

Ao proclamar 2015 como o Ano Internacional da Luz, as Nações Unidas demonstraram a importância de se promover a conscientização mundial sobre como as tecnologias baseadas na luz possibilitam o desenvolvimento humano e fornecem soluções para os desafios mundiais nas áreas de energia, educação, comunicação, saúde e agricultura. Em todo o Brasil, divulgadores da Ciência se movimentaram para a realização de inúmeras atividades, com o objetivo de levar os conhecimentos relacionados à temática Luz para toda a população, em todos os níveis de idade.

Durante a Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, o Centro de Ciências da Universidade Federal de Juiz de Fora promoveu a 4ª Jornada de Divulgação Científica, com o apoio do CNPQ, através da Chamada MCTI/CNPQ/SECIS Nº 90/2013 que, a exemplo das três edições anteriores, contou com um ciclo de palestras baseadas no tema central da SNCT. Foram assim apresentadas quatro palestras, por pesquisadores de renome, que atingiram um público amplo e diversificado de estudantes do Ensino Básico, licenciandos e pessoas da população em geral.

Este novo volume da série "Ciência em Dia: Jornadas de Divulgação Científica" traz o material referente à nossa quarta jornada, com todos os textos girando sobre o tema "Luz". Assim, como o livro anterior, esperamos que este novo volume possa servir de inspiração para os leitores, em especial aos jovens de nosso país, levando-os a aspirar seguir pelos caminhos da Ciência.

*Eloi Teixeira César
Diretor Geral do Centro de Ciências*



ISBN 978-85-7861-481-2



9 788578 614812

Eloi Teixeira César
Thales Costa Soares
Edson Eduardo Reinehr
(Organização)

Ciência em dia:

Jornadas de divulgação científica
Ano Internacional da Luz



Ciência em dia:

Jornadas de divulgação científica

Ano Internacional da Luz



Eloi Teixeira César
Thales Costa Soares
Edson Eduardo Reinehr
(Organizadores)

Ciência em dia:

Jornadas de divulgação científica

Ano Internacional da Luz



LF



LEI 11.093/2005
2017

Prefácio

Ao proclamar 2015 como o Ano Internacional da Luz, as Nações Unidas demonstraram a importância de se promover a conscientização mundial sobre como as tecnologias baseadas na luz possibilitam o desenvolvimento humano e fornecem soluções para os desafios mundiais nas áreas de energia, educação, comunicação, saúde e agricultura. Em todo o Brasil, divulgadores da Ciência se movimentaram para a realização de inúmeras atividades, com o objetivo de levar os conhecimentos relacionados à temática Luz para toda a população, em todos os níveis de idade.

Como parte desse esforço, o Centro de Ciências da Universidade Federal de Juiz de Fora desenvolveu diversas ações: durante o decorrer de todo o ano, foi apresentada a Exposição “Oficinas Luz e Energia”, que contou com o apoio da Chamada CNPQ/Instituto TIM N°02/2015 e do MEC através do Edital PROEXT, sendo apresentados diversos aparatos interativos relacionados à Luz, como caleidoscópio gigante, olhando o infinito, princípio do cinema, dentre outros. Para crianças na faixa etária de 7 a 10 anos, em especial estudantes de Escolas Públicas de Juiz de Fora e toda a região, foram também realizadas oficinas de construção de brinquedos científicos, como câmara escura, lanterna de Led e disco de cores, sendo que, ao final, as crianças podiam levar esses brinquedos para casa, podendo compartilhar com colegas, irmãos, pais e, assim, possibilitando ainda mais a disseminação do conhecimento envolvido de forma divertida e lúdica. Já durante a Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, tivemos a oportunidade de realizar nossa 4ª Jornada de Divulgação Científica, também com o apoio do CNPQ, através da Chamada MCTI/CNPQ/SECIS N° 90/2013 que, a exemplo das três edições anteriores, contou com um ciclo de palestras baseadas no tema central da SNCT. Foram assim apresentadas quatro palestras, por pesquisadores de renome, que atingiram um público amplo e diversificado de estudantes do Ensino Básico, licenciandos e pessoas da população em geral.

No primeiro volume da série “Ciência em Dia: Jornadas de Divulgação Científica”, reunimos os textos de nossas três primeiras Jornadas. Agora, este novo volume traz o material referente à nossa quarta jornada, com todos os

textos girando sobre o tema “Luz”. No primeiro artigo, o professor André Koch Torres de Assis nos brinda com uma análise de como Sir Isaac Newton abordava os problemas científicos relacionados especialmente à Óptica, mas também à Mecânica, Matemática e Filosofia. A seguir, os professores José Abdalla-Helayel Neto e Thales Costa Soares traçam um panorama sobre a importância do conceito de simetria na construção de novas teorias para as interações fundamentais. O terceiro texto, do professor João Rodrigo Souza Leão, traz uma análise sobre o que é a Luz e de como ela é utilizada pelos Cientistas para o estudo da Astronomia. Por fim, os professores Humberto Belich Júnior e Thales Costa Soares descrevem como as transformações de Lorentz interferem na teoria da relatividade restrita, além de exercerem um papel fundamental também nas simetrias das equações de Maxwell.

Assim, como o livro anterior, esperamos que este novo volume possa servir de inspiração para os leitores, em especial aos jovens de nosso país, levando-os a aspirar seguir pelos caminhos da Ciência.

Eloi Teixeira César
Professor de Química
Colégio de Aplicação João XXIII-UFJF

Newton e os Problemas Inversos

A. K. T. Assis
Instituto de Física “Gleb Wataghin”
Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
13083-859 Campinas, SP, Brasil
E-mail: assis@ifi.unicamp.br
Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

Resumo

Apresentamos uma tradução do artigo “Newton and Inverse Problems” (ASSIS, 2011), ampliada, atualizada e com novas referências. Utilizamos também aspectos importantes discutidos no artigo “Newton e Suas Grandes Obras: O *Principia* e o *Óptica*” (ASSIS, 1998). Consideramos a abordagem geral que Newton utilizava para tratar com os problemas científicos. Mostramos que ele sempre considerou os aspectos inversos de qualquer questão. Concluimos que essa maneira de lidar com a física, com a matemática e com a filosofia foi uma das fontes principais de sua imensa criatividade na ciência.

Introdução

Isaac Newton (1642-1727) é um dos maiores cientistas de todos os tempos. Seus dois livros mais importantes são o *Principia*, publicado originalmente em 1687, e o *Óptica*, publicado originalmente em 1704. As duas obras já se encontram totalmente traduzidas para o Português (NEWTON, 1990, 1996 e 2008), de onde tiramos as citações. Ele sempre viveu na Inglaterra, tendo entrado no Trinity College, em Cambridge, em 1661. Obteve o título de bacharel em 1665, tornando-se um Professor Lucasiano na Universidade de

Cambridge em 1669. Seu primeiro artigo científico, sobre óptica, foi publicado em 1672, e já se encontra traduzido para o Português (SILVA; MARTINS, 1996). No mesmo ano, foi eleito membro da Royal Society. Ingressou no parlamento inglês, em 1689, como deputado indicado pela Universidade de Cambridge. Em 1696, foi nomeado diretor da Casa da Moeda da Inglaterra. Tornou-se presidente da Royal Society em 1703, ocupando essa função até sua morte. Recebeu o título de Cavaleiro (*Sir*) em 1705. Faleceu aos 85 anos, sendo sepultado na Abadia de Westminster em Londres.

A obra mais importante de Newton tem como título *Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, sendo, usualmente, conhecida por seu primeiro nome em latim, *Principia*. Ela foi escrita em latim e traduzida para o Inglês por Andrew Motte, havendo, atualmente, uma nova tradução inglesa feita por Cohen e Whitman (NEWTON, 1934 e 1999). Foram publicadas três edições em sua vida, a saber, em 1687, 1713 e 1726.

Já o *Óptica* foi publicado originalmente em Inglês, com quatro edições inglesas: 1704, 1717, 1721 e 1730. Esta última versão foi corrigida pelo próprio Newton, embora publicada após sua morte. As edições em latim foram publicadas em 1706 e 1719. Boa parte do *Óptica* já estava pronta nos primeiros anos da década de 1690, quando se perdeu por um incêndio. Logo, pode-se dizer que o *Principia* e o *Óptica* foram concebidos ao redor da mesma época, entre meados de 1680 e 1690.

Neste trabalho, consideramos sua maneira de pesquisar. Mostramos que ele sempre considerava os aspectos inversos de qualquer problema. Concluímos que essa maneira de lidar com a física e com a matemática foi uma das principais fontes de sua imensa criatividade.

Problemas Inversos na Matemática

Um período muito importante na vida de Newton foram os anos de 1664 a 1666, conhecidos como seus *anos milagrosos*, durante os quais obteve seus primeiros resultados importantes em matemática e na física. Nesse período, ele estava na propriedade rural da família em Woolsthorpe, onde havia nascido, sendo que a Universidade de Cambridge ficou fechada entre agosto de 1665 e abril de 1667 devido à peste que assolou a Inglaterra.

Podemos ter uma primeira ideia da sua maneira de raciocinar, lendo sua própria descrição desse período, que aparece em uma carta escrita ao final de sua vida (WESTFALL, 1995, p. 39):

No início do ano de 1665, descobri o método de aproximação a uma série desse tipo & a regra para reduzir qualquer potência de qualquer binômio a tal série. No mesmo ano, em maio, descobri o método das tangentes de Gregory & Slusius &, em novembro, obtive o método direto das fluxões, & no ano seguinte, em janeiro, a teoria das cores, & em maio seguinte desvendei o método inverso das fluxões. &, no mesmo ano, comecei a pensar na gravidade como se estendendo até a órbita da Lua & (depois de descobrir como calcular a força com que [um] globo girando dentro de uma esfera pressiona a superfície da esfera), a partir da regra de Kepler de que os períodos dos planetas estão numa proporção sesquiáltera com suas distâncias do centro de suas órbitas, deduzi que as forças que mantêm os planetas em suas órbitas devem [variar], reciprocamente, como o quadrado de sua distância do centro em torno do qual eles giram: & a partir disso, comparei a força necessária para manter a Lua em sua órbita com a força da gravidade na superfície da Terra, & descobri que elas se correspondem bem de perto. Tudo isso foi nos dois anos da peste, 1665-1666. Pois, nessa época, eu estava no auge de minha fase de invenção & me interessava mais pela matemática & pela filosofia do que em qualquer ocasião posterior.

Ou seja, ele encontrou os métodos direto e inverso das fluxões, que são a essência do nosso cálculo diferencial e integral. A partir do método das tangentes, ele podia calcular derivadas, assim como podia calcular áreas por quadraturas. Sua descoberta do teorema fundamental do cálculo ligando a integração como sendo o inverso da diferenciação também vem desses anos milagrosos (NEWTON, 1934, p. 123-128; WESTFALL, 1995, p. 40-46).

Problemas Inversos na Óptica

Newton, em seu livro *Óptica*, ofereceu vários exemplos de como ele lidava com problemas inversos na física (NEWTON, 1996). Esse trabalho é dividido em três livros. O livro I tem duas partes, tratando da decomposição da luz branca nas cores do espectro após atravessar um prisma. A primeira parte começa com oito definições (de raio de luz, refringência, reflexibilidade etc.), oito axiomas (o ângulo de reflexão com a normal é igual ao ângulo de incidência com a normal etc.), seis teoremas, dois problemas e dezesseis experiências. A segunda parte tem cinco teoremas, seis problemas e dezessete experiências. O livro II lida com as reflexões, refrações e cores de corpos transparentes finos e espessos (anéis de Newton). A primeira parte contém vinte e quatro observações. A segunda parte contém comentários sobre as observações precedentes. A terceira parte lida com as cores permanentes dos corpos naturais e suas analogias com as cores das lâminas transparentes finas, contendo vinte proposições. A quarta parte contém treze observações sobre as reflexões e cores das placas polidas transparentes espessas. A primeira parte do livro III contém onze observações sobre as inflexões (difrações) dos raios de luz e das cores produzidas dessa maneira. No final do livro, Newton incluiu trinta e uma questões, lidando com vários aspectos não apenas da óptica, mas também da mecânica, física e filosofia em geral.

Embora a estrutura do livro seja, de certa forma, similar à obra *Os Elementos de Geometria* de Euclides, as provas das proposições (também chamadas de teoremas por Newton) não são baseadas na lógica pura como um conjunto de construções e raciocínios feitos a partir dos axiomas. No *Óptica*, as demonstrações das proposições e dos teoremas são feitas, nas palavras de Newton, “por experiências”. Essa é uma característica notável introduzida por Newton para a prova de teoremas. Esse procedimento tem início já na primeira proposição do livro, teorema 1 (NEWTON, 1996, p. 50-51):

Proposição 1. Teorema 1: As luzes que diferem em cor diferem também em graus de refringência.

Demonstração por experiências.

Experiência 1: Tomei um pedaço retangular de cartão preto terminado por lados paralelos, e com uma linha reta perpendicular de um lado ao outro dividi-o em duas partes iguais passando uma reta perpendicular de um lado ao outro. Pinte uma das partes com uma cor vermelha e a outro com uma cor azul [...].

O mesmo procedimento de prova foi adotado em praticamente todos os teoremas. Já o assunto dos livros II e III do *Óptica* trata de observações sobre fenômenos novos, que não estão contidos nem foram deduzidos a partir dos axiomas iniciais descritos no livro I.

Vejamos, agora, como Newton lidou com os aspectos inversos dos problemas no campo da óptica. Após apresentar as definições e axiomas, ele introduziu uma série de proposições, teoremas e problemas. Entre outras coisas, ele separou a luz solar nas cores do espectro e depois combinou essas cores formando o branco. Por exemplo (NEWTON, 1996, p. 54-55):

Proposição 2. Teorema 2: A luz do sol consiste em raios que se refratam diferentemente.

Demonstração por experiências.

Experiência 3: Numa sala bem escura coloquei em um orifício circular de 1/3 de polegada de diâmetro que fiz na folha da janela um prisma de vidro por onde o feixe de luz solar que entrasse pelo orifício pudesse ser refratado para cima em direção à parede oposta da sala, formando ali uma imagem colorida do sol [...].

Sua quarta proposição (também chamada de primeiro problema) da primeira parte do livro I diz o seguinte (NEWTON, 1996, p. 76): “Separar um do outro os raios heterogêneos da luz composta”. Para realizar esse procedimento, ele deixou a luz do Sol penetrar em seu quarto escuro através de um pequeno orifício feito na folha da janela. Colocou uma lente aproximadamente a onze pés da janela e depois dela havia um prisma que separava a luz do Sol nas cores do espectro sobre um papel branco.

Já na quinta proposição (também chamada de teorema 4) da segunda parte do livro I, ele explorou o efeito oposto (NEWTON, 1996, p. 121):

Proposição 5. Teorema 4: A brancura e todos os tons cinzentos entre o branco e o preto podem ser compostos de cores, e a brancura da luz do sol é composta de todas as cores primárias mescladas numa proporção devida.

Prova por Experiências.

Experiência 9 [...].

A demonstração desse teorema é feita através de seis experiências bem detalhadas.

Sua décima primeira proposição tinha o mesmo objetivo (NEWTON, 1996, p. 150):

Proposição 11. Problema 6: Misturando luzes coloridas, compor um feixe de luz da mesma cor e natureza de um feixe da luz direta do sol, verificando assim a verdade das Proposições precedentes.

Um outro exemplo dessa maneira de pesquisar os fenômenos até chegar a suas essências foi apresentado por Newton ao comparar a influência dos corpos sobre a luz e da luz sobre os corpos. Por exemplo, na quinta questão ao final do *Óptica*, vemos, mais uma vez, Newton considerando os dois lados de um mesmo problema (NEWTON, 1996, p. 251):

Questão 5: Os corpos e a luz não agem mutuamente um sobre o outro, quer dizer, os corpos sobre a luz ao emití-la, refletí-la, refratá-la e inflectí-la [difratá-la], e a luz sobre os corpos ao aquecê-los e ao imprimir em suas partes um movimento vibratório no qual consiste o calor?

Essa conclusão tem uma certa analogia com sua lei da gravitação universal, já que se a Terra atrai a maçã e o Sol atrai os planetas, então a maçã também deve atuar sobre a Terra assim como os planetas devem atuar sobre o Sol. Ou seja, os corpos atuam sobre a luz, por exemplo, refletindo-a e refratando-a. Mas, ao mesmo tempo, a luz atua sobre os corpos, aquecendo-os. Hoje em dia, poderíamos citar outros exemplos dessa influência, como a ionização

de átomos pela luz, a transferência de momento linear da luz para a matéria na reflexão ou na absorção etc. Mais uma vez, vemos Newton explorando os dois lados do fenômeno, não apenas a influência da matéria sobre a luz, mas também o mecanismo inverso. Podemos encarar esse exemplo como mais um exemplo de ação e reação, agora entre entidades aparentemente distintas, como os corpos materiais e a luz.

As últimas Questões do Óptica, de números 30 e 31, apresentam outros exemplos dessa maneira Newtoniana de raciocinar, sempre considerando os lados opostos de todos os problemas (NEWTON, 1996, p. 273-293):

Questão 30: Não são os corpos pesados e a luz convertíveis um no outro, e não podem os corpos dever grande parte de sua atividade às partículas de luz que entram em sua composição? Pois todos os corpos fixos, uma vez aquecidos, emitem luz enquanto continuam suficientemente quentes, e a luz, reciprocamente, se detém nos corpos sempre que seus raios colidem com suas partes, como mostramos acima. Não conheço nenhum corpo menos apto a brilhar do que a água; e, todavia, a água, por destilações frequentes, transforma-se em terra fixa, como verificou o Sr. Boyle, e, tornando-se essa terra, então, capaz de suportar um calor suficiente, ela brilha como os outros corpos em virtude do calor.

A transformação dos corpos em luz, e da luz em corpos, é muito conforme ao curso da natureza, que parece deliciar-se com as transmutações. [...]

Questão 31: Não têm as pequenas partículas dos corpos certos poderes, virtudes ou forças por meio dos quais elas agem a distância não apenas sobre os raios de luz, refletindo-os, refratando-os e inflectindo-os [difratando-os], mas também umas sobre as outras, produzindo grande parte dos fenômenos da natureza? Pois sabe-se que os corpos agem uns sobre os outros pelas ações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade; e esses exemplos mostram o teor e o curso da natureza, e não tornam improvável que possa haver mais poderes atrativos além desses. Porque a natureza é muito consonante e conforme a si mesma. [...] As atrações da gravidade, do magnetismo e da eletricidade alcançam distâncias

bem perceptíveis, e assim têm sido observadas pelos olhos comuns, podendo haver outras que alcançam distâncias tão pequenas que escaparam à observação até aqui; e talvez a atração elétrica possa alcançar essas distâncias mínimas mesmo sem ser excitada pela fricção.

[...]

E assim a natureza será muito conforme a si mesma e muito simples, executando todos os grandes movimentos dos corpos celestes pela atração da gravidade que atua sobre esses corpos, e quase todos os pequenos movimentos de suas partículas por alguns outros poderes atrativos e repulsivos que atuam sobre as partículas. [...]

Problemas Inversos na Mecânica

Consideramos agora a obra prima de Newton, o *Principia* (NEWTON, 1990 e 2008). Ela começa com oito definições (quantidade de matéria etc.), um Escólio sobre o movimento absoluto e relativo, apresentando sua famosa experiência do balde, vindo então suas três leis do movimento (que ele também denominou de axiomas), depois seis corolários, seguidos por um outro Escólio no qual discutiu as leis de colisão etc. O restante da obra é dividido em três livros. O livro I lida com o movimento dos corpos, contendo noventa e oito proposições (50 teoremas e 48 problemas). O livro II trata do movimento dos corpos em meios com resistência, contendo cinquenta e três proposições (41 teoremas e 12 problemas). O livro III lida com o sistema do mundo com um tratamento matemático. Ele começa com quatro regras de raciocínio em filosofia, seguido por seis fenômenos celestes (os planetas descrevem áreas proporcionais aos tempos de percurso etc.). Seguem-se, então, quarenta e duas proposições (20 teoremas e 22 problemas). No final do livro, há um famoso Escólio Geral.

Em várias partes dessa obra, podemos observar Newton lidando com aspectos opostos de qualquer problema mecânico. Isso já fica evidente, por

exemplo, em seu terceiro axioma ou lei do movimento (NEWTON, 1990, p.16):

Lei III: A toda ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas.

Seja o que for que puxe ou empurre alguma coisa, é da mesma forma, puxado ou empurrado por ela. Se você empurra uma pedra com seu dedo, o dedo é também empurrado pela pedra. Se um cavalo puxa uma pedra amarrada a uma corda, o cavalo (se posso dizer assim) vai ser igualmente puxado de volta na direção da pedra, pois a corda distendida, pela mesma tendência a relaxar ou distorcer-se, puxará o cavalo na direção da pedra, tanto quanto ela puxa a pedra na direção do cavalo, e obstruirá o progresso de um tanto quanto promove o do outro. Se um corpo choca-se com outro, e pela sua força muda o movimento desse, aquele corpo também (por causa da igualdade da pressão mútua) sofrerá uma mudança igual no seu próprio movimento, em direção à parte contrária. As mudanças feitas por essas ações são iguais não nas velocidades mas nos movimentos dos corpos, quer dizer, se os corpos não são obstruídos por qualquer outros impedimentos. Pois, porque os movimentos são igualmente alterados, as mudanças de velocidades feitas em direções a partes contrárias são inversamente proporcionais aos corpos. Essa lei também ocorre em atrações, como será provado no próximo Escólio.

Após as três leis do movimento, aparecem seis corolários. Segue-se, então, um Escólio no qual Newton demonstra, por experiências feitas com pêndulos, a validade da lei de ação e reação nas colisões. Ele também apresentou experiências mostrando que essa lei é obedecida para atrações magnéticas atuando à distância, sem contato entre os corpos que estavam interagindo (NEWTON, 1990, p. 28):

Fiz a experiência com magnetita e ferro. Se esses, colocados separadamente em recipientes adequados, flutuam, um próximo ao outro, em água parada, nenhum deles propelerá o outro; mas, por

serem igualmente atraídos, sustentarão a pressão um do outro, e finalmente repousarão em equilíbrio.

No livro III do *Principia*, Newton apresentou seis fenômenos relacionados com as leis de Kepler dos movimentos dos corpos celestes (NEWTON, 2008, p.189-192):

Fenômeno I: Que os planetas que circundam Júpiter, por raios traçados ao centro de Júpiter, descrevem áreas proporcionais aos tempos de percurso, e que seus tempos periódicos, estando as estrelas fixas em repouso, estão como a $3/2^a$ potência de suas distâncias deste centro.

[...]

Fenômeno IV: Que estando as estrelas fixas em repouso, os tempos periódicos dos cinco planetas primários e (seja do sol ao redor da terra, ou da terra ao redor do sol, são como a $3/2^a$ potência de suas distâncias médias ao sol.

A partir desses fenômenos, ele deduziu que a força da gravidade é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias (NEWTON, 2008, p. 195):

Proposição I. Teorema 1: Que as forças com que os planetas que circundam Júpiter são continuamente desviados dos movimentos retilíneos e mantidos em suas próprias órbitas tendem ao centro de Júpiter e são inversamente proporcionais aos quadrados das distâncias dos lugares destes planetas em relação a este centro.

[...]

Proposição II. Teorema II: Que as forças com que os planetas primários são continuamente desviados dos movimentos retilíneos e mantidos em suas próprias órbitas tendem ao sol e são inversamente proporcionais aos quadrados das distâncias dos lugares destes planetas ao centro do sol.

Após chegar a esses resultados, Newton começou o processo inverso. Isto é, começando com uma força gravitacional variando com o inverso do quadrado da distância entre os corpos, proporcional a $1/r^2$, ele deduziu as leis de Kepler. Um exemplo (NEWTON, 2008, p. 210):

Proposição XIII. Teorema XIII: Os planetas movem-se em elipses que têm seu foco comum no centro do sol e, a partir de raios traçados até este centro, descrevem áreas proporcionais aos tempos de percurso.

Dissertamos acima sobre estes movimentos a partir dos Fenômenos. Agora que conhecemos os princípios dos quais eles dependem, a partir destes princípios deduzimos os movimentos dos céus *a priori*. [...]

Ou seja, Newton partiu das leis de Kepler para então deduzir sua lei da gravitação universal. Em seguida, partiu de sua lei da gravitação universal para deduzir as leis de Kepler. Mas Newton não parou aqui. Em seguida, ele deduziu um conjunto de novos resultados, começando com uma força da gravidade proporcional ao produto das massas que estão interagindo e variando com o inverso do quadrado da distância entre elas. Como um exemplo, temos sua Proposição XIX, Problema III (NEWTON, 2008, p. 214): “*Achar a proporção do eixo de um planeta para os diâmetros perpendiculares a ele*”. Isto é, ele calculou o achatamento dos planetas ao redor de seus polos devido às suas rotações ao redor desses eixos em relação ao pano de fundo das estrelas fixas. Ele também deduziu, a partir de sua lei da gravitação universal, o movimento da Lua ao redor da Terra. A partir da Proposição XXIV, Teorema XIX, ele apresentou um novo conjunto de fenômenos que podiam ser explicados com base em sua lei da gravidade, a saber (NEWTON, 2008, p. 224): “*Que o fluxo e refluxo do mar surge das ações do sol e da lua*”. Isto é, conseguiu explicar as marés terrestres devido à influência gravitacional da Lua e do Sol sobre as águas dos mares. Outro resultado novo que conseguiu explicar, a partir de sua força gravitacional, aparece na Proposição XXXIX, Problema XX (NEWTON, 2008, p. 274): “*Descobrir a precessão dos equinócios*”. Nas próximas proposições, deduziu o movimento dos cometas ao redor do Sol.

Essencialmente, Newton começou com as leis de Kepler do movimento planetário e com sua expressão da aceleração centrípeta. Deduziu, então, sua lei da gravitação universal. Em seguida, partiu dessa lei da gravidade para deduzir não apenas as leis de Kepler, mas toda uma gama de novos fenômenos que nunca haviam sido explicados gravitacionalmente, a saber, o achatamento dos planetas nos polos devido as suas rotações ao redor desses eixos em relação ao pano de fundo das estrelas fixas, a precessão dos equinócios, as marés terrestres, as órbitas dos cometas etc.

Problemas Inversos na Filosofia

Na última Questão do Óptica, Newton apresentou sua visão geral de como se deve proceder na filosofia natural (NEWTON, 1996, p. 292-293):

Como na matemática, também na filosofia natural a investigação das coisas difíceis pelo método da análise deve sempre preceder o método da composição. Essa análise consiste em fazer experiências e observações, em tirar conclusões gerais delas por indução e em não admitir objeções contra as conclusões exceto aquelas que decorrem das experiências ou de algumas outras verdades. Pois as hipóteses não devem ser consideradas na filosofia experimental. E, embora a argumentação pela indução a partir de experiências e observações não seja a demonstração de conclusões gerais, ainda assim é o melhor caminho de argumentação que a natureza das coisas admite, e pode ser considerada tanto mais forte quanto mais geral é a indução. E se não aparece nenhuma exceção dos fenômenos, a conclusão pode ser afirmada em termos gerais. Mas se depois, em qualquer época, aparecer qualquer exceção relativamente às experiências, ela poderá então começar a ser afirmada com as exceções que aparecerem. Por esse método de análise podemos passar dos compostos aos ingredientes, e dos movimentos às forças que os produzem; e, em geral, dos efeitos às suas causas, e das causas particulares às causas mais gerais, até que o argumento termine na causa mais geral. Tal é o método da análise; e a síntese consiste em admitir as causas descobertas e estabelecidas como princípios, em explicar por elas os fenômenos que deles procedem e em provar as explicações. Nos dois primeiros livros desta Óptica

procedi a essa análise para descobrir e provar as diferenças originais dos raios de luz com respeito à refringência, à reflexibilidade e à cor, aos seus estados alternados de fácil reflexão e fácil transmissão e às propriedades dos corpos, tanto opacos quanto transparentes, das quais dependem suas reflexões e cores. E, uma vez provadas essas descobertas, elas podem ser admitidas no método da composição para explicar os fenômenos que delas resultam, e dei um exemplo desse método no final do primeiro livro. [...]

Newton formalizou sua maneira geral de lidar com a ciência no Prefácio da primeira edição do *Principia* (NEWTON, 1990, p. I-II):

[...] ofereço este trabalho como os princípios matemáticos da filosofia, pois toda a essência da filosofia parece consistir nisso – a partir dos fenômenos de movimento, investigar as forças da natureza e, então, dessas forças demonstrar os outros fenômenos; e para esse fim dirigem-se as proposições gerais no primeiro e segundo Livros. No terceiro Livro, dou um exemplo disso na explicação do Sistema do Mundo; pois, pelas proposições matematicamente demonstradas nos Livros anteriores, no terceiro derivo dos fenômenos celestes as forças de gravidade com as quais corpos tendem para o Sol e para os vários planetas. Então, dessas forças, por outras proposições que também são matemáticas, deduzo os movimentos dos planetas, dos cometas, da Lua e do mar. Gostaria que pudéssemos derivar o resto dos fenômenos da Natureza dos princípios mecânicos pelo mesmo tipo de raciocínio, pois, por muitas razões, sou induzido a suspeitar de que todos eles possam depender de certas forças pelas quais as partículas dos corpos, por algumas causas até aqui desconhecidas, ou são mutuamente impedidas umas em direção às outras e se ligam em formas regulares, ou são repelidas e se afastam umas das outras. Sendo desconhecidas essas forças, os filósofos até agora têm tentado em vão a investigação da Natureza; mas espero que os princípios aqui expostos tragam alguma luz, seja a esse ou a algum outro método mais verdadeiro de filosofar.

No início do livro III do *Principia*, ele apresentou um enfoque similar, a saber (NEWTON, 2008, p. 183):

Nos livros precedentes estabeleci os princípios de filosofia, não princípios filosóficos, mas matemáticos, isto é, tais que possamos basear nossos raciocínios em investigações filosóficas. Estes princípios são as leis e condições de certos movimentos, e poderes ou forças, que dizem respeito principalmente à filosofia. Para evitar que parecessem secos e estéreis, illustrei-os aqui e ali com alguns escólios filosóficos, explicando coisas que são de uma natureza mais geral e sobre as quais parece apoiar-se principalmente a filosofia, como a densidade e resistência dos corpos, espaços vazios de todos os corpos, e o movimento da luz e dos sons. Falta demonstrar a partir dos mesmos princípios a estrutura do Sistema do Mundo. [...]

No Escólio Geral, ao fim do *Principia*, afirmou o seguinte (NEWTON, 2008, p. 331-332):

E agora poderíamos acrescentar alguma coisa concernente a um certo espírito muito sutil que penetra e fica escondido em todos os corpos grandes, por cuja força e ação as partículas dos corpos atraem-se umas às outras quando se encontram a distâncias próximas e se unem se estão contíguas; e os corpos elétricos operam a distâncias maiores, tanto repelindo quanto atraindo os corpúsculos vizinhos; e a luz é emitida, refletida, refratada, inpletida [difratada] e aquece os corpos; e toda sensação é excitada e os membros dos corpos animais movem-se ao comando da vontade, propagada pelas vibrações deste espírito ao longo dos filamentos sólidos dos nervos, a partir dos órgãos sensoriais externos até o cérebro e do cérebro aos músculos. Mas estas são coisas que não podem ser explicadas em poucas palavras. Também não dispomos de uma quantidade suficiente de experiências que é necessário para determinar com precisão e demonstrar mediante que leis opera este espírito elétrico e elástico.

A explicação do Sistema do Mundo a partir da lei gravitacional de Newton é o coroamento do *Principia*.

Conclusão

Mostramos, neste trabalho, como Newton sempre considerou os aspectos inversos em todos os ramos do conhecimento, incluindo matemática, mecânica, óptica e filosofia. Essa característica de sua maneira de raciocinar e de considerar os diferentes problemas foi uma das principais fontes de sua criatividade poderosa na ciência.

Agradecimentos: O autor agradece ao Centro de Ciências da Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF, pelo convite para participar da 4ª Jornada de Divulgação Científica ocorrida em novembro de 2015.

Bibliografia

Os artigos de A. K. T. Assis encontram-se disponíveis em <www.ifi.unicamp.br/~assis>.

ASSIS, A. K. T. Newton e suas grandes obras: o *Principia* e o *Óptica*. In: ALMEIDA, M. J. P. M. de; SILVA, H. C. da (editores). *Linguagens, Leituras e Ensino da Ciência*. Campinas: Mercado das Letras/Associação de Leitura do Brasil, 1998, p. 37-52.

ASSIS, A. K. T. Newton and inverse problems. In: KRAUSE, D.; VIDEIRA, A. (editores). *Brazilian Studies in Philosophy and History of Science: An Account of Recent Works*, volume 290 de *Boston Studies in the Philosophy of Science*, capítulo 3, p. 71-76 (Springer, Dordrecht, 2011). DOI: 10.1007/978-90-481-9422-3_3, 2011.

NEWTON, I. *Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Berkeley: University of California Press, Edição Cajori, 1934.

NEWTON, I. *Principia* – Princípios Matemáticos de Filosofia Natural. Livro I: O Movimento dos Corpos. Tradução de RICCI, T.; BRUNET, L. G.; GEHRING, S. T.; CÉLIA, M. H. C. São Paulo: Nova Stella/Edusp, 1990.

NEWTON, I. *Óptica*. Tradução, introdução e notas de ASSIS, A. K. T. São Paulo: Edusp, 1996.

NEWTON, I. *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy*. Nova tradução de COHEN, I. B.; WHITMAN, A. Berkeley: University of California Press, 1999.

NEWTON, I. *Principia* – Princípios Matemáticos de Filosofia Natural. Livro II: O Movimento dos Corpos (em Meios com Resistência). Livro III: O Sistema do Mundo (Tratado Matematicamente). Tradução de ASSIS, A. K. T. São Paulo: Edusp, 2008.

SILVA, C. C.; MARTINS, R. d. A. A “Nova teoria sobre luz e cores” de Isaac Newton: uma tradução comentada. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, Vol. 18, p. 313-327, 1996.

WESTFALL, R. S. *A Vida de Isaac Newton*. Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

Simetrias, Luz e Interações Fundamentais

*José Abdalla Helayël-Neto
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF/MCT)
e Grupo de Física Teórica José Leite Lopes (GFT – JLL)*

*Thales Costa Soares
IF Sudeste MG – JF, Centro de Ciências UFJF
e Grupo de Física Teórica José Leite Lopes (GFT - JLL)*

Introdução

A Física contemporânea descreve os fenômenos naturais em termos de quatro interações fundamentais que, para efeitos de compreensão num contexto mais próximo da Física Newtoniana, podemos pensar como sendo descritas por campos de forças. Mais recentemente – e estamos falando de Agosto de 2016 – surgem indícios, em processos envolvendo núcleos excitados de berílio, de um possível quinto campo de interação. Abre-se esse caminho, mas muito deve ainda ser apurado. A força gravitacional e a força eletromagnética são as interações fundamentais que se fazem sentir no mundo macroscópico, inclusive em escala humana. As outras duas, a força nuclear forte e a força nuclear fraca, não se revelam em escala macroscópica. Aparecem apenas em escala subatômica; na verdade, como o nome indica, nas escalas nuclear e subnuclear, portanto a distâncias tão pequenas ou ainda menores que o décimo do trilionésimo do centímetro, o que corresponde ao centésimo de milésimo da escala atômica ou à milionésima parte da nanoescala.

As Interações Fundamentais

A força gravitacional é a responsável pelos movimentos planetários e pela organização da estrutura em larga escala de nosso Universo. É uma força predominantemente de coesão; mas, em escalas muito grandes, na ordem do mega-parsec, entra em ação um aspecto repulsivo da gravitação, fenômeno a que nos referimos hoje como devido a uma “energia escura”. A força eletromagnética é a interação que responde pela formação dos átomos, pelas ligações moleculares e pelos processos biológicos fundamentais, por exemplo. Já a força nuclear forte responde pela coesão dos prótons e dos nêutrons no interior dos núcleos atômicos e pela ligação dos quarks no interior dos hádrons; finalmente, a interação nuclear fraca é a responsável pelos processos radioativos, em que núcleos atômicos instáveis decaem e emitem partículas.

Cada um desses campos de força é descrito por uma sólida teoria física. A força gravitacional, em sua escala macroscópica, é descrita pela Mecânica Newtoniana, sempre que as velocidades envolvidas forem baixas se comparadas à velocidade da luz; ainda em escala macroscópica, e mesmo cosmológica, mas no regime em que fenômenos relativísticos começam a operar, a descrição do campo gravitacional fica a cargo da Teoria da Relatividade Geral. A descrição microscópica da gravitação, que constitui o que se chama na literatura de Gravitação Quântica, é um campo de investigação com várias questões ainda em aberto. De fato, abordagens mais recentes como a das Teorias de Supercordas são novos encaminhamentos no sentido de, entre outras questões, resolver os problemas da Gravitação Quântica.

Já a Eletrodinâmica Quântica (QED) descreve os fenômenos que envolvem a força eletromagnética na escala quântica. Os fenômenos eletromagnéticos em escalas meso ou macroscópica admitem uma descrição muito precisa através da Teoria Eletromagnética de Maxwell e algumas de suas possíveis extensões. A QED foi desenvolvida a partir do início da década de 1930 e ajudou a entender o mundo das chamadas partículas elementares – ou seja, partículas ‘indivisíveis’. Trabalhos publicados entre 1961 e 1968 ajudaram a formular a teoria que unificou tanto os fenômenos eletromagnéticos quanto aqueles regidos pela força nuclear fraca. A Teoria Eletrofraca ou o Modelo de Salam-Weinberg-Glashow – como ficou conhecido – mostrou, portanto, que essas duas forças, apesar de se nos apresentarem com características

marcadamente distintas, têm uma origem comum, sendo possível propor para elas um cenário de unificação que ilustra como ambas se separam no regime da Natureza em que fazemos as nossas observações.

A Cromodinâmica Quântica (QCD) é a teoria física que incorpora o conhecimento experimental e a fenomenologia das interações nucleares fortes; a sua formulação ficou estabelecida em 1973, com os trabalhos de Gross e Wilczek, e, independentemente, de Politzer, o que valeu a esses três autores o Prêmio Nobel de Física de 2004. **Essa é uma teoria que ainda ocupa uma parte considerável da comunidade dos teóricos e apresenta desafios estimulantes a serem esclarecidos, como, por exemplo, a resolução do problema do confinamento dos quarks e glúons no interior dos hádrons, o desenvolvimento de técnicas matemáticas e computacionais para os chamados cálculos não perturbativos e a compreensão da teoria incluindo efeitos de temperatura finita, a fim de compreender o seu rico diagrama de fases.**

Yang-Mills: um paradigma teórico

Neste cenário das quatro interações fundamentais devidamente organizadas em termos de teorias microscópicas, que incorporam tanto as leis do mundo quântico quanto a Teoria da Relatividade Especial, percebe-se que o conceito-chave para a formulação das mesmas é o conceito de simetria, e, ao lançar mão da ideia de simetria, as teorias de Yang-Mills, propostas em 1954, estabelecem o referencial teórico para a formulação de todas as teorias acima mencionadas. Do ponto de vista matemático, cada interação tem associado a si um grupo de simetria, estrutura matemática que obedece a um conjunto de regras bem específicas; no que diz respeito às características de cada campo de força, o grupo de simetria organiza e sistematiza grandezas de natureza física como as cargas e as correntes envolvidas na interação. Os fenômenos eletromagnéticos são descritos em termos de um grupo de simetria designado por $U(1)$, associado à carga elétrica; a fenomenologia das interações fracas acomoda-se na estrutura imposta pelo grupo $SU(2)$, que responde pelo chamado isospin fraco; a QCD é formulada em termos do grupo $SU(3)$, que descreve a carga de cor e, finalmente, o grupo subliminar à gravitação é o $SO(1,3)$, conhecido como o grupo de Lorentz, associado a uma grandeza intrínseca das partículas elementares, a que nos referimos como spin.

O conceito de simetria e estrutura algébrica a ela correspondente organiza as leis de conservação associadas a um dado tipo de interação, sistematiza a classificação das partículas e dos estados físicos da teoria em termos de especificações bem precisas – os chamados números quânticos – e estabelece mecanismos para a compreensão das relações existentes entre as massas e as cargas das partículas envolvidas na interação considerada. Entretanto essas relações de massa envolvem exclusivamente bósons (partículas de spin inteiro) ou férmions (partículas com spin semi-inteiro e que obedecem ao chamado Princípio da Exclusão de Pauli); as simetrias usuais não inter-relacionam, contudo, os setores bosônico e fermiônico. É exatamente nesse ponto, a compartimentação bóson-férmion, que a Supersimetria faz a sua entrada na cena das interações fundamentais. A Teoria da Relatividade Especial é fundamental para a formulação da Física do chamado Modelo-Padrão das Interações Fundamentais e demarca um passo importantíssimo para a incorporação da ideia de simetria na Mecânica Quântica e em teorias de caráter mais microscópico. Simetria é um grande legado da Teoria da Relatividade.

Supersimetria

A Supersimetria, que emerge a partir de setores muito especiais da noção unificada de espaço-tempo introduzida pela Relatividade Especial – a dita estrutura causal dos cones de luz – amplia a nossa visão de simetria e já assinala para a possibilidade de o próprio espaço-tempo, tal qual o conhecemos, estar ligado e ser parte de uma estrutura mais ampla, o superespaço, que manifesta uma natureza quântica intrínseca. O aspecto quântico da matéria pode ser uma manifestação da natureza quântica do espaço-tempo.

E muito interessante, também, é se observar que foi exatamente em 1973, quando as teorias específicas para cada interação ficaram estabelecidas, que se inaugurou a era da Supersimetria como conceito fundamental no projeto de construção de uma teoria de unificação dos quatro campos de força da Natureza, tendo o propósito, inclusive, de viabilizar um ambiente teórico para a consolidação de uma teoria quântica para a gravitação.

A Supersimetria coloca férmions e bósons no mesmo patamar, e, na proposta de ser uma simetria do espectro de partículas físicas (entretanto é preciso deixar claro que ainda não foi detectada experimentalmente), propõe

que bósons e férmions possam figurar no mesmo grupo de partículas degeneradas em massa, ou que, caso venham a ter massas muito próximas, essa diferença possa ser reproduzida em termos de um mecanismo de violação da Supersimetria. Em um mundo regulado pelas leis da Supersimetria, a cada bóson de uma certa massa corresponderia um férmion com a mesma massa. Não é essa a situação que encontramos no mundo a nós acessível das partículas verdadeiramente elementares. Mas a ideia é de que isso deva ocorrer em uma escala de altíssimas energias, ainda muito afastadas do regime de energia a que temos acesso experimental.

A partir da premissa de que existe um princípio de simetria segundo o qual bósons e férmions possam ser degenerados em massa é que se desenvolveu fortemente a Supersimetria na comunidade da Física Teórica de Altas Energias; em 1975, já eram conhecidas as ditas extensões supersimétricas da Eletrodinâmica Quântica e das Teorias de Yang-Mills, em cujo contexto são descritas as interações nucleares fortes e fracas. Em 1976, conseguiu-se chegar à formulação supersimétrica da gravitação, numa teoria denominada Supergravidade, que trouxe uma compreensão mais aprofundada de como deve ser a interação gravitacional no mundo microscópico.

Em todas essas teorias, a ideia de que a interação seja mediada por um bóson intermediário fica, agora, com a Supersimetria, acrescida da presença de férmions parceiros dos bósons mediadores, também conhecidos como bósons de gauge. No caso da Eletrodinâmica, o fóton é acompanhado do férmion neutro denominado fotino; no contexto das interações fracas, os bósons carregados W e o bóson neutro Z são acompanhados dos férmions chamados W -inos e Z -ino. Os parceiros supersimétricos dos glúons da QCD são conhecidos como gluinos e, como parceiro do gráviton, partícula de massa nula e spin-2 (o quantum da interação, gravitacional), aparece o gravitino, férmion eletricamente neutro com spin-3/2. Nenhum desses parceiros supersimétricos é degenerado em massa com o bóson que acompanha; por exemplo, o fotino e o gravitino não são partículas de massa de repouso nula, como o fóton e o gráviton.

Isso impõe que a maneira de se introduzir a Supersimetria nas teorias de interações fundamentais, de forma compatível com a realidade experimental de que dispomos, é através dos chamados mecanismos de quebra. Propõe-se que a Supersimetria tenha operado no Universo em seus instantes iniciais e que, com o resfriamento do mesmo, essa simetria entre bósons e férmions

tenha sido quebrada (existem mecanismos específicos e independentes para se implementar a violação da Supersimetria) de tal forma que, em seu regime atual, as partículas introduzidas pela Supersimetria no espectro físico tenham suas massas numa escala acima da escala acessível aos experimentos atuais de altas energias. Isso significa que os “inos” devem estar todos localizados na escala do TeV, ou seja, uma ordem de grandeza acima da escala fixada para a separação das interações fracas dos setores eletromagnético e forte, o que ocorre na faixa das centenas de GeV. Apenas para efeito de referência, a energia de repouso do próton é de 0.938 GeV.

A Supersimetria também tocou questões teóricas muito relevantes, como o atenuamento das divergências (quantidades infinitas) no regime ultravioleta (região de altíssimas energias) das teorias quânticas de campos, essenciais para a descrição das interações fundamentais, e culminou com uma teoria de gravitação com mais possibilidades de consistência do que a Gravitação Quântica tradicional; além dessa notável realização, a Supersimetria possibilitou a formulação da primeira classe de teorias quânticas de Yang-Mills livres de qualquer tipo de divergência ultravioleta, concretizando uma grande expectativa de Dirac, que sempre sustentava que uma teoria quântica viável deveria ser absolutamente finita. Também, na sua busca por uma teoria de unificação dos diferentes campos de força, a Supersimetria resolve alguns problemas fundamentais de consistência que o programa usual de unificação enfrenta.

Os dez primeiros anos de desenvolvimentos em Supersimetria (1974 – 1984) foram marcados pela incorporação dessa simetria na Física de Partículas, no programa de unificação e no projeto de construção de uma teoria matematicamente consistente para a gravitação. Vários modelos de Supergravidade foram propostos, e a célebre Supergravidade- $N=8$, com uma série de mecanismos agregados, figurou, por certo tempo na literatura, como o paradigma da teoria mais propícia para a unificação das interações fundamentais.

A segunda fase, iniciada em 1985, já nos apresenta a Supersimetria em uma outra perspectiva, colocando-a na qualidade de um ingrediente físico e matemático necessário para a construção das Teorias de Supercordas – nessa visão, genuínas teorias fundamentais – as quais, espera-se, possam propiciar o cenário que viabilize o programa de unificação, incorporando o setor gravitacional, descrito, nesse novo panorama, por uma teoria quântica consistente para a gravitação. A Supersimetria foi, assim, definitivamente incorporada à Física

de Partículas e vem sendo, de forma crescente, aplicada, também, a outros campos da Física, como a Física Nuclear, a Física da Matéria Condensada e, até mesmo, a alguns sistemas biofísicos.

Podemos falar, também, de uma terceira fase da Supersimetria, iniciada em 1996, através da ideia de uma simetria a que se refere como dualidade. Esse conceito de dualidade em um mundo supersimétrico aprofundou, significativamente, a nossa visão das interações nucleares fortes e um conceito fundamental dessas interações: o confinamento de quarks e glúons.

Seria bastante oportuno, ainda, mencionar que sistemas quanto-mecânicos muito simples, como aqueles constituídos por partículas, carregadas ou neutras, e sujeitas a certas configurações de campo magnético externo, exibem características de uma supersimetria que se revela como uma simetria dinâmica. Essa é uma indicação de como a Supersimetria poderia ser subjacente a interessantes sistemas quânticos realísticos. Finalmente, com a entrada em operação do Large Hadron Collider (o LHC), a partir de 2009, espera-se dispor de recursos experimentais suficientes para a busca e a identificação de partículas supersimétricas (o que seria um teste direto da Supersimetria) e de outras consequências indiretas da presença da Supersimetria no mundo físico, reforçando o seu marcante papel na formulação das teorias fundamentais para a descrição dos campos de força da Natureza. A descoberta do Bóson de Higgs, a última peça do Modelo-Padrão a ser detectada nas colaborações ATLAS e CMS do LHC, abre espaço para a busca direta (no ATLAS e no CMS) ou indireta (no ALICE/LHC) de partículas introduzidas pela Supersimetria.

Uma observação de caráter pedagógico a respeito da Supersimetria pode ser feita a partir de uma experiência social da qual participamos desde 1994, através do ensino de Física e da realização de atividades de divulgação científica nos chamados Pré-Vestibulares Sociais ou Comunitários. No sentido de motivar os jovens e lhes transmitir o estímulo para a pesquisa científica antes de seu ingresso nas universidades, criamos, em nosso Núcleo de Petrópolis, a disciplina “Introdução às Teorias Quânticas e à Física de Partículas Elementares”. Em nossas discussões, temos ressaltado sempre o papel social e transformador do conhecimento científico e da indução, e a partir deste, novas tecnologias.

Os 100 anos da Relatividade Geral, celebrados em 2015 (também escolhido como o Ano Internacional da Luz), culminaram com a detecção

experimental das ondas gravitacionais, uma das grandes previsões dessa teoria. A descoberta deu-se em Setembro de 2015, mas o anúncio oficial foi feito em Fevereiro de 2016.

O nosso esforço, nesta contribuição a este volume, é mostrar o importantíssimo papel do conceito de simetria na construção de novas teorias para as interações fundamentais e para a predição de um grande número daquelas partículas que são genuinamente elementares e de outras estruturas físicas. Foi o caso dos neutrinos, dos quarks, das correntes neutras dos processos fracos, do Bóson de Higgs e, mais recentemente, das ondas gravitacionais.

A simetria e os conceitos matemáticos abstratos a ela inerentes nos permitem perceber uma realidade além da Natureza observada. O conceito de multipletes das simetrias é o elemento-chave para completarmos várias lacunas que a Natureza parece ter. A partir de algo observado no mundo natural – e isso pode acontecer de forma espontânea ou induzida – e da associação dessa particular descoberta a uma certa simetria, temos o caminho para novas predições. A Natureza observada pode abrir espaço para uma realidade concebida; conhecendo essa realidade, partimos para um processo experimental com o propósito de constatar se essa realidade imaginada pode vir a ser parte da Natureza. Sob essa ótica, poderíamos pensar na simetria como o elemento indutor de realidades que podem ampliar a nossa visão de Natureza.

Bibliografia

Costa-Soares, T., Helajel-Neto, J. A. , Belich Jr, H. *A Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais*. Juiz de Fora, CAPES, 2013, 66p.

A Vida Secreta dos Fótons: Como os Astrônomos Descobrem a Luz?

*Professor João Rodrigo Souza Leão
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN*

Prólogo

No princípio, tudo era escuro. Não havia a luz, nem o céu, tampouco as estrelas. Não existiam os planetas e muito menos nosso planeta azul que hoje vaga solitariamente em sua órbita, em torno de uma estrela que chamamos de Sol. No princípio, não havia sequer os elementos químicos, nem estrelas ou galáxia alguma. No princípio, era somente a escuridão. Foi então que uma enorme expansão passou a ocorrer, e o universo aumentou rapidamente de tamanho. Durante esse processo, ocorreu o resfriamento do universo e a formação das primeiras estrelas que começaram a queimar os elementos químicos de seus núcleos, transformando-os em elementos químicos ainda mais complexos. Milhares e milhares de estrelas formam as inúmeras galáxias do universo. Mas foi somente com a morte das primeiras estrelas que o universo passou a enriquecer-se quimicamente e pôde originar novas gerações de estrelas ainda mais complexas. Através de bilhões de anos, o processo se repetiu. E as estrelas encheram o universo de fótons, ou partículas de luz. Finalmente, em uma galáxia distante, que contém uma estrela ordinária e comum, processos interessantes passaram a ocorrer. Em um pequeno planeta azul, que orbita essa tão comum estrela, reações químicas complexas passaram a produzir compostos químicos estáveis e capazes de se reproduzir. A evolução geológica, química e climática permitiu o surgimento de reações químicas ainda mais complexas que originaram os primeiros seres vivos. Estes evoluíram ao longo de bilhões de anos, e surge a espécie humana, capaz de interagir e

interferir no planetinha azul. Os humanos eram inquietantemente curiosos e, logo, indagaram a respeito das estrelas e se perguntaram sobre as estações do ano e sobre as frequentes mudanças climáticas. Os curiosos humanos ficaram cada vez mais intrigados com os fenômenos que ocorriam nos céus. Mas eles olhavam para os céus, contemplavam o cosmos e pouco podiam compreender. Ao olharem para os céus, encontravam mais perguntas do que respostas. O que seriam as luzes que iluminavam as noites escuras? O que seria a imensa bola de fogo que iluminava o dia? O que seria a esfera prateada que mudava de tamanho nos céus? As respostas mudariam a humanidade para sempre e revelariam a intrínseca beleza do mundo natural. As respostas revelariam detalhes ocultos e propriedades inimagináveis da natureza. Mas a verdade os levaria, também, a contemplarem a si mesmos dentro de uma perspectiva cósmica. A verdade os levaria a questões profundas sobre a vida e a morte. Sobre a existência e a destruição. Sobre a luz e a escuridão. Eles mal podiam imaginar...

Introdução

A astrofísica pode ser definida como uma das ciências mais interessantes existentes. Não porque as demais não sejam muitíssimo interessantes também, mas porque essa área do conhecimento dispõe de um único método para investigar nosso vasto universo: a Luz. Nenhum astrônomo pode se dar ao luxo de visitar um planeta distante ou de levar uma estrela para o laboratório. Essas afirmações podem parecer estranhas, mas pensem bem: biólogos, botânicos, químicos, físicos, bioquímicos e tantos outros cientistas podem, na maioria das vezes, levar exemplares de seus objetos de estudo para seus laboratórios ou, então, fazer uma viagem de campo e coletar amostras, rochas, plantas, animais ou elementos químicos para análise e estudo. Os astrônomos não podem fazer o mesmo! Tudo, ou quase tudo, está longe demais, a distâncias literalmente astronômicas, longe dos laboratórios e além do alcance de nossas curiosas mãos.

Salvo amostras das rochas lunares, trazidas pelos astronautas das missões Apolo dos anos 1960 e 1970 e de alguns meteoritos que atingem nosso planeta, **nosso conhecimento sobre astronomia é totalmente baseado no que podemos observar através da luz** emitida ou refletida que percorre distâncias enormes, atravessa nossa atmosfera e chega até nossos instrumentos. Esqueça

a noção de que a astronomia se faz apenas com a luz visível! Modernamente, existem detectores que operam em terra e no espaço que podem sondar a natureza da luz e das radiações em todos os seus comprimentos de onda, passando pelo infravermelho, ótico, ultravioleta, rádio e micro-ondas. Mas, de qualquer forma, temos apenas as radiações eletromagnéticas para sondar, estudar e compreender o vasto universo em que vivemos.

É por isso que a astronomia é tão interessante: não podemos pegar, tocar, ver, aprisionar ou analisar estrelas e galáxias em laboratório, como fazem outros cientistas com seus objetos de estudo. Mas, mesmo diante dessa absurda e aparentemente incontornável limitação, a astronomia moderna entende o funcionamento de estrelas e os seus processos de geração de energia; compreendemos a colisão de galáxias, a variação do brilho de estrelas, entendemos buracos negros, nebulosas e tantos outros fenômenos astronômicos.

Como foi possível tanto avanço se não podemos tocar as estrelas ou sondá-las de perto? Como podemos dizer que compreendemos as galáxias e as nebulosas se podemos apenas vê-las pelos nossos telescópios e detectores? Você acreditaria em um biólogo que diz compreender uma determinada espécie sem nunca ter tocado em um espécimen daquele animal? Acreditaria se esse cientista afirmasse que conhece sua anatomia completa sem nunca ter dissecado aquele bicho? É exatamente isso que afirmam os astrônomos: conseguimos entender as estrelas e o que ocorre no núcleo delas sem nunca termos tocado em uma estrela. **Dispomos apenas da luz.** Nós, astrônomos, afirmamos ainda: sabemos como as galáxias interagem, suas características e propriedades. Sabemos tudo isso através de fotografias e diagramas construídos apenas com a luz que chega desses astros. Seria como um médico dizer que sabe as enfermidades de um paciente apenas pelas suas fotos. Mas os astrônomos afirmam ainda mais: sabemos o provável destino do universo, sua inexorável expansão, sua aceleração crescente, seu tamanho e idade! Sabemos tudo isso apenas analisando a luz! Como isso é possível? Você, com razão, poderia se perguntar: Como podem ser tão mentirosos esses pretensiosos astrônomos? Mas calma! Não nos julgue antecipadamente!

Para entender como a luz pode revelar tanto a respeito do universo é que escrevi este capítulo. Talvez eu tenha escrito para convencer a mim mesmo do alcance e do poder da luz. Eu mesmo, apesar de vários anos estudando astronomia, ainda me pergunto: como sabemos tanto a respeito do universo,

se temos tão pouco para sondá-lo? Afinal, contamos apenas com a luz e suas interessantes partículas chamadas fótons.

As respostas para essas inquietantes indagações são fascinantes e nos levarão a conhecer a natureza da luz e suas propriedades. Entenderemos que a luz interage com o meio no qual se propaga, muda suas características, curva-se diante de aglomerados de galáxias, interage com o gás das estrelas, rico em elementos químicos variados e que deixam assinaturas inquestionáveis de sua composição na luz que detectamos. A luz não é simplesmente a luz. A luz e as radiações que os astrônomos detectam são verdadeiras **assinaturas ou impressões digitais** dos mais variados cenários e configurações físicas dos lugares por onde ela passou. Ao se propagar pela vastidão do cosmos, a luz interage com elementos químicos diversos. A assinatura inquestionável desses elementos deixa marcas e evidências. Os astrônomos aprenderam a sondar essas minúsculas evidências e suas importantes consequências. Os astrônomos aprenderam a interpretar a “poesia” da luz que diz tanto a respeito do universo e de seus elementos. Sobretudo, os astrônomos aprenderam a “descobrir” a luz e o que ela pode revelar a respeito do universo. Neste capítulo, vamos revelar como a astrofísica moderna descobriu, verdadeiramente, a vida secreta dos fótons.

O que é a luz?

Essa pergunta já recebeu muitas respostas ao longo da história da física. Seria impossível mostrar, neste capítulo, tudo o que sabemos sobre a luz e as múltiplas respostas que essa pergunta pode receber. Entretanto podemos fazer um resumo, passando pelas principais descobertas. Cientistas da antiguidade e mais recentes como Galileu Galilei (1564 - 1642) se preocuparam com a natureza da luz e com suas propriedades. Galileu realizou, em 1638, a experiência das lanternas para determinar a velocidade da luz, mas ela foi inconclusiva pelas imprecisões dos relógios da época e pela inadequação do método à altíssima velocidade que se pretendia medir. Galileu concluiu: “A velocidade da luz deve ser altíssima, se não for infinita” (SMALLWOOD, 2013).

Além da velocidade da luz, outra controvérsia era a respeito de sua natureza: corpuscular ou ondulatória? A luz era composta por partículas de luz (o que modernamente chamamos de fótons), ou era composta por ondas? Durante os séculos XVII e XVIII, permaneceu em evidência a teoria

corpúscular da luz, que foi promovida através do prestígio do físico inglês Isaac Newton (1643-1727). Nessa teoria, especulava-se que a luz era composta por diminutas partículas. Essa abordagem evidenciava o pensamento mecanicista que dominava a física daquela época. Entretanto novas experiências acabariam por revelar resultados que não podiam ser explicados pela teoria corpúscular.

Isso ocorreu no início do século XIX, quando experiências com fendas revelaram o caráter ondulatório da luz. Uma delas foi realizada em 1802, pelo físico inglês Thomas Young (1773-1829). Nessa experiência, uma fonte de luz é interceptada por uma fenda simples e depois por uma fenda dupla, onde ocorre o fenômeno da difração da luz, que é a mudança de direção da luz ao encontrar obstáculos, rugosidades, dobras ou fendas. O esquema e o correspondente padrão de interferência observado são mostrados na **FIGURA 1**. Após as fendas, um anteparo coleta a luz e revela padrões de luminosidade e escuridão característicos de ondas, mostrando que, em alguns pontos, as ondas de luz interferiram coerentemente (e aumentaram de intensidade) e que, em outros pontos, a interferência foi destrutiva (causando os padrões de escuridão observados). Mais tarde, em 1921, o físico alemão Joseph von Fraunhofer (1787-1826) realizou experiências similares que sustentaram e ampliaram as conclusões de Young, favorecendo a descrição ondulatória da luz¹, pois **somente ondas podem interferir e exibir os padrões observados**.

1 Curiosamente, trabalhos realizados em 1905 e em 1923, realizados por Albert Einstein (1879-1955) e Arthur Holly Compton (1892-1962), revelaram aspectos corpusculares da radiação luminosa. Modernamente, sabemos que tanto a visão ondulatória da luz quanto a visão corpúscular da luz estão corretas e que, dependendo da experiência, uma ou outra característica podem ser evidenciadas.

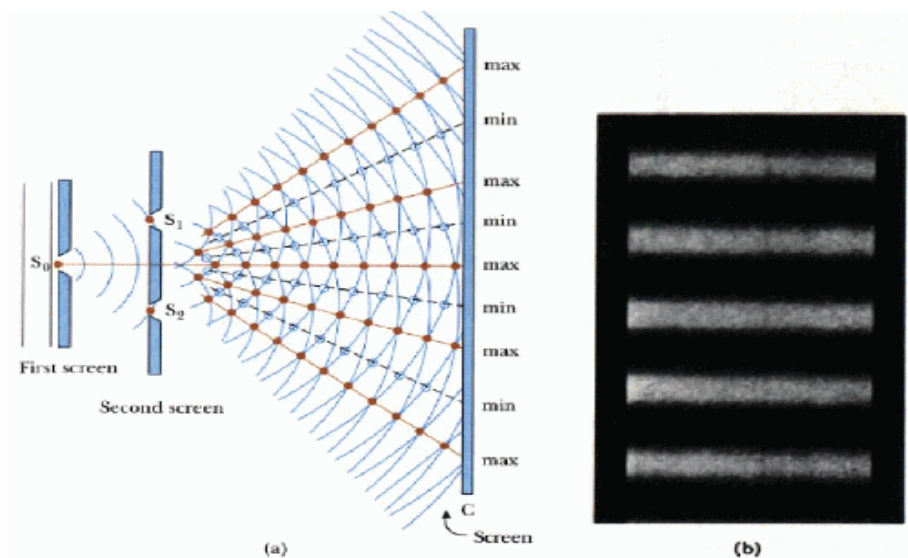


FIGURA 1: Esquema representativo da experiência de Young de 1802 (lado esquerdo). No Alvo (lado direito), seriam observados os padrões de interferência, com regiões claras (interferência construtiva) e escuras (interferência destrutiva). Apenas ondas poderiam exibir os comportamentos observados nas diversas experiências realizadas. Crédito da figura:

Disponível em: <<http://physics.stackexchange.com/questions/114926/youngs-double-slit-experiment-what-would-happen-if-the-first-slit-was-too-w>>. Acesso em 5 de outubro de 2016.

Outro parâmetro importante para se entender a natureza da luz era sua velocidade, mas essa grandeza ficou desconhecida até meados do século XIX. Foi somente em 1851 que o cientista francês Armand Fizeau (1819-1896) utilizou uma roda dentada para determinar com precisão a velocidade da luz. O valor encontrado por Fizeau foi de 313.300 km/s, com um erro de apenas 5% em relação ao valor mais aceito atualmente que é de 299.972,46 km/s. A descoberta de que a luz tem uma velocidade finita, com um valor tão bem determinado, solidifica nossos conhecimentos sobre a luz e ajuda a astronomia que se utiliza da luz para determinar distâncias, brilhos e tantos outros parâmetros (WIKIPEDIA, 2016).

O século XIX ainda reservava mais surpresas que revelariam a verdadeira natureza da luz. Curiosamente, os estudos sobre a natureza da luz foram ajudados pelo estudo do **eletromagnetismo**. Vários cientistas contribuíram para o desenvolvimento desse campo da ciência, e não faremos aqui uma revisão completa sobre esse importante assunto, mas podemos citar o

físico e químico inglês Michael Faraday (1761–1867), descobridor da Lei da **indução eletromagnética** em 1831. Essa importante lei do eletromagnetismo prova que campos magnéticos variáveis geram campos elétricos e forças eletromotrizes. Esse é o princípio físico essencial para o entendimento de motores elétricos, geradores e outras máquinas elétricas. Faraday deu, ainda, imensas contribuições à química e à metalurgia, sendo uma das mentes mais brilhantes que a humanidade já produziu.

Outro importante cientista que contribuiu experimentalmente para o desenvolvimento do eletromagnetismo foi o físico francês André-Marie Ampère (1775–1836). Ele mostrou que **campos magnéticos interagem com fios que transportam correntes**. Mostrou, ainda, que fios paralelos que transportam correntes elétricas podem se atrair, quando as correntes estão no mesmo sentido; ou se repelir, quando as correntes são em sentidos opostos.

Outras inúmeras experiências e avanços matemáticos foram necessários para o completo desenvolvimento do eletromagnetismo, mas coube ao matemático e físico James Clerk Maxwell reunir todos os resultados da ciência do eletromagnetismo em 20 equações. Maxwell foi capaz de traduzir para a matemática e o cálculo a fenomenologia observada a respeito das ondas eletromagnéticas. Um de seus principais resultados foi o cálculo do valor da **velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas** e a sua “coincidência” para o valor mais aceito para a propagação da velocidade da luz. Maxwell achou que isso não seria apenas uma mera coincidência e atribuiu à luz todas as características das chamadas ondas eletromagnéticas. Assim, do ponto de vista da física atual, **a luz é uma onda eletromagnética** e o valor de sua velocidade de propagação pode ser calculado através das características do meio de propagação.

Dessa forma, o trabalho de Maxwell não apenas elucidou a natureza física da luz, mas também, através do cálculo de sua velocidade, foi capaz de revelar que **a luz e demais radiações eletromagnéticas são composições de campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo**. Como a velocidade de propagação depende das propriedades do meio de propagação, fica clara a dependência do meio ótico através do qual a luz se propaga. No vidro, em acrílicos e na água, a luz se propaga com uma velocidade menor do que no vácuo. Somente nesse último meio é que a luz pode se deslocar com velocidade máxima que é de, aproximadamente, 300.000 km/s. Esse é um dos resultados mais belos da física clássica, pois unificou os fenômenos elétricos, magnéticos e

óticos em um único conjunto de equações coerentes e simples. Essa unificação foi capaz de revelar a natureza da luz e de outros tipos de radiação.

Anos mais tarde, em 1888, o alemão Henrich Rudolf Hertz (1857-1894) demonstrou a existência física de ondas eletromagnéticas através da construção de emissores e receptores dessas ondas. Por fim, já no final do século XIX, o Inglês Oliver Heaviside (1850-1925) reformulou as 20 equações originais de Maxwell e as reduziu para apenas 4 equações (HEAVISIDE, 1892; HEAVISIDE, 1894).

A conclusão é que, modernamente, a luz é uma entre as várias **radiações eletromagnéticas** existentes. A luz visível (aquela que podemos detectar com o olho humano) é apenas uma faixa estreita no imenso espectro eletromagnético, que inclui ainda as micro-ondas, o ultravioleta, o infravermelho e várias outras faixas de radiação com frequências características, conforme pode ser visto na **FIGURA 2**. A faixa do ótico vai desde 400 nm até 700 nm. Abaixo de 400 nm, encontra-se o ultravioleta, e, acima dos 700 nm, encontra-se a região do infravermelho.

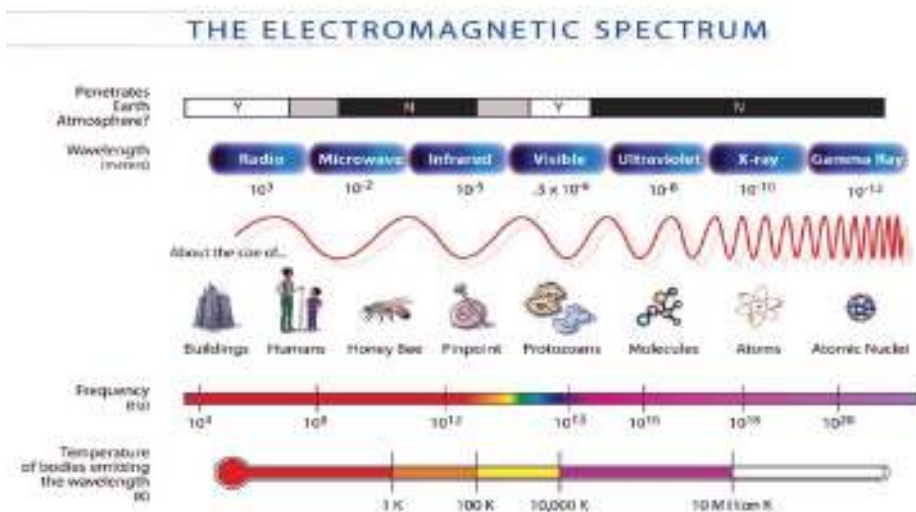


FIGURA 2: Espectro eletromagnético. Esta figura mostra os comprimentos de onda e sua relação com tamanhos, frequências e temperaturas. Os comprimentos de onda correspondentes ao visível estão entre 400 e 700 nano metros. Comprimentos de ondas maiores do que 700 nm correspondem ao infravermelho e têm menos energia do que os comprimentos de onda abaixo dos 400 nm, que correspondem ao ultravioleta. Crédito da Imagem: NASA.

Disponível em: <http://myasadata.larc.nasa.gov/images/EM_Spectrum3-new.jpg>. Acesso em 01 de outubro de 2016.

Como já mencionado, os objetos de estudo do astrônomo encontram-se muito longe. Assim, a missão dos astrônomos é capturar os fótons de luz visível e também de outras faixas do espectro eletromagnético. Uma vez que entendemos o que é a luz, resta aos curiosos astrônomos identificar a origem dos fótons “capturados” e explicar a fenomenologia observada. Será que apenas a luz pode revelar a natureza física de objetos tão distantes? Neste artigo, vamos explorar como os astrônomos fazem seus estudos, como a luz é de fato capturada, analisada e utilizada para a determinação das cores, idades e distâncias das estrelas. Vamos mostrar como são calculados vários parâmetros de interesse que podem revelar a beleza do vasto e complexo universo que observamos. Sobretudo, vamos explorar os detalhes que permitem aos astrônomos estudarem o universo, analisando apenas com os fótons. Essas misteriosas partículas de luz carregam muita informação a respeito do universo. Mas como? De que maneira a radiação carrega essa informação? Como podemos revelar os fótons e ao mesmo tempo estudar o universo? As respostas são surpreendentes e mostram que a vida secreta dos fótons carrega muitos segredos.

Como os astrônomos capturam a luz?

Os primeiros astrônomos foram, sem dúvida, os primeiros *Homo sapiens*, nossos ancestrais que, ao olharem para o céu, sem a ajuda de instrumentos, formularam as primeiras perguntas a respeito de nosso universo. Podemos imaginar que esses primeiros astrônomos foram guiados pela **curiosidade** em entender os pontos luminosos do céu, que, atualmente, chamamos de estrelas. Podemos imaginar, ainda, que eles indagaram sobre o fenômeno astronômico mais dramático e notável de todos: o nascer e o pôr do sol. Seria interessante, ainda, ver a perplexidade dos seres humanos primitivos ao testemunharem o ciclo lunar, durante o qual a lua muda de posição e tamanho. Esses primeiros astrônomos não contavam com quaisquer aparelhos para auxiliarem suas observações. E, sem modelos físicos coerentes, podemos imaginar que essas rudimentares observações traziam mais perguntas e perplexidade do que esclarecimentos.

O homem anatomicamente moderno surgiu há apenas 200.000 anos. É muito provável que eles tenham utilizado o **misticismo e as religiões** primitivas para entender os céus e seus fenômenos. É provável, também, que

tenham atribuído as explicações a divindades e mitos. Entretanto eles estavam utilizando uma interessante máquina biológica para investigar o cosmos: o fantástico e complexo **olho humano**. Esse órgão surgiu há milhões e milhões de anos em espécies ainda mais antigas do que a nossa. E, em nosso planeta, iluminado pelo nosso sol, que emite luz na faixa do ótico (**FIGURA 2**), não é surpresa que esse interessante órgão tenha evoluído e ficado especialmente sensível nessa faixa de comprimentos de onda.

É interessante notar que até mesmo o pai da Teoria da Evolução das Espécies, o naturalista Inglês Charles Darwin (1809-1882), tenha ficado perplexo ao admirar o olho humano (e de outras espécies animais) do ponto de vista evolutivo, pois ele afirmou em seu famoso livro *A Origem das Espécies*: “A evolução do olho humano, apenas pelo mecanismo da seleção natural, é totalmente absurda” (DARWIN, 1859). Modernamente, sabemos que os olhos de várias espécies animais têm uma enorme variabilidade e que podem ter surgido de maneira independente pelo menos uma centena de vezes ao longo da evolução (LANDE, 2002), sendo que os fósseis mais antigos contendo evidências de olhos primitivos são de 540 milhões de anos atrás (PARKER, 2003).

Entretanto o olho humano tem limitações e não pode capturar toda a luz que vem dos mais vastos confins do universo. Tudo o que vemos com nossos olhos, sem o auxílio de instrumentos, são as estrelas que compõem a linda Via Láctea, nossa galáxia natal. Outra limitação é que **o olho humano é sensível apenas no ótico** ou faixa do visível. Todavia os fenômenos astronômicos podem ocorrer em variados contextos físicos, que são capazes de liberar radiação e luz em **diversas faixas de comprimento de onda**, nas quais nosso limitado olho não é capaz de operar.

É justamente por essas limitações que utilizamos **telescópios e lunetas** para auxiliar as observações astronômicas. E quando passamos a utilizar esses instrumentos? Como eles funcionam? O cientista italiano Galileu Galilei (1564-1642) foi o primeiro a apontar um instrumento ótico para os céus². Isso ocorreu em 1609 e, embora aquele instrumento fosse muito limitado, Galileu foi capaz de identificar as crateras e características da superfície lunar. Ele pôde, ainda, ver centenas de estrelas que não poderiam ser vistas sem o auxílio

2 Existe uma interessante controvérsia a respeito da invenção do telescópio e do pioneirismo de sua utilização. Para mais referências, o leitor interessado deve consultar o livro *Astrophysical Techniques* (KITCHIN, 2009, p.51-61.).

daquele instrumento. Isso ocorre porque o telescópio de Galileu era uma composição de duas lentes que, colocadas em sequência dentro de um tubo, podem resultar em imagens aumentadas de objetos distantes. Por outro lado, a **área das lentes** (tamanho) e a **qualidade** das mesmas (polimento, acabamento, curvatura, transparência) são determinantes para uma boa qualidade das imagens astronômicas.

O fenômeno físico que explica a produção de imagens através de lentes é a **refração**, que é a mudança de direção de um raio de luz ao passar de um meio para outro. A magnitude da mudança de direção de propagação depende da frequência (cor) do raio de luz e da diferença entre os meios, uma propriedade conhecida como **índice de refração**. A **FIGURA 3** mostra o fenômeno da refração através de um experimento simples.

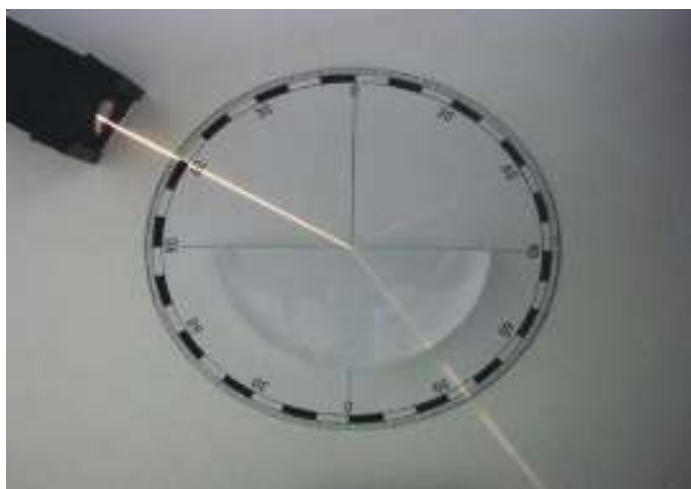


FIGURA 3: Fenômeno da refração. O raio de luz incidente é refratado ao passar do ar para a lente de vidro. Parte da luz é também refletida.

Crédito da imagem: Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Fizped>>. Acesso em: 03 de outubro de 2016.

Nessa experiência, um raio de luz vindo da esquerda incide sobre a superfície de uma lente de vidro. Ao passar do ar para o vidro, fazendo um ângulo de 60 graus com a vertical, o raio de luz muda de direção, passando a se propagar dentro do vidro, fazendo um ângulo um pouco maior do que 30 graus com a vertical. Parte do raio luminoso também é refletida e emerge do lado direito, fazendo um ângulo de 60 graus com a horizontal. **A mudança de**

direção da luz, ilustrada nesse experimento, constitui o fenômeno da refração. Através de lentes cuidadosamente posicionadas, podem ser obtidas imagens através dos raios refratados. A distância entre as lentes (geralmente duas) e os seus respectivos poderes de aumento pode gerar a curvatura (refração) ideal dos raios de luz, de modo a formar imagens nítidas e ampliadas.

A evolução do telescópio refrator de Galileu (que utilizava lentes) foi o telescópio refletor (que utiliza espelhos) de Isaac Newton (1643-1727). Esse importante cientista inglês fez contribuições na matemática e inventou o cálculo diferencial integral. Além disso, conseguiu formular descrições matemáticas para as leis do movimento e descreveu a força da gravidade. Além de tudo isso, Isaac Newton fez, ainda, contribuições à ótica e inventou o telescópio refletor que, segundo as melhores referências, foi inventado em 1668 (século XVII).

A vantagem do telescópio refletor em relação ao refrator é que o refletor produz menos **aberração cromática**, embora o refletor sofra de distorções e de limitações também, ainda que menores. A aberração cromática é um problema que surge relacionado à refração e se deve à dificuldade de focalizar todos os comprimentos de onda ou cores em um único ponto focal. Isso torna as imagens distorcidas. É por essa e por outras razões que os telescópios refletores são utilizados até os dias atuais, com modificações em relação ao modelo original de Newton, obviamente. A **FIGURA 4** mostra um moderno telescópio profissional localizado no deserto do Chile.



FIGURA 4: Telescópio Gemini Sul, localizado no Chile. Esse telescópio é um dos mais modernos do mundo e seu espelho principal possui 8,1 m de diâmetro. O telescópio está localizado a uma altitude de 2700 m acima do nível do mar, bem acima dos indesejáveis efeitos da atmosfera terrestre. O Brasil é sócio desse telescópio com outros países. Há outro telescópio idêntico a esse no estado americano do Havaí, no hemisfério norte.

Ao longo dos séculos XVII, XVIII e XIX, as técnicas de polimento de lentes e montagem de telescópios foram sendo aperfeiçoadas, de maneira que, no século XIX, já existiam telescópios bastante evoluídos, com grande área coletora de fótons (tamanho do espelho), com diferentes montagens. Em meados do século XIX, já existiam telescópios cujo espelho principal tinha diâmetros da ordem de 1,8 m (72 polegadas). Foi, também, no século XIX que surgiu um importante aliado da astronomia e da astrofísica: o **espectrógrafo**.

Esse aparelho é composto por **redes de difração**, que nada mais são do que fendas muito estreitas, minuciosamente separadas, que são capazes de desviar a luz de diferentes maneiras. As primeiras redes de difração utilizavam fios de cabelo e penas de pássaros (século XVII), e as mais modernas, que são do início do século XIX, utilizavam finos fios metálicos para o mesmo propósito. Essas redes mais precisas foram estudadas e experimentadas por volta de 1821, com grande precisão, pelo físico alemão Joseph von Fraunhofer (1787 -1826).

Os espectrógrafos, que utilizam redes de difração, são capazes de separar um feixe de luz em seus comprimentos de onda correspondentes. Da

mesma forma que um pedaço de vidro ou prisma pode separar a luz branca em suas cores constituintes (vermelho ao violeta), um espectrógrafo pode **separar os comprimentos de onda da luz**, pois diferentes comprimentos de onda reagem de maneira diferente ao passarem por redes de difração. A experiência mostra que a luz vermelha (maior comprimento de onda) é mais difratada (desviada de seu caminho original) do que a luz azul (menor comprimento de onda). Dessa forma, um feixe de luz cujo “conteúdo” é desconhecido pode ser revelado. Um anteparo é usado para se projetar os comprimentos de onda que constituem o feixe de luz original. Nas seções seguintes, voltaremos a falar sobre os espectrógrafos e sobre a ciência da **espectroscopia**, que é a utilização desse aparelho para investigar a luz.

Outra ferramenta que ajuda o astrônomo a capturar a luz é a **astrofotografia** (ALMEIDA; SANTOS; LEÃO, 2012). Embora as primeiras fotografias da Lua tenham sido feitas em meados do século XIX, foi somente no final daquele século que as técnicas de astrofotografia e de registro em placas fotográficas evoluíram, e foi possível fazer o registro de estrelas. Já no século XX, as técnicas de astrofotografia foram melhoradas e aperfeiçoadas. A partir do final do século XX, a astrofotografia passou a ser digital, com o emprego de câmeras cada vez mais modernas e com alto poder de resolução.

Outra ferramenta muito importante para os astrônomos são os **filtros astronômicos** que, colocados entre o foco principal do telescópio e a câmera fotográfica (ou espectrógrafo), podem facilitar a observação de comprimentos de onda específicos. Modernamente, existem filtros que operam no ótico (azul, vermelho, verde), no ultravioleta, no infravermelho etc. Cada filtro separa um comprimento de onda específico da radiação, e isso pode ajudar o cientista a evidenciar determinadas características do objeto em estudo.

Assim, as principais ferramentas do astrônomo são os **telescópios** (e lunetas), **espectrógrafos**, **fotografias astronômicas** e **os filtros astronômicos**. São precisamente esses aparelhos que ajudam os astrônomos a **capturar os fótons**. Nas próximas seções, vamos explorar como essas ferramentas são inteligentemente utilizadas pelos astrônomos para investigar a vasta e complexa beleza do universo, que só pode ser revelada através dos fótons, cujas vidas secretas temos a missão de desvendar.

Como a luz pode revelar a cor e a temperatura das estrelas?

Em 1900, os físicos estavam estudando como ocorre a emissão de radiação em função do comprimento de onda para um corpo aquecido em equilíbrio térmico. Em outras palavras, qual a densidade de radiação (ou luz) que é emitida por um corpo quando ele é aquecido? Quanta radiação é emitida em cada faixa de comprimento de onda? Esse foi um difícil problema para a física do século XIX e do início do século XX, pois os dados experimentais contrariavam as melhores teorias da época. Coube ao cientista alemão Max Planck (1858-1947) propor a solução do problema que não apenas ajustou a teoria aos dados experimentais, mas também abriu as portas para uma nova era para a física. A **FIGURA 5** mostra um diagrama que ilustra o problema estudado por Planck, relacionando a densidade da radiação emitida com o comprimento de onda da radiação observada.

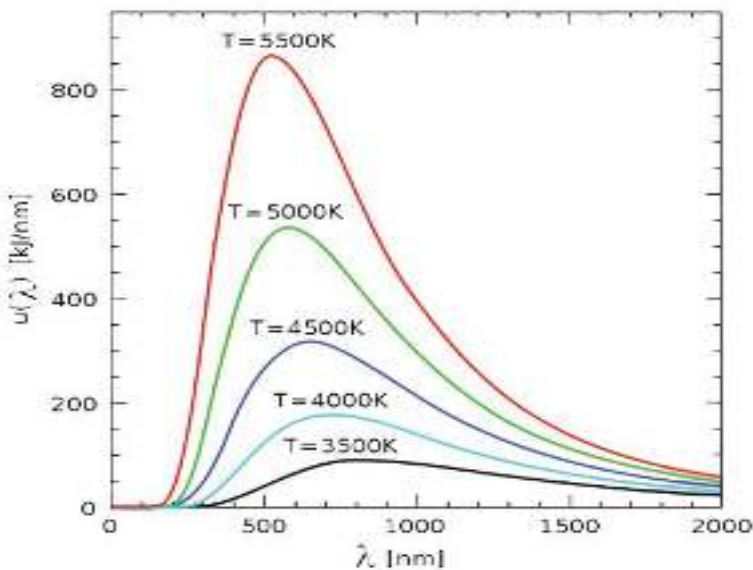


FIGURA 5: Densidade de radiação emitida em função do comprimento de onda, de acordo com a lei de distribuição de energia de Planck. A temperatura superficial é mostrada para cada curva, de acordo com a lei de Wien. Quanto mais quente é um corpo aquecido, mais radiação ele emite nas regiões de comprimento de onda menores.

A explicação proposta por Planck³ sugeria que, em microescala, as partículas poderiam trocar, ceder ou perder energia apenas em quantidades fixas, levando à quantização dessa quantidade e, também, à quantização de diversos outros parâmetros. Assim, a característica principal da mecânica quântica é a ideia (e constatação) de que, no mundo microscópico, as partículas somente podem trocar energia em pacotes ou quantidades bem definidas⁴.

Nessa figura, observamos que os corpos mais quentes possuem o pico de suas emissões em comprimentos de onda menores. A física quântica nos ensina que comprimentos de onda menores correspondem às radiações de maior energia; e que comprimentos de onda maiores correspondem às radiações de menor energia. Ou seja: comprimento de onda e energia são inversamente proporcionais. Dessa forma, o diagrama da **FIGURA 5** mostra que a maior parte da emissão dos corpos quentes ocorre em comprimentos de onda menores, correspondendo a uma faixa de maior energia. Em outras palavras: quanto mais quente for um corpo, mais radiação ele emite e mais deslocado para a esquerda (correspondendo a comprimentos de onda menores na **FIGURA 5**) será o pico de emissão.

A faixa do ótico ou espectro visível é apenas uma fração de todo o espectro eletromagnético (**FIGURA 2**). Essa faixa se estende desde 400 nm (azul) a 750 nm (vermelho), sendo que um nanômetro (nm) corresponde a 10^{-9} m. Isso significa que os menores comprimentos de onda dessa faixa correspondem ao azul, e os maiores comprimentos de onda correspondem ao vermelho. Por isso dizemos que as estrelas mais quentes são azuis e as mais frias são vermelhas. Isso ocorre porque o pico de emissão das estrelas mais quentes ocorre na região do azul e o pico de emissão das estrelas mais frias ocorre na região do vermelho. Esse fato estabelece uma correspondência entre temperatura e cor.

E o que isso tudo tem a ver com a cor e a temperatura de estrelas? Quando os primeiros espectros estelares foram tomados no século XIX, ninguém sabia o que eles significavam. Felizmente, ao longo do século XX, e,

3 Não entraremos em maiores detalhes a respeito da teoria quântica proposta por Planck, mas esse é um dos mais belos capítulos da física do século XX, que rendeu o Prêmio Nobel de Física, em 1918, para Max Planck. Vários outros cientistas trabalharam em diversos aspectos e consequências dessa teoria.

4 Essas quantidades bem definidas são os chamados *quanta* de luz (no singular, *quantum*). Esses *quanta* são “pacotes” de energia que são trocados pela matéria. A mecânica quântica afirma que, em microescala, a natureza só é capaz de trocar energias em pacotes, ou *quanta*, com quantidades de energia bem definidos.

sobretudo, após a descoberta de Planck em 1900, sabemos interpretar espectros. A surpresa é que os espectros estelares seguem **exatamente** a lei de distribuição da radiação de Planck. Ou seja: estrelas quentes têm um pico de emissão de radiação em comprimentos de onda menores do que as estrelas comparativamente mais frias que têm o seu pico de emissão em comprimentos de onda maiores.

Uma das consequências naturais da lei de Planck é a lei de Wien, que afirma que o pico de comprimento de onda da radiação emitida por um corpo é inversamente proporcional à sua temperatura⁵. Assim, os astrônomos medem, diretamente no espectro observado de uma estrela, em que comprimento de onda ocorre o pico da emissão e, de posse dessa medida, podem calcular a temperatura da atmosfera estelar. Por exemplo, a nossa estrela, o Sol, tem seu pico de emissão por volta de 502 nm ($502 \text{ nm} = 502 \times 10^{-9} \text{ m}$). Utilizando a Lei de Wien, os astrônomos obtêm uma temperatura exatamente igual a 5772 K, que corresponde a, aproximadamente, 5500 graus Celsius. Vale lembrar que essa temperatura corresponde à fotosfera do Sol, sua camada mais exterior. A temperatura no centro do Sol e das demais estrelas é muito mais alta. Para o Sol, a temperatura central é estimada em, aproximadamente, 15 milhões de graus Celsius. Dessa forma, os astrônomos conseguem calcular a temperatura da atmosfera de uma estrela através da leitura de seu espectro!

Modernamente, os astrônomos têm acesso a milhares de espectros estelares, e a medida da temperatura de estrelas é feita corriqueiramente. Outro parâmetro que pode ser facilmente medido é o brilho ou magnitude aparente da estrela. Essa magnitude aparente é diferente de sua magnitude absoluta, tendo em vista que o brilho que captamos na Terra não é igual ao brilho emitido pela estrela, pois a poeira estelar e outros fatores atmosféricos contribuem para que a magnitude aparente seja menor do que a magnitude real ou absoluta.

Ao longo de décadas de estudos, os astrônomos passaram a relacionar a temperatura de uma estrela ao seu brilho ou magnitude absoluta e ainda a outros parâmetros de interesse. O diagrama padrão utilizado modernamente na astronomia chama-se Diagrama H-R, em homenagem aos seus descobridores, os astrônomos Ejnar Hertzsprung (1873-1967) e Henri Norris Russell

5 Foi o físico alemão Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien (1864-1928) que recebeu o Prêmio Nobel em Física em 1911, por seus trabalhos sobre radiação e calor, ou seja: $\lambda_{\text{max}} \cdot T = 0.0028976 \text{ m.K}$.

(1877 -1957). O diagrama, mostrado na **FIGURA 6**, exibe uma faixa central de concentração de estrelas chamada de sequência principal (*main sequence*).

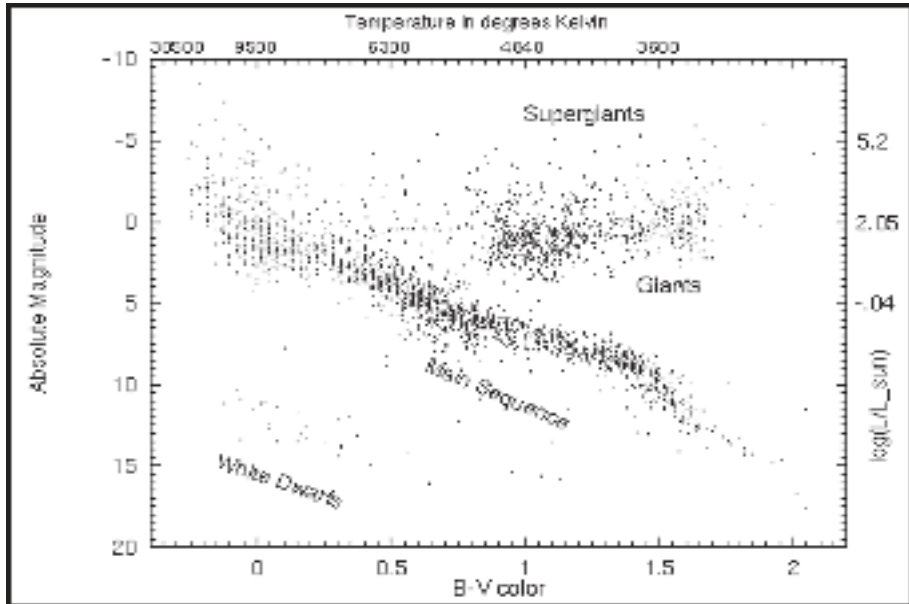


FIGURA 6: Diagrama H-R mostrando as magnitudes absolutas no eixo vertical (esquerdo) e as temperaturas no eixo horizontal (superior). Outros parâmetros de interesse também são mostrados, como as cores no eixo horizontal (inferior) e a luminosidade relativa ao Sol no eixo vertical (direito). Centenas de estrelas são mostradas, e elas definem claramente o estágio evolutivo conhecido como sequência principal, mais ou menos no centro da figura.

Crédito da imagem: Disponível em: <<http://astronomyonline.org/Astrophotography/CMDDDiagram.asp>>. Acesso em 02 de outubro de 2016.

Segundo as mais modernas teorias de evolução estelar, as estrelas nessa faixa estão na fase mais longa da vida de uma estrela, na qual a principal fonte da energia é a queima do Hidrogênio e a geração do elemento Hélio, liberando energia luminosa no processo. Outras concentrações de estrelas são visíveis e denotam outras fases da evolução estelar, como a fase da supergigante vermelha (uma fase da evolução estelar na qual a estrela aumenta de raios) e a fase das anãs brancas, que é o estágio final de algumas estrelas.

Voltando ao nosso Sol, sabemos que ele tem uma temperatura externa (fotosfera) de 5772 K e que a sua magnitude absoluta é de 4,83. Você consegue localizar o Sol no diagrama da **FIGURA 6**? Você consegue ver que ele se

localiza exatamente na sequência principal? Isso nos leva a concluir que o Sol tem o mecanismo da fusão do Hidrogênio como principal fonte de geração de energia.

Agora você já sabe como podemos calcular a temperatura e a cor das estrelas. Sabemos, também, que a cor e a temperatura relacionam-se com o brilho e outros parâmetros de interesse. Vimos, ainda, que a cor das estrelas corresponde a uma determinada quantidade de radiação emitida, e que o diagrama de temperatura e brilho da **FIGURA 6** sugere que existem diversas fases para a evolução estelar. Ou seja: **os espectros estelares revelam a cor e a temperatura das fotosferas estelares**. Aprendemos que essas duas características estão associadas através da lei de Wien e da lei de Planck. Por fim, a luz emitida pelas estrelas contém muito mais informação do que parece. Felizmente, a física moderna foi capaz de nos presentear com ferramentas de análise que nos revelam tantos detalhes a respeito dos complexos mecanismos ocultos no brilho das estrelas. É impressionante vislumbrar a interessante e inusitada correspondência entre cor e temperatura. Quem diria que a luz das estrelas poderia revelar também suas temperaturas? O que mais é possível saber a partir da luz das estrelas? Continue lendo para descobrir!

Como a luz revela a química das estrelas?

A seção anterior nos ensinou muito, mas ainda não explicamos uma questão crucial: como podemos utilizar os espectros estelares para investigar a química das estrelas? Será possível desvendar o conteúdo químico das estrelas apenas através da luz emitida por aqueles astros? Curiosamente, nas primeiras décadas do século XIX, em 1835, o Filósofo francês August Comte (1798-1857) afirmou sobre as estrelas:

Entendemos a possibilidade de determinar suas formas, suas distâncias, tamanhos e movimentos; entretanto jamais saberemos nada sobre suas composições químicas, ou estruturas minerais; ou ainda sobre a natureza de eventuais seres organizados que possam viver em suas superfícies. Eu persisto na ideia de que as temperaturas das estrelas jamais serão conhecidas por nós (HEARNshaw, 2010, p. 1).

Felizmente, a ciência é muito versátil e imprevisível. Mesmo filósofos brilhantes como Comte cometeram erros ao tentar prever as possibilidades e limitações da ciência (HEARNSHAW, 2010).

Os primeiros espectros estelares obtidos ainda no século XIX eram dominados por **linhas de absorção sobrepostas a um contínuo**, cuja forma geral segue a distribuição de energia explicada por Planck (**FIGURA 5**). Entretanto as linhas de absorção foram notadas, primeiramente, por Wolaston em 1802 e, posteriormente, por Joseph von Fraunhofer (1787-1826), muito antes da Lei de Planck. Desde os primeiros espectros estelares, o grande mistério e a grande questão de interesse eram a explicação da natureza e das propriedades dessas linhas.

Foi a partir de 1814 que Fraunhofer passou a obter espectros estelares com a ajuda do espectrógrafo que ele inventara naquele ano. Esses espectros mostravam linhas fixas escuras em comprimentos de onda característicos. Fraunhofer e Robert Bunsen (1811-1899) notaram que alguns elementos em laboratório, quando expostos a chamas, tinham um espectro similar a alguns espectros estelares. Como esses cientistas conheciam a natureza desses elementos (Carbono, Cálcio, Hidrogênio etc.), ficou claro que esses mesmos elementos deveriam estar presentes nas estrelas que exibiam características similares. No início, essa descoberta foi recebida com ceticismo, mas logo outros cientistas passaram a obter resultados semelhantes, e ficou estabelecido que as estrelas devem conter elementos semelhantes àqueles encontrados na Terra, embora em quantidades diferentes. Passou-se, então, ao monumental esforço de mapear todas as linhas observadas em espectros estelares através da comparação com linhas de emissão obtidas em materiais aquecidos em laboratório. Apesar de rudimentar, essa técnica foi capaz de identificar centenas de linhas presentes nos espectros estelares.

Obviamente que a melhoria das técnicas de espectroscopia e a melhoria dos telescópios possibilitaram a obtenção de espectros de melhor qualidade, tornando a identificação das linhas algo mais preciso. O advento da mecânica quântica, nas primeiras décadas do século XX, também ajudou a entender a física da formação de linhas de absorção. As **reações termonucleares** são o principal processo através do qual as estrelas geram sua energia. Nesses processos, que ocorrem preferencialmente nas camadas mais próximas do núcleo estelar, átomos mais simples são transformados em átomos mais pesados.

Na vasta maioria das estrelas, o elemento mais abundante é o Hidrogênio, que é transformado em Hélio, liberando energia e fótons luminosos nesse processo. Dessa maneira, as estrelas podem sustentar seus próprios pesos, através da energia liberada pelas reações termonucleares, geram elementos mais pesados e, ainda, ejetam fótons luminosos em diversos comprimentos de onda. Esses fótons não se propagam em linha reta até a fotosfera da estrela, pois as camadas estelares interiores são muito densas e opacas à radiação. Estima-se que seja da ordem de 30.000 anos o tempo médio que um fóton recém-gerado leva para se deslocar do interior da estrela até sua fotosfera.

Na fotosfera, existem bilhões e bilhões de átomos de diversos elementos químicos, sobretudo Hidrogênio. E é justamente nas camadas mais exteriores da estrela e na fotosfera que ocorre a interação do fóton que vem do interior estelar com os átomos presentes nas camadas exteriores. Vamos pensar no Hidrogênio, que é o átomo mais simples, composto de um único próton no núcleo e um único elétron orbitando esse próton. De acordo com a mecânica quântica, sabemos que esse elétron pode ocupar diversos níveis de energia em relação ao próton ao qual está ligado. Cada nível de energia corresponde a uma órbita com energia bastante específica. Assim, quando o elétron de um átomo de Hidrogênio encontra um fóton com a energia exatamente igual à diferença de energia entre dois de seus níveis de energia, ele pode saltar de uma órbita menos energética para uma órbita mais energética.

Por exemplo, para que um elétron possa saltar do seu nível mais fundamental de energia para o primeiro estado excitado, um fóton de energia exatamente igual a $10,2 \text{ eV}$ ⁶ deve ser absorvido por esse elétron. Essa quantidade de energia corresponde a um fóton na região do ultravioleta, ou seja, um fóton de altíssima energia. Ora, se o elétron absorve esse fóton nas camadas mais exteriores da estrela, significa que esse fóton não pode ser observado pelos astrônomos que estão distantes da estrela! É exatamente esse processo de absorção da radiação que gera as linhas de absorção observadas nos espectros estelares!

No exemplo que citamos acima, seria observada uma linha de absorção na região ultravioleta do espectro estelar, correspondendo à absorção que citamos. Imagine, agora, que não existe apenas um, mas bilhões e bilhões de

6 O elétron-volt (eV) é uma unidade de medida de energia que corresponde à energia cinética que um único elétron adquire no vácuo quando acelerado por uma diferença de potencial de 1 volt. Um eV corresponde a $1,602 \times 10^{-19}$ joules.

átomos de Hidrogênio realizando esse processo. Imagine, ainda, que são muitas as absorções possíveis, pois o elétron possui diversos níveis de energia que correspondem a fótons de diversas energias. Esses processos de absorção ocorrem milhões de vezes por segundo para todo o conjunto de átomos presentes na fotosfera estelar.

Alguns desses processos geram linhas no ultravioleta; outros, na região do ótico e outros, ainda, na região do infravermelho. Entretanto sabemos que não existe apenas o Hidrogênio, já que esta é apenas uma das muitas espécies atômicas presentes nas camadas mais externas das estrelas e em suas fotosferas. Mas cada elemento possui uma estrutura eletrônica distinta, sendo os elétrons distribuídos em distintos níveis de energia. Isso significa que múltiplos elementos químicos podem gerar múltiplas linhas de absorção; e um mesmo elemento pode gerar múltiplas linhas, dependendo do tipo de absorção que realiza. Assim, a família de linhas de absorção é vastíssima, existindo milhares de milhares de linhas possíveis! Dessa forma, um espectro contém **as assinaturas inconfundíveis de diversas espécies químicas**, cada uma delas correspondendo a uma absorção específica, com energia e comprimentos de ondas bem definidos. Ao longo do século XX, a astrofísica aprendeu a desvendar os espectros estelares e, com isso, revelar a constituição química das estrelas!

Atualmente sabemos que a profundidade, a forma e a largura das linhas revelam velocidades estelares, abundância dos elementos que produzem essas linhas e, ainda, outros detalhes sobre a física das estrelas, como rotação, presença de ventos estelares, entre outros fenômenos. A conclusão é que a luz das estrelas contém muitas informações. Isso porque a luz que recebemos das estrelas atravessa suas camadas internas, sua fotosfera, e somente após interagir com os elementos químicos presentes nesses locais é que chega até nós, trazendo as inconfundíveis assinaturas espectrais dos elementos químicos que compõem as estrelas, seus interiores e atmosferas.

A **FIGURA 7** mostra dois espectros estelares nos quais podem ser vistas algumas linhas de absorção. Nela, podemos ver os espectros de duas estrelas cujos picos de radiação ocorrem perto dos 4000 Angstroms, bem perto da fronteira entre o ultravioleta e o ótico.

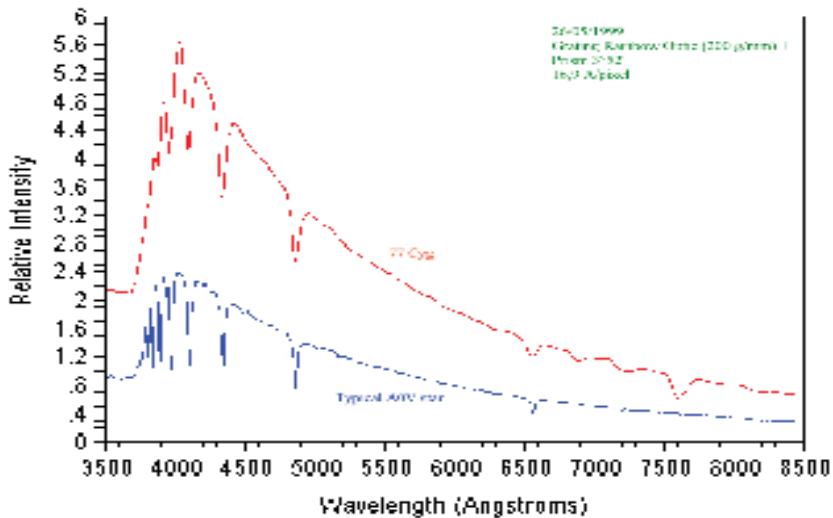


FIGURA 7: Espectro de duas estrelas com temperaturas semelhantes. Observe que o pico de emissão ocorre por volta dos 4000 Angstroms (10^{-10} m) para as duas estrelas, correspondendo a uma temperatura de aproximadamente 7200 K, de acordo com a Lei de Wien. Observe, ainda, que a forma geral do espectro corresponde àquela das distribuições da **FIGURA 5** (Lei de Planck). Entretanto, sobrepostas à forma geral do contínuo, existem as linhas de absorção que correspondem às linhas de absorção do Hidrogênio e de outras espécies químicas.

Crédito da imagem: Disponível em: <<http://www.astrosurf.com/buil/spectrographs.htm>>. Acesso em 14 de outubro de 2016.

Assim, concluímos que **a luz carrega informação dos locais que atravessou!** Como a luz é versátil! É impressionante que os astrônomos e outros cientistas tenham aprendido a ler esses inconfundíveis e sutis sinais, revelando, nesse processo, os segredos das estrelas e do universo. A próxima pergunta de interesse seria: A cor e a temperatura de uma estrela podem indicar sua idade? Como podemos inferir esse parâmetro?

A próxima seção traz essas respostas e nos mostrará que os fótons podem, de fato, conter muito mais informações do que poderíamos inicialmente supor. Como podem essas interessantes partículas de luz ocultar tantas informações e tantos detalhes? Continue sua leitura e desvende a idade das estrelas através da luz!

Como podemos estimar a idade de estrelas e das galáxias?

Desde os primeiros espectros estelares e métodos de fotografia rudimentares do século XIX, a astrofísica se esforça para entender as estrelas. Embora elas pareçam imutáveis e perenes, as estrelas terão um fim. Até mesmo o nosso Sol, que já foi tão idolatrado por civilizações antigas, cessará seu brilho e deixará de existir.

A parte da astrofísica que trata da evolução das estrelas chama-se teoria da evolução estelar. Trata-se de uma das teorias mais bem-sucedidas da física contemporânea, pois a ferramenta básica desse ramo do conhecimento é a física quântica, que é uma das teorias mais bem testadas de toda a física. Ou seja: no interior de estrelas, os processos são quânticos e não podem ser explicados apenas com a física clássica. Como nossa confiança na teoria quântica é muito sólida, temos convicção de que sabemos o destino de nosso Sol e de todas as estrelas. Entretanto o que determina a evolução estelar?

Seria impossível, neste artigo, resumir todas as consequências e propriedades das estrelas e sua evolução, mas podemos resumir boa parte em algumas ideias. Primeiramente, estrelas são esferas autogravitantes que pressionam seus interiores com as enormes forças gravitacionais das camadas mais exteriores sobre as camadas mais interiores. Isso gera enormes pressões em seus centros e possibilita que a distância entre átomos vizinhos seja a menor possível. Na verdade, as pressões são tão altas e as temperaturas tão elevadas que os átomos passam a se fundir. Esse processo recebe o nome técnico de fusão nuclear e ocorre através das chamadas reações termonucleares.

O Hidrogênio é o elemento mais comum na vastíssima maioria das estrelas e, por isso, a fusão de átomos de Hidrogênio com outros átomos de Hidrogênio gera um átomo de Hélio e ainda libera energia. A reação não é tão simples assim e envolve múltiplos passos e espécies mais pesadas do Hidrogênio, como o Deutério, que é um átomo de Hidrogênio com um nêutron no núcleo. Entretanto estamos omitindo os detalhes para fins didáticos. O importante é que núcleos leves se transformam em núcleos mais pesados. Assim, o Hélio se transforma em Lítio, e a fusão de outras espécies gera o Carbono, Nitrogênio e vários outros elementos, chegando até o Ferro. Todas essas reações termonucleares são bastante complexas, mas o importante é que

elas liberam energia suficiente para gerar uma pressão de dentro para fora que sustenta o próprio peso da estrela. Essa pressão é chamada pressão de radiação.

Como o Hidrogênio é o elemento mais abundante, a sua fusão em Hélio é o mecanismo mais comum para gerar energia no interior estelar. O equilíbrio entre as esmagadoras forças gravitacionais e a pressão de radiação gerada pelas reações termonucleares garante a estabilidade estelar. Enquanto houver Hidrogênio, este será o mecanismo de geração de energia mais vantajoso do ponto de vista energético. Os astrônomos chamam esse período da vida de uma estrela de sequência principal, como já ilustramos na **FIGURA 6**.

Outro subproduto das reações nucleares são fótons luminosos de diversas energias (e comprimentos de onda). Esses fótons partem das regiões mais internas das estrelas e vão ricocheteando ao longo de aproximadamente 30.000 anos até a fotosfera estelar, como também já mencionamos. Esses fótons são justamente aqueles que capturamos com nossos telescópios, fotografias e com nossos espectrógrafos. São justamente esses fótons que aprendemos a “ler” e a “interpretar”!

A teoria da evolução estelar nos ensina que a característica física mais importante de uma estrela é a sua massa inicial. De maneira muitíssimo resumida, podemos dizer que as estrelas de mais alta massa vivem muito menos do que as de massa comparativamente menor. Por exemplo, uma estrela como o Sol pode viver até 10 bilhões de anos. Existem estrelas já observadas com 3, 10, 30, 50 massas solares e até maiores. Essas estrelas vivem bem menos, e seus tempos de vida podem não ultrapassar alguns poucos milhões de anos (LEÃO, 2016). Assim, **a massa inicial de uma estrela determina seu destino**. As de maior massa pressionam as camadas interiores com tanta força que a taxa de reações nucleares é muitíssimo elevada. Isso faz com que essas estrelas consumam seus combustíveis nucleares de maneira muito mais rápida. Em comparação, estrelas de menor massa utilizam, de maneira mais parcimoniosa, suas reservas de combustível nuclear.

Mas como podemos saber se uma estrela está envelhecendo? Como isso pode ser possível se os tempos de vida das estrelas são da ordem de milhões ou até bilhões de anos? Se vivemos meros 70-90 anos (no máximo, salvo algumas vovozinhas mais longevas), como podemos observar uma estrela e saber seu tempo de vida? A resposta é simples: nós não observamos! Lembre-se de que a humanidade (a espécie *Homo Sapiens Sapiens*) existe há pouco mais de

200.000 anos. Como podemos, então, ter tanta certeza? Você se lembra de que dissemos que diversas reações nucleares ocorrem? E que as reações nucleares são realizadas na ordem de maior eficiência energética? Pois bem. À medida que uma estrela envelhece, ela emite cada vez menos energia! As suas reações nucleares ficam cada vez mais minguadas e liberam menos energia, pois a fusão dos elementos mais pesados libera, comparativamente, menos energia do que a dos mais leves. Estamos omitindo alguns detalhes, mas o resumo é este: as estrelas mais velhas emitem pouca energia em comparação com as mais jovens que emitem muito mais energia!

Podemos medir a quantidade de energia emitida por uma estrela através da intensidade da radiação que elas emitem. Essas medidas podem ser feitas com fotografias e filtros ou, de maneira ainda mais precisa, através de seus espectros. Lembre-se da Lei de Wien: **O pico de radiação tem a ver com a cor e a temperatura da estrela.** Quanto mais para a esquerda na **FIGURA 5** for o pico de emissão de uma estrela, maior a sua temperatura e maior a quantidade de radiação emitida em comprimentos de onda menores que correspondem a energias mais altas! Assim, os astrônomos descobriram que estrelas mais energéticas devem ter seus espectros com picos deslocados para a esquerda. Isso corresponde a estrelas muito jovens, pois somente as estrelas jovens podem realizar as reações termonucleares que liberam energia naquela faixa de comprimentos de onda da esquerda. Ou seja, as estrelas mais jovens possuem reservas nucleares que liberam energia de maneira mais eficiente. O lado esquerdo da **FIGURA 5** corresponde à radiação ultravioleta, de altíssima energia. Em comparação, estrelas cujo pico está mais ou menos no meio da referida figura emitem a maior parte de sua radiação no ótico e, se o pico estiver deslocado para a direita na **FIGURA 5**, significa que o pico de radiação ocorre na região do infravermelho. Essa região corresponde às radiações de baixa energia, e somente estrelas mais velhas possuem o pico de radiação nessa região do espectro.

Outra maneira de entender a idade das estrelas e, por consequência, sua evolução é imaginar que, no início de suas vidas, elas realizam reações termonucleares muitíssimo energéticas e, portanto, emitem mais radiação na região do ultravioleta. As estrelas de meia idade realizam reações nucleares moderadamente energéticas e emitem a maior parte de sua radiação no ótico. Por fim, as mais velhas emitem muito pouco no ótico ultravioleta, mas emitem a maior

parte de sua radiação no infravermelho. Ou seja, a física, através da mecânica quântica, descobriu a sequência evolutiva das estrelas, que pode durar bilhões ou milhões de anos. Descobriu-se que a massa inicial dita o ritmo das reações termonucleares. Isso explica o diagrama H-R da **FIGURA 6**, que também indica uma possível evolução para esses astros. Assim, embora não seja possível acompanhar todo o ciclo evolutivo das estrelas, podemos inferir, com muita certeza, a respeito de seus estágios evolutivos através de seus espectros. Os dois espectros estelares da **FIGURA 7** indicam estrelas de, aproximadamente, a mesma idade, uma vez que seus picos de radiação ocorrem, aproximadamente, no mesmo comprimento de onda. Analisando com mais cuidado, vemos que devem ser estrelas ainda jovens, pois o pico de radiação ocorre no limiar entre o ultravioleta e o ótico! Ou seja: essas estrelas ainda vão viver muito tempo, da ordem de bilhões de anos.

Resumindo, as estrelas, na tentativa de suportar o peso de suas camadas mais exteriores, realizam reações termonucleares. No processo, exaurem suas reservas de combustível nuclear e passam a realizar reações termonucleares cada vez menos eficientes do ponto de vista energético. Isso faz com que elas gradualmente se esfriem e diminuam de brilho e temperatura. Omitimos alguns detalhes, pois o brilho pode variar em algumas fases da evolução estelar de maneira não gradual. Outro fato que omitimos é a ocorrência de sistemas binários, que podem acelerar a evolução estelar. Muitas estrelas no universo estão em associações, e isso é importante para entender a evolução de estrelas. Se você está curioso, talvez você queira estudar física ou astrofísica! O universo está cheio de segredos e detalhes intrigantes!

Agora vem uma pergunta ainda mais complicada: como podemos inferir a idade de galáxias, que são coleções de estrelas? É claro que não podemos extrair o espectro para cada uma das estrelas de uma galáxia. Isso seria impossível, mesmo com todo o tempo do mundo e com os melhores telescópios e espectrógrafos da atualidade. Entretanto existem várias maneiras relativamente simples de se inferir a idade de galáxias! Isso porque nós podemos obter o espectro de galáxias. Esses espectros contêm a soma da assinatura espectral de bilhões de estrelas. Mas, da mesma forma, os espectros de galáxias seguem a mesma lei de distribuição de energia de Planck, embora esses espectros possam conter linhas de emissão devido ao gás que circunda as estrelas em uma galáxia.

Entretanto a ideia é a mesma. Se uma galáxia emite grande parte de sua radiação no ultravioleta, com certeza, trata-se de um sistema bastante jovem, pois somente uma enorme quantidade de estrelas jovens pode fazer uma galáxia emitir tanta luz no ultravioleta, que é um tipo de radiação altamente energética. Por outro lado, galáxias mais velhas emitem mais radiação em comprimentos de onda menos energéticos, pois seu estoque de estrelas jovens é escasso em comparação com sistemas mais jovens. Esses sistemas mais velhos devem emitir a maior parte de sua radiação no infravermelho. Assim, os astrônomos novamente vencem a batalha pelo conhecimento. Novamente a luz revela as idades. Novamente desvendamos os fótons e aprendemos a descobrir a idade das estrelas e galáxias. Mais uma vez, os fótons foram utilizados como verdadeiros mensageiros do conhecimento e dos segredos do universo.

As próximas perguntas que vamos fazer são as mais intrigantes e as que contêm as maiores surpresas em suas respostas. Queremos, agora, saber como podemos medir distâncias e velocidades no universo. Como a luz pode nos dar essa informação? Como os fótons podem “saber” tanto? Continue sua leitura para descobrir por que essas respostas nos levam à conclusão de que **o universo está em expansão!**

Medindo distâncias, velocidades e a expansão do universo

Galáxias são sistemas gravitacionalmente ligados, compostos por bilhões de estrelas nas galáxias maiores. Esses sistemas são bastante numerosos no universo, e estima-se que existam, aproximadamente, 170 bilhões de galáxias no universo.

A **FIGURA 8** mostra uma foto da galáxia M83, fotografada por um dos telescópios do Observatório Europeu do Sul (ESO). Notam-se os braços espirais que são berçários de estrelas jovens e ainda uma enorme concentração de estrelas no centro da galáxia.



FIGURA 8: Galáxia M83 mostrando suas estruturas em espiral, contendo bilhões de estrelas, muitas delas agrupadas em pontos de altas taxas de formação estelar. Crédito da imagem: Observatório Europeu do Sul (ESO). O telescópio utilizado foi o ESO/MPG de 2,2 metros, localizado em La Silla, Chile. Imagem original: Disponível em: <<http://annesastronomynews.com/annes-picture-of-the-day-spiral-galaxy-messier-83>>. Acesso em: 11 de maio de 2015.

Até o início dos anos 20 do século XX, acreditava-se que todos os objetos observados no céu eram parte de nossa galáxia, a Via-Láctea. Mas, por volta de 1920, estranhas manchas brancas começaram a aparecer nas fotos feitas com os telescópios mais modernos da época. Foi o astrônomo americano Edwin Hubble (1889-1953) quem estudou e calculou a distância até esses sistemas. Descobriu-se que, na verdade, essas “manchas” eram galáxias independentes da nossa, sendo que as distâncias foram medidas com o auxílio das **estrelas variáveis cefeidas**, que são estrelas de brilho variável.

Na prática, mede-se o período de variação do brilho da estrela, que pode ser desde algumas horas até de alguns dias. Existe uma conhecida relação entre o período de variação do brilho e o brilho absoluto dessas estrelas. Com o brilho absoluto e a medida do brilho aparente, pode-se determinar a distância até a cefeida e, de forma indireta, pode-se inferir a distância até a galáxia que

hospeda a estrela cefeida. Assim, podem-se estimar as distâncias até centenas de galáxias. **Novamente, os fótons foram utilizados para o cálculo da distância.**

Edwin Hubble estudou, ainda, a luz emitida pelas galáxias e passou a analisar seus espectros. O espectro de cada galáxia tem um espectro bastante particular que mostra as linhas de emissão correspondentes aos diversos elementos químicos presentes no gás que envolve as estrelas. Hubble notou que muitas das galáxias exibiam um peculiar deslocamento em suas linhas de emissão. O deslocamento das linhas espectrais é causado pelo afastamento (ou aproximação) de uma galáxia. Esse efeito é chamado de *redshift* ou deslocamento para o vermelho. O que ocorre é que linhas espectrais das galáxias que se afastam deslocam-se para zonas de menor frequência no espectro, deslocando-se na direção da cor vermelha no espectro visível. O contrário ocorre com as galáxias que se aproximam. Esse efeito observado na luz emitida por galáxias distantes é similar ao efeito Doppler do som, observado quando uma fonte sonora se aproxima ou se afasta de nós, alterando, dessa forma, a frequência do som que ouvimos.

Existe uma conhecida relação entre o deslocamento das linhas e a **velocidade de afastamento** da galáxia que emite a referida linha, sendo que o deslocamento é maior para as galáxias que se afastam com maior velocidade. Hubble realizou uma medição meticulosa dos deslocamentos das linhas de dezenas de galáxias. E, com isso, calculou suas velocidades de afastamento.

De posse das distâncias e velocidades de afastamento para cada galáxia, pode-se fazer um gráfico da velocidade (km/s) em função da distância (megaparsecs⁷). A **FIGURA 9** mostra esse gráfico, no qual cada ponto representa uma galáxia. Pode-se ver que galáxias mais distantes têm maiores velocidades nesse diagrama que foi primeiramente obtido por Hubble, para menos galáxias e cobrindo galáxias menos distantes (HUBBLE, 1929). Esse diagrama recebe o nome de **Diagrama de Hubble** e, ao longo do século XX, os astrônomos estenderam esse gráfico para mais e mais galáxias, verificando a validade da mesma relação entre a velocidade e a distância.

7 O parsec é uma unidade de medida muito utilizada em astrofísica, sendo que 1 parsec = $3,09 \times 10^{16}$ m. Um megaparsec é igual a um milhão de vezes esse valor. Assim 1 megaparsec = $3,09 \times 10^{22}$ m. Sim, as distâncias medidas através dessa unidade são muito grandes. Isso apenas reflete o tamanho do universo e as suas distâncias realmente astronômicas!

A relação matemática que explica o gráfico é chamada de **Lei de Hubble** e estabelece uma relação linear entre a velocidade V e a distância D : $V = H_0 D$, sendo H_0 a chamada constante de Hubble que reflete a inclinação da reta que ajusta os dados observacionais. Pode-se inferir, através do gráfico, que o universo está em expansão, pois quanto mais distante está uma determinada galáxia, mais alta sua velocidade de afastamento.

Isso sugere que, em um passado distante, as galáxias deveriam estar mais próximas umas das outras. Se levarmos essa ideia adiante, concluiremos que, no início do universo, toda a matéria estaria concentrada em um mesmo ponto. A teoria que investiga essa possibilidade é chamada de **Teoria do Big Bang**, e ela propõe que, em um passado remoto, precisamente há 14,44 bilhões de anos⁸, ocorreu uma enorme explosão (Big Bang) que deu origem aos elementos químicos, às primeiras estrelas e às primeiras galáxias. Essa teoria tenta explicar a origem do cosmos e dos seus elementos químicos, sendo a teoria mais aceita na atualidade e a que tem os maiores indícios teóricos e observacionais a seu favor.

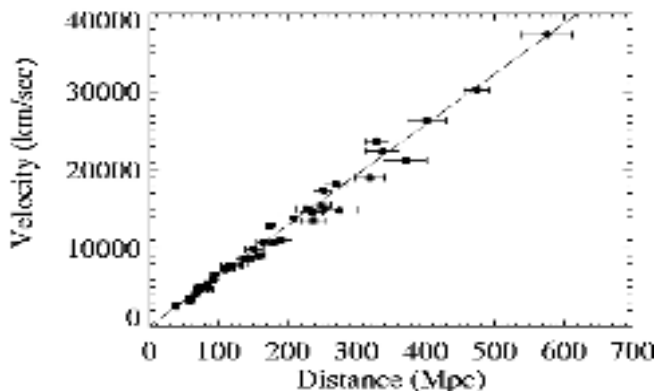


FIGURA9: Diagrama de Hubble para dados modernos, mostrando a distância (em megaparsecs) no eixo horizontal e a velocidade de afastamento no eixo vertical. Esse gráfico mostra dezenas de galáxias a mais do que o diagrama original de Hubble que cobria distância de até 2 megaparsecs apenas. Ao longo do século XX, novos estudos comprovaram e estenderam a validade da relação encontrada por Hubble. Esse diagrama é do trabalho de Filipenko & Riess (1998).

8 Este é o valor mais aceito atualmente. Novos estudos estão constantemente reavaliando esse número, que muda a cada nova contagem de galáxias e com novos diagramas de Hubble, que descobrem novos valores para H_0 e, consequentemente, para a idade do universo. Atualmente o valor da constante de Hubble vale $H_0 = 67.80 \pm 0.77$ km/s/Mpc (Missão Planck, Agência Espacial Europeia, 2013). A idade do universo é igual a $t=1/H_0$. Calculando-se esse valor, chegamos a $t=14,42$ bilhões de anos. Essa é a idade do universo, segundo os melhores dados de que dispomos.

Após verificarem que é real a possibilidade de ter ocorrido o Big Bang, os astrônomos passaram a pensar sobre o futuro ou o destino do universo. Pela lógica, como a força da gravidade atrai as galáxias, então a expansão deve estar sendo freada. Entretanto alguns astrônomos argumentaram que, se o número de galáxias no universo for muito pequeno, pode ser que a força da gravidade nunca seja capaz de frear a expansão observada. Entre os anos 20 e os anos 90 do século XX, a quantidade de galáxias no universo foi estudada para tentar estimar se elas seriam suficientes para frear a expansão do cosmos.

Entretanto, em 1998, descobriu-se que as galáxias mais distantes do universo também estão se expandindo. Ou seja, não há sinais de que a explosão causada pelo Big Bang esteja sendo freada pela força da gravidade. Na verdade, verificou-se exatamente o contrário, pois os estudos mostraram que as galáxias mais distantes estão, na verdade, acelerando! **Isso mesmo, além da gravidade não estar freando a expansão, existe ainda alguma força ou energia acelerando as galáxias.** Isso é exatamente o oposto do esperado, pois as galáxias deveriam, ainda que minimamente, estar sendo freadas pela gravidade. No entanto, existe uma energia, de origem desconhecida, que acelera as galáxias! Essa energia que atua contra a gravidade recebeu o nome de **energia escura**.

Como vemos, o estudo das galáxias levou a importantes conclusões a respeito do universo. Através dos fótons, descobrimos as distâncias e as velocidades de expansão das galáxias. Isso nos levou à conclusão de que o universo está se expandindo e à conclusão da presença da energia escura, cujas propriedades desconhecemos.

O que mais sabemos?

Um dia, se você tiver a chance de ver o pôr do Sol em uma praia ou campo distante, longe da cidade, vá observar os céus! Olhe para cima! Se você tiver a sorte de contar com um céu sem muitas nuvens, tanto melhor. Se você tiver paciência, verá o Sol lentamente se pondo, revelando a noite escura à medida que os últimos raios de Sol iluminam a nossa atmosfera. O show astronômico da natureza começou.

Variados tons de laranja, azul, amarelo e rosa podem ser vistos no horizonte. A Terra gira lentamente em torno do seu eixo e, à medida que gira, oculta o Sol no horizonte. Os raios luminosos agora atravessam uma maior

camada de atmosfera até chegar aos seus olhos, em comparação ao meio dia, quando o Sol está aproximadamente acima de sua cabeça. Ao atravessarem uma maior camada de atmosfera, aumenta também o espalhamento dos raios de luz, que afeta mais os raios amarelos e azuis emitidos pelo Sol. Isso deixa os raios vermelhos e laranja dominarem o pôr do Sol. Essas cores encantam, mas, em poucos minutos, começa a chegar a escuridão.

Mas, antes da escuridão completa, você verá a primeira estrela no céu. Será muito brilhante, porém, se você prestar atenção, verá que ela é muito luminosa para ser uma estrela. Trata-se, na verdade, do planeta Vênus. Quando a escuridão aumentar, outras centenas de estrelas devem “pipocar” no céu. Muitas delas estão muito distantes e outras estão muito perto. Não se engane com seus brilhos relativos, pois estrelas muito brilhantes podem parecer menos brilhantes devido às suas distâncias elevadas. O contrário também pode acontecer, pois uma estrela intrinsecamente pouco brilhante pode parecer mais brilhante por estar mais perto. Pense nos céus não como uma tela em 2 dimensões, mas sim como um imenso quebra-cabeças 3-D, cujas distâncias relativas são enormes.

Se você for realmente privilegiado e estiver em um local realmente afastado, bastante escuro, mesmo a olho nu, você deve perceber uma tênue faixa branca que domina a parte central do céu. Trata-se do disco de nossa galáxia, a Via Láctea. Essa faixa denota a presença de milhares e milhares de estrelas. Pode-se ver, também, os efeitos da poeira pois, em algumas vastas porções, parece que não existem estrelas. Na verdade, a poeira da nossa galáxia é que oculta algumas estrelas que certamente estão lá. Se você puder utilizar uma luneta ou até um binóculo, as centenas de estrelas se multiplicam, e milhares poderão ser vistas.

Após ler este capítulo, você pode certamente olhar para esse espetáculo da natureza de maneira mais informada. Mostramos que a luz e suas intrigantes partículas carregam muita informação a respeito do universo. Aprendemos sobre as distâncias, idades, cores, velocidades e várias outras informações a respeito das estrelas e galáxias. Mas o que mais sabemos? Se você pudesse olhar para o céu em sua praia ou campo distante, com os mais avançados instrumentos e telescópios, o que você descobriria? A vida de muitos futuros astrônomos começa justamente ao contemplar o pôr do Sol e ao indagar sobre o universo e seus segredos. Muitos levam a sua curiosidade ao extremo e buscam

o conhecimento. Abraçam essa profissão. Muitos contam que olhavam os céus desde criança.

As respostas que os mais avançados instrumentos trazem são fantásticas. Já sabemos muito a respeito do universo pois, desde os anos 1960, temos enviado sondas aos planetas e luas de nosso sistema solar. Nos anos 1960, enviamos sondas a Vênus; nos anos 1970, enviamos sondas a Marte; nos anos 1990, o Telescópio Espacial Hubble observou Júpiter e o impacto de cometas naquele planeta. Ao longo das décadas do século XX, estudamos várias luas dos planetas em nosso sistema solar. Sabemos que esses planetas e suas luas são inóspitos e inapropriados à vida. Outras observações mostraram que nosso sistema solar é vasto e geologicamente muito interessante, denotando a sua história de formação. As melhores teorias apontam que nosso sistema solar tem, aproximadamente, 5 bilhões de anos. Essa é, também, a idade aproximada de nosso Sol, sendo que a Terra seria um tanto mais jovem, com “apenas” 4,5 bilhões de anos.

Nos anos 1990 e nos anos 2000, muitos telescópios modernos e técnicas de fotografia astronômica aprimoradas revolucionaram a astronomia, revelando estrelas distantes com luminosidades centenas de milhares de vezes maiores do que a de nosso Sol! Esses instrumentos revelaram, também, estrelas em sistemas binários, cujas evoluções são diferentes de estrelas solitárias, pois os sistemas binários apresentam transferência de massa entre suas estrelas. Os telescópios modernos revelam, também, estrelas que explodem, emitindo a luz de bilhões e bilhões de estrelas por um curto intervalo de tempo. São as chamadas supernovas, ou estrelas que originalmente tinham alta massa, que explodem ao atingirem o final de suas vidas. As estrelas também podem apresentar peculiaridades como brilho elevado devido às suas variações e raio, ventos estelares, ejeção de matéria, rotação, mistura de elementos químicos em suas camadas interiores e tantos outros fenômenos.

A astronomia moderna revelou, também, detalhes sobre galáxias distantes. Conhecemos suas morfologias em detalhes. Entendemos a formação de estrelas nos braços espirais de galáxias, e existem métodos numéricos e computacionais para o cálculo da idade de galáxias. Entendemos a formação de elementos nas galáxias e as suas histórias de enriquecimento químico. Sabemos, ainda, que, algumas vezes, as galáxias podem colidir e, no processo, podem formar uma única galáxia. Sabemos, também, através de simulações numéricas,

que o processo de interação gravitacional entre duas galáxias leva da ordem de 100 milhões de anos. Imagens astronômicas modernas mostram que o número de galáxias em processos de fusão é bastante grande e que isso pode contribuir para a formação de galáxias maiores e com morfologias complexas.

Outro problema em aberto é a existência da **matéria escura**, cuja origem e propriedades ninguém conhece. Estudos da velocidade das estrelas em função do raio para diversas galáxias mostraram que as velocidades observadas não podem ser explicadas apenas com a matéria visível. As velocidades só podem ser explicadas quando se adiciona aos modelos uma enorme (gigantesca) quantidade de matéria envolvendo as galáxias. Essa matéria que tem que ser prevista nos modelos não pode ser observada através de observações. Ou seja, as galáxias devem conter uma enorme quantidade de matéria que não emite luz, e, por isso, ela é chamada de matéria escura. Esse problema da massa que interage gravitacionalmente, mas que não pode ser observada, foi notado primeiramente pelo astrônomo Fritz Zwicky em 1933. A origem e a constituição dessa matéria escura é um dos grandes mistérios atuais da física, sendo que esse problema é notado para toda e qualquer galáxia observada. Ninguém sabe explicar por que a maior parte da massa contida nas galáxias interage gravitacionalmente, mas não emite luz.

Assim, vemos que o universo possui dois segredos bem guardados que ainda não descobrimos. **A matéria escura e a energia escura podem ser indiretamente detectadas, mas a real natureza e propriedades de ambas permanecem ocultas.** Esses são segredos que apenas os astrônomos do futuro poderão revelar. Se você está curioso, saiba que a astrofísica é uma carreira incrível, mas que exige curiosidade e vontade de descobrir. São longos anos de estudos, mas vale a pena compreender o universo.

Ao contemplar o universo com instrumentos modernos e precisos, fomos capazes de desvendar características e fatos que ficariam ocultos, caso não tivéssemos aliado ciência e tecnologia. Sem nossa curiosidade a respeito da natureza, jamais teríamos desvendado a vida secreta dos fótons. Continue olhando para os céus. Contemple sua beleza e complexidade. O universo é, também, dramático, cheio de explosões, ambientes inóspitos, galáxias ativas, buracos negros, luminosidades e energias inimagináveis. Continue a contemplar o universo e pense nos cientistas que dedicaram suas vidas a desvendar o

cosmos. Tente imaginar o que seria de nossa espécie sem os conhecimentos que acumulamos ao longo dos séculos, graças à ciência!

Contemple os céus! Agora você já sabe parte da história do universo e já conhece alguns de seus segredos. Os céus e as estrelas já não estão tão distantes, pois sua sutil poesia pode agora ser compreendida. Acima de tudo, revelamos a complexa e intrigante vida secreta dos fótons!

Conclusões

Como vimos, a astronomia nos ensina a capturar os fótons, a estudar suas características e a determinar os fenômenos físicos que podem causar a emissão de fótons com esta ou aquela propriedade. Vimos, ainda, que a astronomia nos revela o universo, abre horizontes e expande nossa compreensão a respeito do mundo em que vivemos. No início do século XIX - quando a astronomia moderna dava seus primeiros passos - ainda estávamos em pleno mercantilismo e colonialismo, com grandes naus repletas de produtos manufaturados, fabricados pelas grandes potências da época (Reino Unido, França, Alemanha e EUA) e com matéria-prima vinda das grandes colônias na Ásia, América e África. Ilhas e regiões remotas de nosso planeta, como vastas porções do pacífico, os polos e as regiões austrais dos oceanos ainda estavam sendo descobertos e explorados. Povos ainda sem contato com os exploradores europeus ainda eram descobertos com relativa frequência. Línguas nativas ainda eram pouco conhecidas, como o caso das centenas de línguas faladas na ilha de Nova Guiné, ao norte da Austrália. Ironicamente estávamos descobrindo o universo ao mesmo tempo em que ainda faltava tanto para descobrir a respeito da própria Terra, a respeito de nós mesmos enquanto espécie.

Entretanto, agora, ainda no início do século XXI, com o auxílio da astronomia, da matemática e da física, a humanidade já vislumbra a exploração de outros planetas, estudamos estrelas e galáxias distantes, sendo que nossos maiores e melhores telescópios são capazes de explorar o universo em diversos comprimentos de onda e energias. Alguns telescópios estão em órbita, vislumbrando o cosmos sem a interferência de nossa atmosfera. Outras sondas foram mandadas a outros planetas do sistema solar e suas luas. Outras ainda foram mandadas para asteroides e para o limite de nosso sistema solar. Sondas ainda

mais avançadas procuram por exoplanetas na esperança de encontrarmos planetas semelhantes à nossa Terra.

A astronomia ajuda, ainda, a compreensão da física propriamente dita, pois muitos fenômenos físicos ocorrem apenas em escalas astronômicas, como a formação de estrelas, por exemplo. Assim, o próprio cosmos é um laboratório poderoso e irreproduzível. Ao longo de tantos séculos estudando a astronomia, fica uma importante lição: somos muito pequenos. Somos insignificantes diante da vastidão do cosmos que contemplamos e lutamos para investigar. Somos crianças diante de um imenso laboratório, cujas dimensões extrapolam o espaço e o tempo e cujo significado nos esforçamos tanto para compreender. Um astronauta na Lua tem uma linda visão do planeta Terra e, com um simples gesto, ele pode cobrir com o polegar todo o nosso planeta e toda nossa civilização. O nosso ego e nossa arrogância desaparecem na mesma medida, visto que somos tão minúsculos. Diversos astronautas relataram a experiência de olhar para a Terra a partir da Lua. Uma das descrições mais dramáticas foi feita em 1969, pelo Astronauta da Apollo 8 Frank Borman:

A visão da Terra a partir da Lua me fascinou – um pequeno disco, a 384.000 km de distância. Foi difícil pensar que aquela coisa minúscula tinha tantos problemas, tantas frustrações. Interesses nacionalistas exacerbados, a fome, a guerra e a pestilência, não são aparentes de tão longe. (REVISTA LIFE, 1969, p. 23).

É somente diante de descrições tão reveladoras como a de Borman⁹ que vislumbramos o óbvio: como somos tolos, como valorizamos coisas inúteis. Nos mesmos anos que gastamos bilhões de dólares para mandar missões até a Lua (final dos anos 1960), desperdiçamos milhares e milhares de vidas na estúpida Guerra do Vietnam. Quanta ironia! Estávamos explorando o universo e nos matando ao mesmo tempo.

Então, fica clara a importante lição que somente a astrofísica pode nos ensinar: embora sejamos capazes de sondar o invisível, entender o

9 A frae original de Frank Borman é a seguinte: “The view of the Earth from the Moon fascinated me - a small disk, 240,000 miles away. It was hard to think that that little thing held so many problems, so many frustrations. Raging nationalistic interests, famines, wars, pestilence don't show from that distance.” Frank Borman, astronauta da Apollo 8, ‘A Science Fiction World—Awesome Forlorn Beauty’, *Revista Life*, 17 de janeiro de 1969.

funcionamento das estrelas e compreender as colisões de galáxias, somos ainda incapazes de entender nosso universo interior, nossas relações humanas, nosso universo íntimo. Temos que aprender a viver em paz e em harmonia aqui na Terra. Quanta pesquisa pode ser feita com o dinheiro gasto com armas? Quantas Áfricas poderíamos livrar da fome, da miséria e do HIV sem os gastos com mísseis balísticos intercontinentais? Quantas Sírias poderíamos evitar se tivéssemos a paz? O astronauta afirmou que, de tão longe, nossos problemas nem parecem existir. Por que não somos capazes de viver em paz em nosso lindo planeta azul?

Como vimos, o planeta Terra é raro e único. Os nossos melhores estudos não apontam a existência de uma infinidade de planetas semelhantes ao nosso. Pelo contrário! Esses estudos apontam que planetas como a Terra são extremamente raros. E mesmo que eles existam, estão extremamente distantes de nós! Esta é a segunda lição: precisamos conservar os recursos minerais, hídricos, vegetais e animais de nosso planeta. Utilizá-los de maneira sustentável é imperativo para que muitas e muitas gerações futuras possam desfrutar de nosso planeta.

Mas os pessimistas poderiam dizer que, mesmo com a conservação e a utilização consciente de nossos recursos naturais, e mesmo que sejamos capazes de construir a paz e a harmonia em nosso planeta, ainda teremos um problema: a morte do Sol! O fim da Luz! Os pessimistas diriam: mesmo que devotemos todos os esforços a pesquisas que busquem o bem-estar de toda a humanidade, não poderemos fugir de um fato certo e inexorável: tudo no universo tem um fim. Inclusive o Sol. Nossa estrela viverá ainda por, aproximadamente, 5 bilhões de anos. Durante a maior parte desse tempo, a quantidade e a qualidade da radiação produzida serão adequadas ao nosso planeta. Entretanto, de acordo com a teoria da evolução estelar, eventualmente, nosso Sol vai aumentar de tamanho, transformando-se em uma supergigante vermelha, cujo raio é maior do que a distância média entre a Terra e o Sol. Em outras palavras, seremos engolidos pelo nosso Sol. A humanidade cessará de existir. Morreremos todos! A menos que sejamos capazes de enviar uma espécie de arca a outro planeta, morreremos e a espécie humana deixará de existir.

Como cientista, professor e ser humano, eu me deparei com essa importante questão quando li sobre evolução estelar. Esse problema da finitude, do fim da estrela e do fim de nossa espécie é inquietante. Ao estudarmos

astrofísica, aprendemos a calcular os parâmetros estelares que determinam nosso inexorável destino. Durante algum tempo, o problema da finitude humana me incomodou. Seriam inválidos nossos esforços por sobrevivência? Seríamos, afinal, aniquilados pelo nosso próprio Sol? Eu chamo essa constatação do triste **dilema da existência**. Foi, então, que um dia me deparei com uma importante conclusão do físico e divulgador da ciência, James Trefil. Essa conclusão mudaria minha perspectiva a esse respeito. O professor Trefil afirma¹⁰:

É verdade, aqui a alguns bilhões de anos o combustível nuclear de nossa estrela cessará. De fato, o destino do universo é se expandir para sempre. E de fato, no final, restará apenas um mar de partículas frias, em um universo também frio. Não restará uma única alma para escutar nossos lamentos ou para julgar o que fizemos. Entretanto amanhã eu saberei o que fiz. Amanhã eu saberei se fui a melhor pessoa que pude ser. E isso, meus amigos, é tudo o que importa (TREFIL, 1988, p. 192).

Curiosamente, a conclusão do professor Trefil resolve, pelo menos para mim, o dilema de nossa existência. Fica a mensagem: Vamos ser bons. Para nós mesmos, para a nossa espécie, para as gerações futuras e para nosso planeta. Sabemos tanto a respeito do universo. Dominamos a técnica. Acumulamos conhecimentos sobre sistemas planetários e galáxias distantes. O que nos falta para entender nosso universo íntimo? O que nos falta para vivermos bem e abraçarmos a paz?

Epílogo

Os curiosos humanos aprenderam, finalmente, a ler o universo. Seus brilhantes cientistas desvendaram os segredos da luz e revelaram a composição química das estrelas, suas distâncias e mecanismos de geração de energia. Curiosamente, os humanos são uma evolução dos primeiros elementos químicos que formaram compostos cada vez mais estáveis e que, eventualmente, originaram os primeiros seres vivos. Esses seres primitivos evoluíram e, após alguns bilhões de anos, surgiu a espécie humana. Os humanos são formados

10 O texto citado é uma tradução livre do texto original do autor. O trecho original, em língua inglesa, pode ser lido na página 192, do livro *The Dark side of the universe*, James Trefil (1988).

pelos mesmos elementos químicos que compõem grande parte do seu lindo planeta azul. Esses elementos químicos foram formados através de reações termonucleares no núcleo de estrelas muito antigas. Por fim, a imaginação, a curiosidade e a engenhosidade dos humanos garantiram-lhes não apenas a sobrevivência, mas também a supremacia no planeta Terra. Ao longo dos milênios, os cientistas humanos aprenderam a ciência e a técnica. Com o tempo, dominaram os instrumentos necessários para a investigação da luz das estrelas. Aprenderam a sondar os fótons, que são as minúsculas partículas que compõem a luz e as radiações eletromagnéticas. Eles, finalmente, podiam estudar a luz das estrelas. Finalmente, poderiam indagar sobre a vida secreta dos fótons e entender o vasto e complexo universo em que vivem. Entretanto, ao descobrirem os segredos da luz, ao desvendarem as idades das estrelas, descobriram a finitude inexorável dos astros que pareciam eternos. O próprio Sol, fonte de toda energia no planeta, não seria eterno. Até mesmo o Sol encontraria seu fim ao esgotar seu combustível nuclear. Isso trouxe uma nova e inquietante perspectiva aos humanos. Eles descobriram que não eram finitos apenas como indivíduos. As pesquisas em astrofísica revelaram o possível fim do planeta e da própria espécie humana, pois até mesmo os astros têm um fim, um ciclo de vida limitado. Assim, as guerras, os conflitos, a fome, as disputas políticas e as paixões nacionalistas eram, na verdade, uma grande e fútil perda de tempo. Essa deveria ser a conclusão mais óbvia. Em outras palavras, todas as ações e decisões da espécie humana deveriam ter como objetivo o bem-estar e o progresso de todas as nações, de todos os povos, sem exceção. Entretanto os humanos chegaram ao século XXI ricos em conhecimento e dominando a técnica; porém toda a futilidade de suas ações ainda estava presente. A espécie humana ainda degrada seu planeta, ainda explora de maneira não sustentável sua fauna, flora, água e recursos minerais. Em pleno século XXI e diante de sua própria finitude, os humanos ainda sustentam guerras intermináveis e fúteis. Ainda há riqueza extrema e pobreza extrema. Diante de tudo, fica a pergunta: sobreviverão os humanos à sua própria estrela? Conseguirão superar a futilidade de seus conflitos? Conseguirão preservar o planeta Terra? Em um esforço conjunto, poderão migrar para outro sistema planetário e sobreviver? Somente o tempo poderá dizer...

Referências

ALMEIDA, L.; SANTOS, J.; LEÃO, J. R. S. *Astrofotografia e Processamento Básico de imagens*, II Simpósio Nacional de Educação em Astronomia – II SNEA 2012 – São Paulo, SP, 2012.

BORMAN, F. A Science Fiction World - Awesome Forlorn Beauty. *Life magazine*, p. 23, 17/01/1969.

DARWIN, C. *The Origin of the Species by Means of Natural Selection*. London: John Murray, 1859.

FILIPENKO, A.; RIESS, A. *Results from the High-Z Supernova Search Team*, Phys. Rept, 307, 1998.

HEARNSHAW, J. Auguste comte's blunder: an account of the first century of stellar spectroscopy and how It took one hundred years to prove that Comte was wrong! In: *Journal of Astronomical History and Heritage*, 13(2), p. 90-104, 2010.

HEAVISIDE, O. *Electrical Papers. Volume 1. London and New York: Macmillan Co, 1892.*

HEAVISIDE, O. *Electrical Papers. Volume 2. London and New York: Macmillan Co, 1894.*

KITCHIN, C. R. *Astrophysical Techniques*. Boca Raton, Florida: CRC Press, fifth edition, 2009.

LAND, M. F.; NILSSON, D. E. *Animal Eyes*. Oxford: Oxford University Press, 2002.

LEÃO, J. R. S. A Surpreendente História do Universo: Astronomia para Compreender o Mundo Natural, o Cosmos e a Vida. In: THALES COSTA SOARES; ELOI TEIXEIRA CÉSAR; EDSON E. REINERH. (Org.). *Ciência em dia: Jornadas de Divulgação Científica*. 1 ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016, v. , p. 31-60.

MAXWELL, J. C. On the Physical Lines of Force. *Philosophical magazine and Journal of science, fourth series, March*. London, Edinburgh and Dublin, 1861.

SMALLWOOD, K. Como a velocidade da luz foi medida pela primeira vez? Disponível em: <<http://gizmodo.uol.com.br/como-a-velocidade-da-luz-foi-medida-pela-primeira-vez>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

Wikipedia: Artigo sobre a biografia e descobertas do físico francês Hippolyte Fizeau. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hippolyte_Fizeau>. Acesso em: 12 jun. 2016.

Transformações de Lorentz e o Efeito Doppler para Ondas Eletromagnéticas

*Humberto Belich
Departamento de Física e Química
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES,
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, 29060-900, Vitória, ES, Brasil.*

*Thales Costa Soares
IF Sudeste MG – Juiz de Fora; Centro de Ciências UFJF; GFT/JLL.
Rua Bernardo Mascarenhas, 1283, Fábrica, Juiz de Fora - MG*

*Thiago Prudêncio
Coordenação Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia - CCCT
Universidade Federal do Maranhão - UFMA, Av. dos Portugueses, 1966,
Bacanga, 65080-805, São Luís - MA.*

Resumo

As transformações de Lorentz representam um papel fundamental na teoria da relatividade restrita. Essas transformações de referencial exercem um papel fundamental também nas simetrias das equações de Maxwell que descrevem o eletromagnetismo clássico. Nesse contexto, o movimento relativo de uma fonte de ondas eletromagnéticas em relação a um observador deve obedecer às transformações de Lorentz, sujeitando o movimento relativo entre observador e fonte à constância da velocidade da luz e, consequentemente, levando ao efeito Doppler relativístico ou efeito Doppler para ondas eletromagnéticas.

Introdução

O efeito Doppler clássico representa uma alteração da medida de frequência de uma onda emitida por uma fonte em relação ao observador, devido ao movimento relativo entre a fonte e o observador. Quando uma fonte de ondas sonoras se movimenta em direção a um observador, a frequência detectada pelo observador não corresponde à frequência original da fonte, mas será aumentada devido a uma compressão efetiva do comprimento de onda da onda emitida, no referencial do observador. Por outro lado, se a fonte se afasta do observador, esse comprimento de onda observado será distendido em relação ao observador e, conseqüentemente, a frequência detectada pelo observador tende a diminuir. Quando o observador se move em direção à fonte, ou se afasta dela, a velocidade de propagação da onda, em relação ao observador, será dependente da velocidade relativa em relação ao observador. Conseqüentemente, embora o comprimento de onda permaneça inalterado, há o aumento ou a diminuição da velocidade relativa entre a frente de onda e o observador, fazendo com que a frequência detectada pelo observador seja distinta da frequência da onda emitida pela fonte.

No caso do movimento relativístico, isto é, quando as velocidades envolvidas estão próximas à velocidade da luz, já não se podem considerar os movimentos relativos da mecânica newtoniana, que estão relacionados às denominadas transformações de Galileu. Nesse caso, a constância da velocidade da luz implica que, para ondas eletromagnéticas, o efeito Doppler deve respeitar os princípios da relatividade e, conseqüentemente, a transformação de referencial envolvida devem ser as conhecidas transformações de Lorentz.

Transformações de Lorentz e referencial no eletromagnetismo

Diferente da mecânica newtoniana, em que o tempo é absoluto, isto é, dois referenciais distintos devem coincidir em suas medidas de tempo, na mecânica relativística, uma mudança de referencial pode corresponder a uma conseqüente mudança na medida de tempo. Isso implica que, mesmo sincronizando os relógios, dois referenciais distintos em movimento relativo podem diferir na medida do tempo. Esse fato particular da relatividade é o que marca a mudança de paradigma da mecânica relativística em relação à mecânica

newtoniana, com a passagem do conceito de tempo absoluto para o de tempo relativo.

Essas transformações de referencial são, respectivamente, as transformações de Galileu e as transformações de Lorentz. Enquanto as transformações de Galileu descrevem a mudança de referencial clássico na mecânica newtoniana, não alterando o tempo na mudança de referencial, as transformações de Lorentz descrevem uma mudança do tempo na mudança de referencial, tornando o conceito de espaço-tempo fundamentalmente vinculado à constância da velocidade da luz. As transformações de Lorentz em uma direção espacial podem ser expressas por:

$$x' = \gamma(x - vt), t' = \gamma(t - vx/c^2); \gamma = 1/[1 - (v/c)^2]^{1/2}, \quad ^1$$

e $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$ é a velocidade da luz e v é a velocidade entre os referenciais. Essas transformações se reduzem às transformações de Galileu quando v é muito menor que c .

As equações de Maxwell que descrevem o eletromagnetismo obedecem às transformações de Lorentz, isto é, são invariantes sob tais transformações, e, conseqüentemente, estão relacionadas ao comportamento relativístico na mudança de referencial e à constância da velocidade da luz. As ondas eletromagnéticas detectadas por um observador em movimento não podem assim ter sua velocidade relativa medida com valor maior que a velocidade da luz. Isso implica que o efeito Doppler medido para ondas eletromagnéticas deve ser o efeito Doppler relativístico.

Efeito Doppler relativístico e efeito Doppler para ondas eletromagnéticas

Quando uma fonte de ondas eletromagnéticas possui um movimento relativo em relação a um observador, este último não pode obter para a velocidade da onda uma velocidade maior que a velocidade da luz. A velocidade relativa entre a frente de onda e a velocidade do observador deve sempre se manter na velocidade da luz. Conseqüentemente, o efeito Doppler, nesse caso, deve

1 EINSTEIN, A. *The Principle of Relativity*. DOVER PUBLICATIONS, 2013.

ser governado pelas transformações de Lorentz, e não pelas transformações de Galileu, como seria no caso newtoniano. Assim, para uma fonte de ondas eletromagnéticas, o efeito Doppler é relativístico; com efeito, o efeito Doppler para ondas eletromagnéticas é o efeito Doppler relativístico.

Se uma fonte de ondas eletromagnéticas emite ondas de frequência f_{fonte} com velocidade v se aproximando do observador, esse observador detectará uma frequência maior do que a emitida pela fonte, dada por:

$$f_{\text{observador}} = f_{\text{fonte}} [(1+v/c)/(1-v/c)]^{1/2} \quad .^2$$

Por outro lado, se a fonte se afasta do observador, teremos uma diminuição da frequência detectada pelo observador, dada por:

$$f_{\text{observador}} = f_{\text{fonte}} [(1-v/c)/(1+v/c)]^{1/2} \quad .^3$$

Note-se que, no caso de a velocidade relativa entre a fonte e o observador ser muito pequena em relação à velocidade da luz, a frequência medida pelo observador permanece inalterada em relação à frequência da onda emitida pela fonte. As fórmulas (2) e (3) apresentadas são uma consequência das transformações de Lorentz.

Com efeito, como no caso newtoniano, o movimento da fonte em direção ao observador gera uma compressão efetiva do comprimento de onda da radiação eletromagnética, mas, diferente do caso newtoniano, essa transformação também está associada a uma alteração do intervalo de tempo entre os referenciais da fonte e do observador. Isso implica que uma compressão efetiva do comprimento de onda está associada também a uma dilatação do intervalo de tempo, e vice-versa. Esse fato tem como consequência para o efeito Doppler as expressões (2) e (3), dependendo de a fonte estar se aproximando ou se afastando do observador.

No caso de o observador se movimentar em direção à fonte, observa-se, no caso newtoniano, um aumento da velocidade de propagação da onda ou sua diminuição em relação ao observador. No entanto, dada a constância da velocidade da luz, isso não pode ocorrer no caso relativístico. Como consequência,

2 BORN, M. *Einstein's Theory of Relativity*. DOVER PUBLICATIONS, 1962.

3 D'INVERNO, R. *Introducing Einstein's Relativity*. Oxford Publishing, 1992.

se o observador estiver se aproximando ou se afastando da fonte, é um caso simétrico ao da fonte estar se aproximando ou afastando-se do observador, e, conseqüentemente, uma transformação de Lorentz estará associada a uma mudança efetiva de comprimento de onda e intervalo de tempo para o observador em relação ao referencial da fonte.

Referências

EINSTEIN, A. *The Principle of Relativity*. DOVER PUBLICATIONS, 2013.

BORN, M. *Einstein's Theory of Relativity*. DOVER PUBLICATIONS, 1962.

D'INVERNO, R. *Introducing Einstein's Relativity*. Oxford Publishing, 1992.

