

# GdL Standard Model (SM)

S. Forte, A. Nisati, G. Passarino and R. Tenchini

Roma, 16 Febbraio 2016

# Pubblicazioni “What Next” del GdL SM

(Un executive summary e' stato distribuito, NON rifaremo qui una lista degli argomenti)



Eur. Phys. J. C (2015) 75:554  
DOI 10.1140/epjc/s10052-015-3759-0

THE EUROPEAN  
PHYSICAL JOURNAL C



Special Article - Tools for Experiment and Theory

## The Standard Model from LHC to future colliders

S. Forte<sup>1,13,a</sup>, A. Nisati<sup>2</sup>, G. Passarino<sup>3,14</sup>, R. Tenchini<sup>4</sup>, C. M. Carloni Calame<sup>5</sup>, M. Chiesa<sup>6</sup>, M. Cobi<sup>7,15</sup>,  
G. Corcella<sup>8</sup>, G. Degras<sup>9,16</sup>, G. Ferrera<sup>1,17</sup>, L. Magnea<sup>3,14</sup>, F. Maltoni<sup>10</sup>, G. Montagna<sup>11</sup>, P. Nason<sup>12</sup>,  
O. Nicrosini<sup>6</sup>, C. Oleari<sup>11,17</sup>, F. Piccinini<sup>6</sup>, F. Riva<sup>12</sup>, A. Vicini<sup>1,13</sup>

<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Milano, Via Celoria 16, 20133 Milan, Italy

<sup>2</sup> INFN, Sezione di Roma, Piazzale Aldo Moro 2, 00185 Rome, Italy

<sup>3</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Torino, Via P. Giuria 1, 10125 Turin, Italy

<sup>4</sup> INFN, Sezione di Pisa, Largo B. Pontecorvo 3, 56127 Pisa, Italy

<sup>5</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Pavia, via Bassi 6, 27100 Pavia, Italy

<sup>6</sup> INFN, Sezione di Pavia, via Bassi 6, 27100 Pavia, Italy

<sup>7</sup> Dipartimento di Chimica, Fisica e Ambiente, Università di Udine, Via delle Scienze, 206, 33100 Udine, Italy

<sup>8</sup> INFN, Laboratori Nazionali di Frascati, Via E. Fermi 40, 00044 Frascati, Italy

<sup>9</sup> Dipartimento di Matematica e Fisica, Università Roma Tre, Via della Vasca Navale 84, 00146 Rome, Italy

<sup>10</sup> Centre for Cosmology, Particle Physics and Phenomenology (CP3), Université Catholique de Louvain, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgium

<sup>11</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Milano-Bicocca, Piazza della Scienza 3, 20126 Milan, Italy

<sup>12</sup> Institut de Théorie des Phénomènes Physiques, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne, Switzerland

<sup>13</sup> INFN, Sezione di Milano, Via Celoria 16, 20133 Milan, Italy

<sup>14</sup> INFN, Sezione di Torino, Via P. Giuria 1, 10125 Turin, Italy

<sup>15</sup> INFN, Gruppo Collegato di Udine, Via delle Scienze, 206, 33100 Udine, Italy

<sup>16</sup> INFN, Sezione di Roma Tre, Via della Vasca Navale 84, 00146 Rome, Italy

<sup>17</sup> INFN, Sezione di Milano-Bicocca, Piazza della Scienza 3, 20126 Milan, Italy

Received: 9 June 2015 / Accepted: 25 October 2015 / Published online: 25 November 2015  
© The Author(s) 2015. This article is published with open access at Springerlink.com

**Abstract** This review summarizes the results of the activities which have taken place in 2014 within the Standard Model Working Group of the “What Next” Workshop organized by INFN, Italy. We present a framework, general questions, and some indications of possible answers on the main issue for Standard Model physics in the LHC era and in view of possible future accelerators.

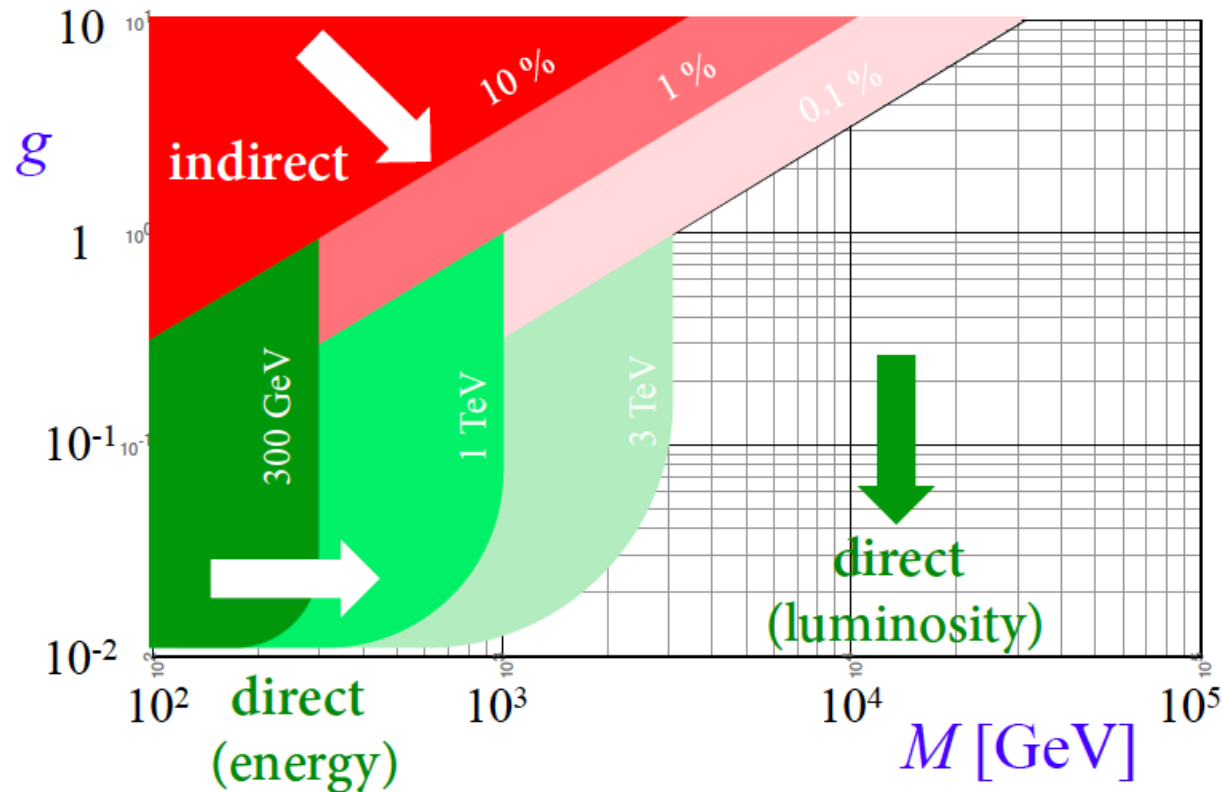
### Contents

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Synopsis                                                           | 2  |
| 1.1 Scenarios                                                        | 2  |
| 1.1.1 Scenarios for LHC physics                                      | 2  |
| 1.1.2 Physics at the ILC                                             | 3  |
| 1.1.3 The far future                                                 | 4  |
| 1.1.4 A new frontier?                                                | 4  |
| 1.2 Measurements and tools                                           | 4  |
| 2 The W and Z mass and electroweak precision physics                 | 4  |
| 2.1 Introduction                                                     | 4  |
| 2.1.1 Relevance of a high-precision $m_W$ measurement                | 4  |
| 2.1.2 Physical observables                                           | 5  |
| 2.1.3 Sensitivity to $m_W$ of different observables                  | 5  |
| 2.2 Available tools and sources of uncertainty                       | 5  |
| 2.2.1 EW radiative corrections                                       | 6  |
| 2.2.2 QCD radiative corrections                                      | 6  |
| 2.2.3 Proton PDF uncertainty                                         | 7  |
| 2.2.4 Mixed QCD-EW radiative corrections                             | 7  |
| 2.3 Prospects of improvement                                         | 7  |
| 2.3.1 Monte Carlo generators                                         | 7  |
| 2.3.2 Uncertainty reduction with higher energy/luminosity            | 8  |
| 2.4 Conclusions                                                      | 8  |
| 3 Top quark physics                                                  | 9  |
| 3.1 Introduction                                                     | 9  |
| 3.2 Top quark mass                                                   | 9  |
| 3.3 Top quark couplings                                              | 12 |
| 3.4 Final-state kinematics                                           | 13 |
| 4 Effective field theories for the Higgs sector                      | 13 |
| 4.1 Introduction                                                     | 13 |
| 4.2 The dim = 6 Standard Model Lagrangian                            | 15 |
| 4.3 Expected precision on the couplings strength: the Snowmass study | 17 |
| 4.4 Towards precision EFT: the road ahead                            | 19 |
| 5 The Higgs potential and the electroweak vacuum                     | 21 |
| 6 Jet physics                                                        | 23 |

\*e-mail: forte@mi.infn.it

# Ruolo delle misure di precisione

Le ricerche dirette esplorano la scala di massa ( $M$ ) con l'aumento di energia e gli accoppiamenti ( $g$ ) con aumento di luminosita'. Le ricerche indirette sondano il rapporto  $g^2/M^2$



# Misure SM come caratterizzazione della scoperta

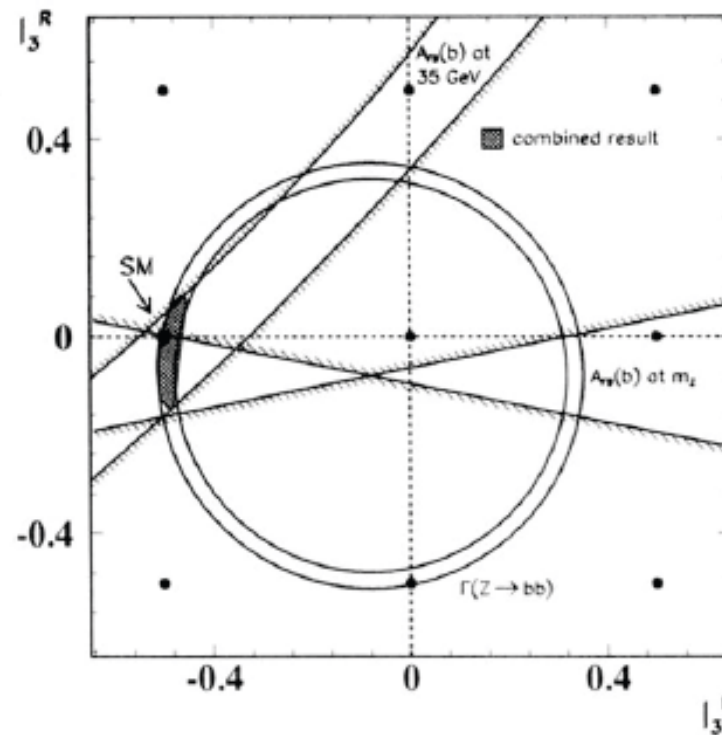
Scoperta



Misure

$(-\frac{1}{2}, 0)$ , SM  
 $(0, -\frac{1}{2})$ , mirror  
 $(0, 0)$ , topless  
 $(-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2})$ , vector doublet

Esempio: Le misure a LEP/SLC hanno caratterizzato la fisica sottostante alla scoperta di W e Z



Schaile and Zerwas, Phys.Rev. D45 (1992)

# Misure SM come predizione della scoperta

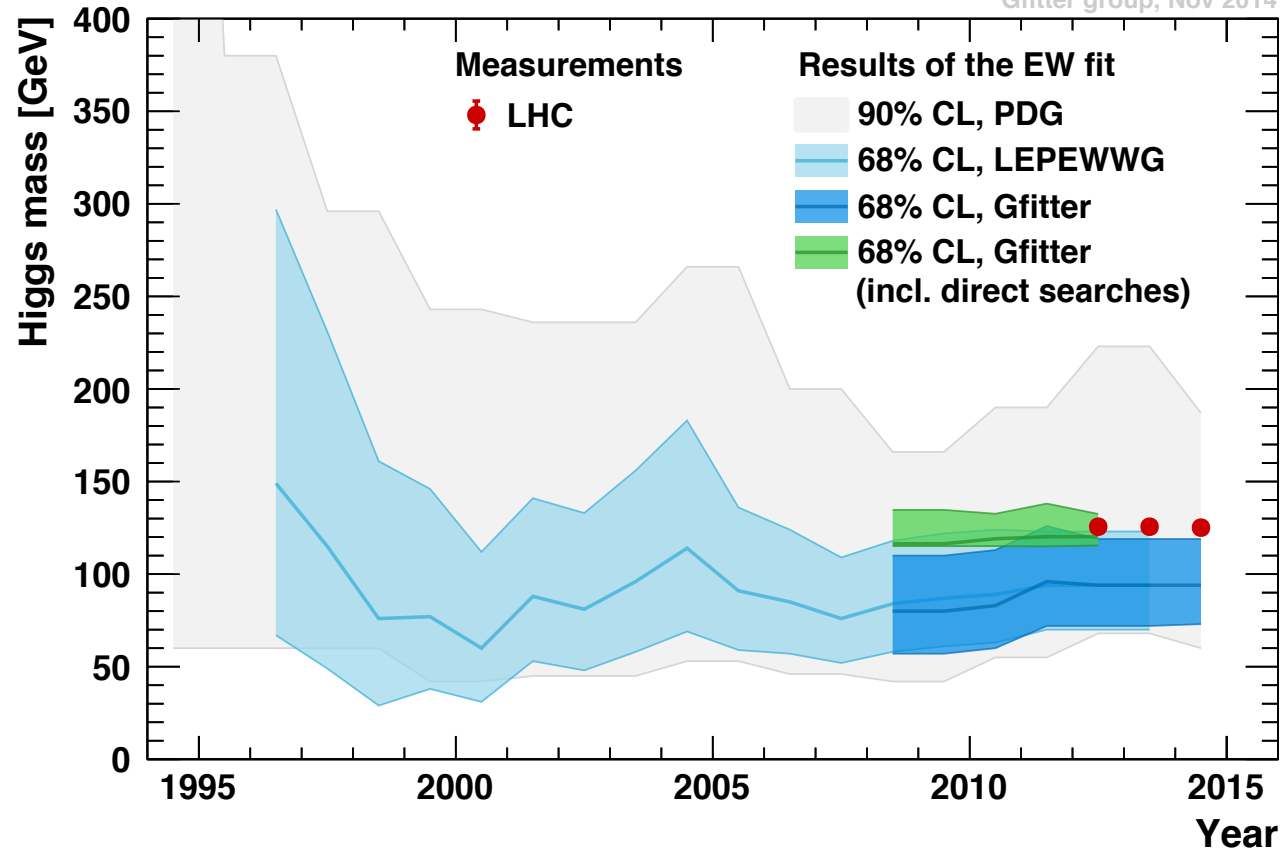
Misure



Scoperta

Massa del bosone di Higgs dai fit elettrodeboli in funzione del tempo

Gfitter group, Nov 2014



Potere predittivo delle misure di precisione: massa del top, massa del bosone di Higgs

# Lo stato attuale

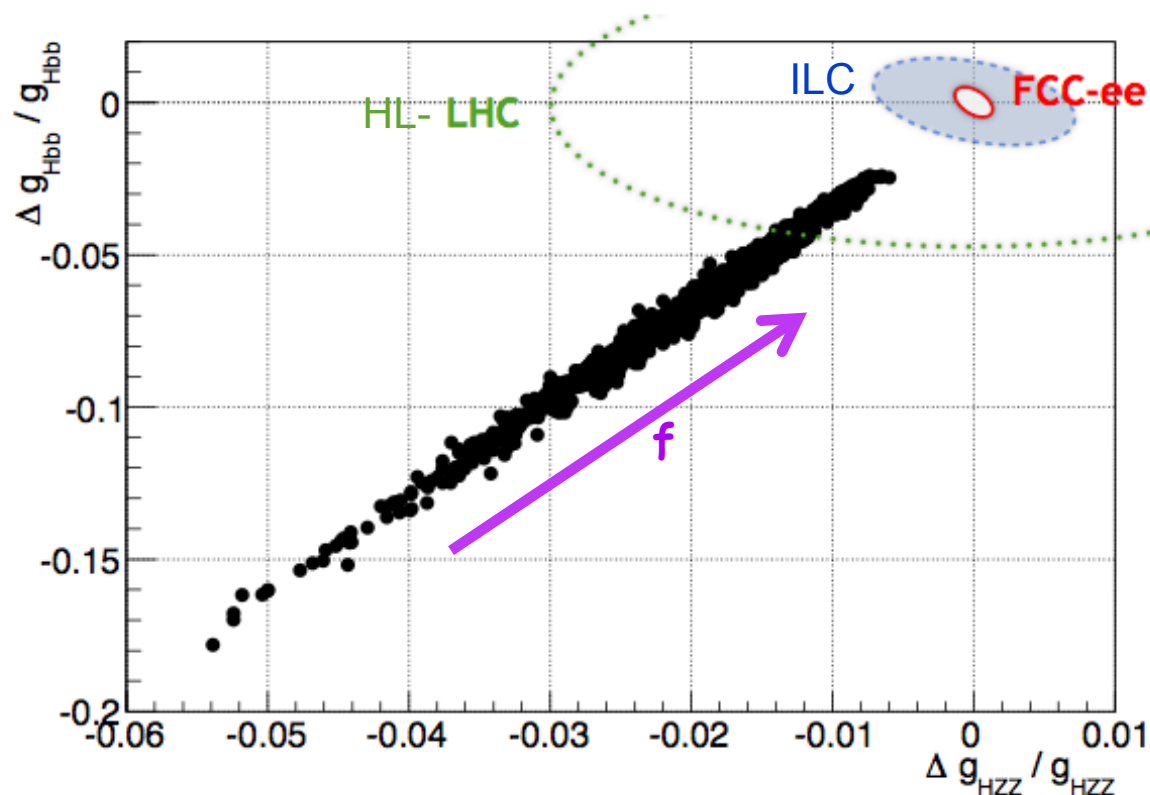
- Fino a Giugno 2012, l'elemento mancante dello Standard Model (SM) era il bosone di Higgs
- Il bosone scalare di massa 125 GeV scoperto nel Luglio 2012 sembra a tutti gli effetti il pezzo mancante
  - **sono necessarie misure di precisione delle sue proprietà per mettere in luce i legami tra il nuovo bosone scalare e fisica al di là dello SM**
  - Inoltre misure di precisione di processi standard (**e.g. top couplings, W mass**) sono promettenti per aprire la strada alla rivelazione di nuovi fenomeni

# Misure di precisione: What Next ?

Esempio: sensitività degli accoppiamenti del bosone di Higgs a Z e b quark a deviazioni dovute a Composite Higgs Models (4HDM)

Models  $\rightarrow$  black points  
Ellipses  $\rightarrow$  exp reach

$f$  = compositeness scale  
 $0.75 \leq f \text{ (TeV)} \leq 1.5$



Deviations for HZZ and Hbb couplings in the 4DCHM

compared with the relative precision expected at HL-LHC, ILC, FCC-ee

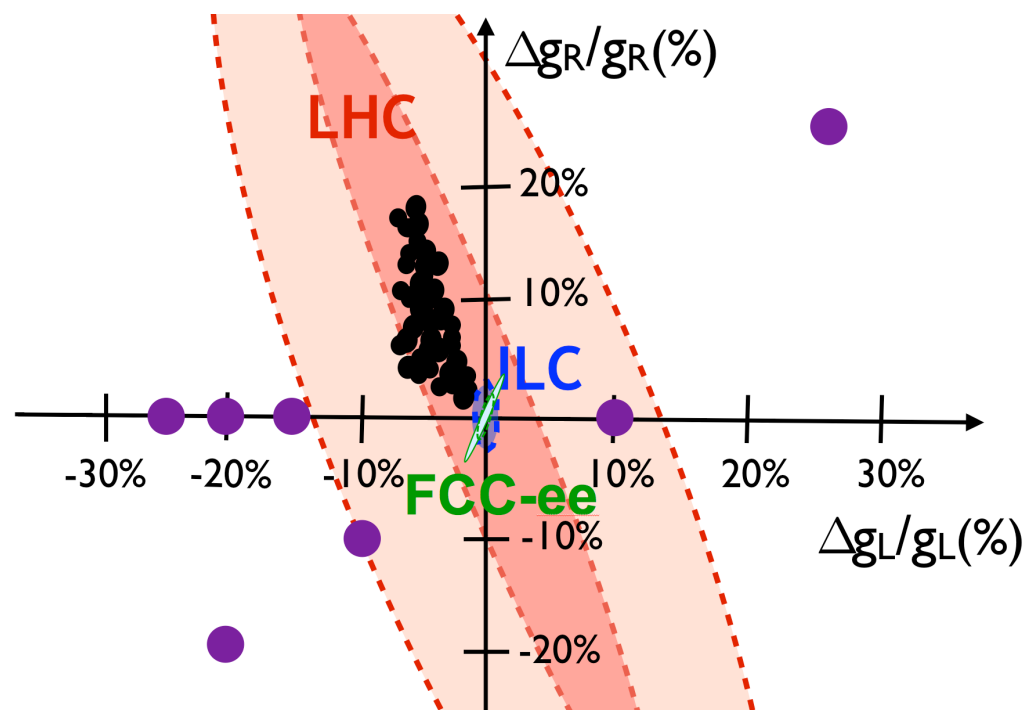
(DeCurtis, Redi, Tesi JHEP 1204(2012)042;  
Barducci et al. JHEP 1309(2013)047)

(Janot EPS Proc.1510.09056)

# Misure di precisione: What Next ?

Esempio: sensitività agli accoppiamenti del quark top al bosone Z in vari scenari di nuova fisica confrontato con le precisioni di presenti e futuri acceleratori

[*Frascati Phys. Ser. 60 (2015) 28-57*]



Produzione  $t\bar{t}Z$  recentemente osservata a LHC  
ATLAS Collaboration, JHEP 11 (2015) 172  
CMS Collaboration, JHEP 01 (2016) 096

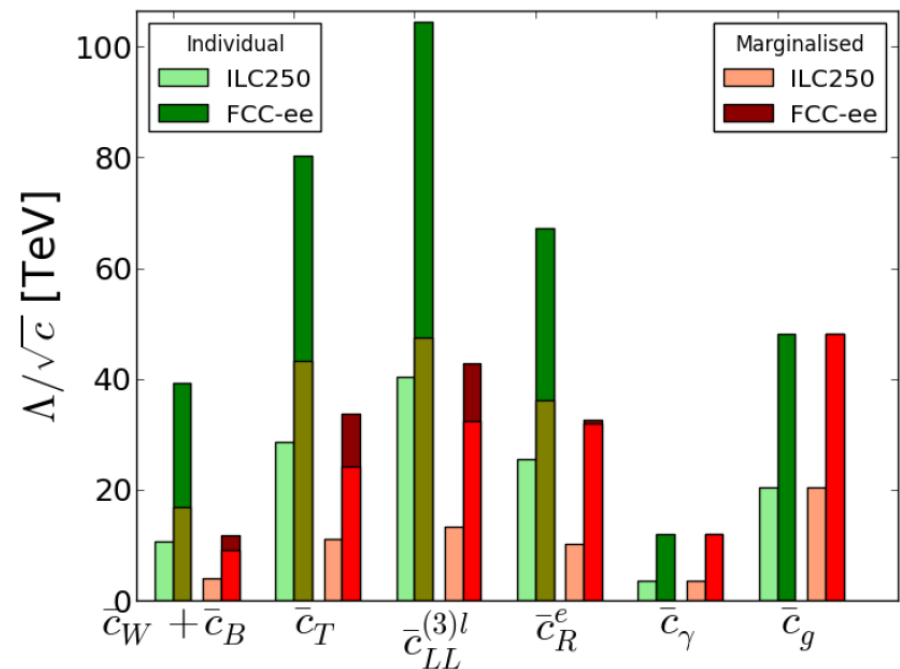
# Misure di precisione: What Next ?

Sensitivita' di misure indirette a nuova fisica alla scala multi-TeV

Esempio: teoria effettiva (EFT) dove ai campi dello SM sono aggiunti operatori effettivi (dim-6) con coefficienti di Wilson generati da possibile fisica BSM

$$\mathcal{L}_{\text{SMEFT}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \frac{c_i}{\Lambda^2} \mathcal{O}_i$$

Nel plot sono considerati coefficienti rilevanti per misure di precisione alla Z, W e Higgs



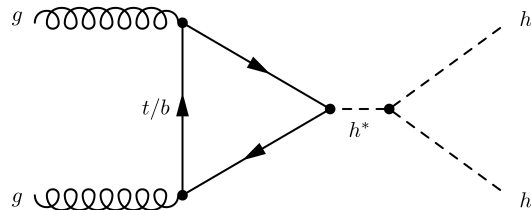
John Ellis & Tevong You, arXiv:1510.04561

# Su quali strumenti puntare per le misure di precisione ? (esempio Higgs couplings)

| Uncertainties           | HL-LHC* | $\mu$ -coll | CLIC | ILC** | CEPC | FCC-ee |
|-------------------------|---------|-------------|------|-------|------|--------|
| $m_H$ [MeV]             | 40      | 0.06        | 40   | 30    | 5.5  | 8      |
| $\Gamma_H$ [MeV]        | -       | 0.17        | 0.16 | 0.16  | 0.12 | 0.04   |
| $g_{HZZ}$ [%]           | 2.0     | -           | 1.0  | 0.6   | 0.25 | 0.15   |
| $g_{HWW}$ [%]           | 2.0     | 2.2         | 1.0  | 0.8   | 1.2  | 0.2    |
| $g_{Hbb}$ [%]           | 4.0     | 2.3         | 1.0  | 1.5   | 1.3  | 0.4    |
| $g_{H\tau\tau}$ [%]     | 2.0     | 5           | 2.0  | 1.9   | 1.4  | 0.5    |
| $g_{H\gamma\gamma}$ [%] | 2.0     | 10          | 6.0  | 7.8   | 4.7  | 1.5    |
| $g_{Hcc}$ [%]           | -       | -           | 2.0  | 2.7   | 1.7  | 0.7    |
| $g_{Hgg}$ [%]           | 3.0     | -           | 2.0  | 2.3   | 1.5  | 0.8    |
| $g_{Htt}$ [%]           | 4.0     | -           | 4.5  | 18    | -    | -      |
| $g_{H\mu\mu}$ [%]       | 4.0     | 2.1         | 8.0  | 20    | 8.6  | 6.2    |
| $g_{HHH}$ [%]           | 30      | -           | 24   | -     | -    | -      |

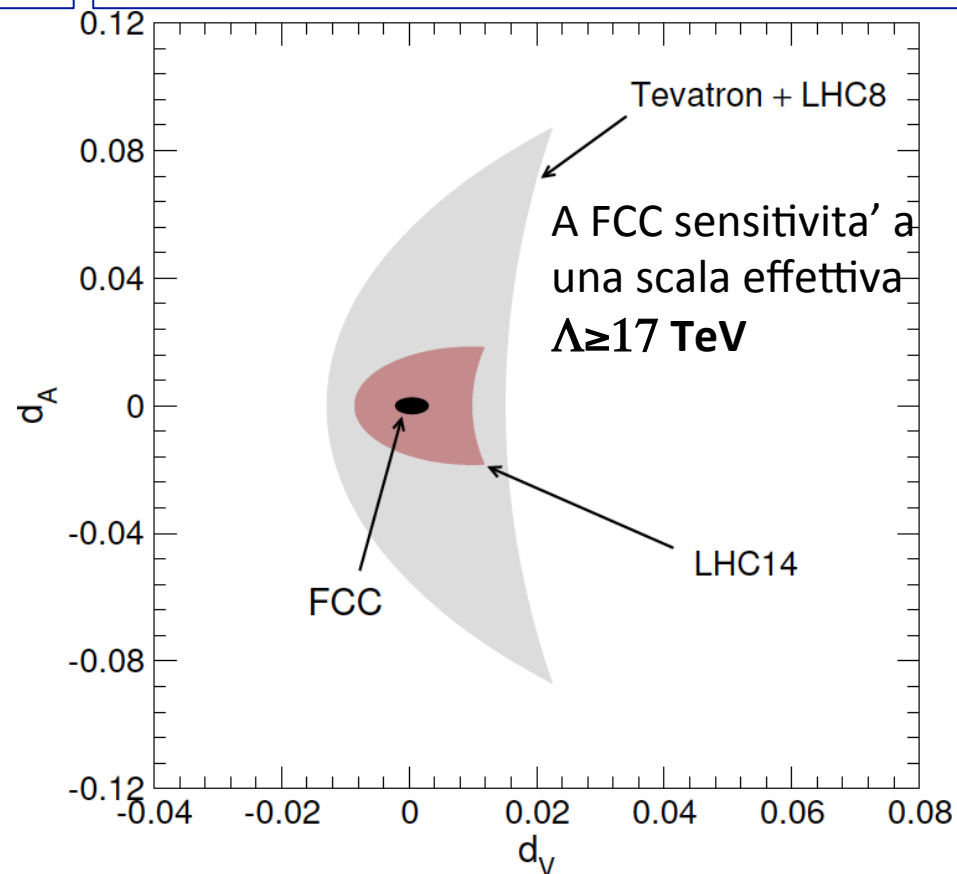
# Su quali strumenti puntare per le misure di precisione ? (potenzialita' macchine adroniche)

Esempio: misura autoaccoppiamento del bosone di Higgs ( $\lambda_{HHH}$ )



- Misura diretta della struttura del potenziale di Higgs
- Stime a FCC-hh 100 TeV per ora limitate al canale  $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$
- Ci si aspetta una precisione 5% - 10% se l'autoaccoppiamento e' quello previsto dal Modello Standard
- Scenari di Nuova Fisica possono dare valori di  $\lambda_{HHH}$  significativamente diversi.

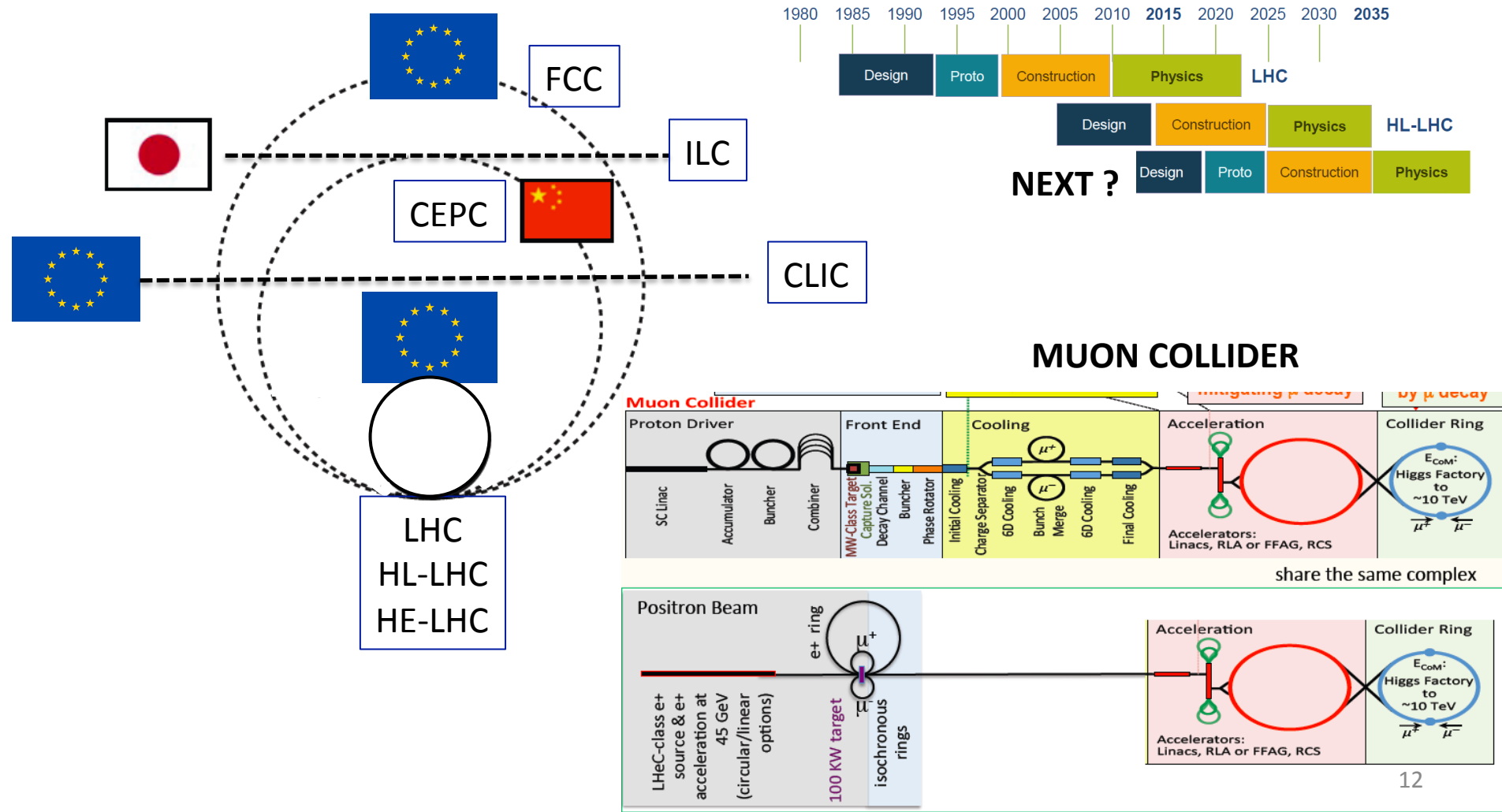
Esempio: misura dei momenti cromomagnetici del top



J.A. Aguilar-Saavedra et al. arXiv:1412.6654

# Quali strumenti per le misure ?

## What's Next Accelerator ? (After LHC)



# Spunti per discussione

- Come **massimizzare l'impatto** di misure di **del bosone di Higgs** sulla ricerca di fisica al di là del Modello Standard ?
  - misure di precisione di massa e larghezza naturale
  - misure di precisione degli accoppiamenti a fermioni e bosoni
  - misura del self-coupling dell'Higgs
- Qual e' il modo piu' efficace per cercare **nuova fisica nel resto del settore elettrodebole** ?
  - misure nel settore quark top, bosoni W e Z
- Quali osservabili per una informazione piu' accurata e completa?

# Spunti per discussione

- Lezione dagli esperimenti hep 1973-oggi: difficile trovare falle nello SM.
  - il modello standard e' la **teoria efficace** di una **teoria fondamentale**, oppure e' **un settore della teoria veramente fondamentale** ?
    - gli esperimenti del futuro come possono guidarci a investigare questo aspetto ?
- Come cambierebbe il programma di misure di precisione in seguito alla scoperta di un nuovo stato a LHC ?