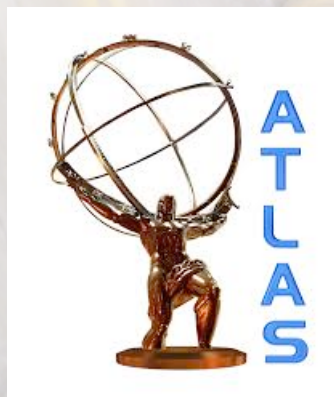


Ricerche di nuova fisica nel canale a due fotoni in ATLAS e CMS



L. Carminati
Universita' e Sezione INFN Milano
per le collaborazioni ATLAS e CMS



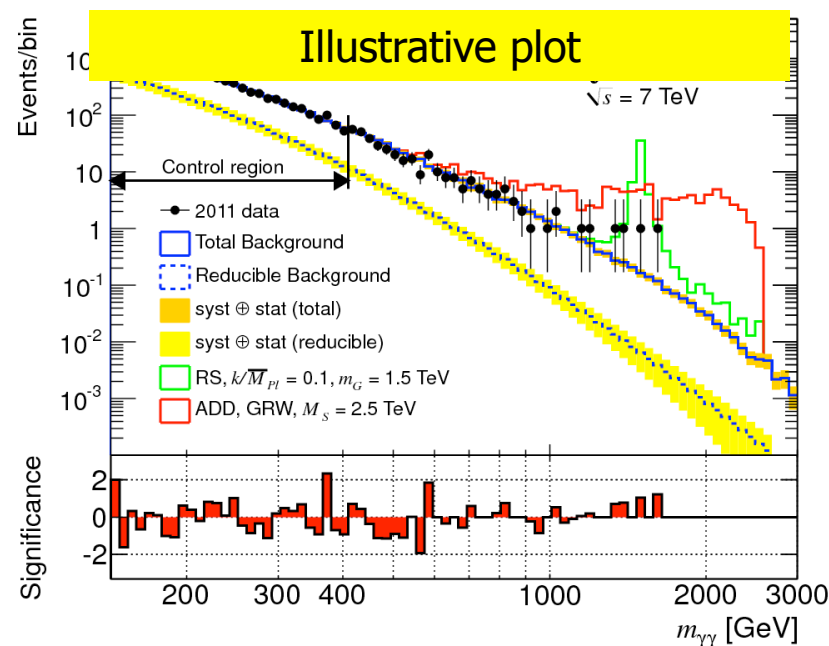
Modelli di benchmark e strategie di analisi

Ricerche di nuova fisica nel canale a due fotoni in ATLAS e CMS utilizzando modelli di benchmark

- ❑ Estensioni esotiche dello SM: gravitone (spin2) nel modello RS (risonante) ma anche ADD (non-risonante)
- ❑ Estensioni del settore Higgs : scalare aggiuntivo che decade in due fotoni

Strategia di analisi in breve :

- ❑ Cercare due fotoni isolati di alto momento trasverso.
- ❑ Cercare eccessi localizzati (RS, scalar) o "larghi" (ADD) nello spettro di massa invariante dei due candidati
 - ❑ Irriducibile $\gamma\gamma + \gamma j$ e jj quando uno o due jets sono identificati come fotoni
- ❑ Le analisi dei due esperimenti differiscono per alcuni dettagli
 - ❑ Ottimizzazione dei tagli (sensitività' vs generalita')
 - ❑ Strategia di modellizzazione del background



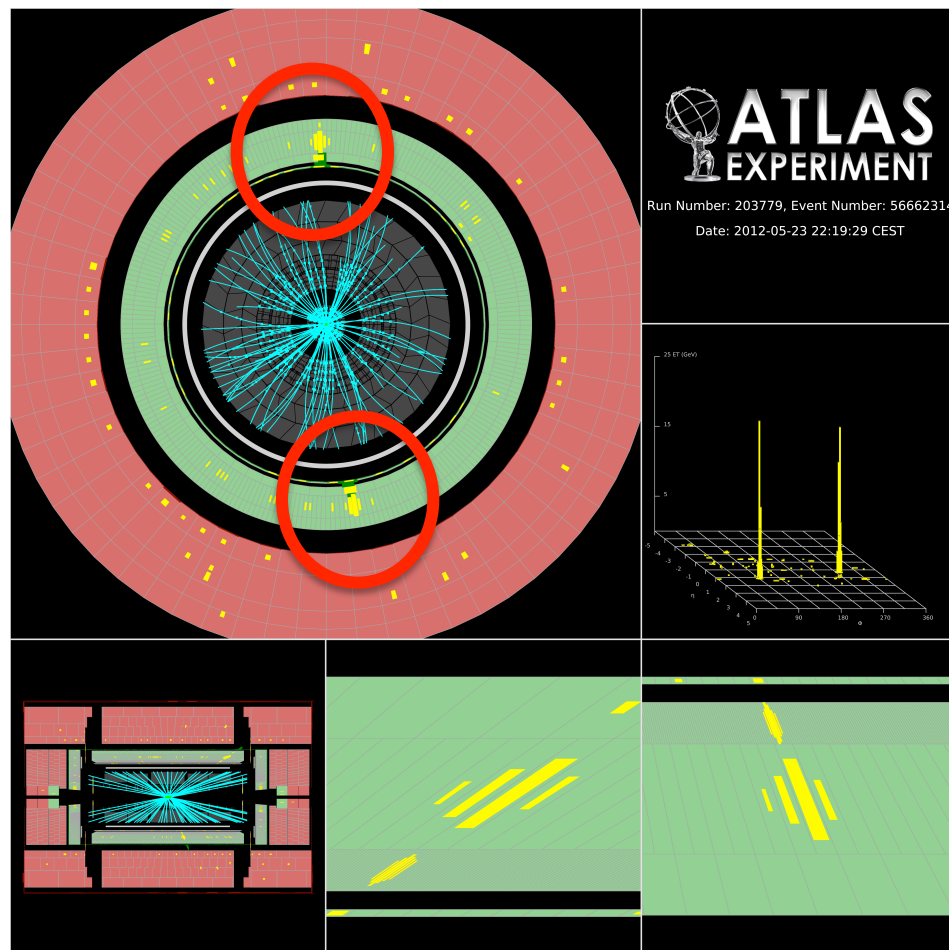
La performance del detector e' il punto chiave

❑ Background rejection:

- ❑ massima rigezione di jets alta efficienza per fotoni veri (normalmente $> \sim 80-90\%$)
- ❑ Misurata accuratamente in situ, con eventi Zee, Zee($\mu\mu$) γ , fotoni inclusivi.

❑ Ricostruzione massa invariante:

- ❑ Calibrazione cella per cella detector level e ottimizzazione su MC con tecniche multivariate
- ❑ Stima in-situ della scala di energia e della risoluzione (e delle loro incertezze!)
- ❑ Ricostruzione e identificazione del vertice primario



Selezione degli eventi (ATLAS)

- ❑ 3.2 fb⁻¹ di dati a 13 TeV : nessun cambiamento rispetto a dicembre 2015
- ❑ I tagli di selezione sono ottimizzati separatamente per la ricerca di uno scalare (Higgs-like) o di uno spin-2 (gravitone nel modello Randall-Sundrum)
- ❑ Pre-selezione :
 - ❑ $E_T^{\gamma 1} > 40$ GeV, $E_T^{\gamma 2} > 30$ GeV in $|\eta_\gamma| < 2.37$, escludendo 1.37-1.52
 - ❑ Photon identification basata sullo sviluppo dello sciame nel calorimetro EM
 - ❑ Photon isolation (calorimetrica, cono 0.4 + track isolation)

Higgs like (spin-0) selection

- ❑ $E_T^{\gamma 1} > 0.4 m_{\gamma\gamma}$, $E_T^{\gamma 2} > 0.3 m_{\gamma\gamma}$ (+20% significance per $m_X > 600$ GeV)
- ❑ Effectively deplete forward regions
- ❑ Ricerca model-independent: limiti sulla sezione d'urto fiduciale
- ❑ Search range $m_X = [200 \text{ GeV} - 2 \text{ TeV}]$ and $\Gamma_X/m_X = [0\% - 10\%]$

acceptance x efficiency da 40% a 60%

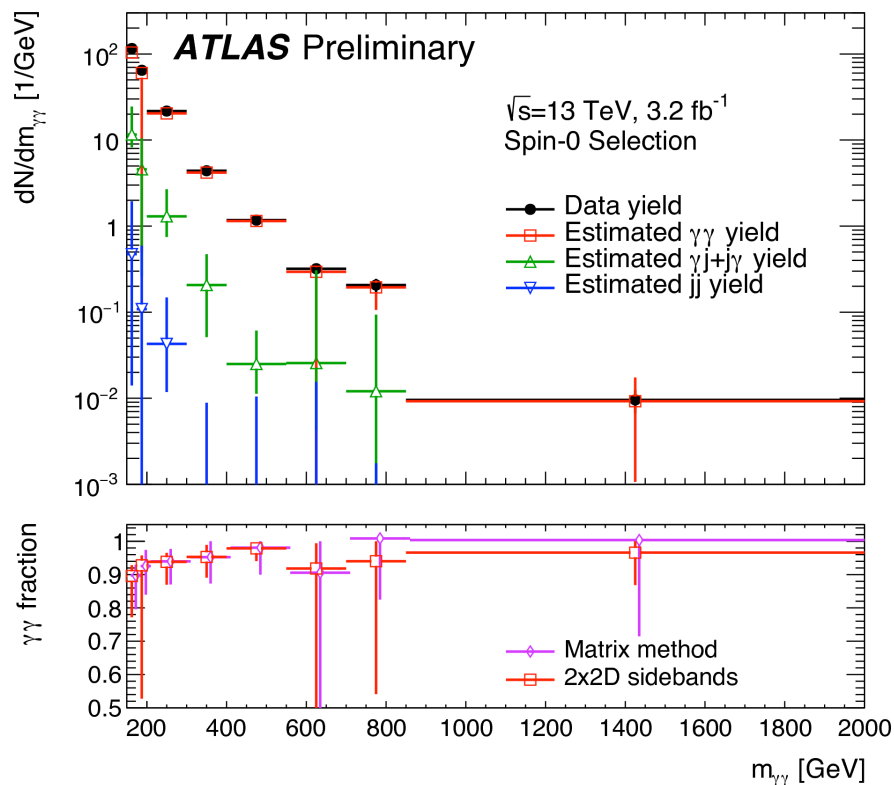
Graviton like (spin-2) selection

- ❑ Cinematica di RS graviton usata come benchmark
- ❑ $E_T^{\gamma 1} > 55$ GeV, $E_T^{\gamma 2} > 55$ GeV : selezione semplice, generale
- ❑ Search range $m_G = [500 \text{ GeV} - 3 \text{ TeV}]$
 $\kappa/M_{Pl} = [0.01-0.3]$ ($\Gamma_G/m_G \sim [0.01\% - 11\%]$)
 - ❑ $\Gamma_G \sim 1.44 (\kappa/M_{Pl})^2$

acceptance x efficiency da 45% a 60%

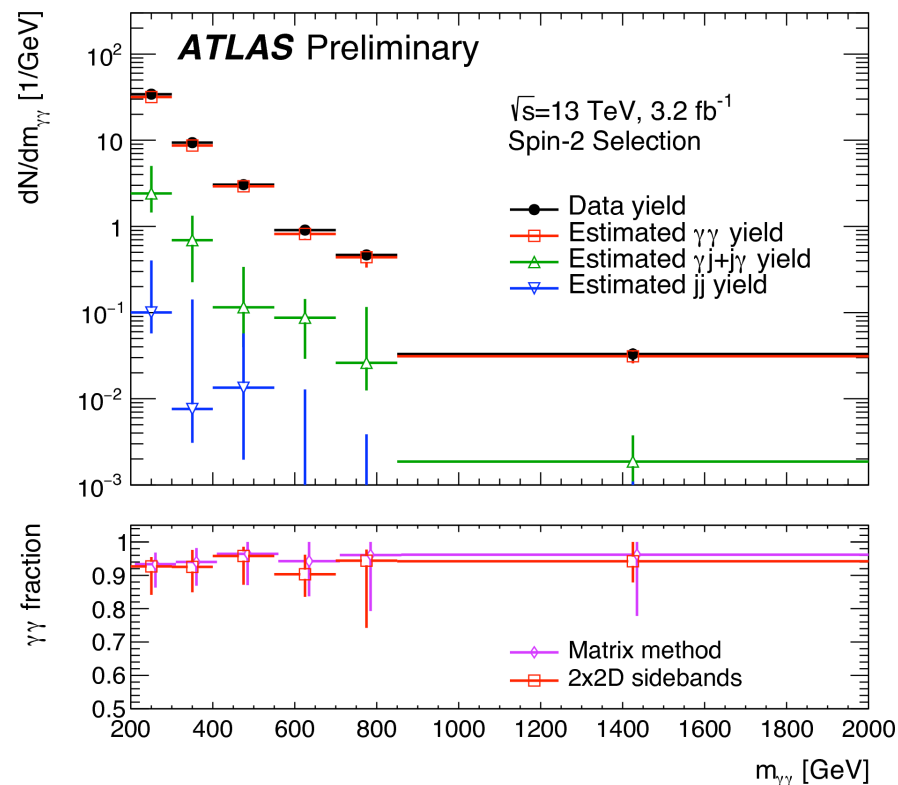
Selezione degli eventi (ATLAS)

Spin-0 selection



□ Purezza del campione $93^{+3}_{-8}\%$

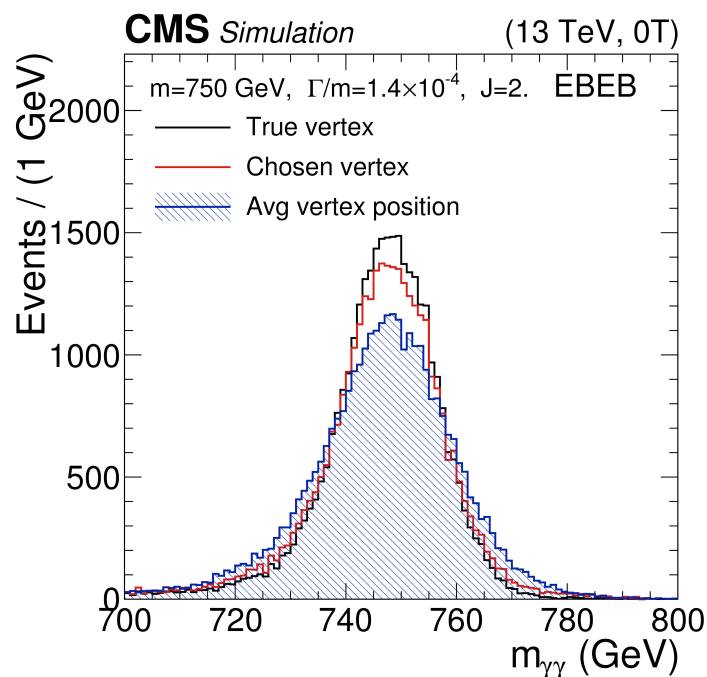
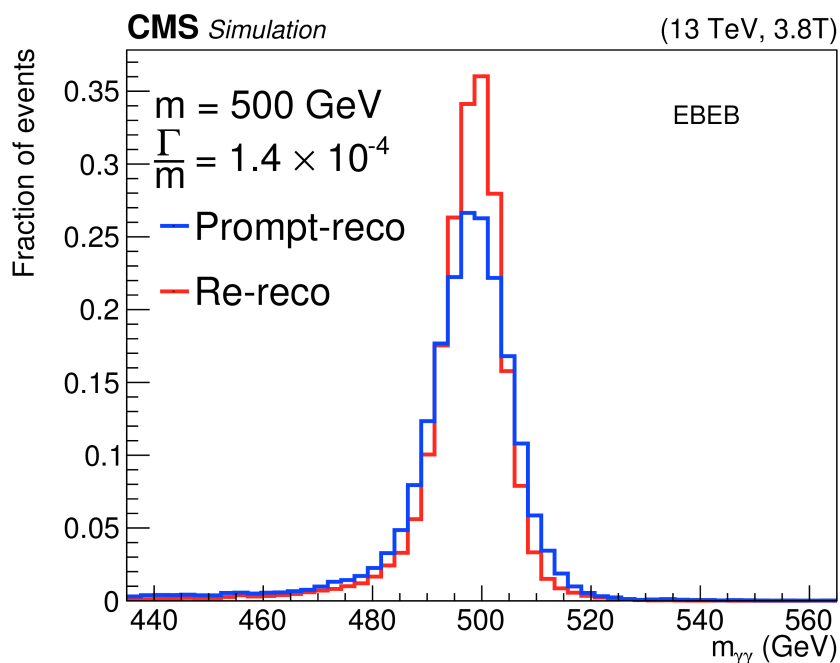
Spin-2 selection



□ Purezza del campione : $94^{+3}_{-8}\%$

Selezione degli eventi (CMS)

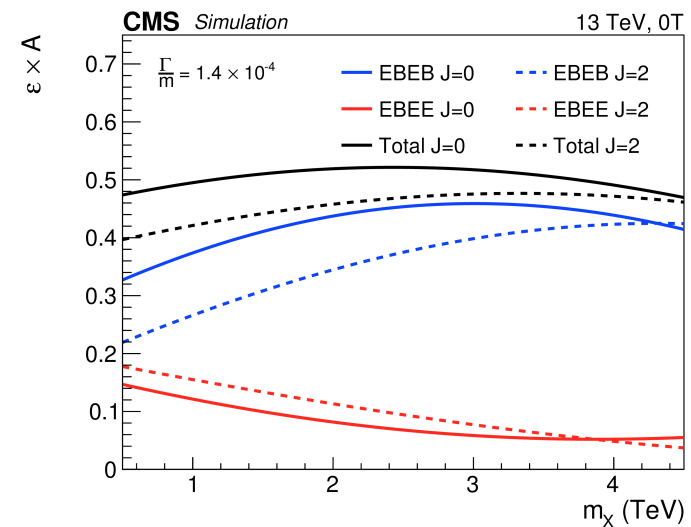
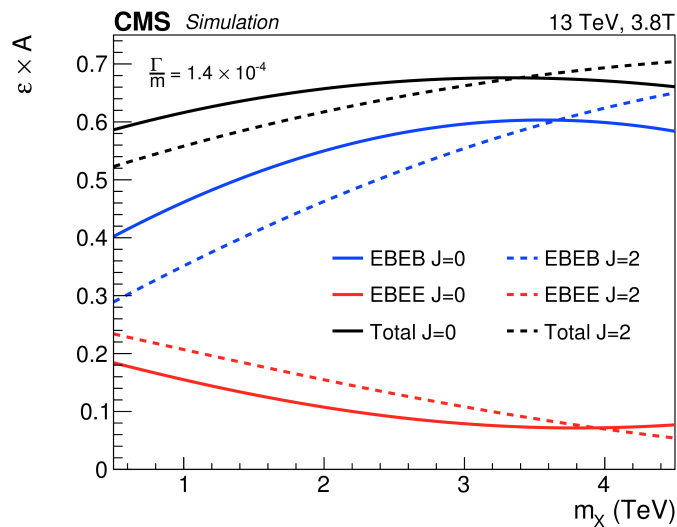
- ❑ 0.6 fb⁻¹ di dati senza campo magnetico: identificazione dei fotoni, correzioni per l'energy scale, algoritmo di identificazione del vertice primario (90% di efficienza a 3.8 T, 60% a 0T) ri-ottimizzati ad hoc
 - ❑ Ulteriore incremento del 10% della sensitività'
- ❑ Migliorata la calibrazione dei singoli canali utilizzando tutti i dati 2015 : 30% di miglioramento della risoluzione in massa per segnali sopra 500 GeV
 - ❑ 10% di miglioramento della sensitività' dell'analisi



Selezione degli eventi (CMS)

Combinazione di 2.7 fb^{-1} di dati raccolti con il magnete a 3.8 T con 0.6 fb^{-1} di dati con il magnete off + calibrazione per fotoni migliorata

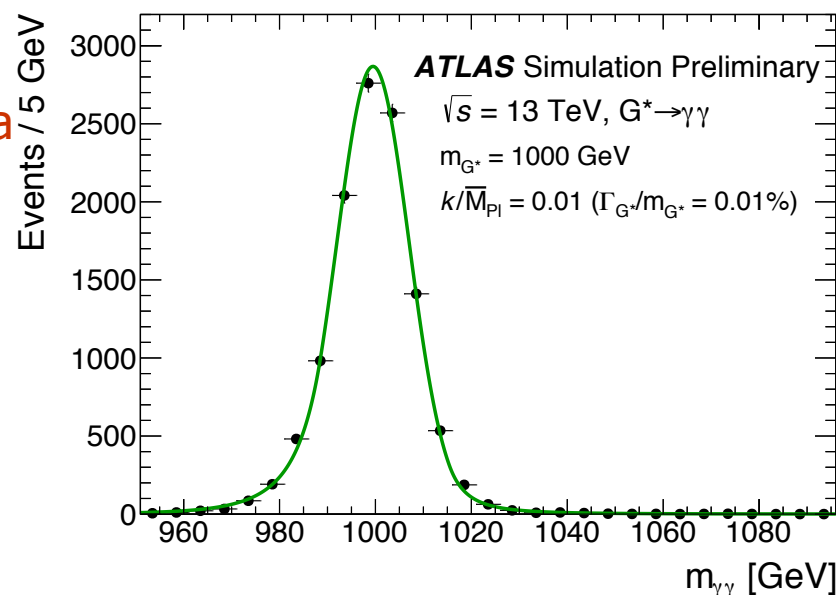
- E_T^γ di entrambi i fotoni maggiore di 75 GeV.
- $|\eta_\gamma| < 2.5$ escludendo la regione 1.44 and 1.57.
- Photon identification (85%-90% per 3.8T, 70%-85% per 0T) + particle flow isolation
- Almeno un fotone con $|\eta| < 1.44$ (i.e. eventi EE-EE sono rigettati).
- $m_{\gamma\gamma} > 230 \text{ GeV}$ per eventi EBEB(barrel-barrel). Per eventi con un fotone nell'endcap, si richiede $m_{\gamma\gamma} > 320 \text{ GeV}$:



Eventi sono categorizzati : EB-EB/EB-EE e 3.6T/0T fit simultaneo nelle 4 categorie

Modellizzazione del segnale

- ❑ Si utilizzano degli eventi MC (da Pythia o Powhag a seconda dei casi) per costruire la distribuzione $m_{\gamma\gamma}$ attesa per un determinato segnale dopo le selezioni (inclusendo gli effetti di rivelatore)
- ❑ Si estrae una parametrizzazione della forma attesa di segnale in funzione della massa (e della larghezza o coupling):
 - ❑ Convoluzione tra la lineshape teorica con la risoluzione sperimentale (CMS and ATLAS per l'analisi spin-2)
 - ❑ Modellizzazione efficace utilizzando una 'double sided crystal ball' (ATLAS spin0 analysis) con parametri dipendenti dalla massa e interpolati in larghezza



$$N \cdot \begin{cases} e^{-t^2/2} & \text{if } -\alpha_{\text{low}} \leq t \leq \alpha_{\text{high}} \\ \frac{e^{-0.5\alpha_{\text{low}}^2}}{\left[\frac{\alpha_{\text{low}}}{n_{\text{low}}} \left(\frac{n_{\text{low}}}{\alpha_{\text{low}}} - \alpha_{\text{low}} - t \right) \right]^{n_{\text{low}}}} & \text{if } t < -\alpha_{\text{low}} \\ \frac{e^{-0.5\alpha_{\text{high}}^2}}{\left[\frac{\alpha_{\text{high}}}{n_{\text{high}}} \left(\frac{n_{\text{high}}}{\alpha_{\text{high}}} - \alpha_{\text{high}} + t \right) \right]^{n_{\text{high}}}} & \text{if } t > \alpha_{\text{high}}, \end{cases}$$

Modellizzazione del background: forma funzionale (ATLAS)

Approccio agnostico : usare una forma funzionale per fittare i dati e aggiungere una sistematica signal-like per tenere conto del fatto che la forma funzionale possa non descrivere bene i dati

❑ Costruire un template (noto) rappresentativo del background : componente irriducibile da Sherpa MC e componente riducibile da control samples nei dati. Il campione finale viene costruito mescolando i campioni secondo le proporzioni misurate nei dati.

❑ Costruire una famiglia di funzioni con un numero crescente di gradi di liberta'

$$f_{(k)}(x; b, \{a_k\}) = N(1 - x^{1/3})^b x^{\sum_{j=0}^k a_j (\log x)^j} \quad x = \frac{m_{\gamma\gamma}}{\sqrt{s}}$$

❑ Girare un fit S+B fit e misurare lo "spurious signal" (SS) nel range di massa di interesse : si tengono le funzioni per cui SS e' < 20% incertezza sul background

❑ Tra le funzioni candidate si decide quale prendere utilizzando un F-test : k=0

❑ Si parametrizza lo SS in funzione della massa e della larghezza e lo si aggiunge al modello S+B

Modellizzazione del background : forma funzionale (CMS)

Approccio agnostico : usare una forma funzionale per fittare i dati e aggiungere una sistematica signal-like per tenere conto del fatto che la forma funzionale possa non descrivere bene i dati

- ❑ Si sceglie una forma funzionale, fittata separatamente nelle 4 categorie

$$f(m_{\gamma\gamma}) = m_{\gamma\gamma}^{a+b \cdot \log(m_{\gamma\gamma})}$$

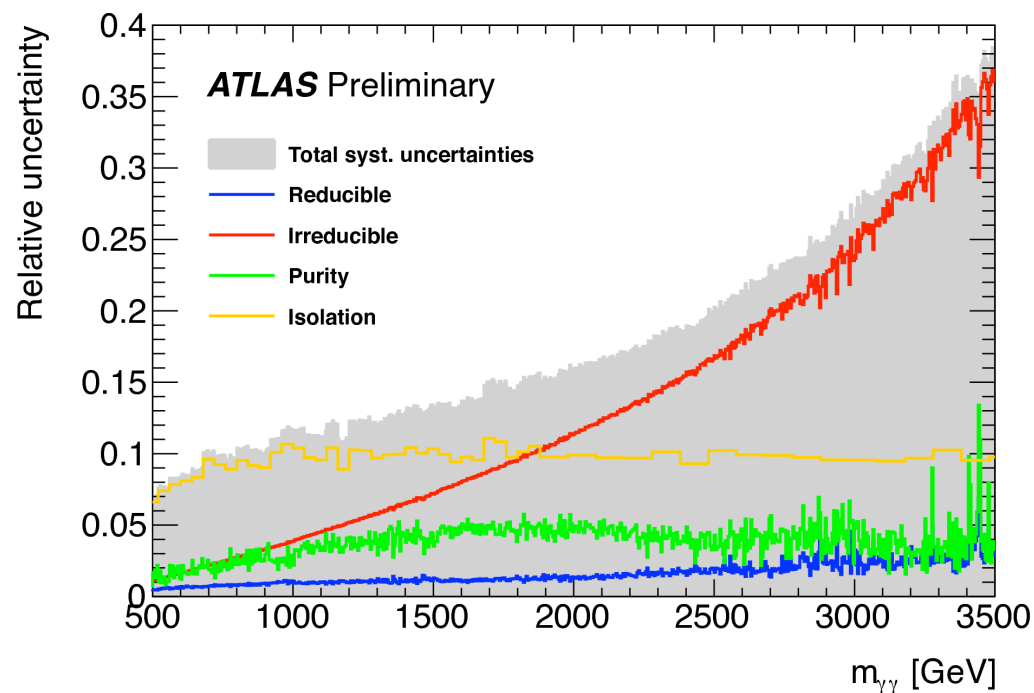
- ❑ Si costruisce un template MC rappresentativo dei dati
- ❑ Si definiscono diverse finestre in massa, si generano sets di pseudo-dati e si controllano le distribuzioni dei pulls eventi fittati-eventi veri
- ❑ Si aggiunge un 'bias' term alla forma di background finché la mediana della distribuzione dei pulls $e' < 0.5$
- ❑ Si aggiunge un termine signal-like al modello di background (valutando in contributo del 'bias' term sotto il picco di segnale)

Modellizzazione del background : MC background template (ATLAS)

Sfruttare le conoscenze che abbiamo della fisica dei processi di fondo

- ❑ Costruire un MC template da Sherpa ripesato su Diphox (NLO) per irriducibile $\gamma\gamma$
- ❑ La shape della componente riducibile dai dati in campioni di controllo
- ❑ I campioni vengono mescolati secondo le frazioni misurate nei dati ($m_{\gamma\gamma} < 500\text{GeV}$)

- ❑ Le incertezze sul fondo irriducibile da PDF variations , scales variations, alpha in Diphox
- ❑ Incertezze sulla forma della background riducibile da variazioni nelle control regions
- ❑ Incertezza nel mix dei campioni dalle incertezze sulla stima in situ
- ❑ Isolation uncertainties dal matching del parton level cut Sherpa-Diphox



Implementati nel modello come 4 nuisance parameters (fully correlated tra bins)+incertezze bin a bin per la statistica finita del MC

Modello e fit sui dati

I dati selezionati sono descritti da una funzione di likelihood del tipo:

$$L(\mu, \theta) = \prod_{i=1}^{N_{\text{events}}} \left[\mu S(m_i | \theta_S) + B(m_i | \theta_B) \right] \cdot \text{Poisson}(N_{\text{events}} | N_B + \mu N_S)$$

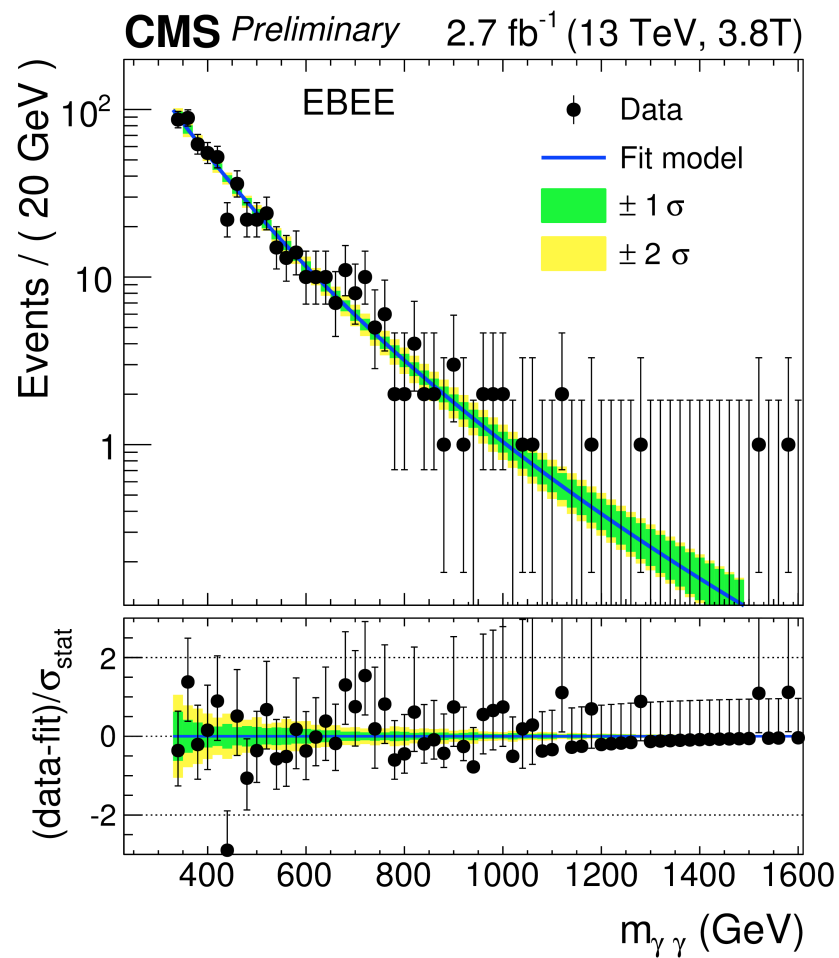
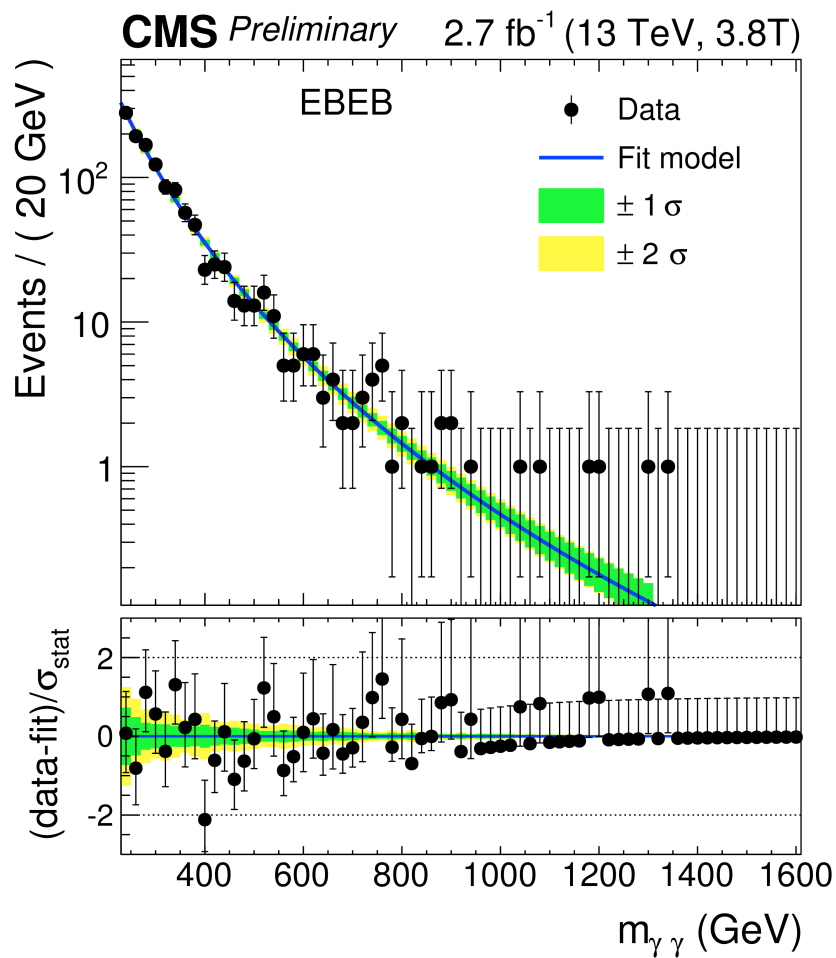

PDF di segnale : puo' essere una DSCB o convoluzione lineshape con risoluzione sperimentale

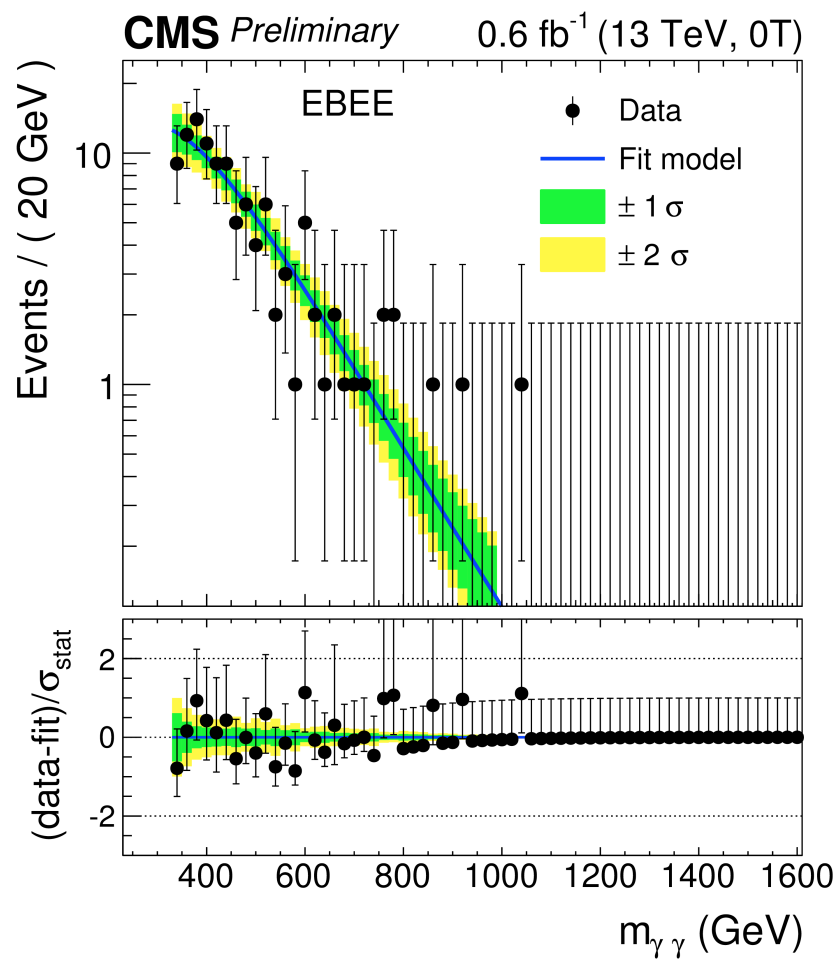
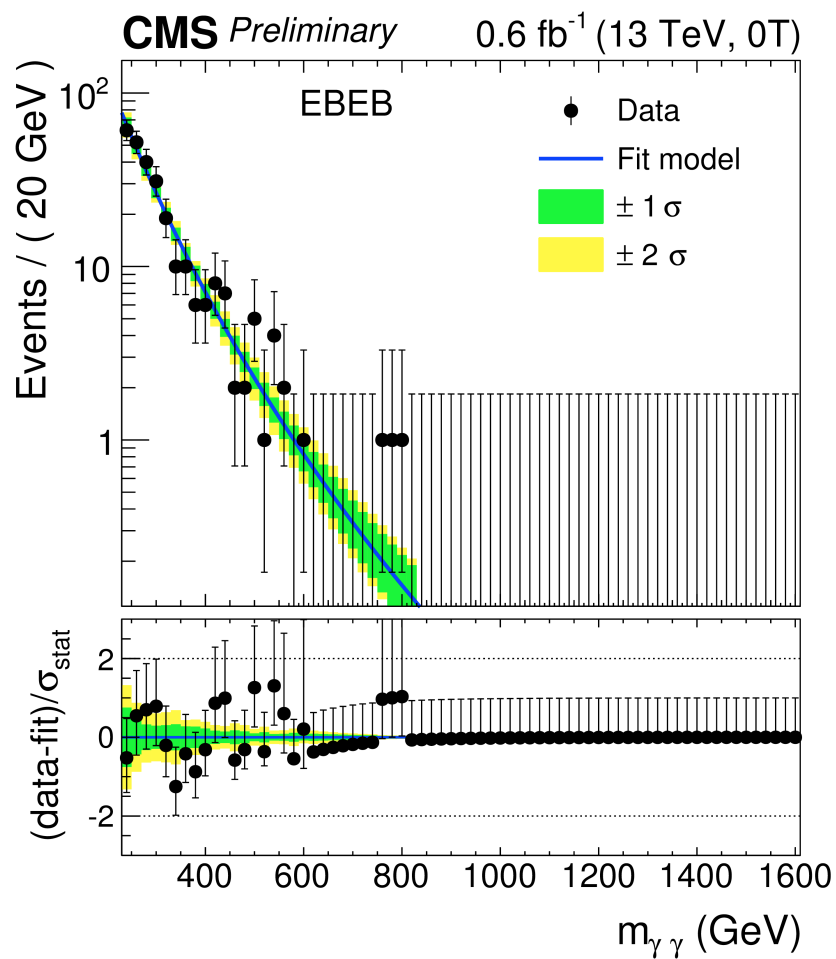
PDF di fondo: puo' essere una forma funzionale o un MC template

- ❑ Le incertezze sulla forma del segnale (energy scale e risoluzione), sull' accettanza e la detector efficiency, sono introdotti nel modello come parametri di nuisance (con constraints gaussiani)
- ❑ I parametri del background sono liberi nel caso della forma funzionale, sono parametri di nuisance (con constraints gaussiani) nel caso del MC template

Plots di massa invariante (CMS)

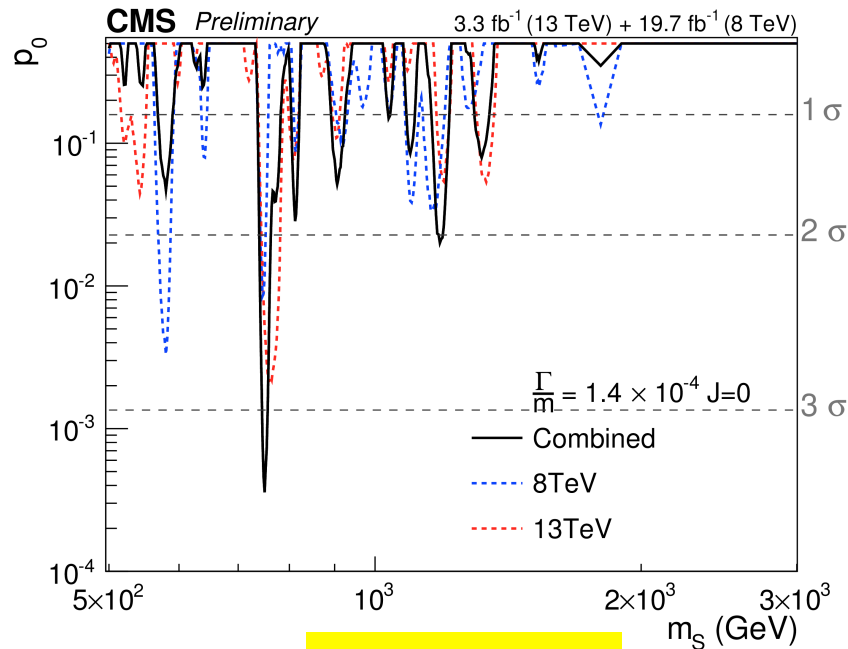
CMS-PAS-EXO-16-018





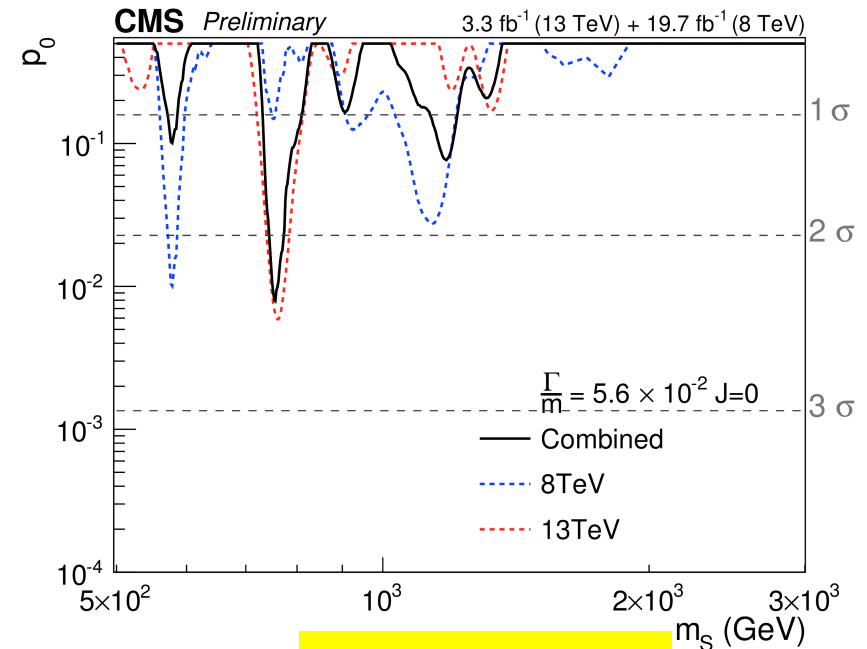
Risultati da CMS : p-value

Combinazione dell'analisi a 13 TeV con quella a 8 TeV



13 TeV only

- ❑ La deviazione piu' consistente dalla null-hypothesis per $m_\chi = 760$ GeV e $\Gamma/m = 1.4 \times 10^{-2}$.
- ❑ Significanza locale: $2.8-2.9 \sigma$
- ❑ Significanza globale $< 1\sigma$

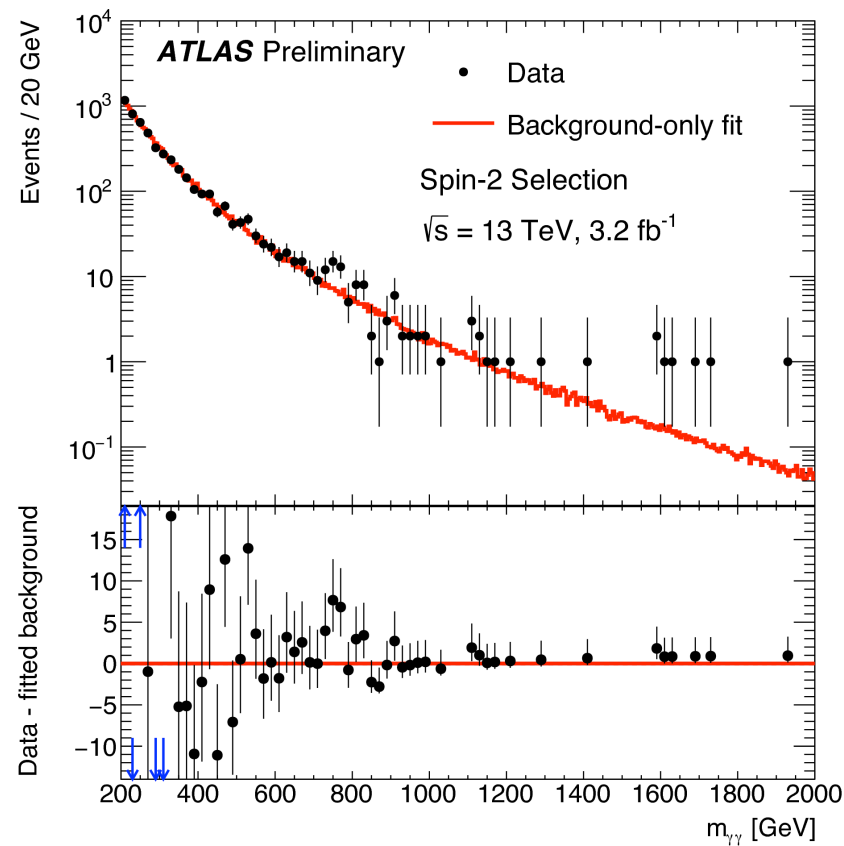
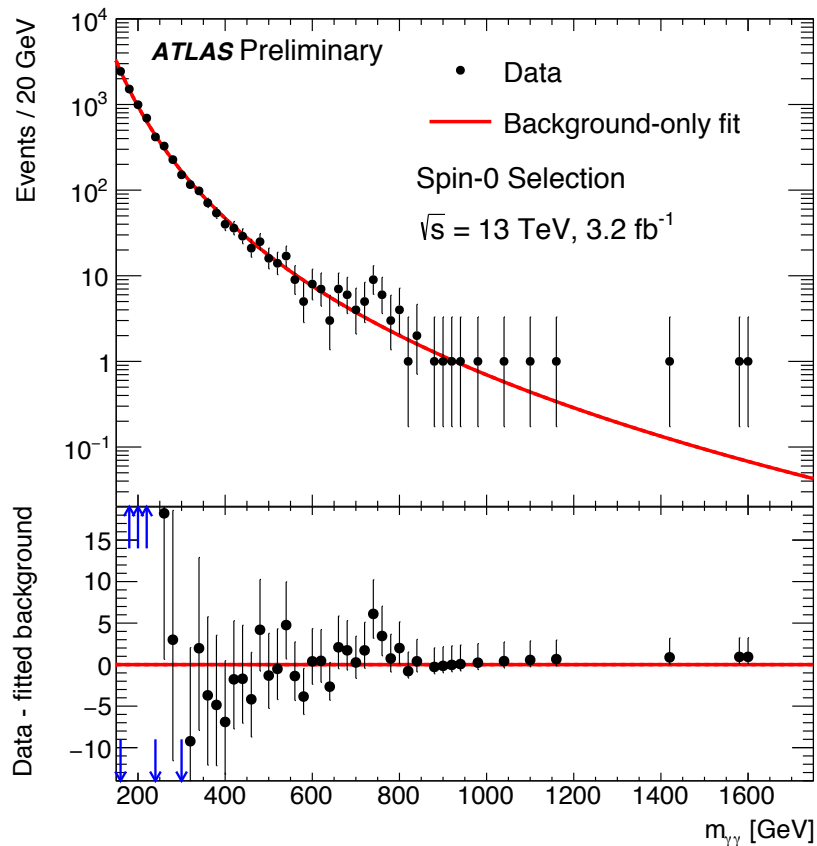


13 TeV+8 TeV

- ❑ La deviazione piu' significativa dalla null-hypothesis a $m_\chi = 750$ GeV e narrow width (1.4×10^{-4}).
- ❑ Local significance: 3.4σ
- ❑ Global significance: 1.6σ

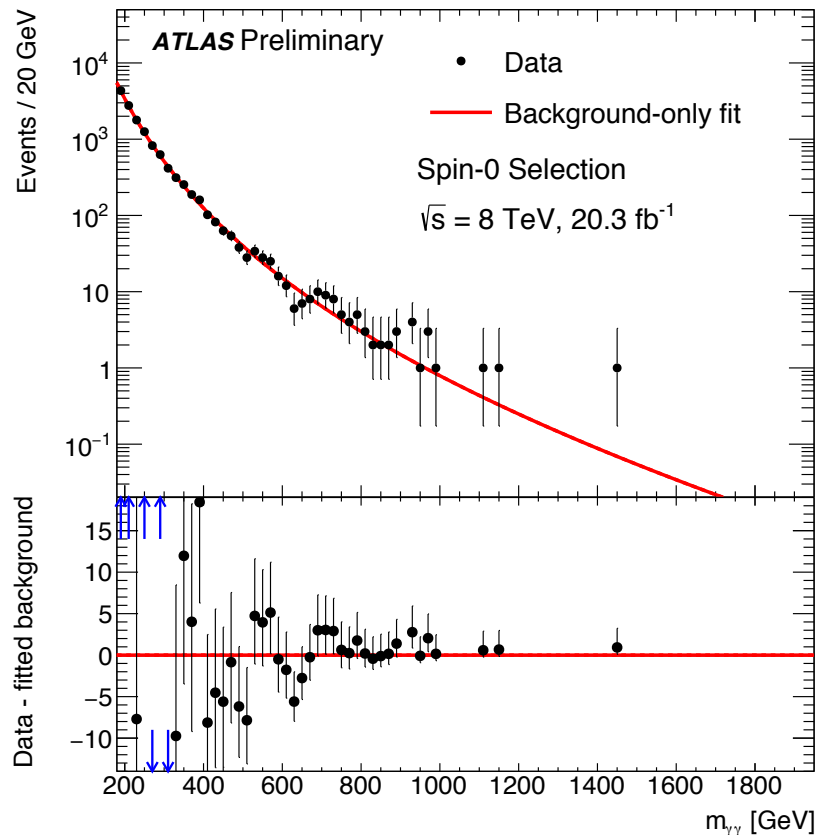
Diphoton invariant mass (ATLAS) at 13 TeV

ATLAS-CONF-2015-081



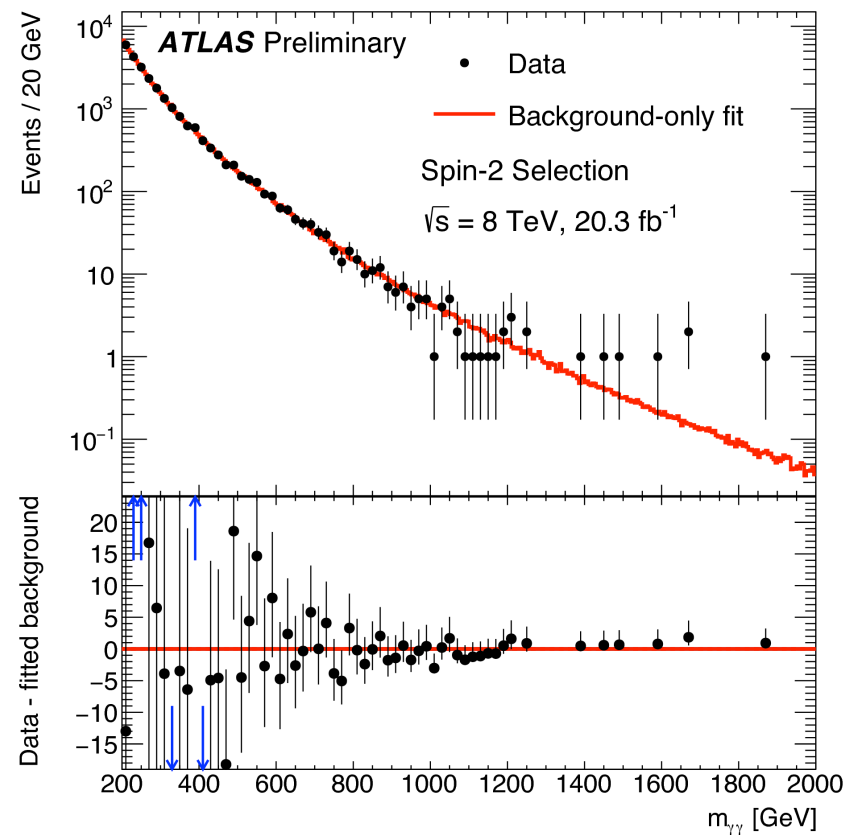
Diphoton invariant mass (ATLAS) a 8 TeV

- ❑ Nessuna ri-ottimizzazione delle selezioni dell'analisi. Update alle piu' recente calibrazione, geometria del detector e isolation
- ❑ Range dell'analisi scalare estesa oltre il limite fissato nel run 1
- ❑ Modesto eccesso a 1.9σ nella selezione scalare, nulla in quella spin-2



30/03/16

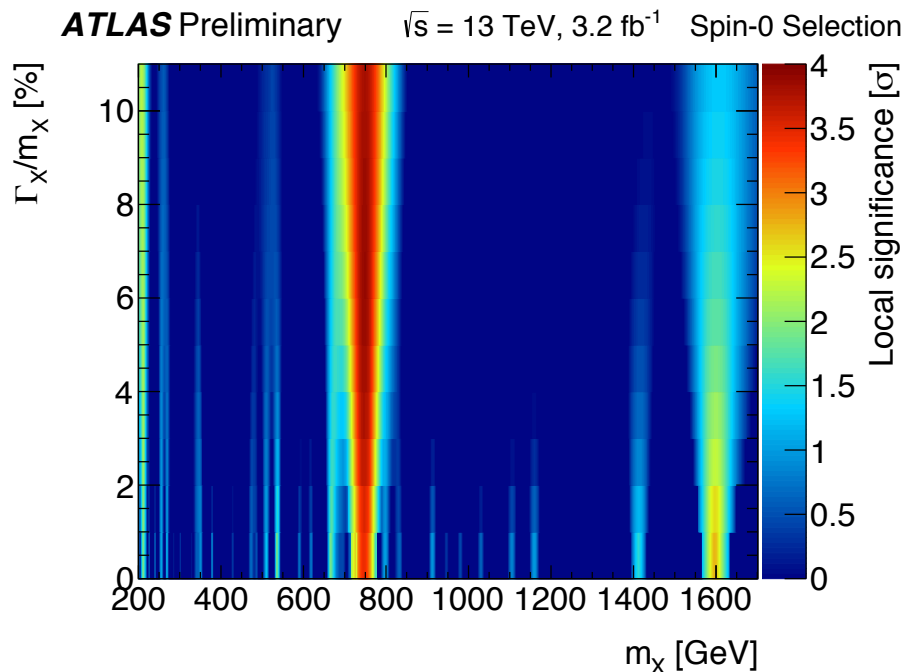
IFAE 2016



17

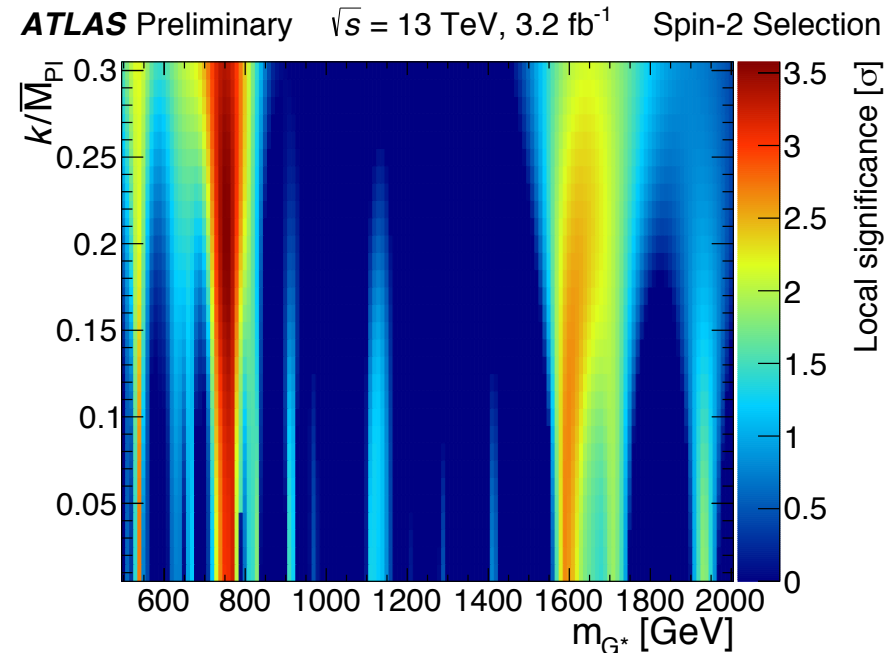
Results : 2D scan del p0

- ❑ Massima significanza : 750 GeV per large width (6%) con 3.9σ local significance. Global significance 2.0σ . 1.9σ excess nei dati a 8 TeV alla stessa mass/width.
 - ❑ Compatibilita' : tensione a 1.2σ e 2.1σ assumendo uno scaling xs per gg(4.7) or qq (2.7)
- ❑ Massima significanza: 750 GeV per large width $k/M_{\text{pl}}=0.21$ (6%) con 3.6σ local significance. Global significance 1.8σ . No eccesso nei dati 8 TeV alla stessa mass/width.
 - ❑ Compatibilita' : tensione a 2.7σ e 3.6σ assumendo uno scaling xs per gg (4.7) or qq (2.7)



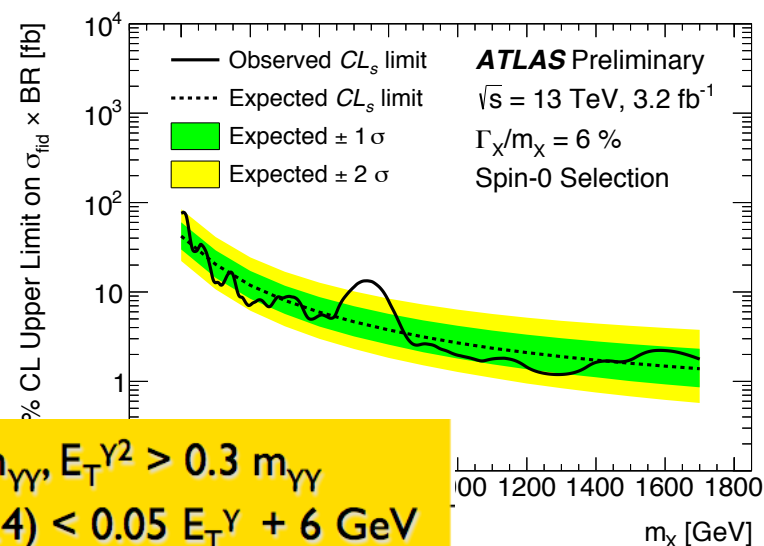
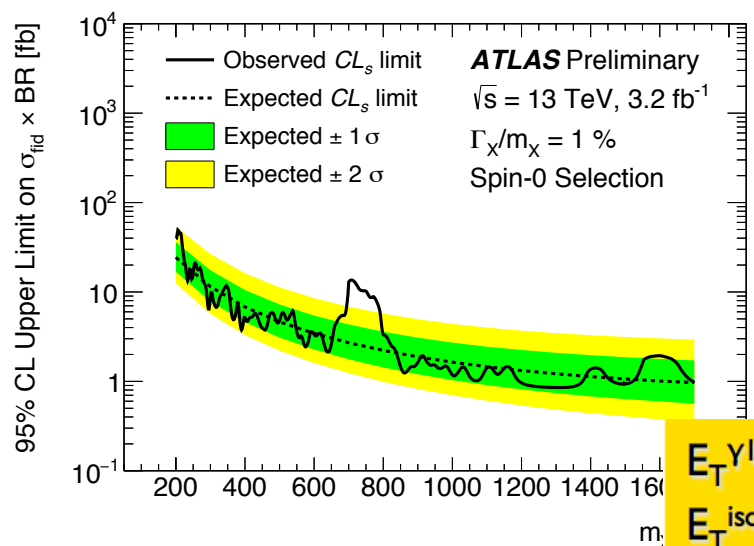
30/05/16

IFAE 2016

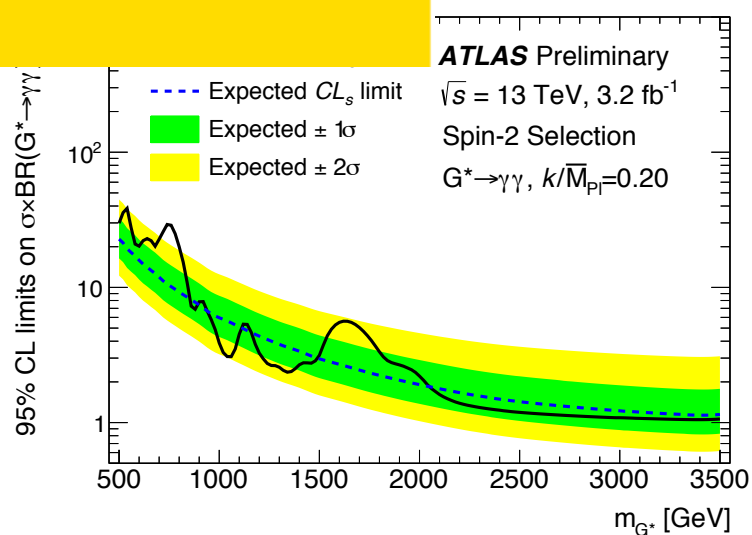
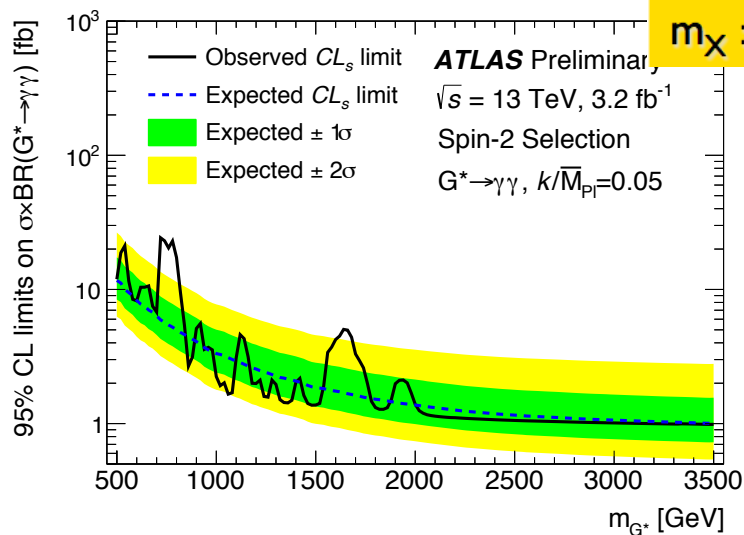


18

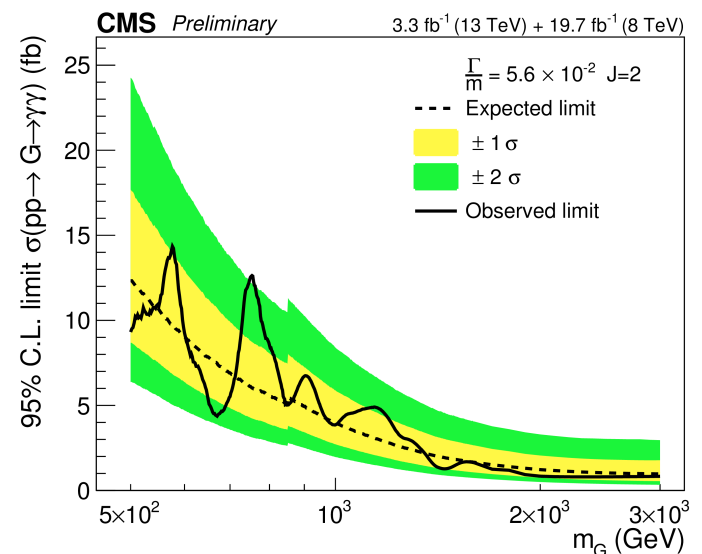
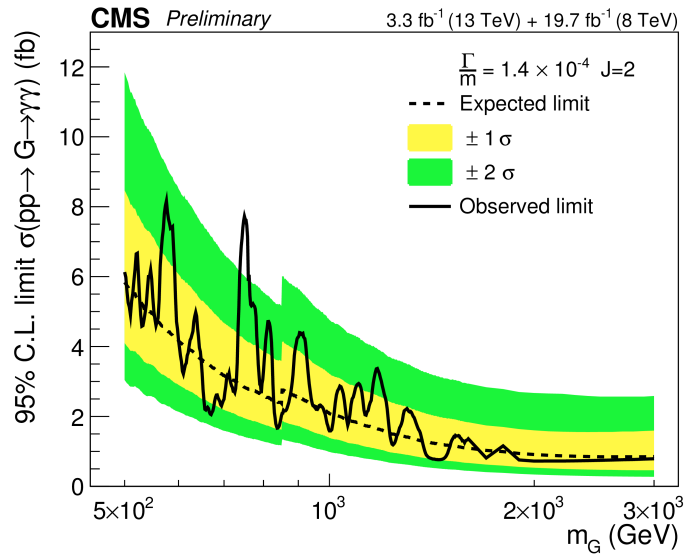
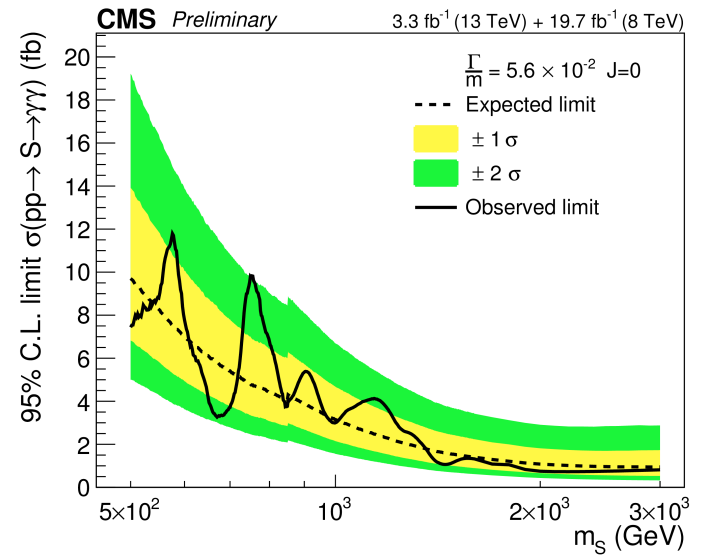
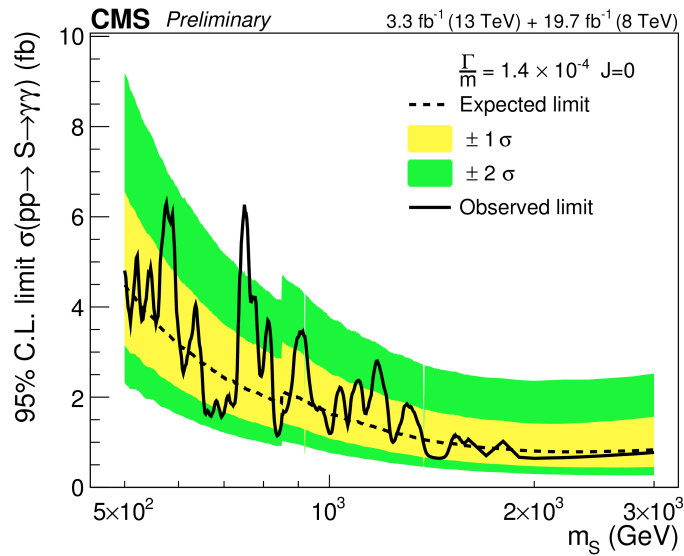
Limiti (ATLAS)



$E_T^{Y1} > 0.4 m_{YY}, E_T^{Y2} > 0.3 m_{YY}$
 $E_T^{\text{iso}} (\Delta R=0.4) < 0.05 E_T^Y + 6 \text{ GeV}$
 $m_\chi \pm 2\Gamma_\chi$



Limits (CMS)



Conclusioni

- ❑ Presentato un aggiornamento delle ricerche di nuova fisica nel canale a due fotoni con i rivelatori ATLAS e CMS per l'ipotesi di una nuova particella scalare o spin-2
- ❑ Interessante eccesso di eventi per $m_{\gamma\gamma} \sim 750$ GeV riportato già in dicembre 2015
- ❑ Photon performance (reconstruction, calibration, identification, isolation) sono state controllate e revisionate in dettaglio : l'eccesso sopravvive.
 - ❑ La significanza locale(globale) 3.4 (1.6) σ per CMS combinando 8 e 13 TeV
 - ❑ La significanze locale(globale) 3.6(1.8) -3.9(2.0) σ per ATLAS con 13 TeV
 - ❑ CMS preferisce un eccesso narrow (1.4×10^{-4}), ATLAS broad excess (0.06)
- ❑ Questo e' il massimo dell'informazione che possiamo estrarre dal dataset 2015. Nuovi dati in pochi mesi aiuteranno a capire meglio la situazione

References

Search for scalar diphoton resonances in the mass range 65-600 GeV with the ATLAS detector in pp collision data at $\sqrt{s} = 8$ TeV (Phys. Rev. Lett. 113, 171801)

Search for high-mass diphoton resonances in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the ATLAS detector. (Phys. Rev. D 92, 032004 (2015))

Search for diphoton resonances in the mass range from 150 to 850 GeV in pp collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV. (PLB 750 (2015) 494)

Search for High-Mass Diphoton Resonances in pp Collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV with the CMS Detector (EXO-12-045)

Search for new physics in high mass diphoton events in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV. (EXO-15-004)

Search for new physics in high mass diphoton events in 3.3 fb⁻¹ of proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV and combined interpretation of searches at $\sqrt{s}=8$ TeV and 13 TeV. (EXO-16-018)

Search for resonances decaying to photon pairs in 3.2 fb⁻¹ of pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector (ATLAS-CONF-2015-081)

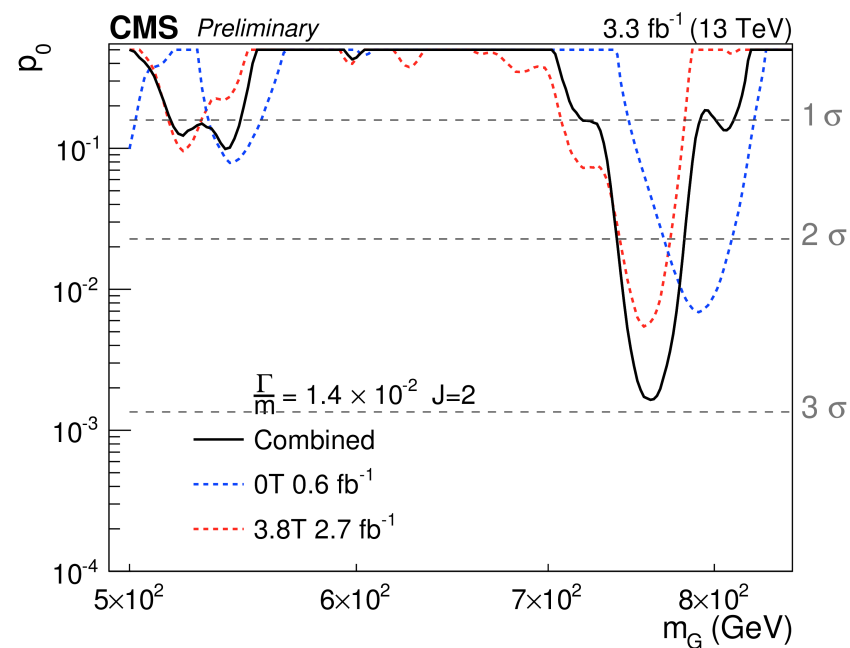
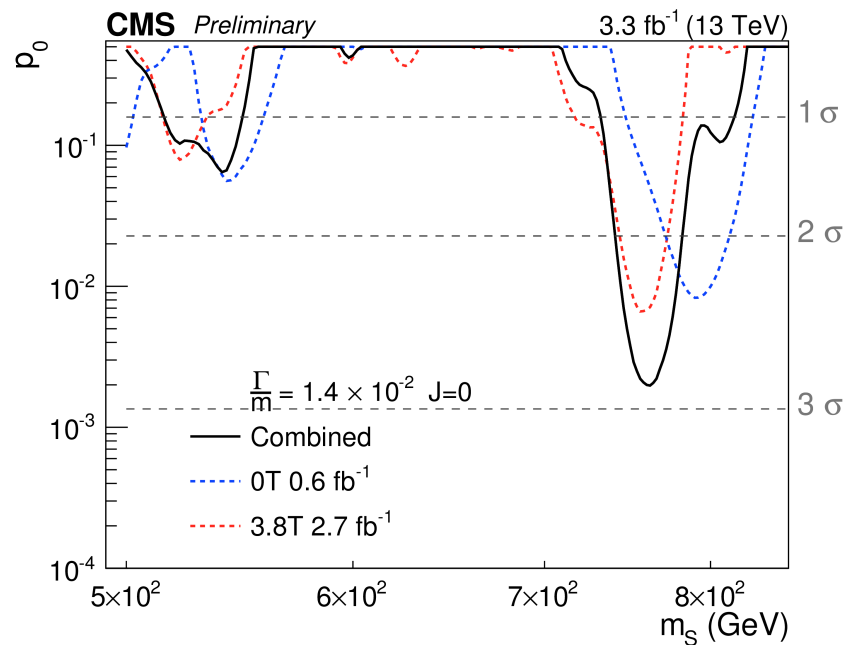
Significanza locale e globale

- ❑ Per quantificare la significanza statistica di un eventuale eccesso di eventi si effettua un test di ipotesi :
 - ❑ H_0 (null-hypothesis) per background only , H_1 (alternative hypothesis) per signal (m_X, α) +background ipotesi.
 - ❑ Calcolare il livello di disaccordo dei dati con la null-hypothesis : si definisce il test statistico e si calcola la probabilita' di ottenere un test statistico piu' sfavorevole (pvalue).

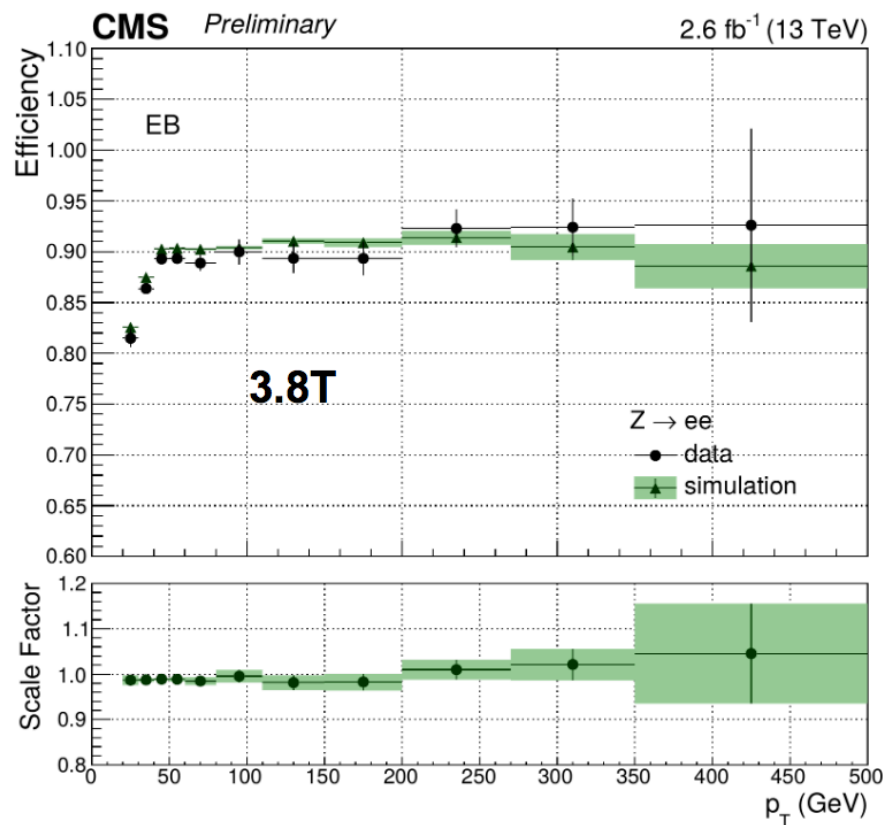
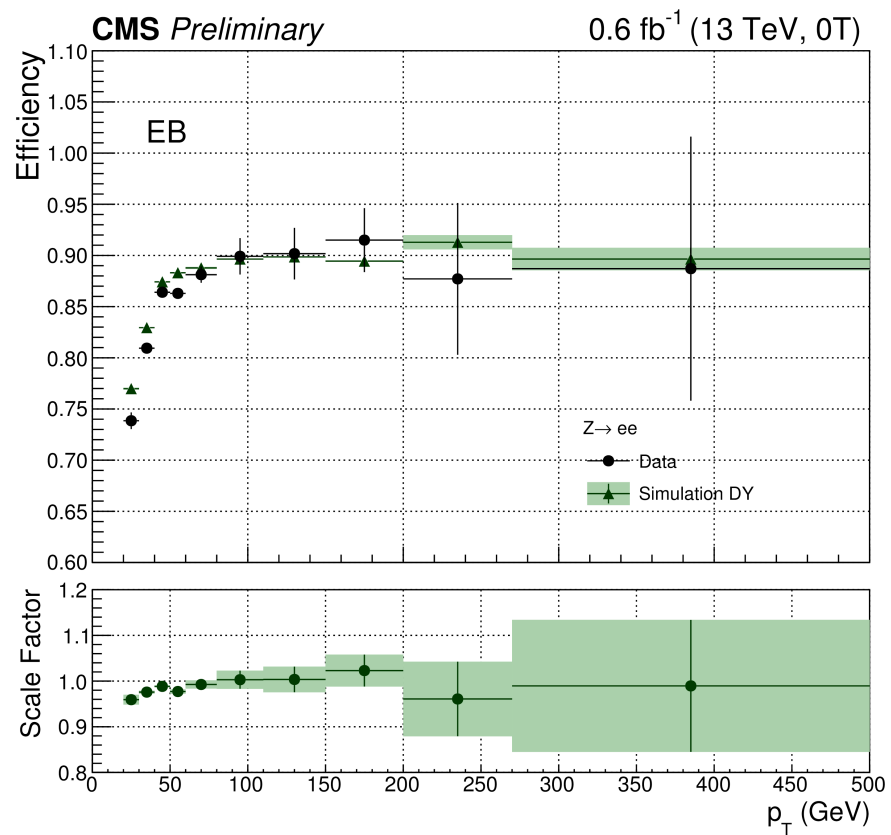
$$q_0(m_X, \alpha) = -2 \log \frac{L(0, m_X, \alpha, \hat{\nu})}{L(\hat{\sigma}, m_X, \alpha, \hat{\nu})},$$

- ❑ p-value piccolo -> rigetto la null hypothesis ->discovery
 - ❑ p-value convertito in "sigma" gaussiane
- ❑ Global significance : la significanza discussa sopra e' LOCALE, (m_X, α). Nel caso di una ricerca di nuova fisica in un certo spazio osservato dei parametri occorre tener conto della probabilita' di trovare questo eccesso in un punto qualsiasi dello spazio dei parametri !

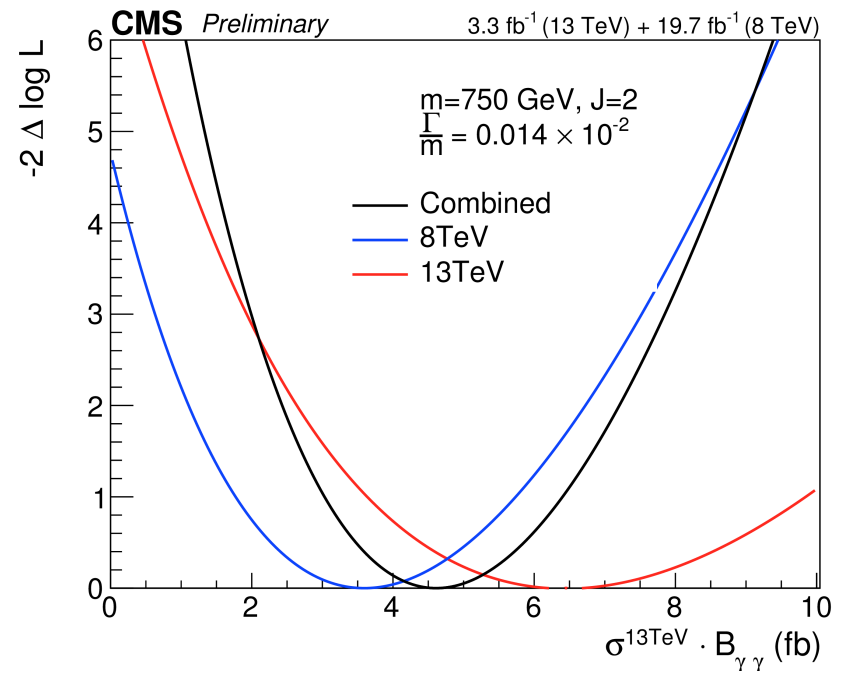
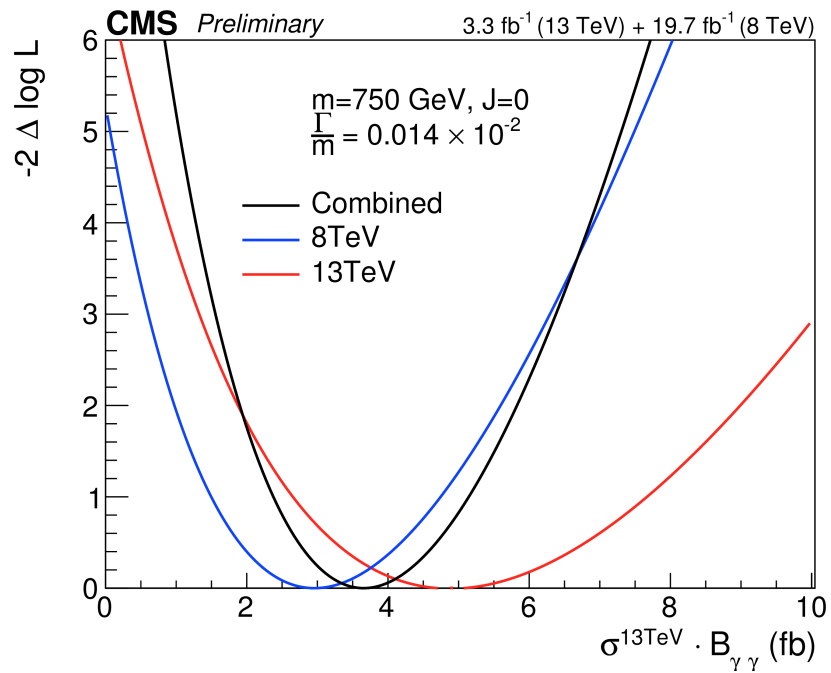
Risultati da CMS : p-value per analisi a 13 TeV



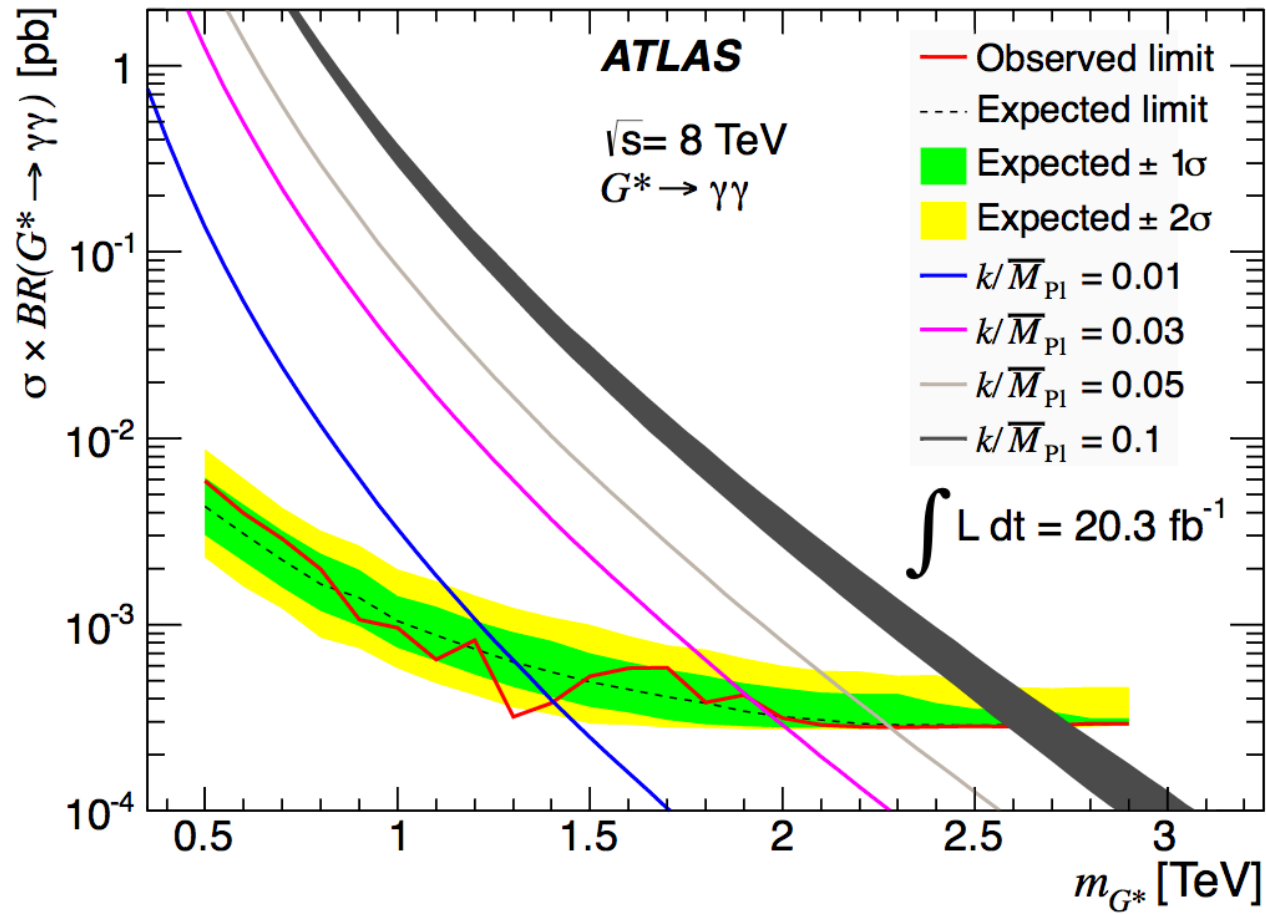
Photon identification efficiency (CMS)



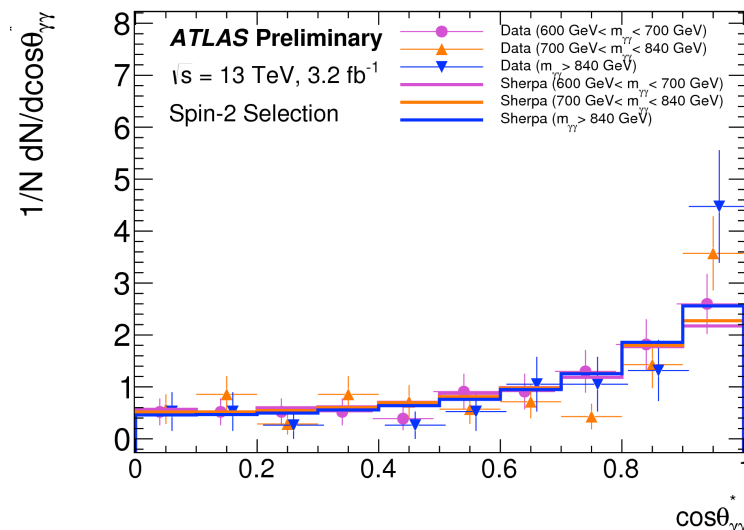
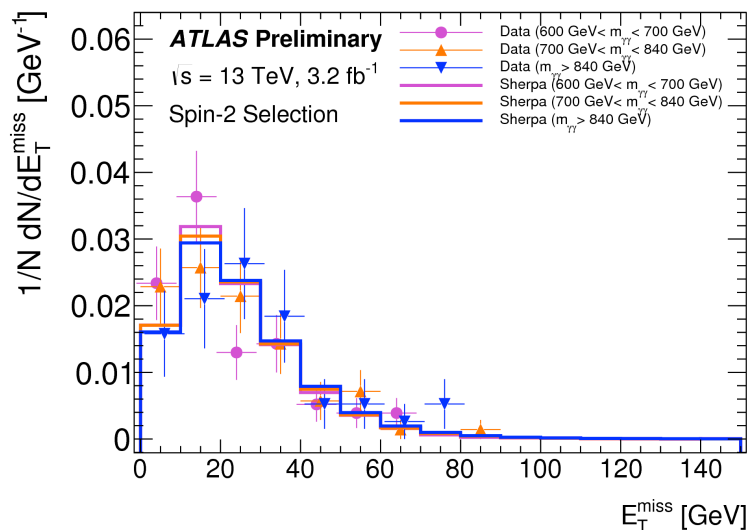
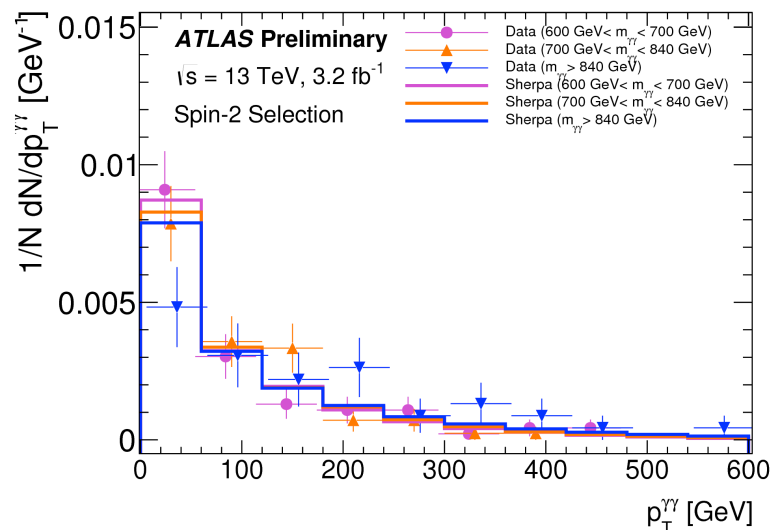
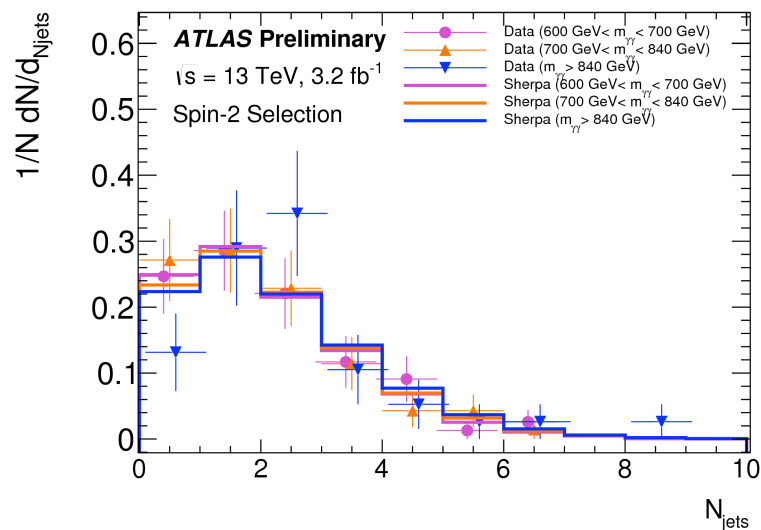
Compatibilita' 8-13 TeV (CMS)



Run 1 legacy on the RS model (ATLAS)



Distribuzioni cinematiche (ATLAS)



Systematic uncertainties (ATLAS)

Uncertainty	spin-2 search	spin-0 search	
Background (mass dependent)	$\pm 7\%$ to $\pm 35\%$	spurious signal 20 – 0.04 events for $\Gamma/M=6\%$	p_0 and limit
Signal mass resolution (mass dependent)		$(^{+55}_{-20})\% - (^{+110}_{-40})\%$	p_0 and limit
Signal photon identification (mass dependent)		$\pm(3 - 2)\%$	limit
Signal photon isolation (mass dependent)	$\pm(3-1)\%$	$\pm(4-1)\%$	limit
Signal production process	N/A	$\pm(3-6)\%$ depending on Γ	limit
Trigger efficiency		$\pm 0.6\%$	limit
Luminosity		$\pm 5.0\%$	limit

Table 1: Summary of systematic uncertainties on the modelling of the invariant mass shape of the background, on the signal mass resolution and on the total signal yield (from uncertainties on photon identification, isolation, process dependence of the reconstruction and identification efficiency C for the spin-0 resonance search, trigger efficiency and integrated luminosity). For mass-dependent uncertainties the quoted ranges cover the range from 500 GeV (200 GeV) to 3500 GeV (2000 GeV) for the spin-2 (spin-0) resonance search. The last column indicates if the corresponding uncertainty affects only the compatibility with the background-only hypothesis (p_0) or also the limit on the signal cross section.

Model dependence (CMS)

