O papel das aproximações na Física: o caso de experimentos e teorias controversas no efeito Casimir

Luis Reyes-Galindo[1]

Tradução: Tiago Ribeiro Duarte, Adriano Premebida, Fabrício Neves

Revisor técnico: Rafael de Araujo Álvares Marinho[2]

Introdução: O que é aproximar?

Comecemos com uma definição: *aproximar* um resultado implica uma solução que se sabe próxima à resolução exata de um problema, tendo consciência de que o resultado aproximado é distinto da solução exata.

A Física teórica baseia-se em aproximações para resolver a maioria dos enigmas que enfrenta na prática, e estas soluções não são exatas. Isto acontece porque a porcentagem dos problemas aos quais se pode dar uma solução exata é uma parte infinitesimal do total dos problemas possíveis. Esta necessidade de aproximar provém de três fontes distintas, e o propósito deste trabalho, em primeiro lugar, é distinguir entre estes três tipos para, posteriormente, exemplificar o seu uso em um caso real de controvérsia na Física Moderna. Apresentam-se, a seguir, os três tipos de aproximações:

i. Aproximações que são necessárias para a explicação de fenômenos novos, anormais, atípicos e extraordinários, ou para modelar fenômenos que são acessíveis por meio de trabalho de laboratório (chamaremos a este conjunto de explicações, aproximação$_{1)}$.

A aproximação$_1$ é imperiosa quando existe um desconhecimento profundo ou total dos princípios *físicos* que regulam um sistema. As equações que descrevem um sistema podem ser desconhecidas, por exemplo, uma vez que, anteriormente, o ser humano não havia enfrentado o fenômeno que se queria explorar. Um exemplo recente

---

[1] Graduado em física e mestre em filosofia e sociologia da ciência e tecnologia pela Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), onde trabalhou no Instituto de Física como assistente de pesquisa durante vários anos. É doutor em sociologia pela Universidade de Cardiff, onde pesquisou as dimensões sociológicas da física teórica. Email: luisreyes@ciencias.unam.mx.

[2] Graduado em Física e Mestre em Educação pela UFMG. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Congonhas.

é o fenômeno conhecido com “matéria escura”. Várias observações, na astrofísica, têm chegado à conclusão de que se as leis da gravitação conhecidas são corretas, o movimento das galáxias e aglomerados de galáxias requer muito mais matéria do que se pode observar (aproximadamente nove vezes mais!). Apesar disso, esta matéria hipotética é completamente invisível, o que se levou a pensar que este tipo de matéria é completamente diferente da matéria que se conhece[3]. O candidato favorito para explicar estes fenômenos é conhecido como “matéria escura fria”, e os físicos propõem a este tipo de matéria características específicas extrapoladas ou fora do Modelo Padrão; a denominação mais popular do Modelo estendido é conhecida como Modelo Supersimétrico Mínino (MMS, na sigla em inglês). Mas alguns dos parâmetros que descrevem a nova matéria são totalmente arbitrários. Espera-se que aproximando$_1$ estes parâmetros obtenham-se resultados que concordem com as observações astronômicas. Enquanto a “matéria escura” é uma estratégia generalizada para resolver as anomalias da velocidade de rotação galáctica, o MMS é uma aproximação$_1$ baseada em argumentos da Supersimetria (uma extrapolação dos métodos matemáticos que suportam o Modelo Padrão).

Uma aproximação$_1$ é uma aposta, pois não há nada dentro da física conhecida que assegure com cem por cento de probabilidade que o fenômeno observado, de fato, está descrito por esta física. Não obstante, pode ser que isto aconteça (por exemplo, o caso da explicação da órbita irregular de Urano, postulando a existência do planeta Netuno, que não necessitou mais do que desta hipótese para corroborar a mecânica Newtoniana) ou não (a subsequente impossibilidade de explicar o estranho periélio de Mercúrio, postulando o hipotético planeta Vulcan, que requereu a criação de uma nova teoria da gravitação).

ii. Aproximações que são necessárias para explicar fenômenos ou criar modelos usando uma teoria física que se sabe, de forma aberta ou explícita, antiquada, incorreta, incompleta ou ultrapassada (denominaremos, aproximação$_2$).

Suponha-se que, como no caso do planeta Vulcan, uma aberração chega a se resolver tão somente com uma nova teoria física (por exemplo, a gravitação de Einstein) e que, finalmente, esta nova teoria é aceita como correta; isto é, que ocorra uma

---

[3] O chamado Modelo Padrão da Física de Partículas enumera todos os tipos de partículas fundamentais e — salvo a matéria escura — nenhum tipo de matéria observada conseguiu escapar a esta classificação.

revolução do tipo descrito por Kuhn. Como também reconheceu Kuhn, em certas ocasiões, é conveniente, por razões meramente pragmáticas, seguir usando a velha teoria, tendo em vista que a velha teoria mantém uma ontologia mais acessível ou porque os cálculos com a velha teoria resultam em boas aproximações$_2$ para uma boa quantidade de problemas. Por exemplo, hoje em dia, a gravitação Newtoniana é utilizada na maioria dos cálculos práticos da Física, desde o cálculo da trajetória de satélites até muitas das interações em escalas intergalácticas. Uma das propostas alternativas à matéria escura para explicar a rotação irregular das galáxias é o uso da chamada Dinâmica Newtoniana Modificada (*Modified Newtonian Dynamics* – MOND). Nota-se, no nome, que a modificação é uma ligeira alteração sobre as equações da velha gravitação do século XIX, pois é ela que se usa na prática dentro das áreas de investigação de ponta em grande parte da astrofísica, e não a Relatividade Geral. A razão é que resolver as equações de Einstein é complicadíssimo, e se sabe que os resultados difeririam quase imperceptivelmente para uma grande porcentagem dos casos que se abordam. Um exemplo menos famoso é o uso da equação de Klein-Gordon no lugar da equação de Dirac em eletrodinâmica quântica (QED, na sigla em inglês). A primeira implica equações muito fáceis de resolver e conserva a maioria das propriedades fenomenológicas relevantes para muitos problemas. A segunda requer um aparato matemático muito mais complexo, mas dá conta do fenômeno do spin (momento eletromagnético intrínseco) que é fenomenologicamente importante em muitas outras aplicações, mas não em todas. A maioria dos livros texto sobre QED introduz, primeiro, a equação de Klein-Gordon e, somente nas seções avançadas, trata a equação de Dirac explicitamente.

A condição de uso de uma aproximação$_2$ sobre uma velha teoria é o reconhecimento explícito da classe de parâmetros físicos em que as teorias velha e nova são compatíveis. Um problema possível, sobretudo ao elaborar modelos, é que, em muitas ocasiões, este conhecimento não pode sustentar-se *a priori*.

iii. Aproximações puramente matemáticas, nas quais as *leis* físicas *supõem*-se conhecidas *exatamente* (nominaremos aproximação$_3$).

Os dois tipos de aproximações$_{1,2}$ anteriores são bem conhecidas, sobretudo para a filosofia da ciência, e dão origem a seus problemas clássicos de redução de teorias, incomensurabilidade, subdeterminação teórica, etc. Dada a relação e os espaços comuns entre filosofia e sociologia da ciência, estes tipos de aproximações não são fenômenos novos. Apesar disso, o terceiro tipo é muito menos conhecido, ainda que tenha um papel extremamente relevante na rotina diária de um físico, sobremaneira de um físico teórico. Inclusive, não seria um exagero considerar que aprender a aproximar$_3$ e desenvolver aproximações$_3$ é uma das atividades que mais ocupa o tempo da vida de um físico teórico. Nas aproximações$_3$ há uma suspensão da dúvida sobre a veracidade das leis físicas, ainda quando é possível pensar em que, em um futuro longínquo, as leis poderiam alterar e o que se poderia obter com isto.

Se seguirmos brevemente a linguagem do marco teórico de Kuhn, uma vez que uma revolução fixou um paradigma teórico dentro de uma comunidade particular (ou, quiçá, um campo pré-científico consolidou o seu primeiro paradigma) deve-se, em grande medida, haver uma suspensão da dúvida sobre a veracidade dos elementos básicos de uma determinada teoria; assim entrando no período de uma ciência normal. Parece que a única atividade que resta para o físico teórico, nestes períodos normais, é a de delinear equações interessantes e resolvê-las. Isto seria tudo, exceto por um curioso fato: a maioria das equações matemáticas não tem uma solução exata. Mas para explicar isto é preciso haver um desvio para explicar o que significa exatamente quando uma solução é "exata".

1. O que é uma solução matemática exata?

O objeto matemático básico com o que opera um físico é a função numérica. Em um sentido pragmático, uma função define-se como uma relação entre dois conjuntos de objetos; portanto, uma função numérica estabelece uma relação entre conjuntos de números. Por exemplo, a função

$$f(x) = x + 3$$

estabelece uma relação entre um conjunto de números reais A e outro conjunto B, tal que a um elemento de A (digamos "1") corresponde um elemento de B (o chamamos *f(1)*). Qual é *explicitamente* o elemento que corresponde a "1"? A função estabelece-o usando uma regra de transformação *explícita*.

$$f(1) = 1 + 3 = 4$$

e assim se procederia para qualquer número x em A, dando como resultado um número em B (o número original mais 3). Pode resultar também conveniente pensar em uma função como uma máquina que transforma um número em outro. Mas o elemento de entrada 'x' de uma função não tem que ser necessariamente um número. Poderia ser uma tríade de números (que poderia corresponder às coordenadas cartesianas de um ponto no espaço) ou um quarteto deles (coordenadas mais uma medida de tempo, por exemplo). Incluso, podem existir funções que não associem números, mas quaisquer outros tipos de expressões. Exemplo *f(x)=cor da fruta (x)*; *f(limão)=verde*.

O matemático francês Joseph Liouville (1833) introduziu o conceito classificatório de "função elementar" como uma classe de funções básicas, ou combinações matemáticas simples destas, tal que o algoritmo entre o valor de entrada "x" e o valor de saída "*f(x)*" é, matematicamente falando, fácil de obter mediante métodos "elementares". Dentro desta classe de funções, estão os polinômios, as funções trigonométricas e suas funções inversas, e as funções exponenciais e suas inversas (os logaritmos). Até nossos dias, a classificação de Liouville mantém-se quase intacta, salvo que, em ocasiões específicas, incluem-se algumas funções extras. Considera-se que qualquer combinação das funções elementares, mediante operações elementares (soma, subtração, divisão, multiplicação, raiz; também enumeradas por Liouville), em um número de passos finitos, resulta uma função "em termos elementares".

A importância das funções elementares origina-se do fato de que, dado um valor de entrada "x" exato, em teoria é possível calcular um valor de saída "*f(x)*" igualmente exato. Mas por que "em teoria" e não "em prática"? Resulta que em casos simples como a função *f(x)* igual a "soma a x três unidades" o resultado é imediato. Apesar disso, nem todas as funções elementares são tão diretas. O caso mais simples de entender é o de duas funções trigonométricas, exemplifiquemos com a função cosseno. O cosseno é uma função que, em sua formulação grega original, estabelece a relação entre um ângulo inscrito dentro de um círculo de raio unitário e a longitude de um dos lados do triângulo formado pelos pontos de intersecção com o círculo. Para um ângulo "x=0", pode-se ver, por observação direta, que o $cos(x=0^o)=cos(0^o)=1$. Igualmente, $cos(90^o)=0$. Para outros valores (ver figura), pode-se demonstrar, mediante argumentos geométricos simples, que o valor é um número exatamente conhecido. O mesmo sucede com a função seno. Para as funções exponenciais e logarítmicas, de fato, só há um valor que é "exatamente" conhecido, x=0.

$sin(x) = x$ -

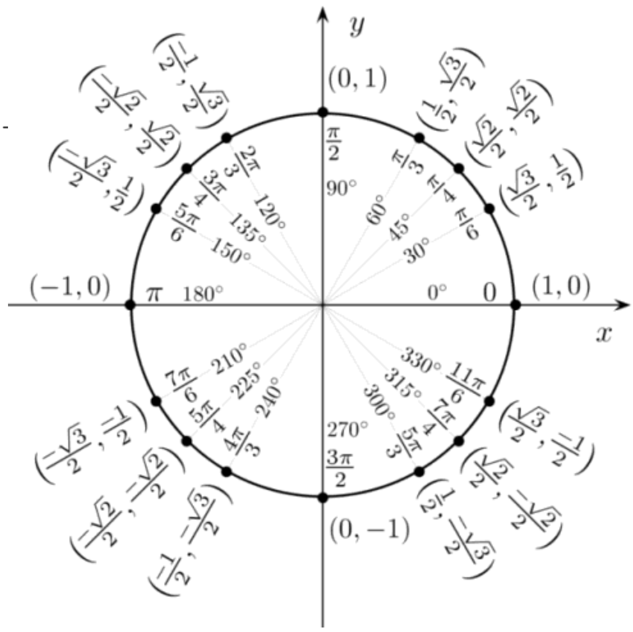

Figura 1: para alguns ângulos, podem-se calcular valores *exatos* das funções seno e cosseno.

Contudo, gerar o valor de qualquer valor arbitrário é possível, ainda que exija um pouco de tempo. Para isto, empregam-se as chamadas séries assintóticas ou expansões assintóticas[4]. É bem conhecido, no campo das matemáticas puras, que as funções elementares podem expressar-se como somas infinitas do tipo:

Estritamente falando, só se pode tratar de "igualdade" entre ambos os lados da igualdade quando a série contém um número infinito de termos. É claro que nossas mentes não podem apreender isto e, na prática, o que se faz é cortar a cadeia de expansão.

$$sin(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \ldots$$

$$sin(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \ldots \pm \frac{x^n}{n!} + R(n, x)$$

Assim, inclui-se um valor até um grau *n* desejado, e é um termo residual que depende tanto do grau máximo de aproximação$_4$ e do valor de entrada de "*x*" [5].

Para as funções elementares, entre o maior grau n de aproximação$_4$, é bem

[4] Do Grego *asymptotos*, significando "que não caem juntas; que não se reduz, não coincidente" [qual a fonte bibliográfica consultada?]. As assíntotas, na geometria euclidiana, são linhas no espaço que se aproximam uma da outra até quase se tocarem, separadas por distâncias infinitesimais, mas sem "realmente" tocarem-se em nenhum ponto.

[5] É necessário, aqui, enumerar outra definição de aproximação (aproximação$_4$). Trata-se de uma "aproximação" que busca encontrar uma resposta *razoável* a um problema *puramente matemático*. Este processo de levar um problema físico ao terreno puramente matemático é, por si mesmo, digno de se entender com maior profundidade ao tempo de análise que se pode dedicar aqui.

conhecido que R decresce até ficar extremamente pequeno. Usando a expansão, pode-se aproximar de um valor "real" de *sin(x)* tanto quanto se queira, dependendo unicamente do esforço intelectual para atingir tal objetivo. Os computadores e as calculadoras empregam exatamente este tipo de expansão para aproximar$_4$ os resultados numéricos. Na prática, quando se fazem cálculos mais diretos, é possível utilizar apenas um ou dois termos. Os problemas de cálculo geralmente complicam-se muitíssimo quanto mais termos forem usados, inclusive para os computadores, de modo que, com menos termos, seja possível realizar a aproximação$_4$ de modo mais rápido.

O físico-matemático Michael Berry, um especialista no uso das expansões assintóticas para resolver problemas em ótica, assinala que as séries assintóticas simplesmente são expressões "decodificadas" das demais funções. Berry se especializou-se em entender fenomenologicamente o comportamento destas séries para funções não-elementares, para as quais "cortar a cadeia" das séries demasiadamente cedo, elimina precisamente as propriedades mais interessantes das funções. Berry trata de compreender o que chama "limites singulares", pontos matemáticos nos quais há uma transição entre o mundo que se pode descrever usando funções simples (e com explicações simples) e o que requer os termos superiores.

> Há muitos exemplos disto, nos quais se tem um limite singular, e um se aproxima do limite, mas não se está totalmente aí, nestas fronteiras se pode observar fenômenos que não se teria anteriormente [6].

2. A importância de saber "cortar a cadeia": um exemplo de modelagem usando aproximações$_4$

Não é necessário ir mais além das funções elementares para perceber a importância de saber cortar a cadeia de continuidade de uma função e, com um exemplo simples, poder-se-á apreciar o valor de utilizar o vocabulário introduzido anteriormente. Tomemos um exemplo clássico da dinâmica de Newton, quiçá, o exemplo mais trabalhado em livros textos de física: o pêndulo simples, o qual consiste em uma idealização de um sistema físico — efetivamente — simples: uma pedra ou outro objeto pesado pendurado em um ponto qualquer através de um fio delgado. Qualquer livro texto elementar segue este procedimento. Primeiro, faz-se notar ao estudante que o

[6] Entrevista com o Prof. Michael Berry, seis de abril de 2010, Universidade de Bristol.

propósito do exercício é descrever o movimento do pêndulo e, para isto, basta descrever a variação do ângulo que o fio faz com a diagonal. Para tal, utilizam-se os seguintes fatos:

a) O sistema está bem descrito pela dinâmica de Newton;
b) As únicas duas forças sobre a pedra são tensão do fio e a força da gravitação;
c) A força gravitacional pode ser considerada como uma constante, igual ao peso da pedra (sua massa multiplicada pela aceleração gravitacional constante);
d) O sistema idealizado está, em geral, muito bem descrito por este modelo simplificado.

Mas, o mais interessante para o sociólogo é o que não se menciona ao idealizar o sistema:

a) Se aceita, para propósitos práticos, que a dinâmica Newtoniana é uma boa aproximação$_2$ para o problema. O problema tratado com a Relatividade Geral seria, em todo caso, demasiado complicado de resolver exatamente, isto é, o trabalho de aproximar$_3$ é uma solução, usando relatividade geral; seria absurdamente difícil e — argumenta-se para o estudante — levaria a correções tão pequenas que não valeria a pena o trabalho inverso. De qualquer forma, é bem conhecido, de antemão, que, para os parâmetros físicos do problema (por exemplo, massas pequenas) Einstein pode ter aproximação$_2$ com Newton.
b) Na realidade, se está ignorando muitíssimos elementos do sistema real. Por exemplo, que o fio tem peso, ainda que seja muito pequeno; que, apesar da gravidade mudar muito pouco entre o ponto mais alto e baixo do sistema, não é realmente constante (a força muda com a distância ao centro da Terra); que um fio “real” não é perfeitamente rígido e que haveria força elástica de restituição que poderia afetar o movimento; que, em um sistema real, o ponto de apoio entre o fio e o teto, onde está amarrado, não é um ponto matemático, o qual causaria atrito e calor, fazendo o sistema perder energia lentamente; que, a menos que se trate de um vácuo perfeito, existe resistência do ar; etc. Quando se mencionam estes e outros pontos, afirma-se ao estudante que tais efeitos são reais, mas muito pequenos e, portanto, pode-se ignorá-los no momento. O que se busca, desse modo, é uma aproximação$_2$ em um sistema real, usando um modelo que o estudante principiante possa resolver facilmente.

No momento em que se aceitou que o sistema Newton+pêndulo simplificado é uma boa aproximação$_2$, tanto em teoria como no modelo para o sistema “pedra pendurada no teto”, procede-se ao delineamento das equações dinâmicas que descrevem o movimento, o que é relativamente simples, e com um pouco de manipulação algébrica, que não é necessária descrever aqui, obtém-se a equação diferencial

$$\frac{d^2}{dt^2}\theta(t) = \frac{g}{l}\sin\theta(t)$$

onde o lado direito equivale à posição angular θ (mudança na velocidade do ângulo), a aceleração de gravidade *g*, e o seno do ângulo como função do tempo (recordemo-nos que o que se quer descrever é o comportamento do pêndulo; o seu movimento, e isto implica tomar o tempo como variável). Ainda que talvez, para o leigo, esta equação que inclui derivadas possa parecer aterradora, em primeira instância, para um físico, é simples “eliminar” derivadas. Simplesmente, tem-se que realizar a operação inversa, integrar, que é algo que, hoje em dia, se deseja inserir na educação pré-universitária. Não obstante, se o aluno incauto tratar de resolver esta equação diferencial, isto é, encontrar a função *θ(t)* que fornece o ângulo como função do tempo, *não haveria maneira de encontrar uma função em termos elementares que pudesse satisfazer a equação*. Não importa a complexidade de combinações engenhosas de funções elementares que se intentaria usar; não se encontraria uma adequada. O estudante frustrado iria, então, com um matemático e este revelar-lhe-ia um grande segredo: *não existe* uma solução; pelo menos, não em termos de funções elementares, ou de uma combinação finita destas. A solução, enfim, não tem solução exata.

Apesar disso, o estudante não pode render-se tão facilmente. Em seu auxílio, chega o conhecimento prático das expansões assintóticas que, agora, o autor do livro texto introduz explicitamente. Para começar, sabe-se que a expansão do seno “a mais baixa ordem” (a expansão mais simples) é, recordando as fórmulas anteriores:

$$sin(x) = x + R(x)$$

É bem conhecido (pelo autor do texto e, após leitura, pelos estudantes) que, para ângulos “pequenos”, o resíduo R é praticamente zero; tão pequeno que pode desprezá-lo. Com efeito, postula-se que, para resolver o problema, pode-se usar a aproximação$_4$ matemática

$$sin(x) \approx x$$

Para, assim, fazer a aproximação$_3$ *física*

$$\frac{d^2}{dt^2}\theta(t) = \frac{g}{l}\theta(t)$$

Como se mencionou anteriormente, a utilidade da aproximação$_4$ radica em saber quando esta é matematicamente “apropriada”, no caso, para ângulos pequenos. Caso isto seja aceito, e com todas as aproximações$_{2,3,4}$ anteriores, então, esta última equação “linearizada” é a correta. Afortunadamente, com a versão linearizada tem-se uma solução exata, que é igual a:

$$\theta(t) = \sin\left(\frac{t}{T}\right) \quad \text{com} \qquad T = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Assim, há uma relação entre a variável de entrada (o tempo) e a de saída (o ângulo) para qualquer momento futuro. Desta forma, caso se tome esta equação para descrever um pêndulo no laboratório, pode-se observar que, para ângulos “pequenos”, o comportamento está bem descrito pela equação. Quão pequeno é um ângulo pequeno? Novamente, depende do nível de precisão que se requer. Se introduzir-se a equação não-linearizada em uma simulação computacional, para avaliar o seu comportamento e se comparar com a função linearizada, poder-se-á observar que quanto menor o ângulo, mais assemelham-se as soluções para a equação. Em geral, as soluções para ambas as equações apresentam características similares; mais similitude no regime de ângulos “pequenos”.

Não obstante, o caso torna-se mais interessante para um pêndulo com um grau de liberdade mais conhecido como pêndulo duplo. Para este caso, podem-se usar uma versão linearizada ou não-linearizada das equações. Para ângulos “pequenos”, novamente os dois tipos de equações têm soluções fenomenologicamente muito parecidas. Apesar disso, para ângulos grandes, as soluções são completamente distintas. As soluções não-linearizadas dão lugar ao fenômeno do caos, ainda que as não-linearizadas sigam dando resultados regulares e combinações de movimentos oscilatórios harmônicos. A definição de qual aproximação$_{2,4}$ é “correta” para analisar um duplo pêndulo dependerá do que se está tratando de investigar, do esforço matemático ou computacional que se queira despender para levar a cabo a análise, assim como dos parâmetros particulares do problema. Inclusive, a melhor aproximação[3,4], usando o computador mais poderoso e o método mais sofisticado, não fornece a solução mais "real" de um sistema caótico como o duplo pêndulo para tempos futuros em relação ao tempo inicial.

1. O efeito Casimir: uma controvérsia sobre modelagem, aproximações e experimentos

A segunda parte deste trabalho apresenta uma controvérsia na física moderna relacionada tanto com a comunidade teórica quanto experimental no campo de forças de Casimir, as quais são forças de origem eletromagnética, mas que surgem entre dois corpos sem cargas elétricas resultantes. Sua origem é puramente quântica, ainda que estejam intimamente relacionadas com as forças de van de Waals clássicas. Existem dois tipos de explicações fenomenológicas do efeito: a explicação original de H. B. G. Casimir (1948) e a de E. M. Lifshitz (1956).

Quanto Planck publicou o seu trabalho sobre o corpo negro de 1901, fundando, assim, a mecânica quântica, na realidade, estava descrevendo o espectro eletromagnético de uma cavidade vazia em uma temperatura arbitrária. No entanto, menos sabido é que quase uma década mais tarde, Planck modificaria esta fórmula para fazê-la consistente com a Termodinâmica[7]. Esta modificação, ainda que fizesse seu espectro matematicamente consistente, tinha uma consequência física estranha. Afirmava que, mesmo quando não havia campos eletromagnéticos no espaço, seguia havendo uma energia associada ao campo no mesmo espaço. Esta energia recebeu o nome de "energia de ponto zero" ou "energia do vácuo" e, posteriormente, reconheceu-se que surge em todo sistema quântico oscilatório. No entanto, poucos físicos, naquele tempo, chegaram a acreditar que esta energia tivesse realidade física e apenas limitaram-se a pensar na energia de ponto zero como uma necessidade matemática que fazia a teoria consistente. Isto tinha certa lógica, pois a energia do ponto zero é uma energia absoluta e, na física, as energias medíveis são energias relativas, isto é, só se medem diferenças de energia (por exemplo, a voltagem elétrica que se mede com um multímetro é, na realidade, a diferença entre a energia dos dois pontos que tocam as

---

[7] Ver Kuhn (1987).

pontas do instrumento, ou entre um ponto e a terra física). Como a energia do ponto zero é uma propriedade "do espaço", ao calcular a energia entre dois pontos no espaço (a única propriedade física medível), esta energia deveria anular-se.

Tal postulado, de fato, era bastante razoável, pois se seguisse ao pé-da-letra as fórmulas, esta energia do espaço resultava estritamente infinita, algo fisicamente indesejável. O passo seguinte, portanto, foi pensar que "infinito menos infinito é igual a zero" e esquecer por completo a energia do ponto zero. Em seu primeiro livro-texto sobre campos eletromagnéticos quânticos, R. Feynman (1965) escreveu:

> O estado do campo eletromagnético com a energia mais baixa possível, que chamaremos o estado base ou o vácuo, é aquele no qual não há fótons em nenhum dos modos [quânticos]. Isto significa que a energia de cada modo é $h\omega/2$, onde ω é a frequência do modo. Porém, se somarmos esta energia do estado base sobre todos os infinitos modos possíveis e de frequência ilimitadamente crescente que existem até para uma caixa de tamanho finito, a soma seria infinita. Este é o sintoma mais ilustrativo das dificuldades que afetam a eletrodinâmica quântica. No presente caso, para vácuo, o problema se compõe facilmente. Suponhamos que escolhemos medir a energia do ponto zero a partir de outro ponto zero. Já que não há efeito físico que resulte de uma constante de energia [aditiva], o resultado de qualquer experimento que realizemos será insensível à eleição arbitrária do ponto zero de energia [...] Para o momento, estamos em terreno seguro atribuindo um valor de zero à densidade da energia do vazio. Até o momento não se realizou experimentos que contradigam esta hipótese.

O trabalho original de Casimir, publicado quando a teoria dos campos quânticos estava ainda se consolidando, inicia considerando duas placas metálicas, infinitamente largas, feitas de um condutor "perfeito" (ou o que é equivalente, de condutividade infinita), colocadas em um vácuo absoluto sob temperatura zero. O trabalho estava motivado por pesquisas anteriores tratando de entender o comportamento de partículas metálicas em suspensões, dentro da química de colóides; em que as partículas suspensas podiam ser pensadas como pequenas placas metálicas. Casimir mostrou que era possível considerar que as placas no vácuo poderiam modificar ligeiramente o espectro de frequências da energia do ponto zero, ainda que esta energia continuasse sendo infinita. Utilizando fórmulas matemática engenhosas, Casimir destacou que se podia retardar ambas as energias infinitas, obtendo um resultado finito. A diferença entre a energia do vácuo absoluto e o espaço com placas dependia da distância entre as placas e isto significava que, entre as placas, deveria haver uma força atrativa simplesmente devido ao fato de que "perturbavam" o vácuo. Isto também indicava que Feynman devia estar equivocado, pois a energia do vácuo certamente tinha consequências físicas medíveis. Casimir deu uma expressão exata para estas forças. Desafortunadamente, desde o princípio viu-se que medi-las seria tremendamente difícil, pois as forças eram extremamente pequenas.

O segundo desenvolvimento teórico importante chegou com o trabalho de E. M. Lifshitz, que começava descrevendo forças tipo van der Waals, mas levando em conta tanto a teoria quântica como a relatividade especial. Na física clássica, os campos eletromagnéticos são causados única e exclusivamente pela presença de cargas, assim sendo, se não há cargas, não há campos. No entanto, a eletrodinâmica quântica propõe algo muito diferente. Segundo QED[8], só se pode afirmar que o campo eletromagnético médio é nulo na ausência de cargas. A física quântica exige que as variações do campo não possam ser nulas. As medições de um campo no espaço não são medições "instantâneas", mas medições da média do campo que, na ausência de cargas em todo momento, está flutuando entre valores positivos e negativos. As flutuações vão desde os menores até os mais altos valores, no entanto a soma total é sempre zero. QED também garantia que as flutuações são tão rápidas, que não se pode observá-las individualmente, mas através das médias. Pensemos, outra vez, em um pêndulo simples. Se se realizassem muitas medições aleatórias de sua posição medindo o ângulo que forma o pêndulo com respeito à vertical e se medir a média, chegar-se-ia à conclusão que o ângulo médio de flutuação em relação à vertical é zero (para cada ângulo positivo, há um negativo de igual magnitude), sem que isto signifique que o ângulo é zero todo o tempo. Estas variações infinitamente rápidas fazem com que um átomo na superfície de um corpo esteja imerso em campos eletromagnéticos que flutuam todo o tempo. Em um átomo comum, as cargas positivas estão concentradas nos núcleos atômicos, que são massivos comparados com as nuvens eletrônicas que os rodeiam, onde se concentram as cargas negativas. Os campos oscilantes fazem com que as cargas negativas sejam facilmente empurradas, enquanto, por sua mais alta massa, os núcleos apenas movem-se. Isto resulta em uma molécula dipolar, a qual ainda que seja eletricamente neutra, tem a carga positiva concentrada em um lado e a carga negativa no outro extremo. Lifshitz propôs que, se duas placas de um material qualquer são colocadas uma próxima da outra, esta polarização dos átomos combinada com as flutuações dos campos eletromagnéticos quânticos causam uma força atrativa. Tempos depois, mostrou-se que

[8] Sigla, em inglês, para eletrodinâmica quântica (*quatum electrodynamics*).

se as placas tivessem uma condutividade infinita, a fórmula de Lifshitz daria um resultado exatamente igual à fórmula de Casimir, o qual era surpreendente, pois ambas expressões pareciam provir de pontos de vista significativamente distintos.

A vantagem da fórmula de Lifshitz era que, com ela, se podia fazer o cálculo de materiais “reais”, ou seja, não de condutores “perfeitos” que são uma idealização que não é consistente com nenhum material encontrado na natureza. Um condutor “perfeito” seria um corpo para o qual a resistividade elétrica é zero para todo campo eletromagnético incidente. Ainda que, para a maioria dos metais, há uma extensão de frequências em que isto é quase certo, não há corpos que, em geral, obedeçam este comportamento para *todas* frequências. A fórmula de Lifshitz permitia o uso de praticamente qualquer material, cuja função dielétrica fosse conhecida ou pudesse ser modelada matematicamente (a função dialética da relação entre um campo eletromagnético incidente e a resposta do material) e podia tratar placas de espessuras distintas.

2. Experimentos sobre o efeito Casimir

Como se mencionou anteriormente, as forças de Casimir-Lifshitz são muito pequenas. Entre duas placas paralelas, mesmo a menor diferença de carga elétrica parasitária causará uma força entre as placas de várias ordens de magnitude maior que as forças Casimir. Ademais, as forças de Casimir são forças de “alcance muito curto” e são inversamente proporcionais à quarta potência da distância, enquanto as forças eletrostáticas são inversamente proporcionais ao quadrado. O efeito resultante é que as forças de Casimir, mesmo sendo a única força, só tornam-se significativas em magnitude em distâncias muito curtas, em torno dos micrometros (um milionésimo de metro). Em 1958, M. Sparnaay tentou medir estas forças, obtendo como resultado uma medição com 100% de erro experimental, o qual se limitava a ponderar que havia medido “algo” que parecia em magnitude à força Casimir, mas sem poder dar mais informação. Surpreendentemente, não foi senão, até 1997, que S. Lamoreaux realizou os primeiros experimentos de precisão aceitável – em torno de 5%, o que ainda é alto para os padrões da física moderna.

3. Desenvolvimentos teóricos

Enquanto a dimensão experimental do efeito Casimir esteve imobilizada durante quase meio século, o desenvolvimento teórico foi prolífico no mesmo período. Entre as novas propostas teóricas, encontramos:

a) *Extensão da teoria a temperaturas "finitas".* A teoria original estava formulada para temperatura zero, que é um estado fisicamente inalcançável. Utilizando basicamente a teoria do corpo negro de Planck, pode-se fazer cálculos estando o sistema em temperatura arbitrária.

b) *Extensão da teoria para sistemas com geometrias distintas*. Pode-se perguntar o que ocorre se, em lugar de duas placas paralelas, há objetos de forma arbitrária. A resposta não é simples, pois, para a maioria dos casos, não há respostas exatas nem métodos fáceis de aproximação[4]. Em particular, desenvolveu-se a chamada "aproximação de Derjaguin" ou "teorema da proximidade", um dos resultados teóricos mais utilizados para comparar teoria com experimento. O teorema da proximidade relaciona a força entre duas placas a uma distância arbitrária e a força entre uma placa e uma esfera a essa mesma distância. Esta aproximação[4] é muito útil no terreno experimental. Atualmente, os experimentos em forças de Casimir realizam-se entre micro e nano-máquinas. Manter duas placas deste tamanho paralelas é extremamente difícil e se não estão perfeitamente paralelas, os resultados não são nada confiáveis. Ao invés disto, o experimento de Lamoreaux utilizou uma placa e uma esfera, e a força calculou-se, usando o teorema de proximidade.

c) *Desenvolvimento da matemática do efeito Casimir*. A principal dificuldade do ponto de vista matemático é que as energias que se devem subtrair são sempre infinitas. Criaram-se distintos "esquemas de regularização": métodos e algoritmos que fazem as subtrações certeiras e matematicamente consistentes. Além disto, trabalhou-se sobre esquemas de aproximações[4] confiáveis.

d) *Extensão da teoria para materiais arbitrários.* A qualidade da fórmula de Lifshitz foi explorada em tal grau que, sabendo-se a resposta ótica de qualquer material, é fácil encontrar a sua função dielétrica e calcular a força de Casimir. Não obstante, resta um problema: deve-se saber a resposta ótica para todas as frequências, ou seja, deve-se fazer experimentos em frequências muito altas e muito baixas. No caso de frequências baixas é particularmente difícil. Além disto, para a maioria dos materiais, não há medições, mas extrapolações das medidas existentes. Estas extrapolações, junto com modelos fenomenológicos aceitáveis, viram a incursão de outro tipo de físicos na comunidade que resultaria extremamente importante em pouco tempo: *experts* na modelagem de materiais.

e) *Modelagem de superfícies rugosas*. Mesmo o material mais puro e com o maior grau de polimento, uma vez visto de muito perto, apresenta rugosidades. Na escala nanométrica, onde se realizam os experimentos, ao invés de plana, estas superfícies assemelham-se à superfície de uma cadeia de montanhas escarpadas. A teoria também tratou satisfatoriamente deste problema, dando aproximações[4] que relacionam a força entre uma superfície plana e uma superfície rugosa similar.

1. A prescrição de Schwinger

Dado que a fórmula de Lifshitz é complicada para a realização de cálculos, buscou-se maneiras de simplificar o cálculo das integrais necessárias, sobretudo, para a situação em que a temperatura é diferente de zero. A partir disto, transformaram-se as integrais multidimensionais (que são sempre muito difíceis) em séries de somas infinitas (muito mais fáceis, no que tange à computação) conhecidas como “somas de Matsubara”. Cada elemento das somas de Matsubara corresponde a um “modo” quântico (os mesmos aos que se referia Feynman na passagem já citada). Literalmente, a teoria consigna que as somas devem ser feitas desde a frequência zero até frequências infinitas, o que é *praticamente* impossível. O que se faz é somar até uma frequência “muito” alta e, depois, observar como muda a soma quando se move a frequência de corte para cima (se se analisa cuidadosamente, esta é uma série de aproximações[3]). Por outro lado, para comparar a fórmula de Lifshitz com a de Casimir, é necessário usar condutividades infinitas, razão pela qual também se segue o mesmo processo: calcula-se a força para uma condutividade finita e, a seguir, chega-se ao limite infinito.

No entanto, surge um problema. O comportamento de uma das frequências baixas é anormal. Exatamente, o valor mais baixo não está matematicamente definido para o campo elétrico. Para isto, aplicaram-se vários esquemas matemáticos ao problema, de modo que este pudera estabelecer-se. Seguindo uma técnica particular, chegava-se a uma resposta distinta daquela em que se alcançava seguindo outra ligeiramente diversa. Em particular, se, primeiro, elevava-se a frequência a infinito e, depois, somava-se o termo mais baixo, chegava-se a um resultado diferente de quando, primeiro, se somava e, posteriormente, elevava-se a frequência. Isto representava um verdadeiro enigma, pois não havia nada na *física* do problema que dera prioridade e fixara um dos dois métodos. *Necessariamente* um deveria ser incorreto.

J. Schwinger, um dos fundadores da QED, trabalhou no problema, usando a sua chamada "teoria das fontes" (*source theory*) que oferecia uma visão da eletrodinâmica ligeiramente distinta, deixando às flutuações do vácuo o papel principal. Ainda que a teoria das fontes nunca tenha decolado em termos de popularidade, junto com o seu jovem colaborador K. Milton, Schwinger (1978) publicou um importante artigo no qual dava uma solução final ao problema, estabelecendo um algoritmo de cálculo rigoroso, conhecido como a "prescrição de Schwinger". O estudioso mostrou que o apropriado era primeiro medir o limite de condutividade e, depois, o da soma. Milton tornou-se e ainda é um dos teóricos mais importantes em forças de Casimir, tendo ajudado a disseminar a prescrição.

2. Uma pequena controvérsia

O duo teórico Boström e Sernelius (2000) publicou uma breve análise teórica dos experimentos de Lamoreaux com resultados extremamente controversos. Boström e Sernelius (B&S) fizeram notar que, nos cálculos utilizados para comparar teoria com experimento, os metais eram descritos, usando modelos que não levavam em conta um elemento muito importante: a resistividade (isto é, a resistência que opõem os elétrons a ser movidos em um metal). Por exemplo, o artigo de Lamoreaux comparava o resultado experimental com a força entre placas de metais perfeitos, a qual não corresponde à força entre dois metais reais. Havia uma diferença de tal grau que a precisão reportada de 5% deveria ser revisada e estabelecida a partir da comparação com um modelo melhor. Na linguagem estabelecida anteriormente, B&S estavam estabelecendo que a aproximação$_3$ de usar um metal ideal não era ótima e dava como resultado níveis menores de precisão do que se deveria reportar. Em lugar de metal perfeito, B&S propuseram que os cálculos teóricos se realizassem usando o popular "modelo de Drude" para metais, uma aproximação$_2$ semi-clássica que descreve metais com uma função simples (não considera nenhum efeito quântico), mas que leva em conta a resistividade e chega a resultados fenomenológicos muito razoáveis e consistentes com muitos experimentos clássicos (por exemplo, acender um foco elétrico: se os metais não apresentassem resistividade, os elétrons que se movem ao acender o circuito não perderiam energia em forma de luz e calor) [9].

A controvérsia surgiu a partir de um segundo ponto explicado por B&S. Se utilizar-se uma fórmula tipo Drude para calcular o caso de Casimir com condutores perfeitos, um dos elementos da soma de Matsubara vira automaticamente zero; isto é, a contribuição à força total associada a este termo é nula. Especificamente, é o primeiro termo da soma de frequências que, na literatura especializada, se conhece como o ”modo TM m=0”, que desaparece. Isto significa que a soma deve ir não da frequência m=0 até infinito, mas da frequência m=1 até infinito. No entanto, no marco da prescrição de Schwinger, o modo TM=0 contribui para a soma, e a contribuição é crucial no valor da força total.

Porém, não havia repercussões só para Lamoreaux (que é mencionado por B&S nos agradecimentos do artigo por ter facilitado os seus dados experimentais). O grupo de U. Mohideen (1998) havia publicado resultados experimentais nos quais reportavam erros menores que 1% para distâncias menores, empregando as mesmas expressões teóricas que B&S criticavam. Ao comparar o experimento de Mohideen, primeiro, com a “teoria incorretamente tratada” (a prescrição de Schwinger) e, a seguir, contra “a nova teoria sem o modo TM m=0”, B&S enfatizaram que as distâncias nas quais a diferença teórica fazia-se relevante eram precisamente as distâncias onde os experimentos perdiam a alta precisão. Dado que as forças de Casimir são de curto alcance, nestas distâncias “grandes”, o sinal da força perde-se entre ruídos dos instrumentos, de forma que era impossível decidir a favor de uma teoria a partir destes experimentos. B&S concluíram que era necessário avançar no terreno experimental – sobretudo, nas distâncias maiores – para saber se a teoria, de fato, deveria ser modificada.

3. As críticas a Boström e Sernelius

No início, os teóricos principais opuseram-se veementemente às correções propostas por B&S. Por exemplo, em seu livro enciclopédico sobre o efeito Casimir, Milton (2001) faz referência à controvérsia em uma nota de rodapé:

> Surpreendentemente, esta prescrição que é tão óbvia tem se tornado controversa. Boström e Sernelius […] declaram que o [modo TM

[9] O modelo de Drude é também uma aproximação$_2$ já que, abertamente, se reconhece que é incompleto, pois tampouco é um modelo quântico. O uso de um metal ideal é uma aproximação$_3$ porque supõe que, de fato, toda a física do problema é bem conhecida e trabalha a partir dali; não há contradições com nenhuma das teorias anteriores, mas não é um sistema que se encontra no mundo real.

> m=0] deve ser omitido. Isto resultaria em uma correção térmica significativa na região experimentalmente acessível, enquanto esta correção não se tem observado – ver mais abaixo. Que esta declaração é incorreta tem sido demonstrado por Lamoreaux […]. Ver também o trabalho de Svetovoy e Lokhanin […], os quais também obtêm uma grande correção térmica, novamente em contradição com os experimentos. Uma explicação sensata das ambiguidades que levaram a estes resultados errôneos pode se encontrar nos trabalhos de Bordag [e Mostepanenko].

A comunidade teórica dividiu-se em duas frentes, a velha escola de Milton junto com o grupo formado por M. Bordag, V. Mostepanenko e G. Klimchitskaya, e o grupo mais jovem, no qual Boström, Sernelius e Svetovoy foram, no princípio, as vozes dissidentes mais visíveis. Em particular, Bordag, Mostepanenko e Klimchitskaya, trabalhando junto com Mohideen, estavam claramente tratando de consolidarem-se como os líderes dos teóricos experimentais, publicando conjuntamente monografias e livros monumentais e enciclopédicos. Inclusive, em algumas publicações de resultados experimentais, Bordag, Mostepanenko e Klimchitskaya (M&K), os quais historicamente eram pilares teóricos da comunidade junto com Milton, eram mencionados como co-autores, por exemplo, Mostepaneno (1999). M&K tinham desenvolvido algumas das correções mais importantes dentro da modelação de materiais "reais" e apresentavam a maior resistência aos novos resultados, tanto teórica quanto experimentalmente.

As críticas contra B&S e Svetovoy por parte de Mostepanenko (2000, 2001) não tardaram e resumiam-se principalmente em ressaltar que:

A) A prescrição de Schwinger havia resolvido a redução da fórmula de Lifschitz no resultado de Casimir, enquanto que a nova prescrição de B&S reintroduzia um problema que, na realidade, já estava resolvido.
B) O uso indiscriminado do modelo de Drude implicava correções lineares que resultavam "fisicamente" inaceitáveis e que tampouco eram observadas.
C) A proposta de ignorar o modo TM m=0 era resultado de uma análise matemática errônea que podia ser resolvida usando método apropriado.
D) Os experimentos de Mohideen davam a razão ao uso da prescrição de Schwinger.
E) Incluso, se o modelo de Drude é o mais adequado para descrever metais nestes regimes de frequência, a diferença entre usar este modelo ou outros modelos que não tomaram em conta a resistividade (o modelo de plasma) era insignificante,

com variações menores a 2%.

F) As correções entravam em conflito com a terceira lei da termodinâmica.

Estes dois últimos pontos devem ser tratados como muito cuidado, pois foram a fonte de outra controvérsia que dividiu a comunidade fortemente e a mantém dividida até hoje.

1. A violação do Teorema de Nernst, e a disputa entre Drude e Plasma

Em Mostepanenko (2001a), os autores mencionam, no final do artigo, que um dos problemas com as modificações de B&S era que havia uma correção negativa à força devido à temperatura finita e que “tal comportamento é inaceitável do ponto de vista termodinâmico, porque leva a uma entropia negativa, além de estar em conflito com o experimento”.

O problema de usar o modelo de Drude foi tratado em Mostepanenko (2001b), onde se fornece uma tentativa de solução, aparentemente final (como muitas outras soluções “finais”, que escrevia M&K). Dado que efetivamente usar um metal “ideal” não corresponde ao comportamento de nenhum metal que se possa encontrar em um laboratório, era necessário utilizar um “modelo de plasma” que também é um modelo tradicional na física dos metais. Os autores enfatizam que o modelo de plasma “realista” (em oposição ao modelo de metal “ideal”), além de ter a vantagem de que o modelo TM m=0 não desaparece, usando este modelo.

Mas quais são as diferenças entre o modelo de Drude e o modelo de plasma? Dos dois modelos, o de plasma é o mais fácil de descrever, comecemos por este. Um metal é um material que se converte em um fácil condutor de corrente elétrica. Para que isto aconteça, alguns dos elétrons do material devem estar relativamente “livres”, ou seja, devem poder mover-se facilmente de átomo a átomo ao ser empurrados ou puxados por um campo elétrico. O fenômeno de movimento dos elétrons é a corrente elétrica. Em materiais não-condutores, os elétrons simplesmente não estão livres, mas praticamente fixos aos seus átomos originais. O modelo de plasma simplesmente supõe que os elétrons de condução estão flutuando livremente em um espaço confinado (ao redor da rede cristalina de núcleos atômicos do material) e um campo elétrico aplicado causa o movimento sem impedimento algum. É “realista” no sentido de que toma em conta que os elétrons livres têm, de fato, uma massa que não permite que a aceleração seja instantânea e, ademais, admite que a densidade de elétrons depende do material que se quer descrever. A massa não é a massa original do elétron, mas uma massa "efetiva" que se calcula tomando em conta o comportamento quântico dos elétrons e possíveis choques com a rede cristalina.

Ainda que se trabalhe na física clássica e na mecânica estatística, o modelo de plasma é uma boa aproximação$_2$ para metais quando os campos aplicados são altamente energéticos, contudo, para baixas frequências, não funciona assim. Na realidade, os elétrons livres estão sujeitos a minúsculos alinhamentos e choques com os núcleos atômicos. Isto é tomado em conta pelo modelo de Drude e ainda que siga tratando os elétrons como um gás semi-livre, ele acrescenta um parâmetro de atrito efetivo que também depende do material. O modelo de Drude permanece sendo uma aproximação, associada à física clássica, mas é universalmente reconhecido como superior ao modelo de plasma para descrever baixas frequências.

A contestação daqueles que começavam a ver problemas sérios com o não levar em conta os efeitos da dissipação era previsível. O modelo de plasma não resolve nada, pois, ainda que seja uma aproximação$_2$ ligeiramente mais "realista" do que tentar modelar o efeito Casimir, usando o metal "ideal", utilizando-o *não* se toma em conta a origem do problema, porque ignora-se a dissipação! Nas palavras de um *expert* em Estado Sólido que faz parte da comunidade de Casimir:

> Na realidade o que acontece é que essas pessoas não entendem de Estado Sólido[10]. O modelo de Drude tem 100 anos mostrando que funciona, ainda que não para todos os metais. É complexo[11] por duas razões, uma que deve ser causal e a outra é que os materiais absorvem energia. Em particular o pólo em w=0 garante a existência da condutividade DC(corrente direta). O escopo da aplicação de Drude é limitado quando se vai a energias mais altas e tem transições inter-banda; aí já não serve mais. A necessidade de usar plasma e reinventar o Estado Sólido é um recurso *ad hoc*. Suponhamos que os resultados de Decca são certos e plasma é o bom para Casimir[12]. Isto é

[10] O Estado Sólido é uma subárea da física de matéria condensada que tem como propósito criar modelos fenomenologicamente adequados para os materiais sólidos de todo tipo. Os modelos buscam não somente dar conta dos dados experimentais, mas que também expliquem o comportamento destes a partir de "primeiros princípios" físicos. Assim, o modelo de Drude não somente é fenomenologicamente mais adequado, mas também ao tomar em conta a dissipação faz uso de um fenômeno físico bem conhecido.

[11] "Complexo" faz referência a um *número* complexo, ou seja, com uma parte real e uma imaginária. O "pólo" relaciona-se precisamente à parte imaginária.

[12] R. Decca, trabalhando em conjunto com Mostepanenko, realizou, alguns anos depois, experimento de maior precisão que, ainda que tomados com ceticismo no início por alguns grupos, foram aceitos, posteriormente, como adequados. Hoje em dia, os experimentos de Decca são considerados mais precisos no campo, ainda que continue ocorrendo certa desconfiança quanto às precisões relatadas. Ver Reys-Galindo (2007).

> interessante e deve-se entender porque isto ocorre, mas não há que reinventar o Estado Sólido, já que como disse Drude, está mais que provado experimentalmente. (...) Obviamente, na comunidade de Estado Sólido eles são considerados loucos[13].

Os três pontos relevantes que dão sustentação ao modelo de Drude sobre o plasma, desde o ponto de vista do Estado Sólido, são:

A) Sabe-se que o modelo de Drude é uma aproximação adequada no nível de frequencias onde ocorre a controvérsia.

B) O modelo de Drude considera processos físicos (dissipação) que, como se sabe, *devem* ocorrer nesses materiais.

C) O modelo de Drude está respaldado pelas comunidades teóricas e experimentais do Estado Sólido. Atacar o modelo de Drude significa – na opinião de muitos - atacar não só um simples modelo, mas toda uma tradição de investigação, e uma das mais estáveis na física.

Não obstante a oposição que crescia com o tempo, o grupo de Mostepanenko tinha cartas igualmente fortes. Primeiramente, mostrou o que chegou a considerar um problema muito sério com o modelo de Drude usado junto com a prescrição de B&S: ao fazer os cálculos teóricos, entrava-se em aparente contradição com um dos princípios fundamentais da física teórica, a Terceira Lei da Termodinâmica, também conhecida como o "teorema de Nernst", conforme Mostepanenko (2002). A retórica de Mostepanenko é interessante, pois, está inclinada a mostrar que o uso de Drude mais B&S é uma impossibilidade lógica se aceita a Terceira Lei. Tanto nos artigos quanto pessoalmente, a ênfase de Mostepanenko era ter "provado", "demonstrado" ou "mostrado rigorosamente" que a nova prescrição era "absurda" ou "contraditória"[14]. Por outro lado, os novos experimentos de U. Mohideen e de R. Decca, ao serem analisados e comparados contra todas as permutações de prescrição + modelos pertinentes, resultavam em uma maior coincidência entre Schwinger + plasma, maior que as outras.

Sem dúvida, a análise teórico-experimental tanto para U. Mohideen como para R. Decca eram realizadas por ninguém mais que K&M. Todavia, Mostepanenko seguia

---

[13] Comunicação anônima com o autor, 2010.

[14] No primeiro congresso que assisti sobre o efeito Casimir, *Quantum Field Theory Under External Conditions* (QFEXT'05, Barcelona, Espanha), foi organizada uma mesa redonda sobre o tema. Em 15 minutos, tanto Mostepanenko como Bordag falaram sobre a "prova" matemática *absoluta* que sustentava o seu argumento, discurso que, anteriormente, já havia ouvido de Mostepanenko no Instituto de Física da Universidade Nacional do México e que seguiria ouvindo até o último congresso especializado que assisti, QFEXT'09, Universidade de Oklahoma.

usando a retórica de um empirismo simples[15]. Alguns membros da comunidade já questionavam seriamente que um grupo teórico que buscava validar a sua teoria com resultados experimentais fosse também responsável pela análise dos dados. Ainda que, hoje em dia, Decca já tenha divulgado os seus dados experimentais crus, em 2005, porém, isto não acontecia.

10. Mudanças de opinião

A nova prescrição recebeu um importante apoio a partir de 2002, quando K. Milton, um dos co-autores da prescrição Schwinger e um opositor anterior de B&S, mudou completamente de lado. Em suas palavras:

> Eu provavelmente tenho uma perspectiva única sobre esse problema, já que mudei de lado. Eu fui um dos autores do artigo de 1978 de Schwinger *et al.* que reproduziu a forma de Lifshitz e a dependência da temperatura padrão (fui estudante de Schwinger em Havard e pósdoc em UCLA). Ali explicitamente adotamos o que agora muitos chamam a prescrição de Schwinger de tomar o limite de épsilon no infinito antes de fixar o índice de Matsubara em zero. Fizemos isto, creio, para evitar uma contradição óbvia com a termodinâmica, especificamente, entropia diferente de zero na temperatura zero. Quando escrevi meu livro sobre o efeito Casimir em 2001, todavia, seguia esta prescrição ao pé da letra, e fiz alguns comentários desdenhosos sobre o outro ponto de vista que começava a emergir. Foi no congresso de Harvard de 2002 que fui convertido. Naquela ocasião já havia começado a colaborar no tema com Brevik e Hoye, mas, no entanto, não apreciava tal ponto de vista. Agora estou firmemente convencido de que a prescrição de Schwinger é incorreta e que se deve usar simplesmente dados reais e requerimentos físicos na forma de Lidshitz. Tenho lido muito a respeito dos artigos de Mostepanenko e não os considero convincentes, pois envolvem elementos *ad hoc*, tais como ignorar a relaxação e o momento transversal assim como prescrições de extrapolação[16].

Até hoje, Milton mantém-se convencido de que a prescrição de Schwingers não é o procedimento correto, da mesma forma que o resto da comunidade considera que a violação da Terceira Lei apresenta um problema real.

11. Materiais reais e a necessidade de aproximar

[15] Considere-se o título de sua publicação, "La Teoría Confronta al Experimento...." [é nome de artigo ou livro?], Mostepanenko (2004), na qual há estreita colaboração entre Mohideen e Mostepanenko.
[16] K. Milton (2005), comunicação privada com o autor.

O ponto de vista de Milton, de que se devem usar “dados reais”, tem o inconveniente de não existir tais para todas as frequências relevantes. O material com o qual se recobre o sistema esfera/placa em efeitos de Casemir é o ouro. Mesmo que a resposta óptica do ouro seja conhecida para algumas frequências, não o é para todas as frequências e, portanto, se regressa ao problema de como proceder para extrair a informação para o caso geral a partir de casos particulares, isto é, como construir modelos apropriados. O caso do efeito Casimir é estranho na física, porque é raro encontrar casos reais para os quais a teoria exija modelos de tão absoluto grau de universalidade. Geralmente, quando se quer descrever um sistema físico “real” só necessita-se saber a resposta fenomenológica do sistema entre certos níveis de parâmetros relevantes e não para todos os parâmetros. O caso serve para por em evidência as limitações inerentes das aproximações[234] que, necessariamente, devem realizar-se, e apresenta uma oportunidade de observar como se desenvolve a elaboração de um modelo.

No desenvolvimento dos modelos que descrevem as interações de Casimir, existem dois elementos retóricos recorrentes nas narrativas dos teóricos envolvidos: o uso do experimento em seu trabalho e o apoio em processos lógico-dedutivos. Ambos os elementos são bem conhecidos desde a filosofia da ciência e, até mesmo, é difícil encontrar trabalhos filosóficos nos quais a prática teórica não é reduzida a essas duas dimensões. Sem dúvida, o caso da controvérsia de Casimir mostra um panorama muito mais rico, inundado de elementos sociais.

Por exemplo, vale a pena perguntar-se o porquê de as duas partes da controvérsia darem distinto peso e relevância à diferença de experimentos. No caso de Mostepanenko, existe uma apropriação dos experimentos recentes, enquanto que, no caso de B&S e Milton, apela-se para os modelos tradicionais de Estado Sólido que, por sua vez, estão imersos em uma longa, frutífera e exitosa tradição empírica. Assim mesmo, se analisar-se o uso da dedução matemática a partir de “princípios físicos”, encontram-se amplas diferenças: enquanto que, para Mostepanenko, a violação da Terceira Lei da Termodinâmica é um resultado absurdo, irrecuperável; B&S e Milton – entre muitos membros da comunidade – têm assinalado que tal violação na verdade não existe. Recentemente, o renomado teórico L. Pitaevskii tem entrado com força na controvérsia, insistindo enfaticamente que, nos sistemas de Casimir que se estão examinando, a Terceira Lei nem se quer é aplicável (ao contrário, Mostepanenko considera que isto é completamente incorreto e as batalhas públicas entre esses dois eminentes teóricos têm se convertido em um verdadeiro circo cada vez que se encontram cara a cara).

Uma vez visto desde perto, a modelagem experimental e a prática teórica deixam de ser exercícios dentro dos campos nomológicos-dedutivos empobrecidos de conteúdo social. Os grandes debates não são só sobre as deduções, mas sobre quem crê ou não; porque crer neste modelo ou nesta teoria e porque não; como proceder para aproximar$_{234}$ corretamente e como não o fazer. Os elementos retóricos, certamente, apóiam-se sobre a crença da teoria como uma atividade baseada em modelos positivistas, mas se distanciam muito de descrever o proceder interno das comunidades.

Conclusões e comentários finais sobre a controvérsia

As controvérsias nos experimentos de forças de Casimir, na modelagem dos experimentos e na teoria associada, continuam até hoje em dia, se bem que os argumentos usados por ambas as partes têm se mantido praticamente iguais. A opinião geral da comunidade é que o problema principal, que se enfrenta nesse momento, é a falta de resultados experimentais de alta precisão (isto é, que a comunidade mesma sancione favoravelmente). Assim mesmo, o problema do modo TM m=0 segue surpreendentemente aberto sem que haja um consenso acerca de quais são os princípios básicos sobre os quais devem basear-se os argumentos teóricos. É impossível, neste momento, saber se o problema encerrar-se-á ou se será esquecido por futuras gerações como tantas outras discussões que desaparecem com o tempo, sem resolução.

Na realidade, a introdução da linguagem de subíndices nas aproximações $_{1234}$ é só um jogo linguístico e não esperamos, seriamente, que seja adotado por ninguém. Concretamente, o desejo é chamar a atenção para dois pontos. Primeiro, se as aproximações na física teórica são, quiçá, a atividade principal de um teórico, o uso da palavra "aproximação" para significar distintas ações pode levar a confusões. Se o uso de subíndices é um jogo que ressalta este fenômeno, os quatro tipos de "aproximações" assinaladas devem ser tomadas cuidadosamente como ações com diferenças relevantes na análise da prática da física teórica.

Cada um desse tipo de ação é ensinado aos físicos teóricos através do longo processo de aprendizagem e socialização profissional, e, portanto, são elementos importantes da análise sociológica. Dado que não há em essência uma fórmula universal para "aproximar" corretamente como sucede com tantos outros elementos da prática científica, aprende-se a "aproximar" simplesmente aproximando na prática diária. "Aproximar" corretamente é uma forma de conhecimento tácito que, hoje, reconhecemos como um dos objetos de estudo fundamental na sociologia da ciência. Este texto apresenta uma contrapartida teórica aos estudos clássicos sobre conhecimento tácito na física experimental[17]. A maneira nas quais ambas as partes da controvérsia de Casimir enfrenta os seus argumentos dá-se mediante símbolos matemáticos. Mas a eleição de uma ou outra aproximação, seja no modelo ou na teoria, não está determinada por nenhum tipo de algoritmo que possa ostensivamente para todo o caso[18].

Kennefick (2000: 5, 6) representa um dos poucos trabalhos disponíveis sobre os aspectos sociológicos da física teórica e ressalta exatamente esse ponto sobre o conhecimento tácito. "Assim como sucede com o conhecimento tácito na física experimental, a habilidade e o juízo com os quais o teórico manipula seu aparato só podem ser apreendidos construindo-o e usando-o ele mesmo". Além disso, assinala que: "Se dois grupos de teóricos se encontram trabalhando no mesmo problema usando distintos métodos, provenientes de campos disciplinares distintos, a brecha de comunicação pode resultar incontornável". A controvérsia do efeito Casimir parece sustentar completamente essa afirmação.

Kennefick (2000: 6), um pouco mais adiante, escreve que "na ausência de acordo entre propostas de conhecimentos rivais, uma comunidade teórica pode preferir manter a coesão da investigação ignorando, pelo menos temporariamente, aqueles programas de investigação em desacordo, inclusive quando não podem se mostrar incorretos". Se, no caso de Casimir, "ignorar" o grupo em desacordo foi a primeira reação de Milton, a sua "transformação" demonstra que, nem em todos os casos, a manutenção da coesão é sempre o caminho que se segue. Em particular, se as vozes dissidentes estão sustentadas por uma comunidade (sociologicamente) sólida, pode resultar impossível ignorá-las.

Não obstante, o importante papel que o conhecimento tácito assume na controvérsia de Casimir, ele não resulta ser o único elemento relevante, posto que, como se pode ver nas palavras de Milton, não é, no desenvolvimento dos argumentos a partir de "primeiros princípios", que está o problema, mas nos "primeiros princípios" mesmos[19]. No caso de Casimir, os atores não parecem discutir a partir de argumentos

[17] Ver Collins (1974).
[18] Ver Collins (1985).
[19] Deve se levar em conta que, ao longo das discussões, na literatura técnica, entre os grupos que estão em

que não compreendem em sua totalidade, fazem-no a partir de argumentos que entendem bem, mas em relação aos quais estão em completo desacordo. Ainda que a sociologia da ciência esteja dando ênfase, com toda razão, ao papel que os componentes não racionais desempenham no fazer científico, deve, por outro lado, acentuar que os componentes racionais são, na física teórica – quem sabe mais que em qualquer outra ciência, exceto as matemáticas –, ferramentas sociologicamente poderosas. Tanto o tácito como o explícito têm um papel fundamental na física teórica.

Referências

BOSTROM M., SERNELIUS, N. Thermal Effects on the Casimir Force in the 0.1–5 mm Range, *Physical Review Letters*, 80(20), 2000.

CASIMIR, H. B. G. On the Attraction Between Two Perfectly Conducting Plates. *Proc. Netherlands Aka. Wetenschapen*, 51:793-795, 1948.

COLLINS, H. M. The TEA Set: Tacit Knowledge and Scientific Networks, *Science Studies*, 4: 165-86, 1974.

COLLINS, H. M. *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*, Chicago: University of Chicago Press, 1985.

FEYNMAN, R. P., GIBBS A. R. *Quantum Mechanics and Path Integrals: International Series in Pure and Applied Physics*, McGraw-Hill Book Company, 1965.

LIFSHITZ E. M. The theory of Molecular Attractive Forces Between Solids, *Soviet Physics JETP*, 2: 37, 1956.

KUHN, T. S. *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity*, 1894-1912, Chicago: University of Chicago Press, 1987.

KENNEFICK D. Star Crushing: Theoretical Practice and the Theoretician's Regress, *Social Studies of Science*, 30(1): 5-40, 2000.

LIOUVILLE J. Mémoire sur la classification des transcendantes, et sur l'impossibilité d'exprimer les racines de certaines équations en fonction finie explicite des coefficients. *Journal de mathématiques pures et appliquées*. 1re série, tome 2: 56-104, 1837.

MONTEPANENKO, V. M., KLIMCHITSKAYA G.L. A. Roy, U. Mohideen *Complete Roughness and Conductivity Corrections for the Recent Casimir Force Measurement,* Phys. Rev. A., 60 (5): 3487–3497, 1999.

V. M. MOSTEPANENKI, M. BORDAG, B. GEYER, G. L. KLIMCHITSKAYA

---

conflito, há acusações mútuas de "erros de compreensão" dos pontos fundamentais.

"Casimir Force at Both Nonzero Temperature and Finite Conductivity", *Physical Review Letters*, 83 (3): 503-506, 2000.

V. M. MONTEPANENKO, M. BORDAG, B. GEYER, G. L. KLIMCHITSKAYA Reply to Commnent by Boström and Sernelius, *Physical Review Letter*, 87 (25): 259102-1, 2001a.

V. M. MOSTEPANANEKO, G. L. KLIMCHITSKAYA, "Investigation of the Temperature Dependence of the Casimir Force Between Real Metals", *Physical Review* A, 63(6): 062108-18, 2001b.

V. M. MOSTEPANANEKO, V. B. BEZERRA, G. L. KLIMCHITSKAYA "Correlation of Energy and Free Energy for the Thermal Casimir Force Between Real Metals", *Physical Review* A, 66(6): 062112-13, 2002.

V. M. MOSTEPANANEKO, F. CHEN, G. L. KLIMCHITSKAYA, U. Mohideen "Theory confronts experiment in the Casimir force measurements: Quantification of errors and precision", *Physical Review* A, 69(2): 022117-11, 2004.

U. MOHIDEEN, ANUSHREE R. "Precision Measurement of the Casimir Force from 0.1 to 0.9 µm", *Physical Review Letters*, 81(21):4549-4552, 1998.