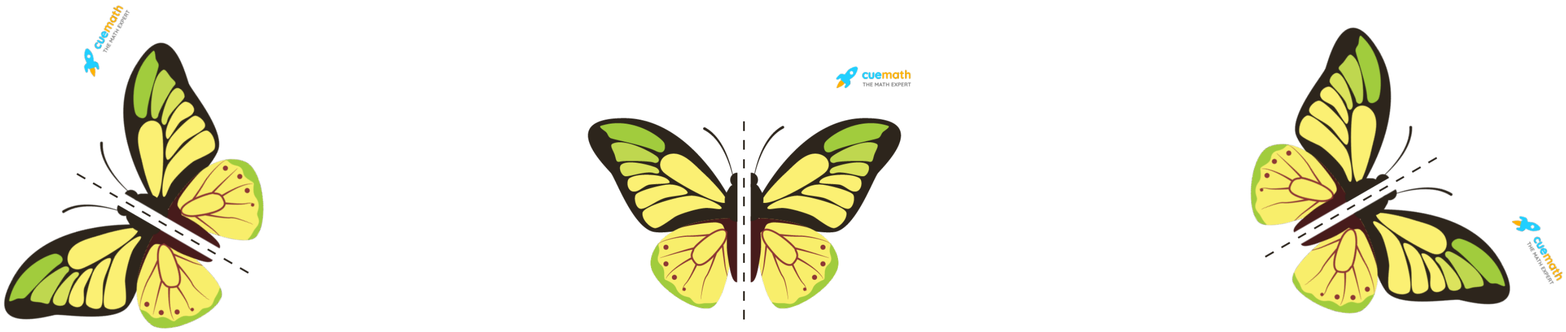
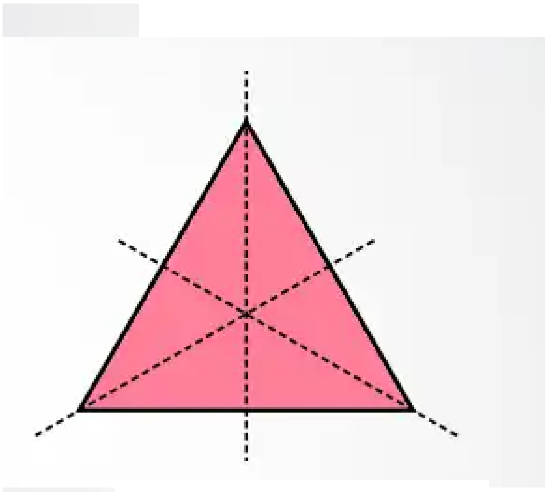
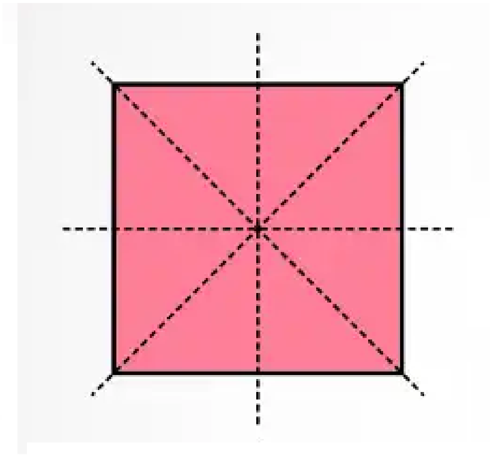
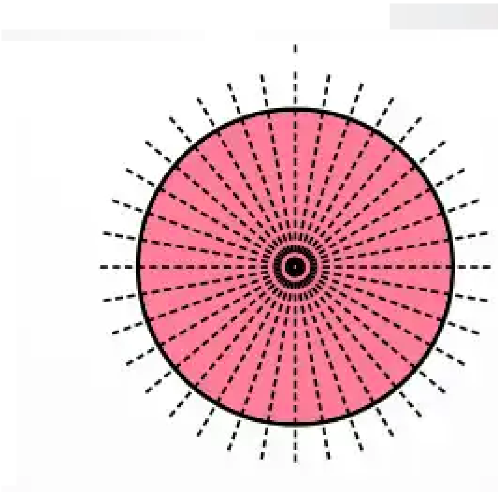
Simetrias Na Física de Altas Energias

André Nepomuceno
Universidade Federal Fluminense

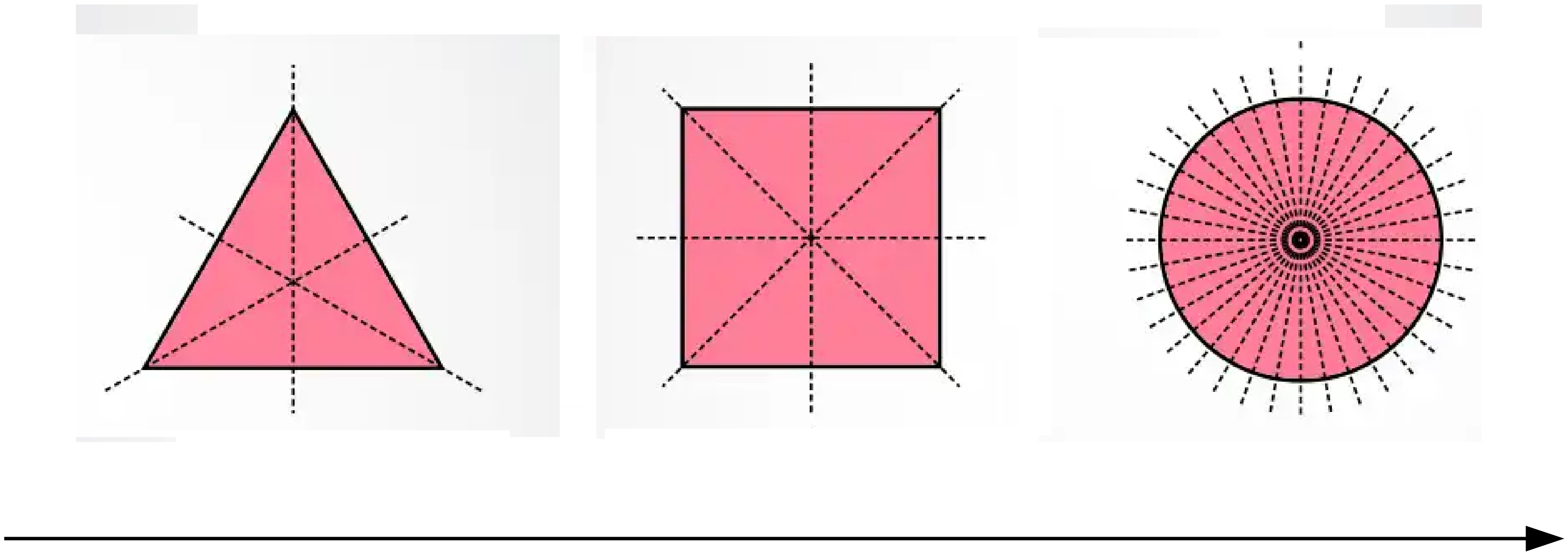


O que é Simetria ?

simetria

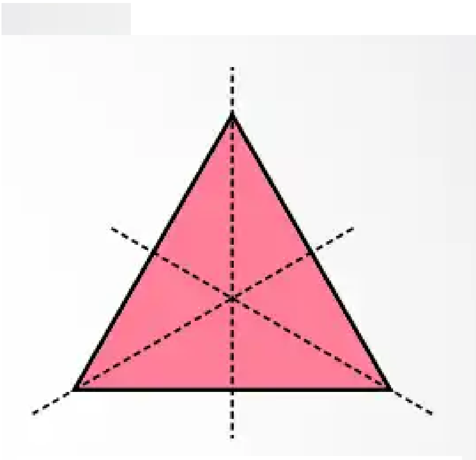
O que é Simetria ?



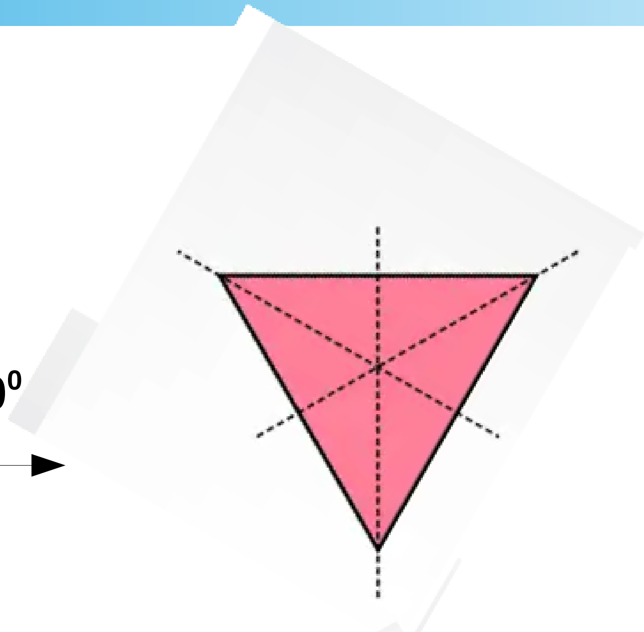
simetria

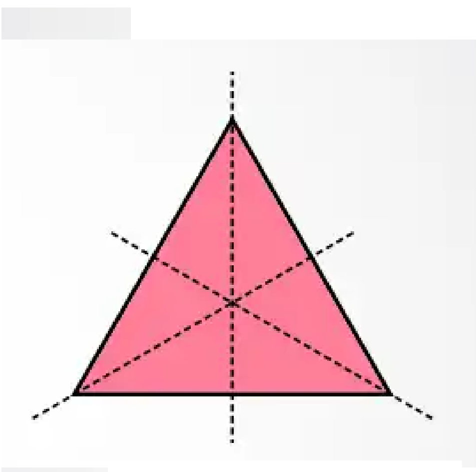
Definição: simetria é uma operação aplicada a um sistema que o deixa **invariante.**

O que é Simetria ?

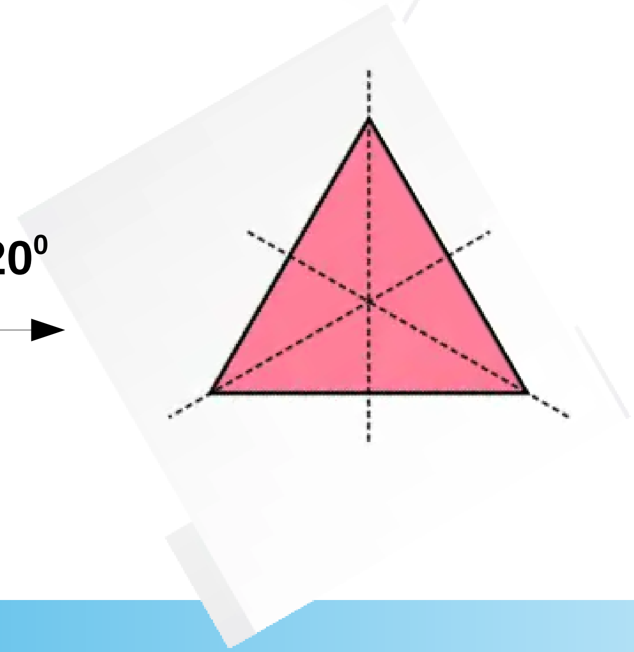


Rotação de 60^0





Rotação de 120^0

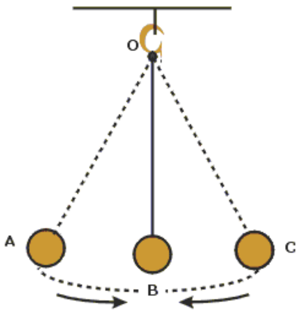


Simetrias na Física

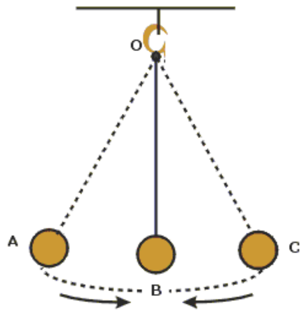
As leis da física são invariantes por transformações no sistema.

Translação temporal

t_1

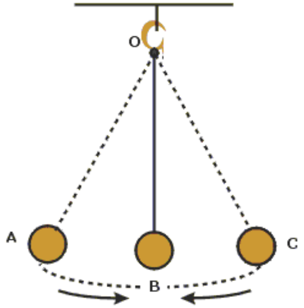


t_2

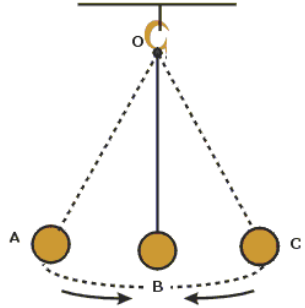


Translação espacial

UERJ



UFF

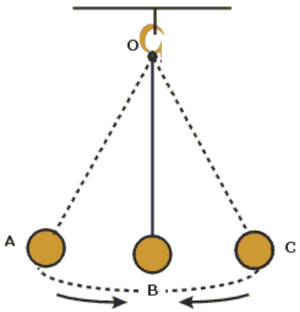


Simetrias na Física

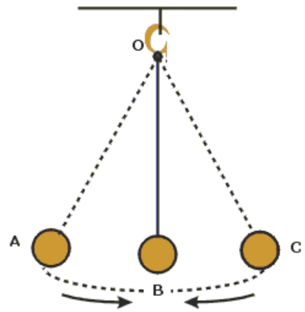
As leis da física são invariantes por transformações no sistema.

Translação temporal

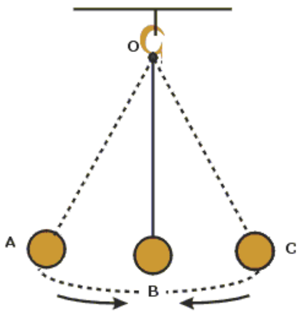
t_1



t_2

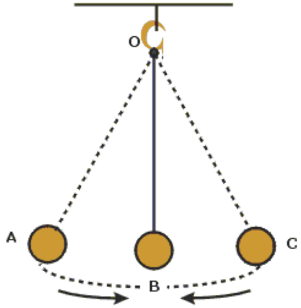


Rotação

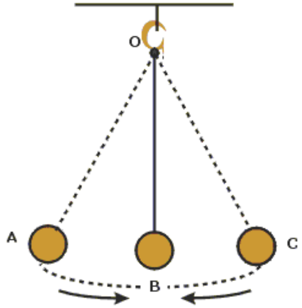


Translação espacial

UERJ



UFF



Simetrias na Física

Um sistema pode ser descrito por uma **lagrangiana**:

$$L = T - U = \frac{1}{2}mv^2 - U$$

- A lagrangiana não depende explicitamente do tempo
- A lagrangiana não é afetada por uma translação no espaço
- A lagrangiana não é afetada por uma rotação

Essas simetrias são chamadas simetrias do espaço-tempo, e são exemplos de simetrias ***contínuas***.

Teorema de Noether

Emmy Noether

(1882 – 1935)

Teorema de Noether (1918):
Para cada simetria **contínua** de um sistema existe uma lei de conservação.

Teorema de Noether

Emmy Noether

(1882 – 1935)

Teorema de Noether (1918):
Para cada simetria **contínua** de um sistema existe uma lei de conservação.

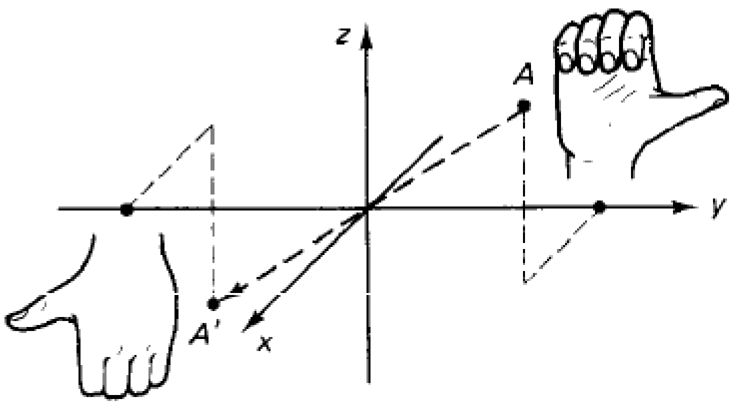
Simetrias ⟷ Leis de Conservação

Simetria	Lei de conservação
Translação no tempo	Energia
Translação no espaço	Momento linear
Rotação	Momento angular

Simetrias Discretas

As leis da física fazem distinção entre esquerda-direita ?

Até 1956, acreditava-se que as leis da física eram invariantes sob uma transformação de ***paridade***.



Inversion $(x, y, z) \to (-x, -y, -z)$

Experimentos com "partículas estranhas" levaram a C. N. Yang e T. D. Lee a propor que paridade *não* é conservada nas interações fracas.

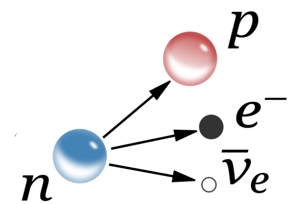
T.D.Lee and C.N.Yang, *Phys.Rev.* 104 (1956)

Simetrias Discretas

Experimento realizado por Madame Wu

C. S. Wu

$$^{60}C \rightarrow \ ^{60}\mathrm{Ni} + e^{-} + \overline{\nu}$$



Transformação de paridade

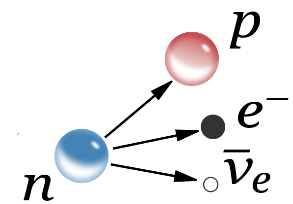
$$P(\overrightarrow{a}) = -\overrightarrow{a}$$

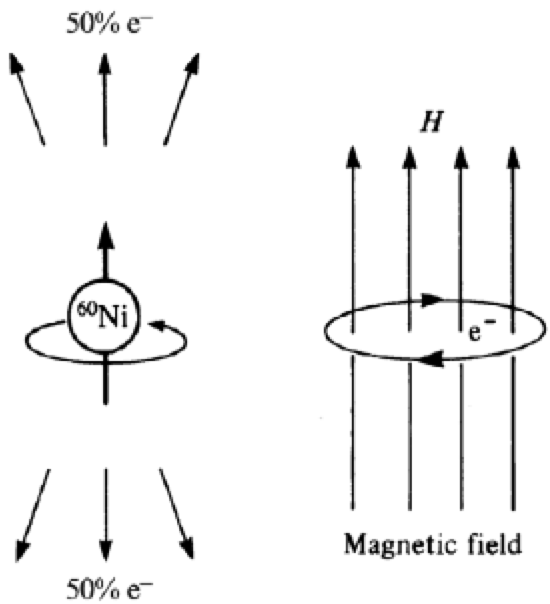
$$P(\overrightarrow{a} \times \overrightarrow{b}) = \overrightarrow{a} \times \overrightarrow{b}$$

Experimento realizado por Madame Wu

C. S. Wu

$$^{60}C \rightarrow \ ^{60}\mathrm{Ni} + e^{-} + \overline{\nu}$$





Transformação de paridade

$$P(\overrightarrow{a}) = -\overrightarrow{a}$$

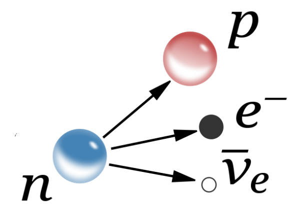
$$P(\overrightarrow{a} \times \overrightarrow{b}) = \overrightarrow{a} \times \overrightarrow{b}$$

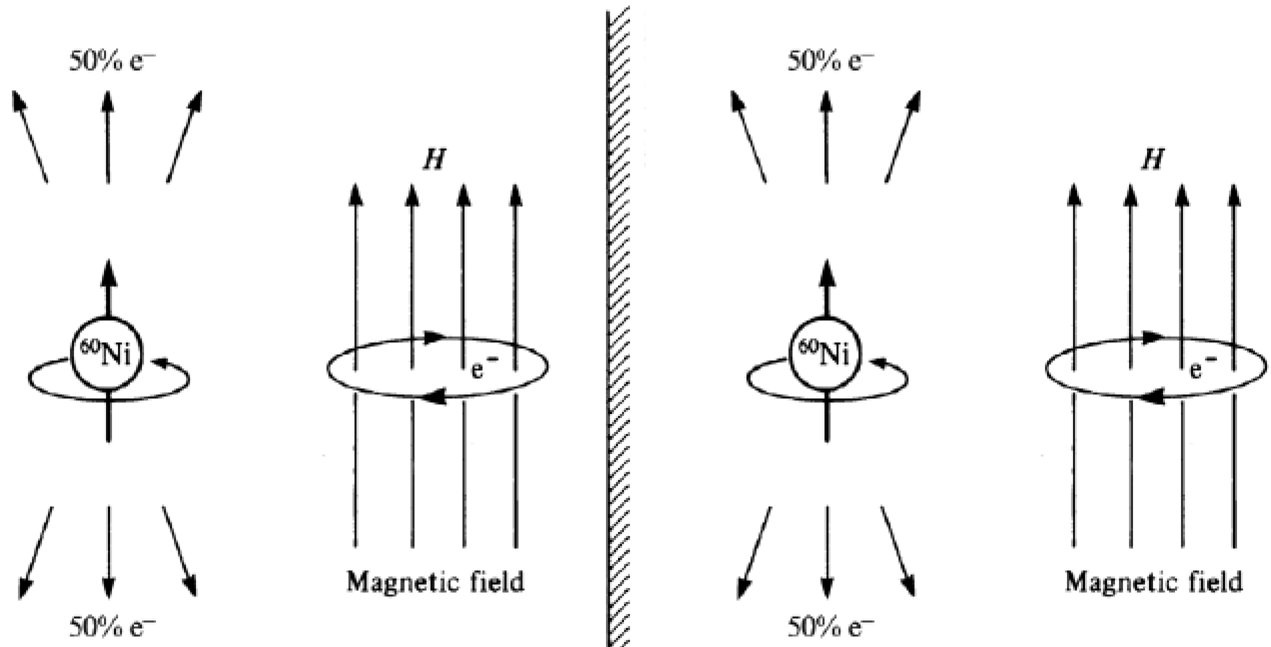
Simetrias Discretas

Experimento realizado por Madame Wu

C. S. Wu

$$^{60}C \rightarrow \; ^{60}\mathrm{Ni} + e^{-} + \overline{\nu}$$





Paridade conservada

Transformação de paridade

$P(\overrightarrow{a}) = -\overrightarrow{a}$

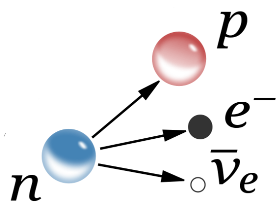
$P(\overrightarrow{a} \times \overrightarrow{b}) = \overrightarrow{a} \times \overrightarrow{b}$

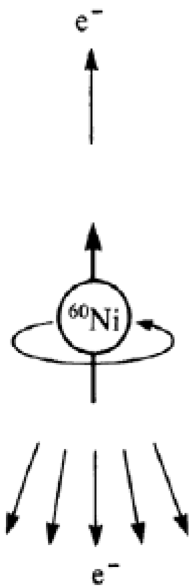
Simetrias Discretas

Experimento realizado por Madame Wu

C. S. Wu

$$^{60}C \rightarrow \ ^{60}\mathrm{Ni} + e^{-} + \overline{\nu}$$





Transformação de paridade

$P(\overrightarrow{a}) = -\overrightarrow{a}$

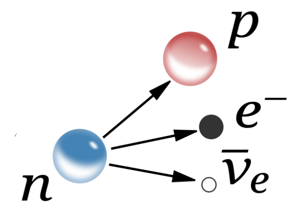
$P(\overrightarrow{a} \times \overrightarrow{b}) = \overrightarrow{a} \times \overrightarrow{b}$

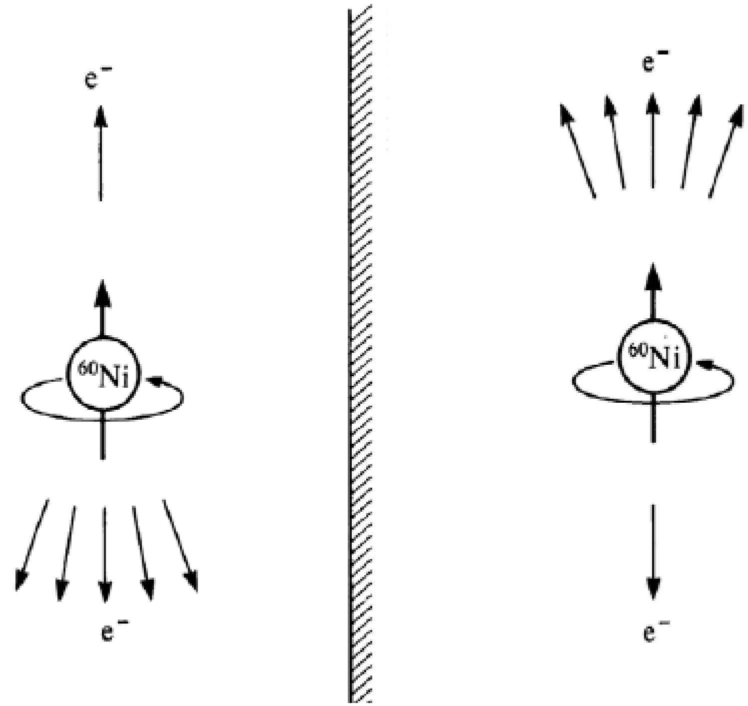
Simetrias Discretas

Experimento realizado por Madame Wu

C. S. Wu

$$^{60}C \rightarrow \, ^{60}\mathrm{Ni} + e^{-} + \overline{\nu}$$





Transformação de paridade

$$P(\vec{a}) = -\vec{a}$$

$$P(\vec{a} \times \vec{b}) = \vec{a} \times \vec{b}$$

Paridade violada 

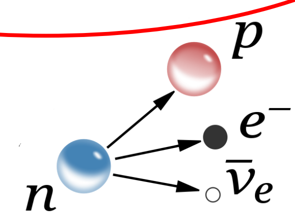
Simetrias Discretas

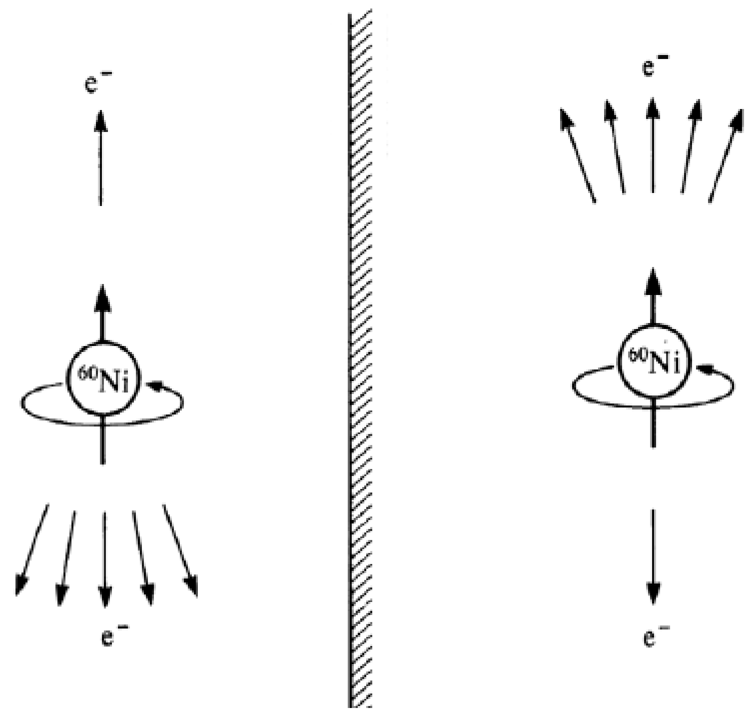
John Blatt para Pauli
"We are all rather shaken by the death of our well-beloved friend, parity,"

Experimento realizado por Madame Wu

C. S. Wu

$$^{60}C \to \ {}^{60}\mathrm{Ni} + e^- + \overline{\nu}$$





Transformação de paridade

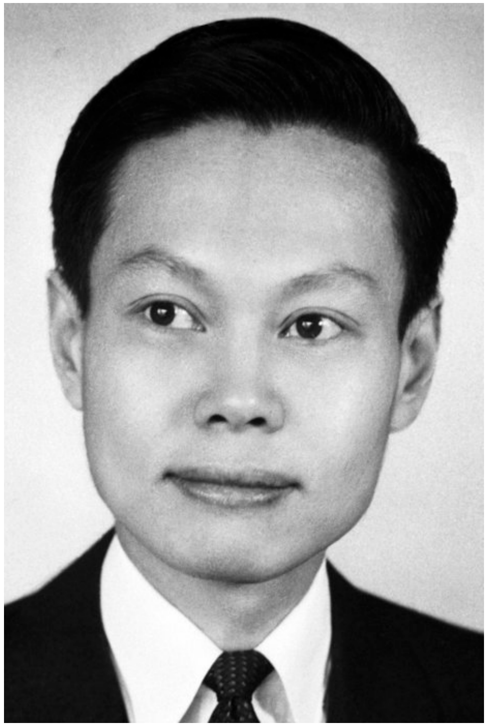
$$P(\overrightarrow{a}) = -\overrightarrow{a}$$

$$P(\overrightarrow{a} \times \overrightarrow{b}) = \overrightarrow{a} \times \overrightarrow{b}$$

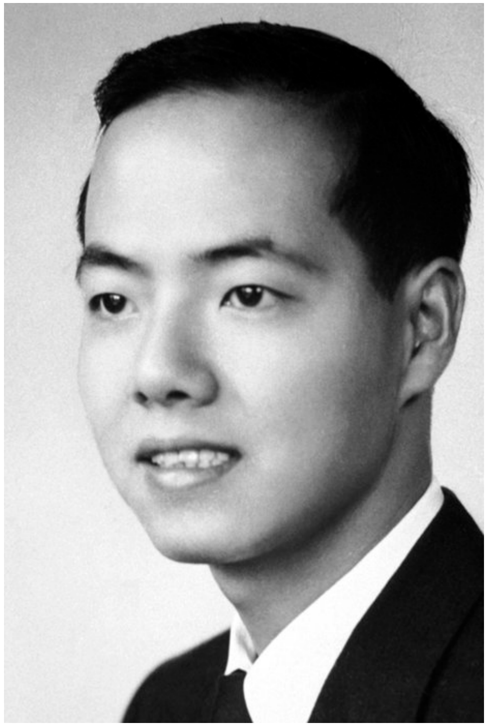
Paridade violada

Simetrias Discretas

Prêmio Nobel para Yang e Lee em 1957



Chen Ning Yang



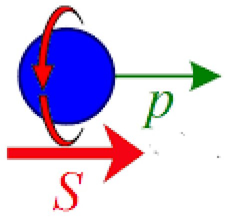
Tsung-Dao (T.D.) Lee

"*for their penetrating investigation of the so-called parity laws which has led to important discoveries regarding the elementary particles*"

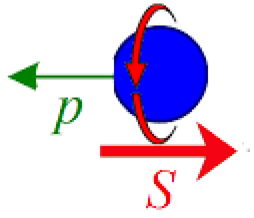
Simetrias Discretas

Consequência da violação de paridade: sistemas relacionados por uma transformação de paridade *não existem com a mesma probabilidade.*

Uma partícula pode duas *helicidades*: mão-direita e mão-esquerda



mão-direita



mão-esquerda

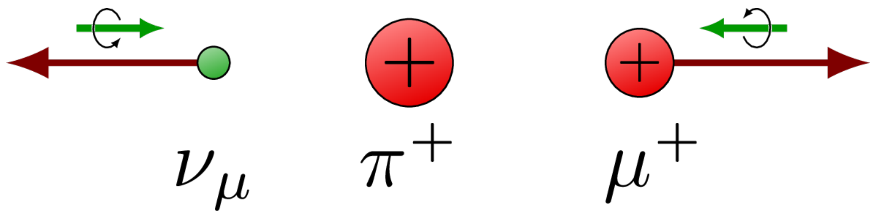
Experimentos mostraram que os elétrons produzidos no decaimento do ^{60}Co *sempre* são de mão-esquerda. A paridade é violada ao **máximo** nas interações fracas.

Simetrias Discretas

Consequência da violação de paridade: sistemas relacionados por uma transformação de paridade *não existem com a mesma probabilidade.*

Qual a helicidade do neutrino ?

$$\text{Decaimento do píon}: \ \pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu$$



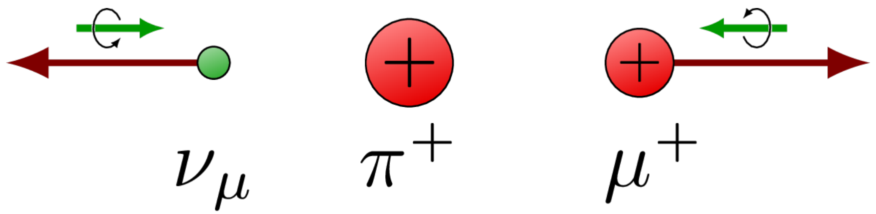
Leis de conservação implicam que o momento linear e spin das partículas resultantes devem ser *opostos*.

Simetrias Discretas

Consequência da violação de paridade: sistemas relacionados por uma transformação de paridade *não existem com a mesma probabilidade.*

Qual a helicidade do neutrino ?

$$\text{Decaimento do píon}: \; \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$



Conclusão: todos os neutrinos são de mão-esquerda, e todos os antineutrinos são de mão direita.

Leis de conservação implicam que o momento linear e spin das partículas resultantes devem ser *opostos*.

Simetrias Discretas

Formalmente, podemos converter uma partícula em sua antipartícula através um operador de ***conjugação de carga***:

$$C|p >= |\overline{p} >$$

Qual o resultado da operação ***CP*** ?

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (\mathrm{E})$$

$$\Big\downarrow \mathbf{C}$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \overline{\nu}_\mu \quad (\mathrm{E}) \quad ✗$$

$$\Big\downarrow \mathbf{P}$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \overline{\nu}_\mu \quad (\mathrm{D}) \quad ✓$$

Simetrias Discretas

Formalmente, podemos converter uma partícula em sua antipartícula através um operador de ***conjugação de carga***:

$$C|p>=|\overline{p}>$$

Qual o resultado da operação ***CP*** ?

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \text{(E)}$$

$$\Big\downarrow \ \mathbf{C}$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \overline{\nu}_\mu \quad \text{(E)}$$

$$\Big\downarrow \ \mathbf{P}$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \overline{\nu}_\mu \quad \text{(D)}$$

A violação de ***CP*** nas interações fracas foi observada no decaimento de káons

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \overline{\nu}_e$$

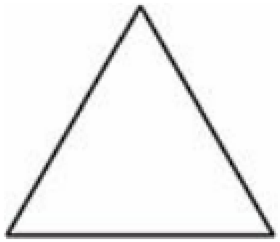
$$K_L^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$$

O decaimento em pósitron é mais frequente por uma fração de ~ 3 x 10^{-3}

Grupos em Poucas Palavras

Simetrias de um triângulo equilátero

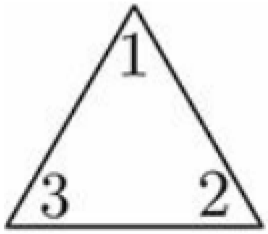
Quais operação deixam a configuração invariante ?



Grupos em Poucas Palavras

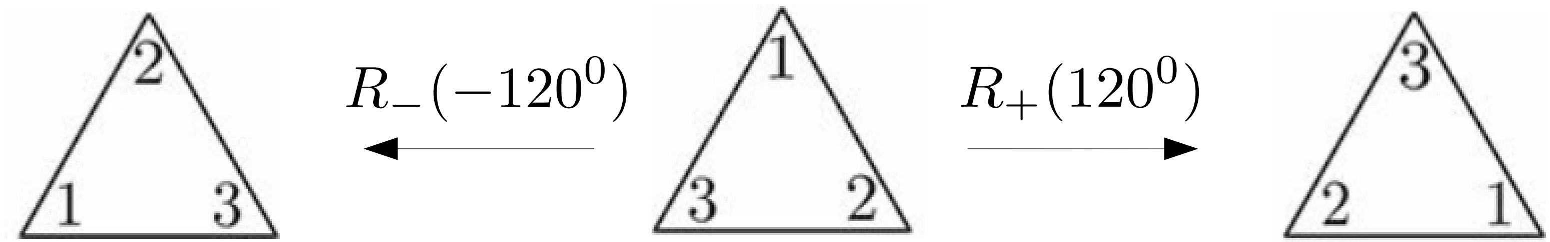
Simetrias de um triângulo equilátero

Quais operação deixam a configuração invariante ?



Simetrias de um triângulo equilátero

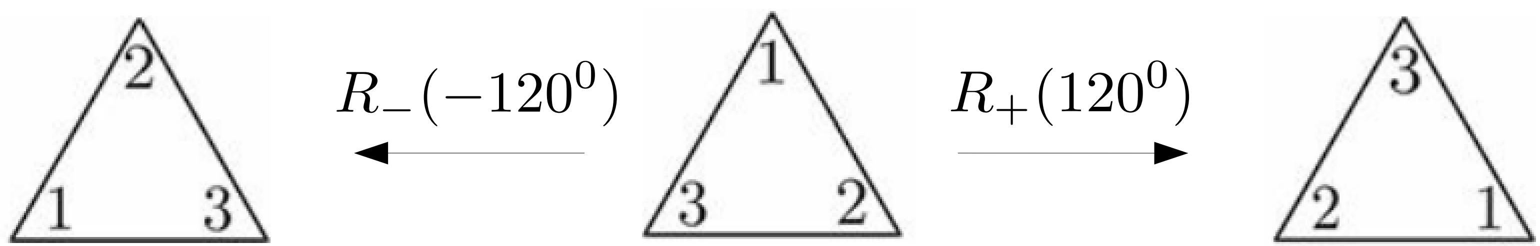
Podemos girar o triângulo….



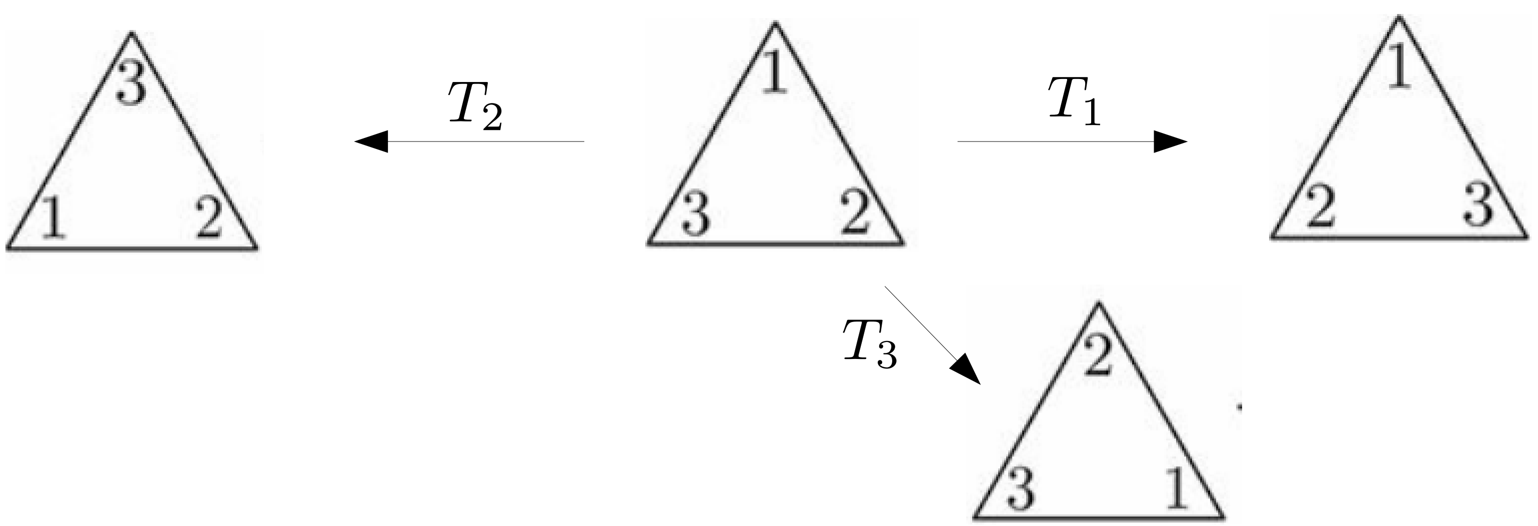
Grupos em Poucas Palavras

Simetrias de um triângulo equilátero

Podemos girar o triângulo….



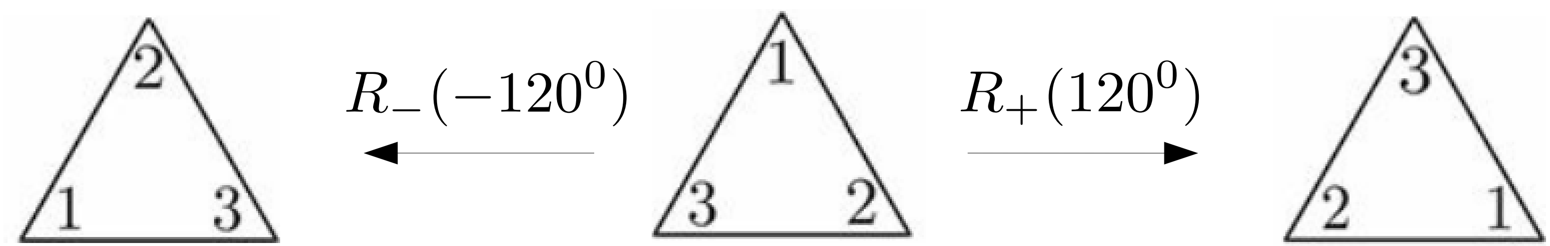
e podemos também virar o triângulo



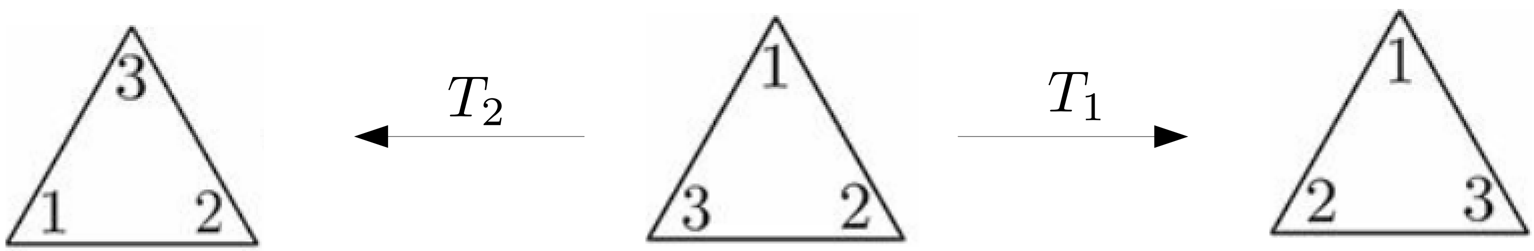
Grupos em Poucas Palavras

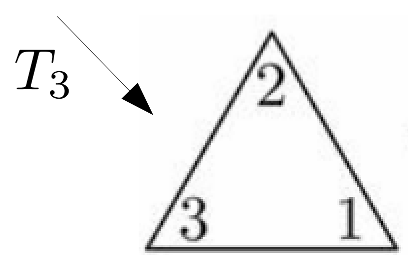
Simetrias de um triângulo equilátero

Podemos girar o triângulo….



e podemos também virar o triângulo



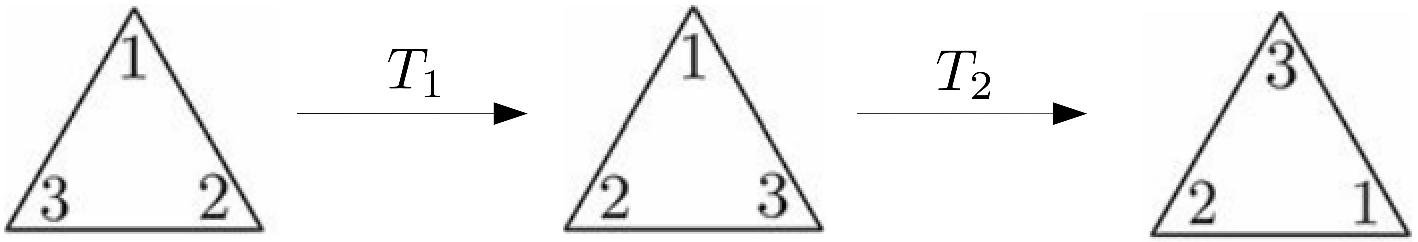


Seis operações de simetria

Grupos em Poucas Palavras

Simetrias de um triângulo equilátero

E se combinarmos operações? Exemplo: T_1 X T_2



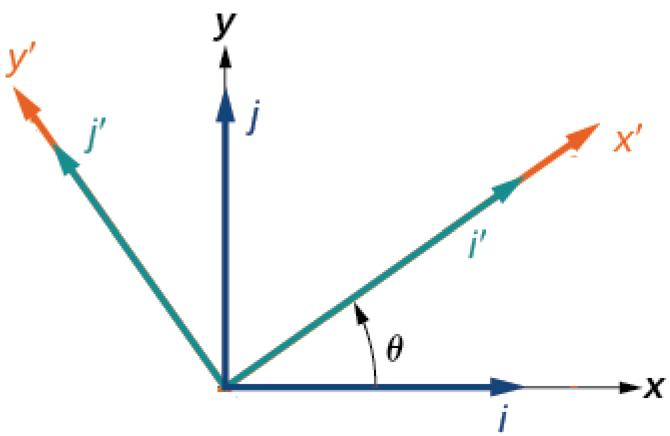
$$T_1 \times T_2 = R_+$$

Esse conjunto de seis operação formam um ***grupo,*** e devem satisfazer as seguintes propriedades:

- Existe um elemento identidade (ex. girar por 0^0).
- Todos os elementos do grupo tem uma inversa ($RR^{-1} = I$)
- O resultado da “multiplicação” de dois elementos do grupo resulta em um elemento do grupo.

Grupos em Poucas Palavras

Exemplo 1: rotações no plano

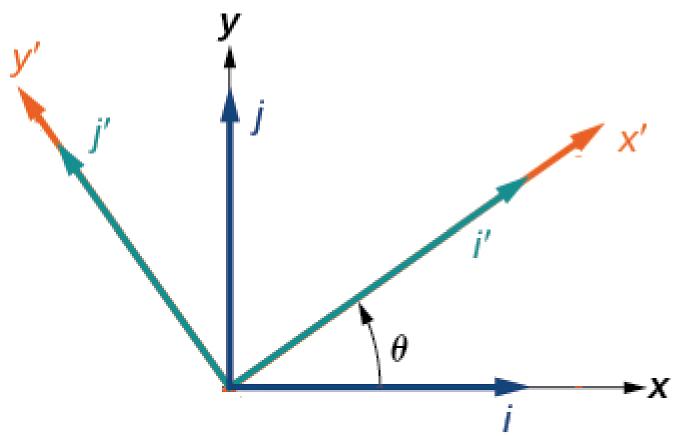


$$R = \begin{pmatrix} \cos\theta & \mathrm{sen}\theta \\ -\mathrm{sen}\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \mathrm{sen}\theta \\ -\mathrm{sen}\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Grupos em Poucas Palavras

Exemplo 1: rotações no plano



$$R = \begin{pmatrix} \cos\theta & \mathrm{sen}\theta \\ -\mathrm{sen}\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

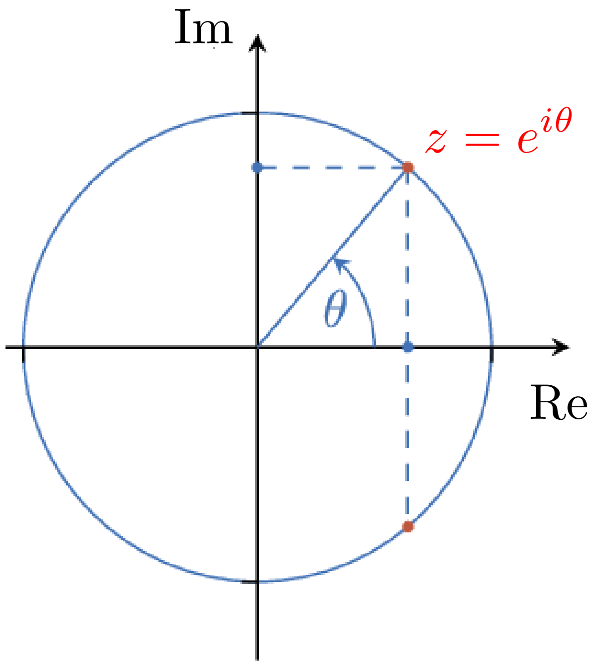
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \mathrm{sen}\theta \\ -\mathrm{sen}\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

- ✔ Identidade: ***I***
- ✔ $RR^T = I$
- ✔ $R(\theta)R(\phi) = R(\theta + \phi)$

- ✔ Rotações no plano formam o grupo **SO(2)**
- ✔ O módulo do vetor é **invariante** sob rotações

Exemplo 2: grupo U(1)

U(1) é o grupo de matrizes unitárias de dimensão 1 (números complexos).

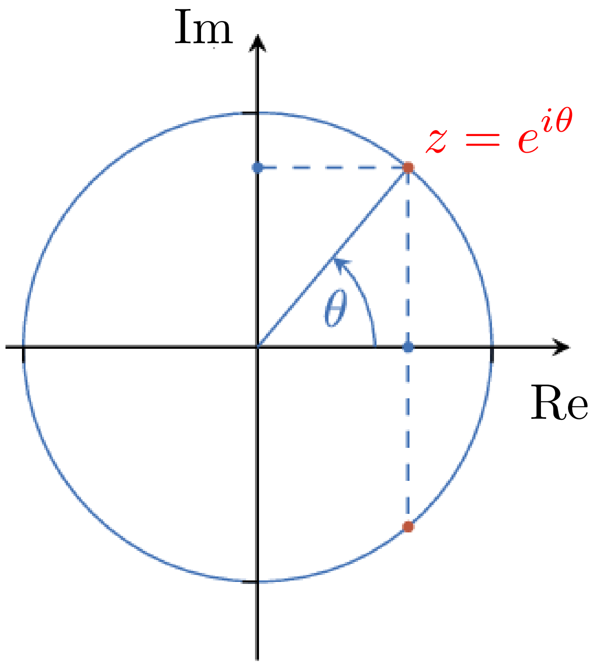


$$ze^{i\alpha} = e^{i\theta}e^{i\alpha} = e^{i(\theta+\alpha)}$$

Grupos em Poucas Palavras

Exemplo 2: grupo U(1)

U(1) é o grupo de matrizes unitárias de dimensão 1 (números complexos).



$$ze^{i\alpha} = e^{i\theta}e^{i\alpha} = e^{i(\theta+\alpha)}$$

Por que grupos unitários são importantes?

Mecânica Quântica

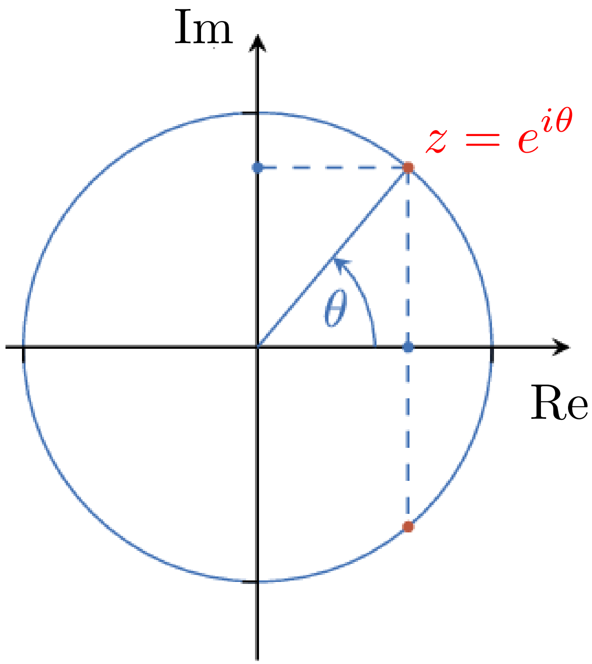
$\psi(x)$: função de onda

$|\psi(x)|^2 = \psi\psi*$: probabilidade

Grupos em Poucas Palavras

Exemplo 2: grupo U(1)

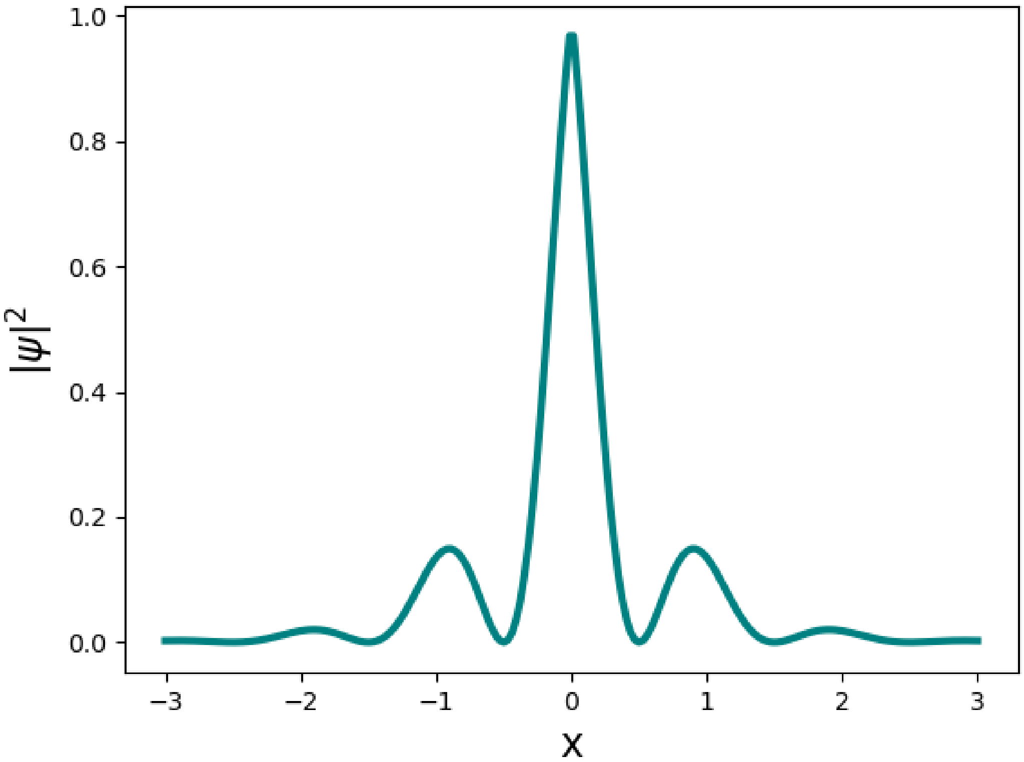
U(1) é o grupo de matrizes unitárias de dimensão 1 (números complexos).



$$ze^{i\alpha} = e^{i\theta}e^{i\alpha} = e^{i(\theta+\alpha)}$$

Por que grupos unitários são importantes?

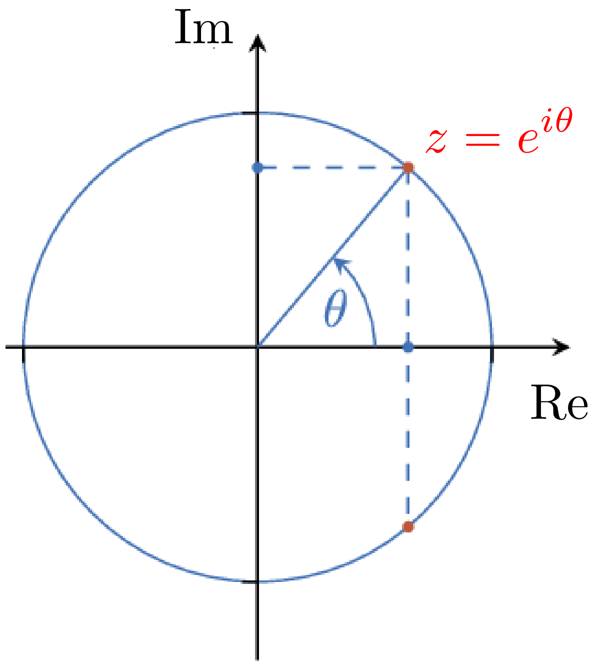
$$|\psi|^2 = \psi\psi*$$



Grupos em Poucas Palavras

Exemplo 2: grupo U(1)

U(1) é o grupo de matrizes unitárias de dimensão 1 (números complexos).



$$ze^{i\alpha} = e^{i\theta}e^{i\alpha} = e^{i(\theta+\alpha)}$$

Por que grupos unitários são importantes?

Mecânica Quântica

$\psi(x)$: função de onda

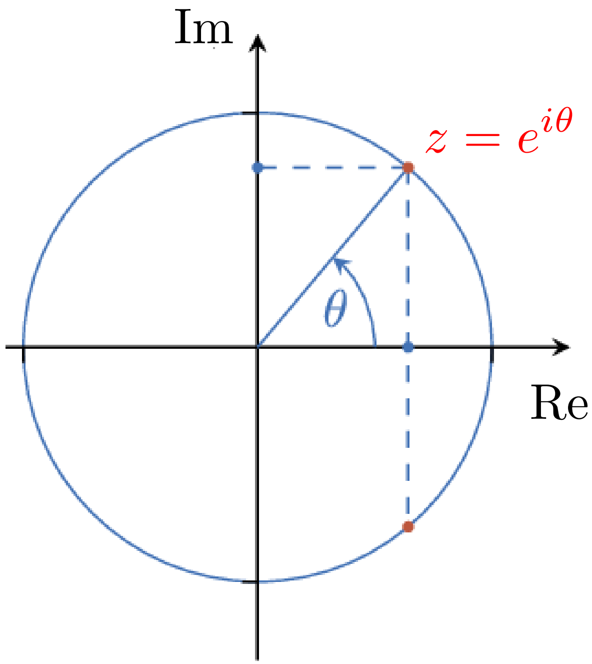
$|\psi(x)|^2 = \psi\psi*$: probabilidade

Transformação de fase

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{i\theta}\psi(x)$$

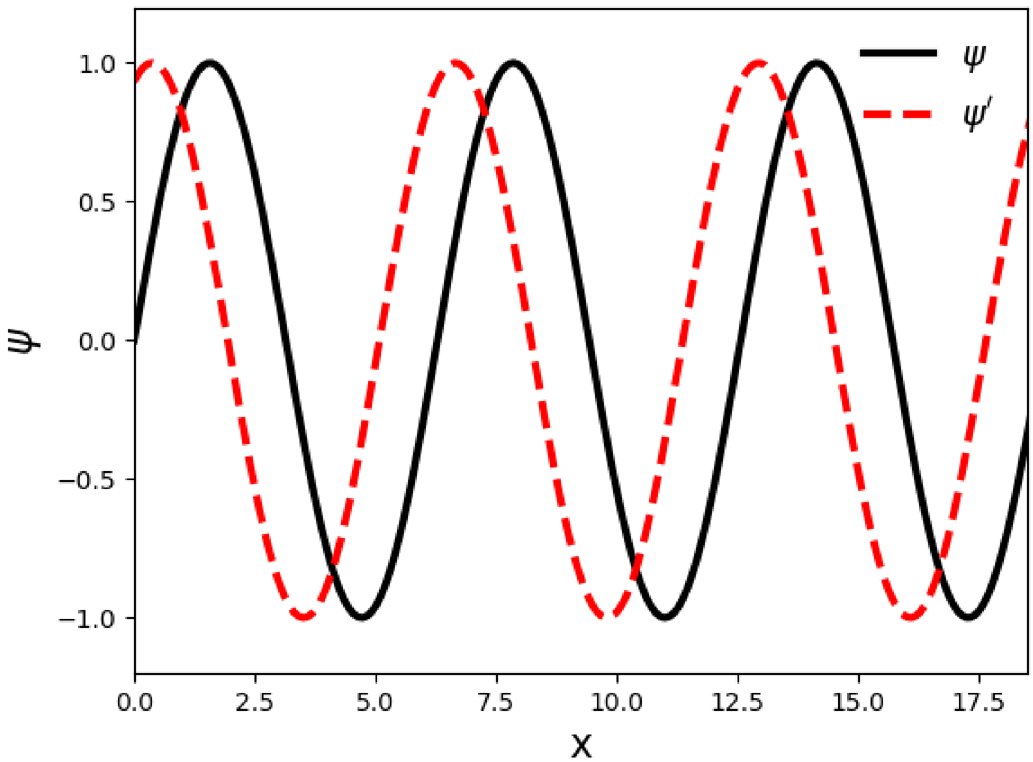
Exemplo 2: grupo U(1)

U(1) é o grupo de matrizes unitárias de dimensão 1 (números complexos).



$$ze^{i\alpha} = e^{i\theta}e^{i\alpha} = e^{i(\theta+\alpha)}$$

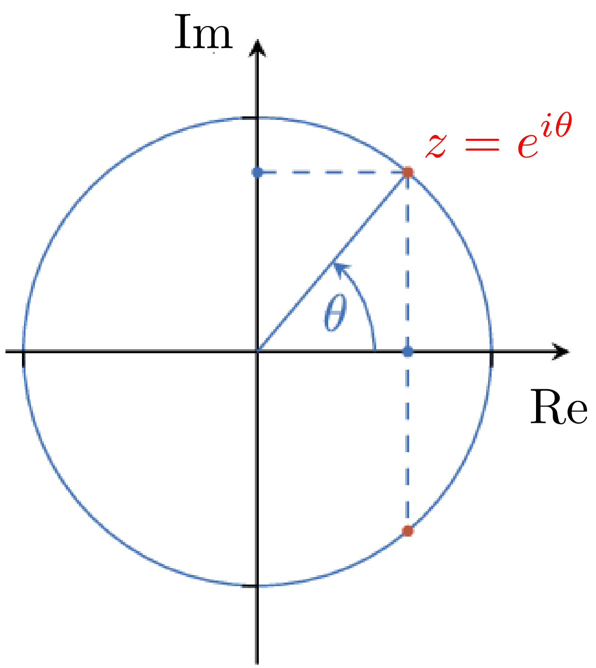
$$\psi(x) \to \psi'(x) = e^{i\theta}\psi(x)$$



Grupos em Poucas Palavras

Exemplo 2: grupo U(1)

U(1) é o grupo de matrizes unitárias de dimensão 1 (números complexos).



$$ze^{i\alpha} = e^{i\theta}e^{i\alpha} = e^{i(\theta+\alpha)}$$

Por que grupos unitários são importantes?

Mecânica Quântica

$\psi(x)$: função de onda

$|\psi(x)|^2 = \psi\psi*$: probabilidade

Transformação de fase

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{i\theta}\psi(x)$$

$$|\psi(x)'|^2 = e^{i\theta}e^{-i\theta}\psi(x)\psi(x)* = |\psi(x)|^2$$

Transformação de gauge **global**

Eletrodinâmica Quântica

Lagrangiana de Dirac

$$\mathcal{L} = i\overline{\psi}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi - m\overline{\psi}\psi$$

Invariante sob uma transformação de fase *global*.

Eletrodinâmica Quântica

Lagrangiana de Dirac

$$\mathcal{L} = i\overline{\psi}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi - m\overline{\psi}\psi$$

Invariante sob uma transformação de fase *global*.

E se a transformação for **local?**

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{i\theta(x)}\psi(x)$$

Eletrodinâmica Quântica

Lagrangiana de Dirac

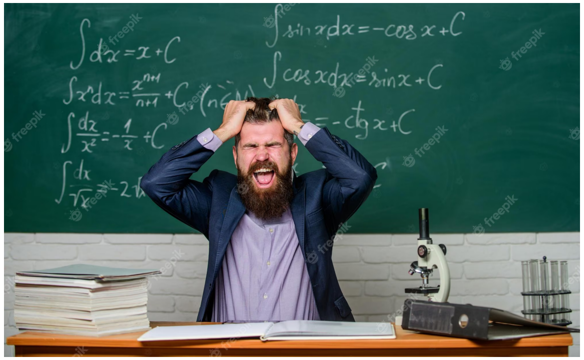
$$\mathcal{L} = i\overline{\psi}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi - m\overline{\psi}\psi$$

Invariante sob uma transformação de fase *global*.

E se a transformação for **local?**

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{i\theta(x)}\psi(x)$$

$\mathscr{L}$ não é invariante!!



Eletrodinâmica Quântica

Lagrangiana de Dirac

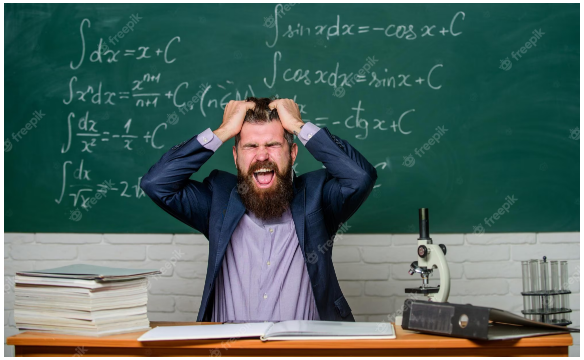
$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi$$

Invariante sob uma transformação de fase *global*.

E se a transformação for **local?**

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{i\theta(x)}\psi(x)$$

$\mathscr{L}$ não é invariante!!



Para manter a lagrangiana invariante, ***precisamos*** introduzir um campo A_μ

$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - q\bar{\psi}\gamma^\mu\psi A_\mu - m\bar{\psi}\psi$$

Com as transformações *simultâneas*

$$\psi(x) \rightarrow e^{i\theta(x)}\psi(x)$$

$$A_\mu \rightarrow A_\mu - \frac{1}{q}\partial_\mu\theta$$

Eletrodinâmica Quântica

Lagrangiana de Dirac

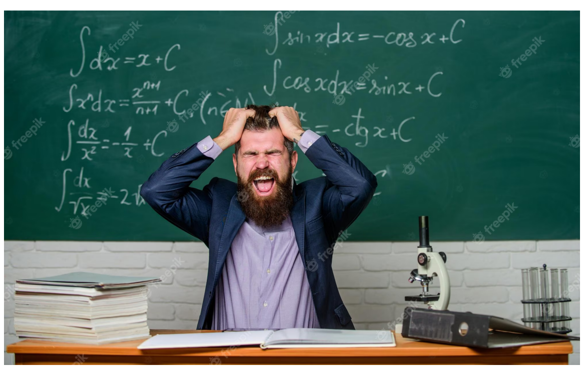
$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - m\bar{\psi}\psi$$

Invariante sob uma transformação de fase *global*.

E se a transformação for **local?**

$$\psi(x) \to \psi'(x) = e^{i\theta(x)}\psi(x)$$

$\mathscr{L}$ não é invariante!!



Para manter a lagrangiana invariante, ***precisamos*** introduzir um campo A_μ

$$\mathcal{L} = i\bar{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - q\bar{\psi}\gamma^\mu\psi A_\mu - m\bar{\psi}\psi$$

Com as transformações *simultâneas*

$$\psi(x) \to e^{i\theta(x)}\psi(x)$$

$$A_\mu \to A_\mu - \frac{1}{q}\partial_\mu\theta$$

$\mathscr{L}$ volta a ser invariante!

Eletrodinâmica Quântica

Para manter a lagrangiana invariante, ***precisamos*** introduzir um campo A_μ

$$\mathcal{L} = i\overline{\psi}\gamma^\mu\partial_\mu\psi - q\overline{\psi}\gamma^\mu\psi A_\mu - m\overline{\psi}\psi$$

Com as transformações *simultâneas*

$$\psi(x) \to e^{i\theta(x)}\psi(x)$$

$$A_\mu \to A_\mu - \frac{1}{q}\partial_\mu\theta$$

$\mathscr{L}$ **volta a ser invariante!**

Conclusões:

- ✔ A invariância sob uma transformação de fase local ***requer*** a presença de um campo vetorial (*campo de gauge*)
- ✔ A partícula associada com o campo tem spin 1 é chamada *bóson de gauge* (fóton).
- ✔ O bóson de gauge não tem massa.
- ✔ A simetria requer a existência de um fóton e de uma interação (eletromagnética)
- ✔ A quantidade conservada é a carga elétrica.

Teoria de Yang-Mills

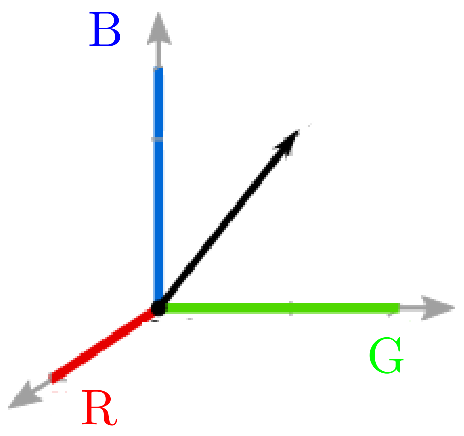
Teoria de Yang-Mills

- ✔ Escolha um grupo que descreva uma simetria interna (ex. SU(N))
- ✔ Imponha que a lagrangiana da teoria seja invariante sob transformação de simetria ***local***.
- ✔ A simetria local demanda a existências de bósos de gauge **sem massa**. Quantos? Com o SU(N), serão $N^2 - 1$.

Cromodinâmica Quântica

Cromodinâmica Quântica (QCD)

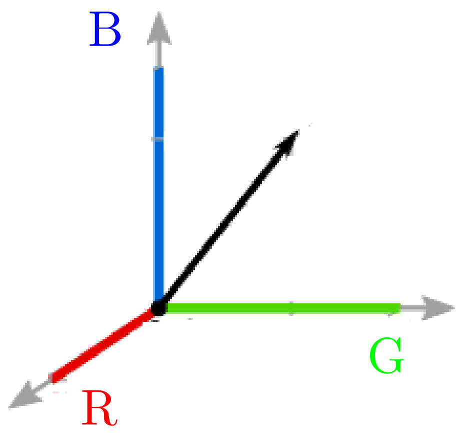
Cada sabor de quark pode ter uma de três cargas de cor: azul (b), verde (g) ou vermelho (r).



Cromodinâmica Quântica

Cromodinâmica Quântica (QCD)

Cada sabor de quark pode ter uma de três cargas de cor: azul (b), verde (g) ou vermelho (r).



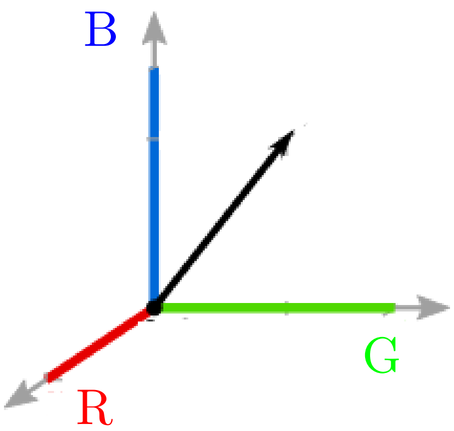
$\text{Simetria: SU}(3)$

$\text{Bósons de gauge: } 3^2 - 1 = 8 \text{ (glúons)}$

Cromodinâmica Quântica

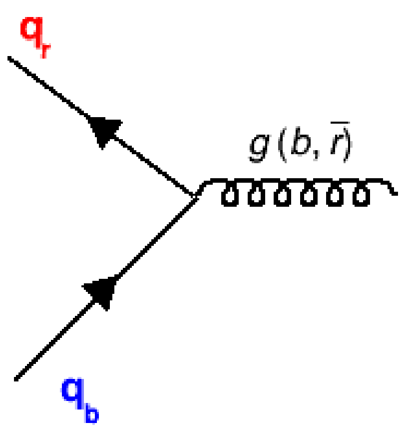
Cromodinâmica Quântica (QCD)

Cada sabor de quark pode ter uma de três cargas de cor: azul (b), verde (g) ou vermelho (r).



Simetria: $\mathrm{SU}(3)$

Bósons de gauge: $3^2 - 1 = 8$ (glúons)



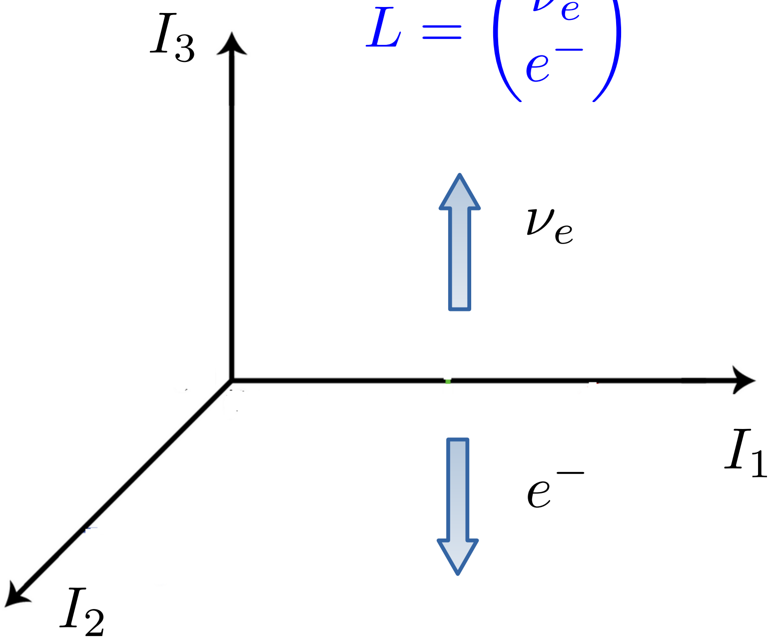
Simetria exata!

Teoria Eletrofraca

Interação fraca

Elétrons e neutrinos têm *carga* diferentes, mas são indiferenciáveis para a ***interação fraca***.

$$L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$



Isospin fraco (simetria interna)

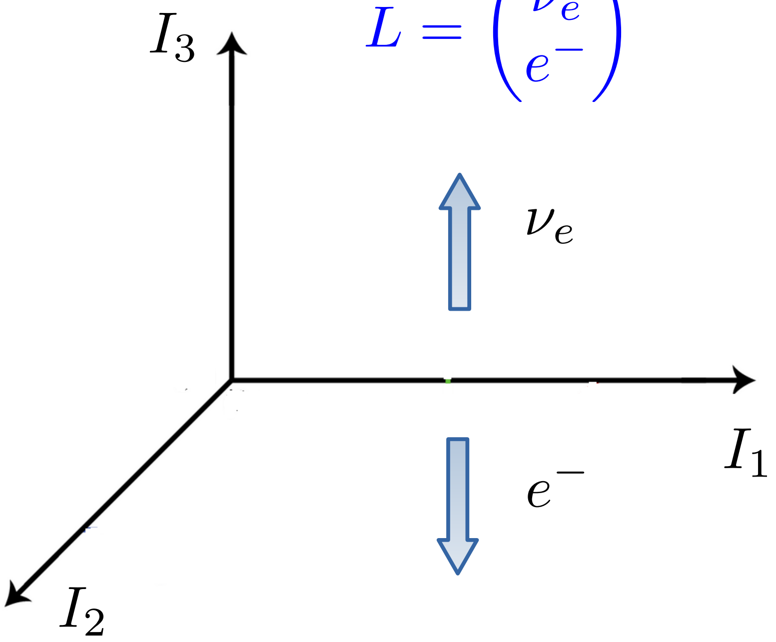
Interação fraca

Elétrons e neutrinos têm *carga* diferentes, mas são indiferenciáveis para a ***interação fraca***.

$$\text{Simetria: } \mathrm{SU}(2)$$

$$\text{Bósons de gauge: } 2^2 - 1 = 3$$

$$L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$



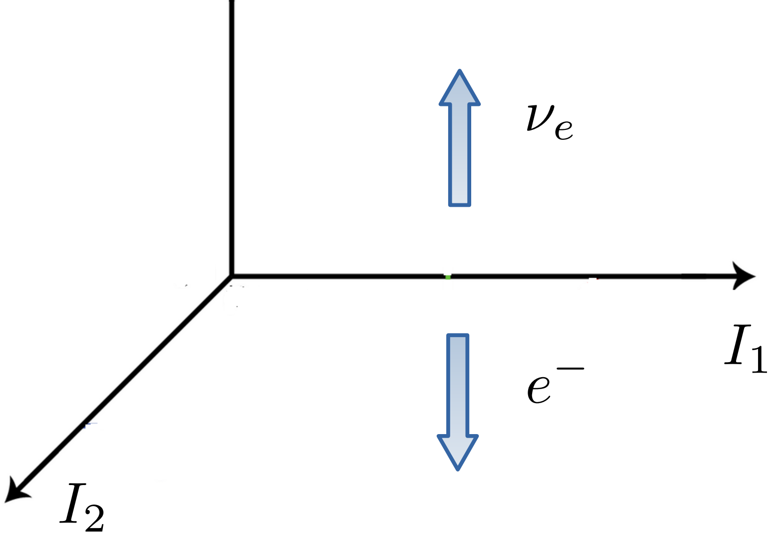
Isospin fraco (simetria interna)

Teoria Eletrofraca

Interação fraca

Elétrons e neutrinos têm *carga* diferentes, mas são indiferenciáveis para a ***interação fraca***.

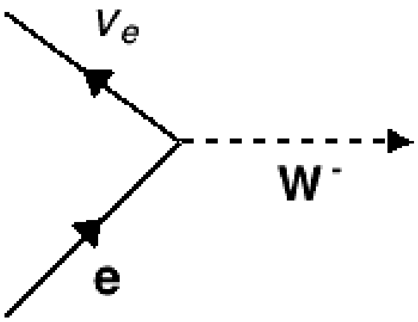
$$L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$



Isospin fraco (simetria interna)

Simetria: SU(2)

Bósons de gauge: $2^2 - 1 = 3$

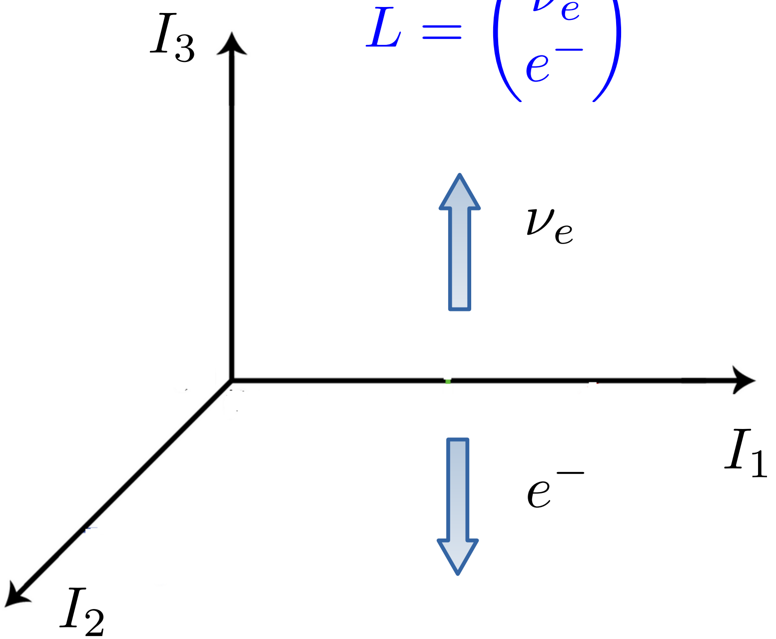


Teoria Eletrofraca

Interação fraca

Elétrons e neutrinos têm *carga* diferentes, mas são indiferenciáveis para a ***interação fraca***.

$$L = \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$



Isospin fraco (simetria interna)

$$\text{Simetria: } \mathrm{SU}(2)$$

$$\text{Bósons de gauge: } 2^2 - 1 = 3$$

- ✔ Unificação das interações fraca e eletromagnética: grupo $SU(2) \times U(1)$
- ✔ Problema: teoricamente, os bósons não tem massa, mas os bósons reais tem! (simetria quebrada)

Teoria Eletrofraca

Interação Eletrofraca

$$\text{Simetria: } \mathrm{SU}(2)$$

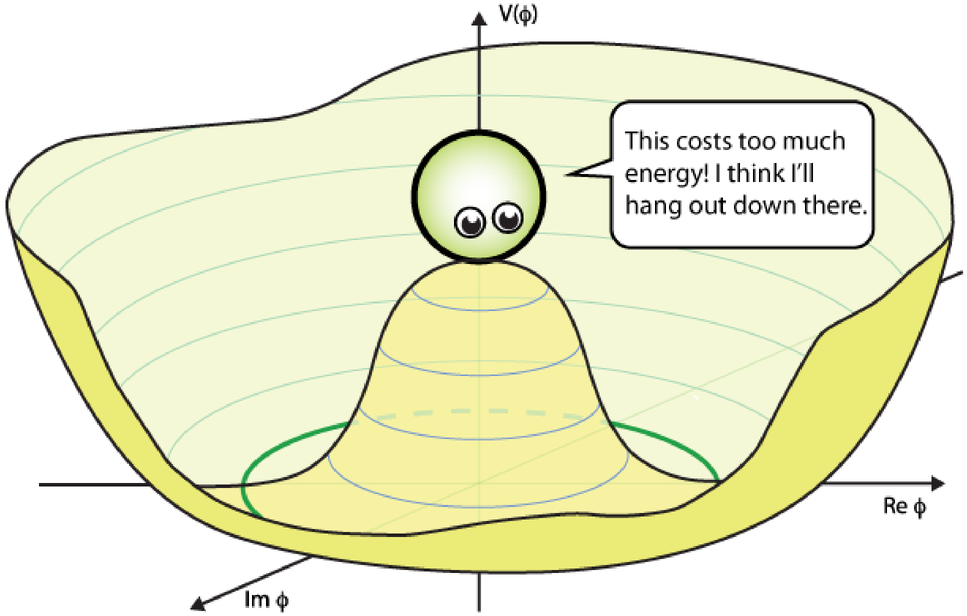
$$\text{Bósons de gauge: } 2^2 - 1 = 3$$

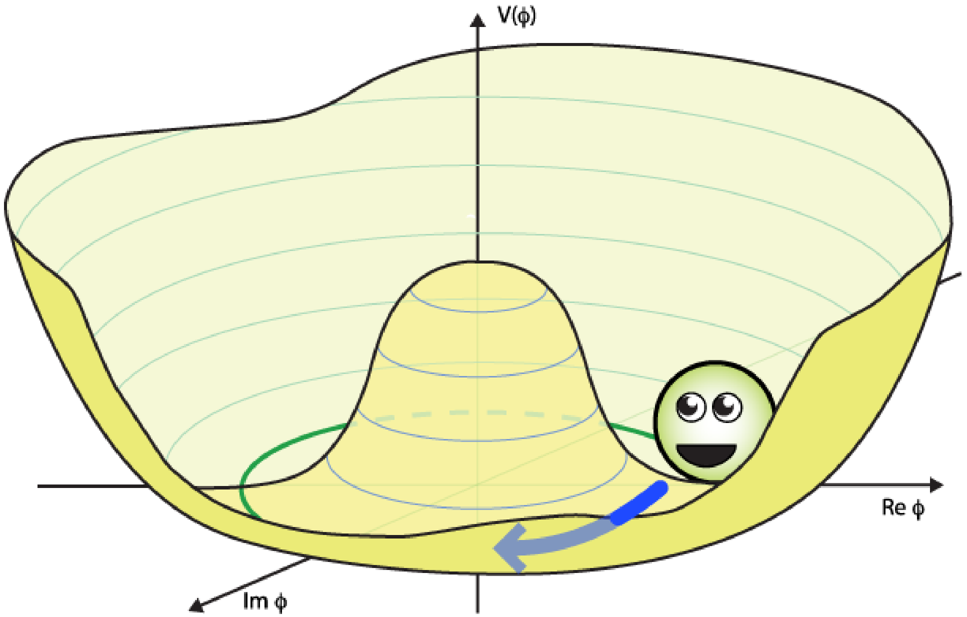
- ✔ Unificação das interações fraca e eletromagnética: grupo $SU(2) \times U(1)$
- ✔ Problema: teoricamente, os bósons não tem massa, mas os bósons reais tem! (simetria quebrada)

Solução: mecanismo de Higgs

Teoria Eletrofraca

Interação Eletrofraca





W^+,W^- e Z adquirem massa! O fóton permanece sem masa.

Teoria Eletrofraca

Interação Eletrofraca

PRL 19, no. 21 (1967)

A MODEL OF LEPTONS*

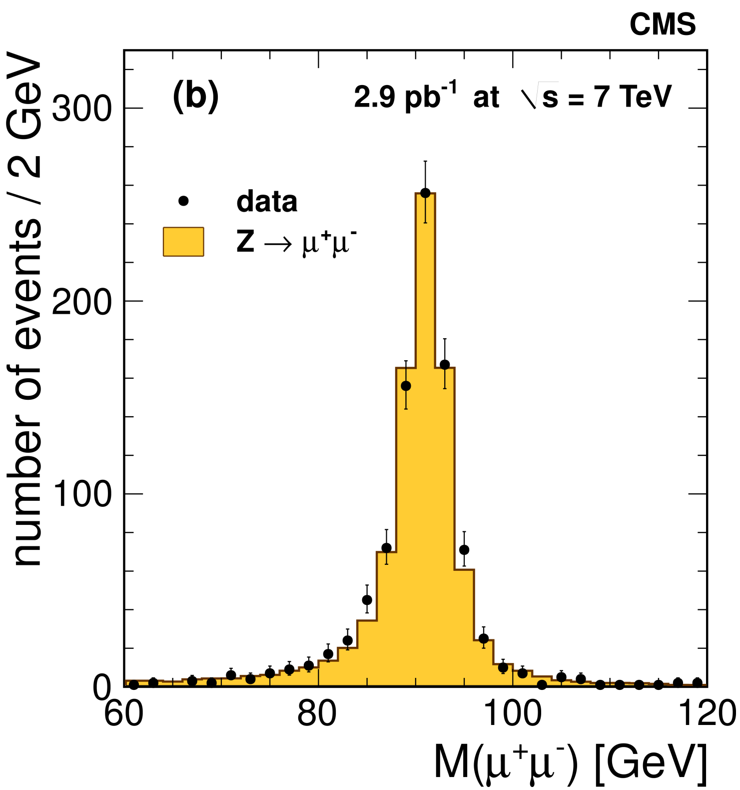
Steven Weinberg†
Laboratory for Nuclear Science and Physics Department,
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts
(Received 17 October 1967)

The coupling of φ_1 to muons is stronger by a factor M_μ/M_e, but still very weak. Note also that (14) gives g and g' larger than e, so (16) tells us that $M_W > 40$ BeV, while (12) gives $M_Z > M_W$ and $M_Z > 80$ BeV.

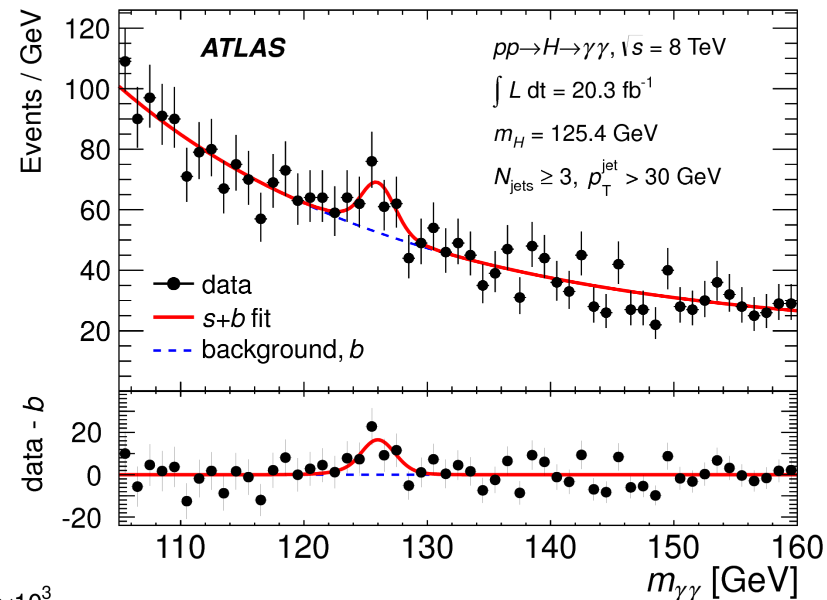
Teoria Eletrofraca

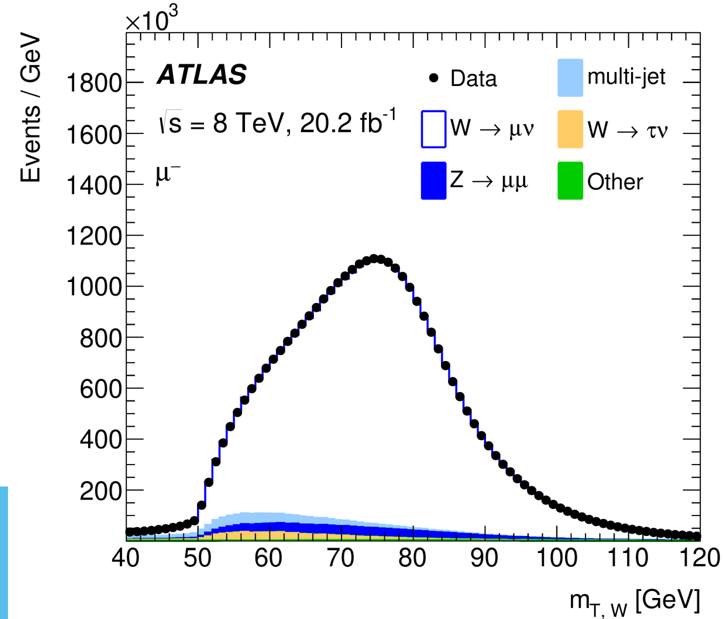
Como observamos os bósons?

JHEP 09 (2014)



JHEP 01 (2011)



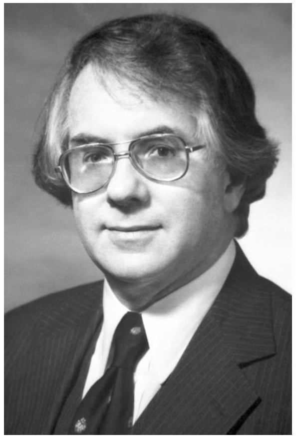


EPJ C79 (2019)

Teoria Eletrofraca

E o prêmio vai para….

Prêmio Nobel de 1979



Sheldon Glashow

Abdus Salam

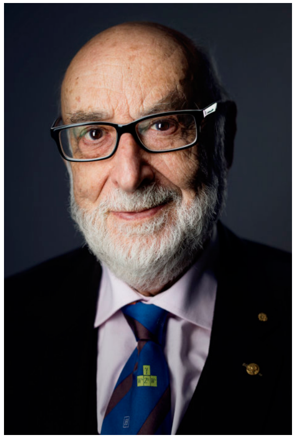
Steven Weinberg

Prêmio Nobel de 1984

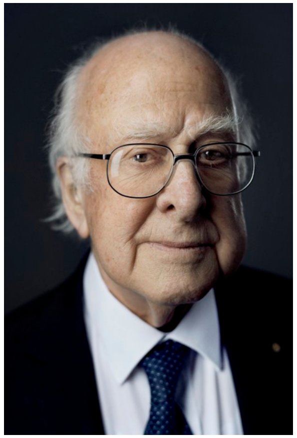
Carlo Rubbia

Simon van der Meer

Prêmio Nobel de 2013



François Englert

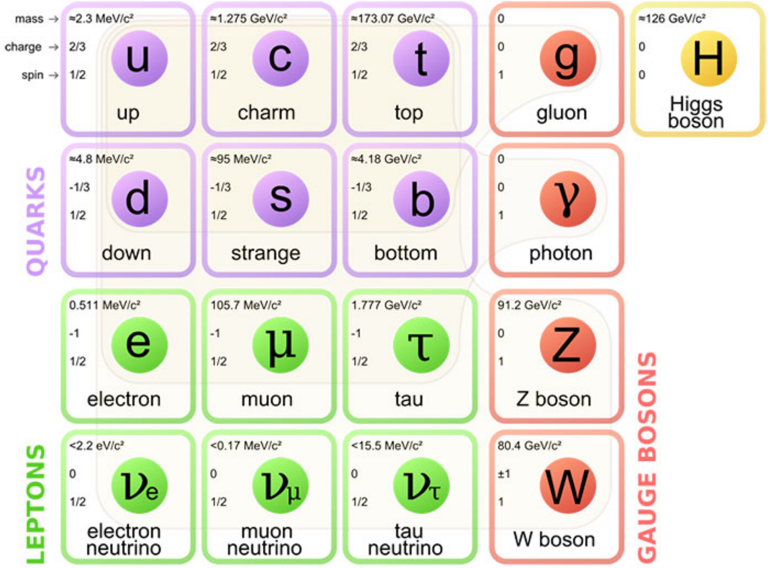


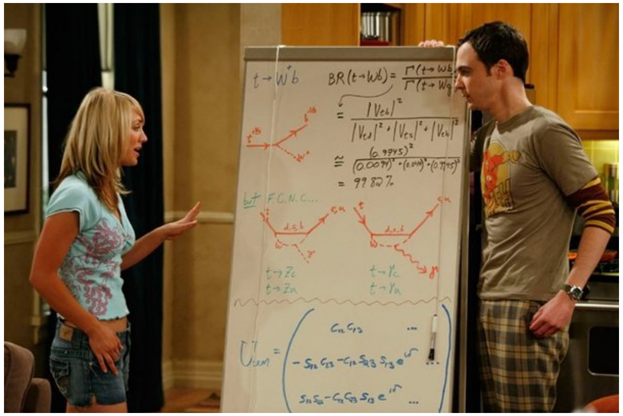
Peter Higgs

A Lagrangiana Final

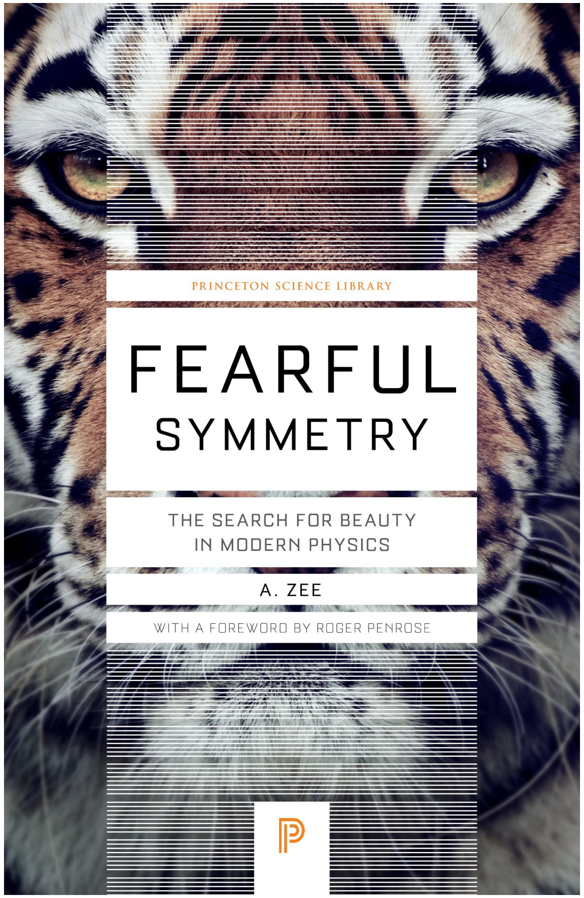
Modelo Padrão: $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

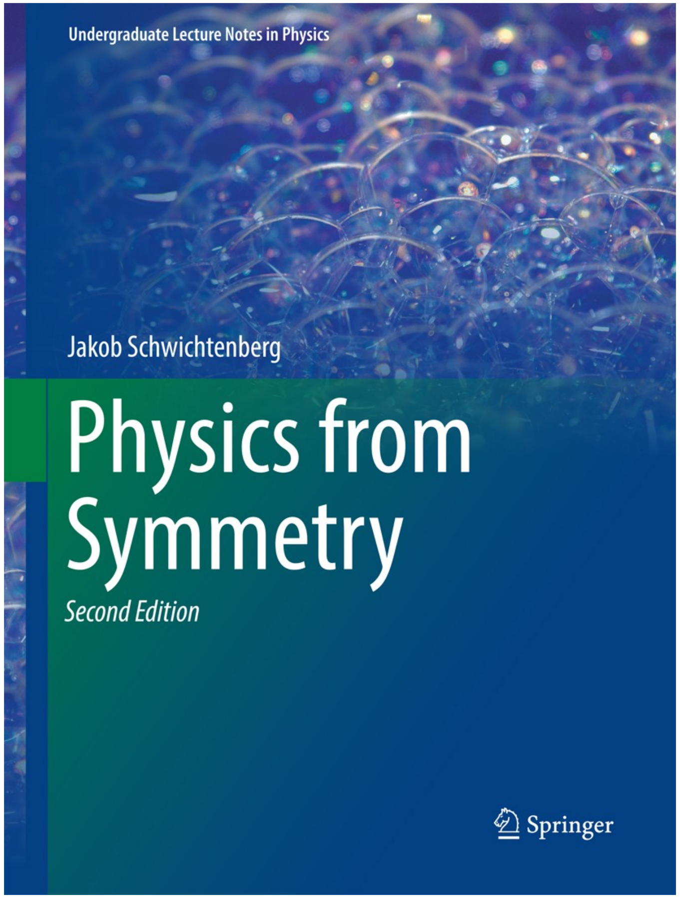
$$\begin{aligned}\mathcal{L} = &- \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ &+ i\bar{\Psi} \not{D} \psi \\ &+ D_\mu \Phi^\dagger D^\mu \Phi - V(\Phi) \\ &+ \bar{\Psi}_L \hat{Y} \Phi \Psi_R + h.c.\end{aligned}$$





Para saber mais





Contato: andrenepomuceno@id.uff.br
YouTube: @python4scientists