



# CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

[www.bassalo.com.br](http://www.bassalo.com.br)

## Estamos no Limiar de uma Nova Física?: 1) Dificuldades do Modelo Padrão das Partículas Elementares (MPPE).

Em verbetes desta série, vimos que os dois **Modelos Padrão** (*Standard Model*) que explicam o micro (partículas elementares) e o macro (cosmologia) mundos apresentam algumas dificuldades. Neste verbete, trataremos do **Modelo Padrão das Partículas Elementares** (MPPE) e, para isso, usaremos as referências: Michael Boris Green, John Henry Schwarz and Edward Witten, **Superstrings Theory: Volumes 1 and 2** (Cambridge University Press, 1987); Paul Charles William Davies and Julien Russel Brown (Editors), **Superstrings: A Theory of Everything?** (Cambridge University Press, 1989); John D. Barrow, **Teorias de Tudo: A Busca da Explicação Final** (Jorge Zahar, 1994); George Smott III e Keay Davidson, **Dobras no Tempo** (Rocco, 1995); Steven Weinberg, **Sonhos de uma Teoria Final: A Busca das Leis Fundamentais da Natureza** (Rocco, 1996); Alan Harvey Guth, **O Universo Inflacionário** (Campus, 1997); Michio Kaku, **Introduction to Superstrings and M-Theory** (Springer-Verlag, 1999); Michio Kaku, **Hiperespaço: Uma Odisséia Científica Através de Universos Paralelos, Empenamentos do Tempo e a Décima Dimensão** (Rocco, 2000); Brian Greene, **O Universo Elegante: Supercordas, Dimensões Ocultas e a Busca da Teoria Definitiva** (Companhia das Letras, 2001); Stephen William Hawking, **O Universo numa Casca de Noz** (Mandarim, 2001); Lee Smolin, **Três Caminhos para a Gravidade Quântica** (Rocco, 2002); Martinus Veltman, **Facts and Mysteries in Elementary Particles** (World Scientific, 2003); Brian Greene, **O Tecido do Cosmo: O Espaço, o Tempo e a Textura da Realidade** (Companhia das Letras, 2005); Maria Cristina Batoni Abdalla, **O Discreto Charme das Partículas Elementares** (Editora UNESP, 2006); Stephen Hawking and Leonard Mlodinow, **The Grand Design** (Bantam Books, 2010); Frank Close, **The Infinity Puzzle: Quantum Field Theory and the Hunt for an Orderly Universe** (Basic Books, 2011); Mauro Anselmino, Francisco Caruso, José Roberto Mahon e Vitor Oguri, **Introdução à QCD Perturbativa** (Livros Técnicos e Científicos, 2013); Rogério Rosenfeld, **O Cerne da Matéria** (Companhia das Letras, 2013); e Ben Best, **The Standard Model of Particle Physics** ([www.benbest.com](http://www.benbest.com)), (acesso em 14/01/2014).

O MPPE é, basicamente, constituído pela Teoria de Salam-Weinberg (TSW) [fundamentada na Eletrodinâmica Quântica (*Quantum Electrodynamics* – QED) (ver verbete nesta série)] e pela Cromodinâmica Quântica (*Quantum Chromodynamics* - QCD), com complementos posteriores. A TSW, que unificou as **forças: eletromagnética** (de intensidade relativa:  $7 \times 10^{-3}$ ) e **fraca** (de intensidade relativa:  $10^{-5}$ ), foi desenvolvida nos artigos dos físicos, o norte-americano Steven Weinberg (n.1933; PNF, 1979), em 1967 (*Physical Review Letters* **19**, p. 1264) e o paquistanês Abdus de Salam (1926-1996; PNF, 1979), em 1968 (*Proceedings of the Eighth Nobel Symposium*, p. 367), a conhecida Teoria Eletrofraca. Segundo essa teoria, a **força eletrofraca** é mediada por quatro *quanta*: o **fóton** ( $\gamma$ ), partícula

não-massiva e mediadora da **interação eletromagnética** e os bósons vetoriais ( $W^\pm$ ,  $Z^0$ ) massivos, mediadores da **interação fraca**. Contudo, a TSW apresentava dois problemas: 1<sup>o</sup>) - Relacionado com a massa das partículas  $W^\pm$  e  $Z^0$ , problema esse resolvido por intermédio do **mecanismo de Higgs** [cujo bóson de spin nulo correspondente de tal mecanismo é o hoje famoso **bóson de Higgs** (H), detectado em julho de 2012 (ver verbete nesta série)], mecanismo esse que foi desenvolvido nos trabalhos independentes realizados, em 1964, pelos físicos, o inglês Peter Ware Higgs (n.1929; PNF, 2013) (*Physics Letters* **12**, p. 132; *Physical Review Letters* **13**, p. 508), os belgas François Englert (n.1932; PNF, 2013) e Robert Brout (1928-2011) (*Physical Review Letters* **13**, p. 321), e os norte-americanos Gerald Stanford Guralnik (n.1936) e Carl Richard Hagen (n.1937), e o indiano-inglês Thomas Walter Bannerman Kibble (n.1932) (*Physical Review Letters* **13**, p. 585); 2<sup>o</sup>) – A TSW não era **renormalizável**, ou seja, apareciam divergências (infinitos) nos cálculos realizados com os **diagramas de Feynman** (ver verbete nesta série), envolvendo os quatro *quanta*, característicos dessa teoria. Esse problema foi contornado usando a técnica matemática conhecida como **regularização dimensional contínua**, desenvolvida em trabalhos independentes, publicados, em 1972, pelos físicos, os holandeses Gerardus 't Hooft (n.1946; PNF, 1999) e Martinus Justinus Godefridus Veltman (n.1931; PNF, 1999) (*Nuclear Physics* **B44**; p. 189, **B50**, p. 318), os 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).

Por sua vez, a QCD foi desenvolvida, em 1973, em artigos independentes dos 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 Hugh David Politzer (n.1949; PNF, 2004) (*Physical Review Letters* **30**, p. 1346), segundo a qual a **interação forte** (de intensidade relativa: 1) entre os **quarks** (q) (ver verbete nesta série) seria consequência da troca entre si das partículas **glúons** (g) que são bosônicas (spin 1), não-massivas [0.14 GeV (?)], alcance de  $10^{-15}$  m, e em número de oito (8). Tais partículas seriam responsáveis pela **cor** (**vermelho**, **verde** e **azul**) [esse novo número quântico foi proposto pelo físico norte-americano Oscar Wallace Greenberg (n.1932), em 1964 (*Physical Review Letters* **13**, p. 598)] do **quark** e, este novo número quântico, representaria na QCD o mesmo papel que a carga elétrica representa na QED.

Em resumo, MPPE é constituído de dois tipos de **partículas**: as que compõem a **matéria** [são **férmions** (com spin 1/2) e que obedecem à Estatística de Fermi-Dirac, de 1926 (ver verbete nesta série)] e as responsáveis pela **força de interação** entre elas [são **bósons** (com spin inteiro: 0, 1 e 2) e que obedecem à Estatística de Bose-Einstein, de 1924 (ver verbete nesta série)]. Ao todo, são 17 partículas: 12 compõem a **matéria**: 6 (seis) **quarks** {**up** [u: massa (em unidades de energia por intermédio da expressão  $E = mc^2$ , sendo considerado  $c = 1$ ) de 0,003 GeV e carga elétrica de  $+(2/3) |e|$ ], **down** (d: 0,006 GeV;  $-(1/3) |e|$ ), **strange** (s: 0,1 GeV;  $-(1/3) |e|$ ), **charme** (c: 1,3 GeV;  $+(2/3) |e|$ ), **bottom** (b: 4,3 GeV;  $-(1/3) |e|$ ) e **top** (t: 175 GeV;  $+(2/3) |e|$ )} e 6 (seis) **léptons** [**elétron** ( $e^-$ :  $5,11 \times 10^{-4}$  GeV;  $-1 |e|$ ), **muon** ( $\mu$ : 0,106 GeV;  $-1 |e|$ ), **tau** ( $\tau$ : 1,78 GeV;  $-1 |e|$ ) e seus respectivos **neutrinos** :  $\nu_e$ :  $< 10^{-8}$  GeV;  $0 |e|$ ,  $\nu_\mu$ :  $< 3 \times 10^{-4}$  GeV;  $0 |e|$ ,  $\nu_\tau$ :  $< 3,3 \times 10^{-2}$  GeV;  $0 |e|$ ]. É oportuno destacar que o MPPE prevê a existência de **antimatéria** idêntica à **matéria**, apenas com carga elétrica de

sinal contrário e que, de todas elas, apenas os 3 **neutrinos/antineutrinos** não têm carga e nem massa (?), só têm spin 1/2. As 5 partículas restantes, são assim distribuídas: 4 são mediadoras das três interações fundamentais da Natureza (vide verbete nesta série): **fóton** ( $\gamma$ ) (sem massa, spin 1 e alcance infinito) (**eletromagnética**); **W<sup>±</sup>** e **Z<sup>0</sup>** (**fraca**) [com massa (80-10 GeV), spin 1 e com alcance de  $10^{-17}$  m] e **glúon** (g) (**forte**) (ver suas características acima). É interessante destacar que, teoricamente, a quarta interação fundamental da Natureza, a **gravitacional** (de intensidade relativa:  $6 \times 10^{-39}$ ), deverá ser mediada pela partícula **gráviton**, que não tem massa, seu spin vale 2 e tem alcance infinito, mas ele não é descrito pelo MPPE e ainda não foi detectado. Por fim, a décima sétima partícula, é o **bóson de Higgs** (H), massiva, de spin 0, e responsável pela massa das partículas do MPPE (ver verbete nesta série). Concluindo este resumo, é oportuno salientar que a **matéria** formada de **quarks/antiquarks** é denominada de **hádrons** e se divide em dois tipos: **bárions**, partículas estáveis (mediadas por **interação forte**) formadas de três **quarks** [p.e.: **próton** ( $p = uud$ ), **nêutron** ( $n = udd$ ), **xi-menos** ( $\Xi^- = dss$ ) e **ômega-menos** ( $\Omega^- = sss$ ) etc.]; e **mésons**, partículas instáveis (decaindo, por **interação fraca**, em **léptons**, daí serem **bosônicas**) e formadas de combinações de pares de **quark-antiquark** [p.e.: **píons** -  $\pi^+ (u\bar{d})$ ,  $\pi^0 [(u\bar{u} + d\bar{d})/\sqrt{2}]$ ,  $\pi^- (d\bar{u})$ ; **psi/jota** ( $\psi/J = c\bar{c}$ ); **úpsilon-zero** ( $Y^0 = b\bar{b}$ ); **mésonB-zero** ( $B^0 = \bar{b}d$ ) etc.].

Destaque-se, também, que a **antimatéria** estável não existe na Natureza, devido a um fenômeno físico conhecido como **aniquilamento** (*annihilation*), descoberto em 1933 (*Proceedings of the Royal Society of London* **139A**, p. 699) pelos físicos, o inglês Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974; PNF, 1948) e o italiano Guiseppe Paolo Stanislao Occhialini (1907-1993) ao observarem que o elétron ( $e^-$ ) e sua antipartícula (pósitron:  $e^+$ ) eram produzidos por **fótons** ( $\gamma$ ) e, portanto, a operação inversa aconteceria:  $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$ . Mais tarde, em 1955, com a descoberta do antipróton ( $\bar{p}$ ), observou-se que o mesmo **aniquilamento** acontecia quando ocorria a colisão de prótons (p) com antiprótons ( $\bar{p}$ ). Hoje, o MPPE considera que a **matéria** e a **antimatéria** se aniquilam quando se encontram.

É interessante lembrar que:  $e = 1,602 \times 10^{-19}$  C (coulombs);  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$  e  $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ; sendo  $1 \text{ eV} = 1,602176462 \times 10^{-19} \text{ J}$  (joules).

Trataremos, agora, das dificuldades do MPPE e as tentativas de contorná-las.

1) **Partícula Elementar como um ponto**. A principal dificuldade do MPPE é a de que ela trata as PE como entidades do *tipo-ponto*, sem dimensão e, por isso, há necessidade da **renormalização**, ou seja, de “jogar para debaixo do tapete” os infinitos que aparecem naquele modelo. Conforme vimos em verbete desta série, para contornar essa dificuldade foi apresentada a ideia de **corda**, que é uma tentativa de generalizar o conceito de **partícula puntiforme** (*tipo-ponto*). Ora, em qualquer instante, a configuração de uma corda é uma curva que pode ser aberta ou fechada e, quando a mesma se move através do espaço-tempo, ela varre uma superfície conhecida como **folha-mundo** (*world-sheet*). No entanto, como classicamente a **ação relativista** para uma partícula livre é proporcional ao comprimento invariante lorentziano de sua **linha-mundo** (*world-line*), em 1970, em trabalhos independentes, o físico japonês Yoichiro Nambu (n.1921; PNF, 2008) (*Lectures at Copenhagen Summer Symposium*), Holger B. Nielsen (*15th International Conference Physics, Kiev*) e Leonard Susskind (*Nuovo Cimento* **A69**, p. 457) e, em 1971 (*Progress in Theoretical Physics* **46**, p. 1560), o físico japonês T. Goto propuseram que a ação relativista para uma

corda deveria ser proporcional à área da *folha-mundo*. Assim, com a obtenção dessa ação, conhecida desde então como *ação Nambu-Goto*, iniciou-se o estudo da Teoria da Corda de Nambu-Goto (TCN-G). Ainda em 1971 (*Physical Review Letters* **B34**, p. 500), Claude Lovelace demonstrou que a Teoria de Cordas (TC) é descrita em um espaço de 26 dimensões (sendo uma temporal), que decorre da famosa equação:  $[1 - (D - 2)/24] = 0$ .

Uma Segunda TC, desta vez com 10 dimensões espaciais, foi formulada também em 1971, em trabalhos distintos do físico francês Pierre Ramond (n.1943) (*Physical Review* **D3**, p. 2415), e dos físicos, o francês André Neveu (n.1946) e o norte-americano John Henry Schwarz (n.1941) (*Nuclear Physics* **B31**, p. 86). No trabalho de Ramond há a construção de uma TC análoga à *Equação de Dirac*, de 1928 [Bassalo & Caruso, *Dirac* (Livreria da Física, 2013)] e, portanto, poderia explicar os férmions. Ainda nesse trabalho, Ramond generalizou a *Álgebra de Virasoro* [formulada pelo físico argentino Miguel Angel Virasoro (n.1940), em 1970 (*Physical Review* **D1**, p. 2933)], álgebra essa que se tornou uma das mais potentes ferramentas na construção da TC. É oportuno notar que, em 1976, em trabalhos independentes dos físicos, o norte-americano Stanley Deser (n. 1931) e o italiano Bruno Zumino (n.1923) (*Physics Letters* **B65**, p. 369) e L. Brink, P. Di Vecchia e Paul Howe (*Physics Letters* **B65**, p. 471) apresentaram a seguinte ação S para uma corda:

$$S = -1/2 T \int d\sigma d\tau \sqrt{-g} g^{ab} \partial_a x^\mu \partial_b x^\nu,$$

onde  $(\sigma, \tau) \in D, g^{ab}(\sigma, \tau)$  é o *tensor métrico* da *folha-mundo* e seu respectivo módulo  $g = |\det(g_{ab})|$ ,  $\partial_a = \partial/\partial\sigma^a$  ( $a = 1, 2$ ,  $\sigma^1 = \sigma$  e  $\sigma^2 = \tau$ ) e T é a tensão na corda caracterizada pelo campo  $x^\mu$ . Ainda em 1976 (*Nuclear Physics* **B108**, p. 409), os físicos, o francês Eugène Cremmer (n.1942) e o norte-americano Joël Scherk (1946-1980), estudaram a questão da compactificação das seis coordenadas espaciais extras da Segunda TC.

Na década de 1980, novos trabalhos sobre a TC foram realizados. Logo em 1981 (*Physics Letters* **B103**, p. 207; 211), o físico russo Aleksandr Morkowitsch Polyakov (n.1945) apresentou a forma funcional da ação da TC. Em 1982 (*Nuclear Physics* **B195**, p. 481), o físico e matemático norte-americano Edward Witten (n.1951) também tratou da questão da compactificação das seis (6) coordenadas espaciais extras da Segunda TC usando a Teoria de Kaluza-Klein [proposta pelo matemático e linguista alemão Theodor Kaluza (1885-1954), em 1921 (*Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften, Part 1*, p. 966)] e pelo físico sueco Oskar Benjamin Klein (1894-1977), em 1926 (*Zeitschrift für Physik* **37**, p. 895; *Nature* **118**, p. 516), sobre a existência de uma quinta dimensão]. Por sua vez, o físico inglês Michael Boris Green (n.1946) e Schwarz, em 1982 (*Nuclear Physics* **B198**, p. 252; 441) e em 1984 (*Physics Letters* **B136**, p. 367), encontraram uma ação para a TC onde a *supersimetria* (*supersymmetry* - SUSY) é manifestada. Note-se que a SUSY foi descoberta, em 1971 (*Nuclear Physics* **B34**, p. 632), pelos físicos, o francês Jean Loup Gervais (n.1936) e o japonês Bunji Sakita (n.1930), envolvendo energias da ordem de  $10^{20}$  GeV (ou dimensões da ordem de  $10^{-34}$  cm), que converte bósons em férmions, e sua correspondente Teoria da Supersimetria (TS), desenvolvida, em 1973, em 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), segundo a qual 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  $1/2$  (ver verbete nesta série). Com isso, estava

formalizada a Teoria de Supercordas (TSC). É importante destacar que, com essa teoria, a interação entre as **supercordas** decorre da troca de seus pedaços, e requer a existência de 496 partículas mediadoras, contra as 12 conhecidas ( $\gamma, W^+, W^-, Z^0, 8g$ ) características do MPPE. Ainda em 1984 (*Physics Letters* **B149**, p. 117), Green e Schwarz descobriram que modelos de **supercordas** baseados em grupos de 'gauge' do tipo *Heterótica-O* [ $SO(32)$ ], livres de anomalias (infinitos) e que, portanto, a gravitação poderia ser quantizada. Logo depois, em 1985, em trabalhos independentes realizados por Gross, Jeffrey A. Harvey, E. Martinec e R. Rohm (*Physical Review Letters* **54**, p. 502) e por Philip Candelas, Gary Horowitz, Andrew Strominger e Witten (*Nuclear Physics* **B258**, p. 46), nos quais foram encontrados resultados análogos aos de Green e Schwarz usando, no entanto, o grupo *Heterótico* de simetria, o  $H_g = E_8 \otimes E_8$ . Registre-se que a metade dos componentes dessa simetria descreve cada coisa em nosso Universo, a outra metade é uma duplicata, o que conduz a ideia da existência de dois Universos com atuações mútuas por intermédio da gravidade. Note-se que, em seu trabalho, Candelas, Horowitz, Strominger e Witten mostraram que as dimensões espaciais extras não podem ser recurvadas de qualquer maneira, e sim, em uma classe específica de formas geométricas, a **variedade Calabi-Yau**. Esse nome foi dado para homenagear os matemáticos, o norte-americano Eugênio Calabi (n.1923) e o chinês Shing-Tung Yau (n.1949) que, respectivamente, em 1957 (*Algebraic Geometry and Topology: A Symposium in Honor of S. Lefschetz*, Princeton) e 1977 (*Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.* **74**, p. 1798) trabalharam com esse tipo de "espaço" geométrico. Registre-se que Calabi conjecturou a sua existência e Yau a demonstrou.

Uma grande dificuldade da TC desenvolvida nas décadas de 1970 e 1980, analisadas acima, era a de que não existia uma única versão dela e sim, cinco versões: *Tipo I*, *Tipo IIA*, *Tipo IIB*, *Heterótica-O* e *Heterótica  $E_8$* . Embora cada uma dessas cinco (5) versões requiera seis (6) dimensões espaciais adicionais, existiam diferenças significativas entre elas. Por exemplo, a do Tipo I envolve **cordas abertas** e **cordas fechadas**, com a mesma **quiralidade** (simetria de paridade); a do Tipo IIA, envolve **cordas fechadas** com quiralidades opostas, e as do Tipo IIB, envolve **cordas fechadas** com a mesma **quiralidade**. A dificuldade apontada acima começou a ser superada, na primavera de 1995, por ocasião da *Strings'95 Conference* ("Conferência de Cordas de 1995"), na *University of South California, Los Angeles*, quando Witten apresentou uma Segunda TSC, logo desenvolvida por ele próprio [*Nuclear Physics* **B433**, p. 85 (1995)] e com outros físicos [Petr Horava e Witten, *Nuclear Physics* **B460**, p. 506; **B465**, p.94 (1996); Joseph Polchinski (n.1954) e Witten, *Nuclear Physics* **B460**, p. 525 (1996)], além de outros físicos [Paul K. Townsend, *Physics Letters* **B350**, p. 184 (1995); C. M. Hull e Townsend, *Nuclear Physics* **B438**, p. 109 (1995)], conhecida como a **Teoria M**, e que procura unificar as cinco (5) versões referidas, em um espaço de onze (11) dimensões (sendo uma temporal). As sete (7) dimensões espaciais são recurvadas no "espaço" de Calabi-Yau e a elas são atribuídas outras propriedades, como massa e carga elétrica. Além disso, não existem apenas **cordas**, mas também **p-branas**, que surgem quando há variação da **constante de acoplamento da corda**, e que são consideradas superfícies no **espaço-tempo plano**. Dessa forma a **corda** é **1-brana**, uma **membrana** (a superfície geométrica conhecida) é uma **2-brana**, o **espaço** é uma **3-brana** e assim sucessivamente até p dimensões. Note-se que na TSC as PE são consequência de sua vibração.

Por fim, ainda sobre a TSC é interessante notar que, com a conjectura da existência de **cordas cósmicas** (objetos muito finos, extremamente bem esticados e muitíssimo rico em massa, infinitamente longas ou formando laços fechados) apresentada por Kibble, em 1976 (*Journal of Physics* **A9**, p. 1387) e reiterada pelo astrofísico russo Alexander Vilenkin, em 1985 (*Physics Reports* **121**, p. 263), foi considerada a hipótese de que tais **cordas** serviriam de **sementes de cristalização** para as Galáxias. Por outro lado, em 1992 (*Astroparticle Physics* **1**, p. 129), X. Chi, C. Dahanayake, J. Wdowczyk e A. W. Wolfendale aventaram a hipótese de que os **raios cósmicos** altamente energéticos poderiam ser **prótons** resultantes do colapso das **cordas cósmicas**.

2) **Auto-Consistência do MPPE**. O MPPE formulado como uma Teoria de Yang-Mills quantizada (TQY-M) por intermédio de integrais de Feynman, ainda não foi matematicamente provada, isto é, ela não é **auto-consistente**. Note-se que a TQY-M com um grupo de 'gauge' ("calibre") não-abeliano (Grupo de Lie) em um espaço de quatro dimensões foi proposta, em 1954 (*Physical Review* **96**, p. 191), pelos físicos, o sino-norte-americano Chen Ning Yang (n.1925; PNF, 1957) e o norte-americano Robert Laurence Mills (n.1927), apresenta uma propriedade física conhecida como **confinamento**. Contudo, na ausência dessa propriedade, espera-se identificar **glúons** sem massa, mas como eles estão confinados, tudo que se identifica são **glúons** de cor neutra, os **glueballs**, os quais, se existirem devem possuir massa e, deste modo, deve haver um intervalo de massa. ([wikipedia/Yang-Mills\\_intervalo de massa](https://pt.wikipedia.org/wiki/Yang-Mills_intervalo_de_massa); [Standard Model\\_Self-consistency](https://www.standardmodel.org/Standard-Model-Self-consistency)).

3) **Massa dos neutrinos**. Segundo vimos acima, na MPPE os **neutrinos** e seus respectivos **antineutrinos** não possuem massa. Contudo, como vimos em verbete desta série, vários experimentos realizados para detectar essas partículas oriundas do Sol e de outras estrelas [por dois grupos de pesquisas independentes, o sob a liderança respectiva dos físicos, o norte-americano Raymond Davis Junior (1914-2006; PNF, 2002) e o japonês Masatoshi Koshiba (n.1926; PNF, 2002)], mostraram que há uma **oscilação de neutrinos** ( $\nu_e \rightarrow \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ), conhecida como **hierarquia de neutrinos**, o que indica que os mesmos possuem massa (conforme registramos antes). Desse modo, o MPPE deve ser alterado para incluir a massa dos **neutrinos** como, por exemplo, o **seesaw mechanism** ("mecanismo de gangorra"), que se trata de um modelo genérico para entender os tamanhos relativos das massas observadas dos **neutrinos** ( $\approx$  eV), comparadas com às dos **quarks** e **leptons carregados**, que são milhões de vezes mais pesados. Para mais detalhes, ver: Robert D. Klauber ([www.quantumfieldtheory.info](http://www.quantumfieldtheory.info)); ([www.searadaciencia.ufc.br/donafifi/neutrino](http://www.searadaciencia.ufc.br/donafifi/neutrino)).

4) **Massa das partículas elementares supersimétricas**. Segundo vimos acima, o MPPE, por intermédio do **mecanismo de Higgs**, gera a massa de todas as partículas elementares envolvidas nesse modelo, embora a massa do próprio H ( $m_H$ ) apresente uma dificuldade com relação às correções radiativas (*loops*) que contribuem para a massa *bare* ("nua") do H; essa dificuldade é a de evitar que essas correções cresçam indefinidamente fazendo com que  $m_H > 1$  TeV (Gilvan Augusto Alves, por *e-mail*, em 30/11/2013). Além dessa dificuldade intrínseca do MPPE, outras aparecem quando esta leva em consideração a SUSY, segundo a qual cada partícula deverá possuir uma **supercompanheira** (partículas **SUSY** ou **ino**: **gluino**, de spin  $\frac{1}{2}$ ; **wino** $^\pm$ , de spin  $\frac{1}{2}$ ; **zino** $^0$ , de spin  $\frac{1}{2}$ ; **fotino**, de spin  $\frac{1}{2}$ ; e **gravitino**, de spin  $\frac{3}{2}$ ) com propriedades idênticas, exceto no valor de seu spin, que vale o spin da partícula correspondente, subtraído de  $\frac{1}{2}$ , segundo vimos anteriormente. A incorporação da

SUSY ao MPPE foi apresentada, em 1981 (*Nuclear Physics B* **193**, p. 150), pelos físicos norte-americanos Savvas Dimoupolos (n.1952) (de origem grega) e Howard Mason Georgi (n.1947), hoje conhecido como o **Modelo Padrão Supersimétrico Mínimo** (MPSM) (*Minimal Supersymmetric Standard Model*), 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 pelo **Tevatron** e pelo LEP (*Large Electron-Positron Collider*: anel de colisão entre elétrons e pósitrons) e LHC (*Large Hadron Collider*: anel de colisão entre prótons e antiprótons) do *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (hoje: *European Organization for Nuclear Research*) (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** até setembro de 2013 [Jonathan L. Feng, Philipp Kant, Stefano Profumo e David Sanford. (*Physical Review Letters* **111**, a.n. 131802)].

É oportuno esclarecer que o astrofísico brasileiro Mario Novello (n.1942) em artigos publicados em 2010 (*arXiv:1003.5126v2 [physics.gen-ph]*, 10 março de 2010), em 2011 (*Classical and Quantum Gravity* **28**, a.n. 035003; *International Journal of Modern Physics A* **26**, p. 3781) e, em 2012 (*Physical Review D* **86**, 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.

5) **Tamanho (raio) do próton**. Segundo o **MPPE**, o **raio** ( $r_p$ ) **do próton** deveria ser sempre o mesmo, independentemente da maneira de como ele é calculado como, por exemplo, medindo os níveis de energia do hidrogênio (H) em experimentos de espectroscopia ou por experimentos envolvendo o espalhamento de **elétrons** ( $e^-$ ) em um gás de H ionizado, ou seja, formado só de **prótons** (p). Esse tipo de espalhamento, segundo a QED, é descrito pela troca de fótons ( $\gamma$ ) “virtuais” entre  $e^-$  e p, e o comprimento de onda ( $\lambda$ ) desses  $\gamma$  depende da distância entre essas PE durante a interação eletromagnética que ocorre entre elas, comprimento esse que altera drasticamente a trajetória eletrônica. Assim, **elétrons** que passam mais longe dos **prótons** produzem  $\lambda$  cada vez maiores, e o  $r_p$  é codificado pelo comprimento de onda mais longo. Uma série de experiências realizadas (do tipo: espalhamento  $e^-$  - H ionizado) até 2010 indicava, em média, que tínhamos:  $r_p \approx 0,877$  f [1 femtômetro (f) =  $10^{-15}$  m]. Contudo, em 2010, duas experiências realizadas, independentemente, nas quais um feixe de **múons** ( $\mu^-$ , de massa em torno de 200 vezes a massa do  $e^-$ ) disparado pelo acelerador do *Instituto Paul Scherrer*, na Suíça, foi espalhado por um gás de hidrogênio ionizado, experimentos esses conduzidos por Randolph Pohl, Aldo Antognini, François Nez, Fernando D. Amaro, François Biraben, João M. R. Cardoso, Daniel S. Covita, Andreas Dax, Satish Dhawan, Luis M. P. Fernandes, Adolf Giesen, Thomas Graf, Theodor Wolfgang Hänsch (n.1941; PNF, 2005), Paul Indelicato, Lucile Julien, Cheng-Yang Kao, Paul Knowles, Eric-Olivier Le Bigot, Yi-Wei Liu, José A. M. Lopes, Lívia Ludhova, Cristina M. B. Monteiro, Françoise Mulhauser, Tobias Nebel, Paul Rabinowitz, Joaquim M. F. dos Santos, Lukas A. Schaller, Karsten Schuhmann, Catherine Schwob, David Taqqu, João F. C. A.

Veloso e Franz Kottmann (*Nature* **466**, p. 213, 8 de julho) e por Jan C. Bernauer, P. Achenbach, C. Ayerbe Gayoso, R. Böhm, D. Bosnar, L. Debenjak, M. O. Distler, L. Doria, A. Esser, H. Fonvieille, J. M. Friedrich, J. Friedrich, M. Gómez Rodríguez de la Paz, M. Makek, H. Merkel, D. G. Middleton, U. Müller, L. Nungesser, J. Pochodzalla, M. Potokar, S. Sánchez Majos, B. S. Schlimme, S. Sirca, Th. Walcher e M. Weinriefer (*Physical Review Letters* **105**, a.n. 242001, 10 de dezembro). Tais experiências encontraram que:  $r_p \approx 0,842$  f. Recentemente, em outubro de 2013 (*Annual Review of Nuclear and Particle Science* **63**, p. 175), Pohl, Ronald Gilman, Gerald A. Miller e Krzysztof Pachucki repetiram a experiência com **hidrogênio muônico** e, praticamente, confirmaram que o **próton** tem tamanho menor ( $r_p \approx 0,841$  f) do que o calculado pelo **MPPE** ( $r_p \approx 0,877$  f). Em vista dessa discrepância, várias tentativas por intermédio do **MPPE** foram apresentadas para explicá-la, sem obterem êxito conforme se pode ler em: Jan C. Bernauer e Randolf Pohl, **Problema do Raio do Próton** (*Scientific American Brasil* **142**, p. 32, março de 2014).

6) Em abril de 2014 a LHCb *Collaboration* (formada de 700 cientistas) anunciou a descoberta ([arXiv.org/abs/1404.1903v1](https://arxiv.org/abs/1404.1903v1) [hep-ex]) de uma nova partícula botônica exótica –  $Z(4430)^-$  – composta de quatro quarks (**tetraquark**, constituído de pares de **quarks** e **antiquarks**), com nível de precisão de  $5,2 \sigma$ , ou seja, menos do que um em um milhão de chances de erro, e que, no entanto, não se encaixa no **MPPE**. Essa nova **ressonância** ( $B^0 \rightarrow \psi' \pi^- K^+$ ) decai pelo menos dez (10) mais rápido do esperado. Note-se que essa nova partícula já havia sido anunciada, no começo de agosto de 2008, pela *KEK Belle Collaboration* do *High Energy Accelerator Research Organisation* (KEK) localizado em Tsukuba, Japão. (*Inovação Tecnológica*, 14 de abril de 2014). Registre-se, também, que o *Beijing Spectrometer* (BES-*Collaboration*, constituído de cerca de 200 cientistas) já havia confirmado a existência de **tetraquarks exóticos** em 2013 {[arXiv:1308.2760v1](https://arxiv.org/abs/1308.2760v1) [hep-ex]; [arXiv:1309.1896 v1](https://arxiv.org/abs/1309.1896v1) [hep-ex]; (agosto/setembro, 2013); [arXiv:1310.1163](https://arxiv.org/abs/1310.1163) v1 [hep-ex]; [arXiv:1310.4101](https://arxiv.org/abs/1310.4101) v1 [hep-ex]) (outubro,2013)}.

7) **O MPPE e a Gravitação Quântica**. Até o presente momento (janeiro de 2014) ainda não se conseguiu usar a MPPE para obter a **Gravitação Quântica**. Esta quantização da gravidade tem sido tentada por três caminhos, segundo nos conta o físico norte-americano Lee Smolin (n.1955) em seu livro citado no início deste verbete. O primeiro caminho é o da Teoria Quântica e o segundo, o da Teoria da Relatividade Geral. O primeiro gerou a Teoria das Supercordas (TSC), tratada acima; o segundo produziu a chamada Teoria da Gravidade Quântica com Laços, cujos primeiros trabalhos foram realizados pelo próprio Smolin. Por fim, a terceira via, considera que aquelas duas teorias são incompletas e defeituosas, e busca princípios fundamentais completos e sem anomalias. Aliás, é oportuno notar que foi Witten quem afirmou o seguinte: - *A Teoria das Cordas é uma parte da Física do Século 21 que caiu por acaso no Século 20*, segundo nos fala o físico norte-americano Brian Greene (n.1963), em seu citado livro de 2001, também registrado no início deste verbete.



ANTERIOR

SEGUINTE