

# O testamento de Dirac

Domingos Soares

Departamento de Física  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, Brasil

03 de março de 2021

## Resumo

Em 1982, dois anos antes de sua morte, o físico inglês P.A.M. Dirac concedeu uma importante entrevista. Ela pode ser considerada como um testamento de suas preocupações derradeiras relativas à física teórica. Apresento os tópicos abordados, detendo-me em mais detalhes nos seus comentários sobre a Teoria da Relatividade Geral.

## 1 Introdução

O físico teórico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984) realizou trabalhos fundamentais para o desenvolvimento inicial da mecânica quântica e da eletrodinâmica quântica, além de ter previsto a existência da antimatéria. Dirac dividiu o prêmio Nobel de física de 1933 com o físico alemão Erwin Schrödinger (1887-1961) pela “descoberta de novas formas profícuas de teoria atômica”. Ele também trabalhou no sentido da reconciliação da relatividade geral com a mecânica quântica.

Em 1982, Dirac realizou uma visita à Universidade de Göttingen, Alemanha. Na ocasião, foi entrevistado pelo físico alemão Friedrich Hermann Hund (1896-1997), também cientista consagrado, tendo realizado contribuições seminais para o entendimento da estrutura de átomos e moléculas, através de aplicações da mecânica quântica.

Dirac contava então 80 anos de vida e Hund estava na altura dos 86. Foi uma conversa madura e equilibrada entre dois teóricos importantes na história da física moderna. Para Dirac era muito mais. Foi a oportunidade para ele colocar publicamente os seus pontos de vista sobre questões da física que, aparentemente, o atormentavam. É importante notar que dois anos depois ele faleceria. Ao assistir a entrevista é notória a impressão de ouvirmos alguém que antevê o próprio fim e quer firmar as suas preocupações derradeiras com o estado da física teórica na época.



Friedrich Hund à esquerda e Paul Dirac em conversação [1].

Apresentarei, na próxima seção, a relação dos temas tratados na entrevista acompanhados de um breve comentário. Na seção seguinte, deter-me-ei na discussão em torno da Teoria da Relatividade Geral (TRG), a teoria de gravitação de Albert Einstein (1879-1955). Esta, dentre outras aplicações, é o fundamento teórico da chamada “cosmologia relativista” [2]. As minhas considerações finais estão na seção 4.

## 2 Temas discutidos na entrevista

A entrevista tem a duração de 20 minutos e 33 segundos (cf. [1]). A seguir elencarei os temas discutidos pelos dois físicos, na ordem cronológica em que

aparecem na conversação.

- 1) Einstein foi o primeiro a constatar a importância de simetrias em física. O físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) descobriu as transformações de coordenadas que levam o seu nome, mas as interpretou em termos de um referencial especial. No que ele estava equivocado. Foi Einstein quem introduziu a ideia da simetria entre espaço e tempo na interpretação das transformações de Lorentz. Desta forma ele tornou todos os referenciais equivalentes. Não há referencial privilegiado. Einstein mostrou ser um pensador independente, neste e em outros problemas da física teórica.
- 2) Simetria entre partículas e antipartículas.
- 3) Equação de Dirac para o elétron, que inclui o seu spin.
- 4) Estados de energia negativos: conceito do vácuo, onde todos os estados de energia negativos estão ocupados.
- 5) Aos 7:58 minutos Dirac fala: *“Não deveríamos falar um pouco sobre a TRG?”*. Esta conversa então se estende até o minuto 15:05. O comentário estendido sobre ela está na seção 3.
- 6) A conexão correta entre a teoria quântica e a relatividade ainda não foi descoberta.
- 7) Os métodos atuais usados pelos físicos teóricos no estudo das partículas elementares e da unificação das forças da natureza não são os métodos corretos. Eles usam as chamadas “técnicas de renormalização” para lidar com as grandezas infinitas. E isto não é um processo matematicamente lógico, mas apenas um conjunto de regras de trabalho e não uma teoria matemática correta. *“And I don’t like this whole development at all”*.
- 8) O valor da constante de estrutura fina, a saber,  $1/137$ , não é explicado por nenhuma teoria. A questão é por que ela deveria ser  $1/137$  e não outro número. Isto não foi explicado ainda. Avanços em teoria atômica só serão possíveis após uma explicação satisfatória.

### 3 Teoria da Relatividade Geral

Este é o item 5 do rol apresentado na seção anterior. Apresentarei uma transcrição livre das afirmações de Dirac ouvidas entre os minutos 7:58 e 15:05 da entrevista. Ele começa dizendo: “*Should we speak a little about General Relativity?*”. É sua a iniciativa, pois a TRG é tão importante para ele que ele *quer* falar sobre ela. Vamos então aos pontos principais.

A) Relatividade especial versus relatividade geral:

*“Einstein introduziu uma nova teoria de gravitação que trouxe um tipo de simetria muito poderosa. As simetrias da TRG só são importantes quando ocorrem campos gravitacionais, enquanto que as simetrias da relatividade especial têm importância em toda a física.”*

B) Tempos e distâncias na TRG:

*“Meu trabalho recente tem sido concernente à TRG e acredito que os tempos e as distâncias que devem ser usados na relatividade geral de Einstein não são os mesmos que os tempos e as distâncias que seriam fornecidos pelos relógios atômicos. Há boas razões teóricas para se acreditar que deve ser assim...”*

C) Forças gravitacionais e forças elétricas:

*“... e para acreditar que as forças gravitacionais estão se tornando mais fracas comparadas às forças elétricas à medida que o universo envelhece. E há alguma evidência observacional disto a partir de observações da Lua, que têm sido feitas com grande precisão com relação ao tempo fornecido pela teoria de Einstein, e que têm sido feitas desde 1955 com relógios atômicos. E há alguma evidência de diferença entre os dois tempos.”*

Note que os chamados “tempos de Einstein” são aqueles calculados a partir da estrutura espaço-temporal relativista — i.e., a distância — entre a Terra e a Lua e a velocidade da luz. Os tempos atômicos são determinados a partir de frequências de transições atômicas apropriadamente escolhidas.

D) Observações dos tempos com o *Viking Lander*:

*“A evidência não é tão completa quanto se deseja, mas as pessoas ainda estão trabalhando no problema. Em particular com o Viking Lander, o qual foi colocado em Marte em 1976. Pode-se enviar sinais de radar para Marte e receber de volta as ondas refletidas. E então pode-se medir com relógios atômicos quanto tempo estas ondas levaram para ir a Marte e voltar.”*

Dirac fala aqui do *Viking Lander 1* que desceu em Marte em 20 de julho de 1976 e foi a primeira sonda espacial americana em solo marciano. Ela esteve operante até 13 de novembro de 1982 (mais detalhes em [3]).

E) Perturbações espaço-temporais sobre as observações Terra-Marte:

*“Os resultados que se obtém são, infelizmente, muito complicados porque há muitas perturbações. Há mesmo perturbações causadas por meteoros. Há muito mais meteoros passando perto de Marte do que passando perto da Terra. E todas estas perturbações têm que ser levadas em consideração. Bem, as pessoas estão trabalhando no problema e eu acredito que elas vão obter muito brevemente uma resposta definitiva sobre a questão se estes dois tempos existem, o tempo de Einstein e o tempo atômico, com uma diferença entre eles. (...) Os tempos e distâncias atômicos podem não ser aqueles a serem usados na teoria de Einstein para observações astronômicas.”*

Ao invés de “meteoros” devemos ler “asteroides” na fala de Dirac (ver [4]). A densidade numérica de asteroides nas vizinhanças de Marte é muito grande. Devemos lembrar que entre as órbitas de Marte e Júpiter existe o chamado “cinturão de asteroides”, uma faixa com grande população de asteroides, tendo o maior deles quase  $1/3$  do diâmetro da Lua. Os asteroides causam perturbação mensurável sobre a órbita de Marte, causando alteração na determinação do tempo de viagem da luz entre a Terra e Marte. As distâncias atômicas são dadas — como salienta Hund — pelas dimensões de cristais não perturbados (ver minuto 12:35 e o que se segue). Ao falar em “*observações astronômicas*”, Dirac certamente se refere às observações cosmológicas.

## 4 Considerações finais

As pesquisas sobre os tempos atômicos, as distâncias e a variação temporal das constantes físicas já estavam em pleno andamento na época da entrevista de Dirac. Um exemplo pode ser visto no estudo publicado em 1983, o qual utiliza dados obtidos através do Viking Lander (cf. [4]).

Os interessados em se aprofundar na definição da escala de tempo atômico e sua cronometragem desde 1955 até 2005 podem ver a ref. [5]. Uma discussão de alguns aspectos da relação do tempo atômico com a TRG é apresentada também. Um estudo mais recente, publicado em 2018, está em [6].

Dirac faz questão de afirmar que a TRG “*is so successful in all its applications*”. Esta afirmação aparece logo após as críticas que ele fez a esta mesma teoria e tem duas finalidades. Ao mesmo tempo em que ameniza a apresentação das críticas, mostra que ele realmente acredita nelas — e daí a necessidade de amenizá-las. Por outro lado, o elogio de Dirac à gravitação relativista era exagerado em 1982, pois ainda não havia elementos para tal avaliação. Hoje sabe-se que, em pelo menos uma de suas aplicações — a cosmologia — a gravitação einsteiniana encontra sérios problemas (cf. [7]).

A TRG possui soluções para problemas particulares que já foram comprovadas de maneira inegável (cf. relatado em [7, 8]). Pode-se concluir, no entanto, a partir do item E acima, que Dirac acredita que a TRG ainda não é totalmente satisfatória. Pelo menos enquanto não se saber se o tempo de Einstein difere ou não do tempo atômico. E se diferir, como a diferença é quantificada. A existência desta diferença pode influenciar de maneira fundamental as aplicações astronômicas de grande escala, a saber, a cosmologia. A cosmologia relativista, como dito acima, apresenta muitos problemas (ver uma lista deles em [9]).

## Referências

- [1] P. Dirac e F. Hund, *Paul Dirac Interview, Göttingen 1982*, <https://youtu.be/Et8-gg6XNDY?t=0> (1982).
- [2] D. Soares, *Os fundamentos físico-matemáticos da cosmologia relativista in Tópicos em cosmologia relativista*, <https://www.researchgate.net/publication/338842995> (2020).

- [3] NASA Mars Exploration Program, *Viking 1 & 2*,  
<https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/viking-1-2/>
- [4] R.W. Hellings, P. J. Adams, J. D. Anderson, M.S. Keeseey, E.L. Lau, E.M. Standish, V.M. Canuto e I. Goldman, *Experimental Test of the Variability of G Using Viking Lander Ranging Data*, Physical Review Letters, v. 51, n. 18, 1609, <https://www.researchgate.net/publication/23912447> (1983).
- [5] B. Guinot e E.F. Arias, *Atomic time-keeping from 1955 to the present*, Metrologia, v. 42, n. 3, S20,  
<https://www.researchgate.net/publication/231061914> (2005).
- [6] N. Ashby, T.E. Parker e B.R. Patla, *A null test of general relativity based on a long-term comparison of atomic transition frequencies*, Nature Physics, v. 14, n. 8, 822, <https://www.researchgate.net/publication/325552081> (2018).
- [7] D. Soares, *Uma pedra no caminho da Teoria da Relatividade Geral in Tópicos em cosmologia relativista*,  
<https://www.researchgate.net/publication/338842995> (2020).
- [8] D. Soares, *De Schwarzschild a Newton in Tópicos em cosmologia relativista*, <https://www.researchgate.net/publication/338842995> (2020).
- [9] D. Soares, *Universo do Estrondão Quente*,  
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/extn/ueq/ueq.htm> (2016).