

---

# Python, Linux e Predições na Física de Partículas

André Zimmermann-Santos

---

—

Quais são os elementos que,  
quando combinados,  
**compõem todo nosso  
universo?**

1 <b>H</b> Hydrogen 1.008																	2 <b>He</b> Helium 4.003	
3 <b>Li</b> Lithium 6.94	4 <b>Be</b> Beryllium 9.012																	
11 <b>Na</b> Sodium 22.990	12 <b>Mg</b> Magnesium 24.305																	
19 <b>K</b> Potassium 39.098	20 <b>Ca</b> Calcium 40.078	21 <b>Sc</b> Scandium 44.956	22 <b>Ti</b> Titanium 47.867	23 <b>V</b> Vanadium 50.942	24 <b>Cr</b> Chromium 51.996	25 <b>Mn</b> Manganese 54.938	26 <b>Fe</b> Iron 55.845	27 <b>Co</b> Cobalt 58.933	28 <b>Ni</b> Nickel 58.693	29 <b>Cu</b> Copper 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.38	31 <b>Ga</b> Gallium 69.723	32 <b>Ge</b> Germanium 72.630	33 <b>As</b> Arsenic 74.922	34 <b>Se</b> Selenium 78.97	35 <b>Br</b> Bromine 79.904	36 <b>Kr</b> Krypton 83.798	
37 <b>Rb</b> Rubidium 85.468	38 <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 <b>Y</b> Yttrium 88.906	40 <b>Zr</b> Zirconium 91.224	41 <b>Nb</b> Niobium 92.906	42 <b>Mo</b> Molybdenum 95.95	43 <b>Tc</b> Technetium [97]	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102.906	46 <b>Pd</b> Palladium 106.42	47 <b>Ag</b> Silver 107.868	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.414	49 <b>In</b> Indium 114.818	50 <b>Sn</b> Tin 118.710	51 <b>Sb</b> Antimony 121.760	52 <b>Te</b> Tellurium 127.60	53 <b>I</b> Iodine 126.904	54 <b>Xe</b> Xenon 131.293	
55 <b>Cs</b> Cesium 132.905	56 <b>Ba</b> Barium 137.327	* 57 - 70	71 <b>Lu</b> Lutetium 174.967	72 <b>Hf</b> Hafnium 178.49	73 <b>Ta</b> Tantalum 180.948	74 <b>W</b> Tungsten 183.84	75 <b>Re</b> Rhenium 186.207	76 <b>Os</b> Osmium 190.23	78 <b>Ir</b> Iridium 192.217	79 <b>Pt</b> Platinum 195.084	80 <b>Au</b> Gold 196.967	81 <b>Hg</b> Mercury 200.592	81 <b>Tl</b> Thallium 204.38	82 <b>Pb</b> Lead 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208.980	84 <b>Po</b> Polonium [209]	85 <b>At</b> Astatine [210]	86 <b>Rn</b> Radon [222]
87 <b>Fr</b> Francium [223]	88 <b>Ra</b> Radium [226]	** 89 - 102	103 <b>Lr</b> Lawrencium [262]	104 <b>Rf</b> Rutherfordium [267]	105 <b>Db</b> Dubnium [270]	106 <b>Sg</b> Seaborgium [266]	107 <b>Bh</b> Bohrium [270]	108 <b>Hs</b> Hassium [270]	109 <b>Mt</b> Meitnerium [278]	110 <b>Ds</b> Darmstadtium [281]	111 <b>Rg</b> Roentgenium [281]	112 <b>Cn</b> Copernicium [285]	113 <b>Nh</b> Nihonium [286]	114 <b>Fl</b> Flerovium [289]	115 <b>Mc</b> Moscovium [289]	116 <b>Lv</b> Livermorium [293]	117 <b>Ts</b> Tennessine [293]	118 <b>Og</b> Oganesson [294]

\*Lanthanide series

57 <b>La</b> Lanthanum 138.905	58 <b>Ce</b> Cerium 140.116	59 <b>Pr</b> Praseodymium 140.908	60 <b>Nd</b> Neodymium 144.242	61 <b>Pm</b> Promethium [145]	62 <b>Sm</b> Samarium 150.36	63 <b>Eu</b> Europium 151.964	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	65 <b>Tb</b> Terbium 158.925	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162.500	67 <b>Ho</b> Holmium 164.930	68 <b>Er</b> Erbium 167.259	69 <b>Tm</b> Thulium 168.934	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173.045
---	--------------------------------------	--	---	--	---------------------------------------	--	---	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	---

\*\*Actinide series

89 <b>Ac</b> Actinium [227]	90 <b>Th</b> Thorium 232.038	91 <b>Pa</b> Protactinium 231.036	92 <b>U</b> Uranium 238.029	93 <b>Np</b> Neptunium [237]	94 <b>Pu</b> Plutonium [244]	95 <b>Am</b> Americium [243]	96 <b>Cm</b> Curium [247]	97 <b>Bk</b> Berkelium [247]	98 <b>Cf</b> Californium [251]	99 <b>Es</b> Einsteinium [252]	100 <b>Fm</b> Fermium [257]	101 <b>Md</b> Mendelevium [258]	102 <b>No</b> Nobelium [259]
--------------------------------------	---------------------------------------	--	--------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------------	---	---	--------------------------------------	--	---------------------------------------

1 <b>H</b> Hydrogen 1.008																	2 <b>He</b> Helium 4.003	
3 <b>Li</b> Lithium 6.94	4 <b>Be</b> Beryllium 9.012																	
11 <b>Na</b> Sodium 22.990	12 <b>Mg</b> Magnesium 24.305																	
19 <b>K</b> Potassium 39.098	20 <b>Ca</b> Calcium 40.078	21 <b>Sc</b> Scandium 44.956	22 <b>Ti</b> Titanium 47.867	23 <b>V</b> Vanadium 50.942	24 <b>Cr</b> Chromium 51.996	25 <b>Mn</b> Manganese 54.938	26 <b>Fe</b> Iron 55.845	27 <b>Co</b> Cobalt 58.933	28 <b>Ni</b> Nickel 58.693	29 <b>Cu</b> Copper 63.546	30 <b>Zn</b> Zinc 65.38	31 <b>Ga</b> Gallium 69.723	32 <b>Ge</b> Germanium 72.630	33 <b>As</b> Arsenic 74.922	34 <b>Se</b> Selenium 78.97	35 <b>Br</b> Bromine 79.904	36 <b>Kr</b> Krypton 83.798	
37 <b>Rb</b> Rubidium 85.468	38 <b>Sr</b> Strontium 87.62	39 <b>Y</b> Yttrium 88.906	40 <b>Zr</b> Zirconium 91.224	41 <b>Nb</b> Niobium 92.906	42 <b>Mo</b> Molybdenum 95.95	43 <b>Tc</b> Technetium [98]	44 <b>Ru</b> Ruthenium 101.07	45 <b>Rh</b> Rhodium 102.905	46 <b>Pd</b> Palladium 106.367	47 <b>Ag</b> Silver 107.868	48 <b>Cd</b> Cadmium 112.414	49 <b>In</b> Indium 114.818	50 <b>Sn</b> Tin 118.710	51 <b>Sb</b> Antimony 121.760	52 <b>Te</b> Tellurium 127.60	53 <b>I</b> Iodine 126.904	54 <b>Xe</b> Xenon 131.293	
55 <b>Cs</b> Cesium 132.905	56 <b>Ba</b> Barium 137.327	* 57 - 70	71 <b>Lu</b> Lutetium 174.967	72 <b>Hf</b> Hafnium 178.49	73 <b>Ta</b> Tantalum 180.948	74 <b>W</b> Tungsten 183.84	75 <b>Re</b> Rhenium 186.207	76 <b>Os</b> Osmium 190.23	77 <b>Ir</b> Iridium 192.222	78 <b>Pt</b> Platinum 195.084	79 <b>Au</b> Gold 196.967	80 <b>Hg</b> Mercury 200.592	81 <b>Tl</b> Thallium 204.38	82 <b>Pb</b> Lead 207.2	83 <b>Bi</b> Bismuth 208.980	84 <b>Po</b> Polonium [209]	85 <b>At</b> Astatine [210]	86 <b>Rn</b> Radon [222]
87 <b>Fr</b> Francium [223]	88 <b>Ra</b> Radium [226]	** 89 - 102	103 <b>Lr</b> Lawrencium [262]	104 <b>Rf</b> Rutherfordium [267]	105 <b>Db</b> Dubnium [270]	106 <b>Sg</b> Seaborgium [266]	107 <b>Bh</b> Bohrium [264]	108 <b>Hs</b> Hassium [270]	109 <b>Mt</b> Meitnerium [278]	110 <b>Ds</b> Darmstadtium [281]	111 <b>Rg</b> Roentgenium [281]	112 <b>Cn</b> Copernicium [285]	113 <b>Nh</b> Nihonium [286]	114 <b>Fl</b> Flerovium [289]	115 <b>Mc</b> Moscovium [289]	116 <b>Lv</b> Livermorium [293]	117 <b>Ts</b> Tennessine [293]	118 <b>Og</b> Oganesson [294]

\*Lanthanide series

57 <b>La</b> Lanthanum 138.905	58 <b>Ce</b> Cerium 140.116	59 <b>Pr</b> Praseodymium 140.908	60 <b>Nd</b> Neodymium 144.242	61 <b>Pm</b> Promethium [145]	62 <b>Sm</b> Samarium 150.36	63 <b>Eu</b> Europium 151.964	64 <b>Gd</b> Gadolinium 157.25	65 <b>Tb</b> Terbium 158.925	66 <b>Dy</b> Dysprosium 162.500	67 <b>Ho</b> Holmium 164.930	68 <b>Er</b> Erbium 167.259	69 <b>Tm</b> Thulium 168.934	70 <b>Yb</b> Ytterbium 173.045
---	--------------------------------------	--	---	--	---------------------------------------	--	---	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	---

\*\*Actinide series

89 <b>Ac</b> Actinium [227]	90 <b>Th</b> Thorium 232.038	91 <b>Pa</b> Protactinium 231.036	92 <b>U</b> Uranium 238.029	93 <b>Np</b> Neptunium [237]	94 <b>Pu</b> Plutonium [244]	95 <b>Am</b> Americium [243]	96 <b>Cm</b> Curium [247]	97 <b>Bk</b> Berkelium [247]	98 <b>Cf</b> Californium [251]	99 <b>Es</b> Einsteinium [252]	100 <b>Fm</b> Fermium [257]	101 <b>Md</b> Mendelevium [258]	102 <b>No</b> Nobelium [259]
--------------------------------------	---------------------------------------	--	--------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------------	---	---	--------------------------------------	--	---------------------------------------

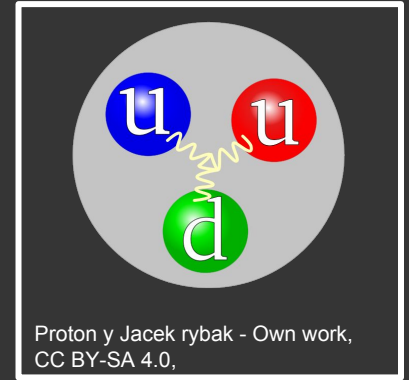
# Modelo Padrão!

	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>		
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	$\gamma$ photon	
	$d$ down	$s$ strange	$b$ beauty		$W^{\pm}$ W boson
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau		
$\nu_e$ neutrino electron	$\nu_\mu$ neutrino muon	$\nu_\tau$ neutrino tau	$g$ gluon		
				$H$ Higgs Boson	

Faltam 96 %:

- Gravidade
- Matéria escura
- Energia escura

# Várias combinações possíveis !!!



Quark



Hádrons

Quark

Bárions (3 quarks) - Próton, Neutron, Lambdas, Sigmas, Deltas... etc.

Mésons (quark + anti-quark) - Pi, K , Eta, J/Psi...

A computação de alto desempenho tornou-se ferramenta para a determinação de

# PROPRIEDADES DE PARTÍCULAS E DE SUAS INTERAÇÕES



*CSD3 Peta4 CPU/KNL cluster is at position number 75 in the November 2017 Top500 list of the 500 most powerful commercially available computer systems.*





—

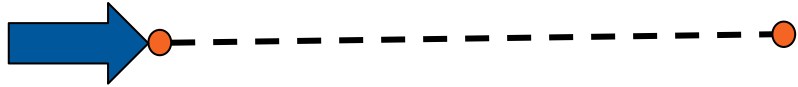


## Segunda Lei de Newton.

Quanto maior a força exercida sobre um corpo, maior a sua aceleração.

Mecânica clássica. Válida nas nossas atividades cotidianas

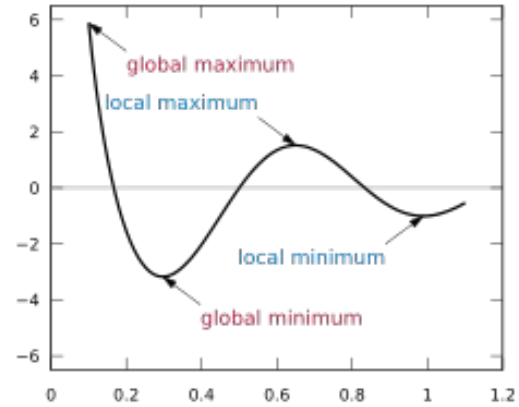
$S_1$

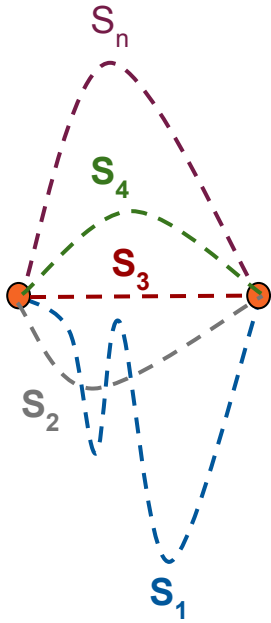


$S_2$

# Princípio da Ação

O caminho percorrido é aquele em que a ação se mantém estacionária.





# Mecânica Quântica

Probabilidade: depende de todos os caminhos possíveis e da Ação em cada caminho.

Para o caso de muita partículas: média vem do caminho de ação estacionária.

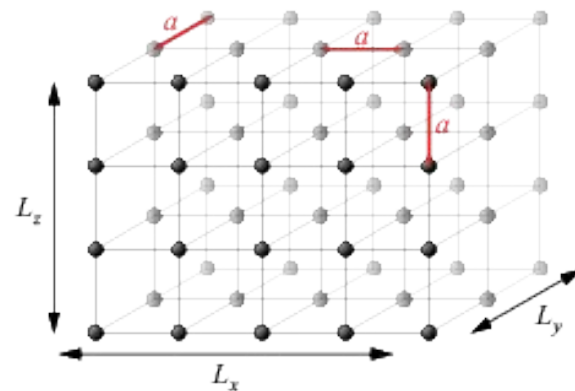
# Interações fortes

- Teoria Quântica -> Quantum Chromodynamics, QCD
- Quarks e gluons
- Formalismo Lattice (ou de rede) : parte de primeiros princípios

# Discretização da malha que compõe o espaço-tempo

Campos de quarks são definidos nos nós.

Campos de gluons nos links.



—

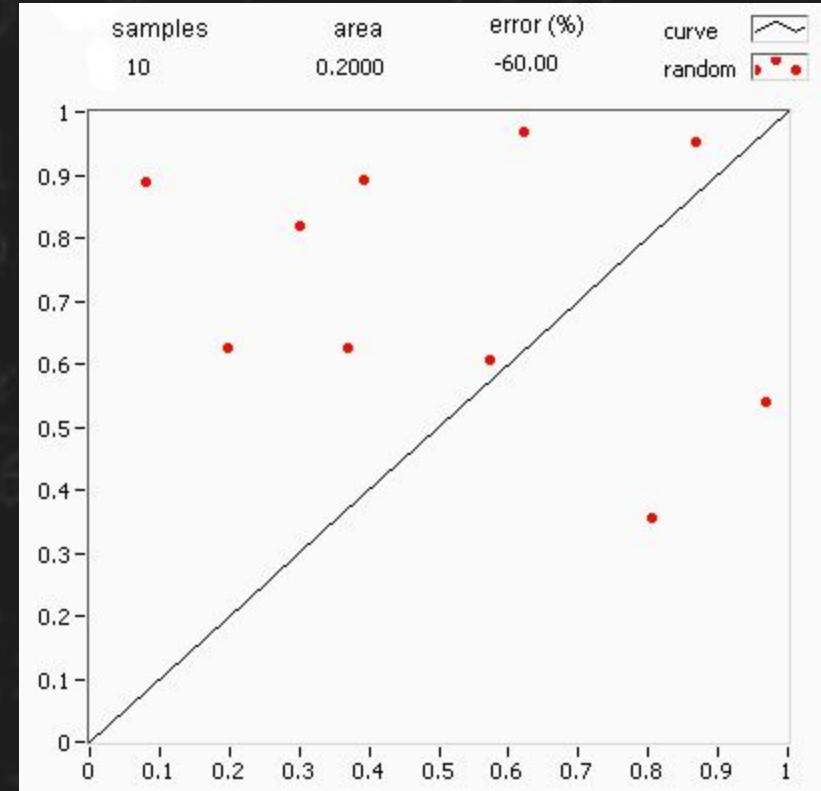
$$\langle \phi(x_2)\phi(x_1) \rangle_T = \frac{1}{Z} \int e^{-S_E[\phi]} \phi(x_2)\phi(x_1) \prod_{x_j \in \text{grid}} d\phi(x_j)$$

–  
Usamos algoritmos  
**monte carlo** para  
somar as  
contribuições de  
cada caminho.

# A solução Monte Carlo

Método/Algoritmo para  
resolução de Integrais

- Amostragem aleatória
- Média do valor da função nos pontos igualmente distribuídos
- $\text{error} \sim 1 / \sqrt{N}$



From Wikipedia Commons



## Adaptações:

- Amostragem por Importância das configs. (distribuições  $e^{-S \text{ phi}}$ )
- Algoritmo de Metropolis para geração de configs. (Cadeias de Markov).

—  
Existem códigos abertos para se fazer  
simulações de Lattice QCD

## MILC code

- **Software Livre (licenças GNU)**
- **University of UTAH**
- <http://physics.utah.edu/~detar/milc/>

The MILC Code is a body of high performance research software written in C for doing SU(3) lattice gauge theory on several different (MIMD) parallel computers in current use. In scalar mode, it runs on a variety of workstations making it extremely versatile for both production and exploratory applications. This manual is for the latest (7.7.3) version of the code. Currently supported code runs on:

- Scalar machines
- Linux+MPI clusters
- IBM BG/L BG/P BG/Q
- Cray XT3, XE6
- Multi-GPU clusters

Faça download do MILC  
no Github:

**milc-qcd**

Link: [https://github.com/milc-qcd/milc\\_qcd](https://github.com/milc-qcd/milc_qcd)



# Input- Script

1. Algumas semanas rodando 1 única simulação
2. Meses até rodar um conjunto de interesse
3. Repetição em diferentes distâncias de rede

```
55 t0=$((src_start + i*dsrc))
56 t0phase=$((1-2*t0 % 2))
57
58 tt=0
59
60 T=$((Tstart+tt*dT))
61 Tt=$((t0+T))
62 Tt=$((Tt % nt))
63
64 corrfilet0=${corrfile}_t${t0}
65 corrfilet=${corrfile}_t${t0}_T${T}
66
67 cat << HERE2
68
69 #####
70 # source time ${t0}, meson separation T = ${T}
71 #####
72
73 # Gauge field description
74
75 ${reload_gauge_cmd}
76 u0 ${u0}
77 no_gauge_fix
78 forget
79 staple_weight 0
80 ape_iter 0
81 coordinate_origin 0 0 0 0
```

# Análise de Dados

Ajuste dos Correlatores

Extração de Grandezas Físicas:

1. Constantes de Decaimento
2. Massas de Quarks e Hádrons
3. Parâmetros de interação
4. Espectros



---

## Ajuste:

- lsqfit
- corrfitter



Prof. G. Peter Lepage da Universidade de Cornell.

# lsqfit

- Mínimos Quadrados
- Funções multidimensionais e não lineares
- Uso de **Priors Bayesianos**



# corrfitter

- Mínimos Quadrados
- **Funções de correlação** como função do tempo
  - 2-pt -> hádrons
  - 3-pt -> interação hádrons-partícula
- Extração de grandezas

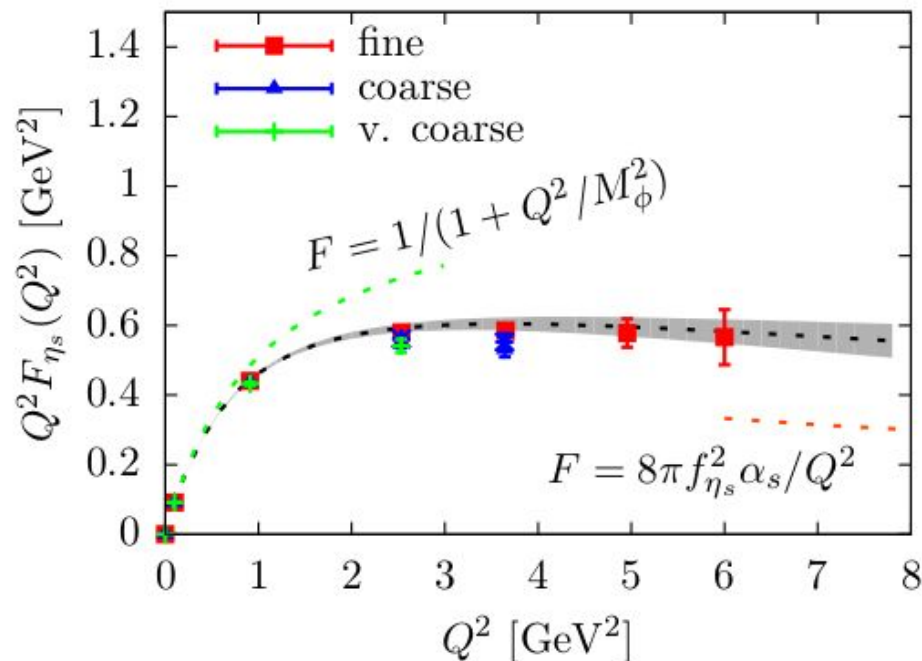
# Módulos complementares

- Numpy
  - Arrays, funções otimizadas
- Gvar
  - Incertezas e correlações
- Matplotlib
  - Gráficos

# Resultados

Setembro 2017

→ Predição do comportamento do fator de forma à baixas  $Q^2$



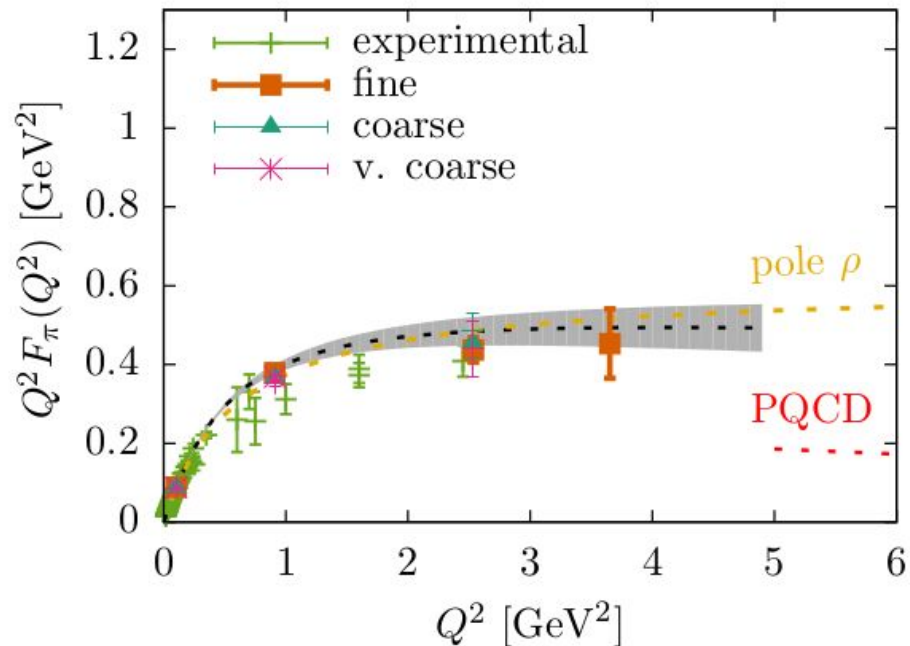
J. Koponen, A. C. Zimmermann-Santos, C. T. H. Davies, G. P. Lepage, and A. T. Lytle "Pseudoscalar meson electromagnetic form factor at high  $Q^2$  from full lattice QCD", **Physical Review D** 96, 054501, Sep. 2017

# Resultados

Atual

→ Extensão para  
mésons reais:

- ◆  $\pi$ 's
- ◆  $K$ 's
- ◆  $\eta_c$



---

# Perspectivas

- Aumento da capacidade computacional
- Cálculos de altíssima precisão possíveis
- Aproximação de massas físicas
- Cálculos com Hádrons leves

---

# O que mais?

- Restrições ao Modelo Padrão
- Física de Íons-pesados:
- Estrela de Neutrons e “the beginning”
- Pistas de novas físicas

# Mais Informações:

- Físicas de Partículas: Blog “Coleção de Partículas “  
(<https://colecaodeparticulas.wordpress.com/blog/>)
- “Lattice QCD for Novices” - G. P. Lepage(  
<https://arxiv.org/abs/hep-lat/0506036>)
- Lsqfit documentation (  
<https://corrfitter.readthedocs.io/en/latest/>)
- Corrfitter documentation  
(<https://corrfitter.readthedocs.io/en/latest/>)