Liberdade assintótica na cromodinâmica quântica

Emmanuel Gräve de Oliveira

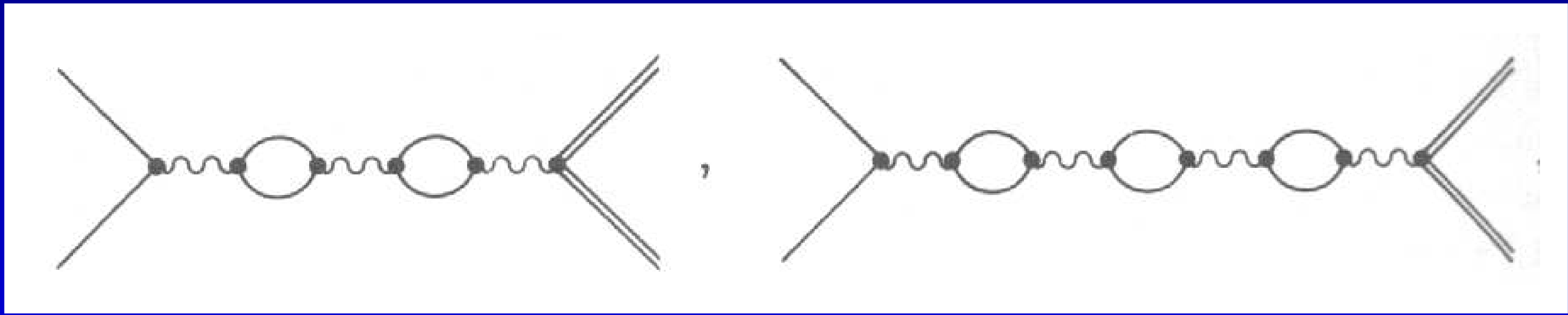
Grupo de Fenomenologia de Partículas de Altas Energias
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre
Abril de 2006

Liberdade assintótica

- Liberdade assintótica é a propriedade de algumas teorias de calibre nas quais a interação entre as partículas para distâncias pequenas (ou altas energias) se torna arbitrariamente pequena.
- David Gross, Frank Wilczek e David Politzer, em 1973, mostraram que a cromodinâmica quântica apresenta esta propriedade.
- Esta demonstração rendeu um prêmio Nobel.

Eletrodinâmica quântica

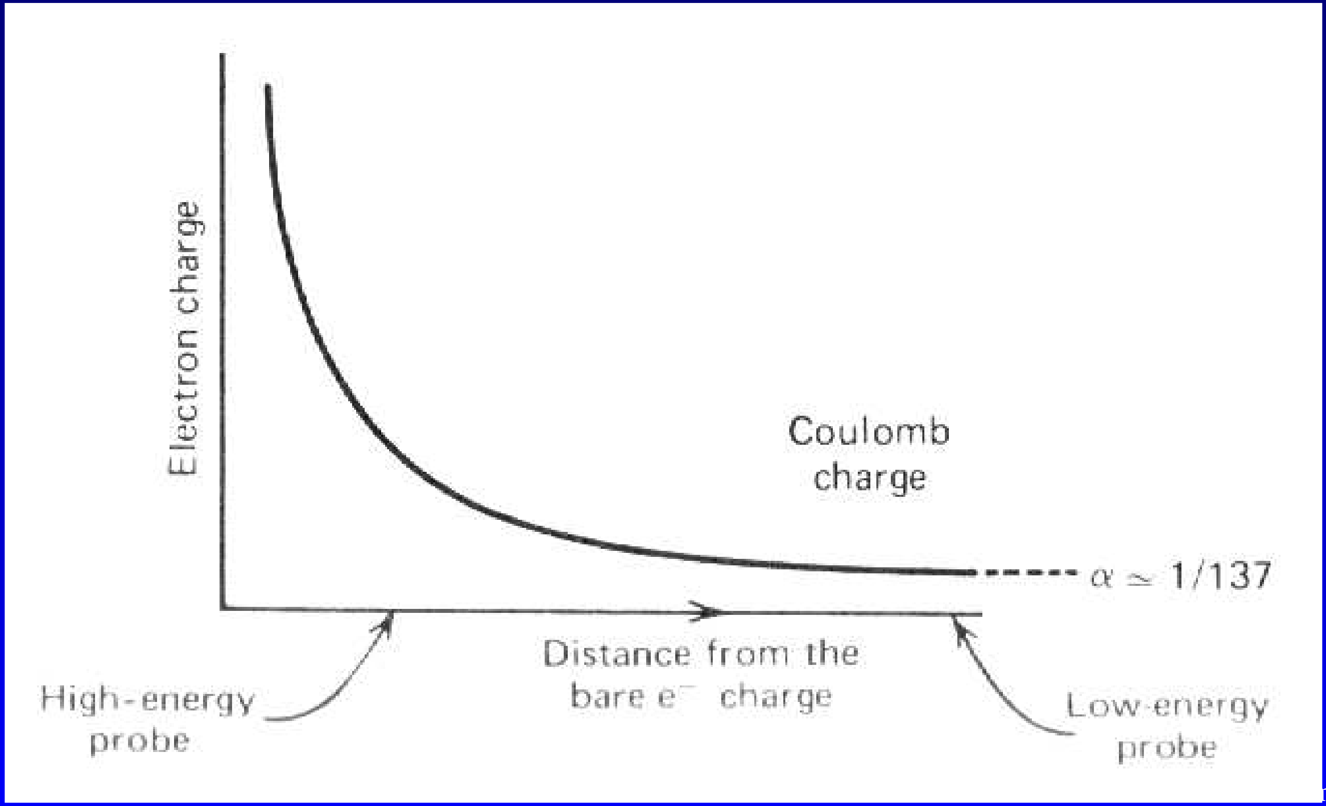
- Antes de começar com a cromodinâmica quântica, será visto como o parâmetro de acoplamento da QED varia.
- O que precisa ser feito é calcular a polarização do vácuo, que está relacionada com os seguintes diagramas:



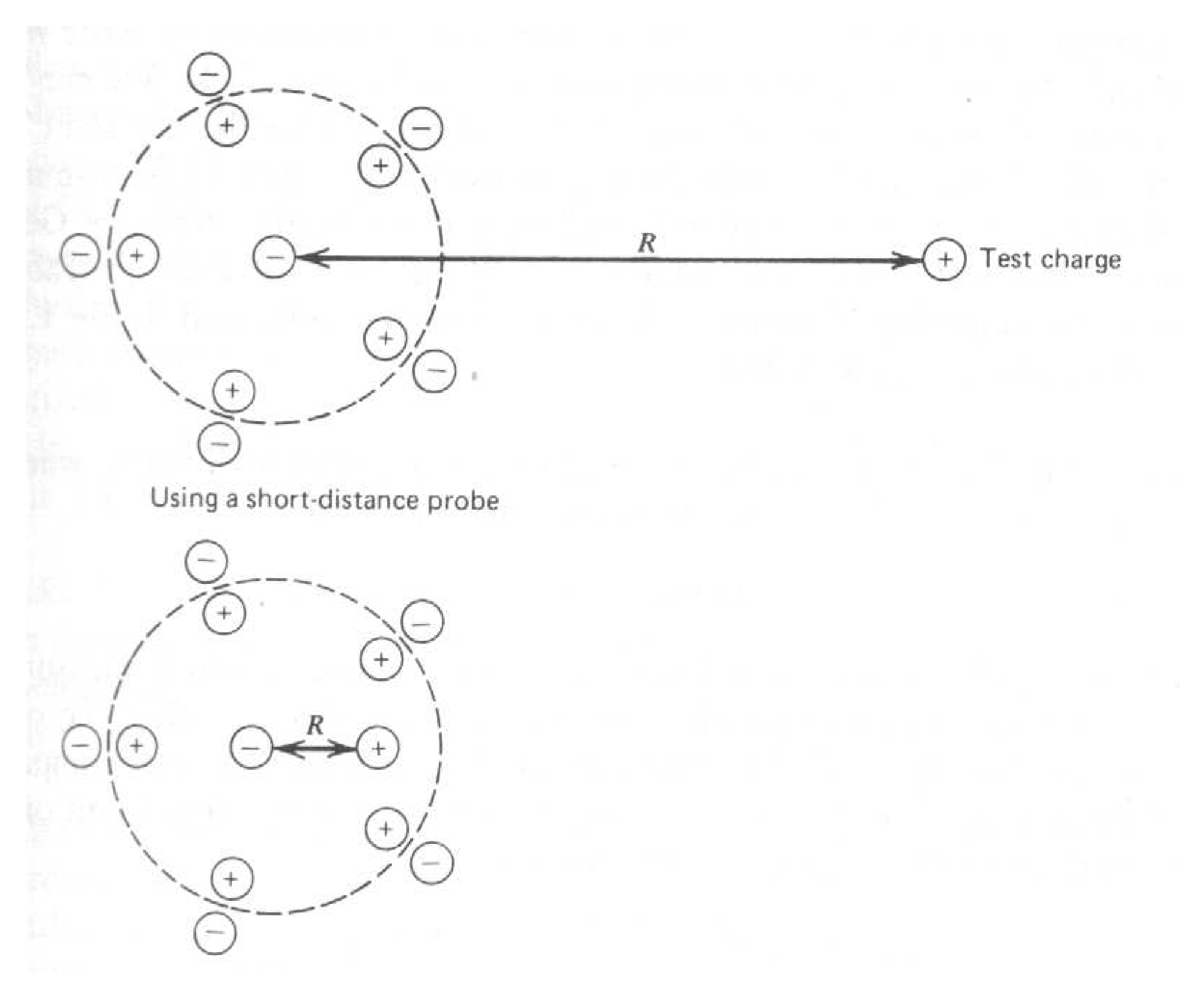
Parâmetro de acopl. da QED

- O resultado é:

$$\alpha_{\text{QED}} = \frac{\alpha}{1 - (\alpha/3\pi)\ln Q^2/m_{\text{e}}^2} \tag{1}$$



Atenuação da carga



Polo de Landau

- A QED apresentam um polo de Landau:

$$\alpha_{\mathrm{QED}} = \frac{\alpha}{1 - (\alpha/3\pi)\ln Q^2/m_{\mathrm{e}}^2} \tag{2}$$

- Isto significa que a teoria não pode ser aplicada para uma energia suficientemente alta, sob a pena de divergência da constante de acoplamento.

Interação entre quarks

- Os hádrons interagem fortemente: o que mantém os prótons junto no núcleo do átomo é a força forte residual.
- Além disso, os quarks estão confinados em hádrons, ou seja, uma interação com grande magnitude deve estar envolvida.
- Paradoxalmente, para altas energias, os quarks parecem estar livres dentro dos hádrons, como no modelo de pártons.

Lagrangiana da cromodinâmica quântica

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}\mathcal{F}^a_{\mu\nu}\mathcal{F}^{a\mu\nu} + \overline{\psi}^i(i\gamma^\mu D^{ij}_\mu - m\delta^{ij})\psi^j + \cdots \quad (3)$$

- $\mathcal{F}$ é o tensor de campo de glúons;
- ψ é o campo de quarks;
- γ_μ são as matrizes de Dirac;
- D^μ é a derivada covariante;
- m é a massa.

$$\mathcal{F}^a_{\mu\nu} = \partial_\mu A^a_\nu - \partial_\nu A^a_\mu + g f^{abc} A^b_\mu A^c_\nu \quad (4)$$

Divergências e renormalização

- Quando as regras de Feynman são aplicadas, divergências parecem nos cálculos.
- As divergências são removidas por meio da renormalização para que se obtenha um resultado finito.

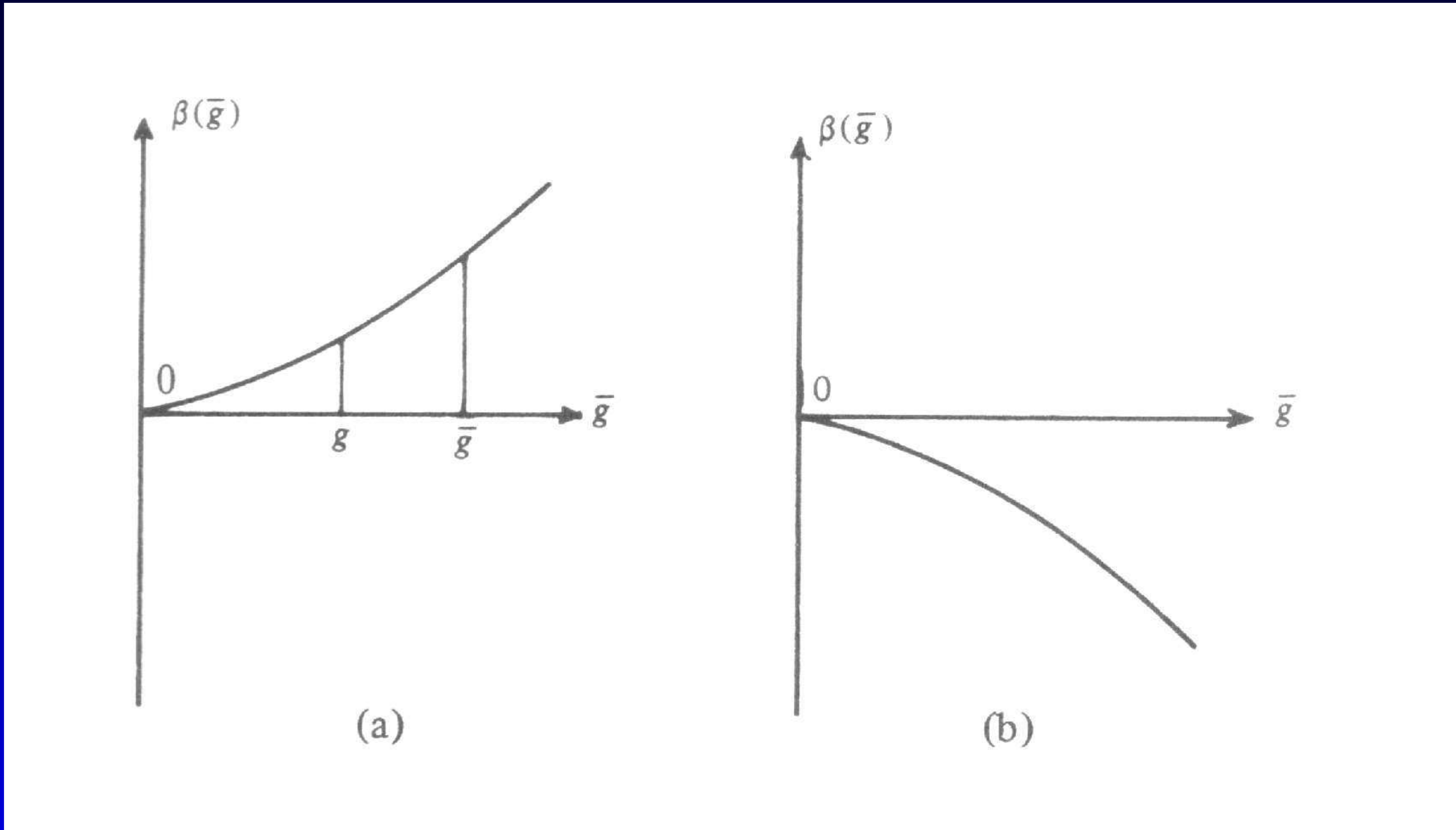
$$A^a_\mu = Z_3^{1/2} A^a_{r\mu}, \qquad \psi = Z_2^{1/2}\psi, \qquad g = Z_g g \tag{5}$$

Grupo de renormalização

- O processo de renormalização introduz a escala de renormalização que está relacionada com o momentum característico da interação.
- As transformações que levam de uma escala a outra compõem o grupo de renormalização.
- Com a variação da escala de renormalização, a constante de acoplamento vira um parâmetro de acoplamento que *corre* com a escala.
- Esta variação é determinada pela função:

$$\beta = \mu \frac{\partial g_R}{\partial \mu} \tag{6}$$

Análise de sinal



David Gross e Frank Wilczek

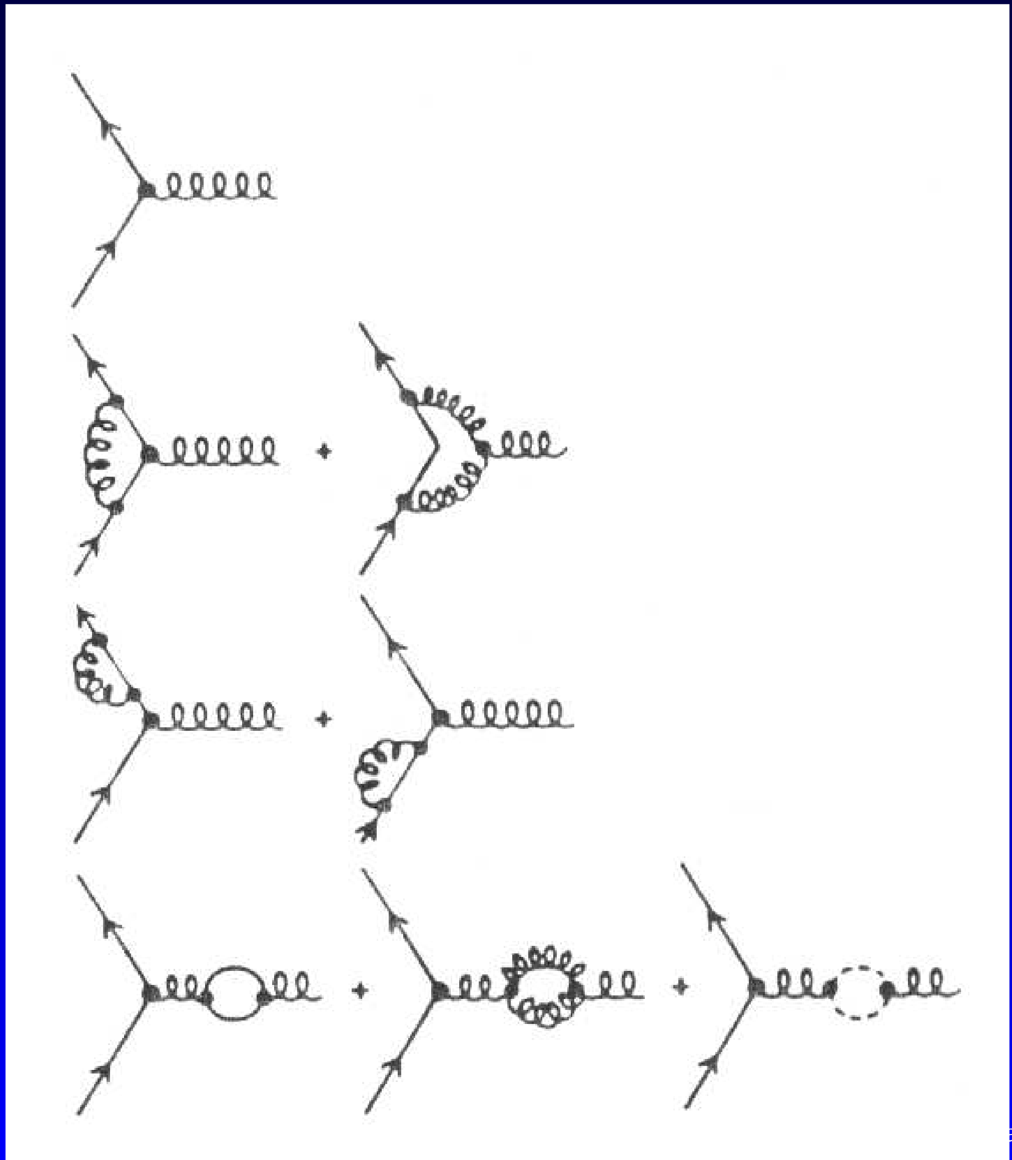
- O plano inicialmente era provar que as teorias de Yang-Mills não poderiam explicar a liberdade assintótica.
- O plano deu certo para teorias abelianas.
- Contudo, para teorias não abelianas, não funcionou. Em linhas gerais não era possível provar o proposto.
- Isto levou ao cálculo da função beta, que resultou na liberdade assintótica. Inicialmente, o sinal é calculado erroneamente, mas na hora de passar a limpo o erro é descoberto.

David Politzer

- Contribuições de ’t Hooft e Veltman para as teorias de Yang-Mills (principalmente, em 1971, o desenvolvimento da regularização dimensional).
- O orientador Sidney Coleman entra em um ano sabático.
- Politzer calcula a função beta e encontra um sinal de menos. Quando avisa o seu orientador, este diz que o cálculo está errado, em contato com Gross.
- Politzer refaz todos os cálculos e chega no mesmo resultado.

Parâmetro de acopl. da QCD

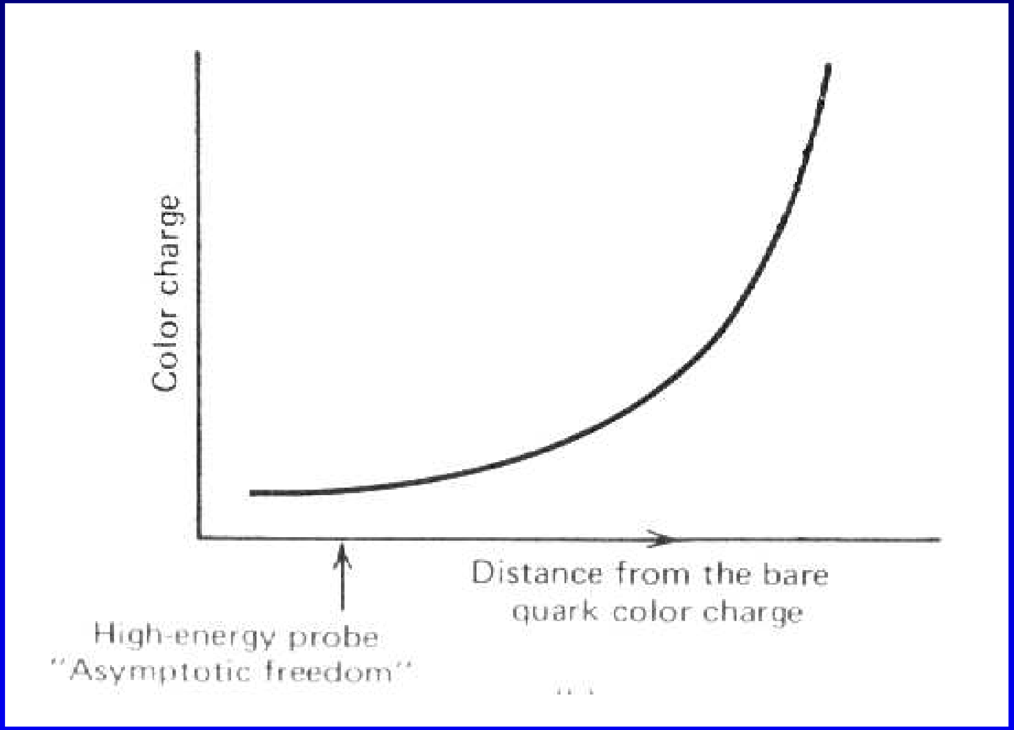
Diagramas considerados:



Parâmetro de acopl. da QCD

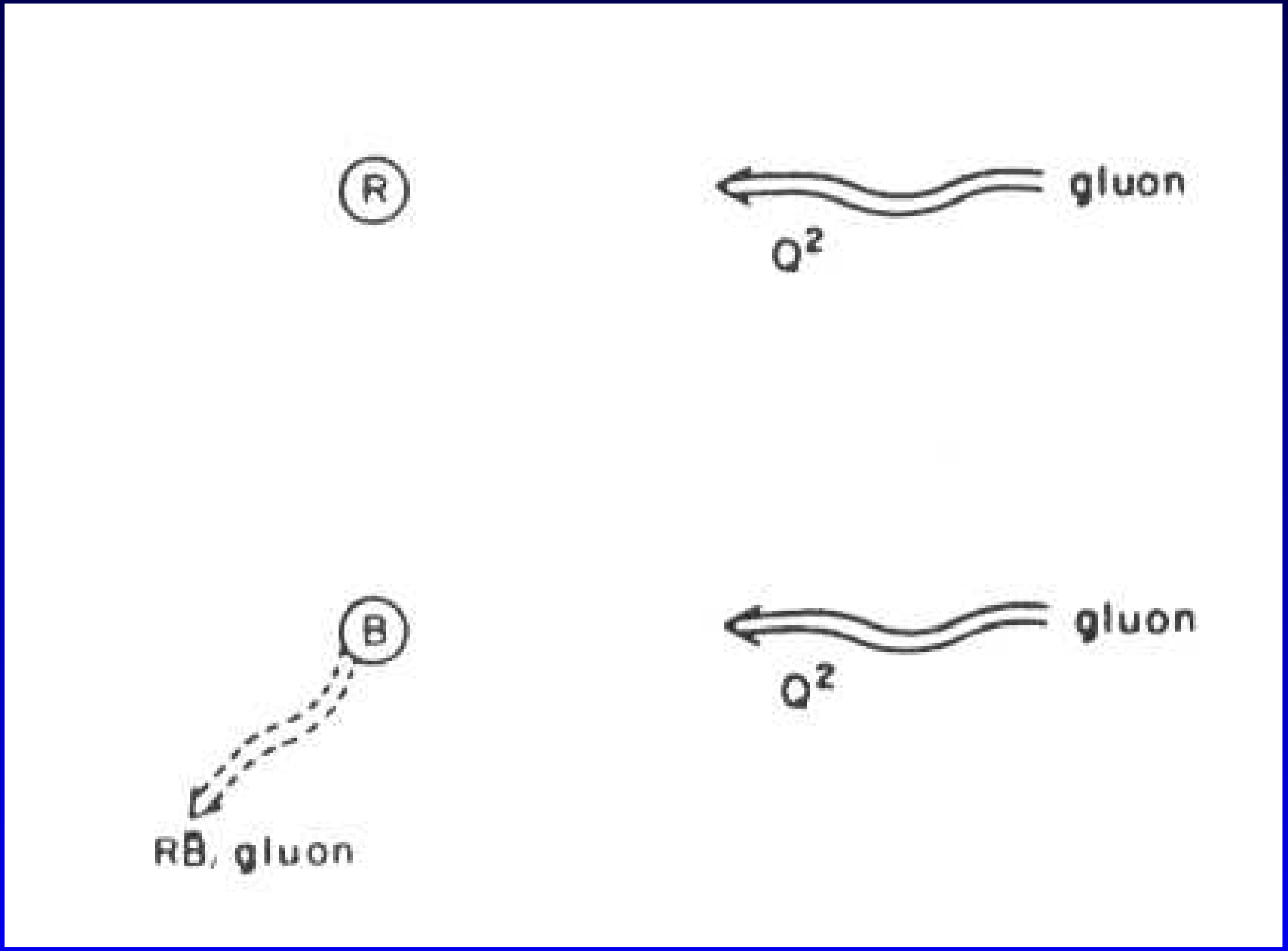
- O resultado é:

$$\alpha_{\mathrm{QCD}} = \frac{12\pi}{(33 - 2n_f)\ln Q^2/\Lambda^2} \tag{7}$$



Camuflagem

Como os glúons possuem cor, eles podem espalhar a cor das partículas:



Paramagnetismo

- Classicamente, o paramagnetismo não é possível.
- Já que existe spin, na mecânica quântica este fenômeno é observado.
- Os glúons virtuais, com spin 1, podem se alinhar (magneticamente) com o campo de cor e o intensificar.
- Assim, o ao invés de atenuar (como na QED), as contribuições virtuais aumentam a intensidade do campo.

Conclusão

- A liberdade assintótica calculada teoricamente e os experimentos concordaram entre si.
- A liberdade assintótica tornou válido o cálculo perturbativo na cromodinâmica quântica.
- A liberdade assintótica mostrou um caminho para resolver os problemas relacionados com o polo de Landau.

Referências

- H. David Politzer, *The Dilemma of Attribution*, <http://www.theory.caltech.edu/people/politzer/>.
- David J. Gross, *Twenty Five Years of Asymptotic Freedom*, hep-th/9809060.
- Taizo Muta, *Foundations of Quantum Chromodynamics*: An Introduction to Pertubative Methods in Gauge Theories, World Scientific.