



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Renormalização da Força (Interação) Fraca, os Físicos Argentinos Bollini e Giambiagi, e o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 1999.

No dia 10 de dezembro de 1999, dia em que se comemora a morte do sueco Alfred Bernhard Nobel (1833-1896), químico, engenheiro, industrial e inventor da dinamite, a *Real Academia Sueca de Ciências* entregou o PNF aos físicos holandeses Gerardus 't Hooft (n. 1946) e Martinus Justinus Godefridus Veltman (n. 1931), por desenvolverem trabalhos relacionados com a **renormalização da interação fraca**, trabalhos esses que foram fundamentais para o entendimento da unificação das forças eletromagnética e fraca, hoje conhecida como **força eletrofraca** (vide verbete nesta série).

Filho de um engenheiro naval, 't Hooft foi estimulado pelo seu pai para gostar de engenharia, razão pela qual lhe deu o famoso brinquedo *Mecano*. No entanto, como 't Hooft gostava de descobrir coisas novas, ele sempre construía brinquedos que não constavam no Manual do *Mecano*. Esse mesmo fascínio pelo novo o acompanhou enquanto estudante da *Escola Primária* e no *Liceu Dalton*, ambos situados em The Hague, cidade próxima de sua cidade natal Den Helder, na Holanda. Quando era aluno da *High School* (HBC, em holandês), 't Hooft participou, em 1962, da *Segunda Olimpíada de Matemática Nacional Holandesa*, ficando com o segundo lugar. Ao concluir a HBC, em 1964, escolheu a *Universidade Estadual de Utrecht* para estudar Física, onde seu tio, o físico holandês Nicolaas Godfried van Kampen (n.1921), era professor de Física Teórica. Ao concluir sua graduação, em 1968, seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi orientado e julgado por Veltman, especialista em Física de Partículas Elementares, que havia sido admitido naquela Universidade, em 1966, como Professor de Física Teórica, substituindo o físico belga Léon von Hove (1924-1990). Registre-se que Veltman foi também seu orientador de Doutorado, cuja tese foi defendida em 1972, ainda em Utrecht, como veremos mais adiante.

Em 1943, Veltman iniciou sua *High School* (HS) em Waalwijk, sua cidade natal holandesa, concluída em 1948. Sua habilidade em eletrônica o tornava candidato a uma *Escola Técnica* (MTS, em holandês) de nível médio localizada em Hertogenbosch. Contudo, Mr. Beunes, seu professor de física da HS, sugeriu aos pais de Veltman que o mandassem para a Universidade. Assim, a

Universidade de Utrecht (UU) foi a escolhida. Depois de cinco anos nessa Universidade, ao concluir seu exame final, Veltman esbarrou com um livro popular sobre a Teoria da Relatividade. Empolgado com esse livro e desejando aprender mais, dirigiu-se à Biblioteca do Instituto de Física Teórica da UU e conseguiu, depois de muita insistência, tomar emprestado o famoso livro do físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), intitulado **The Meaning of Relativity**, publicado pela Princeton University Press, em 1921. Sua paixão pela Física foi imediata.

Em 1955, van Hove chegou em Utrecht, e Veltman logo candidatou-se para escrever as *Notas de Aula* dos cursos por ele ministrados, surgindo daí uma grande amizade entre eles. Depois de concluir sua graduação, em 1956, e realizar o Serviço Militar, concluído em fevereiro de 1959, Veltman iniciou seu Doutorado com van Hove. Ao se tornar Diretor da Divisão Teórica do *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN), em Genebra, Suíça, em 1960, van Hove convidou Veltman para trabalhar nesse grande laboratório de pesquisa, o que ocorreu em 1961. Lá, contando com o auxílio do físico norte-americano Sam Berman, completou sua Tese de Doutorado, iniciada com van Hove em Utrecht, calculando as correções coulombianas à produção de **bósons vetoriais** intermediários de uma experiência sobre neutrinos (ν) que estava sendo realizada no CERN. Essa Tese foi defendida em 22 de abril de 1963, na UU e publicada nesse mesmo ano na *Physica* **29**, p. 186. É interessante destacar que Veltman, ao desenvolver seu trabalho de doutorado, aprendeu a trabalhar com os **diagramas de Feynman** (dF), sem, contudo, usar a técnica das **integrais de caminho feynmanianas** (ICF).

O início do trabalho conjunto de 't Hooft e de Veltman e que levou os dois ao Nobelato99, ocorreu quando 't Hooft escolheu Veltman para ser o orientador de seu programa de Doutorado, iniciado em 1969. Assim, Veltman pedia a 't Hooft que estudasse a famosa teoria de *gauge* não-abeliana (vide verbete nesta série) desenvolvida pelos físicos norte-americanos Chen Ning Yang (n.1922; PNF, 1957) (de origem chinesa) e Robert Laurence Mills (n.1927), em 1954, e, independentemente, pelo físico inglês Robert Shaw (n.1929), em Sua Tese de Doutorado defendida na *Universidade de Cambridge*, em 1955, sob a orientação do físico paquistanês Abdus Salam (1926-1996; PNF, 1979). Contudo, advertiu Veltman, essa Teoria de Yang-Mills-Shaw (TYMS) apresentava uma grande dificuldade, uma vez que descrevia três partículas não-massivas de spin unitário, conhecidos como **bósons vetoriais** (bv). Ora, enquanto uma delas poderia corresponder ao **fóton** (γ), partícula não-massiva mediadora da interação eletromagnética (vide verbete nesta série), as outras duas não existiam na Natureza. Além do mais, essa teoria era **não-renormalizável** para bósons massivos, como as partículas (W^\pm e Z^0) mediadoras, respectivamente, da

interação fraca com corrente elétrica carregada e neutra (vide verbete nesta série), e, portanto, não poderia ser usada para explicá-las. Porém, completou Veltman, tais dificuldades poderiam ser contornadas com a **renormalização** dessa teoria. E o caminho seria por intermédio da **quebra espontânea de simetria** (QES). Antes de mostrar como 't Hooft e Veltman chegaram a essa **renormalização**, vejamos como ocorreu a **renormalização** da QED (“Quantum Electrodynamics”), que serviu de *leitmotiv* para o trabalho desses físicos holandeses.

Conforme vimos em verbetes desta série, o tratamento quântico da Eletrodinâmica, a hoje famosa QED, foi apresentado pelo físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933), em 1927, em seu histórico trabalho no qual abordou a emissão e a absorção da radiação eletromagnética sob o ponto de vista quântico. Contudo, a aplicação desse tratamento ao estudo da interação da radiação eletromagnética com partículas puntiformes carregadas, principalmente elétrons (e^-) e pósitrons (e^+), ou no estudo da interação entre tais partículas, envolvia integrais de valores infinitos. Esses infinitos decorriam, basicamente, da inconsistência entre os valores teóricos e os valores experimentais da carga (e) e da massa (m) do elétron e do pósitron. Os primeiros trabalhos no sentido de remover esses infinitos foram realizados, em 1936, pelo físico norte-americano Robert Serber (1909-1997); em 1938, pelo físico holandês Hendrik Anthony Kramers (1894-1952); e, em 1943, pelo físico japonês Sin-itiro Tomonaga (1906-1979; PNF, 1965). O estudo completo da eliminação desses infinitos na Eletrodinâmica Quântica, conhecida como **Eletrodinâmica Quântica Renormalizável**, foi completado, entre 1948 e 1949, nos trabalhos dos físicos, os norte-americanos Robert Phillips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) e Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965), e o inglês Freeman John Dyson (n.1923). Registre-se que, de um modo geral, a **renormalização** (termo cunhado por Serber) é um método pelo qual os infinitos de uma Teoria de Campos (TC) são absorvidos em seus parâmetros livres, de modo que resultam valores finitos nos cálculos, em todas as ordens de perturbação, para todos os observáveis envolvidos nos fenômenos físicos tratados pela TC.

Ainda segundo verbetes apresentados nesta série, em 1934, tomando como modelo a QED de Dirac, o físico ítalo-norte-americano Enrico Fermi (1901-1954; PNF, 1938) sugeriu que no **decaimento beta** (“ β -decay”), um nêutron (n) se transforma em um próton (p), emitindo um elétron (e^-) e o neutrino (ν), partícula esta proposta pelo físico austro-suíço-norte-americano Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945), em 1930. Esse decaimento, segundo Fermi, ocorre por intermédio de um novo processo físico, mais tarde denominado de **força (interação) fraca**. Em 1938, o físico sueco Oskar Benjamin Klein (1894-1977)

sugeriu que bv carregados e massivos, aos quais denominou de W (provavelmente da palavra “weak”, fraco em inglês), seriam os mediadores dessa força. Assim o “ β -decay” seria dado por: $n \rightarrow p + W^-$, completado pelo decaimento $W^- \rightarrow e^- + \nu$, sendo a constante de acoplamento (g_w) para tal processo o mesmo da força (interação) eletromagnética, isto é, a **constante de estrutura fina** α . Essa igualdade significava uma unificação entre as forças eletromagnética e fraca – a **força eletrofraca** -, que ocorreria mais tarde, na década de 1960.

As primeiras tentativas no sentido de concretizar essa unificação foram desenvolvidas na segunda metade da década de 1950, nos trabalhos realizados, em 1957, por Schwinger; em 1958 e, independentemente, pelos físicos, o brasileiro José Leite Lopes (1918-2006) (com a previsão da partícula Z^0), os norte-americanos Sidney Arnold Bludman (n.1927), Gerald Feinberg (1933-1992) e Sheldon Lee Glashow (n.1932; PNF, 1979) (em sua Tese de Doutorado orientada por Schwinger); em 1959, por Salam e o físico inglês John Clive Ward (1924-2000), e, independentemente, pelo físico norte-americano Murray Gell-Mann (n.1929; PNF, 1969).

A consolidação da unificação acima referida ocorreu na década de 1960. Ainda usando verbetes escritos para esta série, vimos que, em 1961, Glashow desenvolveu um modelo méson-vetorial da **força fraca** baseado no grupo de *simetria gauge* $SU(2) \otimes SU(1)$. Esse modelo requeria a existência de quatro (4) **bósons vetoriais** (bv): o fóton (γ) e as partículas massivas (W^\pm, Z^0), sendo estas mediadoras da **força fraca**, segundo referimos acima. Embora esse modelo representasse uma unificação entre as duas forças (**eletromagnética e fraca**), a quebra de simetria desse modelo era resolvida com a colocação “à mão”, de mésons massivos intermediários. Uma teoria de unificação análoga a essa de Glashow foi desenvolvida pelo físico norte-americano Steven Weinberg (n.1933; PNF, 1979), em 1967, e por Salam, em 1968. No entanto, diferentemente de Glashow, esses dois físicos consideraram a **quebra espontânea de simetria** (QES) como mecanismo para gerar massas às partículas mediadoras da **força ou interação fraca**, o qual requer a existência de uma partícula de spin 0, o conhecido **bóson de Higgs**, conforme veremos a seguir. Em seus trabalhos, Weinberg e Salam afirmaram que o modelo que desenvolveram, independentemente, poderia ser renormalizável, mas não indicaram a maneira de fazê-lo. É oportuno destacar que Salam, em 1962 (*Physical Review* **127**, p. 331), havia provado que a TYMS era não-renormalizável.

Segundo vimos em verbete desta série, a QES na TYMS havia sido descoberta, independentemente, nos trabalhos dos físicos, o japonês Yoshiro Nambu (n.1921; PNF, 2008), em 1960, e o inglês Jeffrey Goldstone (n.1933), em 1961, e, também, em 1961, por Nambu e pelo físico italiano Giovanni Jona-

Laginio (n.1932). Essa QES era acompanhada de partículas não-massivas, logo denominadas de **bósons de Goldstone** (bG). Em 1963, o físico norte-americano Philip Warren Anderson (n.1923; PNF, 1977) discutiu essa *quebra de simetria* na matéria condensada. Em 1964, em trabalhos independentes, os físicos, os ingleses Peter Ware Higgs (n.1929); G. S. Guralnik, C. R. Hagen e Thomas Walter Bannerman Kibble (n.1932) (de origem indiana); e os belgas François Englert (n.1932) e Robert Brout (n.1928) encontraram um mecanismo que tornava massivos os bG. Esse mecanismo ficou conhecido como **mecanismo de Higgs**, e o bóson de spin 0 correspondente de tal mecanismo, como **bóson de Higgs** (bH) que, no entanto, até o presente momento (março de 2011) ainda não foi detectado.

Vejamos, agora, como 't Hooft e Veltman desenvolveram a **renormalização** da TYMS. Segundo vimos anteriormente, em 1969, Veltman aceitara 't Hooft como aluno de doutoramento, ocasião em que lhe pediu para estudar a TYMS, uma vez que, nos trabalhos que realizara até então, concluía que essa teoria poderia ser **renormalizada**. Vejamos como ele chegou a essa conclusão. Em 1961, Glashow demonstrou, como referimos antes, a necessidade da presença de ν na **interação fraca**. Logo em 1962, os físicos sino-norte-americanos Tsung-Dao Lee (n.1926; PNF, 1957) e Yang estudaram a interação fóton-bóson vetorial (γ - ν), e observaram que o **momento magnético** do ν , até então desconhecido, deveria ser considerado como um parâmetro arbitrário. Por outro lado, em trabalho realizado ainda em 1962 (*Physical Review* **128**, p. 899), Lee calculou o **momento de quadrupolo elétrico** do ν usando um processo envolvendo um *cutoff* conhecido como processo **limite- ξ** .

Estudando o **limite- ξ** de Lee, Veltman estendeu-o para calcular as primeiras correções radiativas da interação γ - ν . Contudo, o “coração” do cálculo a ser realizado envolvia a computação de um diagrama triangular, cujos lados eram os ν , com cerca de 50.000 termos intermediários. Em vista disso, desenvolveu um programa computacional, denominado por ele de *Schoonschip* (em holandês coloquial significa “aclarar um resultado”), completado em 1963, para estudar as correções radiativas acima referidas. Em 1964, Veltman participou de um evento promovido pela *American Physical Society*, em New York, ocasião em que se encontrou com Tsung Lee e lhe falou de seu programa computacional. Embora Tsung Lee haja mostrado certa indiferença na exposição feita por Veltman, logo que este deixou NY, solicitou de um de seus colaboradores que desenvolvesse um programa semelhante. De volta a Utrecht, Veltman retomou o cálculo das correções radiativas no qual estava trabalhando. Depois de pesquisar vários valores do **momento magnético** do ν envolvidos nesse cálculo, encontrou um que conseguiu minimizar o grau e o número de infinitos na computação realizada. O valor que havia escolhido coincidia com o

especificado pela TYMS, conforme mais tarde verificou quando passou a estudar essa teoria.

O interesse de Veltman pela TYMS intensificou-se quando estudou os artigos, de 1965, escritos independentemente pelos físicos norte-americanos William I. Weisberger (n.1937) (*Physical Review Letters* **14**, p. 1047) e Stephen L. Adler (n.1939) (*Physical Review Letters* **14**, p. 1051), nos quais deduziram a famosa relação entre a constante de acoplamento vetor axial (g_A) do decaimento β e a integral de dispersão do espalhamento pión-núcleon (π -N). Essa relação, que concordava muito bem com os dados experimentais, era baseada na Álgebra de Comutação de Correntes desenvolvida por Gell-Mann, em 1964 (*Physics* **1**, p. 63). Em 1966 (*Physical Review Letters* **17**, p. 553), Veltman deduziu essa mesma relação por intermédio da TYMS, porém, encontrou equações modificadas para a conservação das correntes fracas, às quais denominou **condições de divergência**. Logo depois, em 1967 (*Nuovo Cimento* **A50**, p. 129), o físico inglês John Stuart Bell (1928-1990) mostrou que essas condições decorriam de uma teoria de *gauge*. Em vista disso, Veltman iniciou um estudo sistemático da TWMS com campos carregados massivos, onde as massas das partículas vetoriais (bv) eram consideradas como parâmetros, e examinou cada laço (“loop”) dos dF, para entender o aparecimento dos infinitos. Assim, introduzindo uma nova técnica em seus cálculos, uma transformação de *gauge*, Veltman eliminou quase todos os infinitos do primeiro “loop”. Nesse processo de eliminação, permaneceu um *fantasma* (“ghost”), uma partícula de spin 0 e que obedecia à **estatística de Fermi** (vide verbete nesta série). Contudo, o exame dos demais laços mostrou que os infinitos permaneciam. Nesse trabalho, que foi publicado em 1968 (*Nuclear Physics* **B7**, p. 637), Veltman generalizou a **identidade de Ward** [Em 1950 (*Physical Review* **77**; **78**, p. 293; 182), Ward demonstrou, em forma de identidade, que a **renormalização** da carga elétrica era devida somente à **renormalização** do propagador do fóton]. É oportuno destacar que Veltman aprendera a trabalhar com os dF, sem usar a técnica das **integrais de caminho feynmanianas** (ICF), ao desenvolver sua Tese de Doutorado, segundo afirmamos anteriormente.

Em 1967 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A301**, p. 107), ao aplicar suas **condições de divergência** ao decaimento do pión neutro (π^0), Veltman demonstrou formalmente que esse méson não poderia decair em dois fótons (γ), muito embora outros cálculos (por exemplo, via **relações de dispersão**) desse decaimento indicassem o contrário. Essa anomalia foi confirmada em trabalhos independentes realizados, em 1969, por Bell e o físico polonês norte-americano Roman Wladimir Jackiw (n.1939) (*Nuovo Cimento* **A60**, p. 47), e por Adler (*Physical Review* **177**, p. 2426). Ainda em 1969 (*Nuclear Physics* **B13**, p. 545), J. Reiff e Veltman trabalharam com diagramas de dois laços na

TYMS massiva e mostraram que o seu limite de massa nula não levava à TYMS não-massiva. Um resultado análogo a esse, porém com diagramas de um só laço, foi conseguido pelos físicos russos A. A. Slavnov e Ludwig D. Faddeev (n.1934), em 1970 (*Theoretical and Mathematical Physics* **3**, p. 18). Ainda em 1970 (*Nuclear Physics* **B22**, p. 397), Henk Van Dam e Veltman aplicaram a TYMS à gravitação e encontraram um resultado surpreendente: o limite de grávitons massivos para os de massa nula não reproduz os grávitons não-massivos da gravitação einsteniana (vide verbete nesta série). Aliás, o tratamento quântico da gravitação permanece ainda, em março de 2011, um dos problemas em aberto da Física.

A dificuldade com a **anomalia de Adler-Bell-Jackiw**, que demandava a **renormalização** da TYMS, foi um dos problemas apresentados por Veltman ao seu aluno de doutoramento 't Hooft, em 1969. Vejamos como eles trataram desse problema. Entre 1968 e 1969, Veltman discutiu com alguns físicos o problema da massa das partículas na TYMS. Em abril de 1968, ele passou um mês na *Rockefeller University*, nos Estados Unidos, ocasião em que tomou conhecimento dos trabalhos de Feynman, em 1963, do físico norte-americano Bryce S. Dewitt (1923-2004), em 1964 e 1967, e de Faddeev e o físico russo Victor Nikolaevich Popov (1937-1994), em 1967, sobre a aplicação do formalismo da ICF à TYMS, formalismo esse desconhecido por Veltman, conforme já anotamos. Logo depois, ao realizar seu *Ano Sabático 1968-1969* na *Universidade de Orsay*, na França, Veltman teve oportunidade de discutir com os físicos norte-americanos Stanley Mandelstam (n.1928) (de origem sul-africana) e D. Boulware suas pesquisas sobre a TYMS. Mais uma vez, aquele formalismo fez parte da discussão. Assim, juntamente com o físico coreano-norte-americano Benjamin W. Lee (1935-1977), que também se encontrava em Orsay, resolveu estudá-lo e, para isso, usaram o hoje célebre livro de Feynman e do físico norte-americano Albert Roach Hibbs (1924-2003) sobre esse assunto e intitulado: **Quantum Mechanics and Path Integrals** (McGraw-Hill, Inc., 1965).

Veltman voltou para Utrecht em setembro de 1969. Logo em seguida, ele e van de Kampen iniciaram um curso sobre ICF, cujas *Notas de Aula* foram preparadas por 't Hooft, o que lhe permitiu tornar-se um *expert* nesse formalismo. Em 1970, 't Hooft foi participar de uma *Escola de Verão* em Cargèse, na França, no *Instituto de Ciência Avançada* criado pelo físico francês Maurice Lévy (n.1942). Este, com a participação de Gell-Mann, havia desenvolvido um modelo, conhecido como **modelo sigma** (σ), para estudar as interações fortes. Formalmente, tal modelo poderia ser renormalizado com a QES. Contudo, na prática, havia uma série de dificuldades que estavam sendo discutidas nessa *Escola*, em seminários conduzidos por Benjamin Lee e pelo físico germano-polonês Kurt Symanzik (1923-1983). Em um desses seminários, esses físicos

afirmaram que as propriedades de simetria daquele modelo não seriam destruídas com a geração de massa (como a do próton, por exemplo) decorrente da QES. Em vista disso, 't Hooft perguntou-lhes se não poderia fazer o mesmo para a TYMS. Eles responderam: - *Como você é aluno de Veltman, pergunte a ele, pois não somos especialistas nessa teoria.*

Chegando a Utrecht, 't Hooft começou a pensar na **renormalização** da TYMS, orientado por Veltman. Inicialmente, trabalhou com ν não-massivos, sem considerar o mecanismo da QES de Brout-Englert-Higgs. Para isso, trabalhou com os conflitantes artigos de Feynman-DeWitt-Faddeev-Popov. No entanto, logo percebeu que os conflitos seriam contornados com uma técnica, baseada na ICF, de **regularização gauge**-invariante entre eles. Assim, usando uma quinta dimensão, ele mostrou que os infinitos dos diagramas de um laço eram então eliminados. Desse trabalho, resultou o artigo publicado em 1971 (*Nuclear Physics B33*, p. 173), no qual deduziu várias identidades, logo generalizadas (e citadas) nos trabalhos de J. C. Taylor, em 1971 (*Nuclear Physics B33*, p. 436), e de Slavnov, em 1972 (*Theoretical and Mathematical Physics 10*, p. 153).

Depois de **renormalizar** a TYMS com partículas não-massivas, 't Hooft partiu para **renormalização** com partículas massivas, usando, para isso, o mecanismo de QES de Brout-Englert-Higgs. O primeiro resultado foi publicado, ainda em 1971 (*Nuclear Physics B35*, p. 167). Por outro lado, usando o seu programa de computador *Schoonschip*, Veltman verificou que o **modelo de regularização dimensional de 't Hooft** eliminava os infinitos dos diagramas de dois laços. No entanto, para mais de dois laços, os infinitos permaneciam, mesmo que fossem usadas seis, sete ou mais dimensões naquele modelo. Então, Veltman e 't Hooft tiveram a ideia de usar uma **regularização dimensional contínua**. Ora, como o número n de dimensões do modelo considerado aparece no argumento da **função gama** $[\Gamma(n)]$, eles passaram a considerar esse argumento como a variável complexa $4 - \epsilon$. Assim, eles primeiramente consideraram valores finitos de ϵ e mostraram que a **renormalização** era completa, e depois fizeram o limite $\epsilon \rightarrow 0$. Um primeiro resultado desse tipo de **regularização** foi apresentado por 't Hooft e Veltman, em 1972 (*Nuclear Physics B44*, p.189). Um estudo mais completo foi por eles apresentado, ainda em 1972 (*Nuclear Physics B50*, p.318). É oportuno destacar que, ainda em 1972, os físicos argentinos Juan José Giambiagi (1924-1996) e Carlos Guido Bollini (1926-2009) (*Nuovo Cimento B12*, p. 20; *Physics Letters B40*, p. 566); Benjamin Lee (*Physical Review D5*, p. 823); Benjamin Lee e o físico francês Jean Zinn-Justin (n.1943) (*Physical Review D5*, p. 3121; 3137; 3155); e J. F. Ashmore (*Lettere al Nuovo Cimento 4*, p. 289) desenvolveram o mesmo tipo de **regularização dimensional**. Desse modo, esses trabalhos conseguiram resolver a grande dificuldade do **modelo de Salam-Weinberg** (MS-W), ou seja, a sua **renormalização**, e completar

a Teoria da Interação (Força) Eletrofraca e de suas partículas mediadoras: W^\pm e Z^0 .

Os trabalhos dessa **renormalização** realizados por 't Hooft foram a base de sua Tese de Doutorado, defendida em 1972, na *Universidade de Utrecht* (UU), tendo Veltman como seu orientador, segundo já falamos. Depois, no CERN e na UU, 't Hooft e Veltman, ora juntos, ora isoladamente, trabalharam no refinamento dessa **renormalização** e sua extensão a outras interações (forte e gravitacional), obtendo resultados importantes. Assim, ao aplicar a TYMS (Renormalizada) associada ao grupo de *gauge* SU(3) à interação forte, 't Hooft foi o precursor da hoje famosa QCD ("Quantum Chromodynamics"), formalizada nos trabalhos realizados, em 1973, pelos físicos norte-americanos David Jonathan Gross (n.1941; PNF, 2004) e Frank Anthony Wilczek (n.1951; PNF, 2004) (*Physical Review Letters* **30**, p. 1343) e, independentemente, pelo físico norte-americano Hugh David Politzer (n.1949; PNF, 2004) (*Physical Review Letters* **30**, p. 1346). Essa mesma aplicação levou, em 1974, 't Hooft (*Nuclear Physics* **B79**, p. 276) e, independentemente, o físico russo Aleksandr M. Polyakov (n.1945) (*Journal of Experimental and Theoretical Physics: Letters* **20**, p. 194) a encontrarem o **monopolo magnético** (MM) e o **instanton** como soluções da TYMSR. Destaque-se que o MM, partícula prevista por Dirac, em 1931 (vide verbete nesta série), até o momento (março de 2011), não foi encontrada experimentalmente.

Por seu lado, a partir de 1972, Veltman começou a trabalhar nas correções radiativas da TYMSR envolvendo a massa das partículas pesadas como as partículas W^\pm , Z^0 , os **quarks** de Gell-Mann [**up** (u), **down** (d) e **strange** (s)] (vide verbete nesta série) e os bH. Com a Teoria do Charme proposta, em 1970, prevendo a existência do quarto **quark charm** (c) (descoberto em 1974) e das correntes neutras (envolvendo o Z^0), e a descoberta do **lépton pesado tau** (τ), em 1975, o **Modelo Padrão** ("Standard Model") (composto do MS-W e da QCD), previa a existência do **neutrino do tau** (ν_τ) e de mais dois **quarks: bottom** (b) e **top** (t). Muito embora o b haja sido descoberto em 1977, havia dificuldade com o t, devido ao desconhecimento de sua massa. Naquele mesmo ano de 1977 (*Nuclear Physics* **B123**, p. 89), Veltman usou as correções radiativas da TYMSR e previu a massa de t em torno de 180 GeV, o que foi comprovado com a sua descoberta, em 1994, com a massa de ≈ 175 MeV (vide verbete nesta série). Aliás, é interessante destacar que o trabalho de Veltman com essas correções foi importante nas descobertas das correntes neutras, em 1973, e das partículas W^\pm e Z^0 , em 1983, ambas acontecidas no acelerador LEP ("Large Electron Positron") do CERN.

Maiores detalhes sobre este verbete podem ser encontrados nas *Lectures Nobel de 1999*: Gerardus 't Hooft, **A Confrontation with Infinite**;

Martinus Justinus Godefridus Veltman, **From Weak Interactions to Gravitation** (08 de Dezembro), em suas *Autobiografias (Nobel e-Museum)*, e em verbetes desta série. Concluindo este verbete, é oportuno destacar que o trabalho de Bollini e Giambiagi citado acima sobre **regularização dimensional** foi destacado por Veltman em sua *Nobel Lecture*.



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)