

# Campos escalares e suas aplicações na física

M.A.M. Souza\*  
Instituto Federal do Piauí, 64211-145,  
Parnaíba, Piauí, Brasil.

## RESUMO

Neste artigo é abordada a utilização de campos escalares na física dentro das mais diversas áreas de pesquisa, como a física de partículas elementares, matéria condensada e cosmologia. A versatilidade dos campos escalares deram-lhes destaque no cenário científico contemporâneo, levando-os a serem utilizados na formulação da teoria do campo de Higgs, nas teorias da inflação cósmica e da energia escura e no estudo de defeitos topológicos.

**Palavras-chave:** campos escalares; campo de Higgs; defeitos topológicos; inflação cósmica; energia escura

## 1. Introdução

O século XX foi marcado pelo surgimento de uma das maiores vertentes da física, a física moderna. Os principais avanços tecnológicos do mundo moderno devem-se, em parte, ao surgimento da mecânica quântica e da teoria da relatividade, que serviram de base para a descrição de uma série de fenômenos nas escalas atômica e nuclear. Como exemplo, temos a supercondutividade, fenômeno que ocorre a baixas temperaturas, aproximadamente 4 K, em que um material comporta-se como um condutor perfeito com resistência efetivamente nula, levando à superfluidez de portadores de carga no mesmo, descrita pela teoria BCS [1] de John Bardeen (1908-1991), Leon Cooper e John Robert Schrieffer, que tem se mostrado extremamente eficaz na busca por sistemas mais eficientes para transmissão de informação e na construção de aceleradores de partículas.

A teoria BCS sugere que os elétrons de spin contrários, em um material no estado supercondutor, acoplam-se aos pares formando os pares de Cooper, prefigurando um estado de mais baixa energia, como em um condensado de Bose-Einstein, gerando a supercondutividade. A interação capaz de sobrepor a repulsão coulombiana entre os elétrons está associada à interação destes com a rede cristalina do material, por meio do quantum de vibração da rede denominado fônon.

Temos também inúmeros avanços

na medicina, seja do ponto de vista instrumental, para diagnóstico, por meio de aparelhos de processamento de imagem, como a ressonância magnética nuclear, ou mesmo do ponto de vista clínico, através de tratamentos de radioterapia. As teorias modernas da física têm contribuído para o desenvolvimento de técnicas de tratamento na medicina, além de servirem como arcabouço teórico para outras áreas, como a astrofísica e a cosmologia.

Foi também no início do século passado que ocorreu a descoberta do núcleo atômico pelo físico Ernest Rutherford (1871-1937), considerada o marco inicial da física nuclear e de partículas elementares. A possibilidade de se obterem informações acerca da estrutura atômica, por meio de colisões com partículas subnucleares, abriu um leque de possibilidades na busca pela compreensão

**Os principais avanços tecnológicos do mundo moderno devem-se, em parte, ao surgimento da mecânica quântica e da teoria da relatividade, que serviram de base para a descrição de uma série de fenômenos nas escalas atômica e nuclear**

e aplicação das energias envolvidas nas reações com matéria bariônica, que é a matéria ordinária formada por prótons e nêutrons, como também no conhecimento das estruturas internas do núcleo. Abriam-se as portas de uma

nova área de conhecimento em que os resultados experimentais só podiam ser obtidos por mecanismos de colisão.

Com as teorias da mecânica quântica matricial de Werner Heisenberg (1901-1976), a versão ondulatória de Erwin Schrödinger (1887-1961) e a formulação relativística de Paul Dirac (1902-1984), uma descrição teórica mais precisa acerca dos processos nucleares e de interação entre partículas elementares pôde ser obtida, resultan-

Autor de correspondência. E-mail: msouza@ifpi.edu.br.

do nas teorias mais modernas da cromodinâmica quântica de David Politzer, Frank Wilczek e David Gross; na eletrodinâmica quântica de Richard Feynman (1918-1988), Sin-Itiro Tomonaga (1906-1979) e Julian Schwinger (1918-1994), e na teoria eletrofraca de Steven Weinberg, Abdus Salam (1926-1996) e Sheldon Glashow, que unifica a interação eletromagnética com a Teoria de Fermi para a interação fraca mediante a atuação de campos carregados por bósons vetoriais.

Nesse cenário, verificou-se que as interações entre as partículas ocorriam através de campos, e cada campo poderia ser representado por uma partícula mediadora, denominada bóson, como pode ser visto na Tabela 1, onde as massas possuem unidade em  $\text{GeV}/c^2$ , em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Para interação eletromagnética, temos o fóton; a força nuclear forte é mediada pelo glúon, e a força nuclear fraca é transmitida pelos bósons  $Z^0$ ,  $W^+$  e  $W^-$ , sendo que todas essas partículas adquirem suas propriedades de um campo escalar complexo conhecido como campo de Higgs. Em uma teoria de grande unificação, como a teoria das supercordas, que quantiza o campo gravitacional e unifica as quatro interações fundamentais, aparece uma partícula mediadora para força gravitacional, denominada gráviton, ainda não observada diretamente em aceleradores de partículas.

A seguir, apresentaremos uma abordagem breve e qualitativa da utilização de campos escalares em um número delimitado de fenômenos observados no século XX, estendendo-se da física de partículas, passando por sistemas elásticos contínuos em matéria condensada, até a dinâmica do Universo nas teorias cosmológicas. Esses tópicos foram escolhidos devido a sua indiscutível importância histórica e por estarem na vanguarda das pesquisas

na área de física. A dinâmica dos campos escalares é obtida através de um formalismo não trivial, onde toda a sua descrição está associada às leis de conservação, simetrias e ao formalismo da teoria quântica de campos, além do fato de muitos dos modelos teóricos propostos estarem estruturados em uma base experimental e alguns ainda terem sua comprovação em aberto.

As teorias são abordadas neste trabalho para fins de divulgação científica, visando difundir conceitos relevantes nas áreas de pesquisa em física entre os estudantes e professores do Ensino Médio que possuem interesse em ciência contemporânea, servindo como motivação para aqueles que pretendem ingressar nessas áreas e mostrando a importância das descobertas científicas para a sociedade e para a compreensão do Universo. Busca-se, dessa forma, contextualizar o estudo de campos escalares com conceitos bastante difundidos no Ensino Médio, como temperatura, pressão e potencial elétrico.

Nesse contexto, na seção 2 abordaremos a utilização de campos escalares na física de partículas; em seguida, na seção 3, discutiremos como o campo escalar pode ser utilizado para descrever a estrutura de defeitos topológicos em sistemas de matéria condensada, ou mesmo em cosmologia; na seção 4, vamos estudar a dinâmica de campos escalares no contexto da aceleração cósmica do Universo, e as considerações finais serão feitas na seção 5.

## 2. Campos escalares na física de partículas

A natureza pode ser totalmente compreendida por meio da descrição de quatro interações básicas, responsáveis pelo comportamento dos sistemas físicos da escala subatômica à escala astronômica. Temos a bem conhecida interação gravitacional, responsável pela

dinâmica orbital dos corpos celestes, com efeitos significativos no estudo de objetos massivos do Universo, como buracos negros e estrelas de nêutrons. Ela pode ser interpretada geometricamente como resultado da curvatura do espaço-tempo devido à presença de matéria, tendo seus efeitos desprezíveis na escala atômica, o que dificulta a quantização do campo gravitacional.

A interação eletromagnética age nos corpos dotados de carga elétrica e também atua nos fenômenos magnéticos. Explica as ligações moleculares entre compostos por meio das forças interatômicas, como as pontes de hidrogênio e a ligação de Van der Waals. É responsável pelo movimento dos elétrons nos orbitais atômicos, além de explicar muitas propriedades da matéria. Tem inúmeras aplicações no meio tecnológico, explicando o funcionamento dos equipamentos de transmissão via satélite, de gravação magnética, equipamentos elétricos e eletrônicos, no processamento de sinais elétricos de forma digital e analógica e na computação quântica.

A interação fraca é responsável pelo decaimento beta. É um processo de transição radioativa entre estados instáveis de alguns núcleos com a emissão de elétrons de alta energia. A teoria inicial do decaimento beta tinha sérios problemas, pois não dava conta do espectro de energia observado experimentalmente e que não podia ser comportado por um único elétron. Em 1930, Wolfgang Pauli (1900-1958) postulou a existência do neutrino, outra partícula que também era emitida no decaimento, sem carga, sem massa e spin  $1/2$ ; a existência de uma partícula desprovida de massa, de carga nula e momento de spin  $1/2$  era necessária para a preservação dos princípios de conservação de energia e momento angular. No interior do núcleo, o decaimento beta pode ser expresso pelas seguintes reações:

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \quad (1)$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (2)$$

As Eqs. (1) e (2) mostram o decaimento

Tabela 1: Bósons elementares.

Nome	Símbolo	Massa	Spin	Descoberta
Fóton	$\gamma$	0	1	1905
Glúon	$g$	0	1	1978
Bósons carregados	$W^\pm$	80	1	1983
Bóson neutro	$Z^0$	91	1	1983
Gráviton	$G$	0	2	-
Bóson de Higgs	$H$	126	0	2012

beta positivo e negativo com a emissão de um pósitron e um neutrino do elétron ou a emissão de um elétron e um antineutrino do elétron, respectivamente. Uma teoria mais precisa só foi proposta em 1934, por Enrico Fermi (1901-1954). Anos mais tarde, essa teoria foi aprimorada com os trabalhos de Richard Feynman e Murray Gell-Mann (1929-2019), sendo utilizado na descrição da interação de Fermi um tratamento relativístico coerente a partir da equação de Dirac.

A teoria eletrofraca descreve a emissão beta por meio da transformação de quarks no interior de prótons e nêutrons, com a emissão virtual dos bósons  $W^+$  e  $Z^0$ , como pode ser visto na Fig. 1, onde um quark  $d$  se converte em um quark  $u$  pela emissão do bóson  $W^-$ , que decai em seguida no pósitron e no neutrino. As aplicações do processo de decaimento beta estão presentes em uma classe considerável de fenômenos, abrangendo desde a fisiologia humana até o desenvolvimento de tecnologia espacial e industrial. Um fenômeno interessante que envolve a emissão beta ocorre no interior do corpo humano; esse processo de radiação é responsável pelo funcionamento do músculo cardíaco.

No sangue humano, encontram-se diluídos cerca de 30 mg de potássio-40 ( $K^{40}$ ), que é um isótopo radioativo do potássio-39, concentração que é suficiente para emissão de partículas beta. Dentro do coração existem duas cavidades, chamadas de aurículas direita e esquerda: a primeira tem a função de bombear sangue na circulação pulmonar e a segunda é responsável por distribuir sangue enriquecido com oxigênio por todas as partes do corpo. Ambas são dotadas de células e feixes de fibras nervosas denominadas de nódulo sinoauricular e feixe de Bachman, respectivamente.

O potássio diluído no sangue, den-

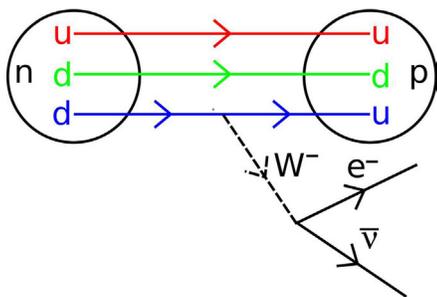


Figura 1 - Diagrama de Feynman para o decaimento beta negativo com base na teoria eletrofraca. Fonte: Wikimedia Commons.

tro dessas cavidades, sofre desintegração por emissão de elétrons e estes, ao colidirem com as terminações nervosas nas paredes das cavidades cardíacas, geram um estímulo responsável pela contração e expansão do músculo cardíaco, possibilitando, desse modo, que o sangue seja bombeado por todas as partes do corpo.

A força nuclear forte é responsável por ligar prótons e nêutrons no interior do núcleo atômico e, consequentemente, assegurar a estabilidade do núcleo e da matéria hadrônica. É a força de maior intensidade na natureza, daí o nome da interação. A interação hadrônica pode ser descrita a partir da dispersão nêutron-próton à alta energia. Esse processo é descrito em termos da energia de ligação do dêuteron, que é um núcleo composto por um próton e um nêutron. O problema é tratado fisicamente com os princípios quânticos de interação entre dois corpos.

Os resultados das experiências de espalhamento entre núcleons levam às seguintes propriedades da interação nucleônica: a propriedade de saturação, isto é, um único núcleon só pode interagir com um número limitado de outros núcleons; a independência da carga, ou seja, as forças nucleares são simétricas em relação à carga; a intensidade de interação numa reação (nn) é idêntica a uma reação (pp), e a presença de forças de troca.

Na mecânica quântica, quando duas partículas interagem mutuamente, existe sempre um estado em que alguma propriedade pode ser compartilhada, produzindo uma interação de troca para os núcleons; assim, Heisenberg supôs que essa propriedade seria a carga [2]. A propriedade de força de troca está ligada intimamente à teoria mesônica das forças nucleares [3] proposta pelo físico japonês Hideki Yukawa (1907-1981), em 1935, que, em analogia à interação eletromagnética mediada pela troca de fótons, supôs que a interação hadrônica entre núcleons fosse resultado da troca de um méson  $\pi$ ; o fato de essa partícula possuir massa possibilitava caracterizar tal interação como sendo de curto alcance; além disso, os mésons possuem carga ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ) ou podem ser eletricamente neutros ( $\pi^0$ ), requisito necessário para que, em uma interação, a carga das partículas envolvidas seja permutada. Nesse processo, explicitamente, um próton pode converter-se em um nêutron e vice-versa.

Hoje em dia, a teoria mais moderna da força nuclear forte, a cromodinâmi-

ca quântica, foca-se na ligação entre os componentes de prótons e nêutrons, denominados quarks [4], atribuindo a esses últimos a propriedade de carga de cor e de sabor, sendo o glúon a partícula responsável por essa interação.

A maior aplicação da força nuclear forte ocorre nos reatores de fissão nuclear utilizados para produzir energia elétrica, onde o urânio, ao ser bombardeado por nêutrons, absorve essas partículas e torna-se instável, sofrendo uma bipartição (gerando dois novos núcleos mais leves). A energia correspondente à força nuclear forte que unia os prótons e nêutrons no núcleo de urânio é liberada na forma de energia cinética dos dois núcleos residuais, energia essa que pode ser aproveitada dentro do reator de uma usina nuclear ou pode ser usada para fins bélicos, como no caso da bomba atômica.

A unificação da interação eletromagnética com as interações nucleares fraca e forte resultou no conhecido modelo padrão da física de partículas elementares, que agrupa todas as partículas elementares e suas antipartículas em quatro categorias: léptons, quarks, bósons e hádrons, como pode ser visto de forma resumida na Fig. 2. E eis aqui o ponto chave de toda a nossa discussão, pois para que todo o modelo funcione é necessário um campo, responsável por atribuir às famílias de partículas elementares as propriedades de massa tais quais as conhecemos. Trata-se, portanto, de um campo escalar fundamental, representado pelo bóson de Higgs, descoberto em julho de 2012 no LHC [5] (Large Hadron Collider - Grande Colisor de Hádrons), vindo esses resultados a serem corroborados no início de 2013, o que valeu o Prêmio Nobel de Física para Peter Higgs e François Englert, que previram teoricamente a existência do bóson em 1964.

## 2.1. Afinal, o que é um campo escalar?

De forma geral, podemos dizer que um campo é uma entidade física que possui existência real ou complexa, podendo ter natureza escalar, vetorial e tensorial; ele permeia o espaço-tempo, associando a cada ponto uma grandeza física, permitindo a interação entre partículas. Os campos, na sua essência mais abstrata, são energia e, consequentemente, em altas energias e regimes relativísticos, também são matéria; por isso os bósons de calibre são o resultado da quantização de campos fundamentais (quantizar significa dividir

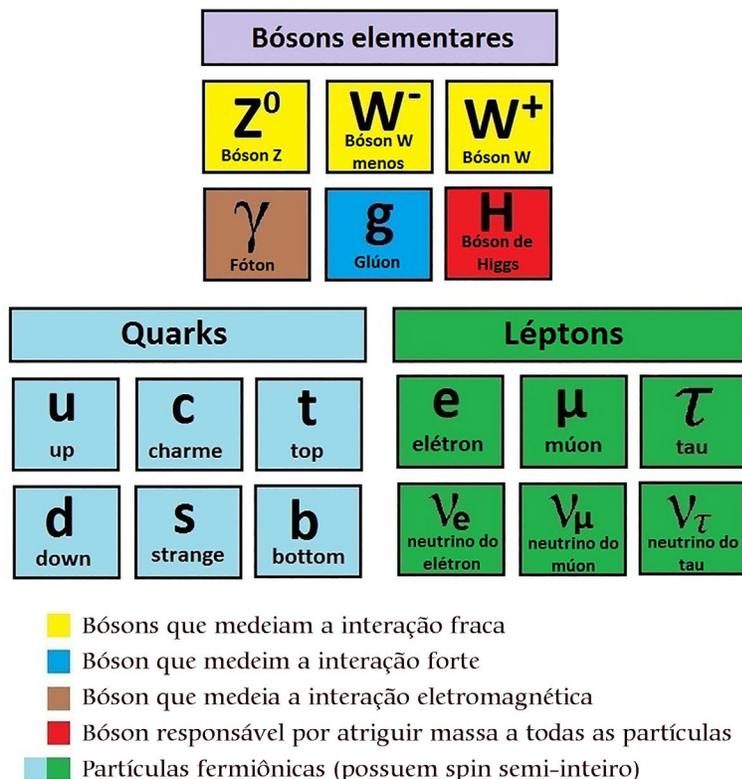


Figura 2 - Modelo padrão da física de partículas, onde temos representados os léptons, os quarks e os bósons mediadores de interação.

em partes discretas). Os campos tensoriais são muito utilizados na relatividade geral (tensor de curvatura de Riemann) e no estudo de tensões e deformações em materiais. O tensor é a generalização de um escalar e um vetor, ou seja, um campo tensorial (ou um tensor propriamente dito) associa um escalar e/ou um vetor a cada ponto do espaço.

Os campos vetoriais associam unicamente um vetor a cada ponto do espaço como os campos elétrico ( $\mathbf{E}$ ), magnético ( $\mathbf{B}$ ) e o campo de velocidades em um fluido ( $\mathbf{v}$ ). Esses campos podem ser obtidos por meio de gradientes de campos escalares. Na física de partículas, os bósons com spin 1 são denominados bósons vetoriais, devido ao fato de se originarem de campos vetoriais, como por exemplo o fóton, que media a interação eletromagnética entre prótons e elétrons; os bósons  $W^\pm$  e  $Z^0$ , que mediam a interação fraca associada a léptons como neutrinos, elétrons e pósitrons, e o glúon, que media a força forte entre os quarks. Os bósons com spin 2 são tensoriais por se originarem de campos tensoriais, sendo muito utilizados na construção de teorias quânticas para gravitação, como por exemplo o gráviton. Já os bósons com spin 0 são escalares, pois são provenientes de campos escalares como o bóson de

Higgs já citado anteriormente.

Dentro do foco deste trabalho, campos escalares podem ser definidos como uma função da posição de um ponto do espaço, independentemente do sistema de coordenadas adotado, sejam as coordenadas definidas no espaço euclidiano ou no espaço-tempo de Minkowski. São descritos como um tensor de ordem zero, por isso são invariantes relativísticos, possuindo o mesmo valor quando mensurados por observadores distintos em referenciais separados. Na

física clássica, são comumente empregados para representar distribuição de temperatura em um meio ou o campo de pressões em um fluido. Também estão associados à energia potencial de um campo de forças, como o potencial gravitacional ou o potencial elétrico na eletrostática.

Matematicamente, temos a seguinte definição: Seja  $R$  uma região do espaço tridimensional e seja  $f$  uma função definida em  $R$ . Se para cada ponto  $P$  pertencente a  $R$ ,  $f$  associa uma única grandeza escalar  $f(P)$ , então a região  $R$  associada aos valores de  $f$  em cada um de seus pontos é chamado campo escalar [6]. Em outras palavras, o campo escalar é a região do espaço delimitada por um conjunto de pontos associados a uma função escalar do tipo  $f(r)$ , onde  $r$  é a coordenada de posição no espaço.

Na Fig. 3, temos a representação do campo de temperatura  $T$  no globo terrestre. Como pode ser observado, os valores de  $T$  variam conforme as coordenadas de latitude e longitude, ou seja, conforme a posição, logo a distribuição de temperatura pode ser considerada um campo escalar.

Na Fig. 4, temos a representação da pressão atmosférica média no globo terrestre em períodos sazonais distintos a nível do mar. A pressão pode variar conforme a profundidade ou posição de um ponto em um fluido, conforme a lei de Stevin  $p = p_0 + \rho gh$ , onde  $p$  é a pressão na profundidade  $h$ ,  $p_0$  é a pressão na superfície do fluido,  $\rho$  é sua densidade e  $g$  é a gravidade. Por sua vez, a pressão exercida pela atmosfera na superfície da Terra, além de depender da altitude, também depende de fatores como a temperatura das massas de ar e da ra-

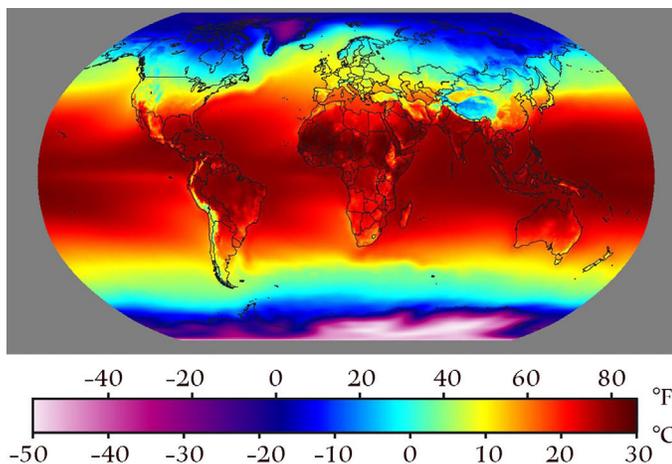


Figura 3 - Representação do campo de distribuição de temperatura no globo terrestre. Fonte: Wikimedia Commons.

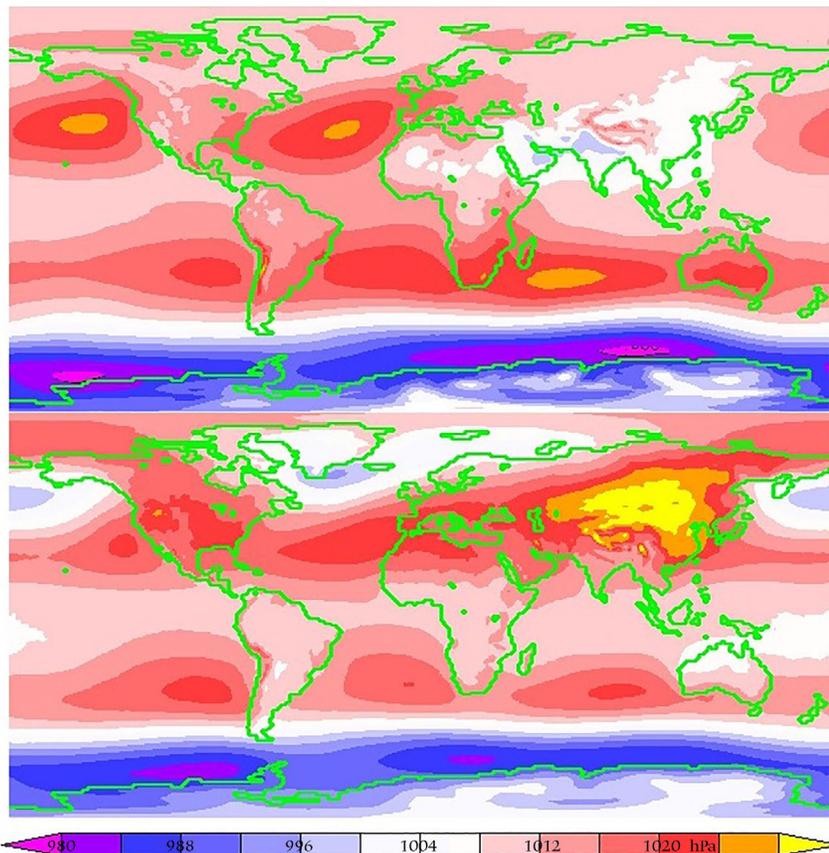


Figura 4 - Representação do campo de distribuição de pressão atmosférica no globo terrestre em períodos distintos, medida em hectopascal. Fonte: Wikimedia Commons.

dição solar, algo bem estabelecido pela termodinâmica. Mantendo-se a altitude constante, a pressão atmosférica também varia conforme as coordenadas de latitude e longitude, isto é, mantém sua dependência com a posição definida por um par de coordenadas no espaço. Essa dependência continua devido à variação de temperatura em pontos distintos do globo, de modo que a distribuição de pressão atmosférica na superfície da terra também pode ser considerada um campo escalar.

O potencial elétrico gerado por uma carga pontual é uma função da posição e é dado por  $V = q/4\pi\epsilon_0 r$ . Na Fig. 5 temos a representação das linhas de campo de uma carga positiva e das superfícies equipotenciais, sendo essas últimas representadas por círculos concêntricos com a carga no centro; em três dimensões, esses círculos na verdade seriam as áreas de superfícies esféricas, devido à simetria do campo elétrico. Superfícies equipotenciais são definidas por um conjunto de pontos sujeitos ao mesmo potencial elétrico. Na Fig. 5, todos os pontos cuja distância a carga  $+q$  for  $r_1$  terão o mesmo poten-

cial elétrico  $V_1(r_1)$ , os pontos que distam  $r_2$  terão o mesmo potencial  $V_2(r_2)$  e os pontos a distância  $r_3$  terão todos potencial  $V_3(r_3)$ , portanto o potencial elétrico representa um campo escalar.

Na física de altas energias, os campos escalares ainda podem ser reais ou complexos. O campo de Higgs, por exemplo, é representado por um campo escalar complexo, ao passo que na cosmologia e na matéria condensada é mais comum empregarmos campos escalares reais. Na teoria de campos, define-se campo escalar real como sendo uma função real do quadri-vetor  $\chi^\mu = (t, r)$  no espaço-tempo de Minkowski, isto é,  $\phi = \phi(\chi^\mu)$ . Campos escalares complexos também são utilizados para representar partículas carregadas que decaem por meio da interação fraca, como os mésons.

Na física de partículas, o campo de Higgs, cujo estado de vácuo é constante com valor igual a 246 GeV, adquire sua própria massa do mecanismo de quebra espontânea de simetria do vácuo, como ilustrado na Fig. 6, em que temos representado o potencial de um campo escalar  $\phi$ , onde o mínimo do potencial

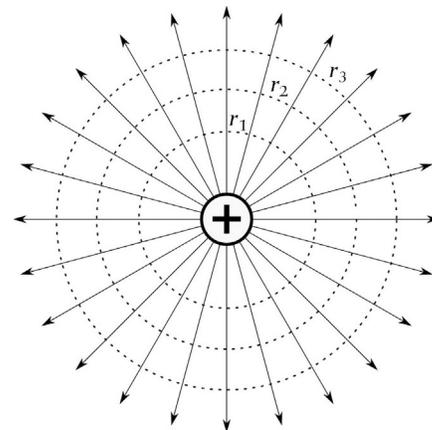


Figura 5 - Representação das superfícies equipotenciais geradas por uma carga elétrica positiva  $q$ . Fonte: Wikimedia Commons.

representa o estado de vácuo. De forma geral, podemos dizer que um sistema é simétrico se não muda suas características e/ou propriedades frente a alterações dos parâmetros que o descrevem. Na teoria de campos, dizemos que uma teoria descrita por uma densidade de Lagrangeana  $L(\phi)$ , onde  $\phi$  representa um campo escalar, é simétrica se ela torna-se invariante frente à transformação:

$$\mathcal{L}(\phi) \rightarrow \mathcal{L}(-\phi), \quad (3)$$

o estado de vácuo é degenerado e os estados possíveis transformam-se um no outro em detrimento dessa simetria. A Lagrangeana é a diferença entre a energia cinética e potencial de um sistema, e é também chamada de função de Lagrange.

Em física, a aplicação mais importante de simetria está no teorema de Noether, que estabelece que para cada simetria contínua em um sistema físico existe uma lei de conservação correspondente. Assim, pode-se mostrar que a conservação de momento linear está associada à simetria de translação ou paridade do sistema. A conservação de energia associa-se à uniformidade temporal e à conservação de carga elétrica a uma simetria de calibre, entre outras. Um sistema possui sua simetria quebrada quando as alterações nele promovidas modificam sua estrutura, levando ao aparecimento de fases distintas. Em teoria de campos, um dos mecanismos de quebra de simetria de grande interesse é aquele que promove a geração de massa para o campo.

No gráfico da esquerda, na Fig. 6, vemos claramente que o estado de energia mais baixo está na origem; já

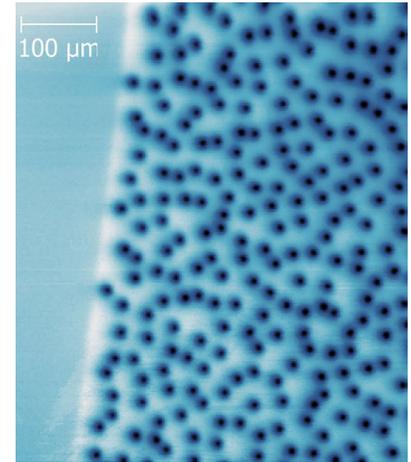
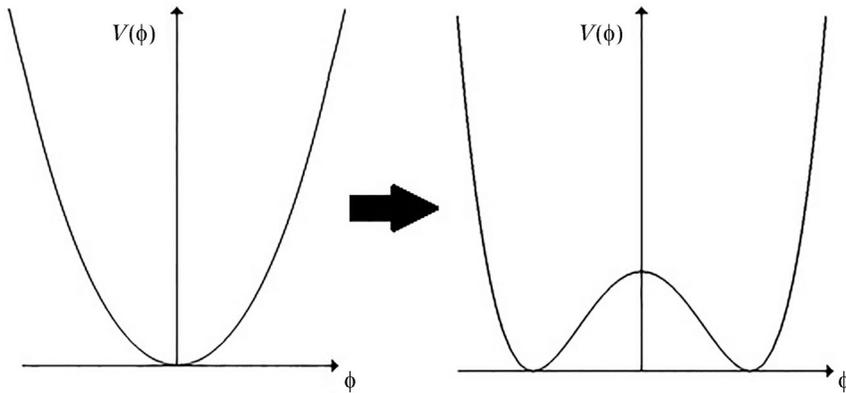


Figura 6 - Representação do mecanismo de quebra espontânea de simetria do vácuo para um campo escalar.

no segundo gráfico, onde a simetria foi quebrada, temos dois estados de vácuo onde o campo adquire massa, ou seja, o estado de menor energia não é mais nulo, a existência de um estado de vácuo diferente de zero também quebra espontaneamente a simetria de calibre da interação eletrofraca; esse mecanismo gera massa para os bósons de calibre  $Z^0$ ,  $W^+$  e  $W^-$ , mediadores dessa interação. Como complementação de leitura e instrumento de aprendizagem, sugiro a consulta ao jogo didático de física de partículas intitulado “Descobrimo o bóson de Higgs” [7].

### 3. Campos escalares e defeitos topológicos

O princípio de quebra de simetria para campos escalares tem aplicações além da escala subnuclear. Na matéria condensada, em meios elásticos contínuos, quando os campos que descrevem a ordenação da estrutura dos materiais têm a sua simetria quebrada por agentes externos, aparecem defeitos topológicos. Uma definição matemática para defeito seria dizer que ele é uma solução, com energia finita, de uma equação diferencial não linear; do ponto de vista físico, um defeito topológico é a região de transição entre fases distintas de um sistema. A quebra de simetria dá origem a um conjunto não trivial de estados degenerados (estados com o mesmo valor de energia), como os dipolos magnéticos nos domínios de um material ferromagnético. O estudo de defeitos topológicos valeu o prêmio Nobel de Física de 2016 para os pesquisadores David Thouless, Duncan Haldane e Michael Kosterlitz.

No regime de baixas temperaturas, a quantização do fluxo magnético em supercondutores, como o hélio superfluido, gera o aparecimento de defeitos,

denominados vórtices. A superfluidez é um estado de natureza quântica onde um líquido a baixas temperaturas ( $\cong 2,2$  K para o hélio líquido) escoou sem viscosidade. O estudo do hélio líquido valeu o Prêmio Nobel de Física para o físico Lev Davidovich Landau (1908-1968). No mundo macroscópico, os vórtices representam o escoamento giratório de um fluido na forma de espiral devido a uma diferença de pressão e podem ser observados em diversos fenômenos naturais, como tornados, no arrasto induzido produzido pelas pontas das asas de um avião, ou quando giramos um líquido dentro de um recipiente, como um balde. Na Fig. 7, temos uma imagem microscópica que mostra vórtices formados por spins em um material supercondutor. Spin é um número quântico associado ao momento angular intrínseco das partículas elementares e que em certas circunstâncias é responsável por efeitos magnéticos na matéria na escala macroscópica.

A baixas temperaturas, em alguns materiais, os vórtices de spins acoplam-se formando pares; em altas temperaturas, ocorre uma transição de fase topológica e os vórtices têm comportamento individual. Defeitos topológicos também aparecem em cosmologia, na forma de monopolos magnéticos, introduzidos por Gerardus 't Hooft e Alexan-

Figura 7 - Imagem microscópica de vórtices em um material supercondutor. Créditos: Frederick S. Wells, Alexey V. Pan, X. Renshaw Wang, Sergey A. Fedoseev e Hans Hilgenkamp (Fonte: Wikimedia Commons).

der Polyakov, ou cordas cósmicas, propostas por Holger Nielsen e Poul Olesen, que são defeitos associados ao processo de transição de fase do Universo primordial, quando a temperatura do mesmo diminuiu até um valor crítico  $T_c = 10^{28}$  K, levando à quebra espontânea de simetria associada a um campo escalar e gerando esses objetos exóticos, sendo criados até  $10^{-35}$  s após o Big-Bang.

Monopolos magnéticos são objetos que possuem carga magnética, algo similar à representação de um único polo de um ímã, ver Fig. 8, e são o resultado da quebra de uma simetria esférica; são extremamente massivos, o que dificulta sua detecção. As cordas cósmicas são objetos representados por linhas unidimensionais que se estenderiam pelo Universo, e estão vinculados à quebra de uma simetria axial.

Temos ainda defeitos topológicos instáveis, denominados de texturas, relacionados a uma quebra de simetria global não-Abeliana. Um grupo não-Abeliano é formado por elementos não comutativos, onde é válida a relação

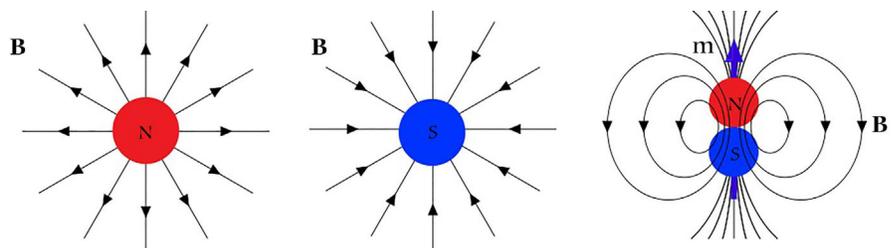


Figura 8 - Representação de polos magnéticos à esquerda e de um dipolo magnético à direita. Fonte: Wikimedia Commons.

$a * b \neq b * a$ , sendo  $a$  e  $b$  elementos de um grupo  $G = \{a, b, c, \dots\}$ . Texturas são o resultado do processo de transição de fase, durante a expansão cósmica do Universo, em regiões distintas do tecido cósmico que estavam fora de contato causal, por isso estão associadas à flutuação na temperatura, medida nos dias atuais, da radiação cósmica de fundo em microondas (RCFM), e que podem ser observadas por meio de manchas claras (quentes) e escuras (frias) no espectro da RCFM.

Em 1961, Tony Skyrme (1922-1987) apresentou o primeiro defeito topológico tridimensional decorrente da teoria de campo não linear, um sóliton topológico denominado de skyrmion, muito utilizado na spintrônica, tecnologia que utiliza os bits quânticos spintrônicos (qubits), atribuindo aos estados de spins up (cima) ou down (baixo) a modulação de informação, similar ao 0 e 1 do sistema binário convencional. Já em 1966, Yoichiro Nambu (1921-2015) antecipou a existência de tais defeitos na teoria quântica de campos.

Skyrmions podem ser vistos como resultado da sobreposição quântica de bárions e de estados de ressonância verificados no estudo de excitações em partículas elementares, cuja energia adicionada aos estados de energia da partícula completam o espectro observado. Ele é considerado um sóliton, pois pode ser estudado como um pulso de onda concentrado não-linear que se propaga sem perder a forma original, isto é, possui baixa dispersão. Sólitons são empregados na descrição da propagação de pulsos luminosos no interior de fibras óticas. Na Fig. 9, temos uma representação de skyrmions para um conjunto de spins.

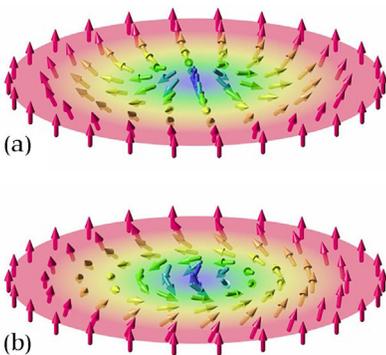


Figura 9 - Representação de dois fenômenos magnéticos em escala quântica: a) skyrmion tipo “ourico” e b) skyrmion em espiral. Fonte: Wikimedia commons.

O estudo mais simples de defeitos topológicos é feita em  $(1 + 1)$  dimensão, ou seja, em uma dimensão temporal e uma dimensão espacial, e utiliza o modelo  $\phi^4$  [8] no sistema natural de unidades dado por:

$$V(\phi) = \frac{1}{2}(1-\phi^2)^2$$

onde  $\phi$  representa um campo escalar real. No sistema natural de unidades, as unidades de medida são definidas em função das constantes físicas fundamentais utilizando expressões em que algumas dessas constantes são normalizadas, isto é, possuem valor unitário. Podemos citar como exemplo as unidades de Planck, que utilizam  $c = 1$ ,  $G = 1$ ,  $k_B = 1$ ,  $e = \sqrt{\alpha}$ ,  $1/4\pi\epsilon_0 = 1$  e  $\hbar = 1$ , onde respectivamente temos a velocidade da luz no vácuo, a constante gravitacional, a constante de Boltzmann, a carga elementar em função da constante de estrutura fina  $\alpha$ , a constante de força de Coulomb e a constante reduzida de Planck.

O potencial dado pela Eq. (4) tem soluções estáticas  $\phi = \pm \tanh(x)$ . A solução com sinal positivo é denominada de kink, enquanto a solução com sinal negativo é chamada de antikink. Essas soluções são topológicas por terem limites assintóticos diferentes; elas conectam os diferentes mínimos do potencial, que também são soluções triviais,  $\phi_{\pm} = \pm 1$ , com energia nula. Esse tipo de defeito é uma representação precisa do processo de transição de fase, como po-

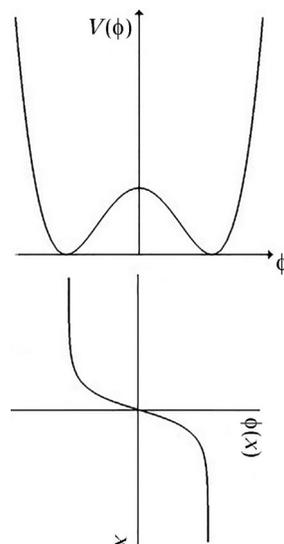


Figura 10 - Representação de um defeito topológico do tipo kink. O defeito conecta os estados de vácuo do potencial.

de ser observado na Fig. 10.

Quando os kinks estão imersos em duas ou mais dimensões eles são chamados paredes de domínio e suas energias se transformam em densidades de energia.

#### 4. Campos escalares na cosmologia - inflação cósmica e energia escura

O modelo cosmológico padrão, conhecido como Big-Bang, afirma que o Universo, em algum momento, no início de sua formação, estava em um estado extremo de alta temperatura e densidade, formando o plasma de quarks e glúons, composto por partículas elementares dissociadas, assim como elétrons livres. Conforme o Universo foi se expandindo de forma acelerada, a temperatura foi diminuindo e teve início a nucleossíntese primordial; dessa forma, os quarks passaram a interagir, formando prótons e nêutrons, que posteriormente se ligaram, formando núcleos simples (deuteron), ocorrendo nessa fase a emissão da radiação cósmica de fundo em microondas.

Quando foram atingidas temperaturas abaixo da energia de ligação dos elétrons, estes passaram a ser capturados pelos deuterons, formando uma estrutura mais complexa, que conhecemos como átomo. Com a continuação da expansão, sucedeu-se a formação das primeiras estrelas e posteriormente a formação de galáxias e planetas, como ilustrado na Fig. 11.

Hoje se sabe que a maioria dos elementos químicos conhecidos foi sintetizada no interior das estrelas, onde núcleos maiores podem ser formados pela fusão nuclear do hidrogênio, em condições apropriadas de temperatura e pressão, onde a energia cinética dos núcleos da reação deve ser grande para possibilitar o aumento da probabilidade de penetração na barreira coulombiana; esse processo ocorre em núcleos muito leves, a uma temperatura da ordem de  $10^7$  K, estando então os átomos completamente ionizados.

Algumas das vertentes mais modernas da cosmologia utilizam o campo escalar para explicar a expansão acelerada do Universo na sua fase inicial, ou ainda em modelos de quintessência, que descrevem a energia escura por meio da dinâmica de campos escalares para elucidar a fase atual de expansão. O modelo cosmológico padrão explica com sucesso algumas das principais propriedades observadas do nosso Universo, mas infelizmente ele ainda deixa



Figura 11 - Processo de evolução do Universo.

muitos problemas sem solução, como o processo de formação de estruturas em larga escala, ou seja, a formação de estrelas, planetas, galáxias etc., além das anisotropias observadas pelo satélite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) na radiação cósmica de fundo em microondas (RCFM).

A RCFM é a radiação eletromagnética na faixa de microondas oriunda do Universo primordial, quando houve a formação dos primeiros núcleos ionizados. Sua descoberta acidental em 1965, por Arno Penzias e Robert Wilson, foi uma das maiores evidências a favor da teoria do Big-Bang. Atualmente se estima que sua temperatura média seja de 2,725 K, sua frequência de 160,4 GHz e que seu espectro seja idêntico ao de um corpo negro.

A saída mais viável para resolver esses problemas é apresentada no contexto da teoria da inflação cósmica, proposta por Alan Guth, em que um campo escalar, chamado de inflaton, seria responsável pela evolução do Universo primordial em um período muito curto de intensa expansão acelerada [9]. Dessa forma, considerar uma fase de expansão acelerada regida por um campo escalar também garante a existência de inhomogeneidades no Universo, o que explicaria a formação de estruturas, fazendo com que em um dado momento o Universo começasse a desacelerar, levando portanto a uma fase de evolução dominada pela matéria não relativística.

Em termos quantitativos, conside-

rando um Universo plano, para um regime inflacionário regido pela dinâmica de um campo escalar  $\phi$ , onde  $V = V(\phi)$  é o potencial associado ao campo do inflaton, temos a densidade de energia e a pressão responsáveis pela aceleração dadas por:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V \\ p &= \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V \end{aligned} \quad (5)$$

em que temos a soma de um termo cinético com um termo potencial [10]. O termo cinético  $\dot{\phi} = d\phi/dt$  representa a taxa de variação temporal do campo. Resultados interessantes aparecem quando consideramos que o campo escalar varia muito lentamente, em um regime chamado *slow-roll*, de modo que com boa aproximação o termo cinético é suplantado pelo potencial e obtemos  $\rho \cong V$  e  $p \cong -V$ , resultando em  $\rho \cong -p$ , ou seja, a densidade de energia do campo escalar gera uma pressão negativa, ocasionando uma rápida expansão do Universo primordial.

Os dados observacionais da astronomia, obtidos pelo estudo de supernovas tipo IA, levou um grupo de cientistas a anunciar que o Universo teria passado não por uma, mas por duas fases de aceleração cósmica; a segunda, por sinal, estaria ocorrendo exatamente agora. Uma supernova é uma estrela colapsada, ou seja, pode ser um dos estágios finais de uma estrela que já consumiu todo o seu combustível nuclear e não consegue mais vencer sua luta con-

tra a contração gravitacional. Como resultado, temos uma grande explosão, que ejeta uma quantidade significativa de energia no meio interestelar.

Supernovas tipo IA são provenientes das explosões de anãs brancas com massa inferior ao limite de Chandrasekhar, que é necessário para explosão: cerca de 1,38 massas solares. Entretanto, em sistemas binários pode ocorrer um fenômeno ímpar, de uma anã branca fundir-se com sua companheira, aumentando sua massa e colapsando, tendo seu fim em uma explosão de supernova. A anã branca é o estágio final de uma estrela com até 10 massas solares. Em seu processo evolutivo, tais estrelas se transformarão em gigantes vermelhas, ejetando suas camadas externas e tornando-se nebulosas planetárias, com um núcleo denso formado de carbono e oxigênio, mantendo-se em equilíbrio com a gravidade por meio das forças de degenerescência entre elétrons originadas pelo princípio da exclusão de Pauli.

Na tentativa de explicar essa nova fase de expansão acelerada, foi proposta a existência de uma nova forma de energia que não interage com a luz, denominada energia escura, que englobaria pouco menos de três quartos do conteúdo do Universo, conforme a Fig. 12. Algumas teorias utilizam a dinâmica de um campo escalar para descrever a energia escura; esse campo estaria espalhado de forma homogênea e isotrópica pelo Universo, com uma densidade de energia não estacionária e que exerceria uma pressão negativa, isto é, agiria de forma contrária à atração gravitacional do conteúdo de matéria do Universo, conforme as Eqs. (5). É uma alternativa ao modelo  $\Lambda$  - CDM (Cold Dark Matter- Matéria Escura Fria), que coloca a constante cosmológica como candidata a energia escura.

A constante cosmológica ( $\Lambda$ ) é um elemento que se opõe à atração gravitacional, análogo à densidade de energia do vácuo, tendo sido utilizada inicialmente por Albert Einstein (1879-1955) para descrever um Universo estacionário em 1917. Em 1929, com a descoberta do afastamento das galáxias pelo astrônomo Edwin Hubble (1889-1953) e o surgimento da teoria do Big-Bang de George Gamow (1904-1968), em 1948, sua utilização foi abandonada. Entretanto, com a evidência da nova fase de aceleração cósmica do Universo, algumas teorias voltaram a utilizar a constante cosmológica, de modo que ela passou a desempenhar o papel de um

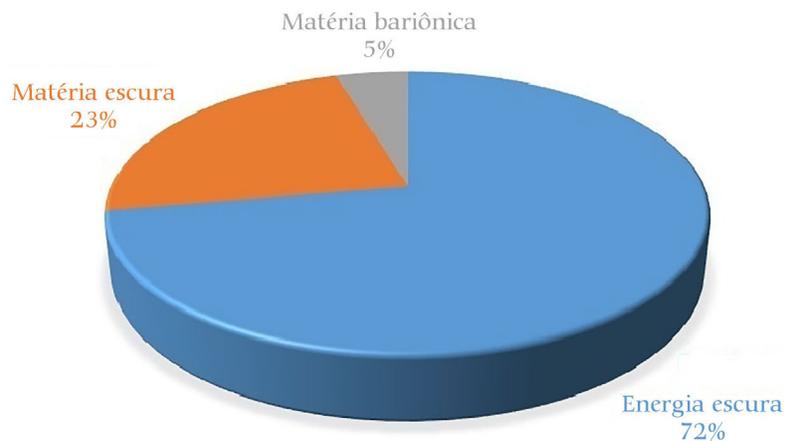


Figura 12 - Composição do Universo observável.

termo repulsivo responsável pela aceleração.

### 5. Considerações finais

É peculiar observar que aspectos tão complexos da natureza possam ser explicados pela dinâmica do mais simples campo que conhecemos, o campo escalar. Tanto na física de partículas elementares quanto no estudo de defeitos topológicos, em sistemas de matéria

condensada, os campos escalares já estão bem estabelecidos, fornecendo resultados precisos comprovados diretamente por métodos experimentais, e tendo ampla aceitação na comunidade científica. Por outro lado, embora os campos escalares tenham produzido resultados em comum acordo com os dados observacionais da astronomia, eles nunca foram observados experimentalmente, nem mesmo por

meio de técnicas de medição e quantificação indiretas. Na busca pelo entendimento do Universo, muitos fenômenos estão com sua explicação em aberto; somente com o tempo, o aperfeiçoamento de instrumentos e o desenvolvimento de novas tecnologias de exploração espacial poderemos confirmar se nossas conjecturas a respeito da dinâmica e da constituição do Cosmos são verdadeiras ou falsas.

### Referências

- [1] M.B.S. Costa, A.C. Pavão, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **34**, 2602 (2012).
- [2] J.L. Lopes, *A Estrutura Quântica da Matéria: Do Átomo Pré-Socrático às Partículas Elementares* (Editora UFRJ, Rio de Janeiro, 1992).
- [3] R.M. Eisberg, R.Resnick, *Física Quântica: Átomos, Moléculas, Sólidos, Núcleos e Partículas* (Editora Campus, Rio de Janeiro, 1979).
- [4] M.A. Moreira, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **31**, 1306 (2009).
- [5] M.M. Pereira, *Física na Escola* **12**(1), 37 (2011).
- [6] M.B. Gonçalves, D.M. Flemming, *Cálculo C: Funções Vetoriais, Integrais Curvilíneas, Integrais de Superfície* (Editora MAKRON Books, São Paulo, 2000), 3ª ed.
- [7] M.A.M. Souza, A.C.S. Nascimento, D.F. Costa, O. Ferreira, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **41**, e20180124 (2019).
- [8] M.A.M. Souza, D. Bazeia, L. Losano, R. Menezes, *Latin-American Journal of Physics Education*, **6**, 47 (2012).
- [9] J. Horvath, G. Lugones, M. Porto, S. Scarano E.R. Teixeira, *Cosmologia Física do Micro ao Macro Cosmos e Vice-Versa* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011), 2ª ed.
- [10] M.A.M. Souza e J.J. Rodrigues, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **41**, e20170402 (2019).