



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



Quarks, QCD, Cordas e Supercordas.

Até o início da década de 1950, a descoberta de novas partículas elementares decorreu do estudo da colisão de raios cósmicos com a atmosfera e observadas em câmaras de névoas (p.e.: **pósitron**) ou emulsões nucleares (p.e.: **múons** e **píons**) (vide verbetes nesta série). Contudo, com a construção do acelerador **cósmotron** de 3 GeV e a instalação da **câmara de bolhas**, ambos no *Brookhaven National Laboratory* (BNL), entre 1952 e 1953, foi possível, na década de 1950 e no começo da década de 1960, produzir novas partículas assim como estudar suas interações. Desse modo, surgiu a necessidade de denominá-las e classificá-las. Assim, as partículas mais pesadas que os núcleons (prótons e nêutrons), receberam o nome de **hyperons** e as de massa intermediária entre os núcleons e os píons, foram chamadas de **káons**. Em 1958, o físico russo Lev Borisovich Okun (n.1929) denominou de **hádrons** as partículas que eram sensíveis à interação forte. Tais partículas foram divididas em dois grupos: **bárions** (núcleons e hyperons), que possuem spin fracionário (1/2) e **mésons** (píons e káons), de spin inteiro (0). É oportuno registrar que as partículas que eram produzidas por interação forte e decaíam por interação fraca, foram inicialmente denominadas de **partículas estranhas** (p.e.: **káons**); as que apresentavam uma vida média extremamente pequena ($\approx 10^{-23}$ s) foram denominadas de **ressonâncias** (“mesônicas” e “bariônicas”). Por seu lado, as partículas sensíveis à interação fraca foram denominadas de **léptons** (elétron, pósitron, múons e seus respectivos neutrinos). Registre-se que os nomes: **bárion** (que significa *pesado*, em grego) e **lépton** (que significa *fino*, em grego) foram cunhados pelo físico holandês norte-americano Abraham Pais (1918-2000). [Abraham Pais, **A Tale of Two Continents: A Physicist's Life in a Turbulent World** (Princeton University Press, 1997)].

A grande diversidade das partículas elementares, principalmente as hadrônicas, conhecidas até o início da década de 1960, levou os físicos a tentar estudar a interação forte entre elas. Por não existir uma Teoria Quântica de Campos, como a Eletrodinâmica Quântica (QED) (vide verbete nesta série), para estudar essa interação, a sua dinâmica foi estudada via a **matriz de espalhamento** – **matriz S**, que havia sido introduzida pelo físico alemão Werner Karl Heisenberg (1901-1976; PNF, 1932), em 1943. Vejamos como isso aconteceu. Em 1959 (*Nuovo Cimento* **14**, p. 951), o físico italiano Túlio Eugene Regge (n.1931) observou que as partículas hadrônicas com maior momento angular total J (soma do momento angular orbital L e do spin S) eram mais pesadas, deduzindo, então, uma relação entre J e a massa (m) da partícula. De acordo com Regge, cada partícula deveria ter “estados” [caracterizados por um mesmo **número bariônico** (B), uma mesma **hipercarga** (Y) e um mesmo **spin isotópico** (I)], porém com massas aumentando à medida que S subia de duas unidades. Assim, ao traçar um diagrama $J \times m$, verificou que as partículas hadrônicas até então conhecidas ocupavam pontos nesse diagrama correspondentes a valores inteiros ou semi-inteiros de J . Esses pontos foram posteriormente denominados de **pólos de Regge** e as curvas que ligam os “estados” de uma mesma partícula foram denominadas de **trajetórias de Regge**. Embora algumas “trajetórias” de partículas conhecidas fossem traçadas, outras previstas não foram encontradas. Por sua vez, em 1961 (*Physical Review Letters* **7**, p. 394), os físicos norte-americanos Geoffrey Foucar Chew (n.1924) e S. C. Frautschi mostraram que todos os pólos da matriz S , correspondente à interação forte entre partículas elementares, são **pólos de Regge**. Devido a inexistência de algumas “trajetórias de Regge”, conforme salientamos acima, em 1962 (*Physical Review Letters* **8**, p. 41), Chew e Frautschi apresentaram um novo modelo para explicar os hádrons, conhecido como **modelo “bootstrap”** segundo o qual cada hádron é constituído de uma combinação de todos os outros e a comunicação entre eles é feita por interação forte. Dentro desse esquema “democrático” de classificação dos hádrons, nenhum deles é fundamental, sendo a diferença de massa entre eles determinada pela dinâmica da interação. As demais partículas que não se enquadravam nesse modelo, como as partículas sensíveis às interações fraca e eletromagnética (**léptons** e **fótons**) foram jocosamente denominadas de “aristocráticas”. Registre-se que a matriz S de Chew e Frautschi deveria satisfazer uma série de “axiomas”, dentre eles a unitariedade (essa propriedade ocorre quando a matriz Hermitiana é igual a sua inversa). [Michio Kaku, **Introduction to Superstrings and M-Theory** (Springer-Verlag, 1999)].

As dificuldades com o tipo de classificação das partículas hadrônicas, via matriz S, ensejaram que se tentasse uma outra via. Desta vez, a escolhida foi a Teoria de Grupos. Em um de nossos verbetes desta série, vimos que o físico norte-americano Murray Gell-Mann (n.1929; PNF, 1969) teve um grande sucesso com o seu **modelo de octetos** (1961), baseado no grupo SU(3). Ainda usando esse mesmo grupo, ele desenvolveu, em 1964 (*Physics Letters* 8, p. 214), o **modelo de quarks**, segundo o qual os **hádrons** eram constituídos de novas partículas, os **quarks**, da seguinte maneira: **bárions** constituídos de três quarks e os **mésons** de pares de quark-antiquark [para essa constituição, ver, por exemplo: José Maria Filardo Bassalo e Mauro Sérgio Dorsa Cattani, **Teoria de Grupo e Algumas Aplicações em Física** (EDUFPA, 2005)]. Ainda em 1964 (*CERN Preprint* 8182/Th 401; 8419/Th 412) e, independentemente, o físico russo-norte-americano George Zweig (n.1937) desenvolveu um modelo análogo a esse de Gell-Mann, mas, no entanto, deu o nome de **aces** a essas novas partículas. Note-se que tais partículas se apresentam em três “sabores” (“flavours”): **up** (u), **down** (d) e **strange** (s) e seus respectivos **antiquarks**: \bar{u} , \bar{d} , \bar{s} ; elas são fermiônicas, pois têm spin $\frac{1}{2}$; e apresentam cargas fracionárias dadas, respectivamente, por: $+2e/3$, $-1e/3$, $-1e/3$; $-2e/3$, $+1e/3$, $-1e/3$, onde e representa a carga do elétron. Registre-se que Gell-Mann deu o nome de **quark** para homenagear o escritor irlandês James Joyce (1882-1941), uma vez que em uma das estrofes do livro **Finnegan’s Wake**, escrito por Joyce em 1939, lê-se: *Three quarks for Master Mark*. É importante registrar que, nesse modelo, por exemplo, o próton é formado por dois quarks u e um d ($p = uud$) e o nêutron por dois quarks d e um u ($n = udd$). [Para maiores detalhes sobre as partículas elementares ver, por exemplo: Maria Cristina Batoni Abdalla, **O Discreto Charme das Partículas Elementares** (Editora UNESP, 2006)].

Voltemos à matriz S. Ainda usando essa matriz, o físico italiano Gabrielle Veneziano, em 1968 (*Nuovo Cimento* A57, p. 190) e, independentemente, o físico japonês M. Suzuki (trabalho não publicado) descobriram que a **função Beta de Euler** satisfazia todos os “axiomas” da matriz S para a interação hadrônica, exceto a unitariedade. Eles estavam estudando a amplitude de espalhamento da interação de quatro partículas quando, acidentalmente, consultando um livro de matemática, observaram que essa amplitude poderia ser representada por aquela função. Observaram, também, que esse modelo matemático continha intrinsecamente as **trajetórias de Regge**. É oportuno registrar que, para contornar o problema da unitariedade não satisfeita pela **função Beta de Euler**, os físicos, os japoneses Keiji Kikkawa e B. Sakita, e o argentino Miguel Angel Virasoro (n.1940), em 1969 (*Physical Review* 184, p. 1701), propuseram que essa função fosse tratada como um termo da **série de Born-Oppenheimer**. A análise dessa descoberta de Veneziano-Suzuki levou ao conceito de **corda** (“string”), conforme veremos a seguir.

A idéia de **corda** é uma tentativa de generalizar o conceito de **partícula puntiforme**, como eram consideradas (e ainda são) todas as partículas elementares até então conhecidas, em virtude do problema da “singularidade” (infinito) que decorre de sua dimensão zero (ponto). 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, sendo classicamente a **ação relativista** para uma partícula livre proporcional ao comprimento invariante Lorentziano de sua **linha-mundo** (“world-line”), em 1970, em trabalhos independentes, o físico japonês Yoichiro Nambu (n.1921) (*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. Antes de prosseguirmos com o desenvolvimento do estudo da Primeira Teoria de Cordas, vejamos como surgiu o nome “corda”.

Nos trabalhos independentes de Nambu, Nielsen e Susskind, eles demonstraram que se a força forte entre hádrons se devesse a um fio extremamente diminuto e fino, quase como um elástico e que as conectassem, então os processos quânticos observados por Veneziano poderiam ser descritos pela **função Beta de Euler**. É oportuno registrar que a primeira Revista Científica para a qual Susskind enviou seu trabalho, rejeitou o mesmo, sob o argumento de que a idéia proposta no artigo não apresentava nenhum interesse para os leitores. Quando Susskind recebeu essa informação, sua atitude foi por ele descrita assim: *Fiquei perplexo. Caí da Cadeira. Fiquei deprimido. Fui para casa e tomei um porre*, segundo nos conta o físico norte-americano Brian Greene (n.1963) no livro intitulado **O Tecido do Cosmo: O Espaço, o tempo e a Textura da Realidade** (Companhia das Letras, 2005).

Ainda em 1971 (*Physical Review Letters* B34, p. 500), Claude Lovelace demonstrou que a Teoria de Cordas é descrita em um espaço de 26 dimensões (sendo uma temporal), que decorre da famosa equação: $[1 - (D - 2)/24] = 0$. Embora essa Teoria conseguisse explicar os bósons, no entanto, apresentava uma dificuldade, qual seja, ela previa a existência de um hádron de massa nula e de spin 2, que não era encontrada na Natureza. Além do mais, explicava também a existência de **táquions**, partículas que têm velocidade maior do que a velocidade da luz no vácuo (c) e massa de repouso imaginária, e que, igualmente como o bóson de spin 2, não eram (e ainda não são) encontradas na Natureza. Observe-se que aquelas partículas foram previstas teoricamente

em 1962 (*American Journal of Physics* **30**, p. 718), por O. M. Bilaniuk, V. K. Deshpande e o físico indiano-americano Ennackel Chandy George Sudarshan (n.1931) e, tal previsão, foi ratificada pelo físico norte-americano Gerald Feinberg (1933-1992), em 1967 (*Physical Review* **159**, p. 1089). [Gerald Feinberg, **What is the World Made of? Atoms, Leptons, Quarks and other Tantalizing Particles** (Anchor Books, 1978)].

Uma Segunda Teoria de Cordas, desta vez com 10 dimensões espaciais, foi formulada 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 Teoria de Cordas análoga à **Equação de Dirac** e, portanto, poderia explicar os férmions. Ainda nesse trabalho, Ramond generalizou a **Álgebra de Virasoro** [formulada por este físico em 1970 (*Physical Review* **D1**, p. 2933)], álgebra essa que se tornou uma das mais potentes ferramentas na construção da Teoria de Cordas. Por sua vez, no trabalho de Neveu e Schwarz, há o desenvolvimento de uma Teoria de Cordas para explicar os bósons contendo um campo fermiônico \mathbf{H}^{μ} . Ainda nesse trabalho eles reencontraram a **Super-Álgebra de Virasoro**, obtida por Ramond. É oportuno notar que, em 1976, em trabalhos independentes dos físicos, o norte-americano Stanley Deser (n. 1931) e o italiano Bruno Zumino (*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:

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

onde $(\sigma, \tau) \in \mathbf{D}$, $g^{ab}(\sigma, \tau)$ 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^μ . 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 Teoria de Cordas.

Paralelamente ao estudo da Teoria de Cordas ocorrida na década de 1970 e visto acima, foi desenvolvida uma Teoria de Campos para os hádrons. Com efeito, em analogia com a QED, segundo a qual a interação eletromagnética entre cargas elétricas decorre da troca de fótons (γ) entre as mesmas (vide verbete nesta série), em 1973, foram realizados trabalhos 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), trabalhos esses nos quais formularam a Cromodinâmica Quântica (“Quantum Chromodynamics” – QCD), segundo a qual a interação forte entre os quarks seria consequência da troca entre si das partículas **glúons** (g) que são bosônicas (spin 1), não-massivas e em número de oito (8). Tais partículas seriam responsáveis pela **cor** do quark e, este novo número quântico, representaria na QCD o mesmo papel que a carga elétrica representa na QED.

É oportuno registrar que a adoção da **cor** surgiu da seguinte dificuldade. Segundo o **modelo de quarks**, do qual falamos acima, três hádrons eram formados de três quarks iguais, a saber: $\Delta^{++}(\uuu)$, $\Delta^-(ddd)$ e $\Omega^-(sss)$. Porém, como os quarks são férmions, essas três partículas violariam o **Princípio da Exclusão de Pauli** (PEP), formulado em 1925. Assim, para contornar essa dificuldade o físico norte-americano Oscar Wallace Greenberg (n.1932), em 1964 (*Physical Review Letters* **13**, p. 598), propôs que cada quark era caracterizado por uma das três cores primárias do espectro luminoso: **vermelho**, **azul** e **verde**. Por sua vez, os antiquarks seriam caracterizados pelas cores complementares desse mesmo espectro: **cyan**, **amarelo** e **magenta**. Desse modo, teríamos, por exemplo: $\Delta^{++} = [u(\text{vermelho}), u(\text{azul}), u(\text{verde})]$. Essa proposta de Greenberg foi confirmada pelo físico coreano Moo-Young Han (n.1934) e por Nambu, em 1965 (*Physical Review* **B139**, p. 1006). Ainda segundo essa proposta, para que os quarks (férmions) se mantenham sempre juntos sem violar o PEP, deverão trocar glúons entre si a fim de mudarem de cor. Por exemplo, um **quark vermelho** para se transformar em azul, emite um **glúon vermelho-amarelo**, pois o amarelo é o antiazul. É oportuno registrar que enquanto na interação forte há troca de **cor** entre os quarks, na interação fraca há troca de **sabor** entre eles. Assim, por exemplo, no decaimento beta (vide verbete nesta série): $n(udd) \rightarrow p(uud) + e^- + \bar{\nu}_e$, pois: $d \rightarrow u + W^-$ e $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$. [Martinus Veltman, **Facts and Mysteries in Elementary Particles** (World Scientific, 2003)].

Com o desenvolvimento da QCD ocorrido em 1973, conforme vimos acima, a Teoria de Cordas foi um pouco esquecida até ser usada para estudar a unificação entre as interações físicas, em virtude da seguinte descoberta. Em 1974, Scherk e Schwarz (*Nuclear Physics* **B81**, p. 118; *Physics Letters* **B52**, p. 347) e, independentemente, o físico japonês Tamiaki Yoneya (*Progress in Theoretical Physics* **51**, p. 1907), descobriram uma ligação entre a Teoria de Cordas e a gravitação e, com isso, sugeriram que cordas sem massa poderiam ser interpretadas como **grávitons** [partículas mediadoras da interação gravitacional, e até o momento (2007) ainda

não descobertas] e **fótons** (partículas mediadoras da interação eletromagnética) e, portanto, uma Teoria de Cordas Sem Massa poderia unificar as interações físicas. Em 1975 (*Review of Modern Physics* **47**, p. 1213), Scherk mostrou que férmions e bósons emergem igualmente de uma Teoria de Cordas, isto é, para cada férmion existe um companheiro bóson e vice-versa. Ora, como essa transformação é característica da **supersimetria** (SUSY), desenvolvida em 1971 (vide verbete nesta série), esta passou a ser incorporada na Teoria de Cordas. Usando essa incorporação, em 1978 (*Physics Letters* **B76**, p. 409), Cremmer, o físico francês Bernard Julia (n.1952) e Scherk construíram uma Teoria da Supergravidade, com onze (11) dimensões (sendo uma temporal), com as sete dimensões espaciais extras compactificadas segundo a Teoria de Kaluza-Klein (vide verbete nesta série).

Na década de 1980, novos trabalhos sobre a Teoria de Cordas 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 Teoria de Cordas. 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 Teoria de Cordas usando a Teoria de Kaluza-Klein. Por sua vez, o físico inglês Michael Boris Green (n.1946) e Schwarz, em 1982 (*Nuclear Physics* **B198**, pgs. 252; 441) e em 1984 (*Physics Letters* **B136**, p. 367), encontraram uma ação para a Teoria de Cordas onde a supersimetria é manifestada. Com isso, estava formalizada a Teoria de Supercordas. 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 **Modelo Padrão**, constituído da Eletrodinâmica Quântica (QED), da Teoria da Unificação Eletrofraca (TSW) e da Cromodinâmica Quântica (QCD). Ainda em 1984 (*Physics Letters* **B149**, p. 117), Green e Schwarz descobriram que modelos de supercordas baseados em grupos de 'gauge' do tipo 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 $E_8 \otimes E_8$. 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 idéia 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 Teoria de Cordas desenvolvida nas décadas de 1970 e 1980, analisadas até aqui, era a de que não existia uma única versão dela e sim, cinco versões: *Tipo I*, *Tipo IIA*, *Tipo IIB*, *Heterótica-O* [SO(32)] e *Heterótica* $E_8 [E_8 \otimes E_8]$. Embora cada uma dessas cinco (5) versões requeira seis (6) dimensões espaciais adicionais, existiam diferenças significativas entre elas. Por exemplo, a do Tipo I envolve cordas abertas e 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 (Kaku, op. cit.). A dificuldade apontada acima começou a ser superada, na primavera de 1995, por ocasião da *Strings '95 Conference* ("Conferência Anual de Cordas"), quando Witten apresentou uma Segunda Teoria de Supercordas, logo desenvolvida por ele próprio [*Nuclear Physics* **B433**, p. 85 (1995)] e com outros físicos [Pet Horava e Witten, *Nuclear Physics* **B460; B465**, pgs. 506; 94 (1996); J. Polchinski 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 do mais, as supercordas apresentam uma característica importante que é a **constante de acoplamento**. É ainda oportuno registrar que, na Teoria de Supercordas, as partículas elementares são consequência de sua vibração.

É oportuno 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 pelo físico indiano Thomas Walter Bannerman Kibble (n.1932), 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 resultante do colapso daquelas cordas.

Na conclusão deste verbete, queremos chamar a atenção para o fato de que, conforme dissemos acima, a Teoria de Cordas não é única, pois existe um número enorme de versões, no entanto, podem ser unificadas por intermédio da chamada Teoria M. 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.

Por fim, queremos também registrar que a Teoria de Supercordas está ligada a um dos grandes problemas da Física atual, qual seja, a **gravidade quântica** (unificação das Teorias Quântica e da Relatividade Geral). Vejamos de que maneira. Esta quantização da gravidade tem sido tentada por três caminhos, segundo nos conta o físico norte-americano Lee Smolin (n.1955) em seu livro intitulado **Três Caminhos para a Gravidade Quântica** (Rocco, 2002). O primeiro caminho é o da Teoria Quântica e o segundo, o da Teoria da Relatividade Geral. O primeiro gerou a Teoria das Supercordas, enquanto 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.* [Brian Greene, **O Universo Elegante: Supercordas, Dimensões Ocultas e a Busca da Teoria Definitiva** (Companhia das Letras, 2001).]

Para maiores detalhes sobre o que foi discutido neste verbete, ver os seguintes textos: Abdalla, op. cit.; Feinberg, op. cit.; Greene (2001, 2005), op. cit.; Kaku, op. cit.; Pais, op. cit.; Smolin, op. cit.; Veltman, op. cit.; 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); Steven Weinberg, **Sonhos de uma Teoria Final: A Busca das Leis Fundamentais da Natureza** (Rocco, 1996); e Stephen William Hawking, **O Universo numa Casca de Noz** (Mandarim, 2001).



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)