

# **Amplitudes de espalhamento em teorias com derivadas de ordem superior**

Departamento de Física-Matemática

Instituto de Física - Universidade de São Paulo  
São Paulo/SP

## **Resumo**

Este plano de atividades se propõe a realizar um estudo de amplitudes de espalhamento na chamada teoria  $(DF)^2$  e, utilizando-se do método da cópia dupla, estender esses resultados para o caso da supergravidade conforme do tipo Berkovits-Witten. Estes estudos também prevêem uma maior compreensão do método da unitariedade generalizado para o caso de partículas instáveis. Além disso, também nos permitiria uma abordagem sistemático no estudo do comportamento a altas energias das amplitudes de espalhamento em gravidade quadrática.

## I. JUSTIFICATIVAS PARA O PLANO DE ATIVIDADES

Um insight importante decorrente do estudo contemporâneo das amplitudes de espalhamento é que as amplitudes gravitacionais são mais simples do que se esperaria; com efeito, as amplitudes gravitacionais estão intimamente ligadas às amplitudes da teoria de Yang-Mills pela abordagem chamada de cópia dupla (*double copy*), que determina que as amplitudes gravitacionais sejam obtidas como produto de duas amplitudes de Yang-Mills. A formulação original de Kawai, Lewellen e Tye afirma que uma amplitude gravitacional no nível da árvore é dada por uma soma sobre os produtos de duas amplitudes Yang-Mills ordenadas por cor no nível da árvore [1]. Mais recentemente, Bern, Carrasco e Johansson demonstraram que os numeradores gravitacionais são, em certo sentido, o quadrado dos numeradores cinemáticos da teoria de Yang-Mills [2, 3]. Por sua vez, a abordagem de cópia dupla também conecta soluções clássicas da teoria de Yang-Mills e da gravidade.

Por outro lado, existem muitas abordagens alternativas para se quantizar o campo gravitacional, mas comparativamente pouco trabalho atual explora a opção de se representar a gravidade por uma teoria quântica de campos renormalizável. Há uma coleção modesta de trabalhos recentes tentando reviver essa possibilidade [4–12].

A gravidade quadrática tem a característica positiva de ser renormalizável [13], e pode ser assintoticamente livre [14–16]. Ademais, para se recuperar a relatividade geral no limite de baixas energias, deve-se lançar mão de uma construção delicada de modo a obter os termos usuais a baixas energias. Recentemente apresentamos uma proposta diferente para a gravidade quadrática em que as interações gravitacionais permanecem fracamente acopladas em todas as escalas de energia, mas ocorre uma “assistência” por parte de um campo de calibre, cujo papel é definir a escala de Planck e induzir a ação de Einstein-Hilbert a baixas energias [17]. Com relação a este último efeito, nós calculamos a constante de gravitação universal de Newton induzida devido à cromodinâmica quântica, encontrando um valor positivo para a mesma [18].

Ainda seguindo a mesma linha de investigação, apresentamos uma nova compreensão da ressonância tipo fantasma instável que aparece em teorias como a gravidade quadrática e as teorias do tipo Lee-Wick. As correções quânticas tornam esta ressonância instável, de forma que ela não aparece no espectro assintótico [19]. Provamos que essas teorias são unitárias para todas as ordens na teoria de perturbação [20]. Por outro lado, essas teorias podem apresentar violações de microcausalidade da ordem da largura do modo fantasma. Para entendermos melhor essa incerteza causal, introduzimos um novo conceito: a seta da causalidade – a direção do tempo em que ocorrem os processos quânticos causais, que está presente em todas as teorias quânticas [21]. As leis da física quântica fornecem uma direção causal. Conforme discutimos, a seta da causalidade determina a seta da termodinâmica e a seta do tempo [22]. Gostaria de enfatizar que o artigo [21], publicado pela célebre *Physical Review Letters*, foi selecionado para o seletor grupo das *Editors’ Suggestion* da dita revista.

O recente trabalho [23] demonstra explicitamente como certas técnicas tradicionais para se calcular funções beta do grupo de renormalização não produzem acoplamentos que correm físicos quando utilizadas em teorias que possuem termos com derivadas de ordem superior; por exemplo, o acoplamento fundamental do modelo sigma não linear  $SU(N)$  com derivada de ordem superior não corre em nenhuma escala de energia, apesar de resultados relatados anteriormente usando métodos baseados em regularização com *cut-off*. Esses resultados foram levados às interações gravitacionais, em particular para gravidade quadrática – demonstramos que a propriedade de iberdade assintótica acaba por ser compatível com a ausência de táquions [24]. Gostaria de enfatizar que este último artigo, publicado pela célebre *Physical Review Letters*, foi selecionado para o seletor grupo das *Editors’ Suggestion* da dita revista.

## II. DESCRIÇÃO DOS OBJETIVOS

De forma abrangente, espera-se uma melhor compreensão da física envolvida na linha de pesquisa acima delineada. Ademais, espera-se também que os resultados obtidos concordem com as conclusões existentes na literatura. Especificamente:

1. Para iniciarmos nossos estudos, vamos investigar os modelos escalares estudados nos trabalhos [20, 25]. Como são modelos que funcionam como bons representantes escalares de gravidade quadrática, eles devem servir muito bem para preparar o cenário para entendermos com mais detalhe como aplicamos as técnicas descritas na referência [26] para o caso de teorias com derivadas de ordem superior.
2. Desejamos entender melhor a estrutura analítica das teorias que são obtidas da teoria  $(DF)^2$  por meio de cópia dupla. Como é sabido, esta teoria de gauge entra na construção de cópia dupla

para amplitudes de várias teorias da gravidade, incluindo algumas teorias de cordas e também a supergravidade conforme não mínima do tipo Berkovits-Witten [27]. Como a teoria  $(DF)^2$  é uma teoria de gauge com derivadas de ordem superior, ela deve ter um propagador de gauge quártico, cujo comportamento analítico é diferente do usual. Portanto, buscamos entender como isso afeta (ou não) as teorias construídas a partir dela por meio de cópia dupla usando métodos de unitariedade para o cálculo de amplitudes no nível do loop.

3. Utilizando os métodos descritos na referência [26], desejamos explorar as propriedades de integrandos da supergravidade conforme do tipo Berkovits-Witten e da teoria  $(DF)^2$  para momentos de loop grandes. Esta análise não pode ser feita diretamente para o integrando off-shell completo, mas só se torna bem definida em cortes que nos permitem especificar classificações para as variáveis de loop de forma inequívoca. A região ultravioleta das amplitudes de espalhamento se origina de polos no infinito dos integrandos de loop. A referência acima demonstra que nas amplitudes de gravidade e  $\mathcal{N} = 8$  supergravidade esses integrandos escondem uma série de características surpreendentes – certos polos no infinito estão ausentes, o que requer uma “conspiração” entre integrais de Feynman individuais que contribuem para a amplitude. Desejamos ver se essa história se repete no caso da teoria  $\mathcal{N} = 4$  supergravidade conforme. Estes estudos também prevêm uma maior compreensão do método da unitariedade generalizado para o caso de partículas instáveis. Além disso, também nos permitiria uma abordagem sistemático no estudo do comportamento a altas energias das amplitudes de espalhamento em gravidade quadrática.

Acreditamos que este projeto de pesquisa possa contribuir para o avanço do conhecimento sobre o comportamento assintótico das amplitudes de espalhamento em gravidade quadrática. A abordagem inovadora e promissora das amplitudes de espalhamento pode pavimentar novos caminhos para resolver questões da física teórica e estabelecer novas conexões.

### III. PLANO DE TRABALHO

#### A. Metodologia

A metodologia geral para todas as linhas de pesquisa discutidas acima seguirá os princípios usuais da teoria quântica de campos em espaço-tempo de Minkowski. Em particular, para o estudo de amplitudes de espalhamento, devemos seguir os métodos descritos pelas referências [28–34]. Por outro lado, para o caso específico da teoria  $(DF)^2$  e a supergravidade do tipo Berkovits-Witten, iremos nos basear na metodologia apresentada nas referências [35–38]. Para analisarmos o comportamento assintótico de integrandos nessas teorias, também iremos nos basear na referência [26].

#### B. Cronograma de resultados previstos

À medida que os resultados se tornarem mais claros, nós ajustaremos o cronograma para produzir o máximo de produção de pesquisa. Em qualquer caso, como o projeto será desenvolvido ao longo de 24 meses, propomos os seguintes estágios principais para cada um dos estudos acima mencionados:

- **1º semestre:** Revisão bibliográfica e formulação inicial do problema. Estudo detalhado das amplitudes da teoria  $(DF)^2$  e a supergravidade do tipo Berkovits-Witten.
- **2º semestre:** Cálculos preliminares. Desenvolvimento de ferramentas computacionais para simplificação dos cálculos.
- **3º semestre:** Aplicação dos métodos desenvolvidos para se estudar as propriedades de integrandos da supergravidade conforme do tipo Berkovits-Witten e da teoria  $(DF)^2$  para momentos de loop grandes.
- **4º semestre:** Finalização dos cálculos, análise dos resultados e redação da dissertação. Se for o caso, e se o tempo permitir, preparação e finalização de um artigo científico.

---

[1] H. Kawai, D. Lewellen, and S. Tye, Nucl. Phys. B **269**, 1 (1986).

[2] Z. Bern, J. Carrasco, and H. Johansson, Phys. Rev. D **78**, 085011 (2008).

- [3] Z. Bern, J. Carrasco, and H. Johansson, Phys. Rev. Lett. **105**, 061602 (2010).
- [4] A. Salvio and A. Strumia, JHEP **06**, 080 (2014).
- [5] B. Holdom, Phys. Rev. D **93**, 124030 (2016).
- [6] P. D. Mannheim, Found. Phys **42**, 388 (2012).
- [7] S. D. Odintsov and I. L. Shapiro, Theor. Math. Phys. **90**, 319 (1992).
- [8] I. L. Shapiro and G. Cognola, Phys. Rev. D **51**, 2775 (1995).
- [9] V. F. Barra, P. M. Lavrov, E. A. Dos Reis, T. de Paula Netto, and I. L. Shapiro, Phys. Rev. D **101**, 065001 (2020).
- [10] E. T. Tomboulis, Mod. Phys. Lett. A **30**, 1540005 (2015).
- [11] I. Antoniadis and E. Tomboulis, Phys. Rev. D **33**, 2756 (1986).
- [12] D. Anselmi and M. Piva, Phys. Rev. D **96**, 045009 (2017).
- [13] K. S. Stelle, Phys. Rev. D **16**, 953 (1977).
- [14] J. Julve and M. Tonin, Nuovo Cim. B **46**, 137 (1978).
- [15] E. S. Fradkin and A. A. Tseytlin, Phys. Lett. B **104**, 377 (1981).
- [16] E. S. Fradkin and A. A. Tseytlin, Nucl. Phys. B **201**, 469 (1982).
- [17] J. F. Donoghue and G. Menezes, Phys. Rev. D **97**, 126005 (2018).
- [18] J. F. Donoghue and G. Menezes, Phys. Rev. D **97**, 056022 (2018).
- [19] J. F. Donoghue and G. Menezes, Phys. Rev. D **99**, 065017 (2019).
- [20] J. F. Donoghue and G. Menezes, Phys. Rev. D **100**, 105006 (2019).
- [21] J. F. Donoghue and G. Menezes, Phys. Rev. Lett. **123**, 171601 (2019).
- [22] J. F. Donoghue and G. Menezes, Prog. Part. Nucl. Phys. **115**, 103812 (2020).
- [23] J. F. Donoghue and G. Menezes (2023), 2308.13704.
- [24] D. Buccio, J. F. Donoghue, G. Menezes, and R. Percacci, Phys. Rev. Lett. **133**, 021604 (2024), 2403.02397.
- [25] D. Buccio, J. F. Donoghue, and R. Percacci, Phys. Rev. D **109**, 045008 (2024), 2307.00055.
- [26] E. Herrmann and J. Trnka, JHEP **02**, 084 (2019), 1808.10446.
- [27] N. Berkovits and E. Witten, JHEP **08**, 009 (2004), hep-th/0406051.
- [28] F. Cachazo and A. Guevara, arXiv:1705.10262 (2017).
- [29] A. Guevara, arXiv:1706.02314 (2017).
- [30] A. Guevara, A. Ochirov, and J. Vines, JHEP **09**, 056 (2019).
- [31] D. Kosower, B. Maybee, and D. O. Connell, JHEP **02**, 137 (2019).
- [32] B. Maybee, D. O. Connell, and J. Vines, JHEP **12**, 156 (2019).
- [33] H. Elvang and Y.-T. Huang, *Scattering Amplitudes in Gauge Theory and Gravity* (Cambridge University Press, Cambridge, 2015).
- [34] N. Arkani-Hamed, T.-C. Huang, and Y.-T. Huang, arXiv:1709.04891 (2017).
- [35] H. Johansson and J. Nohle (2017), 1707.02965.
- [36] H. Johansson, G. Mogull, and F. Teng, JHEP **09**, 080 (2018), 1806.05124.
- [37] T. Azevedo, M. Chiodaroli, H. Johansson, and O. Schlotterer, JHEP **10**, 012 (2018), 1803.05452.
- [38] T. Azevedo, R. L. Jusinkas, and M. Lize, JHEP **01**, 082 (2020), 1908.11371.