Enrico Fermi, Gênio e Simplicidade

H. Fleming
Instituto de Física, Universidade de São Paulo

Trabalho recebido em 6 de maio de 1996

A nós, que nos dedicamos à física, não poderia haver época melhor para viver do que o século XX. Duas grandes revoluções conceituais, a Teoria da Relatividade e a Mecânica Quântica, e um sem número de saltos tecnológicos derivados delas, transformaram o mundo e abriram áreas de pesquisa inimagináveis para um cientista do final do século 19. Entre os grandes pesquisadores que construíram este nosso novo mundo, Enrico Fermi ocupa um lugar especial para nós, por ter sido o único que foi um grandíssimo teórico e um grandíssimo experimental, por ter criado o estilo que é hoje considerado o bom estilo, e por ser, indiretamente, parte importante na implantação da física no Brasil. De fato, foi por sua indicação que o professor Theodoro Ramos convidou o professor Gleb Wataghin para vir ao Brasil, por ocasião da fundação da Universidade de São Paulo.
Neste artigo pretendo descrever, principalmente por meio de exemplos, o estilo de Fermi. Isto nos levará aos seus trabalhos, mas também à sua educação e ao seu estilo de educador, atividade em que teve um sucesso comparável ao de pesquisador.
A iniciativa é oportuna. De fato, pelo menos em algumas áreas, uma combinação da luta pela vida ("publish or perish") com a escassez de novos dados experimentais e com o charme de teorias dotadas de uma roupagem matemática de grande elegância e beleza, trouxe um desvio de formação que já tem consequências graves. Quando um estudante avançado distingue sutilezas da teoria das conexões em fibrados principais em suas aplicações à gravitação mas não consegue responder se a sua gravitação é atrativa ou repulsiva, é hora de parar e pensar. Ou de estudar a obra de Fermi...[1].

I. Formação

Fermi foi, em física, um autodidata, não porque não frequentasse as melhores escolas, mas porque estava permanentemente fora de fase em relação a elas.

Ainda menino, Fermi e seu amigo Enrico Persico, que depois viria a ser também um ótimo físico teórico, interessaram-se pela ciência, e em particular pela física. Narra Laura Fermi, esposa do grande cientista, no belíssimo livro *Atomi in Famiglia*[2]:

"À medida que seus conhecimentos cresciam e se aprofundavam, os dois amigos dedicaram-se a aplicá-los a problemas experimentais. Com o equipamento rudimentar que podiam obter, realizaram algumas medidas bastante acuradas, como do campo magnético da Terra. Tentaram também explicar um certo número de fenômenos naturais, e por um longo tempo ficaram perplexos pelo que parecia ser o mais profundo mistério da natureza: como a maioria dos meninos, costumavam brincar com piões, populares porque baratos. Diferentemente da maioria dos meninos, porém, tentaram explicar o estranho comportamento dos piões. Não viam razão por que um pião em rápida rotação devesse manter seu eixo na vertical, ou mesmo endireitar-se, procurando a vertical. Era incompreensível para eles por que, quando o movimento se tornava mais lento, o eixo se inclinava de um certo ângulo com a vertical, e se movia de modo tal que a parte superior do pião descrevia um círculo. E não eram capazes de predizer a velocidade angular desse movimento.

Um mistério é um desafio para mentes inquisidoras. Resolver o mistério do pião tornou-se a principal preocupação dos meninos. Não falavam de outra coisa, nada mais parecia interessar. As noções de mecânica que haviam adquirido em suas leituras eram elementares, e não se aplicavam diretamente ao movimento dos piões. Recusaram-se a desistir, e, no fim, Fermi chegou a uma teoria do giroscópio que funcionava. "

Comprava livros de ciência nas bancas do Campo dei Fiori à sombra do severo monumento que homenageia Giordano Bruno. Ali encontrou, e leu de capa a capa, um tratado de física de autoria de um padre Andrea Caraffa, contendo uma introdução ao cálculo diferencial e integral, e que tinha a curiosidade de ser escrito em latim, lingua dominada por qualquer bom estudante italiano. Sua devoção à ciência chegou aos ouvidos de um amigo de seu pai, o engenheiro Adolfo Amidei, que se ofereceu para lhe emprestar livros que julgava importantes para a sua formação. E assim Enrico teve a fortuna de estudar quase sempre em textos clássicos de excepcional qualidade, como a Trigonometria de Serret, a Álgebra de Cesàro, a Geometria Analítica de Bianchi, o Cálculo Diferencial e Integral de Dini e a Mecânica de Poisson. Em 1918, com 17 anos, ingressou na Scuola Normale Superiore de Pisa, uma escola de elite na Itália, a única a exigir vestibular. Durante os exames resolveu uma questão a respeito das vibrações de uma viga engastada usando métodos tão sofisticados que houve suspeita de cola. Foi então entrevistado por um grupo de professores que reconheceram ter diante de si um gênio absolutamente invulgar.

Durante o curso aprimorou sua formação experimental, e teve licença para seguir seus estudos no ritmo que lhe aprouvesse. Ainda aluno publicou um trabalho importantíssimo sobre Relatividade Geral, descobrindo o que hoje se chama transporte de Fermi-Walker, e estabelecendo-se como a autoridade mais influente em física, em sua escola. Sua formação estava essencialmente completa. A partir daí raramente precisou ler livros de física. Entre os poucos que ainda leu estão o grande livro de Dirac,*Principles of Quantum Mechanics*, e o de Weyl, *Gruppentheorie und Quantenmechanik*. O alemão aprendera na escola, e o inglês, por conta própria, adotando um método pessoal que recomendava a todos: comprou uma coleção de livros de aventura de Jack London, um dicionário Inglês-Italiano, e obrigou-se a ler toda a coleção. Lia as principais revistas científicas de uma maneira peculiar: percorria atentamente o resumo inicial (Abstract) até se inteirar do problema e do método. Daí fazia ele mesmo os cálculos, cotejando seus resultados com os do autor.

II. O Estilo Fermi

Mesmo nessa fase inicial de sua carreira já exibia um dos traços fundamentais do seu estilo: a "física na ponta dos dedos", isto é, a habilidade de atacar os mais variados temas de improviso, sem consultas de qualquer tipo. Aprimorado com os anos, atingiu um nível invulgar mesmo entre os grandes da física. No final dos anos 40, quando estava em Los Alamos, aconteceu este episódio, envolvendo nada mais nada menos do que o famoso Arthur Compton, prêmio Nobel. Compton, Fermi e Samuel K. Allison estavam viajando de trem para a usina de plutônio em Hanford (Compton e Fermi eram proibidos de voar durante a guerra porque o general Groves não queria que corressem riscos desnecessários.) A viagem era longa e monótona, e, depois de um pouco, Compton disse: *"Enrico, quando eu estava em Chacaltaya, nos Andes, nas minhas viagens por causa dos raios cósmicos, notei que, a grandes altitudes, meu relógio não funcionava bem. Pensei longamente sobre o assunto e finalmente cheguei a uma explicação que me satisfez. Vamos ver o que você tem a dizer sobre isso."* Allison, achando que a monotonia seria quebrada por um bom tempo, preparou-se para assistir os "fogos de artifício" que se seguiriam. Fermi achou um pedaço de papel e um lápis e extraiu de seu bolso a régua de cálculo. Depois de alguns minutos escreveu fórmulas para o arrastamento do ar pelo balancim , que aumenta o seu momento de inércia, retardando a marcha do relógio. Calculou o efeito e produziu um número que correspondia, na memória de Compton, ao defeito apresentado pelo seu cronômetro nos Andes. Allison declarou que jamais poderia esquecer a expressão maravilhada de Compton ante isso! Outra característica fundamental do estilo de Fermi é a simplicidade de meios. Depois de tratado por ele, todo problema parece trivial. O exemplo mais famoso é o seu artigo sobre a Eletrodinâmica Quântica, publicado nos Reviews of Modern Physics, e onde quase todo o mundo aprendeu a teoria (discutiremos esse artigo clássico mais abaixo).

Entre os físicos que, após contato com Fermi, adotaram o seu estilo, está o grande Hans Bethe. Ouçâmo-lo. *"O que mais me impressionou do método de Fermi na física teórica foi a sua simplicidade. Era capaz de analisar qualquer problema, complicado que fosse, nos seus elementos essenciais. Despía-o de complicações matemáticas e de todo formalismo desnecessário. Desta maneira, muitas vezes em meia hora ou menos, era capaz de resolver a essência do problema físico. Naturalmente isso não era ainda uma descrição completa do ponto de vista matemático, mas quando você o deixava, depois de uma dessas discussões, já estava claro como proceder em direção à solução matemática.*

Este método impressionava particularmente a mim, que tinha vindo da escola de Sommerfeld em Munique, que perseguia sempre uma solução matemática completa, em primeiro lugar. Educado na escola de Sommerfeld eu pensava que o método a seguir era estabelecer a equação diferencial para o problema, usar toda a habilidade matemática para *achar a solução de maneira tão acurada e elegante quanto possível, e então discutir a solução. Nesta discussão, finalmente, você chegaria às características qualitativas da solução, e, assim, à compreensão da física do problema.Era impressionante verificar que Fermi não necessitava de todo esse esforço. A física se tornava clara por uma análise do essencial e mais algumas estimaticas de ordem de grandeza. Meia hora dessa análise valia vários meses de trabalho à la Sommerfeld."*

Outra descrição entusiástica das habilidades de Fermi nos é dada por Richard Feynman.Conta ele que, quando estava em Los Alamos," havia, naturalmente, Enrico Fermi. Numa ocasião ele veio de Chicago para dar alguma consultoria, para nos ajudar, se tivéssemos problemas. Tínhamos uma reunião com ele, e eu tinha feito alguns cálculos e obtidos certos resultados. Os cálculos eram tão elaborados que era muito difícil entendê-los. Pois bem, em geral eu era o especialista nesse tipo de coisa. Eu sempre conseguia explicar os resultados de uma maneira simples, mas aquele era um caso demasiado complicado. Então disse a Fermi o que eu estava fazendo, e comecei a descrever os resultados.Ele disse, 'Espere, antes de me dizer o resultado, deixe-me pensar um pouco. Deve dar alguma coisa assim (estava certo!), e não pode ser de outro jeito por este motivo, etc. E há uma explicação óbvia para isso...'

Ele estava fazendo aquilo em que eu era considerado o máximo, mas dez vezes melhor do que eu. Foi uma grande lição para mim!"

III. O Educador

O aparecimento de Fermi no ambiente medíocre da física italiana dos anos 20 (a figura proeminente era Marconi) marcou o início de uma nova era. A obra de Fermi consistiu não só na grande física que produziu, mas também nos excelentes físicos que formou. Foram suas crias, entre outros, Emilio Segrè, Edoardo Amaldi, Enrico Persico, Bruno Pontecorvo, Franco Rasetti, Ettore Majorana,Giulio Racah, na Itália, e Chen Ning Yang, Tsung Dao Lee, Marvin Goldberger, Geoffrey Chew,Jack Steinberger, Leon Lederman, nos Estados Unidos. Também foram notáveis os livros que escreveu, o mais conhecido sendo, provavelmente, Thermodynamics, uma exposição clássica da termodinâmica na linguagem de ciclos, popular há muitas décadas, muito claro e econômico na linguagem. Originou-se das notas de um curso de verão que deu na Universidade de Michigan quando ainda residia na Itália. Embora tradicional, aqui e ali se percebe a preocupação em sempre ligar o formalismo aos fenômenos, como na parte em que estuda a atmosfera adiabática, obtendo, em poucas linhas, uma fórmula relacionando altitudes e temperaturas que é suficientemente boa para uso prático [6].

"An interesting and simple application of the adiabatic expansion of a gas is the calculation of the dependence of the temperature of the atmosphere on the height above sea level. The principal reason for this variation of temperature is that there are convection currents in the troposphere which continually transport air from the lower regions to the higher ones and from the higher regions to the lower ones. When air from sea level rises to the upper regions of lower pressures, it expands. Since air is a poor conductor of heat, very little heat is transferred to or from the expanding air, so that we may consider the expansion as taking place adiabatically. Consequently, the temperature of the rising air decreases. On the other hand, air from the upper regions of the atmosphere suffers an adiabatic compression, and hence an increase of temperature, when it sinks to low regions. In order to calculate the change in temperature, we consider a column of air of unit cross section, and focus our attention on a slab, of height dh, having its lower face at a distance h above sea level. If p is the pressure on the lower face, then the pressure on the upper face will de $p + dp$, where dp is the change in pressure which is due to the weight of the air contained in the slab. If g is the acceleration of gravity and ρ is the density of the air, then the weight of the air in the slab is $\rho g dh$. Since an increase in height is followed by a decrease in pressure, we have:

$$dp = -\rho g dh$$

or, using

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{Mp}{RT},$$

$$dp = -\frac{gMp}{RT}dh,$$

where M is the average molecular weight of air; $M = 28.88$. The logarithmic derivative of

$$\frac{T}{p^{\frac{K-1}{K}}} = constant,$$

which is true for an adiabatic process ($K = \frac{C_p}{C_v}$),gives us

$$\frac{dT}{T} = \frac{K-1}{K}\frac{dp}{p}.$$

Together with the equation for dp this gives:

$$\frac{dT}{dh} = -\frac{K-1}{K}\frac{gM}{R}.$$

Assuming $K = \frac{7}{5}$; $g = 980.665$; $M = 28.88$; $R = 8.214.10^7$ we obtain:

$$\frac{dT}{dh} = -9.8.10^{-5} degrees/cm = -9.8 degrees/km.$$

This value is actually somewhat larger than the observed average decrease of temperature with altitude. The difference is mainly owing to our having neglected the effect of condensation of water vapor in the expanding masses of air."

Esta pérola de física teórica vem na página 28 da Ref. [6], revelando a preocupação de chegar a aplicações o quanto antes. Que o resultado é bom, pode ser testado pelo leitor diariamente comparando as temperaturas em São Paulo e no Rio, de latitudes próximas e diferença de altitude de cerca de 800m. É típico Fermi: procura-se a aproximação que faz sentido e simplifica a dedução e, a seguir, comenta-se sobre os efeitos do que não foi levado em conta. Fermi era um grande mestre na arte de separar o relevante do irrelevante, de pesar os tamanhos relativos dos vários efeitos, e procurava transmitir esta arte em suas aulas.

Como introdução a um grupo de artigos nas Obras Completas de Fermi, diz Yang: "Como é bem sabido, Fermi dava aulas extremamente lúcidas. Característica era a sua maneira de , para cada tópico, começar sempre do início, tratando exemplos simples e evitando, tanto quanto possível, formalismos. Esta simplicidade causava a impressão de ausência de esforço, uma impressão falsa.A simplicidade era o resultado de uma cuidadosa preparação e de um balanceamento deliberado das diversas alternativas de apresentação. Em uma ocasião precisei substituí-lo no curso de Física Nuclear, já que ele devia se ausentar de Chicago por uns dias. Deu-me um caderno em que havia preparado cuidadosamente cada aula, e repassou comigo a que eu devia dar, explicando as razões por trás de cada particular linha de abordagem.

Era seu hábito dar, uma ou duas vezes por semana, seminários informais, não preparados, para um pequeno grupo de estudantes de pós-graduação. A reunião era em seu escritório, e alguém, Fermi ou um dos alunos, propunha um tema específico para discussão. Fermi olhava em seus cadernos cuidadosamente indexados para achar suas anotações sobre o tópico e então o apresentava a nós. Tenho ainda as notas desses seminários de outubro de 46 a julho de 47. Cobriam os seguintes tópicos, na ordem original: teoria da constituição interna e da evolução das estrelas, estrutura das anãs brancas, a idéia de Gamow-Schönberg sobre supernovas(resfriamento por neutrinos devido à captura de elétrons por núcleos, o processo Urca, uma das principais contribuições de físicos brasileiros à ciência mundial; o *Schönberg* é o nosso saudoso professor Mário Schenberg), geometria riemanniana, relatividade geral e cosmologia, modelo de Thomas-Fermi, o estado da matéria a temperaturas e densidades muito altas, o fator 2 de Thomas, espalhamento de neutrons por para e orto-hidrogênio, radiação de synchrotron, efeito Zeeman, "efeito Josephson" de ruído em circuitos, condensação de Bose-Einstein, fundamentos da mecânica estatística, freiamento de mesons na matéria, freiamento de neutrons na matéria. As discussões eram mantidas em nível elementar, e a ênfase era sempre nas partes essencial e prática do tema; a abordagem era intuitiva e geométrica, em vez de analítica.

Aprendíamos que **aquilo** era física; que física não devia ser assunto de um especialista, a física tinha de ser construída a partir do chão, tijolo por tijolo, camada por camada. Aprendíamos que as abstrações vêm **após** o trabalho de base, não antes. E também verificamos o prazer com que Fermi realizava simples cálculos numéricos, com uma máquina de calcular de mesa."

IV. Principais Trabalhos

Do nosso ponto de vista, os principais trabalhos são aqueles que mais marcadamente revelam o estilo de Fermi. Assim, os trabalhos que lhe valeram o prêmio Nobel, a longa série de experiências de física nuclear utilizando a técnica dos neutrons lentos, não serão aqui comentados, como não serão os que estão ligados à construção do primeiro reator nuclear, e os que relatam sua descoberta do que é hoje denominado estatística de Fermi-Dirac, embora sejam talvez seus trabalhos mais importantes.

IV.1 A Eletrodinâmica Quântica

O relato que segue é inspirado nas notas de Edoardo Amaldi que precedem um dos capítulos das Obras Completas, e em conversações que tive o privilégio de manter com o ilutre professor.

No inverno de 1928-1929 Fermi iniciou seus estudos sobre a teoria quântica da radiação. Seu primeiro passo foi ler os artigos de Dirac, pioneiro no assunto, e entender os resultados obtidos. O método usado por Dirac não era de seu gosto, e assim, como costumava fazer, resolveu reformular a teoria de uma forma que lhe fosse matematicamente mais familiar . Usando a decomposição clássica do campo eletromagnético livre em uma série de osciladores harmônicos desacoplados, os modos normais da onda (método devido a Rayleigh), quantizou o campo simplesmente substituindo os osciladores clássicos por osciladores quânticos. Este é o método usado em vários textos modernos, como, por exemplo, Sakurai. Obteve assim o Hamiltoniano do sistema quântico, e realizou inúmeras aplicações, que foram o objeto de um curso dado na escola de verão de física teórica em Ann Arbor, Michigan, em 1930. Enquanto realizava esses trabalhos, Fermi transmitia os resultados a vários dos seus alunos, incluindo Amaldi, Majorana, Racah, Rasetti e Segrè. Todo dia, após o expediente, reunia essas pessoas em torno de sua mesa e começava a elaborar, diante deles, primeiro a formulação básica da eletrodinâmica quântica, e então, uma após a outra, uma longa série de aplicações a problemas particulares. Dessa maneira, que lhe era típica, pesquisava e ensinava ao mesmo tempo, enquanto dispunha de uma audiência à qual externava seus pensamentos, ainda não em forma definitiva, progredindo de maneira firme e sem hesitações; nunca muito rapidamente, mas nunca sem conquistas. Resultaram várias publicações, de certa forma sumarizadas no famoso trabalho *Quantum Theory of Radiation*, aparecido na Reviews of Modern Physics de 1935. Dele disse Hans Bethe:*" Muitos de vocês provavelmente, como eu, aprenderam sua teoria de campos no maravilhoso artigo de Fermi. É um exemplo de simplicidade em uma área difícil que creio não ter sido ultrapassado. Apareceu depois de vários artigos extremamente complicados, e antes de um outro lote de artigos ainda mais complicados sobre o tema, e sem a esclarecedora simplicidade de Fermi acredito que muitos de nós nunca teriam chegado às profundidades da teoria de campos. Julgo-me um deles."*

Em São Paulo, até os anos 70, o professor Paulo Leal Ferreira fazia com que seus alunos iniciassem seus estudos de teoria de campos pelo artigo de Fermi, antídoto ao feroz formalismo que se tinha instalado em torno aos diagramas de Feynman (e a despeito de Feynman, que deplorava o excesso formal).

IV.2 O neutrino

O neutron, fora do núcleo atômico, é uma partícula instável. Transforma-se em um próton em alguns minutos, emitindo ainda um elétron, pelo menos. Quando um neutron em repouso decai, o próton resultante está também muito aproximadamente em repouso. Se apenas um elétron fosse emitido, sua energia deveria ser equivalente à diferença de massas entre o neutron e o próton, ou seja, essencialmente $(m_n - m_p)c^2$, onde c é a velocidade da luz. Não é o que se observa. Medindo-se a energia do elétron emitido encontram-se valores que variam continuamente desde a energia em repouso do elétron até o valor citado acima. Parece existir uma violação da lei da conservação da energia. Pauli, face a isto, propôs que no decaimento do neutron fosse emitida uma partícula adicional, de difícil detecção, que estaria levando consigo, sem deixar traços, a energia que estava faltando. Fermi interessou-se pela idéia, e resolveu investigar o processo à luz da teoria quântica dos campos. E sugeriu que a partícula se chamasse neutrino.

A teoria de Fermi introduz várias idéias inovadoras. "Elétrons (ou neutrinos) podem ser criados e podem desaparecer... A Hamiltoniana do sistema consistindo de partículas pesadas e leves deve ser escolhida de maneira que a cada transição de um neutron a um próton esteja associada a criação de um elétron e um neutrino. Ao processo inverso, a mudança de um próton em um neutron, o desaparecimento de um elétron e de um neutrino devem estar associados." Deste trabalho surgiram uma estimativa da massa do neutrino (a distribuição de energia prevista teoricamente para o elétron concordava melhor com os dados experimentais se a massa do neutrino fosse nula), uma estimativa da constante de acoplamento para processos deste tipo, informações sobre como melhor analisar a curva do espectro de energia do elétron para obter informações sobre a massa do neutrino, a idéia de transições permitidas e proibidas, e, sobretudo, uma nova área da física, a física das interações fracas. Bruno Pontecorvo, o mais jovem estudante italiano de Fermi, escreve [3]: "Fermi se familiarizou com a hipótese de Pauli (da existência do neutrino) em Roma, em congresso internacional de física nuclear de 1931, onde o problema do decaimento β foi discutido. Bohr, nessa ocasião, defendeu a idéia de que não haveria conservação de energia em escala microscópica. Fermi, ao contrário, tinha se impressionado muito com a partícula de Pauli, e foi nessa ocasião que começou a chamá-la de *neutrino*. Era evidente que já havia pensado profundamente no assunto. Seu artigo *A Tentative Theory of Beta Decay* surgiu dois meses depois do Congresso Solvay de 1933. Trata-se de uma teoria quantitativa, que muito influenciou o desenvolvimento da física. Não há dúvida de que a idéia de neutrino teria permanecido uma noção vaga sem a sua contribuição. Quero descrever alguns fatos curiosos sobre o aparecimento da teoria, fatos, que vi com os meus olhos, já que trabalhava, nessa época, em Roma. O primeiro é que a revista *Nature* recusou o artigo, porque parecia abstrato demais para seus leitores usuais. Estou seguro de que o editor arrependeu-se dessa decisão por toda a sua vida. O segundo tem a ver com as dificuldades encontradas por Fermi. Não eram matemáticas, mas físicas. O mais dificil foi reconhecer o fato de que o elétron e o neutrino são **criados** quando um neutron se transforma em um próton. Esta idéia, hoje trivial, era nova na época. Lendo-se o artigo de Fermi se vê que ele fez uma analogia com a teoria quântica da radiação de Dirac (fótons **são** criados e destruídos). Lembro-me ainda de suas palavras : quando o átomo de Na excitado emite a linha de 5840 Å, o fóton não está sentado no átomo (ele é criado); semelhantemente, o elétron e o neutrino são criados quando um neutron está de convertendo em um próton. Gostaria de salientar que o nosso conhecimento desde aquele tempo cresceu tremendamente; contudo, quase todas as novidades se encaixam maravilhosamente na imagem criada por Fermi."

V. Quando Tudo Falha ...

Como é bem sabido, Fermi foi um dos principais físicos do projeto Manhattan, talvez o principal. Pouco antes, ao fazer funcionar, em Chicago, o primeiro reator, ele se tornara o primeiro homem a usar energia não proveniente do Sol. Este feito, naturalmente, requereu a resolução de problemas tecnológicos de grande sofisticação, sem paralelo para a época. Em contraponto a isso, durante a explosão da primeira bomba atômica em Alamogordo, voltará à cena a simplicidade de sua física, a capacidade de obter muito com muito pouco. Conta Segrè [4] que a explosão foi monitorada por muitos instrumentos, que visavam estimar a energia liberada. Contudo, em uma situação tão nova, mesmo os mais cuidadosos preparativos podem falhar. No momento da explosão " Fermi levantou-se e jogou no chão pequenos pedaços de papel. Tinha preparado uma experiência simples para medir a energia liberada pela explosão: no ar parado, os pedacinhos de papel cairiam aos seus pés, mas quando a onda de choque chegou (alguns segundos após o clarão), foram transportados por alguns centímetros na direção da onda. Sabendo a distância da explosão, com esses dados ele podia calcular a energia. Tinha preparado antecipadamente uma tabela, de maneira que pode quase imediatamente informar quanta energia tinha sido liberada."

Algum tempo atrás eu e meu amigo professor Giorgio Moscati estávamos experimentando nossas modernníssimas máquinas de calcular programáveis e com capacidade gráfica, imaginando coisas interessantes para fazer com elas, quando Giorgio comentou, com suprema maldade: "Imagine o Fermi com uma dessas ...". Confesso que, por alguns dias, fiquei com vergonha de minha máquina. Mas, não era justo, como se verá a seguir.

VI. Computadores

Quando o primeiro computador eletrônico de Los Alamos ficou pronto e se quis experimentá-lo em problemas de física relevantes e especialmente adequados à análise numérica, foi a Fermi que se recorreu.Tratava-se do MANIAC. Após longas discussões com o grande matemático Stanislaw Ulam, Fermi decidiu-se por um problema que requeriria uma longa computação que não poderia ser feita com lápis e papel. Tratava-se da consideração de uma corda elástica com as duas extremidades fixas, sujeita não apenas à força elástica, mas também, como na realidade, a uma pequena força não-linear. Como conta Ulam em sua interessantíssima autobiografia [5], "a questão era achar como essa não-linearidade, após muitos e muitos períodos de vibrações, iria gradualmente alterar o bem conhecido comportamento periódico de oscilações, para a frente e para trás, que caracteriza o modo estacionário. Como outros modos da corda iriam se tornando mais importantes, e como, pensávamos, o movimento por inteiro iria se termalizar, imitando talvez o movimento de fluidos, que se inicia de modo laminar para tornar-se mais e mais turbulento, convertendo seu movimento macroscópico em calor." Foram auxiliados pelo físico John Pasta na tarefa de fazer os diagramas de fluxo, a programação e as correções *run-time*. Fermi decidira aprender a programar a máquina por si mesmo, o que era uma tarefa muito diferente do equivalente moderno. Não havia compiladores, e a programação era em linguagem de máquina,em binários, e tinha-se que aprender a arquitetura da máquina e os inúmeros pequenos truques da programação em tão baixo nível. Fermi superou o problema rapidamente, e logo estava ensinando Ulam a programar. Conta este: "Logo verificamos que o problema tinha sido bem escolhido. Os resultados revelaram-se qualitativamente diferentes do que mesmo Fermi, com seu grande conhecimento do movimento das ondas, esperava. O objetivo original tinha sido o de ver a que velocidade a energia da corda, posta originalmente em uma única onda senoidal, iria gradualmente desenvolver tons mais altos com os harmônicos, e como a corda iria finalmente tornar-se uma 'mixórdia', tanto na forma da corda como na maneira em que a energia estava distribuída entre modos cada vez mais altos. Nada disso aconteceu. Para nossa surpresa a corda teve excitados apenas uns poucos modos, entre os quais realizava transições, e, talvez ainda mais surpreedentemente, após algumas centenas de vibrações, voltou quase exatamente à forma senoidal original." Fermi considerou isso *a minor discovery.* Na realidade o trabalho, conhecido como *Fermi, Pasta, Ulam*, Ref.[7] deu origem a muitas pesquisas de físicos e matemáticos famosos, como Martin Kruskal, Peter Lax e Jurgen Moser. A mim serviu também como um consolo. Os próprios construtores do MANIAC tinham pensado "Imaginem esta máquina nas mãos do Fermi!".

References

[1] *The Collected Works of Enrico Fermi*, University of Chicago Press, Accademia Nazionale dei Lincei, 1962, 1965.

[2] Laura Fermi, *Atoms in the Family* University of Chicago Press; tradução, pela autora, do original italiano publicado por A. Mondadori.

[3] B. Pontecorvo, *The Infancy and Youth of Neutrino Physics: Some Recollections*, International Colloquium on Particle Physics History, Paris, 1982.

[4] Emílio Segrè, *Enrico Fermi, Physicist*, The University of Chicago Press, 1970.

[5] S. M. Ulam, *Adventures of a Mathematician*, Scribner's, 1976.

[6] Enrico Fermi, *Thermodynamics*, Dover, muitas edições.

[7] E. Fermi, J. Pasta, S. Ulam, *Studies of Nonlinear Problems*, Los Alamos Documents LA-1940, Maio de 1955.