

Caratterizzazione dello spin della materia oscura all'LHC

Luca Panizzi

University of Southampton & NExT, UK

Oltre il bosone di Higgs

quali problemi sono ancora aperti?

**Il Modello Standard è completo
ma siamo soddisfatti?**

Dati osservabili

Materia Oscura

**Asimmetria
barioni-antibarioni**

Masse dei neutrini

Problemi teorici

Gerarchia di
masse dei
fermioni

Origine delle
famiglie di flavour

Unificazione degli
accoppiamenti di
gauge

...

Ci deve essere nuova fisica

e molto probabilmente possiamo già osservarla con gli strumenti attuali!

E se c'è nuova fisica, dovremmo poter osservare nuove particelle
(forse una già l'abbiamo vista a 750 GeV...)

Oltre il bosone di Higgs

quali problemi sono ancora aperti?

**Il Modello Standard è completo
ma siamo soddisfatti?**

Dati osservabili

Materia Oscura

**Asimmetria
barioni-antibarioni**

Masse dei neutrini

Problemi teorici

Gerarchia di
masse dei
fermioni

Origine delle
famiglie di flavour

Unificazione degli
accoppiamenti di
gauge

...

Ci deve essere nuova fisica

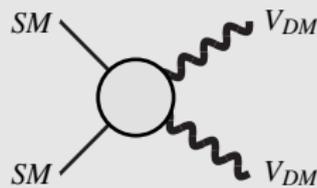
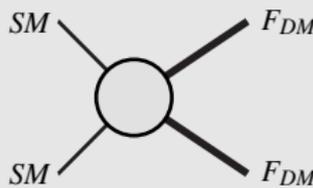
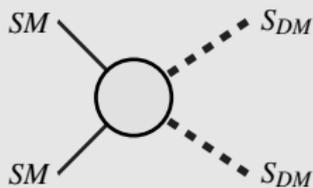
e molto probabilmente possiamo già osservarla con gli strumenti attuali!

E se c'è nuova fisica, dovremmo poter osservare nuove particelle
(forse una già l'abbiamo vista a 750 GeV...)

Concentriamoci sulla materia oscura!

Il ruolo dello spin della materia oscura

Scalare, fermione o vettore?



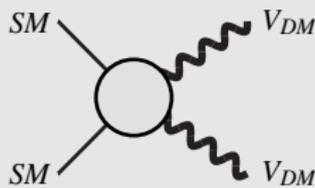
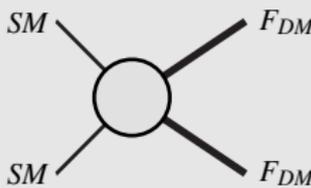
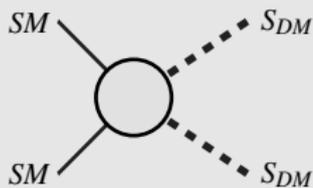
Per esempio:

- **Supersimmetria:** neutralino (fermione) or sneutrino (scalare)
- **Extra-dimensioni universali:** la più leggera particella KK-odd (di solito partner del fotone) (scalare o vettore a seconda del numero di dimensioni)

Determinare lo spin dello stato di materia oscura sarebbe utile per porre limiti o escludere classi di scenari di nuova fisica

Il ruolo dello spin della materia oscura

Scalare, fermione o vettore?



Per esempio:

- **Supersimmetria:** neutralino (fermione) or sneutrino (scalare)
- **Extra-dimensioni universali:** la più leggera particella KK-odd (di solito partner del fotone) (scalare o vettore a seconda del numero di dimensioni)

Determinare lo spin dello stato di materia oscura sarebbe utile per porre limiti o escludere classi di scenari di nuova fisica

Report dell'ATLAS/CMS Dark Matter Forum, arXiv:1507.00966 [hep-ex]:

"Different spins of Dark Matter particles will typically give similar results [...]. Thus the choice of Dirac fermion Dark Matter should be sufficient as benchmarks for atlas+cms dark matter forum the upcoming Run-2 searches"

È sempre vero?

Le proprietà cinematiche di una particella di DM scalare o vettoriale possono essere **diverse** da quelle di una DM fermionica in certi canali?

Teorie effettive e modelli semplificati

Cosa usare?

Teorie effettive (EFT)



Si assume che la materia oscura (DM) comunichi con le particelle del modello standard (SM) tramite particelle troppo massive per poter essere risolte all'LHC

Operatori di dimensione $d > 4$ soppressi da Λ_{UV}^{d-4}

Parametri liberi:

- Massa della DM
- Scala UV (coefficiente dell'operatore)

Semplici da studiare
Applicabilità limitata

Teorie effettive e modelli semplificati

Cosa usare?

Teorie effettive (EFT)



Si assume che la materia oscura (DM) comunichi con le particelle del modello standard (SM) tramite particelle troppo massive per poter essere risolte all'LHC

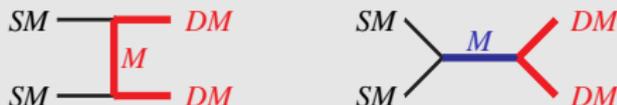
Operatori di dimensione $d > 4$ soppressi da Λ_{UV}^{d-4}

Parametri liberi:

- Massa della DM
- Scala UV (coefficiente dell'operatore)

Semplici da studiare
Applicabilità limitata

Modelli semplificati



Si assume che la DM comunichi con lo SM tramite una particella detta **mediatore**, che può essere sia una particella di nuova fisica (BSM) che una particella dello SM stesso

Operatori di dimensione 4 (o anche superiore, e.g. $gg \rightarrow S \rightarrow DM DM$, ma soppressi da una scala UV)

Parametri liberi:

- Massa della DM
- Massa del mediatore (se BSM)
- Accoppiamento fra DM e mediatore
- Accoppiamento fra SM e mediatore (se BSM)

Possono descrivere più scenari delle EFT
Più gradi di libertà, più complesso lo studio

Teorie efficaci

Operatori di dimensione 6

Elencati in J. Goodman et al. *Constraints on Dark Matter from Colliders*, Phys.Rev. **D82** (2010) 116010, [arXiv:1008.1783]

DM fermione di Dirac	DM scalare complessa o reale
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \chi \bar{q} q$ [D1]	$\frac{1}{\Lambda^2} \partial_\mu (\phi^{(\dagger)} \phi) \bar{q} \gamma^\mu q$ [S1]
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \gamma^5 \chi \bar{q} q$ [D2]	$\frac{1}{\Lambda^2} \partial_\mu (\phi^{(\dagger)} \phi) \bar{q} \gamma^\mu \gamma^5 q$ [S1A]
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \chi \bar{q} \gamma^5 q$ [D3]	$\frac{1}{\Lambda^2} [\phi^\dagger (\partial_\mu \phi) - (\partial_\mu \phi^\dagger) \phi] \bar{q} \gamma^\mu q$ [S2]
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \gamma^5 \chi \bar{q} \gamma^5 q$ [D4]	$\frac{1}{\Lambda^2} [\phi^\dagger (\partial_\mu \phi) - (\partial_\mu \phi^\dagger) \phi] \bar{q} \gamma^\mu \gamma^5 q$ [S2A]
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} q \bar{q} \chi$ [D1T]	$\frac{1}{\Lambda^2} \phi^{(\dagger)} \phi (\bar{q} \overleftrightarrow{\not{D}} q)$ [S3]
$\frac{1}{2\Lambda^2} (\bar{\chi} \gamma^5 q \bar{q} \chi + \bar{\chi} q \bar{q} \gamma^5 \chi)$ [D2T]	$\frac{1}{\Lambda^2} \phi^{(\dagger)} \phi (\bar{q} \overleftrightarrow{\not{D}} \gamma^5 q)$ [S3A]
$\frac{1}{2\Lambda^2} (\bar{\chi} \gamma^5 q \bar{q} \chi - \bar{\chi} q \bar{q} \gamma^5 \chi)$ [D3T]	$\frac{1}{\Lambda^2} \phi^{(\dagger)} \phi \bar{q} q \Phi \implies \frac{\bar{m}}{\Lambda^2} \phi^{(\dagger)} \phi \bar{q} q$ [S4]
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \gamma^5 q \bar{q} \gamma^5 \chi$ [D4T]	$\frac{1}{\Lambda^2} \phi^{(\dagger)} \phi \bar{q} \gamma^5 q \Phi \implies \frac{\bar{m}}{\Lambda^2} \phi^{(\dagger)} \phi \bar{q} \gamma^5 q$ [S4A]
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \gamma^\mu \chi \bar{q} \gamma_\mu q$ [D5]	$\frac{1}{\Lambda^2} \phi^{(\dagger)} \phi G^{\mu\nu} G^{\mu\nu}$ [S5]
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \gamma^\mu \gamma^5 \chi \bar{q} \gamma_\mu q$ [D6]	$\frac{1}{\Lambda^2} \phi^{(\dagger)} \phi \tilde{G}^{\mu\nu} G^{\mu\nu}$ [S5A]
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \gamma^\mu \chi \bar{q} \gamma_\mu \gamma^5 q$ [D7]	
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \gamma^\mu \gamma^5 \chi \bar{q} \gamma_\mu \gamma^5 q$ [D8]	
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \sigma^{\mu\nu} \chi \bar{q} \sigma_{\mu\nu} q$ [D9]	
$\frac{1}{\Lambda^2} \bar{\chi} \sigma^{\mu\nu} \gamma^5 \chi \bar{q} \sigma_{\mu\nu} q$ [D10]	

Operatori non considerati in letteratura

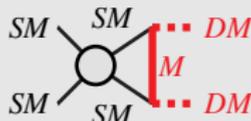
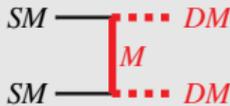
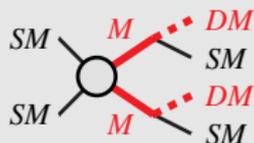
S1/S1A sono derivate totali e quindi contribuiscono solo quando gli stati iniziali sono nella regione offshell

S3/S3A sono equivalenti a S4/S4A attraverso una ridefinizione dei campi

Modelli semplificati

Una caratteristica comune dei candidati di DM è che sono **dispari** sotto una simmetria di tipo Z_2 mentre le particelle dello SM sono **pari**. Ma come si comportano i mediatori?

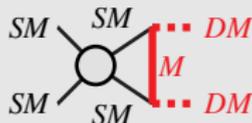
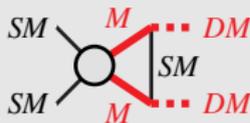
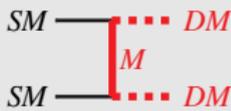
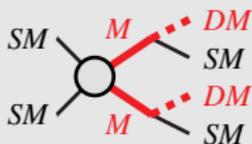
Mediatori dispari



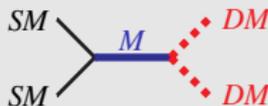
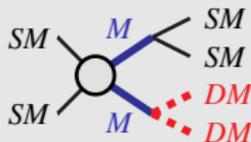
Modelli semplificati

Una caratteristica comune dei candidati di DM è che sono **dispari** sotto una simmetria di tipo Z_2 mentre le particelle dello SM sono **pari**. Ma come si comportano i mediatori?

Mediatori dispari



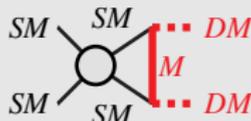
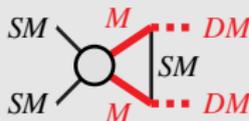
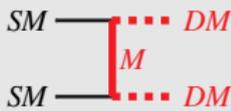
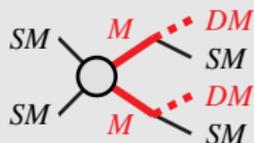
Mediatori pari



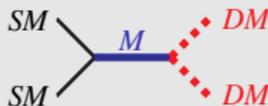
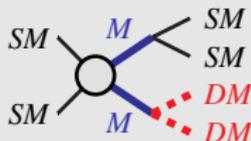
Modelli semplificati

Una caratteristica comune dei candidati di DM è che sono **dispari** sotto una simmetria di tipo Z_2 mentre le particelle dello SM sono **pari**. Ma come si comportano i mediatori?

Mediatori dispari



Mediatori pari



Particelle dello SM come mediatori

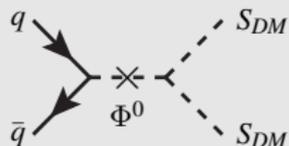


Mono-X da **canale t** o topologie a **loop** per mediatori **dispari**
e da **canale s** o topologie **4-leg** per mediatori **pari** (sia di nuova fisica che SM)

Il ruolo dello spin del mediatore

canale s

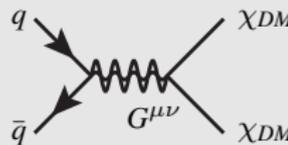
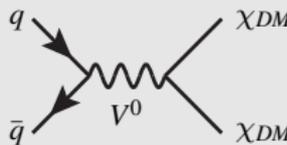
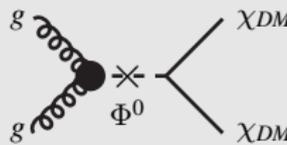
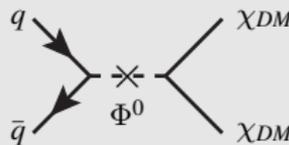
Scalare



Vettore



Tensore



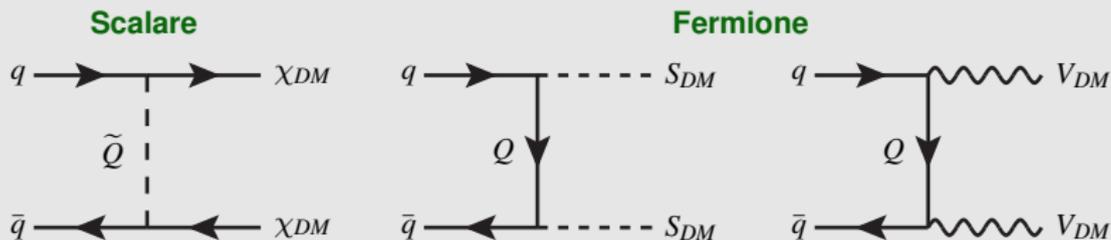
La rilevanza di processi iniziati da gluoni dipende dall'accoppiamento fra mediatore scalare e quark SM

Stessi mediatori per DM bosonica o fermionica

Canali di mono-X possono discriminare lo spin della DM solo se "X" accoppia alla DM (per esempio mono-Z o mono-W con Z/W mediatore o mono-Higgs con Higgs mediatore)

Il ruolo dello spin del mediatore

canale t

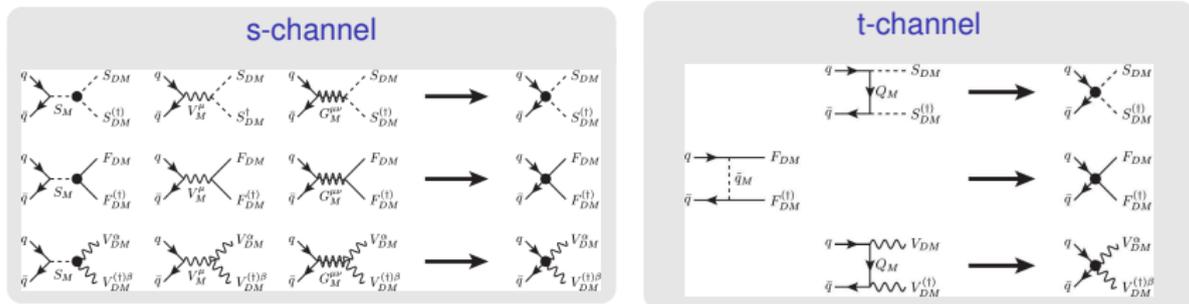


E diagrammi a loop se il mediatore non accoppia ai partoni dello SM

Nel canale t lo spin della DM e del mediatore sono collegati

Qualsiasi canale di mono-X può essere in grado di testare lo spin della DM (o almeno distinguere fra DM fermionica o bosonica)

Una corrispondenza univoca



Più modelli semplificati possono essere descritti dallo stesso operatore nel limite di mediatore molto massivo

- DM scalare e mediatore scalare in canale s \longrightarrow operatore S4
- DM scalare e mediatore fermionico in canale t \longrightarrow operatore S4

$$\frac{\tilde{m}}{\Lambda^2} \phi^{(\dagger)} \phi \bar{q} q$$

Operatori corrispondenti a spin di DM diversi possono in principio generare risultati diversi

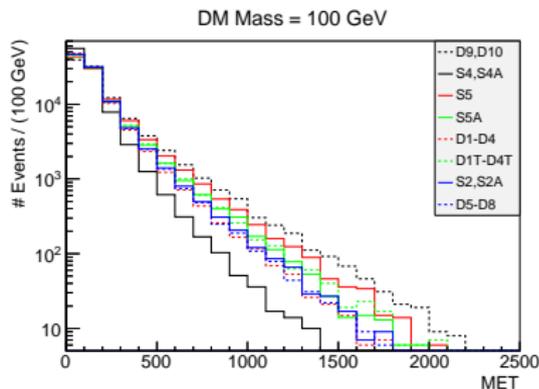
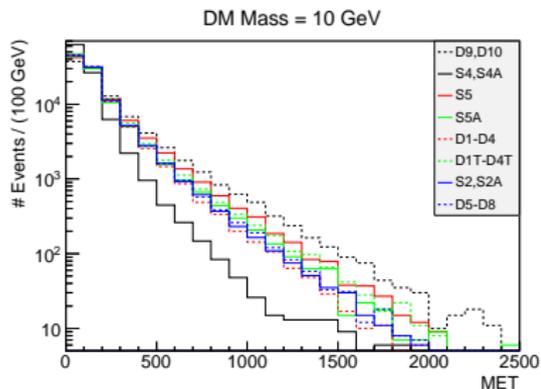
Cosa risulta in pratica, a livello numerico?

Mono-jet

Risultati preliminari

In collaborazione con A.Belyaev, M. Thomas (Southampton) e A. Pukhov (Moscow State University)

Teorie efficaci



- **Differenze rilevanti** fra operatori diversi corrispondenti a DM scalare o fermionica (distribuzione per **D1** corrispondente a **DM fermionica** (linea tratteggiata rossa) con coda più alta di quella di **S4** corrispondente a **DM scalare** (linea continua nera))
- Le differenze non sono attenuate eccessivamente considerando effetti di detector
- Differenze presenti per masse di DM diverse

Questi effetti possono essere meglio compresi considerando i modelli semplificati

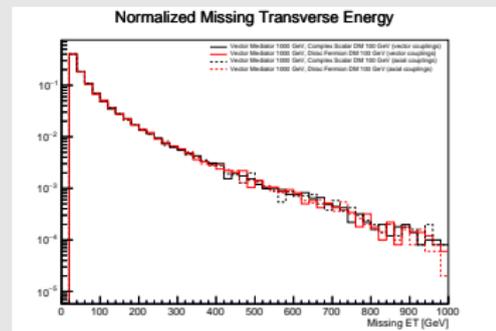
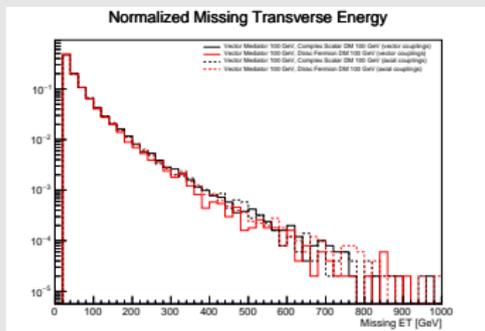
Mono-jet

topologie di canale s (esempio con mediatore vettoriale)

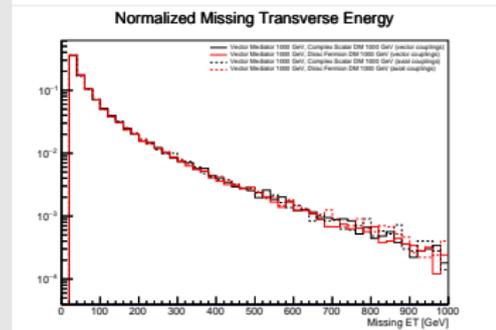
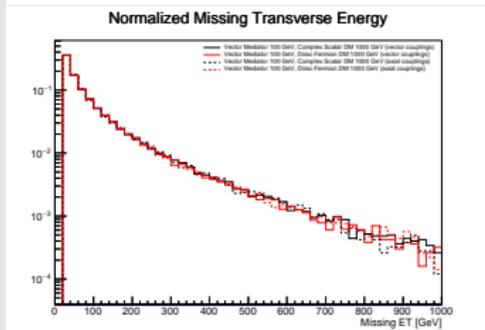
$M_V = 100 \text{ GeV}$

$M_V = 1000 \text{ GeV}$

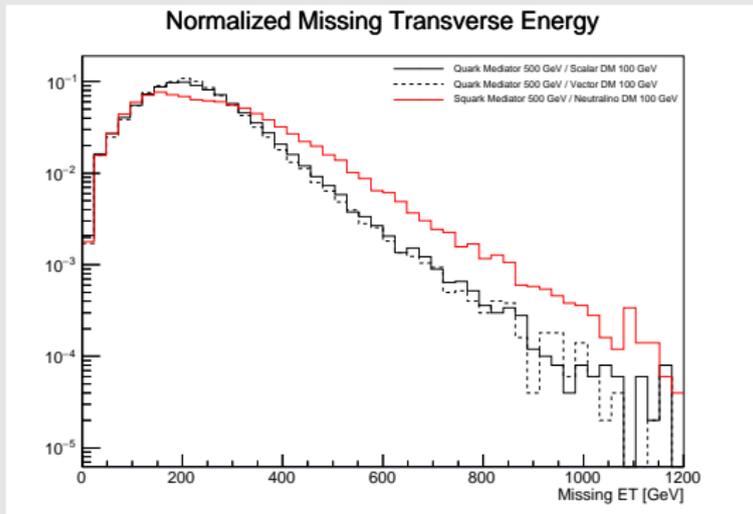
$M_{DM} 100 \text{ GeV}$



$M_{DM} 1000 \text{ GeV}$



Risultati molto simili per DM di spin diverso (come previsto)



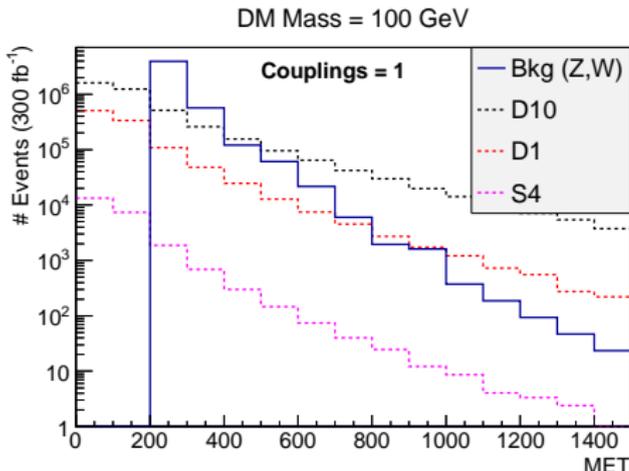
Analogamente a EFT, la coda della distribuzione corrispondente a **DM fermionica** è più alta di quella corrispondente a **DM bosonica**

Sensibilità maggiore allo spin della DM tramite mediatori di spin diverso

Rimane un'ambiguità fra DM scalare o vettoriale data dal fatto che il mediatore è lo stesso

Considerando il background

Risultati per teorie effettive



A seconda del coefficiente dell'operatore, è possibile isolare il segnale dal background per operatori diversi applicando tagli sull'energia mancante.

È importante capire i limiti sui coefficienti degli operatori provenienti da altre osservabili (relic density, direct e indirect detection...)
per poter sviluppare una strategia di ricerca di segnali di DM

Canale Mono-Z

(scenario con Z come mediatore)

Risultati preliminari a livello partonico (LHC@8TeV)

Topologie del segnale

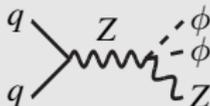
mono-Z

Assunzioni

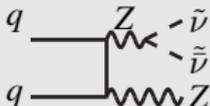
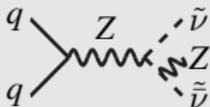
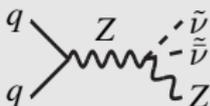
- La DM interagisce **solo** con i bosoni di gauge dello SM
- Gli accoppiamenti della DM sono di tipo EW: $\begin{cases} g_{Z-Z-DM} = e/s_W & (3\text{-leg}) \\ g_{Z-Z-DM-DM} = (e/s_W)^2 & (4\text{-leg}) \end{cases}$

DM scalare

Reale (ϕ)
solo 4-leg



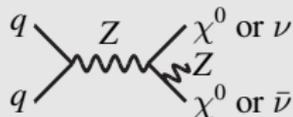
Complessa ($\tilde{\nu}, \tilde{\bar{\nu}}$)
4-leg e 3-leg



DM fermionica

Majorana (χ^0)

solo 3-leg



Dirac ($\nu, \bar{\nu}$)

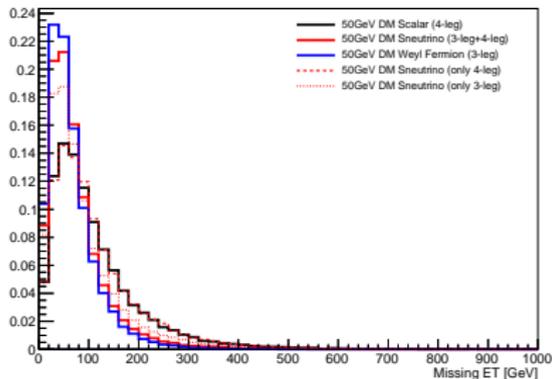
Possiamo distinguere effetti di spin da effetti di topologia?

Canale mono-Z

$$M_{DM} = 50\text{GeV}$$

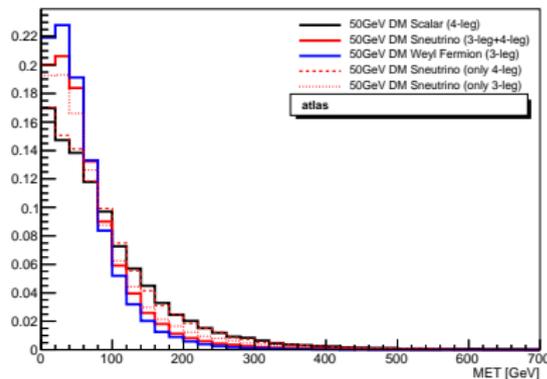
Livello partonico dopo il decadimento della Z

Normalized Missing Transverse Energy



Detector level (CheckMATE)

Normalised MET



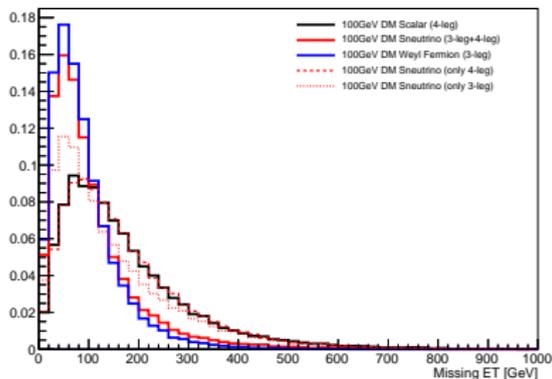
- Difficile separare effetti di spin per topologie con **vertici 4-leg**
- Effetti di spin molto più evidenti per topologie con **vertici 3-leg**
- Le differenze **umentano** per DM più massiva
- Le differenze son sempre **abbastanza grandi** da non essere attenuate a livello di detector

Canale mono-Z

$$M_{DM} = 100\text{GeV}$$

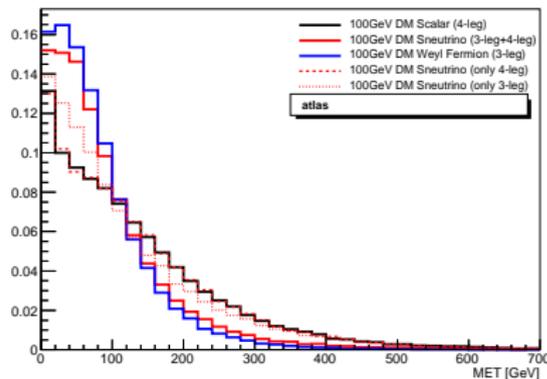
Livello partonico dopo il decadimento della Z

Normalized Missing Transverse Energy



Detector level (CheckMATE)

Normalised MET



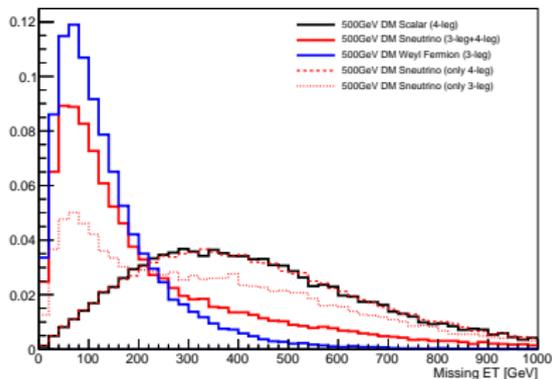
- Difficile separare effetti di spin per topologie con **vertici 4-leg**
- Effetti di spin molto più evidenti per topologie con **vertici 3-leg**
- Le differenze **umentano** per DM più massiva
- Le differenze son sempre **abbastanza grandi** da non essere attenuate a livello di detector

Canale mono-Z

$$M_{DM} = 500\text{GeV}$$

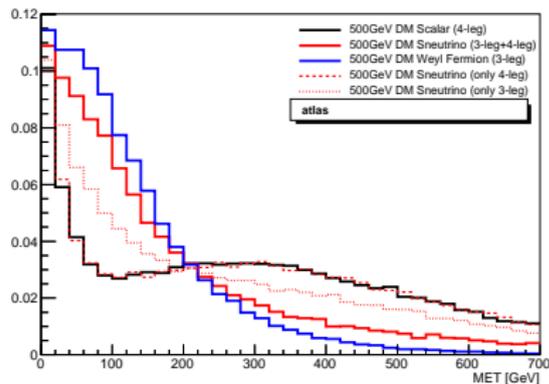
Livello partonico dopo il decadimento della Z

Normalized Missing Transverse Energy



Detector level (CheckMATE)

Normalised MET



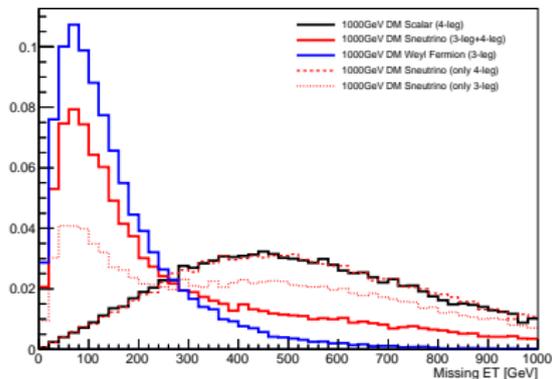
- Difficile separare effetti di spin per topologie con **vertici 4-leg**
- Effetti di spin molto più evidenti per topologie con **vertici 3-leg**
- Le differenze **umentano** per DM più massiva
- Le differenze son sempre **abbastanza grandi** da non essere attenuate a livello di detector

Canale mono-Z

$$M_{DM} = 1000 GeV$$

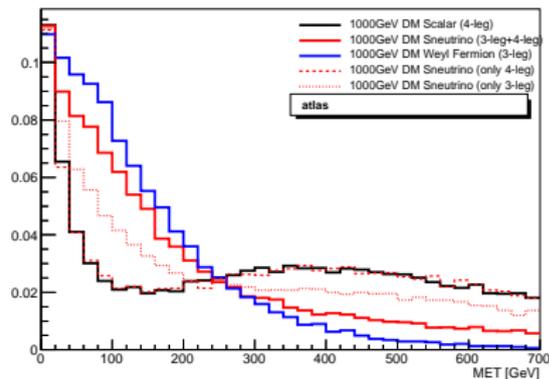
Livello partonico dopo il decadimento della Z

Normalized Missing Transverse Energy



Detector level (CheckMATE)

Normalised MET



- Difficile separare effetti di spin per topologie con **vertici 4-leg**
- Effetti di spin molto più evidenti per topologie con **vertici 3-leg**
- Le differenze **umentano** per DM più massiva
- Le differenze son sempre **abbastanza grandi** da non essere attenuate a livello di detector

Conclusioni e prospettive

In sintesi

- La caratterizzazione dello spin di un candidato di DM all'LHC sarebbe cruciale per l'interpretazione di un possibile segnale in termini di scenari di nuova fisica
- Canali di mono-X sono maggiormente sensibili allo spin del mediatore, ma se lo spin della DM è collegato a quello del mediatore (canale t) è possibile esplorare le differenze di spin della DM
- Gli operatori corrispondenti a teorie effettive – più semplici da studiare – possono già dare indicazioni riguardo lo spin della DM, se un segnale con momento mancante fosse osservato

Lavori in corso

- Determinazione dei limiti su accoppiamenti e masse per poter meglio identificare strategie di ricerca
- Studio della rilevanza di altri canali (mono-Z, mono-photon, mono-W...)