



Ricerca dei partner pesanti dei neutrini nell'ambito del modello see-saw di tipo III a CMS

Lisa Benato, A. Gozzelino, E. Torassa, S. Vanini
 (Università degli Studi di Padova & INFN);
 C. Biggio (Università degli Studi di Genova & INFN)

a nome della collaborazione CMS

Roma, 22 settembre 2015

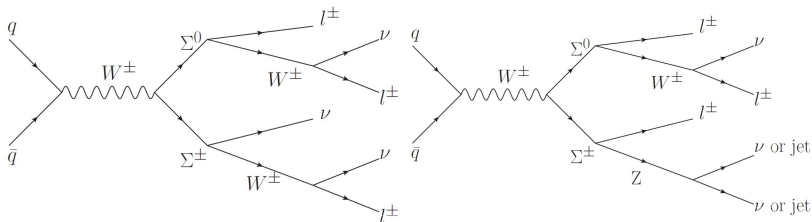
- ▶ Oscillazioni dei neutrini: $m_\nu \neq 0 \rightarrow$ necessità di estendere il Modello Standard
- ▶ Meccanismo see-saw: nuove particelle pesanti che si accoppiano a leptoni e bosone di Higgs \rightarrow i neutrini acquistano masse di Majorana piccole
- ▶ Meccanismo see-saw di tipo III: tripletto di partner fermionici $\Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-$
- ▶ Accoppiamenti di Yukawa “naturali” (10^{-6}) tra Σ e leptoni \rightarrow
 $M_\Sigma \sim 100$ GeV \rightarrow producibili nelle collisioni protone - protone di LHC \rightarrow
rivelazione in stati finali leptonici
- ▶ Eventi con molti leptoni sono canali puliti per ricerca di nuova fisica a CMS



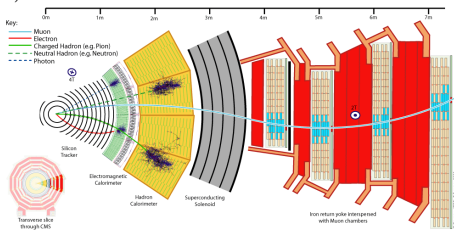
- ▶ Tripletto fermionico $\Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-$ da annichilazione di quark attraverso un bosone virtuale W^\pm : $q\bar{q} \rightarrow W^\pm \rightarrow \Sigma^0\Sigma^\pm$
- ▶ Stati finali a 3 leptoni carichi con energia mancante (ν) e jet
- ▶ I tre Σ sono assunti avere la stessa massa
- ▶ L'entità del contributo $v_{\alpha N}$ di leptoni di flavour α al segnale è proporzionale al parametro di accoppiamento di Yukawa V_α :

$$v_{\alpha N} = \frac{|V_\alpha|}{\sqrt{|V_e|^2 + |V_\mu|^2 + |V_\tau|^2}}$$

- ▶ Si assume uno **scenario democratico** di accoppiamento dei leptoni ai partner ($V_e = V_\mu = V_\tau$) $\rightarrow v_{\alpha N} = 1/\sqrt{3}$



- ▶ Segnatura di segnale cercata: **tre leptoni carichi isolati** più energia trasversa mancante
- ▶ Dati: collisioni p-p a $\sqrt{s} = 8$ TeV raccolti da CMS nel 2012 ($\mathcal{L} = 19.7 \text{ fb}^{-1}$)
- ▶ Trigger: due leptoni con momento trasverso >17 GeV, >8 GeV
- ▶ Pre-selezioni:
 - ▶ tre leptoni isolati, μ o e , con momento trasverso $> 30, 20, 20$ GeV
 - ▶ somma della loro carica pari a ± 1
- ▶ Oggetti fisici: ricostruiti con l'algoritmo Particle Flow (informazioni da tutto il rivelatore CMS)



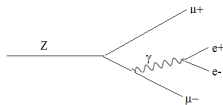
Ricerca: confronto tra eventi attesi di fondo e di segnale con eventi osservati nei dati dopo le selezioni

Fondi da processi elettrodeboli

- ▶ Processi Standard Model, simulati con tecniche Monte Carlo

| Processo | σ (pb) | Fondo |
|----------|---------------|--|
| WZ | 24.6 | Fondo irriducibile, tre leptoni nello stato finale |
| ZZ | 8.4 | Z decadono in coppie di leptoni, uno non rivelato |
| WWW | 0.08 | Fondo irriducibile, piccola sezione d'urto |

- ▶ Fondi dal processo $Z \rightarrow l^+l^- \gamma \rightarrow l^+l^-l^+l^-$: conversione asimmetrica di γ in l molto energetico e l a bassa energia (non rivelato)



- ▶ Contributi $t\bar{t}W$, $t\bar{t}Z$, $t\bar{t}H$, $t\bar{t}\gamma$, $WW\gamma$, WWZ : trascurabili

Fondi da leptoni “fake”

- ▶ Leptoni “fake”: non provenienti dal vertice primario di interazione, ma dal decadimento di quark pesanti oppure jet falsamente identificati come leptoni
- ▶ Stimati su campione di dati ad alta attività adronica, successivamente test di consistenza su campioni Monte Carlo (processi QCD ed elettrodeboli + jet)

Selezione degli eventi



| Nome | Selezione | Fondo soppresso |
|---|--|----------------------------|
| Numero di leptoni | 3 e o μ isolati | |
| Momento trasverso | $> 30, 20, 20$ GeV | Leptoni fake |
| Somma carica leptoni | ± 1 | |
| Energia trasversa mancante | > 50 GeV | ZZ |
| Attività adronica (somma scalare energie trasverse dei jet) | < 150 GeV | Leptoni fake |
| Veto su b tag (algoritmo Combined Secondary Vertex) | < 0.244 | $t\bar{t}$ |
| Veto su massa Z | $M_{ll} < 76$ GeV \vee $M_{ll} > 106$ GeV | ZZ |
| Veto per risonanze a bassa massa | $M_{ll} > 12$ GeV | Leptoni fake |
| Veto su massa Z per trileptoni | $M_{lll} < 76$ GeV \vee $M_{lll} > 106$ GeV | Conversione asimmetrica |

- ▶ Selezioni scelte per massimizzare la significanza:

$$Q = 2(\sqrt{N_{fondo} + N_{segnale}} - \sqrt{N_{fondo}})$$

- ▶ Ottimizzazioni su un segnale di Σ^+ di massa 180 GeV

Incertezze sul segnale

- ▶ Efficienza del trigger dileptonico per tre leptoni (dopo tagli geometrici): $(98 \pm 2)\%$
- ▶ Incertezze su ricostruzione, identificazione, isolamento: 3.0% - 7.5% (categoria)
- ▶ Incertezze su Parton Distribution Function al Next-to-Leading-Order: 4.4% - 6.8% (M_Σ)
- ▶ Incertezze su jet, energia trasversa mancante, pileup: trascurabili

Incertezze sui fondi

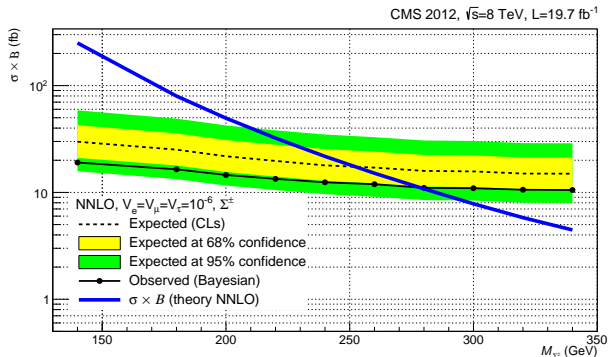
- ▶ WZ: 6.9% sulla σ , 25.7% per discrepanze dati-Monte Carlo. In quadratura 26.6%
- ▶ ZZ: 15.4% sulla σ
- ▶ WWW: 50% incertezze teoriche e differenze tra Monte Carlo
- ▶ Leptoni fake: 50% discrepanze dati-Monte Carlo

- ▶ Incertezza su luminosità integrata: 2.6%

| Category | EWK prompt | Fake | Total background | Data | Signal mass M_Σ (GeV) | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|-----------|------------------------------|-----------------|------------------|
| | | | | | 180 | 240 | 340 |
| $\mu^+\mu^+\mu^-$ | 4.7±1.2 (0.4) | 0.4±0.5 (0.4) | 5.0±1.3 | 9 | 4.3±0.3 | 2.0±0.1 | 0.55±0.04 |
| $e^+e^+e^-$ | 2.9±0.8 (0.3) | 1.4±1.1 (0.8) | 4.3±1.4 | 6 | 2.8±0.3 | 1.4±0.1 | 0.39±0.04 |
| $\mu^+\mu^+e^-$ | 0.6±0.2 (0.1) | 2.1±1.3 (0.7) | 2.7±1.3 | 1 | 6.7±0.4 | 2.4±0.2 | 0.56±0.04 |
| $\mu^+e^+\mu^-$ | 7.1±1.8 (0.6) | 3.5±1.9 (0.7) | 10.6±2.6 | 8 | 9.8±0.6 | 4.2±0.3 | 1.06±0.08 |
| $e^+e^+\mu^-$ | 0.7±0.2 (0.1) | 2.8±1.5 (0.6) | 3.6±1.6 | 1 | 5.9±0.5 | 2.2±0.2 | 0.51±0.04 |
| $\mu^+e^+e^-$ | 4.8±1.2 (0.4) | 1.0±0.8 (0.6) | 5.7±1.4 | 6 | 8.7±0.7 | 3.7±0.3 | 0.97±0.08 |
| Total sign + | 20.7±2.6 (0.9) | 11.2±3.1 (1.6) | 31.9±4.0 | 31 | 38.2±1.2 | 15.8±0.5 | 4.04±0.14 |
| $\mu^-\mu^-\mu^+$ | 2.4±0.6 (0.3) | 0.2±0.5 (0.5) | 2.6±0.8 | 2 | 2.1±0.2 | 0.96±0.07 | 0.24±0.02 |
| $e^-e^-e^+$ | 2.4±0.7 (0.3) | 2.7±1.6 (0.9) | 5.1±1.8 | 5 | 1.4±0.1 | 0.66±0.07 | 0.17±0.02 |
| $\mu^-\mu^-e^+$ | 0.5±0.2 (0.1) | 1.6±1.0 (0.6) | 2.1±1.0 | 2 | 3.4±0.2 | 1.09±0.08 | 0.24±0.02 |
| $\mu^-e^-\mu^+$ | 3.4±0.9 (0.4) | 2.1±1.2 (0.7) | 5.5±1.5 | 2 | 5.0±0.4 | 1.86±0.14 | 0.46±0.04 |
| $e^-e^-\mu^+$ | 0.6±0.2 (0.1) | 2.3±1.3 (0.7) | 2.9±1.4 | 1 | 2.8±0.2 | 0.96±0.08 | 0.22±0.02 |
| $\mu^-e^-e^+$ | 3.4±0.8 (0.4) | 2.0±1.2 (0.7) | 5.4±1.5 | 4 | 4.5±0.4 | 1.71±0.15 | 0.42±0.04 |
| Total sign - | 12.6±1.5 (0.7) | 10.9±2.9 (1.6) | 23.5±3.3 | 16 | 19.2±0.7 | 7.2±0.25 | 1.75±0.07 |
| Total | 33.3±3.9 (1.2) | 22.1±5.2 (1.7) | 55.4±6.5 | 47 | 57.5±1.4 | 23.1±0.6 | 5.78±0.16 |

- ▶ Eventi di fondo e segnale previsti: divisi in categorie e confrontati con i dati
- ▶ Non si osserva alcun eccesso di eventi rispetto ai fondi attesi
- ▶ Discrepanza maggiore in $\mu^+\mu^+\mu^-$: p-value dell'11%, $\iff 1.23 \sigma$

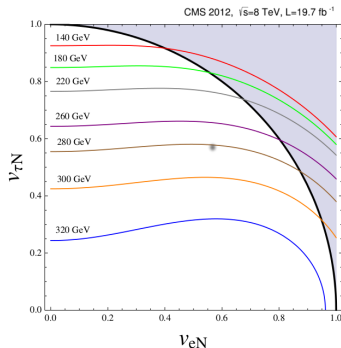
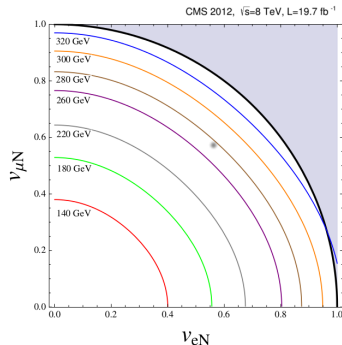
Assenza di segnale \rightarrow limite 95% CL su $\sigma_{\text{prod}} \times \text{BranchingRatio}(\text{stati finali})$



- ▶ Limite osservato da CMS a $\sqrt{s} = 7$ TeV per Σ^+ : 179 GeV
- ▶ Nuovi limiti fissati da CMS a $\sqrt{s} = 8$ TeV per Σ^+ , Σ^- , Σ^\pm

| | 95% CL | | $\sigma \times B$ (fb) | | M_{Σ} (GeV) | |
|--------------|--------|------|------------------------|------|--------------------|------|
| | Exp. | Obs. | Exp. | Obs. | Exp. | Obs. |
| Σ^+ | 19 | 19 | 245 | 260 | | |
| Σ^- | 13 | 8 | 210 | 238 | | |
| Σ^\pm | 18 | 12 | 250 | 278 | | |

Limiti su piani 2D $[v_{eN}, v_{\mu N}]$, $[v_{eN}, v_{\tau N}]$: regioni di esclusione mixing tra sapori leptonici (M_Σ)



- ▶ Area grigia: esclusa per unitarietà
- ▶ Curva nera: nessun accoppiamento al terzo sapore ($v_\tau = 0 \vee v_\mu = 0$)
- ▶ Curve colorate: scenari con lo stesso valore limite di M_Σ
- ▶ Punti: limite calcolato sui dati nello scenario democratico

Conclusioni e prospettive future



- ▶ La collaborazione CMS ha svolto una ricerca del tripletto fermionico predetto dal meccanismo see-saw di tipo III.
- ▶ Lo stato finale comprende tre leptoni isolati carichi, energia trasversa mancante e jet.
- ▶ L'analisi non mostra alcuna evidenza di segnale nei dati raccolti da CMS nel 2012, nelle collisioni protone-protone di LHC a $\sqrt{s} = 8$ TeV.
- ▶ L'interpretazione dei risultati fissa limiti inferiori alla massa dei fermioni nello scenario democratico di accoppiamento ai leptoni.
- ▶ Si è estesa l'interpretazione dei risultati a più ampi range di parametri di mixing, in collaborazione con un teorico.

- ▶ La ricerca del see-saw di tipo III è iniziata con i dati del Run 2 di LHC, a $\sqrt{s} = 13$ TeV. Sarà condotta in un'analisi inclusiva con stati finali multileptonici.

Referenze:

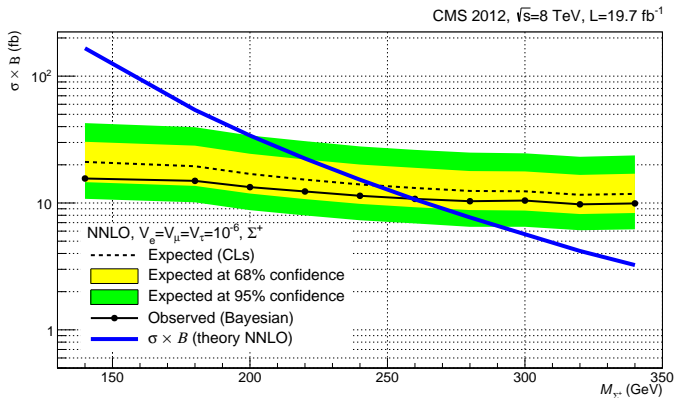
- ▶ CMS: una pubblicazione ([CMS PAS-14-001](#))
- ▶ ATLAS: due articoli pubblicati ([CERN-PH-EP-2015-094](#), [CERN-PH-EP-2015-080](#))



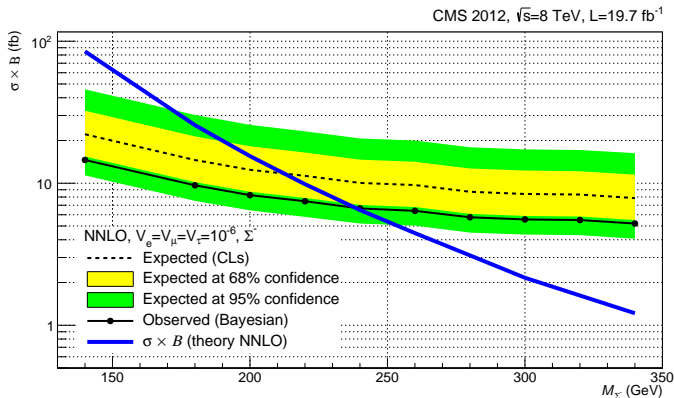
Grazie per l'attenzione!

Backup slides

Interpretazione dei risultati: limite Σ^+

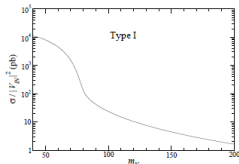


Interpretazione dei risultati: limite Σ^-



Gli esperimenti di LHC hanno potenzialità di scoperta del meccanismo see-saw alla scala elettrodebole.

See-saw di tipo I: singoletto fermionico



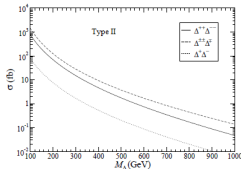
Singoleto N:
neutrino right

$$q\bar{q}' \rightarrow W^* \rightarrow l^{\pm} N$$

$$q\bar{q} \rightarrow Z^* \rightarrow \nu N$$

$$gg \rightarrow H^* \rightarrow \nu N$$

See-saw di tipo II: tripletto scalare



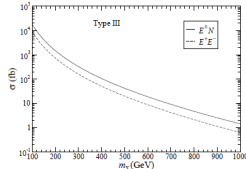
Tripletto scalare Δ di
ipercarica Y=2

$$q\bar{q} \rightarrow Z^* / \gamma^* \rightarrow \Delta^{++}\Delta^{--}$$

$$q\bar{q}' \rightarrow W^* \rightarrow \Delta^{\pm\pm}\Delta^{\mp}$$

$$q\bar{q} \rightarrow Z^* / \gamma^* \rightarrow \Delta^+\Delta^-$$

See-saw di tipo III: tripletto fermionico



Tripletto fermionico Σ di
ipercarica Y=0

$$q\bar{q} \rightarrow Z^* / \gamma^* \rightarrow \Sigma^+ \Sigma^-$$

$$q\bar{q}' \rightarrow W^* \rightarrow \Sigma^{\pm} \Sigma^0$$