

# Teoria de Campos Avançada

## 1 Semestre 2004/2005

Escolha **um** dos temas a seguir propostos. Deverá escrever um pequeno texto sobre o tema que escolher e fazer uma apresentação oral do mesmo perante os colegas numa sessão a organizar em finais de Fevereiro em data a combinar. A duração da apresentação oral será no máximo de 30 minutos.

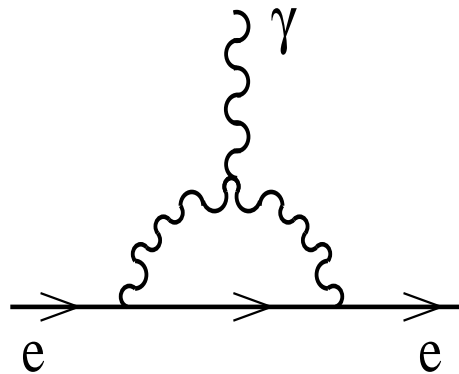
IST, 25 de Janeiro de 2005  
Jorge C. Romão

## QED numa gauge não linear

Considere QED com a condição de gauge não linear

$$F = \partial_\mu A^\mu + \frac{\lambda}{2} A_\mu A^\mu .$$

1. Escreva  $\mathcal{L}_{eff}$  e mostre que  $s\mathcal{L}_{eff} = 0$ , onde  $s$  é o operador de Slavnov.
2. Escreva as regras de Feynman para os vértices e propagadores novos. Calcule ao nível árvore  $\gamma + \gamma \rightarrow \gamma + \gamma$ . Compare com o resultado na gauge linear.
3. Calcule a polarização do vácuo a  $1-loop$ .
4. Mostre que o diagrama da figura junta potencialmente perigoso para o momento magnético anómalo do electrão não dá contribuição (seria proporcional a  $\lambda$ ).



## Polarização do vácuo em QCD

Considere a teoria que descreve as interações dos quarks com os glúons (QCD) descrita pelo Lagrangeano

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu a} + \sum_{\alpha=1}^n \bar{\psi}_i^\alpha (i\not{D} - m_\alpha)_{ij} \psi_j^\alpha$$

onde

$$\begin{aligned} F_{\mu\nu}^a &= \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c \\ (D_\mu)_{ij} &= \delta_{ij} \partial_\mu - ig \left( \frac{\lambda^a}{2} \right)_{ij} A_\mu^a . \end{aligned}$$

O índice  $\alpha = 1, 2, \dots, n$  referencia os diferentes sabores de quarks (*up, down, ..., top*). Para quantificar a teoria considere a condição de gauge

$$\mathcal{L}_{GF} = -\frac{1}{2\xi} (\partial_\mu A^{\mu a})^2 ,$$

para a qual resulta o Lagrangeano dos fantasmas

$$\mathcal{L}_G = \partial_\mu \bar{\omega}^a \partial^\mu \omega^a + g f^{abc} \partial^\mu \bar{\omega}^a A_\mu^b \omega^c$$

Para renormalizar a teoria necessitamos do seguinte Lagrangeano de contratermos:

$$\begin{aligned} \Delta\mathcal{L} &= -\frac{1}{4}(Z_3 - 1) (\partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a)^2 - (Z_4 - 1) g f^{abc} \partial_\mu A_\nu^a A^{\mu b} A^{\nu c} \\ &\quad - \frac{1}{4} g^2 (Z_5 - 1) f^{abc} f^{ade} A_\mu^b A_\nu^c A^{\mu d} A^{\nu e} + \sum_\alpha (Z_2 - 1) i \bar{\psi}_i^\alpha \gamma^\mu \partial_\mu \psi_i^\alpha \\ &\quad - \sum_\alpha m_\alpha (Z_{m_\alpha} - 1) \bar{\psi}_i^\alpha \psi_i^\alpha + (Z_1 - 1) g \sum_\alpha \bar{\psi}_i^\alpha \gamma^\mu \left( \frac{\lambda^a}{2} \right)_{ij} \psi_j^\alpha A_\mu^a \\ &\quad + (Z_6 - 1) \partial_\mu \bar{\omega}^a \partial^\mu \omega^a + (Z_7 - 1) g f^{abc} \partial^\mu \bar{\omega}^a A_\mu^b \omega^c . \end{aligned}$$

1. Verifique a expressão para  $\mathcal{L}_G$ .
2. Verifique as regras de Feynman dadas no livro.
3. Calcule a polarização do vácuo.

# Renormalização da Cromodinâmica Quântica (QCD)

Considere a teoria que descreve as interações dos quarks com os gluões (QCD) descrita pelo Lagrangeano

$$\mathcal{L}_{QCD} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^a F^{\mu\nu a} + \sum_{\alpha=1}^n \bar{\psi}_i^\alpha (i\not{D} - m_\alpha)_{ij} \psi_j^\alpha$$

onde

$$\begin{aligned} F_{\mu\nu}^a &= \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c \\ (D_\mu)_{ij} &= \delta_{ij} \partial_\mu - ig \left( \frac{\lambda^a}{2} \right)_{ij} A_\mu^a . \end{aligned}$$

O índice  $\alpha = 1, 2, \dots, n$  referencia os diferentes sabores de quarks (*up, down, ..., top*). Para quantificar a teoria considere a condição de gauge

$$\mathcal{L}_{GF} = -\frac{1}{2\xi} (\partial_\mu A^{\mu a})^2 ,$$

para a qual resulta o Lagrangeano dos fantasmas

$$\mathcal{L}_G = \partial_\mu \bar{\omega}^a \partial^\mu \omega^a + g f^{abc} \partial^\mu \bar{\omega}^a A_\mu^b \omega^c .$$

Para renormalizar a teoria necessitamos do seguinte Lagrangeano de contratermos:

$$\begin{aligned} \Delta\mathcal{L} &= -\frac{1}{4}(Z_3 - 1) (\partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a)^2 - (Z_4 - 1) g f^{abc} \partial_\mu A_\nu^a A^{\mu b} A^{\nu c} \\ &\quad - \frac{1}{4} g^2 (Z_5 - 1) f^{abc} f^{ade} A_\mu^b A_\nu^c A^{\mu d} A^{\nu e} + \sum_\alpha (Z_2 - 1) i \bar{\psi}_i^\alpha \gamma^\mu \partial_\mu \psi_i^\alpha \\ &\quad - \sum_\alpha m_\alpha (Z_{m_\alpha} - 1) \bar{\psi}_i^\alpha \psi_i^\alpha + (Z_1 - 1) g \sum_\alpha \bar{\psi}_i^\alpha \gamma^\mu \left( \frac{\lambda^a}{2} \right)_{ij} \psi_j^\alpha A_\mu^a \\ &\quad + (Z_6 - 1) \partial_\mu \bar{\omega}^a \partial^\mu \omega^a + (Z_7 - 1) g f^{abc} \partial^\mu \bar{\omega}^a A_\mu^b \omega^c . \end{aligned}$$

1. Mostre que se devem verificar as relações

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_4}{Z_3} = \frac{Z_7}{Z_6} = \frac{\sqrt{Z_5}}{\sqrt{Z_3}}$$

2. Calcule  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_6$  e  $Z_7$  usando subtração mínima (MS), isto é calcule só a parte divergente dos diagramas. Verifique explicitamente que  $Z_1 Z_6 = Z_2 Z_7$ .
3. Calcule a contribuição dos fermiões para  $Z_4$  e  $Z_5$ . Mostre que estão de acordo com as relações anteriores.

# Renormalização da Electrodinâmica Escalar

Considere a Electrodinâmica Escalar, isto é a teoria da interacção de fótons com partículas escalares carregadas.

1. Escreva o Lagrangeano para esta teoria.
2. Deduza as regras de Feynman.
3. Identifique os diagramas divergentes.
4. Faça a renormalização das auto energias do fóton e da partícula carregada.

**Nota.** Para este trabalho é conveniente consultar a versão do Apêndice do livro de Introdução à Teoria do Campo que pode ser obtida por no seguinte endereço:

<http://porthos.ist.utl.pt/Public/textos/tc1apendice.ps.gz>.

Deve/pode também consultar o texto em

<http://porthos.ist.utl.pt/OneLoop/one-loop.ps>.

# Renormalização de QED Supersimétrica

Considere a QED supersimétrica, isto é a teoria da interacção de fótons com electrões e dos seus parceiros supersimétricos, fotino e selectrões.

1. Escreva o Lagrangeano para esta teoria.
2. Deduza as regras de Feynman.
3. Identifique os diagramas divergentes.
4. Calcule a auto energia do selectrão e mostre que as divergências quadráticas cancelam.

**Nota.** Para este trabalho é conveniente consultar a versão do Apêndice do livro de Introdução à Teoria do Campo que pode ser obtida por no seguinte endereço:

<http://porthos.ist.utl.pt/Public/textos/tc1apendice.ps.gz>.

Deve/pode também consultar o texto em

<http://porthos.ist.utl.pt/OneLoop/one-loop.ps>.

# Renormalização do Modelo de Wess-Zumino

Considere o modelo de Wess e Zumino descrito pelo Lagrangiano seguinte

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \frac{1}{2}\partial_\mu A\partial^\mu A + \frac{1}{2}\partial_\mu B\partial^\mu B + \frac{i}{2}\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - \frac{1}{2}m^2A^2 - \frac{1}{2}m^2B^2 - \frac{1}{2}m\bar{\psi}\psi \\ & - \frac{\lambda^2}{4}(A^2 + B^2)^2 - \frac{m\lambda}{\sqrt{2}}A(A^2 + B^2) - \frac{\lambda}{\sqrt{2}}A\bar{\psi}\psi + \frac{i\lambda}{\sqrt{2}}B\bar{\psi}\gamma_5\psi \end{aligned} \quad (1)$$

onde o fermião  $\psi$  é uma partícula de Majorana e  $A$  e  $B$  são campos escalares reais.

1. Deduza as regras de Feynman (não esquecer que o fermião é de Majorana).
2. Identifique os diagramas divergentes.
3. Calcule a auto energia do campo escalar e mostre que as divergências quadráticas cancelam.
4. Para renormalizar o modelo é necessário um lagrangeano de contratermos da forma geral

$$\begin{aligned} \Delta\mathcal{L} = & \frac{1}{2}\delta Z_A\partial_\mu A\partial^\mu A + \frac{1}{2}\delta Z_B\partial_\mu B\partial^\mu B + \frac{i}{2}\delta Z_\psi\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi \\ & - \frac{1}{2}m^2(2\delta Z_m + \delta Z_A)A^2 - \frac{1}{2}m^2(2\delta Z_m + \delta Z_B)B^2 - \frac{1}{2}m(\delta Z_m + \delta Z_\psi)\bar{\psi}\psi \\ & - \frac{\lambda^2}{4}(2\delta Z_\lambda + 2\delta Z_A)A^4 - \frac{\lambda^2}{4}(2\delta Z_\lambda + 2\delta Z_B)B^4 \\ & - 2\frac{\lambda^2}{4}(2\delta Z_\lambda + \delta Z_A + \delta Z_B)A^2B^2 \\ & - \frac{m\lambda}{\sqrt{2}}(\delta Z_m + \delta Z_\lambda + \frac{3}{2}\delta Z_A)A^3 - \frac{m\lambda}{\sqrt{2}}(\delta Z_m + \delta Z_\lambda + \frac{1}{2}\delta Z_A + \delta Z_B)AB^2 \\ & - \frac{\lambda}{\sqrt{2}}(\delta Z_\lambda + \frac{1}{2}\delta Z_A + \delta Z_\psi)A\bar{\psi}\psi + \frac{i\lambda}{\sqrt{2}}(\delta Z_\lambda + \frac{1}{2}\delta Z_B + \delta Z_\psi)B\bar{\psi}\gamma_5\psi \end{aligned}$$

Mostre que as 6 constantes de renormalização estão todas relacionadas, só há uma independente, uma renormalização da função de onda. Para isso calcule todas as constantes em  $MS$  (subtração mínima).

**Nota.** Para este trabalho é conveniente consultar a versão do Apêndice do livro de Introdução à Teoria do Campo que pode ser obtida por no seguinte endereço:

<http://porthos.ist.utl.pt/Public/textos/tc1apendice.ps.gz>.

Deve/pode também consultar o texto em

<http://porthos.ist.utl.pt/OneLoop/one-loop.ps>.