La Fisica con i supercomputer

25 anni
di Fisica del flavor e QCD (+ QED) sul reticolo all'INFN Roma Tre

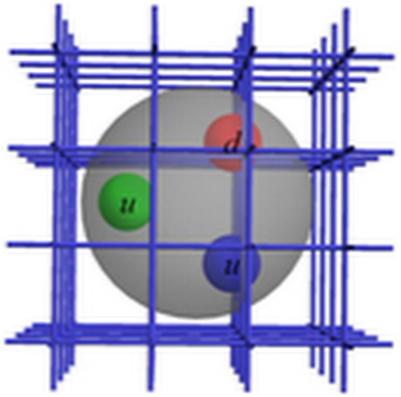
Vittorio Lubicz

Roma Tre - 28 settembre 2023

Le simulazioni di QCD sul reticolo

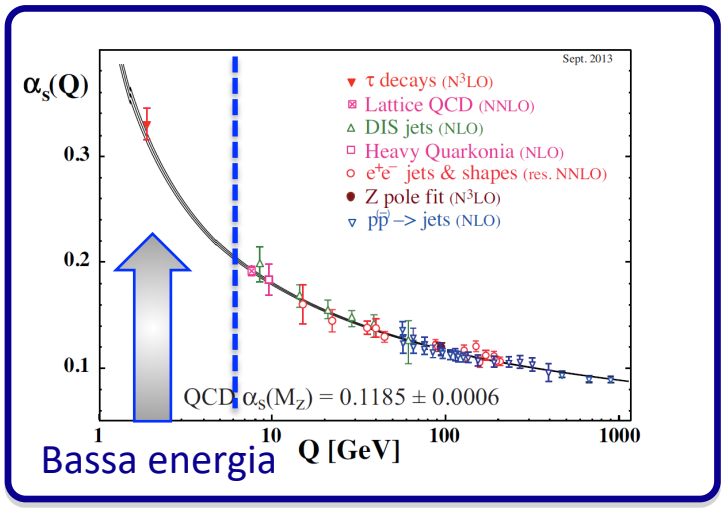
La teoria di campo è espressa in termini di integrali funzionali

$$\langle T[\varphi(x_1) \dots \varphi(x_n)]\rangle = \int d[\varphi]\, \varphi(x_1) \dots \varphi(x_n)\, e^{-S(\varphi)}$$



L'integrale è discretizzato sul reticolo ($O(10^9)$ variabili)

➡ Simulazioni numeriche con metodi Montecarlo



METODO NON PERTURBATIVO

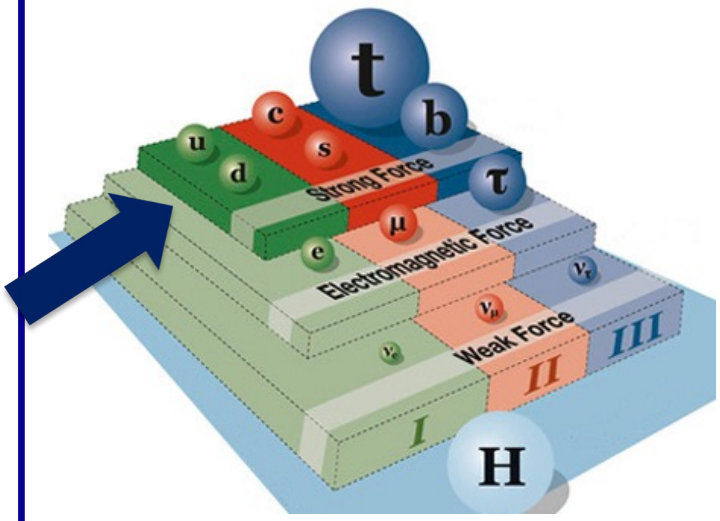
- Masse degli adroni
- Masse dei quark
- Costanti di decadimento
- Fattori di forma ...

Determinazione dei parametri liberi del Modello Standard

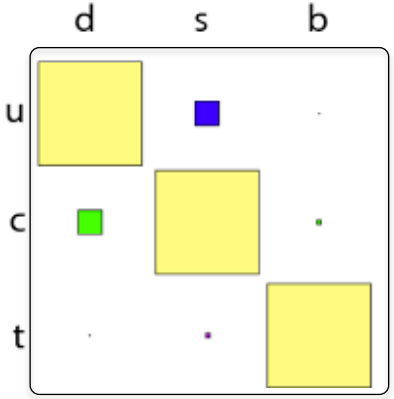
Nel settore del flavor dei quark (10 parametri liberi)

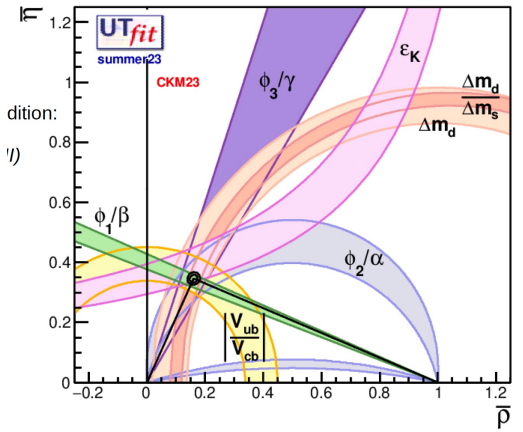
Masse dei quark

Elementi della matrice CKM



Cabibbo-Kobayashi-Maskawa





In entrambe le matrici una significativa gerarchia (teoria di flavor?)

Le masse dei quark

Non si possono misurare negli esperimenti né calcolare con la sola teoria

ELSEVIER

Nuclear Physics B 431 (1994) 667–685

NUCLEAR PHYSICS B

Quark masses from lattice QCD at the next-to-leading order

C.R. Allton [a], M. Ciuchini [a,b], M. Crisafulli [a], E. Franco [a], V. Lubicz [a], G. Martinelli [a,c]

[a] *Dip. di Fisica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" and INFN, Sezione di Roma, P.le A. Moro 2,*

[b] *INFM*

[c]

Abstract

Using the results of sev
charm quark masses in th
and $m_{ch}^{\overline{MS}}(\mu = 2\,\mathrm{GeV}) =$
taking into account the o

Il primo studio delle masse dei quark sul reticolo al NLO (1994)

Un calcolo più recente (2021)

PHYSICAL REVIEW D **104,** 074515 (2021)

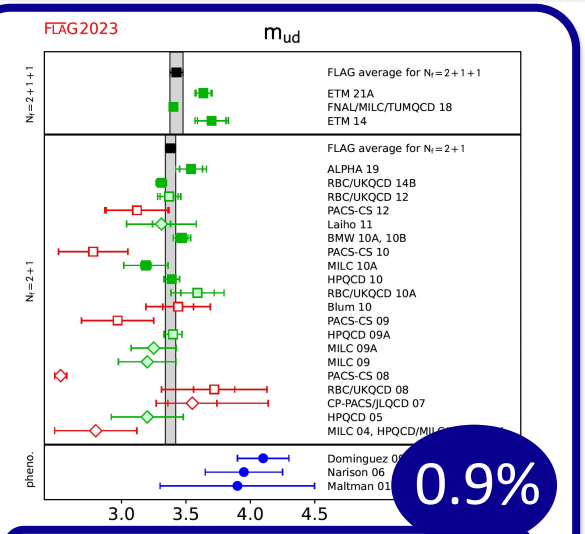
Quark masses using twisted-mass fermion gauge ensembles

C. Alexandrou,[1,2] S. Bacchio,[2] G. Bergner,[3] M. Constantinou,[4] M. Di Carlo,[5,6] P. Dimopoulos,[7] J. Finkenrath,[2] E. Fiorenza,[8] R. Frezzotti,[9] M. Garofalo,[10] K. Hadjiyiannakou,[1,2] B. Kostrzewa,[11] G. Koutsou,[2] K. Jansen,[12] V. Lubicz,[13] M. Mangin-Brinet,[14] F. Manigrasso,[1,9,15] G. Martinelli,[16] E. Papadiofantous,[1,2] F. Pittler,[2] G. C. Rossi,[9,17] F. Sanfilippo,[18] S. Simula,[18] C. Tarantino,[13] A. Todaro,[1,9,15] C. Urbach,[10] and U. Wenger[19]

(Extended Twisted Mass Collaboration)

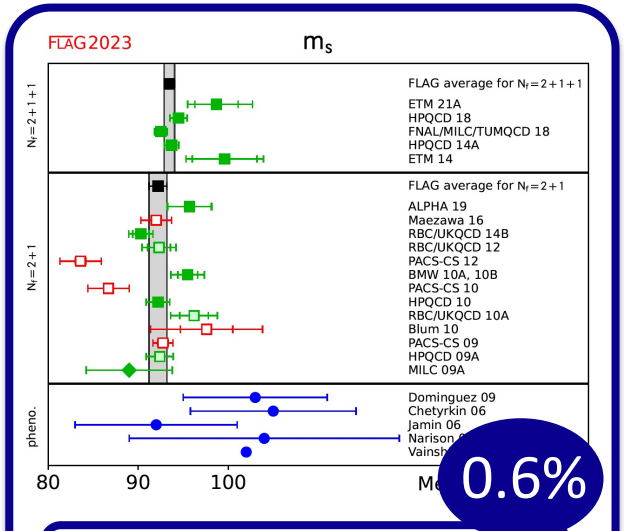
[1]*Department of Physics, University of Cyprus, 20537 Nicosia, Cyprus*

Le masse dei quark



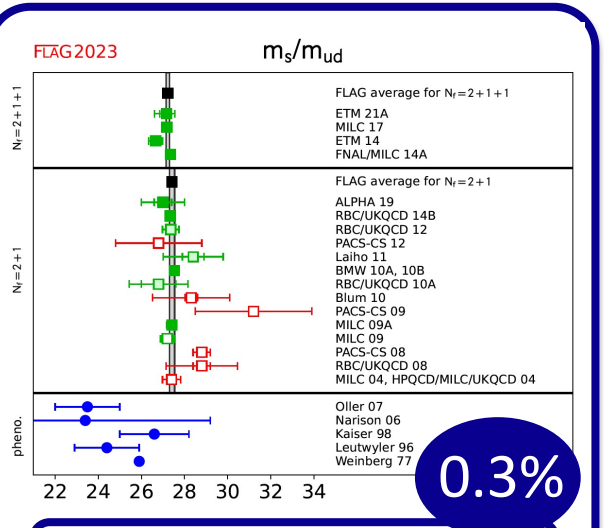
0.9%

$\overline{m}_{ud}$= 3.399(31) MeV



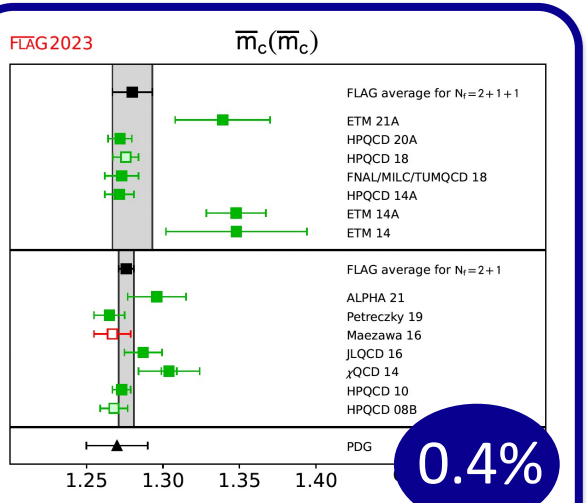
0.6%

$\overline{m}_s$ = 93.14(55) MeV



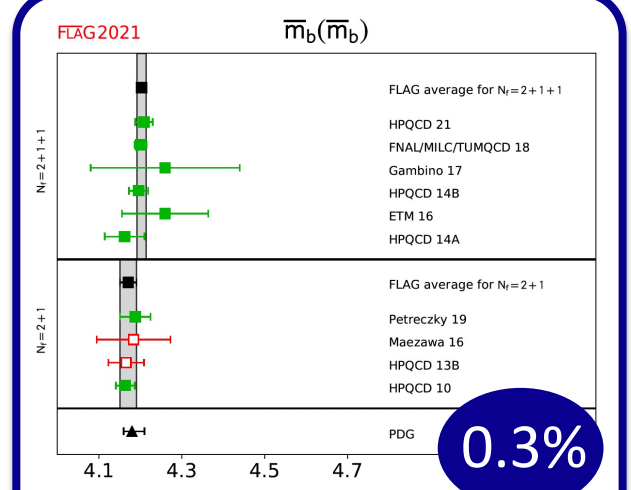
0.3%

$\overline{m}_s / \overline{m}_{ud}$ = 27.287(89)



0.4%

$\overline{m}_c$ = 1.2917(48) GeV



0.3%

$\overline{m}_b$ = 4.196(14) GeV

L'accuratezza è al per mille!

Impensabile senza il reticolo ...

L'era di precisione della QCD sul reticolo

1994

ELSEVIER

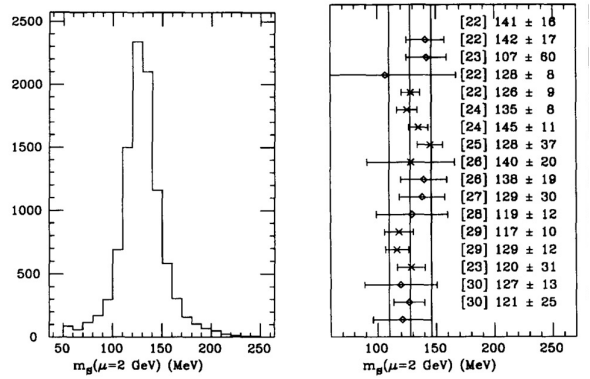
Nuclear Physics B 431 (1994) 667–685

NUCLEAR PHYSICS B

Quark masses from lattice QCD at the next-to-leading order

C.R. Allton [a], M. Ciuchini [a,b], M. Crisafulli [a], E. Franco [a], V. Lubicz [a], G. Martinelli [a,c]

[a] Dip. di Fisica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" and INFN, Sezione di Roma, P.le A. Moro 2,

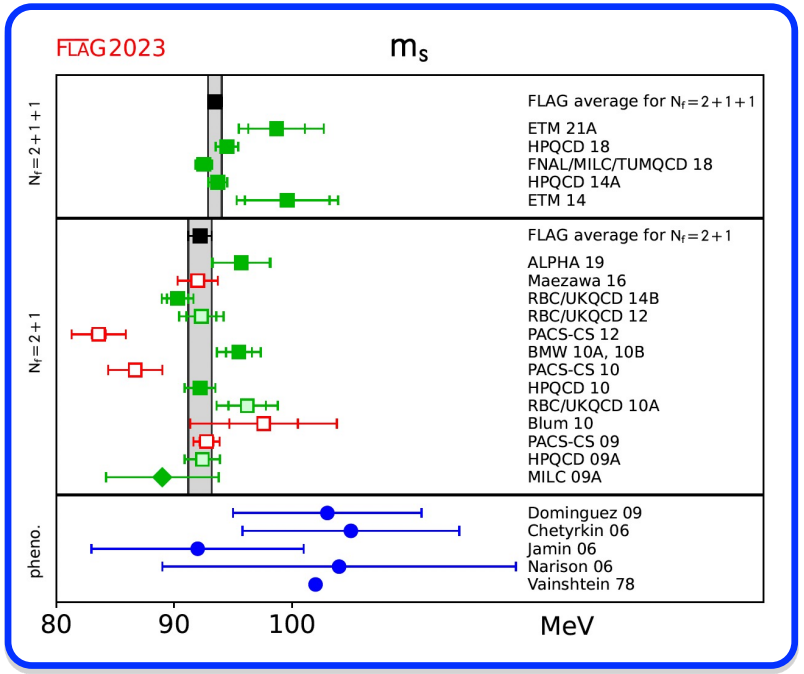


$$m_s^{\overline{\rm MS}}(\mu = 2\ \text{GeV}) = (128 \pm 18)\ \text{MeV}$$

$$\overline{m}_c(\overline{m}_c) = (1.59 \pm 0.30)\ \text{GeV}$$

15 – 20 %

30 anni dopo



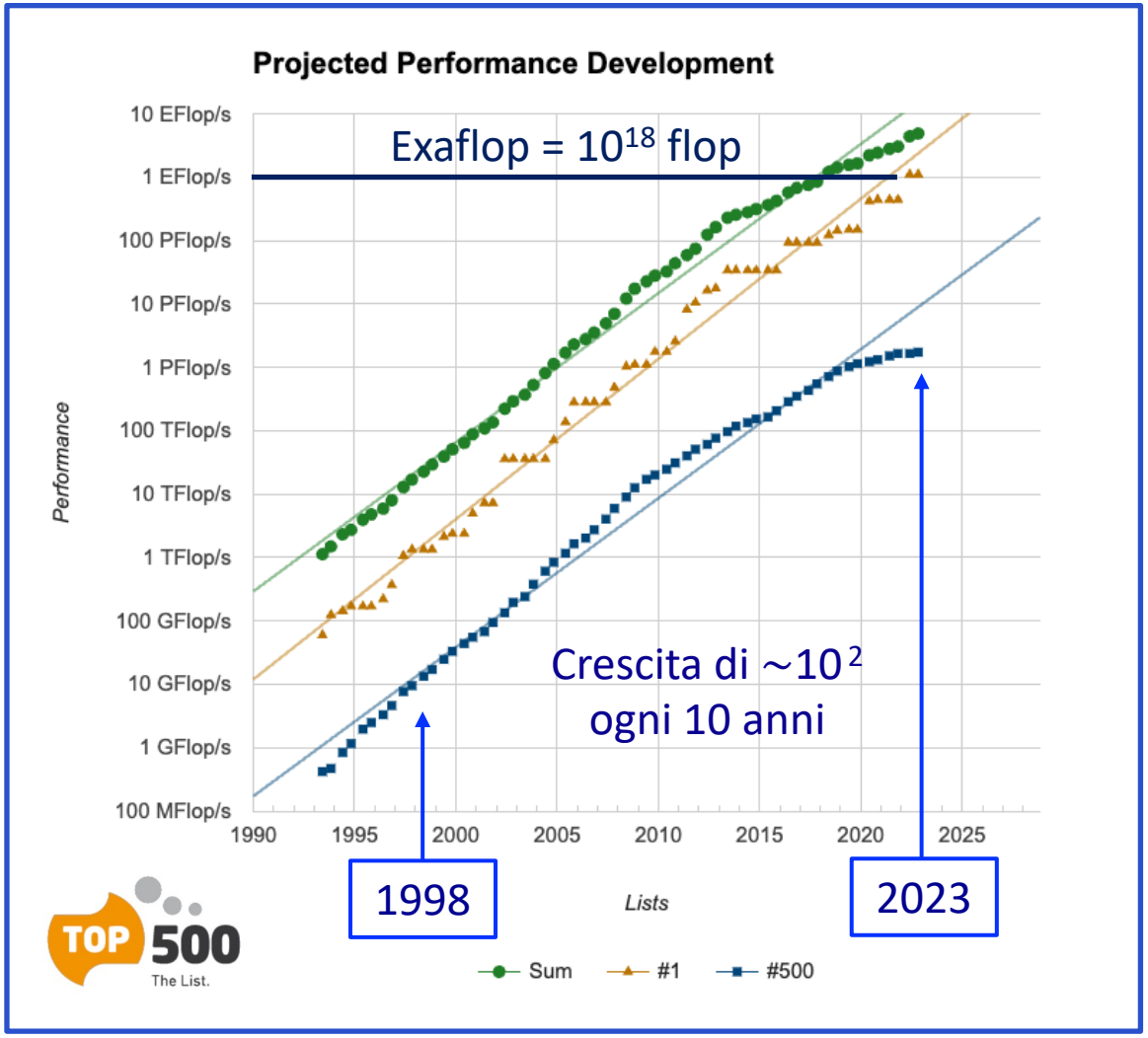
$\overline{m}_s$ = 93.14(55) MeV

$\overline{m}_c$ = 1.2917(48) GeV

0,4 – 0,6 %

L'era di precisione della QCD sul reticolo

La crescita della potenza di calcolo



Rank	Site
1	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States Frontier Rpeak = 1,680 PFlop/s
2	RIKEN Center for Computational Science Japan Fugaku Rpeak = 537 PFlop/s
3	EuroHPC/CSC Finland LUMI Rpeak = 429 PFlop/s
4	EuroHPC/CINECA Italy Leonardo Rpeak = 305 PFlop/s

L'ERA DI PRECISIONE DELLA QCD SUL RETICOLO

Il supercomputer LEONARDO nel centro di calcolo del Cineca

Gli elementi della matrice CKM: l'angolo di Cabibbo

ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com
SCIENCE DIRECT®

NUCLEAR PHYSICS B

Nuclear Physics B 705 (2005) 339–362

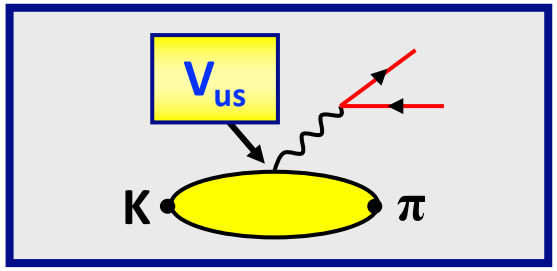
The $K \to \pi$ vector form factor at zero momentum transfer on the lattice

D. Bećirević [a], G. Isidori [b], V. Lubicz [c,d], G. Martinelli [e], F. Mescia [b,c], S. Simula [d], C. Tarantino [c,d], G. Villadoro [e]

[a] *Laboratoire de Physique Théorique, Université Paris Sud, Centre d'Orsay, F-91405 Orsay cedex, France*
[b] *INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 40, I-00044 Frascati, Italy*

Il primo calcolo sul reticolo del fattore di forma $f_+^{K\pi}(0)$ (2005)

$$\Gamma\left(K \to \pi \ell \nu(\gamma)\right) = \frac{G_F^2 m_K^5}{192\pi^3} C_K^2 S_{EW} \left(|V_{us}| f_+^{K^0\pi^-}(0)\right)^2 I_{K\ell} \left(1 + \delta_{EM}^{K\ell} + \delta_{SU(2)}^{K\pi}\right)^2$$



Esperimenti:

$$|V_{us}| f_+^{K^0\pi^-}(0) = 0.21654(41)$$

0.2%

Gli elementi della matrice CKM: l'angolo di Cabibbo

ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE DIRECT

NUCLEAR PHYSICS B

Nuclear Physics B 705 (2005) 339–362

The $K \to \pi$ vector form factor at zero momentum transfer on the lattice

D. Bećirević [a], G. Isidori [b], V. Lubicz [c,d], G. Martinelli [e], F. Mescia [b,c], S. Simula [d], C. Tarantino [c,d], G. Villadoro [e]

[a] *Laboratoire de Physique Théorique, Université Paris Sud, Centre d'Orsay, F-91405 Orsay cedex, France*
[b] *INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 40, I-00044 Frascati, Italy*

Il primo calcolo sul reticolo del fattore di forma $f_+^{K\pi}(0)$ (2005)

PHYSICAL REVIEW D **93,** 114512 (2016)

$K \to \pi$ semileptonic form factors with $N_f = 2 + 1 + 1$ twisted mass fermions

N. Carrasco,[1] P. Lami,[2,1] V. Lubicz,[2,1] L. Riggio,[1] S. Simula,[1] and C. Tarantino[2,1]
(ETM Collaboration)

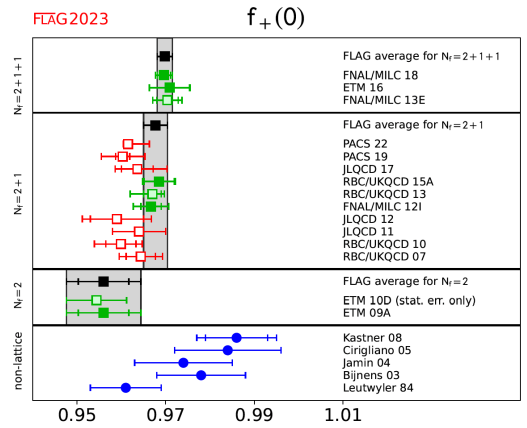
[1]*INFN, Sezione di Roma Tre Via della Vasca Navale 84, I-00146 Rome, Italy*
[2]*Dipartimento di Matematica e Fisica, Università degli Studi Roma Tre Via della Vasca Na I-00146 Rome, Italy*

(Received 18 February 2016; published 20 June 2016)

We present a lattice QCD determination of the vector and scalar form factors of the semileptonic

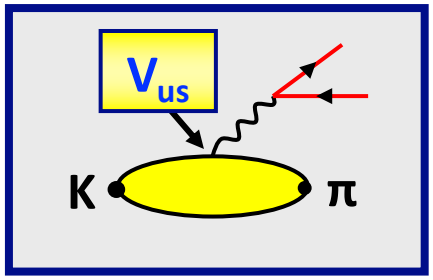
Un calcolo più recente (tutto a Roma Tre) (2016)

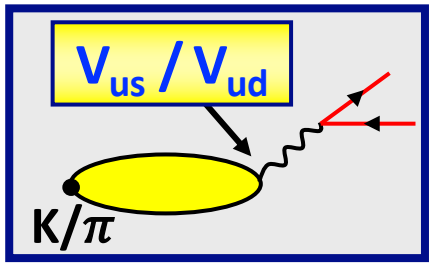
Gli elementi della matrice CKM: l'angolo di Cabibbo



$f_+(0) = 0.9698(17)$

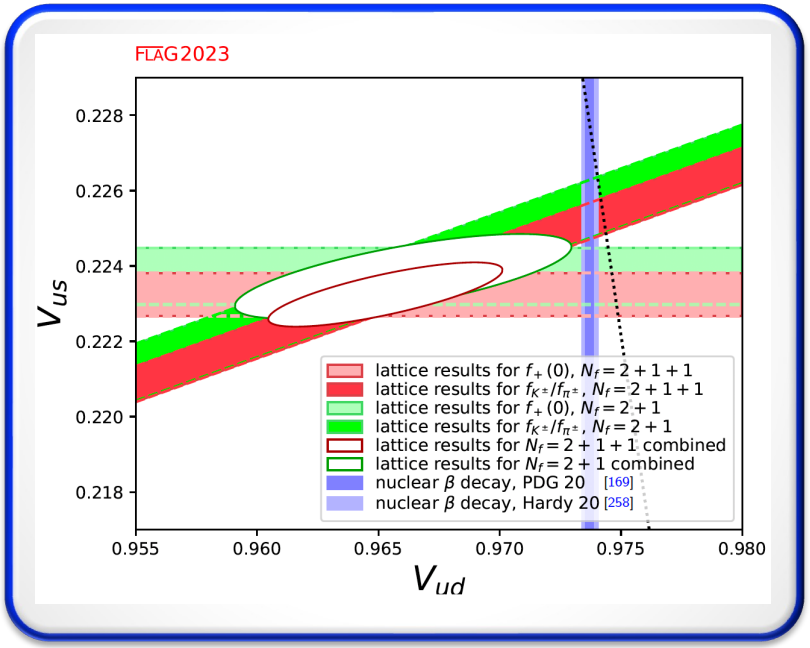
Semileptonici + Leptonici



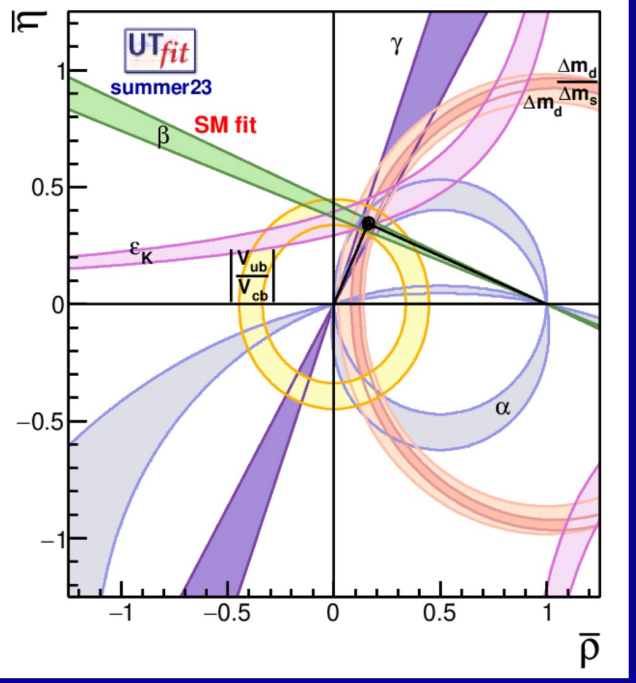


Il test di unitarietà della prima riga:

$$|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + \cancel{|V_{ub}|^2} = 0.99882(36)$$



L'analisi del triangolo unitario



In honor of Nicola Cabibbo (1935-2010)
father of flavour physics

Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali (2023) 34:37–57
https://doi.org/10.1007/s12210-023-01137-5

LINCEI CELEBRATIVE ESSAYS

New UT*fit* analysis of the unitarity triangle in the Cabibbo–Kobayashi–Maskawa scheme

2023

Marcella Bona[1] · Marco Ciuchini[2] · Denis Derkach[3] · Fabio Ferrari[4,5] · Enrico Franco[6] · Vittorio Lubicz[2,7] · Guido Martinelli[6,8] · Davide Morgante[9,10] · Maurizio Pierini[11] · Luca Silvestrini[6] · Silvano Simula[2] · Achille Stocchi[12] · Cecilia Tarantino[2,7] · Vincenzo Vagnoni[4] · Mauro Valli[13] · Ludovico Vittorio[14]

UTfit e Lattice QCD

$|V_{ub}/V_{cb}|$ — $f_+, F, \ldots$ — $b \to u / b \to c$

ε_K — B_K — $K^0 - \overline{K}^0$

Δm_d — $f_B B_B^{1/2}$ — $B_d - \overline{B}_d$

$\Delta m_d/\Delta m_s$ — ξ — $B_s - \overline{B}_s$

$|V_{ub}|$ — f_B — $B \to \tau\nu$

Lo stato dell'arte: QCD+QED sul reticolo

PHYSICAL REVIEW LETTERS **120,** 072001 (2018)

First Lattice Calculation of the QED Corrections to Leptonic Decay Rates

D. Giusti, V. Lubicz, and C. Tarantino
Dipartimento di Matematica e Fisica, Università Roma Tre and INFN Sezione di Roma Tre, Via della Vasca Navale 84, I-00146 Rome, Italy

G. Martinelli
Dipartimento di Fisica, Università di Roma La Sapienza and INFN Sezione di Roma, Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma, Italy

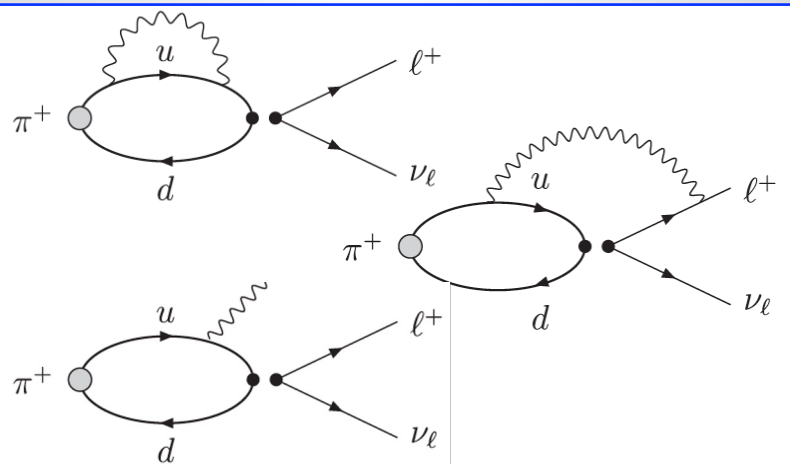
C. T. Sachrajda
Department of Physics and Astronomy, University of Southampton, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom

F. Sanfilippo and S. Simula
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tre, Via della Vasca Navale 84, I-00146 Rome, Italy

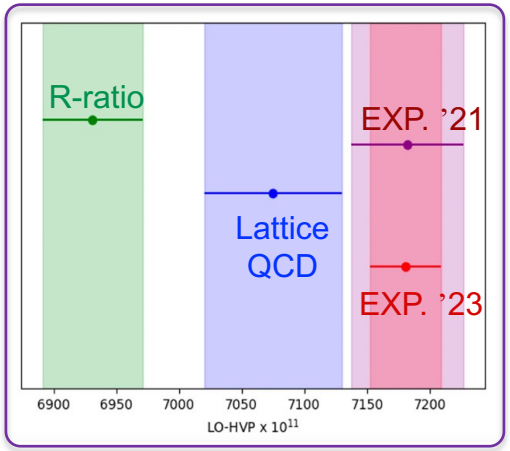
N. Tantalo
Dipartimento di Fisica, Università di Roma "Tor Vergata" and INFN Sezione di Tor Vergata, Via della Ricerca Scientifica 1, I-00133 Roma, Italy

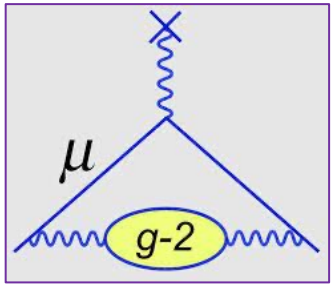
(Received 27 December 2017; published 13 February 2018)

Rates di decadimento leptoniche



g-2 del muone: HVP





PHYSICAL REVIEW D **99,** 114502 (2019)

Electromagnetic and strong isospin-breaking corrections to the muon $g-2$ from lattice QCD+QED

D. Giusti and V. Lubicz
Dipartimento di Matematica e Fisica, Università degli Studi Roma Tre and INFN, Sezione di Roma Tre, Via della Vasca Navale 84, I-00146 Rome, Italy

G. Martinelli
Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza" and INFN, Sezione di Roma, Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Roma, Italy

F. Sanfilippo and S. Simula
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Roma Tre, Via della Vasca Navale 84, I-00146 Rome, Italy

La Fisica con i supercomputer

GRAZIE !

Vittorio Lubicz

Roma Tre - 28 settembre 2023