

# Modello Standard ed esperimenti a bassa energia: dal sapore leptonico ai fotoni oscuri

Giovanni Marco Pruna

Paul Scherrer Institut  
Villigen, CH

XVI Edizione di IFAE, Trieste, 19 Aprile 2017

# Modello Standard e problematiche aperte

Il Modello Standard della Fisica delle Particelle non è in grado di spiegare plausibilmente:

- le oscillazioni fra diverse tipologie di neutrini;
- l'osservazione della materia oscura;
- l'origine della materia (bariogenesi);
- le interazioni gravitazionali.

Inoltre, presenta alcuni aspetti insoddisfacenti in relazione

- al problema della gerarchia;
- all'enigma del sapore;
- all'assenza di violazione CP in cromodinamica quantistica;
- alla possibilità di unificare i suoi accoppiamenti.

## Verifiche del Modello Standard

Possiamo esaminare le proprietà del Modello Standard e studiarne la minimalità attraverso

- la ricerca diretta di nuove particelle;
- lo studio di possibili interazioni non convenzionali.

Frontiera dell'alta intensità (in questa sessione):

- analisi del sapore leptonic
  - MEG e MEG II (L. Galli)
  - Muon  $g - 2$  (A. Driutti)
- ricerca di particelle esotiche
  - BaBar (F. Anulli)
  - NA62 (M. Mirra)
  - PADME (G. Piperno)

# Sapore leptonic: una sfida concettuale

Il Modello Standard preserva “accidentalmente” il sapore leptonic:

- CDQ e EDQ conservano il sapore;
- la teoria ED viola il sapore nelle interazioni fra quark.

In realtà, osserviamo l'oscillazione dei neutrini. . .

. . . ma **non** i seguenti processi:

- $l_h^\pm \rightarrow \gamma + l_i^\pm$       dove       $h, i = e, \mu, \tau,$
- $l_h^\pm \rightarrow l_i^\pm l_j^\pm l_k^\mp$       dove       $h, i, j, k = e, \mu, \tau,$
- $Z \rightarrow l_h^\pm l_i^\mp$       dove       $h, i = e, \mu, \tau,$
- $H \rightarrow l_h^\pm l_i^\mp$       dove       $h, i = e, \mu, \tau,$
- . . .

# Un fenomeno elusivo

## VIOLAZIONE DEL SAPORE LEPTONICO: ALCUNI LIMITI SPERIMENTALI

- $BR(\mu \rightarrow 3e) < 1.0 \times 10^{-12}$  al 90% L.C.  
SINDRUM collaboration, Nucl. Phys. B **299** (1988) 1;
- $\sigma(\mu^- \rightarrow e^-)/\sigma(\text{capt.})|_{\text{Au}} < 7.0 \times 10^{-13}$  al 90% L.C.  
SINDRUM II collaboration, Eur. Phys. J. C **47** (2006) 337;
- $BR(\mu \rightarrow \gamma + e) < 4.2 \times 10^{-13}$  al 90% L.C.  
MEG collaboration, Eur. Phys. J. C **76** (2016) 434;
- $BR(Z \rightarrow e + \mu) < 7.5 \times 10^{-7}$  al 95% L.C.  
ATLAS Collaboration, Phys. Rev. D **90** (2014) 072010;
- $BR(\tau \rightarrow 3e) < 2.1 \times 10^{-8}$  al 90% L.C.  
BELL Collaboration, Phys. Lett. B **687** (2010) 139-143;
- $BR(\tau \rightarrow \gamma + \mu) < 4.4 \times 10^{-8}$  al 90% L.C.  
BaBar Collaboration, Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 021802;
- $BR(Z \rightarrow \tau + \mu) < 1.2 \times 10^{-5}$  al 95% L.C.  
DELPHI Collaboration, Z. Phys. C **73** (1997) 243-251;
- $BR(H \rightarrow \tau + \mu) < 1.8 \times 10^{-2}$  al 90% L.C.  
ATLAS/CMS, JHEP **1511** (2015) 211/Phys. Lett. B **749** (2015) 337.

## Estendiamo le interazioni del Modello Standard

Supponiamo che il Modello Standard sia una teoria efficace, valida fino ad una scala  $\Lambda$ . Può essere reinterpretato come una teoria di campo che soddisfa i seguenti requisiti:

- include le simmetrie di fase  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ ;
- contiene tutti i campi del Modello Standard;
- nel limite di disaccoppiamento è il Modello Standard.

Secondo il teorema di Appelquist-Carazzone, possiamo scrivere questa nuova teoria secondo il seguente sviluppo:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \frac{1}{\Lambda} \sum_k C_k^{(5)} Q_k^{(5)} + \frac{1}{\Lambda^2} \sum_k C_k^{(6)} Q_k^{(6)} + \mathcal{O}\left(\frac{1}{\Lambda^3}\right).$$

# Nuove interazioni leptoniche

## 2 leptoni

$$Q_{eW} = (\bar{l}_p \sigma^{\mu\nu} e_r) \tau^I \varphi W_{\mu\nu}^I;$$

$$Q_{eB} = (\bar{l}_p \sigma^{\mu\nu} e_r) \varphi B_{\mu\nu}.$$

$$Q_{\varphi l}^{(1)} = (\varphi^\dagger \overset{\leftrightarrow}{iD}_\mu \varphi) (\bar{l}_p \gamma^\mu l_r)$$

$$Q_{\varphi l}^{(3)} = (\varphi^\dagger \overset{\leftrightarrow}{iD}_\mu^I \varphi) (\bar{l}_p \tau^I \gamma^\mu l_r)$$

$$Q_{\varphi e} = (\varphi^\dagger \overset{\leftrightarrow}{iD}_\mu \varphi) (\bar{e}_p \gamma^\mu e_r)$$

$$Q_{e\varphi} = (\varphi^\dagger \varphi) (\bar{l}_p e_r \varphi)$$

## 4 leptoni

$$Q_{ll} = (\bar{l}_p \gamma_\mu l_r) (\bar{l}_s \gamma^\mu l_t)$$

$$Q_{ee} = (\bar{e}_p \gamma_\mu e_r) (\bar{e}_s \gamma^\mu e_t)$$

$$Q_{le} = (\bar{l}_p \gamma_\mu l_r) (\bar{e}_s \gamma^\mu e_t)$$

## 4 fermioni

$$Q_{lq}^{(1)} = (\bar{l}_p \gamma_\mu l_r) (\bar{q}_s \gamma^\mu q_t)$$

$$Q_{lq}^{(3)} = (\bar{l}_p \gamma_\mu \tau^I l_r) (\bar{q}_s \gamma^\mu \tau^I q_t)$$

$$Q_{eu} = (\bar{e}_p \gamma_\mu e_r) (\bar{u}_s \gamma^\mu u_t)$$

$$Q_{ed} = (\bar{e}_p \gamma_\mu e_r) (\bar{d}_s \gamma^\mu d_t)$$

$$Q_{lu} = (\bar{l}_p \gamma_\mu l_r) (\bar{u}_s \gamma^\mu u_t)$$

$$Q_{ld} = (\bar{l}_p \gamma_\mu l_r) (\bar{d}_s \gamma^\mu d_t)$$

$$Q_{qe} = (\bar{q}_p \gamma_\mu q_r) (\bar{e}_s \gamma^\mu e_t)$$

$$Q_{ledq} = (\bar{l}_p^j e_r) (\bar{d}_s^k q_t^j)$$

$$Q_{lequ}^{(1)} = (\bar{l}_p^j e_r) \varepsilon_{jk} (\bar{q}_s^k u_t)$$

$$Q_{lequ}^{(3)} = (\bar{l}_p^j \sigma_{\mu\nu} e_r) \varepsilon_{jk} (\bar{q}_s^k \sigma^{\mu\nu} u_t)$$

Contributi a VSP e  $g - 2$

# Limiti sugli operatori muonici efficaci

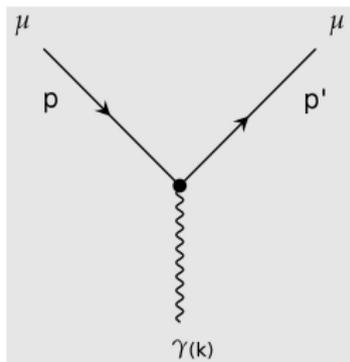
GMP e A. Signer,  
arXiv:1511.04421

Coefficient	MEG ( $\mu \rightarrow e\gamma$ ) $BR \leq 5.7 \cdot 10^{-13}$	ATLAS ( $Z \rightarrow e\mu$ ) $BR \leq 7.5 \cdot 10^{-7}$	SINDRUM ( $\mu \rightarrow 3e$ ) $BR \leq 1.0 \cdot 10^{-12}$
$C_{eZ}^{\mu e}(m_Z)$	$1.4 \cdot 10^{-13} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$5.5 \cdot 10^{-8} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$2.8 \cdot 10^{-8} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$
$C_{\varphi l}^{(1)}$	$2.5 \cdot 10^{-10} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$5.5 \cdot 10^{-8} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$2.5 \cdot 10^{-11} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$
$C_{\varphi l}^{(3)}$	$2.4 \cdot 10^{-10} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$5.5 \cdot 10^{-8} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$2.5 \cdot 10^{-11} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$
$C_{\varphi e}$	$2.4 \cdot 10^{-10} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$5.5 \cdot 10^{-8} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$2.6 \cdot 10^{-11} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$
$C_{e\varphi}^{\mu e}$	$2.7 \cdot 10^{-8} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$		$6.1 \cdot 10^{-6} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$
$C_{le}^{ee\mu\mu}$	$4.2 \cdot 10^{-8} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$		$2.2 \cdot 10^{-11} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$
$C_{le}^{e\mu\mu\mu}$	$2.0 \cdot 10^{-10} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$		
$C_{le}^{e\tau\tau\mu}$	$1.2 \cdot 10^{-11} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$		
$C_{ee}^{ee\mu\mu}$			$7.7 \cdot 10^{-12} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$
$C_{ll}^{ee\mu\mu}$			$7.7 \cdot 10^{-12} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$

# Limiti sugli operatori tauonici efficaci

Coefficient	BaBar ( $\tau \rightarrow \mu\gamma$ ) $BR \leq 4.4 \cdot 10^{-8}$	LEP ( $Z \rightarrow \tau\mu$ ) $BR \leq 1.2 \cdot 10^{-5}$	BELL ( $\tau \rightarrow 3\mu$ ) $BR \leq 2.1 \cdot 10^{-8}$	ATLAS&CMS ( $H \rightarrow \tau\mu$ ) $BR \leq 1.85 \cdot 10^{-2}$
$C_{eZ}^{\tau\mu}(m_Z)$	$1.5 \cdot 10^{-9} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$2.2 \cdot 10^{-7} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$6.1 \cdot 10^{-7} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	
$C_{\phi l}^{(1)}$	$1.6 \cdot 10^{-7} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$2.2 \cdot 10^{-7} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$9.0 \cdot 10^{-9} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	
$C_{\phi l}^{(3)}$	$1.6 \cdot 10^{-7} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$2.2 \cdot 10^{-7} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$9.0 \cdot 10^{-9} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	
$C_{\varphi e}$	$1.6 \cdot 10^{-7} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$2.2 \cdot 10^{-7} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$9.5 \cdot 10^{-9} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	
$C_{e\phi}^{\tau\mu}$	$1.9 \cdot 10^{-6} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$		$1.1 \cdot 10^{-5} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	$1.3 \cdot 10^{-7} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$
$C_{le}^{\mu e e \tau}$	$4.7 \cdot 10^{-4} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$			
$C_{le}^{\mu\mu\mu\tau}$	$2.3 \cdot 10^{-6} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$		$8.0 \cdot 10^{-9} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	
$C_{le}^{\mu\tau\tau\tau}$	$1.3 \cdot 10^{-7} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$			
$C_{ee}^{\mu\mu\mu\tau}$			$2.8 \cdot 10^{-9} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	
$C_{ll}^{\mu\mu\mu\tau}$			$2.8 \cdot 10^{-9} \frac{\Lambda^2}{[\text{GeV}]^2}$	

## Il principio degli osservabili leptonici



$$\simeq \bar{u}(p') \left[ \gamma^\alpha F_1(k^2) + \frac{i\sigma^{\alpha\beta} k_\beta}{2m_\mu} F_2(k^2) \right] u(p)$$

$$F_1(0) = 1$$

$$F_2(0) \equiv a = (g - 2) / 2.$$

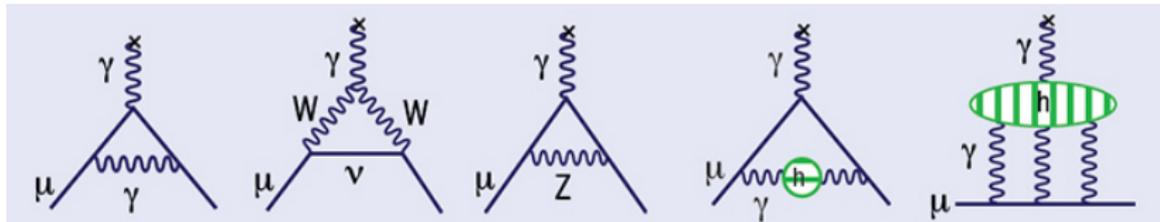
- $a_e$ : una delle verifiche più potenti dell'EDQ, utilizzato per l'estrazione della costante di accoppiamento EM
- $a_\mu$ : raffinata combinazione di contributi EDQ, CDQ (adronici) ed ED; sensibilissimo ai contributi di nuova fisica

$$a_\mu^{E821} = 116\,592\,089(63) \cdot 10^{-11} \quad \text{Phys. Rev. Lett. } \mathbf{92} \text{ (2004) 161802}$$

$$a_\mu^{th} = 116\,591\,830(50) \cdot 10^{-11} \quad \text{J. Phys. G } \mathbf{38} \text{ (2011) 085003}$$

# Predizione teorica

EPJ Web Conf. **118** (2016) 01020



- EDQ a cinque circoli (!)  $116584718.95(8) \cdot 10^{-11}$
- ED a due circoli  $(154 \pm 2) \cdot 10^{-11}$
- CAPV all'ordine principale  $(6949 \pm 37.2 \pm 21.0) \cdot 10^{-11}$
- CAPV al secondo ordine  $(-98.4 \pm 0.6 \pm 0.4) \cdot 10^{-11}$
- CADL  $(105 \pm 26) \cdot 10^{-11}$

Sorgente principale di incertezza: polarizzazione adronica del vuoto e contributo adronico alla dispersione della luce.

## Il presente e il futuro del $(g - 2)_\mu$

Escludendo che  $a_\mu^{E821} - a_\mu^{th} = (259 \pm 81) \cdot 10^{-11}$  sia il risultato di un abbaglio interpretativo, non rimangono che tre possibili opzioni:

- un problema sperimentale;
- fluttuazioni statistiche;
- nuova fisica.

Il nuovo esperimento a FNAL ridurrà l'incertezza sperimentale di un fattore 4, ovvero sarà sufficiente di per sè, nell'ipotesi in cui i valori d'aspettazione e le altre incertezze permangano invariati, a portare l'attuale discrepanza a  $\sim 5\sigma$ .

Per quanto riguarda il CAPV:

- VEPP-2000 a Novosibirsk, maggiore luminosità;
- Novità: estrarre il CAPV dal canale- $t$  del processo  $\mu e \rightarrow \mu e$   
C. M. Carloni Calame, M. Passera, L. Trentadue e G. Venanzoni,  
Phys. Lett. B **746** (2015) 325

## Particelle fantastiche...

Materia oscura descritta da estensioni del Modello Standard accessibili fondamentalmente attraverso dei portali.

- portali vettoriali supportati da ulteriori simmetrie di fase;
- portali scalari supportati da un settore di Higgs non minimale.

Problema della bariogenesi: il Modello Standard non dispone di settori che violino la simmetria CP in quantità sufficiente ad originare la materia.

Inoltre, ci si aspetterebbe che la CDQ violi la simmetria CP attraverso il “termine  $\theta$ ”, che tuttavia è soppresso/assente (limiti sul MDE del Neutrone:  $|d_n| < 3 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{cm}$ ).

Soluzione dinamica e assioni: Lect. Notes Phys. **741** (2008) 3.

## ... e dove trovarle!

Lo spazio dei parametri è semplice solo in apparenza.

In realtà, qualsiasi bosone/scalare si manifesta attraverso:

- segnali (multi-)leptonici;
- verifiche di precisione della teoria ED;
- violazione di CP e correnti neutre che modificano il sapore;
- decadimenti invisibili;
- momenti magnetici anomali e momenti di dipolo elettrico;
- spettroscopia atomica (spostamento di Lamb, struttura iperfine);
- fisica dei neutrini, oscillazioni;
- vertici delocalizzati;
- ...

Frontiera dell'alta intensità: fisica mesonica e annichilazione  $e^+e^-$ .

## Conclusioni

- ✓ Il Modello Standard risulta insoddisfacente nel spiegare alcune osservazioni fenomenologiche, e, ragionevolmente, ci si aspetta che possa essere esteso migliorandone il potere predittivo.
- ✓ Estendere il Modello Standard significa alternarne in modo più o meno profondo la struttura delle interazioni e il numero dei gradi di libertà dinamici, e tali modifiche *devono necessariamente* manifestarsi a livello fenomenologico, pertanto possono essere studiate sperimentalmente.
- ✓ In questa sessione, verranno presentate delle ricerche sul possibile impatto di nuova fisica nel settore leptonic (VSP e  $a_{\mu}$ ) e ricerche dirette di particelle esotiche (fotoni oscuri, assioni, leptoni massicci neutri) alla frontiera dell'alta intensità.

Buon proseguimento!