Quarks and paths

Sofia Leitão

Sumário

Parte I:

- Partículas Elementares
- Hadrões: Mesões
- Como descrever partículas?
- Cromodinâmica Quântica e Física Hadrónica

os ingredientes...

Parte II:

- Mesões são partículas relativistas?
- Modelo não relativista

hands on!!!

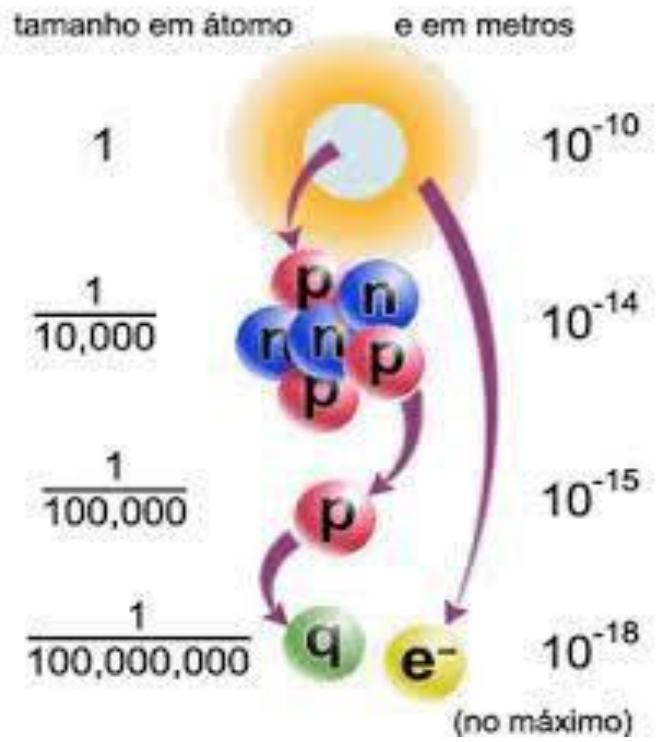
Parte III:

- Motivação
- Desafios
- Outros caminhos

a minha experiência :)

Parte I:

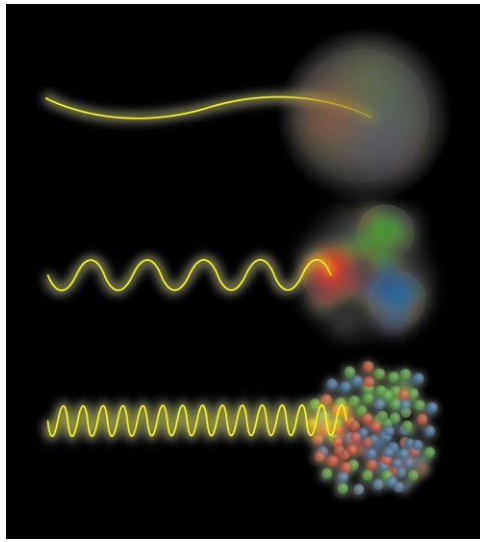
Partículas Elementares

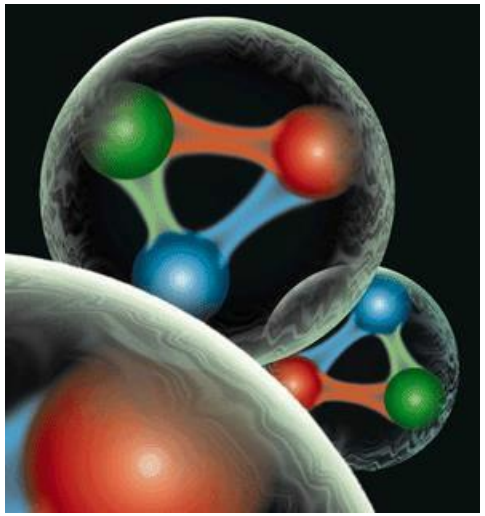


bosões de gauge

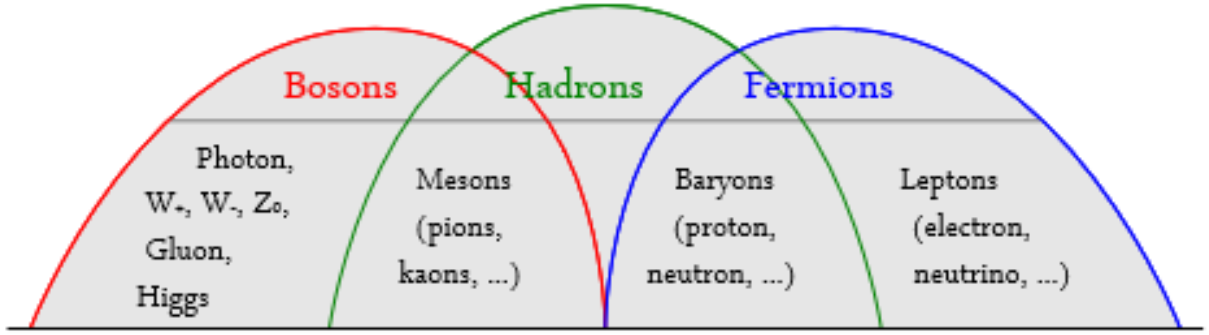
γ W^- W^+ Z g H^0 G ?

leptões			quarks		
ν_e	ν_μ	ν_τ	u	c	t
$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$	$\bar{u}$	$\bar{c}$	$\bar{t}$
e^-	μ^-	τ	d	s	b
$\bar{e}^-$	$\bar{\mu}^-$	$\bar{\tau}$	$\bar{d}$	$\bar{s}$	$\bar{b}$





Hadrões



constituídos por quarks

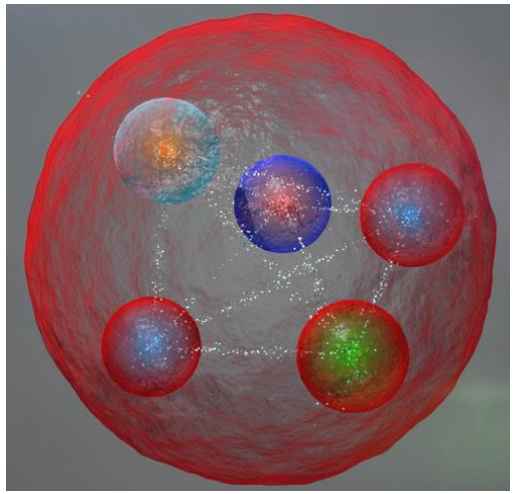
Convencionais:

Mesões

Bariões

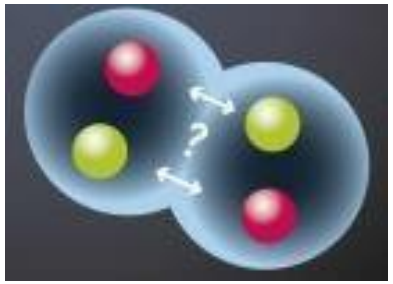
NEW: LHCb 2015!

Pentaquark

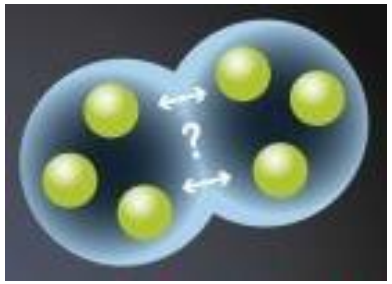


Exóticos:

Tetraquark



Dibariões



...?

Mesões: Introdução histórica

- **1935-** Yukawa **- campo carregado** – força de curto alcance entre o *protão* e o *neutrão* – $m \approx 200 m_e$ - "*mesão*"
- **1947-** Powell, Occhialini, Lattes – observação do "*mesão*" (*muão*) nos **raios cósmicos**;
- **1961-** Gell-Mann – descoberta de inúmeras novas partículas – "***The Eightfold Way***" baseado em simetrias internas;
- **1964-** Gell-Mann, Zweig – *bariões* $(qqq, \ldots)$ e *mesões* $(q\bar{q}, \ldots)$ compostos por *quarks* (q) e *antiquarks* $(\bar{q})$;
- **1969-** Bloom, Breidenback – experiências de ***deep inelastic scattering*** – sub-estrutura dos protões;
- **1974-** Gross, Wilczeck – grupo de simetria interna de ***cor*** – $SU(3)_c$ – teoria de gauge não-Abelianas;
- …

Modelo de quarks

- Modelo Standard e experiência – **6 sabores de quarks:**
  u *–up* e ***d*** *–down* (simetria de isospin I);
  s*–strange* (nº quântico S);
  c*–charm;*
  b*–bottom;*
  t*–top.*

- **Simetrias**
  - $SU_s(3)q = u, d, s$; $SU_s(4)q = u, d, s, c$ **não exatas**
  - $SU(2)$ spin (*quarks* são *fermiões*);
  - Carga elétrica;
  - Paridade $P = (-1)^{L+1}$;
  - $C = (-1)^{L+S}$;
  - $G = (-1)^I C$;

- **Multipletos de sabor**

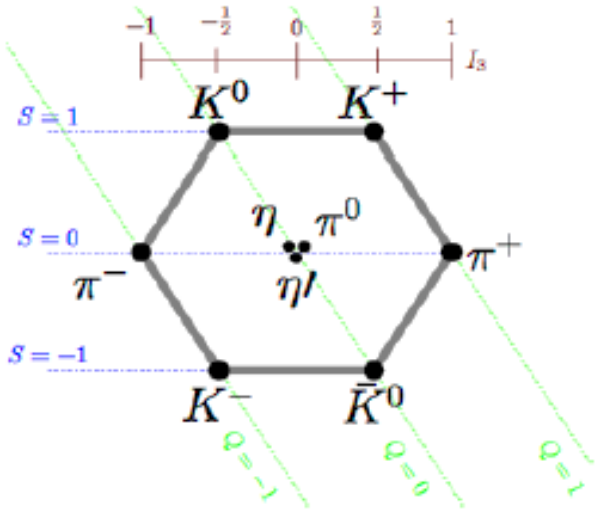
  $SU(3) \rightarrow 3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$

- **Conservação** de P, C, G e J na interação forte

Números quânticos de $q\bar{q}$

		J^{PC}	J	L	S	$^{2S+1}L_J$
Pseudoscalar	P	0^{-+}	0	0	0	$^1S_0$
Vector	V	1^{--}	1	0, 2	1	$^3S_1, {}^3D_1$
Scalar	S	0^{++}	0	1	1	$^3P_0$
Axial Vector	A^+	1^{++}	1	1	1	$^3P_1$
Pseudovector	A^-	1^{+-}	1	1	0	$^1P_1$
Tensor	T	2^{++}	2	1, 3	1	$^3P_2, {}^3F_2$
Tensor	T	2^{-+}	2	2	0	$^1D_2$
Tensor	T	2^{--}	2	2	1	$^3D_2$

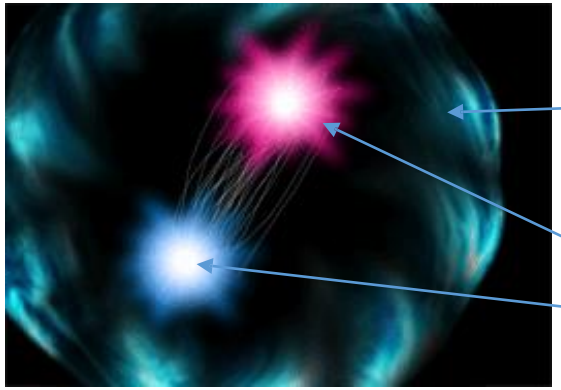
exemplo: **Mesões leves pseudoscalares**



Mesões: Como descrevê-los teoricamente?

Algumas questões!

- Modelo de quarks constituintes - nada nos diz sobre a **dinâmica** da interação;
- Sistema quântico - fenómenos contínuos de criação e destruição - 2ª Quantização;



- Mesões compostos por pelo menos um quark leve, requerem uma formulação relativista;
- “Puzzle” da massa pequena do pião
- Como é dada massa a estas partículas?

Como descrever teoricamente partículas?- ***Quadro síntese***

Mais pequeno →

Mais rápido ↓

Mecânica Clássica $\mathcal{L}[q(t), \dot{q}(t), t]$

ex. partícula num campo gravítico

$$\mathcal{L} = T - V = \frac{1}{2}m\dot{y}^2 + mgy \quad \frac{d}{dt}\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{y}} - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial y} = 0 \rightarrow \ddot{y} = g$$

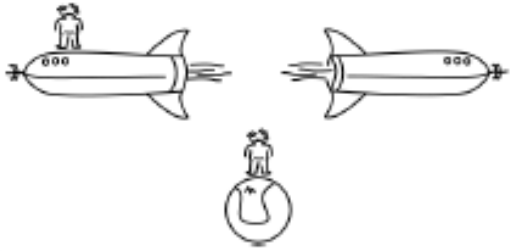
Mecânica Quântica

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m} + V(\boldsymbol{r})$$

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi(\boldsymbol{r}, t) = \hat{H}\Psi(\boldsymbol{r}, t)$$

$|\Psi(\boldsymbol{r}, t)\rangle$

Mecânica Relativista



$$R_{ab} - \frac{1}{2}Rg_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ab}$$

Teoria Quântica dos Campos

$$(t, \boldsymbol{x}) = (x^0, x^1, x^2, x^3) = x^\mu$$

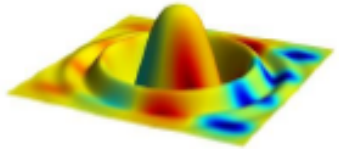
$$\mathcal{L}\left[\phi(\boldsymbol{x}, t), \frac{\partial \phi}{\partial t}, \nabla\phi\right]$$

$$\frac{\partial}{\partial x^\mu}\left[\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial\left(\frac{\partial \phi}{\partial x^\mu}\right)}\right] - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \phi} = 0$$

ex. partícula escalar livre

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}\partial_\mu\phi\partial^\mu\phi - \frac{m^2}{2}\phi^2$$

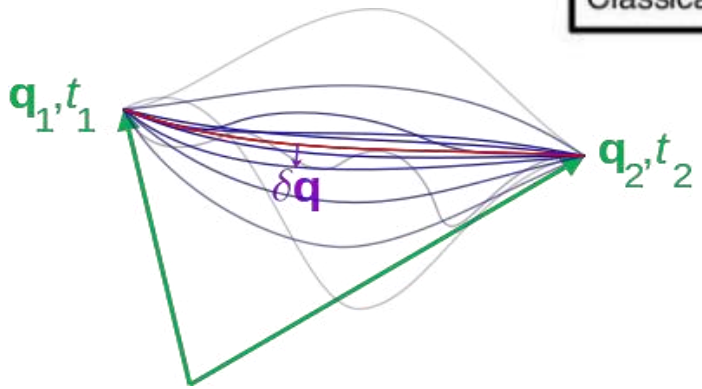
$$(\partial_\mu\partial^\mu + m^2)\phi = 0$$



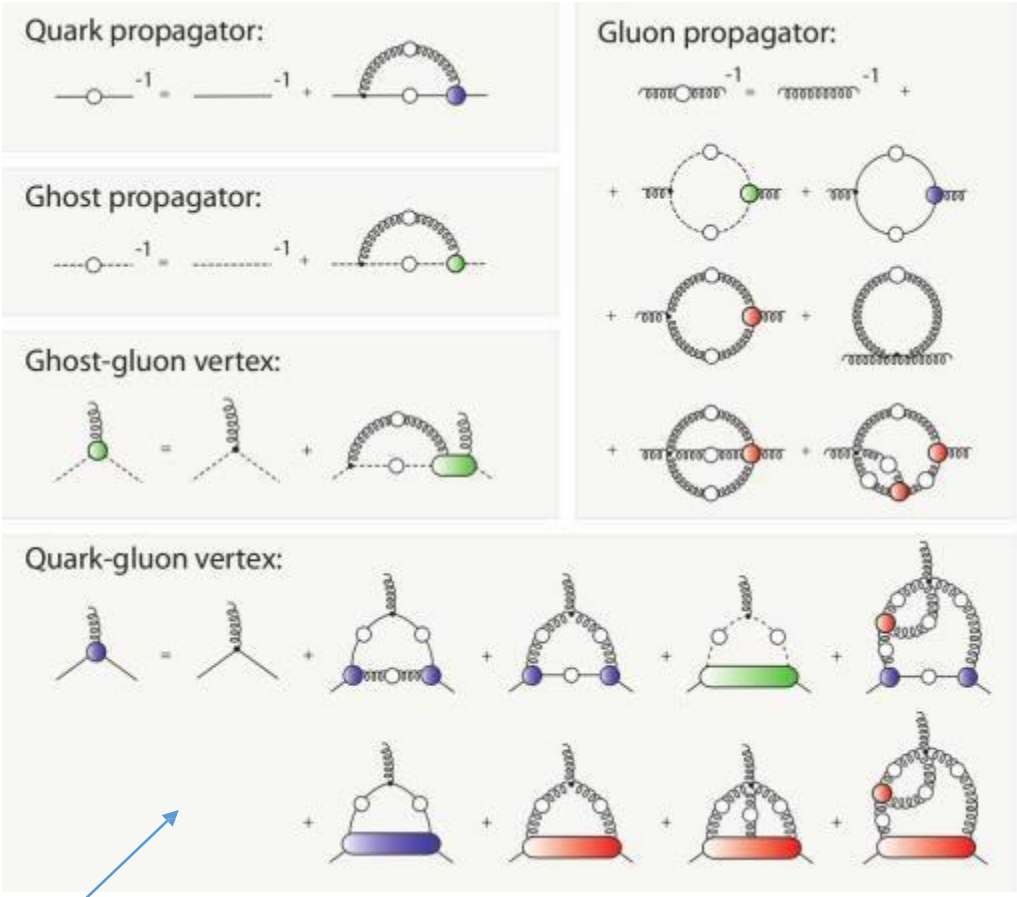
$\phi(\boldsymbol{x}, t)$

Investigação em física → *Qual é o Lagrangiano correcto?* → relacioná-lo com observáveis

Princípio da ação mínima – *o "melhor" caminho*



Classical Mechanics	Quantum Field Theory
Principle of Least Action	
$\frac{\delta S[q]}{\delta q} = 0$	$\left\langle \frac{\delta S[\phi(x)]}{\delta \phi(x)} \right\rangle = 0$
Equations of Motion (EoM)	
Euler-Lagrange Equation	Dyson-Schwinger Equation



exemplos

Lagrangeano do Modelo padrão

bosões

$$\mathcal{L}_{SM} = -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}tr\left(W_{\mu\nu}W^{\mu\nu}\right) - \frac{1}{2}tr\left(G_{\mu\nu}G^{\mu\nu}\right)$$

(termos de gauge U(1),SU(2) e SU(3))

$$+(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\bar{\sigma}^{\mu}iD_{\mu}\begin{pmatrix}\nu_L\\ e_L\end{pmatrix} + \bar{e}_R\sigma^{\mu}iD_{\mu}e_R + \bar{\nu}_R\sigma^{\mu}iD_{\mu}\nu_R + (h.c.)$$

(termo dinâmico leptónico)

$$-\frac{\sqrt{2}}{v}\left[(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L)\phi M^e e_R + \bar{e}_R\bar{M}^e\phi\begin{pmatrix}\nu_L\\ e_L\end{pmatrix}\right]$$

(termo de massa electrão, muão e tau)

$$-\frac{\sqrt{2}}{v}\left[(-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L)\phi^* M^{\nu}\nu_R + \bar{\nu}_R\bar{M}^{\nu}\phi^T\begin{pmatrix}-e_L\\ \nu_L\end{pmatrix}\right]$$

(termo de massa neutrino)

$$+(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\bar{\sigma}^{\mu}iD_{\mu}\begin{pmatrix}u_L\\ d_L\end{pmatrix} + \bar{u}_R\sigma^{\mu}iD_{\mu}u_R + \bar{d}_R\sigma^{\mu}iD_{\mu}d_R + (h.c.)$$

(termo dinâmico quarks)

$$-\frac{\sqrt{2}}{v}\left[(\bar{u}_L, \bar{d}_L)\phi M^d d_R + \bar{d}_R\bar{M}^d\phi\begin{pmatrix}u_L\\ d_L\end{pmatrix}\right]$$

(termo de massa down, strange, bottom)

$$-\frac{\sqrt{2}}{v}\left[(-\bar{d}_L, \bar{u}_L)\phi^* M^u u_R + \bar{u}_R\bar{M}^u\phi^T\begin{pmatrix}-d_L\\ u_L\end{pmatrix}\right]$$

(termo de massa up, charm, top)

$$+\overline{(D_{\mu}\phi)}D^{\mu}\phi - m_h^2\left[\bar{\phi}\phi - \frac{v^2}{2}\right]^2/2v^2.$$

(termo dinâmico e de massa Higgs)

Como extrair um resultado exacto a partir de um dado Lagrangiano em Teoria Quântica dos Campos?

Cromodinâmica Quântica - QCD

- QCD é uma **teoria de gauge** tem por base a introdução da **simetria de cor**, $SU(n_c)$, como uma **simetria local** e a existência de campos fermiónicos de spin ½ - ψ_i^s –*quarks*.

$$\mathcal{L}_{QCD} = \overline{\psi_i^s}(i\not{D} - m_s)_{ij}\psi_i^s - \frac{1}{4}\left(F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu}\right), \qquad \not{D}_\mu \equiv \partial_\mu - igA_\mu^a T^a;$$

$$s = 1, \dots, n_s = 6; i = 1, \dots, n_c = 3 \qquad F_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + gf^{abc}A_\mu^b A_\nu^c$$

- 8 campos adicionais - A_μ^a - *gluões*.
- Os gluões **auto-interagem**, ao contrário dos fotões em QED- teoria **Não Abeliana**

- Obervações empíricas mostram que a interação forte exibe **confinamento** e **liberdade assimptótica**
  - à escala do fm ***quarks*** e ***gluões*** estão sempre em singletos de cor – não existem quarks isolados
  - abaixo de $1fm$ comportam-se como partículas "*quase-livres*"

Cromodinâmica Quântica & Física Hadrónica

- A **liberdade assimptótica** é explicada por QCD através da constante de acoplamento renormalizável da interação α_{QCD}, aumenta com a separação entre *quarks* e *gluões*;

- Como α_{QCD} é elevada, QCD é uma teoria para a maioria das escalas de energia **não perturbativa**;

energias típicas dos mesões

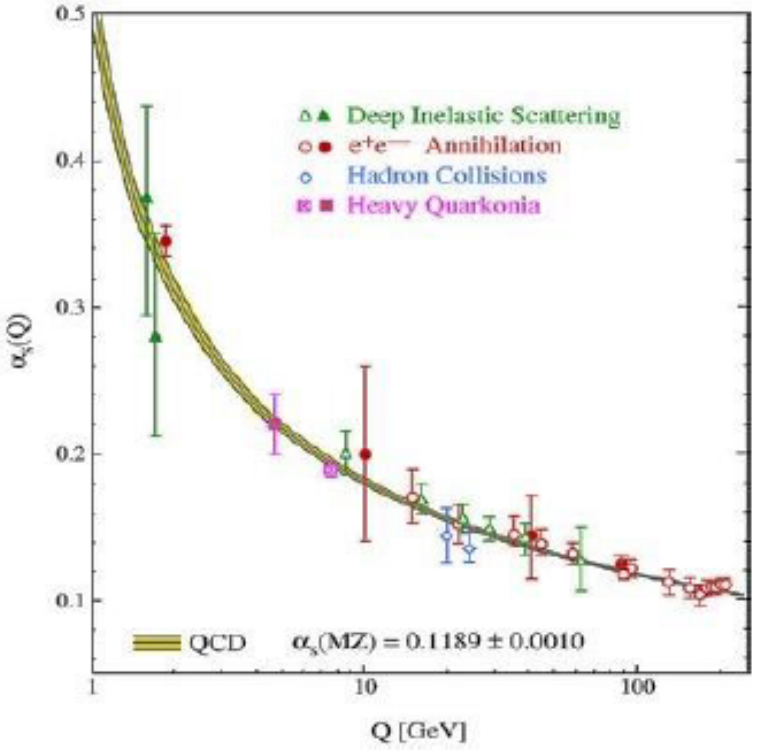
$\alpha_{QCD} \approx 1$

Necessidade de desenvolver outras abordagens teóricas

- **De forma directa-** através dos cálculos em **lattice QCD (LQCD)** teoria não perturbativa completa numa rede discreta

- **De uma forma indirecta-** através de **modelos inspirados** em **QCD**

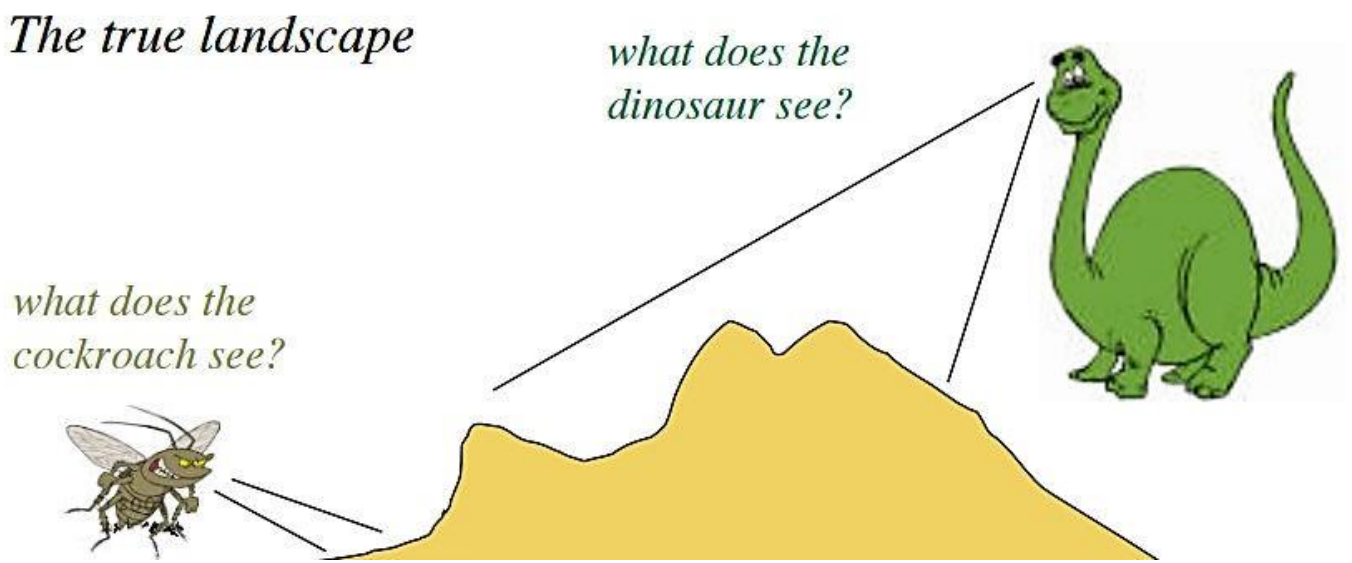
[Fonte: Siegfried Bethke, Experimental Tests of Asymptotic Freedom, arXiv:hep-ex/0606035, Fig. 17.]



Física Hadrónica!

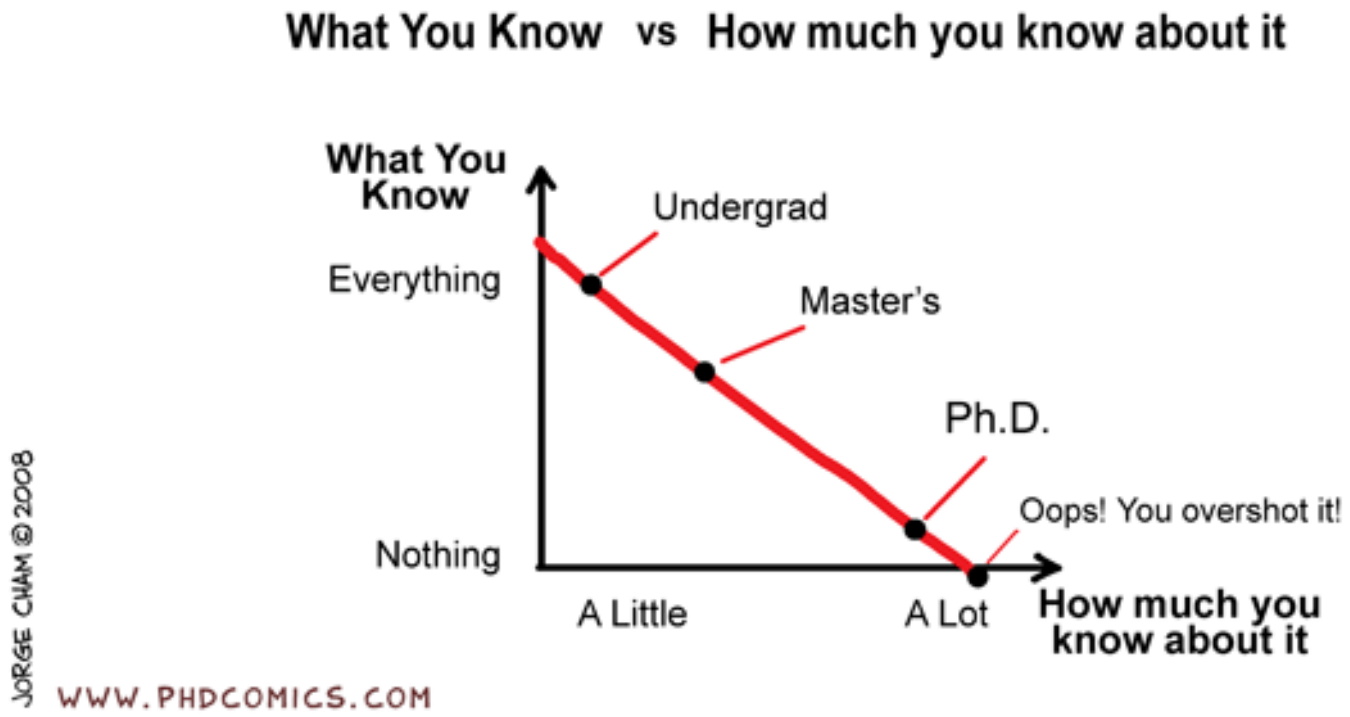
Parte II:

Parte III:



Motivação

Desafios

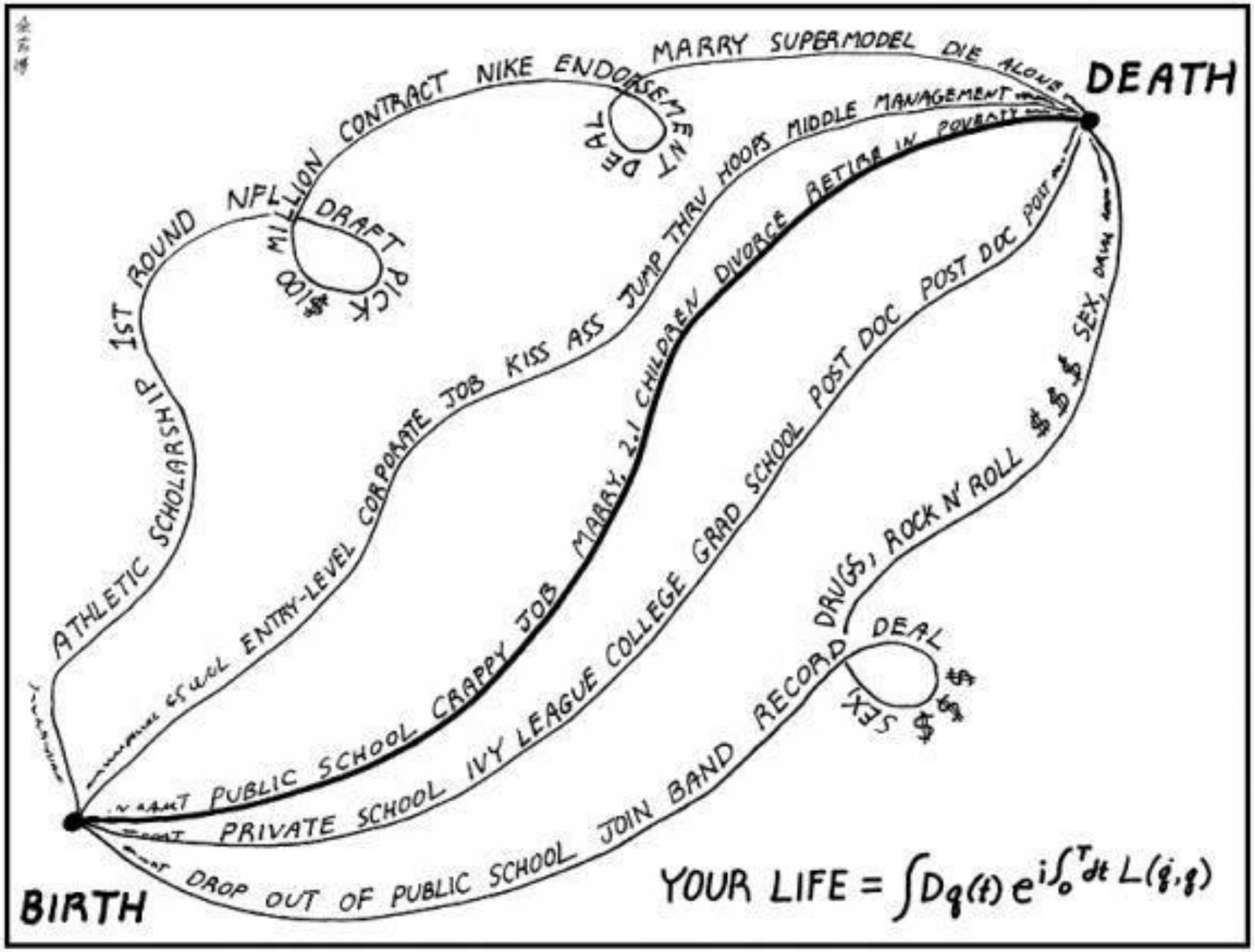


A minha experiência

The 30th Annual Hampton University Graduate Studies Program

HUGS 2015

Outros caminhos



The Path Integral Formulation of Your Life