

Amplitudes de espalhamento em teorias com derivadas de ordem superior

Relatório de atividades anual de Mestrado.

Projeto sob fomento da CAPES

Pesquisador Responsável: Gabriel Santos Menezes

Aluno: Vicente Viater Figueira

Vigência: 01/03/2025 a 01/03/2027

Período Coberto pelo Relatório: 01/03/2025 a 01/12/2025

1. RESUMO DO PROJETO PROPOSTO

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 super-gravidade conforme do tipo Berkovits-Witten. Estes estudos também preveem uma maior compreensão do método da unitariedade generalizada para o caso de partículas instáveis. Além disso, também nos permitiria uma abordagem sistemática no estudo do comportamento a altas energias das amplitudes de espalhamento em gravidade quadrática

2. REALIZAÇÕES NO PERÍODO

Disciplinas feitas no primeiro semestre: Teoria de Cordas, Tópicos Avançados em Relatividade Geral
Eventos participados: CBPF, CPLF e II Agorá Meeting

2.1. Métodos *On-Shell*. O principal ponto da abordagem relativamente moderna de métodos on-shell para o cálculo de amplitudes em teorias de campo é utilizar-se de uma informação subutilizada em Teoria Quântica de Campos (TQC) usual, transformações pelo *Little-Group*. É de conhecimento geral que a álgebra de Poincaré — $ISO^+(1, 3)$ — admite dois invariantes de Casimir, a massa quadrada $-P^\mu P_\mu$ e o spin $W^\mu W_\mu$, para estados fisicamente aceitáveis é necessário $-P^\mu P_\mu \geq 0$, o que gera dois casos possíveis,

$$\begin{cases} -P^\mu P_\mu = 0 \\ -P^\mu P_\mu > 0 \end{cases}.$$

Podemos sempre relacionar momentos específicos via transformações de Lorentz de momentos referência, a escolha mais adequada para cada um dos casos acima é,

$$\begin{cases} -k^2 = 0 & \Rightarrow k_0 = \begin{pmatrix} \kappa & 0 & 0 & \kappa \end{pmatrix}, \quad \kappa > 0 \\ -k^2 = m^2 > 0 & \Rightarrow k_m = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad m > 0 \end{cases}.$$

Dessa forma, dado $p^2 = 0$ ($p^2 = -m^2$), existe sempre uma transformação $L(p)$ tal que $p = L(p)k_0$ ($p = L(p)k_m$). O fato mais interessante dessa relação é que a escolha de $L(p)$ não é única, pois existem transformações — do grupo de Poincaré — não triviais que preservam k_0 (k_m), estas transformações são os elementos do chamado *Little-Group*. É trivial determiná-las, para k_0 são rotações nas componentes 1 e 2, isto é, $SO(2)^1$ que devido à estarmos lidando com uma teoria quântica necessita de ser elevado para seu *double cover*, $U(1)$. Para k_m são rotações nas três componentes espaciais, $SO(3)$, que novamente precisa ser elevado ao *double cover*, $SU(2)$. O ponto desta discussão é: Em TQC, como estamos interessados em utilizar o momento, essas transformações que preservam os momentos k_0, k_m são objetos subutilizados, uma vez que são totalmente irrelevantes. Outro modo de pensar é do ponto de vista de teoria de grupos, os representativos k_0, k_m das classes de momentos sem massa e massivos não são objetos que se transformam em uma representação irredutível do grupo de Poincaré, pois possuem um subespaço invariante — o *Little-Group* —, logo, é possível decompor ainda mais os representativos das classes de momento. Para entender como isso pode ser realizado temos de recorrer novamente a teoria de grupos. Primeiramente, nosso grupo de interesse é o grupo de Poincaré, a parte não homogênea já é realizada trivialmente, pois estamos trabalhando em autoestados de momento, logo, precisamos tornar nossa atenção apenas para a parte homogênea, isto é, o grupo de Lorentz. Note que, devido à querermos analisar a teoria quântica, é necessário voltar-no-mos à seu *double-cover*,

$$SO^+(1, 3) \xrightarrow{\text{double cover}} SL(2, \mathbb{C}).$$

¹Na realidade o subgrupo de Poincaré que preserva k_0 é $ISO(2)$, porém, as transformações geradas pela parte não homogênea desse grupo correspondem à números quânticos contínuos. Até o presente momento, as partículas sem massas conhecidas apresentam apenas números quânticos discretos — helicidade —, e nenhum número quântico contínuo, logo, somos levados a crer que estas se transformam trivialmente sobre a ação da parte não homogênea, de modo que possamos ignorá-la.

Infelizmente, $\mathfrak{sl}(2, \mathbb{C})$ por si não é adequado para obter-se representações irredutíveis. O método mais fácil é complexificar a álgebra, e utilizar-se do isomorfismo $\mathfrak{sl}(2, \mathbb{C}) \cong \mathfrak{su}(2)_{\mathbb{C}}$, útil,

$$\begin{aligned}\mathfrak{sl}(2, \mathbb{C}) &\hookrightarrow \mathfrak{sl}(2, \mathbb{C})_{\mathbb{C}} \cong \mathfrak{sl}(2, \mathbb{C}) \oplus \mathfrak{sl}(2, \mathbb{C}) \\ \mathfrak{sl}(2, \mathbb{C}) &\hookrightarrow \mathfrak{sl}(2, \mathbb{C})_{\mathbb{C}} \cong \mathfrak{su}(2)_{\mathbb{C}} \oplus \mathfrak{su}(2)_{\mathbb{C}} \\ \mathfrak{sl}(2, \mathbb{C}) &\hookrightarrow \mathfrak{sl}(2, \mathbb{C})_{\mathbb{C}} \cong (\mathfrak{su}(2) \oplus \mathfrak{su}(2))_{\mathbb{C}}\end{aligned}$$

O último isomorfismo deixa claro que todas as representações de $\mathfrak{sl}(2, \mathbb{C})$ estão em um mapa um-para-um com as representações de $\mathfrak{su}(2) \oplus \mathfrak{su}(2)$. Estas por sua vez são muito bem conhecidas, são representadas por dois meio-inteiros $m, n \in \frac{1}{2}\mathbb{N}$, (m, n) . Sabemos que um vetor é a representação

$$\left(\frac{1}{2}, 0\right) \otimes \left(0, \frac{1}{2}\right) = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = \mathbf{0} \oplus \mathbf{1},$$

disto é claro que a representação de vetor não é irredutível, ela é o produto das representações irredutíveis $(\frac{1}{2}, 0), (0, \frac{1}{2})$. Como podemos obter a decomposição de um vetor em suas partes irredutíveis? Isso pode ser derivado por teoria de representações também, analisando,

$$\left(\frac{1}{2}, 0\right) \otimes \left(0, \frac{1}{2}\right) \otimes \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) = (0, 0) \oplus (1, 0) \oplus (0, 1) \oplus (1, 1).$$

A existência da representação escalar, $(0, 0)$, neste produto de representações é um indicativo da existência de um invariante do grupo com três índices. Indexando a representação de mão esquerda $(\frac{1}{2}, 0)$ por $_a$ e a de mão direita $(0, \frac{1}{2})$ por $^{\dot{a}}$, o invariante do grupo que prevemos a existência é

$$\Lambda^{\alpha}_{\beta} L(\Lambda)_a{}^b R^{-1}(\Lambda)_{\dot{a}}{}^{\dot{b}} \sigma^{\beta}_{b\dot{b}} = \sigma^{\alpha}_{a\dot{a}},$$

onde $\Lambda, L(\Lambda), R(\Lambda)$ são transformações do grupo $SL(2, \mathbb{C})$ nas representações vetorial, mão esquerda e mão direita. Diretamente dessa relação de invariância é possível calcular explicitamente o tensor $\sigma^{\alpha}_{a\dot{a}}$, a parte de um fator multiplicativo. Seus valores são bem conhecidos,

$$\sigma^{\alpha}_{a\dot{a}} = (\mathbb{1}_{a\dot{a}} \quad \boldsymbol{\sigma}_{a\dot{a}}),$$

no qual $\boldsymbol{\sigma}$ são as matrizes de Pauli. Há mais quantidades invariantes que podem serem obtidas, outra que será de grande importância para nós é,

$$\left(\frac{1}{2}, 0\right) \otimes \left(\frac{1}{2}, 0\right) = (0, 0) \oplus (1, 0),$$

implica a existência de um objeto invariante,

$$L(\Lambda)_a{}^c L(\Lambda)_b{}^d \epsilon_{cd} = \epsilon_{ab},$$

também existe um associado à representação de mão direita,

$$\left(0, \frac{1}{2}\right) \otimes \left(0, \frac{1}{2}\right) = (0, 0) \oplus (0, 1),$$

que implica em,

$$R^{-1}(\Lambda)_{\dot{a}}{}^c R^{-1}(\Lambda)_{\dot{b}}{}^d \epsilon_{c\dot{d}} = \epsilon_{a\dot{b}},$$

aparte de fatores multiplicativos podemos escolher os valores como,

$$\epsilon_{ab} = \epsilon_{a\dot{b}} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Daqui existem várias relações algébricas que serão muito úteis, vamos apenas enunciá-las,

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}^{\mu\dot{a}a} &= \epsilon^{\dot{a}b}\epsilon^{ab}\sigma^\mu_{ab} = (\mathbb{1} \quad -\sigma) \\ \eta_{\mu\nu}\sigma^\mu_{a\dot{a}}\sigma^\nu_{b\dot{b}} &= -2\epsilon_{ab}\epsilon_{\dot{a}\dot{b}} \\ \epsilon^{ab}\epsilon^{\dot{a}b}\sigma^\mu_{a\dot{a}}\sigma^\nu_{b\dot{b}} &= \text{Tr}[\sigma^\mu\bar{\sigma}^\nu] = -2\eta^{\mu\nu} \\ \sigma^\mu\bar{\sigma}^\nu + \sigma^\nu\bar{\sigma}^\mu &= -2\eta^{\mu\nu} \\ \bar{\sigma}^\mu\sigma^\nu + \bar{\sigma}^\nu\sigma^\mu &= -2\eta^{\mu\nu}\end{aligned}$$

O ponto dessas construções é, dado um momento p^μ , é possível construir o seguinte objeto $p_\mu\sigma^\mu_{a\dot{a}} = p_{a\dot{a}}$. Como $\sigma^\mu_{a\dot{a}}$ é um invariante do grupo, o objeto $p_{a\dot{a}}$ se transforma corretamente na representação $(\frac{1}{2}, 0) \otimes (0, \frac{1}{2})$. Caso $p^2 = 0$, e utilizando-se das relações acima,

$$\begin{aligned}p_\mu p_\nu \epsilon^{ab}\epsilon^{\dot{a}b}\sigma^\mu_{a\dot{a}}\sigma^\nu_{b\dot{b}} &= -2p_\mu p_\nu \eta^{\mu\nu} = 0 \\ \epsilon^{ab}\epsilon^{\dot{a}b}p_{a\dot{a}}p_{b\dot{b}} &= 0 \\ \epsilon^{\dot{a}b}(p_{1\dot{a}}p_{2b} - p_{2\dot{a}}p_{1b}) &= 2\epsilon^{\dot{a}b}p_{1\dot{a}}p_{2b} = 2\text{Det}[p_{a\dot{a}}] = 0\end{aligned}$$

Logo, $p_\mu p^\mu = 0 \Rightarrow \text{Det}[p_{a\dot{a}}] = 0$, isto é, dos 4 elementos da matriz $p_{a\dot{a}}$, apenas dois são independentes. Em outras palavras, esta matrix é completamente determinada apenas por um vetor de duas componentes p_a , fazendo com que $p_{a\dot{a}} = -p_a p_{\dot{a}}^2$. Devido à p^μ possuir componentes reais, isso implica em $p_{\dot{a}} = (p_a)^*$. Representamos $p_a = |p\rangle$ e $p_{\dot{a}} = \langle p|$, assim $p = -|p\rangle\langle p|$. Igualmente, podemos definir $p^a = \epsilon^{ab}p_b = [p|, p^{\dot{a}} = \epsilon^{\dot{a}b}p_{\dot{b}} = |p\rangle$, de tal forma que:

$$\forall p, q |p^2 = q^2 = 0, \quad \epsilon^{ab}p_a q_b = [pq], \quad \epsilon_{\dot{a}\dot{b}}p^{\dot{a}}q^{\dot{b}} = \langle pq\rangle.$$

Claramente, dado $p^2 = 0$, a escolha de $|p\rangle$ — que fixa todos os outros símbolos, se o momento for real — não é única. Podemos sempre fazer a transformação $|p\rangle, \langle p| \rightarrow t|p\rangle, t^{-1}\langle p|$ que preserva p^μ . Este é o *Little-Group*. Como afirmamos anteriormente, para partículas sem massa deveria ser o grupo $U(1)$, que é consistente com um fator multiplicativo t . De fato então fomos bem sucedidos, conseguimos compactar a informação contida em um momento sem massa em um objeto $|p\rangle$ que se transforma não trivialmente sobre o *Little-Group*, portanto, se utilizar-mos como blocos de construção $|p\rangle$, etc... ao invés de p^μ , podemos obter restrições não triviais sobre objetos em TQC ao impor condições sobre como devem se comportar sobre uma transformação destas.

Este procedimento é excelente para momentos não massivos, porém, não é satisfatório para momentos massivos, note que, se $p^2 = -m^2$,

$$\begin{aligned}p_\mu p_\nu \epsilon^{ab}\epsilon^{\dot{a}b}\sigma^\mu_{a\dot{a}}\sigma^\nu_{b\dot{b}} &= -2p_\mu p_\nu \eta^{\mu\nu} = 2m^2 \\ \epsilon^{ab}\epsilon^{\dot{a}b}p_{a\dot{a}}p_{b\dot{b}} &= 2m^2 \\ \epsilon^{\dot{a}b}(p_{1\dot{a}}p_{2b} - p_{2\dot{a}}p_{1b}) &= 2\epsilon^{\dot{a}b}p_{1\dot{a}}p_{2b} = 2\text{Det}[p_{a\dot{a}}] = 2m^2\end{aligned}$$

Desta forma, $p^2 = -m^2 \Rightarrow \text{Det}[p_{a\dot{a}}] = m^2$, portanto, as linhas e colunas desta matrix são linearmente independentes, e não é possível decompô-la na forma $p_{a\dot{a}} = -p_a p_{\dot{a}}$, o melhor que é possível de ser realizado é decompô-la em termo de dois vetores p_a^I , $I = 1, 2$, tal que, $p_{a\dot{a}} = -p_a^I p_{I\dot{a}}$. Novamente, é facilmente observável que esta decomposição não é única, e está definida aparte de uma transformação $p_a^I, p_{K\dot{a}} \rightarrow W^I_J, W^{-1L}_K p_{L\dot{a}}$, como p^μ é real, $p_{I\dot{a}} = (p_a^I)^*$, isso impõe a restrição em W de, $W^{T*} = W^{-1}$, ou seja, essa ambiguidade corresponde a uma transformação de $SU(2)$, em concordância com o *Little-Group*. Utilizamos também uma notação muito similar à das partículas sem massa, $p_a^I = |p^I\rangle$, etc...

²O fator de $-$ aqui está relacionado com $p^0 > 0$, para mostrar sua necessidade é preciso realizar uma demonstração mais cuidadosa.

2.2. Unitariedade em TQC. Unitariedade em TQC se refere a unitariedade da matrix S . Como revisão, a matrix S é a amplitude de transição entre um estado *in*, Ψ_α^+ , para um estado *out*, Ψ_β^- ,

$$S_{\beta\alpha} = (\Psi_\beta^-, \Psi_\alpha^+),$$

aqui α e β são índices que condensam toda a informação contida em seu respectivo estado do espaço de Hilbert. É assumido que tanto os estados *in*, quanto os *out*, sejam uma base completa do espaço de Hilbert, de forma que se a matrix S é um mapa entre essas duas bases, é necessário ela ser um mapa unitário, e de fato, manipulando formalmente essa expressão,

$$\int d\beta S_{\beta\gamma}^* S_{\beta\alpha} = \int d\beta (\Psi_\beta^-, \Psi_\gamma^+)^* (\Psi_\beta^-, \Psi_\alpha^+) = \int d\beta (\Psi_\gamma^+, \Psi_\beta^-) (\Psi_\beta^-, \Psi_\alpha^+) = (\Psi_\gamma^+, \Psi_\alpha^+) = \delta_{\gamma\alpha}$$

Há fortes consequências dessa propriedades, a principal é chamada por motivos históricos de **Teorema Óptico**, primeiro, é necessário expandir,

$$S_{\beta\alpha} = \delta_{\beta\alpha} + i(2\pi)^4 \delta(p_\beta - p_\alpha) \mathcal{A}_{\beta\alpha}$$

nessa forma, a condição de unitariedade implica,

$$\begin{aligned} \delta_{\gamma\alpha} &= \int d\beta S_{\beta\gamma}^* S_{\beta\alpha} = \int d\beta (\delta_{\beta\gamma} + i(2\pi)^4 \delta(p_\beta - p_\gamma) \mathcal{A}_{\beta\gamma})^* (\delta_{\beta\alpha} + i(2\pi)^4 \delta(p_\beta - p_\alpha) \mathcal{A}_{\beta\alpha}) \\ \delta_{\gamma\alpha} &= \delta_{\gamma\alpha} - i(2\pi)^4 \delta(p_\alpha - p_\gamma) \mathcal{A}_{\alpha\gamma}^* + i(2\pi)^4 \delta(p_\gamma - p_\alpha) \mathcal{A}_{\gamma\alpha} + (2\pi)^8 \int d\beta \delta(p_\beta - p_\gamma) \delta(p_\beta - p_\alpha) \mathcal{A}_{\beta\gamma}^* \mathcal{A}_{\beta\alpha} \\ 0 &= -i\mathcal{A}_{\alpha\gamma}^* + i\mathcal{A}_{\gamma\alpha} + (2\pi)^4 \int d\beta \delta(p_\beta - p_\alpha) \mathcal{A}_{\beta\gamma}^* \mathcal{A}_{\beta\alpha} \end{aligned}$$

A maior utilidade deste resultado é do ponto de vista de teoria de perturbação, certamente calculamos uma amplitude de espalhamento $\mathcal{A}_{\beta\alpha}$ em uma determinada ordem $\mathcal{O}(g^n)$ do parâmetro de acoplamento, porém, o resultado acima promove uma relação entre \mathcal{A} e \mathcal{A}^2 , ou seja, há relações entre amplitudes em diferentes ordens na expansão do parâmetro de acoplamento. A versão mais famosa deste resultado é para $\alpha = \gamma$,

$$\begin{aligned} i\mathcal{A}_{\alpha\alpha}^* - i\mathcal{A}_{\alpha\alpha} &= (2\pi)^4 \int d\beta \delta(p_\beta - p_\alpha) \mathcal{A}_{\beta\alpha}^* \mathcal{A}_{\beta\alpha} \\ 2\text{Im}[\mathcal{A}_{\alpha\alpha}] &= (2\pi)^4 \int d\beta \delta(p_\beta - p_\alpha) |\mathcal{A}_{\beta\alpha}|^2 \end{aligned}$$

Trabalhando do ponto de vista de teoria de perturbação, podemos calcular a parte imaginária da contribuição de 1-*loop* de $\mathcal{A}_{\alpha\alpha}$ apenas sabendo a contribuição de nível árvore para $\mathcal{A}_{\beta\alpha}$. Parte deste fato está relacionado ao teorema de Sokhotski–Plemelj,

$$\frac{1}{p^2 + m^2 - i\epsilon} = i\pi\delta(p^2 + m^2) + \text{P.V.} \frac{1}{p^2 + m^2}.$$

Que nos confirma que o propagador apenas possui parte imaginária para uma partícula *on-shell*, porém, para diagramas a nível árvore não é cinematicamente permitido de uma partícula virtual interna ao diagrama entrar *on-shell*, o que é compatível com o senso comum de contribuições à nível árvore serem polinômios de propagadores e numeradores cinemáticos, que certamente não possuem parte imaginária para partículas *off-shell*. Agora, para contribuições de *loop*, partículas virtuais internas podem ficarem *on-shell*, e portanto, os diagramas podem possuírem parte imaginária.

Como exemplo tomemos a teoria $g\phi^3$,

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}\phi(-\square + m^2)\phi + \frac{1}{3!}g\phi^3,$$

de unitariedade relaciona a parte imaginária de uma contribuição de ordem superior com contribuições de ordem inferiores — O que pode ser pensado como relacionando a estrutura de polos de amplitudes de ordem inferiores com a estrutura de *branch-cuts* de amplitudes de ordem superiores —, conceitualmente, conforme mencionamos brevemente anteriormente, efeito de *loops* geram uma estrutura analítica de *branch-cuts* não trivial devido a possibilidade de partículas internas estarem *on-shell*. A proposta da unitariedade generalizada é utilizar o conceito de partículas internas entrando *on-shell* alterarem a estrutura analítica da amplitude, e usar isto para recuperar não somente a parte imaginária da amplitude, mas de fato reconstruir a amplitude como um todo³.

O exemplo mais básico de unitariedade generalizada é encontrado nas relações de recursão a nível árvore. Seja \mathcal{A}_n uma amplitude de $n > 3$ pontos, para nossa teoria exemplo há propagadores internos nessa amplitude, porém, cinematicamente nenhum destes pode entrar *on-shell*, o motivo reside em os momentos externos das partículas serem reais. Mas, se admitirmos momentos complexos, é sim possível cinematicamente para propagadores internos estarem *on-shell*

3. PLANO DE ATIVIDADES

³Há condições para que isso seja possível.

REFERÊNCIAS

- [1] Enrico Herrmann e Jaroslav Trnka. “UV cancellations in gravity loop integrands”. Em: *Journal of High Energy Physics* 2019.2 (fev. de 2019). ISSN: 1029-8479. DOI: 10.1007/jhep02(2019)084. URL: [http://dx.doi.org/10.1007/JHEP02\(2019\)084](http://dx.doi.org/10.1007/JHEP02(2019)084).