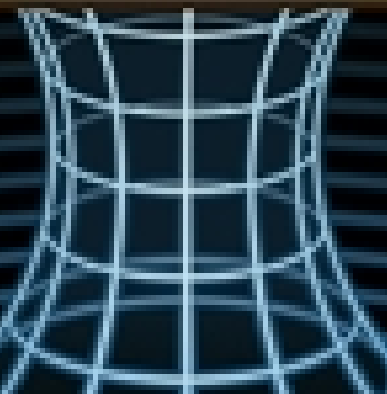




Physicae Organum



Nota editorial

A presente edição teve sua composição final realizada posteriormente à sua publicação original, com o objetivo de padronização editorial e atribuição de identificadores digitais (DOIs) aos artigos. Esse processo não alterou o conteúdo dos trabalhos originalmente publicados.

A equipe editorial agradece à Biblioteca Central da Universidade de Brasília (BCE/UnB) pelo apoio na configuração e no registro dos DOIs da revista, especialmente à bibliotecária Luísa Chaves Café.

— Leonardo Luiz e Castro, responsável pela composição final, 2026

Editorial Note

This issue had its final composition prepared after its original publication, with the aim of editorial standardization and the assignment of digital object identifiers (DOIs) to the articles. This process did not alter the content of the originally published works.

The editorial team thanks the Central Library of the University of Brasília (BCE/UnB), especially librarian Luísa Chaves Café, for their support in configuring and registering the journal's DOIs.

— Leonardo Luiz e Castro, responsible for the final composition, 2026

Apresentação

A Revista Physicae Organum, em sua segunda edição, conta com artigos que apresentam tópicos de grande interesse em diversas áreas da Física. Há uma entrevista com um professor do Instituto de Física da UnB, o professor Doutor Viktor Dodonov, falando sobre sua experiência como pesquisador e mostrando o seu ponto de vista sobre a formação de cientistas. Há ainda artigos importantes na seção de Anais do Instituto de Física, seção que apresenta os principais projetos em desenvolvimento no Instituto de Física (em nível institucional).

Novamente damos as boas vindas aos leitores, esperando contar com artigos seus, suas leituras, críticas e comentários.

Att. Lilah Fialho de Lima Simões

Editora: Physicae Organum

Sumário

1	Determinando o índice de refração do prisma na capa do álbum The Dark Side of the Moon	I
2	Energia Escura no Contexto de Teorias Alternativas da Gravitação	II
3	O Vácuo Quântico	III
4	A Metafísica e a Física de Aristóteles	IV
5	Entrevista com o professor Doutor Viktor Dodonov	V
6	Ciência a caminho da população	VI
7	A Oferta de Disciplinas pelo Instituto de Física: novas estratégias	VII
8	Professores do IF e suas áreas de pesquisa	VIII
9	Expediente Physicae Organum	IX

Determinando o índice de refração do prisma na capa do álbum *The Dark Side of the Moon*: uma atividade de óptica para o ensino médio

Determining the refractive index for the prism displayed at The DarkSide of the Moon album cover: a high school optics activity

JAIR LÚCIO PRADOS RIBEIRO*

Universidade de Brasília

Resumo

*A capa do álbum *The Dark Side of the Moon*, da banda Pink Floyd, apresenta o fenômeno da dispersão da luz branca em um prisma, elucidado por Isaac Newton. Este artigo descreve uma atividade simples, voltada para o ensino médio, para a determinação do índice de refração do prisma ilustrado para cada uma das seis cores representadas na imagem. Os índices foram determinados a partir do traçado dos raios em papel de seda, da medida dos ângulos correspondentes e da aplicação da Lei de Snell, e foi percebido que o índice de refração deveria ser decrescente com a frequência da radiação, condição não apresentada pelos materiais transparentes cotidianos. Propõe-se que o caráter lúdico da atividade e a possibilidade de discussão interdisciplinar tragam benefícios à aprendizagem do tópico.*

Abstract

*The cover of the album *The Dark Side of the Moon* by Pink Floyd depicts white light being scattered by a prism, a phenomenon elucidated by Isaac Newton. This article describes a simple activity for determining the refractive index of the illustrated prism in high school, for each of the six colors represented in the image. The indexes are determined from ray tracing in tissue paper, measuring of corresponding angles and application of Snell's Law, and it was realized that refractive index should decrease with the radiation frequency increase, a condition not revealed by everyday transparent materials. It is proposed that the playful nature of the activity and the possibility of interdisciplinary discussions could bring benefits to this topic learning.*

*Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências da Universidade de Brasília, 2015.

INTRODUÇÃO

O álbum musical foi a mídia dominante para a divulgação da música popular no século XX, e apesar da sua popularidade ter diminuído no século corrente com o advento da distribuição de música pela internet, ainda apresenta relevância como produto da indústria cultural. Ao longo da história, os álbuns foram lançados em dois principais formatos físicos: o *long-play* (LP), correspondendo a um disco de vinil de 12 polegadas (aproximadamente 30 cm) com as faixas musicais gravadas em sulcos que fazem uma agulha de diamante vibrar, e o *compact disc* (CD), um disco de menores dimensões (12 cm de diâmetro), cuja leitura da informação digital armazenada é feita a partir da interferência sofrida por um feixe laser incidente em sua superfície.

A contraparte visual de um álbum era a sua capa, que poderia trazer uma óbvia foto dos artistas, uma ilustração que fosse inerente ao título do trabalho, de uma faixa ou um conceito trabalhado no álbum, ou ainda uma imagem desconexa do mesmo. Listas de capas marcantes estão disponíveis em compilações impressas [1, 4] e pulverizadas em múltiplas fontes na internet.

Entre álbuns de rock, uma das capas mais icônicas está presente no álbum *The Dark Side of the Moon*, da banda inglesa Pink Floyd, desenvolvida pelo estúdio Hipgnosis, em 1973 (fig.1). A ilustração é singular do ponto de vista da física por apresentar uma ilustração do *Experimentum crucis* de Isaac Newton (1704) sobre a natureza da luz branca, detalhado na sua seminal obra *Opticks*: um feixe de luz branca atravessa um prisma com base equilátera e, devido à refração, é disperso em suas cores constituintes, exibindo o espectro subjacente [5]. Essa imagem buscava correlacionar o som progressivo da banda com a iluminação dos palcos em suas turnês [4].



Figura 1: Capa do álbum *The Dark Side of the Moon*, da banda inglesa Pink Floyd. Ano de lançamento: 1973. Fonte: < <http://www.portalcafebrasil.com.br/wp-content/uploads/dark-side-of-the-moon-original-vinilo.jpg> >. Acesso em 24 abr. 2014.

Devido à explicação original de Newton, costuma-se associar a esse espectro sete cores (vermelho, laranja, amarelo, verde, azul, anil e violeta), apesar de apenas seis delas serem apresentadas na capa do álbum (o anil está ausente). O espectro da luz branca emitida por um corpo negro, como sabido, apresenta-se na realidade como uma infinidade progressiva de frequências, sendo as cores apenas interpretações feitas pelo mecanismo de visão de “faixas” desse espectro.

A dispersão da luz branca em um prisma ocorre porque o índice de refração desse elemento óptico é dependente da frequência da luz incidente. Prismas ópticos são comumente feitos de vidro ou plástico, e para esses materiais, os maiores índices estão associados às maiores frequências, levando a cor vermelha a desvios menores em relação às outras cores, que possuem desvios progressivamente maiores até o violeta. A projeção do feixe de luz

emergente em uma parede produz um espectro, tradicionalmente chamado de arco-íris pelos estudantes.

Tem-se aqui uma oportunidade óbvia de se conectar uma imagem provavelmente conhecida pelos estudantes com um episódio importante da história da ciência, trazendo um diferencial para a aprendizagem [6]. As condições da realização original do experimento de Newton e a capa do álbum podem ser comparadas com uma simples recriação do experimento [7], a qual pode ser feita com um prisma e uma fonte potente de luz, tal como um retroprojeter antigo, permitindo contrastes diretos entre o experimento real, a representação imagética na capa do álbum e a descrição feita por Newton.

Nesse trabalho, apresentamos outra possibilidade de trabalho a partir da ilustração: a estimativa dos índices de refração do prisma para cada uma das seis cores presentes na imagem, com uma instrumentação comum (régua, esquadro e transferidor), e a comparação dos dados obtidos com as previsões teóricas, a fim de verificar se a situação ilustrada obedece às leis físicas. Acreditamos que a simplicidade da atividade, o baixo custo dos materiais e a facilidade para obtenção de dados e análise dos mesmos a torna adequada para o ensino da óptica no ensino médio.

I. DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE DIDÁTICA

O índice de refração absoluto é definido como a razão entre a velocidade da luz no vácuo (c) e sua velocidade no meio onde se quer calcular o índice (v). Seu valor é sempre superior a 1, e é costumeiro que o índice de refração do ar seja aproximado para esse valor.

A lei física fundamental que rege a refração foi desenvolvida por diversos estudiosos, mas dois autores tiveram seus nomes mais diretamente associa-

dos a sua formulação: Willebrord Snellius (Snell), que concebeu sua formulação em 1621 (mas não a publicou em vida), e René Descartes, que em 1637 a descobriu de forma independente [8]. Sua forma mais simples, apresentada no ensino médio, envolve a refração em um dióptro plano (fig.2), equivalente à superfície que separa dois meios com diferentes índices de refração (n_1 e n_2).

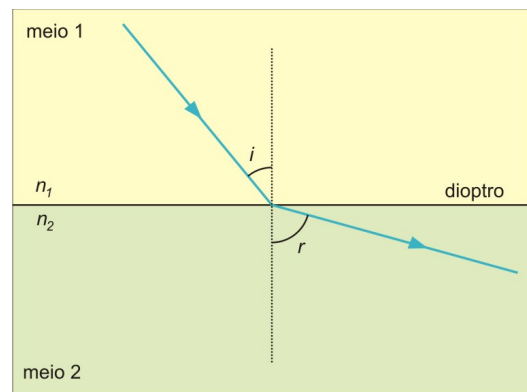


Figura 2: Refração em um dióptro plano ($n_2 < n_1$).

Para a situação apresentada na fig.2, se um raio monocromático incide em uma superfície plana formando um ângulo i com a reta normal a essa superfície e emerge formando um ângulo r com essa mesma reta, pode-se escrever:

$$n_1 \text{sen} i = n_2 \text{sen} r \quad (1)$$

O desvio dos raios de luz no prisma representado na capa do álbum *The Dark Side of the Moon* exige que o índice de refração desse elemento óptico (n_1) seja superior ao meio que o envolve (n_2), que pode ser suposto como o ar ($n_2 = 1$). Assim, o cálculo do índice de refração n_1 é ainda mais simples, a seguir:

$$n_1 = \frac{\text{sen} r}{\text{sen} i} \quad (2)$$

Cada uma das seis cores representadas, entretanto, apresentaria uma gama de valores para o

índice de refração n_1 , os quais podem ser estimados a partir da atividade apresentada nesse trabalho. O mínimo valor para o índice é obtido no limite superior da faixa, enquanto o máximo é obtido no seu limite inferior. Por exemplo, para a cor verde, a linha imaginária que separa a faixa verde da amarela na fig.1 define o mínimo índice de refração, enquanto a linha que separa as faixas verde e azul estabelece o máximo índice.

Uma cópia da fig.1 foi impressa em papel A4 para a condução da atividade junto aos estudantes. Essa figura foi coberta com papel de seda (translúcido), e sobre esse papel, o aluno deveria traçar a lápis, com o auxílio de régua e esquadro, o diopetro onde os raios de luz emergem (à direita na fig.1) e as retas normais a esse diopetro que trespassam a linha de “separação” entre duas faixas coloridas. O estudante também deveria traçar linhas que representassem os raios incidentes nesse diopetro, interligando o ponto de entrada da luz no prisma (diopetro à esquerda) com as linhas imaginárias que separam as faixas coloridas.

Para melhor visualização e precisão nas medidas, a fig.3 apresenta uma versão digital dos traçados a lápis realizados pelos estudantes, feita com o programa de uso gratuito Inkscape [9] a partir de uma ampliação de um detalhe da fig.1.

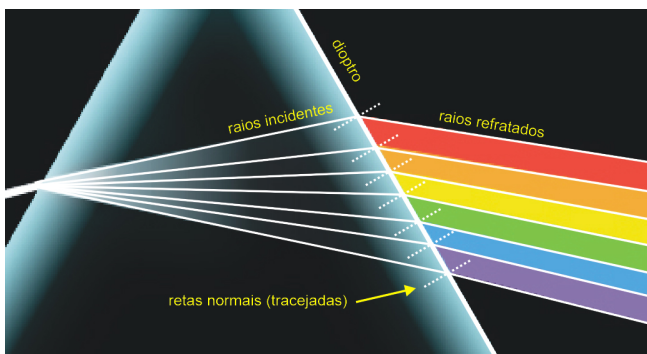


Figura 3: Detalhe da dispersão cromática no diopetro.

Para se calcular o valor do índice de refração n_1 máximo e mínimo correspondente a cada cor, basta medir com um transferidor comum os ângulos i e r (fig.3), formados entre os raios e as retas normais ao diopetro, para cada linha de separação entre as faixas, e em seguida usar a eq.2 para determinar o valor correspondente do índice n_1 . Calculadoras científicas, aplicativos ou mesmo uma tabela impressa de senos e cossenos podem ser usadas pelos estudantes para esse fim.

II. RESULTADOS E ANÁLISE

Os estudantes fizeram as medições dos ângulos sobre o papel de seda no qual foram traçados os raios luminosos, o diopetro e as retas normais. As medições dos ângulos i e r apresentadas a seguir foram obtidas pelo mesmo método, mas a partir de uma versão impressa da fig.3. Foi estimado um algarismo duvidoso após a medida do ângulo (em graus). A tabela 1 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 1: Ângulos de incidência (i) e refração (r) mínimos e máximos para cada cor e índices de refração (n_2) mínimos e máximos correspondentes para cada faixa colorida.

Interface	i (graus)	r (graus)	n_1
Preto-Vermelho	18,4	38,9	1,99
Vermelho-Laranja	23,7	39,1	1,57
Laranja-Amarelo	27,7	40,4	1,39
Amarelo-Verde	31,4	41,6	1,27
Verde-Azul	35,3	42,5	1,17
Azul-Violeta	38,3	43,4	1,11
Violeta-Preto	41,8	44,0	1,04

Uma vez medidos tais valores, foi imediato o cálculo do índice (n_1) para cada interface entre duas cores. a partir da eq.2, considerando-se o prisma imerso no ar ($n_2 = 1$). Essas interfaces

foram nomeadas pelas cores separadas pelo raio refratado: por exemplo, a linha que separa o amarelo do verde, ou aquela que separa a região sem luz (preto) do espectro colorido.

A análise qualitativa da tabela 1 já permite concluir que a ilustração não corresponde à realidade cotidiana. A dispersão cromática ocorre devido à diferença de velocidade das radiações de diferentes frequências ao atravessarem o prisma. Assim, as luzes com frequências próximas às frequências de ressonância dos elétrons dos átomos e moléculas que compõem o meio transparente interagem de forma mais frequente com a matéria, sofrendo constantes absorções e remissões, e terminam por se propagar mais lentamente [10]. Na maioria dos materiais transparentes, tais como o vidro e o acrílico, essa frequência natural de ressonância se situa na região ultravioleta do espectro, fazendo com que a luz violeta (maior frequência) se propague com uma velocidade cerca de 1% menor no vidro que a luz vermelha, levando a maiores índices de refração para as cores de maior frequência. A tabela 1 apresenta o exato oposto: o índice de refração do prisma ilustrado na capa do disco *The Dark Side of the Moon* deveria ser decrescente com a frequência (ou crescente com o comprimento de onda) para que a imagem correspondesse à realidade.

Uma discussão mais detalhista pode ser conduzida junto aos estudantes a partir de uma interpretação gráfica. A fig.4, retirada de um tradicional texto de óptica [11], mostra que o índice de refração da maioria dos materiais no espectro visível (sombreado na figura) é decrescente com o aumento do comprimento de onda, ou seja, radiações como o violeta (mais curtas) apresentam maior comprimento de onda.

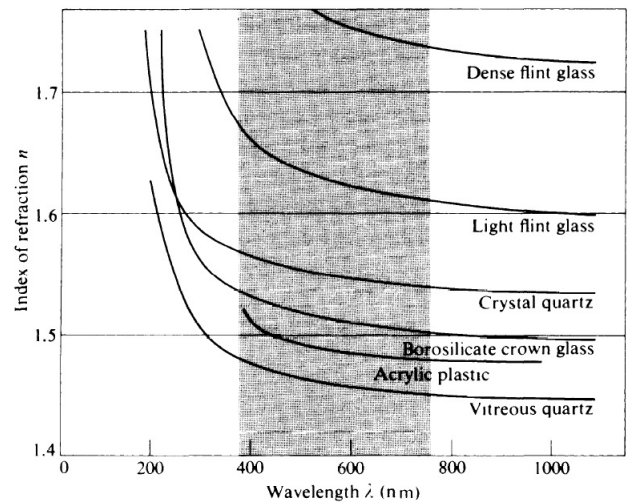


Figura 4: Dependência do índice de refração n (ordenada) em função do comprimento de onda λ (abscissa) para diversos materiais (do topo para a base: vidro flint denso, vidro flint leve, cristal de quartzo, vidro crown, acrílico, quartzo vítreo). Fonte: HETCH (2002), p.72 [11].

Para fins de comparação, é apresentado na fig.5 um gráfico representando uma linha de tendência sobre a relação entre as mesmas grandezas para o prisma aqui estudado, a partir dos dados constantes na tabela 1 e da correlação entre cores e comprimentos de onda [11], a qual se revelou fortuita, por ser feita por essa fonte para seis cores apenas, assim como na capa do álbum estudado. Os pontos azuis representam o mínimo comprimento de onda de cada cor, conforme informado pela ref. [11] e a curva vermelha representa a linha de tendência, extrapolada para as regiões do espectro infravermelho e ultravioleta. Conforme se observa, o gráfico é crescente, desafiando o exposto na fig.4. Na atividade desenvolvida em sala, entretanto, os estudantes não construíram tal gráfico, pois o conceito de comprimento de onda ainda não havia sido apresentado.

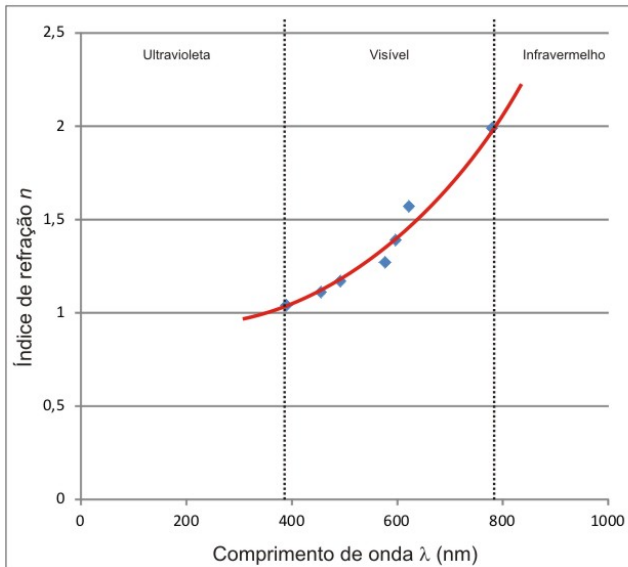


Figura 5: Dependência do índice de refração n (ordenada) em função do comprimento de onda λ (abscissa) para o prisma da capa do álbum *The Dark Side of the Moon*.

III. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Não chega a ser surpreendente o fato da imagem representada na capa do álbum não corresponder à realidade física. Afinal, é comum que o trabalho artístico ou gráfico subverta a realidade para fins estéticos ou conceituais. Entretanto, dada a popularidade da imagem aqui estudada e sua correlação direta com o fenômeno da dispersão cromática, cabe ao menos um alerta aos estudantes sobre a sua incorreção com respeito às leis físicas. Acreditamos que uma comparação entre a situação apresentada na capa do disco e um experimento usando um prisma real poderia trazer ainda maiores vantagens à compreensão do tema.

Apesar de extensa consulta à literatura acadêmica impressa e disponível em meios digitais, não

fomos capazes de encontrar um material que apresentasse índice de refração crescente com o comprimento de onda, tal como demandado para que o prisma ilustrado pudesse ser fisicamente viável. Algumas das referências consultadas [10-11] deixam claro que a *maioria* dos materiais apresenta índice de refração decrescente com o comprimento de onda, deixando em aberto a possibilidade de violação dessa norma, mas não explicitam quais materiais não obedeceriam a essa regra.

A atividade sugerida nesse artigo tem baixo custo e pode ser facilmente desenvolvida pelos estudantes. O caráter lúdico da atividade também não pode ser menosprezado. Uma contraposição aos processos verbalistas de ensino favorece o desenvolvimento da inteligência, facilita o estudo e estimula a criatividade [12]. A chance de trabalhar com um ícone visual da cultura mundial, provando a sua inadequabilidade física, se revela uma oportunidade fértil para a aprendizagem.

Alguns tópicos da óptica apresentada no ensino médio são muitas vezes vistos pelos professores como triviais, mas investigações aprofundadas podem revelar o contrário. A atividade descrita nesse trabalho se apresenta interessante como ponto de discussão sobre a relação interdisciplinar entre as artes visuais e a óptica. A subversão dos princípios da óptica geométrica em uma obra de arte pode chegar a enganar o observador, como a representação de uma imagem refletida no quadro *A Bar at the Folies-Bergère* (1882) de Édouard Manet, a qual só seria possível de ser vista por um observador disposto lateralmente [13]. O trabalho gráfico elaborado para a capa do disco *The Dark Side of the Moon* segue essa mesma linha: a princípio, a imagem parece realista e até mesmo um belo exemplo da dispersão cromática, e apenas uma análise mais profunda revela suas inconsistências, contribuindo para a aprendizagem do fenômeno e de seus conceitos subjacentes.

REFERÊNCIAS

- [1] KIRBY, J.; BUSCH, R. *Rock Covers*. 1^a ed. Köln: Taschen GmbH, 2014.
- [2] MORGAN, J.; WARDLE, B. *The Art of the LP: Classic Album Covers 1955–1995*. 1^a ed. New York: Sterling, 2010.
- [3] OCHS, M. *1000 Record Covers*. 1^a ed. Köln: Taschen GmbH, 2000.
- [4] THORGERSON, S.; POWELL, A. *100 Best Album Covers*. 1^a ed. New York: DK Publishing, 1999.
- [5] NEWTON, I. *Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. 4a ed., William Innys, Londres, 1730.
- [6] SILVA, B. *Revista Ciências & Ideias* 3 (2), 1 (2011).
- [7] RIBEIRO, J. *Experimentos em óptica: uma proposta de reconceitualização das atividades experimentais demonstrativas*. Brasília, 76p, Proposição/Dissertação de Mestrado em Ensino de Ciências, Universidade de Brasília, 2010.
- [8] Wolf, K. *European Journal of Physics* 16 (1), 14 (1995).
- [9] *Inkscape 0.91 for Windows*, 2015. Disponibilidade: <https://inkscape.org/pt/>. Acesso: 18/05/2015.
- [10] HEWITT, P. *Física conceitual*. 9a ed. Porto Alegre, Bookman, 2002.
- [11] HETCH, E. *Optics*. 4^a ed., p.58-80, Pearson, Glenview, 2002.
- [12] KISHIMOTO, T. *Perspectiva* 12 (22), 105 (1994).
- [13] PARK, M. *Manet's Bar at the Folies-Bergère: One Scholar's Perspective*, 2015. Disponibilidade: www.getty.edu/art/exhibitions/manet_bar/looking_glass.html. Acesso: 03/06/2015.

Energia Escura no Contexto de Teorias Alternativas da Gravitação

R.O. DE BRITO* V.C. DE ANDRADE †

Universidade de Brasília

Resumo

A teoria da Relatividade Geral (RG), desde a sua concepção, nos permitiu explicar e descobrir uma série de fenômenos gravitacionais.

A partir dos dados observacionais de supernovas do tipo Ia (SN Ia) acumuladas até o ano 1998, dois grupos de pesquisadores relataram independentemente que o presente Universo está acelerando [8],[9]. A fonte para esta aceleração cósmica foi apelidada de "Energia escura".

Para buscar novas interpretações para o problema foram propostas as hipóteses: Constante Cosmológica, Quintessência e Teoria $f(R)$, entre outras. Revisamos estas hipóteses ao longo do trabalho.

INTRODUÇÃO

A teoria da Relatividade Geral de Einstein [1], [2], [3] aparece como uma teoria que veio tornar mais preciso o estudo da dinâmica dos corpos celestes. Apesar da teoria da gravitação newtoniana explicar com sucesso grande parte da dinâmica dos planetas do sistema solar, pequenas discrepâncias surgem quando tentamos abordar alguns fenômenos como o da rotação da órbita de Mercúrio em torno do Sol e cenários com a presença de fortes campos gravitacionais. Somente por meio da RG foi possível explicar tais discrepâncias.

Com o crescente aumento das técnicas observacionais astrofísicas e cosmológicas, foi possível aos cientistas a observação de maiores detalhes sobre a evolução do universo e desses avanços tecnológicos surgiram algumas questões.

A teoria mais aceita para a origem do universo é conhecida como Big Bang. Esta teoria diz que tudo começou da expansão de um ponto singular, nos primeiros 10^{-30} segundos [2], [6], quando o universo expandiu exponencialmente. Posteriormente em outra etapa ocorreu o desacoplamento dos fótons com a matéria. Estes fótons remanescentes originaram o que atualmente chamamos de CMB

*E-mail: faelcuru@gmail.com

†E-mail: andrade@fis.unb.br

[10].

Algumas etapas depois, a matéria bariônica começou a se unir originando os elementos leves, na sequência os elementos pesados, e passado algum tempo começaram a surgir os planetas, estrelas, galáxias e aglomerados, resultando no universo hoje conhecido. Nestas etapas a taxa de expansão e as condições físicas eram bem distintas.

Apesar de muitos anos de pesquisa a origem da Energia Escura não foi identificada ainda. A mesma é distinta de espécies de matéria comuns como bárions e radiação, no sentido de que ela tem uma pressão negativa. Esta pressão negativa leva à expansão acelerada do Universo, contrabalançando a força gravitacional. As observações SN Ia mostraram que cerca de 70% da energia presente do universo consiste Energia Escura[8], [9].

Esse conceito de Energia Escura difere do conceito de Matéria Escura, pois esta não interage com a matéria e apresenta uma pressão negativa, o que resulta na expansão do universo.

Podemos buscar modelos alternativos para conseguirmos abordar este problema. O candidato mais simples para a Energia Escura é a Constante Cosmológica Λ . Esse modelo, o qual atribui a Λ a aceleração medida, tem sistematicamente provado consistência com um grande número de observações.

Existem basicamente duas aproximações para a construção do modelo de Energia Escura. A primeira aproximação é baseada no "modelo de matéria modificada" em que o tensor energia momento no lado direito da equação de Einstein contém uma fonte de matéria exótica com uma pressão negativa, sendo um exemplo desse modelo a Quintessência. A segunda aproximação é baseada no "modelo de

gravidade modificada", em que o tensor de Einstein no lado esquerdo da equação de Einstein $G_{\mu\nu}$ é modificado.

I. CONCEITOS BÁSICOS

A expressão Energia Escura confunde-se frequentemente com a expressão Matéria Escura, que tem sido utilizada para descrever uma matéria sem pressão que interage muito fracamente com as partículas de matéria bariônica.

A existência de Matéria Escura já foi destacada por Zwicky em 1930 [4], medindo a velocidade de rotação dos discos de galáxias e observando-se divergência entre esse dados e os previstos pela teoria.

Uma vez que a Matéria Escura não apresenta efeitos eletromagnéticos, sua presença é principalmente inferida dos efeitos gravitacionais em matéria visível. A fração de energia para Matéria Escura [5] no presente universo é cerca de 25%, enquanto que para bárions é cerca de 5%.

I. Equação de Friedmann

O elemento linha que descreve um espaço-tempo quadrimensional homogêneo e isotrópico é dito um espaço-tempo Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) e é dado por

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = -dt^2 + a^2(t) d\sigma^2, \quad (1)$$

com $g_{\mu\nu}$ o tensor métrico, $a(t)$ um fator de escala com o tempo cósmico t , e $d\sigma^2$ a métrica independente do tempo do espaço tridimensional com uma curvatura constante k

$$d\sigma^2 = \gamma_{ij} dx^i dx^j = \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2). \quad (2)$$

Aqui $k = +1, 0, -1$, o que corresponde à geometria fechada, plana e aberta, respectivamente.

A equação dinâmica do movimento no universo expandindo pode ser obtida a partir da equação de Einstein pelo seguinte passo. Da métrica $g_{\mu\nu}$ obtemos o símbolo de Christoffel

$$\Gamma_{\nu\lambda}^{\mu} = \frac{1}{2} g^{\mu\alpha} (g_{\alpha\nu,\lambda} + g_{\alpha\lambda,\nu} - g_{\nu\lambda,\alpha}), \quad (3)$$

em que $g_{\alpha\nu,\lambda} \equiv \partial g_{\alpha\nu} / \partial x^{\lambda}$. O tensor de Ricci é definido por

$$R_{\mu\nu} = \Gamma_{\mu\nu,\alpha}^{\alpha} - \Gamma_{\mu\alpha,\nu}^{\alpha} + \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} \Gamma_{\alpha\beta}^{\beta} - \Gamma_{\mu\beta}^{\alpha} \Gamma_{\alpha\nu}^{\beta}. \quad (4)$$

A contração do tensor de Ricci dá o escalar de Ricci (curvatura escalar)

$$R = g_{\mu\nu} R_{\mu\nu}. \quad (5)$$

Podemos então calcular o tensor de Einstein

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R. \quad (6)$$

A dinâmica cosmológica pode ser obtida resolvendo a equação de Einstein

$$G_{\nu}^{\mu} = 8\pi G T_{\nu}^{\mu}, \quad (7)$$

em que T_{ν}^{μ} é o tensor energia momento dos componentes da matéria. O lado esquerdo da equação (7) caracteriza a geometria do espaço tempo, enquanto o lado direito da equação descreve a energia e momento dos componentes da matéria.

Após alguns cálculos envolvendo as equações anteriores [6], chegamos à expressão

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

$$3H^2 + 2\dot{H} = -8\pi G P - \frac{k}{a^2}, \quad (9)$$

na qual H , ρ e k , são respectivamente, parâmetro de Hubble, densidade de energia e curvatura. Estas são duas equações de Friedmann independentes para modelar um universo isotrópico e homogêneo. Eliminando o termo k/a^2 , temos

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3P) \quad (10)$$

Multiplicando a expressão (8) por a^2 , diferenciando com relação ao tempo e usando a equação (10), encontramos

$$\dot{\rho} + 3H(\rho + P) = 0 \quad (11)$$

A expressão (11) é a equação de continuidade e conservação. A equação (8) pode ser escrita na forma

$$\Omega_M + \Omega_k = 1 \quad (12)$$

com

$$\Omega_M \equiv \frac{8\pi G \rho}{3H^2}, \quad \Omega_k \equiv -\frac{k}{(aH)^2}. \quad (13)$$

Frequentemente nos referimos aos presentes valores acima de parâmetro de densidade da matéria e curvatura, respectivamente. As densidades definidas para as partículas relativísticas, matéria não relativística, energia escura e curvatura, são, respectivamente

$$\Omega_r^{(0)} = \frac{8\pi G \rho_r^{(0)}}{eH_0^2}, \quad \Omega_m^{(0)} = \frac{8\pi G \rho_m^{(0)}}{3H_0^2}, \quad \Omega_{DE}^{(0)} = \frac{8\pi G \rho_{DE}^{(0)}}{3H_0^2}, \quad \Omega_k^{(0)} = -\frac{k}{(aH_0)^2} \quad (14)$$

Os índices (0) significam que essas expressões são para o tempo presente.

II. Lei de Hubble

Em 1920 Sliper e Hubble [7] encontraram que o comprimento de onda observado λ_0 das linhas de absorção de uma galáxia distante era maior que o comprimento de onda λ em repouso. Isto se deve ao fato de que o comprimento de onda é esticado proporcionalmente ao fator de escala num universo em expansão. A fim de quantificar esse efeito, introduzimos o *redshift*

$$z \equiv \frac{\lambda_0}{\lambda} - 1 = \frac{a_0}{a} - 1, \quad (15)$$

em que a época presente corresponde à $z = 0$. A seguir tomamos o fator de escala a_0 do presente igual à um, salvo indicação contrária. Como nós vamos voltar ao passado, z fica maior. Dado que a velocidade recessional v de um objeto é muito menor que a velocidade da luz c , temos $\lambda_0 \simeq (1 + v/c)$ e o efeito Doppler resulta em

$$z \simeq v/c. \quad (16)$$

Após alguns cálculos, chegamos ao resultado

$$v \simeq H_0 r. \quad (17)$$

Em 1929, Hubble relatou a lei (17) traçando a velocidade recessional versus a distância r . Seus dados foram escassos e superficiais, mas Hubble concluiu corretamente que o universo estava expandindo.

II. EVIDÊNCIAS OBSERVACIONAIS

A existência de Energia Escura é suportada por um número significativo de observações. Isto inclui (i) observação de supernovas [8], [9] (ii) Radiação Cósmica de Fundo em Micro ondas (CMB, da sigla em inglês) [10] (iii) oscilação acústica de bárions (BAO, da sigla em inglês). A primeira forte evidência para a aceleração do Universo hoje vem da

medida de distâncias (luminosidade) das supernovas tipo Ia (SN Ia). As observações da CMB são também consistentes com a presença de Energia Escura, embora as restrições oriundas da CMB somente não são fortes. As medidas do BAO têm fornecido outros testes independentes para a existência de Energia Escura.

I. Observações de supernovas

Em 1998, Ries et al. [*High-redshift Supernova Search Team (HSST)*] [8] e Perlmutter et al. [*Supernova Cosmology Project (SCP)*] [9] independentemente reportaram a aceleração cósmica, observando distantes supernovas do tipo Ia (SN Ia).

Supernova é um dos estágios finais de vida de uma estrela, quando ela produz uma explosão de enorme luminosidade. As supernovas podem ser classificadas de acordo com as linhas de absorção de elementos químicos. Se o espectro de uma supernova inclui uma linha espectral de Hidrogênio, ela é classificada Tipo II. Caso contrario, ela é dita Tipo I.

Se uma supernova contém uma linha de absorção do silício isoladamente ionizado é ainda classificada Tipo Ia. A explosão da supernova ocorre quando a massa de uma anã branca num sistema binário excede o limite de Chandrasekhar por gás absorvido da outra estrela. Uma vez que a luminosidade absoluta de uma SN Tipo Ia é bastante constante no pico de maior brilho, a distância para uma SN Ia pode ser determinada pela medida de sua magnitude aparente. Devido a essa constância no brilho ela é considerada "vela padrão" e sua luminosidade pode ser utilizada para medições observacionalmente.

A magnitude aparente, m , é frequentemente

usada como uma medida de brilho das estrelas observadas na Terra. Devemos considerar dois objetos cujo o fluxo aparente é dado por F_1 e F_2 . As magnitudes aparentes dessas estrelas (m_1 e m_2) são relacionadas com os fluxos conforme

$$m_1 - m_2 = -\frac{5}{2} \log_{10} \left(\frac{F_1}{F_2} \right). \quad (18)$$

Definimos magnitude absoluta M de um objeto, em termos da magnitude aparente e à distância de luminosidade d_L

$$m - M = 5 \log_{10} \left(\frac{d_L}{10pc} \right). \quad (19)$$

Se a distância está em Megaparsec então

$$m - M = 5 \log_{10} d_L + 25. \quad (20)$$

Em outras palavras, a magnitude absoluta é igual à magnitude aparente localizada numa distância $d_L = 10pc$. A magnitude absoluta de SN Ia é conhecida ser em torno de $M = -19$ no pico de maior brilho.

Com a equação (20) descobrimos d_L e medindo o comprimento de onda determinamos o *redshift*.

II. Radiação cósmica de fundo em Microondas (CMB)

As observações de temperaturas anisotrópicas na CMB forneceram outro teste independente para a existência de Energia Escura. O céu mais antigo que podemos ver é a chamada superfície de ultimo espalhamento, momento em que ocorre a última interação entre fótons e elétrons livres, que logo serão aprisionados por íons para formar átomos.

Os fótons foram fortemente acoplados à bárions e elétrons antes da época de desacoplamento $z \simeq 1090$, mas eles puderam se mover livremente

depois disso.

Em 1963, Penzias e Wilson [10] foram os primeiros a detectar fótons de CMB termalizados a uma temperatura quase uniforme em todo o céu.

A presença de Energia Escura afeta o espectro de potência da CMB de duas maneiras: o primeiro efeito é a mudança de posição dos picos acústicos vindo da modificação da distância do diâmetro angular. O segundo efeito é o chamado efeito Sachs-Wolfe Integrado (ISW)[11] causado pela variação do potencial gravitacional.

III. MODELOS ALTERNATIVOS

I. Constante Cosmológica

Albert Einstein construiu a Relatividade Geral em 1915-1916 [1] e em 1917 aplicou sua teoria para o universo. Na ausência de constante cosmológica é evidente que o fator de escala a pode mudar dinamicamente no tempo. Em 1910, entretanto, Einstein acreditava que o universo era estático e assim introduziu a constante cosmológica para realizar tal universo.

A constante cosmológica é a teoria mais simples que apresenta uma explicação para a Energia Escura, e em especial Λ é importante pois em todas as teorias teremos uma relação com a constante cosmológica, de tal modo que nas demais teorias necessitamos de que a constante cosmológica seja nula ou com valor muito pequeno. Com isso torna-se importante entender o comportamento da constante cosmológica e os motivos que a fazem assumir um pequeno valor.

O tensor energia momento $T_{\mu\nu}$ da Equação de Einstein (7) obedece a lei de conservação $T_{\mu\nu}^{;\nu} = 0$, com o símbolo ${}^{;\mu} = \nabla_{\mu}$ representando a derivada

covariante. Assim a equação de Einstein com constante cosmológica Λ fica

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu} \quad (21)$$

Esta equação (21) pode ser derivada pelo princípio de mínima de ação. Baseado na ação linear em termos do escalar Ricci $R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu}$ e na ação da matéria S_m , a ação total é dada por

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} (R - 2\Lambda) + S_m. \quad (22)$$

A variação da ação (22) com respeito à $g^{\mu\nu}$ nos dá

$$\delta S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x [\delta(\sqrt{-g})(g^{\mu\nu}R_{\mu\nu} - 2\Lambda) + \sqrt{-g}\delta g^{\mu\nu}R_{\mu\nu} + \sqrt{-g}g^{\mu\nu}\delta R_{\mu\nu}] + \delta S_m. \quad (23)$$

Efetuada algumas manipulações nas equações acima [5], obtemos

$$\delta S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} (R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} - 8\pi GT_{\mu\nu}) \delta g^{\mu\nu} \equiv dV/d\Phi. \quad (24)$$

A equação de Einstein (21) segue do princípio de mínima ação, $\delta S = 0$.

As expressões (8) e (10) para a RG com constante cosmológica não nula ficam [6]

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} \quad (25)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3P) + \frac{\Lambda}{3} \quad (26)$$

De (26) é possível ver que Λ trabalha como uma força repulsiva contra a gravidade. E esta força repulsiva seria a anergia escura nesse modelo.

II. Quintessência

O conceito de campo escalar está muito presente na Física de Campos e Partículas. Usamos o termo "Quintessência" [12], que denota um campo escalar canônico Φ com um potencial $V(\Phi)$ que interage com todas as outras componentes somente através da gravidade padrão. O modelo de Quintessência é portanto descrito pela ação

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} [\frac{1}{2}R + \mathcal{L}_\Phi] + S_M, \quad \mathcal{L}_\Phi = \frac{1}{2}g^{\mu\nu}\partial_\mu\Phi\partial_\nu\Phi - V(\Phi) \quad (27)$$

com $k^2 = 8\pi G$ e R o escalar de Ricci. Suprimindo cálculos, [6], obtemos

$$H^2 = \frac{k^2}{3} \left[\frac{1}{2}\dot{\Phi}^2 + V(\Phi) + \rho_M \right], \quad (28)$$

$$H = -\frac{k^2}{2} (P_{\text{Phi}} + \rho_M + P_M). \quad (29)$$

A variação da ação (27) com respeito a Φ é dada por

$$\ddot{\Phi} + 3H\dot{\Phi} + V_\Phi = 0 \quad (30)$$

Assim, a presença da contribuição do campo escalar na ação total simula o efeito da expansão acelerada do universo.

III. Teoria $f(R)$

O último modelo que procura explicar a Energia Escura se baseia em realizar uma mudança no lado esquerdo da equação de Einstein, ou seja, modificar o conteúdo da contribuição dos campos, chamado de modelo de gravitação modificada [13], [14].

Um dos mais simples modelos de gravitação modificada é o chamado gravidade $f(R)$ em que a

ação quadridimensional é dada por alguma função geral $f(R)$ do escalar de Ricci R

$$S = \frac{1}{2k^2} \int d^4x \sqrt{-g} f(R) + S_m(g_{\mu\nu}, \Psi_m), \quad (31)$$

ao passo que, como usual $k^2 = 8\pi G$, e S_m é a ação da matéria com campo material Ψ_m .

III.1 O formalismo métrico

Existem duas formulações para a obtenção das equações generalizadas de campo a partir da ação com $f(R)$: a formulação de Palatini e a formulação métrica. Optaremos por utilizar a formulação métrica considerando $\Gamma_{\nu\lambda}^\mu$ função de $g_{\mu\nu}$ e realizando a variação funcional com respeito a métrica.

A equação de campo resultante fica

$$F(R)R_{\mu\nu}(g) - \frac{1}{2}f(R)g_{\mu\nu} - \nabla_\mu \nabla_\nu F(R) + g_{\mu\nu}F(R) = k^2 T_{\mu\nu}, \quad (32)$$

com $F(R) \equiv \partial f / \partial R$ (Também usamos a notação $f_{,R} \equiv \partial f / \partial R$, $f_{,RR} \equiv \partial^2 / \partial R^2$) e $T_{\mu\nu}$ o tensor energia momento da matéria. Os passos para derivação dessa equação são semelhantes aos utilizados para obter a equação (24). O traço da equação (32) é dado por

$$3F(R) + F(R)R - 2f(R)g_{\mu\nu} = k^2 T_{\mu\nu}, \quad (33)$$

com $T = g^{\mu\nu} T_{\mu\nu} = -\rho + 3P$. Aqui ρ e P são densidade de energia e pressão da matéria, respectivamente.

IV. CONCLUSÃO

A Energia Escura foi proposta no ano de 1998 [9], logo após a análise dos dados das supernovas tipo Ia, e depois de tantos anos de pesquisa teórica

e experimental a Energia Escura continua uma questão não respondida.

Esses modelos mencionados podem todos serem inapropriados, mas serão de grande valia, no tocante ao *background* matemático. Nesse século, estão em curso diversos projetos que poderão ajudar na compreensão da natureza da Energia Escura, auxiliando a indicar as abordagens mais adequadas. Esse é o maior problema da Cosmologia da atualidade em aberto.

V. AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial ao CNPq por ter financiado este trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] EINSTEIN, A. *The Foundation of the General Theory of Relativity* Annalen der Physik 49, 1916
- [2] D'INVERNO. Clarendon Press: Oxford, 2005. *R. Introducing Einstein's Relativity* 21, 116, 2004.
- [3] SCHUTZ, B. *A first course in General Relativity*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [4] ZWICKY. *On the Red Shift of Spectral Lines through Interstellar Space*. F.Proceedings of the National Academy of Science 15, 1929.
- [5] ADE, P. A. R.; AGHANIM, N.; ARMITAGE-CAPLAN, C.; (Planck Collaboration) et al.

- Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results - Table 9.* Astronomy and Astrophysics 571, 2013.
- [6] AMENDOLA, L; TSUJIKAWA, S. *Dark Energy: Theory and Observations.* Cambridge, 2010.
- [7] HUBBLE, E. P. *The Observational Approach to Cosmology.* The Clarendon Press, 1937.
- [8] RIESS, A. et al. *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant* Astron. J. 116, 1998.
- [9] PERLMUTTER, S et al. *Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae.* Astrophys. J. 517, 1999.
- [10] PENZIAS, A. A. ; WILSON, R. W. *A measurement of excess antenna temperature at 4080-Mc/s.* Astrophys. J. 142, 1965.
- [11] SACHS, R. K. ; WOLFE, A. M. *Perturbations of a cosmological model and angular variations of the microwave background.* Astrophys. J. 147, 1967.
- [12] ATRA, P.; PEEBLES, L. *Cosmological consequences of a rolling homogeneous scalar field.* Physical Review D 37, 1988.
- [13] BUCHDAHL, H. A. *Non-linear Lagrangians and cosmological theory.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 150, 1970.
- [14] MÜLLER, D. ; DE ANDRADE, V. C. ; MAIA, C. ; REBOUÇAS, M. J. ; TEIXEIRA, A. F. F. *Future dynamics in $f(R)$ theories.* European Physical Journal C. Particles and Fields, v. 75, p. 13, 2015..

O Vácuo Quântico

WALESKA PRISCYLLA FLORENCIO DE MEDEIROS*

Instituto de Física, Universidade de Brasília

Resumo

Discute-se na presente pesquisa, a quantização do campo eletromagnético, enfatizando o estado de vácuo quântico e como este pode ser significativo através dos efeitos Casimir e Unruh.

Palavra-chaves: quantização do campo eletromagnético, vácuo quântico, efeito Casimir, efeito Unruh-Davies.

INTRODUÇÃO

A noção comum que associamos primeiramente a palavra ‘vácuo’ é a ausência absoluta de matéria [1]. Atualmente, somos levados a uma redefinição dessa noção pelos pressupostos da teoria quântica de campos, na qual a quantização do campo eletromagnético nos concede maneiras de lidar com vários fenômenos relacionados ao vácuo.

Neste processo, o campo eletromagnético modal de frequência ω se torna matematicamente equivalente a de um oscilador harmônico com mesma frequência e autovalores. A principal consequência segue na definição do estado de vácuo como sendo um estado que não possui fótons, mas, no entanto, possui uma quantidade de energia devida às flutuações estatísticas do valor esperado do quadrado dos campos.

Ao estender o procedimento de quantização para um campo de vários modos submetido ao espaço de um paralelepípedo, o número de modos permitidos se torna infinito e implica na densidade de energia no ponto zero de vácuo sendo também infinita. Entretanto, se duas placas paralelas perfeitamente condutoras e descarregadas forem trazidas até o seu interior, será requerida uma energia potencial cujo valor é a diferença entre duas quantidades infinitas, da qual é possível se obter um significado físico de valor finito mostrado em 1948, pelo físico holandês Hendrik B. G. Casimir, como o surgimento de uma força atrativa entre as placas.

A densidade de energia de vácuo é a mesma para todos os observadores em diferentes sistemas inerciais. No entanto, é diferente para observadores que se movem com uma aceleração *própria* constante pelo estado de vácuo; estes percebem a

*waleska182_@hotmail.com

si mesmos submetidos a um banho térmico. Este resultado foi obtido em 1976, por Bill Unruh ao concluir que a aceleração promove uma diferente interpretação para a flutuação quântica de campo no ponto zero.

Notação Relativística

O Operador d'alembertiano \square^2 é definido como

$$\square^2 \equiv \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2}{\delta t^2} = \delta_\nu \delta_\nu \quad (1)$$

onde $v = (x, y, z, ict)$ é o quadri-vetor de deslocamento no espaço-tempo [2]. Em alguns casos é conveniente denotarmos $\tau = ct$.

I. OSCILADOR HARMÔNICO QUÂNTICO

A hamiltoniana de um oscilador harmônico quântico (OHQ), o qual possui massa m e frequência ω , se mantém com o mesmo formato clássico

$$H = \frac{P^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega^2 Q^2 \quad (2)$$

com exceção de P e Q que nesse caso representam os operadores momento e posição no espaço de Hilbert. [3][4]

Dois operadores não-hermitianos são definidos como:

$$a = \frac{1}{\sqrt{2m\hbar\omega}} (P - im\omega Q) \quad (3)$$

$$a^\dagger = \frac{1}{\sqrt{2m\hbar\omega}} (P + im\omega Q) \quad (4)$$

segue da regra de comutação canônica $[Q, P] = i\hbar^1$, o comutador entre eles

$$[a, a^\dagger] = 1. \quad (5)$$

Isolando os operadores P e Q nas equações (3)-(4) e usando a relação de comutação entre os operadores a e a^\dagger na equação (5), podemos escrever a expressão (2) como

$$H = \hbar\omega \left(a^\dagger a + \frac{1}{2} \right) \equiv \hbar\omega \left(N + \frac{1}{2} \right), \quad (6)$$

¹Nessa fórmula, e nas demais apresentadas neste artigo, \hbar é a constante de Planck dividida por 2π .

na qual os autovalores do operador $N \equiv a^\dagger a$ são os níveis de energia do oscilador harmônico n , com respectivo autovetores $|n\rangle$, descritos pela equação de autovalores

$$N|n\rangle = n|n\rangle. \quad (7)$$

Ao analisarmos o efeito do operador N nos kets $a|n\rangle$ e $a^\dagger|n\rangle$ é possível chegar nas seguintes equações:

$$a|n\rangle = \sqrt{n}|n-1\rangle \quad (8)$$

$$a^\dagger|n\rangle = \sqrt{n+1}|n+1\rangle, \quad (9)$$

por razão óbvia, a é chamado de operador de "aniquilação" e a^\dagger operador de "criação".

Da equação de autovalores para a Hamiltoniana

$$H|n\rangle = E_n|n\rangle, \quad (10)$$

obtemos os níveis de energia do oscilador harmônico

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar\omega \quad (11)$$

no qual $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

II. CAMPOS

Nosso universo é composto por campos de matéria, nos quais os quanta são os férmions (ex. elétrons e quarks) e os bósons (ex. fótons e glúons). Todos esses campos possuem energia no ponto zero ou estado de vácuo do campo.

Nos concentraremos no campo de força eletromagnético, cujo quanta são os fótons. Pois este, quando quantizado, possui muitos aspectos que se aplicam à todas as teorias quânticas de campo.

III. QUANTIZAÇÃO DO CAMPO ELETROMAGNÉTICO

O primeiro passo para a quantização do campo eletromagnético é mostrar que esse campo modal é equivalente a um oscilador harmônico quântico. [4]

As equações de Maxwell para o campo livre, i.e. numa região livre de fontes e na condição de calibre de Coulomb $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$, são satisfeitas pelo potencial vetorial \mathbf{A} , escrito como $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$, que quando substituído nas equações de Maxwell resulta em

$$\square^2 \mathbf{A} = 0. \quad (12)$$

Assim, a solução para as equações de Maxwell no espaço livre pode ser obtida pela resolução da equação (12) para o potencial vetorial na condição de calibre de Coulomb, sujeita à apropriadas condições de contorno. Segue a solução monocromática dada pela separação de variáveis

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) &= \alpha(t) \mathbf{A}_0(\mathbf{r}) + \alpha^*(t) \mathbf{A}_0^*(\mathbf{r}) \\ &= \alpha(0) e^{-i\omega t} \mathbf{A}_0(\mathbf{r}) + \alpha^*(0) e^{i\omega t} \mathbf{A}_0^*(\mathbf{r}) \end{aligned} \quad (13)$$

na qual $\mathbf{A}_0(\mathbf{r})$ satisfaz a equação de Helmholtz

$$\nabla^2 \mathbf{A}_0(\mathbf{r}) + k^2 \mathbf{A}_0(\mathbf{r}) = 0, \quad (14)$$

com $k = \omega/c$ e $\alpha(t)$ satisfazendo $\ddot{\alpha}(t) = -\omega^2 \alpha(t)$.

Através da equação (13), podemos escrever os campos vetoriais elétrico e magnético como

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{c} \frac{\delta \mathbf{A}}{\delta t} = -\frac{1}{c} [\dot{\alpha}(t) \mathbf{A}_0(\mathbf{r}) + \dot{\alpha}^*(t) \mathbf{A}_0^*(\mathbf{r})] \quad (15)$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{A} = \alpha(t) \nabla \times \mathbf{A}_0(\mathbf{r}) + \alpha^*(t) \nabla \times \mathbf{A}_0^*(\mathbf{r}). \quad (16)$$

Assumindo sem perda de generalidade que a função modal $\mathbf{A}_0(\mathbf{r})$ é normalizada

$$\int d^3 \mathbf{r} |\mathbf{A}_0(\mathbf{r})| = 1, \quad (17)$$

introduzindo as definições,

$$q(t) = \frac{i}{c\sqrt{4\pi}} [\alpha(t) - \alpha^*(t)] \quad (18)$$

$$p(t) = \frac{k}{\sqrt{4\pi}} [\alpha(t) + \alpha^*(t)] \quad (19)$$

e utilizando as equações (15)-(16) podemos obter a Hamiltoniana do campo $H = 1/8\pi \int d\mathbf{r}^3 (\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2)$ como

$$H = \frac{1}{2} (p^2 + \omega^2 q^2). \quad (20)$$

Essa notação sugere que, como desejado, o nosso campo modal de frequência ω e massa unitária é matematicamente equivalente a um oscilador harmônico com a mesma frequência.

Quando passamos da teoria clássica para a quântica, os números $\alpha(t)$ e $\alpha^*(t)$ devem ser substituídos pelos operadores $(2\pi\hbar c^2/\omega)^{1/2} a(t)$ e $(2\pi\hbar c^2/\omega)^{1/2} a^\dagger(t)$ respectivamente, nas equações (13), (15)-(16), resultando na Hamiltoniana para o campo modal quantizado equivalente ao do (OHQ) na equação (6), com autovalores de energia dados pela equação (11).

O inteiro n é o número de fótons no campo modal, descrito pelo estado $|n\rangle$. Para $n = 0$, temos o estado de vácuo $|0\rangle$, definido como sendo o estado sem fótons, mas, no entanto, este possui uma energia de ponto zero cujo valor é $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$.

O valor esperado dos campos elétrico e magnético zera em todos os estados estacionários, inclusive no estado de vácuo, desde que $\langle n|a|n\rangle = 0$. Entretanto, o valor esperado para o quadrado desses é diferente de zero, calculado como exemplo para o campo elétrico através da equação (15) feito as devidas substituições para o caso quântico com os operadores $a(t)$ e $a^\dagger(t)$,

$$\langle \mathbf{E}^2(\mathbf{r}, t) \rangle = 4\pi\hbar\omega |\mathbf{A}_0(\mathbf{r})|^2 n + \langle \mathbf{E}^2(\mathbf{r}) \rangle_0. \quad (21)$$

Segue como consequência, uma flutuação no estado de vácuo, existindo mesmo na ausência de qualquer fonte. Desse modo, a eletrodinâmica quântica (EDQ) prediz que o vácuo eletromagnético é um estado estacionário de campo com flutuações estatísticas dos campos elétrico e magnético.

I. O Campo no Espaço Livre

Um campo sem condições de contorno se encontra no espaço livre, neste caso, o número permitido de campos modais se torna infinito. [4]

A intensidade do campo para o espaço livre infinito $|\mathbf{A}_0(\mathbf{r})|^2$, da equação (21), deve satisfazer a equação de Helmholtz (14) e ser independente da posição para cada modo do campo. Essas condições são satisfeitas por $\mathbf{A}_0(\mathbf{r}) = e_{\mathbf{k}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$, onde para satisfazer a condição de calibre de Coulomb,

$$\mathbf{k} \cdot e_{\mathbf{k}} = 0. \quad (22)$$

A fim de normalizarmos nossa função modal, como na equação (17), dividimos o espaço em cubos de volume $V = L^3$ e impomos ao campo a condição de contorno periódica

$$\mathbf{A}(x+L, y+L, z+L, t) = \mathbf{A}(x, y, z, t) \quad (23)$$

equivalente à

$$(k_x, k_y, k_z) = \frac{2\pi}{L}(n_x, n_y, n_z) \quad (24)$$

onde cada n pode assumir qualquer valor inteiro.

O artifício de introduzir as condições periódicas de contorno não possui consequência física se considerarmos L grande comparado com qualquer dimensão física do nosso interesse. Isso nos permite considerar o campo em qualquer um dos cubos imaginários e definir a função modal $\mathbf{A}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = V^{-1/2} e_{\mathbf{k}} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}$ satisfazendo as condições da equação de Helmholtz, transversalidade e normalização.

O vetor $e_{\mathbf{k}}$ é unitário, real e específica à polarização do campo modal. Pela equação (22) existe duas condições independentes na sua escolha. Assim a função modal pode ser definida como

$$\mathbf{A}_{\mathbf{k}\lambda}(\mathbf{r}) = V^{-1/2} e_{\mathbf{k}\lambda} e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}, \quad (25)$$

onde \mathbf{k} é o vetor de onda e $\lambda = \{1, 2\}$ a polarização. Tornando o potencial vetorial da onda plana modal do campo na seguinte forma,

$$\mathbf{A}_{\mathbf{k}\lambda}(\mathbf{r}) = \left(\frac{2\pi\hbar c^2}{\omega_{\mathbf{k}} V} \right)^{1/2} \left[a_{\mathbf{k}\lambda}(t) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} + a_{\mathbf{k}\lambda}^\dagger(t) e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \right] e_{\mathbf{k}\lambda}. \quad (26)$$

A condição (24) nos diz que existe um número infinito de ondas modais. A linearidade das equações de Maxwell nos permite escrever o potencial vetorial total no espaço livre como

$$\begin{aligned} \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) &= \sum_{\mathbf{k}\lambda} \mathbf{A}_{\mathbf{k}\lambda}(\mathbf{r}) \\ &= \sum_{\mathbf{k}\lambda} \left(\frac{2\pi\hbar c^2}{\omega_{\mathbf{k}} V} \right)^{1/2} \left[a_{\mathbf{k}\lambda}(t) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} + a_{\mathbf{k}\lambda}^\dagger(t) e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \right] e_{\mathbf{k}\lambda}. \end{aligned} \quad (27)$$

Usando o fato de que

$$\int_V d^3\mathbf{r} \mathbf{A}_{\mathbf{k}\lambda}(\mathbf{r}) \cdot \mathbf{A}_{\mathbf{k}'\lambda'}^*(\mathbf{r}) = \delta_{\mathbf{k}\mathbf{k}'}^3 \delta_{\lambda\lambda'}, \quad (28)$$

encontramos, assim como antes, a Hamiltoniana dos infinitos modos no espaço livre

$$H = \sum_{\mathbf{k}\lambda} \hbar\omega_{\mathbf{k}} \left(a_{\mathbf{k}\lambda}^\dagger a_{\mathbf{k}\lambda} + \frac{1}{2} \right). \quad (29)$$

Essa é a Hamiltoniana para um número infinito de osciladores harmônicos desacoplados, assim, cada campo modal diferente é independente dos demais.

O estado estacionário do campo livre é caracterizado pelo conjunto de números de fótons $\{n_{\mathbf{k}\lambda}\}$. O estado $\{|n_{\mathbf{k}\lambda}\}$ possui o número total de fótons $\sum_{\mathbf{k}\lambda} n_{\mathbf{k}\lambda}$, e energia

$$E = \sum_{\mathbf{k}\lambda} \hbar\omega_{\mathbf{k}} \left(n_{\mathbf{k}\lambda} + \frac{1}{2} \right). \quad (30)$$

O estado de vácuo $|vac\rangle$ do campo livre é definido como sendo o estado de menor energia em que $n_{\mathbf{k}\lambda} = 0$, para todos os modos (\mathbf{k}, λ) . Esse estado de vácuo, assim como todos os estados estacionários do campo, é um autoestado da Hamiltoniana, mas não dos operadores dos campos elétrico e magnético. Isso nos leva aos valores não definidos dos campos no estado de vácuo, como discutido anteriormente, esses podem ser imaginados como flutuações sobre seus valores médios em torno do zero.

No processo em que um fóton é aniquilado (absorvido), pode-se imaginar que o fóton está fazendo uma transição para dentro do estado de vácuo. Similarmente, quando um fóton é criado (emitido), imagina-se que este está fazendo uma transição para fora do estado de vácuo. Não havendo um limite para tal, podemos supor que existe um número infinito de fótons no estado de vácuo com energia infinita.

Usando a equação (24), podemos fazer a seguinte substituição

$$\sum_{\mathbf{k}\lambda} \rightarrow \sum_{\lambda} \left(\frac{L}{2\pi} \right)^3 \int d^3\mathbf{k} = \frac{V}{8\pi^3} \sum_{\lambda} \int d^3\mathbf{k}. \quad (31)$$

O ponto zero da densidade de energia se torna

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} \sum_{\mathbf{k}\lambda} \frac{1}{2} \hbar\omega_{\mathbf{k}} &= \frac{2}{8\pi^3} \int d^3\mathbf{k} \frac{1}{2} \hbar\omega_{\mathbf{k}} \\ &= \frac{\hbar}{2\pi^2 c^3} \int d\omega \omega^3, \end{aligned} \quad (32)$$

usando a substituição (31) e a mudança de variável $\mathbf{k} = \omega_{\mathbf{k}}/c$, o fator multiplicativo 2 surge dos dois valores independentes na escolha de λ . A densidade espectral de energia do campo no vácuo é

$$\rho_0(\omega) = \frac{\hbar\omega^3}{2\pi^2 c^3}. \quad (33)$$

No intervalo no qual a frequência varia de ω_1 para ω_2 , a densidade de energia é

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} d\omega \rho_0(\omega) = \frac{h}{8\pi^2 c^3} (\omega_2^4 - \omega_1^4). \quad (34)$$

Esse valor pode ser bastante extenso, mesmo em regiões de baixas frequências no espectro. Na região ótica, por exemplo, de 400 nm à 700 nm, da equação (32) obtemos um valor por volta de $2,2 \times 10^{-5} \text{ J/cm}^3$.

IV. O EFEITO CASIMIR

Uma consequência do campo eletromagnético no ponto zero, mostrado por Casimir em 1948, é uma força atrativa entre duas placas planas perfeitamente condutoras e descarregadas. [4]

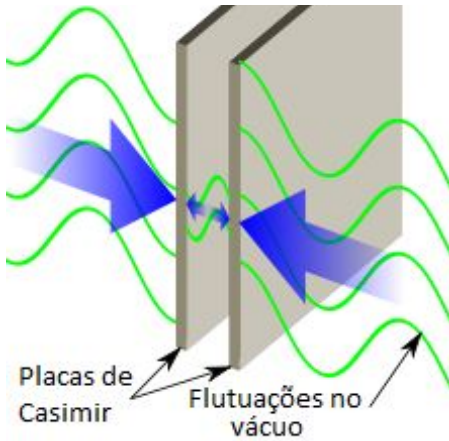


Figura 1: Duas placas paralelas e condutoras experimentam uma força atrativa devido a uma alteração no estado inicial do vácuo, sendo $L_z = d$ a distância entre as placas.

A situação física mostrada na figura 1 leva em consideração um conjunto modal limitado ao invés das ondas planas modais no espaço livre.

Consideramos primeiramente os modos apropriados no interior de um paralelepípedo retangular de lados $L_x = L_y = L$ e L_z , onde L_z é a distância entre as placas igual à d . Para paredes perfeitamente condutoras a função modal satisfazendo as condições de contorno, no qual a componente tangencial do campo elétrico se anula nas paredes são

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = A_x(\mathbf{r})\mathbf{i} + A_y(\mathbf{r})\mathbf{j} + A_z(\mathbf{r})\mathbf{k} \quad (35)$$

onde

$$A_x(\mathbf{r}) = \left(\frac{8}{V}\right)^{1/2} a_x \cos(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) \quad (36)$$

$$A_y(\mathbf{r}) = \left(\frac{8}{V}\right)^{1/2} a_y \sin(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) \quad (37)$$

$$A_z(\mathbf{r}) = \left(\frac{8}{V}\right)^{1/2} a_z \sin(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) \quad (38)$$

com $a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = 1$, $V = L^2 L_z$ e

$$k_x = \frac{l\pi}{L}, k_y = \frac{m\pi}{L}, k_z = \frac{n\pi}{L} \quad (39)$$

onde l, m e n são valores inteiros positivos e zero. Definimos funções de ondas modais que satisfazem a equação de Helmholtz (14) e transversais de acordo com a condição de calibre de Coulomb. Para satisfazer a última condição devemos ter

$$k_x a_x + k_y a_y + k_z a_z = 0 \quad (40)$$

que implica em

$$\frac{\pi}{L}(l a_x + m a_y) + \frac{\pi}{L}(n a_z) = 0, \quad (41)$$

indicando a existência de duas polarizações independentes, a menos que um dos inteiros l, m ou n seja nulo.

Essas funções modais também são ortogonais e satisfazem a condição de normalização (17),

$$\int_0^L dx \int_0^L dy \int_0^L dz [A_x^2(\mathbf{r}) + A_y^2(\mathbf{r}) + A_z^2(\mathbf{r})] = 1. \quad (42)$$

As frequências permitidas definidas pela condição (39) são

$$\omega_{lmn} = k_{lmn} c = \pi c \left[\frac{l^2}{L^2} + \frac{m^2}{L^2} + \frac{n^2}{L^2} \right]^{1/2}, \quad (43)$$

portanto a energia no ponto zero de energia é

$$\sum'_{l,m,n} (2) \frac{1}{2} h \omega_{lmn} = \sum_{l,m,n} \pi h c \left[\frac{l^2}{L^2} + \frac{m^2}{L^2} + \frac{n^2}{L^2} \right]^{1/2}, \quad (44)$$

o fator multiplicativo 2 surge das duas polarizações independentes dos modos e a linha no símbolo do somatório implica que o fator $\frac{1}{2}$ deve ser inserido se um dos inteiros l, m ou n for zero.

Na situação física do efeito Casimir $L \gg L_z$, onde $L_z = d$, nos permitindo fazer a seguinte substituição na equação (44): $\sum_{lmn} \rightarrow \sum_n' \left(\frac{L}{\pi}\right)^2 \int \int dk_x dk_y$, tornando a energia no ponto zero como

$$E(d) = \left(\frac{L}{\pi}\right)^2 (hc) \sum_n' \int_0^\infty dk_x \int_0^\infty dk_y \left(k_x^2 + k_y^2 + \frac{n^2\pi^2}{d^2}\right)^{1/2}, \quad (45)$$

mostra que se trata de um valor infinito, e permanece sendo para qualquer volume finito.

Se d for arbitrariamente grande, a soma sobre n também pode ser substituída por uma integral

$$E(\infty) = \left(\frac{L}{\pi}\right)^2 (hc) \frac{d}{\pi} \int_0^\infty dk_x \int_0^\infty dk_y \int_0^\infty dk_z (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)^{1/2} \quad (46)$$

que também é um valor infinito.

A energia potencial do sistema requerida para trazer as placas de uma longa separação para a separação d é

$$U(d) = E(d) - E(\infty), \quad (47)$$

tratando-se da diferença de duas quantidades infinitas na qual pode-se obter uma medida física de valor finito.

Realizamos uma transformação para as coordenadas polares e introduzimos uma função de corte na frequência 'cutoff' $f(k) = f([u^2 + k_z^2]^{1/2})$, tal que $f(k) = 1$ para $k \ll k_m$ e $f(k) = 0$ para $k \gg k_m$ na equação (47). A função de corte é necessária pelo requerimento das paredes das placas serem perfeitamente condutoras se desfazerem com comprimentos de ondas pequenos comparados com as dimensões atômicas, com isso podemos assumir que $k_m \approx \frac{1}{a_0}$, onde a_0 é o raio de Bohr.

Assim,

$$U(d) = \left(\frac{\pi^2 hc}{4d^3}\right) L^2 \left[\sum_{n=0}^\infty \int_0^\infty dx (x+n^2)^{1/2} f\left(\frac{\pi}{d}[x+n^2]^{1/2}\right) - \int_0^\infty d\kappa \int_0^\infty dx (x+\kappa^2)^{1/2} f\left(\frac{\pi}{d}[x+\kappa^2]^{1/2}\right) \right] \quad (48)$$

utilizando as variáveis de integração $x = u^2 d^2 / \pi^2$ e $\kappa = k_z d / \pi$. Se definimos

$$F(k) \equiv \int_0^\infty dx (x+\kappa^2)^{1/2} f\left(\frac{\pi}{d}[x+\kappa^2]^{1/2}\right), \quad (49)$$

obtemos

$$U(d) = \left(\frac{\pi^2 hc}{4d^3}\right) L^2 \left[\frac{1}{2} F(0) + \sum_{n=0}^\infty F(n) - \int_0^\infty d\kappa F(\kappa) \right]. \quad (50)$$

De acordo com a fórmula de Euler-Maclaurin,

$$\sum_{n=0}^\infty F(n) - \int_0^\infty d\kappa F(\kappa) = -\frac{1}{2} F(0) - \frac{1}{12} F'(0) + \frac{1}{720} F'''(0) \dots \quad (51)$$

para $F(\infty) \rightarrow 0$. Realizando as derivadas, obtemos

$$\sum_{n=0}^\infty F(n) - \int_0^\infty d\kappa F(\kappa) = -\frac{1}{2} F(0) - \frac{4}{720}, \quad (52)$$

resultando em,

$$U(d) = -\left(\frac{\pi^2 hc}{720d^3}\right) L^2 \quad (53)$$

que é finito e independente da função 'cutoff'.

Utilizando $F(d) = -\nabla U(d)$, obtemos a força atrativa por unidade de área entre as placas como

$$F(d) = -\frac{\pi^2 hc}{240d^4}. \quad (54)$$

Esta é a força de Casimir, que se refere à mudanças no ponto zero de energia no campo eletromagnético infinito, podendo ser finita e observável.

V. O EFEITO UNRUH-DAVIES

Um átomo se movendo com velocidade constante v , através de um campo térmico, experimenta uma força de fricção $F = -Rv$, no qual R é proporcional a $\rho(\omega) - \frac{\omega}{3} \frac{d\rho}{d\omega}$. No estado de vácuo, temperatura igual à zero, temos pela equação (33) $\rho(\omega) = \rho_0(\omega) = \hbar\omega^3 / 2\pi^2 c^3$, que nos permite escrever,

$$\rho_0(\omega) - \frac{\omega}{3} \frac{d\rho_0}{d\omega} = 0 \quad (55)$$

implicando na não existência de uma força de fricção agindo sobre um átomo que se move com velocidade uniforme pelo estado de vácuo. Como consequência, um observador se movendo com velocidade constante

pelo estado de vácuo eletromagnético, não pode dizer que está em movimento. [4]

Entretanto, um observador que se move com uma aceleração *própria* constante pelo estado de vácuo, vê a si mesmo em um banho térmico com temperatura $T = \hbar a / 2\pi\kappa c$, onde a é a sua aceleração com respeito ao sistema inercial instantâneo no qual o vácuo se encontra em repouso. Este resultado foi obtido por Unruh em 1976 seguido de um resultado próximo mostrado por Davies em 1975.

I. Aceleração Uniforme

Definimos a aceleração uniforme de um observador em relação a um sistema inercial instantâneo, no qual o observador se encontra em repouso. A aceleração *própria* a é relativa a esse sistema, e se a for constante a aceleração é uniforme. A linha de mundo é uma hipérbole no plano $x-t$ com assintótica $x = ct$. [2][4]

Usando a transformação de Lorentz, podemos relacionar a aceleração *própria* a com a aceleração do sistema inercial $\frac{dv}{dt}$,

$$\frac{dv}{dt} = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}. \quad (56)$$

Prosseguindo com integrações, obtemos:

$$v(t) = at \left(1 + \frac{a^2 t^2}{c^2}\right)^{-1/2} \quad (57)$$

$$x(t) = c^2 \left\{ a \left[\left(\frac{1 + a^2 t^2}{c^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{-1}, \quad (58)$$

onde v e x são assumidos iguais à zero quando $t = 0$. Substituindo a equação (57) na relação entre o intervalo de tempo do sistema inercial e o intervalo de tempo próprio do observador:

$$\frac{dt}{d\tau} = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}, \quad (59)$$

obtemos,

$$\frac{dt}{d\tau} = \left(1 + \frac{a^2 t^2}{c^2}\right)^{1/2} \quad (60)$$

cuja integração nos leva a

$$t(\tau) = \frac{c}{a} \operatorname{senh} \frac{a\tau}{c}, \quad (61)$$

onde $t(\tau = 0) = 0$.

Substituindo a equação (61) nas equações (57)-(58), encontramos os valores de x e v no sistema inercial em termos do tempo próprio τ ,

$$x(\tau) = \frac{c^2}{a} \left[\cosh \frac{a\tau}{c} - 1 \right] \quad (62)$$

$$v(\tau) = c \tanh \frac{a\tau}{c}. \quad (63)$$

II. Campo Escalar

O efeito Unruh será demonstrado para o caso de um campo escalar sem massa $\phi(\mathbf{x}, t)$, cujo resultado é o mesmo para o campo eletromagnético, porém o primeiro é mais simples de ser demonstrado.[4]

Esse campo deve satisfazer a equação de onda $\square^2 \phi = 0$ e possuir uma densidade de energia $\frac{1}{8\pi} \left[(\nabla\phi)^2 + \frac{1}{c^2} \frac{\delta\phi^2}{\delta t} \right]$. Quando quantizado no espaço livre, possui uma forma similar à equação (27),

$$\phi(\mathbf{x}, t) = \sum_{\mathbf{k}} \left(\frac{2\pi\hbar c^2}{\omega_{\mathbf{k}} V} \right)^{1/2} \left[a_{\mathbf{k}}(t) e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} + a_{\mathbf{k}}^\dagger(t) e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}} \right], \quad (64)$$

onde novamente foi assumido as condições periódicas de contorno e $a_{\mathbf{k}}(t) = a_{\mathbf{k}}(0) e^{-i\omega_{\mathbf{k}} t}$. A Hamiltoniana é

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{8\pi} \int dx^3 \left[(\nabla\phi)^2 + \frac{1}{c^2} \frac{\delta\phi^2}{\delta t} \right] \\ &= \sum_{\mathbf{k}} \hbar\omega_{\mathbf{k}} \left(a_{\mathbf{k}}^\dagger a_{\mathbf{k}} + \frac{1}{2} \right). \end{aligned} \quad (65)$$

A princípio consideraremos a função de correlação $\langle \phi(0, t) \phi(0, t + \tau) \rangle$, em um ponto fixo no espaço, para um campo em equilíbrio térmico com temperatura T .

Nesse caso, teremos $\langle a_{\mathbf{k}}^\dagger(0) a_{\mathbf{k}'}(0) \rangle = \delta_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'}^3 \bar{n}(\omega)$, onde $\bar{n}(\omega) \equiv (e^{\hbar\omega/\kappa\tau} - 1)^{-1}$. Isso implica que modos diferentes do campo termal não são correlacionados e que a frequência modal ω possui um número médio de quanta $\bar{n}(\omega)$. Assim,

$$\begin{aligned} &\langle \phi(0, t) \phi(0, t + \tau) \rangle \\ &= \sum_{\mathbf{k}} \left(\frac{2\pi\hbar c^2}{\omega_{\mathbf{k}} V} \right) \left[\langle a_{\mathbf{k}}^\dagger(t) a_{\mathbf{k}}(t + \tau) \rangle \langle a_{\mathbf{k}}^\dagger(t) a_{\mathbf{k}}(t + \tau) \rangle \right] \\ &= \sum_{\mathbf{k}} \left(\frac{2\pi\hbar c^2}{\omega_{\mathbf{k}} V} \right) \left[(\bar{n}(\omega_{\mathbf{k}}) + 1) e^{i\omega_{\mathbf{k}}\tau} + \bar{n}(\omega_{\mathbf{k}}) e^{-i\omega_{\mathbf{k}}\tau} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\rightarrow \frac{h}{\pi c} \left[\int_0^\infty d\omega \omega e^{i\omega\tau} + 2 \int_0^\infty \frac{d\omega \omega \cos\omega\tau}{e^{h\omega/kT} - 1} \right] \\ &= -\frac{h}{\pi c} \left(\frac{\pi k T}{h} \right)^2 \operatorname{csch}^2 \left(\frac{\pi k T \tau}{h} \right). \end{aligned} \quad (66)$$

Agora vamos considerar a função de correlação $\langle \phi(y, t) \phi(y + x, t + \tau) \rangle_0$ no estado de vácuo do nosso campo escalar, onde, nesse caso $\langle a_{\mathbf{k}}(0) a_{\mathbf{k}'}(0) \rangle = \langle a_{\mathbf{k}}^\dagger(0) a_{\mathbf{k}'}(0) \rangle = 0$ e $\langle a_{\mathbf{k}}(0) a_{\mathbf{k}'}^\dagger(0) \rangle = \delta_{\mathbf{k}, \mathbf{k}'}$, pela equação (64) temos

$$\begin{aligned} \langle \phi(y, t) \phi(y + x, t + \tau) \rangle_0 &= \sum_{\mathbf{k}} \left(\frac{2\pi h c^2}{\omega_{\mathbf{k}} V} \right) e^{-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}} e^{i\omega_{\mathbf{k}} \tau} \\ &\rightarrow \frac{h c^2}{4\pi^2} \int_0^\infty d\kappa \kappa^2 \omega^{-1} e^{i\omega \tau} \int d\Omega_{\mathbf{k}} e^{-i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}} \\ &= \frac{h c}{\pi} \frac{1}{x^2 - c^2 \tau^2}. \end{aligned} \quad (67)$$

A função de correlação $\langle \phi(x_1(t_1))(x_2(t_2)) \rangle_0$, medida por um observador sofrendo uma aceleração uniforme no estado de vácuo, é dada pela equação (67), com $x = x_2 - x_1$ e $\tau = \tau_2 - \tau_1$, ou através das equações (61)-(62),

$$\tau = \frac{c}{a} \left[\operatorname{senh} \frac{a\tau_2}{c} - \operatorname{senh} \frac{a\tau_1}{c} \right] \quad (68)$$

$$x(\tau) = \frac{c^2}{a} \left[\operatorname{cosh} \frac{a\tau_2}{c} - \operatorname{cosh} \frac{a\tau_1}{c} \right]. \quad (69)$$

Assim, podemos obter o denominador da equação (67) como

$$\begin{aligned} x^2 - c^2 \tau^2 &= \frac{c^4}{a^2} \left[\operatorname{cosh} \frac{a\tau_2}{c} - \operatorname{cosh} \frac{a\tau_1}{c} \right]^2 \\ &\quad - \frac{c^4}{a^2} \left[\operatorname{senh} \frac{a\tau_2}{c} - \operatorname{senh} \frac{a\tau_1}{c} \right]^2 \\ &= -\frac{4c^4}{a^2} \operatorname{senh}^2 \frac{a(\tau_2 - \tau_1)}{2c}, \end{aligned} \quad (70)$$

tornando-a

$$\langle \phi(x_1(t_1))(x_2(t_2)) \rangle_0 = -\frac{h a^2}{4\pi c^3} \operatorname{csch}^2 \frac{a(\tau_2 - \tau_1)}{2c}, \quad (71)$$

a qual é equivalente a função de correlação do campo térmico, representado pela equação (66) com temperatura

$$T = \frac{h a}{2\pi \kappa c} \quad (72)$$

Como consequência, um detector que se move com aceleração uniforme pelo estado de vácuo responde como se estivesse num banho térmico com temperatura expressada pela equação (72).

VI. CONCLUSÃO

Na física moderna, o vácuo no sentido de espaço vazio é substituído por um estado de vácuo quântico com flutuações eletromagnéticas observáveis em diversas situações. Uma destas se deve a uma alteração nesse estado pela presença de duas placas metálicas resultando numa alteração do espectro de frequências de vibração do campo eletromagnético, no qual um valor finito pode ser extraído.

Um aspecto fortemente não-trivial de sua definição, como sendo um estado sem partículas, surge quando visto por um observador em um sistema de referencial acelerado, como em um banho térmico, tornando a ideia de estado de vácuo dependente do estado de movimento dos observadores envolvidos. Consequentemente, não é simples a definição do conceito de partícula elementar em espaços-tempos sem alguma simetria temporal, como é o caso do universo em expansão no qual vivemos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Clóvis Achy Soares Maia pela orientação no desenvolvimento deste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] Venicius M.; Farina C.; Tort A. *O Efeito Casimir*. Universidade Federal do Rio de Janeiro: Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, 2000.
- [2] Mould, R. A. *Basic Relativity*. New York: Springer-Verlag, Inc., 1994.
- [3] Greiner, W.; Reinhardt, J. *Field Quantization*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, Inc., 1996.
- [4] Milloni, P. W. *The Quantum Vacuum: An Introduction to Quantum Electrodynamics*. New Mexico: Academic Press, Inc., 1994.

A Metafísica e a Física de Aristóteles

ANTONY MARCO MOTA POLITO*

Universidade de Brasília

Resumo

Embora seja inegável que o patamar atual de desenvolvimento da ciência não tenha sido jamais igualado em qualquer período da história humana, somos herdeiros e sucessores de uma tradição ainda bastante jovem, cujos trezentos a quatrocentos anos empalidecem quando comparados aos vinte séculos de sobrevivência do sistema aristotélico. Nesse breve artigo de revisão, traçamos um esboço do que foram as vigas e os pilares desse edifício cuja destruição, pelas mãos de homens como Galileu e Descartes, foi uma das mais difíceis e profundas revoluções pelas quais o pensamento ocidental teve que passar, forjando seu caráter atual na exata medida da contraposição ao bem-sucedido sistema que forneceu um esquema quase completo de inteligibilidade dos fenômenos naturais dos universos da Antiguidade e da Idade Média.

Palavras-chave: Ontologia aristotélica, Cosmologia aristotélica, Lugar natural, Movimento natural, Movimento violento.

INTRODUÇÃO

A história da ciência ou, mais apropriadamente, do pensamento filosófico naturalista, teve início na Antiguidade grega, com os chamados filósofos Pré-Socráticos, no final do século VII a.C. Durante aproximadamente cento e cinquenta anos, personagens como Tales, Anaxímenes, Anaximandro, Heráclito, Pitágoras, Empédocles, Demócrito, entre vários outros, propuseram uma nova maneira de conceber explicações para os fenômenos natu-

rais que se, por um lado, possuía um caráter altamente especulativo, por outro, apresentava, pela primeira vez, uma tentativa de entender o universo de forma exclusivamente *racional*, mas sem apelar para elementos míticos ou religiosos¹. Os Pré-Socráticos foram responsáveis por inaugurar não apenas a investigação natural (física e ontológica), mas, também, por iniciar questionamentos de caráter *epistemológico*, ao começarem a se questionar sobre a validade do conhecimento, bem como o modo de alcançá-lo [1,2].

*Professor do Instituto de Física - IFD, Universidade de Brasília, UnB, Campus Universitário Darcy Ribeiro

¹Não é o caso de se negar que haja, nas tentativas de compreensão do universo com base em elementos míticos e religiosos, *racionalidade*, embora, certamente, de um tipo distinto daquele que os Pré-Socráticos inauguraram.

Contudo, foi com Platão (c. 428 – 347 a.C.) que a filosofia grega alcançou um patamar superior de articulação, permitindo que os aspectos físico, ontológico e epistemológico passassem a ser claramente diferenciados. Platão, entretanto, fazia uma inversão lógica no esquema de prioridades, de tal modo que o problema ontológico passou a ser preponderante com relação ao problema físico. A física de Platão passou, assim, a ser subsidiária de sua metafísica [3-5].

A metafísica platônica era bastante sofisticada. Ela atribuía ao que se convencionou chamar de mundo das *formas* (ou *ideias*) uma posição privilegiada em relação ao mundo material. As formas constituíam o verdadeiro, o real, e “habitavam” um mundo à parte, “externo” ao mundo dos fenômenos: um mundo de eternidade, excluído ao tempo e ao espaço. Os objetos do mundo físico eram concebidos como meras cópias imperfeitas das formas e, nesse sentido, eram menos reais do que elas. Para Platão, somente a razão era capaz de acessar, ou contemplar, o mundo das formas. Os sentidos humanos eram capazes apenas de fornecer subsídio para a mera *opinião* e, por isso, não permitiam exprimir nada além do meramente plausível ou provável. Seu domínio de atuação era um mundo material, onde o movimento e a mudança em geral eram sinônimos de imperfeição e corruptibilidade. Nessa ordem das coisas, o *espírito* ou *intelecto* (*nous*²), sendo o único capaz de pensar, era consi-

derado superior à matéria e ao corpo, sendo este capaz, unicamente, de *sentir*.

Do ponto de vista da investigação científica, esse tipo de visão acabou por dar preponderância aos métodos matemáticos (geométricos), no que se refere ao poder de acesso à verdade. Se, por um lado, a matemática e a ontologia passaram a ser cruciais para Platão, seu desprezo pelo mundo fenomênico refletir-se-ia em uma perspectiva que estabelecia a atividade do pensamento puro e a atitude contemplativa/reflexiva como as únicas merecedoras de dignidade intelectual. A postura ativa perante o mundo físico, ligada à sua manipulação prática, era vista como atividade de segunda categoria. Razões de natureza econômica e política, mas também cultural, ajudaram a construir essa visão. Afinal, em uma sociedade cujo modo de produção se baseava no trabalho escravo, atividades manuais e produtivas dificilmente poderiam ser valorizadas. Por outro lado, o caráter eminentemente humanista do pensamento platônico, com sua predileção por questões éticas e políticas, não poderia contribuir muito para uma visão da natureza que fosse técnica e/ou prática³

A visão cosmológica de Platão incluía muitos elementos derivados aos Pré-Socráticos, porém, em perspectivas bem inovadoras. Na obra intitulada *Timeu* [6], Platão descreveu a geração do cosmos e construiu toda a sua física. De início, postulou a existência de uma *Inteligência* ordenadora (o *De-*

²O *nous* grego era mais semelhante a uma espécie de *intuição intelectual* e, nesse sentido, distinguia-se do *logos*, cujo modo de operação era o *raciocínio discursivo*. A intuição intelectual era uma faculdade da razão que apreendia imediatamente a essência dos objetos, ou seja, seu ser e seu significado. Já a razão discursiva procedia de forma mediatizada, operando por meio de uma linguagem, guiada pela lógica. Para Platão, entretanto, ambas eram faculdades intelectuais e, nesse sentido, propriedades do espírito.

³Note que, por humanista, não se quer referir a uma visão moderna, em que *homem* é todo indivíduo da espécie humana. Para um grego antigo, homem era apenas o cidadão da *Pólis* grega, o que excluía não apenas os escravos como, potencialmente, todos os que não habitavam o universo de língua grega. Daí não haver contradição entre o humanismo platônico e a escravidão, ou entre ele e o desprezo pelas atividades manuais e artísticas.

⁴Platão desenvolveu toda a sua obra em uma linguagem sumamente peculiar, constantemente lançando mão de figuras míticas. Não é possível descartar a possibilidade de que ele ainda assumisse a literalidade de certos elementos mitológicos, muito embora frequentemente argumente-se que seu uso da alegoria tinha caráter essencialmente didático-pedagógico.

miurgo) que criara o mundo físico usando como modelos as formas preexistentes⁴. O Demiurgo atuara sobre a *matéria* e o *caos* – também preexistentes –, ambos caracterizados pela *necessidade cega* – ou seja, evoluindo mecanicamente, sem propósitos ou fim específicos –, os quais, diferentemente das formas, possuíam *extensão espacial*. Por razões de ordem matemática e apoiando-se sobre a metafísica pitagórica, Platão assimilou os quatro elementos de Empédocles – *Terra, Água, Ar e Fogo* – e os fez comparecer em seu universo em proporções definidas, gerando sua própria noção de harmonia⁵. Ele associou a cada elemento um dos cinco sólidos regulares convexos, já então conhecidos (ao dodecaedro ficaria associado o *cosmos*, como um todo). Com isso, ele reduziu as infinitas formas dos átomos de Demócrito a apenas quatro⁶. Usando o fato de que esses sólidos são decomponíveis em triângulos elementares, Platão engendrou uma complicada teoria da constituição dos corpos e chegou mesmo a dar uma explicação dos diversos estados da matéria e de suas transformações.

A forma do universo era esférica (influência pitagórica e parmenidiana [1-2]) e os seus elementos eram ordenados da periferia para o centro, segundo uma hierarquia de perfeição decrescente. Assim é que as estrelas e os planetas, considerados mais perfeitos que os objetos terrenos, passaram a ser considerados como feitos do elemento *fogo*, tendo sido posicionados na periferia. Essa característica de perfeição da esfera celeste era representada por suas órbitas *circulares* e era compatível com seu tratamento matemático mais simples. De fato, não

é de surpreender que a física tenha começado como astronomia. Em comparação com os fenômenos e os movimentos que são observados na Terra, os fenômenos celestes e a movimentação das estrelas e dos planetas são bem mais simples e regulares⁷.

I. O UNIVERSO ARISTOTÉLICO

Se Platão representou, para a ciência nascente da Revolução Científica, uma fonte de inspiração – ainda que não tanto pela sua física, mas, principalmente, pela sua metafísica, sua epistemologia e pelo privilégio conferido à matemática –, Aristóteles seria – de certo modo, injustamente – considerado um de seus maiores obstáculos. A injustiça para com Aristóteles é dúplice. Por um lado, se sua cosmologia imperou por quase dois milênios, isso se deveu – pelo menos no que se refere aos últimos quatro séculos da Idade Média – aos interesses teológicos e políticos da então todo-poderosa Igreja Católica [7]. Por outro lado, a acusação de impedir o desenvolvimento da ciência moderna não faz exatamente justiça à grandeza intelectual de sua obra, considerada como tendo sido, de fato, o primeiro sistema completo de explicação da natureza. O sistema aristotélico fornecia explicações profundas e (relativamente) coerentes do universo físico de sua época, além de prover os fundamentos da lógica e da ontologia que se tornaram também pilares fundamentais sobre os quais a ciência pôde, posteriormente, se apoiar. A maioria de suas contribuições, nesses dois campos, permanece válida

⁵ Agora, puramente matemática e não musical, como nos pitagóricos. A noção de harmonia era fundamental no cosmos platônico e prosperaria também entre os neoplatônicos. Esteve eclipsada pelo aristotelismo por quase dez séculos, mas retornaria com força surpreendente no Renascimento, vindo a desempenhar um papel crucial durante a Revolução Científica, principalmente com Copérnico, Bruno e Kepler [1].

⁶ Apesar da incorporação dos átomos de Demócrito, o universo de Platão não possuía espaços vazios: o espaço era todo ele preenchido pela matéria-prima que seria modelada pelo Demiurgo, ou antes, era considerado idêntico a ela.

⁷ Na verdade, os movimentos dos planetas não são tão simples assim. No tempo de Platão, essas dificuldades já eram bem conhecidas. Entretanto, ele criou soluções metafísicas para lidar com algumas delas (mas não com todas), as quais, em razão de sua artificialidade, perderam o interesse para os não especialistas [3].

até hoje [3,8].

Aristóteles (c. 384 – 322 a.C.) foi discípulo de Platão, mas suas filosofias têm diferenças radicais, de modo que parecem ser opostas em praticamente tudo. A verdade, no entanto, é que o pensamento platônico foi, em grande parte, assimilado para, em seguida, ser transformado por Aristóteles. No entanto, ao contrário de meramente se posicionar contra os pontos centrais da metafísica platônica, em quase todos os aspectos Aristóteles o fez de forma a ir muito além de Platão. De fato, Aristóteles foi capaz de suprir os métodos, a linguagem e os conceitos pelos quais boa parte da ciência de seu próprio tempo passaria a se expressar e que, por fim, permitiriam à ciência dos tempos modernos superá-lo.

Aristóteles abandonou não só a linguagem platônica, fortemente carregada de figuras míticas, mas, também, a própria componente místico-religiosa que caracterizava grande parte do pensamento platônico. Desafortunadamente, ele abandonou também o interesse pela matemática, a qual Platão havia transformado em uma ciência voltada menos para o tratamento dos fenômenos naturais do que para o desenvolvimento de especulações sobre harmonias metafísicas no universo. No lugar da matemática, entretanto, privilegiou a observação empírica⁸. Essa atitude era coerente com o seu processo de desconstrução do mundo das *formas* de Platão, porém, acabou por implicar a construção de uma ciência preponderantemente qualitativa.

⁸Aristóteles distinguiu as ciências em três grandes ramos: as ciências que buscam o saber em si mesmo (ciências teóricas), as ciências que buscam o saber para alcançar a perfeição moral (ciências práticas) e as ciências que buscam o saber com objetivos produtivos (ciências poéticas). A matemática, juntamente com a física e a metafísica, integrava o grupo das ciências teóricas, as que possuíam a dignidade mais elevada. Porém, a matemática, sendo a ciência do número e da forma geométrica, era concebida por Aristóteles como uma ciência cujo objeto era já um produto de um processo de *abstração* operado sobre o mundo concreto das entidades físicas. Isso significa que, ao contrário de Platão, que considerava os objetos matemáticos como *formas*, com realidade independente, Aristóteles os considerava como *entes de razão*, existindo *potencialmente*, nas coisas sensíveis, e em *ato*, apenas em nossas mentes.

⁹A qual não tinha esse nome, evidentemente. Todos os ramos do conhecimento eram apenas *física*. A ideia de biologia como uma ciência específica, com um objeto de estudo definido e separado dos demais, evidentemente, não existia. Porém, isso não significa que o mundo vivo não fosse considerado especial, quando comparado com o restante do mundo físico.

Desse modo, ele fortaleceu as ciências empíricas, passando a fazer grandes sistematizações de todos os tipos de fatos que observava no mundo natural. Essas sistematizações e compilações, feitas no seu próprio tempo, mas continuadas por seus discípulos (como Teofrasto) na escola que ele havia fundado (o Liceu), constituiriam os germes de diversas ciências particulares e ajudariam a fundar o que viria a ser conhecido posteriormente por *história natural* (zoologia, botânica, geologia, etc.). Nesse processo, deu relativa preponderância à biologia⁹ – a qual passou a desempenhar um papel estruturante, em sua filosofia, similar ao que a matemática havia desempenhado, na filosofia platônica. Assim, é importante perceber como Aristóteles modelou a natureza física através de sua compreensão da natureza viva. Isso ficará claro quando abordarmos suas noções de *ato* e *potência*, de *movimentos naturais* e, principalmente, de *causa final*, todas utilizadas na construção de sua teoria geral do movimento. Aristóteles desenvolveu, igualmente, a lógica e a teoria da linguagem que, juntamente com sua perspectiva “biologizante”, constituíram os pilares do processo de reconstrução da noção de *forma* e de sua nova posição no esquema da natureza.

É curioso e importante notar que a retomada do pensamento pitagórico-platônico, na Idade Moderna, representou um passo decisivo para o surgimento da física como a ciência que hoje conhecemos. Esse passo permitiu que a matemática substituísse a lógica aristotélica como *linguagem*

dentro da qual os conceitos da ciência nascente viriam a ser articulados. Porém, em contraponto, a paulatina orientação do pensamento antigo e medieval no sentido da *empíria* – em maior conformidade com o legado do pensamento aristotélico –, também cumpriu papel relevante no amadurecimento do que viria a se tornar o verdadeiro *método experimental*, sobre o qual a ciência iria, finalmente, assentar-se.

I. A Metafísica de Aristóteles

A física e a metafísica de Aristóteles são intimamente conectadas, e é, virtualmente, impossível compreender a primeira sem compreender a segunda [3,9,10]. A rigor, é sempre impossível falar sobre a estrutura das leis e princípios de qualquer ciência particular sem antes estabelecer a sua *metafísica*. Isso porque é a metafísica que se encarrega, essencialmente, de fixar as *categorias* de objetos sobre os quais uma ciência particular se debruça e que constituem seu âmbito de estudo. Isso quer dizer que a metafísica define uma *ontologia*, ou o conjunto das entidades sobre as quais versa certo tipo de discurso teórico, no caso, o científico. No contexto científico contemporâneo, tal conjunto costuma estar praticamente fixado, em virtude de amplo trabalho prévio. Por exemplo, sabemos que, dentro da ciência do eletromagnetismo, o discurso teórico se fará em torno de entidades como correntes elétricas, distribuições de carga elétrica, campos elétricos, campos magnéticos, etc. Não era esse o caso no tempo de Aristóteles, pois todo o universo

dos entes e objetos do discurso científico ainda carecia de definição e ordenação. De modo que, se não havia uma física construída, tampouco havia uma metafísica ou, mais propriamente, uma ontologia prévia, a qual se referir. Portanto, juntamente com as leis que regem os fenômenos naturais, Aristóteles precisava estabelecer os tipos de objetos que estariam submetidos àquelas leis, fixando também uma *terminologia* e uma *classificação* para eles, além de suas propriedades.

Esse entendimento é, em larga medida, moderno. Aristóteles não se expressava exatamente nesses termos. Para ele, *metafísica* era aquela dentre as ciências *teóricas* que indagava pelas *causas e princípios primeiros*¹⁰, sendo, por isso mesmo, a mais importante de todas. A noção de *causa*, portanto, assumia papel central. No que se referia ao mundo natural, eram quatro as causas. Eram elas que definiam as condições de inteligibilidade da constituição e da transformação dos objetos físicos. As duas primeiras procuravam explicar a realidade quando considerada *estaticamente*. A primeira delas era a *causa material*: o substrato do qual as coisas eram feitas. Esse substrato era, originalmente, uma *matéria primeira (hylé)*, completamente destituída de *determinações*. As determinações eram dadas pela segunda delas, a *causa formal*, que constituía aquilo que fazia de uma coisa o que ela era, em contraposição a todas as demais. Assim, por exemplo, em uma cadeira – uma cadeira específica, não uma cadeira em geral –, a madeira que a constitui é sua causa material¹¹, mas o fato de que possui uma configuração geométrica específica (uma figura, conformação, desenho), feita

¹⁰Definições suplementares dadas por Aristóteles incluíam a metafísica como indagando o *Ser enquanto Ser*, indagando pela *substância* e indagando sobre *Deus* e a *substância supra-sensível*. Em todas elas, o relevante é o significado de algo que está para além do puramente material, seja no sentido de algo espiritual e inteligível, seja no sentido de algo conceitualmente anterior a toda determinação do universo fenomênico.

¹¹Veremos, mais abaixo, que as determinações dadas pelas causas formais são cumulativas. As primeiras determinações da matéria primeira são aquelas que permitem formar os quatro elementos fundamentais: Terra, Ar, Água e Fogo. Na sequência, *formas substanciais* adicionais determinam matérias compostas por esses quatro elementos, como, no caso da cadeira, a madeira.

para sentar, responde pela sua causa formal¹². As duas outras noções de causa são mais próximas daquilo a que costumamos nos referir quando usamos esse termo. Elas procuravam explicar a realidade quando considerada *dinamicamente*, em seu processo de mudança e transformação. A primeira delas era a *causa eficiente*, que identificava, no processo de transformação, o agente responsável. A segunda era a *causa final*, que identificava o objetivo em função do qual uma mudança havia acontecido. No caso da cadeira, sua causa eficiente podia ser entendida como sendo o trabalho do artesão que a produziu. Sua causa final é o fim para o qual foi produzida, ou seja, para alguém sentar-se. Note que a causa final *dirige* o processo de transformação da madeira em uma cadeira.

De todas as noções de causa, apenas a noção de causa eficiente continuou a ser utilizada no contexto da física moderna¹³. A substituição da metafísica aristotélica por uma *metafísica mecanicista*, durante a Revolução Científica – sobretudo, pelas mãos de Descartes –, tornou obsoleta a noção de causa formal, e trivial a noção de causa material. E, o que é o mais importante, considerou completamente inútil a noção de causa final, quando não de todo errônea¹⁴ [11].

Estando preocupado com o problema de como *expressar* a realidade, Aristóteles elencou as modalidades possíveis de um discurso sobre tudo o que existe, ou seja, sobre todos os *significados* do

Ser: a) o Ser como *categorias*, b) o Ser como *ato e potência*, c) o Ser como *acidente* e d) o Ser como *verdadeiro*. O Ser como *acidente* dava conta das manifestações do que era fortuito e casual e que, por isso, não se referia à essência das coisas. Desse tipo de Ser não podia haver ciência, pois o acidental não satisfazia a nenhum critério de universalidade e necessidade. O Ser como *verdadeiro* se referia à adequação entre o *discurso* sobre o Ser e a *realidade* do Ser, sendo, portanto, do âmbito da lógica.

Mais relevantes para a física aristotélica são as duas primeiras modalidades. O Ser como *categorias* dizia respeito aos supremos gêneros, ou *modos*, do Ser. Esses modos são exauridos pela tábua das categorias, composta de dez elementos: *substância*, *qualidade* (aspectos como cor, textura, brilho, sabor, temperatura – se é “quente” ou “frio” –, umidade – se é “seco” ou “úmido”-, etc.), *quantidade* (a extensão, o tamanho ou o número), *relação* (situação ou ordenação com relação às demais substâncias), *ação* (o modo como age sobre outras substâncias), *paixão* (o modo como sofre a ação), *lugar*, *tempo*, *estado* (o resultado final após ter agido) e *hábito* (circunstância ou resultado após ter sofrido a ação). Todas as nove últimas categorias são *predicamentos* ou *atributos* do Ser, ou seja, correspondem às determinações (*formas*, em geral) que permitem expressar exaustivamente tudo o que pode ser dito sobre a primeira delas, a *substância*, com exceção da sua *essência* ou *forma substancial*.

¹²Afinal, sem aquele desenho específico, outro objeto, construído com a mesma madeira, dificilmente poderia ser chamado de cadeira. Logo, é uma “forma” que permita alguém sentar-se que faz da cadeira o que ela é, *essencialmente*. Entretanto, é preciso tomar cuidado, pois a causa formal aristotélica não é uma forma geométrica, embora formas geométricas possam fazer parte de *causas* formais.

¹³Embora sem o qualificativo “eficiente”. A rigor, a noção de causalidade passou por várias e profundas transformações ao longo da história da ciência e hoje está relegada a um papel um tanto secundário, em razão de seu conteúdo ter sido articulado em função de outros conceitos, como o de *força*, por exemplo. É interessante observar, entretanto, que uma vertente filosófica inteira procurou expurgar a ciência da noção *metafísica* de *causa*, por considerá-la inútil ou pior, ininteligível. Essa vertente teve no filósofo David Hume (1711-1776) um de seus principais inspiradores.

¹⁴Inútil no sentido de que é claro que se pode continuar dizendo que a cadeira foi feita para sentar, mas isso passou a não ser mais do interesse da física. Mais importante é tê-la considerada errônea: não se aceita, em ciência moderna, nenhuma explicação científica que apele para fins ou propósitos, ainda que o assunto seja, ainda, um tanto controverso.

As substâncias, por sua vez, são as coisas que compõem o universo, seja no sentido concreto (*substâncias primeiras*), seja no sentido lógico de *gênero e espécie* (*substâncias segundas*)¹⁵. São, assim, os *sujeitos* dos quais se fala alguma coisa, como, por exemplo, a cadeira individual na qual estou sentado (substância primeira), ou as cadeiras em geral (substâncias segundas), tanto como cadeiras desse tipo (espécie) como quanto objetos em geral usados para sentar (gênero). Assim, podemos falar de uma cadeira, em particular, como sendo branca (qualidade), como tendo 70 cm de altura (quantidade), como ocupando uma porção específica da sala (lugar)¹⁶, agora (tempo), e assim por diante. Note-se a profunda conexão com a estrutura gramatical da linguagem, embora a relação entre as categorias do Ser e as categorias gramaticais não seja, obviamente, perfeita.

A formulação aristotélica do conceito de subs-

tância foi uma clara superação das noções dos Pré-Socráticos – para os quais a substância era um elemento material¹⁷ – e do conceito platônico, no qual a substância era uma *ideia* (ou seja, uma *forma*). Para Aristóteles, as substâncias (primeiras) são sempre *sínolos* (sínteses indissolúveis) de *matéria e forma*. Nesse sentido, a substância é sempre uma coisa concreta, e, a rigor, apenas as coisas concretas *existem na realidade*. A matéria, embora seja essencial para a substância (pois é princípio constitutivo), é mera potencialidade indeterminada (veremos abaixo o que isso significa em termos dos conceitos de *ato e potência*). Da mesma maneira, a forma, embora seja essencial (pois é princípio formal, ou seja, que define), só existe enquanto determinação da matéria e, portanto, não tem existência independente¹⁸.

Com isso chegamos às noções de *ato e potência*. Enquanto as categorias podem ser vistas como

¹⁵Note-se que a tábua das categorias pretende exaurir todos os tipos de *formas* que estabelecem as *determinações* da matéria. Diferentemente das demais, a *forma substancial* é quem, de fato, *define* o que um ser concreto é, não tanto como indivíduo, mas, principalmente, como parte de um gênero. É lícito interpretar as formas substanciais, portanto, como definidoras das substâncias segundas, pelo menos no que se refere aos objetos naturais. Todas as demais formas contribuem, portanto, para a identificação de um indivíduo particular, de modo que sua *acumulação* com uma forma substancial permite definir completamente um ser particular. Entretanto, essas definições de substância primeira e substância segunda devem ser consideradas, aqui, apenas para fins *didáticos*, embora seja praticamente o que se desprende da obra *Categorias*. Quando Aristóteles, na obra *Metafísica*, volta a se expressar sobre as prioridades ontológicas, ele defende que as *formas substanciais* são “seres por excelência”, logo, elas é que deveriam ser consideradas as “substâncias primeiras”. Essas sutilezas são irrelevantes para a maior parte do que se segue. Uma dificuldade adicional, apresentada por essa teoria das substâncias, aparece quando se pergunta o que mais uma forma substancial acrescenta ao conjunto de todos os atributos de um ser particular, uma vez que esses parecem cumprir completamente o papel de individualização e, portanto, nesse sentido, de definição da essência. Essa discussão é controversa, mas podemos dizer que Aristóteles era completamente *realista e não-reducionista* a respeito das formas substanciais, e não aceitava concebê-las como meras coleções de atributos. Desse ponto de vista, as formas substanciais são o “que dá um sentido global e completo” a uma determinada coleção específica de atributos. Isso claramente estabelece a pressuposição de que o *todo* não é redutível à soma de suas partes.

¹⁶Na verdade, o *lugar* foi definido como sendo a *superfície externa* (imóvel, em relação ao todo do universo) que *delimita* o espaço (volume) ocupado por um corpo.

¹⁷Embora nem sempre. Há muitas variações entre os Pré-Socráticos. Aristóteles tinha conhecimento disso, pois fez comentários de todos eles, para melhor os refutar. Como vimos acima, o Ser, para Heráclito e para Pitágoras, não era apenas matéria, mas também princípio de inteligibilidade.

¹⁸Estamos, novamente, simplificando propositalmente a metafísica aristotélica, nesse ponto. Como já dissemos, Aristóteles, de fato, concedia uma prioridade ontológica à noção de *forma* e, em particular, às *formas substanciais*, que representavam a “definição” da *essência* das substâncias. Além disso, ele concebeu a possibilidade de algumas *formas* existirem sem *matéria*. Nesse caso, ela representaria uma pura *atualidade* (*ato* puro), desprovida de qualquer *potencialidade*. Esse era o caso de Deus - *o primeiro motor imóvel* - e das *inteligências celestes* - responsáveis pelo movimento dos planetas.

um corte “transversal” do discurso sobre o Ser, as noções de ato e potência são uma “dimensão extra” que permite desdobrar o Ser “longitudinalmente”, segundo o plano do devir, ou seja, da transformação, perpassando todas as categorias. Nesse sentido, incorporam o *tempo* não como categoria – o qual representaria um referencial estático, como um ponto numa reta já previamente dada –, mas como elemento dinâmico, no sentido da descrição do fluxo da mudança, e revelam uma filiação íntima para com a noção de desenvolvimento orgânico, modelado pela observação do desenvolvimento dos seres vivos (morfogênese).

Uma coisa é “em ato” quando está “realizada” (já é *real*), ou seja, concretizada ou, um pouco circularmente, *atualizada*. Uma coisa é “em potência” quando tem o poder de se “atualizar”, ou seja, de se *realizar* (tornar-se *real*), pela aquisição ou perda de alguma *forma*. Nesse sentido, toda *mudança* é sempre a *atualização* de alguma *forma* que existe *potencialmente* nas coisas, antes da mudança completar-se. Assim, num exemplo que se tornou clássico, uma semente é árvore, em potência. A árvore é o resultado do processo de (infinitas) atualizações pelas quais a semente passa. É dessa maneira que se pode dizer que a *matéria primeira* é *potência pura*, pois é capaz de receber qualquer forma e só se atualiza quando a recebe. Já as formas se configuram como ato ou concretização das potencialidades da matéria. Assim, seres imateriais só podem ser *ato puro*, privados de qualquer potencialidade. Para Aristóteles, uma vez que atualizar-se é o objetivo de qualquer potencialidade, o ato tem prioridade sobre a potência e é considerado ontologicamente superior. Esse é o caso de *Deus*, que Aristóteles identificará como sendo o *Primeiro Motor Imóvel* (ou seja, respon-

sável pelo movimento, mas que não é afetado por aquilo que ele move). A substância, ou *sinolo* de matéria e forma é, por outro lado, sempre um misto de ato e potência. Veremos que as noções de ato e potência, assim como as categorias, são elementos fundamentais que não só fornecem os termos nos quais a física aristotélica se expressa, mas, principalmente, permitem fazer dela uma construção coerente e inteligível¹⁹.

II. A Física de Aristóteles

A segunda ciência *teorética* em dignidade e valor era, para Aristóteles, a física, ou “filosofia segunda”. Seu objetivo era a investigação da *substância sensível*, cuja caracterização intrínseca era dada pelo *movimento*, ou *mudança*, em sentido genérico.

Para Aristóteles, o movimento devia ser analisado em termos das noções de ato e potência: movimento é a passagem da potência ao ato, ou dito de outra maneira, corresponde sempre à atualização de uma *forma*. Contudo, como potência e ato dizem respeito a todas as categorias, é possível deduzir delas vários tipos de mudança. Em especial, podemos considerar os seguintes tipos: (i) mudança segundo a substância (a “geração” e a “corrupção”), de acordo com a qual uma substância se torna ou deixa de ser o que é, ou seja, correspondendo à atualização de alguma forma substancial; (ii) mudança segundo a qualidade (a “alteração”), correspondendo à aquisição de alguma forma “qualitativa” como, por exemplo, uma mudança de coloração; (iii) mudança segundo a quantidade (o “aumento” ou a “diminuição”); (iv) mudança segundo o lugar (a “locomoção”), ou movimento propria-

¹⁹A física aristotélica compreendia toda a natureza, incluídos, aí, os seres vivos e o próprio homem. Nesse sentido, é interessante observar que tanto as partes consideradas “vivas” quanto a parte considerada “mental” do universo eram representadas pela postulação de diversas *enteléquias* - as almas *vegetativa*, *sensitiva* e *racional*, possuídas, respectiva e cumulativamente, pelas plantas, animais e seres humanos -, as quais constituíam as *formas substanciais* associadas com os seres vivos.

mente dito, correspondendo à atualização de uma “forma de lugar” que poderá ser ou não, como veremos a seguir, um *lugar natural*. Os três últimos tipos de mudança foram agrupados por Aristóteles sob o nome de *kinesis*. Elas supõem uma substância que permanece a mesma, enquanto seus atributos sofrem mutação.

Uma das preocupações fundamentais de Aristóteles, ao desenvolver a sua física, era mostrar que o movimento não era uma ilusão, como defendia a escola eleática de Parmênides e Zenão. Ao estabelecer as categorias e definir tipos diversos de movimento, Aristóteles resolveu esse problema. Ele conseguiu explicar como a mudança pode acontecer ainda que o Ser (a substância) permaneça imutável, desfazendo o paradoxo eleático. Porém, ainda mais profundamente, Aristóteles também procurou mostrar que o movimento, em si mesmo, não era um mero atributo da substância, mas constituía uma realidade independente, pois o movimento foi entendido como sendo a própria *potencialidade em ato*²⁰. Essa visão contribuiu para solidificar as noções antiga e medieval de movimento (e repouso) como correspondendo a um processo *absoluto*, em contraposição à visão que, mais tarde, ao longo da Revolução Científica, negaria ao movimento esse status e concebê-lo-ia como relativo²¹.

Uma vez demonstrada a realidade do movimento, o sistema geral da física aristotélica podia ser construído. Já vimos como Platão incluiu em

sua cosmovisão um elemento de inteligência divina, responsável pelo ordenamento do caos e pela criação do mundo. Aristóteles tinha assimilado muitos dos elementos da cosmologia platônica, mas alterou outros de modo a torná-los coerentes com a sua metafísica. Um dos elementos assimilados foi o elemento *teleológico*²². Moldando sua visão segundo um esquema *finalístico*, ele concebeu a natureza por analogia com um organismo vivo, em nítida contraposição à visão mecanicista dos Atomistas (ou mesmo à visão geométrica de Platão). Assim, contra a necessidade cega de átomos em movimento no espaço vazio, Aristóteles construiu uma visão orgânica do mundo. Essa visão engendrou uma teoria que incluía o propósito, ou causa final, como seu elemento irreduzível e fundamental. Como sempre, a causa final também era descrita como atualização de alguma potência. Essa visão orgânica levou Aristóteles a postular²³ que todos os corpos da natureza, animados ou inanimados, podiam apresentar dois, e apenas dois, tipos de movimento: ou *movimentos naturais* ou *movimentos violentos* (forçados)²⁴.

Esses postulados podem ser entendidos, segundo uma visão epistemológica moderna, como um tipo específico de generalização indutiva realizada a partir de dados observacionais (fenomênicos), mais conhecida como *inferência para a melhor explicação*. Contudo, é interessante observar como a metafísica de fundo – ato e potência,

²⁰Ou seja, o movimento é a atualização da potência como potência. Parece que, com isso, Aristóteles procurou superar a ideia de um movimento divisível em partes estanques – o mesmo que ele fez, na sua obra *Física*, ao criticar Zenão pela noção de tempo como instante –, passando a definir tempo como intervalo (o número do movimento segundo o antes e o depois) [12,10]. (O autor agradece ao revisor por chamar atenção para esse ponto.)

²¹Embora, com Newton, o conceito de movimento absoluto tenha voltado a ser solidamente defendido [11]. Contudo, é importante salientar que, na própria *Física*, Aristóteles construiu uma noção de movimento relativo. (O autor agradece ao revisor por chamar atenção para esse último ponto.)

²²De *télos*, em grego, que significa fim, meta, objetivo.

²³A apresentação feita aqui não corresponde à sequência real dos argumentos aristotélicos, sendo antes uma “reconstrução racional”.

²⁴Claramente, um mesmo corpo podia apresentar ora movimento natural, ora violento.

²⁵Ou melhor, sem ir contra a evidência sensorial de senso comum, à disposição dos gregos antigos. É claro que o aprofunda-

causalidade final – conduziu a formulação dos postulados sem ir contra (quase) nenhuma evidência sensorial²⁵. Isso não apenas ilustra a complexidade das inter-relações entre ontologia e física, com suas múltiplas influências recíprocas, como também ilustra o fato de que, muito embora não se possa reconhecer no elemento empírico um *fundamento* para as teorias científicas, ele certamente é o seu mais importante *balizador*.

Os movimentos violentos (ou forçados) eram sempre resultado da ação de contato de outros corpos e correspondiam à atualização de alguma forma que o corpo que age (o “movente”) imprimia sobre o que era movido. Como a própria definição deixa claro, esses movimentos não eram concebidos como naturais. Eles possuíam uma dinâmica peculiar e, geralmente, não eram vistos como passíveis de estudo sistemático, dada a sua potencialmente infinita variedade²⁶. Assim, na circunstância de inexistir a ação direta de um corpo sobre outro, ou seja, na ausência de movimento violento, três coisas podiam acontecer: ou movimento natural, ou repouso natural, ou repouso violento. O repouso violento (ou forçado) é ilustrado pela situação de uma pedra que é sustentada pelos braços de um homem. Para entender melhor porque essa situação devia ser concebida como repouso violento, precisamos discorrer, agora, sobre a categoria principal: a dos movimentos naturais (e do repouso natural, por extensão).

Os movimentos naturais eram observados diretamente nas coisas animadas, aquelas que se movem por si mesmas, cujos protótipos são os seres

vivos em geral. Todo movimento *natural* era entendido como a expressão mais pura da natureza específica do objeto que se move. Esse movimento é totalmente *finalístico*, sendo, portanto, guiado por algum propósito. Porém, havia também o caso de coisas inanimadas que, embora não tivessem em si mesmas um princípio de autonomia, pareciam mover-se naturalmente para certos lugares, sem o concurso de nenhuma ação externa visível. Aristóteles denominou esses corpos de *leves* e *pesados*, em conformidade com o tipo de movimento que exibiam: o movimento natural dos leves era para cima, o dos pesados, para baixo, ambos sempre radiais e, portanto, retilíneos. Implícita a essa definição está a suposição de um universo com um centro absolutamente bem definido. Dito de outro modo, era da natureza dos pesados procurarem atualizar um lugar natural mais próximo do centro do universo, enquanto era da natureza dos leves procurarem atualizar um lugar natural mais próximo de sua periferia. Note-se, portanto, que a observação de uma vasta gama de fenômenos naturais em um ambiente (superfície da Terra) que hoje sabemos ser dominado pela gravidade e, mais sutilmente, pelos fenômenos atmosféricos, impunha uma diferenciação qualitativa crucial com respeito ao tipo de movimento. A noção de força gravitacional, ou mesmo de qualquer força que não fosse o resultado direto da ação por contato (das ações de puxar, ou empurrar), não existia. Assim, o movimento de queda (ou ascensão) dos objetos, sob a ação da gravidade (e da atmosfera), era visto como movimento natural (não forçado), resultado da atualização da

mento do estudo da natureza iria mostrar algumas graves deficiências da visão aristotélica, e o acúmulo dessas deficiências iria, por fim, implicar sua derrocada final.

²⁶Curiosamente, essa visão era consistente com a ideia geral da ciência grega de que o estudo da natureza só fazia sentido se fosse feito por meio de observação passiva, sem interferência direta nos fenômenos. Afinal, qualquer interferência significaria destruir o movimento natural, que era o principal objetivo da teorização. Isso explica o privilégio que Aristóteles deu ao estudo dos animais (dotados de movimento natural), bem como sua teoria dos movimentos naturais dos corpos em queda (ou ascensão, na atmosfera). Entretanto, a ciência da mecânica, fortemente baseada na investigação do funcionamento de máquinas simples, cujo estudo exigia manipulação direta, desenvolveu-se já no tempo de Aristóteles, assumindo muito de seus princípios, mas, em vários pontos, indo além deles.

potência de um corpo para ocupar o que Aristóteles definiu como sendo o seu *lugar natural* no universo. A noção de *lugar natural* cumpria, portanto, um papel crucial na física aristotélica.

Assimilando as quatro substâncias elementares, tradicionais na filosofia grega desde Empédocles, como também boa parte da concepção platônica descrita no *Timeu*, Aristóteles conferiu, a cada um desses elementos, um lugar natural no universo. Como vimos, a ontologia aristotélica assumia que todos os corpos materiais (substâncias) eram formados por um *sínolo* de *matéria* e de uma *forma substancial*. A matéria específica da qual era formada cada substância, entretanto, era, por sua vez, formada de uma também específica composição dos quatro elementos: Terra, Ar, Fogo e Água. Cada uma dessas substâncias elementares tinha sua própria forma substancial, que combinava as *qualidades básicas* e *contrárias* representadas pelo *quente*, pelo *frio*, pelo *úmido* e pelo *seco*. Assim, a Terra era fria e seca; o Ar, quente e úmido; o Fogo, quente e seco; a Água, fria e úmida. A *matéria primeira* (*hylé*), da qual todos os quatro elementos são formados, era, como vimos, a matéria desprovida de qualquer determinação, ou seja, sem nenhuma forma substancial.

Diferentemente de Platão, Aristóteles não posicionou os quatro elementos segundo um esquema derivado de considerações matemáticas, mas sim em função de suas concepções físicas, boa parte delas obtidas por meio da observação. Assim, o elemento Terra, sendo o mais “pesado”²⁷, tinha no centro do universo seu lugar natural. Os elementos Água, Ar e Fogo ocupavam, sucessivamente,

esferas concêntricas. Com a noção de lugar natural, os conceitos de movimento e repouso naturais podiam ser articulados. A “leveza” do Fogo e do Ar fazia com que eles tivessem o movimento natural de ascender. Todos os corpos (não celestes) eram, contudo, sempre constituídos de uma mistura dos quatro elementos, e seus movimentos naturais eram, consistentemente, uma expressão dessa composição. Uma vez alcançado seu lugar natural, o objeto entrava em repouso: *repouso natural*. Assim, o estado de repouso era considerado *absoluto*: era a atualização final de uma potencialidade. Desse modo, a remoção de um corpo de seu estado de repouso natural só era possível por meio de um movimento violento.

A concepção de espaço na física aristotélica era, portanto, bastante distinta da que temos na física contemporânea²⁸. Modernamente, diríamos que o espaço não era *homogêneo*, embora fosse *isotrópico*. Amalgamada como era essa concepção de espaço com a própria noção de gravidade, era como se o espaço conferisse, absolutamente, propensões aos objetos nele postos para se moverem de determinado modo. Porém, essa é uma interpretação do ponto de vista moderno. Do ponto de vista de Aristóteles, eram as coisas mesmas que possuíam as potencialidades para alcançar seus lugares naturais no universo, atualizando-as. Essa concepção de espaço articulava-se com outro elemento que Aristóteles assimilou de Platão: a de um universo plenamente ocupado. Os Atomistas haviam defendido o espaço vazio como condição necessária para que o movimento, ou mudança de lugar, pudesse ocorrer. Aristóteles, negando veementemente

²⁷ Assim como os demais elementos, o elemento *Terra* era concebido como um elemento “puro”. A terra propriamente dita deveria ser uma combinação específica de todos os quatro elementos com, presumivelmente, maior parcela do próprio elemento *Terra*.

²⁸ Quanto ao *tempo*, entretanto, Aristóteles o definiria em termos que soam bastante modernos, ao afirmar que “tempo é o número do movimento, segundo o antes e o depois”. Isso significa que o tempo é o intervalo entre dois instantes (o antes e o depois), ou seja, uma quantidade *especializada*, o que permitiu a ele definir velocidade como a razão entre duas grandezas “sincrônicas”, ou seja, de mesma natureza, o que era mais adequado à concepção matemática grega [3-5,10,12].

a possibilidade do espaço vazio, defendia que o movimento podia ocorrer mesmo em um *plenum* material, bastando, para isso, que os corpos dessem *lugar* simultaneamente uns aos outros, como no movimento no interior de um fluido. E, como dissemos acima, uma vez alcançado seu lugar natural, apenas a ação de uma força (de contato) poderia fazer um objeto entrar novamente em movimento. Aristóteles tinha um argumento bastante sofisticado para defender essa conclusão. Se houvesse o vazio, não haveria nenhum motivo para que um objeto, uma vez posto em movimento, viesse a parar em qualquer “lugar” específico do espaço vazio, haja vista serem todos esses “lugares” indistintos. Portanto, em um espaço vazio, um objeto não pararia nunca. Ou, dito de outro modo, em um espaço vazio não haveria movimento natural. Porém, isso, sendo impossível, demonstra que o espaço vazio não poderia existir. Aristóteles estava, assim, expressando, só que com o objetivo de negar, o que seria, séculos depois – com Galileu e, mais propriamente, Descartes –, concebido como o *princípio de inércia* ou, ainda mais propriamente, de *conservação da quantidade de movimento*. Note-se que, igualmente, ele conseguiu perceber que a base para o estabelecimento dessa conclusão era um princípio de simetria: de fato, é a homogeneidade do espaço vazio que garante o que hoje chamamos de *princípio de conservação da quantidade de movimento*.

Outra consequência deduzida da postulação de movimentos naturais (e, portanto, da existência de lugares naturais) era a concepção que Aristóteles tinha de um universo finito. Ele, contrariamente a

seus predecessores, não podia conceber o *infinito atual* (real, completado), apenas o infinito potencial²⁹. Afinal, para um infinito ser atual, deveria ser substancial e, portanto, um corpo. Um corpo infinito não pode ter lugar natural. Logo, ele não pode existir. O universo, portanto, tinha que ser finito. Em um universo finito, o movimento perpétuo em linha reta é, obviamente, impossível. A evidência observacional impunha a Aristóteles o fato de que os astros possuam um movimento perpétuo que, diferentemente dos movimentos naturais retilíneos dos corpos terrestres, parecia sempre retornar ao mesmo lugar. Por outro lado, a figura geométrica mais simples que, adicionalmente, encarnava as ideias de imutabilidade e eternidade, era o círculo. Assim, apelando para um critério de simplicidade, Aristóteles assimilou mais um elemento platônico³⁰ e conferiu ao círculo papel proeminente em seu universo como sendo a descrição matemática da trajetória dos astros. A implicação imediata desse fato foi a divisão do universo em duas partes distintas.

A primeira parte era o *mundo sublunar*, constituído pelos corpos terrestres, compostos pelas quatro substâncias elementares, com a Terra, imóvel, ocupando seu centro. Era o lugar da mudança e da transformação, da geração e da corrupção e dos movimentos naturais retilíneos, para cima ou para baixo, ou seja, radialmente dirigidos para o centro, ou para fora dele. A segunda parte era o *mundo supralunar* ou celeste. Nenhuma mudança, transformação, geração ou corrupção podia acontecer nesse mundo, com exceção do movimento circular ou, como foi chamado, *movimento local*.

²⁹O infinito era potencialidade que jamais se realizava. De fato, Aristóteles concebeu, por exemplo, o número como infinito em potência, pois a ele sempre pode ser acrescentado mais um número. Da mesma forma, concebeu o espaço como infinito em potência, na medida em que é infinitamente divisível. Com isso, foi o primeiro a conceber noção de *contínuo* matemático. Contraditoriamente, entretanto, ele concebeu o tempo como infinito, afirmando a eternidade do universo. Essa falha foi claramente percebida pelo filósofo neoplatônico João Philoponus (490 – 570 d.C.), um dos precursores do conceito medieval de *impetus* [11].

³⁰Aristóteles adotou e modificou o sistema de *esferas homocêntricas*, devido ao grande matemático e astrônomo Eudóxio de Cnido (408 – 355 a.C.), contemporâneo seu e membro da Academia de Platão.

Para garantir sua incorruptibilidade e imutabilidade, Aristóteles o fez composto de uma “quinta essência” denominada Éter. O Éter não era nem pesado, nem leve, por isso seu movimento deveria ser tal que nem se afastasse, nem se aproximasse do centro. Assim, sua única potência era a de passar de um ponto para outro, eternamente, em movimento circular³¹.

Essa divisão do universo subsistiria por séculos. Foi relativamente aceita pela ciência medieval, mas só seria seriamente desafiada por Galileu, já no século XVII, durante a Revolução Científica³². Ela implicou concepções físicas muito distintas entre os fenômenos celestes e os fenômenos terrestres, de modo que eles deveriam satisfazer a leis essencialmente diferentes. Dessa dicotomia se ressentiram as histórias da astronomia e da mecânica, pois elas passariam a ser consideradas, definitivamente, ciências separadas, cujos objetos de estudo eram essencialmente distintos e, em função disso, passaram a trilhar trajetórias independentes. Não por acaso, a astronomia passou a ser considerada uma ciência matemática, em conformidade com a natureza perfeita de seu objeto de estudo. Por outro lado, a mecânica, por estar associada a um

mundo onde o acaso, a irregularidade e a imperfeição eram comuns, teve boa parte do seu desenvolvimento atrasado, por não ter sido amplamente reconhecida como uma ciência “matematizável”³³. Observe-se que as concepções cosmológicas aristotélicas se ajustavam bem à astronomia teórica do século IV a. C., a qual analisava as trajetórias do Sol, da Lua e dos demais planetas como resultado da composição dos movimentos de muitas esferas cristalinas concêntricas, “ligadas” umas às outras e girando em torno do centro do universo, com diferentes velocidades angulares. Após Aristóteles, entretanto, a astronomia passou por grande desenvolvimento, acompanhando e incentivando o desenvolvimento conjunto da geometria³⁴. A física terrestre (a mecânica) deveria passar por um caminho um pouco mais tortuoso. A separação dos âmbitos da física celeste e da física terrestre só seria desafiada com o advento da física mecanicista cartesiana que, embora não tenha sido bem-sucedida, abriu caminho para a dissolução final, realizada no âmbito da mecânica newtoniana. A síntese newtoniana foi o primeiro esquema moderno *unificado* de explicação da natureza realmente bem-sucedido matemática e experimentalmente. A partir de en-

³¹Note-se aqui um ponto importante. O movimento dos astros não era concebido nem como natural, nem como violento. Ao contrário do que possa parecer, embora exigisse o concurso de uma ação externa que os mantivesse, essa ação não era uma causa eficiente, operando por contato, e sim uma *causa final*. Essa ação finalística era provida por Deus, o *primeiro motor imóvel*, em última instância, e por uma grande quantidade de outros motores imóveis de menor hierarquia (as *inteligências celestes*), em instâncias intermediárias, cujas naturezas eram ser *ato puro*, sendo, portanto, imateriais [3-4,10].

³²Na verdade, a ciência medieval se contrapôs à ciência aristotélica em diversas partes do seu sistema. Entretanto, suas objeções não foram feitas de maneira global, sistêmica, como as fez Galileu. A noção de *impetus*, por exemplo, é uma contraposição à noção de lugar natural, porém, não apenas foi articulada como contraposição local ao sistema, como também foi realizada com o objetivo de sustentá-lo, e não de destruí-lo [11]. (O autor agradece ao revisor por chamar atenção para esse ponto.)

³³Há, evidentemente, muitas exceções a esses esquemas simplificados de explicação da história. Talvez, o contraexemplo mais ilustre seja o da estática de corpos rígidos e de fluidos que, pelas mãos de Euclides de Alexandria (323 – 283 a.C.) e Arquimedes de Siracusa (287 – 212 a.C.), teve seu desenvolvimento matemático quase perfeito completado ainda na Antiguidade.

³⁴A astronomia do tempo de Aristóteles, essencialmente devida a Eudóxio de Cnido, seria profundamente corrigida por astrônomos de épocas posteriores, tais como Apolônio de Perga (262 – 190 a.C.), Hiparco de Nicéia (190 – 120 a.C.) e, finalmente, Cláudio Ptolomeu (90 – 168 d.C.). Entretanto, não se desvencilhou do geocentrismo, com a única exceção da proposta de Aristarco de Samos (310 – 230 a.C.), que não prosperou.

tão, a ideia de *unificação* jamais deixaria de ser um *conceito-chave* para o entendimento da evolução dos conceitos dentro da física.

Até esse ponto, vimos como as concepções metafísicas de Aristóteles implicaram sua física em dimensão cosmológica. Vamos agora detalhar um pouco mais sua física terrestre. Como vimos, as concepções aristotélicas sobre a física do movimento dos corpos na esfera sublunar eram formuladas segundo a ideia de movimentos naturais. De que modo cada corpo se comportaria em seus respectivos movimentos naturais dependia, essencialmente, de sua composição. As noções qualitativas de *peso* e *leveza* jogavam papel fundamental na descrição do movimento. Aristóteles afirmou explicitamente que a distância percorrida por um corpo, em movimento natural, em um intervalo fixo de tempo, aumentava proporcionalmente com seu peso (*W*). Ou seja, corpos mais pesados caíam mais rapidamente que corpos mais leves. Essa afirmação seria uma das que Galileu mostraria serem falsas. Por outro lado, todo movimento devia ser feito em um meio com certa densidade, já que não há espaço vazio. Isso implica que o meio deve oferecer alguma resistência (*R*) ao movimento. Aristóteles também assumiu explicitamente que a velocidade com que um corpo se move devia ser inversamente proporcional à resistência do meio. Portanto, em termos modernos, poderíamos tentar estabelecer a seguinte expressão matemática para a velocidade de um corpo em movimento natural, segundo Aristóteles:

$$v = \frac{W}{R}$$

Dois comentários sobre a equação acima. Primeiramente, ela não deve ser entendida como uma

asserção quantitativa (até porque há um problema com as unidades), mas, tão somente, *qualitativa*. Em segundo lugar, não é de todo claro se Aristóteles pensava na velocidade *média* ou *instantânea*. Observe-se, de passagem, que em um meio de resistência nula, ou seja, onde $R = 0$, a velocidade seria infinita, o que é um absurdo. Aristóteles usou esse argumento adicional para negar a existência do espaço vazio.

A dinâmica dos movimentos violentos, do ponto de vista quantitativo, não chegou a ser formulada para além do estabelecimento de uma lei de “força” (ou “impulso”) que, *grosso modo*, parecia igualar a “força” (ou “impulso”) com o produto do “peso” (ou “massa”) pela velocidade³⁵. Não está claro se Aristóteles usava (ou concebia) o conceito de *aceleração*. Como vimos, ele afirmou explicitamente que corpos mais “pesados” caem mais rapidamente que os mais “leves”. Isso está em consonância com a ideia básica de que os “pesados” procuram mais rapidamente atualizar sua potencialidade. Porém, a ambiguidade entre ele se referir à velocidade instantânea ou à velocidade média coloca o problema de saber se ele concebia a queda como movimento acelerado. Não está claro, também, se ele não estaria usando a noção de velocidade como um meio de medir o atributo “ser pesado”, o que poderia implicar, inclusive, a conclusão de que o peso não seria constante, caso ele estivesse se referindo à velocidade instantânea. Por fim, ele estabeleceu – de forma compatível com o fato de que toda dinâmica de um corpo deve acontecer em um meio com certa resistência – que, abaixo de certa quantidade, uma força não seria mais capaz de produzir qualquer movimento. O principal, entretanto, no que diz respeito à concepção do movimento violento, em Aristóteles, é o fato

³⁵Os termos usados por Aristóteles são “corpo movente” para a força ou impulso, e “corpo movido” para a massa ou peso, daí as ambiguidades. A terminologia de Aristóteles é compatível com a necessidade do contato para o movimento violento. Ele também concebeu sua relação não como a forma expressa no texto, mas como proporcionalidades, em consonância com a matemática grega da época, a qual não admitia igualar, em uma equação, objetos de naturezas diferentes.

de que, sem o concurso de uma ação contínua, não pode haver movimento. Assim, todo corpo deveria parar imediatamente após cessada a causa que o fazia mover-se. Essa conclusão colocou problemas muito sérios, sobretudo para a física medieval. Das reiteradas tentativas de solucioná-lo surgiram os conceitos de *impetus* e, finalmente, de *inércia* [11].

Dentre esses problemas, notoriamente, o mais sério foi o do *movimento balístico*, ou lançamento sob a ação da gravidade. Esse movimento não podia ser um movimento natural, mas sim violento (forçado). O problema estava em que o objeto em movimento balístico, uma vez lançado, perdia contato com o agente motor e, portanto, não tinha mais uma causa eficiente para seu movimento. Contudo, no esquema aristotélico, se não havia força, não poderia haver movimento. Aparentemente, esse problema nunca pode ser solucionado de modo satisfatório. Uma tentativa pouco convincente de explicação foi engendrada a partir da suposição original de que nenhum movimento acontece no espaço vazio. Assim, a matéria (no caso, ar) à frente do projétil se deslocaria para a parte de trás, provendo o impulso necessário para a continuidade do movimento. Porém, isso colocava uma contradição para o esquema, pois o meio circundante passava a ser tanto resistente quanto impulsivo. Outra tentativa de explicação pouco convincente invocava um efeito de pressão, exercida pela mão do atirador, na porção de ar posicionada logo atrás do projétil, de tal maneira que esta porção, deslocando-se juntamente com o projétil, proveria a força de contato necessária para continuar impulsionando-o. À medida que essa pressão arrefecia, o projétil perderia velocidade e, finalmente, passaria a movimentar-se naturalmente, caindo. A solução matemática definitiva do problema do lançamento sob ação da gravidade só surgiu séculos mais tarde, uma vez mais, pelas mãos de Galileu.

II. EPÍLOGO

Como dissemos, a visão aristotélica do universo dominou a mentalidade científica europeia (e árabe) por quase dois mil anos. A despeito de uma série de problemas, sua enorme consistência interna permitiu sua sobrevivência por longo tempo. Mais do que soluções exatas para problemas físicos específicos, o edifício conceitual aristotélico provia um esquema geral de compreensão do universo que efetivamente dava respostas, ainda que essencialmente qualitativas, para uma vasta categoria de fenômenos. Ele representou o primeiro passo na elaboração de uma linguagem funcional para a física, elaborando conceitos que, se não sobreviveram, foram os motores para elaborações conceituais mais avançadas, sobretudo aquelas que surgiram, muito mais tarde, pelas mãos de Copérnico, Galileu, Kepler e Descartes. Mesmo antes deles, entretanto, houve um lento, mas progressivo, desenvolvimento dos conceitos da física. A física aristotélica e seus desdobramentos representaram o começo da criação de uma ciência independente. Muito tempo ainda seria necessário para que a física se separasse de vez da filosofia, mas o impulso inicial já estava dado.

REFERÊNCIAS

- [1] Polito, A. M. M., Olavo, L. S. F. *A Filosofia da Natureza dos Pré-Socráticos*. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 30, n. 2: p. 323-361, (2013).
- [2] Kirk, G. S., Raven, J. E., Schofield, M. *The Presocratic Philosophers*. Cambridge University Press, Cambridge (2007).
- [3] Olavo, L. S. F. *Panorama do Desenvolvimento Histórico dos Conceitos da Física* Tomo 1. (não publicado).

- [4] Lloyd, G. E. R. *Early Greek Science: Thales to Aristotle* W.W. Norton & Company, New York (1970).
- [5] Reale, G., Antiseri, D. *História da Filosofia*. vol. 1. Ed. Paulus, São Paulo (1990).
- [6] Kalkavage, P. *Plato's Timaeus*. Focus Publishing, Newburyport (2001).
- [7] Grant, E. *Physical Science in the Middle Ages*. Cambridge University Press, Cambridge (1977).
- [8] McKeon, R. *The Basic Works of Aristotle*. The Modern Library, New York (2001).
- [9] Aristóteles. *Metaphysics* (traduzido para o inglês por J. Sachs), Oxford University Press Oxford (2008)
- [10] Aristóteles. *Physics* (traduzido para o inglês por R. Waterfield), Oxford University Press Oxford (2008)
- [11] Polito, A. M. M. *Galileu, Descartes e uma Breve História do Princípio de Inércia*. Physicae Organum, v. 1, n. 1, pag. 1 (2015).
- [12] Olavo, L. S. F. *Aristóteles e a Construção da Física*. eBFIS 3 007-1 (2014).

Entrevista com o Professor Doutor Viktor Dodonov

LILAH FIALHO DE LIMA SIMÕES

Universidade de Brasília

Brasília, 8 de Abril de 2015.

O professor Doutor Viktor Dodonov é graduado e mestre em Aerodinâmica pelo Instituto Físico Técnico de Moscou e possui doutorado em Física teórica pelo mesmo Instituto. Suas principais linhas de pesquisa são: Efeito Casimir dinâmico, eletrodinâmica em cavidades, relações de incerteza, estados não-clássicos, sistemas quânticos abertos e dependentes de tempo, função de Wigner e teoria quântica no espaço de fase, invariantes quânticos.

Trabalha atualmente na Universidade de Brasília e é um professor considerado exemplo a ser seguido pelos alunos. Dada essa motivação convidamos o professor para uma entrevista, uma conversa sobre a vida do professor, sobre as motivações para que entrasse na física e alguns outros assuntos foram abordados pelo ponto de vista muito respeitado desse professor que tem uma grande experiência internacional.

Em 1966, na União Soviética, nos contou o professor, tinham escolas e classes especiais de matemática no ensino médio, ele terminou o colegial em uma escola específica de matemática avançada (o que garantiu que ele nunca tivesse problemas com matemática na universidade), e o interesse pela área de exatas nasceu, em parte, dessa época de colegial, ‘Ah, isso é uma pergunta fácil, porque ainda surgiu na escola. Eu terminei a escola no ano 66, então vejam que já não sou muito jovem [...]’, brincou quando questionado sobre a origem do interesse pela física.

Na época estava em dúvida sobre qual área seguir, física ou matemática, sendo ele bom aluno, participava de olimpíadas e participou de uma olimpíada nacional de física e matemática, na qual ficou em 3 lugar e, como um dos ganhadores, foi chamado para passar um mês em um acampamento próximo ao Mar Negro. No acampamento ele e outros ganhadores tiveram algumas aulas, fornecidas pelos professores do Instituto Físico-Técnico de Moscou, tiveram contato com algumas experiências, aplicações em física, e isso foi importante pois deu motivação para que, ao terminar o acampamento, ele escolhesse a área que queria trabalhar: física.

Ele ter sido sempre um aluno muito bom também o ajudou a tomar essa decisão pois, por ter notas muito boas no ensino médio, ele ganhou uma medalha que garantia o ingresso dele na universidade que quisesse sem ter que fazer vestibular, exceto três melhores universidades e a que ele queria, o Instituto

Físico-Técnico de Moscou (IFTM), era uma das excessões. Ele fez então o vestibular, entrou no IFTM, mas não escolheu a área de Física e sim a área de Engenharia de Aviação (Aero-Mecânica): 'A faculdade de Física Geral e Aplicada (FFGA) um pouco me assustou porque vi ainda nesse campo [acampamento] no Mar Negro alguns ganhadores dessa olimpíada que eu fui na terceira colocação, eles foram muito mais inteligentes do que eu, e eu tive medo que nível nessa faculdade de física geral fosse alto demais pra mim [...]', nos confessou com humildade. Nessa época o Instituto Físico-Técnico de Moscou era muito sigiloso e até o local da Faculdade de Aero-Mecânica era secreto, então ele não sabia muita coisa sobre a instituição, apenas que era uma das melhores. Mas ainda na graduação (no quarto ano), ele se interessou mais por mecânica quântica do que aero-mecânica, pediu então para trabalhar em pesquisa nessa área com o professor quem dava aulas de mecânica quântica e que se tornou, então, seu orientador.

Questionado sobre como foi o processo da mudança para o Brasil o professor nos contou sobre o período muito difícil pelo qual a Rússia passava nessa época (os malditos anos 1990s, como todos russos os chamam, exceto poucos ladrões-oligarcos), eles não recebiam salário e a renda da família era complementada com a venda de cosméticos feita pela esposa dele, situação que ele não gostava, 'Ela é inteligente e de alta qualificação e tinha que ir de casa em casa e empresa em empresa, talvez alguém gosta disso, mas pra mim isso foi humilhação'.

Em 1991, em um congresso na Alemanha, ele conheceu o professor Salomon Mizrahi da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) que um tempo depois, enviou um convite para ele pesquisar por 6 meses na UFSCar com bolsa de FAPESP, e ele aceitou o convite. Depois ele ganhou outra bolsa e voltou e foram aparecendo várias oportunidades para lecionar e ele aproveitou. 'Então qual diferença? Bom, a diferença é grande: a gente recebe dinheiro (risos), e dinheiro bom (risos), e em princípio condições de trabalho são boas, por exemplo, veja minha sala aqui no CIFMC, na Rússia praticamente nenhum professor tem salas tão grandes [...]', comentou quando questionado sobre a diferença entre morar no Brasil e na Rússia. Em 25 anos como cientista foi a primeira vez que ele teve uma mesa própria na sala de trabalho (no Departamento de Física da UFSCar), e ele considera isso muito importante para o desenvolvimento de um trabalho teórico: uma mesa e computador, além de papel e caneta. Comparando as condições de trabalho nos EUA o professor destacou que lá as condições são melhores, mas a jornada de trabalho e estudo é dia e noite, sem descanso, e isso é insuportável para muita gente. Essas diferenças (salário e boa condição de trabalho) o fizeram ficar no Brasil por tanto tempo.

Analisando o cenário nacional do ensino superior no Brasil o professor compartilhou conosco sua opinião sobre como a educação básica faz muita diferença na qualidade do ensino superior, desde que chegou no Brasil ele ouviu comentários de professores amigos de como o nível da educação básica caiu da década de 60 até hoje, os alunos entram na universidade com uma grande deficiência em matérias básicas, o que diminui o desempenho deles. O professor cita como exemplo aulas de Física 4 que ele ministrava, um dos conteúdos da matéria é interferência entre ondas, para isso deve-se, previamente, saber somar funções sen, e muita gente na turma já se sentia perdido pois não sabiam fazer essa soma, essa deficiência em matérias básicas deixa eles atrasados e desmotiva o aluno.

Outro ponto citado por ele foi o de que aqui no Brasil os alunos defendem doutorado, em média, com muito mais de 27 anos, o que dificulta, ou atrasa, a evolução da pesquisa científica no país. Ainda comentou sobre a diferença do sistema de graduação do Brasil e da Rússia. Lá eles estudam cursos básicos nos 3 primeiros anos de graduação (eram 40hs semanais de aula, mais o tempo de estudo em casa, e isso

era pouco, diziam, pois na década de 50 os estudantes do IFTM tinham carga de 54hs semanais) e nos dois últimos anos (que correspondem ao período de mestrado no Brasil) eles têm poucas matérias obrigatórias; o foco é em pesquisas! Caso quisessem aprofundar em algum tópico específico deveriam pegar algum livro e estudar sozinhos.

A desmotivação dos alunos também foi um ponto citado pelo professor, deu como exemplo alunos de Física 1 que acabaram de entrar na universidade e não conhecem ainda como funciona a universidade, mas entram na sala, assinam a chamada e saem, ou seja, porque entraram na universidade então?

Foi discutido também um ponto muito importante e por vezes esquecido em discussões quanto ao futuro da educação superior no Brasil: o objetivo das pesquisas científicas no país. O Instituto Físico-Técnico de Moscou, onde estudou, tinha um objetivo para pesquisas científicas, preparar especialistas de altíssimo nível para que eles trabalhassem em áreas importantes estrategicamente; aqui no Brasil não temos uma motivação principal para as pesquisas científicas, não temos uma área muito importante estrategicamente, não temos um objetivo.

No fechamento da entrevista pedimos ao professor dicas de como ser um bom pesquisador, como manter o nível de estudos e pesquisa sempre elevados, e ele repetiu o que falou muitas vezes durante a entrevista: somente estudando se alcança um bom nível, é essencial trabalhar, se dedicar, treinar, ler bons livros e resolver muitos problemas (começar com algum simples e depois ir atrás de outros mais difíceis), '[para se manter sempre bom] Ler bons livros e pegar livros com muitos exercícios e tentar resolver [...], mas claro que você tem que estar interessado para isso, para mim foi desde escola interessante, resolver problemas de matemática e de física, se não tem interesse claro que você nunca vai fazer isso. Por exemplo, eu não sei jogar futebol, mas não tenho interesse (risos), na escola quando joguei e foi até primeira batida de bola pra minha cabeça e quando bateu eu sentei (risos). Outras [pessoas] gostam mais, a gente tem que fazer o que gosta, mas se decidiu ir pra essa área a única possibilidade é trabalhar'; e destacou, também, o papel essencial que a matemática tem, claro que para tudo isso você deve estar interessado e motivado. Citou também a importância de se achar um bom orientador, que deixa você fazer o trabalho e apenas te orienta quanto ao caminho.

Deixou uma mensagem aos alunos para que fiquem atentos ao fato de que agora, com a internet, temos acesso muito rápido a muita informação e isso é tão bom quanto ruim, pois temos que lembrar que a internet também é uma grande fonte de desinformação e as informações lá devem sempre ser verificadas.

Ciência a caminho da população - uma parceria entre o Instituto de Física da UnB e o Sesc-DF

JOSÉ ROBERTO SFAIR MACEDO*
VANESSA CARVALHO DE ANDRADE†
OLAVO LEOPOLDINO DA SILVA FILHO‡

Resumo

Ao longo dos últimos anos, O Instituto de Física e o Sesc-DF têm estabelecido uma parceria na realização de diversos projetos voltados para a comunidade dos alunos do ensino médio. Em particular, tem sido essencial a participação dos alunos do PET-FÍSICA na concretização dessas ações. Tais ações têm apresentado enorme sucesso entre os alunos no sentido de divulgar a ciência para alunos, em geral, carentes.

Palavras-chave: Extensão, PET, Comunidade, Física na Escola.

I. INTRODUÇÃO

O Serviço Social do Comércio-Sesc é uma instituição de direito privado, que se faz presente em todos os estados brasileiros. Presta atendimentos aos empregados do setor de comércio de bens, serviços e turismo nas áreas de Educação, Cultura, Saúde, Alimentação, Assistência, Esporte, Lazer e Turismo.

A Instituição tem por finalidade promover bem-estar e qualidade de vida ao comerciário e sua família e à sociedade, além de, no exercício da responsabilidade social, contribuir para a construção de uma nação mais justa, democrática e sustentável.

O trilhar do caminho educativo tem sido um dos

traços mais fortes do perfil do Sesc, em sua prática sociocultural, a serviço do bem comum, o que lhe tem assegurado ímpar identidade e expressivo reconhecimento público. Trata-se de valor definido e consolidado como práxis institucional, considerado vetor de transformação social. Seguindo seus preceitos, o Sesc mantém, ainda, estruturas programáticas interativas, que permitem diálogo permanente com a sociedade.

O Sesc, ao prestar serviços à população de diversos perfis, com ela convive e dialoga cotidianamente, procurando conhecer mais de perto seus valores, aspirações, necessidades, sua realidade, enfim.

A Entidade mantém, ainda, estreita relação com

*Diretor Regional do Sesc-DF.

†Coordenadora do PET-Física da UnB

‡Coordenador de Graduação Diurna do Instituto de Física, olavolsf@gmail.com

várias instituições e tem sido protagonista e coautora de uma série de iniciativas no campo socio-educativo e cultural, por meio de parcerias. Esse fato dá relevo não só à importância do papel das organizações nacionais e internacionais no fortalecimento das nações, como também, à positiva relação público-privada como indutor de desenvolvimento e de progresso social.

É dentro dessa perspectiva que foi construída a parceria do Sesc-DF com a Universidade de Brasília, em distintas áreas do conhecimento humano e, mais recentemente, com o Instituto de Física - IF e o Programa de Educação Tutorial - PET-Física – Unb.

Nesse último caso, a parceria tem o propósito de fazer chegar à população conhecimentos científicos e produções acadêmicas, mediante ações compartilhadas e complementares, e de gerar estímulo para o ingresso de estudantes das redes de ensino público e privado ao ensino superior, especialmente no campo das ciências.

II. O INSTITUTO DE FÍSICA E AS AÇÕES DE EXTENSÃO

Uma das maiores dificuldades do Instituto de Física, em todos esses muitos anos de sua existência, tem sido a comunicação (essencial) com a comunidade de fora da Academia.

Em grande parte, tal dificuldade decorreu de um desenvolvimento e oportunização adequados da sua área de ensino, que possui maior facilidade no estabelecimento desse diálogo.

Já há algum tempo, o Instituto de Física tem se preocupado em dar maior relevo ao grupo de professores que estão voltados para a área de Ensino de Física, com novas contratações e uma reestruturação da área de Licenciatura em Física. Haja vista a elaboração do novo Projeto Político Pedagógico para o curso de Licenciatura que reverteu

uma situação histórica no Instituto em que a Licenciatura era considerada meramente um apêndice do Bacharelado.

Com isso, a Licenciatura em Física passou a ter sua identidade própria e os frutos começam a aparecer.

Nesse sentido, a parceria com o Sesc - DF tem sido de imensa importância para que o Instituto possa implementar esse diálogo há tanto esperado fazendo uso da capilaridade social que o Sesc-DF já possui e contribuindo, portanto, com suas capacidades precípuas quanto ao ensino e à divulgação da Física em âmbito social mais amplo.

III. AÇÕES CONJUNTAS

Algumas ações conjugadas já foram realizadas, ou estão em curso, e há oportunidade para a formulação de novas outras: participação de alunos do Instituto de Física em ações sociais promovidas pelo Sesc-DF, da equipe técnica do Sesc-DF na Semana Universitária da UnB e de alunos do Sesc-DF na Escola de Física da UnB; e futura realização de projeto da UnB direcionado a pessoas da terceira idade que frequentam o Sesc-DF.

As ações sociais são realizadas em cidades do Distrito Federal com prevalência de população de baixa renda. Integram esse projeto a Sala de Ciências do Sesc, cujo objetivo central é o de “difundir conhecimentos nas áreas de Biologia, Física e Química, de forma a despertar no educando curiosidade científica, oportunizando um espaço permanente para estudantes de todos os níveis de ensino e faixas etárias”. Nesses espaços, é possível investigar e pesquisar, principalmente, assuntos relacionados à ciência, a questões ambientais e ao desenvolvimento sustentável, de forma contextualizada e interdisciplinar.

A partir de 2014, o Instituto de Física participou das ações sociais mediante experimentos científicos demonstrados por estudantes do Programa de

Educação Tutorial - PET-Física no ambiente da Sala de Ciências do Sesc-DF, tendo sido realizadas, até o momento, duas edições, uma em Arapoanga – Planaltina-DF, em 14 e 15 de março de 2014, e outra em São Sebastião, nos dias 26 e 27 de junho de 2015.

Durante a Semana Universitária da UnB, ocorrida em novembro de 2014, o Sesc-DF instalou, nas dependências daquela Universidade, uma unidade da Sala de Ciências, com a seguinte programação: experimentações de Ciência Forense – Digitais, Luminol-UV - para demonstração de benefícios da Ciência à investigação criminal; microbiologia (experimentação: desenvolvimento de lâminas); homenagem aos Prêmios Nobel de Ciências; atividades científicas interativas por meio de painéis.

Além dessas iniciativas, está programada a participação de 42 (quarenta e dois) alunos da Edusc, do Ensino Médio, na 1ª Escola de Física da UnB, a ser realizada no Instituto de Física, no período de 27 a 30 de julho. O curso será destinado a estudantes de escolas públicas e privadas que apreciam ciências e matemática. Nele serão abordados assuntos relacionados à carreira científica, à vida acadêmica e ao papel do físico na indústria e na sociedade. A Escola realizará palestras sobre nanotecnologia, astrofísica, lasers, plasmas, sistemas biológicos, materiais avançados, entre outros. Os alunos terão, ainda, oportunidade de visitar laboratórios de pesquisa do Instituto e participar de experimentos didáticos.

E, ainda, encontra-se em formatação, pelo Instituto de Física, projeto direcionado a pessoas da terceira idade que frequentam os Grupos dos Mais Vividos do Sesc-DF. A ideia é serem vivenciadas, por esses grupos, experiências científicas aplicáveis ao cotidiano. Há possibilidade de que os encontros ocorram em Unidades de Serviço do Sesc-DF, para atendimento direto ao público, próximo ao seu local de moradia.

O Sesc-DF acredita que ações de extensão

como as aqui tratadas permitem gerar processos educativos e transformadores – princípios essenciais presentes em sua atuação institucional –, por meio da aproximação da sociedade com conhecimentos acadêmicos produzidos nas universidades. E ressalta a importância dessa parceria ainda como instrumento de apoio à formação de estudantes universitários, pela especial oportunidade de compartilhamento direto de seus conhecimentos com a população.

O breve relato que se segue, produzido pelo Sesc-DF, referindo-se a evento realizado em Arapoanga – Planaltina, exemplifica o valor educativo e social da atuação dos alunos do Programa de Educação Tutorial-PET-Física nas ações desenvolvidas juntamente com a equipe da Sala de Ciências do Sesc-DF:

“Tivemos oportunidade de acompanhar os alunos da Física, os Petianos, durante todo o dia do sábado na ação social. Trabalhamos juntos no atendimento à população, naquele local onde pudemos observar o predomínio do estado de pobreza e um tanto de suas perversas consequências.

Um menino daquele bairro disse que achou muito legal conhecer o nitrogênio. Foi dito a ele que muitas informações sobre o nitrogênio poderiam ser buscadas na internet. Ele respondeu: “mas, na minha casa, eu não tenho internet”. A ele foi perguntado: “e na sua escola?” Ele disse: “também não tem.”



Créditos: Raphael Carmona/Sesc-DF

Várias perguntas da população nos surpreenderam. Mais um exemplo se segue: uma senhora bem idosa, ao saber que o nitrogênio existe no ar, pergunta a um aluno da UnB: “mas, como vocês conseguem tirar ele e colocar nesta garrafa?”

Percebemos que, em meio a tanta violência que existe na cidade, bocas de fumo nas esquinas, policiamento ostensivo, a Física falou mais alto naquele dia em Arapoanga; e deu o seu recado para aquelas pessoas que estiveram na Sala de Ciências do evento. Vimos tantas expressões de encantamento, de deslumbramento, de humor e de alegria ao simples contato com o nitrogênio líquido. Tudo parecia mágico, enquanto alunos Petianos e servidores do Sesc/DF assim falavam: “isto é nitrogênio; isto existe no ar; isto é ciência; quem aí gosta de ciência? quem já estudou Física?”. Crianças e jovens respondiam às perguntas, embora estivessem ocupados em experimentar os movimentos da fumaça engraçada que congelava tudo à volta deles. E embora esperassem ansiosos os saborosos sorvetes de chocolate e de groselha que o nitrogênio acabara de ajudar a produzir.

Interessante imaginar o que a Fí-

sica pode suscitar na população, que tão pouco acesso tem ao conhecimento científico. E como terá sido o sono e os sonhos daquelas crianças e jovens, ao se lembrarem daquele dia em que a Física passou por Arapoanga, com sua fumacinha divertida e congelante.”

Encontram-se, nas seguintes palavras da Coordenadora do Programa de Educação Tutorial - Pet-Física-UnB, Prof^a Vanessa Carvalho de Andrade, ao agradecer ao Sesc-DF a oportunidade de participação dos alunos, impressões que ressaltam ainda mais a importância da parceria:

“Realmente não temos a dimensão da necessidade de ações como essas até participarmos de fato delas. Mas o público não é o único beneficiado. Nós reafirmamos nossa vocação e amor pela Física a cada pergunta despreziosa de um jovem e nos encantamos com as hipóteses criativas dos mais velhos. Apesar de todo o racionalismo que a ciência tem por trás, acredito que é o sonho que ainda nos motiva. E passar isso adiante é fundamental. É uma experiência nova para mim, que estou envolvida desde que entrei na Universidade, essencialmente com estudantes que já tomaram a decisão sobre suas carreiras. Mas o público leigo é realmente desafiador! Assim, aceito agradecimentos do Sesc, mas vou além: eu é quem devo agradecer.”

Diante dos resultados significativos alcançados, aplausos não de ser dirigidos ao Sesc e ao Instituto de Física pelos investimentos e esforços institucionais empregados. Devem ser estendidos, por mérito, aos formuladores e executores da proposta, às equipes diretivas e técnicas e aos alunos que

ajudaram a transportar esse sonho do universo das idealizações ao plano concreto: nada que uma parceria bem construída não seja capaz de realizar.

A Oferta de Disciplinas pelo Instituto de Física: novas estratégias

OLAVO LEOPOLDINO DA SILVA FILHO*

Instituto de Física - IFD

Universidade de Brasília - UnB, Brasília, D.F.

Resumo

O Instituto de Física sempre apresentou inúmeros problemas com relação á oferta de disciplinas, principalmente por ser um centro de custo que oferta várias disciplinas para outros cursos – as chamadas disciplinas de serviço. Com esses vínculos diante de si, o Instituto de Física terminou por incorrer em estratégias de oferta que deveriam ser de caráter excepcional, mas que se tornaram, ao longo do tempo, usuais, como a adoção generalizada de professores substitutos. Tal política vem sendo modificada no sentido de racionalizar a oferta de disciplinas e, com isso, permitir um maior controle e planejamento de modo a facilitar a oferta de disciplinas optativas, importantíssimas para a formação de nossos alunos.

Palavras-chave: Oferta de Disciplinas, Estratégias, Planejamento.

I. INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas que reincidentem, todo semestre, nos Departamentos e Institutos das mais diversas instituições de ensino superior é a distribuição da carga didática. Com o Instituto de Física não é diferente. Com um número de professores já superior a 70 e com a característica adicional (não compartilhada com outros institutos) de ter professores que estão capacitados a dar aulas nas mais variadas disciplinas, a questão da distribuição de carga didática tem se tornado de difícil solução.

Além das questões já levantadas, há ainda o problema introduzido pela recente adoção da Uni-

versidade de Brasília, em seu regimento, de um valor *mínimo* de número de créditos ofertados por cada professor (atualmente igual a oito créditos semanais). Tal número, que deveria ser considerado apenas como um mínimo, acaba sendo entendido por diversos professores também como um *máximo*, o que faz com que se abespinhem sempre que o coordenador lhes atribui carga superior. Em contrapartida, vale dizer, há também aqueles que não se furtam de absorver carga didática superior, colaborando valorosamente para o funcionamento adequado do Instituto.

Para além dessas considerações, havia ainda, por parte do Instituto de Física, a prática de lan-

*Coordenador do Instituto de Física (Diurno)

çar mão de diversos professores substitutos. Tais professores são contratados na forma de contrato temporário que dura o prazo exato de afastamento de professores do quadro do Instituto. Um professor substituto, segundo as normas da Universidade de Brasília, deve ser contratado para lecionar um número *mínimo* de créditos igual a dezesseis (se for contratado para 40 horas semanais, como é a praxe em nosso instituto).

Entretanto, a contratação de professores substitutos (algo em torno de dois ou três por semestre) acabava se tornando um problema a mais para o Instituto. E isso por diversas razões: primeiramente, o professor substituto passa por um processo de contratação similar aos professores do quadro (exames admissionais, etc) que prolonga o prazo de contratação consideravelmente. Em segundo lugar, os professores substitutos são contratados, na Universidade de Brasília, através do Decanato de Gestão de Pessoas (DGP), que centraliza todas as operações a respeito. Isso leva a uma sobrecarga de processos naquele Decanato, o que implica em ainda mais demora no processo de contratação.

Por tais razões, os substitutos, muitas vezes, são contratados com o semestre já em andamento, precarizando o ensino e deixando muitas turmas com funcionamento, na melhor das hipóteses, capenga.

A falta de uma política clara e bem estabelecida de atribuição de carga didática também tem levado o Instituto a ofertar um número pequeno de disciplinas optativas, que têm importância na formação mais geral do aluno e na sua aquisição de erudição na área de formação.

Finalmente, após a aprovação dos novos projetos políticos pedagógicos (PPPs), que levou à reformulação dos cursos de Bacharelado e Licenciatura do Instituto, foram criados os Núcleos Docentes Estruturantes (NDEs): um para o bacharelado e outro para a licenciatura.

Como o Instituto aprovou também o fechamento, por tempo indeterminado, da habilitação de licenciatura diurna, tal alteração terminou por estabelecer uma divisão das responsabilidades quanto à lista de ofertas, agora fruto do trabalho *conjunto* dos dois NDEs, após uma primeira etapa de formulação tentativa da lista pelos coordenadores de cada turno (presidentes dos respectivos NDEs).

Essa introdução dos NDEs no processo de oferta de disciplinas também afetou, em parte, as regras que eram adotadas para a distribuição das disciplinas. Se antes havia uma responsabilidade não explicitada do coordenador de evitar que professores com maus resultados pedagógicos em uma disciplina continuassem a lecioná-las ao seu bel prazer, apenas pela aplicação cega de regras preexistentes para a confecção da lista, agora é missão precípua dos NDEs impedir esse tipo de situação, mesmo que isso signifique se sobrepor a eventuais regras de atribuição de turmas.

Tal situação, inclusive, tem trazido alguma perplexidade a professores que por ela são afetados.

II. NOVAS ESTRATÉGIAS

Em função desses problemas, mostrou-se necessário fazer uma análise mais completa da oferta no Instituto de Física, de modo a racionalizar o processo e tentar evitar as armadilhas já mencionadas.

Em particular, a Coorenação de Graduação Diurna do Instituto de Física tomou para si a responsabilidade por fazer um levantamento estatístico da oferta no Instituto (e, de fato, fazê-lo todo semestre, usando o *Physicae Organum* como meio de divulgação desse tipo de levantamento, uma vez que essa é uma das funções precípua da revista.)

A ideia, cuja necessidade já havia sido levantada por outros professores do Instituto¹, por oca-

¹O professor Paulo Caldas, em uma reunião conjunta do Instituto, levantou essa necessidade

²O Instituto já realizou uma tentativa de estabelecer critérios para a divisão da carga didática, quanto a valores mínimos

sião de uma tentativa prévia e mal-sucedida de proceder a tal racionalização², seria justamente obter números que indiquem a real necessidade de professores substitutos e, na hipótese de não havê-la, a adoção de abordagens de oferta que não os tomassem como fundamento da oferta semestral.

De fato, sem tal levantamento, qualquer estratégia de oferta careceria de bases sólidas e qualquer intervenção poderia resultar em casuísmo ou 'achismo'.

Assim, apresentamos, na próxima seção, alguns números que podem induzir políticas adequadas para a oferta de disciplinas. Este trabalho deve ser encarado, também, como uma prestação de contas da Coordenação e do Núcleo Docente Estruturante, uma vez que, como já dissemos, a Lista de Ofertas agora é de responsabilidade do último, sob a presidência do primeiro.

Em publicações futuras, tentaremos contribuir com a proposta de regras mais claras para a oferta de disciplinas, de modo a tornar o processo mais simples e também mais transparente.

III. ALGUNS DADOS BÁSICOS SOBRE A OFERTA - 2^O SEMESTRE/2015

Neste segundo semestre de 2015, o Instituto de Física, que conta com 70 professores no quadro, está ofertando um total de 134 turmas (algumas disciplinas possuem mais de uma turma), com um total de vagas *reservadas* (não necessariamente preenchidas) igual a 3026, distribuídas, principalmente, entre as disciplinas de serviço, como as disciplinas de Física 1, 2, 3 e 4, particularmente as duas primeiras.

Dessas 134 turmas ofertadas, 132 delas referem-se a turmas de disciplinas obrigatórias, e apenas duas são disciplinas optativas, um número excessi-

vamente pequeno para um Instituto já considerado de porte médio/grande. Vale ressaltar que os números aqui apresentados referem-se apenas à *graduação*, não levando em conta aqueles que decorrem da oferta nos cursos de pós-graduação do instituto. O Instituto de Física possui duas pós-graduações: uma pós-graduação profissional (mestrado) e uma pós-graduação acadêmica (mestrado e doutorado) que consomem professores também em suas ofertas.

Ao todo, o Instituto está ofertando 510 créditos (1 crédito = 1 hora e 50 minutos por semana), apenas na graduação, o que implica em um valor *médio* de 7,3 créditos por professor. Note-se que trata-se apenas da carga didática *na graduação*, sendo essa a razão pela qual o número de créditos médio se encontra abaixo do regimentar.

Seja como for, dado que o número de disciplinas nas pós-graduações não é muito grande no que tange a oferta semestral, o resultado acima mostra que o número de créditos por professor se aproxima do valor *mínimo*, indicando exatamente o tipo de perspectiva já mencionada, de se considerar o valor mínimo de oferta como o valor máximo.

Contribui para isso também algumas isenções quanto à oferta de número de créditos, válida regularmente para diretores e coordenadores de graduação e pós-graduação, a quem se faculta a oferta de apenas quatro créditos por semestre.

É importante notar que a regra de dispensa do mínimo de créditos por professor deve obedecer ao critério de um mínimo de quatro créditos por semestre *na graduação*, regra introduzida pelo Conselho de Ensino, Pesquisa e Extensão. Segundo a resolução, *nenhum professor está liberado dessa exigência*. Mais ainda, a dispensa do número de créditos deve-se fazer *a critério* do Instituto, em função de sua conveniência em fazê-lo, e não como uma imposição institucional. Assim, a critério do

e máximos por professor em função da sua atuação acadêmica, mas os critérios se mostraram muito complexos e de difícil execução.

instituto, coordenadores de graduação ou pós, diretor de unidade e outros diretores podem ser instados a lecionar um número maior de créditos.

A distribuição de carga por professor ficou relativamente uniforme, como mostra a Figura a seguir:

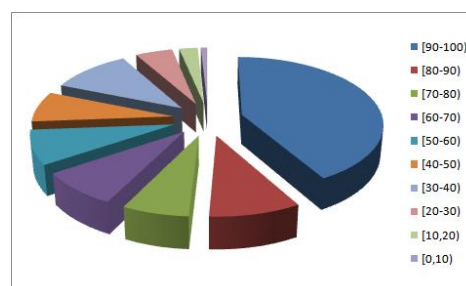


Neste semestre, além do mais, foi possível cobrir toda a carga didática dos professores com a manutenção do contrato de apenas um professor substituto. Mesmo assim, este professor substituto está com uma carga de 12 créditos. A razão para que o professor substituto fique com menos do que 16 créditos é que o professor substituído irá retornar no meio do semestre. Uma vez que a chegada do professor substituído imediatamente cancela o contrato do professor substituto, foi necessário diminuir a carga atribuída ao último para não sobrecarregar o primeiro quando de sua volta.

Algumas disciplinas vinham mostrando, em semestres anteriores, um preenchimento pouco satisfatório de vagas. Isso apontava para a necessidade de se estabelecer uma estratégia de oferta de disciplinas distinta da estritamente semestral, mesmo para as disciplinas obrigatórias, mas sim anual. Entretanto, como mostra a imagem a seguir, este segundo semestre de 2015 apresentou um preenchimento de vagas bastante satisfatório. De fato, fazendo uma classificação por decis, fica claro que mais de metade das turmas tiveram preenchimento acima de 80 por cento das vagas.

Vale notar que as disciplinas de serviço tiveram excelente taxa de preenchimento de vagas: Física 1 (86%), Física 2 (90%) e Física 3 92 %). Do mesmo modo, as disciplinas experimentais de serviço também tiveram alto preenchimento: Física 1

Experimental (75%), Física 2 Experimental (58%) e Física 3 Experimental (79%). Os valores das Físicas Experimentais está abaixo daqueles das Físicas Teóricas devido ao grau de retenção destas últimas ser muito maior.



Esse resultado, entretanto, não desqualifica a ideia de se desenvolver uma estratégia de oferta anual para algumas disciplinas, pois reflete um semestre cujo preenchimento foi adequado, justamente após um semestre em que muitas disciplinas tiveram preenchimento abaixo do desejado.

Entretanto, seria interessante continuar esse estudo de preenchimento de vagas para se chegar a uma conclusão mais adequada a partir da análise da sua série temporal tomada ao longo de vários semestres.

IV. CONCLUSÃO

Alguns elementos podem ser levantados com os dados apresentados na seção anterior.

Identificamos alguns gargalos óbvios no processo de Oferta de Disciplinas:

- Primeiramente, temos o gargalo, menos relevante, da isenção de se ter o mínimo de 8 créditos ofertados por professores em cargo de direção e coordenação. Ainda que seja pequeno o impacto de tal isenção, o problema pode-se agravar em função do número de tais cargos preenchidos por professores do instituto. Entretanto, tal questão pode ser mais

facilmente resolvida do ponto de vista administrativo, uma vez que a isenção é dada *a critério e conveniência do Instituto*. Uma sugestão trivial para se resguardar desse tipo de problema é fazer-se, *sempre* uma consulta ao Núcleo Docente Estruturante para a liberação da oferta mínima de oito créditos;

- Uma outra ação importante seria, como já mencionado, uma maior racionalização da oferta de disciplinas que apresentam menor procura. Seria importante realizar um trabalho pelo qual se construiriam **dois fluxos** diferentes, um relacionado a entradas de alunos nos exames vestibulares do início do ano, outro relacionado a entradas de alunos nos exames vestibulares do meio do ano. Assim, se poderiam elaborar estratégias tais que a oferta anual destas (poucas) disciplinas não impactariam no andamento dos cursos dos alunos (critério fundamental para qualquer estratégia).
- O Instituto de Física também adota uma estratégia não oficial para liberar professores para licenças que permitem a contratação de professores substitutos. Seria importante **rever** tais regras em face das novas características do instituto, seja quanto ao número de profes-

sores, seja quanto as novas necessidades pelo surgimento de mais cursos que necessitam de nossas disciplinas de serviço.

- Faz-se imediatamente necessário que haja algum tipo de coordenação nas ações entre os coordenadores de graduação e de pós-graduação, de modo a fazer com que haja harmonia entre a oferta em ambos os contextos. Até agora, tem-se adotado a estratégia de receber a lista de ofertas da pós graduação (principalmente a pós graduação acadêmica) e então alocar os professores na graduação. Isso, de resto, fere a ideia básica exposta no regimento de que há prioridade na oferta das disciplinas da graduação. Seria interessante criar algum tipo de Fórum dos coordenadores para que pudesse haver tal harmonização.

É importante que as ações necessárias sejam tomadas *antes* que elas se tornem impeditivas de um bom andamento dos trabalhos, mormente aqueles imediatamente afetados pela lista de ofertas.

Cabe aos representantes do Instituto no Conselho do Instituto de Física **propor** as mudanças que julgarem pertinentes, uma vez que, segundo as regras vigentes no instituto, tem apenas voz neste conselho, mas não voto.

Professores do IF-UnB e suas áreas de pesquisa

LILAH FIALHO DE LIMA SIMÕES

Universidade de Brasília

Resumo

Ingressando no curso de Física os alunos devem ficar atentos à importância que a pesquisa tem na sua vida acadêmica. A Physicae Organum foi criada com o intuito de aproximar alunos da graduação e da pós graduação de produções acadêmicas e sabendo do significado da pesquisa na vida dos alunos (seja como Jovem Talento, PiBic, PiBid, etc) montamos um pequeno guia para ajudá-los.

Com o objetivo de simplificar a escolha dos alunos quanto a área na qual querem fazer pesquisa, alguns professores do IF-UnB fizeram um resumo de suas atuais áreas de pesquisa e projetos.

PROFESSORA DOUTORA ROSELINE BEATRIZ STRIEDER

Professora do Instituto de Física da Universidade de Brasília (UnB). Possui graduação em Licenciatura em Física pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), mestrado e doutorado em Ciências (Área: Ensino de Física) pela Universidade de São Paulo (USP).

I. Área em que trabalha atualmente:

Ensino de Física.

II. O que faz dentro da área:

Além de atuar na Formação Inicial e Continuada de Professores de Ciências/Física para a Educação Básica, desenvolvo pesquisas relacionadas à Educação Ciência-Tecnologia-Sociedade e à Abordagem Temática Freireana na Educação Científica.

III. Projetos:

1. Abordagem Temática: elementos para a formação de professores de Física (Financiamento: CNPq/Edital Universal);

2. Temas socioambientais na educação escolar: perspectivas da complexidade (Financiamento: CNPq/Edital Ciências Humanas, Sociais e Sociais Aplicadas);

3. Articulações no Ensino de Ciências a partir da perspectiva CTS na educação básica: desempenho de estudantes, práticas educativas e materiais de ensino (Financiamento: CAPES e INEP/Programa OBEDUC);

4. Universidade de Brasília contribuindo para a formação de Novos Talentos (Financiamento: CAPES/Programa Novos Talentos);

5. Reconfigurações curriculares centradas em CTS na Educação Básica: parâmetros, espaços e estratégias (Sem financiamento). Mais informações sobre os projetos estão disponíveis no Currículo Lattes (<http://lattes.cnpq.br/1223062864841966>).

IV. Disponibilidade para orientar aluno:

Sim. Atualmente oriento um aluno PIBIC (remunerado) e dois alunos de mestrado profissional em Ensino de Ciências.

V. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Sim. Todos os projetos mencionados são desenvolvidos em conjunto com docentes e/ou alunos de graduação e pós-graduação.

VI. email:

roseline@unb.br

PROFESSORA DOUTORA LETÍCIA GONÇALVES NUNES COELHO

Bacharel, Mestre e Doutora em Física pelo Departamento de Física da Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente professora do Instituto de Física da Universidade de Brasília.

VII. Área em que trabalha atualmente:

Física da Matéria Condensada.

VIII. O que faz dentro da área:

Caracterização e síntese de materiais.

IX. Projetos:

1) Tecnologia assistiva - Muleta de látex e compósitos; Fixação de tintas e vernizes para sinalização e comunicação tátil; palmilha de látex para pés diabéticos. Estudo de materiais biocompatíveis.. 2) Estado Sólido - Experimentos de cristalografia em policristais e experimentos do tipo Pump-Probe em invar 3) Estado Sólido - Experimentos de pump-probe em supercondutores de ferro arsenio monocristalinos 4) Nanopartículas de óxido de ferro - Estudo dos efeitos da dopagem de ítrio em nanopartículas de ferrita 5) Laboratórios de ensino de Física - Coordenadora dos laboratórios de Física Experimental 1, 2 e 3.

X. Disponibilidade para orientar aluno:

Tenho interesse em alunos de graduação para os projetos de tecnologia assistiva e também na área de ensino de física para os laboratórios de Física.

XI. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Tenho interesse em projetos em conjunto que envolvam caracterização de materiais. Nosso laboratório conta com um goniômetro para medida de energia de superfície e ângulo de contato, bem como um microscópio de força atômica.

XII. email:

lcoelho@fis.unb.br

PROFESSORA DOUTORA REVA GARG

Possui graduação em Física Quimica Matematica pela University Of Jabalpur(1964), mestrado em Física pela University Of Allahabad(1966), doutorado em Physics pela University of Allahabad(1970), pós-doutorado pela University Of Roorkee(1988) e pós-doutorado pela University Of Allahabad(1974). Atualmente é pesquisadora associada da Universidade de Brasília.

XIII. Área em que trabalha atualmente:

‘Ótica Não linear’ e ‘Ciência e gênero’.

XIV. O que faz dentro da área:

1. Atualmente estou escrevendo um review sobre Ótica não linear 2. Minha recente publicação sobre questão de gênero 3. mantenho uma página “Mulheres na Física” no Facebook

XV. Projetos:

1. Faço parte do Grupo de Fundamentos, Divulgação Científica e Estudos de Gênero em Física certificado pela UnB e já está disponível na Plataformas Lattes - CNPq. 2. Atraindo meninas e jovens mulheres do DF para carreira em Física: um estudo quantitativo (em andamento).

XVI. Disponibilidade para orientar aluno:

Sempre bem vindo.

XVII. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Sempre bem vindo.

XVIII. email:

revagarg@gmail.com

PROFESSORA DOUTORA VANESSA CARVALHO DE ANDRADE

Possui Graduação em Física - Bacharelado em Pesquisa Básica pela Universidade de São Paulo (1995), Doutorado em Física pelo Instituto de Física Teórica-Unesp (2000) e estágio de Pós-Doutoramento no Observatório de Paris-Meudon, Paris-França (2001). É Professora Associada 2 do Instituto de Física da Universidade de Brasília, Tutora do PET-FÍSICA da UnB e Coordenadora do Núcleo de Relatividade e Teoria de Partículas - NRTP -IF-UnB.

XIX. Áreas de Interesse e resumo:

1. Relatividade Geral e Teleparalelismo

Uma possível abordagem para a tentativa de unificação das quatro interações fundamentais é a formulação de teorias para a gravitação baseadas em teorias de gauge. Atualmente, as teorias de gauge fornecem uma poderosa base teórica em física de partículas. Assim, as interações fraca e eletromagnética são unificadas com sucesso pela teoria de Weinberg-Salam, e as interações fortes são mediadas por partículas de gauge, conhecidas como glúons, no cenário da cromodinâmica. Interações com simetrias tão diferentes são interpretadas da mesma forma, através dos potenciais de gauge, principal ferramenta desses modelos. Entretanto, a gravitação é a única que permanece isolada das demais, numa teoria completamente à parte, a RG, que relaciona as interações gravitacionais com a estrutura do espaço-tempo, interpretando o campo gravitacional como a variável dinâmica da teoria e ao mesmo tempo responsável pela geometria do espaço. Neste contexto, temos nos empenhado em investigar a gravitação sob a perspectiva de uma teoria de gauge e mais especificamente, sob o ponto de vista do equivalente teleparalelo da RG, ou Teleparalelismo, que surge de uma teoria de gauge para o grupo das translações. Neste cenário, os efeitos gravitacionais são reservados à presença exclusiva de torção no espaço-tempo (em oposição à

visão standard de curvatura espaço-temporal) e o papel de campo fundamental, responsável primeiro pela gravitação, deixa de ser desempenhado pelo tensor métrico, sendo atribuído agora ao campo de tetradas. Como teoria de gauge, esse formalismo parece apontar para soluções de problemas chaves da RG, como a questão do tensor energia-momento da gravitação e a realização da quantização do campo gravitacional, que se mostra favorável à gaugificação do campo, já que as teorias de gauge possuem uma afinidade natural com a renormalização. Podemos citar alguns dos problemas que estão sendo investigados no momento: - Gravitoeletromagnetismo no contexto do Teleparalelismo. - Simetrias na Gravitação. - O Teleparalelismo como sistema hamiltoniano vinculado. - Quântica e gravitação teleparalela.

2. Teorias alternativas da gravitação

Investigamos teorias mais amplas para a gravitação que consideram além de curvatura, também a presença de torção no espaço-tempo, como generalizações da RG: as teorias F(T) e F(R).

3. Ensino de Física – Física na Educação Básica Na área de ensino de Física, desenvolvo algumas frentes de pesquisa (i) Inserção de tópicos de Física Moderna no Ensino Médio (ii) Ensino de Física para estudantes com TDAH (iii) Ensino de Física no contexto de Educação de Jovens e Adultos (EJA)

XX. Projetos:

- Apoio às Olimpíada Brasileira de Física nas Escolas Públicas no DF, Coordenadora Distrital. - Tutora do PET-Física UnB, que acompanha uma série de projetos em Ensino, Pesquisa e Extensão. - Projeto Instituto de Física/UnB -Escola Básica: estreitando laços para a formação de novos talentos, Programa Novos Talentos Edital 055/2012/CAPES. Duração: 2012 a 2015. Membro. Coordenadora: Roseline Strieder. - Atraindo meninas e jovens mulheres do Distrito Federal para a carreira em Física: primeiros estudos, Chamada Pública MCTI/CNPq/SPM-PR/Petrobrás no 18/2013. Coordenadora: Adriana Pereira Ibaldo. - Projeto de Extensão: ExperimentumLab- Um Programa de Iniciação à Ciência na Educação Básica. Coordenador: Cássio Laranjeiras.

XXI. Disponibilidade para orientar aluno:

- Tenho disponibilidade de 3 vagas para Iniciações Científicas. - Tutoria de estudantes que desejam ingressar no PET-FÍSICA UnB - Estou com 3 vagas para estudantes para o Mestrado Nacional Profissional em Ensino de física

XXII. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Sim, estou disponível para trabalhar em projetos em Pesquisa, Ensino e Extensão na Universidade de Brasília.

XXIII. email:

vcandrade7234@gmail.com

PROFESSOR DOUTOR IVAN SOARES FERREIRA

Possui bacharel em Física pela Universidade de Brasília (2001), mestre em Física dos Plasma e Fluidos pela mesma instituição (2003) e doutor em Astrofísica pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2008). É professor adjunto do Instituto de Física da Universidade de Brasília.

XXIV. Áreas em que trabalha e o que faz dentro das áreas:

Área 1 - Cosmologia observacional

Utilizamos dados recentes de vários instrumentos, como por exemplo os telescópios espaciais WMAP e Planck, para estudar aspectos do nosso universo tais como o seu início, a sua forma e a sua composição. Em específico, avaliamos a presença de anomalias e não gaussianidades nas medidas da Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas, pois podem ser estes os indícios fundamentais para entender como foram os primeiros segundos do Universo. A metodologia envolve a análise estatística de dados. Colaboramos com pesquisadores do INPE, do Observatório Nacional e do Astroparticule et Cosmologie Laboratoire, Université Paris VII, França.

Área 2 - Astrofísica do sistema Sol - Terra ou geofísica espacial

Aqui procuramos entender como funciona a conexão entre o Sol e a Terra, dentro do contexto do circuito elétrico global. Assim tentamos construir um modelo físico que permita, por exemplo, explicar como a atividade solar modula as tempestades elétricas em nosso planeta. Outro exemplo é a construção de um modelo para os Terrestrial Gamma ray Flashes (TGFs), emissões transientes de alta energia que ocorrem no topo da atmosfera terrestre. Toda a metodologia é baseada na construção de simulações computacionais. Colaboramos com pesquisadores do INPE.

XXV. Disponibilidade para orientar alunos:

Sim.

XXVI. e-mail:

ivan@fis.unb.br

PROFESSOR DOUTOR FÁBIO MENEZES DE SOUZA LIMA

Possui graduação em Física pela UNICAMP (1996), mestrado em Física pela Universidade de Brasília - UnB (1999) e doutorado em Física também pela UnB (2003). Estágio pós-doutoral em Física de Nanoestruturas no Dep. de Física da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), com bolsa do CNPq (2009-2010).

XXVII. Área em que trabalha atualmente:

As grandes áreas são Física Teórica e Matemática Pura. Sendo mais específico: Propriedades ópticas e de transporte em nanoestruturas semicondutoras, Evolução dos modelos atômicos, Eletrodinâmica de Weber, Mecânica Relacional, Termodinâmica fora do equilíbrio, Sistemas não-lineares, Ensino de Física, Teoria analítica dos números (funções especiais, função zeta de Riemann, problemas de irracionalidade e transcendência, etc.)

XXVIII. O que faz dentro da área:

Em cada uma das áreas acima tenho realizado trabalhos de pesquisa e dado contribuições interessantes, as quais podem ser apreciadas consultando os artigos científicos que publiquei (ver meu currículo Lattes).

XXIX. Projetos:

Embora eu esteja desenvolvendo pesquisas em todas as áreas listadas acima, no momento não estou participando de nenhum projeto específico.

XXX. Disponibilidade para orientar aluno:

Estou disponível para orientar alunos que já tenham concluído o 4 (quarto) semestre da graduação ou que estejam no início da pós-graduação.

XXXI. email:

fabio@fis.unb.br

PROFESSOR DOUTOR JORLANDIO FRANCISCO FELIX

Possui graduação em Física (Bacharel) pela Universidade Estadual de Ponta Grossa (2006) e em Eletrônica, Modalidade: Automação de Processos Industriais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (2006). Mestrado e Doutorado em Ciência de Materiais (Subárea microeletrônica) pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) com estágio de doutorado sanduíche pela University of Nottingham, Inglaterra (2011-2012). Atualmente é professor Adjunto I no Instituto de Física da UnB.

XXXII. Áreas em que trabalha atualmente:

Grande Área: Física da Matéria Condensada Experimental Subárea: Síntese e Caracterização de Materiais Nanoestruturados Filmes Finos e Interfaces Desenvolvimento de Dispositivos Eletrônicos Dispositivos Fotovoltaicos Polímeros Condutores

XXXIII. O que faz dentro da áreas:

Nossos projetos de pesquisa se inserem em um contexto de continuidade, com viés de consolidação/aprimoramento, das atividades do Laboratório de Interfaces e Nanodispositivos Semicondutores (LINS) no Instituto de Física da Universidade de Brasília, seguindo o objetivo de atrair para este laboratório jovens estudantes motivados e instigados por desafios, potencializando o desenvolvimento de pesquisas científicas e tecnológicas no centro oeste brasileiro. Nesse sentido, temos por objetivo principal o estudo e o desenvolvimento de células solares e dispositivos eletrônicos baseados, principalmente, em materiais nanoestruturados, bem como estudos básicos da nova classe de materiais bidimensionais, os chamados dicalcogenetos de metais de transição (TMDCs). Após o descobrimento do grafeno, muitos outros materiais bidimensionais (2D) têm sido desenvolvidos como, por exemplo, Transition metal dichalcogenides (TMDCs). Em particular, TMDC apresentam propriedades eletrônicas, óticas e térmicas extremamente interessantes do ponto de vista de aplicações tecnológicas (células solares, diodos, transistores, etc). Muitos materiais bidimensionais existem na forma bulk com camadas fortemente ligadas, mas com fracas interações intercamadas permitindo, dessa forma, a obtenção de camadas individuais por esfoliação. O grafeno é um exemplo único de um condutor elétrico e térmico extremamente fino, com alta mobilidade de portadores de carga.

XXXIV. Projetos:

Em curso encontram-se outros 03 (três) projetos de pesquisa financiados, entre outros que participamos como integrante. (1) Edital Universal FAPEMIG/2014 - Preparação e Caracterização de Células Fotovoltaicas a Base Filmes Finos Poliméricos, Nanocompósitos e Substratos Semicondutores Inorgânicos. (2) Edital Universal Cnpq/2013 - Síntese e Caracterização de Filmes Finos Poliméricos e Nanocompósitos para Aplicação em Células Fotovoltaicas e Dispositivos MOS Usando Sistemas do Tipo: Polímero/GaAs e Polímero/Silício. (3) Petrobras/2015 - Medidas de resistividade elétrica por indução em plugues de rocha em regime de alta pressão

XXXV. Disponibilidade para orientar aluno:

Sim.

XXXVI. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Sim.

XXXVII. email:

jorlandio@unb.br

PROFESSOR DOUTOR FERNANDO ALBUQUERQUE DE OLIVEIRA

Possui graduação em Física pela Universidade Federal de Pernambuco (1973), mestrado em Física pela Universidade Federal de Pernambuco (1975) e doutorado em Física - University of Essex (1980). Foi professor da UFF 1981-1984, e professor visitante 1991-1994 na CWRU (Cleveland-Ohio). Atualmente é professor titular da Universidade de Brasília.

XXXVIII. Área em que trabalha atualmente:

Mecânica Estatística Fora de Equilíbrio

XXXIX. O que faz dentro da área:

Difusão anômala, Física de Crescimento (simulação e resultados exatos), Mecanismo de Sincronização, Formação de Padrão.

XL. Projetos:

Soluções exatas para os expoentes dinâmicos sistemas $1+1$ dimensões. Termodinâmica de sincronização.

XLI. Disponibilidade para orientar aluno:

Vários alunos estão terminando e com a Tese definida, de modo que tenho disponibilidade.

XLII. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Depende dos projetos.

XLIII. email:

fao@fis.unb.br, faoliveira@gmal.com

PROFESSOR DOUTOR DANIEL LIMA NASCIMENTO

Possui graduação em Matemática pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1987), graduação em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1986) e doutorado em Física pela Universidade de Brasília (2003). Atualmente é professor adjunto do Instituto de Física da Universidade de Brasília, UnB.

XLIV. Área em que trabalha atualmente:

Fundamentos da Electrodinâmica Quântica.

XLV. O que faz dentro da área:

Modelos Matemáticos Alternativos.

XLVI. Projetos:

Livro sobre o assunto reunindo últimos pré-prints e publicações.

XLVII. Disponibilidade para orientar aluno:

No momento nenhuma.

XLVIII. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Já estou comprometido com projetos do meu Núcleo.

XLIX. email:

daniel@fis.unb.br

PROFESSOR DOUTOR ANTONY MARCO MOTA POLITO

Sua titulação compreende o Bacharelado em Física, o Mestrado em Física e o Doutorado em Física Teórica, pela Universidade de Brasília. Durante o doutorado, seus estudos deram-se na grande área de Física Matemática e Estatística. Atualmente é professor da Universidade de Brasília.

L. Áreas em que trabalha atualmente:

História e Filosofia da Física. Ensino de Física.

LI. O que faz dentro das áreas:

a) História da Física: estou escrevendo um livro didático sobre o assunto, baseado nas minhas notas de aula da disciplina Evolução Histórica dos Conceitos da Física.

b) Filosofia da Física: estou estudando o debate histórico e filosófico entre relacionistas e substantivistas no que diz respeito ao problema da natureza do espaço e do tempo. Em particular, dediquei-me, nos últimos dois anos, ao debate entre Newton e Leibniz sobre o espaço absoluto, empreendido no âmbito da Correspondência Leibniz-Clarke.

c) Ensino de Física: oriento alunos do Mestrado Profissional. As temáticas são variadas, mas procuro concentrar-me na produção de materiais didáticos que potencializem o ensino de conceitos de física em íntima conexão com operações de medida em aparatos experimentais simples.

LII. Projetos:

Não tenho projetos oficiais em andamento, no momento.

LIII. Disponibilidade para orientar aluno:

Tenho disponibilidade para orientar alunos em projeto de PIBIC visando a construção de um aparato experimental para estudar a dinâmica de um corpo rígido em superfícies com atrito, com fins de aplicação didática.

LIV. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Tenho disponibilidade.

LV. email:

antony@fis.unb.br

PROFESSOR DOUTOR JOSÉ WADIH MALUF

Possui graduação em Engenharia Metalúrgica pela Universidade de São Paulo (1979), mestrado em Física pela Universidade de São Paulo (1981) e doutorado em Física - University of Rochester (1985). Atualmente é professor titular da Universidade de Brasília.

LVI. Área em que trabalha atualmente:

Relatividade Geral e Gravitação

LVII. O que faz dentro da área:

Desenvolvo estudos e pesquisas teóricas sobre uma reformulação da teoria da relatividade geral de Einstein. Estes estudos foram iniciados em 1994. Trata-se da formulação teleparalela da gravitação, na qual o campo gravitacional é descrito pelos campos de tétradas e pelo tensor de torção. A estrutura geométrica da formulação teleparalela é mais ampla do que a estrutura da formulação métrica usual, o que permite o estabelecimento de novas definições e quantidades de campo.

LVIII. Projetos:

1. Energia, momento e momento angular do campo gravitacional. 2. Formulação Hamiltoniana da gravitação. 3. Invariância conforme da gravitação. 4. Radiação gravitacional. 5. O campo eletromagnético em referenciais acelerados.

LIX. Disponibilidade para orientar aluno:

Não tenho disponibilidade para orientar alunos.

LX. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Posso considerar a possibilidade de trabalho em conjunto em projetos.

LXI. email:

wadih@unb.br

PROFESSOR DOUTOR ANTONIO CARLOS PEDROZA

Possui graduação em Física pela Universidade de Brasília (1973), graduação em Matemática pela Universidade de Brasília (1973), mestrado em Física pela Universidade de Brasília (1977) e doutorado em Física Teórica - Lund University (1984). Atualmente é professor associado 4 DE da Universidade de Brasília.

LXII. Área em que trabalha atualmente:

Estrutura Eletrônica de átomos, moléculas e sólidos. Além disso, atuo no Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF).

LXIII. O que faz dentro da área:

Desenvolvimento e testes de aproximações para o formalismo da Teoria do Funcional da Densidade (DFT). No MNPEF oriento trabalhos que envolvam práticas didáticas que procurem partir do conhecimento e da realidade dos estudantes.

LXIV. Projetos:

Elaboração de propostas para a Função de Correlação de Pares na aproximação não-local WDA da DFT; e testes em sistemas atômicos. Conexão da aproximação WDA com a teoria livre de orbitais da DFT (Orbital Free DFT). Obtenção de potenciais de troca exatos na DFT. Testes de aproximações que incluem a correções de van der Waals para a DFT.

LXV. Disponibilidade para orientar aluno:

Sim.

LXVI. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Em princípio sim, mas, claro, depende da natureza dos projetos.

LXVII. email:

pedroza@fis.unb.br

PROFESSOR DOUTOR RICARDO GARGANO

Possui graduação em Física pela Universidade de Brasília (1990), mestrado em Física pela Universidade de Brasília (1993) e doutorado em Química-Física Teórica- Università Degli Studi Perugia, Itália (1997) e Pós-Doutorado nos Departments of Physics and Chemistry, Quantum Theory Project, University of Florida, USA (2014-2015). Atualmente é Professor Titular do Instituto de Física da Universidade de Brasília.

LXVIII. Área em que trabalha atualmente:

Física Atômica e Molecular.

LXIX. O que faz dentro da área:

Em geral, a área de Física Atômica e Molecular se preocupa em descrever todas as propriedades eletrônicas e dinâmicas de sistemas moleculares, tais como: sistemas biológicos, polímeros, nanotubos, entre outros.

LXX. Projetos:

Temos muitos Projetos em andamento, tanto com Grupos de Pesquisa nacionais (Institutos de Biologia e Química - UnB, Universidade de São Carlos - SP, Universidade Federal do Pará e Maranhão, Universidade Estadual de Goiás) quanto com grupos internacionais (Itália, Estados Unidos, Espanha e Inglaterra).

LXXI. Disponibilidade para orientar aluno:

Nesse semestre, infelizmente não tenho disponibilidade para orientar novos alunos, pois estou orientando 9 alunos de pós-graduação. Esse número está acima da quota máxima permitida (8 alunos) pelo nosso Instituto.

LXXII. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Estamos sempre abertos para colaborações e de trabalhar em conjunto em outros Projetos.

LXXIII. email:

gargano@unb.br

PROFESSOR DOUTOR PAULO CÉSAR DE MORAIS

Possui graduação em Física pela Universidade de Brasília (1977), graduação em Química pela Universidade de Brasília (1976), mestrado em Física pela Universidade de Brasília (1980), doutorado em Física pela Universidade Federal de Minas Gerais (1986) e pós-doutorado pela Bell Communications Research (1987-1988). Professor titular do Instituto de Física da Universidade de Brasília até 2013. Professor Emérito da Universidade de Brasília (2014).

LXXIV. Área em que trabalha atualmente:

Nanomateriais.

LXXV. O que faz dentro da área:

Caracterização fisicoquímica,

LXXVI. Projetos:

Nanopartículas magnéticas, nanocompósitos magnéticos.

LXXVII. Disponibilidade para orientar aluno:

Um pouco restrita, porém não-nula.

LXXVIII. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Muita.

LXXIX. email:

pcmor@unb.br ; moraispc@aol.com

PROFESSOR DOUTOR VIJAYENDRA KUMAR GARG

Possui graduação em Física, Matemática e Química da Universidade de Agra (1963), Mestrado em Física - Universidade de Agra (1966) e doutorado em Física da Matéria Condensada - Instituto Indiano de Tecnologia (IIT-R) (1971). Atualmente é Pesquisador Sênior na Universidade de Brasília. Foi pesquisador PQ 1C / 1B (1976-1999), desde 1969 até o presente, com uma média de mais que 4

trabalhos de pesquisa publicados anualmente sem qualquer interrupção anual. Tem participado e/ou colaborado no desenvolvimento de dezenas de teses de mestrado e de doutorado em espectroscopia Mössbauer. Em abril de 1995 registou, junto com Instituto nacional de propriedade industrial Mossbauer Effect Assistant; que foi utilizado na missão Marte (ROVERs com MIMOS). Implantou o laboratório experimental de espectroscopia Mössbauer na UFES (Auxílio -CNPq), CVRD (Vitória, ES) UnB (Auxílio -FAPDF) e CVRD (Belo Horizonte). É o responsável pelo laboratório de espectroscopia Mössbauer, da Universidade de Brasília que está aberto a qualquer pesquisador do Brasil. Tem mais de 48 anos de experiência em física experimental, design e manutenção de instrumentação científica. Tem interesses no desenvolvimento de tecnologia, instrumentação e serviços científicos. Ao longo desses anos estudou EFG, MSD e anisotropia quadrupolar (teórico e experimental) em cristais que contêm ferro; cálculo de fator f sem recuo e deslocamento térmicos; estudos estruturais e ligação de ferro (II), ferro (III) de baixo spin; estudos estruturais de compostos e de ligação de ferro (II), ferro (III) nos compostos de baixa spin; soluções congeladas e estudos de decomposição térmicas, estudos de compostos de lantanídeos tratados; sistemas de óxidos mistos; dispersão de impurezas; minerais de sulfetos; argilas; estudos em minerais natural que contém ferro para obter informações estruturais; comportamento magnético anômalo; cinética de oxidação térmica; redes neurais artificiais; lógica de Fuzzy; algoritmos genéticos em espectroscopia Mössbauer; efeito climático em solos marítimo da Antártica; solos vulcânicas; sedimentos; rochas; produtos siderúrgicos e caracterização da poluição industrial; produtos do processo de moagem; ligas; análise automática Mössbauer; superparamagnetismo; caracterização de ferritas; efeito da radiação de íons pesados em esmeralda; as concentrações de metais pesados em manguezais; manejos de água; nanopartículas e fluidos magnéticos. Nos últimos anos, seus esforços concentraram-se em estudos da biodisponibilidade de fármacos assistido e em sistemas avançados de bateria baseado de LiFePO_4 . Atualmente está envolvido em liberação assistida de fármacos, projeto com apoio de CAPES. Recentemente dois pós docs terminaram 1 ano de estadia cada um, e um professor visitante especial também passou 3 meses laboratório.

LXXX. email:

garg@unb.br

PROFESSOR DOUTOR VIKTOR DODONOV

Concluiu o doutorado em Física Teórica pelo Instituto Físico-Técnico de Moscou em 1976. Atualmente é professor titular do Instituto de Física da Universidade de Brasília. Publicou 221 artigos em periódicos especializados e 84 trabalhos em anais de eventos. Possui 22 capítulos de livros e 1 livro publicados, além de 8 volumes de livros e 4 números/volumes especiais editados em revistas internacionais. Estes trabalhos foram citados mais de 3900 vezes por outros autores. Seu índice de Hirsch é $H=32$. Membro de corpo editorial da revista *Journal of Russian Laser Research* e da revista *Mathematics*. Fellow of Institute of Physics (Inglaterra). Participou de 62 eventos no exterior e 22 no Brasil. Participou na organização de 25 eventos internacionais e nacionais.

LXXXI. Área em que trabalha atualmente:

Efeito Casimir dinâmico, eletrodinâmica em cavidades com parâmetros dependentes de tempo, relações de incerteza, estados não-clássicos, sistemas quânticos abertos e dependentes de tempo.

LXXXII. O que faz dentro da área:

Penso e calculo, procurando soluções analíticas.

LXXXIII. Disponibilidade para orientar aluno:

Se algum aluno da pós-graduação tem interesse, posso orientar.

LXXXIV. email:

vdodonov@fis.unb.br

PROFESSOR DOUTOR MARCUS BASTOS LACERDA SANTOS

Possui graduação em Bacharelado em Física pela Universidade de Brasília (1972), mestrado em Física pela Universidade Federal de Pernambuco (1975) e doutorado em Physique des Solides - Université de Paris XI (Paris-Sud) (1985). Pós-Doc em Dinâmica de Fluidos Computacional no DTU - Dinamarca. Aposentado em 07/08/2014 como Professor Associado-4 do IF-UnB, onde continua exercendo atividades de pesquisa como voluntário.

LXXXV. Área em que trabalha atualmente:

Física da Matéria Condensada, especificamente 'Soft Matter', com ênfase em: Cristais Líquidos, Colóides envolvendo argilas, surfactantes, ferrofluidos.

LXXXVI. O que faz dentro da área:

Trabalho experimental principalmente nas técnicas de DLS (Espalhamento de luz dinâmico) e SAXS (raios-X em baixo ângulo). Atualmente mais concentrado na análise de dados provenientes dessas técnicas via colaborações (v. abaixo).

LXXXVII. Projetos:

Atualmente meus projetos em andamento são os seguintes:

1) Colóides de argila sintética exibindo fase nemática: DLS e SAXS 2) Colóides de argila sintética exibindo fase nemática: Texturas em microscópio polarizado 3) Cristais líquidos liotrópicos (eventualmente

dopados com ferrofluidos): DLS e SAXS 4) Cristais líquidos liotrópicos: Reologia 5) Instrumentação: reativação de espectrômetro DLS

- Como ilustração, listo a seguir minhas principais colaborações atuais:
- Prof. Dr. Geraldo J. da Silva (IF-UnB)
- Prof. Dr. Antonio M. Figueiredo Neto (IFUSP)
- Prof. Dr. Paulo Ricardo G. Fernandes (DFi-UEM)

LXXXVIII. Disponibilidade para orientar aluno:

Nos últimos 3 anos tenho colaborado com a orientação dos seguintes alunos: M.Sc. Celso L. S. Risi (doutorando, IFUSP) M.Sc. Mário A. S. Altoé (doutorando, IF/UnB - atualmente em doutorado-sanduíche na Noruega)

Havendo interesse por parte do aluno nas linhas de pesquisa em pauta, outros projetos de orientação poderão ser considerados.

LXXXIX. email:

marcus@fis.unb.br

PROFESSOR DOUTOR SÉRGIO COSTA ULHOA

Possui graduação em Física (bacharelado e licenciatura) pela Universidade de Brasília (2005). Atualmente é professor da Universidade de Brasília.

XC. Área em que trabalha atualmente:

Gravitação.

XCI. O que faz dentro da área:

Trabalho com uma teoria alternativa de gravitação chamada de teleparalelismo equivalente à relatividade geral.

XCII. Projetos:

- Teoria teleparalela conforme; - Modos quase-normais de buracos negros regulares; - Relatividade numérica; - Gravitação quântica; - Termodinâmica gravitacional; - Correções não-comutativas da geometria.

XCIII. Disponibilidade para orientar aluno:

Tenho.

XCIV. Disponibilidade para trabalhar em conjunto em projetos:

Me disporia desde que achasse o projeto interessante.

XCV. email:

ulhoa@unb.br

PROFESSOR DOUTOR LUIZ FERNANDO RONCARATTI

Possui graduação em Física pela Universidade de Brasília (2003), mestrado em Física pela Universidade de Brasília (2006) e doutorado em Química pela Università degli Studi di Perugia (2009). Atualmente é Professor Adjunto no Instituto de Física da Universidade de Brasília.

XCVI. Áreas atuais, atuação e projetos:

1 - Dinâmica de crescimento de microalgas e a interação da cultura com gases e fótons. Neste projeto desenvolvemos e utilizamos Fotobiorreatores automatizados para controlar os parâmetros físicos e químicos que condicionam o desenvolvimento da cultura. O sistema funciona como um "aquário robótico", controlado por circuitos eletrônicos, sensores e atuadores, todos relacionados via software. Acoplados ao sistema temos um espectrofotômetro e um espectrômetro de massa. Com o primeiro, podemos medir continuamente as variações no espectro de absorção ótica da cultura. Com o segundo, podemos medir as concentrações de todas as moléculas presentes na linha de gases que circulam pela cultura. 2 - As câmaras de Wilson, também conhecidas como câmaras de nuvens, são aparatos experimentais utilizados para rastrear partículas carregadas (por exemplo, alfas e betas). Elas podem ser realizadas em uma pequena região do espaço preenchida com álcool supersaturado. Estamos construindo uma câmara de nuvens com sistema de resfriamento termoeletrônico e sistema de vídeo acoplado. Ela poderá ser utilizada pelos nossos alunos nos laboratórios didáticos avançados ou para divulgação científica para um público mais amplo. Um desafio interessante seria utilizá-la na tentativa de se visualizar o retroespalhamento de uma partícula alfa por uma folha de ouro (experimento de Rutherford, Geiger e Mardsen). 3 - Estudo teórico da dinâmica de íons aprisionados em armadilhas de radio frequência.

XCVII. Disponibilidade para orientar aluno:

Sim, tenho disponibilidade de orientar alunos. Aliás, estou procurando alunos de mestrado!

XCVIII. email:

roncaratti@fis.unb.br

PROFESSOR DOUTOR OLAVO LEOPOLDINO DA SILVA FILHO

Possui graduação em Filosofia pela Universidade de Brasília (1999), graduação em Física pela Universidade de Brasília (1986), graduação em Ciências da Computação pela Universidade de Brasília (1994), graduação em Matemática pela Universidade de Brasília (1988), mestrado em Filosofia pela Universidade de Brasília (2001), mestrado em Física pela Universidade de Brasília (1989) e doutorado em Física pela Universidade de Brasília (1995). Atualmente é professor adjunto da Universidade de Brasília.

XCIX. Área em que trabalha atualmente e resumo:

Trabalho com Fundamentos Matemáticos e Epistemológicos da Mecânica Quântica. Assim, minhas pesquisas se voltam para a análise de diversas questões da Mecânica Quântica, principalmente quanto ao desenvolvimento do formalismo e sua interpretação, de modo a remover inconsistências ou mitos que grassam na área.

Tenho me dedicado já há mais de vinte anos ao estudo das várias possibilidades, existentes e pensáveis, de interpretação da Mecânica Quântica. Assim, tenho estudado interpretações como: Estocástica (de la Peña), Estatística (Ballentine), Muitos Mundos (Wheeler, vários) e suas descendentes, como Muitas Mentas, etc., Totalidade (Bohm), Compenhagen (Heisenberg, vários), Histórias Coerentes (Griffths), entre outras.

Sobre esse tema, recentemente, escrevi um livro com uma alternativa a essas interpretações que, de fato, contempla partes delas e as harmoniza em um todo coerente e sem as supostas estranhezas que perpassam as interpretações mais usuais.

No curso dos desenvolvimentos sobre as várias possibilidades de interpretação da Mecânica Quântica em termos que não envolvam as contradições (aparentes ou não) usuais, foi desenvolvida uma equação de Langevin que mostrou recuperar, como uma equação dinâmica mas de caráter estocástico, os resultados usuais que se obtém com a Equação de Schrödinger, que seria, portanto, uma teoria de campo médio existindo sobre a equação mais fundamental de Langevin.

Essa equação, entretanto, coloca vários desafios (alguns já tradicionais no âmbito da Mecânica Quântica) em uma roupagem nova e, portanto, passível de ser tratada sob novos aspectos. Um exemplo disso é a formulação da Mecânica Quântica incorporando dissipação, algo que vem sendo tentado sob outras óticas por diversos autores.

Outro exemplo possível é o uso dos conhecimentos já existentes no âmbito das equações de Langevin (muito conhecidas e estudadas, por exemplo, pelas engenharias, principalmente a elétrica) para abordar temas já bem conhecidos da Mecânica Quântica, mas em um nível de precisão e controle mais profundo.

Uma terceira possibilidade é formular a mecânica quântica no espaço de fase (sem o uso das chamadas Distribuições de Probabilidade, que assumem valores negativos, como é o caso da distribuição de Wigner).

C. Disponibilidade para orientar aluno:

Já me encontro, atualmente, orientando projeto de PIBIC sobre o tema da dissipação em Mecânica Quântica. Estou disponível para orientar alunos em PIBIC ou Mestrado Acadêmico em qualquer um

desses temas (mesmo os que já contam com alunos, já que o problema é amplo e complexo).

No âmbito do mestrado profissional, posso orientar alunos relativamente à transposição didática tanto da discussão sobre a Mecânica Quântica e suas origens (principalmente seus primórdios pré 1927, Congresso Solvay) quanto da discussão sobre as interpretações da mecânica quântica e a possibilidade de transpô-las para o contexto do Ensino Médio.

CI. email:

olavolsf@gmail.com



Expediente Physicae Organum – Revista de Estudantes de Física da UnB
Volume 1. Número 2

**Publicação Semestral do Corpo Discente
do Departamento de Física da UnB
Brasília, Setembro de 2015**

Universidade de Brasília
Reitor: Ivan Marques de Toledo Camargo
Vice-Reitora: Sônia Nair Bão

Diretoria do Instituto de Física
José Felipe Beaklini Filho
José Francisco da Rocha Neto

Conselho Editorial
Dr. Olavo Leopoldino da Silva Filho

Comissão Editorial

Lilah Fialho
Lo Rhuama Florscuk
Rennan Cardoso

Comitê Científico

Dra. Adriana Pereira Ibaldo
Dr. Antonio Carlos Pedroza
Dr. Antony Marco Mota Polito
Dr. Bernardo Mello
Dr. Clovis Maia
Dr. Ivan Soares Ferreira
Dr. José David Manguiera Vianna
Dr. Junio Márcio Rosa Cruz
Dra. Leticia Nunes Coelho
Dr. Marcus Bastos Lacerda Santos
Dr. Olavo Leopoldino da Silva Filho
Dra. Reva Garg
Dra. Roseline Strieder
Dra. Vanessa Carvalho

Contatos

<http://periodicos.unb.br/index.php/physicae>
physicaeorganum@gmail.com