

Interações, escalas e simetrias

Luis E. Oxman

IF-UFF

Novembro 2014

Powers of ten

Sistemas

Escalas das coisas: muito grandes, muito pequenas... e muito complexas

Fronteiras: Cosmos, Partículas elementares, Seres vivos

Ciências

Física de Partículas, Física nuclear, Física atômica, ...

... Astrofísica, Cosmologia

... Química Inorgânica, Química Orgânica, Biologia molecular...

Físico Teórico

Um gangster chamou um engenheiro, um químico, e um físico teórico, e ordenou achar uma maneira para que seu cavalo ganhe as corridas...

Físico Teórico

Um gangster chamou um engenheiro, um químico, e um físico teórico, e ordenou achar uma maneira para que seu cavalo ganhe as corridas...

- Engenheiro: Achei um jeito de colocar electrodos na sela do cavalo para dar choques nele.

Físico Teórico

Um gangster chamou um engenheiro, um químico, e um físico teórico, e ordenou achar uma maneira para que seu cavalo ganhe as corridas...

- Engenheiro: Achei um jeito de colocar electodos na sela do cavalo para dar choques nele.
- Gangster: Muito bom!

Físico Teórico

Um gangster chamou um engenheiro, um químico, e um físico teórico, e ordenou achar uma maneira para que seu cavalo ganhe as corridas...

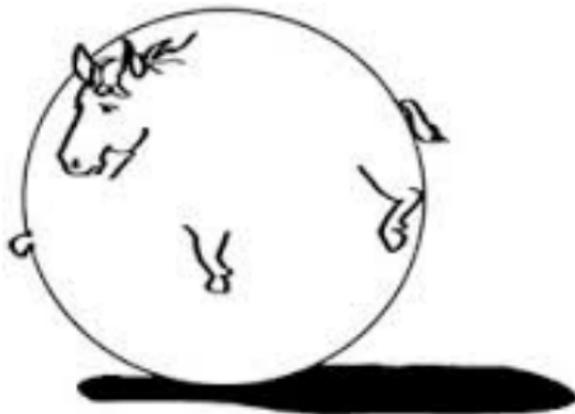
- Engenheiro: Achei um jeito de colocar electrodos na sela do cavalo para dar choques nele.
- Gangster: Muito bom!
- Químico: Sintetizei um estimulante potente que não deixa rastros dez minutos após a corrida.

Físico Teórico

Um gangster chamou um engenheiro, um químico, e um físico teórico, e ordenou achar uma maneira para que seu cavalo ganhe as corridas...

- Engenheiro: Achei um jeito de colocar electrodos na sela do cavalo para dar choques nele.
- Gangster: Muito bom!
- Químico: Sintetizei um estimulante potente que não deixa rastros dez minutos após a corrida.
- Gangster: Excelente, excelente! e o físico teórico?

Físico Teórico: Bem, eu comecei considerando um cavalo esférico...



Sistemas: estados e evoluções

Ecosistema:

estado → distribuição de espécies

evolução → seleção natural

Pessoa:

estar → :(ou :)

evolução → aprendendo

Gás:

estado → quente

evolução → esfriando

Universo:

estado → distribuições de energia, métrica do espaço-tempo

evoluções → Big-Bang, inflação, expansão

$$\text{estado}(t) = G_t(\text{estado}(0))$$

$$\text{estado}(0) = G_{-t}(\text{estado}(t))$$

$$\frac{d}{dt}\text{estado}(t) = \text{algo}(\text{estado}(t))$$

Estar: x, v

Evolução: leis de Newton

$$\frac{dx}{dt} = \frac{p}{m} \quad , \quad \frac{dp}{dt} = -\frac{dU}{dx}$$

isto é,

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{dU}{dx}$$

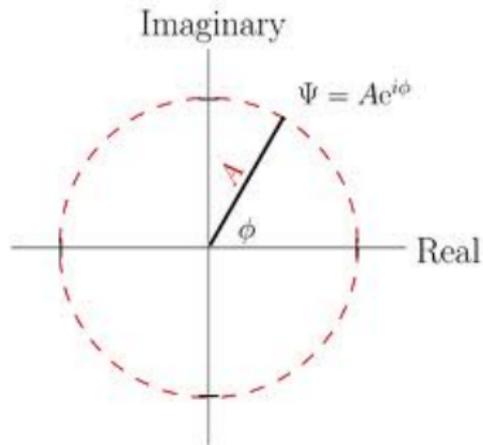
Mecânica Quântica

Estar: $\psi(x) = R(x) + iI(x)$,

Mais afim de... densidade de probabilidade: $\psi^*\psi = R^2 + I^2 = A^2$

Simetria de fase

Outra vez uma circunferência



$$\begin{pmatrix} R \\ I \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix}$$

Evolução: equação de Schrödinger,

$$\frac{d}{dt}\psi(t) = \text{algo}(\psi(t))$$

que implica,

$$\frac{d\langle x \rangle}{dt} = \frac{\langle p \rangle}{m} \quad , \quad \frac{d\langle p \rangle}{dt} = - \left\langle \frac{dU}{dx} \right\rangle$$

sendo,

$$\langle x \rangle = \int dx x \psi^* \psi \quad , \quad \langle p \rangle = \int dx \psi^* \frac{\hbar}{i} \frac{d\psi}{dx}$$

$\psi(x)$ e $\psi(x) e^{-i\chi}$, χ constante, representam o mesmo estado.

Estado coerente do oscilador

Laser



Leis de força

Leis de força

Sem leis de força, a dinâmica não faz sentido,

#Efeigualamassaporaceleracao#

Forças são interações

Sem leis de força, a dinâmica não faz sentido,

#Efeigualamassaporaceleracao#

Forças são interações

A1: as forças de contacto são concretas, as forças a distância são muito estranhas, não é?

Sem leis de força, a dinâmica não faz sentido,

#Efeigualamassaporaceleracao#

Forças são interações

A1: as forças de contacto são concretas, as forças a distância são muito estranhas, não é?

P: Na verdade, as forças de contacto são forças a distância (só que muito curta)

Sem leis de força, a dinâmica não faz sentido,

#Efeigualamassaporaceleracao#

Forças são interações

A1: as forças de contacto são concretas, as forças a distância são muito estranhas, não é?

P: Na verdade, as forças de contacto são forças a distância (só que muito curta)

A2: É possível um campo de forças que confina?

Sem leis de força, a dinâmica não faz sentido,

#Efeigualamassaporaceleracao#

Forças são interações

A1: as forças de contacto são concretas, as forças a distância são muito estranhas, não é?

P: Na verdade, as forças de contacto são forças a distância (só que muito curta)

A2: É possível um campo de forças que confina?

P: Paredes

Sem leis de força, a dinâmica não faz sentido,

#Efeigualamassaporaceleracao#

Forças são interações

A1: as forças de contacto são concretas, as forças a distância são muito estranhas, não é?

P: Na verdade, as forças de contacto são forças a distância (só que muito curta)

A2: É possível um campo de forças que confina?

P: Paredes

A2: Não, quero dizer, é possível um campo invisível que confina?

Sem leis de força, a dinâmica não faz sentido,

#Efeigualamassaporaceleracao#

Forças são interações

A1: as forças de contacto são concretas, as forças a distância são muito estranhas, não é?

P: Na verdade, as forças de contacto são forças a distância (só que muito curta)

A2: É possível um campo de forças que confina?

P: Paredes

A2: Não, quero dizer, é possível um campo invisível que confina?

P: Paredes de vidro

Experimento

Teoria

$$m \vec{a} = \vec{F} \quad , \quad \vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

\vec{F} perpendicular a \vec{v}

Em 2D, com $\vec{B} = B \hat{z}$,

$$m a_x = -v_y (q B) \quad , \quad m a_y = +v_x (q B)$$

$$(-v_y, v_x) \cdot (v_x, v_y) = 0$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{p_x + q A_x}{m} \quad , \quad \frac{dy}{dt} = \frac{p_y + q A_y}{m} \quad , \quad \dots ,$$

com,

$$\frac{dA_y}{dx} - \frac{dA_x}{dy} = B$$

Por que? Este tipo de equação é que leva a eq. de Newton.

Existe velocímetro, existe Gaussímetro, mas não existe “A-metro”

Transformação de calibre:

$$A_x \rightarrow A_x + \frac{d\alpha}{dx} \quad , \quad A_y \rightarrow A_y + \frac{d\alpha}{dy}$$
$$B \rightarrow B$$

Então,

$$p_x \rightarrow p_x - q \frac{d\alpha}{dx} \quad , \quad p_y \rightarrow p_y - q \frac{d\alpha}{dy}$$

$$\frac{d\langle x \rangle}{dt} = \frac{\langle p_x \rangle + q \langle A_x \rangle}{m} \quad , \quad \frac{d\langle y \rangle}{dt} = \frac{\langle p_y \rangle + q \langle A_y \rangle}{m} \quad , \quad \dots ,$$

de forma que para B homogêneo,

$$m \frac{d^2 \langle \vec{x} \rangle}{dt^2} = q \frac{d \langle \vec{x} \rangle}{dt} \times \vec{B}$$

Estado coerente

Transformação de calibre:

$$\langle p_x \rangle \rightarrow \langle p_x - q \frac{d\alpha}{dx} \rangle \quad , \quad \langle p_y \rangle \rightarrow \dots$$

$$\psi^* \frac{\hbar}{i} \frac{d\psi}{dx} \rightarrow \psi^* \frac{\hbar}{i} \frac{d\psi}{dx} - q \psi^* \psi \frac{d\alpha}{dx} \quad , \quad \psi^* \frac{\hbar}{i} \frac{d\psi}{dy} \rightarrow \dots$$

Equivale a,

$$\psi \rightarrow e^{-i\frac{q}{\hbar}\alpha}\psi \quad , \quad \psi^* \rightarrow e^{+i\frac{q}{\hbar}\alpha}\psi^*$$

Agora esta tudo em ordem:

Não somente a densidade de probabilidade $\psi^*\psi$ é invariante, mas também o valor esperado da velocidade é invariante.

O fim vira um princípio: o elétron não interagia e isso não era bom...

Tabela do Modelo Padrão

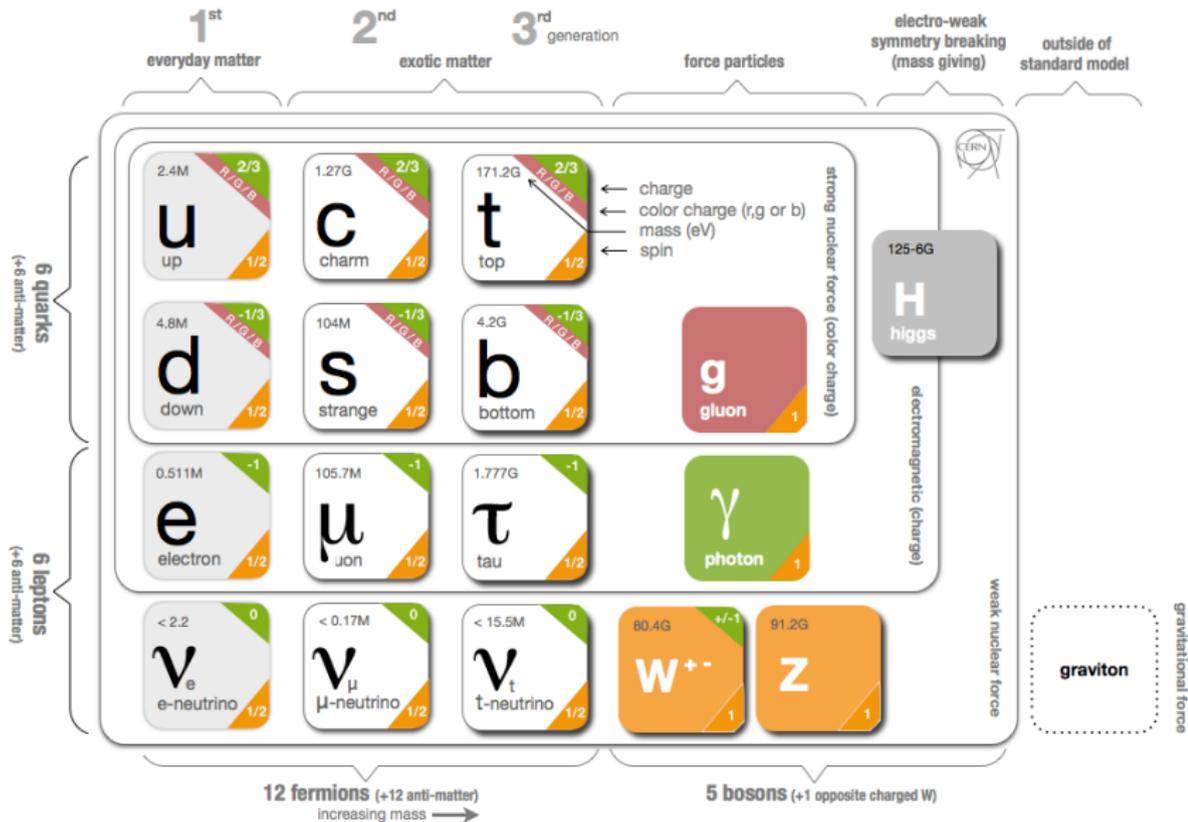


Tabela dos Seres Mitológicos



Hidra: habitava um pântano na costa leste da região do Peloponeso. Inicialmente Hércules tentou esmagar as cabeças, mas a cada uma que cortava surgiam duas no lugar...

Cérbero: era um cão com três cabeças que guardava as portas do Tártaro, não impedindo a entrada e sim a saída...

Minotauro: habitava o centro do Labirinto. O sítio histórico de Cnossos já foi identificado como local do Minotauro, embora não existam provas contundentes que confirmem ou desmintam tal especulação...

Quimera: ...

Qual a diferença?

Um diálogo entre Teoria e Experimento

Teoria:

Modelo Padrão =

Férmions + Interações associadas a simetrias locais

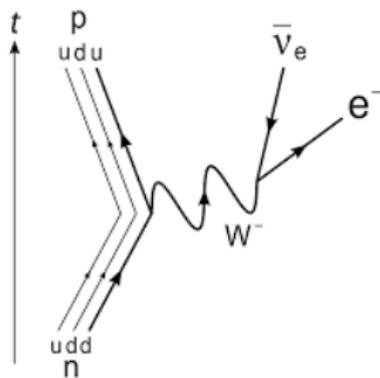
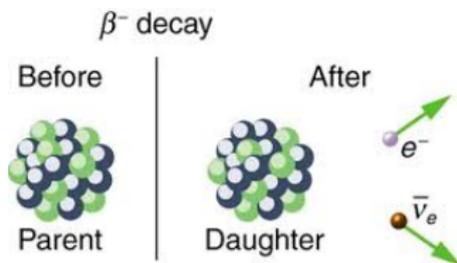
Estado: TQC = Relatividade ($E = mc^2$) + MQ ,

$|vacuo\rangle$, $|uma\ partícula\rangle$, $|duas\ partículas\rangle$...

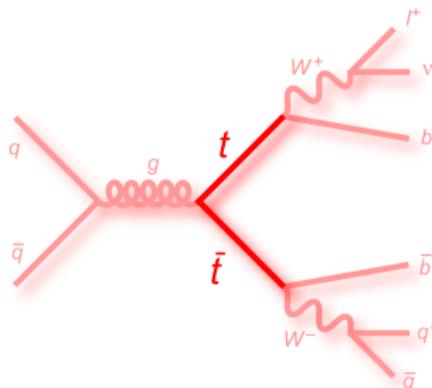
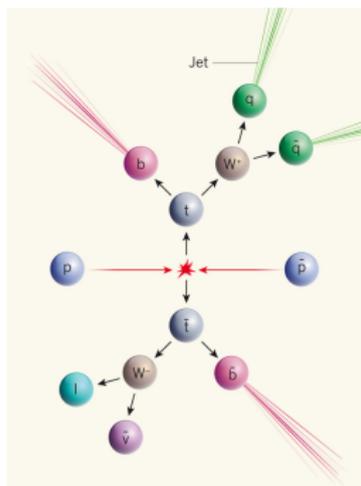
O número de partículas não está necessariamente definido

Evolução: espalhamento, decaimento, aniquilação, criação de partículas, conservando energia, momento, carga elétrica, etc.

Exemplos:

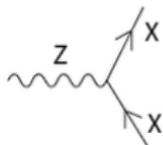


Exemplos:

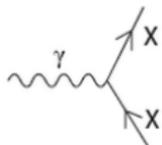


Mais precisamente...

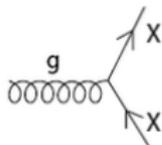
Standard Model Interactions (Forces Mediated by Gauge Bosons)



X is any fermion in the Standard Model.



X is electrically charged.



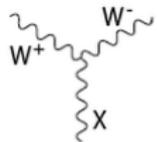
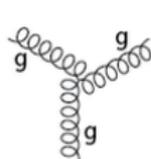
X is any quark.



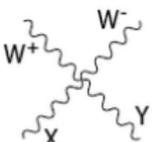
U is a up-type quark;
D is a down-type quark.



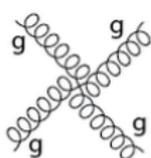
L is a lepton and ν is the
corresponding neutrino.



X is a photon or Z-boson.



X and Y are any two
electroweak bosons such
that charge is conserved.



Mais precisamente...

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{SM} = & \underbrace{\frac{1}{4} \mathbf{W}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}}_{\text{kinetic energies and self-interactions of the gauge bosons}} \\ & + \underbrace{\bar{L} \gamma^\mu (i \partial_\mu - \frac{1}{2} g \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu) L + \bar{R} \gamma^\mu (i \partial_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu) R}_{\text{kinetic energies and electroweak interactions of fermions}} \\ & + \underbrace{\frac{1}{2} \left| (i \partial_\mu - \frac{1}{2} g \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu) \phi \right|^2 - V(\phi)}_{W^\pm, Z, \gamma, \text{ and Higgs masses and couplings}} \\ & + \underbrace{g'' (\bar{q} \gamma^\mu T_a q) G_\mu^a}_{\text{interactions between quarks and gluons}} + \underbrace{(G_1 \bar{L} \phi R + G_2 \bar{L} \phi_c R + h.c.)}_{\text{fermion masses and couplings to Higgs}}\end{aligned}$$

reconhecemos algo parecido ao que vimos!

Experimento: **CERN**

Feixes de fótons (laser), feixes de elétrons

Feixes de glúons, feixes de quarks?

Força forte: a interação entre quarks e glúons é gerada por simetria local $SU(3)$

$$\begin{pmatrix} R \\ I \end{pmatrix} \rightarrow q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix}$$

Quarks e glúons estão confinados, formando objetos brancos

Problema: A teoria clássica das interações fortes não tem escalas dimensionais

Como podem os quarks estar confinados?

força $1/r^2$ e a ausência de escalas

força $1/r^2$ e a ausência de escalas

Força elétrica: $F = qE$

$$E_x = -\frac{dV}{dx} \quad , \quad E_y = -\frac{dV}{dy} \quad , \quad E_z = -\frac{dV}{dz}$$

$$-\frac{d^2V}{dx^2} - \frac{d^2V}{dy^2} - \frac{d^2V}{dz^2} = \frac{\text{densidade de carga}}{\epsilon_0}$$

força $1/r^2$ e a ausência de escalas

Força elétrica: $F = qE$

$$E_x = -\frac{dV}{dx} \quad , \quad E_y = -\frac{dV}{dy} \quad , \quad E_z = -\frac{dV}{dz}$$

$$-\frac{d^2V}{dx^2} - \frac{d^2V}{dy^2} - \frac{d^2V}{dz^2} = \frac{\text{densidade de carga}}{\epsilon_0}$$

Não resolveram? melhor! Distribuição de cargas e:

densidade de carga = e × densidade de partículas

$$f = \frac{\epsilon_0}{e} V \quad , \quad -\frac{d^2f}{dx^2} - \frac{d^2f}{dy^2} - \frac{d^2f}{dz^2} = \text{densidade de partículas}$$

força $1/r^2$ e a ausência de escalas

Força elétrica: $F = qE$

$$E_x = -\frac{dV}{dx} \quad , \quad E_y = -\frac{dV}{dy} \quad , \quad E_z = -\frac{dV}{dz}$$

$$-\frac{d^2V}{dx^2} - \frac{d^2V}{dy^2} - \frac{d^2V}{dz^2} = \frac{\text{densidade de carga}}{\epsilon_0}$$

Não resolveram? melhor! Distribuição de cargas e:

densidade de carga = e × densidade de partículas

$$f = \frac{\epsilon_0}{e} V \quad , \quad -\frac{d^2f}{dx^2} - \frac{d^2f}{dy^2} - \frac{d^2f}{dz^2} = \text{densidade de partículas}$$

$$[f] = 1/m$$

Se a distribuição de partículas tem simetria de rotação:

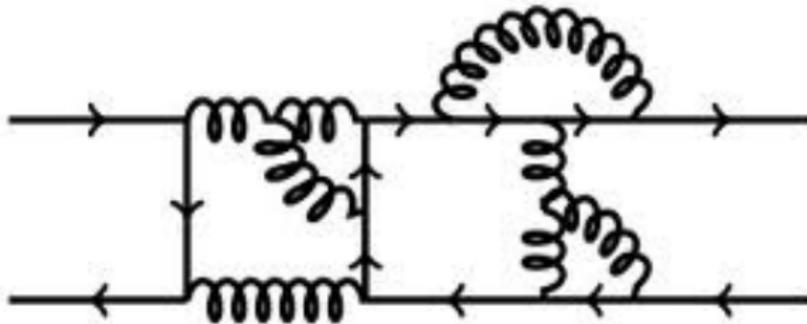
$$f = f(r)$$

Se a distribuição de partículas não tem escala dimensional:

$$f = \text{adimensional}/r \quad , \quad F = \text{adimensional}/r^2$$

Que estaria acontecendo?

O confinamento deve ser um efeito quântico



O surgimento de escadas

O surgimento de escalas

∞ = monstros nas cavernas

O surgimento de escalas

∞ = monstros nas cavernas

∞ regularizado , divergência = iluminar

O surgimento de escalas

∞ = monstros nas cavernas

∞ regularizado , divergência = iluminar

renormalizar = eliminar

O surgimento de escalas

∞ = monstros nas cavernas

∞ regularizado , divergência = iluminar

renormalizar = eliminar

renormalizável = eliminar com um número finito de pauladas.

O surgimento de escalas

∞ = monstros nas cavernas

∞ regularizado , divergência = iluminar

renormalizar = eliminar

renormalizável = eliminar com um número finito de pauladas.

definição das unidades e grandezas em escalas apropriadas ao mundo em questão...

O surgimento de escalas

∞ = monstros nas cavernas

∞ regularizado , divergência = iluminar

renormalizar = eliminar

renormalizável = eliminar com um número finito de pauladas.

definição das unidades e grandezas em escalas apropriadas ao mundo em questão...

surgem escalas...

O surgimento de escalas

∞ = monstros nas cavernas

∞ regularizado , divergência = iluminar

renormalizar = eliminar

renormalizável = eliminar com um número finito de pauladas.

definição das unidades e grandezas em escalas apropriadas ao mundo em questão...

surgem escalas...

não renormalizável = quanto mais pauladas mais cresce

O surgimento de escalas

∞ = monstros nas cavernas

∞ regularizado , divergência = iluminar

renormalizar = eliminar

renormalizável = eliminar com um número finito de pauladas.

definição das unidades e grandezas em escalas apropriadas ao mundo em questão...

surgem escalas...

não renormalizável = quanto mais pauladas mais cresce



Vácuo-YM $\Psi[\textit{campo}]$
qantiq
qqq

Por que a escala dimensional se manifesta como corda confinante?

Qual o final de Powers of Ten?

Qual o final de Powers of Ten?

Powers of ten chegando a uma situação em que avançamos e nada muda?

Qual o final de Powers of Ten?

Powers of ten chegando a uma situação em que avançamos e nada muda?

Partículas elementares são pontos?

Qual o final de Powers of Ten?

Powers of ten chegando a uma situação em que avançamos e nada muda?

Partículas elementares são pontos?

Não, existem escalas...

Qual o final de Powers of Ten?

Powers of ten chegando a uma situação em que avançamos e nada muda?

Partículas elementares são pontos?

Não, existem escalas...

Quanto maior o zoom, mais elusivas são as partículas

Qual o final de Powers of Ten?

Powers of ten chegando a uma situação em que avançamos e nada muda?

Partículas elementares são pontos?

Não, existem escalas...

Quanto maior o zoom, mais elusivas são as partículas

x, v

Qual o final de Powers of Ten?

Powers of ten chegando a uma situação em que avançamos e nada muda?

Partículas elementares são pontos?

Não, existem escalas...

Quanto maior o zoom, mais elusivas são as partículas

x, v

$$\psi(x)$$

Qual o final de Powers of Ten?

Powers of ten chegando a uma situação em que avançamos e nada muda?

Partículas elementares são pontos?

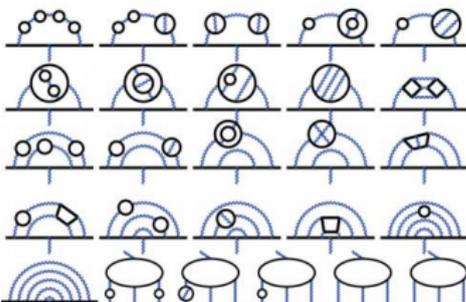
Não, existem escalas...

Quanto maior o zoom, mais elusivas são as partículas

x, v

$$\psi(x)$$

$|1\rangle, \Psi[\text{campo}], \dots$



Obrigado!