

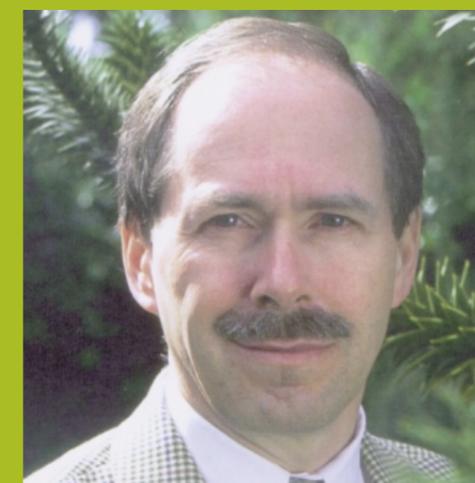
O Prémio Nobel da Física de 1999



Martinus Veltman



CERN



Gerardus 't Hooft

Jorge C. Romão*

O Prémio Nobel da Física de 1999 foi atribuído conjuntamente aos professores Martinus Veltman e Gerardus 't Hooft, respectivamente da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos, e da Universidade de Utrecht, na Holanda. A citação da Academia Sueca no anúncio do prémio diz que receberam o prémio “por terem elucidado a estrutura quântica da teoria das interacções electrofracas”. Alguém mais dentro do assunto poderia dizer que eles colocaram a teoria da física das partículas elementares numa base matemática sólida. Em particular, eles mostraram como se pode usar a teoria para calcular com grande precisão certas grandezas físicas. Experiências nos grandes aceleradores de partículas europeus e norte-americanos confirmaram nas últimas duas décadas muitos desses cálculos, colocando a teoria das interacções electrofracas ao mesmo nível de precisão que a electrodinâmica quântica tinha adquirido nos anos 50. Neste artigo procurarei clarificar para o não-especialista algumas das afirmações anteriores.

A Física de Partículas moderna

A matéria à nossa volta é constituída por átomos que, por sua vez, são feitos de electrões e núcleos atómicos. Nos núcleos existem protões e neutrões que, por sua vez, são feitos de quarks [1]. Para estudar a matéria a este nível elementar são necessários grandes aceleradores. Estas máquinas apareceram na década a seguir à Segunda Guerra Mundial tanto nos Estados Unidos como na Europa (com a criação do CERN, Laboratório Europeu de Física de Partículas). Foi então possível estudar aquelas partículas elementares, criar outras que não existem na matéria normal e estudar as forças ou interacções que existem entre elas. Ficou então claro que existem entre as partículas elementares os quatro tipos de interacções fundamentais indicados na Tabela 1. Durante os últimos 50 anos grandes progressos foram feitos na compreensão destas interacções fundamentais da Natureza. Nas secções seguintes daremos uma ideia do modo como se conseguiu essa compreensão e como os trabalhos de Veltman e 't Hooft aí se inserem.

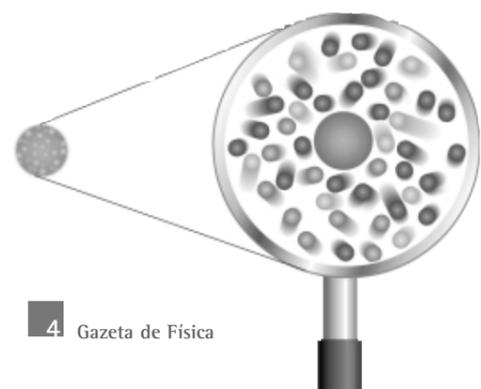
Força	Descoberta	Relevância
Gravitacional	Séc. XVII	Corpos Macroscópicos
Electromagnética	Séc. XIX	Estrutura Atómica
Fraca	Séc. XX	Desintegração Radioactiva
Forte	Séc. XX	Coesão dos Núcleos

Tabela 1. As interacções fundamentais

O caminho da unificação

Desde Isaac Newton que o caminho para a compreensão da Natureza tem sido o de relacionar fenómenos aparentemente distintos numa mesma teoria. Em linguagem moderna pode dizer-se que a descoberta de Newton sobre a causa comum da queda dos corpos e do movimento dos planetas é a primeira unificação: as massas inercial e gravítica são iguais. Em 1860 deu-se um outro passo importante nesse sentido. O físico escocês James Clark Maxwell mostrou que a electricidade e o magnetismo eram dois aspectos diferentes duma mesma realidade descrita pela teoria hoje designada por electro-magnetismo e que previu, entre outras coisas, a existência de ondas de rádio.

Os avanços deste século no sentido da unificação têm a ver com a descoberta duma simetria de que o próprio electromagnetismo de Maxwell é o paradigma. Essa simetria ou invariância designa-se por *simetria de padrão* (em inglês “*gauge symmetry*”). Ao nível clássico esta invariância explica-se de modo simples. Os campos eléctrico e magnético podem ser calculados usando os chamados potenciais. Estes podem ser transformados de acordo com uma certa regra sem alterar o valor dos campos. Tal transformação designa-se por *transformação de padrão*, dizendo-se que a teoria tem uma *simetria de padrão* (“*gauge*”). O exemplo mais simples consiste em adicionar uma constante ao potencial eléctrico. Fisicamente esta invariância está relacionada com o facto



de só serem relevantes diferenças de potencial: o zero do potencial é arbitrário [a].

No electromagnetismo a ordem com que se processam as transformações de padrão é irrelevante. Se designarmos por ϕ eléctrico e fizermos duas transformações sucessivas

$$\begin{aligned} \phi &\xrightarrow{1} \phi_1 \xrightarrow{2} \phi_{12} \\ \phi &\xrightarrow{2} \phi_2 \xrightarrow{1} \phi_{21} \end{aligned}$$

então devemos ter $\phi_{12} = \phi_{21}$. Matematicamente dizemos que o electromagnetismo é uma teoria *abeliana*.

Este nome vem do matemático norueguês Niels Henrik Abel (1802-1829). O exemplo mais simples de uma transformação abeliana é uma série de rotações em torno de um eixo. Se rodar um objecto em torno de um eixo primeiro de 45° e depois de 30° obtenho o mesmo resultado que se rodar primeiro 30° e depois 45° .

Problemas com a mecânica quântica

O electromagnetismo passou sem problemas pela revolução da teoria da relatividade. De facto, o electromagnetismo é uma teoria relativista à partida [b] e foi ele que forçou o aparecimento da teoria da relatividade de Albert Einstein em 1905. Depois da descoberta da mecânica quântica, cerca de 1925, por Erwin Schroedinger, Werner Heisenberg, Max Born e outros, várias tentativas foram feitas para unificar o electromagnetismo com a mecânica quântica naquilo que viria a ser conhecido por *electrodinâmica quântica* (QED, da designação em inglês "*Quantum Electro-Dynamics*"). Como se sabe da mecânica quântica, muito poucos problemas podem ser resolvidos exactamente. Normalmente temos que recorrer a métodos aproximados, nomeadamente a métodos perturbativos. Ora, quando se calculava em QED para além da ordem mais baixa, obtinham-se frequentemente resultados sem sentido, muitas vezes um valor infinito em vez de uma pequena correcção à ordem anterior, como seria de esperar do método perturbativo. Parte da razão reside no facto de que a teoria prevê que os campos electromagnéticos a muita curta distância de um electrão possam gerar grandes quantidades de pares electrão-positrão (o positrão é a anti-partícula do electrão) que existem durante um intervalo de tempo muito curto. Assim, não mais é possível descrever o sistema com base numa função de onda de um só electrão. O problema passou a incluir um número variável de partículas, o objecto de estudo daquilo que se veio a designar por *teoria quântica dos campos*.

O problema da QED foi resolvido nos anos 40 por Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger e Richard P. Feynman, que partilharam o Prémio Nobel da Física em 1965 pelas suas contribuições. O método desenvolvido pelos três é chamado *renormalização*. De modo simplificado, podemos

dizer que, se olharmos para o electrão à distância, a *nuvem* de pares electrão-positrão modifica (*renormaliza*) a carga e a massa do electrão. O efeito destes pares pode ser visto como se o vácuo fosse um meio dieléctrico modificando as propriedades do electrão.

A electrodinâmica quântica foi testada nas décadas seguintes tendo-se obtido um acordo extraordinário entre a experiência e a teoria. Só para dar um exemplo, o momento magnético do electrão é medido com uma precisão de 12 dígitos e os primeiros 10 estão em acordo com os cálculos de QED [c]. Saliente-se que, para se obter esta precisão, é necessário calcular até à quarta ordem da série perturbativa fazendo uso intensivo dos métodos da renormalização.

A unificação do electromagnetismo e da interacção fraca

A descoberta da radioactividade e o desenvolvimento da física atómica nas primeiras décadas do século XX levaram à identificação das interacções fortes e fracas. As interacções fortes são responsáveis pela estabilidade do núcleo atómico, vencendo a repulsão da força de Coulomb existente entre os prótons por serem partículas com a mesma carga eléctrica. Por outro lado, as interacções fracas são responsáveis por certas formas de radioactividade, permitindo que alguns núcleos decaiam através da transformação de neutrões em prótons com emissão de electrões e neutrinos, processo designado por *decaimento beta*, ou pelo processo inverso. As designações forte e fraca têm a ver com a intensidade relativa destas interacções, conforme indicado na Tabela 2, em unidades arbitrárias e tomando como referência a força forte. Apesar da sua fraca intensidade, as interacções fracas desempenham um papel crucial na evolução do Universo e na criação de condições para o desenvolvimento da vida por serem responsáveis pelas reacções que alimentam as estrelas, como é o caso do Sol.

Força	Intensidade	Alcance
Forte	1	< 10 ⁻¹⁵ m
Electromagnética	10 ⁻²	Infinito
Fraca	10 ⁻⁵	< 10 ⁻¹⁸ m
Gravitacional	10 ⁻⁴⁰	Infinito

Tabela 2. Intensidade e alcance das interacções fundamentais.

Nos anos 1930-40 foi formulada a primeira teoria para o decaimento beta pelo fisico italiano Enrico Fermi. Esta teoria foi construída um pouco à semelhança de QED mas, quando se calculava com ela, os problemas eram muito piores que os encontrados em QED e mesmo os métodos de Tomonaga, Schwinger e Feynman não conseguiam resolver esses problemas. A diferença fundamental entre QED e as interacções fracas tem origem na diferença de

alcance entre estas duas forças. Enquanto o electromagnetismo tem alcance infinito, a força fraca tem um alcance muito curto, muito inferior à dimensão do núcleo que é da ordem de 1 fermi = 10^{-15} m, isto é cem mil vezes menor que a dimensão característica dos átomos, que é $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m (ver Tabela 2). Nos anos 30 o físico japonês Yukawa propôs que a energia potencial correspondente a uma dada interacção devia depender da distância r ao centro de forças de acordo com

$$V(r) = g \frac{e^{-\frac{c}{h}Mr}}{r}$$

onde g é uma constante que tem a ver com a *intensidade* da força (ver Tabela 2), c e h são, respectivamente, a velocidade da luz no vácuo e a constante de Planck e M a massa da partícula responsável pela interacção. Seguindo estas ideias dizemos que o electromagnetismo tem alcance infinito ($V \sim 1/r$) porque o fóton responsável pela interacção electromagnética tem massa nula, enquanto o curto alcance das interacções fracas deve ser explicado pelo facto de as partículas responsáveis por essa interacção terem uma massa muito grande.

Como muitas vezes acontece em Física, a solução do problema da teoria das interacções fracas veio por uma via que, à primeira vista, não tinha nada a ver com o problema. Nos anos 1950-60 os físicos norte-americanos Charles Young e Robert Mills formularam uma teoria quântica de campo com invariância de padrão para um *grupo não abeliano*. Num grupo não abeliano é importante a ordem pela qual as transformações são efectuadas [d].

A relevância destas teorias não abelianas para a interacção fraca só foi compreendida no começo da década de 60, depois dos trabalhos do físico escocês Peter Higgs sobre a quebra espontânea de simetria nestas teorias não abelianas. A ideia é que a Natureza pode *escolher* um estado fundamental (o *vácuo*, como se designa em teoria quântica dos campos) com simetria menor que a teoria inicial [e]. Neste processo algumas partículas sem massa associadas à teoria não abeliana adquirem massa, enquanto outras que correspondem às simetrias não quebradas permanecem sem massa. O processo, designado por *mecanismo de Higgs*, permitiu o desenvolvimento de uma teoria não abeliana que unifica a interacção electromagnética com a interacção fraca, naquilo que hoje se designa por interacção electrofraca. Os físicos norte-americanos Sheldon Glashow e Steven Weinberg, conjuntamente com o físico paquistanês Abdus Salam, receberam o Prémio Nobel da Física de 1979 pelas suas contribuições para esta teoria. Ela previa a existência de novas partículas, o W^\pm e o Z^0 , que eram os responsáveis pela força fraca, e que deveriam ter massa elevada (da ordem de 80 a 90 vezes a massa do protão), o que explica o curto alcance dessas interacções. Depois da quebra

de simetria permanece uma simetria abeliana a que corresponde o fóton da interacção electromagnética. A descoberta em 1983, no CERN, dessas partículas veio confirmar estas ideias (o Prémio Nobel da Física em 1984 foi dado a Carlo Rubbia e a Simon van der Meer).

A contribuição de Veltman e 't Hooft

A teoria electrofraca foi um passo importante na compreensão da estrutura das interacções fracas e electromagnéticas, mas não resolveu todos os problemas. De facto, quando se usava a teoria para cálculos além da primeira aproximação apareciam problemas semelhantes aos de QED antes dos trabalhos de Tomonaga, Schwinger e Feynman. A aplicação do método da renormalização de QED na teoria electrofraca não resolvia o problema e muitos investigadores tinham a opinião que não seria possível efectuar cálculos precisos com a teoria electrofraca. Assim, o modelo de Weinberg, Salam e Glashow para as interacções electrofracas não seria mais do que um modelo fenomenológico sem o estatuto de teoria consistente que a QED tinha adquirido para as interacções electromagnéticas.

Entre aqueles que sempre acreditaram ser possível renormalizar as teorias não abelianas estava Martinus Veltman, então professor na Universidade de Utrecht, na Holanda. Durante anos Veltman trabalhou neste problema quase sozinho. O trabalho computacional em teoria quântica dos campos é bastante complexo mas tinha sido simplificado por Feynman com a introdução dos seus famosos *diagramas de Feynman*. Estes diagramas continham ao mesmo tempo uma representação pictórica do processo em estudo e uma forma, através das chamadas *regras de Feynman*, de lhe fazer corresponder uma expressão matemática. O método tinha funcionado maravilhosamente em QED, mas nas teorias não abelianas o número de diagramas é muito maior, o que torna o cálculo muito mais complicado. Para automatizar estes cálculos Veltman desenvolveu um programa de computador, designado por *Schoonschip*, que permitia fazer cálculos algébricos usando símbolos, um precursor de programas actuais como, por exemplo, o *Maple* ou o *Mathematica*. Este programa desempenhou um papel muito importante na verificação dos cálculos.

Em 1969 Gerardus 't Hooft iniciou os seus estudos de doutoramento sob a supervisão de Veltman na Universidade de Utrecht. O seu programa de doutoramento era precisamente a renormalização das teorias não abelianas com invariância de padrão. A genialidade de 't Hooft e todo o trabalho anterior de Veltman permitiram que o problema estivesse resolvido em 1971. Primeiro mostraram que era possível renormalizar uma teoria não abeliana sem quebra de simetria, isto é, uma teoria de Yang-Mills. Como vimos, este caso corresponde à situação em que as partículas

associadas a essa interacção (os análogos do fóton) não têm massa. Depois mostraram que, no caso de teorias não abelianas em que as partículas associadas a essa interacção adquirem massa depois da quebra espontânea de simetria (*mecanismo de Higgs*), como acontece nas interacções electrofracas, a demonstração continuava válida. Com a ajuda do programa *Schoonschip*, os resultados de 't Hooft foram verificados e a teoria não abeliana das interacções electrofracas adquiriu a possibilidade de efectuar cálculos precisos tal como tinha acontecido com a QED 20 anos antes. Veltman e 't Hooft introduziram também uma nova técnica para tratar as divergências que aparecem nos cálculos intermédios. Esta técnica, designada por *regularização dimensional* e que consiste em modificar temporariamente o número de dimensões do espaço quando se efectuam os cálculos, tornou-se um instrumento essencial no programa da renormalização permitindo mesmo simplificar a demonstração para o caso de QED. O artigo em que este método é introduzido é justamente um dos quatro citados pela Academia Sueca no anúncio do prémio [2]. Estes métodos permitiram calcular as massas do W^\pm e o Z^0 com grande precisão, o que veio a ser confirmado em 1983 com a sua descoberta no CERN. Posteriormente, o acelerador LEP (*“Large Electron-Positron”*) no CERN permitiu produzir grandes quantidades de partículas Z e W e verificar as previsões da teoria electrofraca com uma precisão extraordinária. Podemos dizer que a teoria electrofraca tem hoje o mesmo nível de precisão que a QED [3, 4].

Conclusão

As experiências efectuadas no acelerador LEP no CERN durante a última década demonstraram com grande precisão a capacidade de cálculo da teoria não abeliana com invariância de padrão que descreve as interacções electrofracas. O Prémio Nobel da Física de 1999 foi atribuído a Veltman e 't Hooft por terem descoberto os meios para efectuar esses cálculos precisos. Há, no entanto, ainda uma questão por esclarecer [f]. Um ingrediente essencial no esquema é a existência de uma outra partícula, designada por bóson de Higgs. Esta partícula, cuja existência é uma consequência do mecanismo de Higgs que, como vimos, é responsável pelo facto das partículas W e Z terem massa, ainda não foi descoberta. Ao que tudo indica neste momento, o único acelerador com energia suficiente para produzir o bóson de Higgs será o LHC (*“Large Hadron Collider”*), presente-mente a ser construído no CERN e cuja entrada em funcionamento está prevista para 2005. Teremos ainda de esperar alguns anos antes de estar mostrada a consistência completa da teoria electrofraca.

* Departamento de Física, Instituto Superior Técnico

Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa

fromao@alfa.ist.utl.pt

Notas

- [a] Os pássaros que pousam nos cabos de alta tensão também já descobriram esta lei da Natureza.
- [b] Correndo o risco de ser trivial, pode dizer-se que a luz se propaga à velocidade da luz.
- [c] De facto, para ir além dos 10 dígitos é preciso introduzir as interacções fracas e fortes.
- [d] Um exemplo simples de um grupo não abeliano é o grupo cujos elementos são as matrizes 2×2 com a operação a multiplicação de matrizes. Então, se A e B forem duas destas matrizes, em geral $AB \neq BA$. Isto dá origem a uma estrutura matemática mais complicada, e sem ligação aparente com as interacções fracas, pois as partículas associadas a essas teorias (os análogos do fóton) deviam ter massa nula.
- [e] Uma imagem por vezes usada é a seguinte. Consideremos uma vara flexível colocada na vertical. Na extremidade superior da vara actua uma força, também vertical, que comprime a vara. Sabemos que a vara vai flectir, mas a priori todas as direcções são igualmente possíveis. Dizemos que há uma simetria. Contudo depois de a vara flectir há uma direcção que foi escolhida e dizemos que a simetria foi quebrada.
- [f] Estou, claro, a simplificar. Há muitas questões ainda por esclarecer, só que, neste contexto, esta parece ser a mais importante.

Referências

- [1] Barroso, A., “De que são feitas as coisas”, Colóquio Ciências, Outubro de 1988 (uma introdução elementar).
- [2] <http://www.nobel.se/announcement-99/physics99.html> (“Site” da Real Academia Sueca das Ciências, onde pode ser encontrada muita informação).
- [3] 't Hooft, G., “Gauge Theories of the forces between elementary particles”, Scientific American, June 1980.
- [4] Veltman, M., “The Higgs Boson”, Scientific American, November 1986.

