

17

CAPÍTULO

O VÁCUO QUÂNTICO

Alves de Oliveira, Yuri ¹*;
Antonio Andreatta, Mauro ¹

¹ Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Instituto de Física e Química;

* email: yurialves.y@gmail.com

Resumo: Apresentamos, neste trabalho, como surgiram as ideias acerca das flutuações quânticas do vácuo e demonstramos um processo de quantização do campo eletromagnético no espaço livre, isto é, na ausência de correntes e fontes. Em 1928, Paul A. M. Dirac (1902 – 1984) apresentou uma equação de onda relativística para a mecânica quântica. Esta equação trouxe sérias implicações, entre elas, a existência de elétrons com energias negativas. Estes elétrons foram denominados de anti-elétrons ou pósitrons e foram detectados experimentalmente, em 1932, por Carl D. Anderson (1905 – 1991). Mas o que mais chocou nos resultados obtidos foi a ideia de que o vácuo, o espaço livre, não seria tão vazio como se achava ser, mas, ao contrário, era uma região repleta de elétrons – que ficou conhecida como “mar de elétrons” (ou mar de Dirac). Essa teoria foi colocada em um contexto mais geral como parte da teoria de quantização do campo eletromagnético no espaço livre; desenvolvida inicialmente, em 1926, pelos fundadores da mecânica quântica: Werner K. Heisenberg (1901 – 1976), Ernst P. Jordan (1902 – 1980) e Max Born (1882 – 1970) e aprimorada, em 1927, por Dirac na chamada segunda quantização. Nesta teoria, os elétrons com energias positivas e negativas podem ser descritos em termos de operadores de criação e aniquilação. Além disso, mostramos, neste trabalho, como a energia do vácuo quântico pode ser utilizada para compreender o fenômeno denominado efeito Casimir, um fenômeno que embora seja intrinsecamente quântico possui uma manifestação macroscópica.

Palavras-chave: Vácuo quântico; Flutuações quânticas; Quantização

1. Introdução

O vácuo quântico difere do clássico, pois este é definido como sendo o espaço na ausência de quaisquer tipos de matéria, e o quântico é uma região repleta de pares de partículas e anti-partículas, as chamadas partículas virtuais. Desde a antiguidade clássica até os tempos atuais, o conceito de vácuo vem sendo discutido fervorosamente e as ideias sofreram diversas mudanças.

A moderna teoria dos quanta trouxe diversas modificações na forma como se entendia o universo, o determinismo clássico deu lugar à probabilidade quântica e fenômenos novos foram identificados. Embora a teoria quântica tenha sofrido forte repreensão devido às suas novas interpretações que vão contra o que se entende como senso comum, ela possui uma capacidade

de previsão superior à teoria clássica e se mostrou eficaz em explicar diversos fenômenos em níveis atômicos e subatômicos.

Apresentamos neste trabalho como o vácuo é entendido a luz da teoria quântica e como a energia do vácuo pode ser obtida a partir da quantização do campo eletromagnético no espaço. Além disso, apresentamos como tal energia pode ser utilizada para compreender o fenômeno do efeito Casimir, um fenômeno que embora seja intrinsecamente quântico possui uma manifestação macroscópica.

2. O vácuo quântico

Pode-se dizer que a compreensão acerca do vácuo quântico teve seu nascimento através do trabalho sobre a nova hipótese da emissão de radiação de corpo negro, publicado em 1901 por Max Planck (1858 – 1947). Neste trabalho, Planck propõe que a radiação de um corpo negro só pode ser absorvida ou emitida por meio de “pacotes” de energia, os chamados quanta de energia, que são quantidades discretas de energia (PLANCK, p. 553, 1901). Albert Einstein estende a ideia de Planck e propõe uma quantização para ondas eletromagnéticas de modo geral, onde todas elas passam a ser entendidas por meio dos quanta de energia. Isso foi suficiente para desencadear um longo processo de mudanças em nossa compreensão da natureza microscópica dos fenômenos físicos. A partir da hipótese de Planck, resultados posteriores mostraram que a energia de um oscilador harmônico quântico em seu estado fundamental, o estado de mais baixa energia, diferente da situação clássica não é zero. Essa energia mínima foi denominada de energia residual ou energia de ponto-zero (CARUSO; OGURI, pp. 325-332, 2007). A energia de um oscilador harmônico quântico é dada pela expressão abaixo, onde $n = 0$ representa a energia do estado fundamental:

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega, \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

onde \hbar é constante reduzida de Planck, a constante Planck dividida por dois pi, uma constante fundamental da natureza que é definida como sendo a razão entre a energia de um quantum de energia e a sua frequência; e ω é a frequência angular de oscilação. Em 1926, os fundadores da mecânica quântica Werner Karl Heisenberg (1901 – 1976), Ernst Pascual Jordan (1902 – 1980) e Max Born (1882 – 1970) apresentaram em um artigo intitulado: Sobre Mecânica quântica II (BORN; HEISENBERG, JORDAN, pp. 557-615, 1926), que o vácuo quântico se comportava como uma coleção de campos eletromagnéticos oscilantes no tempo, isto é, osciladores harmônicos, onde a energia de cada campo é caracterizada por uma frequência ω_k (ANDREATA, pp. 5-6, 2000), conforme a equação abaixo:

$$E_v = \sum_k \frac{1}{2} \hbar \omega_k$$

Em 1927, Paul A. M. Dirac (1902 – 1984) apresenta (DIRAC, pp. 243-265, 1927) uma nova forma de descrever o vácuo quântico na tentativa de obter uma equação de onda relativística que fosse linear e não quadrática nas derivadas temporais e espaciais, isto é, buscava criar uma teoria que descrevesse o comportamento do elétron e que obedecesse simultaneamente à mecânica quântica e à relatividade especial. Dirac obteve a equação que hoje leva seu nome, a chamada equação de Dirac:

$$\left[i\hbar \left(\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \vec{\alpha} \cdot \vec{\nabla} \right) - \beta mc \right] \Psi(\vec{r}, t) = 0$$

onde m é a massa de repouso do elétron, c é a velocidade da luz no vácuo, α e β são as matrizes de Dirac e $\Psi(\vec{r}, t)$ é a função de onda nos três componentes espaciais e no componente temporal. Os resultados obtidos a partir de sua equação foram um tanto inusitados e curiosos, eles previam que as partículas livres (como os elétrons) poderiam ter energias negativas e isso contrariava as teorias da época. Dirac até pensou em desconsiderar os resultados com energias negativas, mas se fossem descartados a estrutura da teoria seria matematicamente inconsistente. Para resolver esse problema o caminho foi revisar o conceito que se tinha de vácuo. Como Dirac afirmou:

Se não podemos excluir [os estados de energia negativa], devemos encontrar um método de interpretação física para eles. Pode-se chegar a uma interpretação razoável adotando uma nova concepção de vácuo. Anteriormente, as pessoas pensavam no vácuo como uma região do espaço que é completamente vazia, uma região do espaço que não contém absolutamente nada. Agora devemos adotar uma nova visão. Podemos dizer que o vácuo é a região do espaço onde temos a menor energia possível. (DIRAC apud CARUSO; OGURI, p. 553, 2007).

Dirac propôs que o vácuo quântico era o estado formado por uma quantidade infinita de elétrons ocupando todos os níveis de energia negativa, o conhecido “mar de elétrons” (ou mar de Dirac). Sua teoria era análoga a dos elétrons ocupando níveis de energia mais externos, a camada de valência, em um átomo. Devido ao princípio de exclusão de Pauli, que determina que dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado quântico, um elétron não poderia ir para estados de energia negativa, pois estes já estariam ocupados. Mas o contrário poderia ocorrer, caso um desses elétrons que ocupam os estados de energia negativa recebesse energia suficiente ele poderia ‘saltar’ para um estado de energia positiva, deixando no mar de elétrons, de energia negativa, um “buraco” devido à ausência desse elétron. Este “buraco” pode ser entendido como sendo uma carga elétrica positiva com energia positiva, denominado de anti-elétron ou pósitron, sendo este processo conhecido como criação de pares de partículas e anti-partículas (CARUSO; OGURI, pp. 549-558, 2007).

Em 1927, Heisenberg postula o princípio da incerteza, um dos princípios elementares da natureza e base da mecânica quântica (HEISENBERG, pp. 3-4, 1927). Uma consequência deste princípio é que quanto mais preciso a posição é determinada, menos precisamente o

momento é conhecido neste instante e vice-versa. O vácuo quântico é repleto de partículas virtuais e estas devem obedecer a este princípio, de forma que tais partículas não podem ter velocidade e posição bem definidas ao mesmo tempo; o que equivale a dizer que a energia do estado fundamental associada aos seus campos eletromagnéticos deve ser diferente de zero já que de outra forma violariam o princípio da incerteza. Legitimando novamente que o vácuo não é um vazio absoluto, mas uma região repleta de atividade (MORRIS, pp. 107-115, 1998).

3. A energia do vácuo quântico

As equações de Maxwell do eletromagnetismo preveem que o espaço livre, isto é, o espaço na ausência de cargas, correntes e de matéria é repleto de campos eletromagnéticos oscilantes, estas oscilações foram denominadas de flutuações quânticas e são atribuídas às chamadas partículas virtuais. A quantização do campo eletromagnético foi realizada pela primeira vez, em 1926, por Heisenberg, Jordan e Born, onde estes descrevem o vácuo, na ausência de cargas e fontes, como um conjunto de osciladores com energias quantizadas (BORN; HEISENBERG; JORDAN, pp. 375-385, 1926). Dirac, em 1927, cria o método que ficou conhecido como segunda quantização, dando origem a eletrodinâmica quântica, de forma que assim pode tratar do problema de emissão e absorção de energia a partir dos operadores quânticos de criação e aniquilação de partículas, como fótons (DIRAC, pp. 243-265, 1927). A partir destes operadores quânticos é possível obter a energia associada ao vácuo quântico, como será demonstrando ao longo desta seção.

Realizamos a quantização tal como Milloni (1993, pp. 38-41). Na situação de vácuo, as equações de Maxwell, em unidades gaussianas, são escritas na forma:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}.$$

Introduzindo o potencial vetor \vec{A} e reescrevendo o campo magnético como sendo $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ podemos representar o campo elétrico em termos do potencial vetor:

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{\nabla} \phi,$$

onde ϕ é uma função potencial. No calibre de Coulomb e na ausência de cargas, temos que $\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$ e $\phi = 0$, de forma que o campo elétrico pode ser escrito como:

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

e a partir da Lei de Ampère escrevemos:

$$\nabla^2 \vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = 0.$$

Resolvendo a equação diferencial supondo que a solução geral é do tipo $\vec{A} = \vec{A}_0(\vec{r})\alpha(t)$, onde a constante de separação é definida como sendo $-k^2$, obtemos as equações:

$$\nabla^2 \vec{A}_0 + k^2 \vec{A}_0 = 0, \quad \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + k^2 c^2 \alpha = 0.$$

De forma que a solução geral pode ser escrita como:

$$\vec{A} = \vec{A}_0 \alpha_0 e^{-i\omega t} + \vec{A}_0^* \alpha_0^* e^{i\omega t},$$

onde definimos $\omega = kc$. Escrevemos o campo elétrico como sendo:

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{A}_0 \alpha_0 e^{-i\omega t} + \vec{A}_0^* \alpha_0^* e^{i\omega t}) = -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{A}_0 \alpha + \vec{A}_0^* \alpha^*)$$

onde $\alpha = \alpha_0 e^{-i\omega t}$ e $\alpha^* = \alpha_0^* e^{i\omega t}$. Para o campo magnético obtemos:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times (\vec{A}_0 \alpha_0 e^{-i\omega t} + \vec{A}_0^* \alpha_0^* e^{i\omega t}) = \vec{\nabla} \times (\vec{A}_0 \alpha + \vec{A}_0^* \alpha^*).$$

A energia H associada aos campos eletromagnéticos pode ser obtida a partir da integral sobre o espaço das densidades elétrica u_E e magnética u_B :

$$H = \int (u_E + u_B) d^3 r$$

ou ainda:

$$H = \frac{1}{8\pi} \int (|\vec{E}|^2 + |\vec{B}|^2) d^3r,$$

de forma que:

$$H = \frac{1}{8\pi} \int \left(\left| -\frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{A}_0 \alpha + \vec{A}_0^* \alpha^*) \right|^2 + \left| \vec{\nabla} \times (\vec{A}_0 \alpha + \vec{A}_0^* \alpha^*) \right|^2 \right) d^3r,$$

desenvolvendo os termos obtemos:

$$H = \frac{k^2}{2\pi} |\alpha|^2 \int |\vec{A}_0|^2 d^3r.$$

Sem perda de generalidade podemos normalizar a energia, nestas condições:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\vec{A}_0|^2 d^3r = 1,$$

assim:

$$H = \frac{k^2}{2\pi} |\alpha|^2.$$

A partir das quantidades definidas, posição q e momento p , reais:

$$q = \frac{i}{c\sqrt{4\pi}} (\alpha - \alpha^*), \quad p = \frac{k}{\sqrt{4\pi}} (\alpha + \alpha^*),$$

obtemos que:

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

Esta equação sugere um modo de campo de frequência ω , matematicamente, isso equivale a um oscilador harmônico de frequência ω . Para provar tal assertiva devemos demonstrar que q e p são variáveis canonicamente conjugadas. E, portanto valem as seguintes Equações de Hamilton:

$$\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p} = p, \quad \dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q} = -\omega^2 q.$$

Para descrever um modo de campo quanticamente devemos descrever o oscilador harmônico quântico equivalente. O oscilador com função hamiltoniana possui massa unitária, de forma que introduzimos os operadores de aniquilação \hat{a} e criação \hat{a}^\dagger , em termos dos operadores posição \hat{x} e momento \hat{p} , definidos como:

$$\hat{a} = \frac{1}{\sqrt{2\omega\hbar}} (\hat{p} - i\omega\hat{q}), \quad \hat{a}^\dagger = \frac{1}{\sqrt{2\omega\hbar}} (\hat{p} + i\omega\hat{q})$$

De forma que podemos escrever:

$$\hat{q} = i \sqrt{\frac{\hbar}{2\omega}} (\hat{a} - \hat{a}^\dagger), \quad \hat{p} = \sqrt{\frac{\hbar\omega}{2}} (\hat{a} + \hat{a}^\dagger)$$

e obtemos, a partir das quantidades definidas reais x e p em comparação com os operadores \hat{x} e \hat{p} , a equivalência:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2\pi\hbar c^2}{\omega}} \hat{a}, \quad \alpha^* = \sqrt{\frac{2\pi\hbar c^2}{\omega}} \hat{a}^\dagger.$$

Assim, podemos escrever os operadores de aniquilação e criação como sendo:

$$\hat{a} = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\hbar c^2}} \alpha_0 e^{-i\omega t}, \quad \hat{a}^\dagger = \sqrt{\frac{\omega}{2\pi\hbar c^2}} \alpha_0^* e^{i\omega t}.$$

Podemos reescrever o potencial vetor \vec{A} em termos dos operadores quânticos:

$$\vec{A} = \sqrt{\frac{2\pi\hbar c^2}{\omega}} (\hat{a} \vec{A}_0 + \hat{a}^\dagger \vec{A}_0^*).$$

Os campos elétrico e magnético podem ser reescritos também em termo dos operadores:

$$\vec{E} = i\sqrt{2\pi\hbar\omega} (\hat{a} \vec{A}_0 - \hat{a}^\dagger \vec{A}_0^*), \quad \vec{B} = \sqrt{\frac{2\pi\hbar c^2}{\omega}} \vec{\nabla} \times (\hat{a} \vec{A}_0 + \hat{a}^\dagger \vec{A}_0^*).$$

A função hamiltoniana clássica se torna o operador:

$$\hat{H} = \frac{1}{2} (\hat{p}^2 + \omega^2 \hat{q}^2),$$

substituindo os operadores \hat{x} e \hat{p} e utilizando que $\hat{a} \hat{a}^\dagger - \hat{a}^\dagger \hat{a} = [\hat{a}, \hat{a}^\dagger] = 1$, já que $[\hat{q}, \hat{p}] = i\hbar$, temos que:

$$\hat{H} = \hbar\omega \left(\hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{1}{2} \right).$$

Para obter a autoenergia associada ao vácuo devemos atuar o operador sobre um estado. Para isso consideramos um conjunto de fótons cujo estado é $|n\rangle$ e fazemos o operador atuar sobre ele:

$$\hat{H}|n\rangle = \hbar\omega \left(\hat{a}^\dagger \hat{a} + \frac{1}{2} \right) |n\rangle,$$

logo:

$$\hat{H}|n\rangle = \hbar\omega \left(\hat{a}^\dagger \hat{a} |n\rangle + \frac{1}{2} |n\rangle \right).$$

Caracterizamos o autovetor $\hat{a}^\dagger \hat{a}$ pelo seu autovalor n , de forma que $\hat{a}^\dagger \hat{a} |n\rangle = n |n\rangle$, ou seja, $|n\rangle$ é um autoestado do produto dos operadores de aniquilação e criação cujo autovalor é n , sendo este o número de fótons. Escrevemos então:

$$\hat{H} |n\rangle = \hbar\omega \left(n |n\rangle + \frac{1}{2} |n\rangle \right).$$

O estado de vácuo é aquele no qual não há nenhum fóton presente, assim, fazemos $n = 0$ e obtemos:

$$\hat{H} |0\rangle = \frac{\hbar\omega}{2} |0\rangle,$$

e, portanto, a autoenergia do operador \hat{H} é simplesmente:

$$E = \frac{\hbar\omega}{2},$$

como não há nenhuma limitação espacial sobre os modos normais, todas as frequências são possíveis e a energia do vácuo quântico é dada pela equação:

$$E_v = \sum_k \frac{\hbar\omega_k}{2},$$

onde a soma estende-se sobre todas as frequências permitidas. Esta é a chamada energia do vácuo.

4. O efeito Casimir

A energia proveniente do vácuo quântico pode ser utilizada na descrição de um efeito puramente quântico, mas que se apresenta em um sistema macroscópico, o chamado efeito Casimir, apresentado em 1948 pelo físico holandês Hendrik B. Casimir (1909 – 2000) em um trabalho intitulado: Da atração entre duas placas perfeitamente condutoras (CASIMIR, pp. 793-795, 1948). Basicamente, Casimir demonstrou que as energias das flutuações quânticas do espaço livre são capazes de influenciar sistemas físicos. Na mecânica quântica, os campos eletromagnéticos podem ser entendidos como conjuntos de osciladores harmônicos e, da mecânica clássica, se estabelece que uma partícula ao mover-se de um ponto a outro tomará o caminho de menor energia possível; entre as várias trajetórias que ela pode seguir a partícula irá percorrer aquela que minimize a sua ação. Quanticamente, a partícula percorre virtualmente todas as possíveis trajetórias, estabelecidas pelas integrais de caminho de Feynman, ao invés de seguir somente pelo caminho 'clássico'. Cada trajetória possui certo 'peso' energético em relação à trajetória da partícula, sendo a trajetória clássica aquela que possui o peso predominante e os pesos associados as outras trajetórias compreendem as flutuações quânticas (CÉLERI, pp. 3-4, 2008)

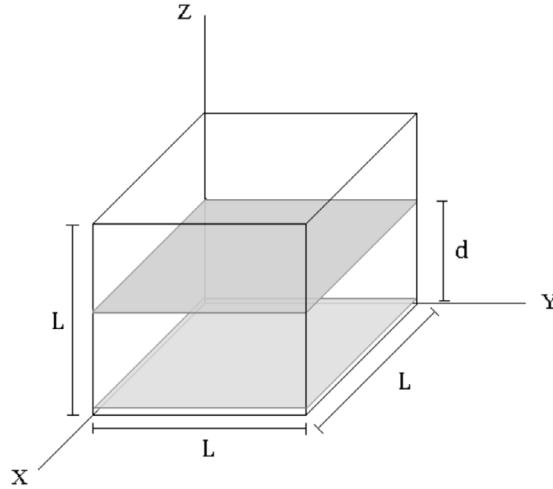


Figura 1. O efeito Casimir estático (imagem criada pelos autores).

O efeito Casimir pode ser ilustrado utilizando duas placas metálicas quadradas, de lado L , eletricamente neutras em uma região de vácuo e separadas por uma distância d , conforme representado na Figura 1. Estas placas são consideradas ideais, de forma que o campo elétrico seja nulo em seu interior. Os modos normais possíveis entre as placas podem ser definidos a partir de um vetor de onda \vec{k} , que assume quantidades discretas, de forma que os modos normais são quantizados e descritos por meio de osciladores harmônicos com frequências $\omega = c|\vec{k}|$ e a energia associada ao estado fundamental, o estado de energia mais baixa possível do oscilador harmônico, é $E_0 = \hbar\omega/2$. Casimir calculou que quando se compara a energia devido às flutuações do vácuo na presença das placas e na ausência delas, a diferença entre as energias assume um valor finito e mensurável, conforme mostramos no artigo O efeito Casimir (OLIVEIRA; ANDREATA, pp. 41-43, 2010). A energia obtida é dada por:

$$U(d) = -\frac{\pi^2 \hbar c}{720 d^3} L^2,$$

desta equação deriva-se que a força de Casimir é:

$$F(d) = -\frac{\pi^2 \hbar c}{240 d^4} L^2,$$

o valor negativo implica que a força entre as placas é do tipo atrativa e tende a aproximar as placas.

Este fenômeno é chamado também de efeito Casimir estacionário, uma vez que as fronteiras que confinam o campo eletromagnético são estáticas e a energia é invariável no decorrer do tempo. Na situação em que a energia varia no tempo e as fronteiras são móveis outro fenômeno é observado, o denominado efeito Casimir não-estacionário ou efeito Casimir dinâmico, evidenciado principalmente pela geração de partículas reais, como fótons, a partir da energia do vácuo.

No efeito Casimir estacionário, as duas placas podem ser entendidas como espelhos e a força que surge em razão das flutuações do vácuo é devido à diferença de pressão, interior e exterior, de radiação dos campos exercidas sobre os espelhos. Na situação onde há um único espelho ainda existe uma força sendo exercida pelas flutuações em ambos os lados do espelho, mas em média essa força é nula. Entretanto, ao colocar o espelho em movimento surge uma força resultante dissipativa proveniente do vácuo quântico que reage ao movimento do espelho, essa força é acompanhada da criação de partículas de forma a preservar a conservação da energia do campo eletromagnético do espelho (OKADA, pp. 14-15, 2011).

5. Conclusão

O vácuo quântico vai contra a ideia intuitiva de um espaço desprovido de qualquer matéria, mesmo que as partículas associadas ao vácuo quântico sejam denominadas de “virtuais” elas de fato existem e podem ser detectadas por meio do efeito de seus campos eletromagnéticos. Além disso, a energia proveniente desses campos possui manifestações reais através de fenômenos como o efeito Casimir, que já foi verificado experimentalmente com alta precisão (MOHIDEEN; ROY, pp. 4549-4552, 1998).

Ainda há muito que se estudar a respeito do vácuo quântico e outros fenômenos podem vir a serem detectados. As pesquisas continuam a todo vapor e as ideias acerca dos campos eletromagnéticos do vácuo podem vir a desempenhar um papel fundamental na resolução de muitos problemas em abertos, como o da energia escura e das teorias de unificação de forças elementares da natureza. E como ressaltado por Steven Weinberg (1933 –):

A realidade essencial é um conjunto de campos sujeitos às regras da Relatividade Especial e da Mecânica Quântica; qualquer outra coisa é derivada como consequência da dinâmica quântica destes campos. (WEINBERG apud CARUSO; OGURI, pp. 558, 2007).

The Quantum Vacuum

Abstract: Here we present, how the ideas of quantum vacuum fluctuations arose and demonstrate a process of quantization of the electromagnetic field in free space, ie, in the absence of currents and source. In 1928, Paul A. M. Dirac (1902 – 1984) presented a relativistic wave equation for quantum mechanics. This equation has brought serious implications, and among them, the existence of electrons with negative energies. These electrons are called anti-electrons or positrons and were detected experimentally in 1932 by Carl D. Anderson (1905 – 1991). But what really shocked in his theory was the idea that the vacuum, the free space, was not as empty as previously thought, on the contrary, was a region full of electrons - which became known as "sea of electrons". This theory was put into a broader context as part of the theory of quantization of the electromagnetic field in free space, initially developed in 1926 by the founders of quantum mechanics, Werner K. Heisenberg (1901-1976), Ernst P. Jordan (1902 - 1980) and Max Born (1882-1970) and refined in 1927 by Dirac, in the so called second quantization. In this theory, the electrons with positive and negative energies can be described in terms of creation and annihilation operators. Furthermore, we show in this paper how the energy of the quantum vacuum can be used to understand the Casimir effect, a phenomenon which although intrinsically quantum has a macroscopic manifestation.

Keywords: Quantum vacuum; Quantum fluctuations; Quantization.

Referências bibliográficas

ANDREATA, Mauro Antonio. **Processos quânticos em cavidades com paredes vibrantes**. 71 f. Dissertação (mestrado em Física) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos: 2000.

BORN, Max; HEISENBERG, Werner Karl; JORDAN, Pascual. **Zur Quantenmechanik II (Sobre mecânica quântica II)**. Zeitschrift für Physik. Vol. 35, pp. 557–615, 1926.

CARUSO, Francisco; OGURI, Vitor. **Física moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos**. 2 ed. Editora Campus, Rio de Janeiro: 2006.

CASIMIR, Hendrik Brugt Gerard. **On the attraction between two perfectly conducting plates (Da atração entre duas placas perfeitamente condutoras)**. Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, Vol. 51, pp. 793-795, 1948. [Existe tradução em português. Ver artigo: COUGO-PINTO, Marcus Venicius; FARINA, Carlos; TORT, Alexandre. O Efeito Casimir. Revista Brasileira de Física, Vol. 22, p. 130-132, 2000].

CÉLERI, Lucas Chibebe. **O efeito Casimir dinâmico e decoerência**. 92 f. Tese (doutorado em Física) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos: 2008.

DIRAC, Paul Adrien Maurice. **The quantum theory of the emission and absorption of radiation (A teoria quântica de emissão e absorção de radiação)**. Proceedings of the Royal Society, A114, pp. 243-265, Londres: 1927.

HEISENBERG, Werner Karl. **Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik (Sobre o conteúdo explícito da cinemática e da mecânica quântica)**. Zeitschrift für Physik. Vol. 43, pp. 172–198, 1927.

MILONNI, Peter W. **The quantum vacuum: an introduction to quantum electrodynamics (O vácuo quântico: uma introdução à eletrodinâmica quântica)**. Academic Press, Los Alamos, New Mexico: 1993.

MOHIDEEN, Umar; ROY, Anushree. **Precision Measurement of the Casimir forces from 0.1 to 0.9 μ m (Medida precisa da força de Casimir no intervalo de 0,1 a 0,9 μ m)**. Physical Review Letters, Vol. 81, pp. 4549-4552, 1998.

MORRIS, Richard. **Uma breve história do infinito, dos paradoxos de Zenão ao universo quântico**. Tradução de Maria Luiza, Editora Zahar, Rio de Janeiro: 1998.

OKADA, Hector da Silva. **Efeito Casimir dinâmico em 1+1 dimensões**. 181 f. Dissertação (mestrado em Física) – Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal do Pará, Belém: 2011.

PLANCK, Max. On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum (Sobre a Lei de Distribuição de Energia no Espectro Normal). Annalen der Physik, vol. 4, p. 553, 1901. [Existe tradução em português. Ver artigo: PLANCK, Max. **Sobre a Lei de Distribuição de Energia no Espectro Normal**. Tradução de Ildeu de Castro Moreira. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, no. 4, pp. 538-542, 2000.]

OLIVEIRA, Yuri Alves de; ANDREATA, Mauro Antonio. **O efeito Casimir**. In **Anais da 1ª Semana da Física do Campus Catalão**. Blucher, Vol.1, pp. 39-44, São Paulo: 2014. Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/9926>>