ENRICO BERTUZZO (DFMA-IFUSP)

UMA INTRODUÇÃO À FÍSICA DE PARTÍCULAS

PLANO DO CURSO

- Aula 1- Uma história da Física de Partículas (parte 1: 1897-1936)
- Aula 2 - Uma história da Física de Partículas (parte 2: 1936-1964)
- Aula 3 - Introdução à teoria quântica de campos
- Aula 4 - Modelo Padrão: previsões e confirmações
- Aula 5 - Problemas do Modelo Padrão

LEMBRETE: O QUE NÃO ERA CLARO

- Como protons e neutrons estão juntos no núcleo?
- Descrição quântica do fóton?
- O neutrino existe
- Assim como o mu ... que existem outras pa

Precisamos:

1. Descrição clássica de um campo
2. Quantização

Por quê?

Fóton = quanto de luz (Planck, Einstein)

Luz = onda eletromagnética

TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

Todos os fenômenos eletromagnéticos podem ser descritos usando as EQUAÇÕES DE MAXWELL

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\varepsilon_0 \qquad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial t \qquad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \partial \mathbf{E}/\partial t$$

$\mathbf{E}$ = campo elétrico

$\mathbf{B}$ = campo magnético

TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

$\mathbf{E}$ = campo elétrico

$\mathbf{B}$ = campo magnético

$\mathbf{E}(t, x, y, z)$

$\mathbf{B}(t, x, y, z)$

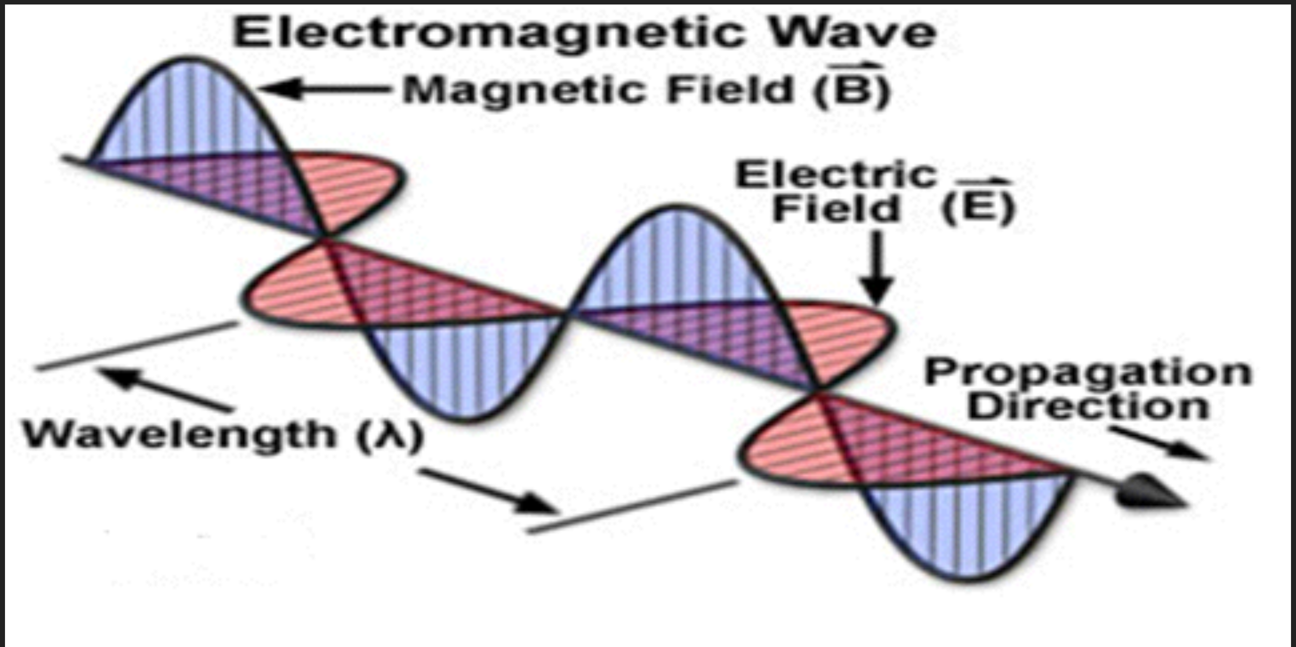
un vetor por todos os pontos do espaço e todos os instantes de tempo

$\boxed{\text{CAMPO VETORIAL}}$

TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

Solução particular das eq. de Maxwell

ONDAS ELETROMAGNÉTICAS



TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

A ideia de campo é mais abstrata do que a ideia de partícula que usamos na mecânica de Newton. Apesar disso, podemos definir o MOMENTO e a ENERGIA de um campo, e escrever EQUAÇÕES DE MOVIMENTO

Eq. movimento partícula clássica $\longrightarrow$ $x(t)$ (trajetória)

Eq. movimento campo $\longrightarrow$ Campo em função de tempo e espaço

TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

Eq. de Maxwell $\longleftrightarrow$ Eq. do movimento campo eletromagnético

Existem dois objetos úteis para calcular as eq. do movimento

$$\mathcal{L} = E_{kin} - V$$

Lagrangiana

$$\mathcal{H} = E_{kin} + V$$

Hamiltoniana

EQ. MOVIMENTO

TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

Ferramenta fundamental: decomposição de Fourier

$$\mathbf{E} = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \left(\varepsilon_{\mathbf{p}} a_{\mathbf{p}} e^{-ipx} + \varepsilon^*_{\mathbf{p}} a^\dagger_{\mathbf{p}} e^{ipx}\right)$$

+ análogo para o campo magnético

No nosso caso, útil pois permite de escrever a energia do campo EM de uma forma muito simples:

$$\mathcal{H} = \int d^3x \left(\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2\right) = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} E_{\mathbf{p}} \left(a^\dagger_{\mathbf{p}} a_{\mathbf{p}} + \ldots\right)$$

TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

$$\mathcal{H} = \int d^3x \left(\mathbf{E}^2 + \mathbf{B}^2\right) = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} E_{\mathbf{p}} \left(a^\dagger_{\mathbf{p}} a_{\mathbf{p}} + \dots\right)$$

Truque: definindo

$$a \equiv \sqrt{\frac{E_{\mathbf{p}}}{2}}x + \frac{i}{\sqrt{2E_{\mathbf{p}}}}p \qquad a^\dagger \equiv \sqrt{\frac{E_{\mathbf{p}}}{2}}x - \frac{i}{\sqrt{2E_{\mathbf{p}}}}p$$

obtemos

$$\boxed{\mathcal{H} = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \left(\frac{p^2}{2} + \frac{E_{\mathbf{p}}^2 x^2}{2}\right)}$$

TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

$$\boxed{\mathcal{H} = \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \left(\frac{p^2}{2} + \frac{E_{\mathbf{p}}^2 x^2}{2} \right)}$$

Lembramos que $\mathcal{H} = E_{kin} + V$

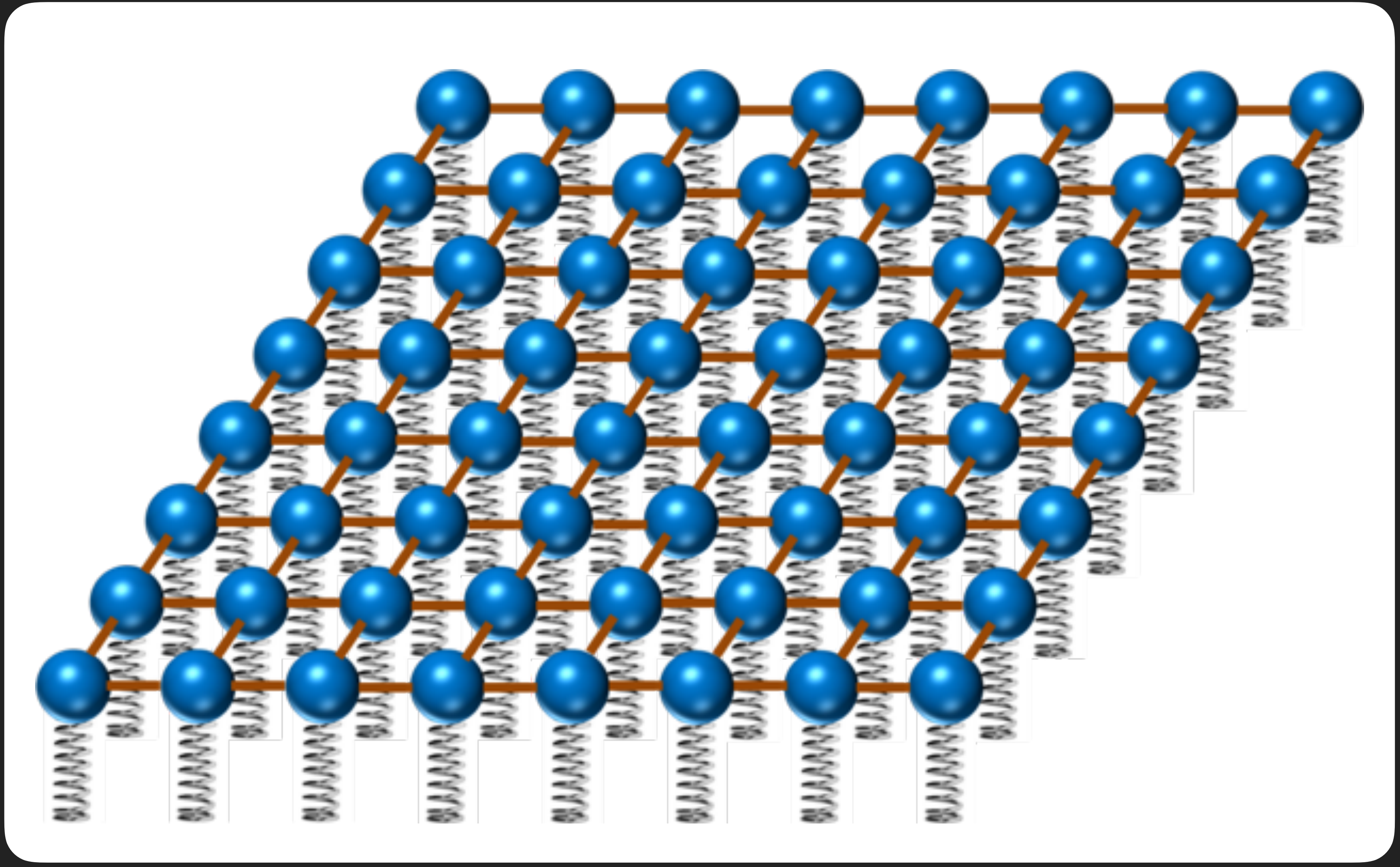
Já conhecemos um sistema cuja energia é da forma achada

$$E_{kin} = \frac{p^2}{2}$$ quando m=1

$$V = \frac{1}{2}kx^2$$ oscilador harmônico (mola) $(k = E_{\mathbf{p}}^2)$

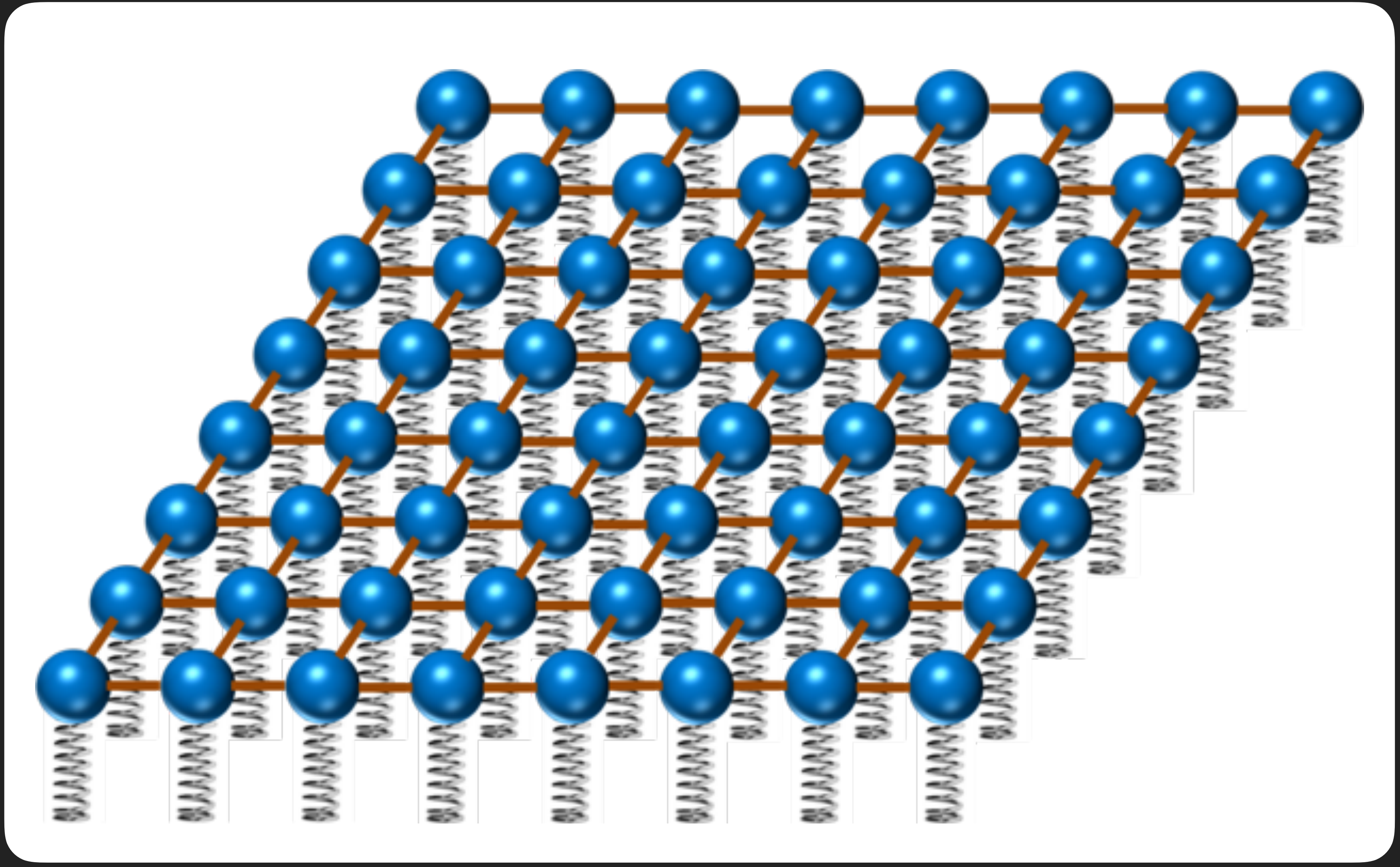
TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

Campo clássico = conjunto de osciladores harmônicos



TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

Campo quântico = quantização dos osciladores harmônicos

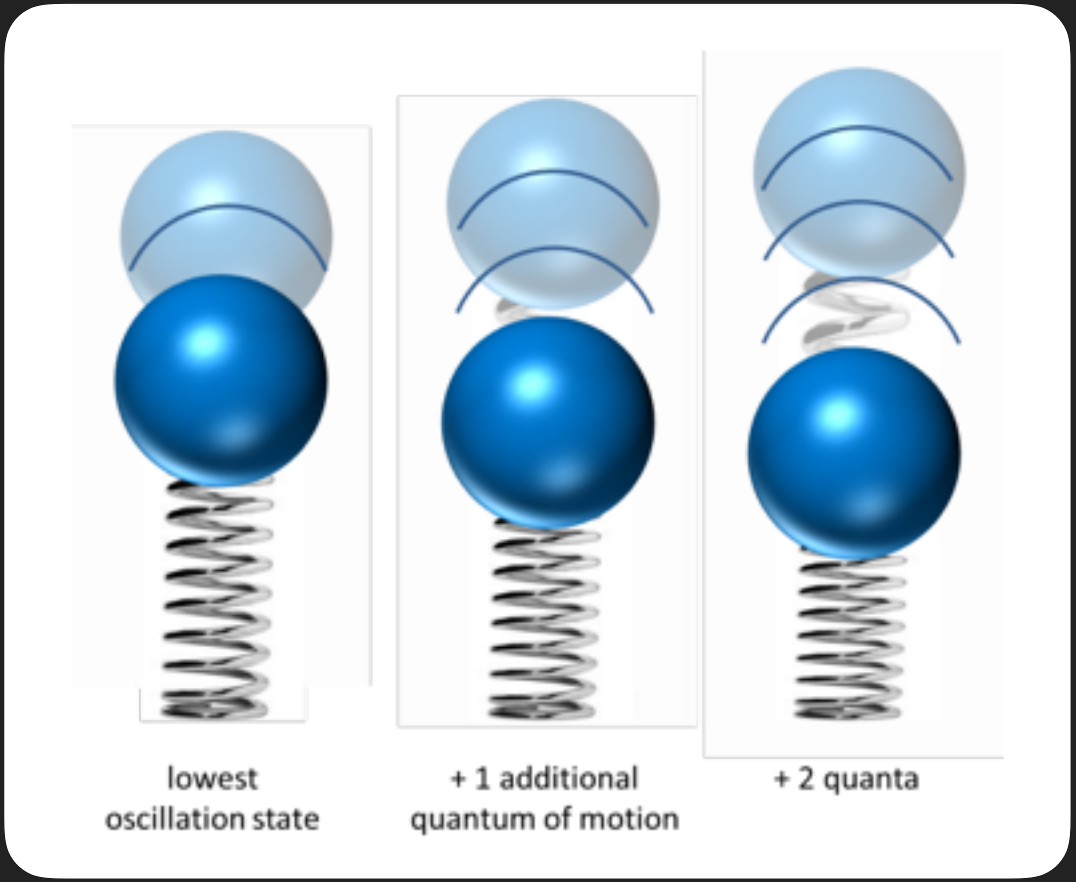


TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

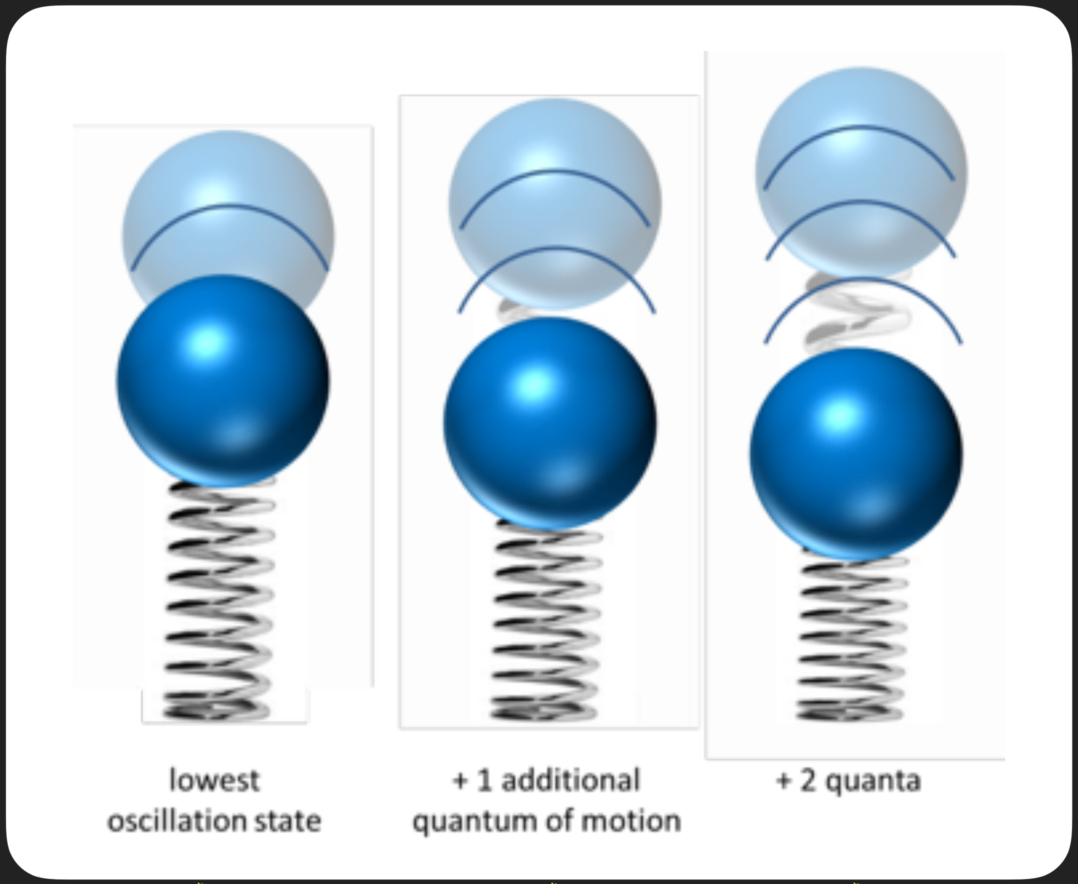
Campo quântico = quantização dos osciladores harmônicos

Propriedades:

1. oscilador harmônico quântico nunca parado
2. amplitude de oscilação discreta, não contínua



TEORIA DE CAMPOS: ELETROMAGNETISMO

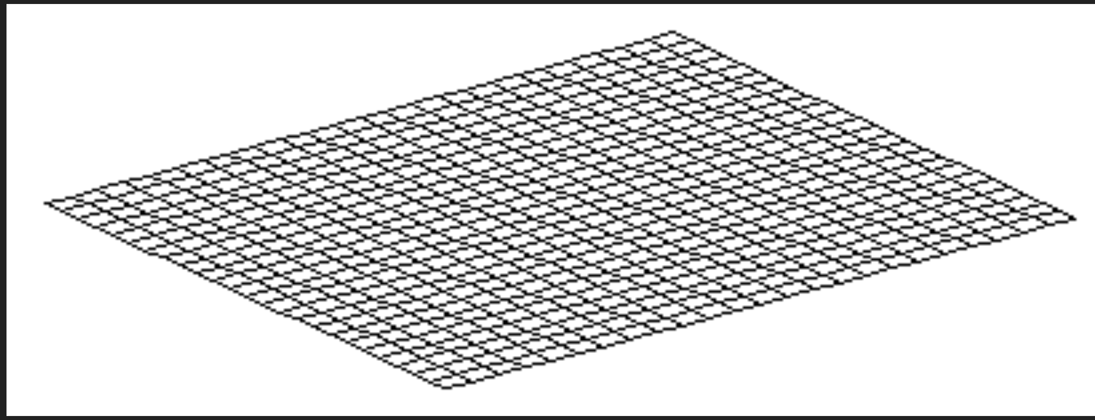


Vácuo

1 partícula

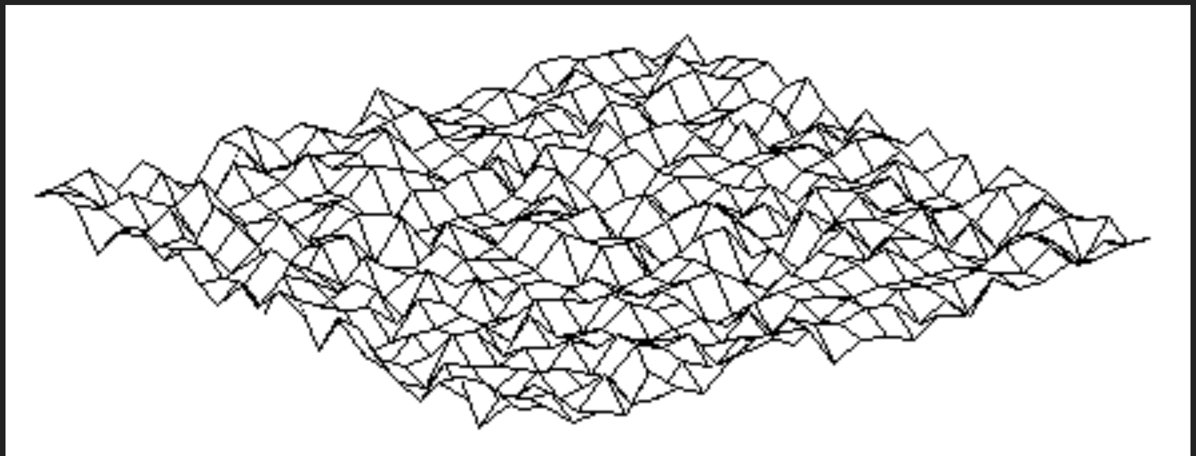
2 partículas

O VACUO QUÂNTICO: UM LUGAR INTERESSANTE



Campo clássico

Estado com menor energia



Campo quântico

Estado com menor energia

O ELÉTRON QUÂNTICO

Assim como todas as partículas, um elétron é a propagação de uma onda (nos osciladores harmônicos) com energia correspondente ao primeiro modo de oscilação

TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS

As regras de interação entre diferentes partículas (= diferentes campos) são descritas em forma compacta na Lagrangiana

QED

$$\mathcal{L} = \boxed{\overline{\psi}_e \gamma^\mu \partial_\mu \psi_e - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}} - \boxed{m_e \overline{\psi}_e \psi_e} - \boxed{e A_\mu \overline{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e}$$

Energia cinética

Massa

Interação fóton-elétron

ψ_e = campo do elétron

A_μ = campo do fóton

TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS

$$\mathcal{L} = \overline{\psi}_e \gamma^\mu \partial_\mu \psi_e - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - m_e \overline{\psi}_e \psi_e - e A_\mu \overline{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e$$

Há um jeito gráfico de escrever as interações entre campos

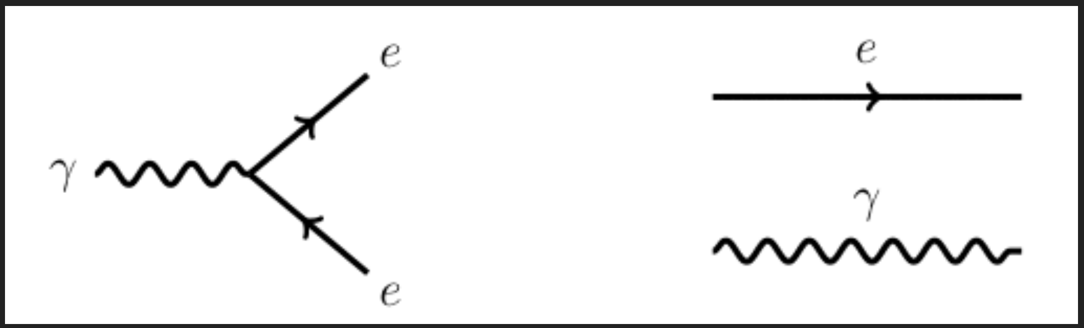
QED

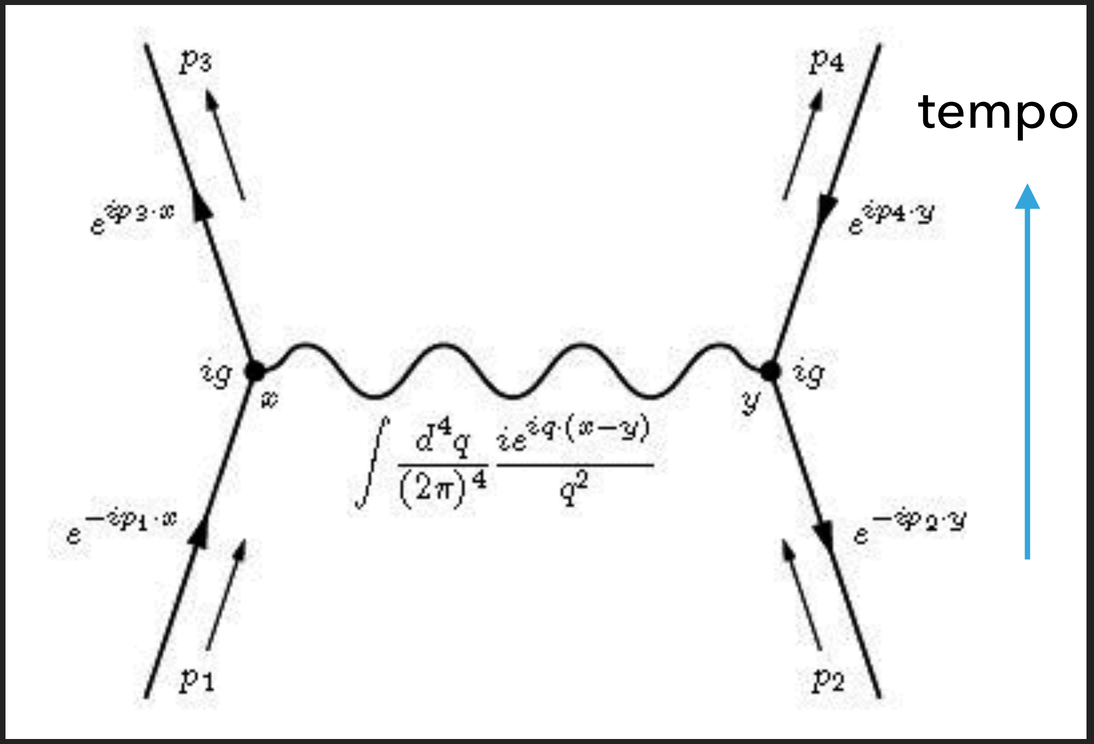
$\boxed{\text{DIAGRAMAS DE FEYNMAN}}$

TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS

$$\mathcal{L} = \overline{\psi}_e \gamma^\mu \partial_\mu \psi_e - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - m_e \overline{\psi}_e \psi_e - e A_\mu \overline{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e$$

Exemplo: interação de Coulomb





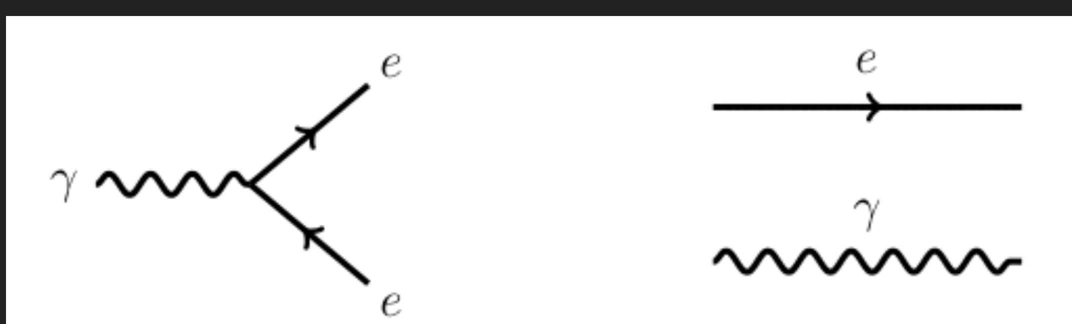
QED

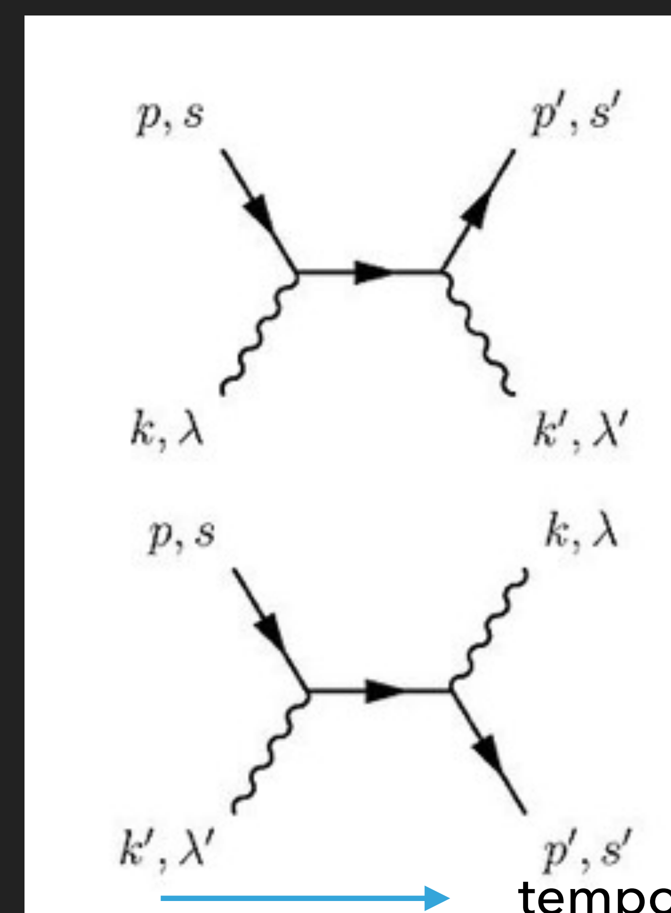
Força elétrica = troca de fótons

TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS

$$\mathcal{L} = \overline{\psi}_e \gamma^\mu \partial_\mu \psi_e - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - m_e \overline{\psi}_e \psi_e - e A_\mu \overline{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e$$

Exemplo 2 : efeito fotoelétrico (scattering Compton)





QED

FÍSICA DE PARTÍCULAS

Programa:

1. Achar a Lagrangiana da teoria
2. Calcular quantidades que podem ser medidas em experimentos
3. Usar algumas medidas para fixar os parâmetros (exemplo: massa do elétron, carga elétrica)
4. Prever outras quantidades que possam ser medidas
5. Comparar com os experimentos

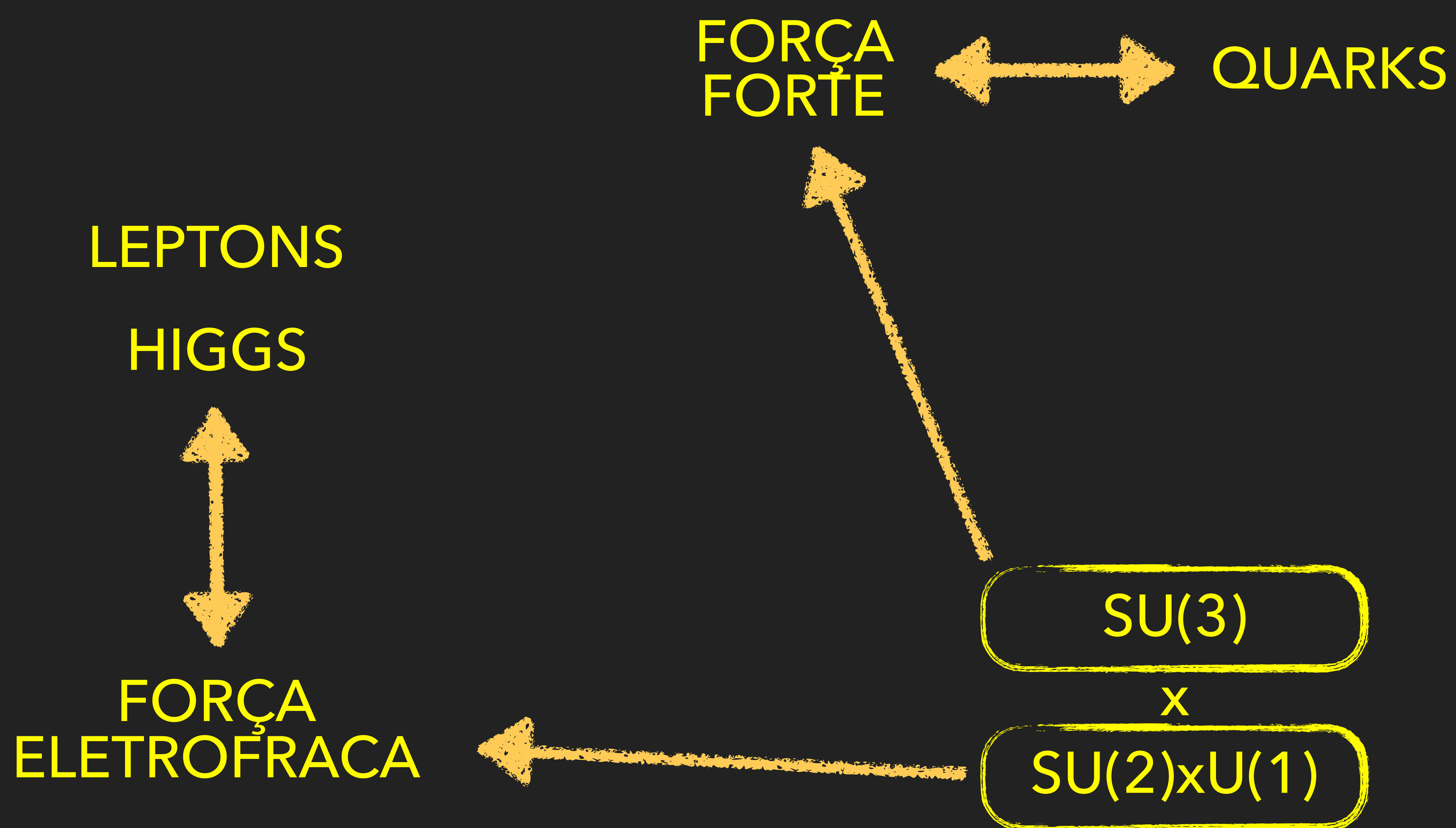
ÚLTIMO INGREDIENTE FALTANTE: SIMETRIAS INTERNAS

Como no caso dos quarks e da simetria interna SU(3), agora vamos usar as simetrias internas para distinguir uma partícula das outras

PARTÍCULA ⟷ campo que obedece a certas regras de transformação de um set de simetrias internas

SIMETRIAS INTERNAS MODELO PADRÃO ⟶ SU(3) x SU(2)xU(1)

ÚLTIMO INGREDIENTE FALTANTE: SIMETRIAS INTERNAS



ÚLTIMO INGREDIENTE FALTANTE: SIMETRIAS INTERNAS

Regras:

1. Estabelecer a simetria interna
2. Escrever a lagrangiana mais geral invariante para transformações das simetrias internas
3. Regras e diagramas de Feynman
4. Observáveis

ÚLTIMO INGREDIENTE FALTANTE: SIMETRIAS INTERNAS

Regras:

1. Estabelecer a simetria interna
2. Escrever a lagrangiana mais geral invariante para transformações das simetrias internas
3. Regras e diagramas
4. Observáveis

Todas as vezes que uma derivada aparece (energia cinética do campo), precisamos modificar a expressão para deixar a lagrangiana invariante:

$$\partial_\mu \to \partial_\mu + igV_\mu$$

V = campo de gauge

ÚLTIMO INGREDIENTE FALTANTE: SIMETRIAS INTERNAS

Já vimos um exemplo: QED (campo de gauge = fóton)

$$\mathcal{L} = \overline{\psi}_e \gamma^\mu \partial_\mu \psi_e - m_e \overline{\psi}_e \psi_e$$

$$\Big\downarrow \quad \partial_\mu \to \partial_\mu + ieA_\mu$$

$$\mathcal{L} = \overline{\psi}_e \gamma^\mu \partial_\mu \psi_e - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} - m_e \overline{\psi}_e \psi_e - eA_\mu \overline{\psi}_e \gamma^\mu \psi_e$$

Simetria interna: U(1) $\qquad \psi_e \to e^{i\alpha(x)} \psi_e$