

# III CICLO DE SEMINÁRIOS DE FÍSICA

COLEGIADO DE FÍSICA

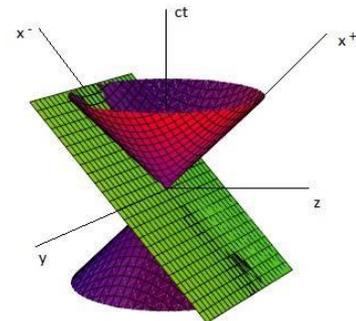
UESB - ITAPETINGA - BA

## Estudo do Comportamento dos Kernels do Estado Ligado Bosônico na Frente de Luz

**Prof. Me Gislan Silveira Santos**

IFBA – Campus de Vitória da Conquista

22 de Maio de 2015



# Sumário:

- ✓ Motivação e Objetivos.
  - ✓ Equações Integrais e Kernels.
  - ✓ Frente de Luz.
  - ✓ Equações Hierárquicas.
  - ✓ Estado Ligado: diagrama escada e diagrama escada cruzado.
  - ✓ Considerações Finais.
- 

# Motivação:

- ✓ Equação de Bethe-Salpeter não é resolvida analiticamente no espaço de Minkowski.
- ✓ A mudança de coordenadas do espaço de Minkowski para as coordenadas da Frente de Luz implica em perda de informação física?

# Objetivos:

- ✓ Comparar a contribuição do Estado Ligado do diagrama escada com o diagrama escada cruzado.
- ✓ Analisar o efeito antipartícula do diagrama escada cruzado.

# Equações Integrais e Kernels:

- ✓ Definição de Equação Integral:
  - ✓ É uma equação na qual a função incógnita aparece sob o sinal de integral e o problema se resume em determinar essa função desconhecida, resolvendo-se essa integral.

$$\psi(x) = f(x) + \lambda \int_a^b K(x,t)\psi(t) dt$$

$f$  e  $K$  são funções dadas e  $\psi$  é uma função a determinar

- ✓ Introdução Histórica:
  - ✓ Paul Du Bois Reymond (1831-1889), matemático francês: introduziu a nomenclatura equação integral;
  - ✓ Vito Volterra (1860-1940), matemático italiano: iniciou o estudo da teoria geral das equações integrais. Começou a surgir por volta de 1896 e 1897;
  - ✓ Erik Ivan Fredholm (1866-1927), matemático sueco: resolveu o problema de Dirichlet, por volta de 1900, aproveitando a mesma ideia da equação integral de Volterra;

# Equações Integrais e Kernels:

## ✓ Introdução Histórica:

- ✓ David Hilbert (1862-1943), matemático alemão: em seus estudos, entre 1904 e 1910, se referiu as equações integrais de Volterra e Fredholm da seguinte forma:

$$u(x) = f(x) + \lambda \int_a^b K(x,t)u(t) dt, \quad \text{equação de Fredholm de segunda espécie}$$

$$0 = f(x) + \lambda \int_a^b K(x,t)u(t) dt, \quad \text{equação de Fredholm de primeira espécie}$$

Se o Kernel  $K(x,t)$  verificar a condição:  $K(x,t) = 0, \forall t > x$

$$u(x) = f(x) + \lambda \int_a^b K(x,t)u(t) dt, \quad \text{equação de Volterra de segunda espécie}$$

$$f(x) = \lambda \int_a^b K(x,t)u(t) dt, \quad \text{equação de Volterra de primeira espécie}$$

# Equações Integrais e Kernels:

- ✓ Obter soluções da Equação de Bethe-Salpeter na Frente de Luz.

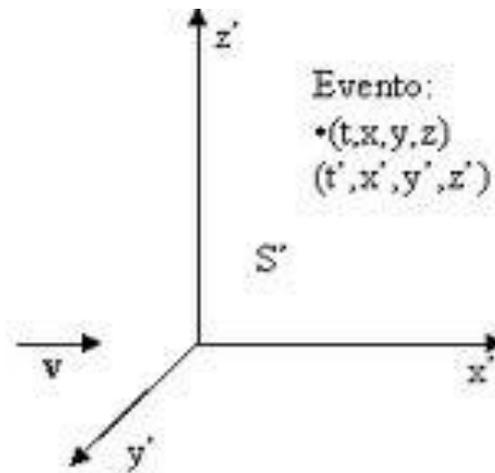
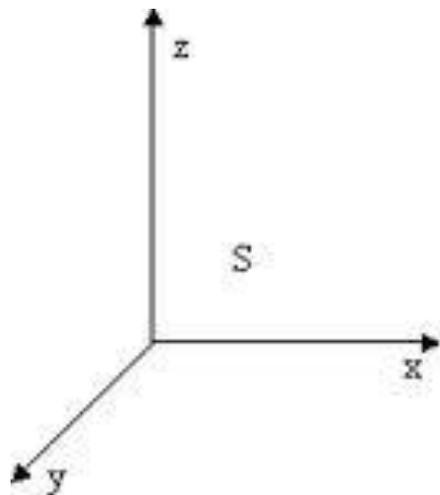
$$\Gamma_B(\vec{q}_\perp, y) = \int \frac{dx d^2 k_\perp}{x(1-x)} \frac{K^{(3)}(\vec{q}_\perp, y; \vec{k}_\perp, x)}{M_B^2 - M_0^2} \Gamma_B(\vec{k}_\perp, x)$$

$$\Gamma_B(\vec{q}_\perp, y) = \int \frac{dx d^2 k_\perp}{x(1-x)} \times \frac{K^{(3)}(\vec{q}_\perp, y; \vec{k}_\perp, x) + K^{(4)}(\vec{q}_\perp, y; \vec{k}_\perp, x)}{M_B^2 - M_0^2} \Gamma_B(k_\perp, x)$$

$$\Gamma_B(\vec{q}_\perp, y) = \int \frac{dx d^2 k_\perp}{x(1-x)} \frac{\Gamma_B(\vec{k}_\perp, x)}{M_B^2 - M_0^2} \times \left[ K^{(3)}(q_\perp, y; \vec{k}_\perp, x) + K^{(4)}(\vec{q}_\perp, y; \vec{k}_\perp, x) + \right. \\ \left. \times K^{(4)}(\vec{q}_\perp, y; \vec{k}_\perp, x) + \times K^{(4)ant}(\vec{q}_\perp, y; \vec{k}_\perp, x) \right]$$

# Frente de Luz:

- ✓ Teoria da Relatividade Restrita: publicada pela primeira vez em 1905.



Evento:  
•(t,x,y,z)  
(t',x',y',z')

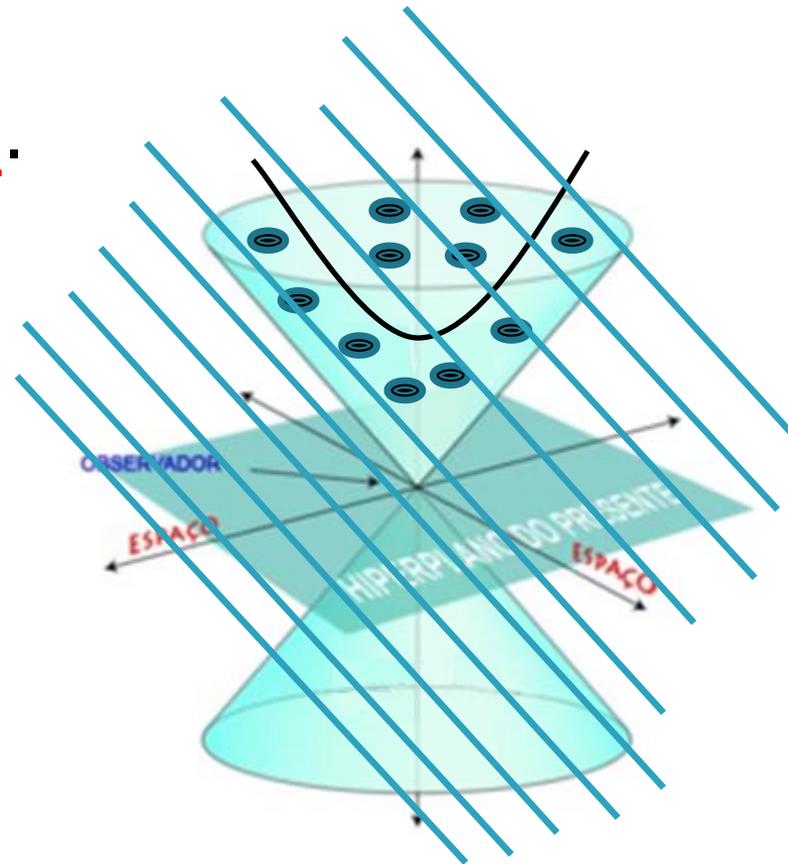
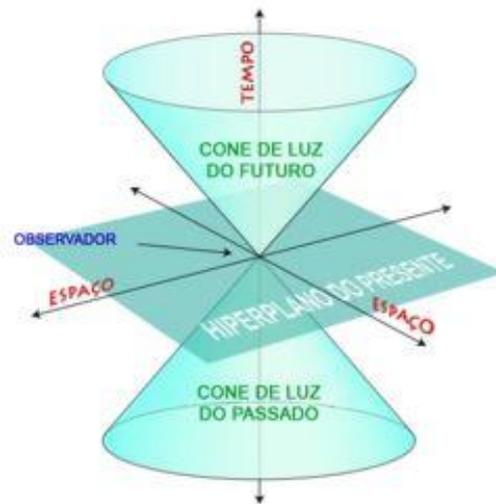
com

$$\begin{cases} t' = \gamma (t - vx/c^2) \\ x' = \gamma (x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases}$$

$$\gamma = \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

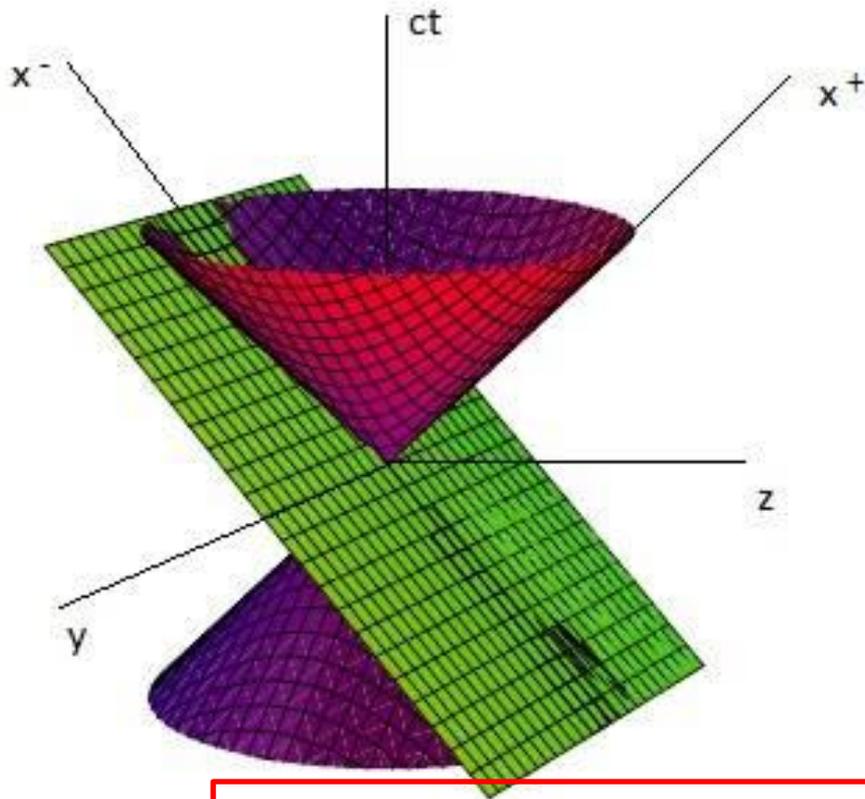
# Frente de Luz:

- ✓ Em 1949 Dirac propôs três diferentes formas de dinâmicas para partículas relativísticas:
- ✓ Forma Instantânea.
- ✓ Forma Pontual.
- ✓ Forma Frontal: FRENTE DE LUZ.



# Frente de Luz:

✓ Transformação de coordenadas na Frente de Luz:



$$\begin{cases} x^+ = \frac{(x^0 + x^3)}{\alpha} \\ x^- = \frac{(x^0 - x^3)}{\alpha} \\ \vec{x}^\perp = x^1 \vec{i} + x^2 \vec{j} \end{cases}$$

$$\begin{cases} x^0 = \frac{\alpha}{2} (x^+ + x^-) \quad \longrightarrow \quad ct \\ x^3 = \frac{\alpha}{2} (x^+ - x^-) \quad \longrightarrow \quad z \end{cases}$$

Convenção Lepage-Brodsky

Convenção SS

Convenção Kogut-Soper

em que  $\alpha = 1$ ,  $\alpha = 2$  ou

$\alpha = \sqrt{2}$

# Equações Hierárquicas

Lagrangiana de interação:

$$\mathcal{L}_I = g\phi_1^\dagger\phi_1\sigma + g\phi_2^\dagger\phi_2\sigma$$

onde os bósons  $\phi_1$  e  $\phi_2$  possuem massas iguais a  $m$  e o bóson intermediário,  $\sigma$ , tem massa  $m_\sigma$ .

$g$  é a constante de acoplamento da interação.

# Equações Hierárquicas: diagrama escada

Equações Hierárquicas:

$$G^{(2)}(K^-) = G_0^{(2)}(K^-) + G_0^{(2)}(K^-)\Sigma^{(3)}(K^-)G^{(2)}(K^-),$$

$$G^{(3)}(K^-) = G_0^{(3)}(K^-) + G_0^{(3)}(K^-)\Sigma^{(4)}(K^-)G^{(3)}(K^-),$$

$$G^{(4)}(K^-) = G_0^{(4)}(K^-) + G_0^{(4)}(K^-)\Sigma^{(5)}(K^-)G^{(4)}(K^-),$$

$\vdots$       $\vdots$

$$G^{(N)}(K^-) = G_0^{(N)}(K^-) + G_0^{(N)}(K^-)\Sigma^{(N+1)}(K^-)G^{(N)}(K^-),$$

$\vdots$       $\vdots$

onde  $\Sigma^{(N+1)}(K^-) \equiv VG^{(N+1)}(K^-)V$  e  $V$  é o vértice da interação.

# Equações Hierárquicas: diagrama escada

Equações Hierárquicas:

$$\begin{aligned}\langle qk_\sigma|V|k \rangle &= 2\delta(q + k_\sigma - k) \frac{g}{\sqrt{q^+k_\sigma^+k^+}} \theta(k_\sigma^+) \\ \langle q|V|k_\sigma k \rangle &= 2\delta(k + k_\sigma - q) \frac{g}{\sqrt{q^+k_\sigma^+k^+}} \theta(k_\sigma^+),\end{aligned}$$

onde  $k_\sigma^+ = k^+ - q^+$  e  $k_{\sigma\perp} = k_\perp - q_\perp$

# Equações Hierárquicas: diagrama escada

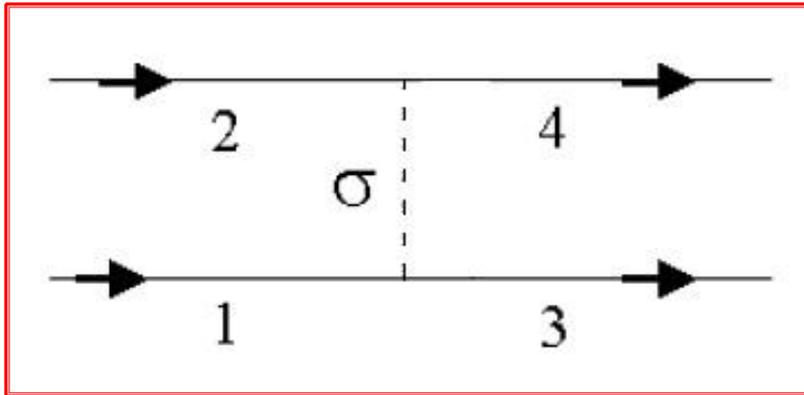
Truncamento das Equações Hierárquicas:  $O(g^2)$

$$\Delta G_{g^2}^{(2)}(K^-) = G_0^{(2)}(K^-)\Sigma^{(3)}(K^-)G_0^{(2)}(K^-)$$

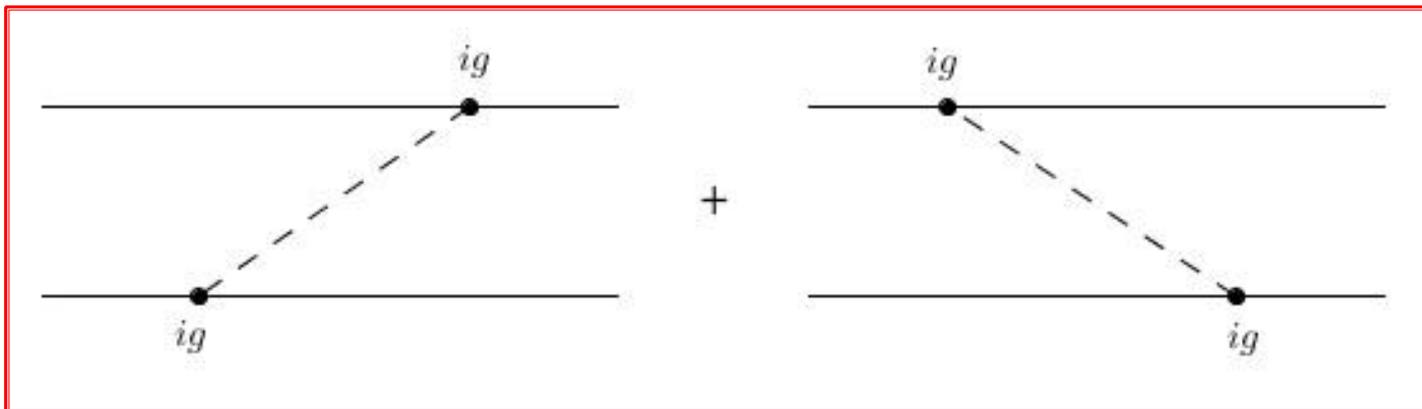


Correção perturbativa em segunda ordem na constante de acoplamento

# Equações Hierárquicas: diagrama escada



Espaço de Minkowski



Frente de Luz

# Equações Hierárquicas: diagrama escada

Truncamento das Equações Hierárquicas:  $O(g^4)$

Equações Hierárquicas:

$$G^{(2)}(K^-) = G_0^{(2)}(K^-) + G_0^{(2)}(K^-)\Sigma^{(3)}(K^-)G^{(2)}(K^-),$$

$$G^{(3)}(K^-) = G_0^{(3)}(K^-) + G_0^{(3)}(K^-)\Sigma^{(4)}(K^-)G^{(3)}(K^-),$$

$$\boxed{G^{(4)}(K^-) \cong G_0^{(4)}(K^-)} \longrightarrow \boxed{\text{Aproximação}}$$

$\vdots$   $\vdots$

$$G^{(N)}(K^-) = G_0^{(N)}(K^-) + G_0^{(N)}(K^-)\Sigma^{(N+1)}(K^-)G^{(N)}(K^-),$$

$\vdots$   $\vdots$

onde,  $\Sigma^{(N+1)}(K^-) \equiv VG^{(N+1)}(K^-)V$

# Equações Hierárquicas: diagrama escada

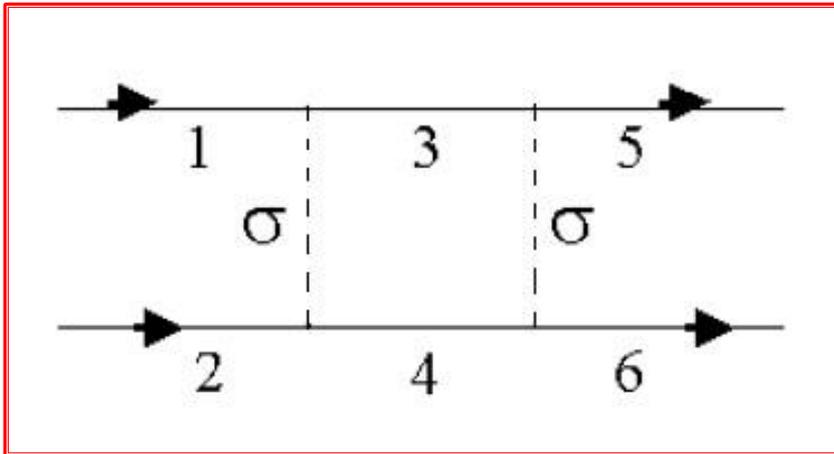
Truncamento das Equações Hierárquicas:  $O(g^4)$

$$\Delta G_{g^4}^{(2)} = G_0^{(2)} \Sigma^{(3)} G_0^{(2)} \Sigma^{(3)} G_0^{(2)} + G_0^{(2)} \Sigma^{(3)} G_0^{(4)} \Sigma^{(3)} G_0^{(2)}$$



Correção perturbativa em quarta ordem na constante de acoplamento

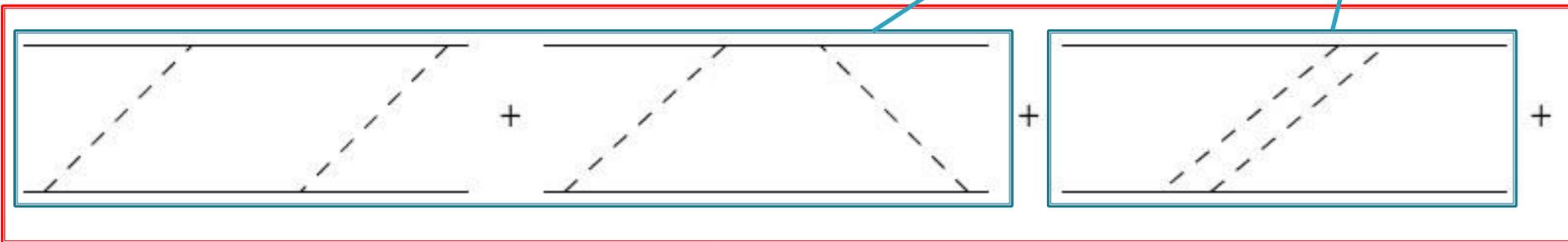
# Equações Hierárquicas: diagrama escada



Espaço de Minkowski

Weinberg

Sales



Frente de Luz

# Estado Ligado: diagrama escada

- ▶ Equação de Bethe-Salpeter na Frente de Luz

$$G^{(2)} = G_0^{(2)} + G_0^{(2)} \Sigma^{(3)} G^{(2)}$$

$$\lim_{K^- \rightarrow K_B^-} G^{(2)}(K^-) = \frac{|\psi_B\rangle \langle \psi_B|}{K^- - K_B^-}$$

$$|\psi_B\rangle = G_0^{(2)}(K_B^-) \Sigma^{(3)}(K_B^-) |\psi_B\rangle$$

Equação de Bethe-Salpeter Homogênea

$$|\Gamma_B\rangle = \left( G_0^{(2)}(K_B^-) \right)^{-1} |\psi_B\rangle$$

Vértice

# Estado Ligado: diagrama escada

- Equação de Bethe-Salpeter na Frente de Luz
- Aproximação de escada em  $O(g^2)$

onde

$$K^{(3)}(\vec{q}_\perp, y; \vec{k}_\perp, x) = \frac{g^2}{16\pi^3} \frac{\theta(x-y)}{(x-y)} \times \frac{1}{\left( M_B^2 - \frac{q_\perp^2 + m^2}{y} - \frac{k_\perp^2 + m^2}{1-x} - \frac{(q-k)_\perp^2 + m_\sigma^2}{x-y} \right)} + [k \leftrightarrow q]$$

Equação de Bethe Salpeter

$$M_0^2 = K^+ K_{(2)on}^- - K_\perp^2 = \frac{k_\perp^2 + m^2}{x(1-x)} \text{ luz na aproximação de ordem } g^2 \quad M_B^2 = K_B^+ K_B^-$$

$$\vec{K}_\perp = 0 \quad x = \frac{k^+}{K^+} \quad \text{e} \quad y = \frac{q^+}{K^+}$$

# Estado Ligado: diagrama escada

- Equação de Bethe-Salpeter na Frente de Luz  
Aproximação de escada em  $O(g^4)$

onde

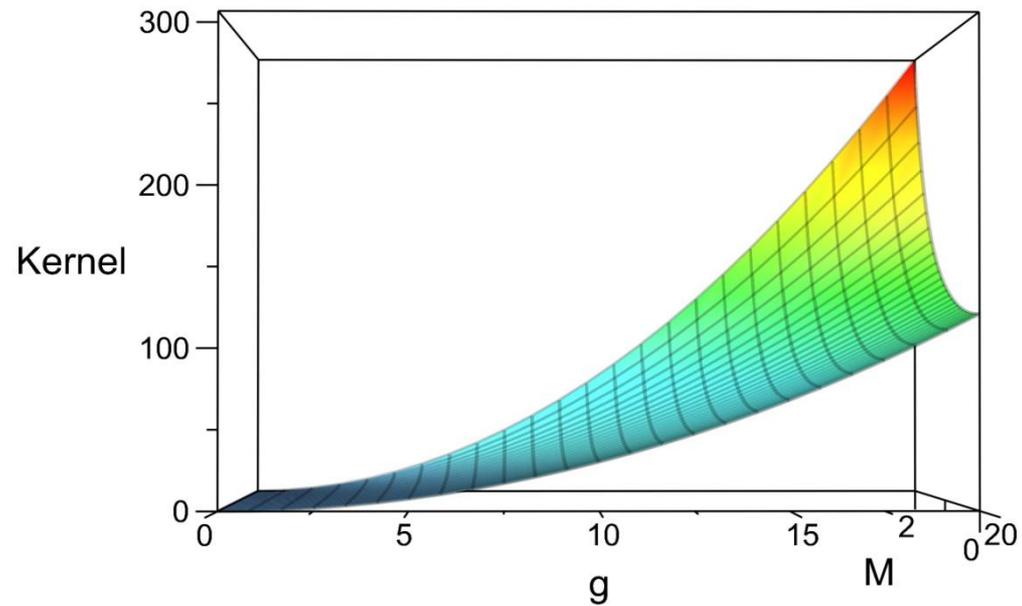
$$K^{(4)}(\vec{q}_\perp, y; \vec{k}_\perp, x) = \left( \frac{g^2}{16\pi^3} \right)^2 \int \frac{d^2 p_\perp dz}{z(z-x)(y-z)(1-z)} \frac{\theta(y-z)\theta(z-x)}{\left( M_B^2 - \frac{k_\perp^2 + m^2}{x} - \frac{p_\perp^2 + m^2}{1-z} - \frac{(p-k)_\perp^2 + m_\sigma^2}{z-x} \right)} \frac{1}{\left( M_B^2 - \frac{p_\perp^2 + m^2}{z} - \frac{q_\perp^2 + m^2}{1-y} - \frac{(q-p)_\perp^2 + m_\sigma^2}{y-z} \right)} \frac{1}{\left( M_B^2 - \frac{k_\perp^2 + m^2}{x} - \frac{q_\perp^2 + m^2}{1-y} - \frac{(q-p)_\perp^2 + m_\sigma^2}{y-z} - \frac{(p-k)_\perp^2 + m_\sigma^2}{z-x} \right)}$$

$$|\Gamma_B\rangle = V \left( G_0^{(3)}(K^-) + \Delta G_{g^2}^{(3)}(K^-) \right) V G_0^{(2)} |\Gamma_B\rangle$$

Vértice

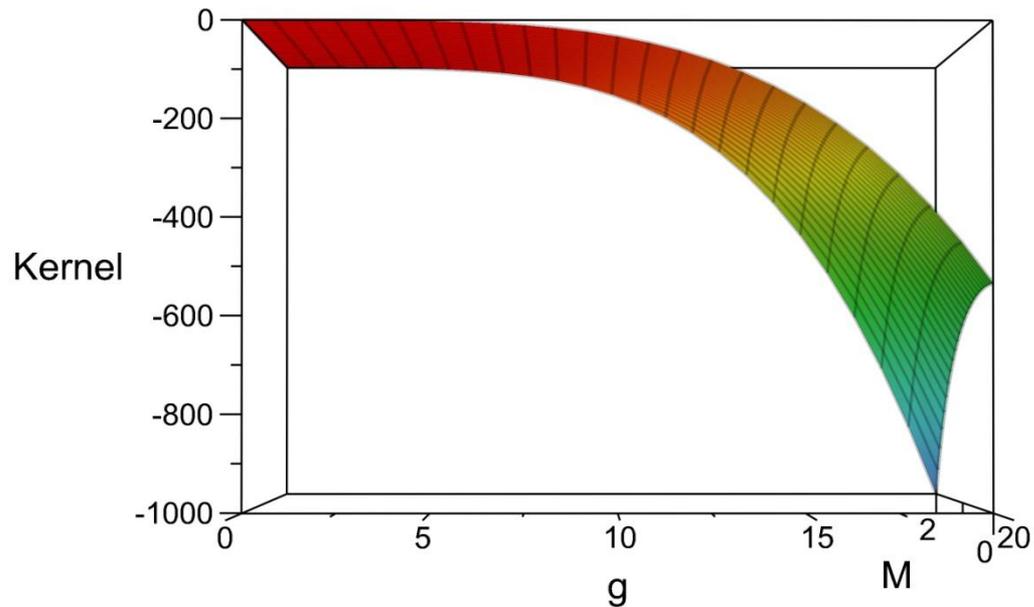
# Estado Ligado: diagrama escada

Kernel de três corpos



# Estado Ligado: diagrama escada

Kernel de quatro corpos



# Equações Hierárquicas: diagrama escada cruzado

Diagrama cruzado

$$\begin{aligned}\Delta_{\times} G(x^+) &= (ig)^4 \int d\bar{x}_1^+ d\bar{x}_2^+ d\bar{x}_3^+ d\bar{x}_4^+ G_3(x^+ - \bar{x}_2^+) \times \\ &G_{\sigma}(\bar{x}_2^+ - \bar{x}_3^+) G_2(\bar{x}_2^+ - \bar{x}_1^+) G_6(x^+ - \bar{x}_4^+) \times \\ &G_{\sigma}(\bar{x}_4^+ - \bar{x}_1^+) G_5(\bar{x}_4^+ - \bar{x}_3^+) \times \\ &G_1(\bar{x}_1^+) G_4(\bar{x}_3^+)\end{aligned}$$

# Equações Hierárquicas: diagrama escada cruzado

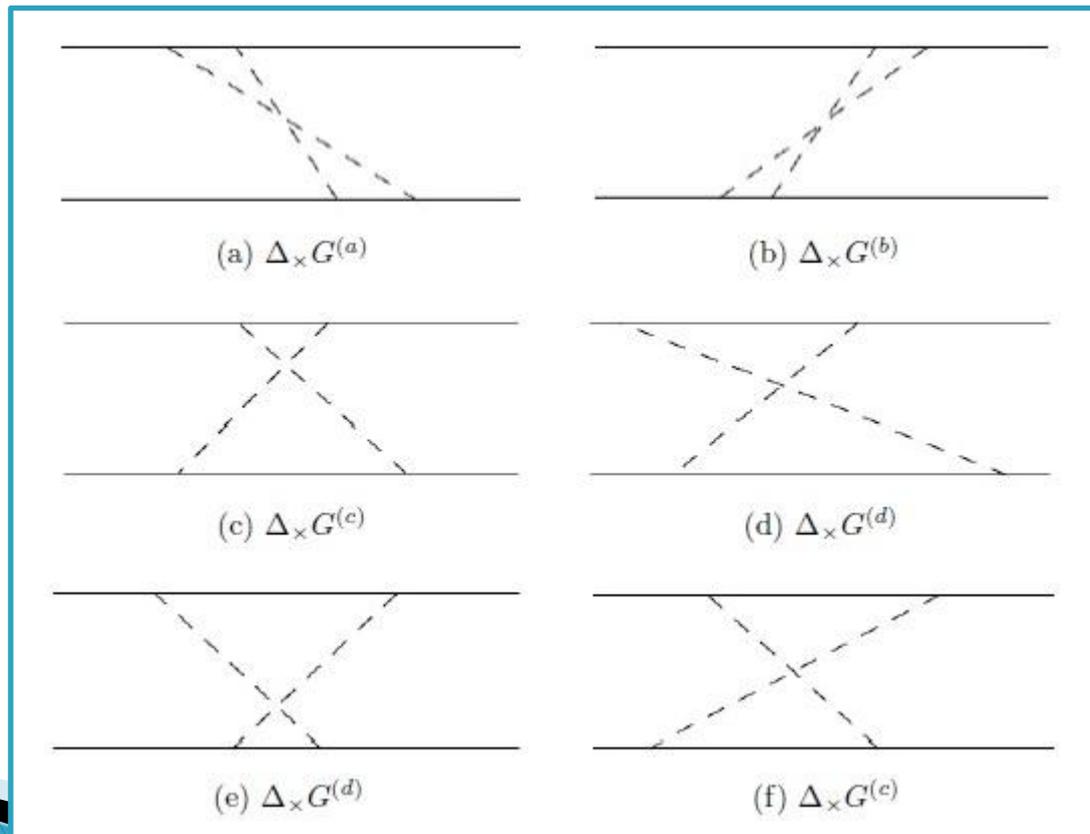
Diagrama cruzado

$$\begin{aligned}
 \Delta_{\times} \tilde{G}(K^-) &= \frac{(ig)^4}{2^3 (2\pi)^3} \int dk^- dp^- dq^- \frac{dp^+ d^2 p_{\perp}}{k^+ p^+ (k-p)^+ (p-q)^+ (K-k-q+p)^+} \times \\
 &\quad \frac{1}{(K-q)^+ (q-p)^+ (k-p)^+} \times \\
 &\quad \frac{1}{\left(k^- - \frac{k_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{k^+}\right)} \frac{1}{\left(p^- - \frac{k_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{p^+}\right)} \times \\
 &\quad \frac{1}{\left(q^- - \frac{k_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{q^+}\right)} \frac{1}{\left(K^- - k^- - \frac{(K-k)_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{(K-k)^+}\right)} \\
 &\quad \frac{1}{\left(K^- - q^- - \frac{(K-q)_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{(K-q)^+}\right)} \frac{1}{\left(k^- - p^- - \frac{(k-p)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\varepsilon}{(k-p)^+}\right)} \\
 &\quad \frac{1}{\left(K^- - k^- - q^- + p^- - \frac{(K-k-q+p)_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{(K-k-q+p)^+}\right)} \\
 &\quad \frac{1}{\left(q^- - p^- - \frac{(q-p)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\varepsilon}{(q-p)^+}\right)}
 \end{aligned}$$

# Equações Hierárquicas: diagrama escada cruzado

## Diagrama cruzado

Regiões de integração em  $p^+$  que definem a posição dos pólos no plano complexo de  $p^-$  para  $K^+ > 0$



# Equações Hierárquicas: diagrama escada cruzado

Diagrama cruzado

$$\Delta_x \tilde{G}(K^-) = \Delta_x \tilde{G}^a(K^-) + \Delta_x \tilde{G}^b(K^-) + \Delta_x \tilde{G}^c(K^-) + \Delta_x \tilde{G}^d(K^-)$$

# Equações Hierárquicas: diagrama escada cruzado

Diagrama cruzado

$$\Delta_{\times} \tilde{G}^a(K^-) = (ig)^4 \int \frac{dp^+ d^2 p_{\perp} \theta(k^+ - p^+) \theta(p^+ - q^+)}{2k^+(K-k)^+ \left( K^- - \frac{k_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{k^+} - \frac{(K-k)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{(K-k)^+} \right)} \times$$

$$\frac{1}{2p^+(k-p)^+(p-q)^+(K-k-q+p)^+} \times$$

$$\frac{1}{\left( K^- - \frac{p_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{p^+} - \frac{(K-k)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{(K-k)^+} - \frac{(k-p)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{(k-p)^+} \right)} \times$$

$$\frac{1}{\left( K^- - \frac{(p-q)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{(p-q)^+} - \frac{(k-p)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{(k-p)^+} - \frac{(K-k)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{(K-k)^+} - \frac{q_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{q^+} \right)} \times$$

$$\frac{1}{\left( K^- - \frac{q_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{q^+} - \frac{(k-p)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{(k-p)^+} - \frac{(K-k-q+p)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{(K-k-q+p)^+} \right)}$$

$$\frac{1}{2q^+(K-q)^+ \left( K^- - \frac{q_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{q^+} - \frac{(K-q)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{(K-q)^+} \right)},$$

$$\Delta_{\times} \tilde{G}^b(K^-) = \Delta_{\times} \tilde{G}^a(K^-) [k \leftrightarrow q]$$

# Equações Hierárquicas: diagrama escada cruzado

Diagrama cruzado

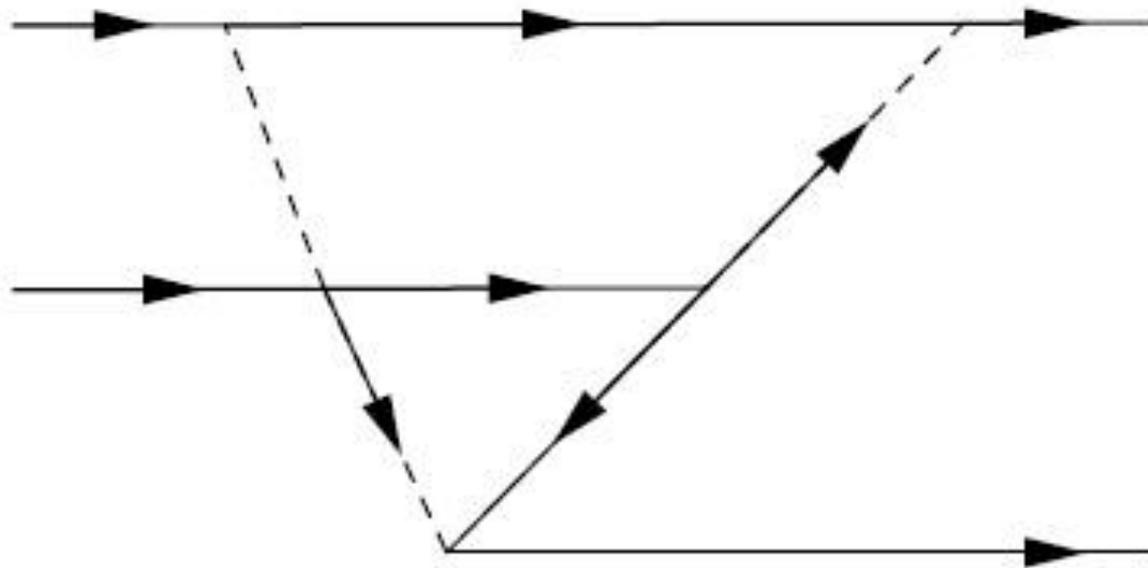
$$\begin{aligned}
 \text{onde } \times \widetilde{G}'^c &= \frac{1}{\left(K^- - \frac{q_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{q^+} - \frac{(k-p)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\varepsilon}{(k-p)^+} - \frac{(K-k-q+p)_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{(K-k-q+p)^+}\right)} \times \\
 &\frac{1}{\left(K^- - \frac{k_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{k^+} - \frac{(K-k-q+p)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\varepsilon}{(K-k-q+p)^+} - \frac{(q-p)_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{(q-p)^+}\right)} \times \\
 &\frac{1}{\left(K^- - \frac{k_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{k^+} - \frac{(q-p)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\varepsilon}{(q-p)^+} - \frac{(K-k-q+p)_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{(K-k-q+p)^+}\right)} \times \\
 &\frac{1}{\left(K^- - \frac{p_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{p^+} - \frac{(q-p)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\varepsilon}{(q-p)^+} - \frac{(K-q)_{\perp}^2 + m^2 - i\varepsilon}{(K-q)^+}\right)}
 \end{aligned}$$

# Equações Hierárquicas: diagrama escada cruzado

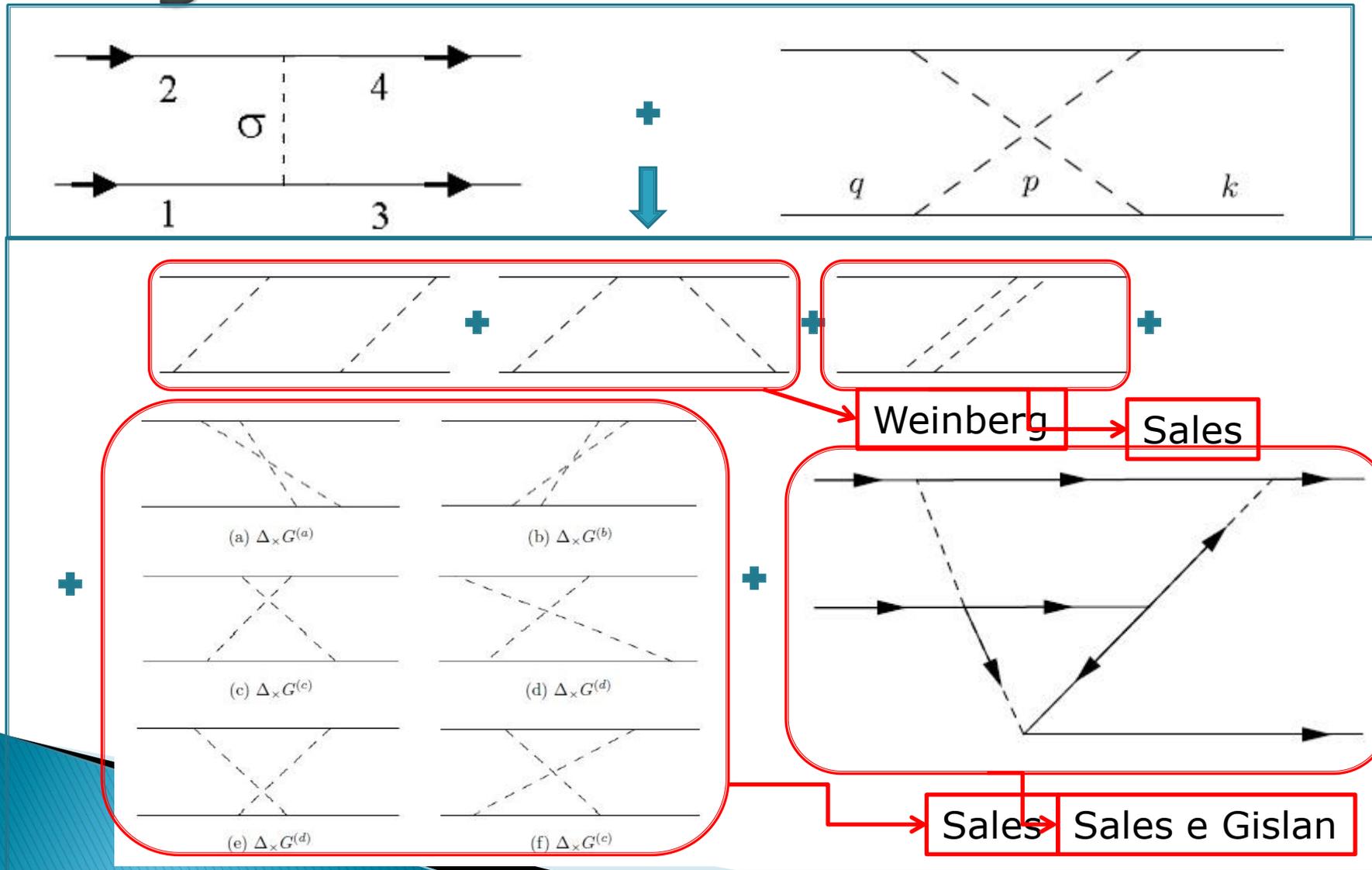
Diagrama cruzado

Contribuição do processo de criação de par ao diagrama escada cruzado

$$p^+ < 0 \quad e \quad K^+ - k^+ - q^+ + p^+ < 0$$



# Equações Hierárquicas: diagrama escada cruzado



# Equações Hierárquicas: diagrama escada cruzado

## Equações Hierárquicas

$$G^{(2)}(K^-) = G_0^{(2)}(K^-) + G_0^{(2)}(K^-)\Sigma^{(3)}(K^-)G^{(2)}(K^-),$$

$$G^{(3)}(K^-) = G_0^{(3)}(K^-) + G_0^{(3)}(K^-)\Sigma^{(4)}(K^-)G^{(3)}(K^-),$$

$$G^{(4)}(K^-) = G_0^{(4)}(K^-) + \Delta_{\times}G^{(4)}(K^-) + G_0^{(4)}(K^-)\Sigma^{(5)}(K^-)G^{(4)}(K^-),$$

$\vdots$       $\vdots$

$$G^{(N)}(K^-) = G_0^{(N)}(K^-) + G_0^{(N)}(K^-)\Sigma^{(N+1)}(K^-)G^{(N)}(K^-),$$

$\vdots$       $\vdots$

onde  $\Sigma^{(N+1)}(K^-) \equiv VG^{(N+1)}(K^-)V$ ,  $\Delta_{\times}G^{(4)}(K^-) = {}_{\times}G^{(4)}(K^-) + {}_{\times}G^{(4)ant}(K^-)$

# Equações Hierárquicas: diagrama escada cruzado

## Equações Hierárquicas

$$G^{(2)}(K^-) = G_0^{(2)}(K^-) + G_0^{(2)}(K^-)\Sigma^{(3)}(K^-)G^{(2)}(K^-),$$

$$G^{(3)}(K^-) = G_0^{(3)}(K^-) + G_0^{(3)}(K^-)\Sigma^{(4)}(K^-)G^{(3)}(K^-),$$

$$G^{(4)}(K^-) \cong G_0^{(4)}(K^-) + \Delta_{\times} G_0^{(4)}(K^-) \longrightarrow \text{Aproximação}$$

⋮ ⋮

$$G^{(N)}(K^-) = G_0^{(N)}(K^-) + G_0^{(N)}(K^-)\Sigma^{(N+1)}(K^-)G^{(N)}(K^-),$$

⋮ ⋮

$$\text{em que } \Delta_{\times} G_0^{(4)}(K^-) = {}_{\times}G_0^{(4)}(K^-) + {}_{\times}G_0^{(4)ant}(K^-)$$

# Equações Hierárquicas: diagrama escada cruzado

Truncamento:  $O(g^4)$

$$\begin{aligned}\Delta G_{g^4}^{(2)} = & G_0^{(2)} \Sigma^{(3)} G_0^{(2)} \Sigma^{(3)} G_0^{(2)} + \\ & + G_0^{(2)} \Sigma^{(3)} G_0^{(4)} \Sigma^{(3)} G_0^{(2)} + \\ & + G_0^{(2)} \Sigma^{(3)} \times G_0^{(4)} \Sigma^{(3)} G_0^{(2)} + \\ & + G_0^{(2)} \Sigma^{(3)} \times G_0^{(4)ant} \Sigma^{(3)} G_0^{(2)}\end{aligned}$$



Correção perturbativa em quarta ordem na constante de acoplamento

# Estado Ligado: diagrama escada cruzado

Equação de Bethe-Salpeter na Frente de Luz

$$|\Psi_B\rangle = G_0^{(2)}(K_B^-)V\{G_0^{(3)}(K_B^-) + G_0^{(3)}(K_B^-)V[G_0^{(4)}(K_B^-) + {}_\times G^{(4)}(K_B^-) + {}_\times G^{(4)ant}(K_B^-)]VG_0^{(3)}(K_B^-)\}V|\Psi_B\rangle$$



Inclusão da Função de Green para o diagrama cruzado

# Estado Ligado: diagrama escada cruzado

Equação de Bethe-Salpeter na Frente de Luz

$$\Gamma_B(\vec{q}_\perp, y) = \int \frac{dx d^2 k_\perp}{x(1-x)} \frac{\Gamma_B(\vec{k}_\perp, x)}{M_B^2 - M_o^2} \times$$
$$\left[ K^{(3)}(q_\perp, y; \vec{k}_\perp, x) + K^{(4)}(\vec{q}_\perp, y; \vec{k}_\perp, x) + \right.$$
$$\left. \times K^{(4)}(\vec{q}_\perp, y; \vec{k}_\perp, x) + \times K^{(4)ant}(\vec{q}_\perp, y; \vec{k}_\perp, x) \right]$$

Equação de Bethe-Salpeter Homogênea com o Kernel expandido até quarta ordem em  $g$  na Frente de Luz na aproximação escada cruzado

onde

$${}_x K^{(4)} = \left( \frac{g^2}{16\pi^3} \right)^2 \int \frac{d^2 p_{\perp} dz \theta(1-z)}{z(x-z)(1-z-x-y)} \left( {}_x K' + {}_x K'' \right)$$

co

$${}_x K^{(4)ant} = \left( \frac{g^2}{16\pi^3} \right)^2 \int \frac{d^2 k_{\perp} dz \theta(1+z)\theta(-z)}{|z|(y+|z|)(1-|z|-x-y)(x+|z|)} \times$$

$$\frac{\theta(y+z)\theta(x+z)}{M_B^2 - \frac{w_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{y} - \frac{(K+k-p-w)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{1-|z|-x-y} + \frac{k_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{|z|} - \frac{p_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\epsilon}{x}} \times$$

$$\frac{1}{M_B^2 - \frac{(p-k)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\epsilon}{x+|z|} - \frac{(K+k-p-w)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{1-|z|-x-y} - \frac{p_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\epsilon}{x}} \times$$

$$\frac{1}{M_B^2 - \frac{(w-k)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\epsilon}{y+|z|} - \frac{(K+k-p-w)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{1-|z|-x-y} - \frac{w_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\epsilon}{y}}$$

e

$$M_B^2 - \frac{(k-p)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\epsilon}{x-z} - \frac{(K-p-k-q)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{1-z-x-y} - \frac{p_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{z} - \frac{(q-p)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\epsilon}{y-z}$$

$$\frac{1}{M_B^2 - \frac{(q-p)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\epsilon}{y-z} - \frac{(K-p-k-q)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{1-z-x-y} - \frac{k_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{x}} \times$$

**Kernel para antipartícula**

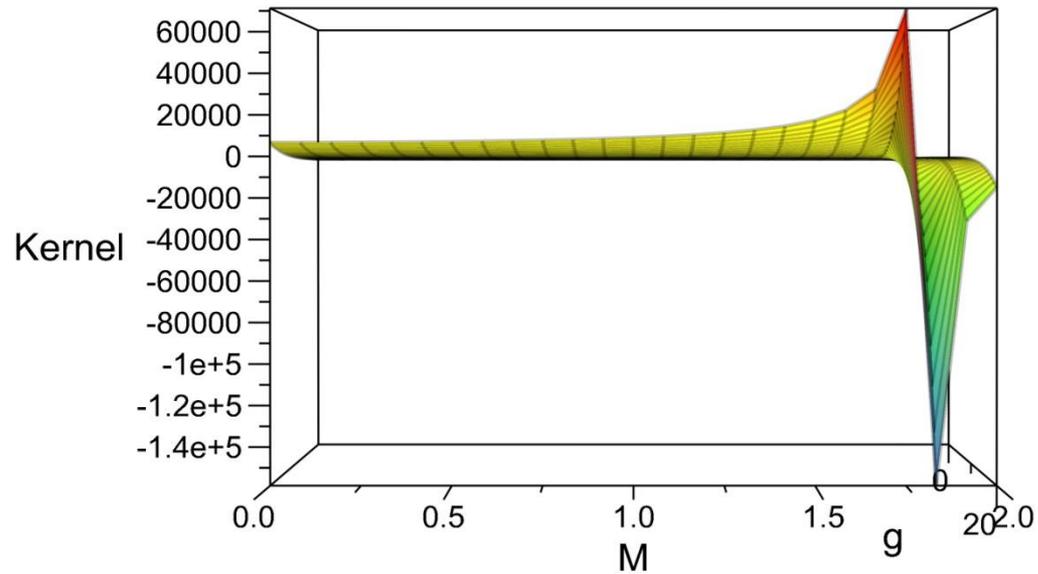
$$\left\{ \frac{1}{M_B^2 - \frac{(k-p)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\epsilon}{x-z} - \frac{(K-p-k-q)_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{1-z-x-y} - \frac{q_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\epsilon}{y}} + \right.$$

$$\left. \frac{1}{M_B^2 - \frac{(q-p)_{\perp}^2 + m_{\sigma}^2 - i\epsilon}{y-z} - \frac{q_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{1-y} - \frac{p_{\perp}^2 + m^2 - i\epsilon}{z}} \right\} +$$

$[x \leftrightarrow 1-x; z \leftrightarrow 1+z-x-y, p_{\perp} \leftrightarrow p_{\perp} \leftrightarrow (1+p-k-q)_{\perp}; y \leftrightarrow 1-y]$

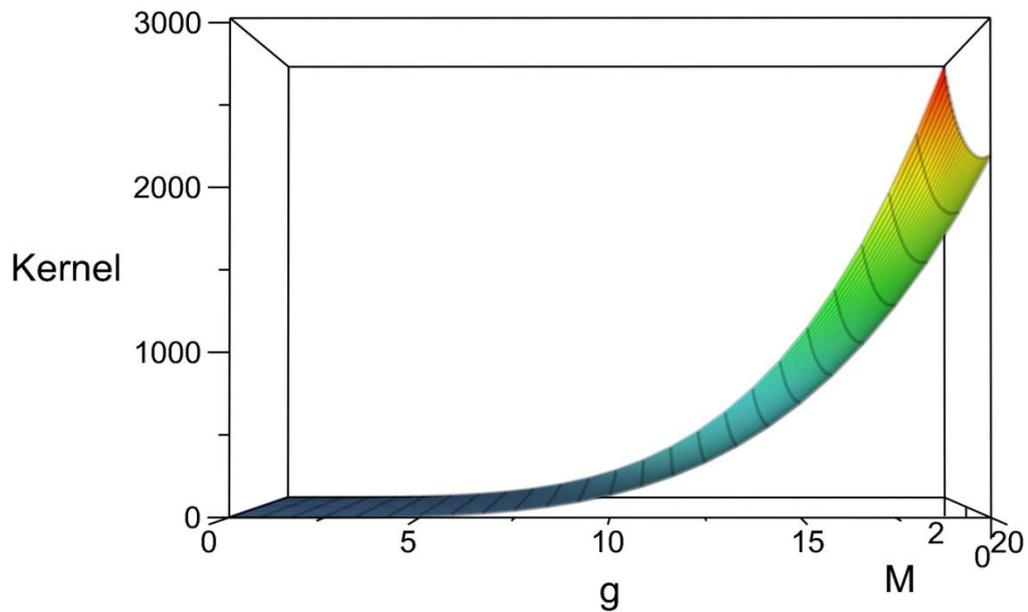
# Estado Ligado: diagrama escada cruzado

Kernel cruzado



# Estado Ligado: diagrama escada cruzado

Kernel antipartícula



# Considerações Finais:

- ✓ Obtemos a representação da partícula e antipartícula nas coordenadas da Frente de Luz.
- ✓ Os gráficos apresentados mostram as contribuições dos Kernels da equação de Bethe-Salpeter, quando fixamos os valores da constante de acoplamento e da massa do Estado Ligado, em relação a uma “faixa numérica” nos diagramas escada e escada cruzado.

***Obrigado!!!***