

GRAVIDADE QUÂNTICA: ESTUDO PRELIMINAR DA GRAVIDADE QUÂNTICA EM *LOOP* DE CARLO ROVELLI

QUANTUM GRAVITY: A PRELIMINARY STUDY ON THE LOOP QUANTUM GRAVITY FROM CARLO ROVELLI

GRAVEDAD CUÁNTICA: ESTUDIO PRELIMINAR DE LA GRAVEDAD CUÁNTICA DE BUCLES DE CARLO ROVELLI

Andrômeda Surak Doge¹
Romulo Ponticelli Giorgi Jr²
Daniel Guimarães Tedesco³

Resumo

O presente artigo busca apresentar de forma introdutória as características da gravidade quântica tal como vista na teoria da gravidade quântica em *loop*, na concepção dirigida por Carlo Rovelli, identificar algumas de suas principais contribuições e desenvolver algumas de suas conclusões, especialmente a quantização do espaço-tempo e a possibilidade de os buracos negros terem ligação com os buracos brancos. As limitações da Teoria da Relatividade Geral diante da mecânica quântica — e vice-versa — são descritas apenas para demonstrar a forma com que a gravidade quântica em *loop* se propõe a solucioná-las, bem como o fato de que, nesta teoria, ao contrário do que ocorre na teoria das cordas, parte-se de intuições físicas e busca-se explicar a realidade sem a pretensão de criar-se uma unificação de todas as forças fundamentais. analisa-se a forma como a gravidade quântica em *loop* concebe o tempo, que carece das noções habituais de unidade, direção, presente, independência e continuidade, substituídas pelas de evento e dinâmica nas relações. O método adotado foi o da pesquisa em livros-texto e artigos científicos.

Palavras-chave: gravidade quântica; gravidade quântica em *loop*; quantização do espaço-tempo; quantização do tempo.

Abstract

This paper presents the key characteristics of quantum gravity, as presented in Carlo Rovelli's formulation of Loop Quantum Gravity. It identifies some of Loop Quantum Gravity's main contributions, including the quantization of spacetime and the possible connection between black holes and white holes. The limitations of both General Relativity and Quantum Mechanics are briefly discussed to highlight how Loop Quantum Gravity aims to reconcile them. Unlike String Theory, Loop Quantum Gravity emphasizes physical intuition and seeks to explain reality without attempting to unify all fundamental forces. The paper also examines Loop Quantum Gravity's unconventional view of time, which lacks the traditional notions of unity, direction, present, independence, and continuity, and instead focuses on events and relational dynamics. The research methodology employed relied on scholarly sources, including textbooks and scientific papers.

Keywords: quantum gravity; *loop quantum gravity*; space-time quantization; time quantization.

Resumen

1 Acadêmica do Bacharelado em Física do Centro Universitário Internacional (UNINTER) e de Biomedicina do Centro Universitário Leonardo da Vinci (UNIASSELVI). Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3622421205162442>. E-mail: andromedasurak@outlook.com

2 Acadêmico do Bacharelado em Física do Centro Universitário Internacional (UNINTER) e doutor em Direito Constitucional pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Currículo Lattes: <https://lattes.cnpq.br/1569727143971459>. E-mail: romulopg@outlook.com

3 Doutor em Ciências – Física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Professor do Centro Universitário Internacional (UNINTER). Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2216096357834491>. E-mail: daniel.te@uninter.com

El presente artículo busca presentar de forma introductoria las características de la gravedad cuántica tal como vista en la teoría de la gravedad cuántica de bucles, en la concepción dirigida por Carlo Rovelli, identificar algunas de sus principales contribuciones y desarrollar algunas de sus conclusiones, especialmente la cuantización del espacio-tiempo y la posibilidad de los agujeros negros tengan conexión con agujeros blancos. Las limitaciones de la Teoría de la Relatividad General ante la mecánica cuántica — y viceversa — son descritas solo para demostrar la forma con que la gravedad cuántica de bucles se propone a solucionarlas, así como el hecho de que esta teoría, al contrario de lo que ocurre en la teoría de cuerdas, arranca de intuiciones físicas y busca explicar la realidad sin la pretensión de crear una unificación de todas las fuerzas fundamentales. Se analiza la forma como la gravedad cuántica de bucles concibe el tiempo, que carece de las nociones habituales de unidad, dirección, presente, independencia y continuidad, sustituidas por las de evento y dinámica en las relaciones. El método adoptado fue el de la investigación en libros-texto y artículos científicos.

Palabras clave: gravedad cuántica; gravedad cuántica de bucles; cuantización del espacio-tiempo; cuantización del tiempo.

1 Introdução

Segundo Carlos Rovelli (2004), a gravidade quântica é, talvez, o mais importante problema aberto na física fundamental contemporânea. A gravidade quântica em loop (LQG, sigla em inglês para *loop quantum gravity*) busca conciliar a física quântica com a gravidade, mantendo ideias e concepções que se baseiam tanto na relatividade geral quanto na mecânica quântica, sem recorrer a dimensões extras sem base empírica. Nesse contexto, o cientista Albert Einstein acreditava que conciliar as concepções de Galileu Galilei (relatividade) e de James Clerk Maxwell (eletromagnetismo) era essencial (Rovelli, 2004). Rovelli, com a LQG, tem um objetivo semelhante: conciliar a mecânica quântica e a teoria da relatividade geral.

O tema do presente trabalho é a LQG de Carlo Rovelli. Tem-se como objetivo imediato, analisar as características gerais da LQG na sua elaboração e desenvolvimento até o final do século XX, identificando algumas de suas principais contribuições, constituindo-se em um estudo preliminar para futura pesquisa por graduandos em física. A metodologia envolve a pesquisa em fontes doutrinárias (livros-texto e artigos científicos).

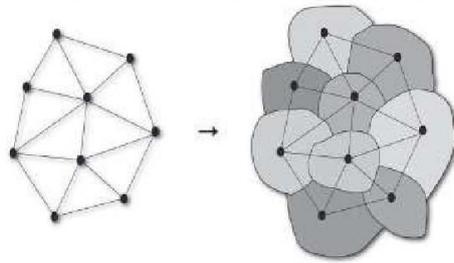
Após o capítulo introdutório, passa-se à exposição das características gerais da LQG, seguido da interação da LQG com a teoria quântica de campos. O quarto capítulo mostra que o ponto de partida são intuições físicas, sem a pretensão de unificar todas as forças fundamentais. A seguir, o capítulo quinto mostra os pontos nos quais a LQG diverge da teoria da relatividade geral. O capítulo sexto analisa a forma como a LQG concebe o tempo, que carece das noções habituais de unidade, direção, presente, independência e continuidade, substituídas pelas de evento e da dinâmica nas relações. Por fim, o capítulo sete analisa os resultados obtidos.

2 Características gerais da LQG

Uma das inúmeras iniciativas para reunir a relatividade geral de Einstein e a mecânica quântica é a LQG (Rovelli, 2004). Seu fundamento é a hipótese de que o espaço-tempo é formado por minúsculos grafos não orientados, dentro de classes de equivalência e sob difeomorfismos, chamados de “nós” (Rovelli, 2004). Esses grafos abrangem o espaço e o tempo e são conectados por relações quânticas conhecidas como “holonomias”.

Para a quantização da gravidade, foi escolhida a álgebra de *loop*, na qual assume-se, fundamentalmente, que os operadores de *loop* de Wilson são bem definidos no espaço hamiltoniano da teoria. Isso significa que certos estados concentrados em estruturas unidimensionais (*loops* e grafos) têm norma finita (Rovelli, 1998).

Figura 1: *Quanta* de espaço e rede de *spin* por ele gerada



Fonte: Rovelli (2021, p. 154).

A holonomia é “um conceito muito importante na Teoria da Foliação. Em muitas situações, ele determina completamente a estrutura da foliação” (Dillen; Vestraelen, 2006, p. 39, tradução nossa). “Muitos sistemas mecânicos envolvem partículas ou sistemas de partículas cujas posições são restritas” por um constritor holonômico (Godinho; Natário, 2014, p. 174). De acordo com a LQG, o espaço-tempo tem uma dimensão mínima para esses *loops* conhecida como “comprimento de Planck” (Rovelli, 2023b). A dinâmica desses *loops* é descrita pela mecânica quântica, enquanto a geometria do espaço-tempo em larga escala é descrita pela relatividade geral.

Uma das principais implicações da LQG é que o espaço e o tempo não são mais entidades independentes e absolutas, mas criadas pela rede de *loops* interconectados. Além disso, a teoria prevê a existência de um estado de energia mínima do universo, conhecido como “estado de vácuo quântico”, que pode ter consequências observacionais na física de partículas e na cosmologia.

3 Interação da LQG com a teoria quântica de campos

Há muitos questionamentos em aberto em relação à LQG: como a teoria interage com outras teorias quânticas de campos, como a teoria quântica de campos padrão? Como ela pode ser testada empiricamente? A discussão será efetuada a partir dos dados coletados das fontes doutrinárias. A gravidade quântica busca conciliar a mecânica quântica e a relatividade geral (D’Inverno; Vickers, 2022, p. 3). A LQG não é uma teoria completa nem se conseguiu ainda comprovar sua total consistência com a Teoria Clássica da Relatividade Geral (TRG).

A relatividade geral parte da equivalência entre a aceleração e a gravidade em quase tudo, exceto nos efeitos decorrentes da maré gravitacional, que encolhe ou pressiona os objetos colocados ao longo de linhas equipotenciais e alonga objetos colocados transversalmente a essas linhas. Esses efeitos de maré não podem ser simulados pela mera aceleração (Susskind; Cabannes, 2023).

Se os efeitos decorrentes de uma gravidade aparente decorrerem de mera aceleração, eles poderão ser eliminados por transformações de coordenadas, enquanto caso decorram de gravidade não poderão sê-lo, pois a gravidade altera a própria geometria e a métrica do sistema, que passa a ser curva. De fato, não há distinção entre a curvatura do espaço e o efeito das marés gravitacionais (Susskind; Cabannes, 2023). O ponto forte da LQG é a sua capacidade de descrever o espaço-tempo quântico de forma independente do contexto e não perturbativa.

4 Parte-se de intuições físicas e não se propõe a unificação de todas as forças fundamentais

A LQG é menos ambiciosa que a teoria das cordas, pois, ao contrário desta, não pretende unificar todas as forças fundamentais (Rovelli, 2008). De fato, a gravidade quântica é vista como a última etapa do caminho para a unificação da mecânica quântica com a relatividade geral sem recorrer à supersimetria ou a dimensões adicionais. A LQG, ao contrário da teoria das cordas, tem uma formulação direta, na qual os graus de liberdade são claros, não se baseando em uma estrutura do espaço-tempo e buscando compreender o que é o espaço-tempo quântico em um nível fundamental (Rovelli, 2008).

As principais versões da teoria das cordas utilizam 10 ou 11 dimensões e recorrem à supersimetria, não apenas se afastando da realidade experimental como tomando, como ponto de partida, suposições sem base empírica, concebendo a gravidade como uma excitação de uma *string* ou outro objeto estendido, localizado em uma determinada métrica do espaço (Rovelli, 2008). A LQG, ao contrário, mantém as características fundamentais da visão de Einstein da gravidade como uma demonstração de que as noções clássicas sobre o espaço e o tempo são inadequadas no nível fundamental (Rovelli, 2008).

O principal mérito da LQG é o de propiciar uma formulação matematicamente rigorosa de uma teoria quântica de campos geralmente covariante, não perturbativa e independente do contexto, viabilizando investigações da física do *Big Bang* e da entropia dos buracos negros (Rovelli, 2008).

O ponto de partida da formalização da LQG é a formulação da TRG nos termos da conexão de Se-Ashtekar-Barbero, fixando um espaço tridimensional M , compacto e sem limites, e considerando funções reais suaves $SU(2)$, conexão $A_a^i(x)$ e uma densidade vetorial E_i^a , transformando a representação vetorial de $SU(2)$ em M . Usamos a, b, \dots como índices espaciais e i, j, \dots como índices internos.

As coordenadas de M são indicadas como x . A relação entre esses campos e a métrica convencional gravitacional, considerando $\hat{E}_i^a(x)$ como a tríade inversa e densitizada, relacionada com os tensores métricos $g_{ab}(x)$, em superfícies constantes no tempo, é:

$$g \cdot g^{ab} = \hat{E}_i^a \hat{E}_i^b$$

- Em que g é o determinante de g_{ab} .

$$A_a^i(x) = \Gamma_i^a(x) + \gamma \cdot K_a^i(x)$$

Nela, $\Gamma_i^a(x)$ é a conexão de *spin* à tríade, $K_a^i(x)$ é a curvatura extrínseca do espaço tempo tridimensional e γ é uma constante, chamada de parâmetro de Immirzi, cuja escolha arbitrária gera diferentes versões do espaço-tempo, ao alterar a restrição hamiltoniana.

Com $\gamma = 1$, tem-se a conexão padrão de Barbero. A formalização fica particularmente simples com $\gamma = i$, gerando uma forma assemelhada à da TRG de Lorenz. Já com $\gamma = 1$ tem-se uma TRG euclidiana. Outros valores são também viáveis (Rovelli, 2008). Chama-se **extrínseca** a curvatura quando “se refere ao modo como um espaço [...] está *embutido em um espaço com dimensão superior*” (Susskind; Cabannes, 2023, p. 55, tradução nossa).

5 *Loop quantum gravity* X Teoria da Relatividade Geral

A LQG é uma “quantização” conservativa da TRG, baseada apenas em ideias físicas suportadas empiricamente. Uma teoria quântica da gravidade é, também, uma teoria da métrica do espaço-tempo. O nome *loop* em *loop quantum gravity* (LQG) vem da álgebra utilizada, a álgebra de *loop* (Rovelli, 2008).

Ao quantizar o espaço, estamos assumindo que certos estados concentrados em estruturas unidimensionais (*loops* e grafos) têm norma finita. Traçando uma analogia com a intuição de Faraday de que os graus de liberdade podem ser concebidos como linhas no espaço, Rovelli (2008) defende que possamos descrever uma teoria quântica de campos com base nessas linhas. A LQG mantém, da TRG, o difeomorfismo. Assim, os estados quânticos são concebidos como excitações em *loops* e grafos em um campo gravitacional em uma superfície diferencial denominada de rede de *spin* (Rovelli, 2008; Rovelli, 2021).

Há invariância por difeomorfismo quando a teoria não varia de acordo com as mudanças de variáveis. Trata-se da relação manifestamente matemática do princípio da covariância da relatividade geral. Dessa forma, a LQG concebe as excitações da teoria quântica de campos não como excitações em um espaço, mas como excitações na própria área de ação (Rovelli, 2018). A LQG é, em geral, compatível com as teorias quânticas de campos, tal como hoje concebidas, bem como com as suas principais interpretações: “A LQG é uma teoria quântica de campos padrão. Assim, você pode escolher sua interpretação favorita da mecânica quântica e utilizá-la para interpretar os aspectos quânticos da LQG” (Rovelli, 2008, p. 21, tradução nossa).

Os estados físicos do campo gravitacional são classificados pela teoria dos nós (Rovelli, 2008). Dentro de buracos negros e no *Big Bang* o tempo desaparece. Geralmente, assume-se que a gravidade tenha efeitos quânticos apenas em dimensões diminutas, próximas da escala de Planck, da ordem de 10^{-35} m, mas os efeitos podem aparecer em escalas maiores, pela superposição, desaparecendo os efeitos quânticos pela decoerência (Kiefer, 2017).

O comprimento de Planck é dado pela fórmula

$$l_p = \sqrt{\frac{h \cdot G}{c^3}} \approx 1,62 \cdot 10^{-35} \text{ m (Kiefer, 2017, p. 289).}$$

A decoerência

refere-se ao fato de que, após a interação com um sistema macroscópico, os suportes da função de onda correspondentes aos diferentes resultados possíveis de uma interação não mais se sobrepõem em uma configuração espacial. [...] O fato de que dois termos [da função de onda] não se sobreponham ou interfiram é chamado de decoerência (Bricmont, 2016, p. 154, 297, tradução nossa).

A LQG estuda a própria natureza do espaço e do tempo (Rovelli, 2007) e a ligação dos buracos negros com os buracos brancos, é uma alternativa à teoria das Cordas (Conlon, 2016) e uma das principais tentativas para fornecer uma visão quântica da gravidade (Rovelli, 2015).

Rovelli (2023) define um buraco branco como o “lado oposto” (no espaço) e reverso (no tempo) do buraco negro. Os buracos brancos podem, na prática, ser quase impossíveis de observar. A emergência da matéria após o seu colapso dentro do horizonte de eventos, para um buraco negro com massa estelar, teria uma duração da ordem de microssegundos, o que dificulta sua visualização. Mesmo nos maiores buracos negros observados, com massa da ordem de bilhões de massas solares, esse colapso duraria apenas umas poucas horas (Rovelli, 2021).

Enquanto a LQG surge de ideias e intuições físicas e busca explicar a realidade, a teoria das cordas é frequentemente criticada pela distância com a realidade experimental; por surgir de ideias sem fundamento empírico; pela dificuldade em aprimorar nosso conhecimento do mundo real; pela liberdade excessiva em especular com dimensões supraespaciais; e pela ausência de descrições geométricas coerentes de como a teoria deva ser concebida em termos físicos ordinários, ainda que seja quase três vezes mais popular que a LQG (Penrose, 2016).

6 Como a LQG concebe o tempo

Deve-se salientar, entretanto, que a palavra “tempo”, na expressão “tempo de emergência da matéria”, oriunda da singularidade do buraco negro, dificilmente seria o tempo cronológico, contado do momento da formação do buraco negro. De fato, a matéria é acrescida aos buracos negros ao longo de extensos períodos (mais de 10 bilhões de anos nos buracos negros situados nos centros das galáxias) e a LQG exige que consideremos o tempo de forma completamente distinta da utilizada tanto na física clássica quanto na mecânica quântica.

O tempo, na física clássica e na concepção utilizada intuitivamente no dia a dia, é concebido como dotado de cinco propriedades que, na LQG, ao quantizar simultaneamente o espaço e o tempo (ou seja, o espaço-tempo), desaparecem:

- I) A **unidade**;
- II) A **direção**;
- III) A noção do **presente**;
- IV) A **independência**; e a
- V) A **continuidade**.

Essas noções são substituídas pelas noções de **evento** e de **dinâmica nas relações**.

6.1 Tempo sem unidade

A própria teoria da gravidade geral já rompeu com a ideia da unidade do tempo ao demonstrar que o tempo passa mais devagar em regiões mais próximas ao centro da Terra,

devido à diferença na aceleração da gravidade (Rovelli, 2018). O espaço-tempo, na LQG, é concebido como desprovido de unidade, sendo substituído por uma expressão probabilística relacionada a excitações quânticas:

O desaparecimento do espaço convencional é um traço característico do quadro proposto pela LQG. Há excitações quânticas do campo gravitacional que conferem amplitudes probabilísticas de transformar-se uma na outra. Estes ‘quanta da gravidade’ não vivem imersos em um espaço-tempo, eles são o espaço. A ideia do espaço como um ‘contêiner’ do mundo físico desapareceu (Rovelli, 2004, p. 368-369, tradução nossa).

6.2 Tempo sem direção

A diferença entre passado e futuro e sua correlação – entre causa e efeito – é tanto intuitiva para nós quanto pode ser considerada uma das características fundamentais da física clássica. Rovelli (2018) salienta, entretanto, que as noções de passado, presente, causa e feito ficam nebulosas e desaparecem na escala quântica.

Se eu observar a escala microscópica [quântica] das coisas, então a diferença entre o passado e o futuro desaparece. O futuro do mundo, por exemplo, é determinado pelo seu estado presente — mas nem mais nem menos do que o é pelo passado. Nós frequentemente **dizemos que a causa precede o efeito**, mas, **na gramática elementar das coisas, não há distinção entre “causa” e “efeito”**. **Há regularidades, representadas pelo que chamamos de leis físicas**, que ligam eventos em diferentes tempos, **mas elas são simétricas entre o futuro e o passado** (Rovelli, 2018, *e-book*, tradução e grifos nossos).

Joshi (2014) analisa a violação das relações de causa e efeito, entendidas como relações relacionadas por sinais de luz originados no passado (causa), salientando que a própria TRG viabiliza situações nas quais a violação da causalidade é permitida no espaço-tempo, e demonstra que essas violações causais são acompanhadas de singularidades.

6.3 Ausência da noção do presente

Cunhando um novo aforismo, Rovelli (2018) afirma que “o agora não significa nada”. A noção de simultaneidade, aliada à de tempo presente, depende da possibilidade do trânsito de sinais de informação simultâneos. A passagem de ondas gravitacionais provocaria oscilações nos cones espaço-temporais. Essas oscilações, quando muito acentuadas, poderiam fazer com que o tempo voltasse ao ponto em que estava no início da passagem da onda gravitacional, provocando um *loop* (Rovelli, 2018). Gödel teria sido o primeiro a teorizar esses *loops* temporais. Esses efeitos seriam comuns na proximidade dos buracos negros. A compreensão da

gravidade quântica exige o abandono tanto das noções clássicas de espaço quanto da linearidade do tempo, como leciona Rovelli no trecho abaixo:

Em uma teoria quântica da gravidade, o espaço-tempo não pode ser mais concebido como uma variedade quadrimensional, pela mesma razão pela qual uma partícula quântica não tem uma trajetória. Isso nos exige uma completa revisão das noções de espaço e tempo. Assim, para entender a gravidade quântica, precisamos começar nos livrando da ideia do espaço como um espaço métrico 3-D, do tempo como algo fluindo unidimensionalmente, ou do espaço-tempo como uma variedade diferenciável (Rovelli, 2014, p. 751, tradução nossa).

6.4 Ausência de independência

O espaço-tempo é o campo gravitacional, e vice-versa, cuja existência independe até mesmo da matéria e não difere das demais formas de campo, é apenas um campo como qualquer outro (Rovelli, 2018). A existência do tempo, separado e independente do espaço, carece de sentido quando se pensa na origem do espaço-tempo (Rovelli, 2004). Na gravidade quântica, como leciona Rovelli no trecho abaixo, a própria noção convencional de tempo desaparece:

O desaparecimento do tempo físico convencional é o segundo traço característico de uma teoria quântica não perturbativa da gravidade. Esse é, talvez, um passo mais radical do que o desaparecimento do espaço. Este livro trata tanto do espaço quanto do tempo. Uma ideia central defendida neste livro é a de que, para formular uma teoria quântica da gravidade, devemos abandonar a ideia de que o fluxo do tempo é um aspecto fundamental da realidade. Não devemos descrever o mundo físico em termos da evolução no tempo dos estados e dos observáveis. Ao invés disso, devemos descrevê-lo em termos das correlações entre os observáveis (Rovelli, 2004, p. 369, tradução nossa).

6.5 Tempo descontínuo

A quantização do tempo importa no seu fluxo de forma granular, assumindo a *granularidade* típica dos fenômenos quânticos, o que importa na inexistência de intervalos contínuos inferiores aos *quanta* do tempo (Rovelli, 2018). Nesse aspecto, a situação não difere do que ocorre nas demais quantizações utilizadas na mecânica quântica: “Na teoria quântica, em que há propriedades quantizadas ‘granulares’ e sua dinâmica é quantizada e, portanto, apenas probabilística, muitas das características ‘espaciais’ e ‘temporais’ do campo gravitacional desaparecem” (Rovelli, 2004, p. 9, tradução nossa).

6.6 Tempo centrado na noção de evento

Ainda que o tempo perca as noções habituais de unidade, direção, presente, independência e continuidade, mantém as de **evento** e da **dinâmica nas relações**. O tempo é

uma rede de eventos. Esse é o sentido do que queremos dizer quando afirmamos que coisas acontecem. O tempo, portanto, refere-se à noção de mudança.

Apenas a ordem que normalmente se observa deriva da estatística aplicada ao caos existente no nível quântico, não de certezas. Pode-se pensar no mundo como feito de coisas, entidades, seres, eventos, acontecimentos e processos; de algo que ocorra (Rovelli, 2018). Rovelli explica a noção de evento no trecho abaixo:

O terceiro pressuposto é pertinente à noção do tempo. É a ideia de que sempre tem sentido falar-se qual dentre dois eventos A e B ocorreu primeiro. Ou seja, que a simultaneidade é bem definida de um modo independente do observador. Einstein salientou que isso é um preconceito que temos sobre a estrutura da realidade. Podemos largar esse preconceito e aceitar o fato de que a ordenação temporal de eventos distintos pode não ter sentido. Fazendo isso, o quadro retoma a consistência (Rovelli, 2004, p. 51, tradução nossa).

6.7 Tempo vinculado à noção da dinâmica nas relações

Para responder à pergunta de como descrever o mundo sem utilizar a variável t , Rovelli (2018) afirma que não há tanta dificuldade, basta utilizar as quantidades percebidas, utilizadas e medidas. Entre elas, há algumas que mudam de forma mais regularmente que outras, como o número de dias, as fases da lua e os ponteiros do relógio. São estas que devem ser utilizadas como pontos de referência, sem supor que se constituam em absolutas invariáveis nem em variáveis de uso privilegiado, mas apenas quantidades, como quaisquer outras.

As principais teorias físicas podem ser reescritas sem utilizar a variável do tempo, embora isso não signifique, necessariamente, uma forma simples, como explica Rovelli (2004) no trecho abaixo:

Voltemos à covariância geral. Assim como a invariância rotacional, a covariância geral é uma linguagem nova que expressa uma ideia física geral sobre o mundo. É possível expressar a física Newtoniana em uma linguagem geralmente covariante. Também é possível expressar a Relatividade Geral em uma linguagem geralmente não covariante (fixando coordenadas e medidas). Mas a física Newtoniana expressa em uma linguagem covariante ou a Relatividade Geral expressa em uma linguagem não covariante são, ambos, monstros formulados de uma forma muito mais complicada que o necessário. Ninguém nunca as teria descoberto (Rovelli, 2004, p. 79-80, tradução nossa).

7 Resultados obtidos

Os dois resultados obtidos foram (1) a análise da LQG enquanto uma iniciativa para compatibilizar a mecânica quântica com a relatividade geral, elencando vários pontos que esta

se propõe a explicar, como a natureza do espaço-tempo. Além desses, buscou-se salientar que a LQG analisa, também: (2) a física do *Big Bang* e (3) a ligação dos buracos negros com os buracos brancos. Trata-se de estudo preliminar, que se pretende se aprofundar como tema de pesquisa.

A discussão será efetuada pela análise, principalmente, dos dados compilados por Rovelli (2004) e Rovelli e Vidotto (2015), assim como nas recentes obras de Gambini e Pullin, publicadas em 2020 e em 2022. Nesse contexto, a compatibilidade da mecânica quântica com as noções da relatividade-geral acerca do espaço e do tempo são defendidas por Rovelli em vários pontos, tendo como condição a *formulação em termos suficientemente gerais*: “A mecânica quântica é compatível com as noções da relatividade geral do espaço e do tempo? Ela é, desde que lhe propiciemos uma formulação suficientemente geral” (Rovelli, 2004, p. 10, tradução nossa).

Algumas fórmulas e concepções da mecânica quântica são excessivamente dependentes de um tempo t observável e mensurável. O essencial é buscar uma concepção covariante, que não se utilize de “*estratégias de fuga*”, eliminando a causa da incompatibilidade entre a mecânica quântica e a relatividade geral. A concepção de Schrödinger, por exemplo, parece ter pouco sentido em um contexto independente dos antecedentes, mas há formulações da mecânica quântica que são gerais o suficiente para que se possa tentar compatibilizá-las com a LQG (Rovelli, 2004, p. 10-11, 13 e 164).

A incompatibilidade entre a mecânica quântica e a relatividade geral é demonstrada na equação abaixo.

$$O(x)O'(y) = \sum \frac{O_n(x)}{|x - y|^n}$$

Em que $|x - y|$ é a distância medida na métrica do espaço-tempo. Em um espaço plano, $|x - y|^2 = \eta_{\mu\nu} \cdot (x^\mu - y^\mu) \cdot (x^\nu - y^\nu)$. No contexto da relatividade geral, estas equações não têm sentido, pois não há métrica de fundo, seja de Minkowski ou qualquer outra métrica $\eta_{\mu\nu}$, que é substituída pelo campo gravitacional, pelo próprio operador do campo gravitacional (Rovelli, 2004, p. 12, tradução nossa).

As estratégias de fuga tentam contornar essa dificuldade escrevendo um campo gravitacional como a soma de dois termos:

$$e(x) = e_{\text{fundo ou background}}(x) + h(x)$$

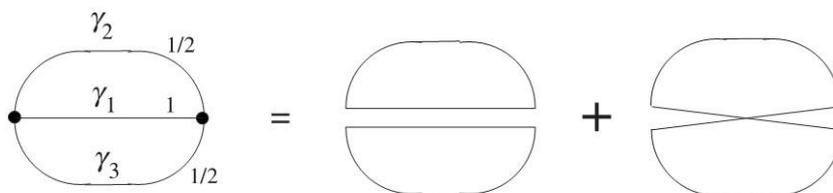
- Em que $e_{\text{fundo ou background}}(x)$ é a configuração de campo de fundo, que poderia ser a de Minkowski ou qualquer outra.

Segundo Rovelli (2004) “A formulação da LQG não usa a estratégia de fuga e é independente do contexto, ou seja, é uma teoria quântica de campos geralmente covariante” (p. 12-13, tradução e grifos nossos). A concepção covariante da LQG exige buscarmos uma visão não determinística da física gravitacional, na qual não tem sentido falarmos do ponto ‘A’ no espaço-tempo físico. A LQG busca compreender a natureza do espaço-tempo analisando a quantização do espaço e da geometria na construção de áreas e volumes e as consequências físicas da existência da escala de Planck (Rovelli; Vidotto, 2017).

Rovelli e Vidotto buscam analisar os *quanta* de área e volume (2017, p. 32) que surgiriam da discretização do espaço. Interessante observar que os elementos mínimos (*quantum*) do espaço nunca serão claramente delimitados como as formas geométricas perfeitas. Um tetraedro, por exemplo, é formado por seis números, correspondentes ao comprimento dos seus lados. Seu equivalente no espaço quântico seria formado por apenas cinco números, quatro áreas e um volume, gerando um sólido difuso (*fuzzy*) em uma situação análoga à do momento angular (Rovelli; Vidotto, 2017, p. 35).

Há vários meios de discretizar ou de quantizar o espaço. Pode-se simplesmente discretizar uma teoria covariante em um espaço tempo euclidiano e tomar o limite em uma direção do tempo com uma formulação hamiltoniana (Gambini; Pullin, 2022). O uso de grafos permite entender a gravidade como uma excitação análoga às linhas de força de Faraday (Rovelli, 2004). Da evolução desses grafos, a LQG propõe a quantização do espaço em uma rede de *spin* (Rovelli, 2021). Essa rede de *spin* se decomporia em estados de *loop*, cuja configuração determinaria o funcionamento do espaço (Rovelli, 2004).

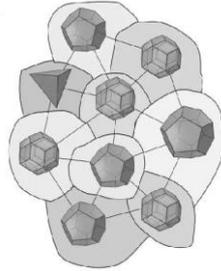
Figura 2: Decomposição da rede de *spin* em estados de *loop*



Fonte: Rovelli (2004, p. 237).

A interação dos grafos dos *quanta* de espaço configuraria a rede de *spin*. Isso seria perceptível principalmente próximo ao comprimento de Planck (Rovelli, 2018), de cerca de $1,62 \cdot 10^{-35}m$ (Kiefer, 2017).

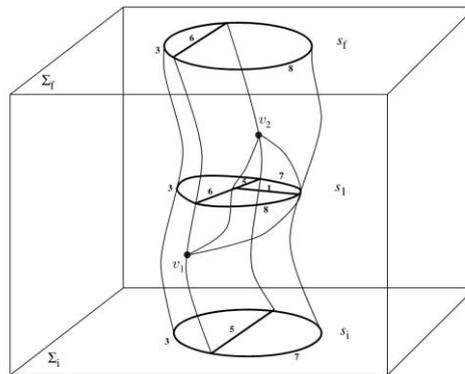
Figura 3: Representação da rede dos grãos elementares do espaço (ou rede de *spin*)



Fonte: Rovelli (2018, p. 77).

Essa rede de *spin* evoluiria para uma espécie de espuma de *spin* (*spin foam*) (Rovelli, 2004). Nesta espuma de *spin* os aspectos quânticos, embora ainda presentes, seriam menos aparentes, devido à superposição e à menor influência da quantização do espaço (Rovelli, 2018).

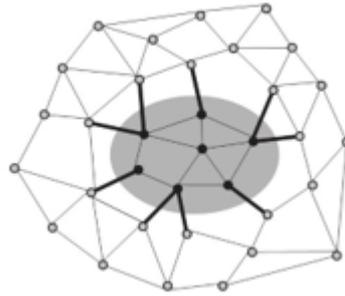
Figura 4: Representação gráfica da evolução da rede de *spin*



Fonte: Rovelli (2004, p. 77).

Segundo Rovelli (2004), a natureza do espaço e do tempo surgiriam desta interação entre os grafos. A principal e mais evidente consequência da existência da escala de Planck é, evidentemente, o caráter discreto da escala, cuja divisão passa a ser finita (Rovelli; Vidotto, 2017). A segunda consequência é o desaparecimento das noções clássicas do espaço e do tempo e o seu caráter difuso (*fuzzy*) nas escalas diminutas (Rovelli; Vidotto, 2017) e a terceira seria a construção do espaço-tempo em grafos, *loops* e linhas quânticas análogas às de Faraday (Rovelli; Vidotto, 2017).

Figura 5: Regiões e superfícies definidas em nós da rede de *spin*. O conjunto de nodos escuros e espessos define uma região do espaço; o conjunto de *links* pretos e grossos define uma superfície em volta dessa região

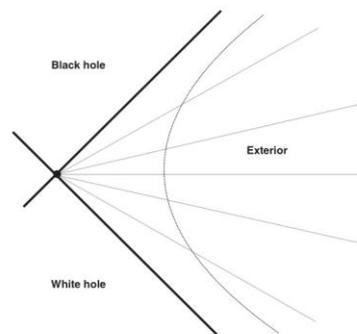


Fonte: Rovelli (2004, p. 265).

A proposta de compreender a física do *Big Bang* parte da imposição de limites à quantização do espaço, evitando infinitos que não existem na natureza. A ligação dos buracos negros com os buracos brancos surge naturalmente dos cálculos da quantização do espaço, surgindo os buracos brancos naturalmente da espuma de *spin* (*spin foam*). Nesse contexto, não é possível pensar densidades de matéria como as que existiriam na proximidade do *Big Bang* sem considerar a quantização da gravidade. Da mesma forma, pode-se dizer das situações envolvendo as singularidades nos buracos negros. Assim, como nada pode ser infinito na natureza, espera-se que os efeitos quânticos limitem e alterem a situação próxima dos momentos iniciais no *Big Bang* (Gambini; Pullin, 2020).

Os cálculos da espuma de *spin* (*spin foam*) tentam, neste espírito, entender o destino final dos buracos negros. Parte-se do cálculo com um buraco negro, o que se está descobrindo é que o estado final da espuma de *spin* leva a um “buraco branco”, uma espécie de buraco negro reverso no tempo. Nele, a matéria, ao invés de ficar presa nela, efetivamente emergiria (o que popularmente se chama de “fogos de artifício”), o que poderia resolver paradoxos e até construir uma ponte entre a LQG e a teoria das cordas (Gambini; Pullin, 2020).

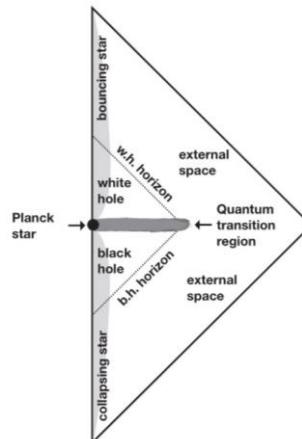
Figura 6: Transposição entre buracos negros e brancos, prevista pela LQG



Fonte: Rovelli (2021b, p. 160).

A LQG defende a existência de uma zona de transposição quântica no centro dos buracos negros (Rovelli, 2021, p. 160): “Um buraco branco seria o modo como apareceria um buraco negro se pudéssemos filmá-lo e projetar o filme ao contrário”.

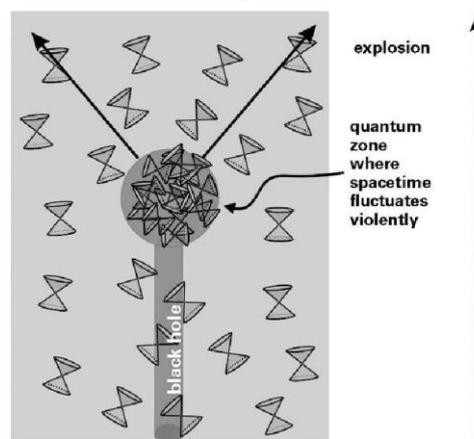
Figura 7: Zona de transposição quântica no centro dos buracos negros e transição entre buracos negros e brancos



Fonte: Rovelli (2021, p. 140).

Essa zona de transposição decorreria da compressão da matéria no centro dos buracos negros, gerando uma zona quântica na qual o espaço e o tempo flutuariam violentamente (Rovelli, 2021).

Figura 8: Zona de transposição quântica, na qual o espaço-tempo flutua violentamente no centro dos buracos negros



Fonte: Rovelli (2018, p. 79).

8 Considerações finais

A LQG é uma hipótese que pode propiciar uma forma de compreender a estrutura do espaço-tempo, buscando a conexão da relatividade geral com a mecânica quântica, e uma possível explicação sobre a natureza do espaço-tempo. Pode, ainda, viabilizar simulações dos

efeitos da gravidade quando os efeitos quânticos são significativos, como logo após o *Big Bang* e na proximidade das singularidades dos buracos negros.

Referências

- BRICMONT, Jean. **Making Sense of Quantum Mechanics**. Cham, Suíça: Springer Nature, 2016.
- CONLON, Joseph. **Why String Theory**. Boca Raton, FL, EUA: CRC Press, 2016.
- DILLEN, F. J. E.; VESTRAELEN, L. C. A (org.). **Handbook of Differential Geometry**. Amsterdã, Países Baixos: Elsevier, 2006.
- D'INVERNO, Ray; VICKERS, James. **Introducing Einstein's Relativity: a deeper understanding**. 2 ed. Oxford, Reino Unido: Oxford University Press, 2022.
- GAMBINI, Rodolfo; PULLIN, Jorge. **Loops, Knots, Gauge Theories and Quantum Gravity**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2022.
- GAMBINI, Rodolfo; PULLIN, Jorge. **Loop Quantum Gravity for Everyone**. Toh Tuck Link, Singapura: World Scientific Publishing, 2020.
- GODINHO, Leonor; NATÁRIO, José. **An Introduction to Riemannian Geometry: with applications to mechanics and Relativity**. Cham, Suíça: Springer, 2014.
- JOSHI, Pankaj S. Spacetime Singularities. *In*: ASTEKAR, Abhay; PETKOV, Vesselin (org.). **Springer Handbook of Spacetime**. Heidelberg, Alemanha: Springer, 2014. p. 409-436.
- KIEFER, Claus. Does Time Exist in Quantum Gravity? *In*: LEMKUHL, Dennis; SCHIEMANN, Gregor; SCHOLZ, Erhard (org.). **Towards a Theory of Spacetime Theories**. Nova York, EUA: Birkhäuser, 2017. p. 287-296.
- PENROSE, Roger. **Fashion, Faith and Fantasy in the New Physics of the Universe**. Princeton, NJ, EUA: Princeton University Press, 2016.
- ROVELLI, Carlo. **Bucchi Bianchi: dentro l'orizzonte**. Milão: Adelphi, 2023a.
- ROVELLI, Carlo. **General Relativity: the essentials**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2021.
- ROVELLI, Carlo. Introduction to Loop Quantum Gravity. Rovelli's Lectures on LQG. Transcribed by Pietropaolo Frisoni. **ArXiv**, Ithaca, NY, EUA, v. 2305.12215v1, p. 1-107, 20 maio 2023. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.12215>. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2305.12215>. Acesso em: 30 jul. 2023.
- ROVELLI, Carlo. Loop Quantum Gravity. **Living Reviews in Relativity**, Potsdam, Alemanha, v. 1, p. 1-75, jan. 1998. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5567241/pdf/41114_2016_Article_1.pdf. Acesso em: 31 jul. 2023.

ROVELLI, Carlo. Loop Quantum Gravity. **Living Reviews in Relativity**, Potsdam, Alemanha, n. 11, p. 5-69, 2008. Disponível em: <http://www.livingreviews.org/lrr-2008-5>. Acesso em: 10 abr. 2023.

ROVELLI, Carlo. **Quantum Gravity**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2004.

ROVELLI, Carlo. Quantum Gravity. **Philosophy of Physics**. Reino Unido, p. 1287-1329, 2007.

ROVELLI, Carlo. Quantum Spacetime. *In*: ASTEKAR, Abhay; PETKOV, Vesselin (org.). **Springer Handbook of Spacetime**. Heidelberg, Alemanha: Springer, 2014. p. 751-758.

ROVELLI, Carlo. **The Order of Time**. Nova York, EUA: Riverhead Books, 2018. E-book.

ROVELLI, Carlo (org.). **General Relativity: the most beautiful of theories. Applications and trends after 100 years**. Boston: De Gruyter, 2015.

ROVELLI, Carlo; VIDOTTO, Francesca. **Covariant Loop Quantum Gravity: an elementary introduction to Quantum Gravity and Spinfoam Theory**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 2015.

SUSSKIND, Leonard; CABANNES, André. **General Relativity: the theoretical minimum**. London: Allan Lane, 2023.