

CBPF-CS-003/89

FEYNMAN: UM FÍSICO TEÓRICO ORIGINAL*

por

José Maria Filardo BASSALO

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF/CNPq
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150
22290 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Departamento de Física da UFPA
66059 - Campus Universitário, Guamã
Belém - Pará

*Este artigo é em homenagem a LUIZ CARLOS LOBATO BOTELHO, professor da UFPA e a MARCELO OTÁVIO CAMINHA GOMES, professor da USP, os primeiros físicos-matemáticos paraenses.

RESUMO

Neste artigo apresentamos aspectos da vida do físico Richard Feynman, recentemente falecido. Destacamos, primeiramente, suas principais contribuições à Física, como, por exemplo, a formulação da Mecânica Quântica através das path integrals, a Renormalização da Eletrodinâmica Quântica, a Teoria do Hélio Líquido, e a Teoria V - A da Interação Fraca. Salientamos, também, situações inusitadas vividas por Feynman, como seu trabalho em Los Alamos por ocasião em que se construía a Bomba Atômica e suas passagens pelo Brasil, onde ensinou e pesquisou, desfilou em banda de samba e assistiu ao desfile de escolas de samba, como celebridade convidada. Por fim, relacionamos as várias honrarias recebidas por Feynman, dentre as quais se destaca o Prêmio Nobel de Física de 1965, que compartilhou com Schwinger e Tomonaga.

Palavras-chave: Feynman, QED, Hélio Líquido, Teoria V - A, Path Integral, Prêmio Nobel de Física de 1965.

Projeto de Pesquisa: CONSEP 0973/83 - Textos em Física.

-1-

Faleceu no dia 15 de fevereiro de 1988, em Los Angeles, Califórnia, nos Estados Unidos da América, o norte-americano Richard Philips Feynman, nascido em Far Rockaway, nos arredores de New York, no dia 11 de maio de 1918, e um dos mais brilhantes físicos teóricos de nosso século. Tornou-se célebre por sua técnica intuitivo-físico-pictográfica desenvolvida para resolver problemas de Eletrodinâmica Quântica, técnica essa mundialmente conhecida como diagramas de Feynman. Ganhou o Prêmio Nobel de Física de 1965, juntamente com os físicos, o norte-americano Julian Seymour Schwinger (n. 1918), e o japonês Sin-Itiro Tomonaga (1906-1979).

Filho de Melville Arthur e Lucille Philips Feynman recebeu Feynman o diploma de Bacharel em Física no Massachusetts Institute of Technology (MIT), em 1939. Em seguida, foi para a Universidade de Princeton, onde doutorou-se, também em Física, em 1942. Foi por essa ocasião, em que era estudante em Princeton, que mais uma vez se evidenciou o seu grande talento para a solução original de questões que se apresentavam a ele. Por exemplo, quando aluno do "High School", ao lidar com problemas envolvendo triângulos retângulos, fez demonstrações de alguns teoremas trigonométricos completamente diferentes das encontradas nos livros textos tradicionais, bem como inventou uma simbologia própria para as funções trigonométricas e de suas respectivas inversas, bem como para outras funções matemáticas.

Por ocasião de sua estada em Princeton, o problema que o seduziu se relacionava com os famosos flexágonos, que são polígonos de papel obtidos ao se dobrar tiras de papel retas ou escantilhadas. Estes polígonos foram construídos pela primeira vez no outono de 1939, por Arthur H. Stoney, estudante de matemática e colega de Feynman em Princeton. Ao construir o primeiro hexaflexágono, Stone mostrou aos seus colegas de Princeton sua descoberta e logo formaram a Comissão Hexágono para entender o fenômeno da flexigação. Dessa Comissão fazia parte além de Stoney e de Feynman, então estudante de Física, Bryant Tuckerman, estudante de Matemática e John W. Tukey, um jovem professor de Matemática. Em vista disso, em 1940, Tukey e Feynman elaboraram uma teoria matemática completa da flexigação, na qual mostraram como construir um flexágono de qualquer tipo ou tamanho desejados. Esse trabalho ficou inédito, porém, mais tarde, outros matemáticos redescobriram aspectos dessa teoria.

O ataque dos japoneses à base norte-americana de Pearl Harbor, no Havai, no dia 7 de dezembro de 1941, colocou os Estados Unidos da América na Segunda Guerra Mundial e, com isso, o esforço de guerra era a palavra de ordem para todos os jovens americanos. Assim é que Feynman foi trabalhar para essa Guerra, primeiro em Princeton, no problema da separação do Urânio 235 do 238, e depois em Los Alamos, para onde foi em abril de 1943, a

-3-

fim de dar continuidade ao desenvolvimento do Projeto Manhattan, projeto esse cujo objetivo principal era a fabricação da Bomba Atômica, cujo Diretor Científico era o físico norte-americano Julius Robert Oppenheimer (1904-1967) e o Diretor Militar era o General Richard Leslie Groves (1896-1970). Nesse Projeto, Feynman era encarregado de uma das seções de computação, onde se fazia os cálculos para o primeiro teste ("Trinity Teste") da Bomba, ocorrido na base da Força Aérea Americana, na Jornada del Muerto, próximo de Alamogordo, Novo México, em 16 de julho de 1945. Em agosto de 1945, as cidades Japonesas de Hiroshima e Nagasaki eram atômicamente bombardeadas, nos dias 6 e 9, respectivamente, e o Japão, em consequência, se rendia incondicionalmente.

Terminada a Guerra, por volta de novembro de 1946, Feynman foi para a Universidade de Cornell, para juntar-se a alguns cientistas que haviam trabalhado em Los Alamos, onde começaram a pesquisar sob a liderança do físico alemão Hans Albrecht Bethe (n. 1906), que havia, inclusive, dirigido a Divisão Teórica do Projeto Manhattan. Bethe se tornara muito conhecido por haver desenvolvido, em 1938, a teoria da produção de energia nas estrelas - o famoso ciclo de Bethe -, trabalho esse que lhe valeu, em 1967, o Prêmio Nobel de Física. No entanto, na época em que Feynman chegou a Cornell uma grande questão intrigava aos físicos teóricos, qual seja, a de

descrever, corretamente, o comportamento de átomos, enquanto emitem e absorvem luz; numa linguagem mais técnica, tratava-se de estudar a interação entre a radiação eletromagnética e a matéria. Vejamos como Feynman abordou essa questão de maneira inteiramente original.

A primeira teoria formulada no sentido de descrever aquela interação, foi apresentada pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984;PNF,1933), em 1927, no histórico trabalho intitulado A Teoria Quântica da Emissão e da Absorção da Radiação, e no qual era quantizado o campo eletromagnético, significando isso dizer que a interação a que nós nos referimos acima, ocorria por intermédio da troca de fótons - os quanta do campo eletromagnético, isto é, as partículas mediadoras da interação eletromagnética - e a matéria com a qual interage. Essa teoria, que ficou conhecida como Eletrodinâmica Quântica (QED - Quantum Electrodynamics), foi largamente utilizada cerca de dez anos após esse trabalho de Dirac, para estudar o espalhamento Compton (Klein-Nishina, 1929), o espalhamento Rutherford (Mott, 1929), e o espalhamento entre partículas carregadas (elétron-elétron: Möller (1932); elétron-positron: Bhabha (1935)). Esses espalhamentos, contudo, eram feitos com auxílio da teoria das perturbações em primeira ordem, porque os físicos teóricos acreditavam que como as interações eletromagnéticas

-5-

tinham como constante de acoplamento a constante de estrutura fina ($\approx 1/137$), as ordens mais altas perturbativas deveriam ser desprezíveis, concluíam aqueles físicos.

Será que essa suposição era verdadeira? A resposta a essa pergunta foi dada pelo físico austríaco Victor Frederick Weisskopf (n.1908) (que havia trabalhado também em Los Alamos), em 1934, quando tentou calcular aquelas ordens mais altas, as chamadas correções radiativas, observando que as mesmas conduziam a integrais divergentes. (Aliás, Weisskopf já havia se deparado com esses infinitos, por ocasião em que fazia sua tese de doutoramento com o físico húngaro Eugene Paul Wigner (1902-;PNF,1963), em 1931, sobre largura natural das linhas espectrais.) Apesar de Weisskopf acreditar que essas divergências não eram essencialmente observáveis (eis a gênese da idéia de renormalização), no entanto, como Wigner não acreditava nessa hipótese, Weisskopf abandonou a mesma e, certamente, escapou-lhe aí o Prêmio Nobel de Física de 1965, atribuído a Feynman, Schwinger e Tomonaga, em virtude desses físicos haverem desenvolvido a Eletrodinâmica Quântica Renormalizável.

Outra questão que intrigava os físicos teóricos no pós-guerra, e que, de certa maneira, estava também ligada a esses infinitos, era o chamado efeito Pasternack (E. C. Kemble e R. D. Present, 1932; E. A. Uehling, 1935; R. Serber, 1936; W. V. Houston, 1937; R. C. Williams, 1938; e S. Pasternack, 1938)

segundo o qual, deveria haver uma possível diferença de energia ("gap") entre os estados $2s_{1/2}$ e $2p_{1/2}$ do átomo de Hidrogênio, apesar desses estados serem degenerados conforme indicava a Teoria Relativista do Elétron, formulada por Dirac, em 1928. Então, Weisskopf e seu aluno J. Bruce French, que estavam no MIT, começaram a tentar obter aquele "gap" usando para isso a "Eletrodinâmica Quântica Divergente". Desse modo, era necessário calcular as auto-energias do elétron, quer livre, quer ligado, e subtraí-las, conforme havia sido sugerido por H. A. Kramers, em 1947. Todavia, esse cálculo deveria ser extremamente cuidadoso, pois se tratava de uma diferença entre infinitos, já que o próprio Weisskopf, em Rochester, demonstrara pela primeira vez, em 1939, que a auto-energia do elétron livre de Dirac divergia logaritmicamente. Como não havia uma medida experimental precisa desse "gap", essa pesquisa de Weisskopf e French foi conduzida lentamente.

Nesse meio-tempo, técnicas de microondas foram largamente desenvolvidas durante a Segunda Guerra Mundial. Desse modo, usando tais técnicas, os físicos norte-americanos Willis Eugene Lamb Jr. (n.1913) e Robert C. Retherford, da Universidade de Columbia, demonstraram em 1947 que a passagem de uma microonda (≈ 1000 Mc) através de átomos de Hidrogênio, convertia o estado $2p_{1/2}$ no estado $2s_{1/2}$. Estava, portanto, confirmado o efeito Pasternack, que, no entanto, passou a ser conhecido

-7-

como Lamb Shift. (Essa mesma técnica de microonda permitiu, também, que o físico alemão Polykarp Kusch (n.1911) e H. M. Foley, ainda em 1947, medissem o momento magnético do elétron e encontrassem uma pequena discrepância com o valor teórico previsto pela teoria de Dirac.) Esses dois resultados experimentais, que eram as pedras angulares da Eletrodinâmica Quântica, garantiram a Lamb e Kusch, o Prêmio Nobel de Física de 1955.

A medida experimental do Lamb Shift estimulou os físicos teóricos a fazerem cálculos mais precisos, já que apenas estimativas grosseiras desse fenômeno eram conhecidas. Com efeito, quinze dias após a publicação na Physical Review do trabalho de Lamb e Retherford, Bethe publicou nessa mesma revista, um desses cálculos que, contudo, era não-relativista; Bethe usou nesse cálculo a idéia de Kramers sobre a renormalização da massa do elétron e, com isso, obteve o valor de 1040 Mc, muito próximo do valor experimental de 1000 Mc medido por Lamb e Retherford. Apesar desse bom resultado obtido por Bethe, seu cálculo não satisfazia à invariância relativista e, por isso, ele próprio reuniu os físicos que trabalhavam consigo em Cornell, dos quais fazia parte Feynman, e deu um curso para os mesmos sobre esse assunto, com o objetivo de conseguirem aquela invariância. No fim desse curso, Feynman foi a Bethe e disse-lhe que já sabia como tratar relativisticamente o problema,

porém ele o fazia a seu modo, isto é, através do que mais tarde ficou conhecido como integrais de caminho de Feynman.

Comentemos um pouco, o que são essas integrais e a maneira pela qual Feynman chegou, de modo original, às mesmas. Ora, desde os 11 anos de idade, Feynman sempre procurou encontrar soluções diferentes (não-ortodoxas), para as diversas situações que enfrentava (basta ler o seu excelente livro de memórias, intitulado Surely You're Joking, Mr. Feynman, para nós nos convenceremos disso). Assim, desde que estudava no MIT, e depois em Princeton, Feynman se recusava a assumir o trabalho de qualquer outro cientista, pois gostava de reinventar ou redescobrir a Física. Portanto, Feynman passou a questionar o princípio ortodoxo da Física, segundo o qual, conhecido o estado de uma partícula em um determinado tempo, saberemos o que essa partícula fez e o que fará posteriormente, bastando para isso resolver-se uma equação diferencial; isso acontece com a Mecânica Clássica de Newton, com a Mecânica Quântica não-relativista de Schrödinger e com a Mecânica Quântica Relativista de Dirac. Todas essas mecânicas partem de uma equação diferencial e que leva, respectivamente, o nome de cada um desses físicos.

Pois bem, ao invés disso, Feynman partiu do princípio de que a partícula poderia fazer o que quisesse, podendo, inclusive, voltar no tempo. Assim, dizia Feynman, partindo-se do estado de um elétron em um certo tempo, saberemos

-9-

calcular um outro estado do mesmo em um outro tempo, se somarmos as contribuições de todos os possíveis históricos do elétron, que o levam de um estado a um outro possível. Para ele, o histórico de um elétron era qualquer caminho possível no espaço e no tempo, podendo, inclusive, o elétron voltar no tempo. Esses históricos eram representados por figuras, mais tarde conhecidas como diagramas de Feynman. Esses diagramas eram (e ainda são) calculados através de uma integral ("path integral"), e o resultado recebe o nome de propagador de Feynman. É oportuno salientar que para fazer essa integral, Feynman usa o conceito de medida de Lebesgue, ao invés da medida tradicional de Riemann, e o integrando, representa uma exponencial cujo argumento vale iS/\hbar , onde S é a ação clássica; essa idéia de Feynman ele a considerou a partir de uma sugestão feita por Dirac, 1934. Mais tarde, já no "California Institute of Technology" (CALTECH), Feynman desenvolveria sua própria Mecânica Quântica, através de cursos e seminários, conforme veremos mais adiante.

Voltemos ao Lamb Shift. A medida desse efeito feita por Lamb e Retherford, estimulou também Weisskopf e French, no MIT, a concluírem o cálculo teórico do mesmo, e ao obterem-no, comunicaram imediatamente a Schwinger, que estava em Harvard, e a Feynman, que estava em Cornell. Estes dois físicos, que estavam trabalhando nesse mesmo tema, fizeram novos cálculos e

encontraram valores bem parecidos; Feynman usou sua própria Mecânica Quântica e Schwinger usou a Mecânica Quântica de Dirac. Esses cálculos foram publicados em 1948. Porém, como os valores obtidos por esses dois excelentes físicos eram diferentes do encontrado por Weisskopf e French, estes retardaram a sua publicação, na esperança de encontrar o erro que supunham haverem cometido, já que, nessa ocasião, Weisskopf dissera a French: - "Bem, a probabilidade é alta de eles estarem certos e nós errados". É importante ressaltar que Tomonaga, na Universidade de Tóquio, no Japão, já havia chegado às idéias centrais de Schwinger, em 1943. No entanto, a Segunda Guerra Mundial havia impedido que os físicos do mundo ocidental tivessem tido conhecimento das pesquisas desse físico japonês. Basicamente, os cálculos feitos por Schwinger e Tomonaga fundamentavam-se na representação de interação covariante da Teoria Quântica de Campos, teoria essa desenvolvida a partir dos trabalhos de Dirac.

Quem tinha razão: Weisskopf ou Feynman e Schwinger? Weisskopf, já que o próprio Lamb e N. M. Kroll, em 1949, fizeram um novo cálculo teórico para o Lamb Shift e encontraram um valor bem próximo do de Weisskopf. Quando Feynman soube desse fato, telefonou para Weisskopf dizendo-lhe que este estava certo, e pediu-lhe desculpas por ter retardado a publicação do trabalho de Weisskopf e French, publicação essa que ocorreu logo depois e ainda em 1949. Esse pedido de desculpas de

-11-

Feynman foi formalizado em um artigo que escreveu, também em 1949, e no qual apresenta o seu "approach" para a Eletrodinâmica Quântica. Neste artigo, Feynman corrige um erro na fórmula que obtivera em 1948, com a qual havia calculado quer o Lamb Shift, quer o momento magnético anômalo do elétron; esse erro fora apontado por French. Ainda nesse mesmo ano de 1949, a Eletrodinâmica Quântica Renormalizável ficou completa com os trabalhos de Schwinger, Tomonaga (este, auxiliado por N. Fukuda e Y. Miyamoto) e, principalmente, com o de Freeman J. Dyson, pois, ao expandir a matriz S de espalhamento em operadores de campo, Dyson demonstrou que as regras utilizadas por Feynman para fazer seus cálculos eram consequência direta da Teoria Quântica de Campos, desenvolvida por Tomonaga e Schwinger. (Um pouco antes, em 1948, os físicos japoneses Z. Koba e G. Takeda, haviam desenvolvido um método semelhante ao de Dyson.)

Feynman permaneceu em Cornell até final de 1950, quando então se transferiu para o CALTECH, em cujo instituto trabalhou e pesquisou até a sua morte. Pouco antes de radicar-se na Califórnia, Feynman esteve por duas vezes no Brasil. A primeira, no verão (para o hemisfério norte) de 1949, a convite dos físicos brasileiros Jayme Timono (n.1920), que encontrara Feynman em uma reunião da Sociedade Americana de Física (ocasião em que formulou aquele convite), e Cesare Mansueto Giulio Lattes (n.1924), então Diretor e um dos fundadores do recente criado

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Durante seis semanas, Feynman fez conferências no CBPF e na Academia Brasileira de Ciências, sobre a sua Mecânica Quântica. Depois, usando o ano sabático que conquistara em Cornell, e já no CALTECH, voltou ao CBPF, a convite do físico brasileiro José Leite Lopes(n.1918) onde passou de setembro de 1951 a maio de 1952 como Professor Visitante, já que se apaixonara pelo Brasil desde que o conheceu. No CBPF e na Faculdade Nacional de Filosofia (FNF1), Feynman ministrou cursos apostilados (Física Nuclear e Eletromagnetismo, respectivamente) enquanto desenvolvia suas pesquisas em Física Nuclear, principalmente tentando obter teoricamente os níveis de energia de núcleos leves. À medida que desenvolvia essas pesquisas, Feynman as "checava", através de rádio-amadores, com os resultados experimentais que estavam sendo obtidos no Kellogg Laboratory, por pesquisadores do CALTECH.

Em fins de 1951, Feynman compareceu à reunião da SBPC em Belo Horizonte e em excursão pelos arredores da cidade notou várias crianças pobres perambulando pelas ruas. À noite, em um jantar na Pampulha, retirou-se quando as autoridades locais entraram pomposamente ao som de música. Foi uma forma de protestar quanto à insensibilidade dos governantes brasileiros em face da miséria de nossas crianças.

Por ocasião em que morou no Brasil, Feynman que

-13-

era exímio tocador de bongô, tornou-se também exímio tocador de "frigideira", quando participou de uma pequena escola de samba (banda) - Farçantes de Copacabana - que desfilava pelas praias de Copacabana no Carnaval de 1952. É oportuno destacar que Feynman voltou ao Carnaval brasileiro (desta vez casado pela terceira vez com a inglesa Gweneth Howarth) como uma das celebridades convidadas, e por intermédio de Darcy Ribeiro, para assistir ao Carnaval de 1966, já que recebera o Prêmio Nobel de Física de 1965 e, portanto, tornara-se célebre. No entanto, segundo o próprio Feynman relata em seu livro de memórias, já referido anteriormente, ele substituiu a celebridade Gina Lolobrigida que não pôde aceitar o convite para assistir o Carnaval daquele ano. Apaixonado pelo Brasil e pelo samba brasileiro, e sempre pronto a fazer uma brincadeira ("joke"), não teria ele escolhido a segunda-feira gorda para morrer?

Uma vez instalado no CALTECH, Feynman começou a formalizar e a consolidar, na década de 1950, as idéias sobre a visão que ele próprio tinha da Mecânica Quântica, através de cursos e seminários para os alunos daquele Instituto de Tecnologia. A importância e a clareza de suas Lectures Notes fizeram com que houvesse a necessidade de ampliar a audiência dos físicos para as mesmas. Assim é que, em 1961, elas foram transformadas em dois livros: Quantum Electrodynamics, no qual aborda, fundamentalmente, a interação da radiação com a

matéria; e The Theory of Fundamental Process, em cujo volume Feynman apresenta a Teoria de Campos, sob a sua técnica das path integrals. A seguir, em 1965, Feynman e seu aluno Albert R. Hibbs condensaram, refinaram e estenderam as idéias contidas nesses dois livros, e as apresentaram num dos livros mais citados e utilizados por, praticamente, todos os profissionais de Física: Quantum Mechanics and Path Integrals. (É importante frisar que o princípio da mínima ação, baseado nos potenciais semi-avanzado e semi-retardado que Feynman utiliza nesse livro para obter a equação de Schrödinger a partir de seu propagador, foi gestada em Princeton, em parceria com o físico norte-americano John Archibald Wheeler (n.1911), de quem era ajudante de pesquisa.) Essas idéias revolucionárias sobre a Quantum Electrodynamics - QED foram também apresentadas ao grande público na primeira Alix G. Mautner Memorial Lectures, ocorrida na Universidade da Califórnia (Los Angeles) e editada em 1985, pela Princeton University Press. Feynman fora grande amigo de Alix e colega de infância de seu esposo, Leonard Mautner.

As contribuições de Feynman para o desenvolvimento da Física, não se limitaram apenas aos Fundamentos da Mecânica e da Eletrodinâmica Quânticas, conforme relatamos acima, mas também aconteceram na Física da Matéria Condensada, principalmente na Física do Estado Sólido a baixas temperaturas. Nesta, destacam-se as suas originais e profundas contribuições no sentido de entender os conceitos de polaron e roton, contribuições essas apresentadas entre 1953 e 1955. Vejamos, sucintamente, esses conceitos. Um elétron em um cristal iônico distorce, isto é, polariza o lattice em sua vizinhança. Pois bem, o polaron nada mais é do que um elétron movendo-se no cristal e acompanhado por essa distorção. Conseqüentemente, o polaron apresenta uma massa efetiva mais alta do que o próprio elétron. Esse conceito foi introduzido por S. I. Pékar, em 1946. Para explicar tal conceito, Feynman fez uma bonita abordagem matemática para o problema do polaron. Por sua vez, o roton está ligado à superfluidez do Hélio líquido. Esta propriedade de superfluidez do He⁴, segundo a qual na temperatura de 2.18 K ele não apresenta viscosidade e torna-se o chamado He II, foi descoberta pelo físico soviético Pyotr Leonidovich Kapitza (1894-1984;PNF,1978) e, independentemente, por J. F. Allen e A. D. Misener, em 1938.

Essa transição do hélio líquido do estado normal (He I) para o estado superfluido (He II) é também conhecida como

ponto lambda, porque o gráfico de seu calor específico C_V em função da temperatura T , tem a forma da letra grega lambda (λ); próximo do zero absoluto, esse gráfico é representado por T^3 , e na temperatura de transição 2.18 K há uma descontinuidade infinita. O He II apresenta ainda uma propriedade notável. Suponhamos que dois tanques desse líquido são conectados por um tubo extremamente fino; se for estabelecido um gradiente de temperatura entre eles, há o aparecimento de um gradiente de pressão, conhecido como efeito termomecânico. Se existe apenas um tanque e, imerso nele, há um tubo extremamente fino, então, ao ser estabelecido o gradiente de temperatura, o He II sofrerá um esguicho, conhecido como efeito chafariz. Se, por outro lado, houver entre os dois tanques considerados um gradiente de pressão, então aparecerá um gradiente de temperatura, constituindo o efeito mecanotérmico. Convém frisar que ao estabelecer um gradiente de temperatura no He II, ele não se propaga por difusão como no caso da condução de calor, e sim, se propaga como se fosse uma onda, com uma velocidade característica. Esse fenômeno é conhecido como segundo som.

A observação dessas propriedades singulares do He II, ensejou que físicos teóricos procurassem uma explicação para as mesmas. Assim, Laslo Tisza, entre 1938 e 1940, começou a desenvolver uma teoria de dois fluidos no sentido de explicá-las. Segundo essa teoria e sob o ponto de vista qualitativo, a simples

consideração de que o He II é um superfluido com viscosidade e entropia nulas, e o He I um fluido normal, explica aqueles efeitos. Contudo, como a teoria de Tisza era uma teoria fenomenológica, ela não considerava os dois fluidos (He I e He II) em termos moleculares, e nem fazia nenhuma descrição hidrodinâmica dos mesmos. Para contornar tais dificuldades, o físico soviético Lev Davidovich Landau (1908-1968;PNF,1962), em 1941, considerou o He II como um líquido quântico, aplicando a ele as leis da Hidrodinâmica e, por essa razão, fazendo uma espécie de Hidrodinâmica Quântica. Em analogia com o modelo de sólido (um lattice básico acrescido de excitações tipo fónons), Landau considerou o He II como um fluido básico (o qual tem viscosidade e entropia nulas), acrescido de dois tipos de excitações elementares. Com efeito, para concordar com a curva experimental do calor específico, a qual indicava, conforme vimos acima, que ele era proporcional a T^3 quando $T \rightarrow 0$ (característica de um gás de fónons), Landau postulou que o He II era constituído de dois tipos de excitações elementares: fónons, para a região próxima de $T \rightarrow 0$, e de um novo tipo de excitação, que denominou nessa ocasião de roton, quando a temperatura é acima de 1 K.

Portanto, para Landau, o espectro de energia dessas excitações em função de \vec{k} (vetor de onda) era constituído por uma parte retilínea, próxima da origem, e por uma

curva tipo parábola, com a concavidade voltada para baixo, tendo o seu mínimo em torno de K_0 , isto é:

$$\hbar \omega_{\vec{k}} = \begin{cases} \hbar c k, & \text{para } k \ll k_0 \\ \Delta + \hbar^2 (k - k_0)^2 / 2\mu, & \text{para } k \approx k_0 \end{cases}$$

onde c é a velocidade do som no hélio líquido no zero absoluto, $k = |\vec{k}|$ e $k_0 = |\vec{k}_0|$. As constantes Δ , c , k_0 e μ foram ajustadas por Landau para explicar a curva tipo lambda do calor específico do He II. No entanto, para Landau, essas duas representações gráficas não eram contínuas, já que, para ele, o roton e o fónon eram partículas distintas, isto é, distinguíveis. É importante chamar atenção para o fato de que as propriedades do He II atraíram a atenção do químico norueguês Lars Onsager (1903- ;PNQ, 1968), que era expert em Mecânica Quântica Estatística, o qual passou a estudá-las. Em 1949, ele sugeriu que as linhas de vortex do He II poderiam ser quantizadas.

Essa era a situação do estudo da superfluidez do He II, quando Feynman entre 1953 e 1955, apresentou um ponto de vista inteiramente novo para esse estudo. Com efeito, considerou então Feynman que o He II era também um fluido, porém adaptou o ponto de vista lagrangeano às partículas constituintes do mesmo, ao invés do ponto de vista euleriano considerado por Landau; ele considerou ainda que cada partícula obedecia à Mecânica Quântica.

Com isso, obteve pela primeira vez uma função que descrevia, de modo aproximado, o espectro de energia postulado por Landau, e as constantes adaptadas por este físico foram então obtidas e, também, pela primeira vez, teoricamente. Feynman mostrou ainda que as excitações consideradas por Landau (fónons e rotons) eram únicas e decorriam de uma condensação de um gás de Bose-Einstein. (Idéia semelhante seria utilizada por O. Penrose e L. Onsager, em 1956.) Como essa sua teoria não era muito rigorosa, Feynman passou então a utilizar sua Mecânica Quântica, isto é, as path integrals, no estudo geral da Mecânica Estatística, e a sua Mecânica Estatística foi então apresentada em uma série de lectures na Hughes Research Laboratories, em 1961, cujas notas tomadas por R. Kikuchi e H. A. Feiveson, foram então editadas em 1972, por Jacob Shaham, em livro publicado pela W. A. Benjamin. (É oportuno salientar que as primeiras idéias de Feynman sobre sua teoria da transição do hélio líquido ele as desenvolveu no Brasil, em 1953, quando passou três meses novamente no CBPF.)

O gênio de Feynman não se limitou, apenas, a dar contribuições originais e elegantes à Física da Matéria Condensada ou à Eletrodinâmica Quântica, ele também deu contribuições originais à Física de Altas Energias. A primeira dessas contribuições, considerada pelo próprio Feynman como sua única e grande descoberta, relaciona-se com a interação fraca.

Esta havia sido proposta pelo físico ítalo-norte-americano Enrico Fermi (1901-1954;PNF, 1938), em 1934, para explicar o decaimento do nêutron, no próton, no elétron e na hipotética partícula sugerida por Pauli, em 1930, que era o neutrino. Esse decaimento, era o famoso decaimento beta. Com a descoberta dos mésons mu (hoje muons) por C. D. Anderson e S. H. Neddermeyer, em 1936, dos mésons pi (hoje píons), por C. F. Powell, C. M. G. Lattes, H. Muirhead e G. Occhialini, em 1947, e seus respectivos modos de decaimentos, e da não-conservação da paridade, por C. N. Yang e T. D. Lee, em 1956, várias teorias foram tentadas no sentido de universalizar a então chamada interação de Fermi, e então aplicá-la a esses novos decaimentos. Dentre tais teorias, destacam-se os trabalhos de B. Pontecorvo (1947), O. Klein (1948), G. Puppi (1948), Tiomno e Wheeler (1949), Tiomno e Yang (1950), A. Salam (1957) e Landau (1957).

Nesse ínterim, Feynman também esteve interessado nessa questão. Assim, desenvolveu suas próprias idéias e as discutiu com colegas teóricos e experimentais, quer em conversas e seminários privados, quer em Congressos internacionais. No entanto, o que lhe intrigava era que os seus cálculos se ajustavam razoavelmente bem aos resultados experimentais, quando se tratava do decaimento envolvendo o muon e o elétron, porém, havia dificuldade quando ele os aplicava ao decaimento do nêutron, que envolve o próton e o elétron. Certo dia, no CALTECH,

Feynman estava discutindo com os experimentais H. Jensen, A. Wapstra e F. Boehm, na presença do físico teórico norte-americano Murray Gell-Mann (1929- ;PNF, 1969) sobre essa questão intrigante da Física das Partículas Elementares: o decaimento das partículas. Numa certa altura da conversa, os experimentais disseram que essa questão estava tão confusa, que até resultados já bem estabelecidos, como a interação tipo S e T (Scalar e Tensor) utilizada para explicar o decaimento do nêutron, começava a ser questionada. Aí, então, Gell-Mann comentou: "Ela pode ser do tipo V e A (Vetor e Axial)". Feynman deu um salto do banco que estava sentado e disse: "Já entendi tudo". Desse modo, Feynman e Gell-Mann, em 1958, formularam a famosa teoria V - A que universalizou a interação de Fermi. (Convém observar que R. E. Marshak e E. C. G. Sudarshan (1958) e J. J. Sakurai (1958), desenvolveram uma teoria semelhante a essa de Feynman-Gell-Mann.) Comparando a sua teoria com os resultados experimentais, Feynman encontrou uma diferença de 2%, que a atribuiu a erros experimentais. No entanto, N. Cabibbo, em 1963, corrigiu a teoria V - A, introduzindo a corrente neutra através de um parâmetro desde então conhecido como ângulo de Cabibbo, reduzindo, desse modo, aquela diferença para 1%.

Uma outra contribuição dada por Feynman à Física das Partículas Elementares refere-se à constituição última dessas próprias partículas. Os filósofos gregos antigos, principalmente

Demócrito (c. 470-c. 380) e Leucipo (c. 460-c. 370) haviam postulado que a matéria poderia subdividir-se até chegar ao átomo, que seria então seu constituinte último e, portanto, indivisível. Essa idéia grega permaneceu até o final do século passado, quando os primeiros modelos atômicos começaram a ser elaborados. Com efeito, o físico inglês Sir Ernest Rutherford (1871-1937;PNQ, 1908), em 1911, formulou um modelo atômico segundo o qual o átomo se comportava como se fosse um sistema planetário em miniatura, no qual os elétrons (carregados negativamente) giravam em torno do núcleo (carregado positivamente). Mais tarde, em 1919, o próprio Rutherford mostrou que o núcleo era constituído por prótons (partículas carregadas positivamente). Em 1932, o físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974;PNF, 1935) descobriu que no núcleo existiam nêutrons (partículas descarregadas) além de prótons, constituindo, as duas, as partículas chamadas nucleons. A partir daí, uma série de novas partículas foram então sendo descobertas. O número delas aumentou tanto, e com propriedades cada vez mais estranhas, que havia necessidade de uma classificação. Após muitas tentativas para classificá-las, realizadas por alguns físicos, Gell-Mann e, independentemente, G. Zweig, em 1964, usando as representações do SU(3), formularam a famosa teoria dos quarks, nome este dado por Gell-Mann. (Zweig chamou-as de aces.) Segundo essa teoria, as partículas

elementares até então conhecidas eram formadas de uma mistura de três quarks (u - up ; d - down ; s - strange), se fossem bariônicas, e de um par de quark e antiquark, se fossem mesônicas. Assim, sendo os nucleons partículas bariônicas, seriam, portanto, constituídas de três quarks, obedecendo o seguinte esquema: próton (uud) e nêutron (udd).

Pois bem, em 1967, pesquisadores da Universidade de Stanford, realizando experiências sobre a eletrodução de partículas, isto é, espalhamento inelástico de elétrons de alta energia por prótons, descobriram que a seção de choque para esse tipo de espalhamento não decrescia com o aumento do quadrado do momento transferido, isto é, com Q^2 , como era de se esperar se os nucleons envolvidos nesse tipo de evento fossem "caroços" rígidos. Os resultados observados ocorreram, disseram os físicos, porque os nucleons eram constituídos de partículas tipo-ponto ("point-like particles"). Pois bem, estudando esse tipo de problema, Feynman, em 1969, denominou tais partículas de partons e desenvolveu a partir daí o modelo de partons para explicar tais experiências. Desde então, os físicos teóricos têm tentado demonstrar que os partons de Feynman são os quarks de Gell-Mann. Porém, como até o presente momento não foram detectados quarks livres, a teoria do parton assim com a do quark estão "sub judice". As interações entre as

partículas elementares foram tratadas por Feynman em livro intitulado Photon-Hadron Interactions, também editado pela Benjamin, em 1972. É oportuno lembrar que a estrutura do núcleo atômico já preocupava Feynman na década de 50, havendo, inclusive, em 1954, realizado um trabalho com Leite Lopes no qual desenvolveram a teoria do campo mesônico pseudo-escalar, e com ela, descreveram algumas propriedades do deuteron.

Os vários trabalhos realizados por Feynman em quase todos os ramos da Física foram sempre reconhecidos por toda a comunidade científica mundial, quer no mundo capitalista, quer no mundo socialista, reconhecimento esse traduzido em uma série de honrarias que recebeu durante toda sua vida científica. Assim, em 1954, recebeu o Prêmio Albert Einstein, uma das mais altas galhardias científicas dos Estados Unidos da América; em 1959, foi escolhido como Richard Chace Tolman Professor, de Física Teórica do CALTECH; em 1962, foi agraciado com o Prêmio Ernest Orlando Lawrence da Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos da América, por suas "meritosas contribuições no desenvolvimento, uso ou controle da energia atômica"; em 1965, compartilhou o Prêmio Nobel de Física com Schwinger e Tomonaga, pelo trabalho fundamental desenvolvido em Eletrodinâmica Quântica; em 1971, ganhou a Medalha Oersted, da Associação Americana dos Professores de Física, pelas "notáveis contribuições ao ensino da física". Nesse particular,

há a destacar o seu livro The Feynman Lectures on Physics, publicado entre 1963 e 1965, e no qual ele apresenta a Física necessária a um estudante que quer iniciar-se em pesquisa. Para escrever este livro, Feynman contou com a colaboração de R. B. Leighton e M. Sands. Além desses prêmios, Feynman recebeu inúmeros convites para dar conferências e participar de Congressos internacionais, em vários países do mundo, para apresentar e discutir suas idéias. É oportuno salientar que, com o objetivo de divulgar a Mecânica Quântica, Feynman foi convidado pela BBC de Londres para fazer uma série de programas. Estes foram filmados na Universidade de Cornell em 1964 e transmitidos pela estação inglesa em 1965. Em 1967, foram transformados num livro pela MIT Press sob o título The Character of Physical Law.

O talento de Feynman era múltiplo, de vez que não apenas em Física ele demonstrou sua originalidade e sua inquietude para o conhecimento. Por exemplo, quando estava em Princeton, na hora das refeições, costumava reunir-se com filósofos, biólogos e outros especialistas não-físicos. Desses "papos" sempre recebia convites para participar de seminários sobre assuntos relacionados com aqueles especialistas. Certa vez, ele foi convidado para participar de um curso de Biologia. Não só frequentou o mesmo, como, depois, usou seu ano sabático de 1958 para fazer pesquisas em Biologia, principalmente em problemas

relacionados com o ADN (ácido desoxirribonucléico) e seu mensageiro, o ARN (ácido ribonucléico). O trabalho que fez sobre mutações duplas em bacteriófagos (fago é um vírus que contém ADN e ataca a bactéria), o levou ao departamento de Biologia da Universidade de Harvard, a convite do próprio descobridor do ADN, o geneticista e biofísico norte-americano James Dewey Watson (1928- ;PNFM, 1962), (junto com o biofísico britânico Francis Harry Compton Crick (1916- ;PNFM, 1962)), para lá apresentar um seminário sobre suas pesquisas. Porém, o seu grande amor pela Física o fez dedicar-se inteiramente a ela, a abandonar as promissoras pesquisas em Biologia que iniciara.

Durante os quase 70 anos de vida de Feynman, ele os viveu em situações curiosas, aventureiras e inusitadas. Para resumir-la, vamos transcrever um trecho da "orelha" de seu livro de memórias, referido anteriormente: -"Feynman é talvez a única pessoa na história mundial que contribuiu para entender o mistério do hélio líquido e foi encarregado de pintar uma toureira nua, abriu muitos dos mais "seguros" cofres de Los Alamos durante a fabricação da bomba atômica e tocou de modo habilidoso uma "frigideira" em uma banda de samba brasileiro, explicou a física para os "monstros sagrados" como Einstein, von Neumann e Pauli e acompanhou balé ao som de bongô, foi julgado débil mental pelos psiquiatras do exército norte-americano e foi

merecedor do Prêmio Nobel de Física pela Academia Suéca".

Apesar de Feynman não ser muito bem visto pelas autoridades norte-americanas, devido a sua extrema honestidade profissional e pessoal, acrescida de sua proverbial jocosidade e irreverência, no entanto, a sua excepcional inteligência e original habilidade em resolver qualquer problema, fizeram com que fosse convidado a participar da Comissão Rogers que examinou o acidente com o ônibus espacial Challenger, ocorrido em 1986. Todavia, percebendo a morosidade e a burocracia dos trabalhos dessa Comissão, realizou uma experiência de improviso e provou o ponto chave da investigação, qual seja, a de que o material do anel de apoio do foguete perdia toda sua elasticidade em baixas temperaturas. No relatório final da Comissão Rogers, afirmou Feynman que "a NASA jogava roleta russa com a vida dos astronautas", porque ela tinha conhecimento dessa fragilidade do anel.

Feynman casou três vezes. A primeira, em 1941, com Arlene, que viria a morrer, em 1946, de tuberculose. A segunda vez, com Marie Lou, e a terceira, em 1961, com a inglesa Gweneth. Deixou dois filhos Carl e Michelle e a irmã Joan, com os quais trocava idéias. Por exemplo, sua irmã Joan foi importante quando da descoberta de sua teoria V - A, estimulando-lhe a estudar o célebre artigo de Lee e Yang, sobre a quebra da paridade nas interações fracas, já que, dizia ele à irmã, não entendia esse

artigo, por ser o mesmo bastante complicado. Ela retrucou dizendo que ele não o entendia porque não o havia inventado; faça-se novamente estudante e estude esse artigo, completou. Feynman fez isso, "checou" todas as equações e o compreendeu completamente. Com seu filho Carl, que é filósofo da Ciência, discutia o pensamento dos filósofos e, em alguns casos, como em Spinoza, encontrou passagens que considerava muito infantis. Este era o espírito de Feynman, sempre pronto a discutir, quer fosse com especialistas, estudantes ou mesmo os seus familiares.

Ao finalizar esse pequeno trabalho sobre "o mais original físico teórico de nosso tempo", conforme declarou o físico Philip Morrison do MIT, ao saber da morte de Feynman, vamos lembrar uma jocosidade feita pelo saudoso e também irreverente jornalista Stanislau Ponte Preta, morto em 1968, por ocasião em que escrevia para o jornal Última Hora, em uma de suas crônicas diárias escritas em 1968, Stanislau referiu-se aos aspectos do caráter de Feynman ligeiramente abordados neste ensaio. A certa altura dessa crônica, falando no divórcio de Feynman e para destacar o fato de que tocava bongô, Sérgio Porto dizia que antes de decidir separar-se de sua mulher, Feynman batia bongô e olhava para a mulher, voltava a bater bongô e tornava a olhar para sua mulher, por fim, depois de vários toques no bongô e olhadas para sua mulher, concluiu o autor do "samba do crioulo doido", Feynman decidiu ficar com o bongô de couro de antflope.

BIBLIOGRAFIA

01. ASIMOV, I. 1974. Os Gênios da Humanidade. Bloch Editores.
02. BASSALO, J. M. F. 1986. A Contribuição dos Físicos Brasileiros para o Entendimento dos Léptons. Ciência e Cultura, 38(11): 1849-1858.
03. BASSALO, J. M. F. 1987. Crônicas da Física. GEU/UFFA.
04. DYSON, F. 1981. Perturbando o Universo. Editora da Universidade de Brasília.
05. FEYNMAN, R. P. 1961. Quantum Electrodynamics. W. A. Benjamin, Inc. Publishers.
06. FEYNMAN, R. P. 1961. The Theory of Fundamental Processes. W. A. Benjamin, Inc. Publishers.
07. FEYNMAN, R. P. 1967. The Character of Physical Law. The MIT Press.
08. FEYNMAN, R. P. 1972. Photon-Hadron Interactions. W. A. Benjamin, Inc. Publishers.
09. FEYNMAN, R. P. 1980. La Recherche, 117(11): 1424-1428.

10. FEYNMAN, R. P. 1982. Statistical Mechanics: A Set of Lectures. The Benjamin Cummings Publishing Company, Inc.
11. FEYNMAN, R. P. 1985. Surely You're Joking Mr. Feynman. W. W. Norton & Co.
12. FEYNMAN, R. P. 1985. QED: The Strange Theory of Light and Matter. Princeton University Press.
13. FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B. and SANDS, M. 1963 e 1965. The Feynman Lectures on Physics. Addison-Wesley Corporation.
14. FEYNMAN, R. P. and HIBBS, A. R. 1965. Quantum Mechanics and Path Integrals. McGraw-Hill, Inc.
15. GARDNER, M. 1967. Divertimentos Matemáticos. IBRASA.
16. GRIBBIN, J. 1984. A Procura do Gato de Schrödinger. Editorial Presença.
17. HUANG, K. 1963. Statistical Mechanics. John Wiley & Sons, Inc.
18. LANDAU, L. et LIFCHITZ, E. 1967. Physique Statistique. Editions Mir.
19. LEITE LOPES, J. 1988. Richard Feynman e a Física no Brasil. CBPF-CS-005/88.

20. MORRISON, P. 1988. The Boston Globe, February 17.
21. OKUN, L. B. 1984. Leptons and Quarks. North-Holland Personal Library.
22. SAKURAI, J. J. 1967. Advanced Quantum Mechanics. Addison-Wesley Publishing Company.
23. SEGRE, E. 1980. From X-Rays to Quarks. W. H. Freeman Company.
24. WEBER, R. L. 1980. Pioneers of Science. The Institute of Physics, Bristol and London.
25. WEISSKOPF, V. F. 1972. Physics in the Twentieth Century. The MIT Press.