



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

O Bóson de Higgs, o Prêmio Nobel de Física (PNF) de 2013 e os Físicos Brasileiros.

O PNF de 2013 foi concedido aos físicos, o inglês Peter Ware Higgs (n.1929) e o belga François Englert (n.1932) pela “descoberta teórica de um mecanismo que contribui para o entendimento da origem da massa das partículas subatômicas”. A partícula decorrente desse mecanismo, conhecida então como **bóson de Higgs**, prevista em 1964, teve uma evidência de 3σ (o que não garante sua confirmação, como veremos mais adiante) em experiências realizadas por colaborações dos dois principais aceleradores do mundo: o **Tevatron New Phenomena & Higgs Working Group: Combined D0/CDF** do *Fermi National Accelerator Laboratory* (FERMILAB), nos Estados Unidos, e **A Toroidal LHC Apparatus** (ATLAS) e **Compact Muon Solenoid** (CMS) do **Large Hadron Collider** (LHC), do *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (hoje: *European Organization for Nuclear Research*) (CERN), na Europa, e finalmente ela foi anunciada em julho de 2012, com um nível de confiança de 5σ , que é um critério internacional sobre a existência de uma partícula, como veremos no decorrer deste artigo.

Higgs nasceu em 29 de maio de 1929 em Elswick, distrito de Newcastle upon Tyne, na Inglaterra. Devido à asma que o acometeu na infância, seus primeiros estudos foram realizados praticamente em casa. Depois que seu pai, engenheiro de som da *British Broadcasting Corporation* ("Corporação Britânica de Radiodifusão") (BBC), se transferiu para Bedford, perto de Bristol, Higgs estudou, entre 1941 e 1946, na *Cotham Grammar School*, em Bristol, que se tornara célebre por ter o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) [Bassalo & Caruso, **Dirac** (Livraria da Física, 2013)] como um de seus alunos.

Com 17 anos de idade, em 1946, Higgs foi estudar na *City of London School*, especializando-se em Matemática. Logo depois, em 1947 ele entrou para o *King College*, em Londres, graduando-se em Física, em 1950, como o primeiro aluno de sua classe; em 1952, obteve o Mestrado em Física, e começou a realizar seu doutoramento no grupo de Física Molecular, trabalhando com os químicos teóricos ingleses Charles Alfred Coulson (1910-1974) (também matemático aplicado) e Hugh Christopher Longuet-Higgins (1923-2004), sendo este aluno de doutorado de Coulson na *Universidade de Oxford*. Higgs defendeu sua Tese de Doutorado, em 1954, intitulada **Some Problems in the Theory of Molecular Vibrations** (“Alguns Problemas na Teoria das Vibrações Moleculares”), sob a orientação de Coulson. Entre 1954 e 1956, Higgs foi Pesquisador Sênior da *University of Edinburgh* (UE), voltando a essa Universidade, em 1960, para ser *Lecturer* no *Tait Institute of Mathematical Physics*, depois de trabalhar no *Imperial College London* e *University College*. Em 1980 assumiu a Cadeira de Física da UE e, em 1983, tornou-se Membro (*Fellow*) da *Royal Society of Edinburgh* (RSE) e da *Royal Society of London* (RSL) e, em 1991, do *Institute of Physics* (IP). Aposentou-se da UE, em 1996, ocasião em que recebeu o título de *Professor Emérito*.

Destaque-se que, antes de compartilhar o PNF2013, Higgs recebeu outras honrarias, tais como: em 1981, *Hughes Medal* da RSL; em 1984, *Rutherford Medal and Prize* do *Institute of Physics* (IP); em 1997, *Dirac Medal and Prize* do IP e *High Energy and Particle Physics Prize* da *European Physical Society* (EPS) [este, com os físicos belgas Englert e Robert Brout (1928-2011)]; em 2004, *Wolf Prize in Physics* (com Englert e Brout) pela *Wolf Foundation*; em 2008, foi retratado pelo artista inglês Ken Currie (n.1960); em 2009, *Oskar Klein Memorial Lecture Medal* da *Royal Swedish Academy of Sciences* (RSAS); em 2010, *J. J. Sakurai Prize for Theoretical Particle Physics* [com Englert, Brout e os físicos, os norte-americanos Gerald Stanford Guralnik (n.1936) e Carl Richard Hagen (n.1937), e o indiano-inglês Thomas Walter Bannerman Kibble (n.1932)] da *American Physical Society* (APS); em

2011, *Edinburgh Award* da *City of Edinburgh Council*; e, em 2012, *Higgs Medal* da RSE. Por fim, em 06 de julho de 2012, a UE criou o *The Higgs Center for Theoretical Physics* e a *Chair Peter Higgs*. Aliás, é interessante registrar que, como Higgs não tem telefone celular e quase não usa o seu fixo, ele soube que havia compartilhado o PNF2013, por intermédio de uma mulher que o abordou em uma rua em Edinburgh e o congratulou (wikipedia/Higgs). Note-se que, no dia 08 de dezembro de 2013, Higgs apresentou sua *Nobel Lecture: Evading the Goldstone Theorem* (“Contornando o Teorema de Goldstone”).

O Barão Englert nasceu no dia 06 de novembro de 1932, em Etterbeck, Bruxelas, na Bélgica. Com a ocupação da Bélgica pelo Exército Nazista, por ocasião da *Segunda Guerra Mundial* (SGM) (1939-1945), ele teve de ocultar sua descendência judaica e viver em orfanatos e casas para crianças nas cidades de Dinant, Lustin, Stoumont e Annevoie-Rouillion, cidades essas que foram, em 1945, libertadas pelo Exército Norte-Americano.

De volta a Bruxelas, ele se graduou em Engenharia Eletromecânica, em 1955, na *Universidade Livre de Bruxelas* (ULB) onde, também, obteve o Doutorado em Física, em 1959. De 1959 até 1961, Englert foi para a *Cornell University*, nos Estados Unidos, trabalhando com Brout. Em 1961, Englert voltou à ULB e tornou-se professor universitário. Em 1980, juntamente com Brout, criou um grupo para trabalhar em Física Teórica. Em 1984, foi indicado para a (“Cadeira” ou “Cátedra”) *Professor Sackler Chair*, na *School of Physics and Astronomy* da *Tel-Aviv University*. Em 1998, Englert foi indicado como *Professor Emérito* da ULB. Por fim, em 2011, o *Institute for Quantum Studies* da *Chapman University* (Orange, Califórnia), ofereceu-lhe o cargo de Eminente Professor Visitante.

Destaque-se que, antes de compartilhar o PNF2013, Englert recebeu outras honrarias, tais como: em 1978, *First Prize* (com Brout e o físico belga Edgard Gunzig) da *Gravity Research Foundation Awards*; em 1982, *Franqui Prize* da *Franqui Foundation*; em 1997, *High Energy and Particle Physics Prize* (com Brout e Higgs) da *European Physical Society* (EPS); em 2004, *Wolf Prize in Physics* (com Brout e Higgs), pela *Wolf Foundation*; em 2010, *J. J. Sakurai Prize for Theoretical Particle Physics* (com Brout, Guralnik, Hagen, Higgs e Kibble). Por fim, em 08 de julho de 2013, o Rei Alberto II da Bélgica (n.1934), por Decreto Real, concedeu a Englert o Título Nobre de Barão. (wikipedia/Englert). Registre-se que, no dia 08 de dezembro de 2013, Englert apresentou sua *Nobel Lecture: The BEH Mechanism and Its Scalar Boson* [“O Mecanismo BEH (Brout-Englert-Higgs) e Seu Bóson Escalar].

Agora, vejamos o significado dessa premiação e, para isso, vamos fazer um resumo histórico sobre as Partículas Elementares. Como vimos em verbete desta série, para os antigos filósofos gregos, existiam quatro tipos de forças: as que atuam nos corpos nas proximidades de nosso planeta Terra (as **terrestres**); as que atuam nos corpos celestes (as **celestes**); as exercidas pela **magnetita** ou **ímã natural** (hoje conhecida quimicamente como o óxido de ferro: Fe_3O_4) – a **força magnética**; e as exercidas pelo **âmbar**, quando este é atritado com um pedaço de lã – a **força elétrica**. Estas duas últimas foram mencionadas pelo filósofo e astrônomo grego Tales de Mileto (624-546). Durante longo tempo os fenômenos elétricos e magnéticos, por se apresentarem muito semelhantes, foram confundidos, até serem, pela primeira vez, diferenciados pelo matemático italiano Ge(i)rolamo Cardano (Jerome Cardan) (1501-1576). Observação análoga foi realizada pelo médico e físico inglês William Gilbert (1544-1603), que a registrou em seu famoso tratado **De Magnete**, publicado em 1600. Aliás, nesse livro, esse físico cunhou o termo **elétrico** para os corpos que se comportavam como o **âmbar** (“elektron”, em grego) quando atritado com lã. Tais 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 ideia de unificação considerada pelo astrônomo armeno Abu Ar-Rayan Muhammad ibn Ahmad al-Biruni (973-c.1051) 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 as **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 [Great Books of the Western World 12 (Encyclopaedia Britannica, Inc., 1993)].

Por sua vez, as primeiras experiências indicando a unificação entre as *forças elétrica e magnética* foram realizadas pelo farmacêutico e físico dinamarquês Hans Christiaan Oersted (1777-1851). Com efeito, em 1807, Oersted procurou, sem êxito, encontrar uma relação entre aquelas forças. Ela só foi por ele 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 ideia 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 ainda interessante observar 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 Jean Arago (1786-1853) (*Annales de Chimie et de Physique* 15, p. 93) e André Marie Ampère (1775-1836) (*Annales de Chimie et de Physique* 15, p. 170). [Roberto de Andrade Martins, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* 10, p. 89 (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 a 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 caiam 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)]. 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)]. Note-se que, até o presente momento (dezembro de 2013), essas duas forças ainda não foram unificadas, apesar de várias tentativas feitas por vários pesquisadores, como, por exemplo, o físico finlandês Gunnar Nordström (1881-1923), em 1914 (*Zeitschrift für Physik* 15, p. 504), o matemático e físico alemão Hermann Klaus Hugo Weyl (1885-1955); em 1918 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften, Part 1*, p. 465); o matemático e linguista alemão Theodor Kaluza (1885-1954), em 1921 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften, Part 1*, p. 966); o astrônomo inglês Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944), ainda em 1921 (*Proceedings of the Royal Society of London* 99, p. 104); os físicos alemães germano-suíço-norte-americano Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921) e Jakob Grommer (1879-1933), em 1923 (*Scripta Jerusalem Universitat* 1, Número 7); e o físico sueco Oskar Benjamin Klein (1894-1977), em 1926 (*Zeitschrift für Physik* 37, p. 895; *Nature* 118, p. 516).

A formulação matemática da unificação entre as **forças elétrica e magnética** – conhecida desde então como **força eletromagnética** - foi finalmente conseguida pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879), em seu livro intitulado **A Treatise on Electricity and Magnetism**, publicado em 1873 (Dover, 1954). Aliás, é oportuno dizer que, nesse livro, Maxwell apresentou também a unificação da Óptica com o Eletromagnetismo ao demonstrar que *a luz é uma onda eletromagnética*.

Note-se que o Século 19 terminou com a ideia 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.

A tentativa da unificação entre as forças da Natureza até então conhecidas (**gravitacional e eletromagnética**) tornou-se ainda mais complicada com a descoberta, na década de 1930, de mais duas forças, a **fraca** e a **forte**, decorrentes da **radioatividade**, descoberta pelo físico francês Antoine Henry Becquerel (1852-1908), em 1896 [*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Academie des Sciences de Paris (CRHSASP)* **122**, p. 420; 501].

Por sua vez, a descoberta dos **raios-X** pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen (1845-1923; PNF, 1901), em 1895 (*Sitzungsberichte der Würzburger Physikalischen-Medicinischen Gesellschaft*, p. 132), levou o físico inglês Ernest Rutherford, Lord Rutherford de Nelson (1871-1937) a medir a ionização provocada por esses raios, trabalho esse que fez como colaborador do físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906) – que viria a descobrir o **elétron** (e^-), em 1897 (*Philosophical Magazine* **44**, p. 295) – de quem Rutherford era pesquisador-estudante no *Laboratório Cavendish*, em Londres, e publicado em 1896 (*Philosophical Magazine* **42**, p. 392). Por outro lado, a descoberta da **radioatividade** por Henri Becquerel, em 1896, referida anteriormente, conduziu Rutherford a outro aspecto de suas pesquisas, qual seja, a de medir a ionização provocada pelos “raios de Becquerel” fazendo-os passar através de folhas metálicas. Neste seu trabalho, descobriu, em 1898 (*Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **9**, p. 401), que os “raios Becquerel” eram constituídos de dois tipos de partículas: **alfa** (α), carregada positivamente, e **beta** (β), carregada negativamente. Em 1899, em trabalhos independentes, Becquerel (*CRHSASP* **129**, p. 996), os físicos austríacos Stefan Meyer (1872-1949) e Egon Ritter von Schweidler (1873-1948) (*Physikalische Zeitschrift* **1**, p. 113), e o físico alemão Frederick Otto Giesel (1852-1927) (*Annalen der Physik* **69**, p. 834), observaram a deflexão magnética sofrida por essas partículas. Em 1900 (*CRHSASP* **130**, p. 809), Becquerel mostrou que os **raios** β eram raios catódicos, isto é, **elétrons**. Ainda em 1900 (*CRHSASP* **130**, p. 1010; 1178), o físico francês Paul Villard (1860-1934) observou que a **radioatividade** possuía uma terceira parcela que não era defletida pelo campo magnético, parcela essa penetrante e semelhante aos **raios-X**, à qual Rutherford denominou de **gama** (γ). Essa descoberta foi confirmada por Becquerel, também em 1900 (*CRHSASP* **130**, p. 1154).

Depois do sucesso de seu trabalho sobre a **radioatividade**, Rutherford passou a usá-la, principalmente a **radioatividade alfa** (α), em outros experimentos, agora com a colaboração dos físicos, o alemão Hans (Joahnes) Wilhelm Geiger (1882-1945) e o inglês Ernst Marsden (1889-1970), sobre o espalhamento de **partículas** α pela matéria. Com efeito, em 1906 (*Philosophical Magazine* **11**, p. 166; **12**, p. 134), Rutherford apresentou os resultados de experiências nas quais observou um pequeno espalhamento (desvio de aproximadamente 2^0) de **partículas** α ao passarem através de uma lâmina de mica de 0,003 cm de espessura. Em 1908 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A81**, p. 174), Geiger estudou o espalhamento de um feixe de **partículas** α , oriundo de um composto de rádio, o brometo de rádio (RaBr_2), através de uma lâmina fina de metal [alumínio (Al) e ouro (Au)]. As **partículas** α [que são núcleos de hélio (${}_2\text{He}^4$), conforme Rutherford e o químico inglês Thomas Royds (1884-1955) mostraram em 1909 (*Philosophical Magazine* **17**, p. 281)] espalhadas eram detectadas em contadores de cintilações. Usando essa técnica de contagem, Geiger e Marsden, em 1909 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A82**, p. 495), estudaram o espalhamento de um feixe de **partículas** α [oriundas do radônio (Rn)], através de uma lâmina fina de metal. Nesse estudo, eles observaram que do feixe não muito bem colimado e contendo cerca de 8.000 daquelas partículas, apenas uma delas era refletida, ou seja, era espalhada num ângulo $> 90^0$. Este tipo de espalhamento foi

também comentado por Geiger, em 1910 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A83**, p. 492). Em 1911 (*Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society* **55**, p. 18; *Philosophical Magazine* **5**, p. 576; **21**, p. 669), Rutherford interpretou os resultados das experiências de Geiger e Marsden, propondo seu célebre **modelo planetário do átomo**, segundo o qual o átomo era constituído de uma parte central positivamente carregada, denominada por ele de **núcleo atômico**, com **elétrons** girando em torno dele, constituindo a **eletrosfera**.

Por outro lado, a **radioatividade beta** (β), composta de **elétrons** (e^-) emitidos por um núcleo A que se transformava em outro núcleo B, emissão essa conhecida como **decaimento beta** (β), foi estudada pelo físico inglês Sir James Chadwick (1891-1974; PNF, 1935), em 1914 (*Verhandlungen der Deutschen Physikalische Gesellschaft* **16**, p. 383), estabelecendo que aquelas partículas possuíam um espectro contínuo de energia. Registre-se que, em 1919 (*Philosophical Magazine* **37**, p. 581), Rutherford voltou a realizar experiências com **partículas** α , ocasião em que realizou a primeira transmutação química, ou seja, transformou o nitrogênio (${}_7\text{N}^{14}$) no oxigênio (${}_8\text{O}^{17}$) e que resultou na descoberta do **próton** (p, o núcleo do hidrogênio – ${}_1\text{H}^1$), com sua célebre reação nuclear: ${}_2\text{He}^4 + {}_7\text{N}^{14} \rightarrow {}_8\text{O}^{17} + {}_1\text{H}^1$. Logo em 1920 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A97**, p. 374), Rutherford sugeriu que no **núcleo atômico**, que havia descoberto, em 1911, além de cargas positivas (p) existiam, também, cargas neutras.

Voltemos às **partículas** β que, segundo Chadwick, possuíam um espectro contínuo de energia, conforme destacamos acima. Desse modo, na década de 1920, desenvolveu-se uma questão polêmica relacionada à energia dessas partículas de carga negativa. Desejava-se saber se a mesma era determinada pelas energias dos núcleos final (B) e inicial (A) ou se variava continuamente. Além do mais, havia uma questão objetiva: se um **elétron** é emitido pelo núcleo A que se transforma no núcleo B e tem energia menor que suas massas de repouso, para onde vai a energia que está faltando? Em 14 de fevereiro de 1929, o físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922) escreveu uma carta para o físico inglês Sir Ralph Howard Fowler (1889-1944), na qual defendeu a tese de que o Princípio da Conservação da Energia, que parecia estar sendo violado no **decaimento** β , só era válido estatisticamente para fenômenos macroscópicos, sendo violado nos processos microscópicos. Aliás, essa mesma tese já havia sido defendida por Bohr, em trabalho publicado em 1924 (*Philosophical Magazine* **47**, p. 785; *Zeitschrift für Physik* **24**, p. 69), em parceria com os físicos, o holandês Hendrik Anthony Kramers (1894-1952) e o norte-americano John Clarke Slater (1900-1976), para explicar o **efeito Compton** (variação do comprimento de onda dos **raios-X** ao ser espalhado pelo **elétron**) descoberto, em 1923, pelo físico norte-americano Arthur Holly Compton (1892-1962; PNF, 1927) (*Physical Review* **21**, p. 207; 483; 715; **22**, p. 409; *Philosophical Magazine* **46**, p. 897) e, independentemente, pelo físico e químico holandês Petrus Joseph Wilhelm Debye (1884-1966; PNQ, 1936) (*Physikalische Zeitschrift* **24**, p. 161). Para resolver a polêmica referida acima, em 04 de dezembro de 1930, o físico austro-norte-americano Wolfgang Pauli Junior (1900-1958; PNF, 1945) propôs, na reunião do *Group of Radioactivity of Tübingen*, em uma “carta aberta” (intitulada: “*To Radioactivity Ladies and Gentlemen*”) aos físicos, a sueco-austríaca Lise Meitner (1878-1968) e o alemão Geiger, ele propunha a existência de uma partícula neutra, de massa muito pequena, não excedendo um centésimo da massa do próton, emitida junto com o elétron no **decaimento** β pela “mãe” (A), cuja energia restaurava aquele princípio. [Para uma boa discussão sobre essa polêmica, ver: Abraham Pais, **Niels Bohr’s Times, in Physics, Philosophy, and Polity** (Clarendon Press, 1991); Francisco Caruso e Vitor Oguri, **Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos** (Campus/Elsevier, 2006); Bassalo & Caruso, **Pauli** (Livraria da Física, 2013)]. Registre-se que, em 1932 (*Proceedings of the Royal Society of London* **A136**, p. 696; 735; *Nature* **129**, p. 312), Chadwick confirmou a existência do **nêutron** (${}_0\text{n}^1$) como constituinte do **núcleo atômico rutherfordiano**, por intermédio da reação: ${}_2\text{He}^4 + {}_5\text{B}^{11} \rightarrow {}_7\text{N}^{14} + {}_0\text{n}^1$, sendo ${}_5\text{B}^{11}$ um isótopo do boro.

Segundo vimos em verbete desta série, a “partícula pauliana” foi denominada de **neutrino** () (nêutron pequenino, em italiano) pelo físico ítalo-norte-americano Enrico Fermi (1901-1954; PNF,

1938), em 1934 (*Nuovo Cimento* **11**, p. 1; *Zeitschrift für Physik* **88**, p. 161), por ocasião em que formulou a teoria matemática do **decaimento** β , segundo a qual, por intermédio de uma nova força na natureza – chamada mais tarde de **força fraca** – o **nêutron** transforma-se em um **próton**, com a emissão de um **elétron** e da “partícula pauliana”, ou seja: . Note-se que, somente em 1953 (*Physical Review* **92**, p. 1045), os físicos norte-americanos Emil John Konopinski (1911-1990) e Hormoz Massou Mahmoud (n.1918) mostraram que a “partícula pauliana” era uma antipartícula, o **antineutrino do elétron** ($\bar{\nu}_e$), ao introduzirem o conceito de **número leptônico** L e sua lei de conservação. Assim, eles atribuíram o valor $L = +1$ para o elétron (e^-) e seu **neutrino associado** (ν_e), e $L = -1$, para as suas respectivas antipartículas, o pósitron (e^+) e o **antineutrino associado** ($\bar{\nu}_e$), como vimos em verbete desta série.

Vejamos agora como aconteceu a proposta da **força forte**. Em 1927 (*Proceedings of the Royal Society* **A114**, p. 243; 710), o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) publicou dois trabalhos nos quais considerou a **função de onda de Schrödinger** (e sua conjugada) como operadores [em vez de números, como o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933) havia considerado, em 1926 (*Annales de Physique Leipzig* **79**, p. 361; 489; 734; 747; **80**, p. 437; e **81**, p. 136), ao apresentar sua famosa equação: $H = \dots$], porém sua álgebra era não-comutativa, isto é: . Com esse procedimento, conhecido como Teoria Quântica da Emissão e Absorção da Radiação [também conhecida como **segunda quantização**, que considera os operadores **criação** (a^+), **destruição** (a^-) e **número de ocupação** ($N = a^+a^-$)], Dirac quantizou o campo eletromagnético, procedimento esse que deu origem ao desenvolvimento da *Quantum Electrodynamics* (Eletrodinâmica Quântica - QED). Segundo esta 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** [nome cunhado, em 1926 (*Nature* **118**, p. 874), pelo químico norte-americano Gilbert Newton Lewis (1875-1946) e hoje denotado por γ] são as partículas mediadoras (“quanta”) da **força (interação) eletromagnética**.

Por outro lado, a descoberta do nêutron por Chadwick, em 1932, como uma das partículas constituintes do **núcleo atômico rutherfordiano**, juntamente com o **próton**, provocou outra 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 interagem por intermédio de uma força atrativa capaz de superar a “repulsão coulombiana”. Ainda em 1932 (*Zeitschrift für Physik* **78**, p. 156), Heisenberg defendeu a ideia 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. [Bassalo & Caruso, **Fermi** (Livreria da Física, 2013)].

A ideia da energia 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 apresentava uma estrutura de saturação dessa energia. Essa ideia 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 **déuteron** (núcleo do hidrogênio pesado: ${}_1^2\text{H} = {}_1^2\text{D}$) e não a **partícula** α que era completamente saturada pela “força de Heisenberg”. Observe-se que o ${}_1^2\text{D}$ foi descoberto, em 1932 (*Physical Review*

39, p. 164; 864; 40, p. 1), pelos químicos norte-americanos Harold Clayton Urey (1893-1981; PNF, 1934), Ferdinand Graft Brickwedde (1903-1989) e George Moseley Murphy (1903-1969). [Bassalo & Caruso, **Heisenberg** (em preparação)].

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: $V = - (A/r) \exp(-\mu r)$, onde A é uma constante e $\mu = \frac{m_U c}{\hbar}$. Portanto, para Yukawa a **força nuclear** [mais tarde chamada de **força (interação) 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 pi** (π). É oportuno registrar que a existência dessa partícula foi confirmada nas experiências realizadas, em 1947 (*Nature* **159**, p. 694), pelos físicos, o brasileiro Cesare (César) Mansueto Giulio Lattes (1924-2005), os ingleses Hugh Muirhead (1925-2007) 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** - μ) e **secundários** (hoje, **píons** - π) (vide verbete nesta série).

Assim, a descoberta de mais duas **forças (interações)** na Natureza 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 isso ocorreu. 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 (partículas que têm spin zero ou inteiro) 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 (em notação da época): $n \rightarrow p + \omega^- \rightarrow e^- + \nu$.

A ideia 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** $\alpha \approx 1/137 \approx 10^{-2}$) 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, Leite Lopes propôs que a interação elétron-nêutron só poderia ser realizada por

intermédio de um bóson vetorial neutro, o hoje conhecido Z^0 , chegando a estimar a sua massa em cerca de 60 massas do próton ($60 m_p$). [Bassalo & Caruso, **Feynman** (Livraria da Física, a ser publicado)].

A TYMS voltou a ser objeto de pesquisa por parte do físico japonês Yoichiro Nambu (n.1921; PNF, 2008) ao descobrir, em 1960 (*Physical Review Letters* **4**, p. 382), a **quebra de espontânea de simetria** nessa teoria, usando uma analogia com a supercondutividade [descoberta em 1911 (*Communications from the Physical Laboratory of Leiden* **122B** e **124C**), pelo físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926; PNF, 1913)]. Esta descoberta foi confirmada, em 1961, pelo físico inglês Jeffrey Goldstone (n. 1933) (*Nuovo Cimento* **19**, 154) e, também, por Nambu e G. Jona-Lasínio (*Physical Review* **122**, p. 345; **124**, p. 246). Esses trabalhos mostravam que essa **quebra de simetria** era acompanhada de partículas não-massivas, logo denominadas de **bósons de Nambu-Goldstone** (bN-G) ou, simplesmente, **bósons de Goldstone** (bG), também conhecido como **Teorema de Goldstone** (TG). Logo em seguida, em 1962 (*Physical Review* **127**, p. 965), Goldstone e os físicos, o paquistanês Abdus Salam (1926-1996; PNF, 1979) e o norte-americano Steven Weinberg (n.1933; PNF, 1979) mostraram que a existência desses bósons era um resultado geral da Teoria Quântica de Campos. Em 1964, em trabalhos independentes, Higgs (*Physics Letters* **12**, p. 132; *Physical Review Letters* **13**, p. 508), Englert e Brout (*Physical Review Letters* **13**, p. 321), e Guralnik, Hagen e Kibble (*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** (H), cuja massa foi estimada em experiências posteriores, porém com um grande intervalo, até finalmente ser detectada, em 2012, como veremos mais adiante. Registre-se que, conforme vimos em verbete desta série, em 1966 (*Communications in Mathematical Physics* **2**, p. 108), o físico brasileiro Jorge André Swieca (1936-1980) (de origem polonesa), com a participação de David Kastler e Derek W. Robinson apresentaram uma demonstração axiomática do TG, com as seguintes hipóteses básicas: 1) invariância de Lorentz; 2) espaço de Hilbert com norma positiva definida; 3) simetria global.

Sobre os trabalhos de Higgs descritos acima, há um aspecto curioso a registrar. No primeiro trabalho (*PL* **12**:132), ele mostrou que as partículas sem massa previstas por Goldstone não ocorrem quando a simetria local é espontaneamente quebrada na Teoria de Campo Relativística. Em vista disso, ele preparou um segundo artigo no qual apresentou o seu famoso **mecanismo de Higgs** e o enviou para a *Physics Letters* que foi rejeitado pelos editores com o argumento de que “o artigo não era relativamente óbvio para a física”. Então, Higgs acrescentou um parágrafo extra e o enviou para a *Physical Review Letters* que o publicou, ainda em 1964 (*PRL* **13**:508), mas posteriormente ao artigo de Englert e Brout (*PRL* **13**:321) ([wikipedia/Higgs](https://pt.wikipedia.org/wiki/Higgs)).

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 , a **força eletrofraca** é mediada por quatro **quanta**: o **fóton** (γ), partícula não-massiva e mediadora da **interação eletromagnética** e os bósons vetoriais () (a notação de Z^0 foi sugerida por Weinberg), de massas respectivas: $\approx 87 m_p$ e $\approx 97 m_p$. Observe-se que nessa Teoria de Salam-Weinberg (TSW), as constantes de acoplamento das interações, a **eletromagnética** ($\alpha \approx 1/137$) e a **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  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** () , há a **quebra espontânea** dessa simetria, ocasião em que o fóton (γ) permanece com massa nula, porém os  adquirem massas por incorporação dos bósons carregados () , ao passo que Z^0 adquire massa de uma parte dos bósons neutros () , ficando a outra parte () como uma nova partícula bosônica escalar (spin 0), o referido **bóson de Higgs** (H). (Salam, 1991, op. cit.). Registre-se que uma simetria de um sistema é dita **quebrada espontaneamente** se o

mais baixo estado do sistema é não-invariante sob as operações dessa simetria. (Mauro Sérgio Dorsa Cattani and José Maria Filardo Bassalo, **Higgs Field, Higgs Mechanism and the Boson of Higgs**, <http://publica-sbi.if.usp.br/PDFs/pd1670.pdf>).

Por outro lado, a TSW apresentava uma grande dificuldade, pois ela não era **renormalizável**, ou seja, apareciam divergências (infinitos) nos cálculos envolvendo os quatro *quanta*, característicos dessa teoria. 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*, p. 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 (1926-2009) (*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 **força (interação) eletrofraca**. Só faltava a detecção de suas partículas mediadoras: . Para detalhes dos trabalhos de 't Hooft e Veltman, ver: Martinus Veltman, **Facts and Mysteries in Elementary Particles** (World Scientific, 2003). Note-se que a **renormalização** [termo cunhado pelo físico norte-americano Robert Serber (1909-1997), em 1936 (*Physical Review 49*, p. 545)] 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.

É oportuno destacar que a importância da descoberta do **bóson de Higgs** (H) decorre do fato de que o *Standard Model* (SM) (“Modelo Padrão”) da Física das Partículas Elementares, modelo este composto pela TSW e pela Cromodinâmica Quântica (*Quantum Chromodynamics* - QCD) [que explica a **força forte**, mediada pelo **glúon** (g), que liga os **quarks** (q)], a massa das partículas é um parâmetro, ou seja, ela é dada em função da massa do elétron (m_e) cujo valor é determinado experimentalmente, valor esse que decorre das experiências de J. J. Thomson, em 1897 (*Philosophical Magazine 44*, p. 295), que calculou a relação e/m_e , e os experimentos do físico norte-americano Robert Andrews Millikan (1868-1953; PNF, 1923), para determinar a carga do elétron (e), a partir de 1906 e definida em 1912 (*Transactions of the American Electrochemical Society 21*, p. 185).

Concluindo este verbete, é oportuno fazer três comentários sobre o H. Primeiro, sobre o nome em que ele é conhecido: **partícula Deus** em virtude do título do livro escrito pelo físico norte-americano Leon Max Lederman (n. 1922; PNF, 1988) em parceria com o escritor norte-americano Dick Teresi: **The God Particle: If the Universe Is the Answer, What Is the Question?** (Delta Book, 1994), no qual há uma descrição histórico-conceitual da Física das Partículas Elementares e, portanto, envolvendo essa “misteriosa” partícula que é a responsável pela massa das partículas, segundo vimos acima. Aliás, sobre o título principal desse livro, há o seguinte esclarecimento em sua página 22: - *Why God Particle? Two reasons. One, the publisher wouldn't let us call it the Goddamn Particle, though that might be a more appropriate title, given its villainous nature and the expense it is causing. And two, there is a connection of sorts, to another book, a much older one ...* (“Por que Partícula Deus? Duas razões. Uma, o editor não permitiu que eu a chamasse de Partícula Maldita, embora ele possa ser um título

apropriado, o mesmo supõe sua natureza infame e causa prejuízo. Dois, existe uma conexão natural a outro livro, e muito mais velho...”). É oportuno dizer que Lederman se refere a Bíblia pois, em seguida a essa afirmação, ele cita uma passagem do *Gênesis* 11:1-9. Por outro lado, é interessante ressaltar que Salam (1991, op. cit.), diz que a partícula Z^0 é a verdadeira **partícula de Deus**, pois ela é a partícula que faz o elétron atômico ter uma órbita espiralada e, portanto, o átomo torna-se *quiral* (a imagem especular é diferente da imagem real). Essa é a propriedade que faz com a maioria dos 20 aminoácidos (responsáveis pela vida) serem moléculas *quirais*. Desse modo, considerando que a **Química da Vida** se deve à essa *quiralidade*, Salam (op. cit.) escreveu a seguinte frase: - *Existe uma certeza cada vez maior de que a força eletrofraca é a verdadeira força da vida e que DEUS criou a partícula Z^0 para fornecer a quiralidade às moléculas da vida.* Assim, creio que podemos dizer que Z^0 é a verdadeira **Partícula de Deus**.

O segundo comentário relaciona-se com a sua detecção. Proposto o H, os grandes aceleradores de partículas, principalmente, o **LEP (Large Electron-Positron Collider) Working Group for Higgs Boson Searches** do EP/CERN [Colaborações: *Apparatus for LEP PHysics* (ALEPH), *Detector with Lepton, Photon and Hadron Identification* (DELPHI), *Terceiro Experimento do LEP* (L3), *Omni-Purpose Apparatus for LEP* (OPAL)], e os **anéis de colisão próton-antipróton** [ppbar] do FERMILAB [*Tevatron New Phenomena & Higgs Working Group: Combined D0/CDF* (TEVNPHWG:D0/CDF)] e o do LHC/CERN (Colaborações: ATLAS e CMS) começaram a busca por sua confirmação. Note-se que o LEP é um anel de 27 km e energia inicial de 91 GeV, quando construído em 1989; o **Tevatron** é um anel de 6,3 km e energia de 2 TeV, construído em 1983 e desativado em 30 de setembro de 2011; e o LHC (sucessor do LEP, a partir de 2000), mantendo 27 km e energia de 7 TeV (em 2011) e 8 TeV (em 2012), por feixe. (Note que: $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$; $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$; sendo $1 \text{ eV} = 1,602176462 \times 10^{-19} \text{ J}$ e que $E = mc^2 = m$, considerando-se $c = 1$).

A busca de H começou nas duas últimas décadas do Século 20 e prolongou-se até 2012, com várias evidências de sua existência encontradas pelas colaborações do LEP: ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, TEVNPHWG:D0/CDF (sendo que dessas colaborações do LEP, nenhuma evidência foi confirmada e indicavam uma massa para o H de 115 GeV, menor do que o valor realmente detectado, como veremos a seguir), e pelo ATLAS e CMS, conforme se pode ver nos artigos de Gregorio Bernardi, Marcela Carena (física argentina nascida em 1962) e Thomas R. Junk, **Higgs Bosons Theory and Searches** [*IN: Physical Review D86*, article number (a.n.) 010001 (2012)] e de M. Della Negra, Peter Jenni e T. S. Virdee, **Journey in the Search for the Higgs Boson: The ATLAS and CMS Experiments at the Large Hadron Collider** (*Science* **338**, p. 1560, 21 de dezembro de 2012). Contudo, a sua existência só foi considerada dentro dos padrões internacionais (com nível de precisão de 5σ , ou seja, menos do que um em um milhão de chances de erro) em 2012, quando a colaboração TEVNPHWG:D0/CDF (*arXiv:1207.0449v1 [hep-ex]*, 02 de julho) anunciou (depois de uma informação extra-oficial do LHC) a existência de H com $m_H \approx (114-130) \text{ GeV}$, com um nível de precisão de apenas 3σ , e as colaborações ATLAS (*Physics Letters B716*, p. 1) e CMS (*Physics Letters B716*, p. 30) anunciaram, por sua vez, em 04 de julho, terem realmente detectado (com 5σ) o H com os respectivos valores de $m_H \approx 126,5 \text{ GeV}$ e $125,3 \pm 0,6 \text{ GeV}$, após observaram, basicamente, o decaimento de H nos canais: $H \rightarrow 2Z^0$ e $H \rightarrow 2\gamma$. Note-se que os demais canais observados pelo LHC: $H \rightarrow b\bar{b}$ não apresentava nenhuma evidência de H, o que levou alguns físicos teóricos a especular que essa partícula era “fermifóbica”, e o canal $H \rightarrow W^+ + W^-$ também observado pelo LHC. Note-se que, o canal $H \rightarrow \tau\bar{\tau}$ era o candidato mais provável, e no final a descoberta aconteceu no canal $H \rightarrow 2\gamma$ (e $2Z^0$), não porque era mais abundante, mas sim por ser o mais limpo, e com maior capacidade de rejeição do *background* hadrônico (José Guilherme Rocha de Lima, por e-mail, em 22/11/2013; Gilvan Augusto Alves, por e-mail, em 30/11/2013).

É oportuno registrar que nessas duas colaborações trabalharam físicos brasileiros. Na ATLAS, dentre os quase três mil cientistas que participaram dessa colaboração, estiveram presente treze (13) cientistas brasileiros (físicos e engenheiros eletrônicos), assim distribuídos: José Guilherme Rocha de Lima (n.1967) do *Fermi National Laboratory*, Denis Oliveira Damazio (n.1975), do *Physics Department*

do *Brookhaven National Laboratory* (USA), e os das seguintes instituições brasileiras: 1) *Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro e Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação em Engenharia* (IF/UFRJ/COPPE) – Luiz Pereira Calôba (n.1944), Carmen (Lucia Lodi) Maidantchik (n.1967), Fernando Marroquim (Leão de Almeida Junior) (n.1948), Andre Asevedo Nepomuceno (n.1979), Marcelo Perantoni (n.1973) e José Manoel de Seixas (n.1954); 2) *Universidade Federal de Juiz de Fora* (UFJF) - Augusto Santiago Cerqueira (n.1974) e Luciano Manhães de Andrade Filho (n.1978); 3) *Departamento de Ciências Naturais da Universidade Federal de São João del Rei* (DCN/UFSJ) – Maria Aline Barros do Vale (n.1961); 4) *Instituto de Física da Universidade de São Paulo* (IF/USP) - Marisilvia Donadelli (n.1968) e Marco Aurélio Lisboa Leite (n.1966). Na CMS, com também quase três mil cientistas, estiveram presente trinta e cinco (35) brasileiros de três instituições brasileiras e assim distribuídos: 1) *Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas* (CBPF) – Gilvan Augusto Alves (n.1960), Lucas (de Brito) Cavalcanti (n.1986), Marcos Correa Martins Junior (n.1984), Thiago (dos Reis) Martins (n.1984), Maria Elena Pol (n.1948) e Moacyr Henrique Gomes e Souza (n.1944); 2) *Instituto de Física da Universidade Estadual do Rio de Janeiro* (IF/UERJ) – Walter Luiz Alda Júnior (n.1984), Wagner (de Paula) Carvalho (n.1968), Analu Custódio (n.1987), Eliza Melo da Costa (n.1981), Dilson de Jesus Damião (n.1979), Carley (Pedro) de Oliveira Martins (n.1951), Sandro Fonseca de Souza (n.1975), Helena (Brandão) Malbouisson (n.1978), Magdalena Malek (n.1981), Diego Matos Figueiredo (n.1984), Luiz (Martins) Mundim (Filho) (n.1966), Hélio Nogima (n.1963), Vitor Oguri (n.1951), Wanda Lúcia Prado da Silva (n.1953), Alberto (Franco de Sá) Santoro (n.1941), André Sznajder (n.1967) e Antônio Vilela Pereira (n.1982); 3) *Instituto de Física Teórica da Universidade Estadual Paulista* (IFT/UNESP) – Tiago Santos dos Anjos (n.1986), César Augusto Bernardes (n.1985), Flávia de Almeida Dias (n.1987), Thiago Rafael Fernandez Perez Tomei (n.1983), Eduardo de Moraes Gregores (n.1958), Rogério Luiz Iope (n.1965), Caio Lagana Fernandes (n.1987), Sérgio Morais Lietti (n.1970), Franciole da Cunha Marinho (n.1981), Pedro Galli Mercadante (n.1969), Sérgio Ferraz Novaes (n.1956) e Sandra dos Santos Padula (n.1956).

Vejamos o terceiro comentário sobre o H, agora relacionado com a sua massa (m_H), que apresenta algumas dificuldades. Por exemplo, embora o H e todas as partículas do SM entrem em correções radiativas (*loops*) para a massa *bare* (“nua”) do H, o problema que surge é o de evitar que essas correções cresçam indefinidamente fazendo com que $m_H > 1$ TeV (Alves, *e-mail* citado). É oportuno esclarecer que o astrofísico brasileiro Mario Novello (n.1942) em artigos publicados em 2010 (*arXiv:1003.5126v2 [physics.gen-ph]* 5 de abril de 2010), em 2011 (*Classical and Quantum Gravity* **28**, a.n. 035003; *International Journal of Modern Physics* **A26**, p. 3781) e, em 2012 (*Physical Review* **D86**, p. a.n. 063510) [este, em parceria com o físico brasileiro Eduardo Henrique Silva Bittencourt (n.1985)], propõe o mecanismo gravitacional (a ação gravitacional do Universo sobre suas partes) como gerador da massa de todas as partículas elementares, inclusive à do **bóson de Englert-Higgs** (EH), como Novello o denomina. [Edgard Elbaz, **O que, afinal, confere massa ao bóson de Higgs?**, *Ciência Hoje* **139**, p. 70 (dezembro de 2013)].

Outro problema é que a m_H não explica as massas das partículas que decorrem da Teoria da Supersimetria. Vejamos como esta foi formulada. Em 1971 (*Nuclear Physics* **B34**, p. 632), os físicos, o francês Jean Loup Gervais (n.1936) e o japonês Bunji Sakita (n.1930), descobriram uma nova simetria – logo conhecida como **supersimetria** (SUSY – “supersymmetry”) [que envolve energias da ordem de 10^{20} GeV (ou dimensões da ordem de 10^{-34} cm)] - que converte bósons em férmions.

Em 1973, trabalhos independentes dos físicos russos D. V. Volkov e V. P. 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** (partículas **SUSY** ou **ino**) com propriedades idênticas, exceto no valor de seu spin, que vale o spin da partícula correspondente, subtraído de $\frac{1}{2}$. 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** (partículas **ino**) são, respectivamente: **gravitino**, de spin 3/2; **gluino**, de spin $\frac{1}{2}$; **wino**, de spin $\frac{1}{2}$; **zino⁰**, de spin $\frac{1}{2}$; e **photino**, de spin $\frac{1}{2}$. Para as

partículas constituintes da matéria (**quarks** e **léptons**, ambas de spin $\frac{1}{2}$), suas **supercompanheiras** são: **squarks** e **sléptons**, de spin 0.

Com a previsão da H, em 1964, como responsável pela massa das partículas elementares, como registramos acima, surgiu a necessidade de encontrar uma versão do SM para incorporar a SUSY. Assim, em 1981 (*Nuclear Physics* **B193**, p. 150), os físicos norte-americanos Savas Dimoupolos (n.1952) (de origem grega) e Howard Mason Georgi (n.1947) apresentaram uma extensão da SUSY ao SM, o hoje conhecido *Minimal Supersymmetric Standard Model* (MSSM), no qual se considera uma transformação com **simetria global**, isto é, que é aplicada uniformemente em todos os pontos do espaço, permitindo transformar bósons em férmions e vice-versa. Além do mais, ela prediz as partículas **ino** com massas entre 100 GeV e 1 TeV. Contudo as experiências realizadas (Bernardi, Carena and Junk, op. cit.), pelo **Tevatron** e pelo LEP e LHC do CERN, até 2013, envolvendo energias até a ordem de TeV e que indicaram a existência de H neutros, não encontraram nenhuma evidência das partículas **SUSY/ino**.

Para finalizar este verbete é oportuno registrar que o LHC continuou a realizar experiências, por intermédio de duas colaborações: 1) LHCb, em um experimento envolvendo a oscilação entre o **méson B_s** [composto de um **antiquark bonito** e um **quark estranho** () e cuja massa foi pela primeira vez medida, em 1993 (*Physics Letters* **B311**, p.425), por D. Buskulic e Alexander Finch] e sua antipartícula (**B_s⁻**); 2) CMS, em busca das **inos**, sem obter sucesso, conforme artigo publicado, em setembro de 2013 (*Physical Review Letters* **111**, a.n. 131802), pelos físicos Jonathan L. Feng, Philipp Kant, Stefano Profumo e David Sanford. Neste artigo, esses autores afirmam que, embora a violação da simetria CP (carga/paridade) observada no decaimento ($B_s \rightarrow \mu^+ + \mu^-$) confirme o SM (com precisão $> 4\sigma$), porém não foi encontrado nenhum **SUSY/ino** como se esperava. Desse modo, alguns físicos afirmaram que essa experiência deixou ainda uma porta muito aberta para uma **Nova Física**. (wikipedia/Strange B meson). Apesar dessa descrença, a esperança de confirmar o MSSM foi proposta, em outubro de 2013 (*European Journal Physics* **C73**, p. 2552), no artigo escrito por Carena, S. Heinemeyer, Oscar Stal, C. E. M. Wagner e G. Weiglein e intitulado: **Benchmark Scenarios after the Discovery of a Higgs-like Particle**.



ANTERIOR

SEGUINTE