



.....

Nelson Studart

Professor da Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil
Professor Aposentado Sênior do Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil
E-mail: n.studart@gmail.com

.....

Finalmente, gostaria de acrescentar que a principal razão das minhas aulas não foi prepará-los para algum exame – não foi sequer para prepará-los para o mercado de trabalho nem para as forças armadas. Eu queria principalmente que vocês passassem a apreciar o mundo extraordinário e a maneira como o físico olha para ele, a qual, acredito, seja uma grande parte da verdadeira cultura dos tempos modernos. (Provavelmente professores de outras matérias iriam protestar, mas eu acredito que eles estão totalmente errados.) Talvez vocês não apenas passem a apreciar essa cultura, mas é possível que queiram se juntar à maior aventura jamais iniciada pela mente humana.

R.P. Feynman

Epílogo do Volume III das *Lectures*, 1963

Introdução

Uma questão, do tipo quebra-cabeça, foi apresentada a Feynman quando cursava o ensino secundário [1]: Dois ciclistas, 20 km de distância um do outro, correm a 10 km/h. Nesse mesmo momento, uma mosca deixa a roda da frente da bicicleta e voa na direção da outra a uma velocidade constante de 15 km/h. Quando pousa na roda da frente da segunda bicicleta, ela imediatamente se vira e retorna. Quando toca a primeira bicicleta, imediatamente inverte o sentido.

Qual é a distância total coberta pela mosca antes de ser esmagada pela colisão entre as rodas das bicicletas? A resposta imediata de Feynman: 15 km. Raciocínio: como as bicicletas vão colidir em exatamente uma hora, e como a mosca está se movendo a 15 km/h, o total do percurso é 15 km. Uma solução, digamos ortodoxa, apresentada por John von Neumann, consiste em somar a série infinita, obtida a partir do cálculo sequencial da distância na primeira viagem, na segunda e assim por diante (foi essa que tentei!). Esse exemplo ilustra bem como a mente de Feynman funciona na solução de pro-

blemas de física aos quais se dedicou durante sua brilhante carreira. Os famosos diagramas de Feynman foram uma maneira engenhosa de realizar cálculos complicados da eletrodinâmica quântica (QED) de forma simples e eficiente e que simplificaram elegantemente a complexidade de cálculos em outras áreas da física [2]. Não houve problema aberto de física no século XX para o qual Feynman não tenha buscado soluções, algumas bem sucedidas, outras sem êxito, como sua frustrada tentativa de elaborar a teoria da supercondutividade. E sempre abordou os problemas já resolvidos de forma original e inovadora, basta

Os famosos diagramas de Feynman foram uma maneira engenhosa de realizar cálculos complicados da eletrodinâmica quântica de forma simples e eficiente e que simplificaram elegantemente a complexidade de cálculos em outras áreas da física

ver os livros editados a partir de suas notas de aulas. Quando inquirido sobre a opinião de Feynman acerca de sua teoria alternativa das “variáveis ocultas” na mecânica quântica, após

encontro deles no Brasil, David Bohm comentou que Feynman não encontrara nela um problema a ser resolvido. Não se interessava muito por filosofia (tinha a sua própria), história e áreas das ciências humanas; seu foco principal eram as ciências físicas. Registrem-se os comentários de professores de Princeton acerca da admissão de Feynman, como narrado por

Feynman é um ícone da física no século XX. Sua personalidade multifacetada, seu carisma e suas contribuições à física e ao ensino tornaram-no muito conhecido do grande público e de toda a comunidade de professores de física. Seu apreço e admiração pelo Brasil, país que visitou em várias oportunidades, foi enorme. Em carta ao amigo Leite Lopes, assinou como no título acima. Neste artigo, em comemoração ao centenário de seu nascimento, comento brevemente aspectos de sua vida e obra e destaco a apreciação de alguns colegas mais próximos. Abordo suas principais incursões no campo da ensinagem, como proponente de metodologias inovadoras e crítico feroz da aprendizagem mecânica e do ensino para testagem. Em particular, exponho suas ideias sobre o ensinar e o aprender, sua visão da física, as palestras sobre o ensino no Brasil e os livros *Lições da Física* e *Sobre as Leis da Física*.

seu orientador, John Wheeler [3]: “Vejam as notas desse sujeito do MIT nos testes de aptidão em matemática e física. Fantástico! Ninguém que está se candidatando, aqui em Princeton, chega assim tão perto do pico absoluto.” Alguém no Comitê de Admissão de Pós-graduandos interrompeu: “Ele deve ser um diamante bruto. Nunca deixamos entrar ninguém com notas tão baixas em história e inglês. Mas veja a experiência prática que ele teve em química e ao trabalhar com atrito.”

Em 2018 é comemorado o centenário de nascimento de Richard Phillips Feynman, um dos mais renomados físicos do século XX e considerado, por muitos, o mais importante físico norte-americano da história. Seus colegas atribuem a ele uma mente quase sobre-humana [4], acima da categoria gênio. Segundo Marc Kac: “Um gênio comum é um sujeito que você e eu seríamos tão bons quanto, se fôssemos apenas muitas vezes melhores. Não há mistério sobre como a sua mente funciona... É diferente com os mágicos [...] o funcionamento de suas mentes é, para todos os efeitos, incompreensível. Mesmo depois de entendermos o que eles fizeram, o processo pelo qual eles fizeram é completamente obscuro [...] Richard Feynman é um mágico do mais alto calibre.” Hans Bethe complementa: “Aquele que faz coisas que ninguém mais poderia fazer e que são completamente inesperadas”. Freeman Dyson: “A mais original mente de sua geração.” Seu grande competidor e colega no Caltech, Murray Gell-Mann: “As ideias de Richard, muitas vezes poderosas, enge-

nhosas e originais, eram apresentadas de uma maneira direta que eu achava inspiradoras.” Leite Lopes, seu anfitrião no Brasil: “A imagem que guardo dele é a imensa alegria em fazer pesquisa, em pensar e descobrir por si mesmo de modo inimitável, uma singular intuição, uma rica imaginação que forneceram muitas bonitas dádivas ao conhecimento físico” [5].

São inúmeros os epítetos a ele atribuídos: *showman* nato, bufão, iconoclasta, além de gênio e mágico. Gosto de *Persönagem curiosa* (subtítulo de sua autobiografia) [6]: exibia comportamento exclusivamente não convencional e se descrevia como “ativamente irresponsável” (pode-se fazer várias leituras dessa sua descrição). Demonstrou um amor intenso pela física, mas também tinha paixão por tocar bongôs e frigideiras, desfilar no carnaval carioca, pintar quadros (Fig. 1) e desenhar figuras humanas, decifrar segredos de cofres e aprender novas línguas (incluindo os hieróglifos maias). Sem dúvida, um contador de histórias, inclusive em suas festejadas aulas e conferências. Assim, Gell-Mann provocativamente se manifestou: “Ele se cercou de uma nuvem de mitos e gastou muito tempo e energia gerando anedotas sobre si mesmo” [7].

Sua extrema curiosidade acerca do mundo lhe permitiu fazer conexões que uma mente estreita não pode alcançar. Como salientado pela revista *The Scientist* em seu obituário: “Aristóteles, em *De Poetica*, observou que a habilidade de fazer tais conexões por meio do pensamento metafórico é ‘um sinal de genialidade [...]

implica uma percepção intuitiva da semelhança entre diferentes’. Ele continua a dizer que essa capacidade ‘não pode ser aprendida com os outros’. De fato, esse, como Feynman, era autodidata”. Essa habilidade está clara, para nós professores, na reformulação da física, com as conexões entre campos do conhecimento físico, como ele os compreendia, no originalíssimo *Feynman Lectures on Physics (Lições de Física)* [8].

Em suma, Feynman foi um cientista que conseguiu reunir as qualidades de curiosidade, criatividade, originalidade e uma intuição apurada.

As contribuições de Feynman foram de grande relevância em várias áreas da física e o fizeram merecedor do Prêmio Nobel de 1965 (compartilhado com Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga) pelo desenvolvimento da teoria da eletrodinâmica quântica, que unificou o eletromagnetismo, a mecânica quântica e a relatividade restrita. Publicou trabalhos importantes na física das partículas elementares (teoria de interações fracas, jatos de quarks, pártons), na mecânica quântica (formalismo de integrais de caminho, dissipação quântica), gravitação quântica e relatividade geral (ondas gravitacionais), e na física da matéria condensada (hélio líquido e pólaçons). Em duas conferências, lançou as bases da nanotecnologia e da computação quântica. Mas lamentou não ter resolvido o problema da supercondutividade. O volume 40, n. 4 da *Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF)* apresenta uma Seção Especial em homenagem a Feynman por ocasião do centenário de seu nascimento, trazendo a visão de pesquisadores brasileiros sobre sua obra [9](Fig. 2).

Professor Feynman

Feynman é considerado um dos grandes professores de física de todos os tempos. Seu epíteto “Grande explicador” lhe faz justiça. Suas palestras atraíam grandes audiências e várias foram gravadas e impressas. Destaco as magistrais *Messenger Lectures*, disponíveis na internet, que se transformaram no livro *The Character of Physical Law (Sobre as Leis da Física, na versão brasileira)* [10]. Gostava de dar aulas e conversar com jovens estudantes. E demonstrou muito respeito aos professores de ciências que talvez o vissem como a seu pai, a quem atribui o estímulo a sua curiosidade na infância. Na palestra *O que é ciência*, apresentada nesta edição de FnE, Feynman demonstra seu apreço pelos professores do nível elementar:

“Mas eu gostaria de dizer que acho que “O que é ciência” não é equivalente de modo algum a “como ensinar ciência”,

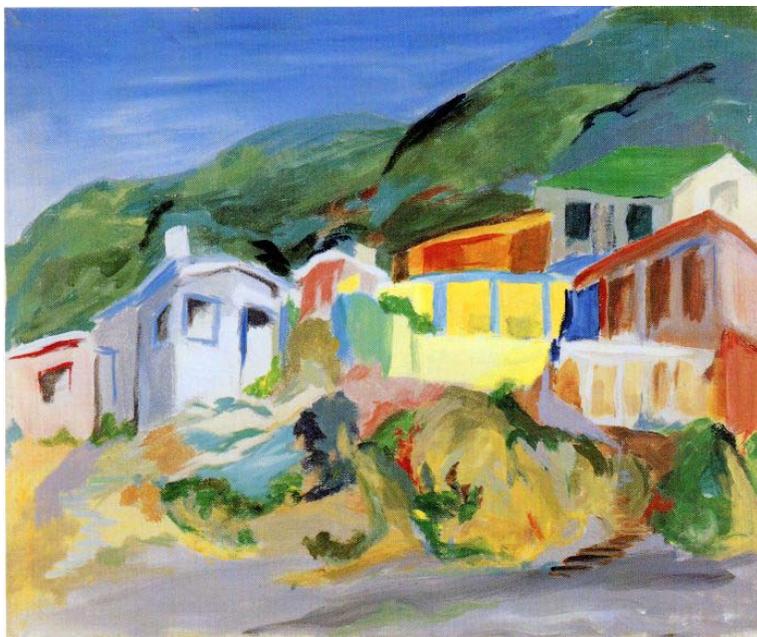
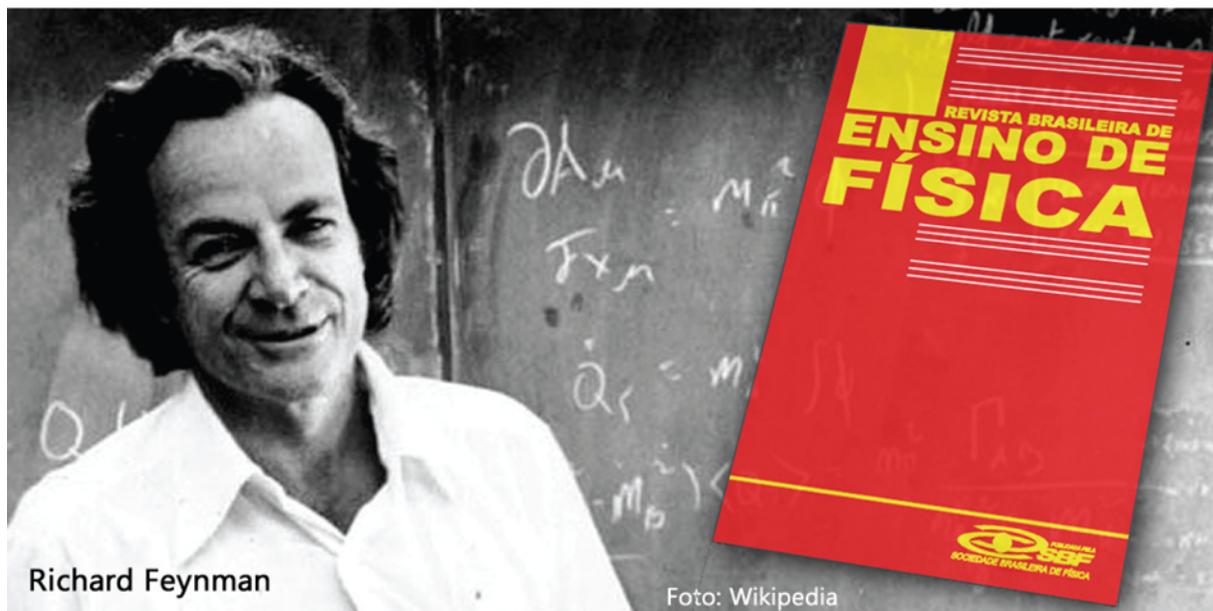


Figura 1: Pintura *Hillside City*, de Feynman, que assinava seus quadros e desenhos com o pseudônimo de Ofey (Museum Syndicate).



Richard Feynman

Foto: Wikipedia

Figura 2: Feynman e a Seção Especial da RBEF que o homenageou no centenário de seu nascimento (vol. 40, n. 4, 2018).

e devo chamar sua atenção para isso por duas razões. Em primeiro lugar, pela maneira como preparei esta palestra, pode parecer que estou tentando dizer a vocês como ensinar ciência – e não estou fazendo isso de maneira nenhuma, porque eu não sei nada sobre crianças pequenas. Eu tenho uma, então eu sei que eu não sei. A outra razão é que eu penso que a maioria de vocês (porque ouço dizer e porque há tantos artigos e especialistas sobre o assunto) têm algum sentimento de falta de confiança. Vocês estão sempre ouvindo falar sobre como as coisas não estão indo bem e como deveriam aprender a ensinar melhor. Eu não vou criticá-los pelo mau trabalho que estão fazendo e indicar como ele pode ser melhorado; não é essa a minha intenção.”

David Goodstein, seu colega e colaborador (apresentador da série *Universo Mecânico*), descreve Feynman na sala de aula [11]: “Para Feynman, o auditório era um teatro, e o conferencista era um artista, responsável por fornecer drama e explosão, além de fatos e números. Isso era verdade independentemente de seu público, se ele estava falando com estudantes de graduação ou pós-graduação, para seus colegas ou o público em geral. Suas aulas eram ilustradas com expressões gestuais e corporais [falava com o corpo], humor e histórias pessoais de seu relacionamento com outros físicos.” Nestor Caticha, do IF-USP, seu aluno em disciplinas da pós no Caltech, comenta [12]: “assistir aula de Feynman era uma experiência única [...] Além da beleza da física que em

si já seria suficiente, nós éramos envolvidos pela trama [que nos contava]” [...] “Ter uma interação, por menor que seja, com alguém assim é uma grande experiência. A mensagem diária era sobre a importância da curiosidade, de conviver honestamente com a dúvida, de não ter medo das dificuldades e se divertir fazendo ciência.”

O método de ensinagem (ensino com aprendizagem) de Feynman, ao final dos anos 1940 em Cornell, explorava a criatividade e a originalidade do aluno de forma pouco convencional até para os dias de hoje, com tantas propostas de metodologias ativas. Laurie Brown, que foi orientado por Feynman e cursou várias disciplinas que ele ministrou, relembra [4]:

“Feynman era um professor muito popular e suas aulas em cursos avançados eram bem frequentadas por teóricos e experimentalistas. Depois das aulas, os alunos reuniam-se em pequenos grupos para comparar suas anotações de aula e para refazê-las. Embora as aulas fossem bem preparadas, nem sempre eram fáceis de seguir. Logo descobrimos que os métodos de Feynman eram tudo, menos triviais, e não encontrados em nenhum livro, e que alguns de seus pontos de vista eram grandemente não convencionais. Feynman enfatizava a criatividade – o que para ele significava resolver as coisas desde o começo. Ele pedia a cada um de nós que criasse seu universo de ideias, para que nossos produtos, mesmo que fossem apenas propostas a problemas de classe, tivessem seu próprio caráter original –

assim como seu próprio trabalho carregava o selo único de sua personalidade. Obviamente, esse tipo de ensino se estende muito além da física ou mesmo da ciência em geral. Era incrivelmente diferente do que a maioria de nós aprendeu anteriormente.”

No prefácio de suas *Lectures* [8], Feynman questiona o sistema tradicional de aula expositiva com resolução de problemas, propondo uma metodologia mais interativa do professor com o aluno:

“Acredito porém que não há solução para esse problema de ordem educacional [fracasso dos alunos nos exames] a não ser abrir os olhos para o fato de que o ensino mais adequado só poderá ser levado a cabo nas situações em que houver um relacionamento pessoal direto entre o aluno e o bom professor – situações nas quais o estudante discuta as ideias, reflita e converse sobre elas. **É impossível aprender muita coisa simplesmente comparecendo a uma palestra ou mesmo limitando-se a resolver os problemas determinados**” (grifo nosso) [8, p. 8].

Como aprender, segundo Feynman

Feynman desenvolveu uma maneira peculiar de aprender. Segundo seu biógrafo, James Gleick [13]:

“Ele abria um caderno novo. Na página do título, escrevia: Caderno de coisas que eu não sei. Nem pela primeira, nem pela última vez, ele reorganizava sua

conhecimento. Trabalhava durante semanas desmontando cada ramo da física, lubrificando as partes e juntando-as novamente, olhando o todo, aparando arestas e procurando inconsistências. Tentava encontrar a essência de cada assunto.”

Desse modo, Feynman antecipa dois processos importantes da teoria da aprendizagem significativa (TAS) de David Ausubel: a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora. A diferenciação progressiva é o processo de atribuição de novos significados a um determinado conceito de forma que resulte no uso desse conceito para dar significado a novos conhecimentos. A reconciliação integradora é um processo dinâmico reestruturador da estrutura cognitiva, simultâneo ao da diferenciação progressiva, que consiste em eliminar diferenças aparentes, resolver inconsistências e integrar significados, como abordado por Feynman em seu processo de aprendizagem. [14]

Outros fatores importantes na ensinagem são a simplicidade e clareza na apresentação dos conteúdos. Achava que se o professor não conseguisse com que os alunos compreendessem uma ideia, conceito ou proposição, é porque o professor não a entendeu realmente. Algo que se relaciona com o pensamento de Jerome Bruner [15]: “qualquer tema se poderia ensinar a uma criança em qualquer idade e de uma forma que seja honesta”. Provocado se uma criança poderia entender cálculo diferencial, Bruner retrucou que isso não, mas o conceito de limite, base do cálculo, poderia ser apreendido por uma criança. Em suas *Lectures*, Feynman, ao explicar o conceito contraintuitivo de velocidade instantânea segue Bruner, apontando a necessidade de considerar intervalos de tempo muito pequenos, e chega ao conceito de limite, antes da definição de derivada, como usual nos livros-texto tradicionais (Fig. 3).

No entanto, ao contrário de usar a máxima de Ausubel de que “o fato isolado mais importante na aprendizagem é aquilo que o aprendiz já conhece. Descubra o que ele sabe e baseie os seus ensinamentos nisso”, e trabalhar com os conhecimentos prévios do aluno, Feynman prefere identificar os interesses mútuos do professor e do aluno: “Em primeiro lugar, descubra por que quer que os alunos aprendam e o que quer que saibam e o método resultará mais ou menos por senso comum” (Ref. [8, p. xii]). Por meio de exposição simples, clara e instigadora, conseguia a atenção dos alunos, despertando o interesse deles em aprender.



Figura 3: Feynman, em suas *Lectures*, usa a ideia de intervalos muito pequenos na discussão preliminar do conceito de velocidade instantânea.

Feynman e o ensino no Brasil

Feynman visitou o Brasil em várias oportunidades entre 1949 e 1966 (Fig. 4). Apareceu na mídia em apoio aos colegas na consolidação do recém-criado Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), enaltecendo as aplicações do laser, e no protesto contra a perseguição a físicos

brasileiros após o golpe de 64. Deu aulas de graduação e pós e realizou pesquisas, usando radioamadores para obter acesso a dados de laboratórios americanos.

E se divertiu muito: desfilou de marinho no bloco “Farsantes de Copacabana”, aprendeu a tocar frigideira e outros instrumentos de percussão e participou de bailes do carnaval carioca. Em entre-



Figura 4: Foto autografada de Feynman e seus colegas no Rio. Na direção da parte da frente para a de trás da mesa. Lado esquerdo: Roberto Salmeron, Gabriel Fialho, Francisco Oliveira Costa, Gerard Hepp, Álvaro Diffini, César Lattes, Antonio José da Costa Nunes, Ugo Camerini, José Leite Lopes, Paulo Emidio Barbosa e Homero L. César. Lado direito: Homero Brandão, Henry British Lins de Barros, Nelson Lins de Barros, Neusa Amato (neé Margem), Richard Feynman, Elisa Frota-Pessôa, Guido Beck, Helmut Schwartz Jayme Tiomno, Reinhard Oehme e George Rawitscher (Caltech Archives).

vista ao *Jornal do Brasil* (24 de fevereiro de 1966), Feynman enfatiza que seu temperamento alegre e sua falta de inibição não são incompatíveis com a seriedade de um cientista: “Não há relação entre o divertimento e o trabalho, e, por isso, não vejo dificuldade em conciliar as duas coisas. Quando estou trabalhando em meu laboratório sou um homem sério e responsável, embora goste de contar histórias engraçadas quando pronuncio confissões para quebrar um pouco a aridez da exposição. Fora do ambiente de trabalho, procuro me divertir (Fig. 5), por achar que um professor e cientista, quando procura manter uma máscara de seriedade, na maioria das vezes está escondendo ignorância.”

E falou sobre ensino de física no Brasil e na América Latina. Em maio de 1952, proferiu palestra sobre ensino de física na Faculdade Nacional de Filosofia que causou enorme impacto na comunidade de físicos. Em junho de 1963, discursou na I Conferência Interamericana de Ensino de Física. Ildeu de Castro Moreira [16] descreveu em detalhes essas duas conferências sobre ensino no Brasil. Segundo Leite Lopes, a palestra foi dada, a pedido dele, após discutir a estrutura do sistema educacional brasileiro e mostrar alguns livros brasileiros para estudantes do ensino secundário. A sugestão foi que ele “criticasse extensivamente esses livros” [5]. Porém, Feynman foi muito além, fazendo ácidas críticas ao sistema de ensino de física no Brasil, em especial sobre as atitudes dos

alunos na aprendizagem e o livro didático do ensino secundário.

Seguem alguns trechos de seu livro de memórias [6] que mostram, com certo sarcasmo, suas impressões sobre a experiência de ensinar no Brasil.

Sobre a aprendizagem

“Eu descobri um fenômeno muito estranho: eu podia fazer uma pergunta, que os estudantes respondiam imediatamente. Mas na próxima vez que eu fizesse a pergunta – o mesmo assunto, e a mesma pergunta, até onde eu conseguia expressar – eles não respondiam nada! Depois de muita investigação, eu finalmente descobri que os alunos tinham memorizado tudo, mas eles não sabiam o que tudo significava [...] Tudo era totalmente decorado, mas nada era traduzido em palavras que fizessem sentido. Outra coisa que nunca consegui fazer com que fizessem foi perguntas [...] Todos fingem que sabem, e se um aluno admite por um momento que algo está confuso, fazendo uma pergunta, os outros assumem uma atitude arrogante, agindo como se não fosse confuso, dizendo que ele está perdendo tempo. Expliquei o quanto era útil trabalhar em conjunto, discutir as perguntas, conversar sobre o assunto, mas eles também não fazem isso, porque a máscara cairia se tivessem que perguntar a outra pessoa. Lamentável! Eram pessoas inteligentes que faziam todo o trabalho, mas entraram nesse estado de espírito engraçado, esse tipo estranho de autopropagar a “educa-

ção” que é sem sentido, completamente sem sentido. “Eu não conseguia ver como alguém poderia ser educado por esse sistema autopropagante no qual as pessoas passam nos exames e ensinam outras pessoas a passar nos exames, mas ninguém sabe de nada. No entanto”, eu disse, “devo estar errado. Havia dois alunos da minha turma que se saíram muito bem. Assim, deve ser possível que algumas pessoas funcionem nesse sistema, por pior que seja.”

Sobre o livro didático

“Não há resultados experimentais mencionados em nenhum lugar deste livro, exceto em um lugar onde há uma bola, rolando um plano inclinado, em que se diz até onde a bola chegou após um segundo, dois segundos, três segundos e assim por diante. Os números têm “erros”, ou seja, se você olhar para eles, acha que está vendo resultados experimentais, porque os números estão um pouco acima ou um pouco abaixo dos valores teóricos. O livro fala sobre ter que corrigir os erros experimentais – muito bem. O problema é que, quando você calcula o valor da constante de aceleração constante a partir desses valores, obtém a resposta correta. Mas uma bola rolando em um plano inclinado possui uma inércia que a faz girar, e, se você fizer o experimento, produzirá cinco sétimos da resposta certa, por causa da energia extra necessária para a rotação da bola. Portanto, esse único exemplo de “resultados” experimentais é obtido a partir de um experimento falso. Ninguém tinha rolado uma bola dessas, ou nunca teriam conseguido esses resultados! ... [Mais adiante, leu:] “A triboluminescência é a luz emitida quando os cristais são esmagados...” Eu disse: “E aí, você tem ciência? Não! Apenas se disse o que uma palavra significa em termos de outras palavras.”

A repercussão dessa palestra ultrapassou os limites da Academia. Osvaldo Frota Pessoa, biólogo destacado e afamado divulgador da ciência, escreveu a matéria “Não se aprende nada”. O físico Costa Ribeiro, ao fim da conferência, lembrou o conhecido conto de Andersen, em que as roupas (invisíveis) do Rei eram “admiradas pelos súditos”, até que um garoto de rua exclamou com franqueza: mas o rei está nu! O artigo termina com uma conclamação para a “revolução necessária” [17]:

Se queremos realmente fazer progredir a ciência no Brasil, urge revolucionar nossos métodos didáticos, em todos os níveis: primário, secundário e superior. Como assinalou muito bem Costa Ri-



Figura 5: Feynman (no centro da linha da frente) se divertindo no carnaval carioca de 1952 (Caltech Archives).

beiro, são as faculdades de filosofia, formadoras de novos mestres, que estão em posição estratégica para iniciar o movimento. E é de muito bom sinal que tenha sido na Faculdade Nacional de Filosofia, sob auspícios do Departamento de Física e do Diretório Acadêmico, que se tenha realizado a esclarecedora palestra do prof. Feynman. A falta de formalidades, pedantismo e academicismo que caracterizou a reunião foi uma das condições de sucesso. Os prolongados debates, em que participaram, com Feynman, alunos e professores da Faculdade, em seguida à conferência, se caracterizaram por ideias objetivas e sugestões felizes para melhoramento dos nossos métodos de ensino. Esperemos que este magnífico impulso inicial nos leve longe.

A revista *Ciência e Cultura*, em seu primeiro número de 1952 destaca, em editorial, que Feynman afirmou “o que todos sabemos, que a ciência é a descrição dos fenômenos da natureza, mas continuou afirmando o que nem todos nós sabemos, que ensinar ciência é pôr os alunos em contato com os fenômenos naturais e que o ensino usual, de memorizar fórmulas

Apesar de avanços na pesquisa em ensino de física e na melhoria dos livros didáticos, pouco permaneceu daquilo que Feynman tentou nos ensinar e estamos ainda muito longe de alcançar o nível de ensinagem que Feynman propôs

e definições, não é ensinar ciência; [...] só quando investiga, aguçado pela curiosidade e pelo encantamento ante o desconhecido, é que está aprendendo ciência.”

Apesar de consideráveis avanços na pesquisa em ensino de física, na melhoria dos livros didáticos proporcionados pelo PNLND, na formulação de diretrizes básicas para a formação de licenciados em ciências e para o ensino das Ciências da Natureza, pouco permaneceu daquilo que Feynman tentou nos ensinar e estamos ainda muito longe de alcançar o nível de ensinagem que Feynman propôs. Nosso ensino escolar é eminentemente comportamentalista, medido em termos de seus resultados, e a aprendizagem de física continua mecânica, baseada na memorização de conteúdos e resolução de problemas fechados que visam essencialmente a testagem. E pior, os conteúdos estão desatualizados, com pouca atenção à física contemporânea, e distantes dos avanços recentes da física quântica, da astrofísica e da nanociência, entre outras áreas.

Outro fato interessante das visitas de Feynman ao Brasil foi sua conferência na Academia Brasileira de Física (Julho de

1953) em que discorreu sobre o uso do Experimento da Dupla Fenda como instrumento para a discussão da interpretação de Copenhague da mecânica quântica, proposta por Niels Bohr com o princípio da complementaridade (a famigerada dualidade onda-partícula). Feynman popularizou essa discussão nos volumes I e III das *Lectures*.

Sua atuação no ensino no Brasil não se limitou ao nível superior. Ao lado de outras figuras importantes da física do Brasil, entre eles Abraão de Moraes, Paulus Pompeia, Costa Ribeiro, Jayme Tiomno e David Bohm, Feynman participou do I Curso de Aperfeiçoamento para Professores de Física [do nível secundário], realizado no ITA em julho de 1953. Ali apresentou a conferência *Minha experiência em relação ao ensino de física no Brasil*. Ressalte-se a participação expressiva de físicos na formação de professores. Esse curso teve sequência em 1955, mas não há registros de sua continuação. Felizmente, hoje a SBF, com apoio da Capes, promove o Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física, que atua em 58 instituições-polos, que se dedicam à capacitação e à atualização, em serviço, de professores de física de todas as regiões do país. O programa envolve docen-

tes dessas instituições que, em geral, passaram a se dedicar com maior entusiasmo ao ensino das disciplinas ministradas na licenciatura e estão mais abertos ao uso de metodologias inovadoras em sua prática.

Em 1963, Feynman abre a Conferência Interamericana de Ensino de Física, no Rio de Janeiro, com o discurso intitulado “*The Problem of Physics Teaching in Latin America*”. [18] Em estilo acadêmico formal, revisita sua experiência anterior no Brasil e estende considerações para a América Latina. Moreira resume pontos mais destacados na fala de Feynman [16]:

i) primeiramente, e o fator mais importante, é que o ensino/aprendizado é quase exclusivamente baseado em memorização. Aqui, Feynman relata várias experiências neste sentido que teve com estudantes da UIB e que depois reproduziria em seu livro; ii) os estudantes atuam sempre sozinhos e não interagem ou discutem com seus colegas; iii) a falta de liberdade no ambiente universitário; isto impede os estudantes de mudarem de área ou de laboratório;

iv) pouca atenção é dada ao conjunto maior de estudantes que não pretendem ser cientistas; v) outro ponto característico da América Latina é o pequeno número de pessoas envolvidas em atividades científicas, o que torna as organizações e instituições irregulares e instáveis; vi) os melhores alunos tendem a sair de seus países e se dirigem para o exterior.

Feynman e as Lectures

David Goodstein conta que Feynman lhe confidenciou que “no longo prazo, sua mais importante contribuição para a física não seria a QED, a teoria do hélio superfluido, os pólarons ou os pártons. Seu verdadeiro monumento seriam suas *Feynman Lectures*”. Elas refletem sua visão peculiar de toda a física e como deveria ser ensinada, mais um desafio que concordou em assumir ao receber o convite para reformular o curso de física introdutória do Caltech.

Os três livros vermelhos despertam curiosidade, interesse e até mesmo fascinação em muitos estudiosos da física, em particular professores. Provavelmente, todos os leitores aficionados possuem suas passagens favoritas. Na introdução da Seção Especial da RBEF em que apresento os artigos dos colegas, destaco algumas das minhas preferidas. [19] As *Lectures* não podem ser consideradas uma coleção didática de estreia na aprendizagem da física. Constituem mais um guia para professores e alunos principiantes destacados. São volumes produzidos a partir das aulas gravadas e transcritas por Robert Leighton e Mathew Sands. Foram destinados a alunos calouros de física do Caltech, no período de setembro de 1961 a maio de 1963 (Fig. 6). Há fatos curiosos, lembrados por Mathews Sands, [20] acerca da construção do que Feynman se referiu como “essencialmente uma experiência” e à qual devotou grande empenho (não publicou nenhum artigo de pesquisa nesse período). E ao final, deu um tom pessimista a essa experiência [8]:

“A questão que se apresenta, naturalmente é saber até que ponto esta experiência foi bem-sucedida. Meu ponto de vista – que não parece ser compartilhado pela maioria das pessoas que trabalharam com os alunos – é pessimista. Não acho que tenha me saído muito bem com os estudantes. Quando paro para analisar o modo como a maioria deles lidou com os problemas nos exames, vejo que o sistema é um fracasso [...] Espero que minhas con-

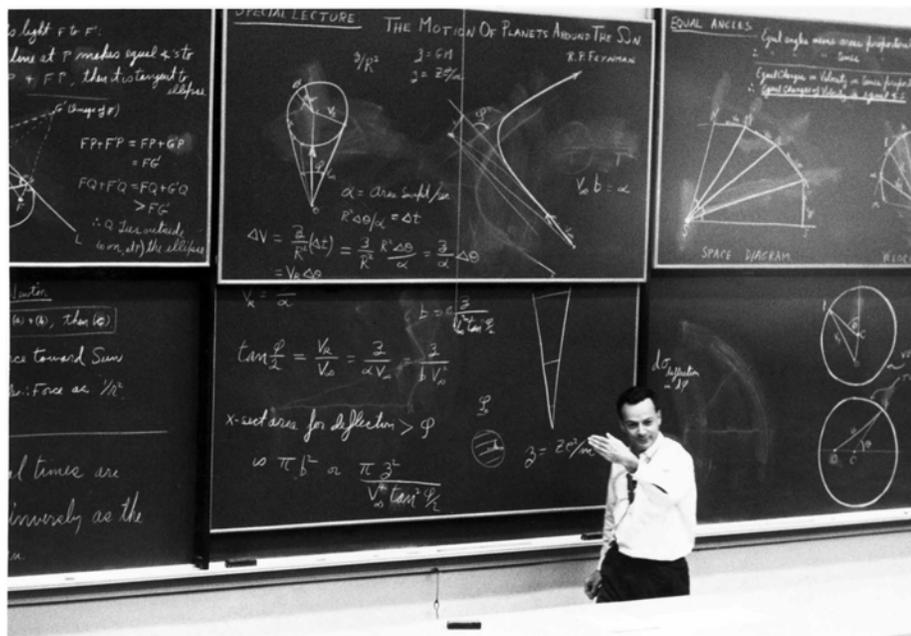


Figura 6: A aula “Movimento de planetas em torno do Sol”. Originalmente tirada para as *Lectures*, mas não foi publicada lá (Caltech Archives).

ferências possam contribuir de alguma forma. Talvez em algum lugarejo, onde haja professores e estudantes individuais, eles possam obter alguma inspiração ou ideias destas conferências. Talvez se divirtam refletindo sobre elas – ou desenvolvendo algumas ideias.”

os alunos de pós-graduação americanos consideram as *Lectures* uma excelente fonte de revisão para os exames de qualificação

Ricardo Karam seguiu esse conselho de Feynman ao mostrar algumas lições didáticas que podem ser extraídas das *Lectures* para o aperfeiçoamento da prática docente do professor de física no Brasil. Em seu artigo da Edição Comemorativa na *RBEF*, Karam [21] analisa as diferenças evidentes entre as *Lectures* e os livros didáticos tradicionais: muito texto; ausência de problemas; ênfase na fenomenologia; ordem e títulos dos capítulos incomuns; matemática a serviço da física e não como pré-requisito; diálogo pessoal. Ademais, aponta como a relação entre matemática e física, a epistemologia e a metacognição são trabalhadas na obra. A análise das *Lectures* foi brilhantemente exposta na palestra que proferiu na V Escola Brasileira de Ensino de Física, em agosto de 2018, na UFSC-Blumenau, tendo como alvo os docentes do MNPEF. Ao final, Karam proclamou dez manda-

mentos que Feynman nos ensinou a partir das *Lectures* [22]:

- 1) Melhor resolver 1 problema de 4 maneiras diferentes do que 4 problemas da mesma maneira;
- 2) Parta do simples ao complexo; do concreto ao abstrato;
- 3) Quando possível, faça a matemática emergir das situações físicas;
- 4) Evite ao máximo argumentos autoritários como “esse é um teorema matemático”; seja criativo, reinvente teoremas, faça suas próprias demonstrações;
- 5) Seja honesto com o estudante, reflita sobre as dificuldades para se entender o conteúdo e explicita-as quando for ensinar;
- 6) Procure evidenciar conexões e analogias profundas entre assuntos aparentemente distintos;
- 7) O conhecimento físico não é dividido em caixas, mostre relações entre as áreas da física;
- 8) Preencha de fenomenologia todo e qualquer assunto que for ensinar;
- 9) Não ensine somente física, mas também o que significa fazer física;
- 10) Seja metacognitivo em seu discurso; explicita onde você está, onde quer chegar, como pretende chegar lá, quais são as possíveis armadilhas, etc.

E o que se pode dizer sobre o impacto atual das *Lectures* no público escolar americano? Com a palavra, um de seus idealizadores, Mathews Sands, que escreveu em

suas memórias: [20]

Nas minhas viagens a serviço da Commission on College Physics, muitas vezes me encontrei com docentes de física em várias universidades. Ouvi dizer que a maioria dos instrutores não considera as *Lectures* adequadas para uso em suas aulas, embora alguns me informaram que usaram um ou outro dos volumes em uma turma especial ou como complemento para um texto comum. Muitas vezes tenho a impressão de que alguns instrutores estavam cautelosos de experimentar as *Lectures* porque eles temiam que os alunos poderiam fazer perguntas que não fossem capazes de responder. Mais comum é ouvir que os alunos de pós-graduação consideram as *Lectures* uma excelente fonte de revisão para os exames de qualificação.

De interesse para o leitor também é a série de conferências *Messenger*, dirigidas ao grande público e transcritas no livro *The Character of Physical Law* [10]. A primeira trata da conhecida lei da gravitação, como um exemplo de universalidade da física: “a natureza usa um fio muito longo para tecer suas tramas, mas um pequeno pedaço do tecido revela a organização de toda a tapeçaria”. Na conferência *A Relação entre a Matemática e a Física*, Feynman explicita as duas maneiras de uso da matemática na descrição da natureza, apelando para as diferenças entre a tradição babilônica e a tradição grega. Na Babilônia, “o aluno devia conhecer muita geometria, muitas propriedades dos círculos, o teorema de Pitágoras, fórmulas para as áreas de cubos e triângulos; além disso, aprendia argumentos para passar de uma coisa a outra e usava tabelas numéricas para resolver equações complicadas. Tudo era preparado para que se calculassem coisas.” Ao contrário, na Grécia, Euclides descobriu que havia uma maneira de deduzir todos os teoremas da geometria a partir de um conjunto simples de “axiomas”. Feynman se considerava um “matemático” babilônio. O capítulo *Os Grandes Princípios de Conservação* é leitura obrigatória para os professores que adotam uma visão fragmentada das várias leis de conservação como dispostas no livro didático. A seguir, Feynman aborda a *Simetria nas Leis Físicas*: translação e rotação no espaço, inversão temporal, princípio da relatividade (simetria para velocidades uniformes em linha reta) e o mais recente (década de 1950) princípio de simetria entre direita e esquerda nas interações. Explora, ainda, a conexão entre leis de con-

servação e leis de simetria. Os fenômenos irreversíveis são abordados com muitos exemplos, à la Feynman, na palestra *A Distinção em Passado e Futuro*. Na conferência acerca da *Visão Quântica da Natureza*, Feynman foca nos conceitos-chave de probabilidade e incerteza e alerta que elétrons e fótons, apesar de “esquisitos, diferentes de tudo que conhecemos”, se comportam de modo semelhante. E confessa: “Sobre esse aspecto, esta é a palestra mais difícil da série, pois é abstrata, distante da experiência”. A frase mereceria reparos, haja vista as atuais experiências sofisticadas que nos ajudaram a compreender os fenômenos quânticos (tunelamento, coerência, emaranhamento) e as inúmeras aplicações práticas da física quântica no nosso cotidiano: eletrônica moderna, baseada na estrutura de bandas de semicondutores; computadores e celulares; lasers; LEDs; nanotecnologia, imageamento NMR, PET scan, lasers e telecomunicações, GPS, internet quântica etc. Chama a atenção o fato de que Feynman tenta explicar a mecânica quântica para

um público amplo em meados dos anos 1960, enquanto o ensino de quântica, nos dias atuais, está ausente do ensino médio (com inserções irrelevantes sobre radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico e modelo de Bohr que constituem a formação dos conceitos quânticos, e não o cerne da física quântica). Além disso, é abordado de forma insatisfatória nas disciplinas básicas de serviço no nível superior (áreas de ciências afins e engenharias). Nessa palestra, Feynman faz um comentário, em minha opinião, infeliz, sobre a dificuldade de se apreender a quântica e que, em geral, tem justificado a ausência do seu ensino nos níveis escolares mais elementares: “Posso afirmar com segurança que ninguém entende a mecânica quântica. Não levem, pois, esta palestra muito a sério, achando que precisam entender em termos de algum modelo o que vou descrever. Relaxem e aproveitem. Vou lhes contar como a natureza se comporta. Se vocês simplesmente admitirem que talvez ela se comporte assim, vão achá-la maravilho-

sa, encantadora. Não fiquem dizendo para si mesmos: ‘Como pode ser assim?’, pois nesse caso vão entrar num beco escuro de onde ninguém conseguiu sair. Ninguém sabe como pode ser assim”. Essa opinião de Feynman tem contribuído para reforçar a “estranheza” da quântica, que não é!, o misticismo quântico e a pseudociência, bem em moda nos tempos atuais. No que segue, Feynman usa o experimento da dupla fenda para discutir interferência quântica, probabilidade e indeterminação, como fizera no volume III das *Lectures*. A conferência final, *Em busca de Novas Leis*, está obviamente ultrapassada.

Agradeço ao Ildeu de Castro Moreira pelas conversas esclarecedoras e por compartilhar documentos e o entusiasmo pelo personagem Feynman, ao Ricardo Karam pela admiração conjunta pelas *Lectures* e aos colegas que contribuíram na Seção Especial da *RBEF* em homenagem a Feynman, em especial Silvio Salinas. Sou grato a Marcel Novaes e Débora Coimbra pela leitura crítica do artigo.

Referências

- [1] C. Dornan, *The Smartest Guys in the Room*, The Globe and Mail, January 23, 1993. Disponível em <http://educatedguesses.ca/people/richard-feynman-john-von-neumann/>.
- [2] A.C. Aguilar, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e4205 (2018).
- [3] J.A. Wheeler, in *Special Issue: Richard Feynman*, *Physics Today* **42**(2), 24 (1989).
- [4] L.M. Brown and J.S. Rigden. *Most of the Good Stuff – Memories of Richard Feynman* (AIP, New York, 1993).
- [5] J.L. Lopes. *Quiju: Revista Latinoamericana de Historia de las Ciencias y la Tecnología* **7**, 383 (1990). Também em *Ciência e Sociedade*, CBPF-CS-013/88 (1988), disponível em <http://inspirehep.net/record/268082?ln=pt>.
- [6] R.P. Feynman, *Surely You're Joking, Mr. Feynman! – Adventures of a Curious Character* (W.W. Norton & Company, New York, 2018). Em português: *O Senhor Está Brincando, Sr. Feynman?* (Elsevier, São Paulo, 2006).
- [7] M. Gell-Mann, in *Special Issue: Richard Feynman*, *Physics Today* **42**(2), 50 (1989).
- [8] R.P. Feynman, R.B. Leighton and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Benjamin Cummings, New Jersey, 2006). Em português: *Feynman: Lições de Física*. Tradução da Equipe do IFUSP sob supervisão de A. Fazzio. (Bookman, Porto Alegre, 2008).
- [9] Seção Especial – *Celebrando os 100 anos de nascimento de Richard P. Feynman*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, 4 (2018).
- [10] R.P. Feynman. *The Character of a Physical Law* (MIT Press, Cambridge, 1965). *Sobre as Leis da Física*, trad. Marcel Novaes e Nelson Studart (Contraponto/Editora PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012).
- [11] D. Goodstein, in *Special Issue: Richard Feynman*, *Physics Today* **42**(2), 70 (1989).
- [12] N. Caticha, in *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e4202 (2018).
- [13] J. Gleick. *Genius: The Life and Science of Richard Feynman* (Open Road Media, New York, 2011).
- [14] M.A. Moreira, *Aprendizagem Significativa: A Teoria e Textos Complementares* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011).
- [15] J. Bruner, *O Processo da Educação* (Edições 70, Lisboa, 2007).
- [16] I.C. Moreira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e4203 (2018).
- [17] I.C. Moreira e M.C. Paiva, *A Física na Escola* **10**(1), 62 (2016).
- [18] R.P. Feynman, *Engineering and Science* (Caltech Magazine) **27**, 21 (1963). Texto em português na Ref. [16].
- [19] N. Studart, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e4201 (2018).
- [20] M. Sands, *Physics Today* **58**, 49 (2005).
- [21] R. Karam, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e4204 (2018).
- [22] R. Karam, *Lições didáticas extraídas das Feynman Lectures*. Palestra 4 do minicurso Metodologias Alternativas no Ensino de Física, disponível em <http://ebef.ufsc.br/material/>.

Leitura adicional

- L. Mlodinow, *O Arco Íris de Feynman* (Sextante, São Paulo, 2005).
J.M.F. Bassalo e F. Caruso, *Feynman* (Ed. Livraria da Física, São Paulo, 2013).
R. Rosenfeld, *Feynman e Gell-Mann* (Odysseus, São Paulo, 2003).
J. Mehra, *The Beat of a Different Drum: The Life and Science of Richard Feynman* (Oxford University Press, Oxford, 1994).