

# Incontri di Fisica delle Alte Energie (IFAE) 2024, 3-5 Aprile

$$X \rightarrow S( \rightarrow b\bar{b})H( \rightarrow \gamma\gamma):$$

Ricerca di una nuova risonanza  $X$  che decade in un bosone di Higgs e in un generico scalare  $S$ , nello stato finale  $b\bar{b}\gamma\gamma$  con l'esperimento ATLAS

Elena Mazzeo

Università degli Studi & INFN Milano



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI MILANO



# Il bosone di Higgs è l'unica particella scalare in Natura?

Osservazione del bosone di Higgs con gli esperimenti ATLAS e CMS @ LHC (con osservazione del decadimento  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ).

➔ Nuova particella scalare (spin 0), con  $m_H = 125$  GeV!

➔ Lo SM e' incompleto!

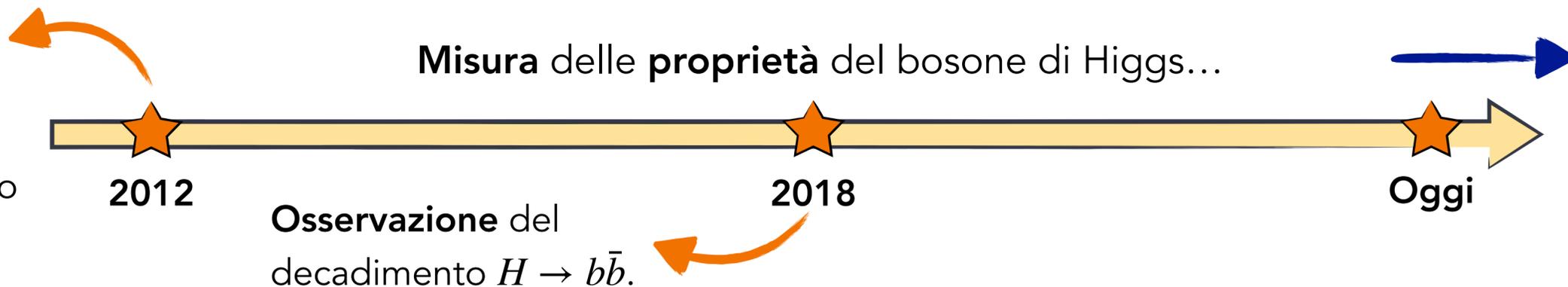
- ➔ Il bosone di Higgs osservato nel 2012 (SM Higgs, con  $m_H = 125$  GeV) e' l'unica particella scalare in natura?
- Numerose estensioni del SM prevedono un settore di Higgs esteso che include particelle scalari aggiuntive (= l'unica fin ora osservata e' il bosone di Higgs con  $m_H = 125$ ).



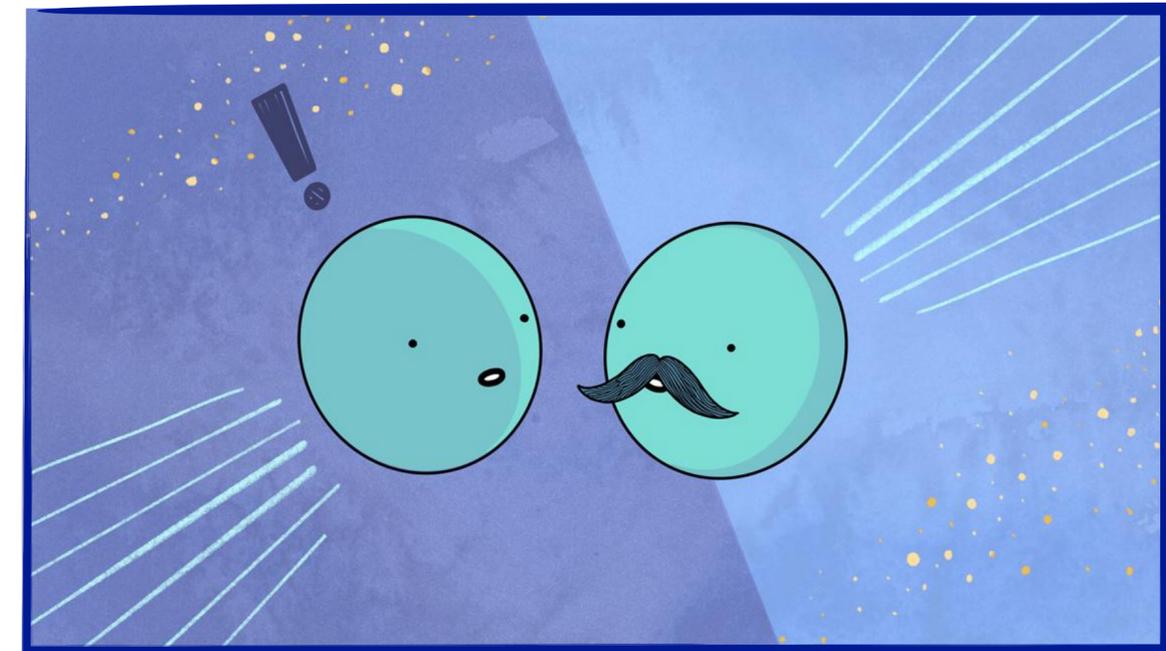
Nuove particelle scalari potrebbero essere prodotte in collisioni  $pp$  @ LHC! ➔ Come il SM Higgs!

➔ Fenomenologia @ LHC:  $pp \rightarrow$  nuova particella scalare  $X \rightarrow$  nuova particella scalare  $S$  + bosone di Higgs  $H$ !

➔ Con  $m_X > m_S + m_H$ !

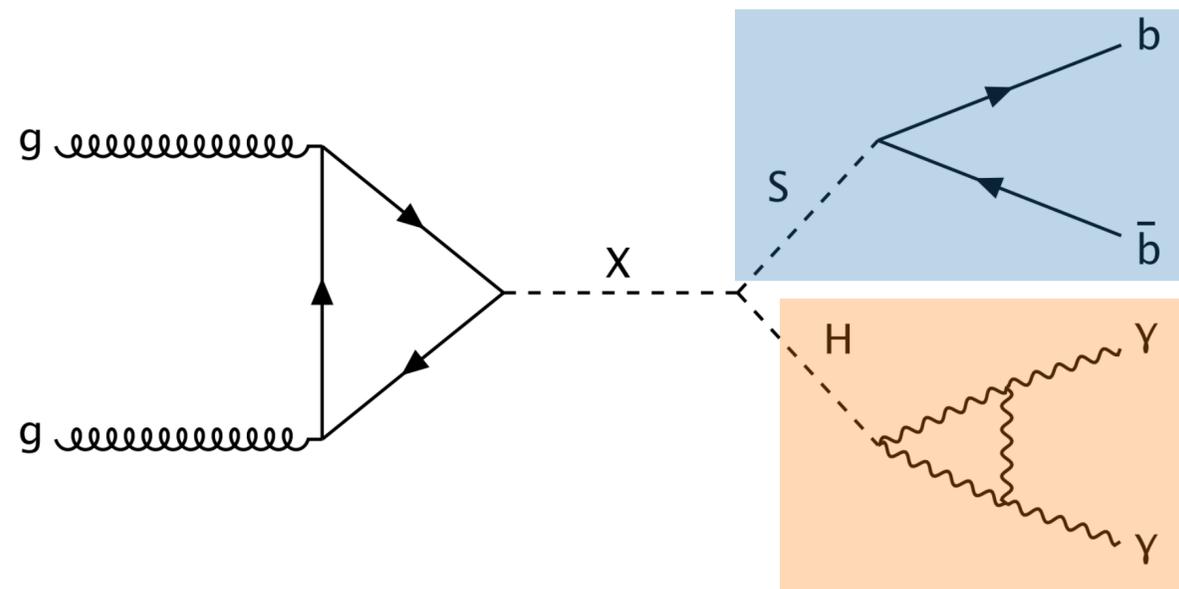


Perfetto accordo con le previsioni del Modello Standard delle particelle elementari (SM)!



# Ricerca di $X \rightarrow S(\rightarrow b\bar{b}) + H(\rightarrow \gamma\gamma)$

Questa analisi ricerca una **nuova risonanza scalare  $X$** , che decade in una **nuova particella scalare più leggera  $S$**  e in un **bosone di Higgs  $H$** , nello stato finale con **due fotoni** e due **quark bottom** nei **dati** raccolti da **ATLAS** durante il **Run 2 di LHC (= 140 fb<sup>-1</sup>)**!



- $S \rightarrow b\bar{b}$ : canale **dominante** per un  $S$  simile al bosone di Higgs, con  $m_S < 130$  GeV.
- La **cinematica dipende fortemente** dalla differenza tra le masse  $m_X$ ,  $m_S$ , e  $m_H$ .

**Nuovo risultato!** (= [referenza](#) e [presentazione alla conferenza Moriond EW](#))!

- Probabilità di decadimento  $H \rightarrow \gamma\gamma$  molto bassa (0.23%), compensata da:**
- **Eccellente efficienza di trigger** e **ricostruzione** dei fotoni con il rivelatore ATLAS.
  - **Eccellente risoluzione** della **massa invariante** dei due fotoni  $m_{\gamma\gamma}$  (1-2 GeV)!

• L'analisi testa un ampio intervallo per  $m_X$  ed  $m_S$ .

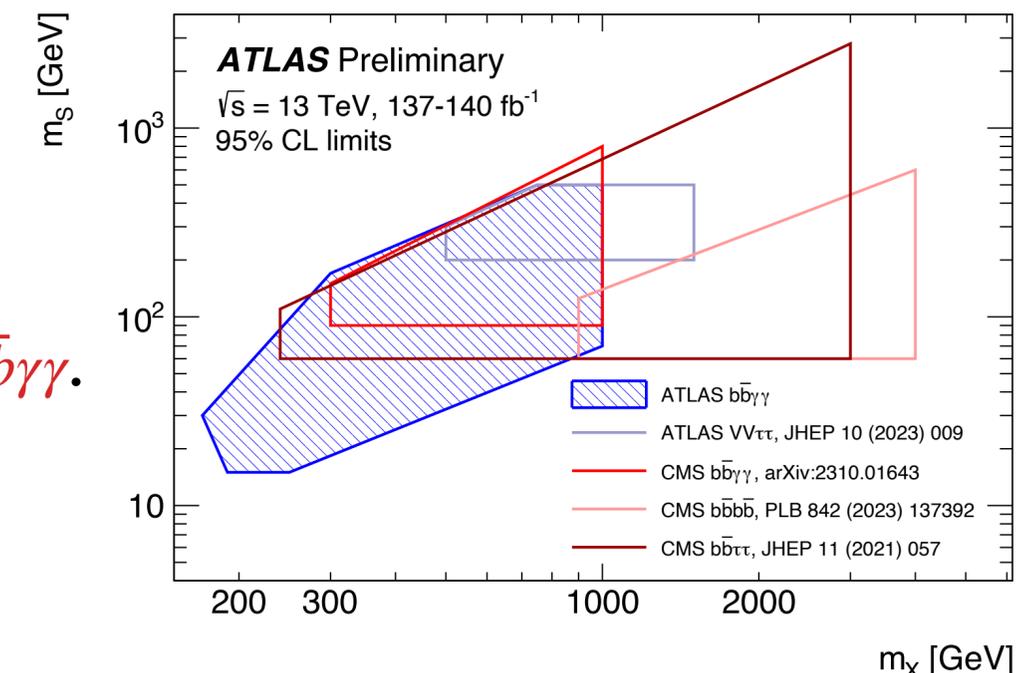
➔  $170 \leq m_X \leq 1000$  GeV  $\times$   $15 \leq m_S \leq 500$  GeV!

• Per ciascun  $(m_X, m_S)$  la presenza di un segnale  $X \rightarrow S(\rightarrow b\bar{b}) + H(\rightarrow \gamma\gamma)$

comporterebbe **tre risonanze** nelle **distribuzioni delle masse invarianti**  $\gamma\gamma$ ,  $b\bar{b}$ , e  $b\bar{b}\gamma\gamma$ .

➔ **Chiave** per distinguere il segnale dai fondi (= non-risonanti)!

➔ Produzione **non-risonante**  $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ , produzione di un **singolo**  $H \rightarrow \gamma\gamma$  + **jet adronici**, e produzione **non-risonante di fotoni + jet adronici**.

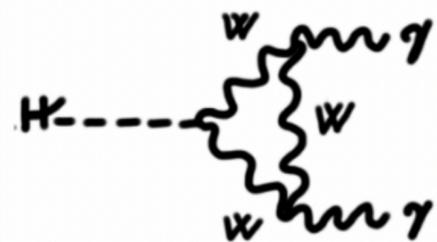


# Selezione degli eventi & categorizzazione

Gli eventi interessanti per l'analisi  $X \rightarrow S(\rightarrow b\bar{b}) + H(\rightarrow \gamma\gamma)$  sono caratterizzati da una segnatura  $b\bar{b} + \gamma\gamma$ .

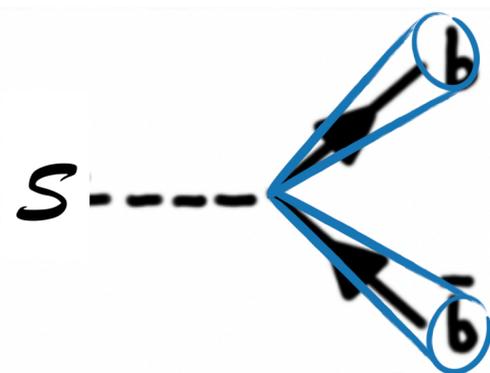
➔ L'analisi **seleziona eventi** con **due fotoni** e **(almeno)** un **jet** compatibile con l'**adronizzazione** di un **bottom quark** (= **b-jet**)!

**Selezione di-fotone** ➔ Seleziona eventi compatibili con il decadimento  $H \rightarrow \gamma\gamma$ .

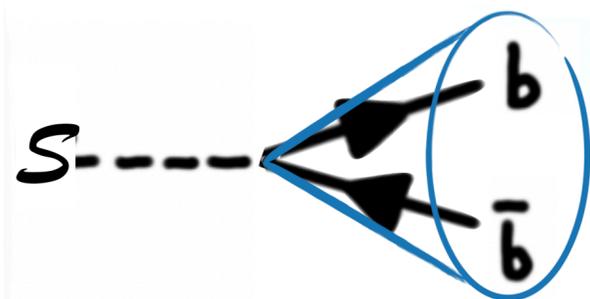


- **Due fotoni** tight e isolati.
- $p_T^{\gamma_{1(2)}}/m_{\gamma\gamma} > 0.35(0.25)$  e  $105 < m_{\gamma\gamma} < 160$  GeV.

**Selezione b-jet** ➔ Due categorie distinte in base al **numero di b-jet**.

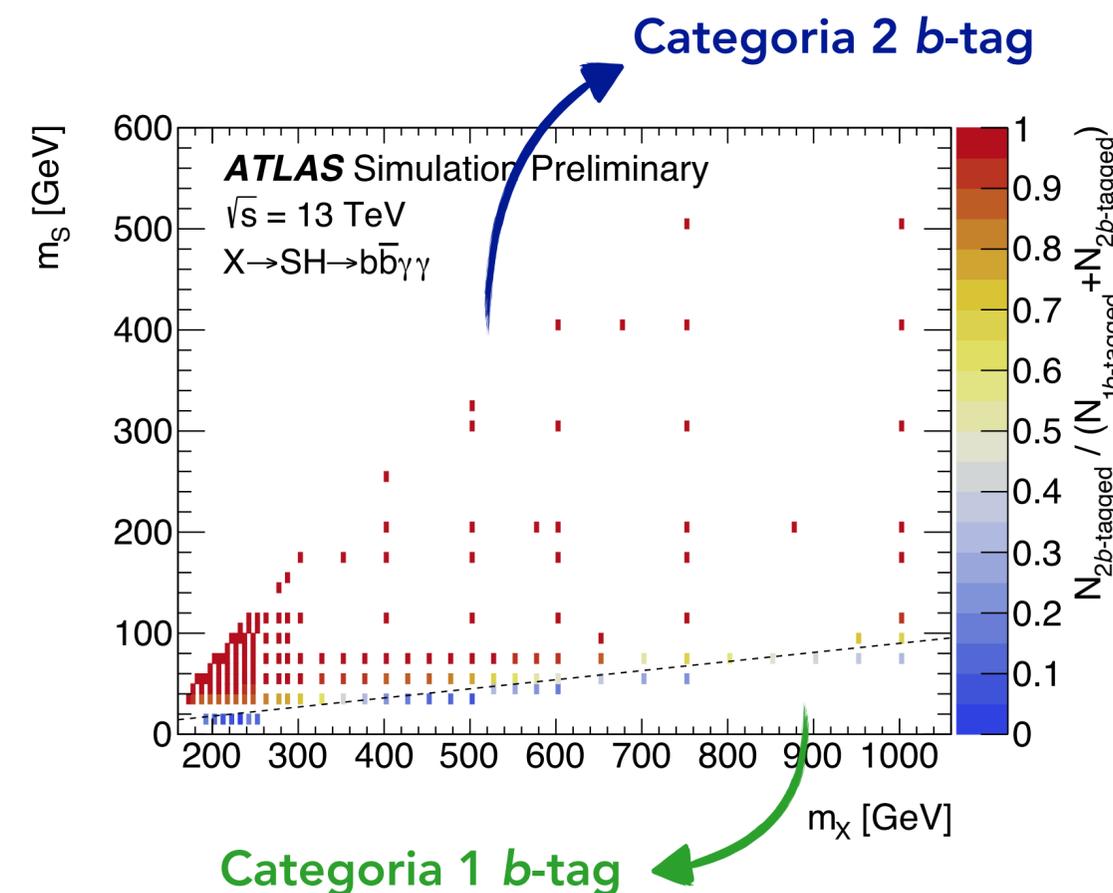


- $m_S \sim m_X - m_H$
- I quark bottom vengono ricostruiti come **due b-jet** distinti.
  - **Categoria 2 b-tag**: esattamente due b-jet con  $p_T > 25$  GeV.



- $m_S \ll m_X - m_H$
- I quark bottom sono **molto collimati**: ricostruiti all'interno di un **unico b-jet**.
  - **Categoria 1 b-tag**: esattamente un b-jet con  $p_T > 25$  GeV.

La selezione **2 b-tag** e' molto inefficiente per segnali  $X \rightarrow S(\rightarrow b\bar{b}) + H(\rightarrow \gamma\gamma)$  con  $m_X/m_S < 0.09$  (= **separazione** tra le categorie **2 b-tag** / **1 b-tag**).

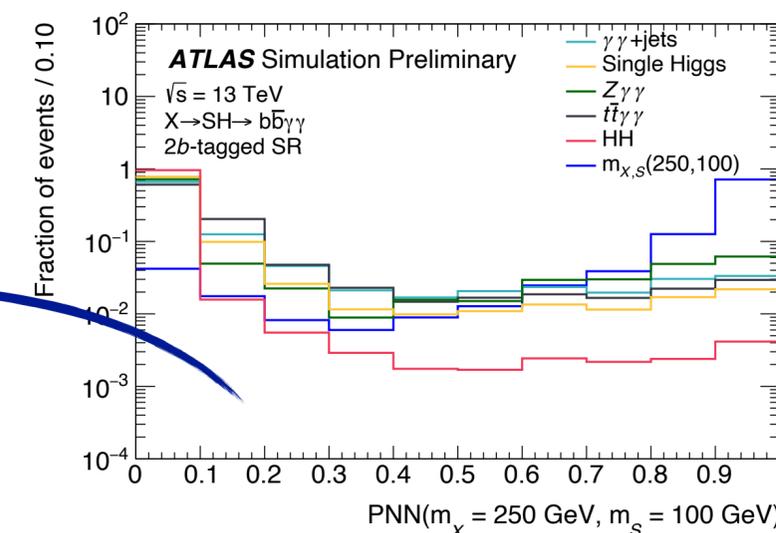
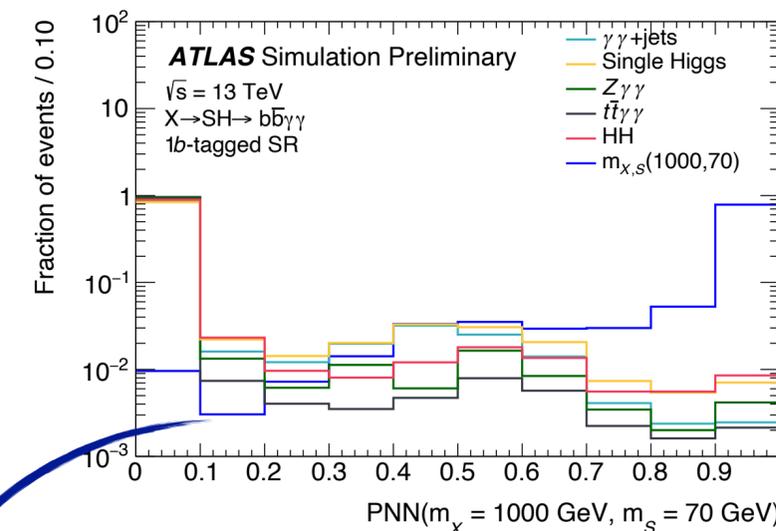
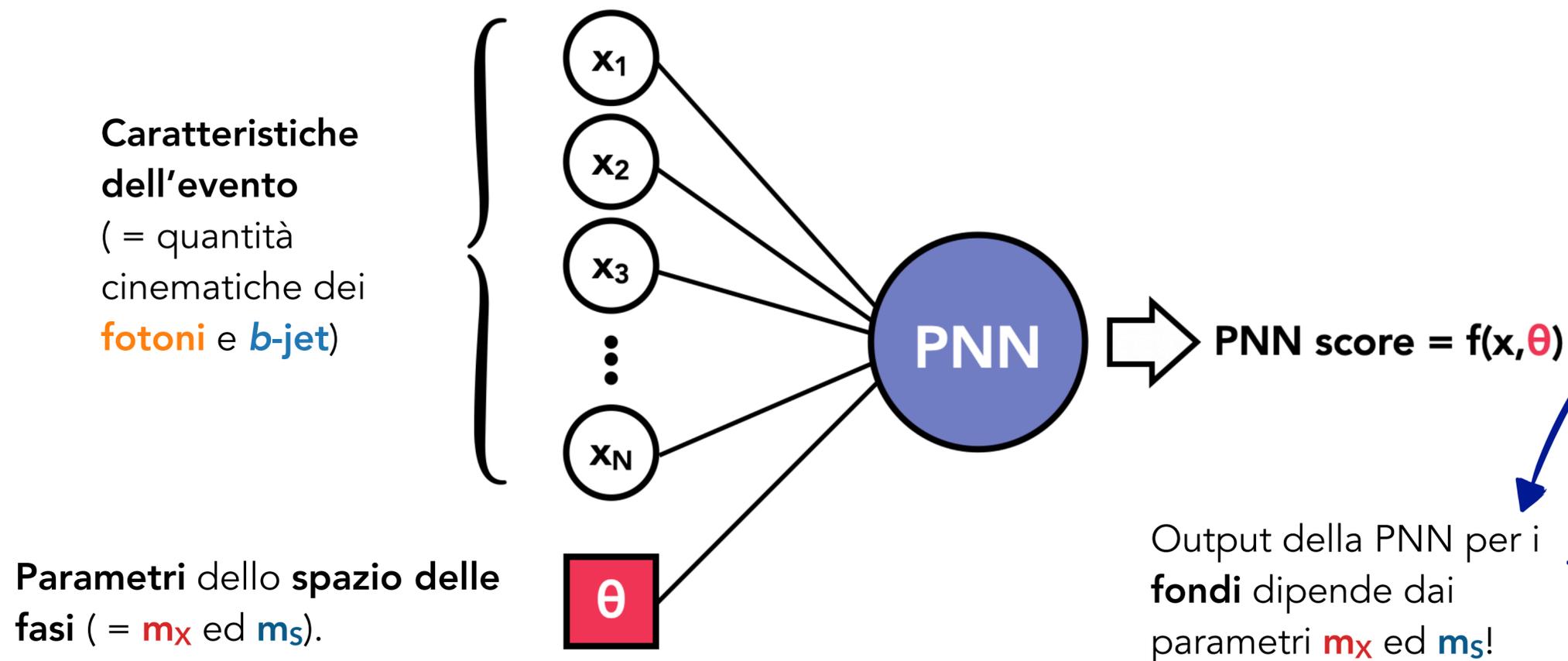


# Reti neurali parametrizzate (PNN)

- Questa analisi ricerca un segnale  $X \rightarrow S( \rightarrow b\bar{b}) + H( \rightarrow \gamma\gamma)$ , in un **ampio spettro di masse** ( $m_X, m_S$ ).

➔ Le caratteristiche del segnale (= risoluzione e cinematica delle risonanze  $S \rightarrow b\bar{b}$  e  $X \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ ) dipendono fortemente da ( $m_X, m_S$ )!

- Discriminante finale** ➔ Rete neurale parametrizzata (PNN). 🎉



- Due PNN separate** per le due categorie 2 b-tag e 1 b-tag.

	Caratteristiche dell'evento	Parametri dello spazio delle fasi
<b>2 b-tag</b>	$m_{bb\gamma\gamma}^* [= m_{bb\gamma\gamma} - (m_{\gamma\gamma} - m_H) - (m_{bb} - m_S)], m_{bb}$	$m_X, m_S$
<b>1 b-tag</b>	$m_{b\gamma\gamma}^* [= m_{b\gamma\gamma} - (m_{\gamma\gamma} - m_H)], p_{T^b}$	$m_X$

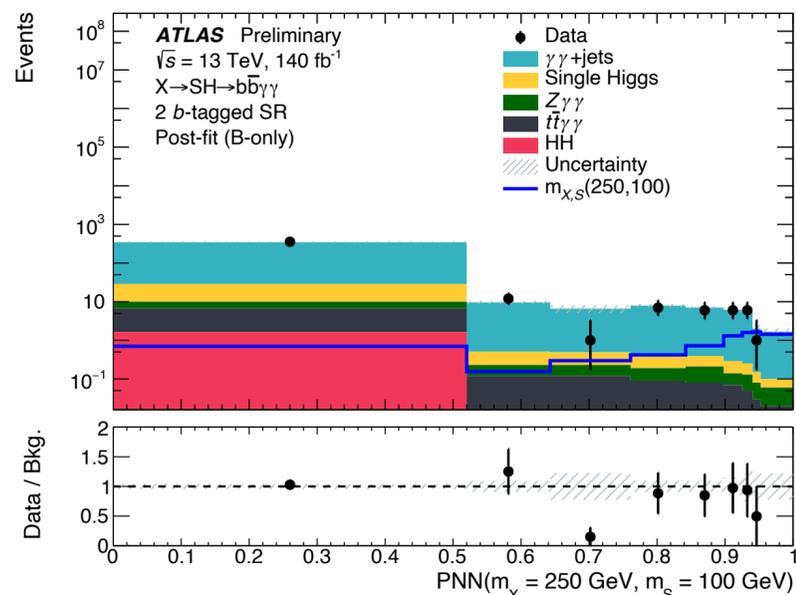
Allenate con eventi simulati di segnale  $X \rightarrow S( \rightarrow b\bar{b}) + H( \rightarrow \gamma\gamma)$  (= campioni Monte Carlo), con diversi valori di ( $m_X, m_S$ ) + fondi **HH**, **singolo H**, e **fotoni + jet**.

# Strategia di analisi e stima dei fondi

L'analisi definisce una **regione di segnale (SR)** e una **regione di controllo (CR)**, basandosi sulla **massa invariante**  $m_{\gamma\gamma}$ .

**Regioni di segnale (SR):**

$$120 < m_{\gamma\gamma} < 130 \text{ GeV}$$



- Regione della **risonanza**  $H \rightarrow \gamma\gamma$ .

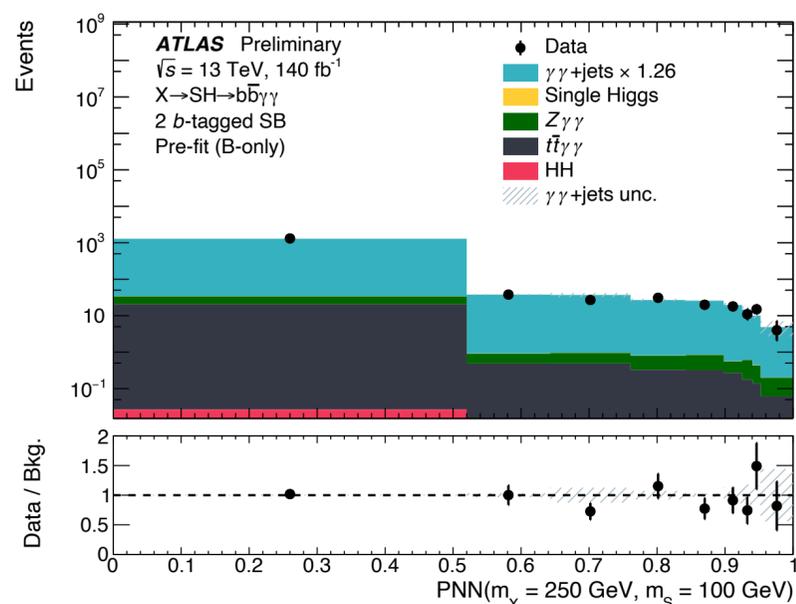
➡ Dove ci si aspetta **eventuale segnale** e **fondi risonanti** (= **HH** e **singolo H**).

- Per ciascun punto ( $m_x, m_s$ ), un **istogramma** dell'output della PNN viene utilizzato per distinguere il **segnale** dai **fondi**. ➡ Grazie a **bin fini** dove  $PNN \approx 1$ !

**Regioni di controllo (CR):**

$$105 < m_{\gamma\gamma} \leq 120 \text{ GeV}$$

$$130 \leq m_{\gamma\gamma} < 160 \text{ GeV}$$



- Dominata dal **fondo non risonante fotoni + jets**.

➡ **Minima contaminazione** di **segnale** e **fondi risonanti** (= **HH** e **singolo H**).

- Funzioni principali:

➡ - Controllare l'**accordo** tra i **dati** e gli **eventi Monte-Carlo (MC) di fondo** nello **spettro** dell'output della PNN.

➡ Fondamentale per la **validazione** della **stima dei fondi**!

- **Normalizzare** il **fondo  $\gamma\gamma$ +jets** ai **dati**.

**Output della PNN**

# Strategia di analisi e stima dei fondi

## Fondo non risonante fotoni + jets

≡  $\gamma\gamma$  + jet adronici +  $\gamma$  + jet e multi-jet (con jet ricostruiti come fotoni).

- ➔ -  $\gamma\gamma$  + jet adronici (= componente irriducibile, con fotoni veri)  $\approx 85\%$
- $\gamma$  + jet e multi-jet (= componente riducibile, con fotoni fake)  $\approx 15\%$

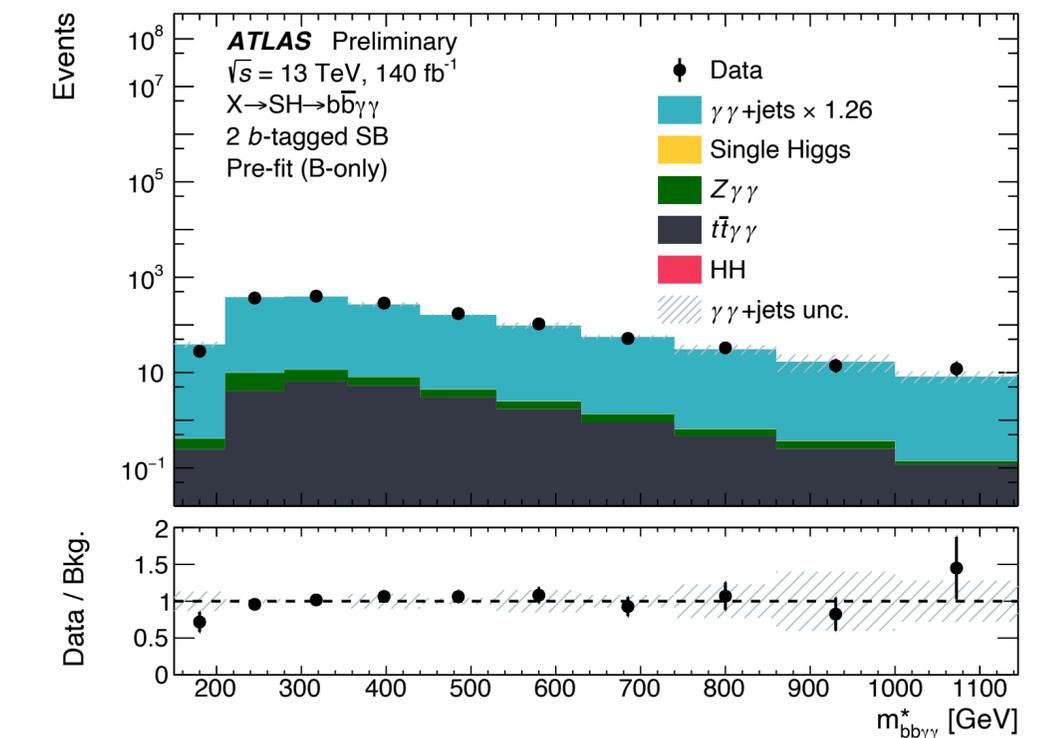
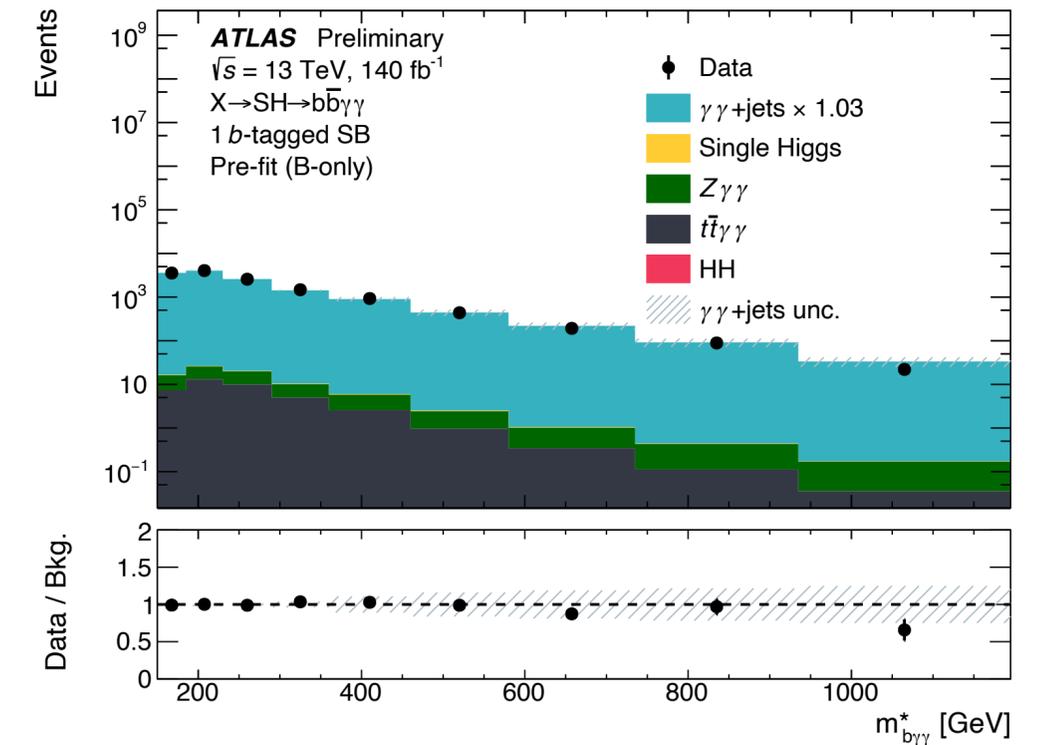
- Eventi MC  $\gamma\gamma$  + jet usati per modellizzare il **fondo non risonante** (compresa la componente riducibile).

- ➔ ○ Errori di modellizzazione dell'output della PNN coperti da incertezze sistematiche.
- Fattore di normalizzazione  $\gamma\gamma$  ( $\approx 15\%$ ) libero nel fit tiene conto del contributo della componente  $\gamma$  + jet e multi-jet.

- Distribuzioni delle **variabili di input della PNN** e dell'output della PNN per la **componente irriducibile** e per la componente riducibile sono **compatibili!** ✓

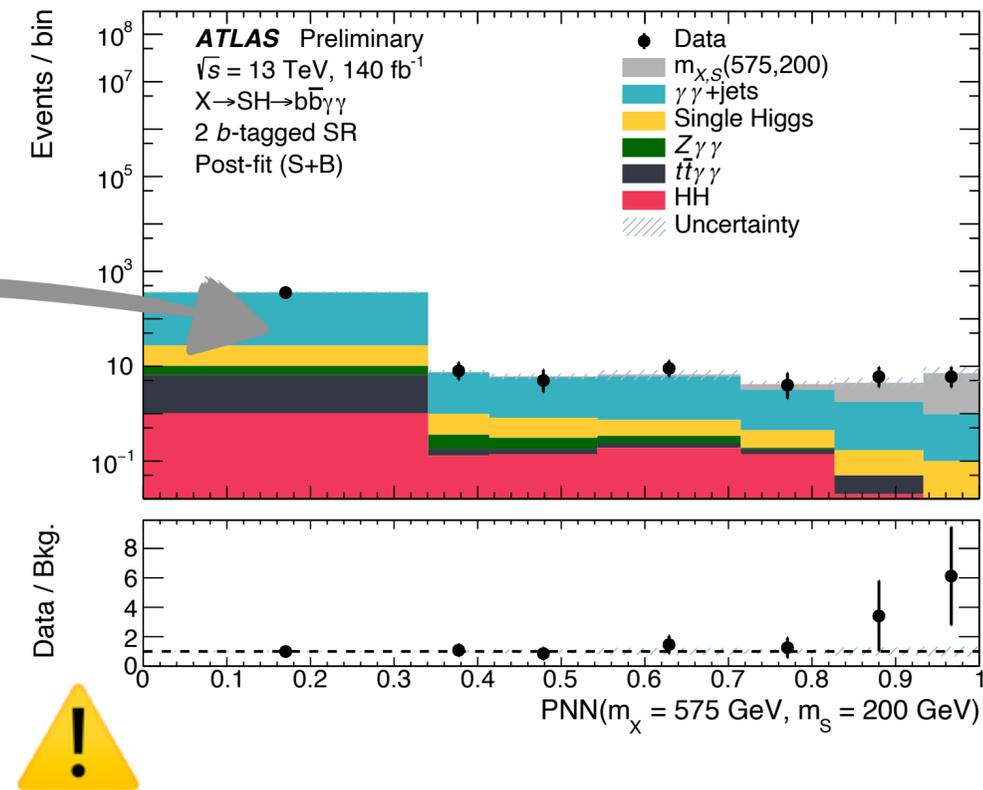
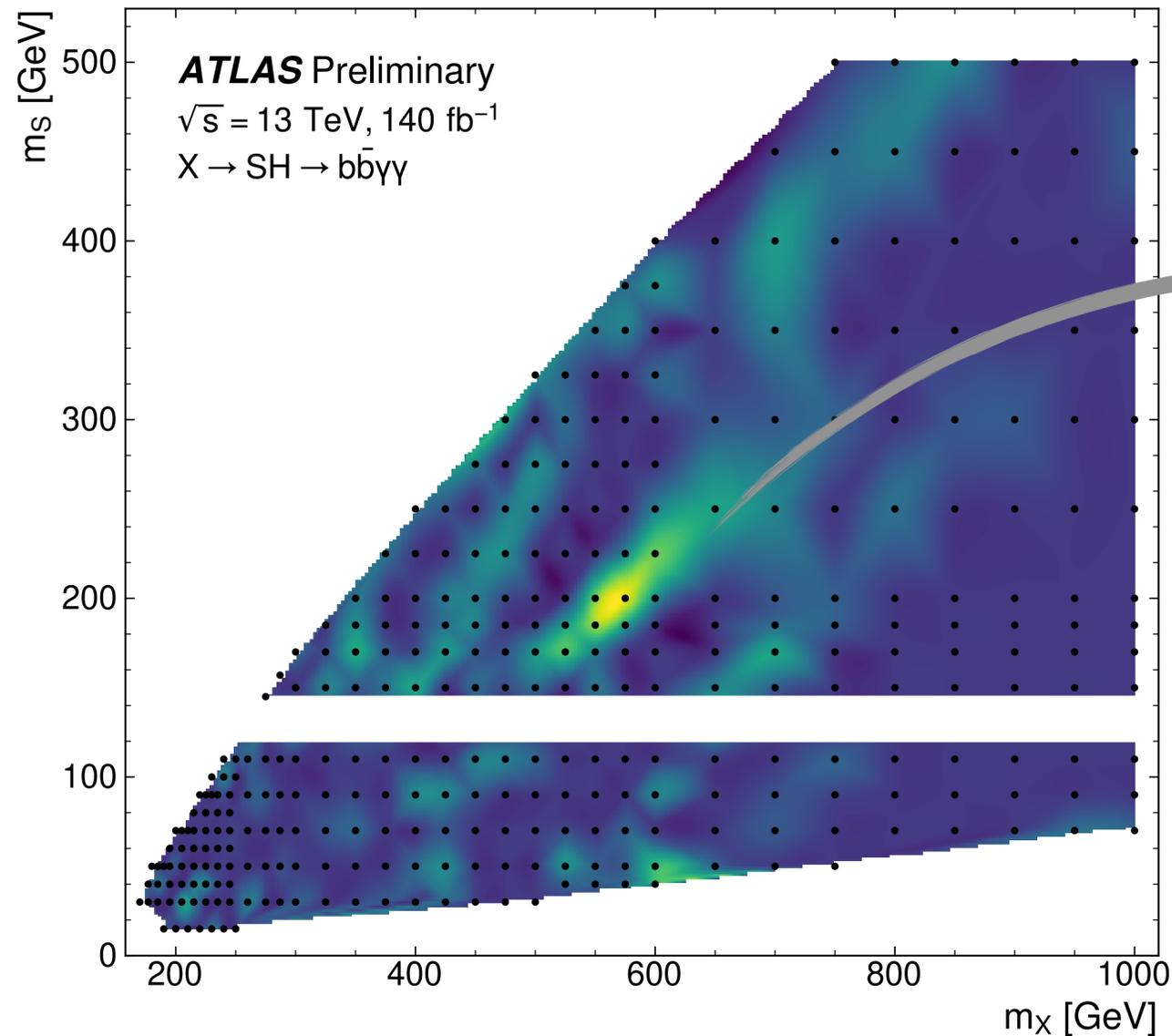
## Fondi risonanti $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ e $H \rightarrow \gamma\gamma$

- Distribuzione dell'output della PNN + normalizzazione stimati con simulazioni MC e predizioni teoriche delle sezioni d'urto secondo il SM.
- Incertezze sistematiche coprono eventuali errori di modellizzazione.



# Risultati: fit segnale + fondo e significanza

- Per ciascun punto  $(m_X, m_S)$  nel piano, la presenza di un **segnale** viene testata da un **fit segnale + fondo** sulla **distribuzione dell'output della PNN nei dati**.
- Per gran parte dei punti  $(m_X, m_S)$ , i **dati** sono **compatibili** con l'**ipotesi di solo fondo**.

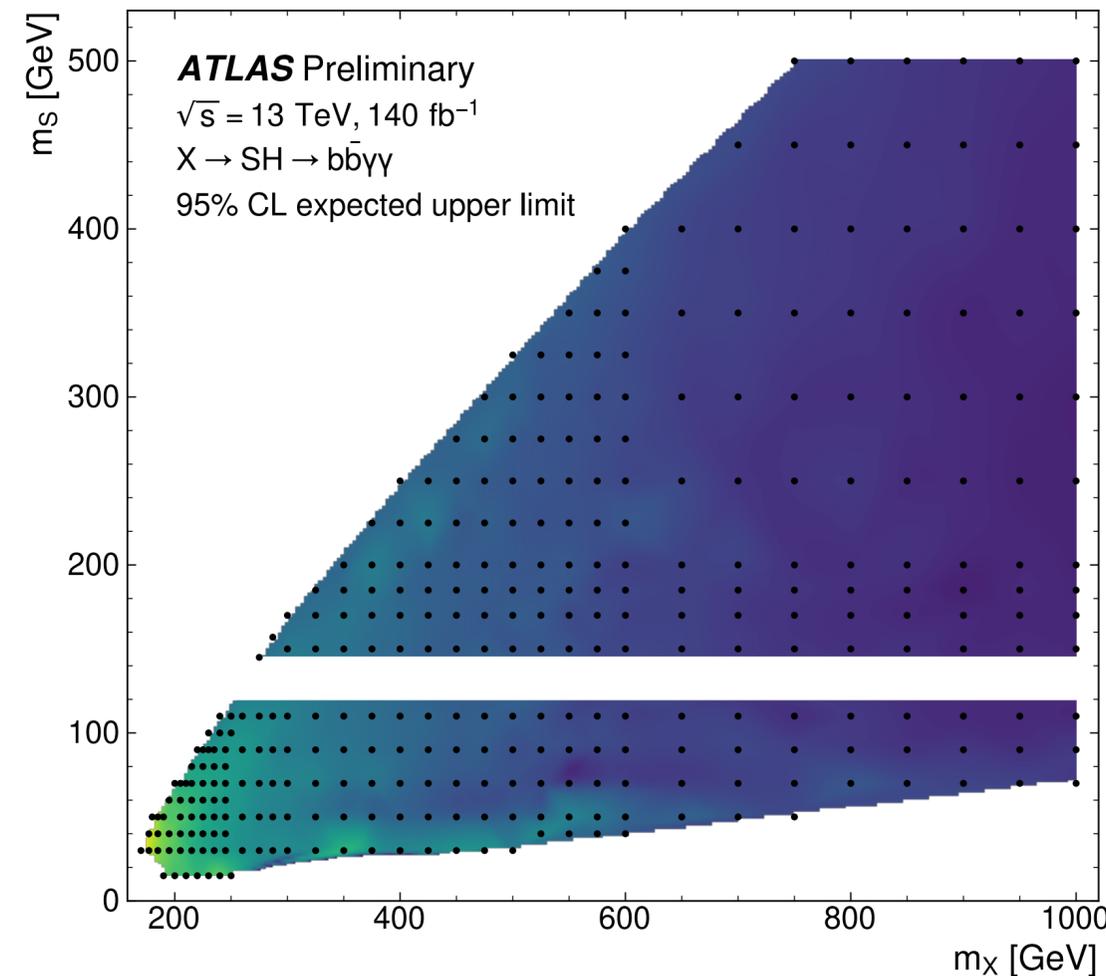
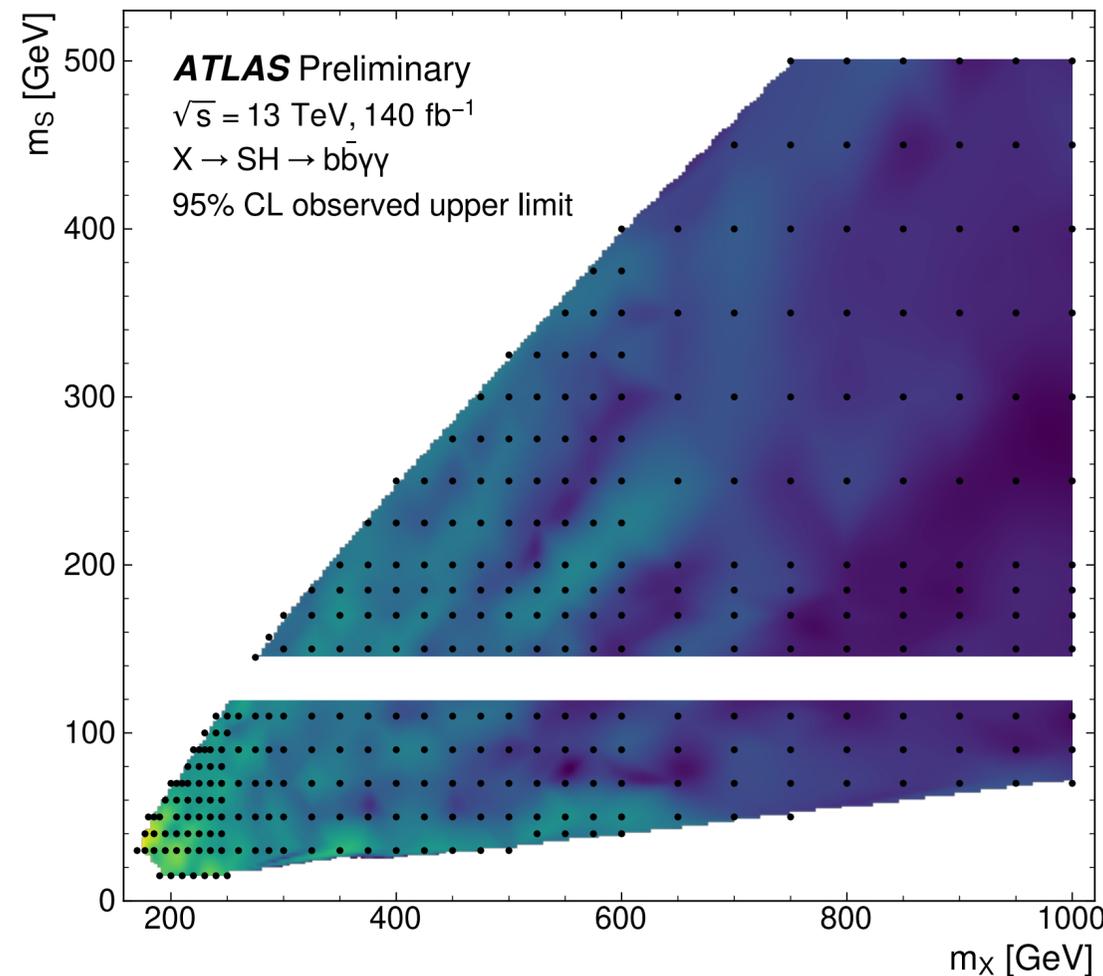


- **Interessante eccesso di segnale rispetto al fondo atteso** intorno a  $(m_X, m_S) = (575, 200) \text{ GeV}$ !
- **Significanza locale (globale) di  $3.5\sigma$  ( $2.0\sigma$ ).**

# Risultati: limiti superiori su $\sigma(pp \rightarrow X) \times \text{BR}(X \rightarrow \text{SH} \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma)$

- Assenza di eccessi di segnale rispetto al fondo atteso significativi ( $> 5\sigma$ ). 😞
- I risultati sono interpretati in termini di **limiti superiori sulla sezione d'urto di produzione**  $pp \rightarrow X$  moltiplicata per la probabilita' di decadimento  $X \rightarrow \text{SH} \times S \rightarrow b\bar{b} \times H \rightarrow \gamma\gamma$ .  $\equiv \sigma(pp \rightarrow X) \times \text{BR}(X \rightarrow \text{SH} \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma)$ !

➡ Nel piano  $(m_X, m_S)$ .



Area  $m_S = 125$  GeV ( $= m_H$ ) gia' coperta da analisi dedicata ([Phys. Rev. D 106 \(2022\) 052001](#)).

# Conclusioni

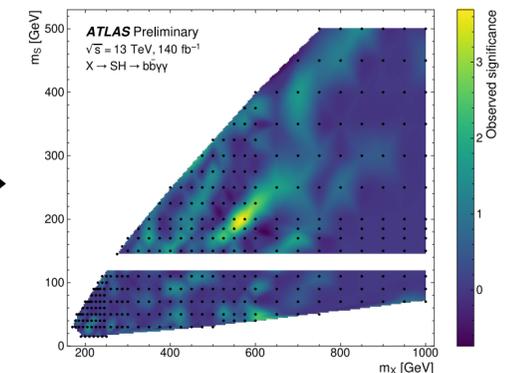
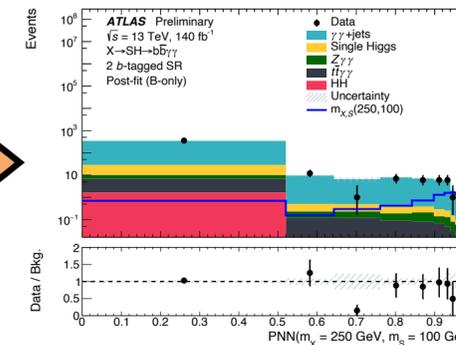
- Abbiamo presentato la ricerca di una **nuova risonanza scalare X**, che decade in una **nuova particella scalare più leggera S** e in un **bosone di Higgs H**, nello stato finale con **due fotoni** e due **quark bottom** nei **dati** raccolti da **ATLAS** durante il **Run 2 di LHC (= 140 fb<sup>-1</sup>)!**

➡ La **fenomenologia**  $pp \rightarrow X \rightarrow S(\rightarrow b\bar{b}) + H(\rightarrow \gamma\gamma)$  @ LHC e' prevista da numerose estensioni del SM, in cui ulteriori particelle scalare (oltre al bosone di Higgs con  $m_H = 125$  GeV) sono **ancora da scoprire!**

- L'analisi ricerca un segnale  $X \rightarrow S(\rightarrow b\bar{b}) + H(\rightarrow \gamma\gamma)$  in un ampio spettro di masse ( $m_X, m_S$ ). ➡ Copre regione finora inesplorata dello spazio delle fasi!
- L'analisi sfrutta una **strategia di modellizzazione innovativa**, in cui la **variabile discriminante finale** e' l'**output di una PNN**.

➡ - **Diversa** dalle **tradizionali** analisi  $H \rightarrow \gamma\gamma$  in **ATLAS**, che si basano su  $m_{\gamma\gamma}$  **come discriminante finale** (vedi presentazione di Laura)!  
- Permette di **massimizzare** la **sensibilità al segnale**, sfruttando le informazioni di tre risonanze (=  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $S \rightarrow b\bar{b}$ , e  $X \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ ).

Selezione  
di-fotone e  
categorie  
1 o 2 b-tag



- Per gran parte dei punti ( $m_X, m_S$ ), i **dati** sono **compatibili** con l'**ipotesi di solo fondo**, e i risultati sono stati interpretati in termini di **limiti superiori** su  $\sigma(pp \rightarrow X) \times BR(X \rightarrow SH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma)$ . ➡ **Nessun indizio** significativo di **nuova fisica!** 😞

➡ **Interessante eccesso di segnale** rispetto all'ipotesi di solo fondo intorno a ( $m_X, m_S$ ) = (575, 200) GeV, con significanza locale (globale) di  $3.5\sigma$  ( $2.0\sigma$ ).

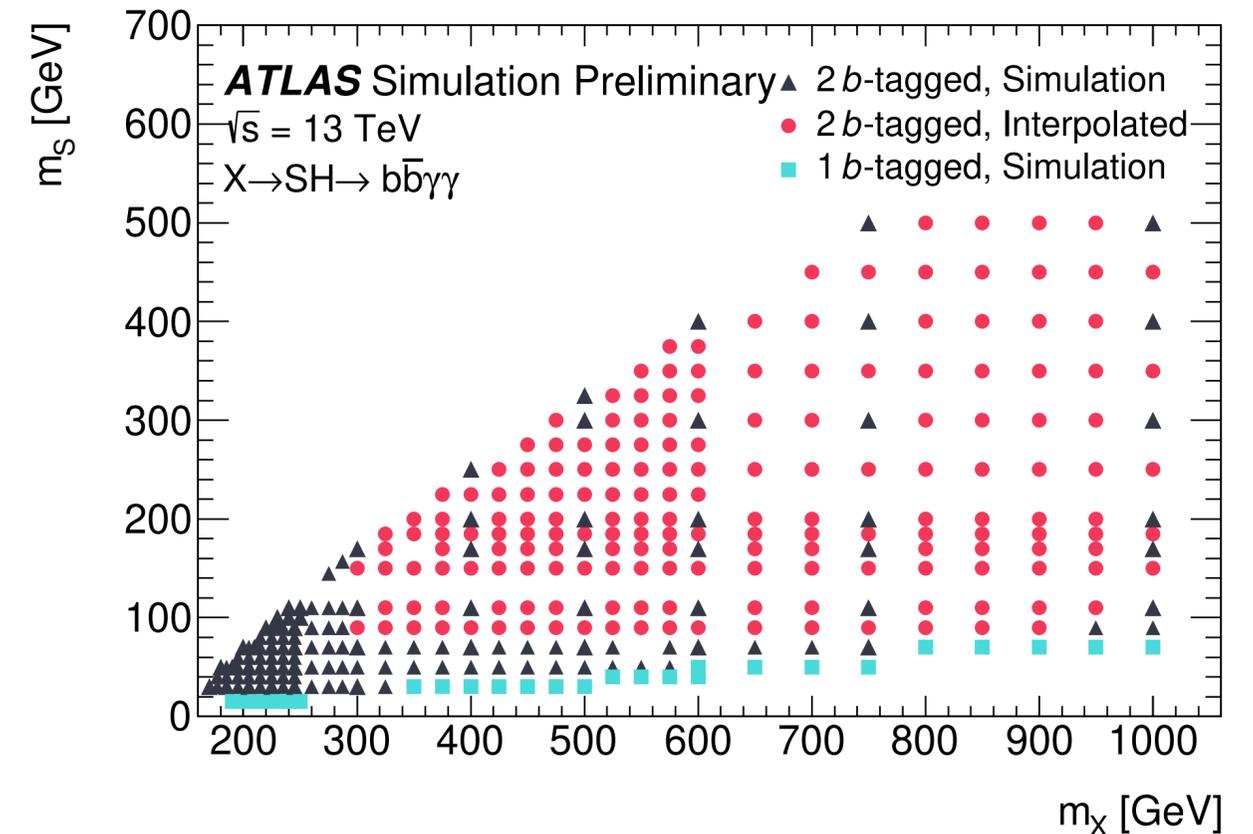
**Grazie per l'attenzione!**

**Backup**

# Interpolazione del segnale nel piano $(m_X, m_S)$

- Grazie all'utilizzo della PNN, l'analisi è **sensibile** ad un **segnale**  $X \rightarrow S(\rightarrow b\bar{b}) + H(\rightarrow \gamma\gamma)$  in **maniera continua** nel piano bidimensionale  $(m_X, m_S)$ .  $\longrightarrow$  La PNN in un punto  $(m_X, m_S)$  è sensibile anche a segnali masse  $(m_X^*, m_S^*)$  "nelle vicinanze".
- **Nella pratica:**
  - $\longrightarrow$  1. Si sceglie una **griglia molto fitta** di punti  $(m_X, m_S)$  nel piano.
  - 2. Per ciascun punto  $(m_X, m_S)$ , si costruisce un istogramma dell'**output della PNN in quel punto** per i fondi (**fotoni + jet**,  $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ , e  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ) per il **segnale**, e per i **dati** nella **SR e CR**.
  - 3. Si testa la presenza del segnale con masse  $(m_X, m_S)$  da un fit **segnale + fondo** sui **dati**.
- Griglia scelta in modo da **non avere "buchi"**, per i quali la **PNN nei punti vicini** non è sensibile ad un segnale.
  - $\longrightarrow$  o Per costruzione, è possibile valutare la PNN per i fondi per qualsiasi punto  $(m_X, m_S)$  del piano!
  - o **Interpolazione del segnale** (= costruire **istogrammi** dell'output della PNN per punti in cui **non sono disponibili MC** di segnale **dedicati**).

- Punti  $(m_X, m_S)$  per i quali viene direttamente testata la presenza del segnale da un fit segnale + fondo (= 360 punti!).
- Grazie alla PNN, la presenza di un segnale nell'intervallo di interesse emergerebbe comunque dall'analisi dei punti  $(m_X, m_S)$  direttamente testati.



# Incertezze sistematiche e modello statistico

Tutti gli ingredienti dell'analisi (= stima del segnale e dei fondi nello spettro output della PNN + incertezze sistematiche) vengono inclusi nel **modello statistico** (descritto con una funzione di likelihood).

Regione di controllo

Regione di segnale

Somma sui **processi**  $p$  (segnale o fondi **risonanti**) che contribuiscono nella **CR**.

Dati osservati nel bin  $i$  nella SR.

$$\mathcal{L} = \text{Pois} \left( n_{CR} \mid \mu^{\gamma\gamma} \cdot N_{CR}^{\gamma\gamma}(\theta) + \sum_p N_{CR}^p(\theta) \right) \times \prod_{i=1}^M \text{Pois} \left( n_{SR,i} \mid \mu^{\gamma\gamma} \cdot N_{SR}^{\gamma\gamma}(\theta) \cdot f_i^{\gamma\gamma}(\theta) + \sum_p N_{SR}^p(\theta) \cdot f_i^p(\theta) \right) \times G(\theta)$$

↓
↓
↓

Dati osservati nella CR.
 Prodotto sui **bin**  $i$  dell'**istogramma** dell'**output** della PNN nella SR.
Somma sui **processi**  $p$  (segnale o fondi risonanti) che **contribuiscono** nella SR.



- $\mu^{\gamma\gamma}$  = fattore di normalizzazione del fondo fotoni + jets.
- $\theta$  = "nuisance parameters", con cui si parametrizzano le incertezze sistematiche sulla normalizzazione e sulla distribuzione della PNN.
- $N_j^p(\theta)$  = numero di eventi atteso del processo  $p$ , che contribuisce nella regione  $j$  (= CR o SR).
  - ➔ Se  $p$  = segnale:  $N_j^{\text{segnale}}(\mu, \theta) = \mu \cdot N_j^{\text{segnale}}(\theta)$ , dove il fattore di normalizzazione  $\mu$  e' libero (nel fit segnale + fondo).
- $f_i^p(\theta)$  = numero di eventi atteso del processo  $p$  nel bin  $i$  dell'output della PNN nella SR (normalizzato a 1).
- $G(\theta)$  = termine gaussiano, che penalizza configurazioni in cui i parametri di disturbo  $\theta$  sono molto diversi dal valore nominale.