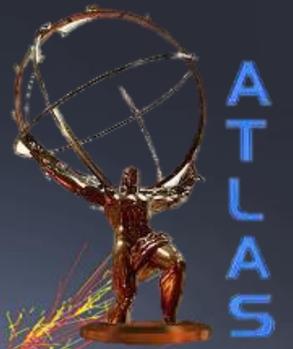




INFN



Risultati e prospettive nello studio della struttura tensoriale del vertice $H \rightarrow ZZ^*$: Ricerca di effetti di violazione di CP con discriminante 1D basato sul metodo Matrix Element.

FRANCESCO CIROTTO

Università degli Studi di Napoli "Federico II" & INFN di Napoli

Per la collaborazione ATLAS

Outline

1. Stato attuale dell'analisi spin-CP del bosone di Higgs
2. Studio della struttura tensoriale del vertice di accoppiamento
 $H \rightarrow ZZ$
3. Fit 2D dei parametri di accoppiamento
4. Prospettive future
5. Conclusioni

Obiettivi

Cosa possiamo dire sulle proprietà di Spin-CP

- ✓ Effettuati test d'ipotesi per diversi valori J^P
- ✓ I risultati sperimentali indicano al momento una consistenza con un bosone di Higgs previsto dal Modello Standard con prevalenza dello stato di spin-parità $J^P = 0^+$

Esclusione in favore dell'ipotesi 0^+

[ATLAS-CONF-2013-013](#)

J^P	C.L.
0^-	99.6 %
1^+	99.4%
1^-	96.9%
2_m^+	81.8%
2^-	88.4%

Accoppiamento del bosone di Higgs

- È estremamente interessante studiare la struttura tensoriale del vertice di accoppiamento $H \rightarrow VV$
 - E' possibile indagare la presenza di termini di violazione di CP
 - Esistono diversi modelli teorici che prevedono tale comportamento (CP violating Higgs Models, Composite Higgs, SUSY [arXiv:1107.3814v2](#))

Come determinare lo spin dell'Higgs?

Ampiezza di decadimento

La forma più generale dell'ampiezza di una risonanza con spin 0 che decade in due bosoni $X \rightarrow VV$ è:

$$A(H_{J=0} \rightarrow V_1 V_2) = v^{-1} \epsilon_1^{*\mu} \epsilon_2^{*\nu} \left(a_1 g_{\mu\nu} M_X^2 + a_2 q_\mu q_\nu + a_3 \epsilon_{\mu\nu\alpha\beta} q_1^\alpha q_2^\beta \right)$$

- a_i coefficienti di accoppiamento
- a_i in generale numeri complessi dipendenti dal momento e legati ai parametri di accoppiamento g_i della Lagrangiana
- La loro misura permette di ottenere informazioni sulle caratteristiche di spin e parità della risonanza
- In tal modo sarà possibile verificare la compatibilità con le previsioni del MS



J=0

$$a_1 = g_1^{(0)} \frac{m_V^2}{m_X^2} + \frac{s}{m_X^2} \left(2g_2^{(0)} + g_3^{(0)} \frac{s}{\Lambda^2} \right)$$
$$a_2 = - \left(2g_2^{(0)} + g_3^{(0)} \frac{s}{\Lambda^2} \right)$$
$$a_3 = -2g_4^{(0)}$$

Possibili scenari

- ☐ $a_1 \neq 0, a_2 \neq 0, a_3 = 0$
- ☐ $a_1 = 0, a_2 = 0, a_3 \neq 0$
- ☐ $a_1 = 0, a_2 \neq 0, a_3 \neq 0$



- ☒ **Higgs 0^+ SM**
- ☒ **Higgs 0^-**
- ☒ **Violazione di CP**

Come determinare lo spin dell'Higgs?

Osservabili sperimentali

- I parametri a_i sono ricondotti ad osservabili sperimentali riscrivendo l'ampiezza di scattering in termini delle ampiezze di elicità $A_{\lambda_1\lambda_2}$
- $A_{\lambda_1\lambda_2}$ direttamente connesse alle distribuzioni angolari delle particelle dello stato finale.

$$A_{00} = -\frac{m_X^2}{v} \left(a_1 \sqrt{1+x} + a_2 \frac{m_1 m_2}{m_X^2} x \right)$$

$$A_{++} = \frac{m_X^2}{v} \left(a_1 + i a_3 \frac{m_1 m_2}{m_X^2} \sqrt{x} \right)$$

$$A_{--} = \frac{m_X^2}{v} \left(a_1 - i a_3 \frac{m_1 m_2}{m_X^2} \sqrt{x} \right)$$

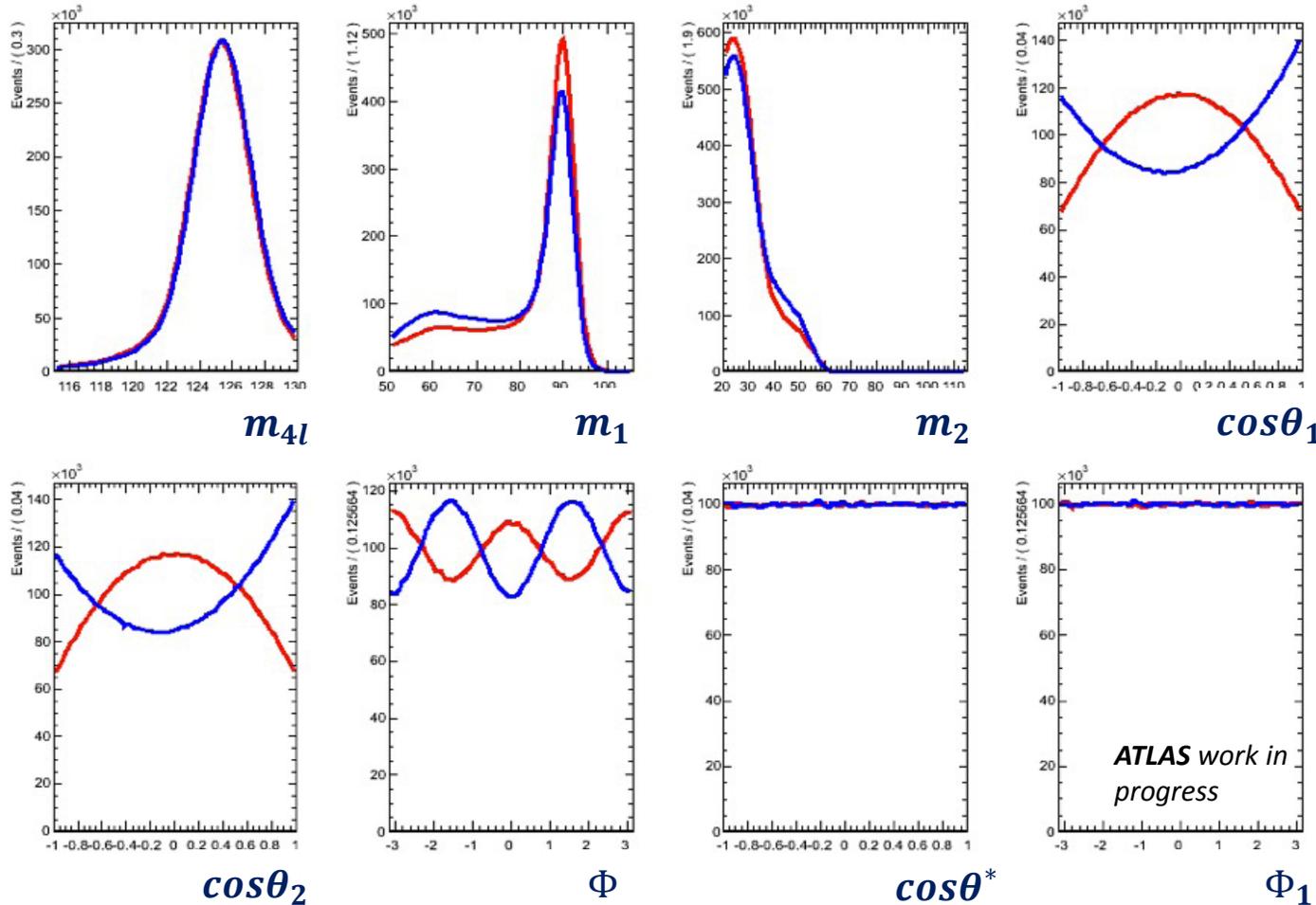
- Ogni termine risulta proporzionale ad una diversa combinazione di g_i

$m_{4l}, m_1, m_2,$
 $\cos\theta^*, \cos\theta_1, \cos\theta_2,$
 ϕ, ϕ_1

- La cinematica del decadimento è completamente descritta da cinque angoli, dalle masse dei due bosoni e della risonanza
- I valori J^P di una particella determinano la distribuzione differenziale angolare e della massa
- Il decadimento $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ rappresenta un canale di grande rilievo, in quanto la cinematica del decadimento è interamente ricostruita con elevata precisione sperimentale.

Come determinare lo spin dell'Higgs?

Osservabili sperimentali



Higgs SM ($g_1 \neq 0, g_2=g_3=g_4=0$)

Higgs SM CPV ($g_1 \neq 0$ e/o $g_2 \neq 0, g_4 = -8i$)

Il fit dei parametri permette di estrarre informazioni sui fattori di forma e sulle proprietà di spin-CP

- Fit 2D con discriminante 1D
- Approccio completo con fit 8D (talk di Giuliano Gustavino)

Analisi con discriminante 1D

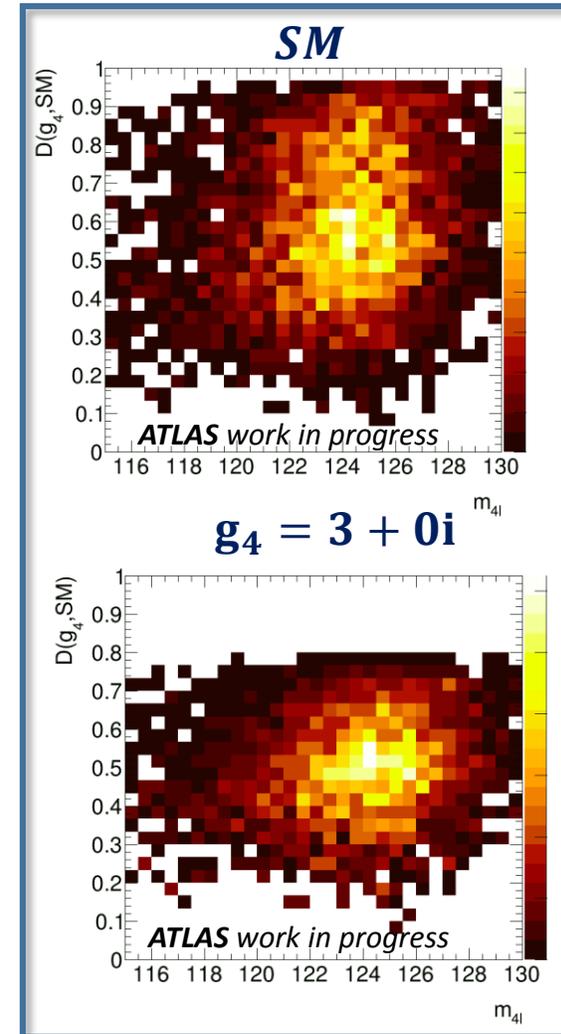
Come si effettua la misura

- Analisi basata su un fit di likelihood 2D
 - Variabili utilizzate: m_{4l} (per separare il segnale dal fondo) e un **discriminante 1D** (basato sul matrix element) nel quale sono condensate le informazioni delle altre 7 variabili cinematiche, sensibile all'accoppiamento $H \rightarrow ZZ$
 - Si riduce la dimensionalità del problema, il discriminante è funzione di g_4 o g_2
 - Permette di discriminare tra le varie ipotesi di struttura tensoriale

$$D_{g_i} = \frac{p(\text{dati}|SM)}{p(\text{dati}|SM) + p(\text{dati}|g_i)}$$

p indica la pdf 7D che si ottiene dal calcolo del matrix element

- Stessa selezione degli eventi applicata dall'analisi principale di $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$
- Dalla procedura di fit si ottiene e una stima del valore dei parametri g_4 e g_2
- Si ottengono le sensibilità nei piani complessi



Analisi con discriminante 1D

Procedimento

- Si costruisce un modello di likelihood 2D:
 - Dal segnale SM del MC si produce $pdf_{SM}(m_{4l}, D_{g_i})$
 - Si utilizza un ripescaggio del matrix element per ottenere un campione MC per la data ipotesi g_i , e si produce la corrispondente $pdf_{g_i}(m_{4l}, D_{g_i})$
 - Si ripete la stessa procedura per costruire la $pdf_{bkg}(m_{4l}, D_{g_i})$
- Si costruisce un modello di likelihood per ognuno dei canali di decadimento di $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$

$$p_{sig} = \epsilon \cdot pdf_{g_4} + (1 - \epsilon) \cdot pdf_{SM}$$

$$p_{tot} = Pois(\mu N_{sig} + \mu_{bkg} N_{bkg}) (f_{sig} p_{sig} + f_{bkg} p_{bkg})$$

ϵ è il parametro di interesse:

0 se è SM

μ e μ_{bkg} parametri nuisance

- Si effettua un fit simultaneo per ognuno dei quattro canali
 - Si utilizza il profile likelihood come statistica di test, per ottenere i p-values delle ipotesi considerate

Cosa si misura

Si misurano i rapporti delle coppie (g_4, g_1) e (g_2, g_1)

- $Re[g_4]/g_1, Im[g_4]/g_1$
- $Re[g_2]/g_1, Im[g_2]/g_1$

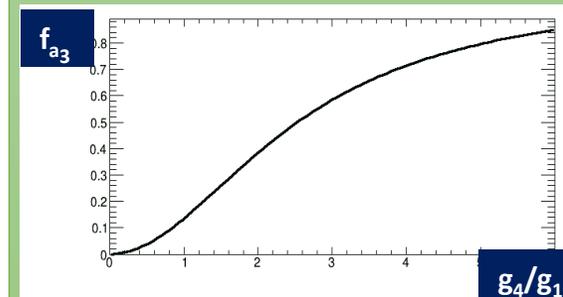
In questo modo si esplora anche la natura complessa delle costanti di accoppiamento

CMS fornisce un primo risultato misurando:

$$f_{a3} = f_{CP} = \frac{|a_3|^2 \sigma_3}{|a_1|^2 \sigma_1 + |a_2|^2 \sigma_2 + |a_3|^2 \sigma_3} < 0.58 \text{ al } 95\% \text{ CL}$$

<http://cds.cern.ch/record/1523767>

È possibile riscrivere i risultati di ATLAS per confrontarli con la parametrizzazione usata da CMS



Calcoli approssimati

$$g_4/g_1 < 0.6 \rightarrow f_{a3} < 0.053$$

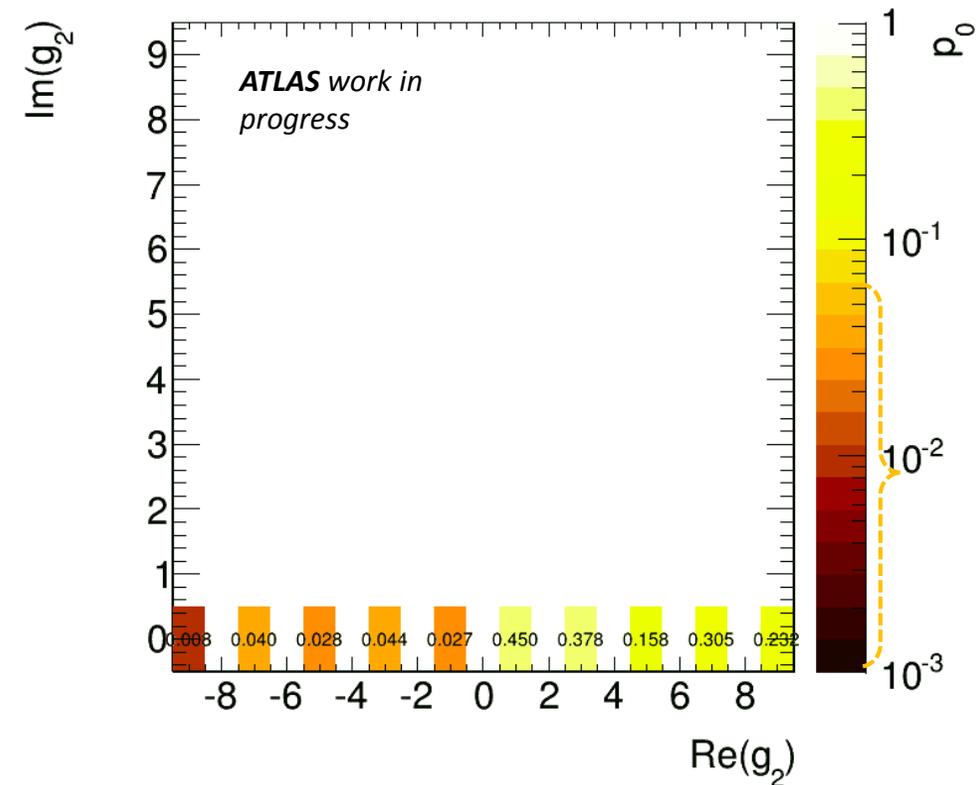
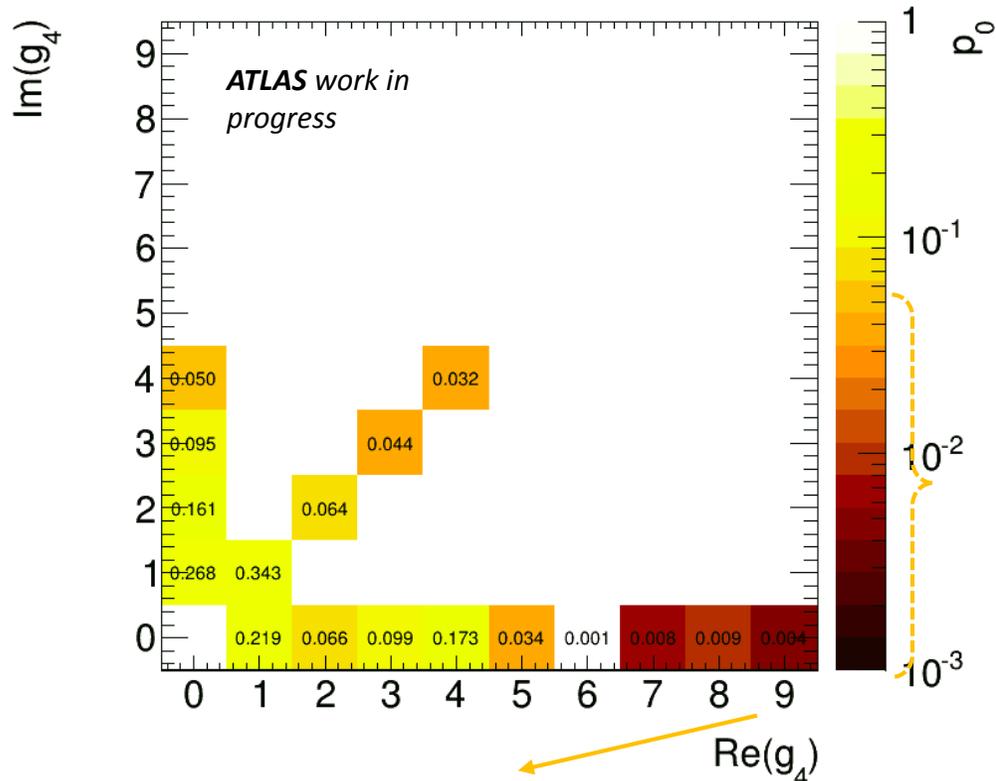
$$g_4/g_1 < 0.5 \rightarrow f_{a3} < 0.037$$

$$g_4/g_1 < 0.4 \rightarrow f_{a3} < 0.023$$

$$g_4/g_1 < 0.3 \rightarrow f_{a3} < 0.014$$

Analisi con discriminante 1D

Sensibilità: piano complesso



- Separazioni asintotiche attese
- Statistica di Moriond ($\sim 25 \text{ fb}^{-1}$)
- Il punto viene escluso quando $p_0 < 0.05$

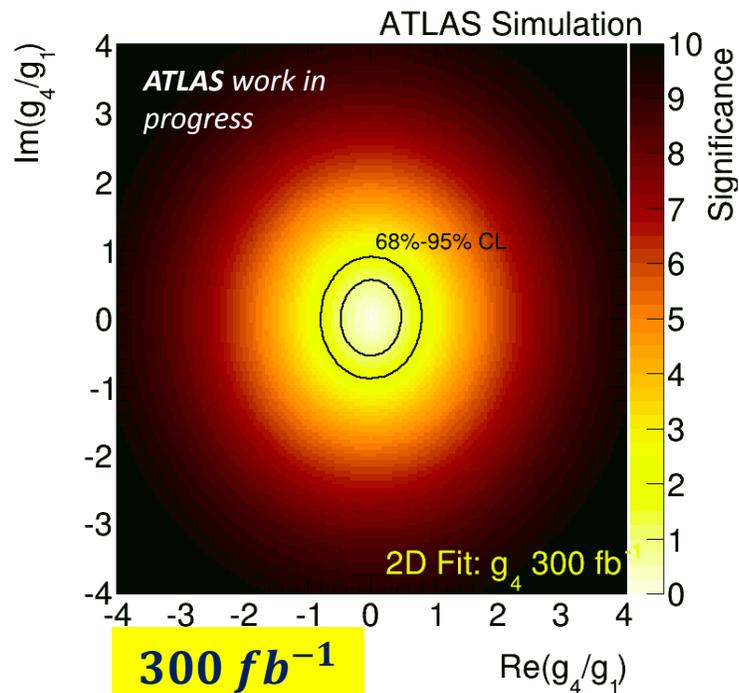
$g_4 = 9 + 0i$ ($J^P=0^-$) è escluso a 2.6σ (consistente con i risultati del test d'ipotesi $0^+ - 0^-$)

I valori negativi sono facilmente esclusi

Analisi con discriminante 1D

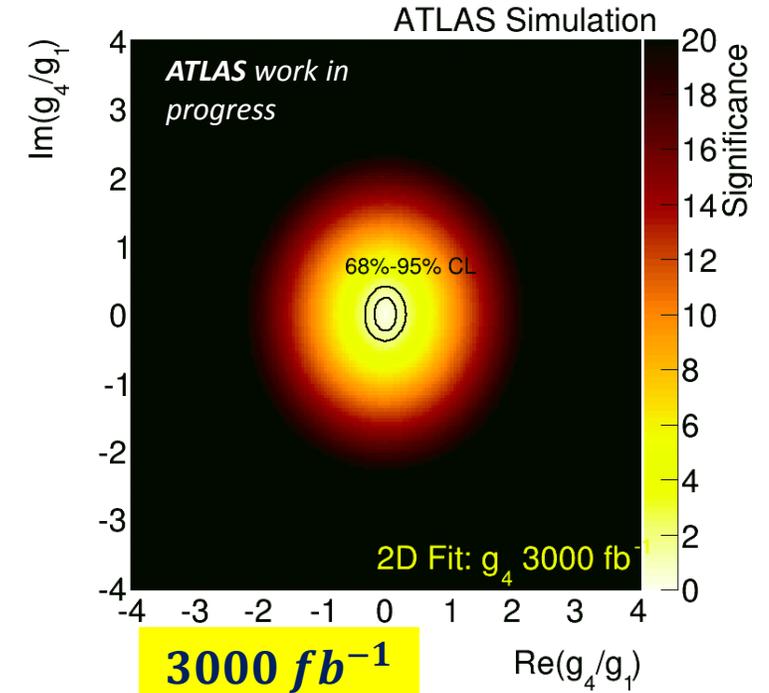
Prospettive future: g_4

Misure più precise dei fattori di forma richiedono una luminosità maggiore, accessibile a HL-LHC



Si esclude $\frac{|g_4|}{g_1} > 0.9$ al 95 % C.L

Sensibilità col segnale SM

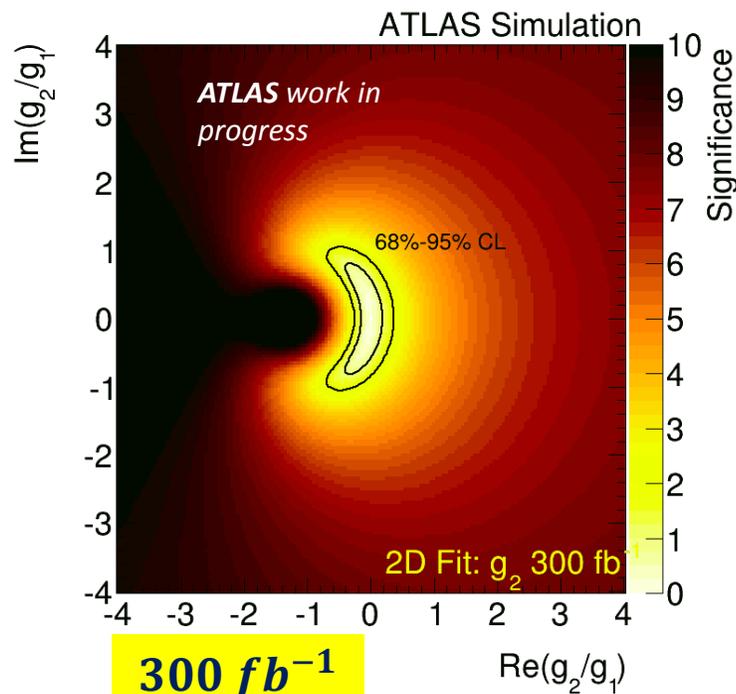


Si esclude $\frac{|g_4|}{g_1} > 0.41$ al 95 % C.L

Analisi con discriminante 1D

Prospettive future: g_2

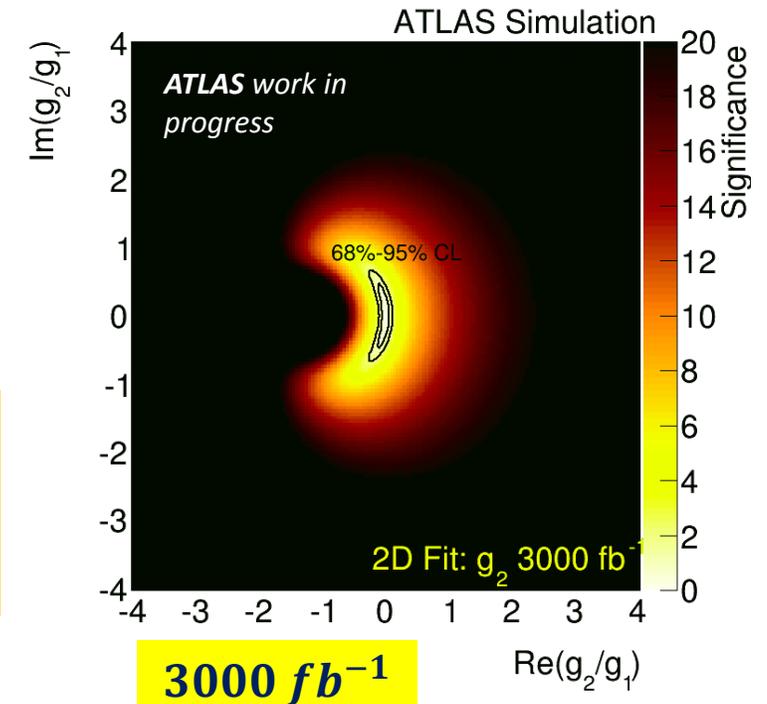
Misure più precise dei fattori di forma richiedono una luminosità maggiore, accessibile a HL-LHC



Sensibilità col segnale SM

Già a 300 fb^{-1} si possono escludere i valori negativi per $Re[g_2]/g_1$ (assumendo $Im[g_2]/g_1 = 0$)

Si esclude $\frac{|g_2|}{g_1} > 1.18$ al 95 % C.L



Si esclude $\frac{|g_2|}{g_1} > 0.69$ al 95 % C.L

Analisi con discriminante 1D

Prospettive future: f_{g_i} vs $\text{Arg}(g_i/g_1)$

È interessante studiare la dipendenza della frazione f_{g_i} dall' $\text{Arg}(g_i/g_1)$

$$f_{g_i} = \frac{\sigma_i |g_i|^2}{\sigma_1 |g_1|^2 + \sigma_i |g_i|^2}$$

Si è in grado di escludere f_{g_i} per molti valori di $\text{Arg}(g_i/g_1)$

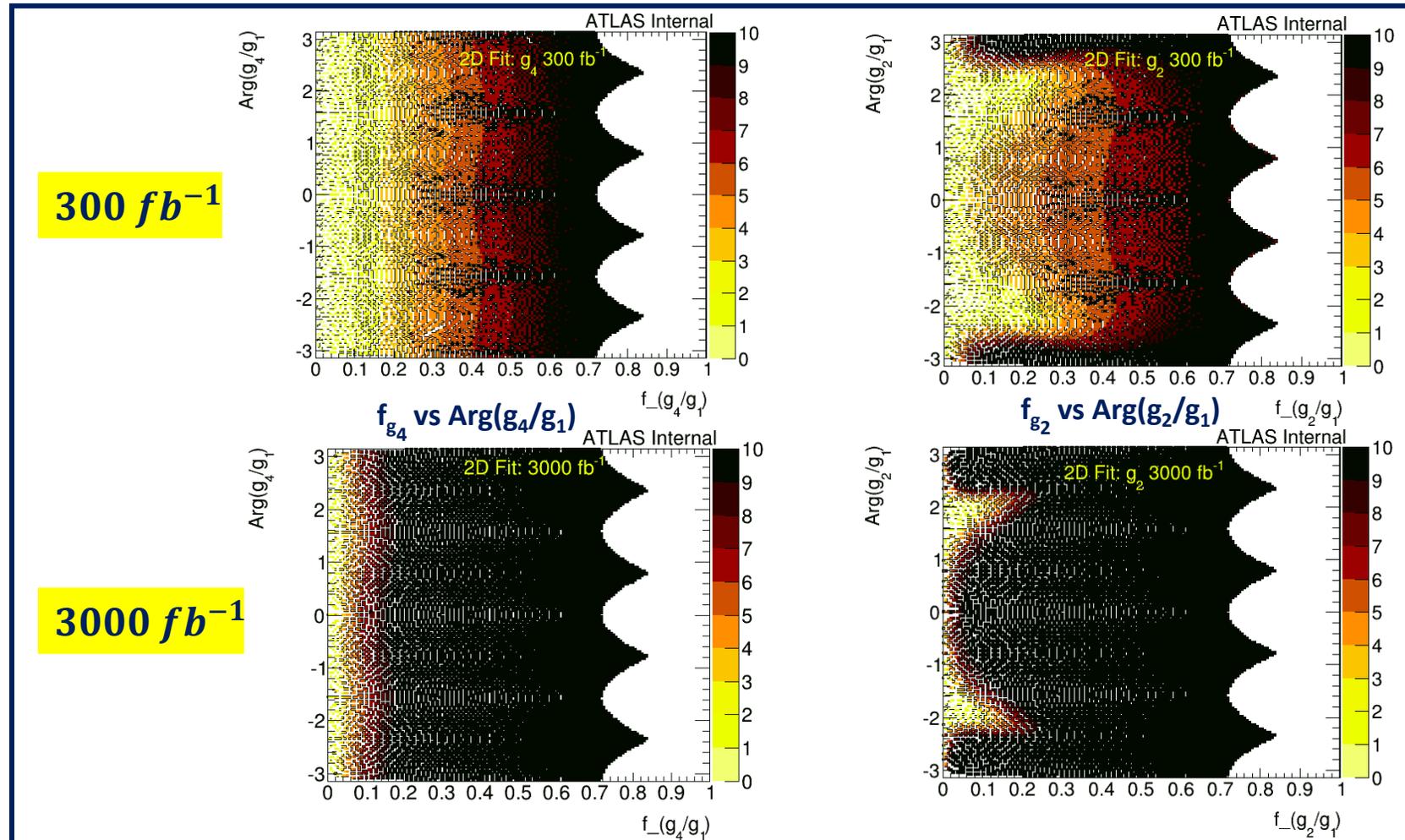
300 fb^{-1} :

- $f_{g_4} > 11\%$
- f_{g_2} per molti valori di $\text{Arg}(g_2/g_1)$

3000 fb^{-1} :

- $f_{g_4} > 3.9\%$
- $f_{g_2} > 5\%$

Sensibilità col segnale SM



Conclusioni

- E' stato presentato uno studio delle proprietà di spin-CP e della struttura tensoriale del vertice di interazione $H \rightarrow ZZ$ in ATLAS nel canale di decadimento con 4 leptoni nello stato finale
- Sono stati sviluppati in parallelo due metodologie sperimentali basate su fit di likelihood 2D e 8D (talk di Giuliano Gustavino)
- Fit 2D:
 - Ottenuti limiti di esclusione al 95% (expected) per g_4 e g_2 sulla statistica attuale e per HL-LHC
 - **Dati attuali:** si esclude $\frac{|g_4|}{g_1} \gtrsim 4$, per $\frac{|g_2|}{g_1}$ si ha ancora poca sensibilità
 - **300 fb⁻¹:** si esclude $\frac{|g_4|}{g_1} > 0.9, \frac{|g_2|}{g_1} > 1.18$
 - **3000 fb⁻¹:** si esclude $\frac{|g_4|}{g_1} > 0.41, \frac{|g_2|}{g_1} > 0.69$
 - Risultati consistenti con il metodo 8D (ATLAS) e con CMS
 - Compatibilità con i risultati del test di ipotesi MELA ($0^+ - 0^-$)
- Work in progress:
 - Risultati osservati con dati 2011/2012 a breve
 - Ottimizzazione della procedura per aumentare la sensibilità
 - Studio delle sistematiche di shape

