



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



As Unificações das Forças (Interações) Físicas.

Para os antigos filósofos gregos, existiam quatro tipos de forças: as que atuam nos corpos nas proximidades de nosso planeta Terra; as que atuam nos corpos celestes; as exercidas pela **magnetita** ou **ímã natural** (hoje conhecida quimicamente como o óxido de ferro: Fe_3O_4); e as exercidas pelo **âmbar**, quando este é atritado com um pedaço de lã. Estas duas últimas foram mencionadas pelo filósofo e astrônomo grego Tales de Mileto (624-546). Durante muito tempo os fenômenos elétricos e magnéticos, por se apresentarem bastante semelhantes, foram confundidos, até serem, pela primeira vez, diferenciados pelo matemático italiano Girolano Cardano (1501-1576). Observação semelhante foi realizada pelo médico e físico inglês William Gilbert (1544-1603), que a registrou em seu famoso tratado **De Magnete**, publicado em 1600. Aliás, foi ele quem, nesse livro, cunhou o termo **elétrico** para os corpos que se comportavam como o **âmbar** ("elektron", em grego) quando atritado com a lã (vide verbete nesta série). As forças elétrica e magnética só foram unificadas no Século 19, conforme veremos mais adiante.

As duas primeiras forças relacionadas acima, terrestres e celestes, discutidas pelo filósofo grego Aristóteles de Siracusa (384-322) em seus Livros V-VIII, **Física** (Les Belles Lettres, 1996), teve sua primeira idéia de unificação considerada pelo astrônomo armeno Abu Ar-Rayan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni (973-c.1051) (aliás, foi quem demonstrou a **lei dos senos** nos triângulos planos) ao afirmar que os fenômenos físicos no Sol, na Terra e na Lua obedecem às mesmas leis [Abdus Salam, *IN: Em Busca da Unificação* (Gradiva, 1991)]. Mais tarde, em 1602, o físico, matemático e astrônomo italiano Galileu Galilei (1564-1642) afirmou que as leis que regem o movimento das forças terrestres e celestes são universais [José Leite Lopes, **Albert Einstein e a Imagem Física do Mundo**, CBPF-CS-011/97 (Abril de 1997)]. Contudo, foi o físico inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) quem formalizou essa unificação por intermédio de sua célebre **Lei da Gravitação Universal**, apresentada no terceiro livro de seu famoso tratado intitulado **Philosophiae Naturalis Principia Mathematica** ("Princípios Matemáticos da Filosofia Natural"), publicado em 1687.

Por sua vez, as primeiras experiências que indicavam a unificação entre as forças elétrica e magnética foram realizadas pelo farmacêutico e físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851). Vejamos como. Em 1807, Oersted procurou, sem êxito, encontrar uma relação entre aquelas forças. Ela só foi encontrada no inverno de 1819-1820, quando ministrou, na *Universidade de Copenhague*, um curso sobre **Eletricidade, Galvanismo e Magnetismo**. Durante esse curso, Oersted realizou uma série de experiências. Por exemplo, em fevereiro de 1820, observou que um condutor se esquentava quando era percorrido por uma corrente elétrica. Também, nessas experiências, Oersted procurou encontrar uma relação entre eletricidade e magnetismo, examinando o que acontecia com uma agulha magnética ao ser colocada perpendicularmente ao fio condutor do circuito galvânico utilizado. No entanto, não registrou nenhum movimento perceptível da agulha. Porém, ao término de uma aula noturna daquele curso, no começo de abril de 1820, ocorreu-lhe a idéia de colocar o fio condutor paralelamente à direção da agulha magnética; aí, então, percebeu uma razoável deflexão dessa agulha, e a procurada relação entre o magnetismo e o "Galvanismo" estava então descoberta. Observe-se que essa descoberta foi relatada ao físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867), em carta escrita pelo físico e astrônomo holandês Christopher Hansteen (1784-1873), então assistente de Oersted. É oportuno registrar que no início do Século 19, era hábito distinguir o estudo da "eletricidade estática" do estudo das correntes elétricas ("Galvanismo"), cujas primeiras pesquisas destas foram conduzidas pelo fisiologista italiano Luigi Galvani (1737-1798), em 1786, e pelo físico italiano Alessandro Giuseppe Volta (1745-1827), em 1794, ocasião em que este cientista cunhou o termo "Galvanismo". É oportuno destacar que a criação de um campo magnético por uma corrente elétrica foi também confirmada, ainda em 1820, em experiências realizadas pelos físicos franceses Dominique François Jena Arago (1786-1853) e André Marie Ampère (1775-1836). [Roberto de Andrade Martins, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 10, p. 87 (UNICAMP, 1986); Sir Edmund Taylor Whittaker, **A History of the Theories of Aether and Electricity: The Classical Theories** (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951).]

Uma vez encontrada uma relação entre as forças elétrica e magnética, uma nova relação precisava ser pesquisada, qual seja, entre o "eletromagnetismo" (termo cunhado por Ampère) e a gravitação. Um dos primeiros a realizar experiências nesse sentido foi Faraday. Contudo, em 1849, ele escreveu em seu **Diário** de laboratório que não havia conseguido mostrar que a gravidade poderia induzir correntes elétricas em peças de metal que caíam do topo de uma sala de aula na *Royal Institution of Great Britain*. [Abraham Pais, '**Subtle is the Lord...**' **The Science and the Life of Albert Einstein** (Oxford University Press, 1982).] Uma outra tentativa de encontrar aquela mesma relação, e igualmente frustrada, foi apresentada pelo matemático alemão Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866), um pouco antes de morrer. [Charles W. Misner, Kip S. Thorne and John Archibald Wheeler, **Gravitation** (W. H. Freeman and Company, 1973).]

A formulação matemática da unificação entre as forças elétrica e magnética – conhecida desde então como **força eletromagnética** - foi desenvolvida pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879), em seu livro intitulado **A Treatise on Electricity and Magnetism**, publicado em 1873. Aliás, é oportuno dizer que, nesse livro,

Maxwell apresentou a unificação da Óptica com o Eletromagnetismo ao demonstrar que “a luz é uma onda eletromagnética” (vide verbete nesta série).

O Século 19 terminou com a idéia de que só existiam duas forças distintas na Natureza: a **gravitacional Newtoniana** e a **eletromagnética Maxwelliana**, em virtude das tentativas frustradas de unificá-las, conforme destacamos acima. No Século 20, uma primeira tentativa de unificar o eletromagnetismo com o campo escalar gravitacional foi apresentada pelo físico finlandês Gunnar Nordström (1881-1923), em 1914 (*Zeitschrift für Physik* **15**, p. 504). Mais tarde, em 1918 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften, Part 1*, p. 465), o matemático e físico alemão Hermann Klaus Hugo Weyl (1885-1955) tentou essa unificação baseando-se na generalização espaço-temporal da geometria Riemanniana. Em 1919, inspirado nesse trabalho de Weyl, o matemático e lingüista alemão Theodor Kaluza (1885-1954) discutiu com o físico germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) uma nova possibilidade de unificar o eletromagnetismo com a gravitação, por intermédio de uma generalização da Teoria Geral da Relatividade (TGR) (esta havia sido desenvolvida por Einstein, em 1915, segundo a qual a gravitação é decorrência da curvatura do espaço-tempo). Para Kaluza, a TGR poderia ser generalizada para um espaço de cinco (5) dimensões, na qual a quinta dimensão era comprimida em um pequeno círculo. Desse modo, as **equações de Einstein** do campo gravitacional escrita em cinco dimensões, reproduzem as usuais equações Einsteinianas em quatro dimensões, acrescido de um conjunto de equações que representam as **equações de Maxwell** do campo eletromagnético. Provavelmente na conversa referida acima, Einstein haja discutido com Kaluza sua idéia de que as partículas eletrizadas eram mantidas juntas por forças gravitacionais, segundo seus artigos publicados também em 1919 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften, Part 1*, p. 349; 463). Aliás, nesses artigos, Einstein apresentou a idéia da **constante cosmológica Γ** , com a qual procurava um vínculo entre a gravitação e o eletromagnetismo. Registre-se que, em 1921, Einstein apresentou o trabalho de Kaluza à *Academia Prussiana de Ciências*, sendo então publicado em seus Anais (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften, Part 1*, p. 966), ainda em 1921. Também em 1921 (*Proceedings of the Royal Society of London* **99**, p. 104), o astrônomo inglês Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) publicou um artigo no qual propôs a unificação entre a gravitação e o eletromagnetismo seguindo a mesma idéia de Weyl.

Em 1923 (*Scripta Jerusalem Universitat* **1**, No. 7), com a colaboração do físico alemão Jakob Grommer (1879-1933), Einstein escreveu um trabalho no qual estudaram as soluções de singularidades-livres da Teoria de Kaluza. Ainda em 1923 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften*, p. 32; 76; 137; *Nature* **112**, p. 448), Einstein apresentou um esboço não-matemático de uma generalização da geometria Riemanniana, na qual englobaria em um campo total, conhecido desde como **campo unificado**, os campos gravitacional e eletromagnético.

Em 1926 (*Zeitschrift für Physik* **37**, p. 895; *Nature* **118**, p. 516), o físico sueco Oskar Benjamin Klein (1894-1977) contornou a dificuldade apresentada pela Teoria de Kaluza, afirmando que a não observação da quinta dimensão Kaluziana devia-se ao fato de que o raio do pequeno círculo considerado naquela teoria era da ordem de 10^{-33} cm, o chamado **comprimento de Planck** ($\ell_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$), comprimento esse correspondente à energia de 10^{19} GeV, conhecida como **energia de Planck** ($M_P c^2 = \sqrt{\hbar c^5/G}$), onde c é a velocidade da luz no vácuo, $M_P = 10^{-5}$ g é a **massa de Planck** e G é a **constante da Gravitação Universal**.

A tentativa de unificar o eletromagnetismo com a gravitação foi uma das principais preocupações de Einstein até morrer, em 1955, quer em trabalhos isolados, quer com colaboradores, usando, basicamente, a Teoria de Kaluza-Klein, ou alguma outra variante. Por exemplo, em 1949 (*Canadian Journal of Mathematics* **1**, p. 209), Einstein e o físico polonês Leopold Infeld (1893-1968) publicaram um artigo no qual propuseram uma nova Teoria do Campo Unificado por intermédio de um tensor métrico que generalizava a estrutura do espaço-tempo, com a sua parte simétrica representando o campo gravitacional, e a parte anti-simétrica, o campo eletromagnético. A unificação entre a força gravitacional e a força eletromagnética também foi objeto de pesquisa de outros físicos. É oportuno registrar que, em 1971 (*Revista Brasileira de Física* **1**, p. 91), o físico brasileiro Mário Schenberg (1914-1990) apresentou um novo aspecto do Campo Unificado de Einstein, no qual o eletromagnetismo é considerado uma teoria mais fundamental do que a gravitação, pois ele formulou a Teoria Eletromagnética de Maxwell em uma variedade diferenciável desprovida de qualquer métrica e estrutura afim. Desse modo, ele interpretou as **equações de Einstein** como um complemento das **equações de Maxwell**. Para maiores detalhes sobre a Teoria do Campo Unificado Einsteiniano ver os seguintes textos: Pais, op. cit.; Salam, op. cit.; Misner, Thorne e Wheeler, op. cit.; Michel Paty, **Einstein Philosophe** (Presses Universitaires de France, 1993) e Paul Charles William Davies and Julian Brown (Editors), **Superstrings: A Theory of Everything?** (Cambridge University Press, 1989).

A unificação entre as forças da Natureza até então conhecidas (gravitacional e eletromagnética) tornou-se mais complicada com a descoberta, na década de 1930, de mais duas forças: a **fraca** e a **forte**. A primeira, formulada pelo físico italiano Enrico Fermi (1901-1954; PNF, 1938), em 1934, já foi tratada por nós em um verbete desta série. Vejamos a segunda. Em 1927, o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) publicou dois trabalhos nos quais considerou a **função de onda de Schrödinger Ψ** (e sua conjugada $\bar{\Psi}$) como operadores [em vez de números, como o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933) havia considerado, em 1926, ao apresentar sua famosa equação], porém sua álgebra era não-comutativa, isto é: $\Psi\bar{\Psi} \neq \bar{\Psi}\Psi$. Com esse procedimento, conhecido como Teoria Quântica da Emissão e Absorção da Radiação [também conhecida como **segunda quantização**, que considera os operadores **criação** (α^+), **destruição** (α^-) e **número de ocupação** ($N = \alpha^+ \alpha^-$)], Dirac quantizou o campo eletromagnético, procedimento esse que deu origem ao desenvolvimento da **Eletrodinâmica Quântica (QED)**, segundo vimos em verbetes desta série. Segundo aquela teoria, o elétron é preso ao próton, no caso do átomo de hidrogênio (H), em virtude da troca de fótons virtuais. Como essas partículas eletrizadas estão sob a ação da força eletromagnética, a “segunda quantização Diraciana” vista acima, significa dizer que os **fótons** são as partículas mediadoras (“quanta”) da força (interação) eletromagnética.

A descoberta do nêutron pelo físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935), em 1932 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A136**, pgs. 696; 735), como uma das partículas constituintes do núcleo atômico Rutherfordiano, juntamente com o próton, provocou uma grande dificuldade para os físicos, qual seja, a de explicar a razão dos prótons não se repelirem pela força Coulombiana (eletromagnética) no interior do núcleo. Para resolver essa dificuldade, ainda em 1932, os físicos, o alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932) (*Zeitschrift für Physik* **77**, p. 1), o russo Dimitrij Iwanenko (1904-1994) (*Nature* **129**, p. 798) e o italiano Ettore Majorana (1906-1938) propuseram a hipótese de que os prótons e os nêutrons enquanto partículas constituintes do núcleo atômico, se comportavam como partículas únicas – os **núcleons** – que interagiam por intermédio de uma força atrativa capaz de superar a repulsão Coulombiana. Ainda em 1932 (*Zeitschrift für Physik* **78**, p. 156), Heisenberg defendeu a idéia de que os núcleons deveriam se caracterizar por um novo número quântico, o hoje conhecido **spin isotópico** ou **isospin** (I). Segundo nos fala o romancista italiano Leonardo Sciascia (1921-1989), em seu livro **Majorana Desapareceu** (Rocco, 1991), Majorana formulou a Teoria dos Núcleons seis meses antes de Heisenberg. Depois de apresentá-la aos seus colegas do *Instituto de Física da Universidade de Roma*, se recusou a publicá-la, bem como proibiu que seu colega Fermi o apresentasse no *Congresso de Física* que iria ser realizado em Paris.

A idéia da força de ligação entre núcleons ainda foi tratada por Heisenberg, em 1933 (*Zeitschrift für Physik* **80**, p. 587), ao mostrar que essa energia aumentava de uma maneira aproximadamente igual ao número de núcleons. Em vista disso, afirmou que a partícula α (núcleo do hélio: ${}_2\text{He}^4$) apresentava uma estrutura de saturação dessa energia. Essa idéia foi logo contestada por Majorana em trabalho publicado ainda em 1933 (*Zeitschrift für Physik* **82**, p. 137; *Ricerca Scientifica* **4**, p. 559), ao afirmar que era o **dêuteron** (núcleo do hidrogênio pesado: ${}_1\text{H}^2 = \text{D}$) e não a partícula α que era completamente saturada pela “força de Heisenberg”.

A polêmica da “força de Heisenberg” foi finalmente resolvida, em 1935 (*Proceedings of the Physical Mathematics Society of Japan* **17**, p. 48), quando o físico japonês Hideaki Yukawa (1907-1981; PNF, 1949) propôs que aquela “força” decorria da troca entre eles da **partícula U** (como a denominou Yukawa), porém sua massa deveria ser $m_U = 200 m_e$ (sendo m_e a massa do elétron). Para chegar a esse valor, Yukawa admitiu que a energia potencial V de dois núcleons em repouso seria dada por: $V = -\frac{A}{r} \exp(-\mu r)$, onde A é uma constante e $\mu = m_U c / \hbar \approx 10^{13} \text{ cm}^{-1}$. Portanto, para Yukawa a **força nuclear** (mais tarde chamada de **força forte**) era de curto alcance e mediada (em analogia com a troca de fótons entre elétron e próton no átomo de H, conforme visto acima) por uma partícula de massa intermediária entre a massa do elétron (m_e) e a massa do próton (m_p), razão pela qual a mesma ficou conhecida, inicialmente, como **yukon**, **mesotron** e, hoje, **méson**. É oportuno registrar que a existência dessa partícula foi confirmada nas experiências realizadas, em 1947, pelos físicos, o brasileiro Cesare (César) Mansueto Giulio Lattes (1924-2005), os ingleses Hugh Muirhead e Sir Cecil Frank Powell (1903-1969; PNF, 1950), e o italiano Giuseppe Paolo Stanislao Occhialini (1907-1993), nas quais observaram que a incidência de raios cósmicos em emulsões nucleares colocadas nos Alpes (Suíça) e em Chacaltaya (Bolívia) produzia dois tipos de mésons: **primários** (hoje, **múons**) e **secundários** (hoje, **píons**) (vide verbete nesta série).

A descoberta de mais duas forças (interações) na Natureza, a fraca e a forte, elevava para quatro o número das forças naturais: **gravitacional**, **eletromagnética**, **fraca** e **forte**. Tais forças, no entanto, são bem distintas, pois suas constantes de acoplamento, em valores aproximados, valem, respectivamente: 10^{-39} , 10^{-2} , 10^{-10} e 10.

Durante mais de 20 anos, essas quatro forças (interações) permaneceram independentes, pois, conforme vimos anteriormente, a tentativa de unificar (via geometrização) as duas primeiras foi malograda. Diferentemente dessa via geométrica, a tentativa de unificar aquelas forças começou a ser viabilizada, graças ao desenvolvimento das **Teorias de “Gauge” (“Calibre”)**. Vejamos como. Em 1954 (*Physical Review* **96**, p. 191), os físicos, o sino-norte-americano Chen Ning Yang (n.1925; PNF, 1957) e o norte-americano Robert Laurence Mills (n.1927), propuseram uma **Teoria de “Gauge” não-Abeliana** para estudar a interação forte. Registre-se que, em 1955, o físico inglês Ronald Shaw (n.1929) defendeu sua Tese de Doutorado, sob a orientação do físico paquistanês Abdus Salam (1926-1996; PNF, 1979), na qual havia uma proposta semelhante à de Yang-Mills. No entanto, por não ser renormalizável para bósons massivos, essa Teoria de Yang-Mills-Shaw (TYMS) não poderia descrever as interações fracas, já que essas são mediadas por partículas massivas, conforme a proposta apresentada por Klein, em 1938 (*Journal de Physique et le Radium* **9**, p. 1). Segundo essa proposta, o decaimento β seria mediado por bósons vetoriais (spin = 1) massivos e carregados, aos quais denominou de ω (hoje, W). Assim, para Klein, esse decaimento seria dado por: $n \rightarrow p + \omega^- \rightarrow p + e^- + \nu$.

A idéia de as interações fracas serem mediadas por bósons vetoriais aventadas por Klein, conforme vimos acima, foi retomada, em 1957 (*Annals of Physics NY* **2**, p. 407), pelo físico norte-americano Julian Seymour Schwinger (1918-1994; PNF, 1965) e, em 1958 (*Physical Review* **109**, p.109), pelos físicos norte-americanos Richard Phillips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) e Murray Gell-Mann (n.1929; PNF, 1969), em sua proposta da famosa **Teoria V-A**, que universalizou a **interação fraca**, e segundo a qual esse tipo de interação poderia ser devido à troca dos bósons Kleinianos. Estimulado pela leitura do trabalho de Feynman-Gell-Mann, o físico brasileiro José Leite Lopes (1918-2006), ainda em 1958 (*Nuclear Physics* **8**, p. 234), publicou um artigo no qual considerou que a constante de acoplamento da interação eletromagnética (constante de estrutura fina α) com a matéria seria igual à constante de acoplamento da interação fraca (G_W) também com a matéria, isto é: $\alpha = G_W$. Desse modo, ele propôs que a interação elétron-nêutron só poderia ser realizada por intermédio de um bóson vetorial neutro, o hoje conhecido **Z⁰**, chegando a estimar a sua massa em cerca de 60 massas do próton (m_p). Observe-se que trabalhos semelhantes a esses relacionados com a unificação das interações fraca e eletromagnética foram realizados, ainda em 1958, pelos físicos norte-americanos Sidney Arnold Bludman (n.1927) (*Nuovo Cimento* **9**, p. 433) e Gerald Feinberg (1933-1992) (*Physical Review* **110**, p. 1482); em 1959, por Salam e o físico inglês John Clive Ward (n.1924) (*Nuovo Cimento* **11**, p. 568), e pelo físico norte-americano Sheldon

Lee Glashow (n.1932; PNF, 1979) (*Nuclear Physics* **10**, p. 107; este trabalho fez parte de sua Tese de Doutorado, orientada por Schwinger e defendida em 1958) e Gell-Mann (*Review of Modern Physics* **31**, p. 834); e, em 1960 (*Physical Review* **119**, p. 1410), pelos físicos sino-norte-americanos Tsung-Dao Lee (n.1926; PNF, 1957) e Chen Ning Yang (n.1922; PNF, 1957).

A TYMS voltou a ser objeto de pesquisa por parte do físico japonês Yoichiro Nambu (n.1921) ao descobrir, em 1960 (*Physical Review Letters* **4**, p. 382), a **quebra de espontânea de simetria** nessa teoria, usando uma analogia com a supercondutividade. Essa descoberta foi confirmada, em 1961, pelo físico inglês Jeffrey Goldstone (n. 1933) (*Nuovo Cimento* **19**, 154) e, também por Nambu e G. Jona-Lasinio (*Physical Review* **122**; **124**, pgs. 345; 246). Esses trabalhos mostravam que essa **quebra de simetria** era acompanhada de partículas não-massivas, logo denominadas de **bósons de Nambu-Goldstone** (bN-G). Em 1964, em trabalhos independentes, os físicos, o inglês Peter Ware Higgs (n.1929) (*Physics Letters* **12**, 132; *Physical Review Letters* **13**, p. 508), os belgas François Englert (n.1932) e Robert Brout (n.1928) (*Physical Review Letters* **13**, p. 321), e G. S. Guralnik, C. R. Hagen e o físico indiano Thomas Walter Bannerman Kibble (n.1932) (*Physical Review Letters* **13**, p. 585), encontraram um mecanismo que tornava massivos os bN-G. Esse mecanismo ficou conhecido como **mecanismo de Higgs**, e o bóson de spin nulo correspondente de tal mecanismo, como **bóson de Higgs** (bH), de massa $m_{bH} = 166 \text{ GeV}/c^2$. É oportuno registrar que, em 08 de janeiro de 2007, o grupo de físicos do **Collider Detector Facility** (CDF) no FERMILAB (USA), anunciou que $m_{bH} = 153 \text{ GeV}/c^2$ e, em vista disso, eles esperam detectá-lo com o seu acelerador **Tevatron**, cujo limite superior de energia é de 170 GeV. Registre-se, também, que o **Large High Collider** (LHC) do CERN (Suíça/França), que ficará pronto no final de 2007, espera também detectar o bH. É oportuno destacar que, em 23 de fevereiro de 2007 (*Physical Review Letters* **98**, p. 081802), Xiao-Gang He, Jusak Tandean e G. Valência anunciaram a possível evidência de um bóson de Higgs pseudoescalar leve no seguinte decaimento: $\Sigma^+ \rightarrow p + \mu^+ + \mu^-$.

A unificação das forças eletromagnética e fraca especulada nos trabalhos referidos acima foi finalmente formalizada nos artigos do físico norte-americano Steven Weinberg (n.1933; PNF, 1979), em 1967 (*Physical Review Letters* **19**, p. 1264) e de Salam, em 1968 (*Proceedings of the Eighth Nobel Symposium*, p. 367), a conhecida **Teoria Eletrofraca**. Segundo essa teoria, baseada no grupo **SU(2) \otimes U(1)**, a “força eletrofraca” é mediada por quatro *quanta*: o **fóton** (γ), partícula não-massiva e mediadora da interação eletromagnética e os bósons vetoriais (W^\pm, Z^0) (a notação de Z^0 foi sugerida por Weinberg), de massas respectivas: $\approx 87 m_p$ e $\approx 97 m_p$. Registre-se que nessa teoria de Salam-Weinberg (TSW), as constantes de acoplamento das interações eletromagnética (α) e fraca (G_W) são relacionadas pela expressão: $\alpha = G_W \sin^2 \theta_W$, onde θ_W é o **ângulo de Weinberg**. E mais ainda, nessa TSW, inicialmente as partículas W^\pm, Z^0, γ têm massa nula e estão sujeitas à simetria “gauge”. No entanto, por intermédio do **mecanismo de Higgs**, do qual participam o **dubleto Higgs** (H^+, H^0) e seu antidubleto (H^-, \bar{H}^0), há a quebra espontânea dessa simetria, ocasião em que o fóton (γ) permanece com massa nula, porém os W^\pm adquirem massas por incorporação dos bósons carregados (H^\pm), ao passo que Z^0 adquire massa de uma parte dos bósons neutros ($H^0 + \bar{H}^0$), ficando a outra parte ($H^0 - \bar{H}^0$) como uma nova partícula bosônica escalar (spin 0), o referido **bóson de Higgs** (bH) (vide Salam, op. cit.).

Não obstante, essa Teoria de Salam-Weinberg (TSW) apresentava uma grande dificuldade, pois ela não era **renormalizável**, ou seja, apareciam divergências (infinitos) nos cálculos envolvendo os quatro *quanta*, característicos dessa teoria (sobre renormalizabilidade ver verbetes nesta série). Para contornar essa dificuldade, em 1971 (*Physical Review* **D3**, p. 1043), Glashow e o físico grego-norte-americano John Iliopoulos (n.1940) examinaram o cancelamento (renormalizabilidade) na TYMS. Ainda em 1971, o físico holandês Gerardus ’t Hooft (n.1946; PNF, 1999) publicou dois artigos nos quais estudou aquele cancelamento. No primeiro (*Nuclear Physics* **B33**, p. 173), ele usou bósons vetoriais não-massivos e não considerou o mecanismo de “quebra espontânea de simetria” de Guralnik-Hagen-Kibble-Brout-Englert-Higgs; e no segundo (*Nuclear Physics* **B35**, p. 167), ele trabalhou com partículas massivas e o mecanismo referido acima. Por outro lado, o físico holandês Martinus Justinus Godefridus Veltman (n.1931; PNF, 1999), que havia sido orientador da Tese de Doutorado de ’t Hooft, observou que o **modelo de regularização dimensional de ’t Hooft** só eliminava os infinitos dos **diagramas de Feynman** de dois laços. Porém, para mais de dois laços, os infinitos permaneciam. Assim, em 1972 (*Nuclear Physics* **B44**; **B50**, pgs. 189; 318), ’t Hooft e Veltman desenvolveram o **modelo de regularização dimensional contínua** que conseguia eliminar todos os infinitos dos **diagramas de Feynman**. É oportuno destacar que, ainda em 1972, os físicos argentinos Juan José Giambiagi (1924-1996) e Carlos Guido Bollini (n.1926) (*Nuovo Cimento* **B12**, p. 20; *Physics Letters* **B40**, p.566) e o coreano-norte-americano Benjamin W. Lee (1935-1977) (*Physical Review* **D5**, p. 823), desenvolveram o mesmo tipo de regularização. Desse modo, os trabalhos de ’t Hooft, Veltman, Giambiagi, Bollini e Lee conseguiram resolver a grande dificuldade da TSW, ou seja, a sua renormalização. Estava assim completada a teoria da **interação (força) eletrofraca**. Só faltava a detecção de suas partículas mediadoras: W^\pm e Z^0 . Para detalhes dos trabalhos de ’t Hooft e Veltman, ver: Martinus Veltman, **Facts and Mysteries in Elementary Particles** (World Scientific, 2003).

A primeira evidência experimental de correntes leptônicas neutras, envolvendo a partícula Z^0 , aconteceu em 1973 (*Physics Letters* **B46**, pgs. 121; 138), quando 55 pesquisadores da **câmara de bolhas “Gargamelle”** do CERN, sob a liderança do físico francês Paul Musset, realizaram uma experiência da interação de neutrinos (ν) com a matéria nuclear. Essa evidência foi confirmada por dois grupos de pesquisadores [em um deles, com a presença do físico italiano Carlo Rubbia (n.1934; PNF, 1984)] do então *Fermi National Laboratory* (hoje, FERMILAB), em 1974 (*Physical Review Letters* **32**, **33**, pgs. 800; 448). Por fim, em 1983 (*Physics Letters* **122B**, p. 103; 476; **126B**, p. 398; **129B**, p. 130; 273), os bósons mediadores da interação eletrofraca foram confirmados nas experiências realizadas no CERN, sob a liderança de

Rubbia e o do físico e engenheiro holandês Simon van der Meer (n.1925; PNF, 1984). As massas desses bósons determinadas nessa experiência, foram:

$$m_{\rho^{\pm}} = (82.1 \pm 1.7) \text{ GeV}/c^2 \approx 80 m_p \text{ e } m_{\rho^0} = (93.0 \pm 1.7) \text{ GeV}/c^2 \approx 90 m_p.$$

A renormalização da Teoria Eletrofraca (TSW), realizada em 1971-1972, conforme registramos acima, deu ensejo a que se buscasse uma teoria que unificasse as interações forte e eletrofraca. Uma primeira tentativa para essa unificação – a **força eletronuclear** - foi apresentada por Salam e Jogesh C. Pati, ainda em 1972 (*Proceedings of the 16th International Conference on High Energy Physics*), por intermédio do grupo **SU_c(3) ⊗ SU(2) ⊗ U(1)**, que agrupa em uma mesma família, **quarks** [que sofrem interação forte, e que foram propostos, em 1964, em trabalhos independentes de Gell-Mann (*Physics Letters* **8**, p. 214) e do físico russo-norte-americano George Zweig (n.1937) (*CERN Preprint* **8182/Th 401**; **8419/ Th 412**)] e **léptons** (que sofrem interação eletrofraca). Como esse grupo tem *rank* pelo menos igual a 4, Glashow e o físico norte-americano Howard Mason Georgi (n.1947), em 1974 (*Physical Review Letters* **32**, p. 438), desenvolveram uma teoria de unificação semelhante à de Salam-Pati, porém usando o grupo SU(5), também de *rank* 4. Essa teoria, que ficou conhecida como **Teoria de Grande Unificação** (TGU) (“Grand Unified Theory” – GUT), que envolve energias da ordem de 10¹⁵ GeV (ou dimensões da ordem de 10⁻²⁹ cm), prevê dois importantes resultados: o decaimento do próton (p) com uma vida média em torno de 10³² anos; e a existência de **monopolos magnéticos** (MM). Ainda em 1974, ‘t Hooft (*Nuclear Physics* **B79**, p. 276) e o físico russo Aleksandr Morkowitsch Polyakov (n.1945) [*Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP) Letters* **20**, p. 194] mostraram que certas teorias de campo de “gauge” prevêm a existência de MM massivos. Registre-se que os MM foram previstos por Dirac, em 1931 (vide verbete nesta série).

As teorias de unificação vistas acima (TSW e TGU) envolvem apenas partículas de mesma espécie spinorial, isto é, **férmions** (spin fracionário) e **bósons** (spin inteiro). Contudo, uma teoria que pretenda unificar todas as interações deve envolver esses dois tipos de partícula. Um primeiro envolvimento entre férmions e bósons foi proposto, em 1961 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A260**; **A262**, pgs. 27; 233), quando o físico inglês Tony Hilton Royle Skyrme (1922-1987) demonstrou que os férmions poderiam ser construídos por intermédio de uma Teoria de Campo envolvendo apenas bósons. Tais partículas assim obtidas ficaram conhecidas como **skyrmions**.

Contudo, foi somente a partir da década de 1970 que um novo envolvimento entre bósons e férmions foi descoberto no contexto da Teoria de Cordas (vide verbete nesta série). Assim, logo em 1971 (*Nuclear Physics* **B34**, p. 632), os físicos, o francês Jean Loup Gervais e o japonês Bunji Sakita (n.1930), descobriram que a usual ação linear bosônica possui uma simetria – logo conhecida como **supersimetria** (SUSY – “supersymmetry”) [que envolve energias da ordem de 10²⁰ GeV (ou dimensões da ordem de 10⁻³⁴ cm)] - que converte bósons em férmions. Ainda em 1971 [*Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP) Letters* **13**, p. 323], os físicos russos Y. A. Gol’fand e E. P. Likhtmann e, em 1972 [*Journal of Experimental and Theoretical Physics (JETP) Letters* **16**, p. 438], os também físicos russos D. V. Volkov e V. P. Akulov trabalharam com uma ação quadri-dimensional bosônica supersimétrica.

Em 1973, trabalhos independentes de Volkov e Akulov (*Physics Letters* **B46**, p. 109) e de Gervais e Sakita (*Physical Review Letters* **30**, p. 716), desenvolveram a hoje conhecida Teoria da Supersimetria (TSS). Segundo essa teoria, cada partícula deverá possuir uma **supercompanheira** com propriedades idênticas, exceto no valor de seu spin, que vale o spin da partícula correspondente, subtraído de ½. Assim, para as partículas mediadoras das interações (gravitacional: **gráviton**, de spin 2; forte: **glúon**, de spin 1; fraca: **W[±]** e **Z⁰**, de spin 1; eletromagnética: **fóton**, de spin 1) suas “supercompanheiras” são, respectivamente: **gravitino**, de spin 3/2; **gluonino**, de spin ½; **wino[±]**, de spin ½; **zino⁰**, de spin ½; e **fortino**, de spin ½. Para as partículas constituintes da matéria (**quarks** e **léptons**, ambas de spin ½), suas “supercompanheiras” são: **squarks** e **sléptons**, de spin 0.

Até aqui, vimos a unificação entre as interações eletromagnética, fraca e forte. Contudo, falta a unificação delas com a gravitacional. As primeiras pesquisas no sentido dessa unificação ocorreram, em 1974, em trabalhos independentes realizados por Julius Wess (n.1934) e Bruno Zumino (*Nuclear Physics* **B70**, p. 39) e por Salam e John Strathdee (*Nuclear Physics* **B79**, p. 477), nos quais mostraram que, ao se passar de uma simetria global (a transformação que a caracteriza é aplicada uniformemente a todos os pontos do espaço) para uma simetria local (cada ponto é transformado independentemente), além de essa passagem mudar o spin da partícula, ela desloca, também, as partículas no espaço. Ora, como essa simetria local incluiu as **transformações locais de Poincaré**, base da interação gravitacional, ela passou a ser conhecida como **supergravidade**. Mais tarde, em 1976, trabalhos independentes de Daniel Z. Freedman, Peter van Nieuwenhuizen e Sergio Ferrara (*Physical Review* **D13**, p. 3214) e de Stanley Deser (n. 1931) e Zumino (*Physics Letters* **B62**, p. 335), redescobriram a **supergravidade** de Wess-Zumino-Salam-Strathdee, de 1974. Ora, como essa supersimetria local requer **campos de “gauge”** mediados por partículas, então uma teoria dotada dessa supersimetria envolve dois tipos de partículas: o **gráviton**, de spin 2 e sua “supercompanheira”, o **gravitino**, de spin 3/2, ambos não-massivos, conforme registramos acima. Desse modo essa Teoria da Supergravidade (TSG) permite unificar as quatro forças da Natureza. Registre-se que, até o presente momento (março de 2007), quer o **gráviton**, quer as “supercompanheiras”, ainda não foram detectadas.

Ao concluir este verbete sobre a unificação das partículas elementares, é interessante realçar que, apesar da beleza e do poder de síntese das teorias de unificação vistas acima (TSW, TGU e TSG), elas apresentam uma grande dificuldade, já que são internamente não-renormalizáveis. Contudo, existe um outro tipo de teoria unificada em que essa “anomalia” é eliminada, que é a Teoria das Cordas (vide verbete nesta série). Por fim, é oportuno notar que a **renormalização** [termo cunhado pelo físico norte-americano Robert Seber (1909-1997)], em 1936] é um método pelo qual os infinitos de uma Teoria de Campo (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.



ANTERIOR

SEGUINTE