

Ricerca di bosoni di Higgs oltre il Modello Standard con l'esperimento ATLAS al Large Hadron Collider

Marco Vanadia

Sapienza Università di Roma & INFN Sezione di Roma

8 Aprile 2015, IFAE



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Nelle precedenti puntate...

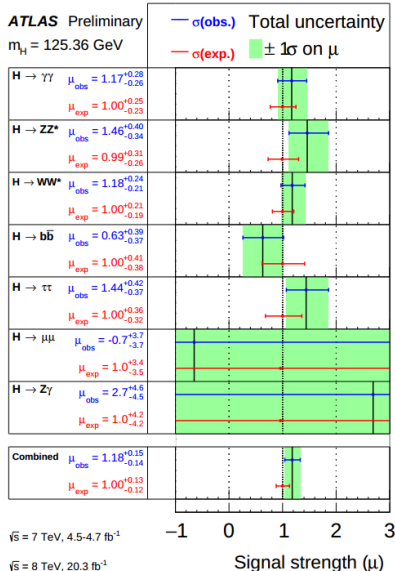
- ATLAS e CMS hanno scoperto nel 2012 una nuova risonanza, con proprietà compatibili con quelle del bosone di Higgs SM
- Nessuna sorpresa (finora) per proprietà CP e accoppiamenti, incertezze su $\sigma \times BR \approx 20\text{-}30\%$

Run-2:

- $\sqrt{s} : 8 \text{ TeV} \rightarrow 13 \text{ TeV} !!!$
- $> 10 \text{ fb}^{-1}$ previsti per il 2015

$BR(h \rightarrow \text{non-SM})_{LHC} \lesssim 30\text{-}40\%$:
misure accoppiamenti Run-1 lasciano ancora molto spazio per fisica BSM!

ATLAS-CONF-2015-007



- **2 Higgs Doublets Models (2HDMs)**: 7 parametri, 4 tipi a seconda della struttura degli accoppiamenti
 - Predizioni: 5 particelle, CP-pari h e H , CP-dispari A , $H^\pm$
- **SUSY**: potenziale soluzione all'hierarchy problem e alla Dark Matter
 - Predizioni del modello minimale (MSSM): settore Higgs come Type-2 2HDM, 2 parametri liberi (es: M_A , $\tan\beta$) per un dato benchmark (SUSY scenario)
- **Single additional EW singlet**: mixing tra doppietto di Higgs e singoletto EW, possibile spiegazione alla DM
 - Predizioni: 2 particelle scalari CP-pari h , H
- **Higgs portal verso DM/settori nascosti**: Higgs interagente con WIMPs o con settori non-SM, ...
 - Predizioni: decadimenti invisibili Higgs, particelle invisibili a vita lunga...
- **Composite Higgs**: es. MCHMs, problema naturalezza risolto da una scala di compositeness f
 - Predizioni: accoppiamenti $\neq$ SM
- **Higgs triplets, estensioni next-to-minimal, ...**

E come?

Vincoli h SM

Interpretazione BSM
degli accoppiamenti h

Model-independent

Ricerche simil-SM
 $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow VV$, ...

Modelli specifici

Ricerca di nuove
particelle A , $H^\pm$, ...

Signature esotiche

$H \rightarrow INV$, LFV,
particelle a vita lunga...

Higgs Carico

- $H^\pm \rightarrow W^\pm Z$: arXiv:1503.04233
- $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu$: JHEP03 (2015) 088, JHEP06(2012)039
- $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu$ in $t\bar{t}$ through lepton universality violation: JHEP03(2013)076
- $H^\pm \rightarrow c\bar{s}$: EPJC, 73 (2013) 2465

Higgs neutro pesante

- $A \rightarrow Zh$: PLB 744 (2015) 163-183
- $h/A/H \rightarrow \tau\tau$: JHEP11(2014)056
- $H \rightarrow hh \rightarrow \gamma\gamma b\bar{b}$: arXiv:1406.5053
- $H \rightarrow hh \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$: ATLAS-CONF-2014-005
- $H \rightarrow ZZ$: PLB 707 (2012)
- $X \rightarrow \gamma\gamma$: PRL 113, 171801 (2014)

2HDM cascade

- $H^0 \rightarrow W^\mp H^\pm \rightarrow W^\mp W^\pm h^0 \rightarrow W^\mp W^\pm b\bar{b}$: PRD 89, 032002 (2014)

NMSSM

- $a\bar{a} \rightarrow \mu\mu\tau\tau$: HIGG-2014-02

Higgs Invisibile

- $VH \rightarrow \text{hadronic} + \text{INV}$: HIGG-2014-07
- $VBF\ h \text{ con } h \rightarrow \text{invisibile}$ ATLAS-CONF-2015-004
- Mono-jet EXOT-2013-13
- $ZH \rightarrow \ell\bar{\ell} + \text{INV}$: PRL 112, 201802 (2014)

Higgs Esotico

- $H \rightarrow \gamma + \text{MET}$: ATLAS-HIGG-2015-001
- $H(\text{narrow scalar}) \rightarrow t\bar{t}$: ATLAS-CONF-2015-009
- $H \rightarrow ZZ_{\text{dark}}, H \rightarrow Z_{\text{dark}}Z_{\text{dark}}$: ATLAS-CONF-2015-003
- Pair produced double-charged $H^{\pm\pm}$: CERN-PH-EP-2014-158
- $h \rightarrow \text{long lived particles}$: ATLAS-CONF-2014-041, JHEP11(2014)088
- Wh with $h \rightarrow \text{hidden sector}$: New J. Phys. 15 (2013) 043009
- ...

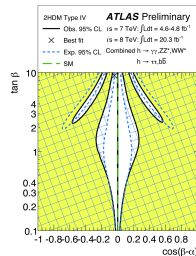
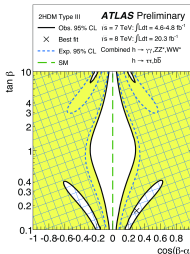
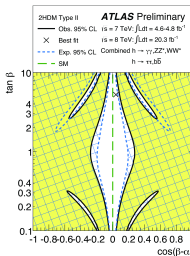
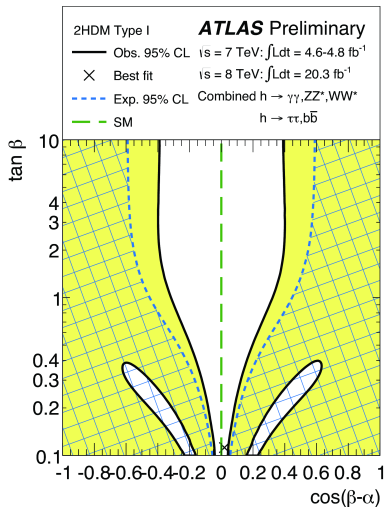
Misure indirette

- $H \rightarrow J/\Psi\gamma$ and $H \rightarrow \Upsilon\gamma$: arXiv:1501.03276
- Constraints from h couplings: ATLAS-CONF-2014-010, ATLAS-CONF-2015-007

- 2 doppietti di Higgs, 5 particelle: h e H CP-pari, A CP-dispari, $H^\pm$
- 7 parametri liberi (con semplici assunzioni: no violazione CP nel settore Higgs, no FCNC)
 - 4 masse
 - $\tan \beta = v_2/v_1$, rapporto tra i valori attesi sul vuoto dei due doppietti
 - α , angolo mixing tra h e H . Spesso usato $\cos(\beta - \alpha)$ come parametro, che regola accoppiamenti
 - 1 parametro di soft symmetry breaking
- Quattro realizzazioni a seconda degli accoppiamenti dei due doppietti:
 - Type-I (Fermiophobic nel limite di zero mixing)
 - Type-II (MSSM-like)
 - Lepton-specific
 - Flipped
- Solo uno dei modelli possibili, ma ad esempio Type-II e' un'approssimazione per SUSY con scala di massa alta

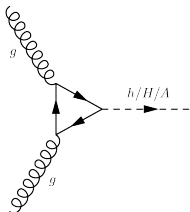
Model	u_R^i	d_R^i	e_R^i
Type I	Φ_2	Φ_2	Φ_2
Type II	Φ_2	Φ_1	Φ_1
Lepton-specific	Φ_2	Φ_2	Φ_1
Flipped	Φ_2	Φ_1	Φ_2

Branco et al, arXiv:1106.0034



Lo spazio dei parametri per 2HDM è significativamente vincolato dalle misure di accoppiamento dell' h^{SM}

Figure da ATLAS-CONF-2014-010



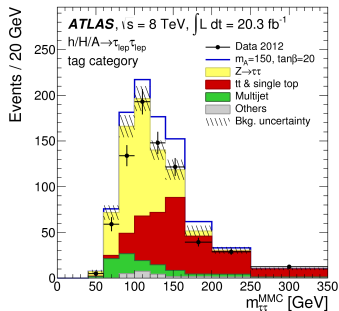
- Ricerca indipendente dal modello per particelle scalari
- Ricerca chiave per MSSM a alto $\tan\beta$
- Canali di decadimento analizzati:
 - $\tau\tau \rightarrow \ell\ell (+neutrini)$, bassa massa
 - $\tau\tau \rightarrow \ell + \text{adroni} (+neutrini)$, bassa+alta massa
 - $\tau\tau \rightarrow \text{adroni} (+neutrini)$, alta massa

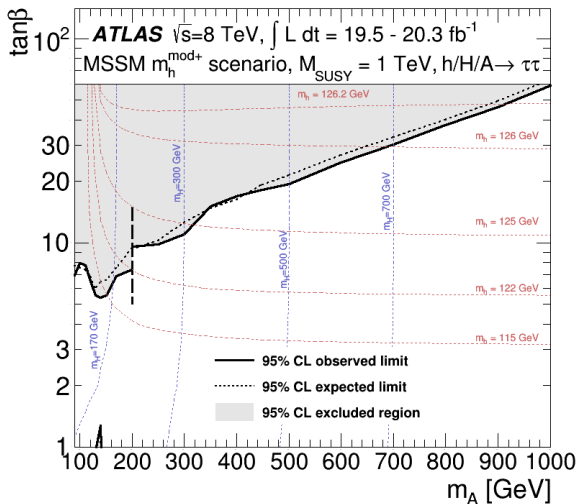
Neutrini nello stato finale, ricostruzione cinematica completa non è possibile

MMC

Ricostruzione con il Missing Mass Calculator (MMC, NIM A 654 (2011) 481–489):

- Usa 4-momento dell'energia trasversa mancante e di tutti gli oggetti visibili
- Valuta statisticamente (likelihood) il valore più probabile per la massa $m_{\tau\tau}$





- 2HDM a alto $\tan\beta$ fortemente limitati per $m_A \ll 1 \text{ TeV}$
- regione a alto $\tan\beta$ e $m_A \approx 1 \text{ TeV}$ target per prime ricerche Run-2
- regione a basso $\tan\beta$ e $m_A \approx 300 \text{ GeV}$ target per ulteriori ricerche Run-1
 → focus del resto del talk

Ricerche $H \rightarrow hh$ sensibili già nel Run-1 per fisica BSM, inoltre rappresentano una importante preparazione a misure hh non-risonante

- risonante: 2HDMs, settori nascosti, modelli esotici (es. gravitoni), ...
- non-risonante: compositeness, scalari colorati, 4th generazione, ...

Pubblicazioni ATLAS

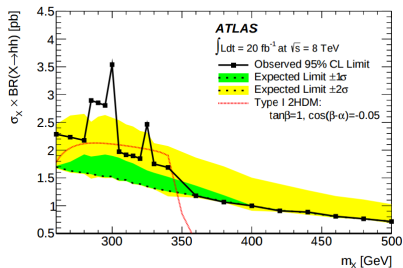
$hh \rightarrow 4b$ CONF-2014-005, $hh \rightarrow bb\gamma\gamma$
arXiv1406.5053

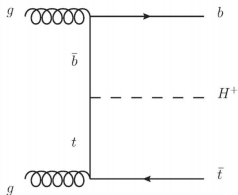
BR decadimento hh

	bb	WW	$\tau\tau$	ZZ	$\gamma\gamma$
bb	0.32				
WW	0.25	0.05			
$\tau\tau$	0.071	0.028	0.0039		
ZZ	0.031	0.012	0.0034	0.00076	
$\gamma\gamma$	0.0026	0.001	0.00029	0.00013	5.3e-06
	bb	WW	$\tau\tau$	ZZ	$\gamma\gamma$

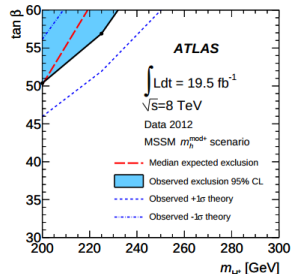
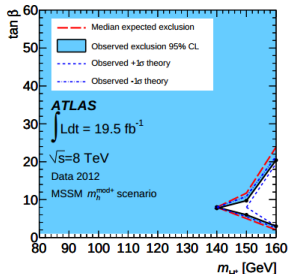
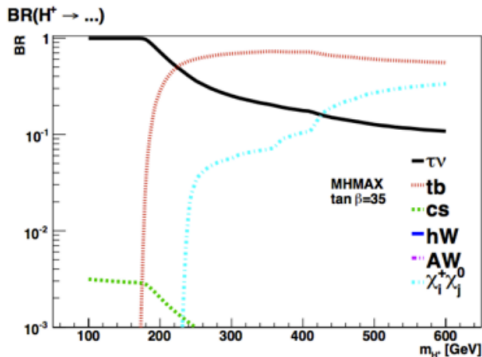
$hh \rightarrow bb\gamma\gamma$ arXiv1406.5053

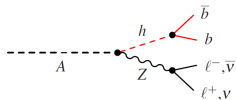
- Sensibilità a $\tan\beta \approx 1$
- Limite osservato (atteso) a σ produzione non-risonante: 2.2 pb ($1.0^{+0.5}_{-0.2}$ pb)





- Decadimenti τ con BR piu' piccolo rispetto a quelli top , ma con segnatura piu' chiara
- Risultati ATLAS $H^+ \rightarrow \tau\nu + jets$: esclusa maggior parte della regione $m_{H^\pm} \lesssim m_{top}$ [JHEP03 (2015) 088]
- Recente pubblicazione ricerca $H^\pm \rightarrow W^\pm Z$ [HIGG-2014-13]

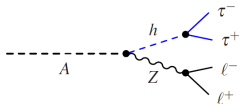




$$A \rightarrow Zh \rightarrow (\ell\ell/\nu\nu)b\bar{b}$$

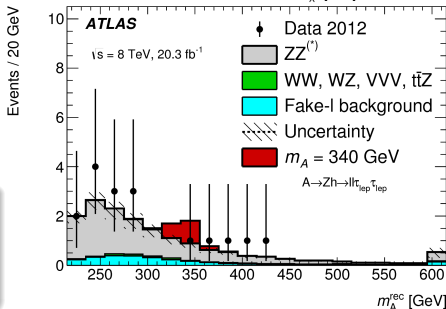
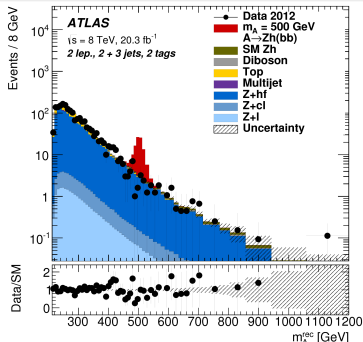
- $\ell\ell$: 2 b -jets selezionati, >2 vetato, $105 < m_{bb} < 145$ GeV. $\sigma(m_A)/m_A \approx 2\text{-}3\%$

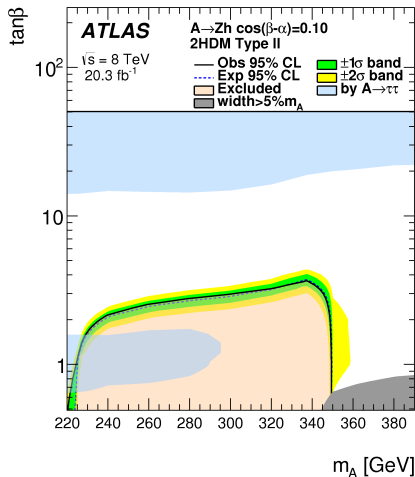
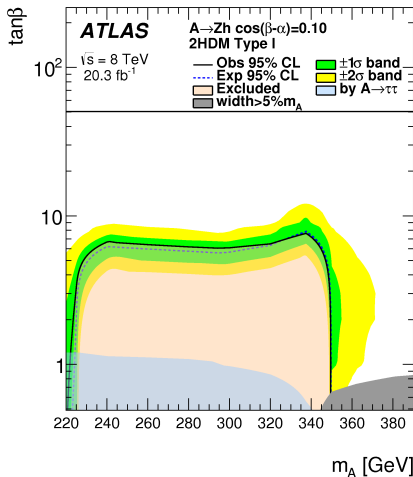
- $\nu\nu$: discriminazione con $m_A^{\text{rec}} = \sqrt{E_T^{bb} + E_T^{\text{miss}})^2 + (\vec{p}_T^{bb} + \vec{E}_T^{\text{miss}})^2}$



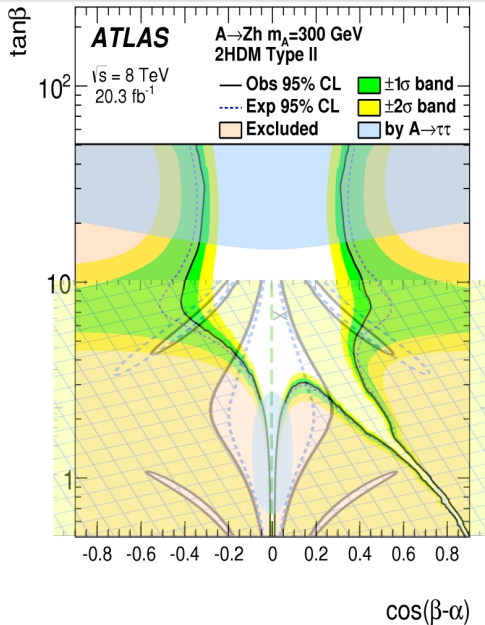
$$A \rightarrow Zh \rightarrow \ell\ell\tau\tau$$

- Decadimento $\tau\tau$ ricostruito con MMC
- Vincolo a $m_{\ell\ell}$ e $m_{\tau\tau}$:
 $m_A^{\text{rec}} = m_{\ell\ell\tau\tau} - m_{\ell\ell} - m_{\tau\tau} + m_Z + m_h$
- $\sigma(m_A)/m_A \approx 3\text{-}5\%$



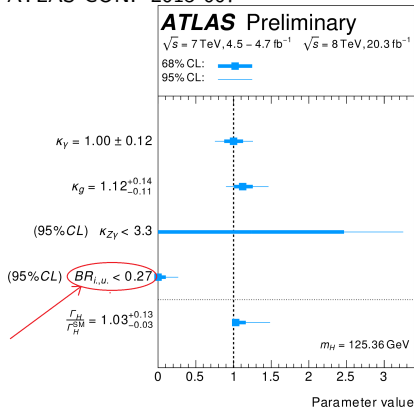


Sensibilità fino a $\tan\beta \approx 5-7$, complementare a $A \rightarrow \tau\tau$



Modelli 2HDM con $m_A \approx 300 \text{ GeV}$
 fortemente vincolati

- BR dell' h in decadimenti non previsti dallo SM $\leq 30\text{-}40\%$ $\rightarrow$ ancora molto spazio per BSM
- Decadimenti invisibili dell'Higgs sono previsti da molti modelli BSM
 - SUSY
 - extra-dimensions
 - quarta generazione di neutrini
 - ...
- Misure indirette limitano $BR(h \rightarrow \text{invisible})$ a meno del 30% (con assunzioni però sui restanti accoppiamenti di h)

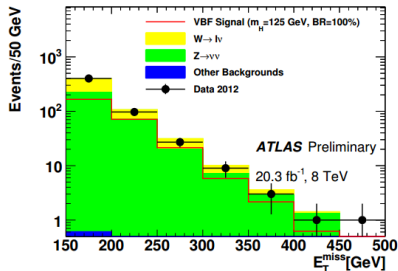


Tre nuove pubblicazioni misure dirette ATLAS

- Vh con $V \rightarrow \text{adroni}$, $h \rightarrow \text{invisible}$ (presentata a Moriond)
- $VBF h$ con $h \rightarrow \text{invisible}$ ATLAS-CONF-2015-004
- Mono-jet $h \rightarrow \text{invisible}$ arXiv:1502.01518

- 2 jets con $p_T^1 > 75$ GeV, $p_T^2 > 50$ GeV
- veto per b/τ -tagging, veto per e/μ nei jet, veto per eventi con un terzo jet
- $E_T^{\text{miss}} > 150$ GeV, $\Delta\eta_{jj} < 2.5$, $\Delta\eta_{jE_T^{\text{miss}}} > 1$ per sopprimere QCD multi-jet
- Jet con grande separazione in rapidità $\Delta\eta_{jj} > 4.8$, e $m_{jj} > 1$ TeV

- $Z \rightarrow \ell\ell$ e $W \rightarrow \ell\nu$ stimati in regioni di controllo nei dati
- Estrapolati alla regione di segnale con fattori calcolati in simulazioni Monte Carlo
- Fit combinato al numero di eventi misurato nella regione di segnale e nelle regioni di controllo $W \rightarrow \ell\nu$ e $Z \rightarrow \ell\ell$



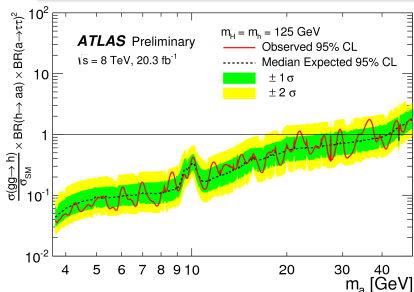
- Limite osservato (atteso) **29% (35%)** $\rightarrow$ confrontabile con limite indiretto **27% (37%)** [ATLAS-CONF-2015-007]
- Nuovo risultato da VH con $V \rightarrow$ adroni: **78% (86%)** [presentato a Moriond]

Molti modelli BSM introducono nuove particelle scalari o pseudoscalari. Es. NMSSM

- $m_H = 125$ GeV introduce un piccolo hierarchy problem anche nel MSSM
- Questo viene risolto nel NMSSM con l'introduzione di bosoni di Higgs pseudoscalari leggeri a ($m_a < m_h$)

Possibili scenari per le ricerche: SM $h \rightarrow aa$ con un certo BR $\lesssim 35\%$ o H aggiuntiva che decade in $H \rightarrow aa$

Segnature dipendono fortemente da m_a : canali di decadimento $ee/\mu\mu, \tau\tau$ se $m_a > 2m_\tau, bb$ se $m_b > 2m_b$



Limite per decadimento Higgs SM in aa vs m_a

- Nuovi risultati ATLAS per una ricerca $aa \rightarrow \mu\mu\tau\tau$ mostrati a Moriond
- Complementari a misure CMS per $a \rightarrow \mu\mu, h \rightarrow 4\mu, a \rightarrow bb$

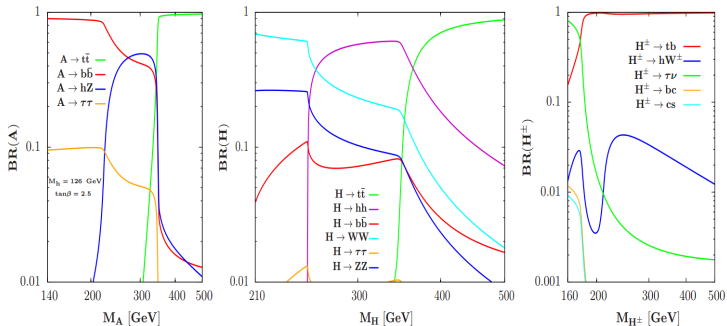
- Presentate nuove ricerche ATLAS di Higgs BSM sui dati di Run-1
- Nessuna scoperta, ma per questo abbiamo ora una nuova opportunita': il **Run-2**!
- 8 TeV $\rightarrow$ 13 TeV: prima fase alta priorita' a ricerche di risonanze piu' o meno model independent
- Con ricerche analoghe a quelle per h_{SM} nel Run-1, possibili risultati interessanti gia' con i primissimi fb^{-1}
 - $H/A \rightarrow \tau\tau$
 - $H \rightarrow \gamma\gamma$
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$
 - $H^+ \rightarrow \tau\nu + jets$
 - ...

Con l'intero dataset 2015 ($>10 \text{ fb}^{-1}$) programma di ricerca completo puo' essere perseguito, concentrandosi sulle segnature piu' che sui modelli:

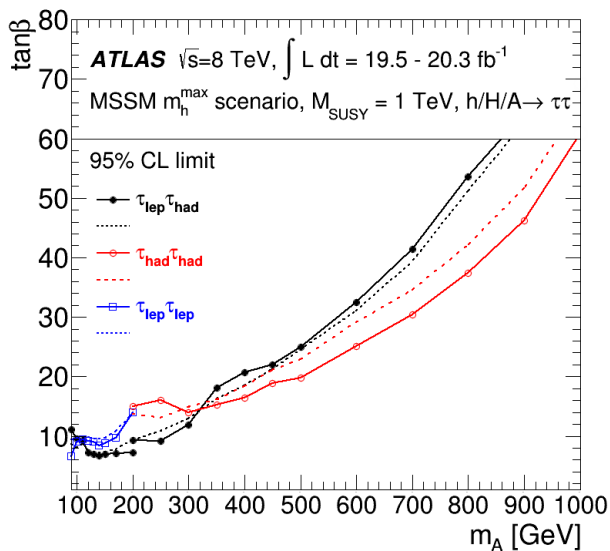
- $A/H \rightarrow \text{fermioni}$
- $H \rightarrow \gamma\gamma/ZZ$
- $H \rightarrow hh$
- $A \rightarrow Zh$
- $H^\pm$,
- decadimenti Higgs con E_T^{miss} (settori dark/nascosti)
- decadimenti Higgs senza E_T^{miss} (settori dark/nascosti, NMSSM)
- decadimenti rari ed esotici (es. Lepton Flavor Violation)
- ...

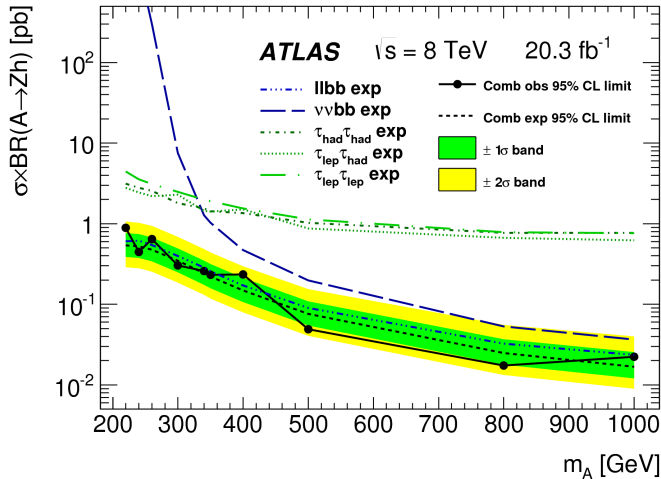
BACKUP

Plots from 1304.1787, Djouadi

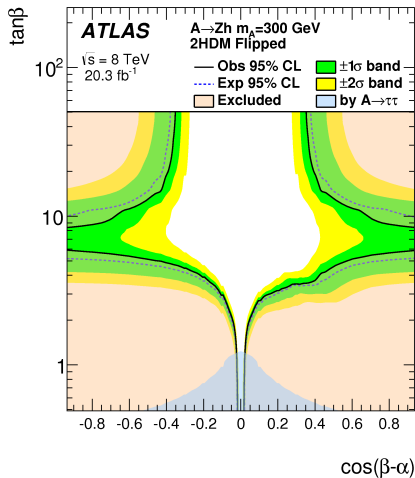
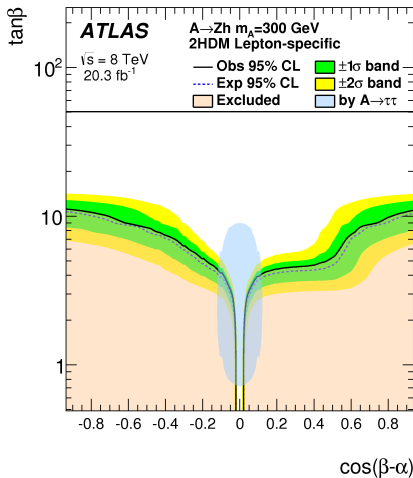


- For low $\tan\beta$ and $m_\chi < 2m_{top}$ most sensitive channels:
 - $H \rightarrow hh, H \rightarrow ZZ, H \rightarrow WW, H \rightarrow \tau\tau$
 - $A \rightarrow \tau\tau, A \rightarrow Zh$
- For high $\tan\beta$ both are completely dominated by $b\bar{b}$ (search with associated production) and $\tau\tau$
- $H^\pm$ most relevant search channels are tb (dominant BR) and $\tau\nu$ (cleaner)



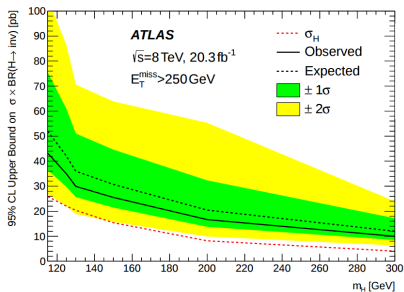


- Canale dominante $h \rightarrow b\bar{b}$
- Utilizzo anche del canale $\tau\tau$ assicura sensitività a modelli lepton-specific e migliora il limite a 300 GeV del 18% (12% atteso)



Sensitività a modelli 2HDM lepton-specific e flipped grazie all'inclusione del canale
 $h \rightarrow \tau\tau$

$h \rightarrow \text{invisibile}$ mono-jet arXiv:1502.01518



Vh con $V \rightarrow \text{adroni}, h \rightarrow \text{invisibile}$ HIGG-2014-07

- Contributo potenziale del segnale estratto con un likelihood fit combinato a E_T^{miss} di segnale, sidebands E_T^{miss} e p_T^V nelle regioni di controllo
- Limite osservato (atteso) 78% (86%)

VBF h con $h \rightarrow \text{invisibile}$ ATLAS-CONF-2015-004

- Fit combinato al numero di eventi misurato nella regione di segnale e nelle regioni di controllo $W \rightarrow \ell \nu$ e $Z \rightarrow \ell \ell$
- Limite osservato (atteso) 29% (35%)

Confronto con i precedenti limiti ATLAS: **75% (62%)**, Zh con $Z \rightarrow \ell \ell$ Phys. Rev. Lett. 112, 201802 (2014) e **27% (37%)**, indiretto h^{SM} ATLAS-CONF-2015-007

Settori hidden o dark previsti in molti modelli di fisica BSM, ad esempio forniscono un candidato per DM

- Nell'analisi considerati modelli con la simmetria di gauge dark mediata da bosone vettore Z_d
- ZZ_d : stessa selezione di $h \rightarrow 4\ell$, ricerca di eccessi nella massa dilepton m_{34} (coppia piu' lontana dalla massa m_Z)
 → per $\text{BR}(h \rightarrow ZZ_d 4\ell)/\text{BR}(h \rightarrow 4\ell) > 0.4$ escluso range $15 < m_{Zd} < 55$ GeV
- $Z_d Z_d$: coppie di-lepton assegnate minimizzando $|m_{12} - m_{34}|$, Z e J/ψ veto, ricerca in funzione m_{Zd} con $|m_{Zd} - m_{12}|$ e $|m_{Zd} - m_{34}| < 3-5$ GeV (a seconda del canale)
 - 1 evento $4e$ ($m_{12} = 28$ e $m_{34} = 22$ GeV, loc. sig. 1.7σ) e 1 evento 4μ ($m_{12} = 23$ e $m_{34} = 18$ GeV, loc. sig. 1.7σ), limiti calcolati nel range $15 < m_{Zd} < 60$ GeV

