

Quando uma experiência é crucial?

(When an experiment is crucial?)

V. Pleitez

*Instituto de Física Teórica
Universidade Estadual Paulista,
Rua Pamplona, 145
01405-900-São Paulo, SP, Brasil*

Recebido em 7 de Março, 1998

Ainda que aceitemos que a Física é, em última instância, uma ciência experimental, a relação teoria-experimento está longe de ser trivial. Qualquer experiência é sempre interpretada num determinado contexto teórico e, pela sua vez, uma experiência pode lançar novos desafios teóricos. Assim, no podemos dizer sem ambigüidade quando uma experiência é crucial.

Abstract

Although we accept that Physics is, in the last resort, an experimental science, the relationship between theory and experiment is far away from being trivial. Any experiment is always explained within a determinate theoretical context and, at the same time, an experiment can give suggestions for theories or even can bring new theoretical challenges. Thus, we cannot say without ambiguity when an experiment is a crucial one.

I Introdução

A diferença fundamental entre a ciência moderna pós Francis Bacon, Galileo e outros, e a física em particular, com outras formas de estudar a natureza na antigüidade esta no papel que desempenha a experimentação na verificação ou falseamento das teorias [CO88]. Em última instância a origem do método científico encontra-se na Grecia antiga porém, na chamada *Revolução Científica* do Sec. XVII houve uma sistematização e aprofundamento do método experimental, isto é, a verificação experimental de *algumas* das hipóteses básicas de uma teoria em particular. Isto está relacionado com o questionamento do o quê é uma teoria. Por exemplo, uma teoria deve estar baseada apenas em quantidades observáveis como queria Heisenberg? Em muitos casos é a teoria que diz o quê deve e o que não pode ser observado. Esta era a visão de Einstein [HE68]. A relação teoria-experiência a pesar da sua importância, afinal ela determina o que significa a “verdade” das leis da natureza, não está bem definida. As teorias representam o mundo real ou apenas as nossas percepções do mundo? A mesma pergunta vale para as experiências.

Existe sempre uma diferença entre teoria e experimento. Por exemplo, nunca verificaremos com exatidão matemática a lei da dependência com $1/r^2$ da força gravitacional. Qualquer resultado experimental confirmará, ou não, esta lei com determinada precisão. O fato de que o resultado seja *quase* igual a $1/r^2$ permite “pular” a distância entre teoria e experimento e usar a matemática para isso. (Mas as experiências eliminam forças dominantes que variem como $1/r^3$ por exemplo.) Afinal, sem assumir que o expoente é “2” não poderíamos usar a análise vetorial para sistematizar todos os efeitos observados e prever outros. A fácil matemática aparece como um guia para aceitar uma teoria.¹ Existem motivos mais profundos para considerar qualquer teoria como aproximada mas isto não será discutido aqui [DU89], porém vale lembrar as diferenças entre Robert Boyle e Baruch Espinosa [CH97] ou Boyle e Thomas Hobbes [SH96]. Segundo Boyle “nas investigações físicas, frequentemente basta que nossas determinações cheguem muito próximas do fato, embora fiquem longe da exatidão matemática”. Já Espinosa dizia “respondo que nunca precisamos de experiência senão para aquilo que não pode ser concluído da definição de uma coisa” [CH97].

¹ Mas podemos especular se numa teoria estritamente *fractal* não seria possível fazer um tratamento de uma lei de forças que dependa de $1/r^{2+\alpha}$, sendo α um parâmetro que dependa da dimensão fractal do problema estudado. Claro na maioria dos casos $\alpha \approx 0$.

Assumiremos uma relação teoria-experimento operacional, isto é, não vamos discutir o quê é uma *teoria* e o quê é uma *experiência*. Usaremos a idéia intuitiva que todos temos a respeito desses conceitos. Aqui interessamos apenas discutir a *relação* entre teoria e experiência. Por exemplo, uma experiência crucial (*experimentum crucis*) sem dúvida nenhuma é a experiência dos dois prismas de Newton. Antes do século XVII a cor dos corpos e a luz eram consideradas dois assuntos diferentes. A cor por exemplo era considerada como uma propriedade material dos corpos. Descartes e Newton propuseram duas teorias rivais sobre a natureza da luz e da cor. Para o primeiro, num contexto mecanicista, a luz era a pressão exercida por esferas de matéria (das quais o universo estava cheio) sendo a sensação de cor, causada pelas diferentes velocidades de rotação axiais das esferas. Nesta teoria o estado natural da luz seria o branco e as cores apenas modificações da “brancura”. Para Newton, a luz branca era uma mistura das diferentes cores. Na experiência dos dois prismas, na teoria de Descartes a refração no segundo prisma deveria implicar numa nova mudança das cores. Na teoria de Newton, por outro lado, as cores do raio luminoso devem permanecer as mesmas. A experiência de Newton decidiu a seu favor de maneira definitiva. (Uma tradução do trabalho de Newton encontra-se na Ref. [SI96]). É nesse sentido que consideramos uma experiência crucial. Lembramos porém, que no século XVII a questão não foi aceita de maneira imediata [SH96].

Assim, podemos perguntar: Quando é possível dizer se uma experiência foi *crucial*? Ou seja quando ela permitiu selecionar a teoria certa entre duas ou mais teorias rivais como no caso da experiência de Newton mencionada acima, ou mesmo que confirmou ou negou uma determinada teoria. Vamos ver que não existe uma resposta única para esta questão. Um único contra exemplo pode derrubar uma visão geral sobre a relação teoria-experimento. Podemos encontrar exemplos nos quais

- i*) uma experiência foi realizada antes do que seu conteúdo teórico estivesse desenvolvido e, por isso, não foi reconhecida como crucial na época.
- ii*) experiências para as quais os preconceitos teóricos adiantaram a sua validade.
- iii*) experiências corretas que foram interpretadas em contextos teóricos errados.
- iv*) experiências que não foram guiadas nem teorica nem epistemologicamente.

Esta lista não esgota o estudo da relação teoria-experimento mas ilustra muito bem que sua relação

não é trivial. Experiências do tipo do item *iv*) não serão discutido aqui em detalhe. Apenas mencionamos entre esse tipo de experimentos: os raios-X e a radioatividade natural (talvez a descoberta da violação da simetria discreta CP seja uma deste tipo).

A seguir, consideraremos alguns exemplos dos três tipos de experiências descritos nos itens *i*)–*iii*) acima. Na Seção II consideramos o caso da violação da paridade nas interações fracas como exemplo do tipo *i*). Na Seção III consideramos quatro experiências que exemplificam a situação *ii*). O caso *3*) é analisado em duas experiências na seção IV. Uma ênfase maior é dada às experiências da violação da paridade e à de Stern-Gerlach na Seção V. As conclusões encontram-se na última Seção.

II Experiências não reconhecidas como cruciais na época

No primeiro tipo de experiências podemos mencionar o descobrimento da violação da simetria sob *inversões espaciais* ou *paridade* (ou seja a transformação das coordenadas espaciais que faz $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$) nas interações fracas. Pode-se mostrar que esta transformação é equivalente a uma reflexão especular *i.e.*, a que acontece quando nos olhamos num espelho. Do ponto de vista teórico a possibilidade deste efeito foi colocada, não pela primeira vez, mas sim de maneira decisiva, por Lee e Yang em 1956.

Em 1957 três experiências diferentes confirmaram inequivocamente que, de fato, a simetria sob transformações de paridade era realmente violada (não apenas um pouco mas de maneira máxima) nas interações fracas.

Antes de Lee e Yang assumia-se como evidente que as leis da natureza deveriam ser simétricas em relação à reflexão em um espelho. (Pauli tinha rejeitado a equação para partículas de spin 1/2 proposta por H. Weyl em 1929 com a argumentação que violava a simetria sob paridade.) Por outro lado as interações eletromagnéticas e gravitacionais são invariantes por paridade. A razão deste fenômeno ainda é um mistério do ponto de vista teórico. (Existem algumas propostas teóricas ainda não confirmadas.)

Podemos, então, dizer que as experiências que em 1957 descobriram a violação da paridade foram cruciais no sentido mencionado acima. No entanto, é interessante notar, que em 1928-30 Richard T. Cox e colaboradores realizaram uma série de experiências de dupla difração de elétrons nas quais aparecia uma assimetria segundo a polarização dos elétrons. Agora sabemos

que isso é devido à violação da paridade: há uma interferência entre as interações eletromagnética e fraca dos elétrons com os núcleons. Porém, em 1928 ninguém interpretou esses resultados desta maneira. Assim, o fato de que as interações responsáveis pelo decaimento- β não são invariantes sob paridade poderia ter sido conhecido 27 anos antes de Lee e Yang [FR79, AD73].

III Preconceitos teóricos adiantados

Com relação às experiências do tipo *ii*) mencionados na Sec. I, isto é, aquelas em que preconceitos teóricos adiantaram a sua confirmação, podemos citar quatro:

a) As experiências de Eötvös para medir a relação entre a massa gravitacional e a massa inercial. Na época foram aceitos seus resultados. Contudo, nos anos 80 um grupo de físicos acreditou ter detectado o efeito de uma possível “quinta força” com um alcance de alguns metros. Motivados por isto, os dados das experiências de Eötvös foram reanalisados e observou-se que seus resultados eram compatíveis com uma dependência na composição química do material (Ver Tabela 1). Assim, podemos dizer que, aparentemente,² a aceitação dos resultados de Eötvös foi devida a preconceitos teóricos. A hipótese da igualdade dos dois tipos de massa permitiu a formulação da teoria geral da gravitação de Einstein. A possibilidade de uma quinta força foi posteriormente descartada por outras experiências [FR93, FI96].

Tabela 1: Dados da experiência de Eötvös et al. Ref. [FR93].

Substância	$(x - x_{pt}) \times 10^{-6}$
magnesita	$+0.004 \pm 0.001$
madeira	-0.001 ± 0.002
cobre	$+0.004 \pm 0.002$
agua	-0.006 ± 0.003
sulfato de cobre (cristalino)	-0.001 ± 0.003
sulfato de cobre (solução)	-0.003 ± 0.003
asbestos	$+0.001 \pm 0.003$
sebo	-0.002 ± 0.003

Por outro lado, na década dos anos 60, experimentos do tipo de Eötvös foram realizados por Robert Dicke e colaboradores. Estes confirmaram a igualdade entre a massa gravitacional e a inercial. Contudo, devemos ressaltar que as experiências de Dicke e Eötvös são sensíveis a (possíveis) forças de alcances diferentes. As

últimas mediram efeitos típicos de dimensões de laboratório, as primeiras, típicos da distância Terra-Sol. Ficam em aberto possibilidades entre distâncias maiores que as de laboratórios, porém menores que a distância Terra-Sol ou ainda distâncias intergalácticas ou mesmo cosmológicas.

b) A experiência de Millikan sobre a quantização da carga elétrica. Ehrenhaft (físico alemão) obtinha, com experimentos semelhantes, resultados opostos aos de Millikan. Gerald Holton, revisando as notas de laboratório de Millikan observou que, para chegar a seu conhecido resultado, ele eliminou algumas medidas que segundo a sua intuição não eram boas. Caso ele as tivesse incluído teria chegado as mesmas conclusões que Ehrenhaft [HO79]. Historicamente, a hipótese de que as cargas elétricas possam existir apenas em múltiplos inteiros da carga do elétron foi muito proveitosa. Isto é, posteriormente verificou-se que era Millikan quem estava certo.

c) No final da década dos anos 20, Hubble mediu a relação entre a velocidade de afastamento das galáxias em relação à Terra e sua distância até esta. Os dados originais de Hubble estão longe de serem convincentes [WE88]. De qualquer forma, assumi-los como corretos permitiu o modelo cosmológico, hoje conhecido como *modelo cosmológico padrão* ou simplesmente como *Big Bang*. Posteriormente os dados de Hubble foram confirmados.

d) Finalmente mencionamos a célebre medição, por uma expedição inglesa, do desvio da luz pelo Sol prevista por Einstein segundo a sua teoria geral da relatividade. Hoje sabe-se que as medições de 1919 não tinham a precisão suficiente. Pior, observações em décadas posteriores não confirmaram o valor predito pela relatividade geral. Apenas nos anos 70, com a ajuda de satélites, foi possível confirmar as predições teóricas [WE93, BE96]. As duas expedições organizadas por Eddington obtiveram os resultados seguintes: a de Sobral, no Brasil, $1.98'' \pm 0.12''$ e a da Ilha de Príncipe $1.61'' \pm 0.30''$ sendo que a teoria de Einstein previa $1.87''$ e a de Newton $0.87''$. No entanto, expedições posteriores não confirmaram estes resultados. Ver Tabela 2.

²Isto precisa ser melhor estudado.

Tabela 2: Resultados de experiências sobre o desvio da luz pelo sol Ref. [BE93]. O valor predito pela relatividade geral é L_E .

Observatório	lugar	data	resultado \pm erro
Greengrich	Australia	set. 21, 1922	1.77 ± 0.40
Postdam	Sumatra	maio 9, 1929	2.24 ± 0.10
Sternberg	USSR	junho 19, 1936	2.73 ± 0.31
Yerkes	Brasil	maio 20, 1947	2.01 ± 0.27
Yerkes	Sudan	fev. 25 1952	1.70 ± 0.10
Texas	Mauritânia	junho 30, 1973	$(0.94 \pm 0.11) \times L_E$

Desde 1859 sabia-se da discrepância na órbita de Mercurio com a teoria de Newton. Devido à presença dos planetas (um sistema de muitos corpos) todas as órbitas planetárias precessam, isto é, a orientação das elipses move-se lentamente no espaço. No caso da órbita de Mercurio a discrepância era de 43 segundos de arco por século (575 segundos de arco por século contra 532 da teoria Newtoniana). É interessante que mesmo assim a teoria de Newton não era considerada errada. Havia também outras discrepâncias, por exemplo a do movimento da Lua e dos cometas Halley e Encke [WE93]. Qual delas seria uma discrepância importante? Posteriormente ficou esclarecido que levar em conta a pressão exercida pelo escape dos gases quando os cometas são aquecidos ao passar perto do Sol, da conta dos movimentos daqueles cometas; e que por outro lado devido a que a Lua é um corpo extenso sofre o efeito de muitas forças tidais [WE93]. Não foi esse o caso do problema da órbita de Mercurio como é bem conhecido. Mas é curioso que mesmo que a teoria da relatividade geral explicasse esse problema, foi o desvio da luz pelo Sol que foi considerado como o teste definitivo dessa teoria.

Mesmo sem entrar nos detalhes, devemos enfatizar que assumir como corretos os resultados das quatro experiências anteriores revelou-se importante do ponto de vista teórico e experimental, permitindo assim o desenvolvimento posterior das teorias das interações eletromagnética e gravitacional. No caso da experiência de Millikan, ela permitiu o desenvolvimento da química como a conhecemos hoje, dado que, a química com cargas fracionárias é bem diferente daquela com cargas que são múltiplos inteiros da carga do elétron. Contudo, fica claro que critérios alheios ao método científico foram muito importantes.

IV Experiências no contexto teórico errado

Como exemplo das experiências do terceiro tipo mencionamos apenas duas. Elas mostram que as experiências podem ser guiadas mas não determinadas por teorias particulares.

a) Os raios cósmicos foram descobertos em 1912 por Victor Hess. Contudo, o fato de que estão constituídos principalmente por prótons, partículas alfa e núcleos pesados foi confirmado apenas 30 anos depois. Por muitos anos aceitou-se a hipótese de Millikan de que eles eram raios gamma, isto é, radiação e não partículas. Em 1929 Bothe e Kolhóster realizaram uma experiência que confirmou o caráter corpuscular dos raios cósmicos. Eles encontraram que esses raios atravessavam 4.1 cm de chumbo. A radiação seria absorvida por essa quantidade de chumbo, assim os raios cósmicos primários deviam ser partículas carregadas. Mesmo que essa conclusão esteja correta, o que Bothe e Kolhóster observaram não foram os raios cósmicos primários mas os secundários: eram os muons que ainda não tinham sido descobertos [OT95, LO92] !

b) A experiência de Stern-Gerlach realizada em 1921, demonstrou a “quantização espacial” ou seja a quantização das orientações permitidas do momento angular orbital dos átomos. De fato esta experiência foi proposta para verificar ou a teoria clássica do momento angular de Larmor ou a teoria quântica de Bohr-Sommerfeld. As duas teorias faziam previsões bem definidas do comportamento dos átomos em campos magnéticos uniformes. A teoria clássica e a de Bohr-Sommerfeld diferiam nas suas previsões dos valores do

momento magnético $\vec{\mu}_l$ e a distribuição de máximos e mínimos observados na tela depois que os átomos atravessavam um campo magnético não homogêneo. Otto Stern e Walter Gerlach mediram os valores possíveis para a componente μ_{lz} para átomos de prata [CO75].

A teoria clássica permite que μ_{lz} possa ter qualquer valor entre $-\mu_{lz}$ e $+\mu_{lz}$. O resultado da experiência foi:

$$\mu_{lz} = \pm \frac{e\hbar}{2m}. \quad (1)$$

Isto é, o feixe de átomos de prata é separado em duas componentes discretas, uma no sentido positivo do eixo z e outra no sentido negativo. (O resultado é independente da escolha do eixo.)

A teoria de Bohr-Sommerfeld previa a quantização dos planos orbitais dos elétrons atômicos. Quer dizer que, além da proposta de Bohr segundo a qual as elipses dos elétrons ao redor do núcleo tinham o seu tamanho e forma quantizada, segundo Sommerfeld, também a orientação da órbita em relação a um eixo apropriado, por exemplo o determinado por um campo magnético, podia ter apenas valores discretos. Além do número quântico principal (radial) n' , Sommerfeld introduziu um número quântico azimutal n , com $n = n_1 + n_2$ e o número permitido de planos das orbitas seria $2n$ incluindo as posições horizontais e verticais, isto é, par. (Na notação atual $n_1 = m_l$, e $n_2 = l$, sendo m_l o número quântico azimutal e l o número quântico para o momento angular orbital.) Stern tinha em mente este contexto teórico quando realizou a famosa experiência.

Na teoria de Bohr-Sommerfeld o caso $n = 0$ [WE95] era proibido como veremos mais adiante mas neste caso o feixe de átomos não seria desviado. Como eles imaginavam que estavam no caso $n = 1$ ($l = 1$ na notação atual) deveriam esperar duas componentes na teoria de Bohr-Sommerfeld. Na verdade eles estavam no caso $l = 0$ e, na mecânica quântica de Schrödinger se esperaria que o feixe não fosse desviado. O caso $l = 1$ produziria três componentes mesmo no contexto da mecânica quântica de Schrödinger dado que a degenerescência é dada por $2l + 1$.

Stern e Gerlach não sabiam que a teoria de Bohr-Sommerfeld seria em breve substituída pela mecânica quântica e que além disso, existe uma outra fonte de momento angular diferente da que tinha sido considerada até então. Depois da proposta da existência do *spin* do elétron, Phipps e Taylor repetiram a experiência de Stern e Gerlach, porém usando desta vez átomos

de hidrogênio. Eles obtiveram os mesmos resultados que Stern-Gerlach, mas não os associaram com o spin. Como os átomos de hidrogênio têm mais probabilidade de estar no estado fundamental, $l = 0$, sem o spin não deveria haver desvio do feixe [PH27]. Agora sabemos, de fato, que o efeito Stern-Gerlach é devido à existência do spin do elétron. Também é de notar que Uhlenbeck e Goudsmith (que propuseram o spin do elétron em 1925) tampouco notaram que a experiência de Stern-Gerlach era uma evidência do novo grau de liberdade introduzido por eles [WE95].

V Duas experiências cruciais: A violação da paridade e a quantização espacial

Os problemas da violação da paridade e da quantização espacial, comentados brevemente nas Secs. II e IV, respectivamente, podem ser considerados *cruciais* no sentido da experiência de Newton mencionada no Seção I. Permitiram descartar teorias que conservam a paridade, no primeiro caso; e a mecânica clássica, no segundo caso. No entanto, não podemos dizer que eles confirmaram uma teoria em particular. Estas duas experiências apresentam características especiais que merecem ser analisadas.

Voltemos ao caso da violação da paridade. Em 1926 Davisson e Germer [DA27] realizaram a experiência que mostrou que a hipótese de de Broglie e Schrödinger sobre a natureza ondulatória das partículas estava correta. Isso incentivou, segundo as próprias palavras de Cox [AD73], um estudo mais detalhado da natureza dessas ondas: são longitudinais, transversais ou têm ambas características? ³ Foi com essa motivação teórica que em 1928 Charles G. McIlwraith, Bernard Kurrelmeier e Cox começaram uma experiência da Universidade de Nova York [CO73]. Eles esperavam que, como no caso dos raios-X que são polarizados via duplo espalhamento, o mesmo acontecesse com os elétrons caso eles fossem ondas transversais. Eles acreditavam que o resultado seria positivo pois na época já havia sido proposto o *spin* do elétron por Goudsmit e Uhlenbeck. O curioso (e Cox não lembra o motivo) é que em vez de usarem como fonte dos elétrons um filamento quente, como era usual na época, eles usaram elétrons produzidos em decaimentos radiativos (produzidos, agora sabemos, pelas interações fracas!). Afinal, porque deveriam ser diferentes os dois tipos de elétrons? Eles não tinham

³Na época ainda se pensava na existência real dessas ondas e não em termos de probabilidades como propôs pouco tempo depois Max Born.

ouvido falar da conservação da paridade. Devemos lembrar que em 1927 Wigner tinha explicado as leis de seleção de Laporte em transições atômicas invocando a conservação da paridade. Esta simetria é, de fato, conservada nas interações eletromagnéticas. Esta foi a primeira vez que essa simetria foi usada na explicação das leis da física. Antes disso era usada apenas como recurso para resolver problemas com maior facilidade.

Na experiência de Cox, os elétrons eram espalhados duas vezes a 90° em alvos de ouro. Observaram uma assimetria: menos partículas β foram observadas a 90° do que a 270° . Depois de longa análise concluíram que se tratava da polarização dos elétrons- β vindo da fonte de rádio (Ra). A sua dúvida nesta interpretação é manifesta no título do seu artigo “Apparent evidence of polarization in a beam of β -rays” [CO73]. Essa assimetria, conjecturaram, aparecia apenas nos elétrons de alta energia! Segundo a teoria $V - A$ das interações fracas proposta em 1958, a polarização dos elétrons produzidos em decaimentos β é dada por $P = \pm v/c$. Se $v \rightarrow 0$ então $P \rightarrow 0$ *i.e.*, não temos polarização, porém se $v \rightarrow c$ temos que $P \rightarrow \pm 1$, a massa dos elétrons é neste caso desprezível e eles se comportam como neutrinos.

Em 1929 Carl T. Chase realizou três experiências semelhantes à de Cox *et al.*, desta vez usando como fonte dos elétrons- β uma amostra de radônio (Rn). Na primeira não apareceu a assimetria mas os elétrons eram de baixa energia. Na segunda experiência Chase confirmou que, como Cox *et al.*, tinham conjecturado, os contadores eram sensíveis à velocidade dos elétrons. A assimetria desaparecia para elétrons de baixa velocidade. Na terceira experiência, o contador Geiger, usado até então em todas as experiências, foi substituído por um eletroscópio muito sensível e a assimetria, mesmo pequena, apareceu de maneira consistente.

Uma quinta experiência foi feita por Frank E. Myers e Cox para estudar a assimetria em elétrons- β . Desta vez, em analogia com a polarização da luz por um cristal de turmalina, fizeram uma contagem dos elétrons que passavam através de duas lâminas finas de ferro magnetizadas em diferentes direções. Não encontraram diferença na contagem quando as direções das magnetizações eram mudadas.

Chase e Myers e outros pesquisadores da universidade de Nova York continuaram as experiências relacionadas com a polarização de elétrons rápidos mas usando filamentos quentes como fonte dos elétrons depois acelerados por alta voltagem. Não encontraram nenhuma assimetria obviamente, para nós agora, porque eram elétrons não polarizados. Segundo Cox [CO73]

“This later work of Chase, Myers and

others left me quite puzzled. I found it difficult to reconcile our observations of β -particles with the prevailing theory and observations on artificially accelerated electrons. I never published a retraction of our findings, but I probably express some doubts about the reality of our effect in conversation with friends”.

Em 1929 Mott mostrou que a interação spin-orbita no espalhamento de Coulomb pode ser usada como polarizador via duplo espalhamento para elétrons relativísticos e, segundo Lee Grodzins as experiências de Cox e colaboradores não eram apropriadas para observar o efeito Mott. As amostras eram grossas, assim o espalhamento não era duplo mas múltiplo.

Em 1960, foi realizada no MIT uma experiência não publicada (por Sidney Altman como sua Senior Thesis) que mostrava que o sinal da assimetria de Cox *et al.*, estava errado [LE73]. O sinal da assimetria da experiência de Cox *et al.*, foi explicado depois como um erro não da experiência em si mas na escolha das coordenadas [AD73].

Independente disso, podemos perguntar por que não foi reconhecido na época, que a assimetria de Cox *et al.*, corresponde à violação da paridade. Nessa época houve muita atividade experimental para detectar o efeito Mott. Assim, as experiências de Cox podem ser confundido com outras similares mas que procuravam o efeito Mott [AD73]. As experiências de 1928-1930 mostraram uma polarização longitudinal para o elétron e isso significa uma violação da paridade. Ela mostrava um número de eventos a 90° diferente dos observados a 270° . O espalhamento Mott não previa uma assimetria nesses ângulos mas entre 0° e 180° . A polarização de Mott foi detectada experimentalmente apenas em 1942 [TO56]. (Em 1935 Halpern e Schwinger observaram que a não observação do efeito Mott poderia ser devida ao que agora chamamos de “correções radiativas” ou a desvios do campo nuclear de sua forma Coulombiana [HA35].)

Por outro lado, as experiências de Wu *et al.* e outros (ver embaixo), podem ser consideradas como cruciais porque elas foram capazes de distinguir entre dois tipos de teorias: as que conservam a paridade e aquelas que a violam [FR81]. Porque isso não foi reconhecido em 1928 e 1930?

Qual foi o contexto em 1956 quando Lee e Yang propuseram que a violação da paridade poderia acontecer nas interações fracas?

Em 1950 Purcell e Ramsey haviam colocado a questão da violação da paridade no contexto do momento dipolar elétrico [PU50]. Também Wick, Whit-

man e Wigner em seu famoso artigo de 1952 [WI52] consideraram o conceito da paridade intrínseca das partículas elementares. Eles observaram que a paridade poderia ser uma simetria aproximada, da mesma maneira que a simetria que transforma matéria em anti-matéria (e viceversa) e, apenas as duas transformações combinadas seria uma simetria da natureza. Estas duas considerações da violação da paridade foram apenas uma forma especulativa e não propunham esta como solução de um problema determinado.

Em 1953 foi colocado *experimentalmente* o chamado “paradoxo $\tau - \theta$ ”. Duas partículas a τ e a θ tinham a mesma massa, spin e vida média mas diferentes canais de decaimento.⁴ A diferença estava no fato de que a paridade nos decaimentos era oposta em cada caso. Assim, se a paridade fosse conservada elas teriam que ser partículas diferentes; se não o fosse, elas poderiam ser a mesma partícula. Lee e Yang, analisando todas as experiências dos decaimentos nucleares β conhecidas na época observaram que todas eram desenhadas de forma tal que mesmo que a paridade fosse violada nesse decaimento, as experiências feitas até então não o teriam detectado. Propuseram então que se fizessem vários testes para verificar se a simetria sob paridade é ou não conservada nesses processos fracos. Entre eles estavam o decaimento β de núcleos com spin orientado. Se ϕ é o ângulo entre o spin do núcleo que decai e o momento do elétron, esperava-se, caso a paridade fosse violada, uma assimetria na distribuição angular entre ϕ e $\phi - 180^\circ$. Um segundo tipo de assimetria apareceria na distribuição angular na cadeia $\pi \rightarrow \mu\nu$, $\mu \rightarrow e\nu\nu$. Ambas experiências foram realizadas nos seis meses seguintes à proposta de Lee e Yang por C. S. Wu, E. Ambler, R. W. Hayward, D. D. Hoppes e R. P. Hudson no primeiro caso; e por R. L. Garwin, L. M. Lederman e M. Weinrich e, independentemente, por J. I. Friedman e V. L. Telegdi, no segundo caso [CO73]. Assim vemos na questão da paridade que o conteúdo físico e lógico da experiência não é suficiente para revelá-la como crucial. Mas, se o contexto teórico é importante, porque não o foi no caso da quantização espacial?

No caso da experiência de Stern-Gerlach a conclusão correta foi que o aparecimento de duas “manchas”, em vez de um contínuo na tela, refutava a teoria clássica. Porém, como mencionamos antes, ao mesmo tempo criava dificuldades para a teoria de Bohr-Sommerfeld. Quando considerada no contexto de dois tipos de momentos angulares, o *momento angular orbital*, \vec{L} , e o *momento angular de spin*, \vec{S} , a experiência de Stern-Gerlach é uma refutação da velha mecânica quântica. Como $l = 0$ nos átomos de prata no estado fundamen-

tal, a separação do feixe em duas partes observada por Stern-Gerlach foi devida ao momento angular \vec{S} , que na época ainda não tinha sido proposto [WE95]. Stern e Gerlach achavam que estavam no caso $l = 1$ e segundo a teoria de Bohr-Sommerfeld esperavam $2l$ componentes. Mas na mecânica quântica o número delas é $2l + 1$ assim deveriam aparecer tres manchas na tela. Como agora sabemos que o átomo de prata no estado fundamental está no estado $l = 0$, do ponto de vista da moderna mecânica quântica não esperamos separação do feixe a menos que exista uma outra fonte de momento angular. Em breve a velha teoria quântica seria substituída pela moderna mecânica quântica (e o spin pela extensão relativística de Dirac). A razão da exclusão do caso $n = 0$ ($l = 0$ na notação atual) na teoria de Bohr-Sommerfeld é porque neste caso as órbitas elípticas degeneram em linhas retas. Isto implica que o elétron colide com o núcleo o que é observado [BO65].

VI Conclusões

Podemos notar de uma maneira muito intuitiva, que as experiências científicas não são, em geral, um meio de falsificar as teorias. A experiência de Stern-Gerlach tem certa independência da teoria: estava baseada em contextos teóricos errados. Quer dizer que as experiências podem ter a sua própria razão de ser. Elas podem sugerir novos avanços teóricos, podem estar baseadas em conceitos teóricos falsos e mesmo assim produzir resultados verdadeiros. Podem também dar evidência contra uma teoria concorrente. Dos exemplos anteriores podemos ver que devemos fazer uma diferença entre uma teoria que permite realizar uma experiência e uma teoria que está sendo testada [WE95].

Assim, se nos perguntarmos: quando uma experiência é crucial? devemos admitir que não temos um resposta bem definida. Normalmente acredita-se, como foi discutido na Sec. I, que as experiências *cruciais* são aquelas que decidiram entre duas teorias rivais. Vimos no caso da quantização espacial (Stern-Gerlach) que ela não foi suficiente para confirmar (pelo contrário, era contra) a velha mecânica quântica. No entanto, sendo seu resultado válido, em breve seria interpretada corretamente na teoria quântica moderna com a introdução de um novo grau de liberdade: o *spin* do elétron. Por outro lado as experiências de Cox *et al.* não foram suficientes para revelar aos físicos que a simetria por paridade não é conservada em certos processos (agora conhecidos por interações fracas.)

A experiência de Stern-Gerlach deu um resultado que estava contra as previsões da mecânica clássica,

⁴A τ não é a partícula que agora conhecemos como lépton τ . Na notação atual ambas τ e θ correspondem ao kaon K^+ .

da mecânica quântica antiga (de Bohr-Sommerfeld) e mesmo contra as da mecânica quântica de Schrödinger (que não considerava o grau de liberdade de spin). Os resultados experimentais estavam corretos mas a sua interpretação teórica não. Assim não é completamente certo que uma experiência decisiva pode ser considerada apenas à luz de uma teoria [WE95]. Uma experiência pode ser guiada por uma ou várias teorias mas não determinada por elas. Uma experiência pode falsificar uma teoria (a de Lamor no caso da experiência de Stern-Gerlach) mas não validar uma outra teoria rival (a mecânica quântica de Bohr-Sommerfeld).

Se aceitamos que é a comunidade científica quem, num determinado contexto teórico, determina se um resultado experimental é crucial ou não, então teremos que aceitar que as verdades científicas têm também um caráter *histórico*. Na época de Millikan, foi importante aceitar os seus resultados e não os de Erhenhaft. Da mesma maneira, os de Hubble e Eötvös. Neste último caso é interessante notar que, se a dependência na composição descoberta nos dados de Eötvös tivesse sido observada na época só poderia ter sido interpretada como uma diferença entre a massa gravitacional e a massa inercial: na época o nêutron não tinha sido descoberto! Na atualidade, caso a dependência na composição tivesse sido confirmada, não alteraria o princípio de equivalência porque conhecemos as cargas às quais atribuir esse efeito, por exemplo, o isospin ou o número bariônico [MA97]. Mais uma vez vemos que aceitar os resultados de Eötvös foi historicamente correto.

Mas se o contexto teórico é importante, como explicar o caso dos raios-X e da radioatividade? Estes foram descobertos sem nenhum marco teórico. Constituem o tipo de descobertas completamente inesperadas [SE87]. É difícil de se prever, se no futuro isso vai acontecer de novo ou não. Também não dá para entender por que os resultados de Cox e colaboradores não estimularam mais pesquisas nessa direção. Davisson e Germer realizaram uma experiência semelhante à de Cox *et al.*, na qual não observaram nenhuma assimetria [DA29]. Mas eles usaram elétrons produzidos por um filamento o que significa uma fonte não polarizada de elétrons. O importante de novo, é que a comunidade não percebeu na época que os elétrons- β eram o produto de uma nova interação: a força ou interação fraca, como seria conhecida mais tarde.

Vemos que, pelo menos nos exemplos discutidos acima, resultados experimentais permanecem, até certo ponto, independentes da interpretação teórica. Isto dá às experiências uma relevância ainda maior que a que é usualmente aceita. Porém, em alguns casos antecipamo-nos à natureza guiados por um senso estético (mesmo mal definido) como foi o caso da teoria

da relatividade geral e a sua “confirmação” por Eddington em 1919. Mas, uma experiência sempre é *guiada* por algum contexto teórico ainda que este seja errado (como no caso de S-G) mas, mesmo sendo dirigida teoricamente, algumas experiências não são *determinadas* pela teoria. Então, uma teoria não precisa ser correta para ser experimentalmente importante. A crença popular entre os cientistas de que uma experiência somente é decisiva à luz de uma teoria fica um pouco relaxada.

Não podemos criar o conhecimento científico pela razão pura como queria Kant mas, por outro lado, as teorias são invenções livres do espírito humano (qualquer coisa que isso signifique). Mas essa liberdade não é completa, ela está limitada pelos dados experimentais. Ninguém poderia, impunemente, propor uma teoria da gravitação clássica ou da eletrostática com uma força dependendo de $1/r^3$. As vezes, uma formulação teórica adianta-se aos dados experimentais, como foi o caso da teoria geral da relatividade. Por outro lado, mesmo que aceitemos que a ciência em geral, e a física em particular, estão baseadas na experiência há várias maneiras de se interpretar isso. Para alguns, como Mach, as cadeias de raciocínio lógico, por complicadas que sejam, são em última instância, relações entre *fatós*. A teoria seria uma maneira econômica de relacionar experiências não sendo ela mesma um elemento do conhecimento [CR97]. A maneira de conciliar esse ponto de vista com as teorias da relatividade e da mecânica quântica foi, para positivistas lógicos, aceitar que a ciência permite explicações baseadas em conceitos abstractos e princípios gerais sempre que sejam relacionados de maneira lógica com consequências *verificáveis* ou *falseáveis* segundo Popper.

A física, em geral, precisa que uma teoria preceda uma experiência porque sem uma teoria não é possível extrair os fatores que são relevantes. Sem um contexto teórico apropriado, como poderia William Crookes ter descoberto os raios-X, quando observou que as placas fotográficas de seu laboratório estavam estragadas? (ele as devolveu aos fabricantes!) ou Cox reconhecer que a simetria por paridade é violada em alguns processos que envolvem elétrons? Mas Roentgen, nas mesmas circunstâncias de Crookes e outros, foi capaz de demonstrar que um novo tipo de radiação (diferente da luz visível) existia. Apenas ciências nos seus primórdios podem realizar experiências sem um contexto teórico bem determinado. Veja-se por exemplo, os trabalhos sobre a máquina de vácuo de Boyle e as primeiras pesquisas sobre termodinâmica.

Na atualidade o caso da física de altas energias está numa fase em que as experiências precisam, talvez

mais do que nunca, uma teoria para serem interpretadas. Este tema merece um artigo separado.

Talvez, como propõe Weinert, seja necessário a construção de uma *epistemologia experimental* [WE95].

References

- [AD73] Veja-se a coleção de artigos e depoimento dos principais envolvidos na questão da violação da paridade em *Adventures in Experimental Physics*, γ Volume, editado por B. Maglic (World Science Education, Princeton 1973), pp. 93.
- [BE96] Bernstein, J., *A Theory for Everything*, (Copernicus, New York 1996).
- [BO65] Born, M., *Atomic Physics*, (Dover Publications, New York 1969), Cap. V e Apêndice XIV.
- [CH97] Uma análise detalhada das diferenças entre Boyle e Espinosa pode ser encontrada em: M. Chaui, *Matemática e Experiência: um debate entre Espinosa e Boyle*, X Colóquio de História da Ciência, Campos do Jordão, 8-12 de setembro de 1997.
- [CO73] As referências originais podem ser encontradas nas Refs. [FR79, AD73].
- [CO75] Esta experiência está bem descrita no livro de C. Cohen-Tannoudji, B. Diu e F. Lalöe, *Mecanique Quantique*, (Herman, Paris 1975) Cap. IV.
- [CO88] Cohen, I. B., *O Nascimento de uma Nova Física* (Gradiva, Lisboa 1988).
- [CR97] Cromer, A., *Connected Knowledge*, (Oxford University Press 1997).
- [DA27] Davisson, C. J. e Germer L. H., *Phys. Rev.* **30**, 705 (1927)
- [DA29] Davisson, C. J. e Germer, L. H., *Phys. Rev.* **33**, 760 (1929).
- [DU89] Duhem, P., *Ciência e Filosofia*, São Paulo, (4), 13-176 (1989).
- [FI96] Fisbach, E. e Talmadge, C., *Ten Years of the Fifth Force*, palestra apresentada no XXXI Rencontres de Moriond, 20-27 de janeiro de 1996; hep-ph/9606249.
- [FR79] Franklin, A., *The Discovery and Nondiscovery of Parity Nonconservation*, *Stud. Hist. Philos. Sci.* **10**, 201 (1979).
- [FR81] Franklin, A. e Smokler H., *Justification of a "Crucial" Experiment: Parity Nonconservation*, *Am. J. Phys.* **49**, 109 (1981).
- [FR93] Franklin, A., *The Rise and Fall of the Fifth Force*, (AIP, New York 1993).
- [HA35] Halpern, O. e Schwinger, J., *Phys. Rev.* **48**, 109 (1935).
- [HE68] Uma narrativa da conversa entre Einstein e Heisenberg sobre este assunto pode ser encontrada em: W. Heisenberg, 1968 Dirac Memorial Lectures reproduzido em A. Salam, W. Heisenberg e P. A. M. Dirac, *A Unificação das Forças Fundamentais*, (Jorge Zahar Ed. RJ 1993); W. Heisenberg, *A parte e o todo*, (Contraponto, RJ 1996).
- [HO79] Holton, G., *A Imaginação Científica*, (Zahar Editores, RJ 1979).
- [LE73] Veja-se nota de Lee Grodzins na Ref. [AD73], p.154.
- [MA97] Agradeço a G. Matsas esclarecimentos sobre esta questão.
- [LO92] Longair, M. S., *High Energy Astrophysics* (Cambridge University Press, Cambridge 1992), vol. 1.
- [OT95] Otaola, J. A. e Valdés-Galicia, J. F., *Los Rayos Cósmicos: Mensajeros de las Estrellas* (Fondo de Cultura Económico, México 1995).
- [PH27] Phipps, T. E. e Taylor, J. B., *The Magnetic Moment of the Hydrogen Atom*, *Phys. Rev.* **29**, 309 (1927).
- [PU50] Purcell, E. M. e Ramsey, N. F., *Phys. Rev.* **78**, 807 (1950).
- [SE87] Segré, S., *Dos Raios-X aos Quarks*, (Editora Universidade de Brasília 1987).
- [SH96] Shapin, S., *The Scientific Revolution* (The University of Chicago Press, Chicago 1996).
- [SI96] Silva, C.C., e de Andrade Martins, R., *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **18**(4), 313 (1996).
- [TO56] Tolhoek, H. A., *Rev. Mod. Phys.* **28**, 277 (1956).
- [WE88] Weinberg, S., *The First Three Minutes*, (Basic Books, New York 1988).
- [WE93] Weinberg, S., *Dreams of Final Theory*, (Vintage Books, New York 1993).
- [WE95] Weinert, F., *Wrong Theory—Right Experiment: The Significance of the Stern-Gerlach Experiments*, *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* **26**(1), 75 (1995).
- [WI52] Wick, G. C., Whitman, A. S. e Wigner, E., *Phys. Rev.* **88**, 101 (1952).