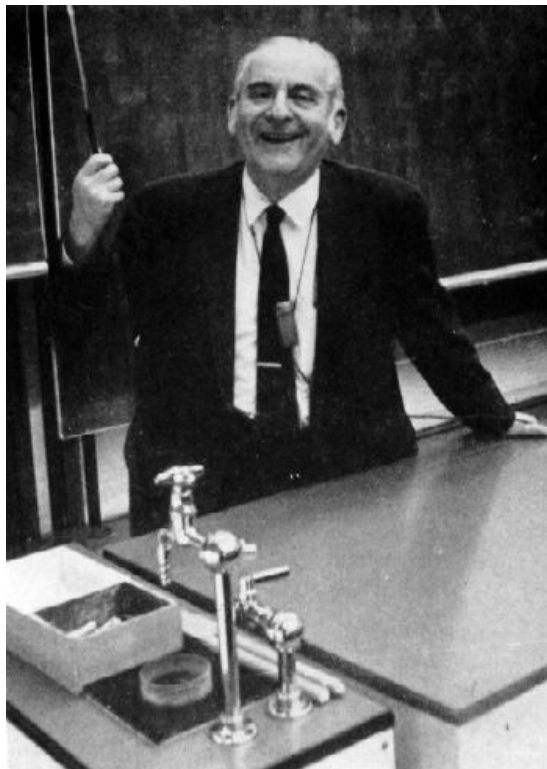


## A descoberta do *spin* do elétron

(Apresentação de Samuel Abraham Goudsmit na *Dutch Physical Society*, em 1971) <sup>1</sup>



Goudsmit em sua apresentação, em 1971.

Eu, Goudsmit, hoje vou falar um pouco sobre uma história. A história da descoberta do *spin* do elétron por George Uhlenbeck e por mim. O que é complicado: eu não gosto de história da Física, sempre fui contra a maneira de como os historiadores escreviam sobre isso em épocas anteriores. Hoje em dia está melhor; alguém como Martin Klein, realmente, traz algo novo. Mas os historiadores anteriores sempre descreveram a Física como tendo sido feita por três ou quatro pessoas, e esqueceram que essas pessoas famosas só puderam fazer o seu trabalho por causa de muitos outros que também deram contribuições. Eles não podem ajudar já que esse é o caminho que eles aprenderam, com os historiadores comuns. Você ouve sobre um homem como Hitler ... e eles esquecem os milhões que lhe emprestaram o suporte necessário.

Agora existem outras pessoas que estão interessadas, são os psicólogos. Eles querem que você saiba por que se tornou um físico, por que você fez tudo o que fez, e começam a interrogá-lo sobre isso. Eles querem saber sobre sua família, esperando que seu avô tenha sido um grande químico ou um grande matemático, e depois ficam sempre terrivelmente desapontados quando vêm até mim.

Quando me matriculei pela primeira vez como estudante em Leiden, o bedel me disse: “O Reitor gostaria de vê-lo por um momento”. Ele me levou para aquela sala com todos aqueles retratos de pessoas famosas e ali, ao lado do retrato de Hugo de Groot, pendurado em uma grande pintura, um famoso jurista. “Aqui”, diz ele, “está o seu avô”, eu respondo: “nunca ouvi falar deste homem”. O nome do grande jurista era Goudsmit, minha resposta deixou-o nervoso. Na verdade, com a minha própria família os psicólogos nada puderam fazer. Meu avô era guia turístico no Hotel des Indes em Haia, minha mãe tinha um chapelaria, e meu pai, um negociante atacadista de assentos ... para sanitários.

O que esquecem os historiadores – e também os físicos – é que nas descobertas da Física o acaso desempenha um papel muito, muito importante. É claro que nem sempre reconhecemos

<sup>1</sup> *The discovery of the electron spin. In Foundations of Modern EPR*, G.R. Eaton & K.M. Slikhov (Eds.). Singapore: World Scientific, 1998. O texto foi traduzido do holandês para o inglês, por J.H. van der Waals, publicado com pequenas mudanças [1], com o acréscimo das referências dos artigos citados por Goudsmit.

isso. Se alguém é rico então diz: “Sim, fui inteligente, é por isso que sou rico”! E o mesmo está sendo dito de alguém que faz algo em Física “sim, um cara realmente inteligente ...”. É certo que existem casos como Heisenberg, Dirac e Einstein, algumas exceções. Mas para a maioria de nós, a sorte desempenha um papel muito importante, e isso deveria não ser esquecido.

Quando fui para Leiden, acabei nas turmas de Ehrenfest, ... as turmas eram pequenas, e havia uma interação muito boa com o professor, que sempre ficava preocupado quando interrompíamos nossas aulas e tínhamos que ir a algum lugar. Uma vez tive que acompanhar meu pai à Alemanha por causa de negócios dele, e ele, então, questionou: “Você precisa interromper suas aulas novamente?” Mas meu pai não poderia viajar sozinho. Aí ele perguntou: “Onde você vai?” Quando eu contei, ele disse: “Perto há uma universidade onde trabalha um espectroscopista, Paschen. ..., vá dar uma olhada”. ... Fui visitar Paschen, que não me tratou como aluno, mas como colega, e me mostrou o aparato experimental que possuía para o estudo das linhas espectrais do hélio ionizado, o que confirmou inteiramente as órbitas relativísticas dos elétrons de Sommerfeld. Não entendia nada disso. Mas, creio, consegui esconder a minha incompreensão, e depois do meu regresso a Leiden, estudei muito bem tudo isso. Uma das coisas que me marcou é que nos experimentos de Paschen sobre as linhas do hélio, sua estrutura fina e a explicação relativística, havia uma componente proibida que estava obviamente presente. No verão seguinte, fui enviado para uma estada com Paschen, e ele e Back me ensinaram as técnicas de espectroscopia. Quando conversei com os teóricos sobre essa componente proibida ... mas você sabe como são os teóricos ... eles então disseram: “Experiências ruins”. Essa linha proibida foi um marco importante.

Se falo na primeira pessoa, há dois motivos. Primeiro: falta de modéstia, e segundo, ao contar essa história, só posso falar das minhas próprias experiências. Você sabe, quando Uhlenbeck conta a história do *spin*, ele conta uma história diferente. Eu não acho que qualquer um de nós esteja mentindo. Mas se alguém está mentindo deve ser um pouco mais eu do que ele.

Naquela época Kronig veio da América para Leiden; nós colaboramos em espectroscopia e trabalhamos nas intensidades do efeito Zeeman para o qual encontramos as expressões exatas [2]. Claro, era bem diferente de hoje; não havia Mecânica Quântica ... Era preciso adivinhar essas pequenas fórmulas; desenvolveu-se uma intuição por elas. É o mesmo que acontece com os veterinários e a medicina humana. As pessoas podem dizer onde dói, mas um médico veterinário tem que adivinhar onde dói. Um cavalo ou uma vaca não podem dizer isso. É assim com essas pequenas fórmulas. É muito curioso .... era uma espécie de numerologia, e um milagre que chegamos às expressões corretas que mais tarde poderiam ser derivadas pela Mecânica Quântica. Agora, ..., tornou-se bastante simples. Se alguém conhece alguma Matemática, pode derivar todas essas coisas. Tivemos que adivinhar; eu tive intuição para isso. E foi assim que Kronig e eu fizemos essas coisas.

Bem, Ehrenfest logo descobriu que eu não era propriamente um teórico, e então me enviou para Amsterdã. Três dias por semana eu era assistente de meio período de Zeeman e coisas assim. ... nas noites de quarta-feira eu voltava de trem para Leiden .... as piadas ouvidas em Amsterdã não poderiam ser contadas em Leiden. ... elas não eram adequadas o suficiente. O ambiente em Amsterdã foi bastante amigável. O professor Zeeman, é claro, era um pouco mais formal do que eu estava acostumado

Eu fiz outra coisa na época. O princípio de Pauli foi publicado no início de 1925 [3]. Estou convencido de que embora seja uma das publicações mais importantes da Física, quem o lê agora, da geração mais jovem, achará difícil de entender. ... Eu escrevi uma nota em maio [4] para torná-lo mais fácil de entender, introduzindo diferentes números quânticos. Os números quânticos que usei para o princípio de Pauli foram  $m_L$  e  $m_s$ ;  $m_s$  sendo sempre igual a mais

ou menos  $1/2$ . (Naquela época era um pouco diferente, usava-se 1 e 0, mas isso realmente não importa.) E se você usá-los, o princípio de Pauli, então torna-se muito mais simples ..., como acontece hoje, é claro. Vocês não sabem disso, mas tal mudança era necessária, pois Pauli introduziu números quânticos diferentes. Como disse um matemático, a mudança era equivalente a uma transformação linear simples – que é trivial, claro, matematicamente trivial, mas não tanto para a compreensão e para o ensino.

Bem, eu tinha introduzido esses números quânticos, mas se eu fosse um bom físico teria notado, já em maio de 1925, de que isso implicava que o elétron possuía *spin*. Mas eu não era um bom físico, não sou um bom físico, e, portanto, não percebi isso.

Enviei minha nota a Copenhague para obter a opinião de Kramers e Kronig ... Recebi uma longa carta de volta, mas Kronig não disse nada sobre minha nota. Isso não lhe interessava, aparentemente. Isso é outro ponto importante, além da linha proibida de Paschen, a componente da estrutura fina proibida. Isso tudo aconteceu na primavera de 1925. Então, Uhlenbeck aparece em cena.

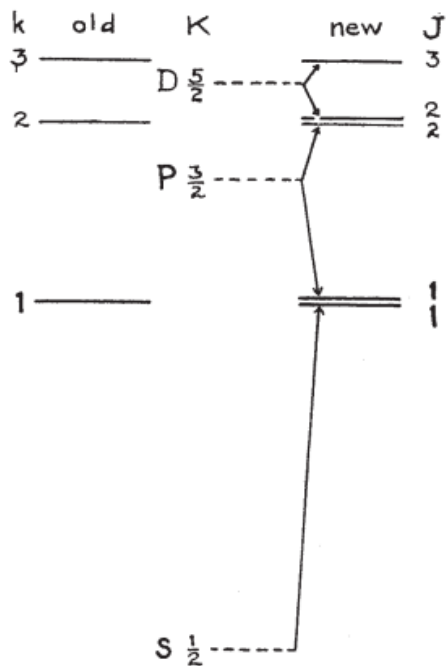
George Uhlenbeck interrompeu suas pesquisas para se tornar tutor das crianças do Embaixador da Holanda em Roma. Ele deve ter feito isso muito bem porque mais tarde, um deles chegou a ser embaixador em Washington, ... Mas, como disse Ehrenfest: “lá na Itália ele não aprendeu nada dessas coisas novas, lá eles só conhecem Física Clássica” ... quando ele voltou para casa no verão, Ehrenfest me disse: “Você deveria trabalhar junto com ele por um tempo, e então ele poderá aprender algo sobre a nova estrutura atômica e todo esse negócio espectral”. O que ele claramente pensou, é claro, foi: “Talvez ele possa aprender realmente um pouco de Física com Uhlenbeck”.

Uhlenbeck não sabia nada sobre a nova física, mas ainda assim fez uma coisa importante para a Física Moderna que estava por vir. Ehrenfest lhe escreveu uma carta na qual disse: “Li um artigo de um jovem, parece simpático, deve tentar encontrá-lo”. Bem, naquela época, quando seu professor lhe pedia, você o fazia. E George Uhlenbeck foi ver aquele jovem; o jovem tinha acabado de voltar da Alemanha, e estava totalmente desanimado. Tinha passado um semestre em Göttingen e lá eles deram-lhe um mau tratamento: “Bom, aquele homem não pode saber de nada, além de ser muito pequeno ele nunca estudou em nenhum lugar que valesse a pena”.



Leiden 1924. Da esquerda para a direita: Dieke, Goudsmit, Tinbergen, Ehrenfest, Kronig e Fermi. Tinbergen mais tarde trocou a Física pela Economia, e tornou-se o primeiro laureado com o Nobel de Economia, em 1969.

Então o jovem ficou realmente desanimado e pretendia desistir da Física. Mas Uhlenbeck disse: “Não faça isso antes de falar com Ehrenfest; venha ver o Ehrenfest.” O homem veio para Leiden, e ficou por dois ou três meses, do qual eu posso mostrar uma fotografia. Uma fotografia conhecida que você já pode ter visto antes: ali está aquele jovem, Enrico Fermi. Com o incentivo de Ehrenfest, ele percebeu que realmente era um físico competente. E se você olhar para a carreira de Fermi ... esses foram os dias em que ele realmente se tornou um grande físico.



De qualquer forma, Uhlenbeck veio para Haia, ... e eu tinha prometido escrever um pequeno artigo para a “Physica”, em holandês, e fiz isso junto com ele, o que foi realmente ótimo. Porque ele não sabia de nada, mas era muito bom; perguntou todas aquelas questões que eu nunca tinha feito, e dessa colaboração, para deixar as coisas claras, surgiram alguns resultados importantes, como sabemos agora. Um dos primeiros resultados, foi uma nova interpretação do espectro do hidrogênio ... Na figura ao lado, à esquerda está o antigo esquema de Sommerfeld, à direita o verdadeiro ... O curioso é que eu, por conhecer todas as regras de intensidade, e assim por diante, já tinha adivinhado as fórmulas corretas. Essa foi a minha contribuição; eu sabia quais fórmulas eram adequadas.

Tomamos as expressões clássicas e, em vez dos números quânticos inteiros, colocamos números quânticos semi-inteiros, ... foi como mágica, mas no entanto, se encaixou com precisão, e o que eu achei tão encantador – se você realmente acredita – a linha “proibida” que Paschen tinha visto não era proibida, mas uma verdadeira linha espectral que deveria estar presente, o que me divertiu muito.

E isto, claro, é algo que quero repetir; as pessoas não acreditam. No começo, você faz algo que você nunca sabe se é importante ou não, não tínhamos absolutamente nenhuma ideia de que uma nova interpretação do espectro do hidrogênio era importante. Assim, esse artigo foi publicado em “Physica”, em holandês [5]. Também tivemos um artigo sobre aqueles vetores quânticos  $\vec{L}$  e  $\vec{S}$ , o acoplamento de vetores quânticos, tudo isso *tommy rot* (sem sentido), não sei como vocês chamam, e foi enviado para o “Zeitschrift für Physik”. Você nota a diferença? Não sabíamos o que era importante. Todos trabalhavam nesses vetores quânticos, e foi publicado no “Zeitschrift für Physik”. O espectro do hidrogênio foi publicado em “Physica”, mas observe, esse artigo sobre o espectro apontou na direção certa.

Quando chegou o dia, eu tive que contar a Uhlenbeck sobre o princípio de Pauli – claro, usando meus próprios números quânticos – então ele me disse: “Mas você não vê o que isso implica? Isso significa que existe um quarto grau de liberdade para o elétron. Isto significa que o elétron tem *spin*, que gira”. Agora, eu posso também dizer exatamente a diferença entre Uhlenbeck e eu como físicos. Naqueles dias, durante todo o verão, quando contei a Uhlenbeck sobre Landé e Heisenberg, por exemplo, ou sobre Paschen, ele perguntou: “Quem é esse?” Ele nunca tinha ouvido falar deles, estranho. E quando ele disse: “Isso significa um quarto grau de liberdade”, então perguntei a ele: “O que é um grau de liberdade?” De qualquer forma, quando ele fez sua observação, foi sorte eu saber todas essas coisas sobre o espectros, e eu então disse: “Isso cabe precisamente em nosso esquema do hidrogênio sobre o qual escrevemos há quatro semanas. E, se agora permite-se que o elétron seja magnético, com um momento magnético apropriado, então se pode entender todos aqueles complicados efeitos Zeeman. Eles surgem naturalmente, bem como as fórmulas de Landé, e tudo funciona lindamente”.

E foi isso: assim, dessa maneira, o *spin* foi descoberto. Claro que contamos a Ehrenfest sobre isso, e então, o verão acabou, fui novamente para Amsterdã e vários episódios se seguiram. Naturalmente achei maravilhoso, porque no formalismo que eu sabia tudo se encaixava perfeitamente. E a Física rigorosa por trás disso, eu não compreendia. Mas Uhlenbeck, sendo um bom físico, começou a pensar nisso. ... “Uma carga que gira”...? Ele afirma que então foi até Lorentz e ele respondeu: “Sim, isso é muito difícil porque faz com que a energia própria do elétron esteja errada”.

Uhlenbeck também conta isso ... Tínhamos acabado de escrever um pequeno artigo em alemão e entregue ao Ehrenfest, que queria enviá-lo para a “Naturwissenschaften”. Agora é dito que Uhlenbeck ficou assustado, foi ao Ehrenfest e disse: “Não envie isso, porque provavelmente está errado; é impossível, não se pode ter um elétron que gire em tão alta velocidade e tenha o momento certo”. Ehrenfest respondeu: “É tarde demais, eu já enviei”. Mas não me lembro do acontecimento, nunca tive a ideia de que estava errado porque eu não sabia o suficiente. A única coisa que me lembro é que o Ehrenfest me disse: “Bem, é uma boa ideia, embora possa estar errada. Mas você ainda não tem uma reputação, então não tem nada a perder”. Essa é a única coisa que me lembro.

Bem, a nota foi submetida e publicada [6]. Diretamente, no dia seguinte, recebi uma carta de Heisenberg referindo-se à nossa “mutige note”(nota corajosa). Eu nem sequer sabia que precisávamos de coragem para publicar. Eu não fui nada corajoso. Acho que ainda tenho a carta de Heisenberg. Nela, ele escreve uma fórmula ... Não entendi nada. Ele diz em algum lugar: “O que você fez com o fator 2?” Qual fator? Nem uma pequena explicação, e a fórmula dada sem derivação.

Eu lhe disse, o *spin* se encaixou perfeitamente em todo o formalismo. Mas, claro, também devíamos ter feito um cálculo quantitativo do tamanho das separações. Se alguém acredita no *spin*, ele pode ser “para cima” ou “para baixo”, e qual é a diferença de energia - sai corretamente? Já tínhamos as fórmulas, mas era possível derivar essas fórmulas? Não fizemos isso porque imaginávamos que seria muito difícil. Agora, todo aluno iniciante faz isso; como você o chama? ... um calouro, um novato? Ele consegue, mas não sabíamos como fazer e, portanto, não fizemos. Felizmente não sabíamos, porque se o tivéssemos feito, teríamos incorrido em um erro por um fator de 2. Não teria funcionado, mas não sabíamos; todas as outras as coisas se encaixavam perfeitamente, ainda que isso não.

Bem, ficamos desanimados mas, novamente, foi uma questão de sorte. Naqueles dias Lorentz comemorou o quinquagésimo aniversário de seu doutorado. Bohr, Einstein e muitos outros grandes cientistas vieram para Leiden. Bohr tinha visto nossa nota e ficou bastante interessado. Todos os dias tínhamos uma reunião, com Bohr, Einstein e Ehrenfest, sobre o problema do *spin* e todas essas coisas, na casa de Ehrenfest. Lá aprendemos muito.

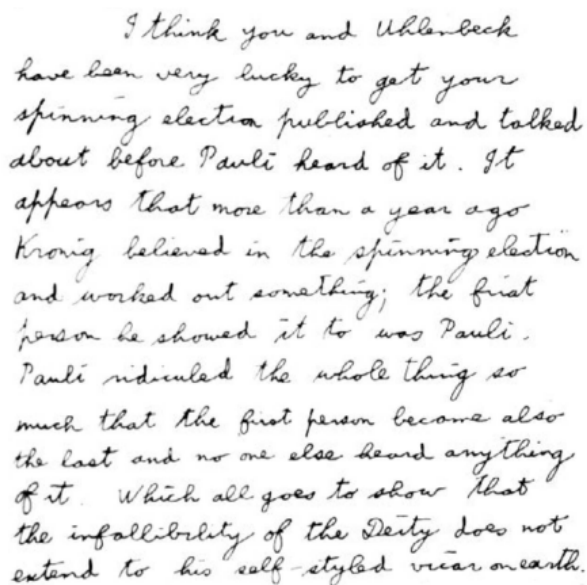
De passagem, devo mencionar uma anedota típica de Ehrenfest, talvez não tão agradável. Lorentz morava em Haarlem e todas essas celebridades, Rutherford, Madame Curie, Bohr, Einstein e muitos outros viajaram de trem, um trem especial, de Leiden para Haarlem. Na semana anterior, ocorreu um daqueles raros acidentes fatais de trem e eu disse a Ehrenfest: “Não seria terrível se aquele trem tivesse sofrido um acidente?” Ehrenfest respondeu: “Sim, isso seria terrível, mas pense em todos os jovens físicos que então poderiam conseguir empregos .....”.

Bohr mostrou-se altamente otimista, especialmente quando viu que eu já tinha todas as fórmulas para a estrutura fina. Ele pensou, talvez, que [o fator 2] fosse algo trivial; provavelmente algo relativístico. Eu nunca entendi o argumento precisamente. Quando Bohr e Einstein estavam conversando na casa dos Ehrenfest, eu não entendia nada.

De qualquer forma, Bohr cometeu um erro. Em vez de Uhlenbeck, ele me convidou para ir a Copenhague, para ver se eu podia aprender alguma coisa por lá. Isso não funcionou, é claro, e depois de seis semanas ele me presenteou com uma passagem de trem de primeira classe, para voltar a Haia. Mas, em Copenhague, havia um jovem, Thomas, que conhecia profundamente a Teoria da Relatividade. Enquanto eu estava lá, ele calculou que o fator dois de Heisenberg – que parecia perdido – na verdade representava o fator relativístico, e tudo estava em ordem [7].

O homem que nunca se importou em acreditar no *spin* foi Pauli. Então Bohr disse: “No caminho para casa você deve parar em Hamburgo e explicar o fator 2 para Pauli”. Tentei fazê-lo, mas como eu mesmo não entendia realmente, fiquei, naturalmente, incapaz de explicar ... Mas Pauli não queria acreditar; no meu retorno, Einstein ainda estava em Leiden e tive que explicar a ele também, o que foi ainda pior. Eu não consegui, mas depois recebi um cartão postal de Pauli informando que ele tinha visto o trabalho de Thomas, e que acreditava nele.

Bem, isso teria sido o fim, como eu mesmo pensava. Thomas deveria voltar para Inglaterra, e queria viajar pela Holanda para me visitar, então me escreveu uma carta. Aqui está uma parte dessa carta. Penso que isto representa um ponto importante e, em particular, os historiadores, naturalmente, gostam disso. Os historiadores sempre tentam rastrear alguém que, em algum lugar num baú escuro, já escondeu a Teoria de Einstein. Mas isso eles também acharam maravilhoso.



*I think you and Uhlenbeck have been very lucky to get your spinning electron published and talked about before Pauli heard of it. It appears that more than a year ago Kronig believed in the spinning electron and worked out something; the first person he showed it to was Pauli. Pauli ridiculed the whole thing so much that the first person became also the last and no one else heard anything of it. Which all goes to show that the infallibility of the Deity does not extend to his self-styled vicar on earth.*

Parte da carta de L.H. Thomas para Goudsmit (25/03/1926).

Acho que você e Uhlenbeck tiveram muita sorte de publicar e conversar sobre seu elétron giratório antes de Pauli ouvir falar dele. Parece que há mais de um ano Kronig acreditou na rotação do elétron e descobriu algo; a primeira pessoa a quem ele mostrou foi Pauli. Pauli ridicularizou tanto tudo que a primeira pessoa se tornou também a última e ninguém mais ouviu nada sobre isso. O que tudo mostra que a infalibilidade da Divindade não se estende ao seu autoproclamado vigário na Terra.

Agora isso é absolutamente certo. Se Kronig não tivesse deixado Leiden e ficado com Ehrenfest, então as coisas teriam tomado outro rumo. Ehrenfest o teria encorajado e dito: “Isso você deveria publicar”. Com Pauli, claro, foi totalmente diferente. Mas admitindo a grande diferença a este respeito, se olharmos objetivamente ... Nos dias que Kronig teve aquela ideia, a nova interpretação do espectro do hidrogênio não existia,  $m_L$  e  $m_s$  não existiam, e ele não sabia sobre essas componentes proibidas porque não lhe interessavam. Assim, na verdade, o material que convenceria as pessoas de que isso era certo, simplesmente não existia. Além disso, Kronig não foi realmente o primeiro. O primeiro a publicar sobre o elétron quantizado – Kronig não o fez – foi Compton. Por razões totalmente erradas, ele havia dito cerca de quatro anos antes no “Journal of the Franklin Institute”: “Talvez exista uma rotação quantizada dos elétrons”. Mas as razões que ele apresentou eram erradas e pouco convincentes.

Depois houve um pequeno artigo de Kennard, um físico americano, que tinha argumentos mais convincentes, mas insuficientes para fazer as pessoas acreditarem nele. Urey tinha pensado nisso, mas não publicou. Quando Kronig leu nosso artigo, ele publicou dois artigos para provar que estávamos errados; na “Nature” e nos “Proceedings of the National Academy”, em Washington ... Portanto, acho um pouco estranho que alguns historiadores digam: “Kronig fez isso, realmente, vocês não fizeram isso”. Esse é o mesmo historiador que diz ... isso é apenas uma transformação linear e, portanto, uma contribuição trivial.

É assim que a história parece e, de alguma maneira, é um tanto curiosa. Quem, precisamente, deveria receber crédito por isso? Tais coisas não são possíveis sem também dar crédito a todas outras pessoas que contribuíram. Mas, um aspecto se destaca, que é de particular importância para os jovens. Primeiro: você não precisa ser um gênio para fazer uma importante contribuição para a Física porque, eu admito, o *spin* do elétron é uma importante contribuição. Isso eu sei agora, mas não sabíamos, e agora sei. Todos me disseram.

Finalmente, quero dizer mais uma coisa: mesmo que você faça uma contribuição menor, que não seja importante, isso dá uma enorme satisfação. Portanto, acredito que nem sempre devemos aspirar a resolver o que é mais importante, mas tentar nos divertir trabalhando em Física, e obter resultados.

---

## References

- [1] S.A. Goudsmit, De ontdekking van de electronenrotatie, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde 37 (1971) 386.
- [2] S. Goudsmit and R. de L. Kronig, Naturwissenschaften 13 (1925) 90; Verhandelingen Koninklijke Akademie van Wetenschappen 34 (1925) 278.
- [3] W. Pauli, Z. Physik 31 (1925) 765
- [4] S. Goudsmit, Z. Physik 32 (1925) 111; a relação com a notação corrente é menos trivial do que a sugerida por Goudsmit em sua exposição.
- [5] S. Goudsmit and G.E. Uhlenbeck, Physica 6 (1926) 273.
- [6] G.E. Uhlenbeck and S. Goudsmit, Naturwissenschaften 47 (1925) 953. Uma subsequente publicação pelos mesmos autores, em Nature 117 (1926) 264, é seguida por um *postscript* muito interessante de N. Bohr.
- [7] L.H. Thomas, Nature 107 (1926) 514.

O físico holandês Samuel Abraham Goudsmit, tinha 23 anos quando ele e George Uhlenbeck, em 1925, levantaram a hipótese de que o elétron tinha *spin*. Quando a Segunda Guerra Mundial começou, ele já era um conhecido físico atômico que trabalhava na Universidade de Michigan, desde 1927, quando ele e Uhlenbeck foram para os Estados Unidos. Durante a guerra, seu primeiro trabalho foi com radares no Laboratório de Radiação do MIT, e depois, nos últimos dias de guerra na Europa, liderou uma missão para determinar até que ponto os alemães conseguiriam desenvolver a bomba atômica. Após a guerra, chefiou o Departamento de Física do recém criado Laboratório Nacional de Brookhaven e, em 1950, a APS (*American Physical Society*) o nomeou como editor da *Physical Review* e da *Review of Modern Physics*, cargo que ocupou até sua aposentadoria em 1972. Foi também o fundador da *Physical Review Letters*, em 1958.