

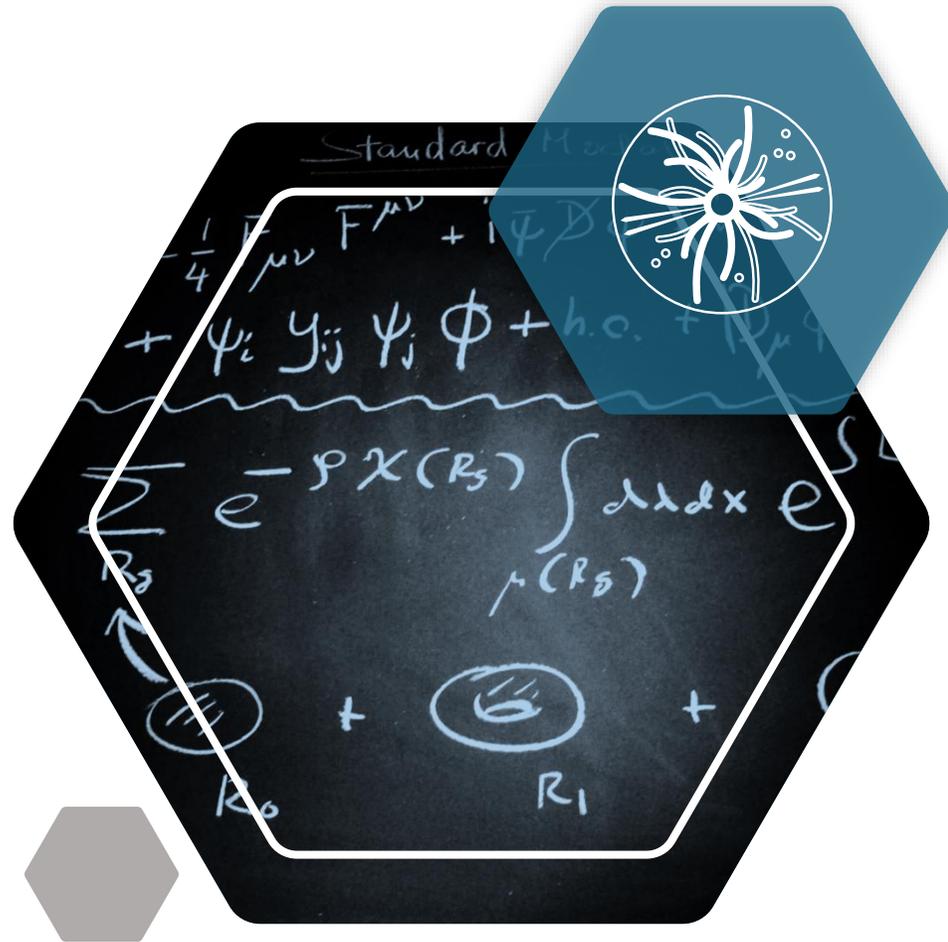
# FÍSICA MODERNA IIA

---

CONSTRUINDO O MODELO  
PADRÃO DA FÍSICA DE  
PARTÍCULAS

## AULA 14

**O QUE É PENSAR A  
ESTRUTURA ELEMENTAR?  
O TORTUOSO CAMINHO RUMO  
A UMA TEORIA QUÂNTICA DE  
CAMPOS**



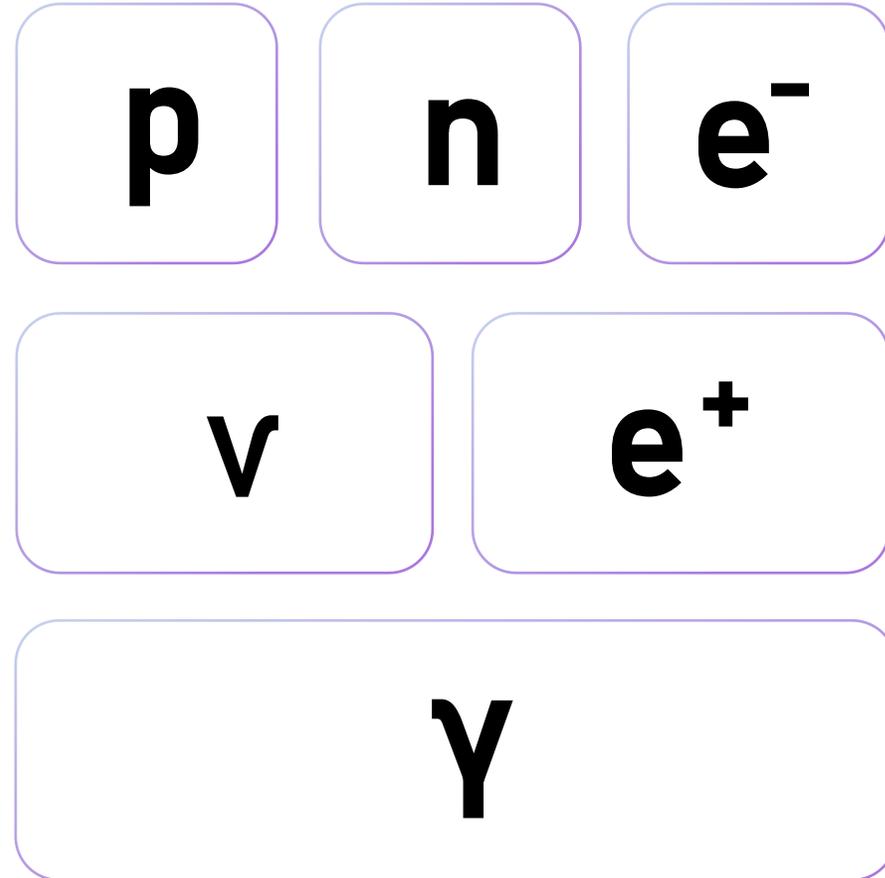
---

# DA ESTRUTURA ÀS INTERAÇÕES

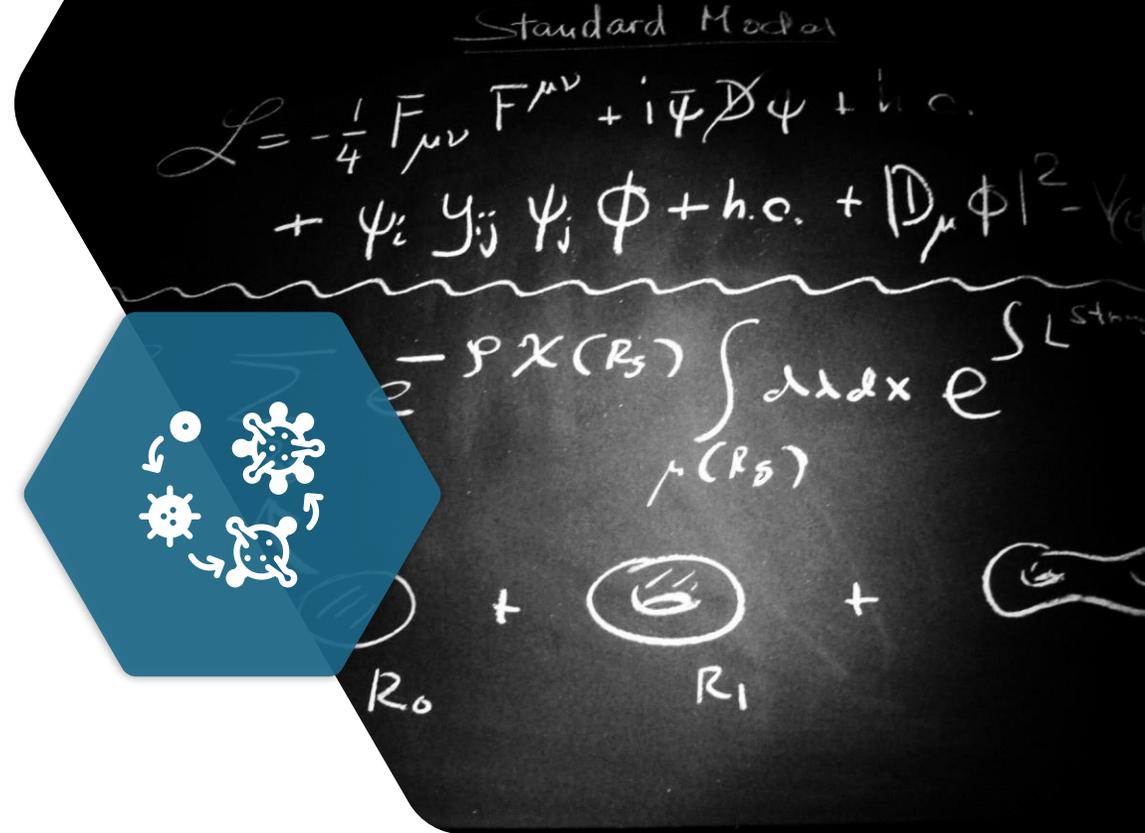
Dos Prótons (p) e Elétrons (e)  
aos Píons ( $\pi$ ) e Múons ( $\mu$ ) e um  
panorama geral das interações

# MODELO

ESTRUTURAL E ATÔMICO



ACOMPANHA A BUSCA POR UMA MECÂNICA QUÂNTICA RELATIVÍSTICA E BUSCA EXPLICAÇÕES A PARTIR DE ESTRUTURAS ELEMENTARES



## EM BUSCA DA ESTRUTURA

O “Modelo Padrão” dos primórdios da Era Quântica.

$p$   $n$

## Prótons e Neutrons

Estrutura do Núcleo Atômico

$e^+$   $e^-$   $\nu$

## Elétrons, Póstrons e Neutrinos

Decaimento  $\beta^\pm$

$\gamma$

## Fótons

Interações Eletromagnéticas

$\pi^0$   $\pi^\pm$

## Mésons $\pi^0$ e $\pi^\pm$

Núcleos e Interações Fortes

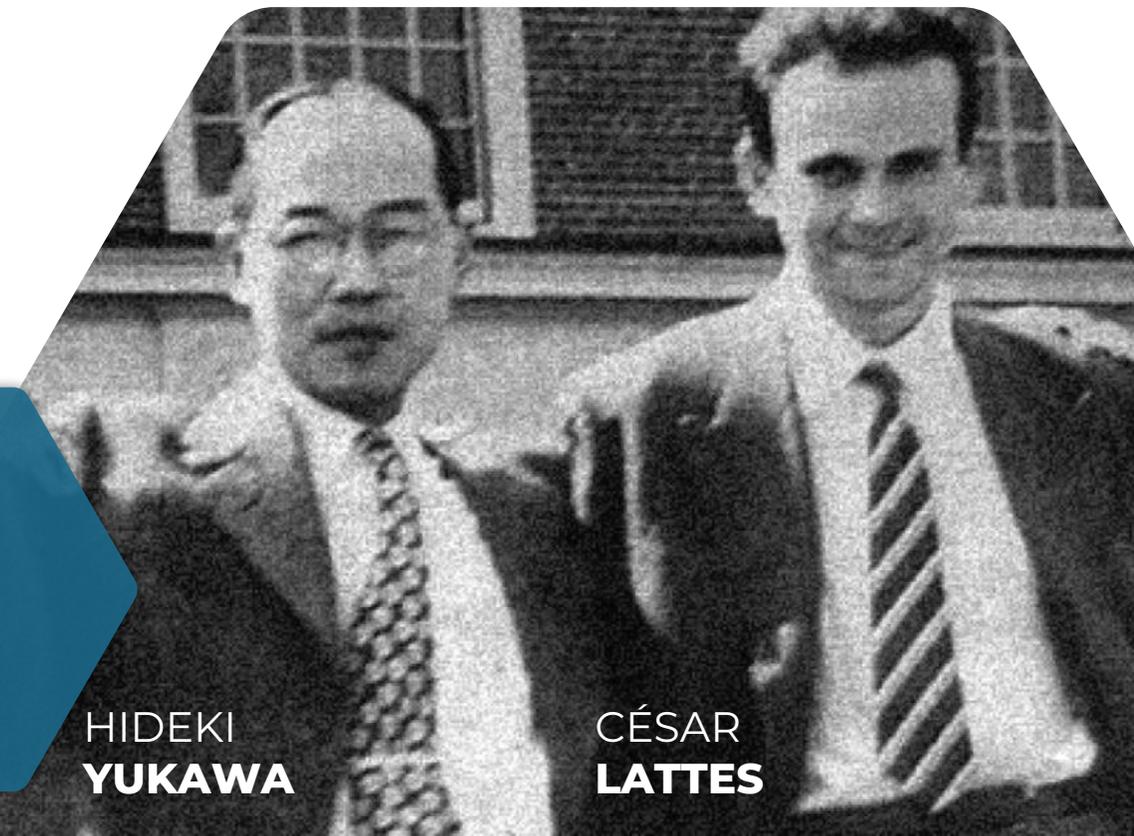
$\mu^+$   $\mu^-$   $\nu$

## Múons $\mu^\pm$ e Neutrinos

Decaimentos e Interações Fraca

# PARTÍCULAS E INTERAÇÕES

COMO PASSOU A SE PENSAR A RELAÇÃO  
ENTRE AS **ESTRUTURAS E INTERAÇÕES?**



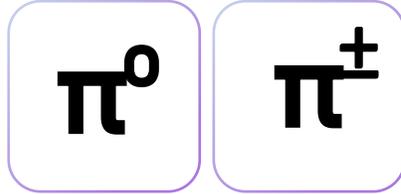
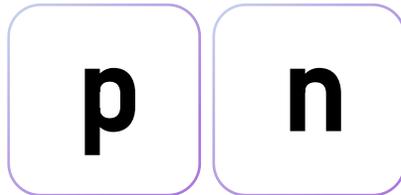
HIDEKI  
YUKAWA

CÉSAR  
LATTES

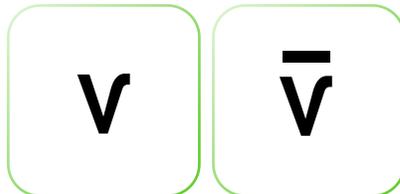
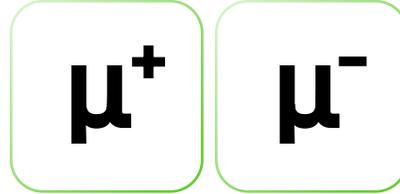
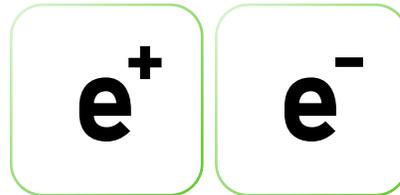
# MODELO

## QUÂNTICO DE INTERAÇÕES

Interações Fortes

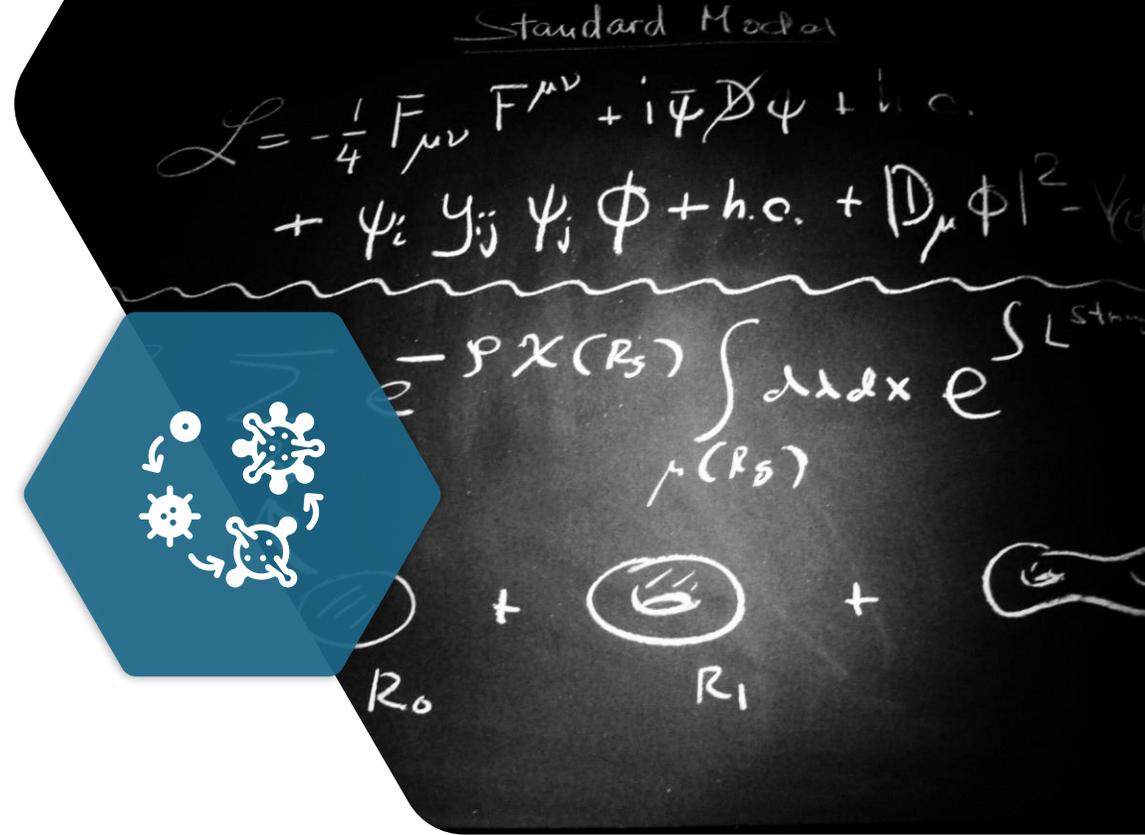


Interações Fracas



Interações  
Eletromagnéticas

**DESLOCA A BUSCA DE UMA  
MECÂNICA QUÂNTICA PARA UMA  
TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS**

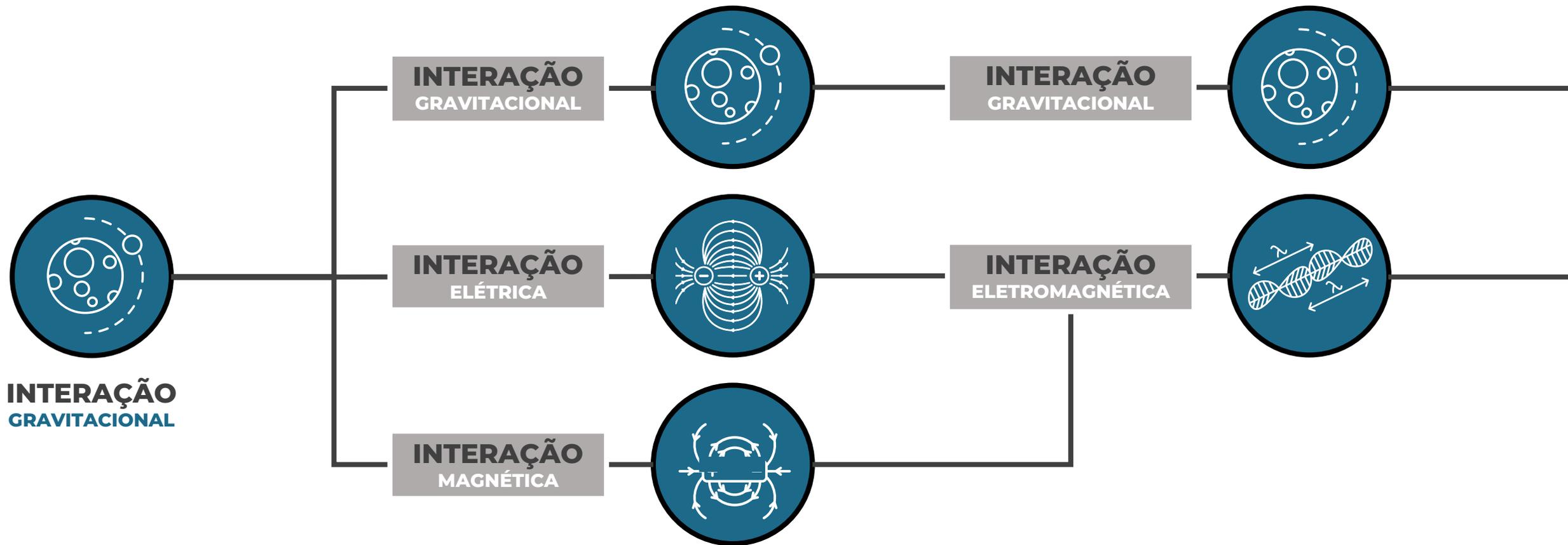


## PARTÍCULAS E INTERAÇÕES

O “Modelo Padrão” da caracterização das diferentes interações.

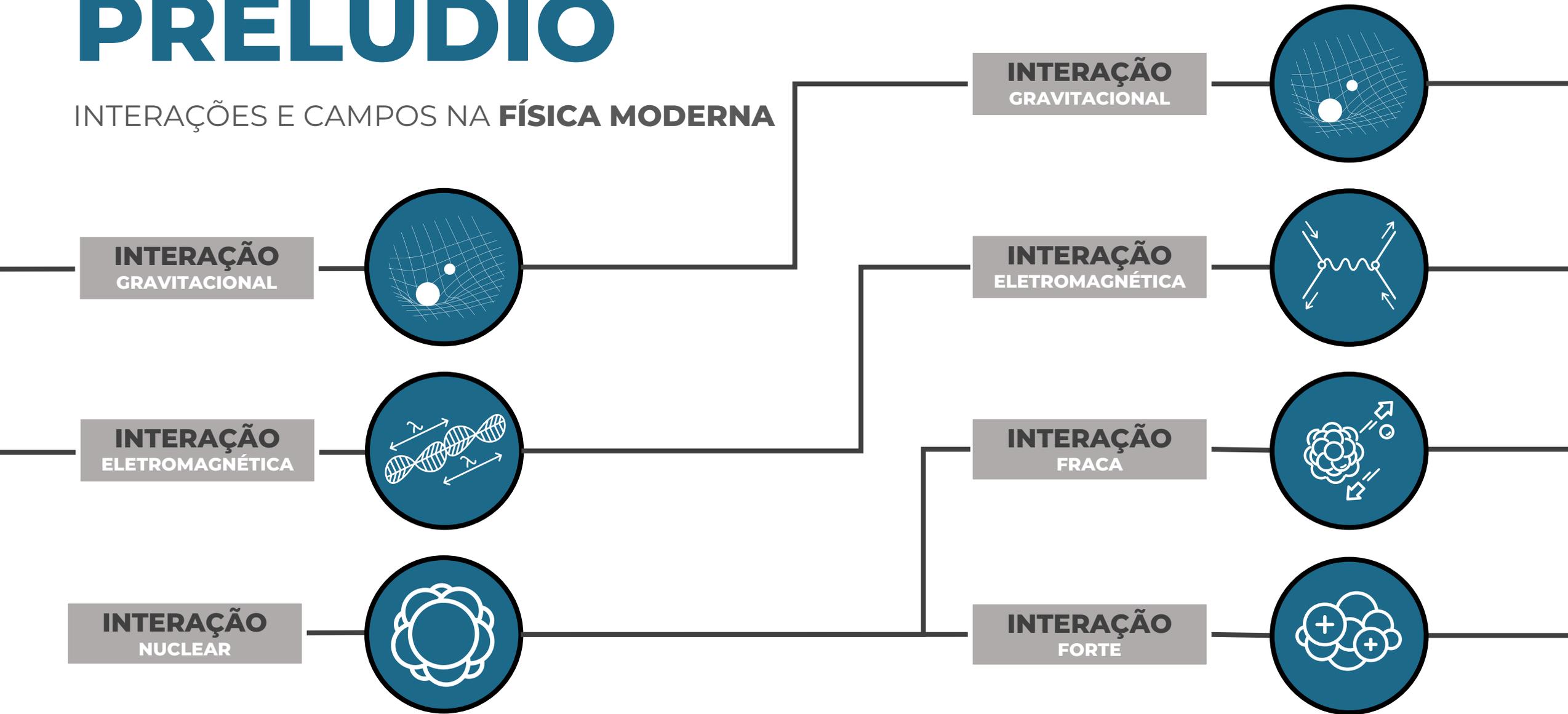
# PRELÚDIO

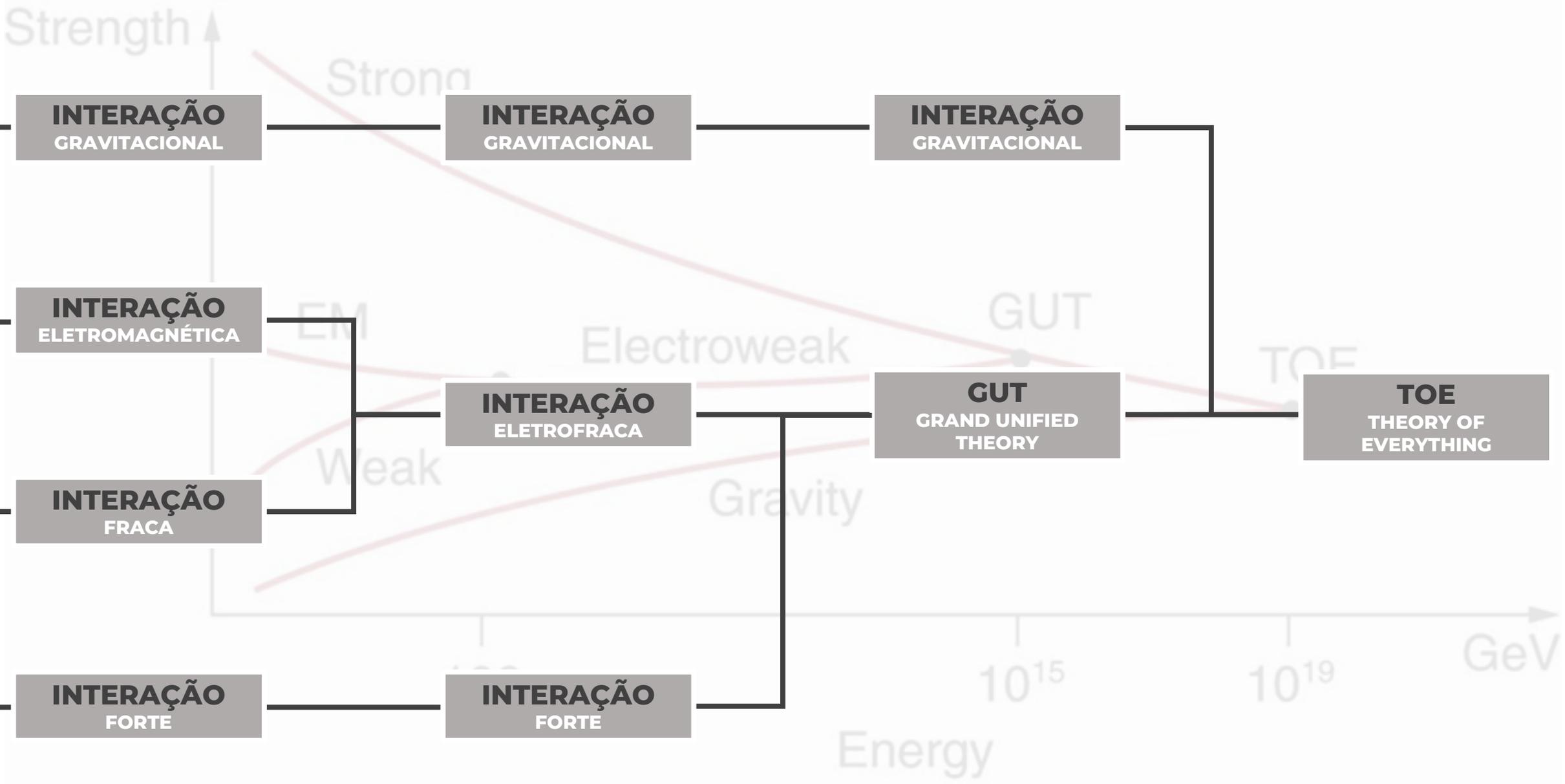
INTERAÇÕES E CAMPOS NA **FÍSICA CLÁSSICA**



# PRELÚDIO

INTERAÇÕES E CAMPOS NA **FÍSICA MODERNA**





**INTERAÇÃO GRAVITACIONAL**

**INTERAÇÃO GRAVITACIONAL**

**INTERAÇÃO GRAVITACIONAL**

**INTERAÇÃO ELETROMAGNÉTICA**

**INTERAÇÃO ELETROFRACA**

**GUT GRAND UNIFIED THEORY**

**TOE THEORY OF EVERYTHING**

**INTERAÇÃO FRACA**

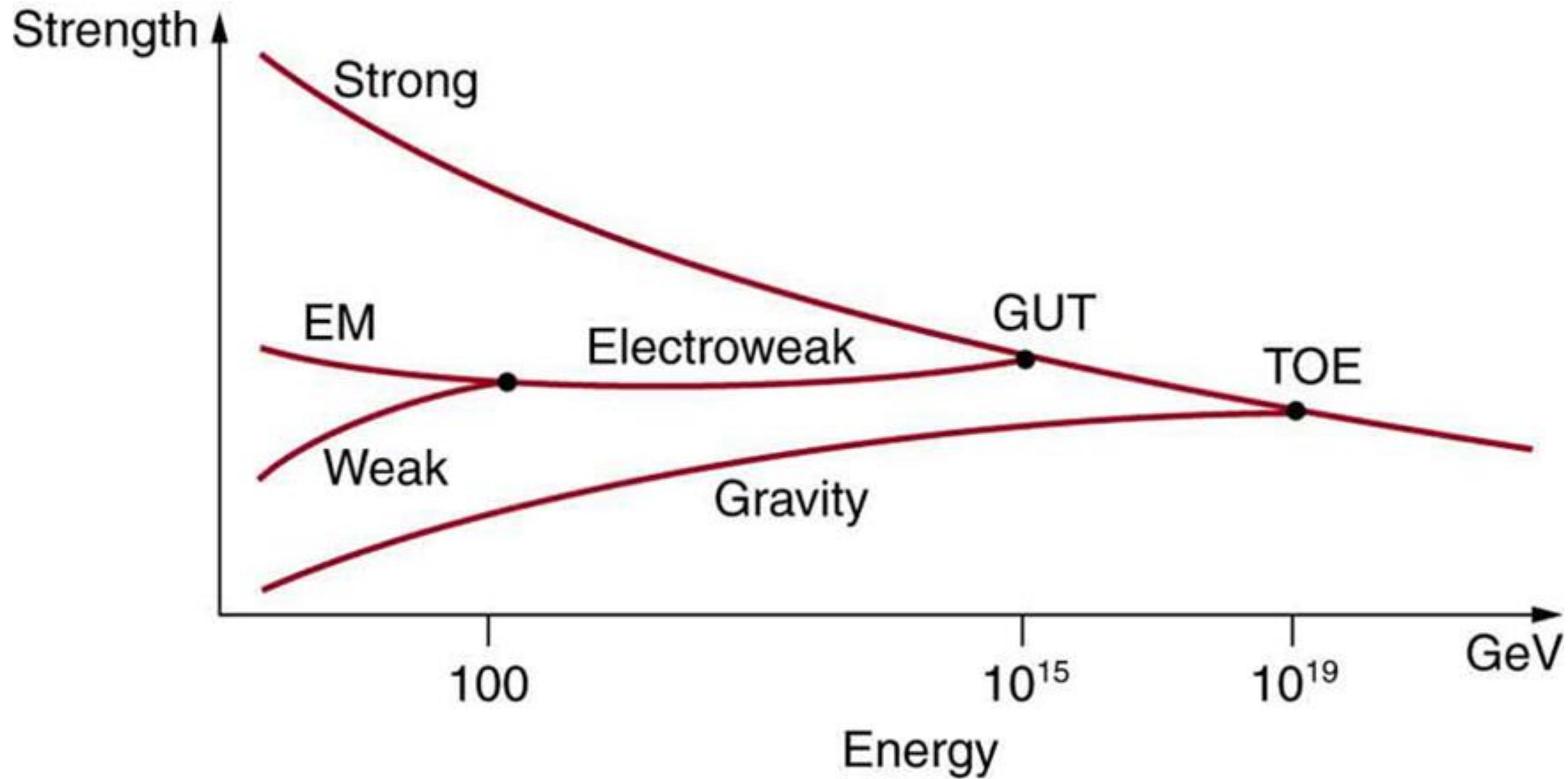
**INTERAÇÃO FORTE**

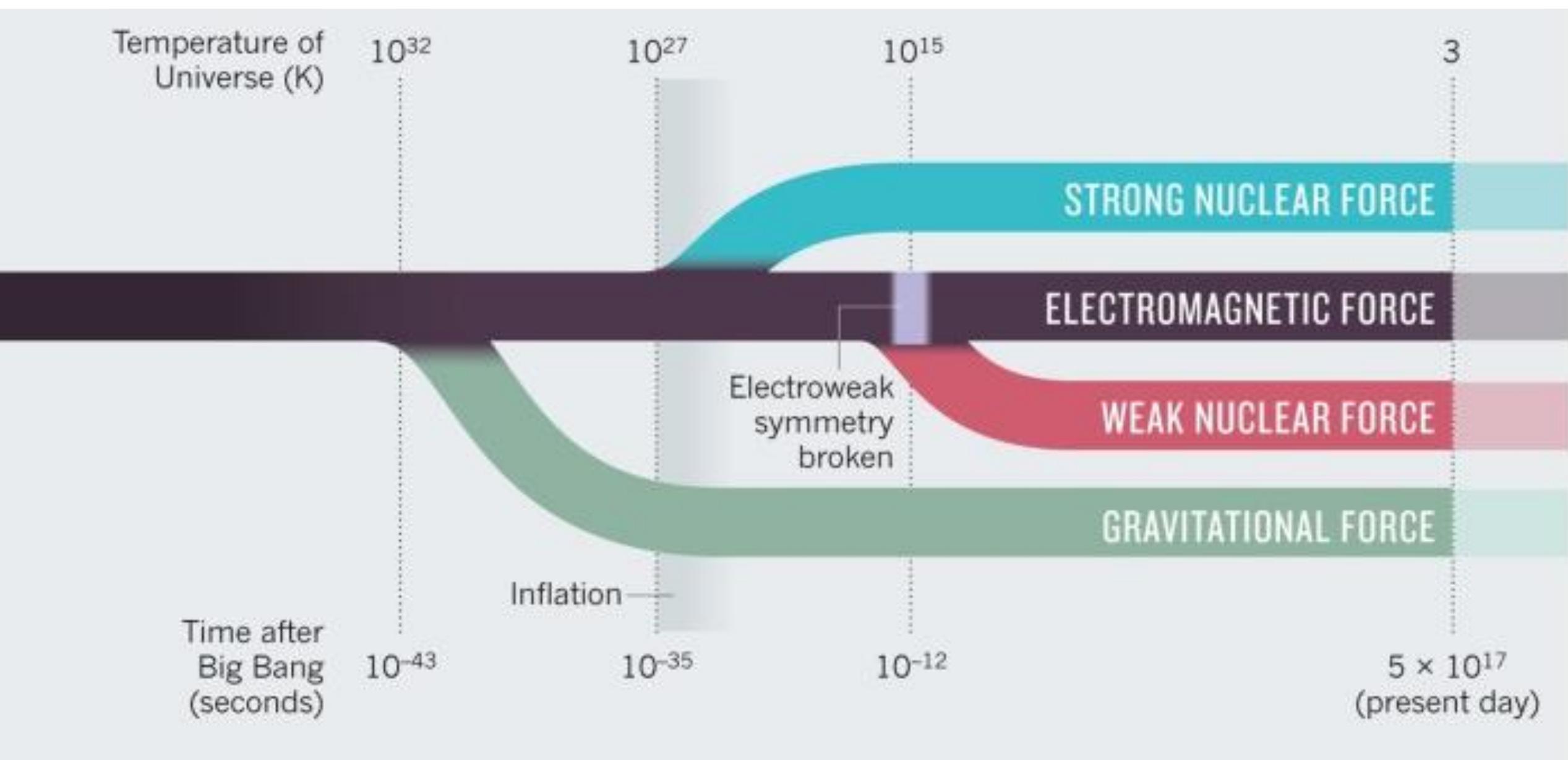
**INTERAÇÃO FORTE**

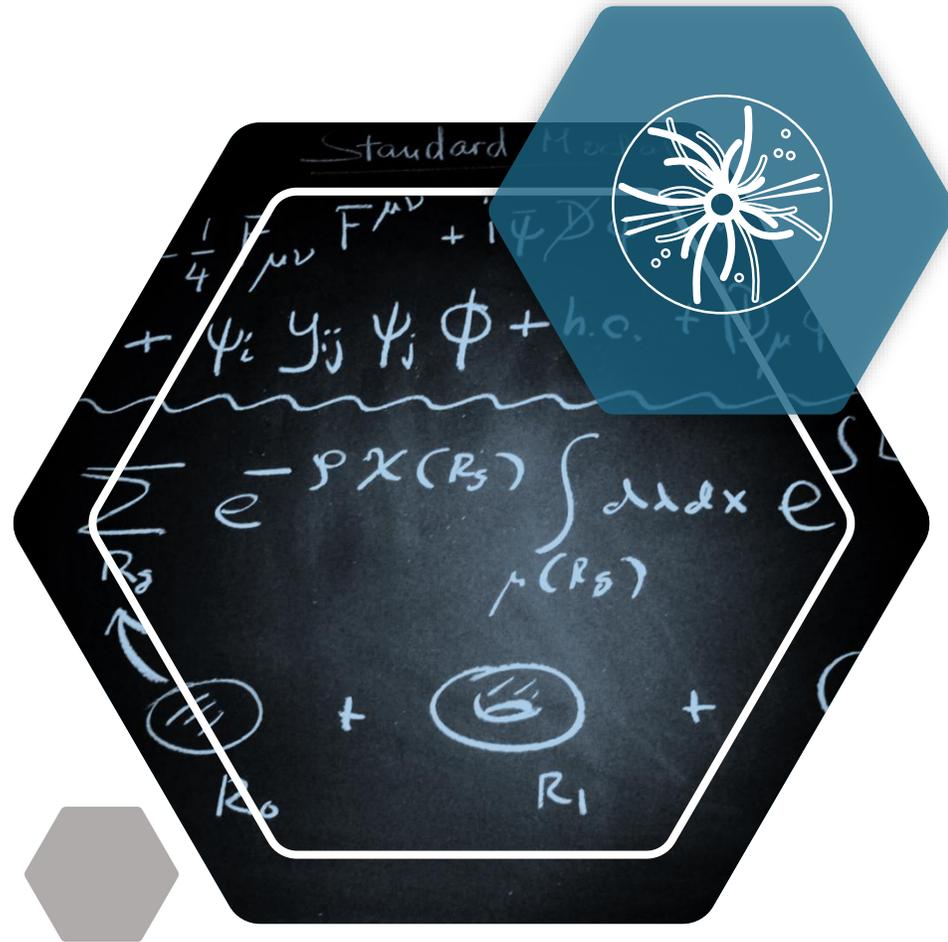
Strength ↑

GeV

Energy







---

# ORIENTAÇÕES

## P/ A RESENHA 2

O tortuoso caminho em direção a uma Teoria Quântica de Campos

# ENTENDENDO A RESENHA

Espaço para propor **dois tipos** de reflexão ao longo da disciplina:

- 1** **Construção histórica** dos conceitos debatidos na disciplina
- 2** **Implicações pessoais** sobre a forma como pensamos a estrutura elementar

2 PÁGINAS

TAM. 12

ESPAÇ. 1,15





---

# AVALIAÇÃO DA RESENHA

Critérios de avaliação da Resenha 2

Cumprimento da proposta  
e parâmetros de formatação **1**

Referência direta e indireta  
a elementos do texto **2**

Abordagem e adequação  
da **reflexão histórica** **3**

Abordagem e adequação  
da **autoreflexão epistemológica** **4**

2 PÁGINAS

TAM. 12

ESPAÇ. 1,15

ENTREGA VIA MOODLE  
**ATÉ AS 23:59 de 05/11**

---

# CONHECENDO O AUTOR

PhD em Física pela Universidade de Londres e PhD Science Studies pela Universidade de Eddingburgh

Pesquisador **reconhecido internacionalmente no campo do Science Studies**, concentra seus estudos em temas diversos da física de partículas no período durante e pós-Segunda Guerra Mundial; investiga **implicações matemática das teorias, ciências e indústria no século XIX**; e **ciência e tecnologia no período entre-guerras**.

ANDREW PICKERING



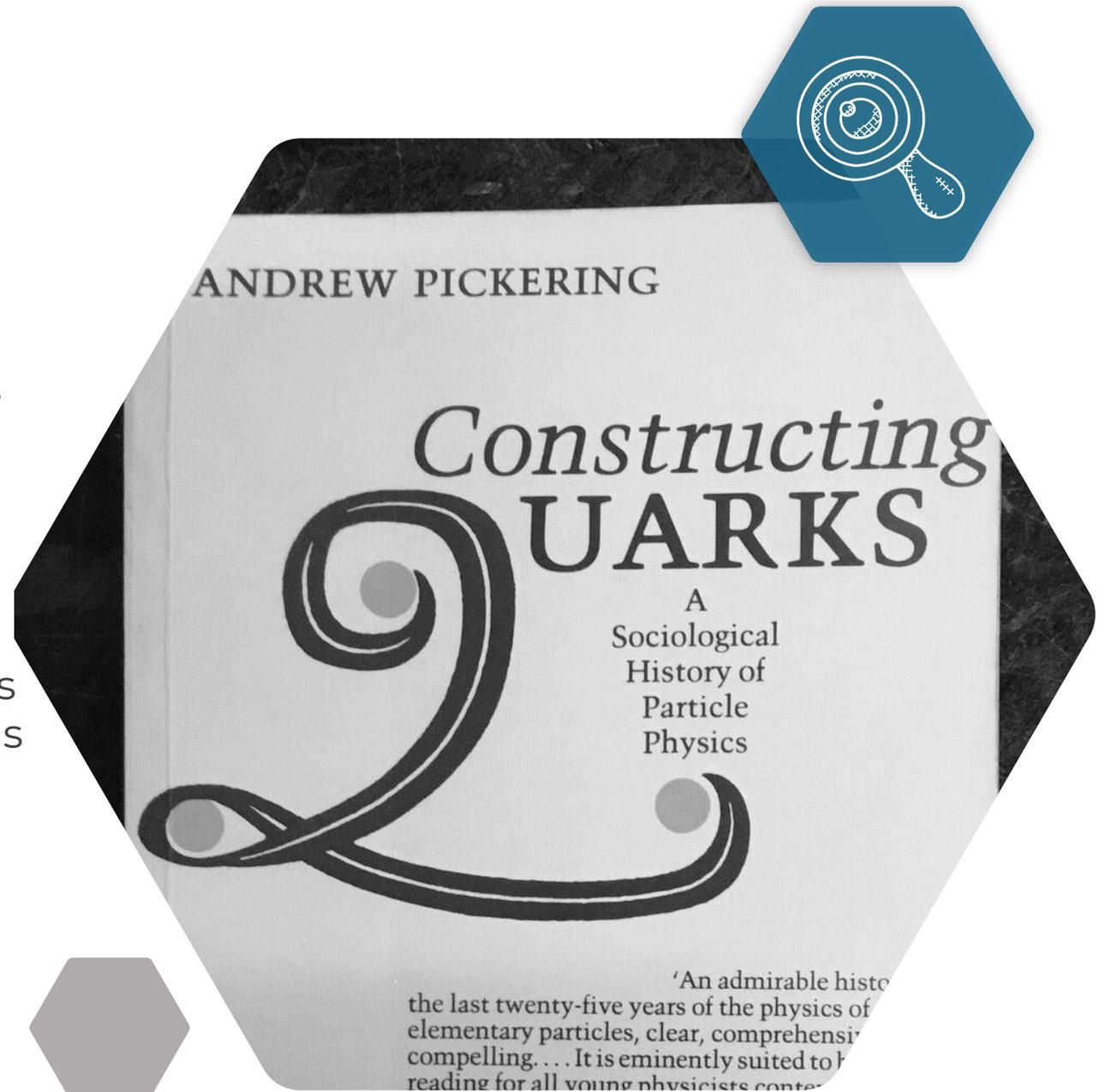
---

# CONHECENDO O AUTOR

PhD em Física pela Universidade de Londres e PhD Science Studies pela Universidade de Eddingburgh

Pesquisador **reconhecido internacionalmente no campo do Science Studies**, concentra seus estudos em temas diversos da física de partículas no período durante e pós-Segunda Guerra Mundial; investiga **implicações matemática das teorias, ciências e indústria no século XIX**; e **ciência e tecnologia no período entre-guerras**.

ANDREW PICKERING





---

# REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

Incorporadas na tradução adaptada

The Search for Unity:  
History of Quantum Field Theory  
Steven Weinberg, 1977



QED and Who Made It: Dyson,  
Feynman, Schwinger & Tomonaga  
Silvan Schweber, 1994



As Interações Fracas:  
Uma introdução  
José Leite Lopes, 1974 [2020]





A partir dos diagramas discutidos no texto, discuta a **lógica estrutural da QED**, as razões do **sucesso ao lidar com os infinitos** e as **limitações e problemas** enfrentados ao descrever as **interações fortes e fracas**.

**Questão histórica e epistemológica**



PAUL  
DIRAC

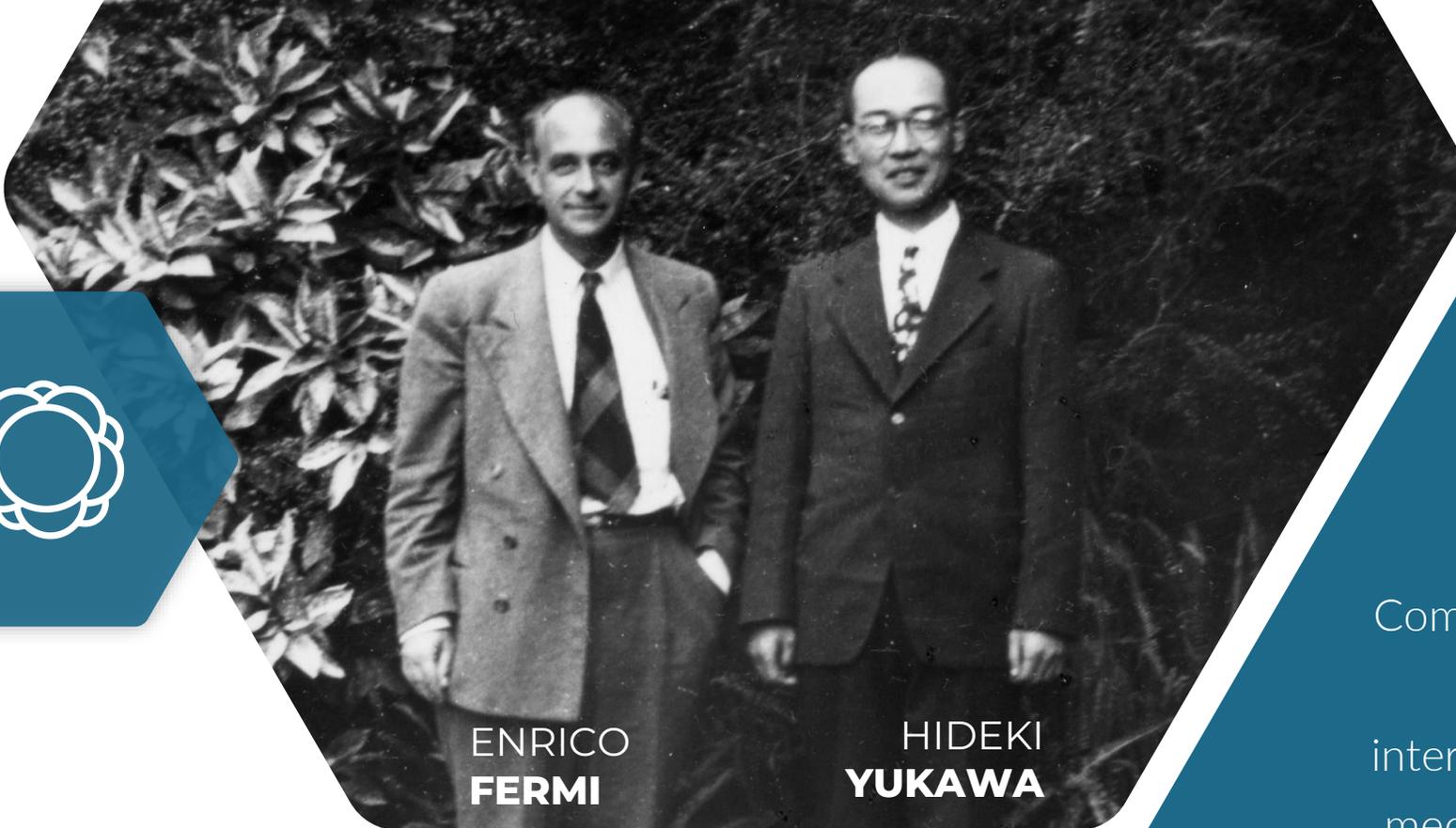
RICHARD  
FEYNMAN

---

# PROPOSTA

## RESENHA 2

Redigir uma resenha, inspirada na leitura do texto, debatendo primeiramente o seguinte ponto ...



ENRICO  
**FERMI**

HIDEKI  
**YUKAWA**

---

# PROPOSTA

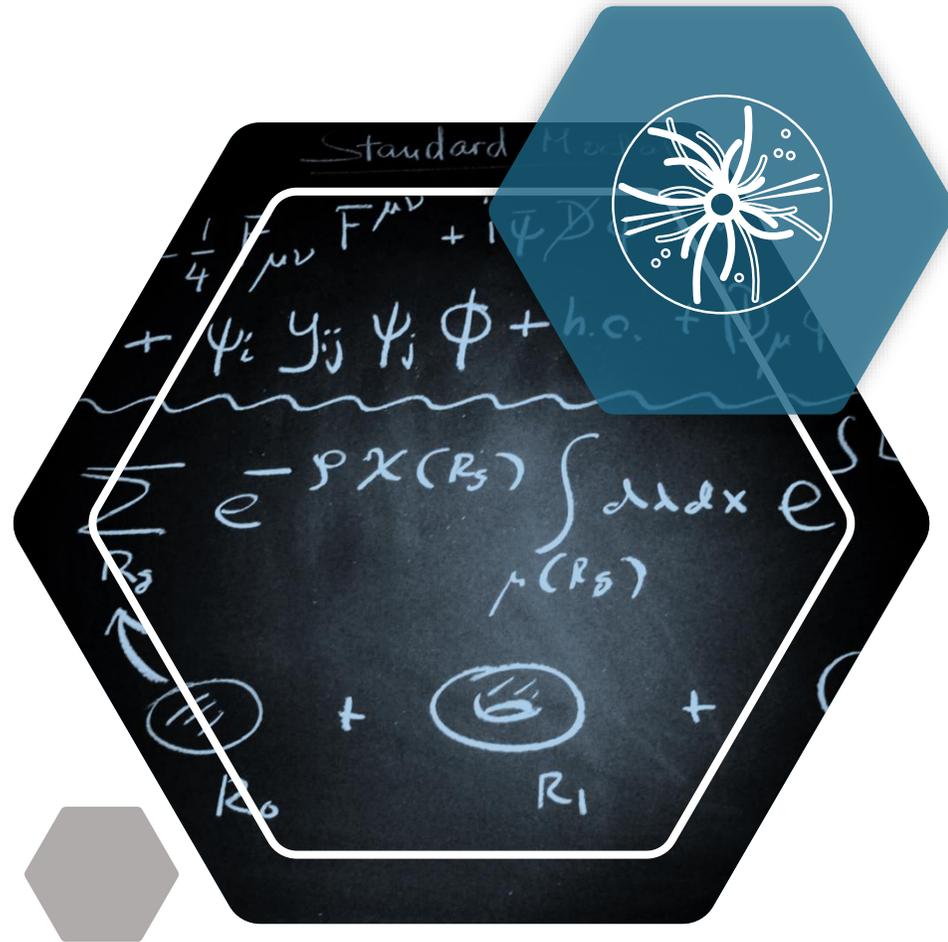
## RESENHA 2

... e complementarmente **uma segunda questão.**



Como você avalia a abordagem perturbativa que trata das interações a partir de partículas mediadoras virtuais? O que ela trouxe de **conflitos e novas concepções sobre a forma como você pensa** a dinâmica das interações?

**Questão de autoreflexão epistemológica**



---

# DO CLÁSSICO AO QUÂNTICO

O que muda nas Forças e Campos com a chegada da Física Moderna?

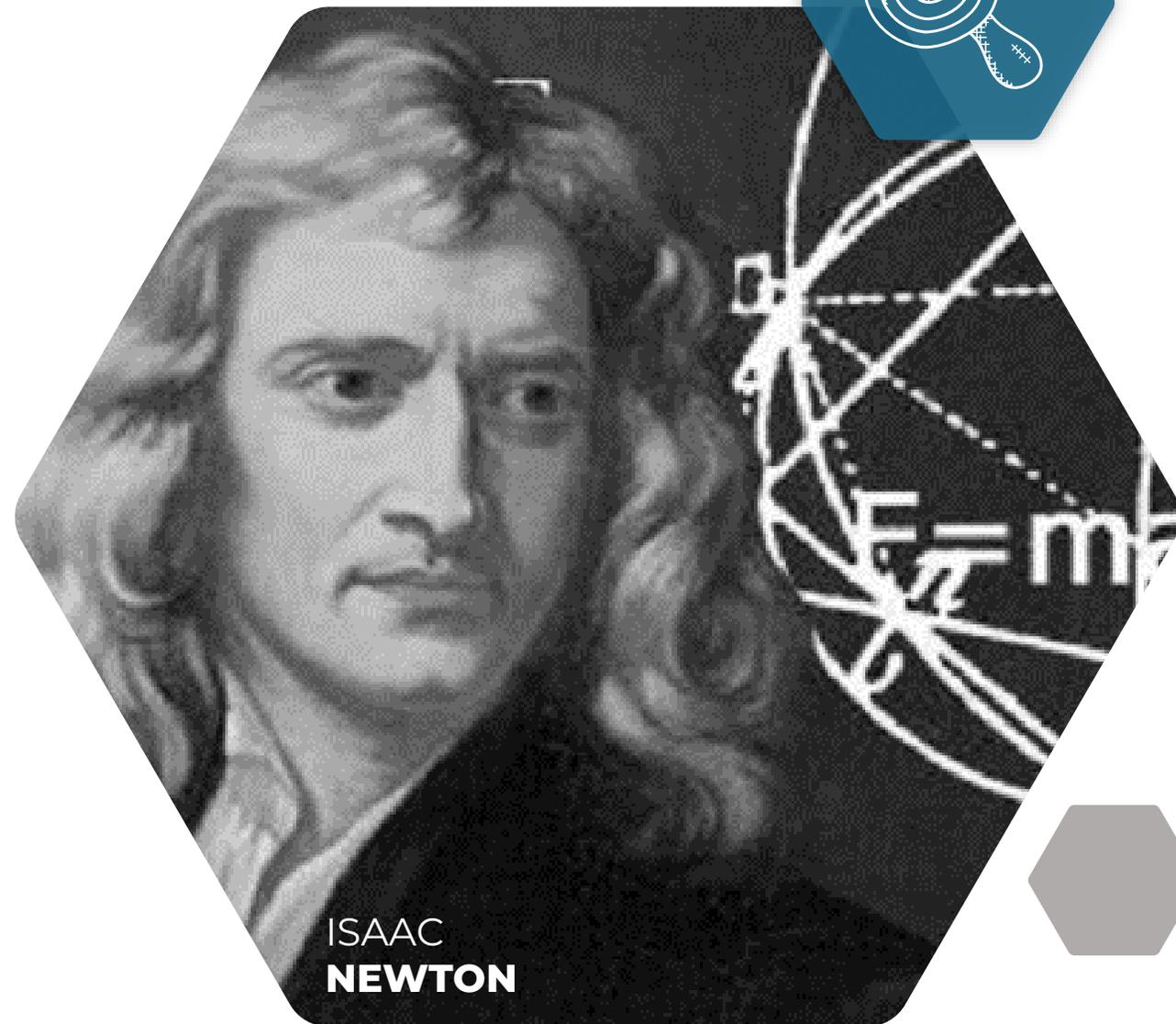
---

# DESCRIÇÃO DINÂMICA

Para refletirmos coletivamente

A partir de que momento começamos a realizar descrições dinâmicas precisas **dos movimentos e suas causas?**

FORÇAS E CAMPOS



ISAAC  
NEWTON

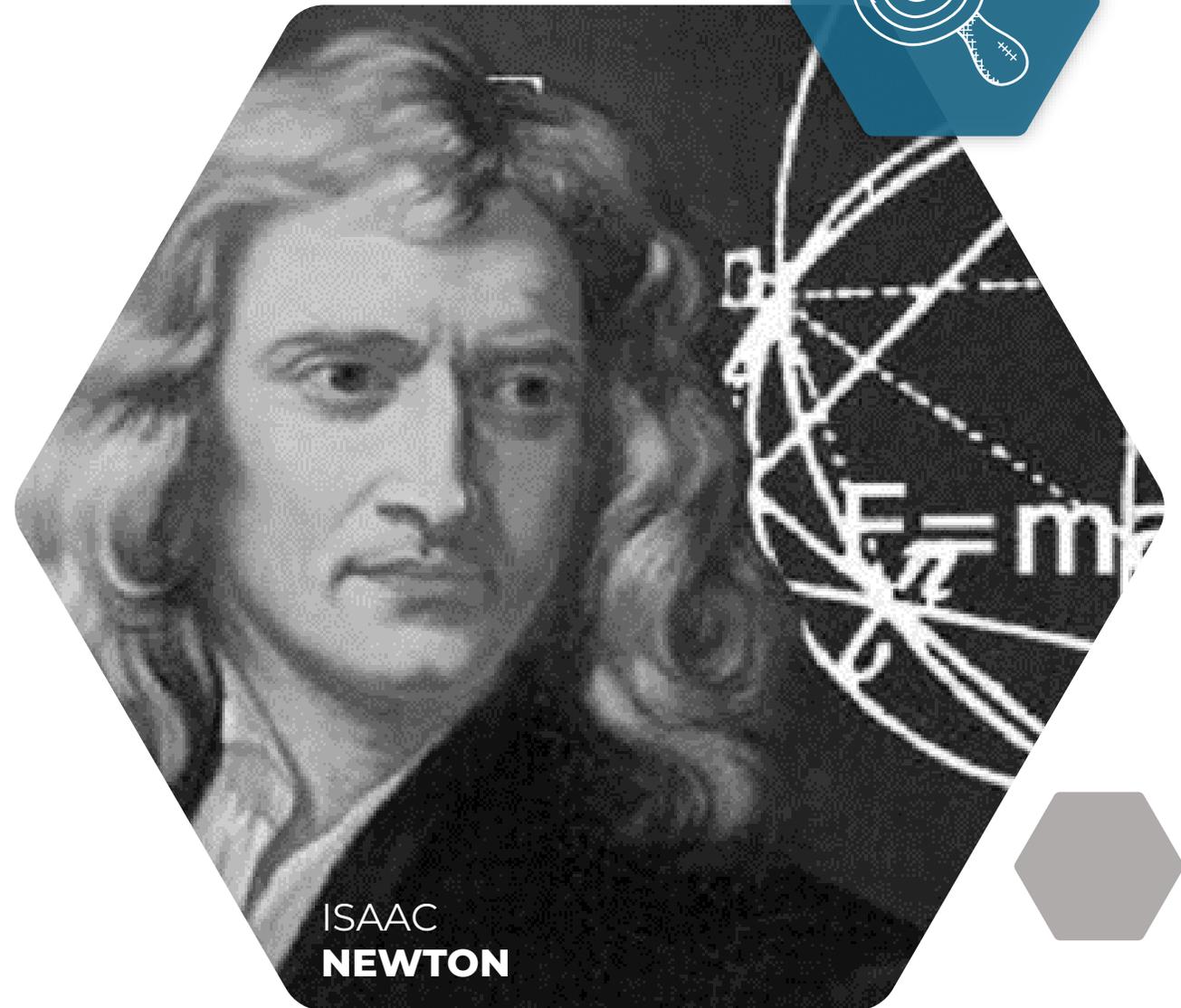
# DESCRIÇÃO DINÂMICA

Para refletirmos coletivamente



$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Newton  
Força, Vetorial



# DESCRIÇÃO DINÂMICA

Para refletirmos coletivamente



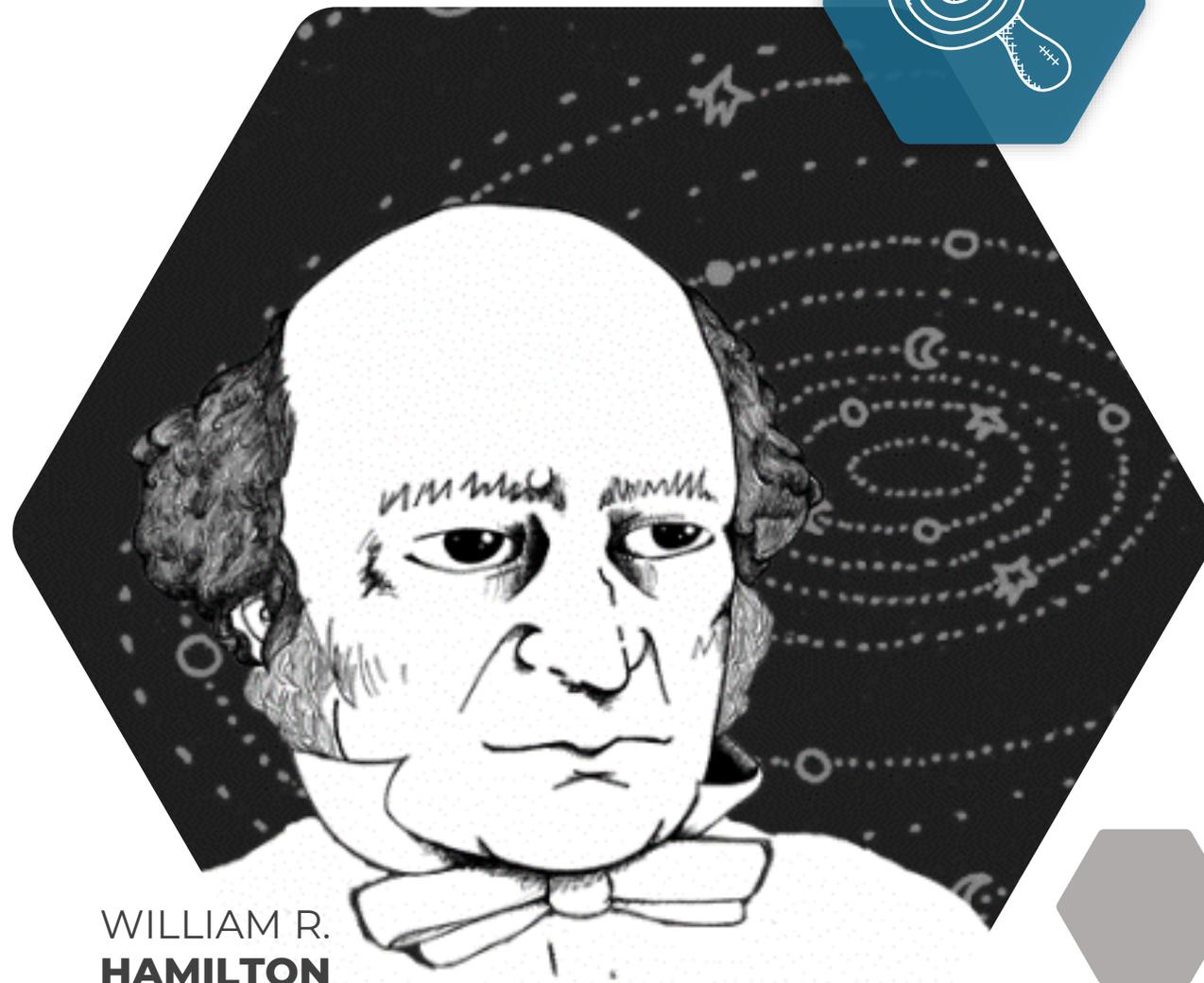
$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Newton  
Força, Vetorial



$$H = T + U$$

Hamilton  
Potencial, Escalar



WILLIAM R.  
**HAMILTON**

# DESCRIÇÃO DINÂMICA

Para refletirmos coletivamente



$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Newton  
Força, Vetorial



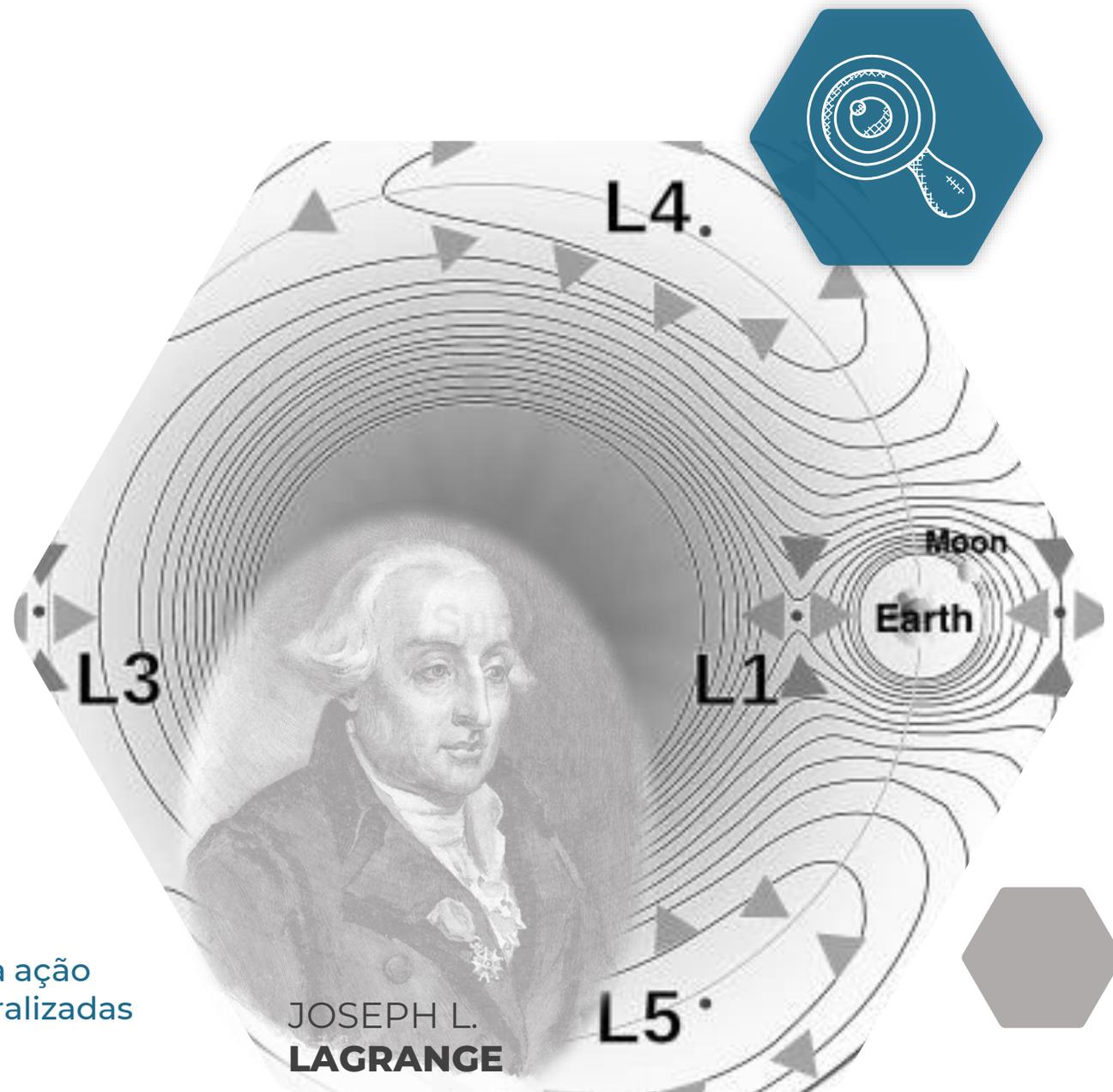
$$H = T + U$$

Hamilton  
Potencial, Escalar



$$L = T - U$$

Lagrange  
Princípio da Mínima ação  
Coordenadas Generalizadas



---

# DESCRIÇÃO DINÂMICA

Para refletirmos coletivamente



$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$$

Newton  
Força, Vetorial



**VETORES NO  
ESPAÇO FÍSICO**



$$-\frac{\partial H}{\partial q} = \frac{dp}{dt}$$

Hamilton  
Potencial, Escalar



**POTENCIAL NO  
ESPAÇO FÍSICO**



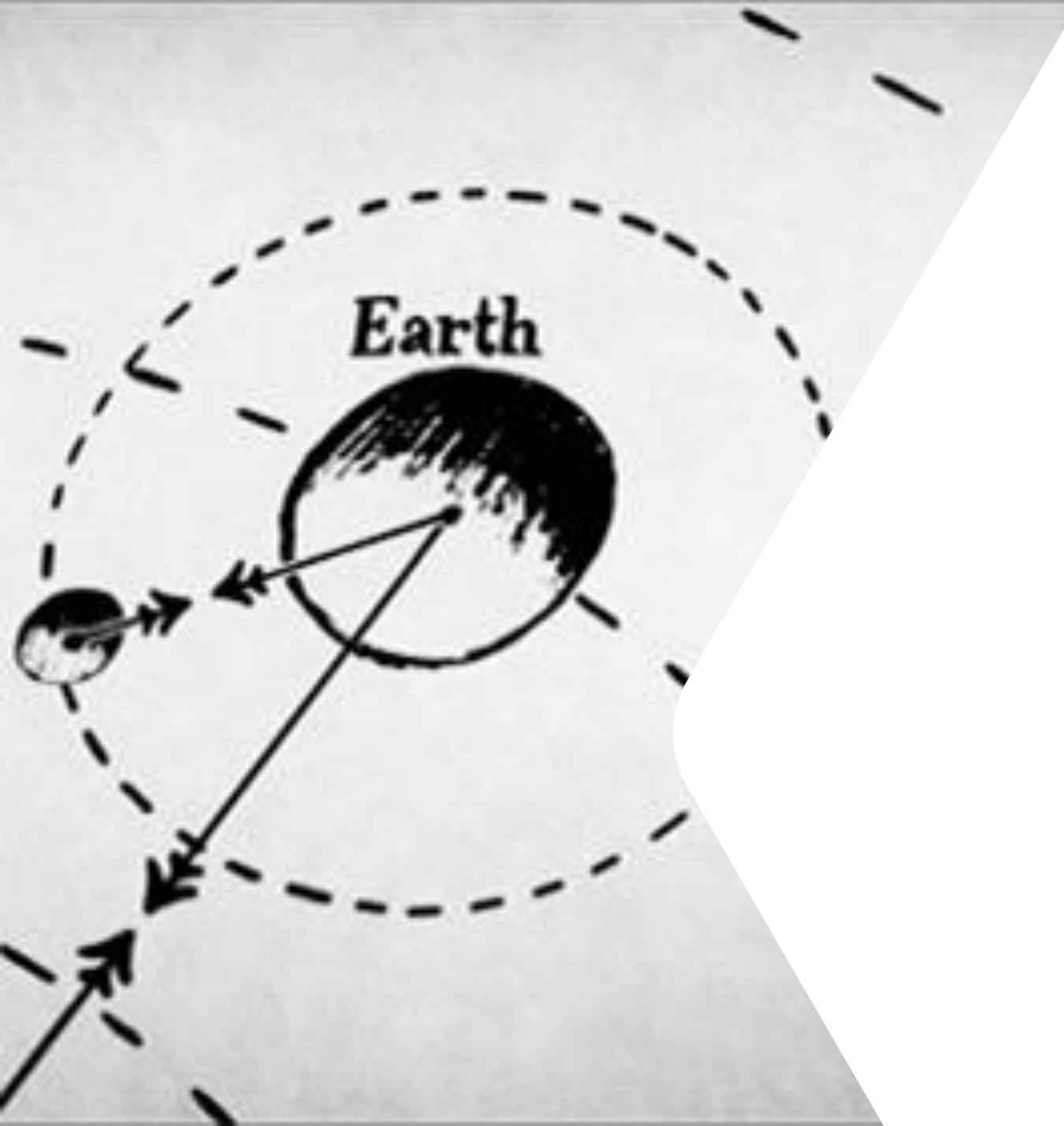
$$\frac{\partial L}{\partial q} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right)$$

Lagrange  
Princípio da Mínima ação  
Coordenadas Generalizadas



**MÍNIMA AÇÃO NO  
ESPAÇO ABSTRATO**

O QUE MOTIVA A MUDANÇA NOS  
**FORMALISMOS?**



# INTERAÇÃO À DISTÂNCIA

A gravitação newtoniana

$$F_G = G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

AÇÃO

CONTÍNUA

INSTANTÂNEA



# DA FORÇA AOS CAMPOS

Campos no Eletromagnetismo Clássico

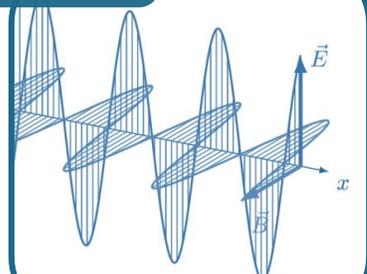

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$


$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$


$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$


$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

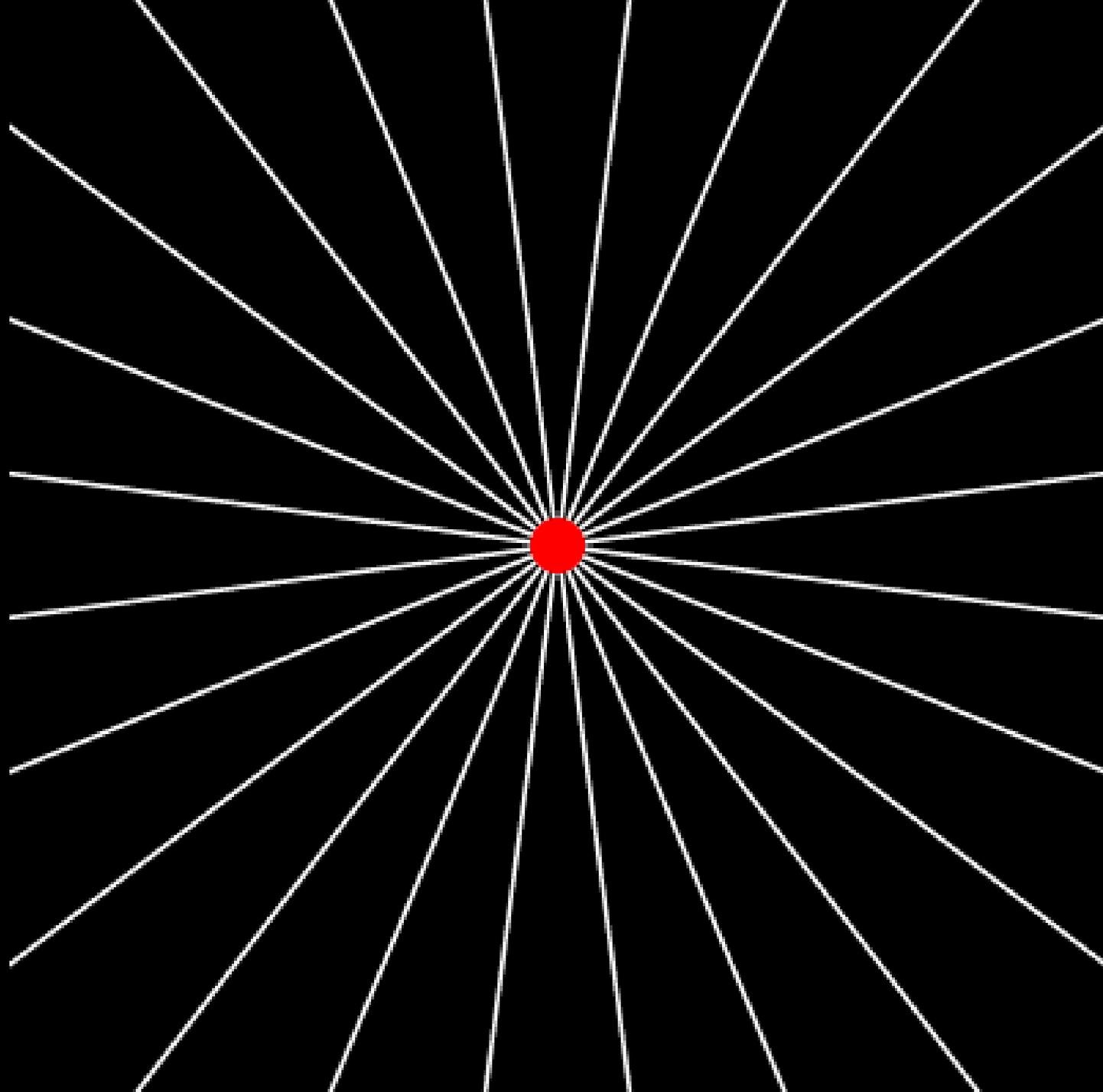


$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

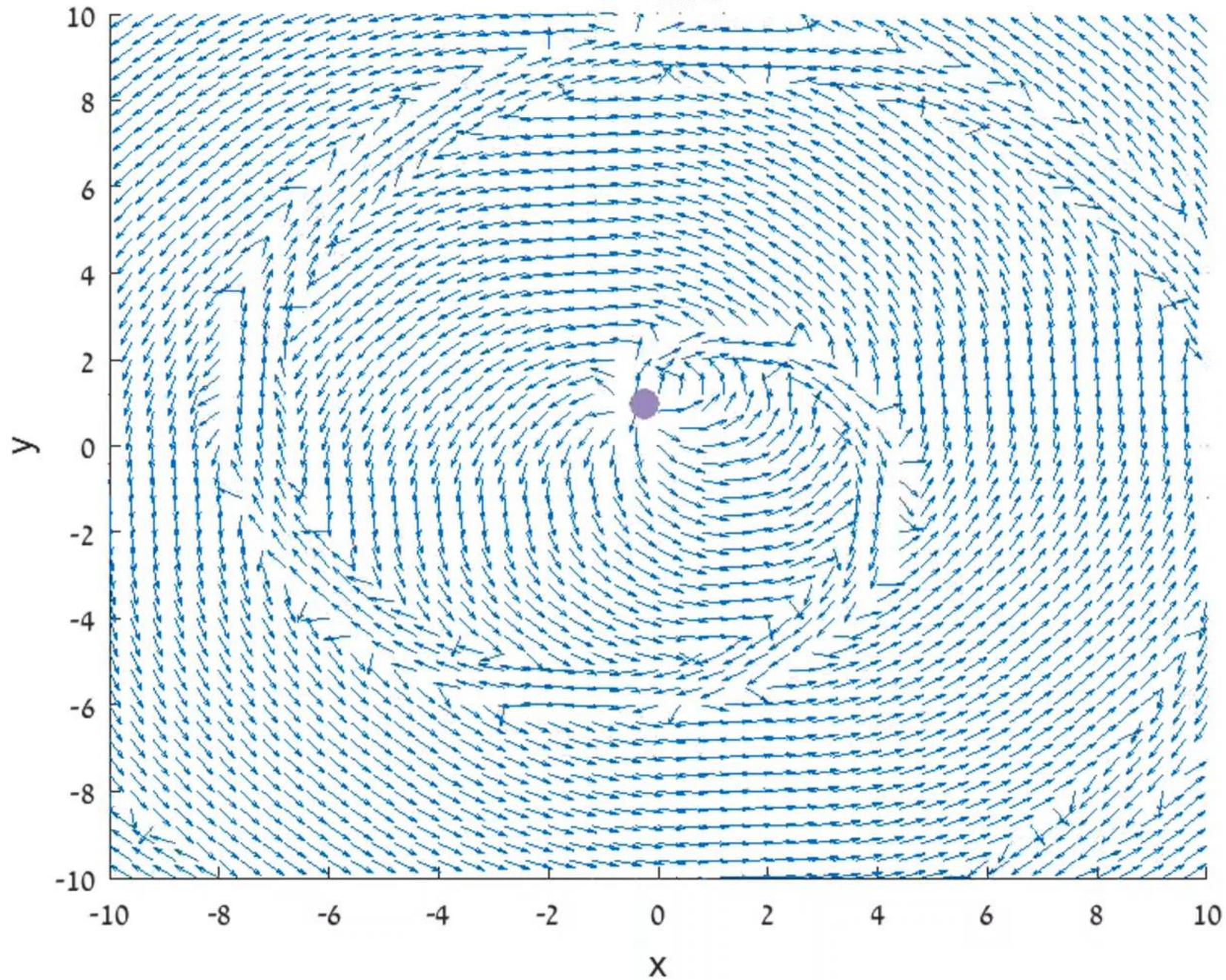
**AÇÃO**

**CONTÍNUA**

**NÃO-INSTANTÂNEA**



$$\omega = 0.9c$$



---

# OS CAMPOS CLÁSSICOS

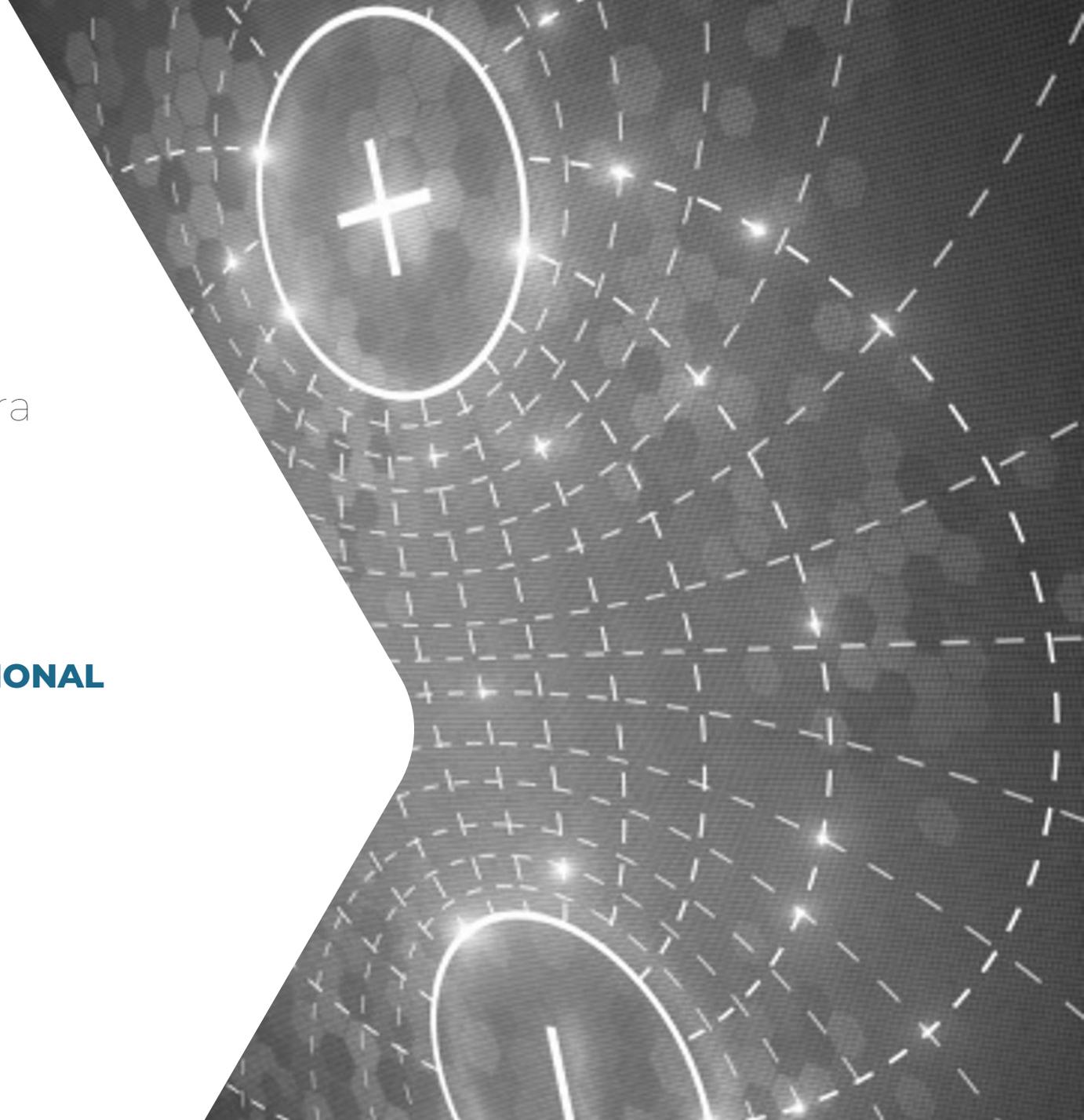
O obstáculo da semelhança de estrutura

$$F_G = G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

FORÇA GRAVITACIONAL

$$F_E = k \frac{Q_1 Q_2}{R^2}$$

FORÇA ELÉTRICA



---

# OS CAMPOS CLÁSSICOS

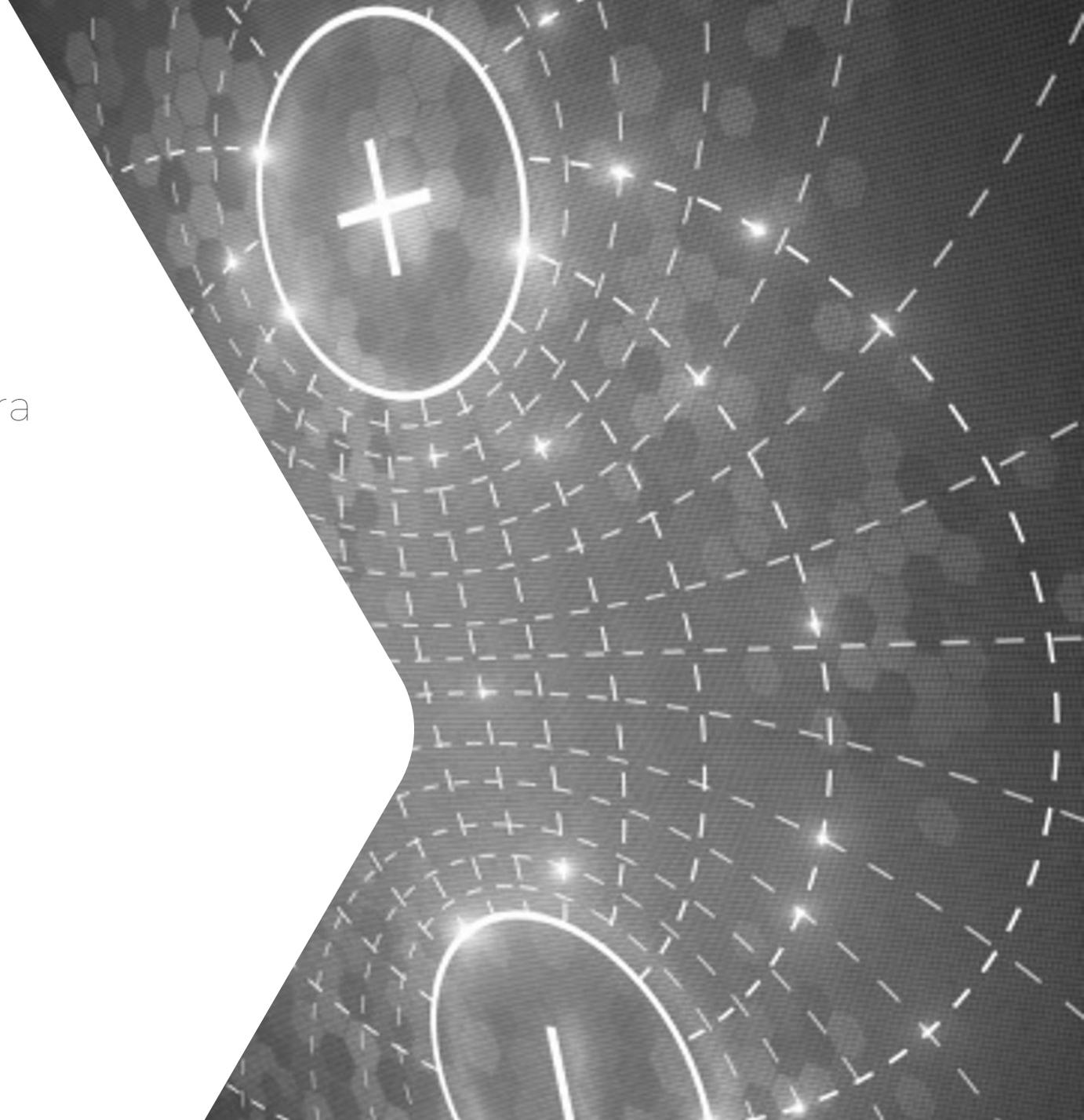
O obstáculo da semelhança de estrutura

$$\mathbf{g} = \mathbf{G} \frac{M}{R^2}$$

CAMPO  
GRAVITACIONAL

$$\mathbf{E} = \mathbf{k} \frac{Q}{R^2}$$

CAMPO  
ELÉTRICO



---

# OS CAMPOS CLÁSSICOS

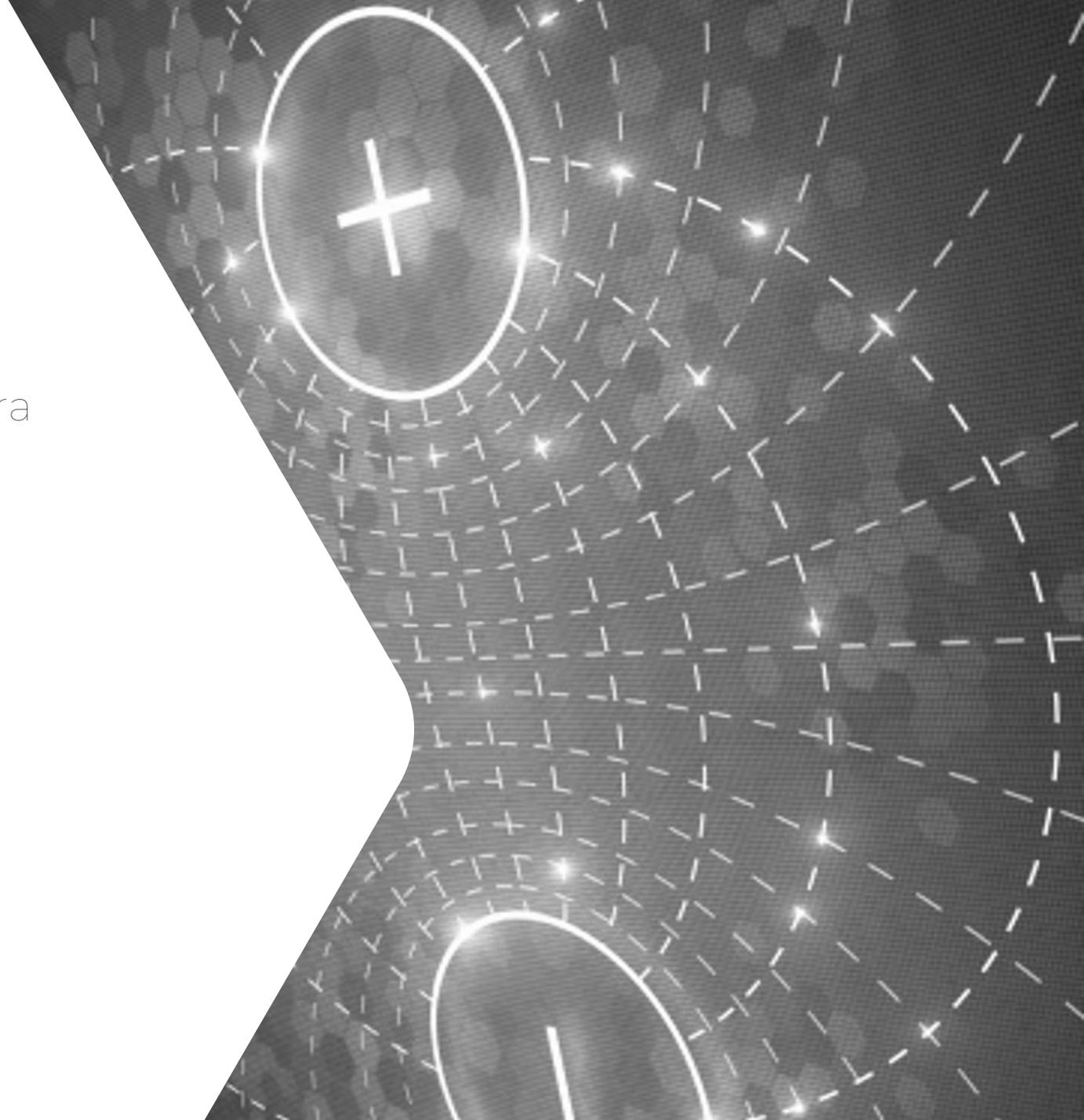
O obstáculo da semelhança de estrutura

$$U = G \frac{M}{R}$$

POTENCIAL  
GRAVITACIONAL

$$V = k \frac{Q}{R}$$

POTENCIAL  
ELÉTRICO



---

# OS CAMPOS CLÁSSICOS

O obstáculo da semelhança de estrutura

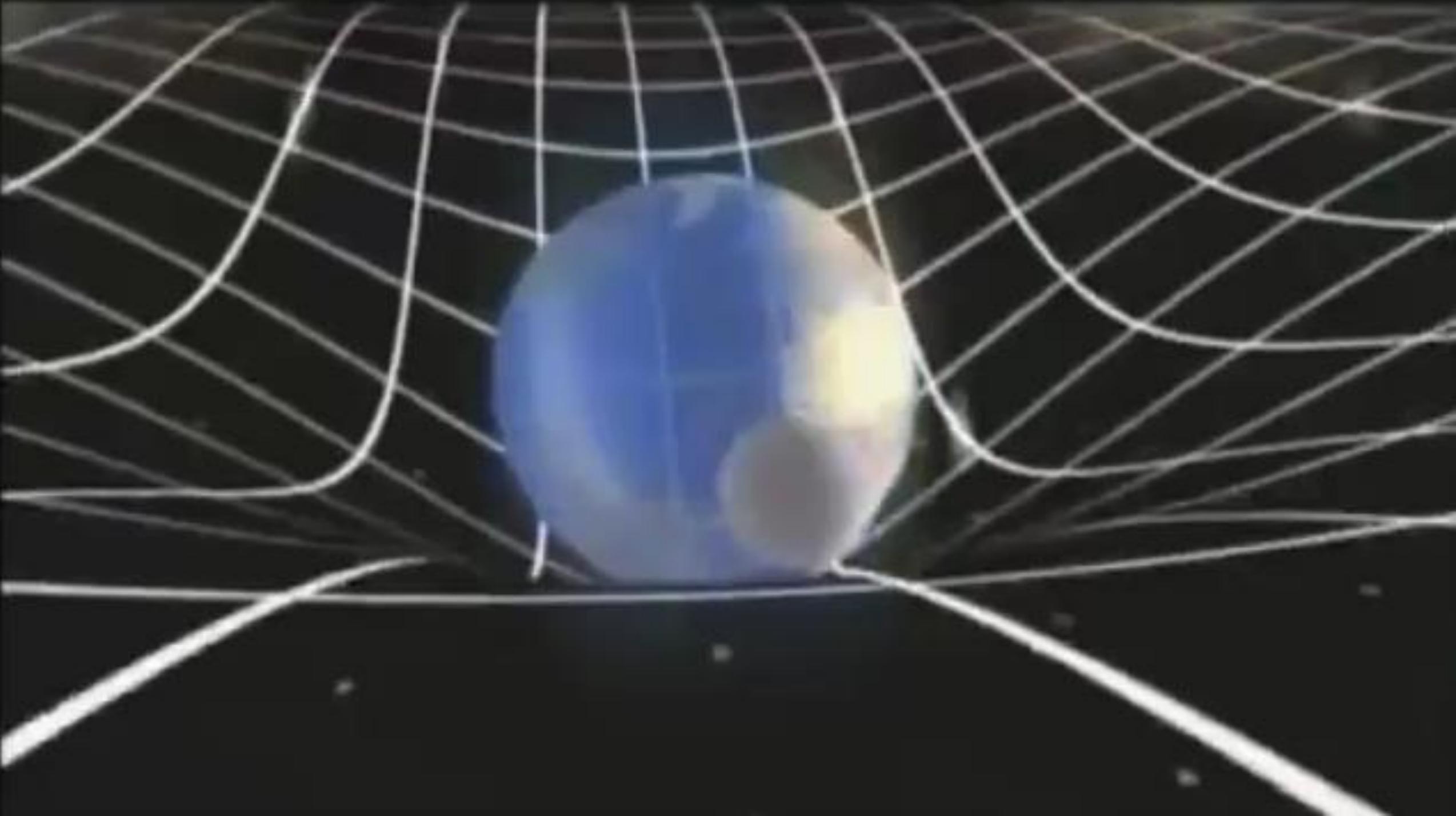
$$\nabla^2 h_{\mu\nu} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 h_{\mu\nu}}{\partial t^2}$$

**ONDA GRAVITACIONAL**

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

**ONDA ELÉTRICA**





---

# OS CAMPOS CLÁSSICOS

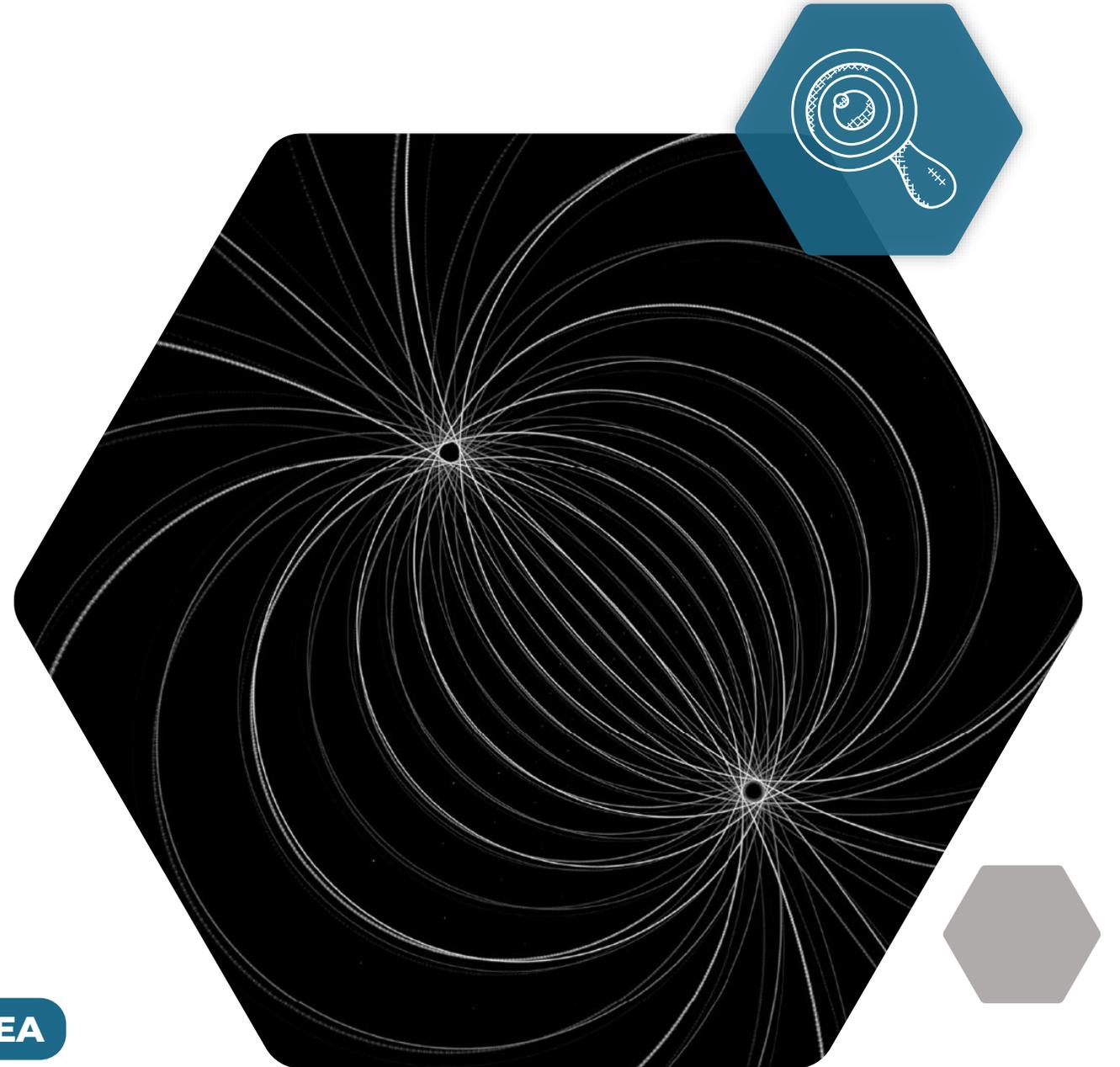
Como a Teoria Clássica de Campos descrever as interações?

- 1 **Campos contínuos:**  
ação contínua e bem determinada
- 2 **Ação não-instantânea:**  
propagação restrita à velocidade da luz

AÇÃO

CONTÍNUA

NÃO-INSTANTÂNEA



---

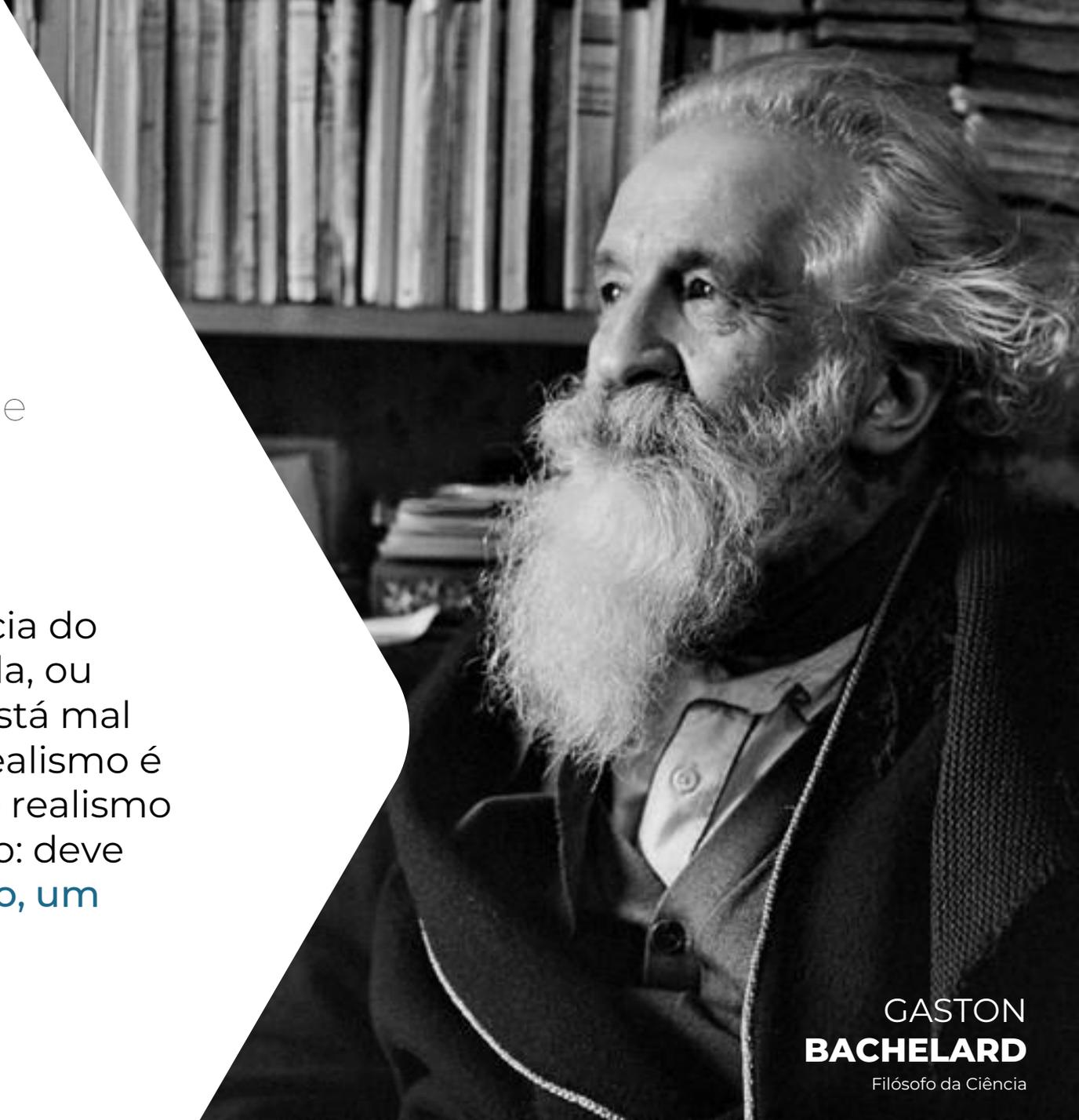
# REALISMO DE ESCALA

Ordens de aproximação com a realidade

“

Só existe um meio de fazer avançar a ciência do séc. XX; é o de atacar a ciência já constituída, ou seja, mudar a sua constituição. O realista está mal acostumado com isto, pois parece que o realismo é uma filosofia onde sempre se tem razão. O realismo deve ser uma filosofia que se adapta a tudo: deve ser um **realismo dos graus de aproximação, um realismo das ordens de grandeza**

**Bachelard (1940, p.52)**



GASTON  
**BACHELARD**  
Filósofo da Ciência

---

# REALISMO DE ESCALA

Ordens de aproximação com a realidade

“

Para Bachelard, há uma ruptura de escala quando a segunda aproximação, realizada com instrumentos técnicos e o formalismo da mecânica quântica, diverge em primeira aproximação daquela que se operava com instrumentos e a geometria da ciência clássica. Por isso, **as intuições construídas em uma escala constituem obstáculo para compreender uma escala mais profunda.**

**Bontems (2017, p.59)**



---

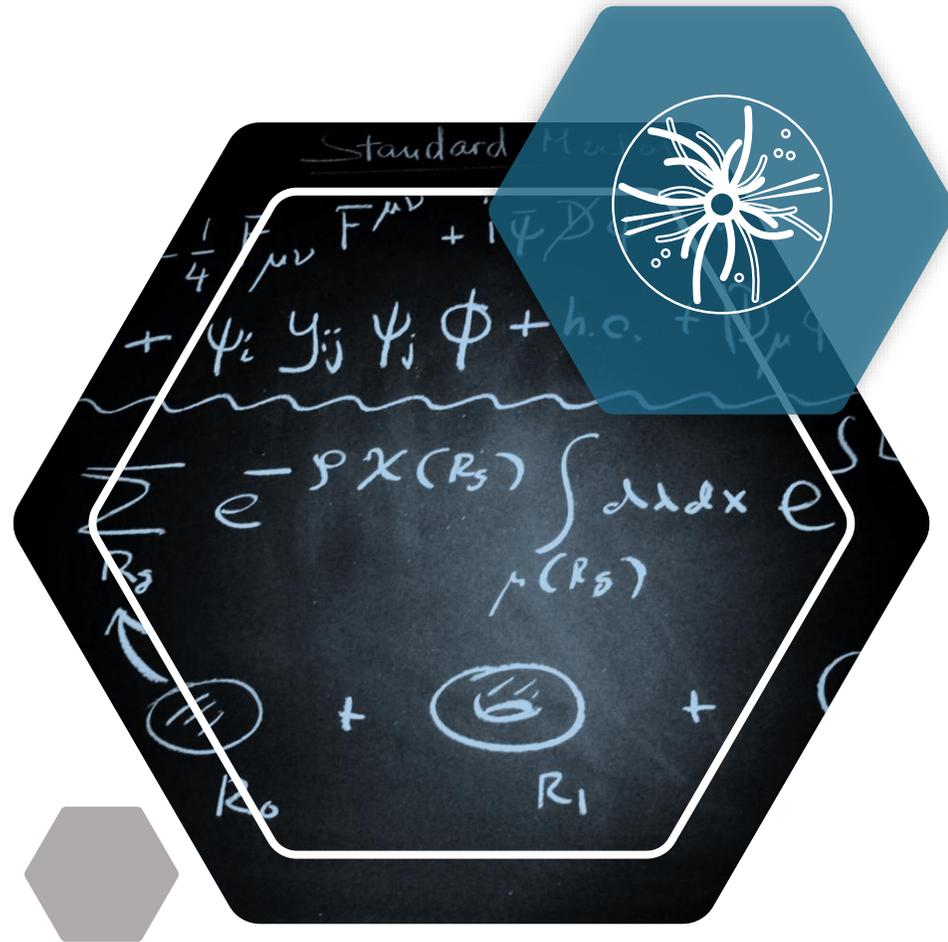
# REALISMO DE ESCALA

Para refletirmos coletivamente

A descrição quântica e relativística dos campos é um **problema de ruptura de escala?**

Que elementos de nossa concepção clássica **podem tornar essa descrição tão complicada?**





---

# TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS

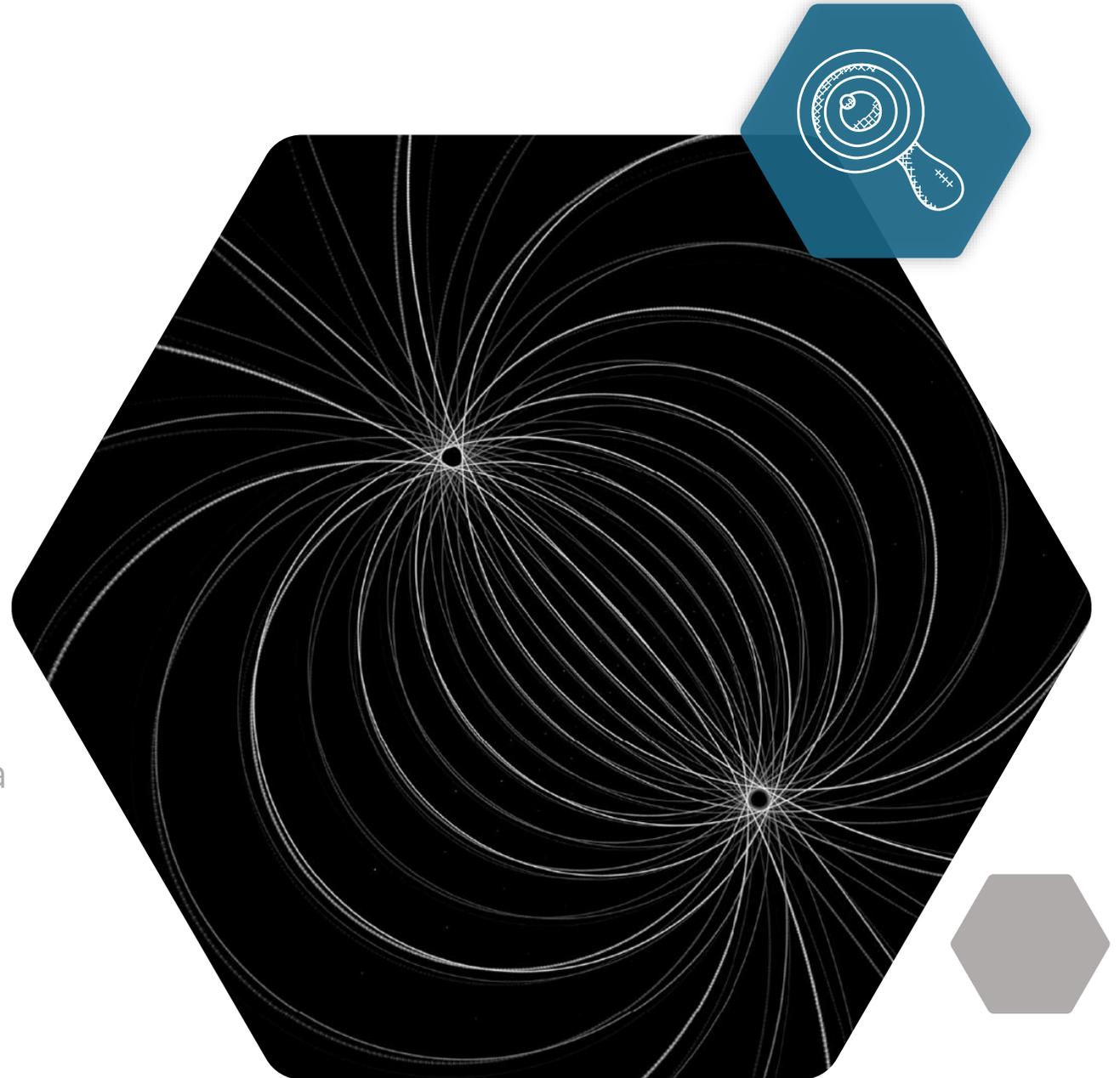
Construindo a Eletrodinâmica Quântica (QED)

---

# PONTO DE PARTIDA

O que herdamos da forma de pensar os **Campos Clássicos**?

- 1** **Descrição da Dinâmica**  
Newton, Hamilton e Lagrange
- 2** **Natureza dos Campos**  
Continuidade e forma matemática
- 3** **Relatividade e Localidade**  
Velocidade da luz e determinação

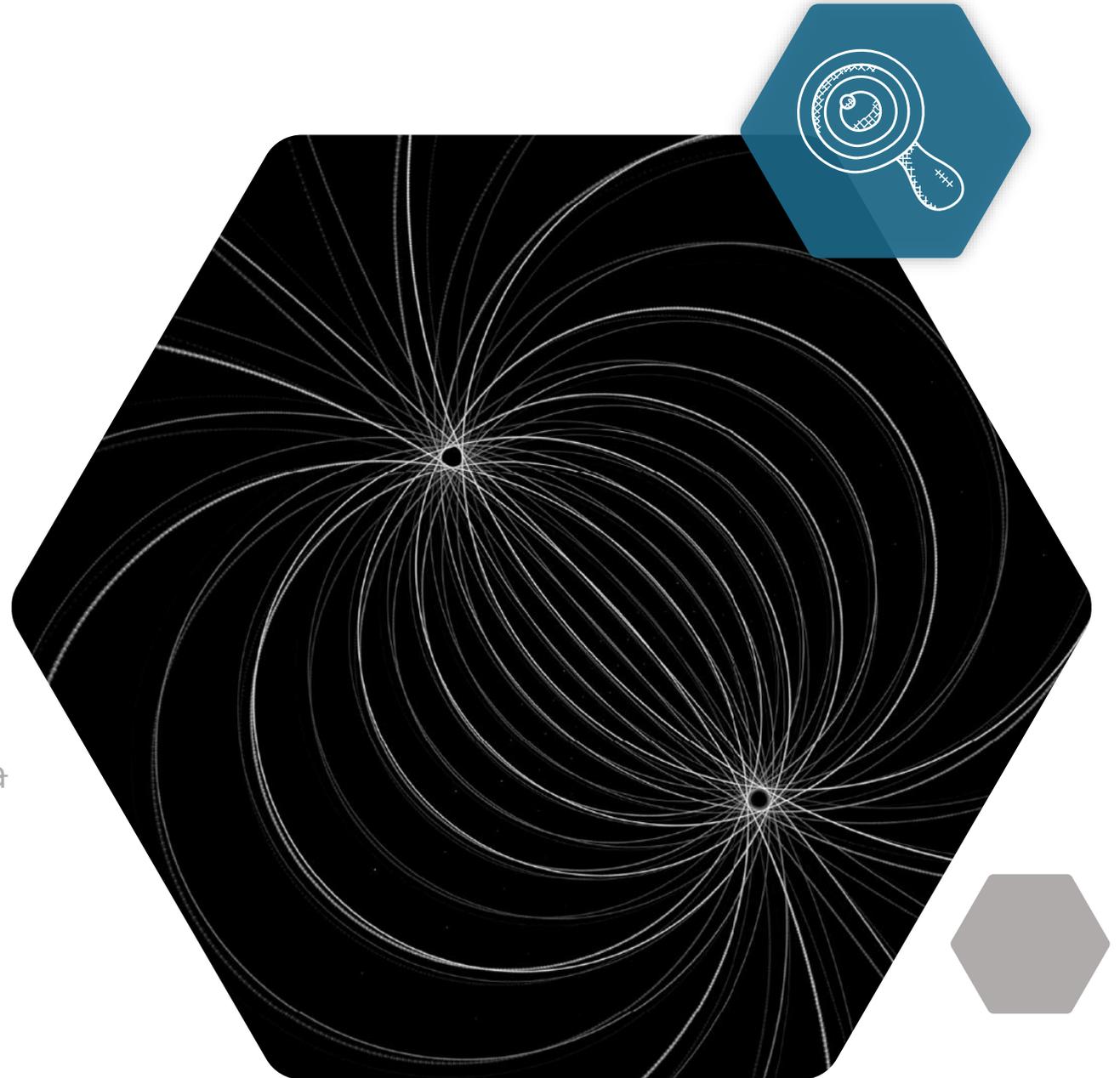


---

# PONTO DE PARTIDA

O que precisamos para descrever os Campos Quânticos?

- 1** **Descrição da Dinâmica**  
Newton, Hamilton e Lagrange
- 2** **Natureza dos Campos**  
Continuidade e forma-matemática
- 3** **Relatividade e Localidade**  
Velocidade da luz e determinação

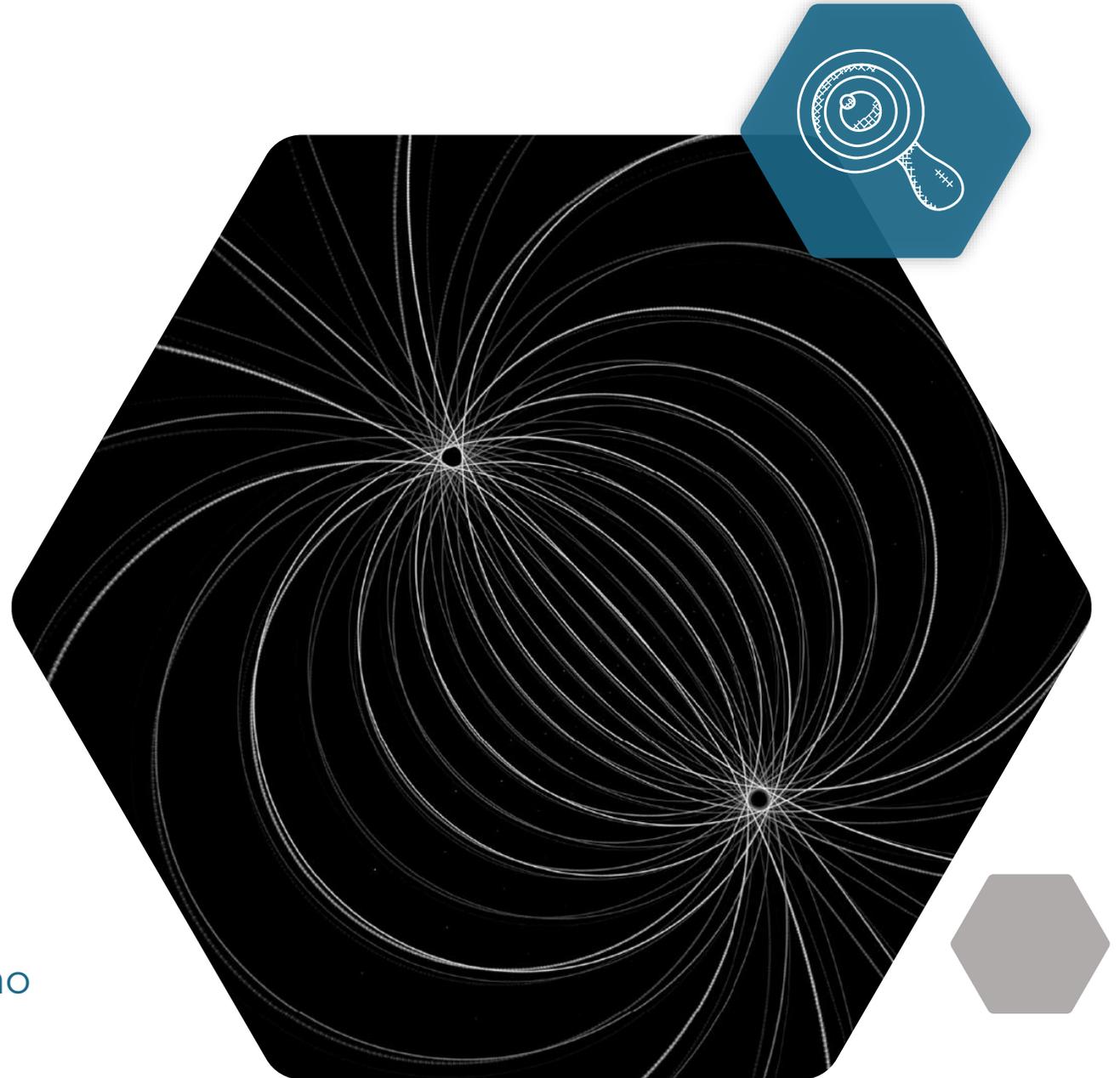


---

# PONTO DE PARTIDA

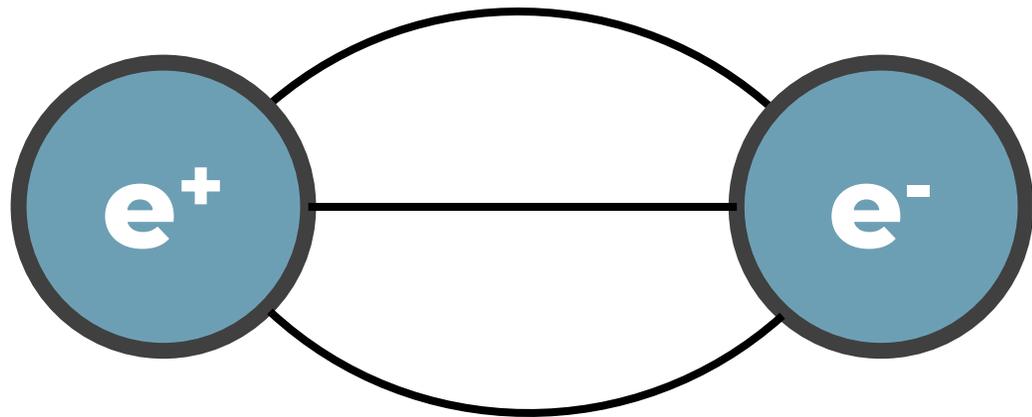
O que precisamos para descrever os Campos Quânticos?

- 1 **Descrição da Dinâmica**  
Hamilton e Lagrange
- 2 **Natureza dos Campos**  
Quantizado e forma matemática desconhecida
- 3 **Relatividade e Localidade**  
Velocidade da luz e indeterminação



# PRIMEIROS PASSOS

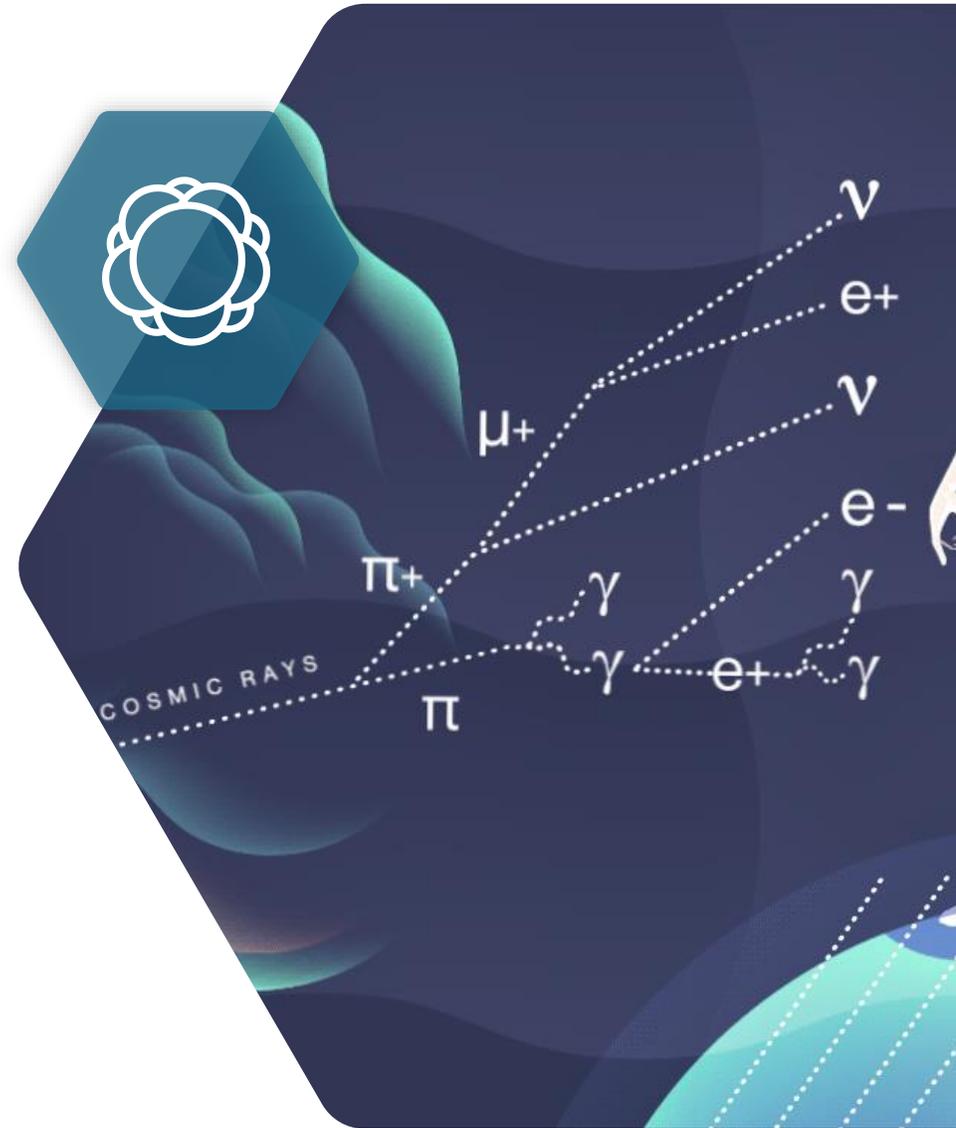
Construindo a Eletrodinâmica Quântica



AÇÃO

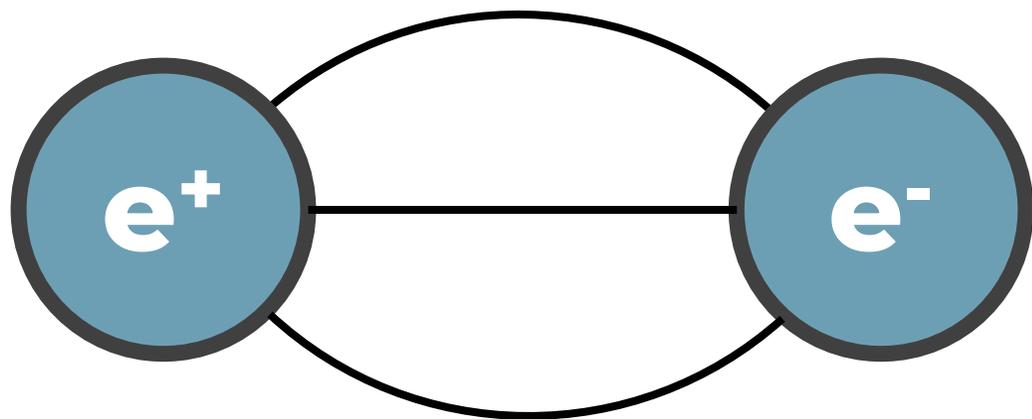
CONTÍNUA

INSTANTÂNEA



# PRIMEIROS PASSOS

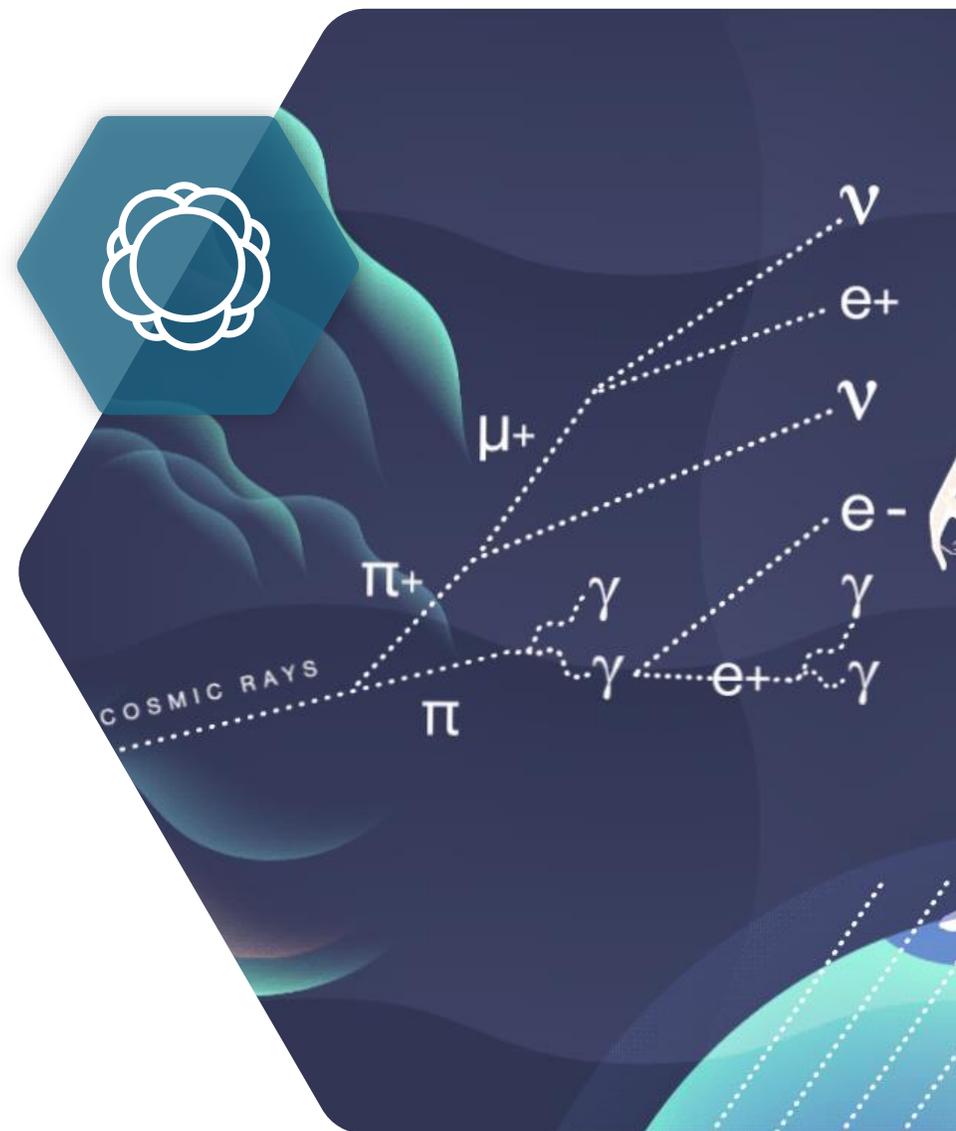
Construindo a Eletrodinâmica Quântica



AÇÃO

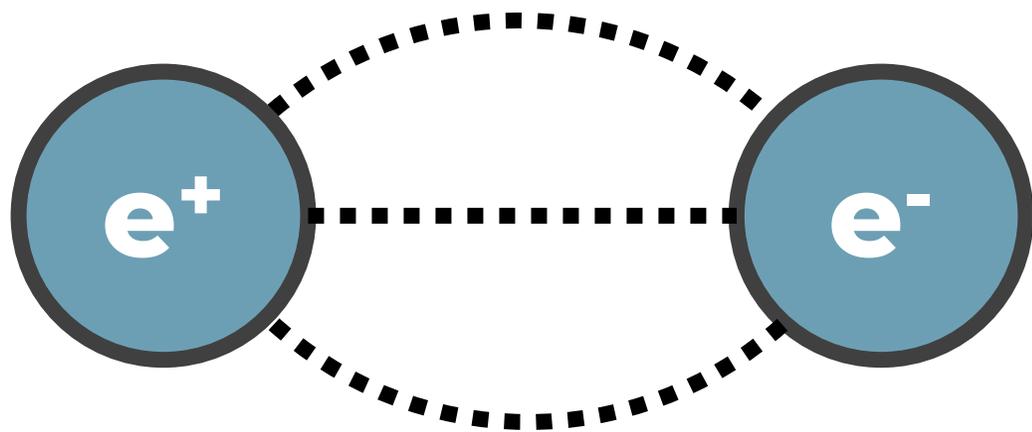
CONTÍNUA

NÃO-INSTANTÂNEA



# PRIMEIROS PASSOS

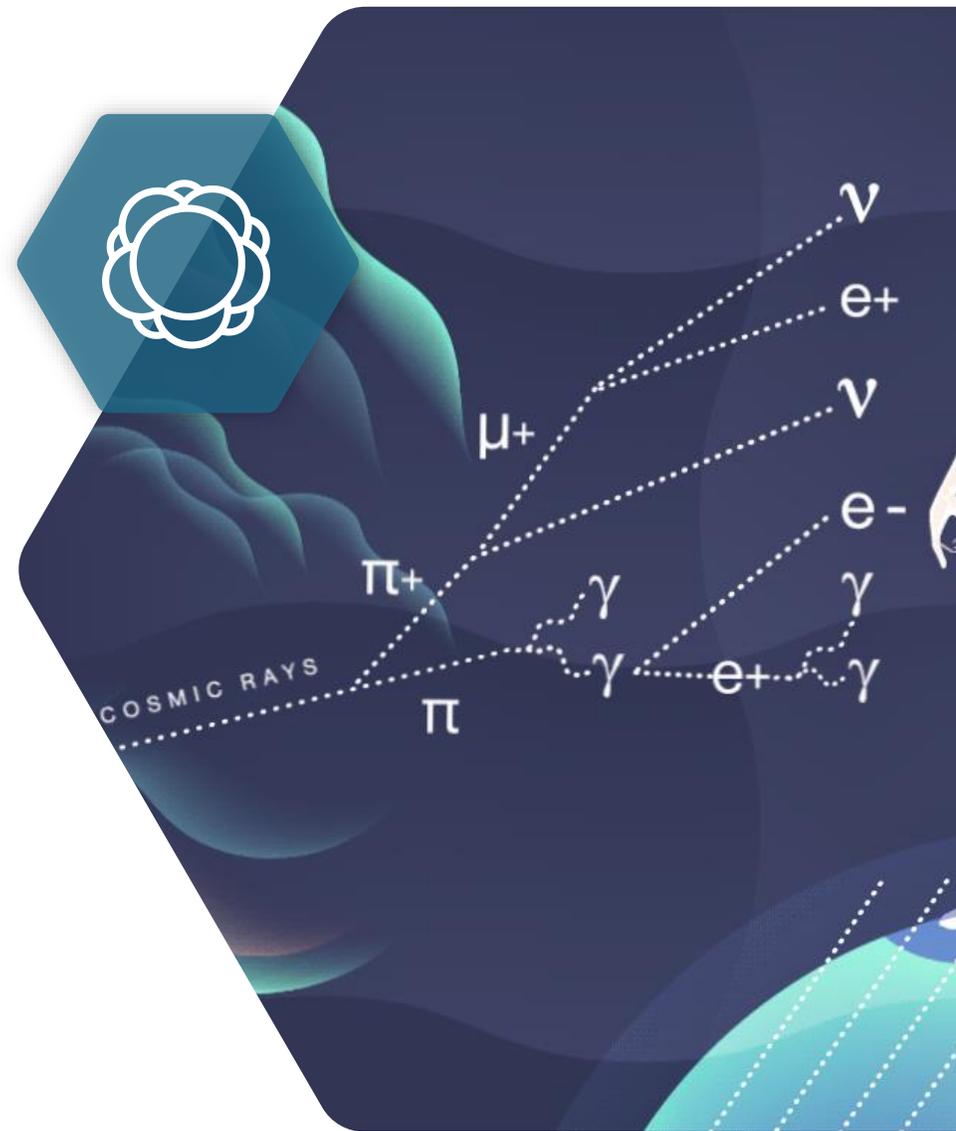
Construindo a Eletrodinâmica Quântica



AÇÃO

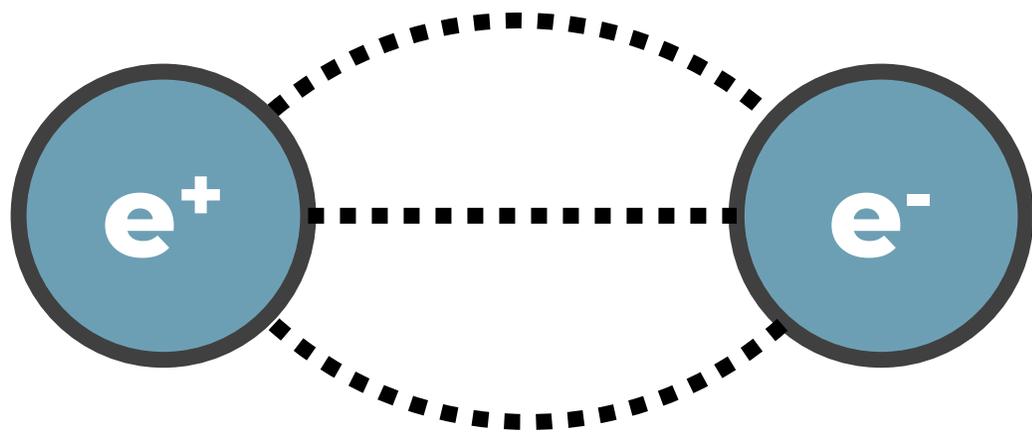
DESCONTÍNUA

INSTANTÂNEA



# PRIMEIROS PASSOS

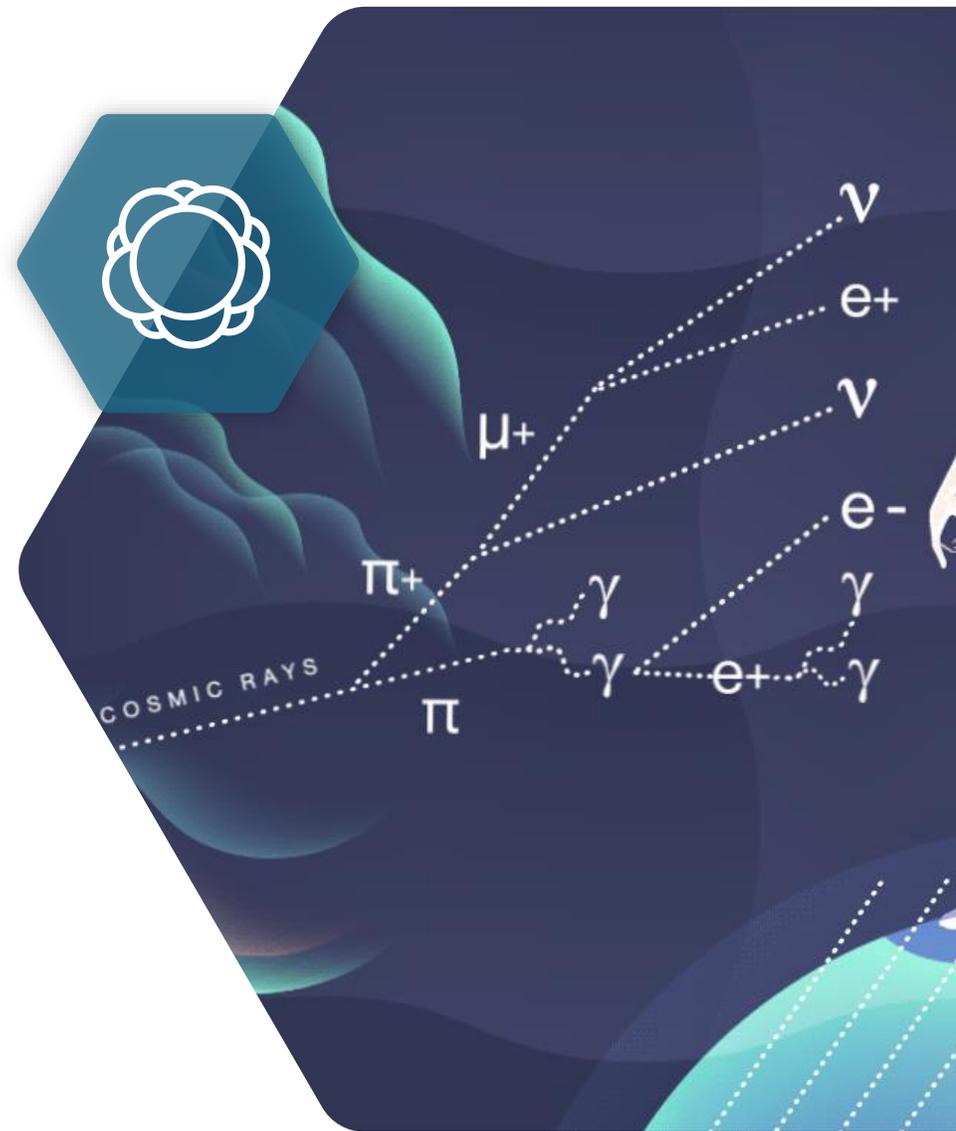
Construindo a Eletrodinâmica Quântica



AÇÃO

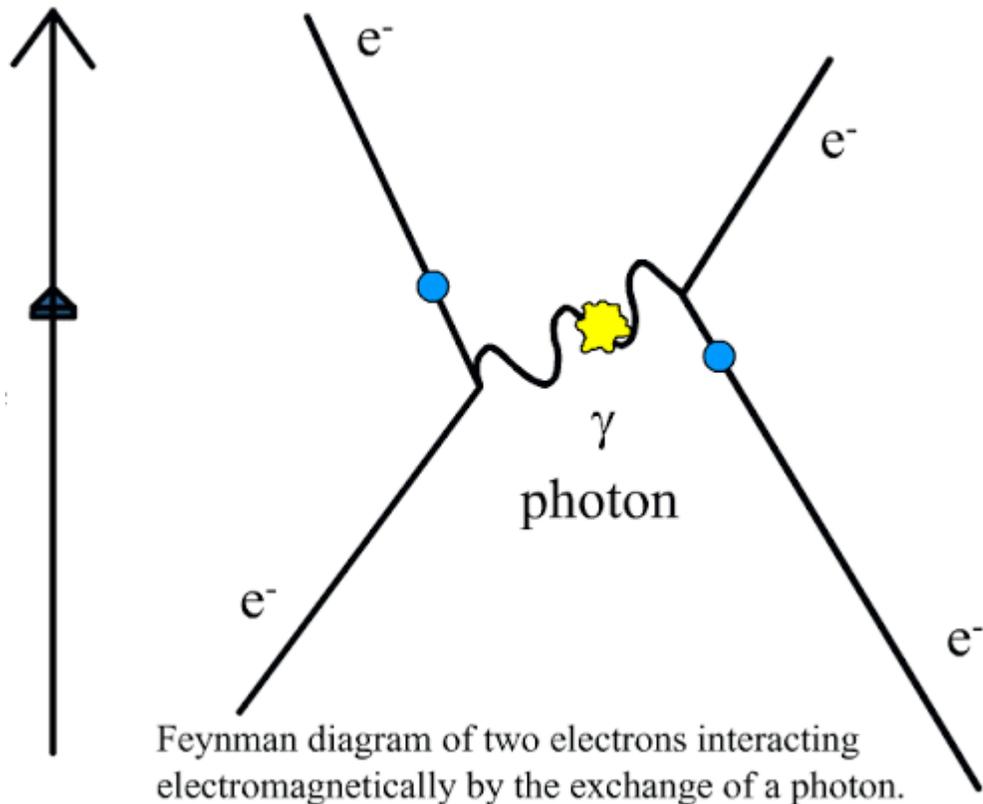
DESCONTÍNUA

NÃO-INSTANTÂNEA



# PRIMEIROS PASSOS

Construindo a Eletrodinâmica Quântica

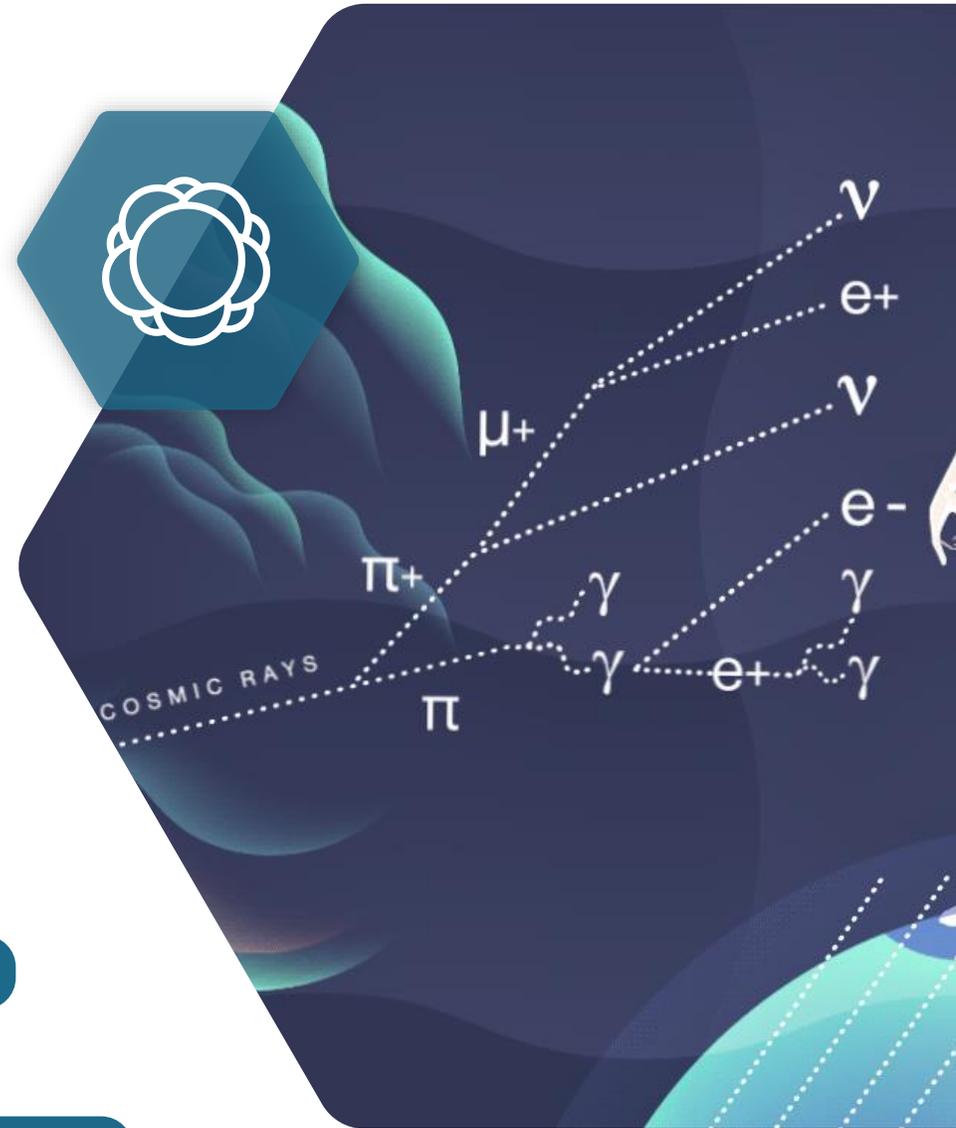


**DESCONTÍNUA**

QUÂNTICA

**NÃO-INSTANTÂNEA**

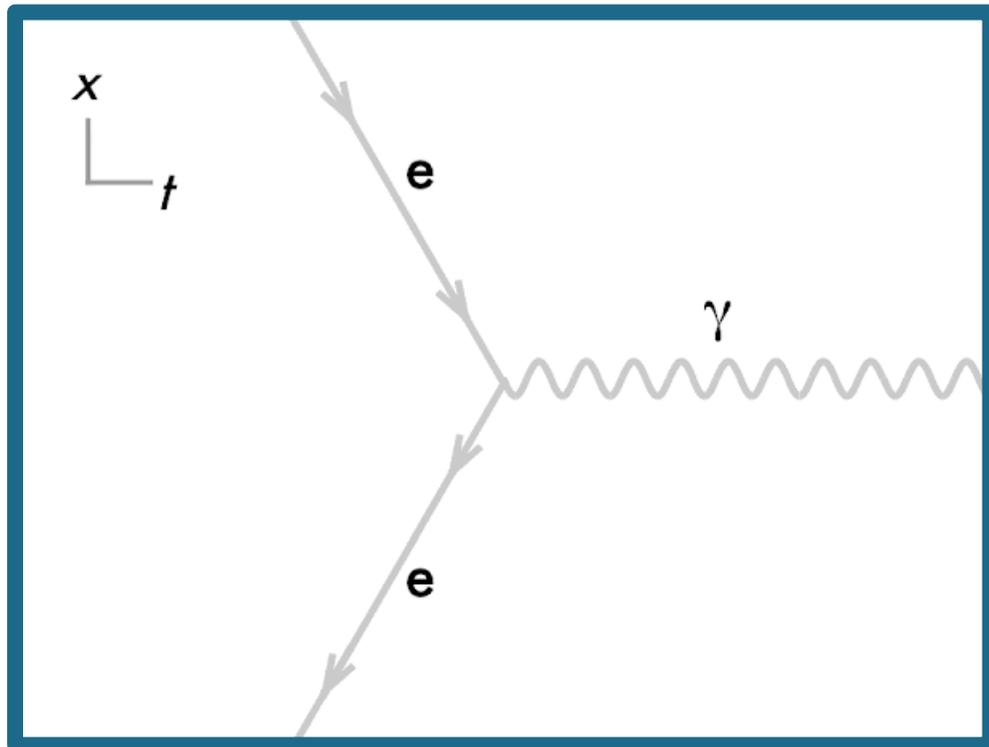
RELATIVÍSTICA





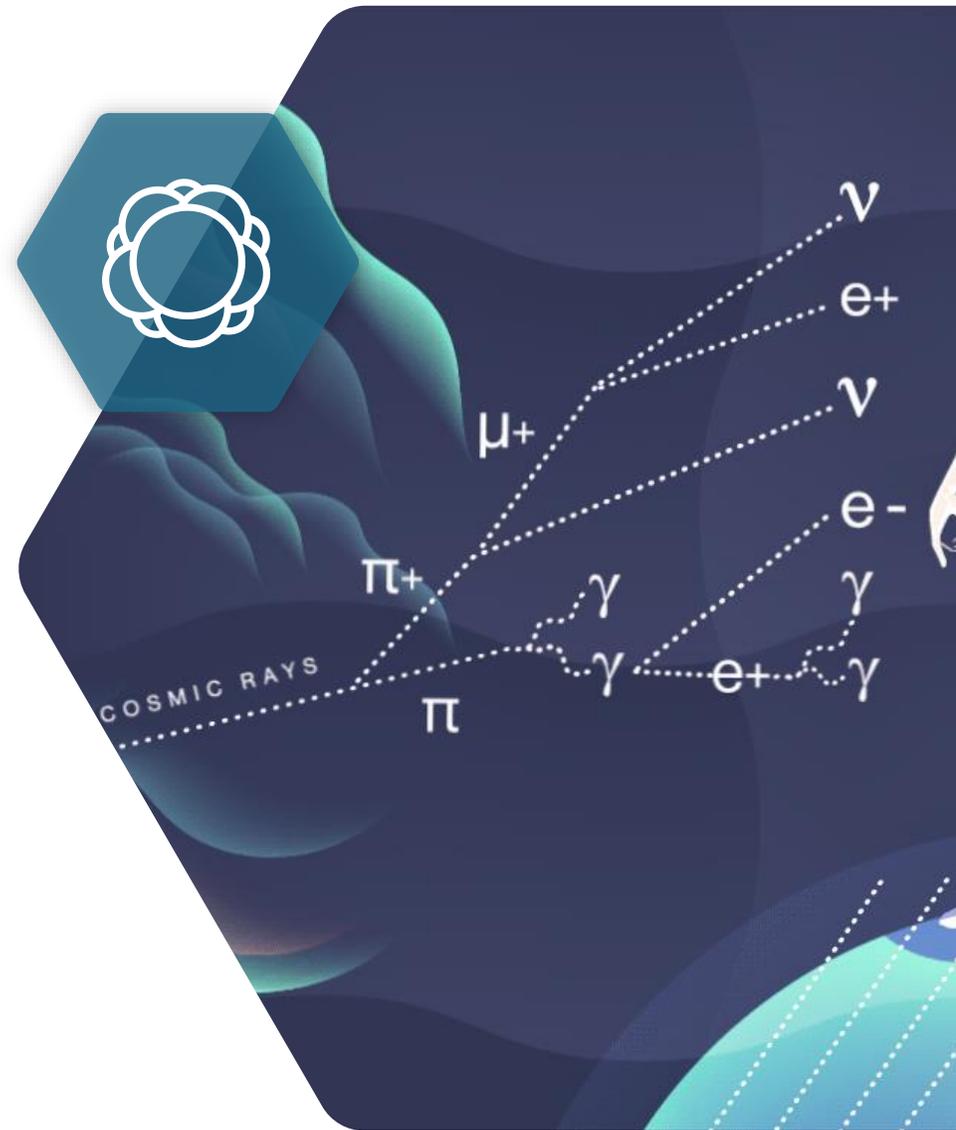
# DIAGRAMAS DE FEYNMAN

Construindo a Eletrodinâmica Quântica



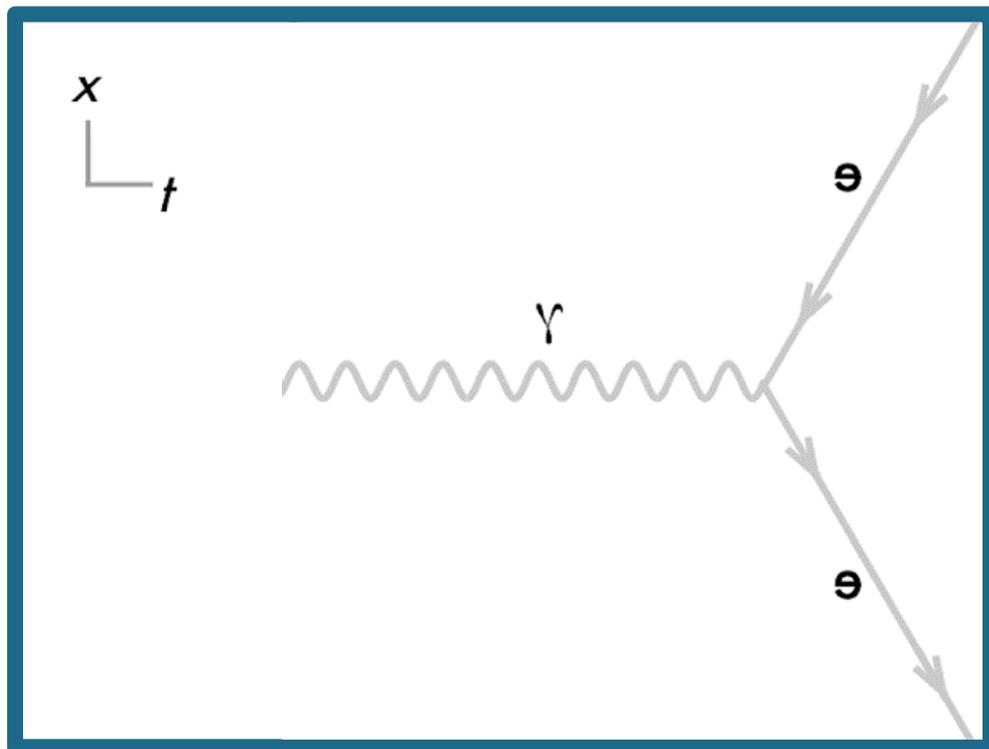
**PROCESSO 2**

**ANIQUILAÇÃO DE PARES**



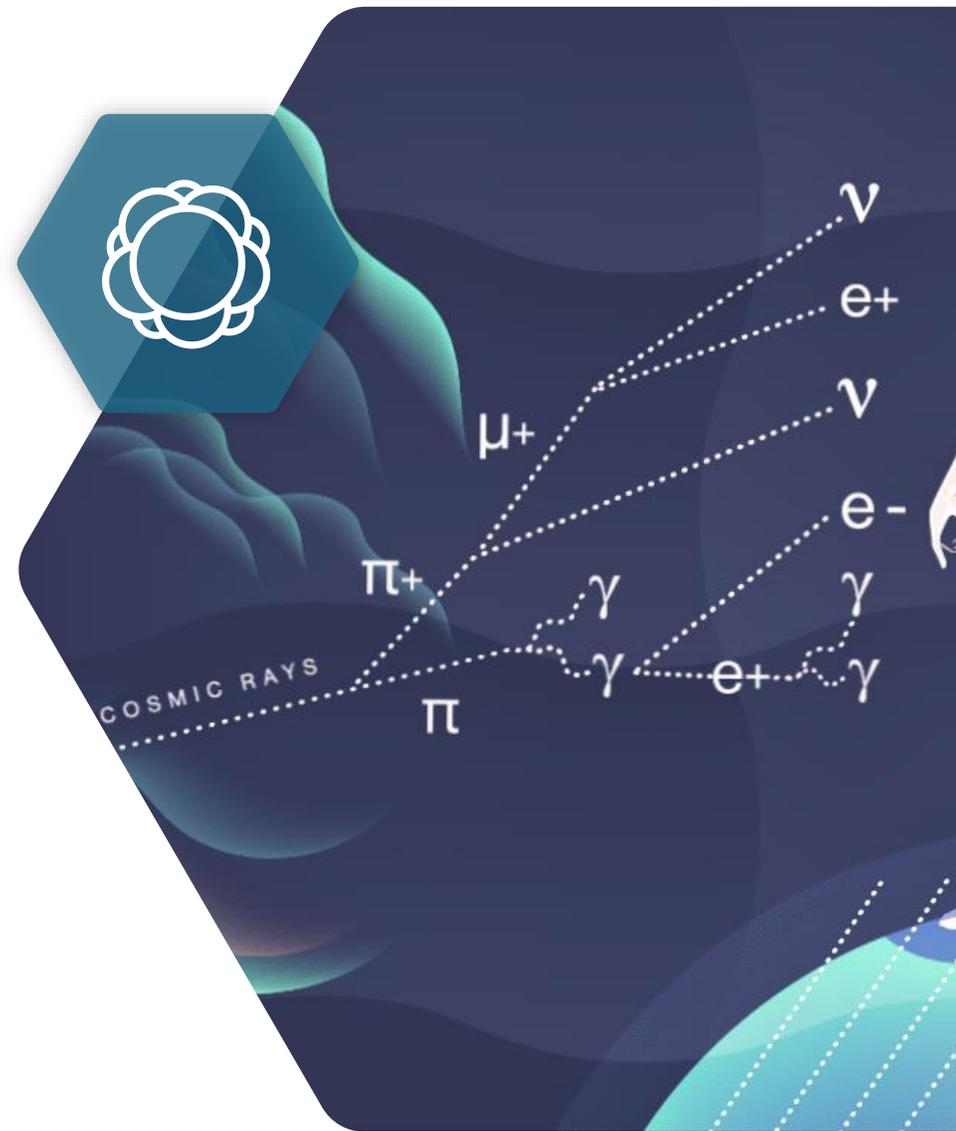
# DIAGRAMAS DE FEYNMAN

Construindo a Eletrodinâmica Quântica



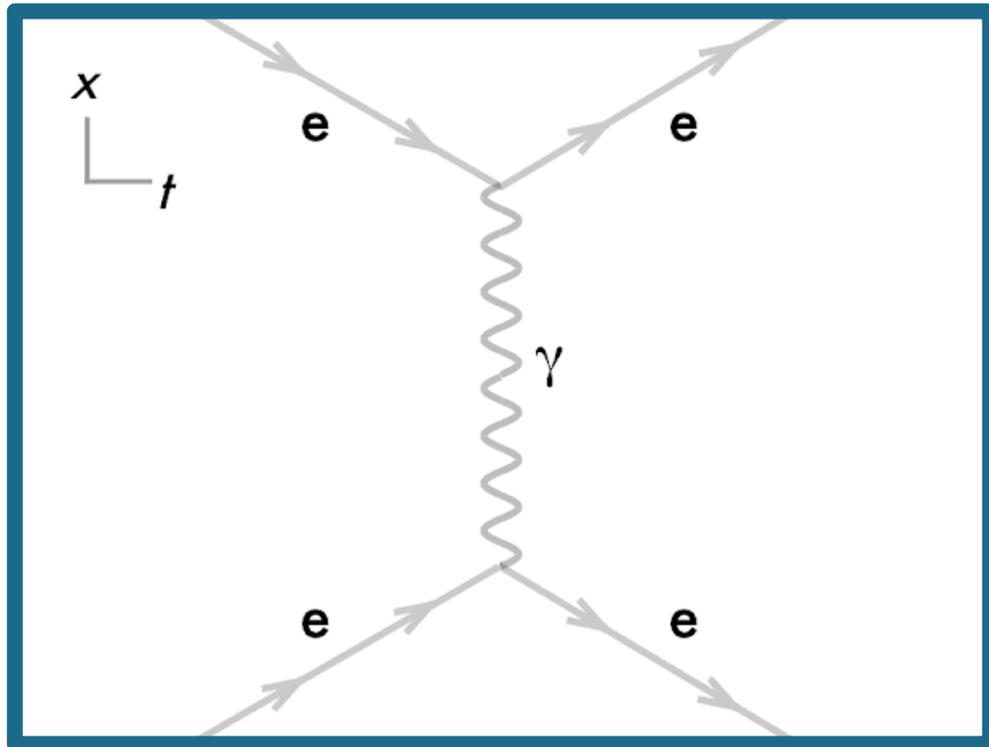
**PROCESSO 3**

**PRODUÇÃO DE PARES**

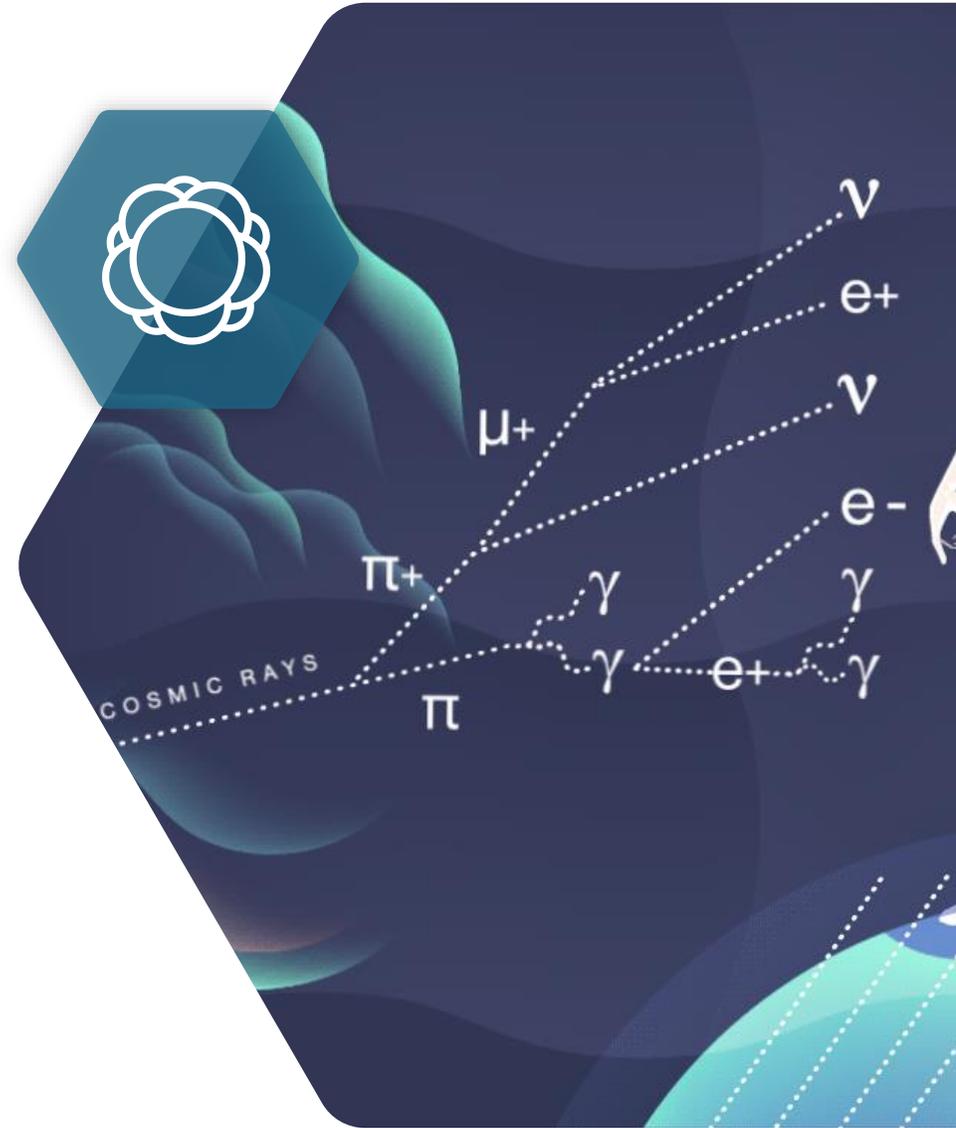


# DIAGRAMAS DE FEYNMAN

Construindo a Eletrodinâmica Quântica

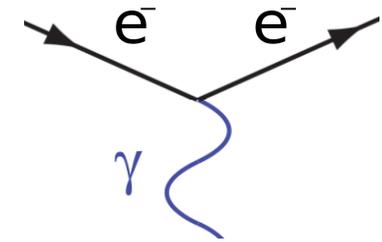
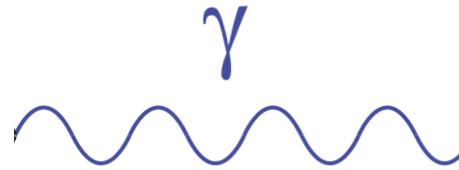


**PROCESSO 4**  
INTERAÇÃO ENTRE  
ELÉTRONS/PÓSITRONS



# DESCRIÇÃO DINÂMICA

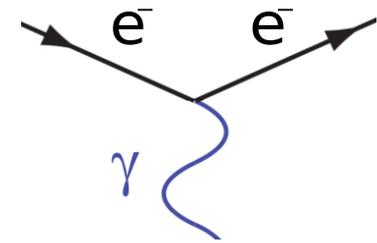
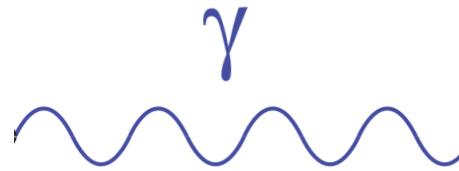
## LAGRANGEANA DA QED



$$\mathcal{L} = \underbrace{\bar{\psi} \hat{D} \psi + m \bar{\psi} \psi}_{\text{Dinâmica dos objetos em interação}} + \underbrace{(\hat{D} A)^2}_{\text{Dinâmica do mediador da interação}} + \underbrace{e A \psi \bar{\psi}}_{\text{Vértice da interação eletromagnética}}$$

# DESCRIÇÃO DINÂMICA

## LAGRANGEANA DA QED



$$\mathcal{L} = \bar{\psi} \hat{D} \psi + m \bar{\psi} \psi + (\hat{D} A)^2 + e A \psi \bar{\psi}$$

Movimento do  
**Elétron**

Massa do  
**Elétron**

Movimento do  
**Fóton**

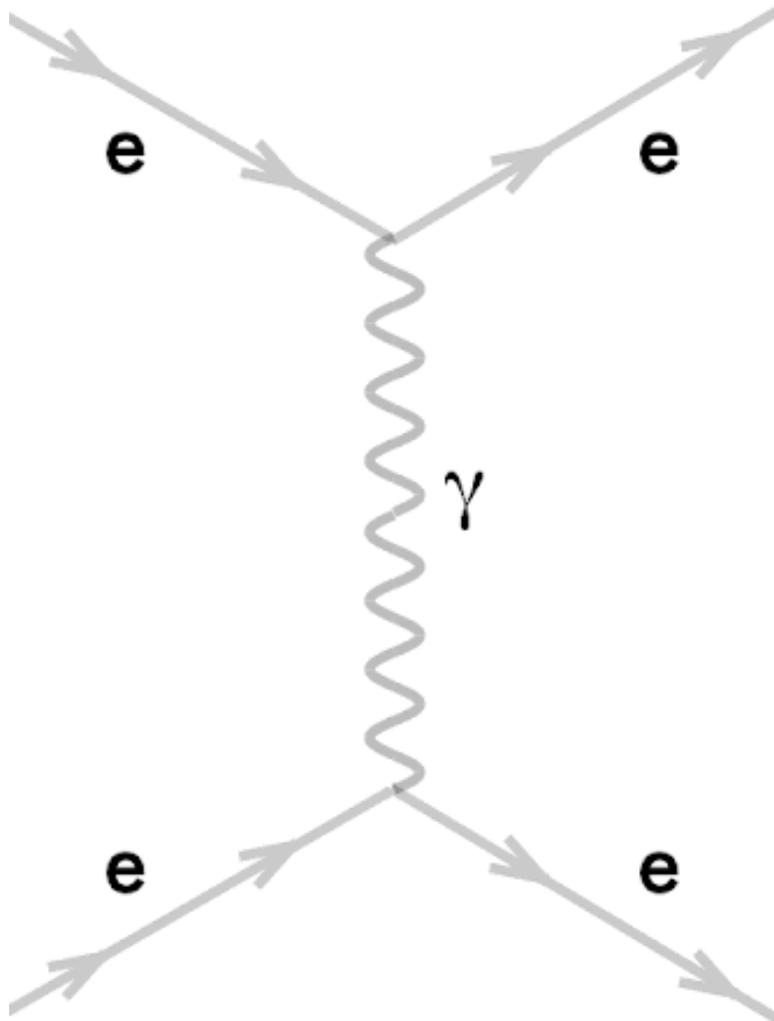
Vértice  
**Elétron-Fóton**

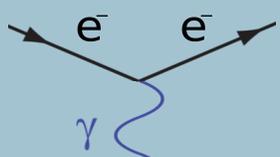
Dinâmica dos  
**objetos em interação**

Dinâmica do  
**mediador da interação**

**Vértice da interação**  
eletromagnética

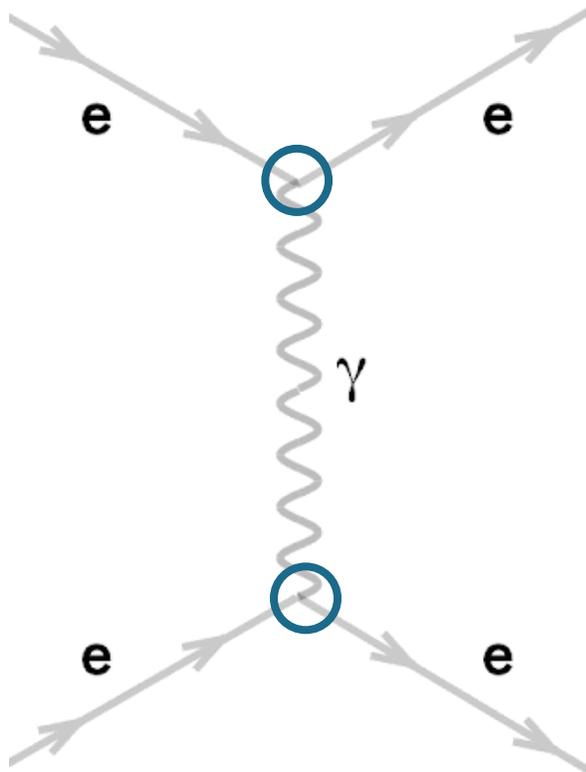
# DESCRIÇÃO DINÂMICA LAGRANGEANA DA QED



Elemento	Função matemática
$e^-$  $\bar{\psi}\hat{D}\psi + m\bar{\psi}\psi$	Dar <b>massa ao elétron</b> e descrever sua <b>evolução espaço-temporal</b>
$\gamma$  $(\hat{D}A)^2$	Descrever a <b>evolução espaço-temporal</b> da quantização do campo eletromagnético: o <b>fóton</b> .
 $eA\psi\bar{\psi}$	Vértice elétron-fóton utilizar para descrever a <b>quantização das interações</b> eletromagnéticas.

# DINÂMICA DA INTERAÇÃO

O diagrama de primeira aproximação



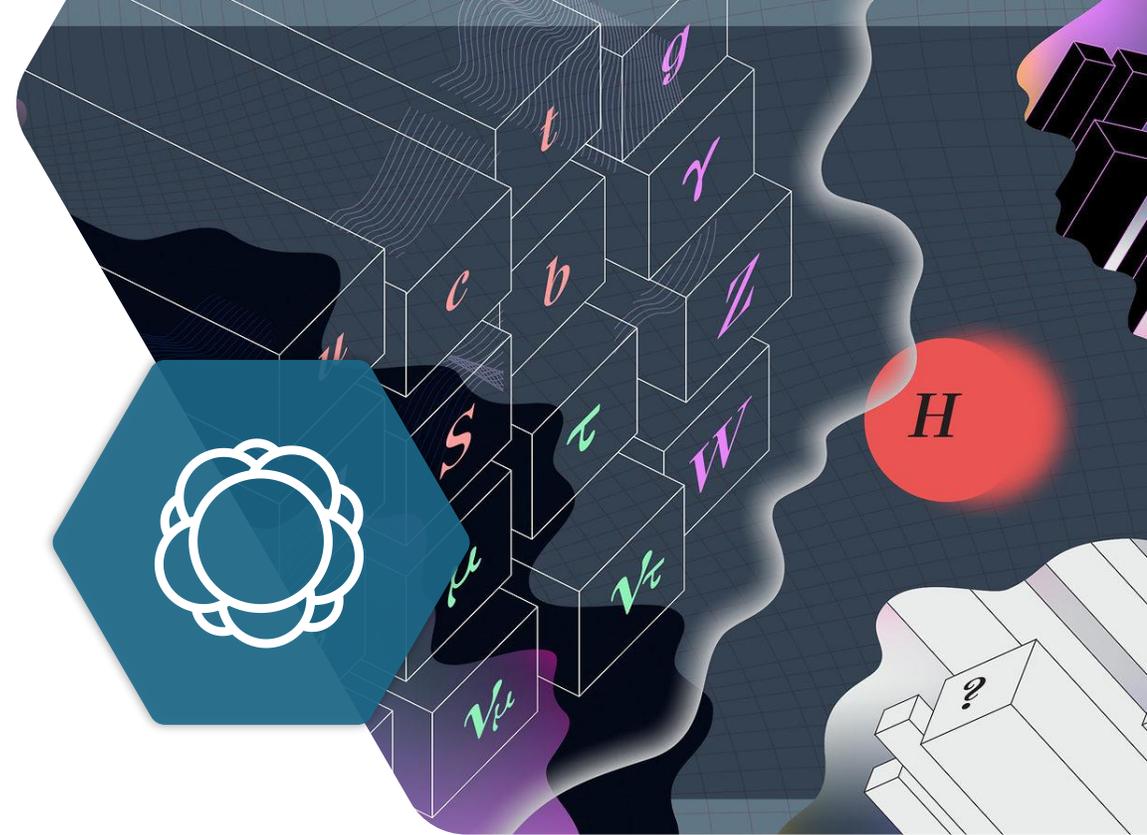
Quantos vértices encontramos no diagrama?

**2 VÉRTICES**

INTERAÇÃO PROPORCIONAL A

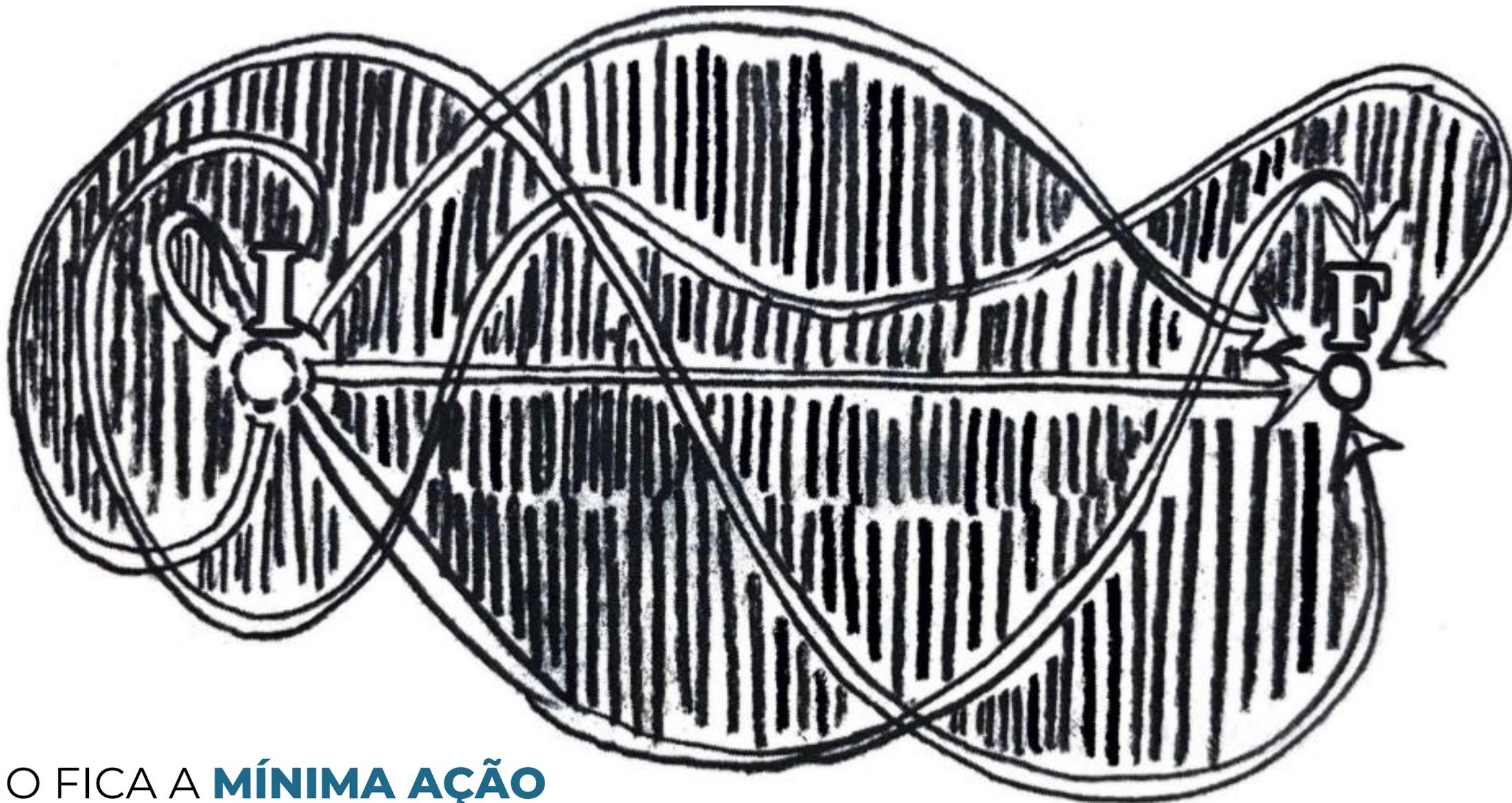
**$e^2$**

EXATAMENTE O QUE ESPERAMOS PARA **INTERAÇÃO COULOMBIANA!**



$$\alpha_{EM} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137} < 1$$

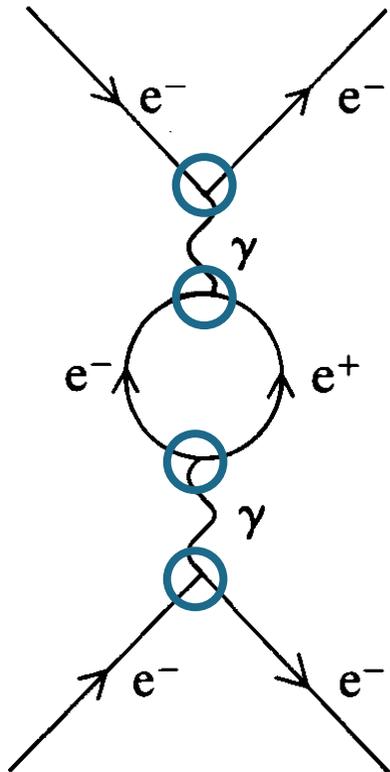
**Constante de acoplamento da interação eletromagnética**



COMO FICA A **MÍNIMA AÇÃO**  
COM O **INDETERMINISMO QUÂNTICO?**

# DINÂMICA DA INTERAÇÃO

O diagrama de segunda aproximação



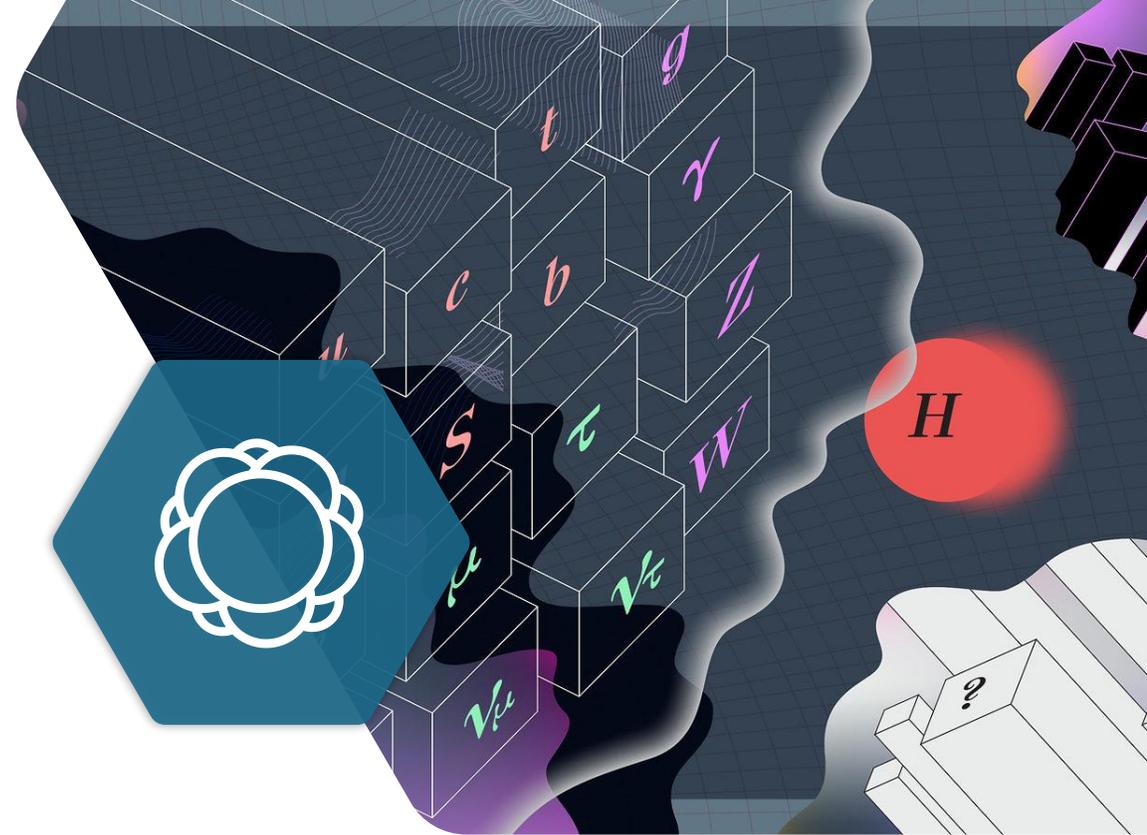
Quantos vértices encontramos no diagrama?

**4 VÉRTICES**

INTERAÇÃO PROPORCIONAL A

**e<sup>4</sup>**

137<sup>2</sup> MENOR QUE A **PRIMEIRA APROXIMAÇÃO**

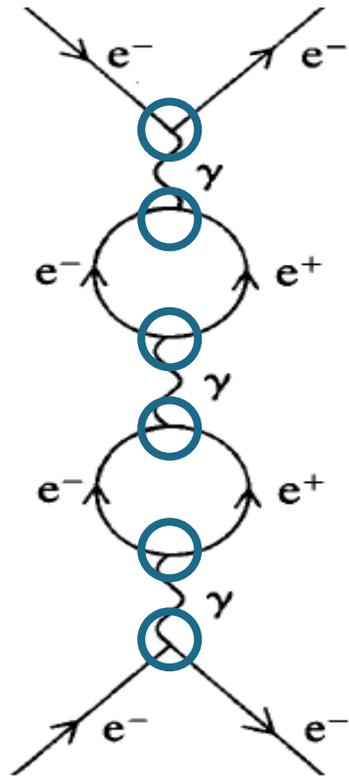


$$\alpha_{EM} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137} < 1$$

**Constante de acoplamento da interação eletromagnética**

# DINÂMICA DA INTERAÇÃO

O diagrama de segunda aproximação



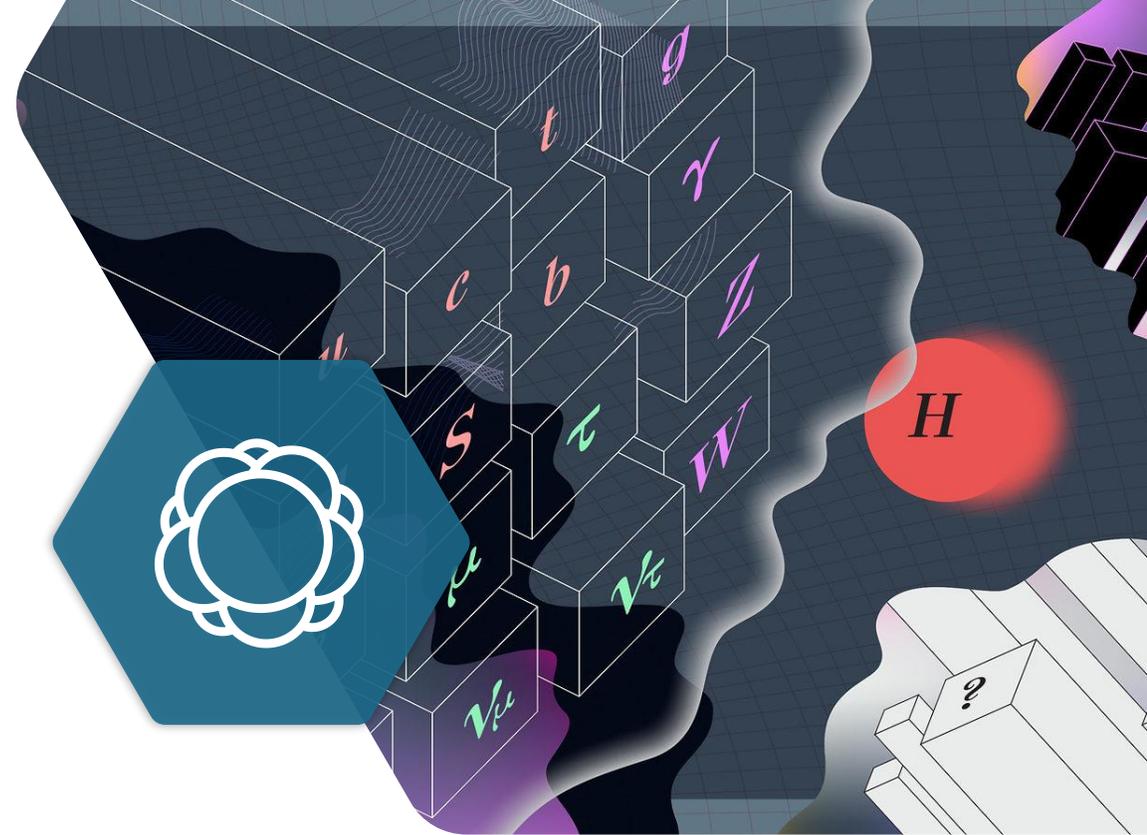
Quantos vértices encontramos no diagrama?

**6 VÉRTICES**

INTERAÇÃO PROPORCIONAL A

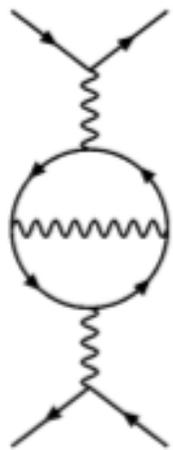
**$e^6$**

137<sup>4</sup> MENOR QUE A **PRIMEIRA APROXIMAÇÃO**

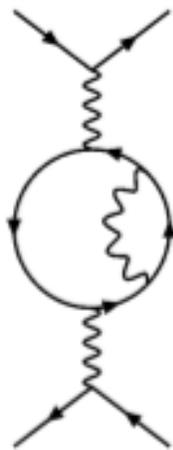


$$\alpha_{EM} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137} < 1$$

**Constante de acoplamento da interação eletromagnética**



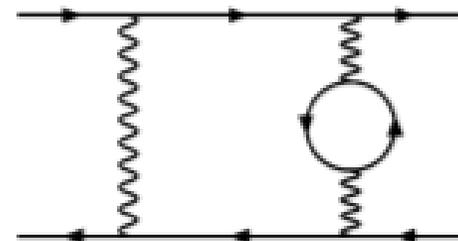
(a)



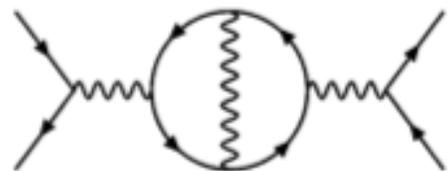
(b)



(c)



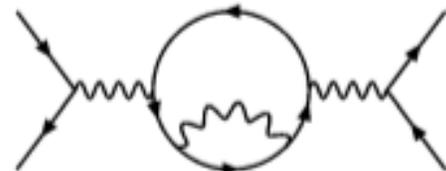
(k)



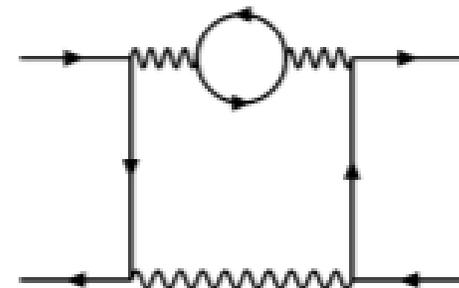
(d)



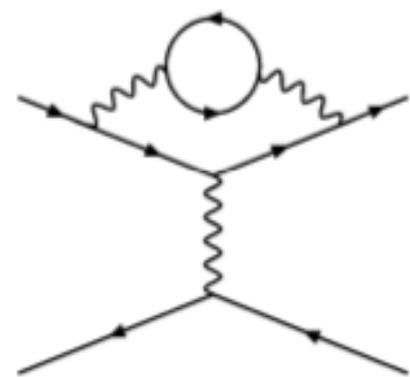
(e)



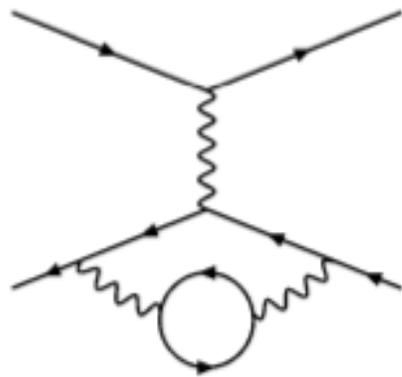
(f)



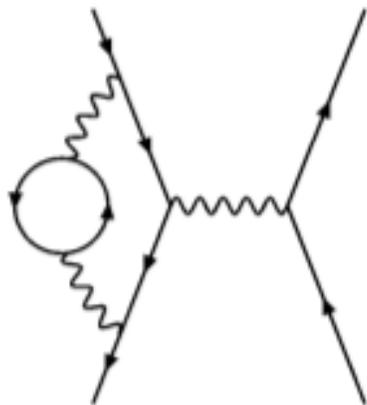
(o)



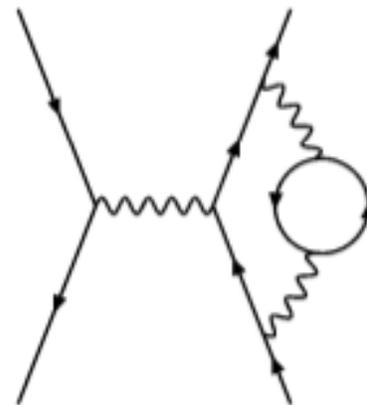
(g)



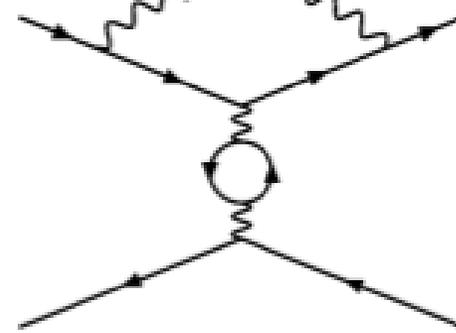
(h)



(i)



(j)



(s)

# INTEGRAIS LOOPS

DIVERGEM PARA  $\infty$



# PROBLEMA DOS INFINITOS

Como lidar com a divergência nos diagramas de ordem superior?

1

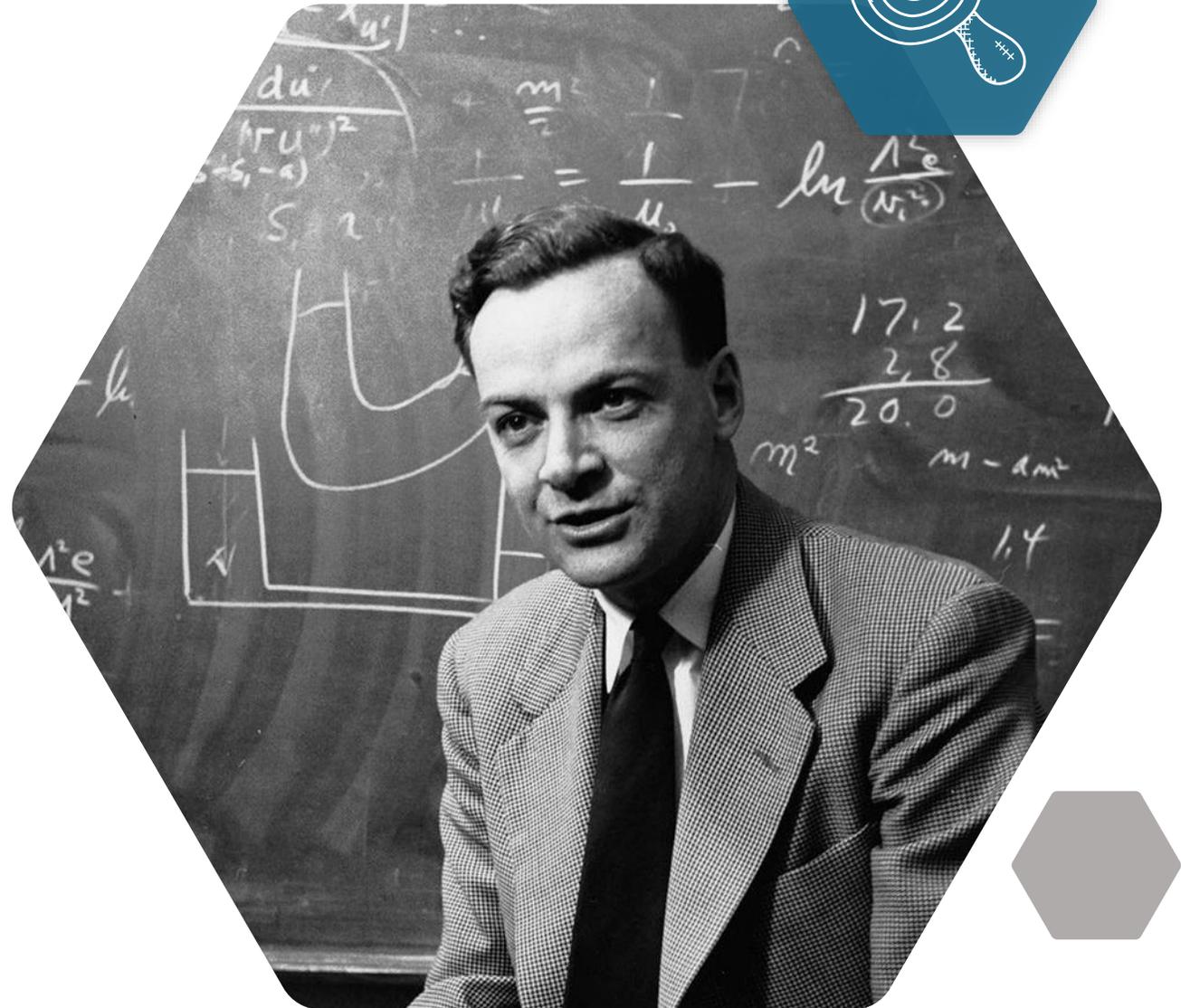
## Desconsiderar

Diagramas de primeira ordem possuem mais relevância

2

## Reavaliar

Avaliar a capacidade preditiva das aproximações em primeira ordem



# MEDIDA DO LAMB-SHIFT

Estrutura Fina e Degenerescência sob a ação e campo magnético

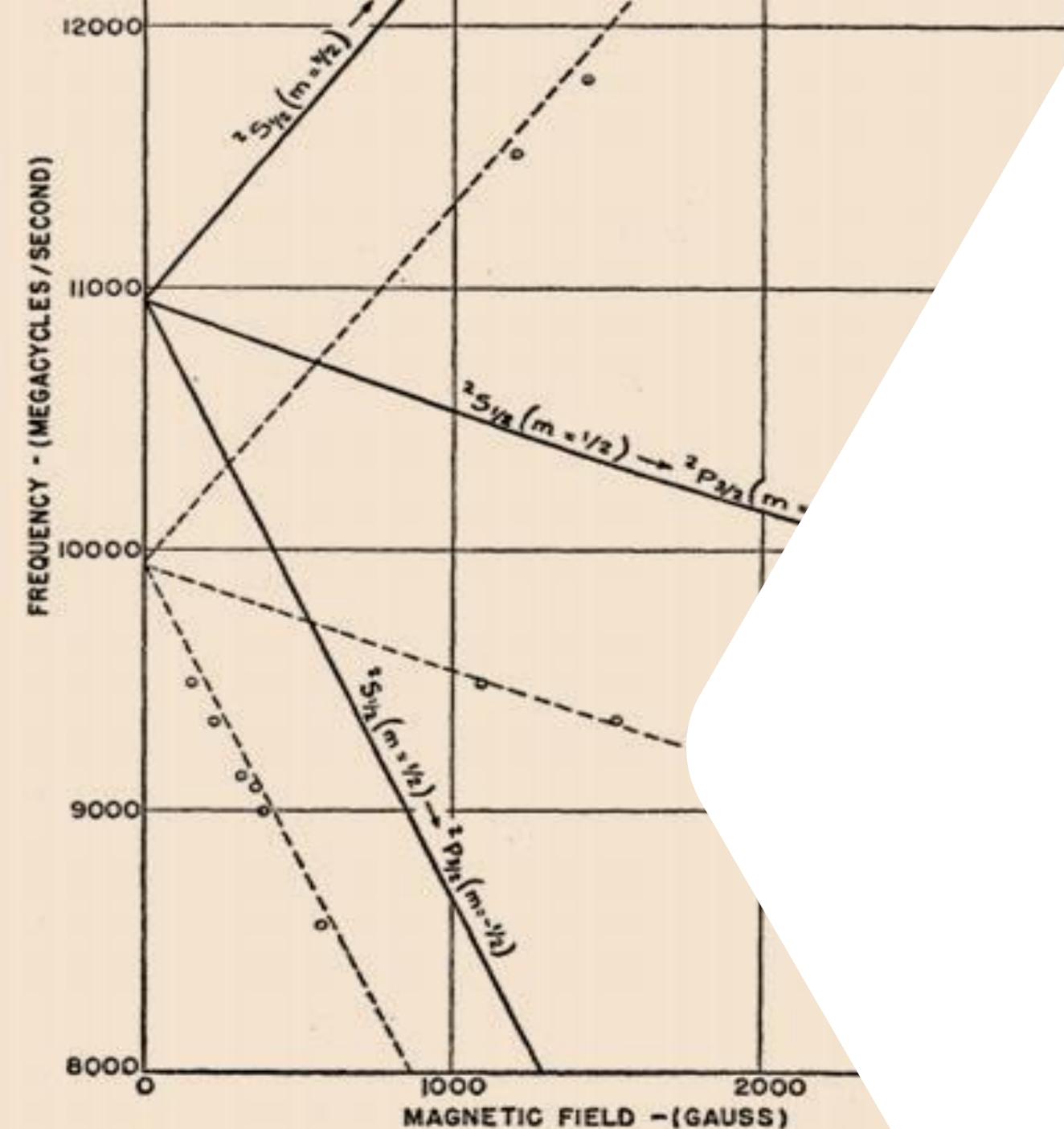
## Comportamento experimental

obtido a partir da interação de elétrons com campos magnéticos.

## Comportamento teórico

obtido considerando os diagramas de primeira ordem de aproximação.

Teoria e experimente diferem entre si por um **valor constante ...**



# MEDIDA DO LAMB-SHIFT

Estrutura Fina e Degenerescência sob a ação e campo magnético

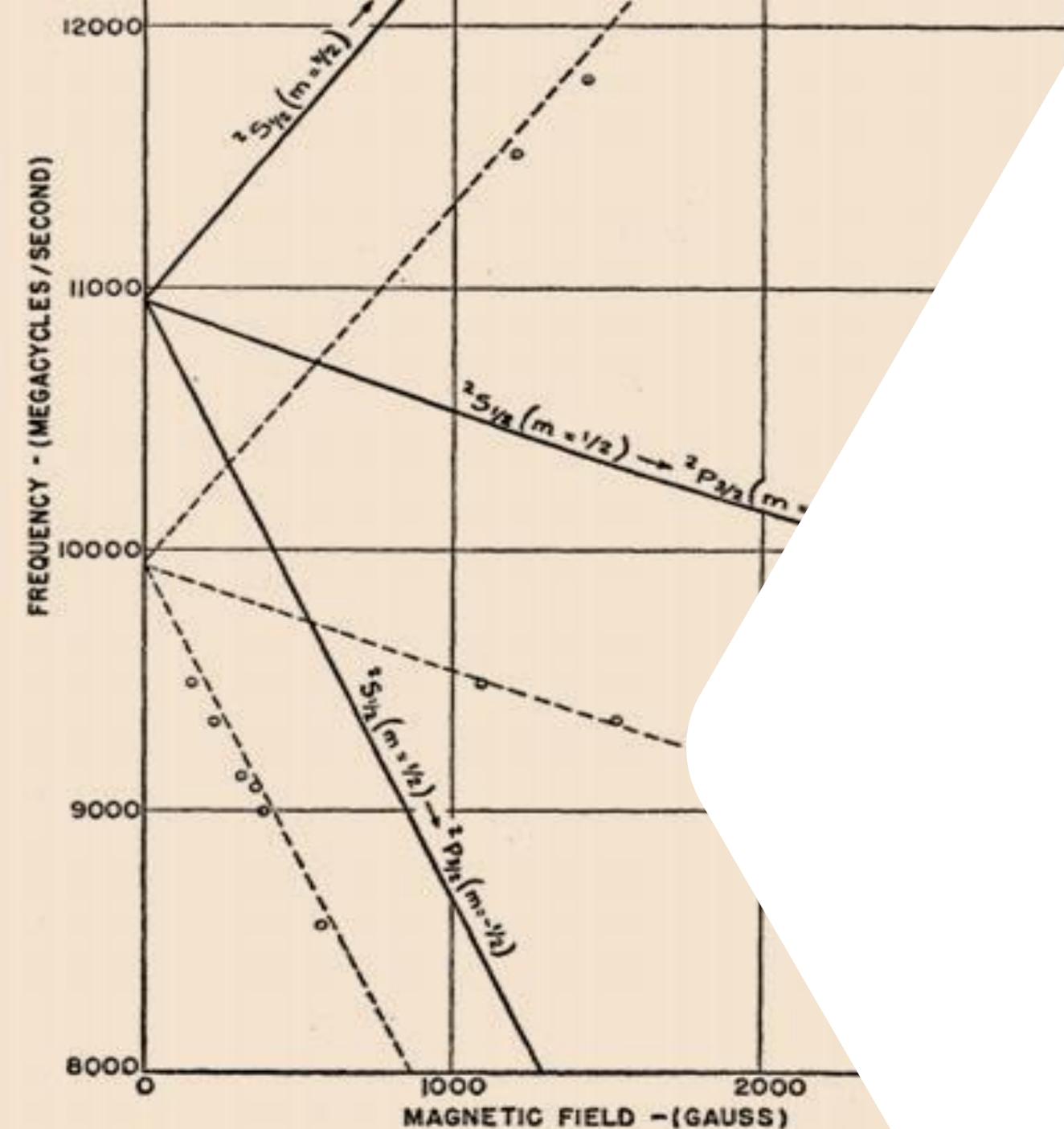
## Comportamento experimental

obtido a partir da interação de elétrons com campos magnéticos.

## Comportamento teórico

obtido considerando os diagramas de primeira ordem de aproximação.

... e se esta diferença estiver contida exatamente **nos infinitos?**



WILLIAM  
LAMB

RICHARD  
FEYNMAN

JULIAN  
SCHWINGER



“

Em um período de um ano ou dois, os trabalhos de Schwinger, Feynman, Dyson, e Tomonaga tornaram a QED em um formalismo consistente, com a prescrição de **renormalização que removeria os infinitos de todos os observáveis** descritos pela teoria. A QED é a teoria quântica mais eficiente já construída, tendo concordâncias com o experimento em até 12 casa decimais.

**Schweber, 1994**

# A PROPOSTA DE RENORMALIZAÇÃO

A convergência da teoria para o experimento

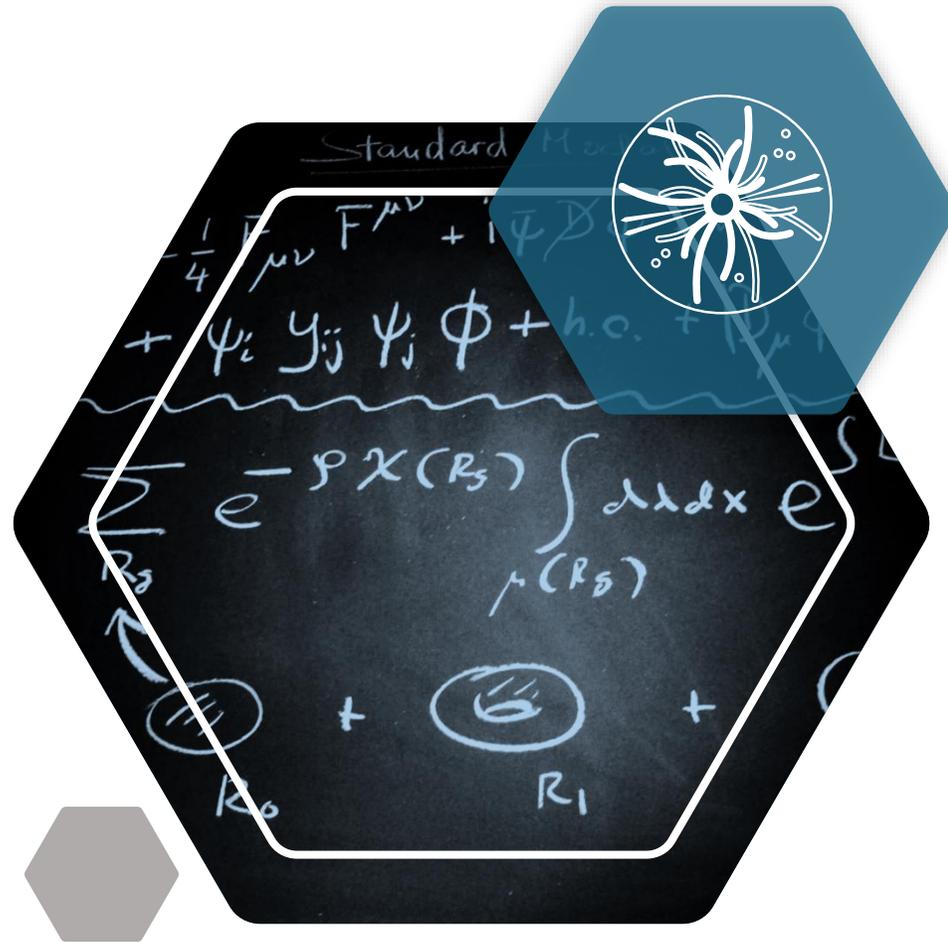
Paul A. M. Dirac, Interview by Friedrich Hund (1982)

**Clique [aqui](#)  
para acessar**



17:03 / 20:33





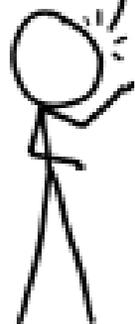
---

# TEORIA QUÂNTICA DE CAMPOS

Como ficam as interações Fortes e Fracas?

THERE ARE FOUR FUNDAMENTAL FORCES BETWEEN PARTICLES:  
(1) GRAVITY, WHICH OBEYS THIS INVERSE SQUARE LAW:

$$F_{\text{gravity}} = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

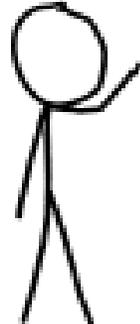


OK...

(2) ELECTROMAGNETISM, WHICH OBEYS THIS INVERSE-SQUARE LAW:

$$F_{\text{static}} = k_e \frac{q_1 q_2}{d^2}$$

AND ALSO MAXWELL'S EQUATIONS

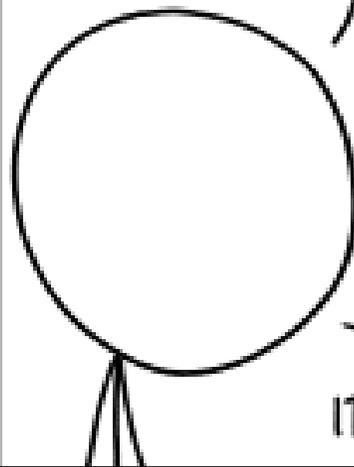


ALSO WHAT?

(3) THE STRONG NUCLEAR FORCE, WHICH OBEYS, UH...

...WELL, UMM...

...IT HOLDS PROTONS AND NEUTRONS TOGETHER.

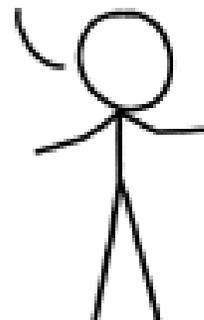


I SEE.

IT'S STRONG.

AND (4) THE WEAK FORCE. IT [MUMBLE MUMBLE] RADIOACTIVE DECAY [MUMBLE MUMBLE]

THAT'S NOT A SENTENCE. YOU JUST SAID 'RADIO-  
-AND THOSE ARE THE FOUR FUNDAMENTAL FORCES!



---

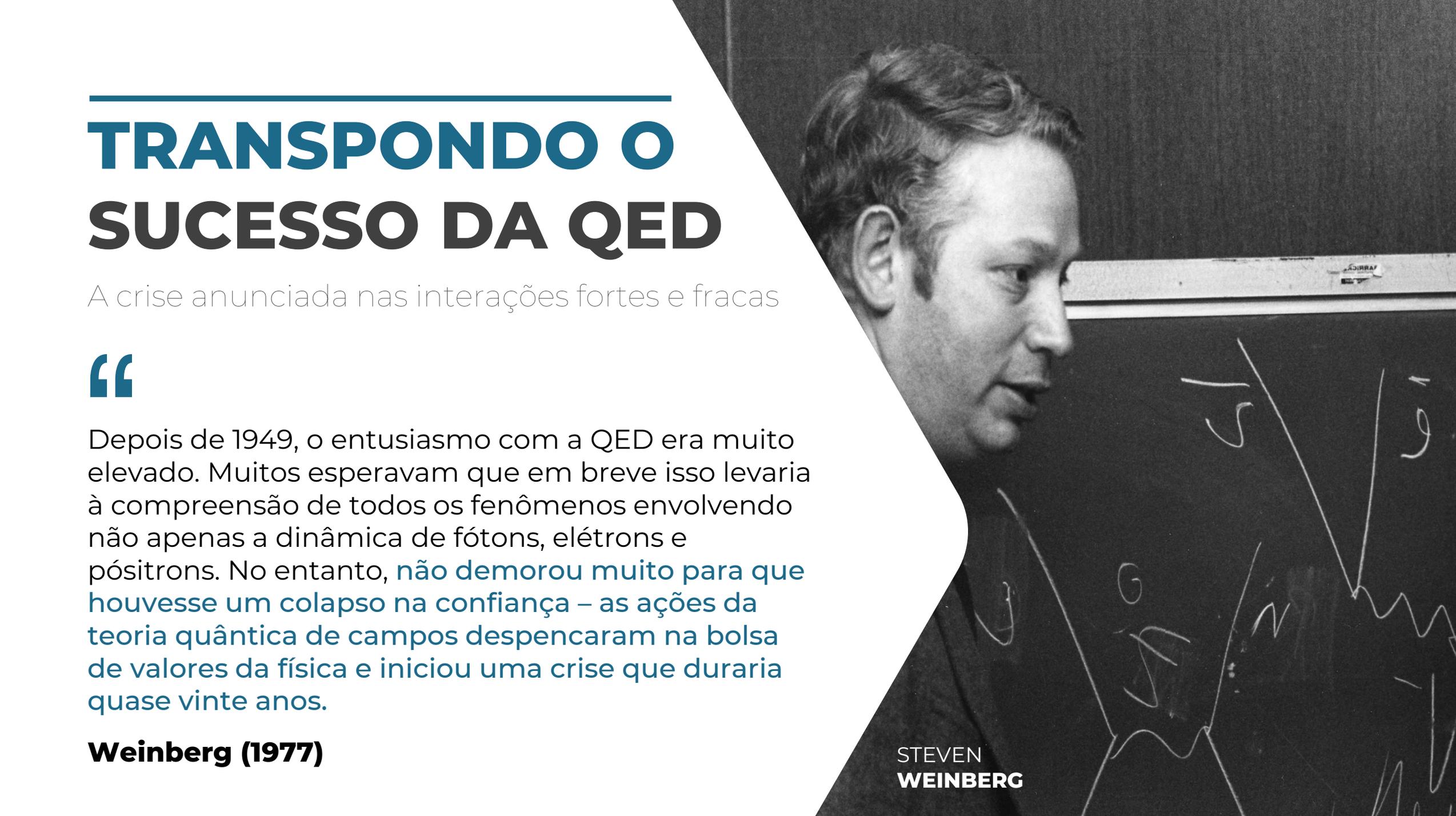
# TRANSPONDO O SUCESSO DA QED

A crise anunciada nas interações fortes e fracas

“

Depois de 1949, o entusiasmo com a QED era muito elevado. Muitos esperavam que em breve isso levaria à compreensão de todos os fenômenos envolvendo não apenas a dinâmica de fótons, elétrons e pósitrons. No entanto, **não demorou muito para que houvesse um colapso na confiança – as ações da teoria quântica de campos despencaram na bolsa de valores da física e iniciou uma crise que duraria quase vinte anos.**

**Weinberg (1977)**



STEVEN  
WEINBERG

# PONTO DE PARTIDA

O que podemos extrair da estrutura teórica de **sucesso da QED**?

- 1** Partículas em Interação  
Sofrem ação do campo
- 2** Propagadores da Interação  
Mediam a ação do campo
- 3** Vértices da Interação  
Interação e ação dos campos



# PONTO DE PARTIDA

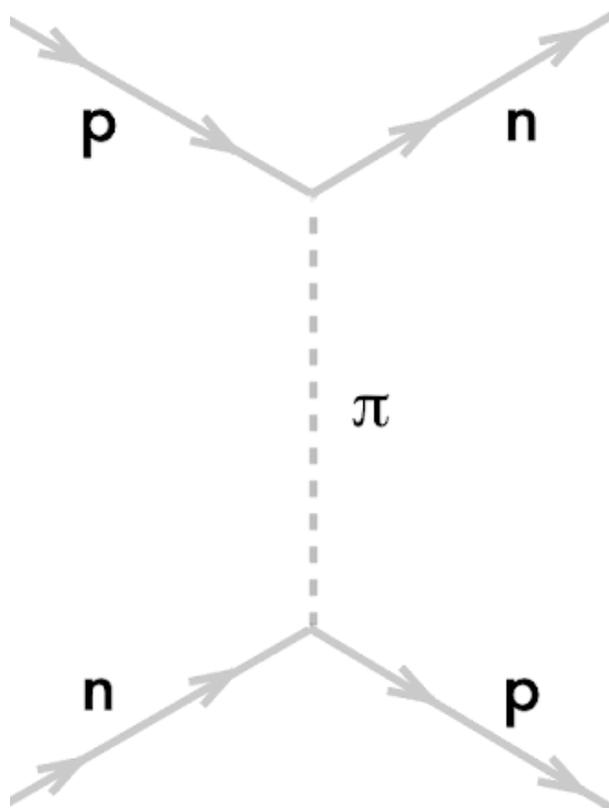
Vértices de Interação e as Constantes de Acoplamento

INTERAÇÃO	CONSTANTE DE ACOMPLAMENTO
FORTE	$\frac{g^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = 15$
ELETRO MAGNÉTICA	$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = \frac{1}{137} \cong 10^{-2}$
FRACA	$\frac{m_p^2 c^2}{\hbar^3} \cong 10^{-5}$



# INTERAÇÕES FORTES

Yukawa e os Píons como propagadores



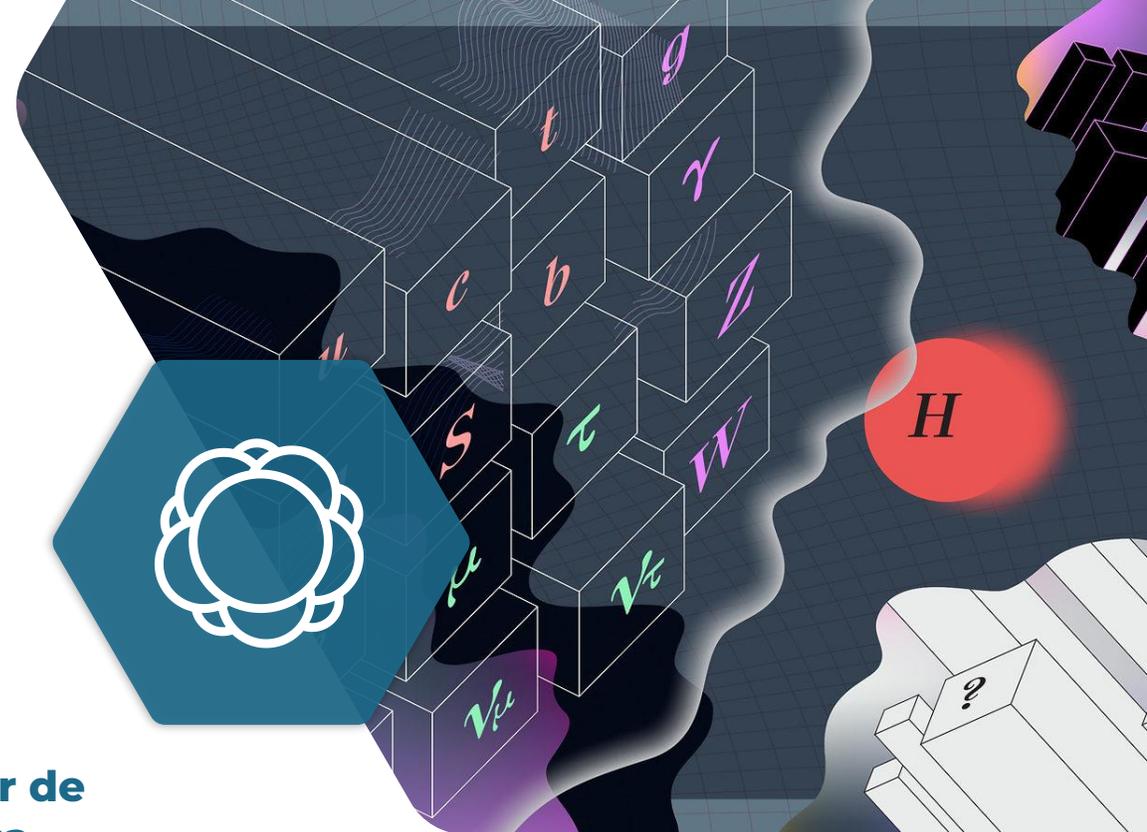
## Propagador de Massa Finita

Alcance limitado implica que o mediador possui massa



## Fragilidade do formalismo

Como operar sabendo que os diagramas de ordem superior são mais relevantes?

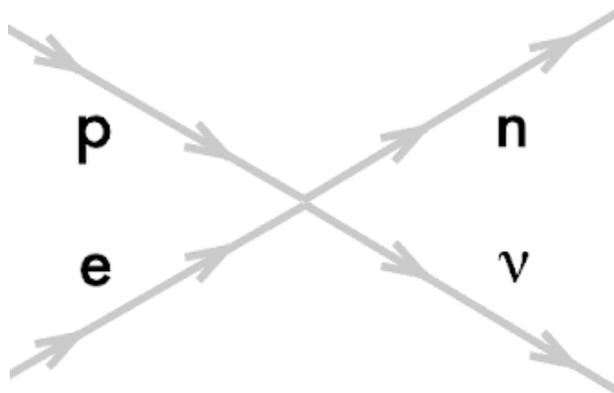


$$\alpha_s = \frac{g^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = 15$$

**Constante de acoplamento das interações fortes**

# INTERAÇÕES FRACAS

Interação entre Correntes  $e$ - $\nu$



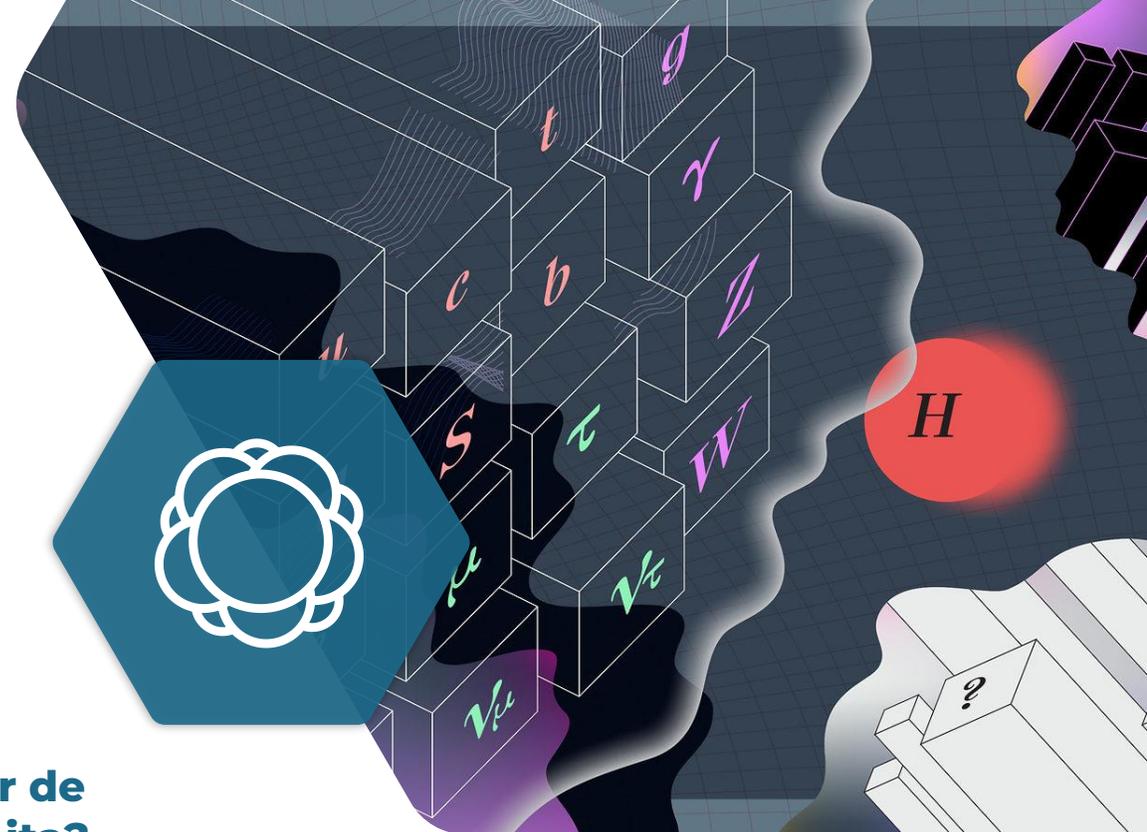
## Propagador de Massa Infinita?

Alcance pontual  
implica que mediador  
deve ter massa infinita



## Fragilidade do formalismo

Operar com correntes  
mediadoras gera infinitos  
já nas primeiras  
aproximações

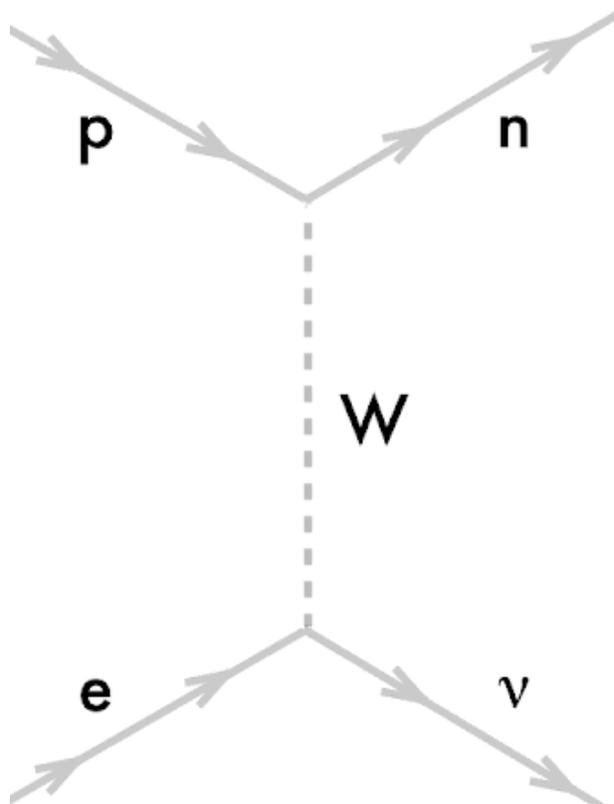


$$\alpha_W = \frac{m_p^2 c^2}{\hbar^3} \cong 10^{-5}$$

**Constante de acoplamento  
das interações fortes**

# INTERAÇÕES FRACAS

Interação entre Correntes  $e$ - $\nu$



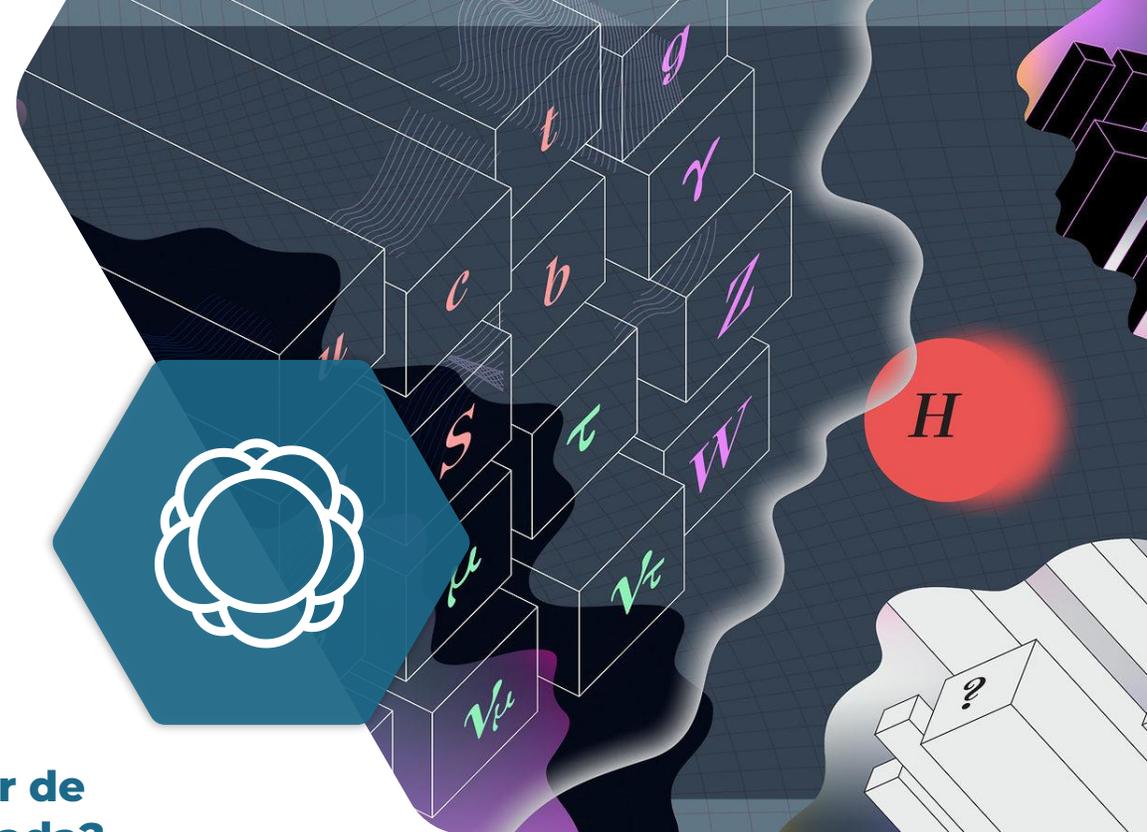
## Propagador de Massa Elevada?

Alcance finito, mas próximo do pontual, implica mediadores de maior massa que aqueles que interagem.



## Fragilidade do formalismo

Operar com correntes mediadoras gera infinitos já nas primeiras aproximações



$$\alpha_W = \frac{m_p^2 c^2}{\hbar^3} \cong 10^{-5}$$

**Constante de acoplamento  
das interações fortes**



---

# COMENTÁRIO

## SHUICHI KUSAKA

Encontro de Física de Teórica de Nova York

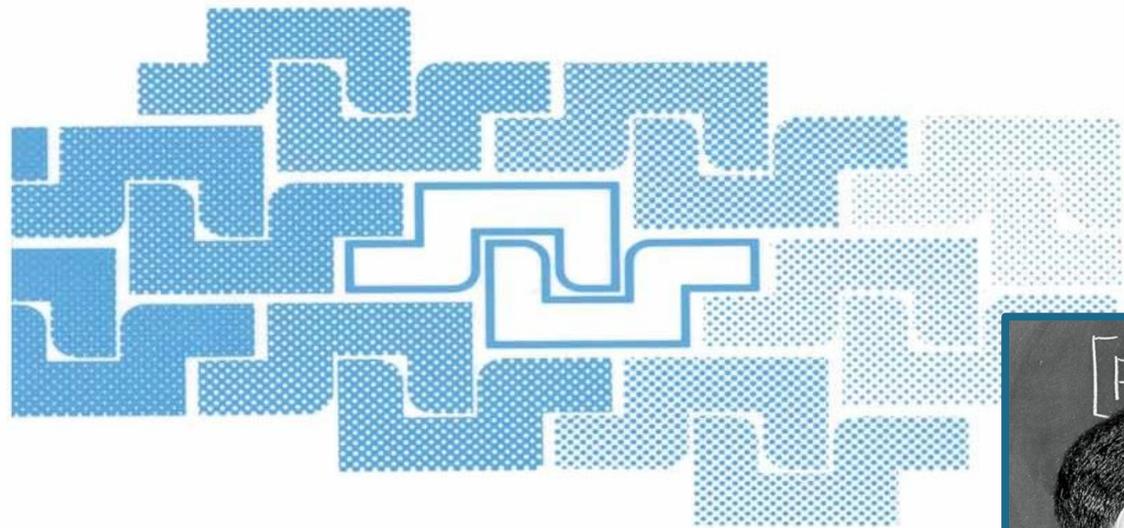


Vários tipos de mediadores em diferentes possibilidades foram investigados. No entanto, **nenhum foi capaz de lidar com todas evidências e fenômenos.**

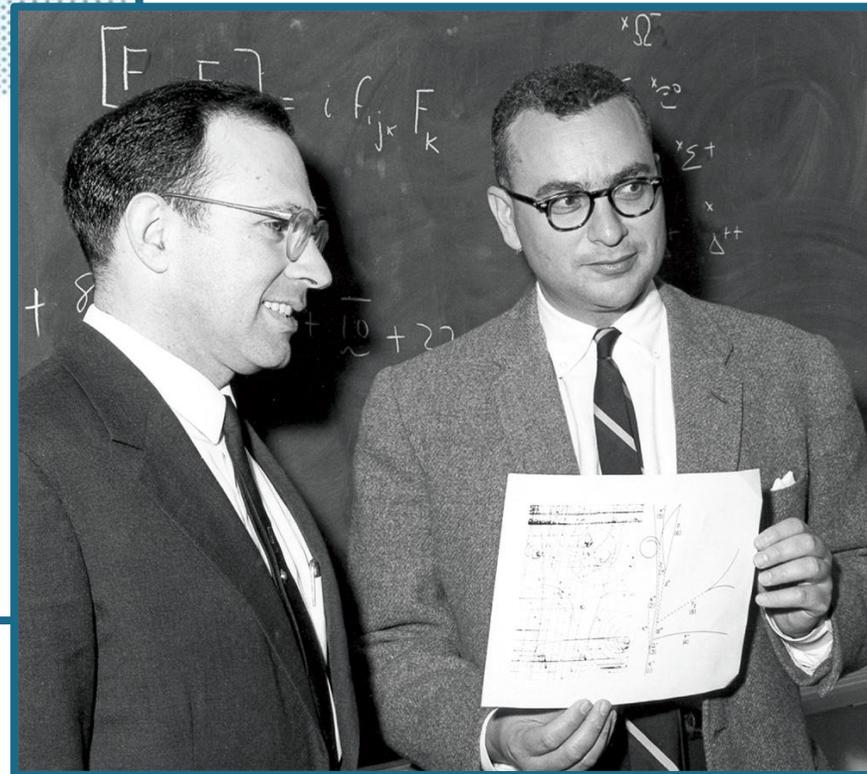
As teorias de **acoplamento fraco** sofrem com a inadequação básica de um alcance pontual e de um acoplamento entre o campo e o núcleo pequeno o que traz dificuldades de divergência inerentes à formulação.

As teorias de **acoplamento forte** são incapazes gerar quaisquer resultados em função das operações necessárias com termos de alta ordem de perturbação.

Parece, portanto, **não haver possibilidade** de formular uma teoria das forças nucleares fortes e fracas com base nas teorias convencionais que temos até agora.



History of Original  
Ideas and Basic  
Discoveries in Particle Physics



NOSSO PRÓXIMO ENCONTRO AO **FINAL DO BLOCO 3 – 27/11**  
MUDANÇAS EM CONCEPÇÕES TEÓRICAS: UM RELATO DE GELL-MANN