

A Ontologia do Eletromagnetismo

Questão: Quais conceitos do eletromagnetismo correspondem a entidades reais ?

1. Critérios para estabelecer o que é Real

A teoria do eletromagnetismo de Maxwell postulou a existência de diversos “campos” (definiremos este conceito na seção XXI.3), como o elétrico E e o de indução magnética B , além do potencial escalar ϕ e o potencial vetor A , e também as linhas de força. Quais deles correspondem a entidades reais? Em nosso ensino de física, E e B são considerados reais, e a luz é costumeiramente representada como ondas E e B (Fig. XVIII.4). Já os potenciais escalar e vetor são considerados irrealis, sendo apenas representações matemáticas.

Qual o critério usado para se estabelecer que um termo teórico corresponde ou não a uma entidade real? Iniciaremos este capítulo examinando esta questão filosófica, para depois discutir a realidade dos referentes dos conceitos eletromagnéticos.

O que é real? O protótipo de um objeto inanimado real é uma *pedra*. Ela é dura, colorida, tem até gosto, continua igual mesmo que eu a jogue, tem uma forma tridimensional que é consistente com todas as imagens formadas de diferentes perspectivas, é facilmente concebida e representada pela minha mente, posso lhe dar um nome, se alguém a atirar em mim eu sentirei dor, e se eu jogá-la contra uma vidraça terei o poder de causar a quebra desta.

Podemos extrair desta caracterização quatro critérios para decidir se um objeto é real ou não. Tais critérios não são necessariamente exaustivos, e podem não ser independentes, mas servirão como um ponto de partida para discutir se determinado objeto, como um arco-íris, uma sombra, um quark, uma partícula virtual, o espaço-tempo curvo ou a onda de probabilidade quântica, é real. Quando consideramos um objeto real, ele costuma ser:¹⁹⁵

1) *Observável*. Se observamos algo, temos boa confiança de que ele existe. Há porém “fosfenos”, que são os lampejos de luz que aparecem quando batemos a cabeça; além disso, algumas pessoas têm alucinações, e há objetos visíveis que às vezes interpretamos como sendo distintos do que são, como as aparições de discos voadores nos céus. O sentido do tato parece ter mais importância na determinação de que algo é real. Vemos um arco-íris mas não conseguimos pegá-lo: será que ele é real? Quando todo mundo observa o mesmo objeto, há mais razões para considerarmos que o objeto é real, mas mesmo observações privadas, como o fosfeno ou uma dor no calcanhar, são indícios de um evento real em nosso corpo.

2) *Invariante*. Ao tratar de entidades inobserváveis, o critério de invariância adquire muita importância. Aquilo que permanece constante ante transformações de coordenadas ou de perspectivas costuma ser considerado real. Na Teoria da Relatividade Restrita, comprimentos e durações temporais variam com o referencial, mas há um “intervalo espaço-temporal” que permanece invariante (seção XXII.6), sugerindo que seja mais real do que o espaço e o tempo separados, apesar de estes serem observados. Na teoria quântica, a função de onda $\psi(\mathbf{r})$ é invariante ante mudanças no aparelho de medição, ou seja, ante mudanças no observável sendo medido. Isso faz alguns autores admitirem que a “amplitude de probabilidade” $\psi(\mathbf{r})$ corresponda a algo real, ou pelo menos a densidade de probabilidade $|\psi(\mathbf{r})|^2$. Porém, os críticos desta opinião argumentam que ela não é diretamente observável e nem satisfaz o critério seguinte (ser concebível), não sendo por isso real. Por outro lado, se uma suposta entidade tem um valor que pode variar conforme o gosto

¹⁹⁵ Uma discussão semelhante, sobre o que é “fisicamente real”, é apresentada em NAGEL (1961), op. cit. (nota 34), pp. 146-52.

do sujeito, como os potenciais eletromagnéticos (seção XXI.4), isso sugere que a entidade não é real.

3) *Concebível*. Outro critério importante para aceitarmos que um conceito corresponda a algo real é que ele possa ser representado de maneira não problemática por nossa intuição ou em uma teoria. A função de onda mencionada no parágrafo anterior estaria sujeita a “colapsos não-locais” (ver seção XIX.1 e, sobre localidade, a seção XXI.2) e, para duas partículas correlacionadas, $\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ seria definida em seis dimensões, o que é problemático teoricamente. A maioria dos cientistas não aceita a tese de Masaru Emoto, de que a água se cristaliza de diferentes maneiras conforme a emoção que um ser humano lhe transmite, porque (entre outras razões) esta tese não é explicável pela teoria física atual. Na física, podemos aceitar que a energia cinética de uma bala atirada seja real porque o correspondente termo teórico (“energia cinética”) está presente em leis científicas bem confirmadas e aceitas. NAGEL salienta também que se um termo teórico aparecer em diferentes leis experimentais, então aumenta nossa confiança em sua realidade. Às vezes, a simplicidade de uma concepção teórica é considerada indício de que corresponde à realidade (ver seção XX.4).

4) *Causalmente potente*. Se um objeto apresenta “poderes causais”, isso aumenta nossa crença em sua realidade. Se uma bruxa consegue lançar um encantamento e incendiar uma árvore, passamos a levar seriamente que seu encantamento é real. Em discussões sobre a realidade do mental (como sendo distinto do corporal ou cerebral), às vezes utiliza-se o argumento de que seriam os estados mentais (e não prioritariamente os correspondentes estados cerebrais) que causariam nossas ações, de forma que tais estados seriam reais (e não meros “epifenômenos” do cerebral). Na psicanálise, pode-se defender a realidade do inconsciente a partir de seus efeitos em nosso comportamento. Em filosofia da biologia, discute-se qual é o “nível de seleção” que tem realidade (o gene, o indivíduo ou o grupo) a partir de seu poder causal.¹⁹⁶

Na presente discussão, enfocamos objetos individuais, mas há também uma longa discussão sobre a realidade de entidades envolvendo mais de um indivíduo, como conjuntos de indivíduos (um conjunto existe ou é apenas uma representação?), ou propriedades universais e entidades matemáticas, que examinamos na seção VI.4.

2. Ação por Contato e Localidade Espaço-Temporal

Quando falamos em um “campo” na física, como o campo elétrico ou o campo gravitacional, pensamos em uma função matemática geralmente definida em todos os pontos do espaço e do tempo, como a função vetorial que define o campo elétrico: $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$. Atribuímos realidade para esse campo porque se no instante t colocarmos uma carga q de massa m no ponto \mathbf{r} , concebemos que este campo *causa* uma aceleração \mathbf{a} , cujo valor medido será tal que $\mathbf{F} = m\mathbf{a} = q \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$. Com a postulação desta entidade real, distribuída pelo espaço mesmo em regiões evacuadas (ou seja, sem matéria, salvo pela presença do vácuo quântico), obtemos uma descrição segundo a qual o movimento da carga é causado por uma entidade, o campo, presente *localmente* em torno do ponto \mathbf{r} , no instante t .

É verdade que o campo em torno de um ponto é gerado por cargas presentes em outras regiões, mas a “causa próxima” do movimento da carga seria o campo local, e não as entidades localizadas à distância. Qualquer alteração nas cargas que originam o campo é propagada a uma

¹⁹⁶ Uma exposição da teoria da seleção natural em múltiplos níveis é apresentada em: OKASHA, S. (2006), *Evolution and the levels of selection*, Oxford U. Press. Na filosofia da mente, o controvertido tema da “causação descendente” é discutido na seguinte coletânea: ANDERSON, P.; EMMECHE, C.; FINNEMANN, N. & CHRISTIANSEN, P. (orgs.) (2000), *Downward causation: minds, bodies, and matter*, Aarhus U. Press.

velocidade finita através do campo, de vizinho em vizinho, no que é chamado de *ação por contato* (ou por contiguidade).

Tomemos o exemplo da gravidade. Depois do trabalho de Newton, o consenso entre os cientistas era que a gravidade age à distância, instantaneamente.¹⁹⁷ Por exemplo, imagine que o nosso Sol sumisse subitamente (ou que um poderoso demônio, “Atlas, o forçudo”, visto na seção XII.3, o jogasse para longe com uma aceleração imensa). No séc. XVIII, a previsão seria de que a Terra sentiria instantaneamente a ausência do Sol. Este é um exemplo de violação de *localidade espacial*: a causa não seria espacialmente contígua ao efeito, mas estaria localizada à distância (caso I da Fig. XXI.1).

No séc. XX, porém, a teoria da relatividade geral concluiu que a velocidade de propagação de efeitos no campo gravitacional é igual à velocidade da luz no vácuo. No exemplo do sumiço do Sol, demoraria 8 minutos (mais 19 ± 8 s) para que a Terra sentisse o baque. Este caso satisfaz a *localidade espaço-temporal*: a causa primeira (a alteração no Sol) provoca um efeito em uma região contígua, tanto no espaço quanto no tempo, e este efeito torna-se a causa local de outro efeito contíguo, e assim por diante, até a cadeia causal gerar um efeito na Terra. Este é o relato fornecido por uma teoria de campo, no caso o campo gravitacional relativístico (caso II da Fig. XXI.1).

A ação à distância gravitacional que consideramos anteriormente, na visão da física clássica, ocorreria de maneira instantânea. Isso corresponde a uma violação da localidade espacial, mas não da “localidade temporal”, pois a causa (o sumiço do Sol) ocorreria imediatamente antes do efeito (o baque na Terra, caso I). Seria possível considerar uma ação à distância que ocorresse não de maneira instantânea, mas de maneira *retardada*: o sumiço do Sol causaria o baque na Terra, 8 minutos depois, mas sem que a causa se propagasse por contato (caso III). Em termos observacionais, esta situação seria indistinguível da ação por contato mediada por um campo real (caso II), mas a diferença é que neste caso não haveria um campo mediador, e teríamos uma ação à distância retardada. Veremos na seção XXI.5 um exemplo desta possibilidade, que corresponde a uma violação da localidade espacial e da localidade temporal.¹⁹⁸

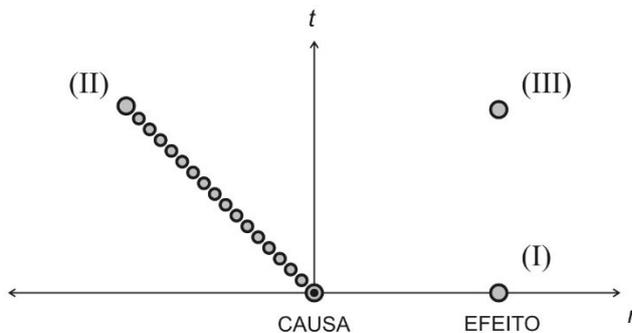


Figura XXI.1. Três casos de relação entre causa e efeito. (I) Ação à distância (violação da localidade espacial). (II) Ação por contato (localidade espaço-temporal). (III) Ação à distância retardada (violação da localidade espacial e da temporal).

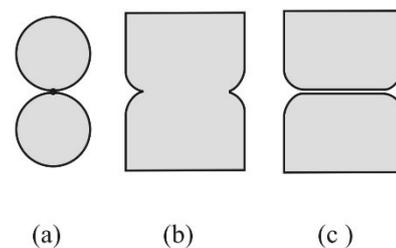


Figura XXI.2. Três situações possíveis para o contato no choque entre dois corpos rígidos. (a) Compartilhamento de um ponto. (b) Formação de uma extensão contínua. (c) Pontos vazios entre os corpos.

A noção de ação por contato estava presente na filosofia mecânica de Descartes e Huygens (seção X.4 e Fig. XVIII.7a), onde a única força atuando sobre um corpo rígido se

¹⁹⁷ Em 1805, Laplace explorou a possibilidade de a gravidade se propagar a uma velocidade finita, e concluiu que ela deveria ser pelo menos um milhão de vezes mais rápida do que a luz (DUGAS, 1957, op. cit., nota 122, p. 360).

¹⁹⁸ As definições de localidade são dadas em LANGE, M. (2002), *An introduction to the philosophy of physics: locality, fields, energy, and mass*, Blackwell, Oxford, pp. 1-17, de onde tiramos a discussão a seguir sobre a ação por contato entre corpos rígidos.

originária de sua colisão com outro corpo rígido. No séc. XIX, surgiu uma discussão sobre como definir rigorosamente o choque entre dois corpos rígidos, supondo que o espaço é *denso*, ou seja, entre dois pontos sempre há um ponto (seção VI.6). Haveria compartilhamento de um ponto, como sugeriu o físico irlandês George FitzGerald (1895)? Ou os corpos em contato ocupariam uma extensão contínua, como sugerido pelo filósofo tcheco Bernhard Bolzano (1851)? Ou haveria pontos vazios entre os dois corpos rígidos em contato? (Ver Fig. XXI.2.)

A ação por contato retornou à física a partir dos trabalhos de Faraday no eletromagnetismo. A teoria da relatividade geral de Einstein é uma teoria da gravitação com ação por contato. Podemos dizer que em 1922, após a consolidação da teoria da relatividade geral, toda a física hegemônica satisfazia a localidade espaço-temporal. Isso é razoável: como é que algo que acontece no Sol poderia chegar até nós instantaneamente?

No entanto, com a teoria quântica, especialmente a partir do teorema de Bell (1964), a não-localidade espacial voltou a figurar nas discussões de física (seção XIX.3). É costume dizer que “Einstein estava errado” (no seu trabalho com Podolsky e Rosen, de 1935) e que a não-localidade se manifesta em pares de partículas “emaranhadas”. No entanto, como vimos na seção XIX.3, a situação é mais sutil do que parece. A questão envolve uma escolha entre uma postura *fenomenista* (instrumentalista, positivista) e uma *realista* (seção III.1). O teorema de Bell diz que se alguém adotar uma postura realista com relação à teoria quântica, ele é obrigado a aceitar a não-localidade espacial (ação à distância). Por exemplo, se alguém atribui realidade à função de onda $\psi(\mathbf{r})$ (que mencionamos na seção XXI.1, item 2), então terá que aceitar a existência de colapsos não-locais. Porém, numa visão instrumentalista (para a qual $\psi(\mathbf{r})$ é apenas um objeto matemático), o mundo se comporta de maneira local. Isso se reflete na impossibilidade de transmitir “informação” (algo macroscópico e observável) a uma velocidade maior do que a luz.¹⁹⁹

3. Definição e Interpretações de Campo

No início da seção anterior, apresentamos a noção de “campo”. De maneira simplificada, podemos dizer que um *campo* (em sentido estrito) reúne três características:

(i) Seria definido em todos (ou quase todos) os pontos do espaço e do tempo de uma determinada região, mesmo na ausência de matéria, correspondendo assim a uma entidade real “espalhada”, e podendo ser associada a uma energia potencial.

(ii) Em geral, tem um caráter meio abstrato ou fantasmagórico, pois não é diretamente observável (sua existência é inferida dos efeitos que causa), podendo ser caracterizado como uma “potencialidade” no sentido aristotélico (seção V.4) – acepção semelhante está implícita no termo “potencial”, a ser examinado na seção seguinte.

(iii) Os efeitos se propagam a uma velocidade finita, numa *ação por contato*.²⁰⁰ Isso é também expresso pela noção de *localidade espaço-temporal*.

¹⁹⁹ O artigo original é: BELL, J.S. (1964), “On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox”, *Physics 1*, 195-200, reproduzido em BELL (1987), *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge U. Press, pp. 14-21. Para uma apresentação inicial: D’ESPAGNAT, B. (1979), “The quantum theory and reality”, *Scientific American 241* (nov.), 128-40. O artigo original de EPR, de 1935, tem tradução: EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B. & ROSEN, N. (1981), “A descrição da realidade física fornecida pela mecânica quântica pode ser considerada completa?”, trad. C.W. Abramo, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência 2*: 90-96.

²⁰⁰ Há na teoria quântica de campos relativísticos a noção de ações ou lagrangianos *não-locais*, que envolvem um número infinito de derivadas. Eles não aparecem no Modelo Padrão de Partículas, mas em algumas extensões da teoria. Teorias de campos não-locais foram exploradas no início da década de 1950 para descrever interações fortes (mésons), por Yukawa, Bloch, Kristensen & Møller, Pauli e Hayashi.

Qualquer variação na fonte de um campo propaga-se a uma velocidade finita, geralmente em todas as direções. Dessa forma, um campo armazena espacialmente toda a variação temporal passada da fonte. “O campo em um dado instante é um registro permanente dos arranjos das cargas no passado” (LANGE, p. 33).

Com a noção de campo, pode-se explicar satisfatoriamente a colisão entre partículas, sem a problemática noção de contato entre corpos rígidos (vista na seção anterior). Porém, os campos elétrico e gravitacional, em torno de uma carga ou massa pontuais, sendo proporcionais a $1/r^2$, divergem quando $r \rightarrow 0$. Para contornar este problema, deve-se estipular classicamente que o campo gerado por uma carga pontual é nula em $r = 0$ (ver seção XXII.4). Um aprofundamento da questão requer a Física Quântica, apesar de haver modelos clássicos que abordam a questão.

A partir de um exame de livros didáticos, LANGE (pp. 36-9) apresenta três interpretações diferentes para a questão de se o campo elétrico $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ gerado por uma carga em um certo instante é real.

(1) A interpretação literal ou *realista* é de que $\mathbf{E}(\mathbf{r}_0)$ designa uma propriedade real do espaço na região de \mathbf{r}_0 , não sendo um mero expediente de cálculo.

(2) Uma primeira interpretação não-literal, que chamaremos *modal*,²⁰¹ diz que $q\mathbf{E}(\mathbf{r}_0)$ designa a força que *seria sentida* por uma carga de prova q colocada na posição \mathbf{r}_0 . Esta interpretação não é realista em relação ao campo \mathbf{E} , mas é realista a respeito da força no caso em que q está localizada em \mathbf{r}_0 . Quando q não está presente, a interpretação segue a atitude fenomenista de não dizer nada sobre a realidade não-observada, mas fala alguma coisa sobre situações *possíveis*: se a carga for q , a força será $q\mathbf{E}(\mathbf{r}_0)$.

(3) Uma segunda interpretação não-literal, que chamaremos *descritivista* (ver seção IV.3), afirma que $\mathbf{E}(\mathbf{r}_0)$ descreve algo sobre os arranjos de cargas distantes em instantes anteriores (ver citação de Lange acima). Esta interpretação é mais claramente fenomenista, e reduz as afirmações teóricas a respeito de campos a uma linguagem observacional relativa a corpos eletricamente carregados.

4. Potenciais Escalares são Reais?

Em 1813, Poisson introduziu uma nova maneira de exprimir a força gravitacional por meio da função potencial $U(\mathbf{r}, t)$, de tal forma que a força sobre uma massa de prova m seria dada por $\mathbf{F} = m\mathbf{a} = -m \cdot \nabla U(\mathbf{r}, t)$, ou seja, o campo gravitacional seria dado pelo negativo do gradiente do potencial (isso é mencionado no texto lido de MAXWELL, 1855, p. 157). No contexto em que Poisson trabalhava, a gravidade atuava à distância, ao contrário do contexto posterior do Eletromagnetismo em que Faraday e Maxwell trabalhariam.

O potencial elétrico ϕ é uma função escalar da posição \mathbf{r} . Ao computar o gradiente da função potencial, $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = -\nabla\phi(\mathbf{r})$, obtém-se o campo vetorial elétrico no caso de cargas estáticas (para cargas em movimento, há mais o termo $-\partial A/\partial t$). Dado que o potencial descreve os mesmos fenômenos com menos informação (um número escalar em cada ponto do espaço, ao invés das três coordenadas vetoriais do campo), poder-se-ia argumentar que o potencial é a entidade real fundamental, pois é *mais simples* do que o campo vetorial. No entanto, Faraday e Maxwell defendiam que o potencial não denota um estado físico: Faraday colocou-se no interior de um grande condutor oco isolado, uma gaiola carregada eletricamente de maneira estática

²⁰¹ O termo “modal” refere-se originalmente ao modo ou à atitude que um falante adiciona a um conteúdo sendo dito. O presente contexto refere-se ao uso na Lógica, especificamente à chamada *modalidade alética*, que envolve os termos “necessário” e “possível” (a presente interpretação refere-se a situações *possíveis*). Há outros tipos de modalidade, todos seguindo lógicas semelhantes: a deontica (“é obrigatório que”, “é permitido que”), epistêmica (“saber que”), doxástica (“acreditar que”), etc.

(tendo assim potencial constante em seu interior), e não pôde detectar nenhum efeito elétrico distinto do caso em que o condutor estivesse descarregado (LANGE, pp. 43-44). Assim, não é o valor do potencial que seria significativo, mas a variação espacial do potencial, ou seja, seu gradiente.

Pode-se traçar uma analogia entre o potencial escalar em 2 dimensões e uma superfície topográfica em 3 dimensões, como o relevo de uma montanha. Uma bolinha colocada em um ponto r_0 da superfície irá descer em uma certa direção e sentido: visto no plano horizontal, esse movimento corresponde a uma aceleração dada pelo campo $E(r_0)$. Por que tal superfície não é considerada real? Ora, o argumento é que as mesmas acelerações seriam obtidas se todo o relevo fosse elevado em um valor constante (desprezando qualquer variação na aceleração gravitacional). Ou seja, se ϕ fosse transformado em $\phi + C$, onde C é uma constante, nenhuma observação se alteraria. Isso então sugere que $\phi(r)$ não é real, mas apenas as diferenças $[\phi(r_0 + \Delta r) - \phi(r_0)] / \Delta r$, que no limite $\Delta r \rightarrow 0$ tende ao gradiente de $\phi(r)$ no ponto r_0 , ou seja, ao campo elétrico $E(r)$.

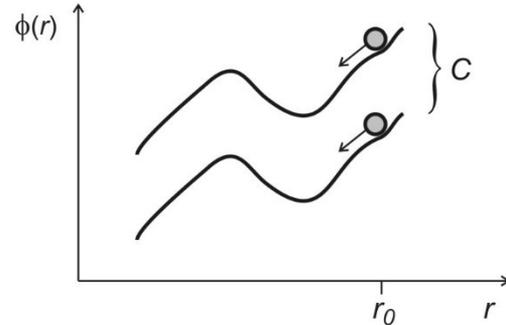


Figura XXI.3: Adicionando uma constante C a um potencial ϕ não altera as forças resultantes.

5. O Potencial Vetor é Real?

Em seu estudo das propriedades eletromagnéticas de um meio, Faraday concluiu que os efeitos eletromagnéticos se propagam por contato a partir de deformações do “estado eletrotônico” do meio. Maxwell matematizou esta noção (seção XX.3), levando ao conceito de “potencial vetor magnético” ou simplesmente “potencial vetor” A . Tal conceito matemático já tinha sido formulado por F.E. Neumann, em 1845. Este potencial possui as seguintes propriedades:

- (i) O rotacional de A é o campo magnético: $\nabla \times A = B$.
- (ii) Ele é um potencial para o campo elétrico, juntamente com o potencial escalar ϕ : $E = -\partial A / \partial t - \nabla \phi$.
- (iii) A seguinte transformação de calibre altera A e ϕ , mas mantém os valores de E e B , para qualquer função escalar ψ : $A \rightarrow A + \nabla \psi$; $\phi \rightarrow \phi - (1/c) \partial \psi / \partial t$. Assim, tais transformações não alteram as medições experimentais.
- (iv) Fixando-se $\nabla \cdot A = 0$, pode-se calcular o valor de A a partir da densidade de corrente j : $\nabla^2 \cdot A = -j / (\epsilon_0 c^2)$, de forma que A seja paralelo a j .
- (v) A pode ser interpretado como um “momento reduzido”. Assim, em analogia com a 2ª lei de Newton, $F = ma = \partial p / \partial t$, onde p é o momento linear, tem-se para a força elétrica: $F = qE = \partial(-qA) / \partial t$, de forma que $-qA$ age como um momento.
- (vi) Em situações estacionárias, do potencial vetor pode-se derivar a energia do campo: $U = \int j \cdot A dV$.
- (vii) Em alguns problemas complicados, as integrais envolvendo A são mais fáceis de trabalhar do que aquelas envolvendo B .
- (viii) Por fim, o potencial vetor reaparece na mecânica quântica, na teoria da relatividade e no princípio de mínima ação.

Richard Feynman²⁰² escreveu uma instrutiva apresentação ao conceito de campo, em que discute a questão de se o potencial vetor A do eletromagnetismo é um campo real ou não.

Na verdade, seu conceito de “real” é um tanto instrumentalista. Ele escreve: “devemos dizer que a frase ‘um campo real’ não tem muito significado”, mas ele diz isso basicamente por causa do critério de observabilidade (da seção XXI.1): “você não pode pôr sua mão e sentir o campo magnético”. Para Feynman, “um campo ‘real’ é portanto um conjunto de números que especificamos de tal maneira que o que acontece *num ponto* depende apenas dos números *naquele ponto*”; o efeito de um potencial dependeria dos valores nas vizinhanças Δr do ponto.

O principal argumento utilizado contra a realidade do potencial vetor A é que seu valor não é único (item *iii* acima), violando a condição de invariância atribuída a entidades reais, mas se levarmos em conta a Teoria da Relatividade (seções XXII.5 e 6), o mesmo argumento se aplicaria contra a realidade dos campos elétricos e magnéticos usuais. Outro argumento contra a realidade é que A não aparece explicitamente em expressões de força, como $F = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$; se tivermos uma região em que $\mathbf{B} = 0$, não haverá força magnética mesmo se $A \neq 0$.

6. O Efeito Aharonov-Bohm

Apesar dos argumentos dados acima contra a realidade do potencial vetor A , com a Física Quântica descobriu-se um efeito que só pode ser explicado, em termos *locais*, a partir do campo A ! Este é o chamado efeito Aharonov-Bohm magnético, formulado explicitamente por esses dois autores em 1959, mas já previsto em trabalho anterior de Ehrenberg & Siday (1949).

Na seção XVIII.3 discutimos o experimento da dupla fenda realizado por Thomas Young, em torno de 1802, para a luz visível. Em 1961, o alemão Claus Jönsson²⁰³ conseguiu realizar o experimento da dupla fenda com *elétrons*. A Fig. XXI.4 mostra uma imagem das fendas usadas e a Fig. XXI.5 mostra o padrão formado pelos elétrons na tela fluorescente.

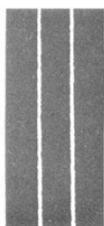


Figura XXI.4: Imagem de microscópio eletrônico mostrando folha metálica (escura) com duas fendas, cada uma de espessura 0,5 micra (10^{-6} m), separados por 2 micra (Jönsson, 1974, p.8).

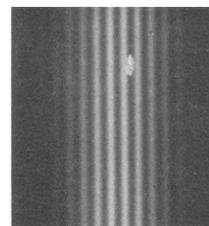


Figura XXI.5: Franjas de interferência obtidas após a passagem de elétrons através das duas fendas da Fig. 1. A imagem foi obtida em uma chapa fotográfica encostada em uma tela fluorescente, após magnificação de 100x das ondas eletrônicas (Jönsson, 1974, p.9).

Vários experimentos com elétrons já tinham mostrado o típico padrão de franjas da Fig. XXI.5, que só pode ser explicado supondo que os elétrons têm propriedades *ondulatórias*.

O experimento Aharonov-Bohm pode ser visto como o experimento da dupla-fenda para elétrons com um solenoide inserido entre as fendas. Isso é ilustrado abaixo, nas Figs. XXI.6, em desenhos de Feynman et al. (1963).

²⁰² FEYNMAN, LEIGHTON & SANDS (1963), op. cit. (nota 158), vol. II, p. 15-7. Sobre o potencial vetor, ver também p. 14-10.

²⁰³ JÖNSSON, C. (1974), “Electron diffraction at multiple slits”, trad. D. Brandt & S. Hirschi, *American Journal of Physics* 42, pp. 4-11. Tradução do original em alemão publicado no *Zeitschrift für Physik* 161 (1961) 454-74.

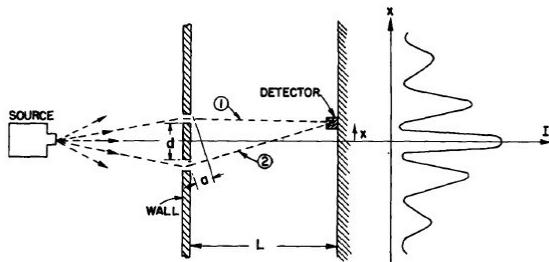


Figura XXI.6a: Experimento da dupla fenda para elétrons, segundo Feynman et al.

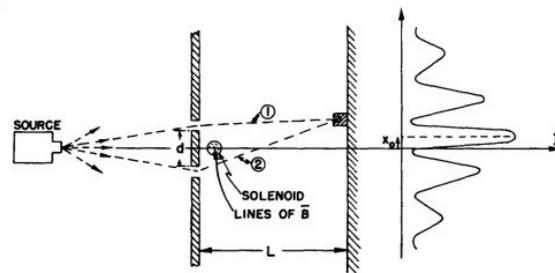


Figura XXI.6b: Inserção de um solenoide leva a um deslocamento das franjas, no experimento Aharonov-Bohm.

Na Fig. XXI.7 o experimento de Aharonov-Bohm é desenhado com mais detalhes. Um feixe de elétrons passa em torno de um solenoide praticamente infinito (em outro arranjo possível, o solenoide tem forma toroidal), tendo-se o cuidado de blindar o solenoide para impedir a penetração de elétrons. A Física Quântica prevê que neste experimento os elétrons se comportam como ondas, formando-se um padrão de interferência na tela, mesmo quando o solenoide está desligado. Mas ao se ligar o solenoide, o que se observa é um deslocamento uniforme da franja de interferência, explicado por uma variação na fase relativa das amplitudes de onda que passam por um lado e por outro do solenoide. Neste arranjo, o campo magnético externo ao solenoide é nulo, e classicamente não se esperaria nenhum efeito sobre os elétrons propagando à volta do solenoide. Como se dá esta alteração na fase relativa?

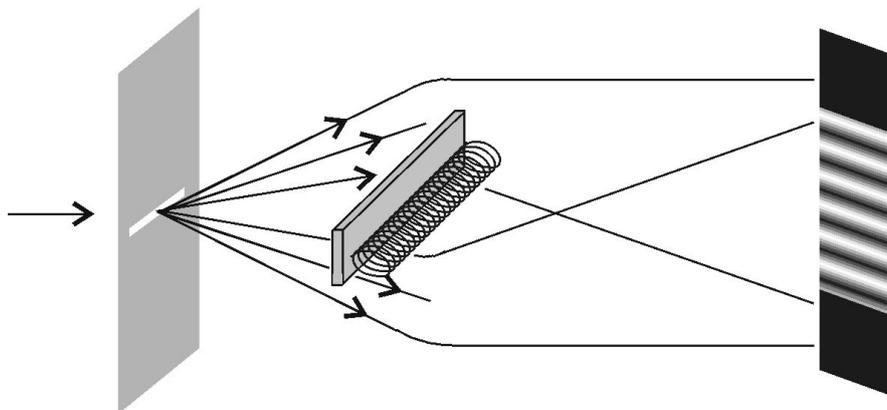


Figura XXI.7: Arranjo do experimento de Aharonov-Bohm. Quando o solenoide é ligado, as franjas sofrem um deslocamento.

O deslocamento de fase $\Delta\phi$ das franjas é teoricamente expresso como dependendo de $\exp\left[\frac{ie}{\hbar} \int^r \mathbf{A} \cdot d\mathbf{r}\right]$, onde a integral de linha segue o caminho percorrido por cada elétron, e torna-

se $\Delta\phi = \frac{e}{\hbar c}\Phi$, onde Φ é o fluxo magnético²⁰⁴ no interior do solenoide. Assim, a teoria nos diz que o deslocamento de fase depende de uma integral em termos do valor do potencial vetor na região externa ao solenoide, por onde passa a onda eletrônica. O efeito pode assim ser visto como satisfazendo a localidade espaço-temporal (seção XXI.2). Isso então sugere que A tenha realidade, no sentido usual atribuído a campos.

No entanto, nem todos os físicos estão dispostos a atribuir realidade ao potencial vetor. Assim, alguns preferem considerar que há um *fenômeno não-local* (ação à distância), em que o campo magnético *dentro* do solenoide é a causa próxima de um efeito que ocorre em uma região distante, fora do solenoide. No entanto, tal ação não poderia ser instantânea, sendo uma ação à distância retardada, violando a localidade espacial e temporal.²⁰⁵

Um ponto curioso é que Feynman errou no seu desenho do deslocamento das franjas (Fig. XXI.6). O envelope que circunda a franja não se move, mas apenas os máximos e mínimos dentro deste envelope (ver Fig. XXI.8, ao lado). Se o envelope se deslocasse, isso indicaria que uma força clássica é exercida nos elétrons, mas este não é o caso. O efeito envolve a fase *da onda associada ao elétron*, sendo que o Eletromagnetismo Clássico não prevê tal onda.

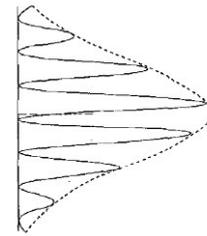


Figura XXI.8: No efeito AB, franja se desloca sem alterar o envelope.

²⁰⁴ O fluxo magnético Φ através de uma superfície é a integral de superfície do componente normal do campo magnético \mathbf{B} passando pela superfície S , e também a integral de linha ao longo do contorno de S : $\Phi = \oint \mathbf{A} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$.

²⁰⁵ Um relato do experimento de Aharonov-Bohm encontra-se em TONOMURA (1993), op. cit. (nota 184), pp. 57-67. Ver também OLARIU, S. & POPESCU, I.I. (1985), "Quantum effects of electromagnetic fluxes", *Reviews of Modern Physics* 57, 339.