

“Alguns Aspectos da Gravitação Quântica” É a gravitação uma teoria de Gauge ?

Carlos Pinheiro

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Departamento de Física

Av. Fernando Ferrari s/n, Campus das Goiabeiras

29060-900, Vitória, ES, Brasil

Bitnet: fcpnunes@cce.ufes.br

Gentil O. Pires

Universidade Federal do Rio de Janeiro Instituto de Física Caixa Postal, 68528

21945-970, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Trabalho recebido em 14 de julho de 1996

É a gravitação uma teoria de Gauge ?

Sabe-se que uma característica essencial na teoria da relatividade é a presença marcante da constante universal c , a velocidade da luz. A Teoria da Relatividade na sua versão de 1905 nos foi apresentada por Einstein e nos descrevia basicamente o movimento relativo entre dois sistemas que se moviam com velocidade constante e elevada, quando comparada à velocidade da luz.

Em 1915 apareceu o que ficou conhecido como a Teoria da Relatividade Geral, e tinha por objetivo nos oferecer uma teoria dos sistemas ditos não-inerciais, isto é, na verdade a teoria apresentada por Einstein agora tratava do fenômeno da gravitação.

Suscintamente pode-se dizer que a Teoria da Relatividade Geral consiste numa teoria de gravitação, cuja idéia central é aquela em que o espaço e o tempo separados na física newtoniana formam no contexto da Relatividade Geral um contínuo espaço-tempo e que o fenômeno da gravitação é na realidade um fenômeno métrico, onde o espaço-tempo se curva por causa da presença de matéria no mundo e reciprocamente, o conteúdo de matéria determina a curvatura do espaço-tempo.

Podemos resumir do exposto acima a seguinte equação:

$$\text{matéria} = \text{curvatura} \quad (1)$$

A equação (1) é, certamente, o núcleo da Relatividade Geral - e que nos deu excelentes resultados quando aplicada à Cosmologia e a problemas de Astrofísica como o colapso gravitacional de estrelas.

Dos testes experimentais da Relatividade Geral, certamente a curvatura do raio de luz quando este passa nas proximidades de fortes campos gravitacionais e o red-shift gravitacional - o deslocamento da frequência para o vermelho no comprimento de onda emitido por uma fonte luminosa constituem - uma prova da força e poder de previsão da teoria.

A Relatividade Geral passou então a figurar como a melhor descrição até então do espaço-tempo em larga escala.

Um outro avanço significativo se deu numa perspectiva do comportamento da matéria em escalas muito pequenas (no interior do átomo) e a energias muito elevadas, onde contrariamente à Relatividade Geral, o mundo do infinitamente pequeno se faz presente. É o mundo da Física Quântica. Aqui a constante fundamental é \hbar e o princípio da incerteza de Heisenberg é a essência da teoria.

O século XX é então profundamente marcado por

estas duas teorias que aparentemente nada têm em comum.

A Relatividade, como sendo uma teoria determinística, caracterizada por c e descrevendo o universo macroscópico, e a Mecânica Quântica, apresentando-se como uma teoria não determinística, descrevendo o mundo microscópico e marcada pela constante \hbar .

No que se refere à Relatividade Geral como uma teoria de gravitação, o fosso que a separava da Mecânica Quântica parecia ser ainda mais evidente, visto que não havia lugar para nenhum tipo de interação na gravitação de Einstein. A métrica era o conceito fundamental e era de caráter puramente geométrico, não tendo aparentemente nenhuma conexão com o princípio de Heisenberg da Mecânica Quântica.

Com o estudo desenvolvido por Michael Faraday sobre o que aconteceria quando forças elétrica e magnética atuavam uma sobre a outra, surgiu a idéia daquilo que é popularmente conhecido em Física como **um modelo de uma “linha de força”** que - Maxwell depois elaborou até forjar a primeira teoria de campo - a chamada **teoria clássica do Campo eletromagnético**.

É com Maxwell que o conceito de **“Campo”** toma corpo e começa a permear toda a Física do século XX.

Passamos então a pensar o Universo como que preenchido por uma multiplicidade de campos em eterno processo de interação, e onde as partículas representariam os quanta dos campos, que se manifestam obedecendo às regras da dualidade onda-partícula e do Princípio de Heisenberg.

O campo se apresenta agora como o conceito fundamental na Física Contemporânea sendo os objetos materiais, as partículas, elas próprias manifestações destes campos.

Um campo para nós passa então a significar um sistema físico contínuo com infinitos graus de liberdade. Porém, no mundo quântico, um campo tem que criar ou destruir partículas. Na verdade, o campo se constitui na própria fonte geradora de partículas.

Encarar as partículas como mediadoras do campo, isto é, olhá-las como quanta do campo em consideração, é precisamente aquilo a que os físicos denominam de segunda quantização.

O campo passa então a ser definido em termos de certos atributos que caracterizam o quantum a ele associado. Dentre estes atributos (também conhecidos

como números quânticos), alguns são sistematicamente interpretados à luz do conceito de “gauge”, ou calibre. Tal idéia vem associada a um princípio de simetria e, por sua vez, verificar a invariância de uma certa propriedade do campo é, na realidade, tornar explícita uma simetria daquele campo. Tal simetria, dita de Gauge, estando ligada à invariância de alguma característica intrínseca do campo está intimamente relacionada com as leis de conservação da Física, tais como conservação da energia, momentum, carga elétrica, etc...

Assim é que hoje temos os chamados campos de matéria, dos quais **Léptons** e **Hádrons** constituem membros bastante conhecidos. Elétrons, múons, neutrinos (léptons) são manifestações materiais desses campos bem como entre os Hádrons temos mésons (píons) e Bárions (prótons e nêutrons). Além desses, temos os chamados campos de Gauge, tais como o fóton, que caracteriza o campo eletromagnético, W^+ , W^- , Z_0 que são quanta mediadores da interação nuclear fraca e glúons como sendo as partículas mediadoras da interação nuclear forte.

Neste contexto, resta-nos perguntar se é possível tratar a gravitação como se fora um campo de Gauge, semelhante portanto, ao eletromagnetismo e consequentemente mediada por um quantum que poderíamos chamar de gráviton? Estamos, portanto, desejando ir mais longe do que a usual teoria clássica do campo gravitacional descrita pela Relatividade Geral, onde a métrica desempenha um papel crucial. Estamos agora propondo um aspecto quântico para a gravitação, onde a dinâmica não reside mais na geometria do espaço-tempo, mas sim num campo capaz de criar e destruir partículas do tipo grávitons.

Como dissemos acima, o formalismo métrico da gravitação de Einstein e a teoria da Mecânica Quântica parecem ser realmente irreconciliáveis. No entanto, podemos construir uma teoria de gravitação do tipo gauge procedendo àquilo que os físicos relativistas chamam de processo de linearização das equações de Einstein e obtendo, à primeira, vista uma boa teoria de grávitons, não fosse o problema dos inevitáveis infinitos que aparecem com tanta frequência nas teorias de campo.

Num mundo de quatro dimensões como o nosso, a teoria de gauge para a gravitação apresenta um gráviton de massa nula, com probabilidade positiva de-

finida de ser detectado e portanto descrevendo uma interação de longo alcance, como seria de fato esperado. No entanto, os infinitos persistem na teoria; não existindo nenhuma maneira de eliminá-los. Dizemos que a gravitação em 4D é não-renormalizável.

Curvatura do espaço campos no espaço plano.
 Linhas retas no espaço curvo linha curva no espaço plano.
 Matéria gerando curvatura matéria gerando campos.
 Equações de campo para curvatura equações de campo para campos
 (Equações de Einstein) (equações de Euler-Lagrange).

Pode-se mostrar que se o nosso mundo fosse de três dimensões, uma temporal e duas espaciais, digamos por exemplo, um mundo do tipo uma tela de cinema, uma teoria de gravitação do tipo gauge seria excelente. Poderíamos ter até dois grávitons presentes na teoria, porém somente um deles mediando a interação gravitacional em 3D. Esse gráviton, contrariamente ao do mundo quadridimensional, seria dotado de massa, e, portanto, teríamos uma interação de alcance limitado, com probabilidade positiva de efetivamente se detectar tal gráviton massivo. Nenhum problema com infinitos aparece nesse fantástico mundo da tela de cinema. Teríamos, conseqüentemente, uma excelente teoria de gauge para a gravitação, não fosse esta, irreal para nós habitantes deste mundo de quatro dimensões.

Na desesperada tentativa de incorporar aspectos quânticos na gravitação, ou melhor dizendo, a frustrada tentativa de quantizar a gravitação levou os físicos a formularem diversos modelos de gravitação onde os aspectos quânticos pudessem ser ressaltados. Assim é que, num modelo de gravitação em que onde o gráviton tenha já uma massa em D=4 ou D=3, embora não ocorram problemas com a detecção (pois a probabilidade de encontrar tal partícula é positiva), existiria o problema da interação ser de alcance limitado, quando sabemos de nossa experiência direta que a gravitação parece ter alcance infinito, o que obrigaria o gráviton, necessariamente, a ter massa nula. Tal modelo é conhecido pelos físicos como um modelo do tipo **Proca**. Do ponto de vista técnico, tal modelo é desprovido daquilo a que nos referimos acima como simetria de gauge, esta tendo sido quebrada pela presença de massa na teoria.

Uma proposta de gravitação quântica que incluía a tão famosa constante cosmológica de Einstein,

É interessante observar que agora podemos fazer uma verdadeira correspondência entre algumas idéias do formalismo métrico em relação ao formalismo de campos de gauge:

$\Lambda \lesssim 10^{48} \text{Gev}^4$, poderia ser muito atraente pois esta constante se reflete no desenvolvimento da teoria como uma massa para o gráviton mediador da interação. No entanto, pode-se verificar que tal modelo é simplesmente não-físico, pois não só aparecem os indesejáveis infinitos (teoria não-renormalizável), como o gráviton mediador da interação tem probabilidade negativa de ser detectado (teoria não-unitária), e tal partícula é referida pelos físicos como sendo muito apropriadamente denominada de fantasma (ghost).

Tentativas de se quantizar a gravitação via o formalismo que envolve as chamadas derivadas de ordem superior foram feitas e também não se mostraram como fisicamente razoáveis, pois os grávitons da teoria ou tinham probabilidade positiva de serem detectados mas os infinitos reapareciam, ou os grávitons eram fantasmas, e portanto impossíveis de serem detectados, além da persistência dos infinitos, ou ainda os grávitons se apresentavam como fantasmas e a teoria sendo renormalizável, isto é, sem infinitos; tudo isso num quadro de espaço-tempo quadridimensional.

Podemos resumir o que foi dito acima como um verdadeiro impasse entre a renormalizabilidade X unitariedade para uma teoria de gravitação em D=4 dotada de derivadas superiores (derivadas quárticas).

Novamente, se refizermos o raciocínio exposto no parágrafo anterior em D=3 dimensões, podemos ter uma teoria quantizada da gravidade onde até três grávitons podem se apresentar como partículas mediadoras da interação, sendo que uma de massa nula e dois grávitons de massas diferentes que poderiam propagar a interação, e seriam agora os grávitons detectáveis. O gráviton de massa nula seria não-dinâmico. A teoria assim apresentada gozaria de certas propriedades

de invariância e em princípio seria renormalizável. Tecnicamente, os físicos diriam que a teoria acima possui simetria de gauge.

Para finalizar, chamamos a atenção para o fato de que tentativas de se quantizar a gravitação com uma massa atribuída ao gráviton (termo do tipo Proca) e mais uma massa gerada dinamicamente por termos de caráter puramente geométrico, conduziram em $D=3$ a uma teoria excelente do ponto-de-vista acadêmico mas também sem nenhum resultado prático que nos iluminasse o caminho da verdadeira teoria quântica da gravitação. A teoria acima é conhecida como o modelo de **Einstein-Chern-Simons-Proca** e nos fornece até três grávitons de massas diferentes como portadores da interação, sendo a teoria unitária e renormalizável. De novo, o alcance limitado de tal teoria se faz presente, sendo contrário ao caráter infinito de propagação da gravitação.

É conveniente ressaltar que esses modelos de gravitação em dimensões inferiores ($D < 4$) são de fato problemas de interesse acadêmico, que podem ser úteis para compreendermos a verdadeira teoria da gravitação quântica, que deveria ser, em tese, uma teoria de longo alcance, unitária, renormalizável ou finita e mediada por gráviton de massa nula. São, por assim dizer, teorias de laboratório, cuja motivação é a busca incessante de incorporar a gravitação no seio das teorias de gauge usuais tais como a interação fraca, forte e eletromagnética.

Na década de 30, Dirac conseguiu unificar a Mecânica Quântica com a Relatividade Especial, unindo numa única teoria as constantes c e \hbar respectivamente, criando assim **a teoria quântica relativista** que descreve o mundo do infinitamente pequeno e dotado de altas velocidades. Toda a nossa discussão girou

em torno da construção de uma teoria que unificasse as constantes c , velocidade da luz, \hbar , constante de Planck e G , constante de gravitação Newtoniana.

Resta-nos perguntar o seguinte: é a gravitação uma teoria quantizável? Ou será ela uma teoria realmente métrica, alheia completamente aos apelos da Mecânica Quântica? Ou ainda, será que devemos alterar a Mecânica Quântica, como insinua R. Penrose em seu livro **a mente nova do Rei**, para que se possa realmente incorporar a gravitação de Einstein no seio de uma teoria de gauge e, portanto, obter a tão sonhada e desejada Teoria da Gravitação Quântica, consistente com as demais teorias propostas para as interações fundamentais e em perfeita harmonia com a Relatividade Geral?

O que há para se ler

1. *A Procura do Big Bang - Cosmologia e Física Quântica*, John Gribbin, Editora Presença.
2. *A Procura do Gato de Schrödinger*, John Gribbin, Editora Presença.
3. *Simetria perfeita*, Heinz R. Pagels, Editora Gradiva.
4. *O Código Cósmico*, Heinz R. Pagels, Editora Gradiva.
5. *Uma Breve História do Tempo*, S. W. Hawking, Editora Rocco.
6. *Entre o Tempo e a Eternidade*, Ilya Prigogine, Stengers, Editora Gradiva.
7. *Ciência, Ordem e Criatividade*, David Bohm e F. D. Peat, Editora Gradiva.
8. Textos especializados e preprints.