativos, permitindo a realização de múltiplas reuniões científicas anuais e ampla oferta de bolsas de estudo para a pós-graduação e o pós-doutoramento. Consideramos também de alta relevância nesse processo a participação dos institutos de pesquisa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Entretanto, é necessário que se faça distinção entre as pesquisas realizadas naqueles institutos e as pesquisas realizadas nas universidades, distinção essa que nem sempre é levada em conta: como ocorre nos países mais avançados da Europa e América, as pesquisas nesses institutos são verticalizadas, dentro de uma certa programação estratégica para o desenvolvimento tecnológico do país. Às vezes essas pesquisas são encomendadas sob um contrato específico, inclusive com prazos para a conclusão. No Brasil temos pelo menos três desses institutos onde se faz pesquisa em gravitação e **cosmologia**: CBPF, INPE e ON, o que atesta o alto grau de importância atribuída àquela área por nossos estrategistas governamentais.

Por outro lado, a pesquisa acadêmica feita nas universidades é, como indica o próprio conceito de universidade, universal, irrestrita e desprovida de objetivos imediatos. Além disso, as pesquisas acadêmicas são realizadas em tempo parcial, já que a maioria dos pesquisadores está também obrigada a prestar serviço docente nas universidades por força de contrato.

Concluimos, portanto, que para promover o salto tecnológico e científico que o Brasil tanto almeja, torna-se necessário um mecanismo que permita aos institutos de pesquisa e às universidades uma interação mais efetiva, realizando acordos de cooperação em pesquisas entre os institutos e as universidades e entre universidades. De grande valor seria também o gerenciamento de programas de pós-graduação compostos por pesquisadores de diferentes instituições em um único programa integrado.

## Referências

- Bekenstein, J. B. (2004), Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm, *Phys. Rev. D*, 70, 8, 083509.
- Camp, Jordan B. and Cornish, Neil J. (2009), *The Status of Gravitational Wave Astronomy*, LIGO-Virgo Team, [http://www.ligo.org/pdf\\_public/camp01.pdf](http://www.ligo.org/pdf_public/camp01.pdf).
- Costa, M. Amoroso (1922), *Introdução à Teoria da Relatividade*, Rio de Janeiro: Livraria Científica Brasileira Sussekind de Mendonça.
- Duhem, P. (1985), *Medieval Cosmology: Theories of Infinity, Place, Time, Void, and the Plurality of Worlds*, Roger Ariew (Transl.), Chicago: The University of Chicago Press.
- Eisenstaedt, J. e Fabris, J. C. (2004), “Amoroso Costa e o primeiro livro brasileiro sobre a Relatividade Geral”, *Rev. Bras. Ensino de Física*, 26, 2, 185-192.
- Ellis, George; Lanza, Antonio and Miller, John, Eds. (1993): *The Renaissance of General Relativity and Cosmology*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Friedmanm, A. (1922), Über die Krümmung des Raumes, *Zeitschrift für Physik*, A10, 1, 377-386.
- Gamow, G. and Schoenberg, M. (1940), The possible role of neutrinos in stellar evolution, *Phys. Rev.*, 58, 1117.
- \_\_\_\_\_ (1941), Neutrino theory of stellar collapse, *Phys. Rev.*, 59, 539-547.
- Goenner, H. F. (2010): What kind of science is cosmology?, *Annalen der Physik*, 522, 6, 389-418.
- Gödel, K. (1949), An example of a new type of cosmological solution of Einstein's field equations of gravitation, *Rev. Mod. Phys.*, 21, 447-450.
- Hamburguer, Amélia Império (2002), “Dois textos de Mário Schenberg. Publicação da obra científica de Mário Schenberg”, *Estudos Avançados*, 16, 44, Jan./Abr., 215-218.

Hawking, S. W. and Ellis, G. R. F. (1973), *The Large Scale Structure of the Universe*, Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Hawking, S. W. and Page, Don N. (1983), Thermodynamics of Black Holes in anti-de Sitter space, *Commun. Math. Phys.*, 87, 577-588.

Kant, E. (2003), *Critique of Pure Reason*, 1ª tradução para o inglês do original de 1781 por J. Meiklejohn em 1900, New York: Dover.

Komatsu, E.; Smith, K. M.; Dunkley, J.; Bennett, C. L.; Gold, B.; Hinshaw, G.; Jarosik, N.; Larson, D.; Nolte, M. R.; Page, L.; Spergel, D. N.; Halpern, M.; Hill, R. S.; Kogut, A.; Limon, M.; Meyer, S. S.; Odegard, N.; Tucker, G. S.; Weiland, J. L.; Wollack, E. and Wright, E. L. (2011), Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: cosmological interpretation, *The Astrophysical Journal Supplement*, 192, 18-64.

Krauss, Lawrence M. and Turner, Michael S. (1995), The cosmological constant is back, *General Relativity and Gravitation*, 27, 11, 1137.

Lemaître, G. (1933), L'Univers en expansion, *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, A53, 51-85.

Lopes, José Leite (2004), *Uma História da Física no Brasil*, São Paulo: Editora Livraria da Física.

Lucretius Carus, Titus (2008), Ronald Melville (Transl.), Don Fowler and Peta Fowler (Eds.), *On the Nature of the Universe*, Oxford: Oxford University Press.

Maia, M. D. (2011), *Geometry of the Fundamental Interactions*, New York: Springer.

Milgrom, M. (1983), A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis, *The Astrophysical Journal*, 270, 365-370.

Milne, E. A. (1935), *Relativity, Gravitation and World Structure*, Oxford: Oxford University Press.

Minkowsky, H. (1923), Discurso na 80ª Reunião de Cientistas Naturais e Médicos Alemães, Colônia, 1908, *The Principles of Relativity*. A Collection of Original Memoirs on the Special and General Theory of Relativity, Dover Publications.

Moraes, Abrahão de (1994), “A Astronomia no Brasil” in Fernando de Azevedo (Org.), *As Ciências no Brasil*, 2ª edição, 2 volumes, Rio de Janeiro: Editora UFRJ.

Padmanabhan, T. (2003), Cosmological Constant — the Weight of the Vacuum, *Physics Reports*, 380, 235-320.

Penzias, A. A. and Wilson, R. W. (1965), A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s, *The Astrophysical Journal*, 142, 419-421.

Planck Collaboration (2013), *Overview of Products and Scientific Results*, <http://arxiv.org/abs/1303.5062> [astro-ph.CO].

Rache, Pedro (1932), *A Relatividade: e sua Aplicação ao Estudo dos Phenomenos Physicos*, Belo Horizonte: Imprensa Official de Minas Geraes.

Riemann, B. (1873), On the hypothesis that lie at the foundations of Geometry, 1ª tradução do original de 1853 para o inglês por W. K. Clifford, *Nature*, 8, 114.

Robertson, H. P. (1936), Kinematics and World-Structure III, *The Astrophysical Journal*, 83, 25.

Rubin, Vera (1997), *Bright galaxies, dark matters*, Woodbury, NY: AIP Press.

Salmeron, R. (2012), *A Universidade Interrompida. Brasília 1964-1965*, edição revista, Brasília: Editora da UnB.

Schoenberg, M. (1941), Angular Momenta of Gravitational Fields, *Physical Reviews*, 52, 161-172.

Scholz, E. (1999), The Concept of Manifold, 1850-1950 in I. M. James (Ed.), *History of Topology*, 25-64, Amsterdam: Elsevier Science B.V.

Schönberg, M. (1958), *Quantum Theory and Geometry*, Sonderdruck aus der Max Planck Festschrift 1958, Berlin, 321.

Schönberg, M. and Chandrasekhar, S. (1942), On the Evolution of the Main-Sequence Stars, *The Astrophysical Journal*, 96, 2, 161-172.

Veblen, O. and Whitehead, J. H. C. (1931), A Set of Axioms for Differential Geometry, *Proc. Natl. Academy of Sciences*, 17, 551.

Walker, A. G. (1937): On Milne's Theory of World-Structure, *Proceedings of the London Mathematical Society*, 2, 1, 90.

Weinberg, S. (1987), Anthropic Bound on the Cosmological Constant, *Phys. Rev. Lett.*, 59, 2607-2610.

\_\_\_\_\_ (1989), The cosmological constant problem, *Rev. Mod. Phys.*, 61, 1-23.

Weisberg, J. M.; Taylor, J. H. and Fowler, L. A. (1981): Gravitational waves from an orbiting pulsar, *Scientific American*, 245, 74-82.

Zel'dovich, Ya. B. and Novikov, I. D. (1983), Leslie Fishbone (Transl.), *The Structure and Evolution of the Universe*, Chicago: The University of Chicago Press.

Zwicky, F. (1933), Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln, *Helvetica Physica Acta*, 6, 110-127.