



CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Filardo Bassalo

www.bassalo.com.br

Einstein e a Gravitação Quântica.

Segundo o físico italiano Carlo Rovelli (n.1956) {*arXiv:0006061v3 [gr-qc]* 23 de janeiro de 2001; *Physics World* (November 2003)}, a história da **gravitação quântica** (GQ) tem três principais linhas de pesquisa: **covariante** [usando a Teoria Quântica de Campos (TQC)], **canônica** (usando o princípio variacional) e **integral funcional** (usando as integrais de caminho de Feynman), acompanhada de outras linhas alternativas. Vejamos como, gradativamente, elas foram aparecendo. A primeira ideia de considerar a Teoria Quântica na Teoria da Gravitação foi devida ao próprio Einstein, em 1916 [*Preussische Akademie der Wissenschaften (Berlin) Sitzungsberichte* **1**, p. 688]. Em 1927 (*Zeitschrift für Physik* **46**, p. 188), o físico sueco Oskar Benjamin Klein (1895-1977) sugeriu que a GQ poderia modificar os conceitos de **espaço** e de **tempo**. Uma primeira tentativa de **quantizar a gravitação** foi proposta, em 1930 (*Annalen der Physik* **5**, p. 113; *Zeitschrift für Physik* **65**, p. 589), pelo físico belga Léon Rosenfeld (1904-1974) ao utilizar os grupos de “gauge” na linearização das **Equações de Einstein**, de 1915. Contudo, essa **linearização quântica da gravitação** foi criticada pelo físico russo Matvei Petrovich Bronstein (1906-1938), em 1936 (*Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* **9**, p. 140; *Zhurnal Eksperimental’noi i Teoretiskoi Fiziki* **6**, p. 140). É interessante registrar que o trabalho de Bronstein foi abruptamente interrompido, aos 32 anos de idade, ao ser assassinado pela NKVD (“Agência da Polícia Secreta Soviética”, precursora da KGB) por ser sobrinho do líder revolucionário russo Leon Trotsky (Lev Davidovich Bronstein) (1879-1940).

Ainda segundo Rovelli (op. cit.), o ano chave para a GQ foi 1949, quando o físico alemão Peter Gabriel Bergmann (1915-2002) iniciou seus trabalhos sobre a quantização do espaço de fase das Teorias de Campo Não-Lineares (*Physical Review* **75**, p. 680; *Reviews of Modern Physics* **21**, p. 480), iniciando então a fase **canônica** da GQ. Logo depois, em 1950, os físicos, o indiano-norte-americano Suraj N. Gupta (n.1924) (*Proceedings of the Physical Society* **A63**, p. 681) e o suíço Konrad Bleuler (1912-1992) quantizaram a Eletrodinâmica Quântica (QED – “Quantum Electrodynamics”) considerando a covariância “gauge” de Lorentz sobre uma métrica indefinida no espaço de Hilbert. Destaque-se que foi o físico inglês Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984; PNF, 1933) quem, em 1950 (*Canadian Journal of Mathematics* **2**, p. 129) e em 1951 (*Canadian Journal of Mathematics* **3**, p. 1), generalizou a Dinâmica Hamiltoniana para tratar sistemas forçados (“constrained”). Logo depois, em 1952 (*Proceedings of the Physical Society* **A65**, p. 608), Gupta usou a TQC para encontrar a partícula sem massa e de spin 2 (**gráviton**) mediadora da **força (interação) gravitacional**. Basicamente, ele considerou a **métrica** do “espaço plano minkowskiano” ($\eta_{\mu\nu}$) e quantizou pequenas oscilações em torno dessa métrica, ou seja, ele definiu a seguinte **métrica**: $h_{\mu\nu} = g_{\mu\nu} - \eta_{\mu\nu}$, onde $g_{\mu\nu}$ é o **tensor métrico riemanniano**. Em 1956 (*Nuovo Cimento* **3**, p. 1177),

Bergmann mostrou que observáveis quânticos deveriam somente corresponder a coordenadas independentes. Logo depois, em 1957 (*Reviews of Modern Physics* **29**, p. 443), ele e seu aluno de doutorado, o físico norte-americano Ezra Ted Newman (n.1929), desenvolveram mais essa ideia de independência entre observáveis e coordenadas.

A fase de **integração funcional** na GQ foi apresentada, em 1957 (*Reviews of Modern Physics* **29**, p. 497), pelo físico norte-americano Charles W. Misner (n.1932) ao sugerir que os cálculos na GQ poderiam ser realizados de maneira análoga como os que são feitos na Teoria Quântica de Campos (TQC) por intermédio das **integrais de trajetória feynmanianas** (estas se referem à soma de todas as trajetórias possíveis de uma dada partícula). No entanto, na GQ, Misner considerou somar sobre todas as flutuações quânticas do espaço-tempo [note que essas flutuações foram denominadas de **espuma quântica** (“quantum foam”) pelo físico norte-americano John Archibald Wheeler (1911-2008), em 1957 (*Annals of Physics-New York* **2**, p. 604), ao considerar o papel da geometria na gravitação, a Geometrodinâmica (“dinâmica da geometria”), qual seja, a de considerar a seguinte **integral funcional**:

$$\int \exp [i/\hbar] (\text{ação de Einstein}) d (\text{caminhos do campo}).$$

É interessante observar que, em 1961 (*Reviews of Modern Physics* **33**, p. 63), Wheeler ainda discutindo o papel da geometria na gravitação, afirmou que essa geometria tem como tese fundamental o seguinte: - *A massa maneja o espaço ensinando-o a curvar-se, e o espaço maneja a massa ensinando-a como mover-se.*

Ainda em 1961, no livro **Gravitation: An Introduction to Current Research** (John Wiley, p. 227), os físicos norte-americanos R. L. Arnowitt, Stanley Deser (n.1931) e Misner apresentaram a formulação hamiltoniana da Geometrodinâmica (ADM) da TRG. Assim, ao quantizarem essa Teoria, eles mostraram a finitude da auto-energia de uma partícula na mesma e, portanto, poderiam usar técnicas não-perturbativas na GQ. Em 1962 (*Journal of Mathematical Physics* **3**, p. 566), Newman e o cosmólogo inglês Roger Penrose (n.1931) introduziram na TRG um formalismo envolvendo quantidades spinoriais. Ainda em 1962 (*Nuovo Cimento* **26**, p. 53), o físico israelense Asher Peres (1934-2005) usou a formulação ADM e deduziu a equação de Hamilton-Jacobi para a TGR e, daí, ela passou a ser conhecida como da **Equação de Einstein-Hamilton-Jacobi** ou **Equação de Peres**:

$$g^{-1/2} [(1/2) g_{ab} g_{cd} - g_{ac} g_{bd}] (\partial S / \partial g_{ab}) (\partial S / \partial g_{cd}) + g^{1/2} R = 0,$$

onde g é o determinante da métrica (g_{ij}) 3-ADM [$g = \det (g_{ij})$], S é a ação e R é a curvatura dessa 3-geometria. Note que essa equação traduz a propagação de S (“cristas de onda”) no superespaço.

Um novo aspecto da QG foi apresentado por Penrose, em 1963 (*Physical Review Letters* **10**, p. 66), ao considerar a hipótese de que o **espaço** poderia decorrer de uma estrutura quântica combinatorial e, desse modo, seus estudos levaram às **redes de spin**, como veremos mais adiante. No entanto, como essa ideia quantizava apenas o grupo de rotações (que envolve momento angular) e não o grupo de Lorentz (base das Teorias Especial e Geral da Relatividade), Penrose desenvolveu uma nova técnica (**twistors**, semelhantes aos

spinors na TQC) para tratar das questões assintóticas nessas Teorias Relativistas. É interessante destacar que Penrose estava interessado em estudar a estrutura global do espaço-tempo e as equações de campos que descrevem partículas com massa de repouso nula, pois as mesmas são invariantes por uma **transformação conforme**, que é uma operação matemática que conserva a mesma forma de uma figura original. Destaque-se que, também em 1963 (*Acta Physical Polonica* **24**, p. 697), o físico norte-americano Richard Philips Feynman (1918-1988; PNF, 1965) usou seu formalismo quântico para calcular as amplitudes das transições quânticas gravitacionais. Em 1964 (*Physics Letters* **9**, p. 357; *Physical Review* **B135**, p. 1049; **B140**, p. 516), o físico norte-americano Steven Weinberg (n.1933; PNF, 1979) estudou a probabilidade de emissão de **ondas gravitacionais (grávitons)** usando a Mecânica Quântica.

A ideia de considerar **funções de onda** que calculem as probabilidades de locação de uma partícula em uma **geometria de espaço-tempo** e não em um **espaço de Hilbert**, de dimensão infinita, como acontecem com as **funções de Schrödinger** na Mecânica Quântica, as chamadas **funções de onda sobre geometrias**, foi apresentada pelo físico norte-americano Bryce Seligman DeWitt (1923-2004), em 1964 (*Physical Review Letters* **12**, p. 742). Em 1965, DeWitt encontrou-se com Wheeler no aeroporto de Nova Carolina, onde morava, aproveitando uma troca de aeronaves que Wheeler tinha que fazer, em virtude de uma viagem que estava fazendo, com escala obrigatória naquela cidade americana. Nesse encontro, DeWitt disse a Wheeler que estava pensando em usar a **Equação de Peres**, de 1962, e aplicá-la ao campo gravitacional, fazendo o mesmo que o físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961; PNF, 1933) ao obter sua famosa equação, em 1926, que trocou o produto de derivadas da **Equação de Hamilton-Jacobi**, pela derivada segunda. Entusiasmado, Wheeler disse a DeWitt que, com isso, ele encontraria a **equação quântica da gravitação**. Com essa entusiástica aprovação, DeWitt submeteu à publicação, na primavera de 1966, seus três famosos artigos e que, por alguma razão, só foram publicados em 1967 (*Physical Review* **160**, p. 1113; **162**, p. 1195; 1239). Desse modo, DeWitt apresentou a **Equação de Einstein-Schrödinger**, denominada de **Equação de DeWitt** por Wheeler e, finalmente, em 1988, na *Osgood Hill Conference*, DeWitt apresentou-a como **Equação de Wheeler-DeWitt** (EW-DW) (em notação atual):

$$\left\{ -\frac{\partial^2}{\partial R^2} + \frac{9\pi^2}{4G^2} \left[kR^2 - \frac{\Lambda}{3} R^4 - \frac{8\pi G}{3} cR^{1-\gamma} \right] \right\} \Psi = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \hat{H}(x)|\Psi\rangle = 0,$$

onde G é a **constante gravitacional**, Λ é o **termo cosmológico**, $r(t) = R(t) s$, sendo s um fator de escala, $\gamma = 1$ para a **radiação gravitacional**, $\gamma = 0$ para a **matéria gravitacional**, $c \neq 0$ é uma constante, $k = 0, +1, -1$, dependendo da geometria (plana, esférica e hiperbólica), e $\hat{H}(x)$ é o **operador hamiltoniano forçado** ("constraint") da TRG. Essa equação se aplica apenas ao **campo gravitacional** (Ψ) e não para uma partícula em movimento nesse mesmo campo. Essa diferença é a mesma que acontece entre o campo eletromagnético maxwelliano e o movimento de uma partícula carregada nesse campo.

Creio ser oportuno destacar que o astrofísico inglês Steven William Hawking (n.1942), em 1974 (*Nature* **248**, p. 30) e em 1975 (*Communications in Mathematical Physics* **43**, p. 199), usou a Mecânica Quântica para mostrar que os **buracos negros** (ver item 2.8) emitem partículas, tais como neutrinos os fótons, em uma dada temperatura (T_H), emissão

essa conhecida como **radiação de Hawking**. É oportuno lembrar que, em 1983 (*Physical Review D* **28**, p. 2960), Hawking e o físico norte-americano James Burkett Hartle (n.1939) propuseram a **função de onda do Universo** usando a EW-DW. Observe-se que, em 1996, os físicos, o norte-americano Curtis G. Callan Junior (n.1942) e seu orientando, o argentino Juan Martín Maldacena (n.1968) (*Nuclear Physics B* **472**, p. 591) e, independentemente, S. R. Das e S. D. Mathur (*Nuclear Physics B* **478**, p. 561) estudaram a radiação dos **buracos negros**. Esse estudo foi repetido por Maldacena e pelo físico norte-americano Andrew Eben Strominger (n.1955), em 1997 (*Physical Review D* **55**, p. 861). Em 1999 (*Physical Review D* **60**, a.n. 023512; 121301), o físico brasileiro Ivano Damião Soares (n.1946) analisou, respectivamente, a estrutura homocíclica de espaços-tempo clássicos emergindo do **Universo de Hartle-Hawking** em GQ, e o **caos** e a **universalidade** na dinâmica de **Universos Inflacionários**.

Uma nova estratégia para tratar a GQ foi a hipótese de que as **linhas de força faradayianas** podem ser vistas como excitações quânticas de um campo e, portanto, na ausência de fontes pontuais, elas se fecham e formam **laços** (“loops”), como acontece com o campo magnético [lembrar que, até o momento (março de 2012), a “carga magnética” (monopolo magnético) é apenas uma proposta teórica feita por Dirac, em 1931 (Capítulo 1, item 1.3)]. Desse modo, surgiu a **Gravitação Quântica de Laços** (GQL). É oportuno registrar que, em baixas energias, esses **laços** aparecem como **grávitons** que são, teoricamente, as partículas mediadoras da força (interação) gravitacional. Registre-se, também, que em Física do Estado Sólido, os correspondentes aos **grávitons** são os **fônons**. Aliás, a ideia de usar os **laços** como variáveis naturais de um **campo de Yang-Mills** (CY-M) [é um campo de “gauge” não-abeliano e foi desenvolvido pelos físicos norte-americanos Chen Ning Yang (n.1922; PNF, 1957) (de origem chinesa) e Robert Laurence Mills (n.1927), em 1954] já havia sido considerada, na década de 1970, pelos físicos, os norte-americanos Kenneth Geddes Wilson (n.1936; PNF, 1982) e Stanley Mandelstam (n.1928) (de origem sul-africana), o russo Aleksandr Morkowitsch Polyakov (n.1945) e o uruguaio Rodolfo Gambini em TQC. Muito embora os **laços** da CY-M tenham sido bastante importantes no desenvolvimento da Cromodinâmica Quântica (“Quantum Chromodynamics” – QCD), a teoria da interação forte, contudo, ela falhou na TCQ, pois dois **laços** que estão infinitamente separados são diferentes e, portanto não podem descrever os graus de liberdade de um campo (Rovelli, op. cit.).

A ideia de **laços** foi retomada na segunda metade da década de 1980. Antes, contudo, outra tentativa de tratar a GQ foi proposta, em 1982 (*Physics Letters B* **119**, p. 89; *International Journal of Theoretical Physics* **21**, p. 1), pelo físico indiano Amitabha Sen (n.1953) ao lançar mão da **supersimetria** [que é, basicamente, uma operação que transforma partículas de spin inteiro (**bósons**) em partículas de spin fracionário (**férmions**), e que foi desenvolvida em 1971] e apresentou as ideias iniciais de uma Teoria Quântica da Supergravidade (TQSG) em que a formulação hamiltoniana ADM da TRG era baseada em variáveis (conexões) spinoriais e expressa por um conjunto de equações muito mais simples e elegante do que as famosas **Equações de Einstein** (ver item 2.7). Ele também mostrou que, em sua formulação, existem elementos forçados (“constraints”) equivalente aos do CY-M. Contudo, ele não conseguiu definir os momentos conjugados de suas variáveis spinoriais. É interessante registrar que a **supersimetria** exige a existência de partículas **inos** (**fotino**, **gravitino** etc.) de spin 3/2 e jamais encontradas.

As dificuldades da TQSG de Sen foram contornadas pelo físico indiano Abhay Vasant Ashtekar (n.1949), em 1986 (*Physical Review Letters* **57**, p. 2244) e em 1987 (*Physical Review* **D36**, p. 1587), ao encontrar as variáveis conjugadas fundamentais (**variáveis de Ashtekar** - VA) da **gravidade spinorial**. Portanto, usando as técnicas da Teoria Quântica de “Gauge” (CY-M) ele propôs uma nova formulação da TGR baseada na TQSG de Sen, conhecido a partir daí como Teoria da Relatividade Quântica de Ashtekar-Sen (TRQA-S), que é baseada nos **laços de Wilson**, em virtude de Wilson, em 1974 (*Physical Review* **D10**, p. 2455), haver quantizado o CY-M para uma rede (“lattice”) discreta em um espaço-tempo euclidiano, por intermédio do Grupo de Renormalização. Note que, nessa mesma época, Polyakov chegou ao mesmo resultado, porém não o publicou.

Como os **laços de Wilson** não se aplicavam à **métrica quase-euclidiana** (a métrica da Relatividade Restrita) proposta pelo matemático russo-alemão Hermann Minkowski (1864-1909), em 1908, ela não poderia ser usada na quantização não-perturbativa da QCD. Porém, como as VA são independentes de uma base (“background”) geométrica, elas puderam ser aplicadas na quantização não-perturbativa da gravidade. Desse modo, pela primeira vez, foi possível obter a formulação hamiltoniana-hilbertiana da EW-DW e encontrar uma solução usando a Teoria de Chern-Simons (TC-S). Esta é uma teoria definida sobre uma variedade M topologicamente tridimensional, com ou sem fronteiras, e que não necessita de métrica; ela foi desenvolvida pelo físico chinês Shiing-Shen Chern (1911-2004) e pelo matemático norte-americano James (“Jim”) Harry Simons (n.1938), em 1974 (*Annals of Mathematics* **99**, p. 48). Registre-se que a TC-S foi quantizada pelo matemático norte-americano Edward Witten (n.1951), em 1988 (*Communications in Mathematical Physical* **117**, p. 353) e, em 1989 (*Communications in Mathematical Physical* **121**, p. 351). (en.wikipedia.org/wiki/Chern-Simons_theory; [James_Harris_Simons](#); [Shiing-Shen_Chern](#); [James_Harris_Simons](#); [Ted_Jacobson](#); [Vaughan_Jones](#); [Jones_polynomial](#) [History_of_loop_quantum_gravity](#)).

O caminho para a formulação da **Gravidade Quântica de Laços** (GQL) foi iniciado, em 1988, pelos físicos norte-americanos Theodore (“Ted”) A. Jacobson (n.1954) e Lee Smolin (n. 1955) (*Nuclear Physics* **B299**, p. 295) e por Rovelli e Smolin (*Physical Review Letters* **61**, p. 1155) quando usaram as **redes de spin** de Penrose para desenvolver a GQL. Neste contexto, essas **redes** surgem como uma generalização dos **laços de Wilson**. Matematicamente, tais **redes** são tratadas pela Teoria de Representações de Grupos e seus **nós** (“knots”) podem ser considerados como invariantes, tais como os termos dos **polinômios de Jones** [estes foram propostos pelo matemático neozelandês Sir Vaughan Frederick Randal Jones (n.1952), em 1985 (*Bulletin of the American Mathematical Society* **12**, p. 103)]. A GQL continuou a ser desenvolvida por Rovelli e Smolin, em 1990 (*Nuclear Physics* **B331**, p. 80); por Rovelli, em 1991 (*Classical and Quantum Gravity* **8**, p. 297; 1613; *Physical Review* **D43**, p. 442); por Bernd Brügmann, Gambini e o físico argentino Jorge Pullin (n.1963), em 1992 (*Nuclear Physics* **B385**, p. 587; *Physical Review Letters* **68**, p. 431). Também, em 1992 (*Physical Review Letters* **69**, p. 237), Ashtekar, Rovelli e Smolin introduziram o conceito de **urdidura** (“weaved”) de **redes** e **nós** na QGL indicando que a estrutura espaço-tempo é discreta. Desse modo, pela primeira vez foi encontrado que os **laços** não descrevem elementos infinitesimais no espaço e sim, elementos finitos. Ainda em 1992 (*Classical and Quantum Gravity* **9**, p. 1433), Ashtekar e Christopher J. Isham estudaram as representações da álgebra holonômica da gravitação e a Teoria de “Gauge” Não-Abeliana (CY-M). Em 1993 (*Classical and Quantum*

Gravity **10**, p. 1549; 1567), Rovelli estudou a Mecânica Estatística da GQ e a origem termodinâmica do tempo. Registre-se que, em 1994 (*Physical Review Letters* **78**, p. 446), Rovelli e Smolin usaram o formalismo hamiltoniano para estudar a GQ não-perturbativa.

Apesar desse importante resultado, ele apresentava um problema, pois os elementos finitos do espaço (volumes - V) eram separados, envolviam áreas (A) e uniões (“links”) entre eles e, além do mais, essa geometria era quantizada conforme foi demonstrado por Rovelli e Smolin, em 1995 (*Physical Review* **D52**, p. 5743; *Nuclear Physics* **B442**, p. 593; **B456**, p. 734). Com efeito, usando a Teoria dos Operadores (de volume e de área) no Espaço de Hilbert encontraram, respectivamente, que: $V = \left[\frac{hG}{2\pi^3} \right]^{3/2}$ e $A_j = 2hG \sum_{i=1}^n \sqrt{j_i(j_i + 1)}$, sendo h a **constante de Planck**, G a **constante de gravitação**, c a **velocidade da luz no vácuo** e j (inteiro ou semi-inteiro) é a ordem do *link*. Note-se um rigoroso tratamento matemático dessa geometria foi apresentado, ainda em 1995 (*Physical Review Letters* **75**, p. 3048), por Renate Loll (*Physical Review Letters* **75**, p. 3048) e por Ashtekar, Jerzy Lewandowski, Donald Marolf, José Mourão e Thomas Thiemann (*Journal of Mathematical Physics* **36**, p. 6456). Aliás, em seu livro de 2002 (op. cit.), Rovelli conta que foi Renate quem mostrou que aqueles cálculos que ele havia apresentados em um evento em Varsóvia estavam errados. Depois de algumas discussões, Smolin viu que ela estava certa, já que havia uma troca de sinal em uma parte dos cálculos. Contudo, apesar desse erro e logo corrigido [*Nuclear Physics* **B456**, p. 734 (1995)], os resultados básicos não se alteraram. Registre-se que, na GQL, a medida das áreas, em *unidades de Planck*, foi logo caracterizada pelo **parâmetro Barbero-Immirzi** [que é um coeficiente numérico introduzido por J. Fernando G. Barbero, em 1995 (*Physical Review* **D51**, p. 5507) e por Giorgio Immirzi, em 1997 (*Classical and Quantum Gravity* **14**, p. L177), ao expressarem a conexão lorentziana com o grupo não-compacto $SO(3,1)$ em termos de uma conexão complexa com um grupo compacto de rotações: $SO(3)$ ou $SU(2)$, e relacioná-los com a **gravidade canônica**]. Note-se que a *geometria planckiana* da GQL também é a base da Teoria de Cordas e das Supercordas (para o caso da GQ) desenvolvida a partir do trabalho do físico italiano Gabrielle Veneziano (n.1942), em 1968 (*Nuovo Cimento* **A57**, p. 190) e, independentemente, do físico japonês M. Suzuki (trabalho não publicado), usando a ideia de **corda** que tenta generalizar o conceito de **partícula elementar**, considerada como um ponto, de dimensão zero, que gera o problema da “singularidade” (infinito) na TQC. Sobre essas Teorias, ver: Michio Kaku, **Introduction to Superstrings and M-Theory** (Springer-Verlag, 1999)].

O tratamento matemático rigoroso de a estrutura granular **do espaço**, que foi demonstrada por Rovelli e Smolin segundo mostramos acima, tem como base a Geometria Não-Comutativa (tipo de geometria em que, embora não possa localizar um ponto no espaço, ela pode fundamentar uma descrição de partículas e campos que evolui com o tempo), cujos principais trabalhos foram desenvolvidos pelo matemático francês Alain Connes (n. 1947), especialista em álgebra de operadores, e apresentados em seu livro **Non-commutative Geometry** (Academic Press, 1994).

É oportuno observar que, ainda em 1995 (*Journal of Mathematical Physics* **36**, p. 6180), Louis Crane usou a Teoria Quântica Relacional (em que o *estado quântico* de uma partícula é definido no contexto criado pela presença do observador e a informação recebida da mesma) e desenvolveu a Cosmologia Quântica Relacional (CQR) que afirma não existir apenas um *estado quântico* do Universo, mas tantos estados quantos forem os contextos.

Em 1996 (*Physics Letters* **B380**, p. 257), Thiemann apresentou um rigoroso tratamento da GQL mostrando que o limite semi-clássico dessa teoria seria a TRG, resultado esse que ainda é uma questão em aberto. Nesse rigoroso formalismo matemático de Thiemann ele define o **operador hamiltoniano forçado** (“constraint”) como um operador auto-adjunto sobre o estado espacial cinemático. Além desse “constraint”, outros também aparecem nessa formulação, como o **difeomorfismo**, que é a operação que move os pontos do espaço, preservando apenas as relações entre eles usadas para definir os pontos (p.e. **nós**, GQL) que estão próximos uns dos outros (Smolin, 2001, op. cit.).

Na TQC, o tratamento de sua dinâmica é realizado com as **integrais de caminho feynmanianas** que são “somas” de regiões arbitrariamente pequenas do espaço-tempo (sendo este uma sequência temporal de espaços), daí essa formulação feynmaniana ser conhecida como uma *história de espaços*. Contudo, na GQL, o espaço é granulado composto de **redes de spin** e o espaço-tempo é, portanto, descrito por uma *história de redes de spin*. Essa história é chamada de **espuma de spin** (“spinfoam”). Vamos entender essa nova geometria. Na geometria conhecida a *linha* é a *história de um ponto*, a *área* (*superfície*) é a *história da linha* e o *volume* é a *história da área*. A “spinfoam” é uma **geometria quântica** formada por áreas chamadas de *faces*, que representam a *história dos* “links”, e as *linhas* (“edgges”) são as *histórias dos nós*. As *faces* se encontram nas *linhas* e estas nos *vértices*, que significam as interações elementares entre os *nós*, ou seja, entre os **grãos do espaço**. Tais interações são estudadas por intermédio de *diagramas* mais complexos dos que os *diagramas de Feynman*, pois enquanto nestes há somente linhas e pontos, naqueles há pontos, linhas e áreas. É interessante observar que o nome **espuma de spin** foi dado pelo físico norte-americano John Carlos Baez (n.1961), em 1998 (*Classical and Quantum Gravity* **15**, p. 1827), em analogia com a **espuma quântica** conceituada por Wheeler, em 1957, como vimos acima. Antes, em 1996 (*Advances in Mathematics* **117**, p. 253), o primo da grande cantora e ativista progressiva norte-americana Joan Baez (n.1941), havia estudado as **redes de spin** em uma Teoria de “Gauge”. (Rovelli, 2003, op. cit.).

O conceito de **soma sobre superfícies** (“spinfoam”) teve sua primeira proposta apresentada, em 1993 (*arXiv:gr-qc/0910036v2*, October), pelo físico norte-americano Norman J. LaFave (n.1958). Depois se seguiu outros trabalhos (os já referidos), bem como o de Junichi Iwasaki (*Journal of Mathematical Physics* **36**, p. 6288), que estudou o modelo da **Gravidade Quântica de Ponzano-Regge** [G. Ponzano and T. Regge, **Semiclassical limit of Racah coefficients**, em: F. Bloch (Editor), **Spectroscopy and Group Theoretical Methods in Physics** (North-Holland, 1968)] usando o *spinfoam*, o de Rovelli e Michael Reisenberger, em 1997 (*Physical Review* **D56**, p. 3490); o de John W. Barrett e Crane, em 1998 (*Journal of Mathematical Physics* **39**, p. 3296), o de Smolin e Fotini Markopoulou, ainda em 1998 (*Physical Review* **D58**, a. n. 084032); o de Rovelli, em 2000 (*Journal of Mathematical Physics* **Special Issue; hep-th/9910131**); o do matemático espanhol Alejandro Perez, em 2003 (*arXiv:gr-qc/0301113v2*, 14 February; *Classical and Quantum Gravity* **20**, R43); e o de Jonathan Engle, Roberto Pereira, Rovelli e Etera Livine, em 2007 (*arXiv:gr-qc/0711.0146v1*, November).

Concluindo este item, é interessante observar que a GQL tem muitas aplicações, com destaque para o estudo da Termodinâmica dos *buracos negros*, conforme se pode ver nos trabalhos descritos a seguir. Antes, apresentemos um pequeno resumo sobre essa Termodinâmica. Em 1972 (*Lettere al Nuovo Cimento* 4

, p. 737) e em 1973, o físico israelense Jacob David Bekenstein (n.1947) (de origem mexicana) sugeriu que a área do *horizonte de eventos* [superfície traçada em torno de um *buraco negro* (“black hole”) (BN)] fosse a entropia desse corpo celeste. Contudo, em 1973 (*Communications in Mathematical Physics* 31, p. 161), James A. Bardeen, Brandon Carter (n.1942) e Hawking mostraram que, se um *buraco negro* tivesse entropia, deveria, então, possuir também temperatura e, conseqüentemente, pelas Leis da Termodinâmica, deveria irradiar, o que contradizia o próprio conceito desse objeto cósmico. Desse modo, concluíram que a entropia de um *buraco negro* era infinita. Para contornar essa dificuldade, procurando uma relação entre a Teoria da Relatividade Geral e a Mecânica Quântica, Hawking publicou um artigo, em 1974 (*Nature* 248, p. 30), no qual apresentou a ideia de que os *buracos negros* poderiam criar e emitir partículas, tais como neutrinos ou fótons, em uma temperatura T_H , em graus Kelvin (K), conhecida como *temperatura Hawking*, cuja expressão é dada pela expressão: $T_H = \hbar \kappa / (4\pi mc k_B)$, onde κ é a *gravidade superficial do horizonte de eventos*, e k_B é a *constante de Boltzmann*. Note-se que, ainda em 1974 (*Physical Review D* 9, p. 3292), Bekenstein formulou o hoje *limite de Bekenstein*: a quantidade de informação que pode ser contida em uma dada região do espaço é finita e proporcional à área da fronteira da região considerada e medida em *unidades de Planck*. $M_p = 10^{-5}$ g, $\ell_p = 10^{-33}$ cm, $E_p = 10^{19}$ GeV.

Essa ideia da emissão de partículas por parte de um BN, hoje conhecida como *radiação (efeito) Hawking*, foi completada por Hawking, em 1975 (*Communications in Mathematical Physics* 43, p. 199), em um trabalho no qual deduziu a célebre fórmula para a *entropia de um buraco negro* (S_{BH}) que, no caso de ele ser esfericamente simétrico, tem a forma: $S_{BH} = 8\pi^2 M^2 (k_B G/h c)$, hoje conhecida como *Fórmula de Bekenstein-Hawking* (FB-H), expressão que claramente que a entropia por unidade massa (S_{BH}/M) é proporcional à massa M do buraco negro, confirmando o que Hawking havia sugerido no artigo de 1974 (visto acima), ou seja, que um BN poderia irradiar. Registre-se que um resultado análogo a esse foi encontrado, ainda em 1975, em trabalhos independentes de Robert M. Wald (*Communications in Mathematical Physics* 45, p. 9) e L. Parker (*Physical Review D* 12, p. 1519). Observe-se que, em 1996 (*Physics Letters B* 379, p. 99), a origem microscópica da FB-H foi discutida pelos físicos Strominger e o iraniano-norte-americano Cumrun Vafa (n.1960) por intermédio da Teoria de Cordas; neste artigo eles mostraram que os BN são corpos complexos, feitos de estruturas quânticas multidimensionais: as *D-branas*. Para outros detalhes sobre os *buracos negros*, ver: Kip S. Thorne, *Black Holes & Time Warps* (W. W. Norton & Company, 1994).

Agora, retornemos aos trabalhos em GQL. Em 1995 (*Physical Review Letters* 75, p. 3214), Jacobson reformulou a TRG a partir do *limite de Bekenstein* (LB) e da Termodinâmica e suas leis. Por sua vez, também em 1995 (*Journal of Mathematical Physics* 36, p. 6377), o físico norte-americano Leonard Susskind (n.1940) sugeriu que o *princípio holográfico* (PH) [proposto pelo físico holandês Gerardus 't Hooft (n.1946; PNF, 1999), em 1993 (*arXiv:gr-qc/9310026v1*, 19 Outubro)] poderia ser aplicado à Teoria das Cordas Cósmicas, resultando daí o que hoje é conhecido como a STL (“String Theory Landscape”- Teoria de Corda Panorâmica). Destaque-se que o PH, um conceito até hoje bastante discutido, foi inspirado no LB da seguinte maneira. Consideremos um sistema físico feito de **A Coisa** (“The Thing”) e que a mesma possa ser contida dentro de uma fronteira finita, denominada **Tela** (“screen”). Pois bem, esse princípio significa que nunca poderemos saber mais sobre **A Coisa** do que o limite imposta pela área da **Tela**. Destaque-se que, em 1999 (*Journal of High-Energy Physics* 9906; 9907, p. 0004; 028), em 2002 (*Review of Modern Physics* 74, p. 825) e, em 2006 (*Physical Review Letters* 97, a.n 191302), Raphael Bousso tem usado o PH para fazer previsões probabilísticas da dinâmica cosmológica.

A Termodinâmica dos BN foi usada na QGL por Smolin, ainda em 1995 (*Journal of Mathematics Physics* **36**, p. 6417), e em 1996 (*Physical Review Letters* **77**, p. 3288; *Helvética Physica Acta* **69**, p. 583). Em 1998 (*Physical Review Letters* **80**, p. 904), Ashtekar, Baez, Alejandro Corichi e Kirill Krasnov usaram a GQL para estudar a entropia do BN. Ainda em 1998 (*Journal of High-Energy Physics* 9802, p. 014), Maldacena e Strominger calcularam a entropia de um BN usando a Teoria de Cordas. Aliás, é oportuno também registrar que foi, ainda em 1998 (*Advanced Theoretical Mathematics Physics* **2**, p. 231) e, em 1999 (*International Journal of Theoretical Physics* **38**, p. 1113), que Maldacena tornou-se famoso ao usar o PH e propor a conjectura sobre a equivalência entre da Teoria de Corda sobre o espaço Anti de Sitter (“Anti-de Sitter Space’ – A-dSS) e uma Teoria de Campo Conforme definida sobre aquele espaço. Note-se que o A-dSS é um espaço-tempo 5-dimensional com um $\Lambda < 0$ e caracterizado por uma curvatura de comprimento L. É interessante destacar que, em 2012 (*Nature Physics*, **on-line**), Igor Pikovski, Michael R. Vanner, Markus Aspelmeyer, M. S. Ki, e Caslav Brukner propuseram um teste da GQ, em laboratório, usando **óptica quântica**. Neste experimento, um pulso de laser interage quatro vezes com um espelho em movimento, para medir primeiro o momento e depois a posição e, depois, inverter essas medidas: primeiro a posição e depois o momento. Segundo esses físicos, a diferença nessas medidas será um resultado decorrente da GQ (*inovaçãotecnologica*, 21 de março de 2012). Mais detalhes sobre a GQ, ver: Lee Smolin, **Três Caminhos para a Gravidade Quântica** (Rocco, 2002) e **A Vida do Cosmos** (Editora Unisinos, 2004); Jan Ambjorn, Jerzy Jurkiewicz e Renate Loll, **Universo Quântico Auto-organizado**, *Scientific American Brasil* **75**, p. 28, Agosto de 2008; Kitty Ferguson, **Stephen Hawking: Aventuras de uma Vida** (Benvirá, 2012)]. Ver, também, os seguintes verbetes da [en.wikipedia/org](http://en.wikipedia.org): [Spin_foam](#); [Carlo_Rovelli](#); [Juan_Martin_Maldacena](#); [John_C_Baez](#); [Alain_Connes](#); [Cumrun_Vafa](#); [Andrew_Strominger](#); [James_Hartle](#); [Rodolfo_Gambini](#); [Jorge_Pullin](#); [Jacob_Bekenstein](#); [Leonard_Susskind](#); [J_Richard_Gott](#); [Immirzi_parameter](#).

[ANTERIOR](#)[SEGUINTE](#)