

Martina Ressegotti  
(INFN Genova)

IFAE 2023 - Incontri di Fisica  
delle Alte Energie  
Catania, 12-14 Aprile 2023

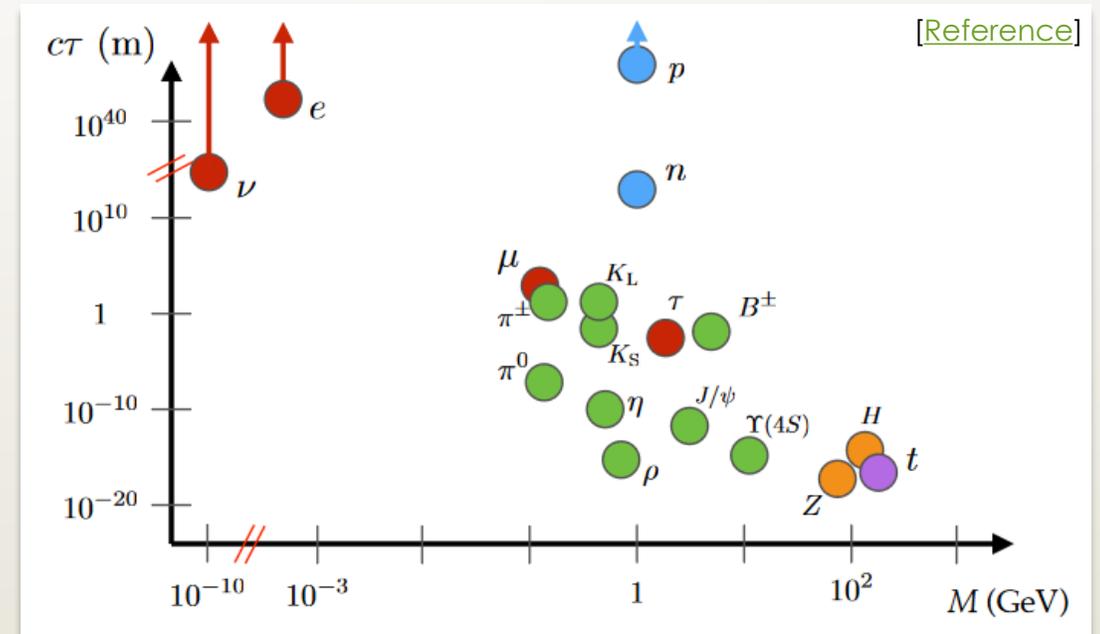
# Ricerca di particelle a lunga vita media in collisioni p-p a 13 TeV con l'esperimento ATLAS

# Particelle a lunga vita media (LLP)

Particelle a lunga vita media (LLP) sono particelle non appartenenti al Modello Standard (MS) che **decadono nel rivelatore** oppure, se **cariche, stabili all'interno dell'accettazione del rivelatore**

Previste da numerosi modelli teorici:

- Modelli **supersimmetrici** e **Hidden Sector**
- Modelli con **molteplici Higgs**
- Settore della **materia oscura**
- **Anomalie di sapore**
- **Heavy resonances**



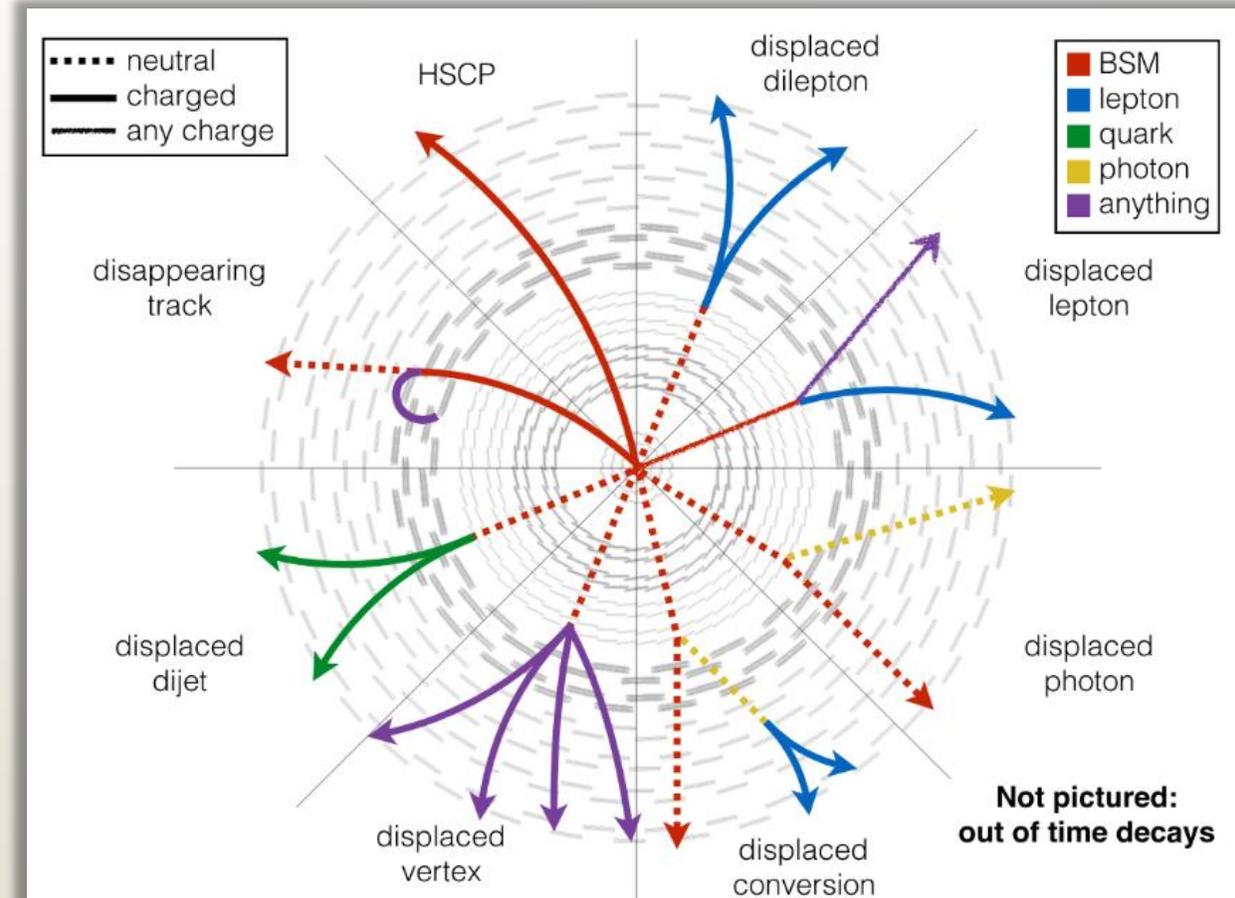
# Come rivelare LLPs?

LLPs che vengono ricercate possono avere caratteristiche molto diverse

- **Leggere / pesanti**
- **Veloci / lente**
- Decadere in particelle del MS **rivelabili** (quark, leptoni, gluoni) / particelle **non rivelabili**

Le ricerche sono pertanto basate su signature come

- **Displacements (vertici e tracce)**
- **Vita media**
- **Tempo di volo**
- **Ionizzazione anomala**
- **Energia trasversa mancante**



[Credits: J. Antonelli]

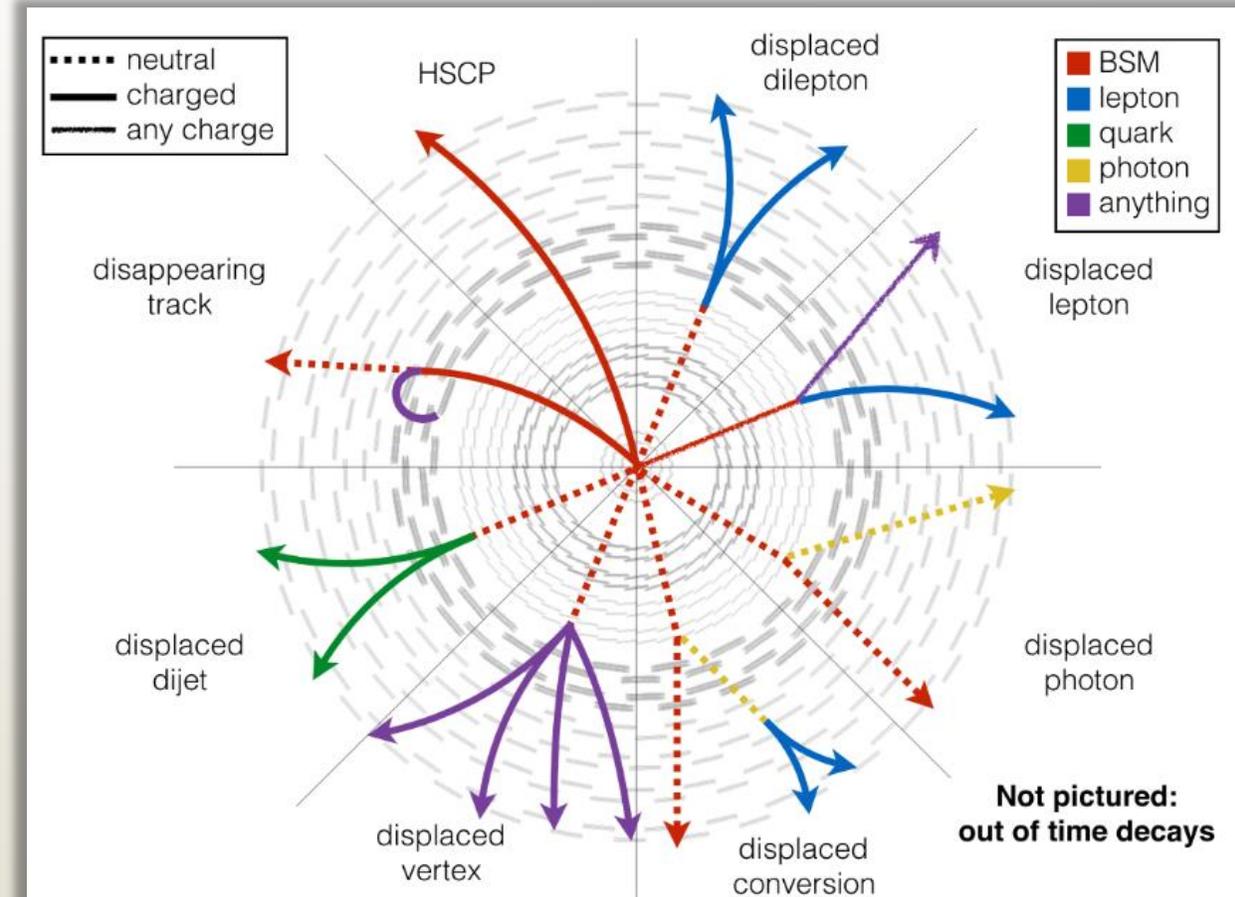
# Come rivelare LLPs?

Analisi interessanti e diverse tra loro perché la ricerca del segnale può

- Richiedere **trigger dedicati**
- Richiedere speciali **algoritmi di ricostruzione**
- Richiedere **simulazioni ad-hoc**
- Avere **background inusuali**

→ Il rivelatore ATLAS non è stato inizialmente disegnato per LLPs, per questo spesso si usano algoritmi particolari

Ricerche di LLP spesso si basano sulle informazioni di uno **specifico sottorivelatore**



[Credits: J. Antonelli]

# Risultati recenti con l'esperimento ATLAS

- Settore LLP molto attivo: molte ricerche già effettuate, molte in corso con i dati di LHC Run-2

## Risultati piú recenti

Marzo '23	Coppia di muoni con piccolo displacement	<a href="#">ATLAS-CONF-2023-018</a>
→ Luglio '22	LLP massive con vertici displaced e jet multipli	<a href="#">arxiv:2301.13866</a>
Luglio '22	Difotoni e dielettroni da bosoni H,Z displaced	<a href="#">ATLAS-CONF-2022-051</a>
Maggio '22	LLP massive di carica multipla	<a href="#">arxiv:2303.13613</a>
Marzo '22	Fotoni displaced da decadimenti esotici di H	<a href="#">arxiv:2209.01029</a>
→ Marzo '22	LLP carichi con stati finali con elevata dE/dx	<a href="#">arxiv:2205.06013</a>
→ Marzo '22	Leptoni neutri pesanti displaced	<a href="#">arxiv:2204.11988</a>
Marzo '22	LLP neutre con jets adronici displaced	<a href="#">JHEP 06 (2022) 005</a>

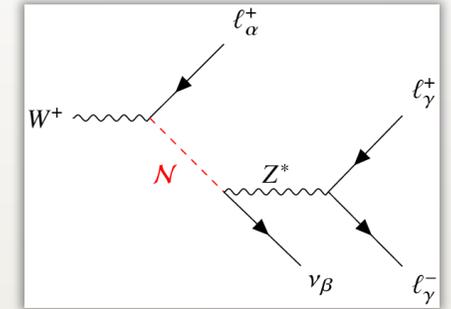
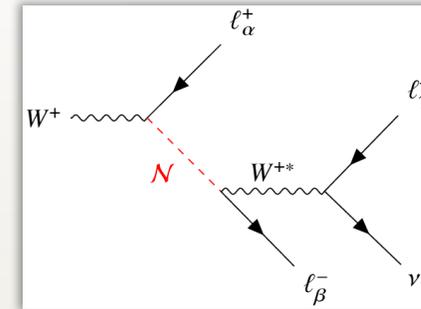
- Intervalli di esclusione di sezioni d'urto e vite medie in costante aggiornamento
- Selezionato alcune di queste ( → ) in base alla segnatura/strategia utilizzata e eventi osservati

# Heavy Neutral Lepton con coppia di leptoni displaced

[arxiv:2204.11988](https://arxiv.org/abs/2204.11988)

- **Target:**

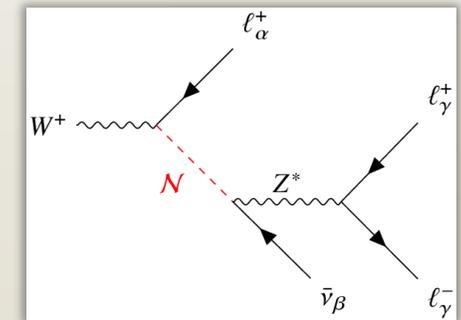
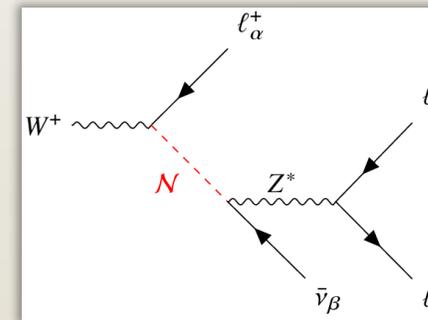
- Heavy Neutral Lepton (HNL)  $N$  prodotto dal decadimento  $W \rightarrow Nl$  ( $l = e, \mu$ ), che decade in due leptoni carichi (displaced) e un neutrino
- Sensibilità:  $m = O(3-20)$  GeV,  $c\tau \sim 1-100$  mm
- Produrre limiti per la prima volta anche per scenari con **flavour-mixing** (motivati da oscillazioni di neutrino)



Esami di produzione e decadimenti di HNL con (sopra) e senza (sotto) conservazione del numero leptonico.

- **Segnatura:**

- Leptone prompt + due leptoni di segno opposto da vertice displaced (dal decadimento di HNL long-lived)



# HNL con coppia di leptoni displaced

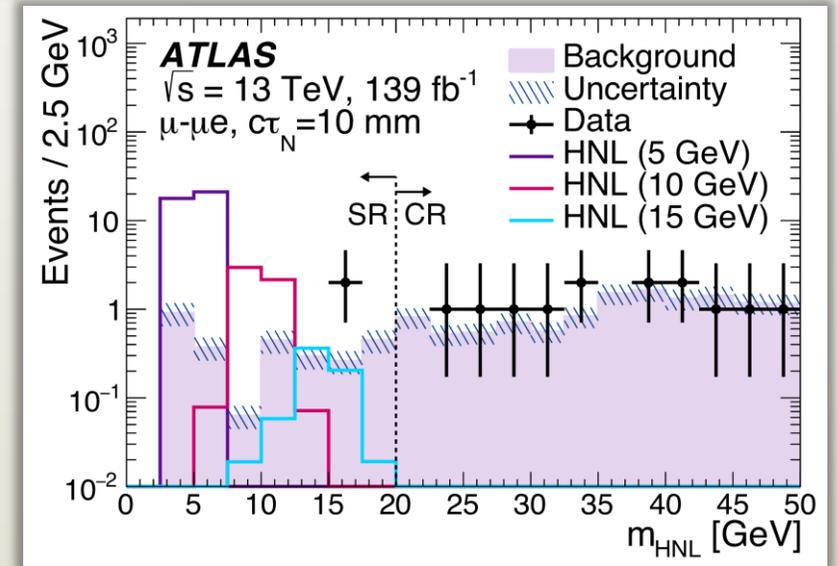
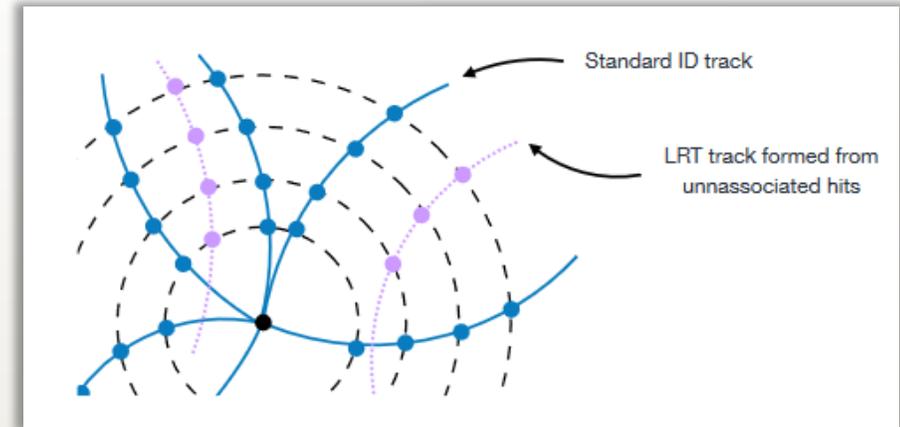
arxiv:2204.11988

- **Strategia:**

- Nuovo: massa di  $N$  dalla conservazione del quadrimpulso

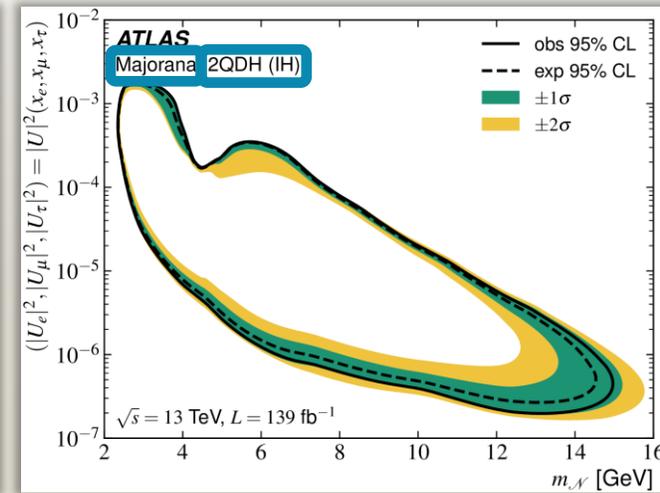
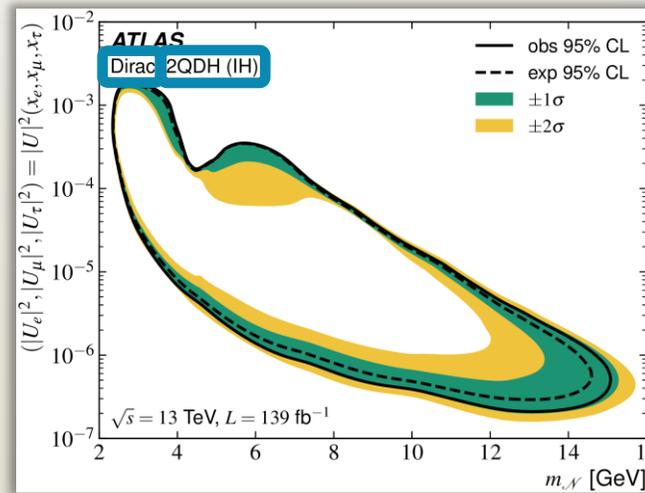
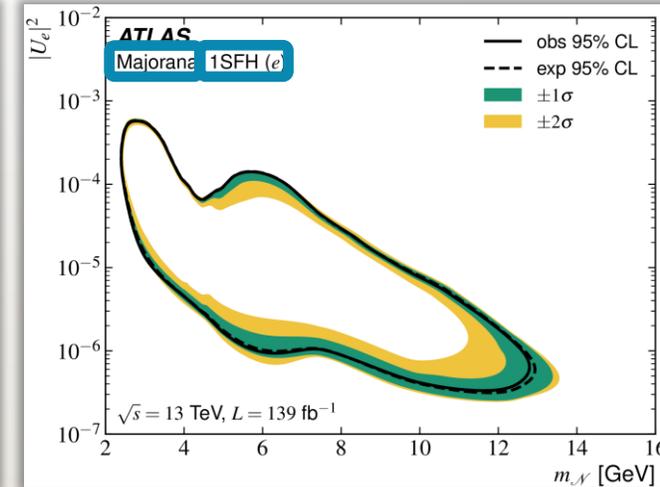
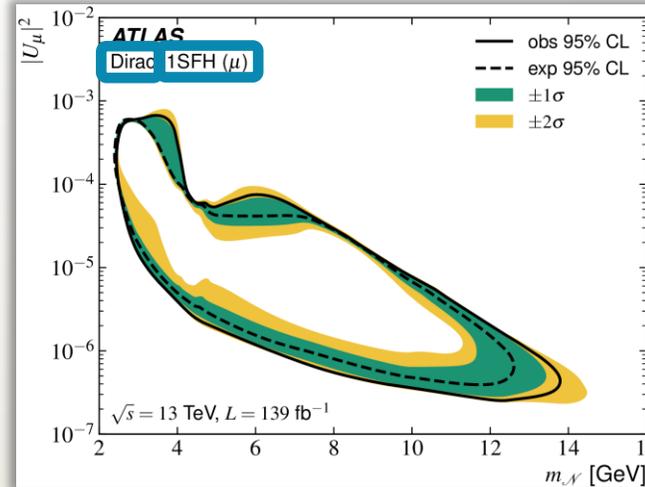
$$m_N^2 = (P_{l_\beta} + P_{l_\gamma} + P_{\nu_\gamma})^2$$

- Usa tracciamento con grande raggio per i leptoni displaced
- Canali separati per sapore del leptone ( $e/\mu$ )
- Background dominato da sovrapposizione casuale di tracce leptoniche  $\rightarrow$  stimato dai dati
- Altri background da (1) vertice displaced (DV) da interazioni nel materiale del rivelatore, (2) decadimenti di particelle MS metastabili, (3)  $Z \rightarrow ll$ , (4) muoni cosmici soppressi da tagli geometrici, tagli sulla massa di coppie di leptoni, e un misto di tagli geometrici e sulla massa appositamente calibrati nei vari stati finali



# HNL con coppia di leptoni displaced

- **Risultati:** (con  $139 \text{ fb}^{-1}$  di dati di collisioni pp 13 TeV)
  - Interpretati sia assumendo particelle di **Dirac** che **Majorana** (conservazione o non del numero leptonico)
  - Modello con 1 HNL con *single-flavour* mixing (1SFH)
    - non prevedono due splitting di massa del neutrino e oscillazioni di neutrino
      - **Nuovi** limiti su  $|U_\mu|^2$
      - **Primi risultati di ATLAS**  $|U_e|^2$
    - **Primi risultati con modello con 2 HNL quasi-degeneri (2QDH)**
      - prevedono due splitting di massa del neutrino e oscillazioni di neutrino



# Pixel dE/dx

arxiv:2205.06013

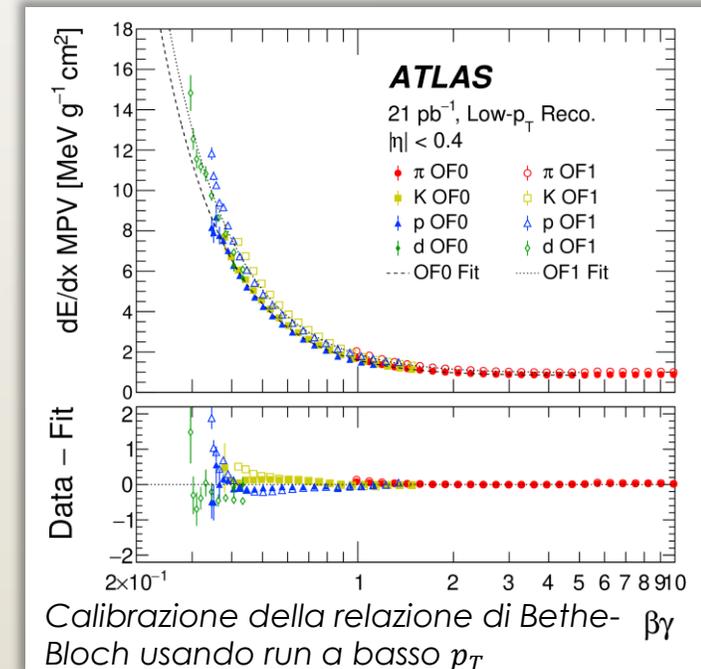
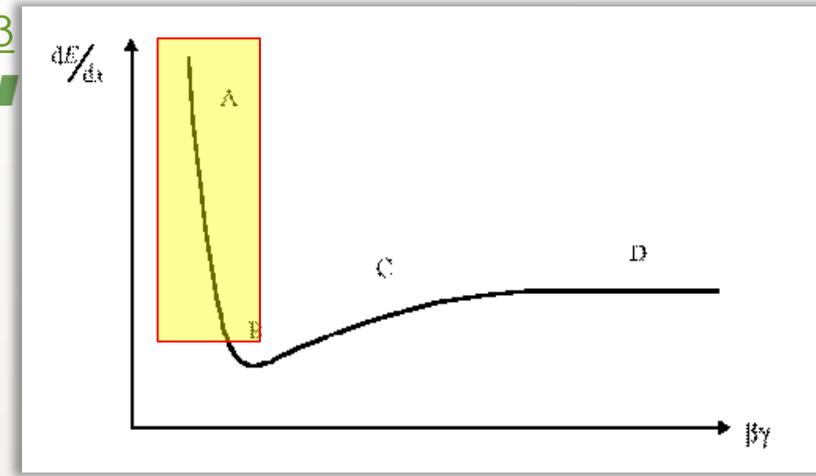
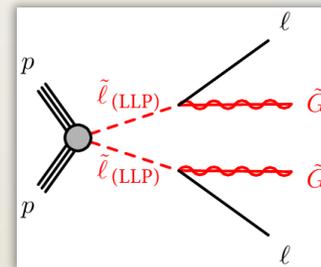
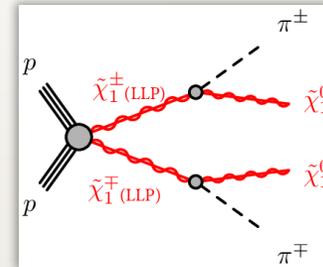
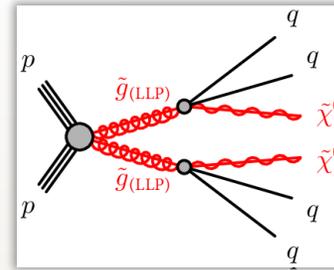
- **Target:**

- ricerca di LLPs **massive con basso  $\beta$** , mantenendo indipendenza dal modello
- Sensibilità:  $\tau \sim 0.3$  ns a stabile

- **Strategia:**

- Usare **alta dE/dx** misurata nel **pixel detector** per identificare **basso  $\beta$**  mediante la relazione di Bethe-Bloch
- Unito alla richiesta di **grande momento  $p$**  seleziona particelle massive:

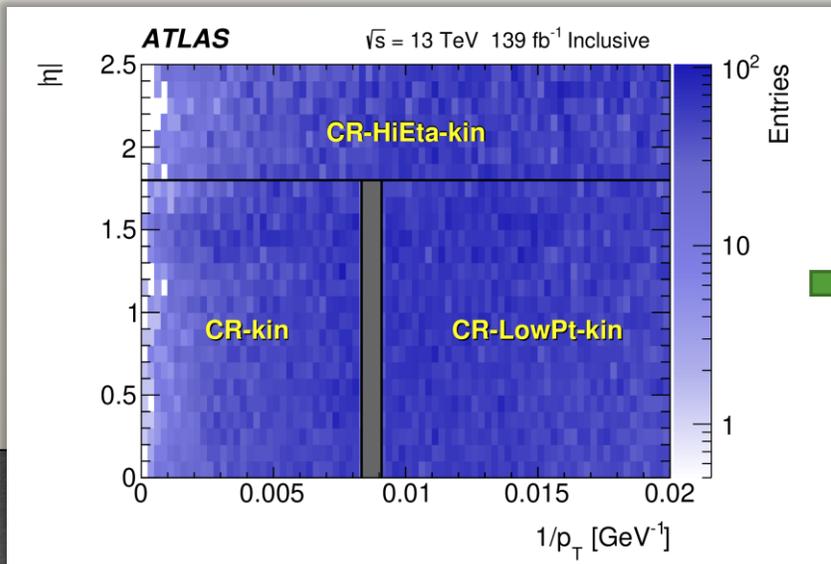
$$m_{dE/dx} = \frac{p_{reco}}{\beta\gamma \langle \frac{dE}{dx} \rangle_{corr}}$$



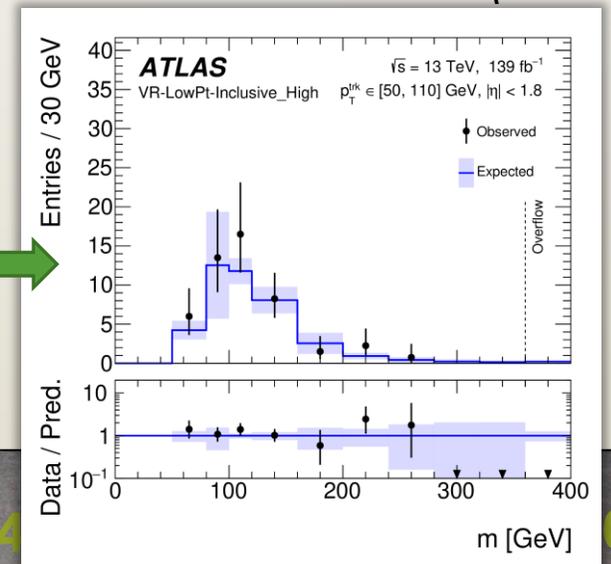
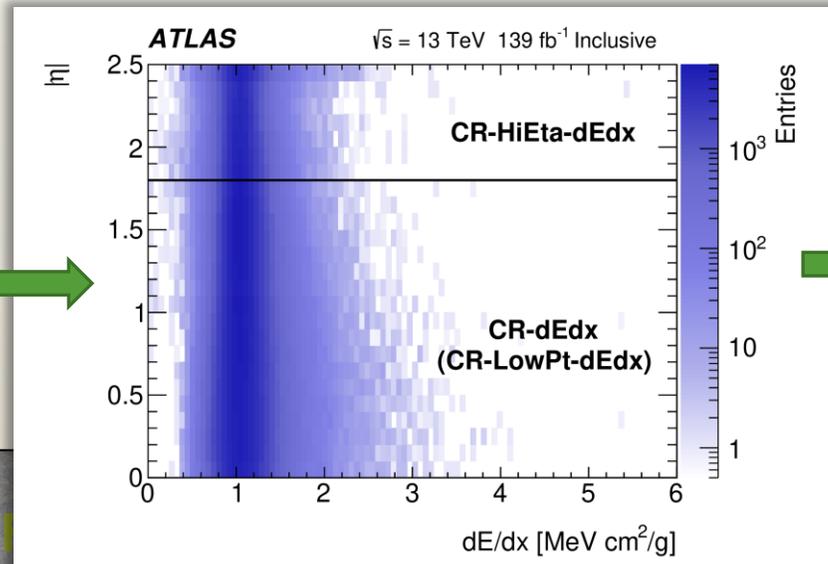
- **Strategia:**

- **Regione di Segnale** = ET miss trigger ( $>170$  GeV) + tracce isolate centrali ( $|\eta| < 1.8$ ) con alto  $p_T$  ( $>120$  GeV) e grande ionizzazione specifica ( $dE/dx > 1.8$  MeV g<sup>-1</sup> cm<sup>2</sup>) [si pone  $dE/dx=1$  MeV g<sup>-1</sup> cm<sup>2</sup> per MIPs]
  - Ulteriormente divisa in 8 regioni (inclusive / esclusive con match di muone o overflow in *Insertable B-Layer* [IBL, layer piú interno del rivelatore a pixel]) e **bin di dE/dx** corrispondenti a diverse **masse e vite medie di LLP**
- **Background:** stimato dai dati a partire da regioni di controllo (ortogonali) da cui sono estratti  $1/p_T$ ,  $\eta$  e  $dE/dx$ , validati in regioni di validazione (una a basso  $p_T$ , una a alto  $\eta$ )

Estrazione di ( $1/p_T$ ,  $\eta$ )



Estrazione di  $dE/dx$  (per  $\eta$  considerato) Calcolo della massa ( $m = \frac{p}{\beta\gamma}$ )



# Pixel dE/dx

[arxiv:2205.06013](https://arxiv.org/abs/2205.06013)

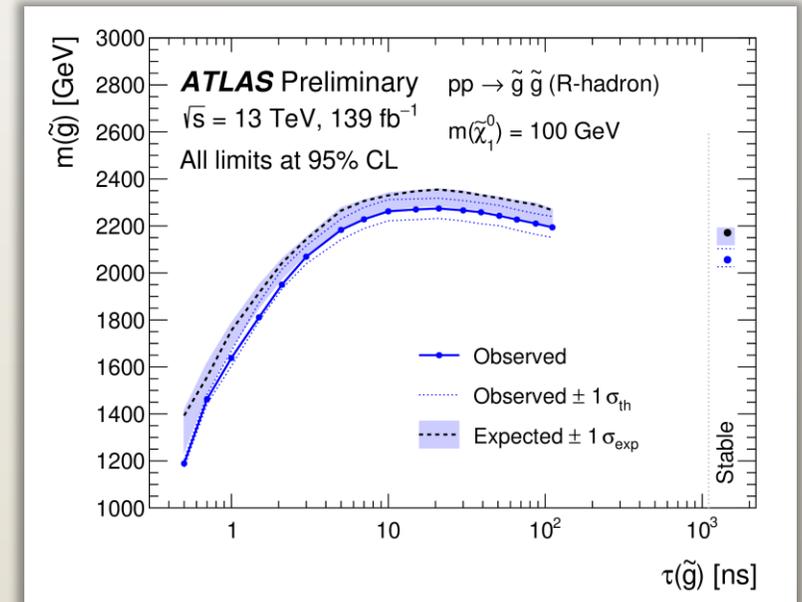
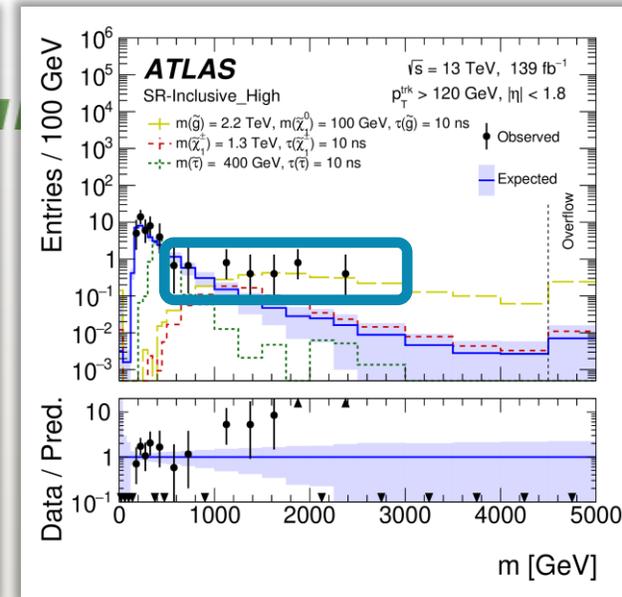
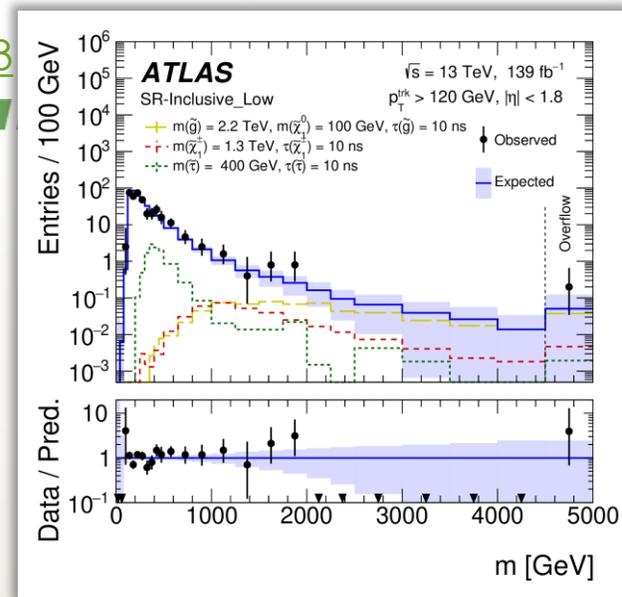


## • Risultati:

- Dati compatibili con background atteso per la maggior parte delle regioni di segnale
- Eccesso di eventi con significanza  $3.3\sigma$  (7 osservati,  $0.7 \pm 0.4$  attesi) per la finestra di massa **[1.1, 2.8] TeV**
  - Verifica di problemi strumentali (tracce e pixel cluster) e consistenza tra tracce ricostruite nel sistema muonico (MS) o nel tracciatore (ID)  $\rightarrow$  ok
  - Tuttavia la misura di  $\beta$  nel MS e nel calorimetro sono consistenti con  $\beta=1 \rightarrow$  non confermano basso  $\beta$
- **Limiti su vite medie di gluino, chargino, stau**
  - Esclusi gluino R-adrone con  $m < 2.27$  TeV,  $\tau = 20$  ns, LSP di massa 100 GeV

## • Nuova analisi in corso:

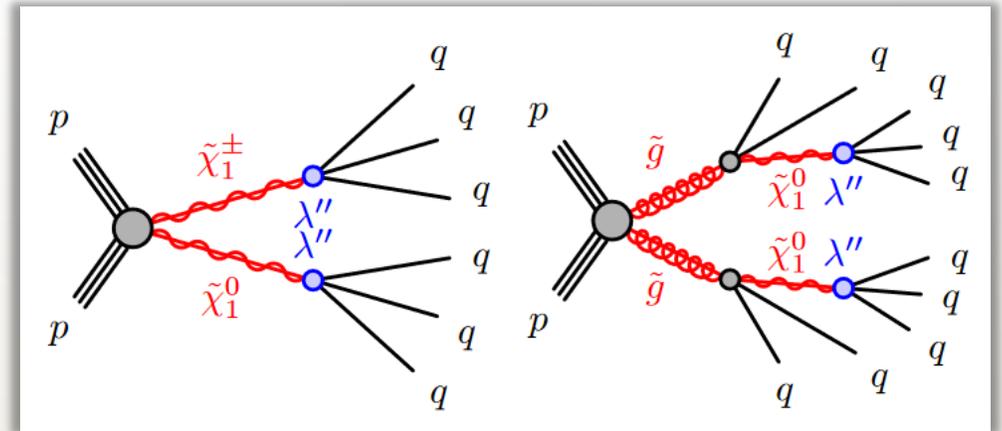
- Nuova ondata di analisi in corso, che utilizza anche la misura di **ToF del calorimetro**
  - due misure indipendenti di  $\beta\gamma$  per ridurre il background dovuto a effetti spuri/strumentali (maggiore sensitività)
  - vincolato alla copertura in eta del calorimetro ( $|\eta| < 1.6$ )



# Vertice displaced e jets multipli

[arxiv:2301.13866](https://arxiv.org/abs/2301.13866)

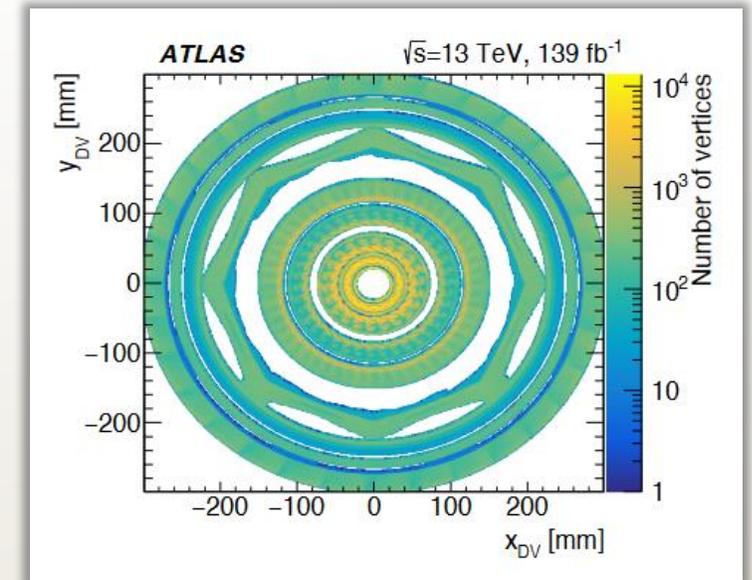
- **Target:** modelli RPV SUSY semplificati in cui neutralino/chargino hanno  $\tau < O(10)$  ns a causa di piccole costanti di accoppiamento ( $\lambda''$ ) e con BR=100% in stati finali con quark light-flavour
- **Segnatura:** vertice displaced, massivo, con molteplici tracce e molteplici jet energetici
- **Background:** non ci sono particelle del MS massive che producono vertici displaced che soddisfano le selezioni usate → **piccolo background** dovuto a
  - (dominante) da sovrapposizione di vertici di massa minore erroneamente classificati come vertici di alta massa
  - (rari) interazioni adroniche con materiale del rivelatore e sovrapposizione accidentale di tracce con vertici di massa (*accidental crossings*)
- **Strategia:** punta a **background nullo** (alta sensitività) sfruttando specifiche tecniche di ricostruzione → **1 evento di background in tutto il data sample!**



# Vertice displaced e jets multipli

arxiv:2301.13866

- **Regione di segnale:** due SR mutualmente esclusive
  - un DV con criteri di selezione stringenti (inclusa **distanza minima dai vertici di collisione** per ridurre il background, **veto sulla posizione** del DV per escludere interazioni nel materiale)

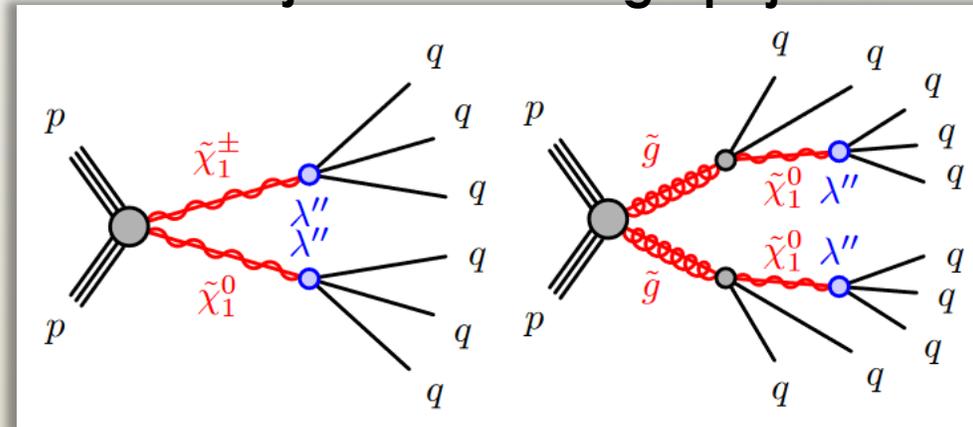


ed una delle due selezioni:

- **High- $p_T$  jet SR**  $\rightarrow$  per eventi con produzione di **coppia di gluini**:  $>3$  jets di cui almeno 1 o 2 senza traccia (diverse soglie in  $p_T$ )
- **Trackless jet SR**  $\rightarrow$  per eventi con produzione di **coppia chargino/neutralino**: falliscono selezione High- $p_T$  jet, hanno  $>3$  jets di alto  $p_T$

Trackless jet SR

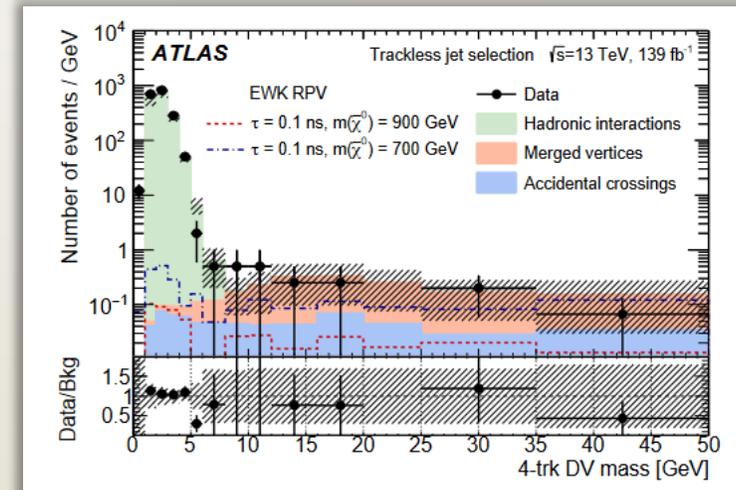
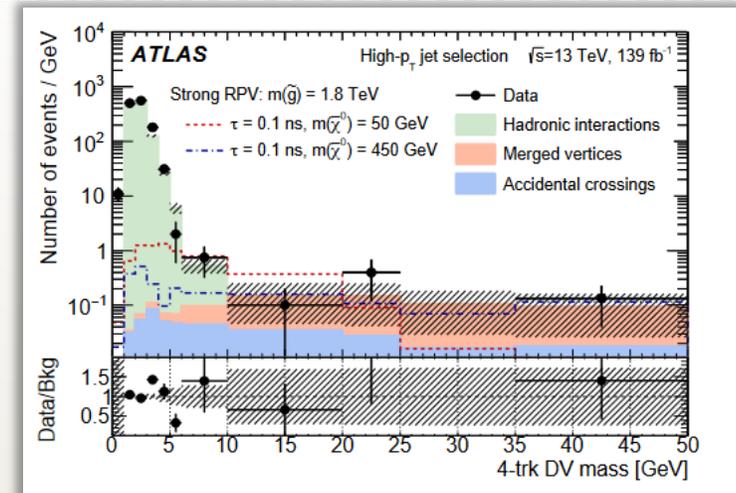
High- $p_T$  jet SR



# Vertice displaced e jets multipli

- **Stima del background:**

- Basato sulla probabilità che un DV (con i criteri di selezione) sia prodotto in prossimità di un track jet  $\rightarrow$  stimata dai dati in una regione di controllo (CR), in funzione della massa del DV, delle proprietà del track jet, della molteplicità di tracce
- Due diverse validazioni:
  - Calcolo di probabilità e numero di eventi di background ripetuto in diverse regioni di validazione (VR) e confrontato con CR
  - Confronto con seconda stima del background indipendente che valuta separatamente le 3 fonti di background dai dati



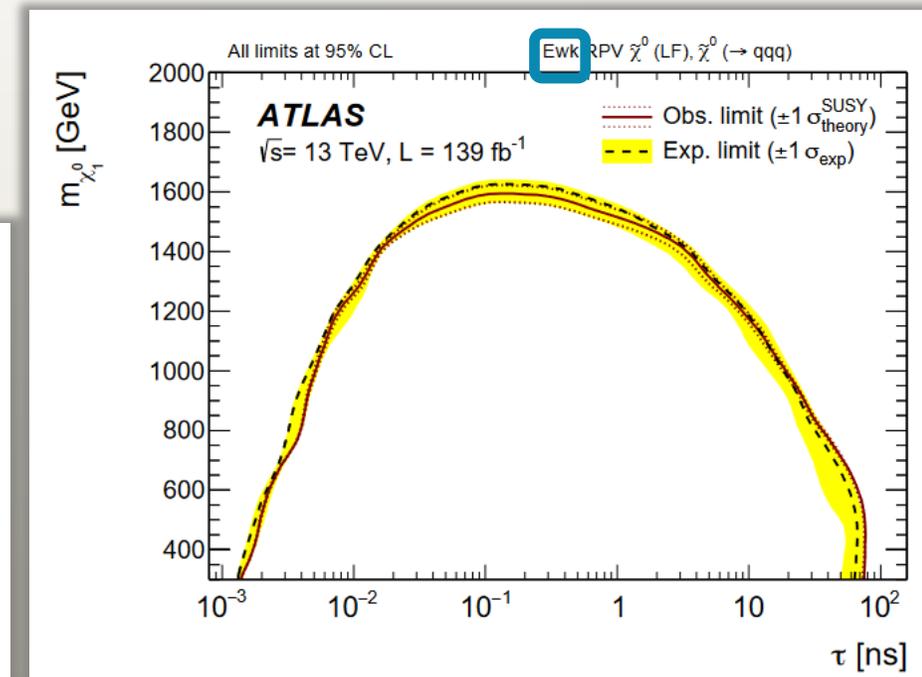
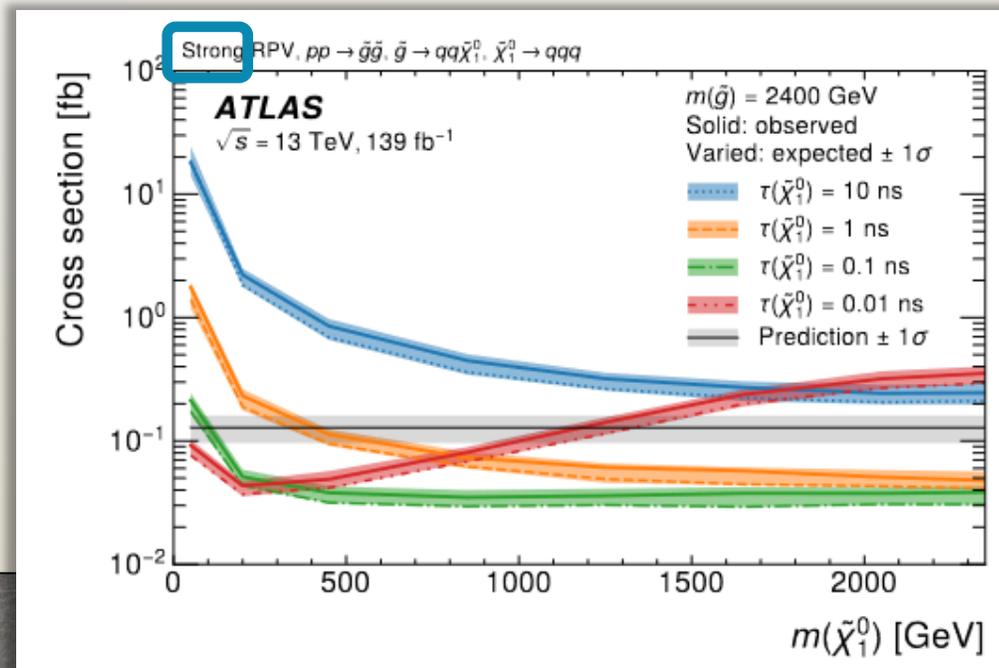
Background stimato nelle VR per DV con 4 tracce (5 tracce usate nella SR)

# Vertice displaced e jets multipli

## • Risultati:

- 0 eventi attesi nelle due SR, 1 evento osservato
- Limiti di esclusione in un **ampio range di masse e vite medie** del neutralino  $\tilde{\chi}_1^0$
- Limiti superiori sulla **sezione d'urto** visibile dei processi cercati (fino a 0.03 fb per High-pT jet e 0.02 fb per Trackless jet)

Signal Region	Observed	Expected	$S_{\text{obs}}^{95}$	$S_{\text{exp}}^{95}$	$\langle \sigma_{\text{vis}} \rangle_{\text{obs}}^{95}$ [fb]
High- $p_T$ jet SR	1	$0.46^{+0.27}_{-0.30}$	3.8	$3.1^{+1.0}_{-0.1}$	0.027
Trackless jet SR	0	$0.83^{+0.51}_{-0.53}$	3.0	$3.4^{+1.3}_{-0.3}$	0.022



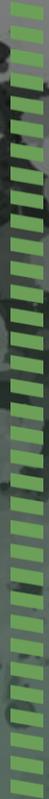
# Conclusioni

- Particelle a lunga vita media (LLP) sono particelle non nel MS che decadono all'interno dell'accettazione del rivelatore oppure, se cariche, stabili all'interno dell'accettazione del rivelatore
- Previste da numerosi modelli teorici
- Molte ricerche di LLP effettuate ed in corso con i dati di LHC Run-2:
  - Grande quantità di risultati già pubblicati, ulteriori analisi in corso
  - Con grande varietà di signature e strategie utilizzate
- Presentati alcuni esempi tra i risultati più recenti con l'esperimento ATLAS
- Cosa ci aspetta da LHC Run-3?
  - Upgrade di rivelatori effettuati durante LHC Long Shutdown 2
  - Nuovi trigger e strategie di acquisizione dati
  - Maggiore luminosità

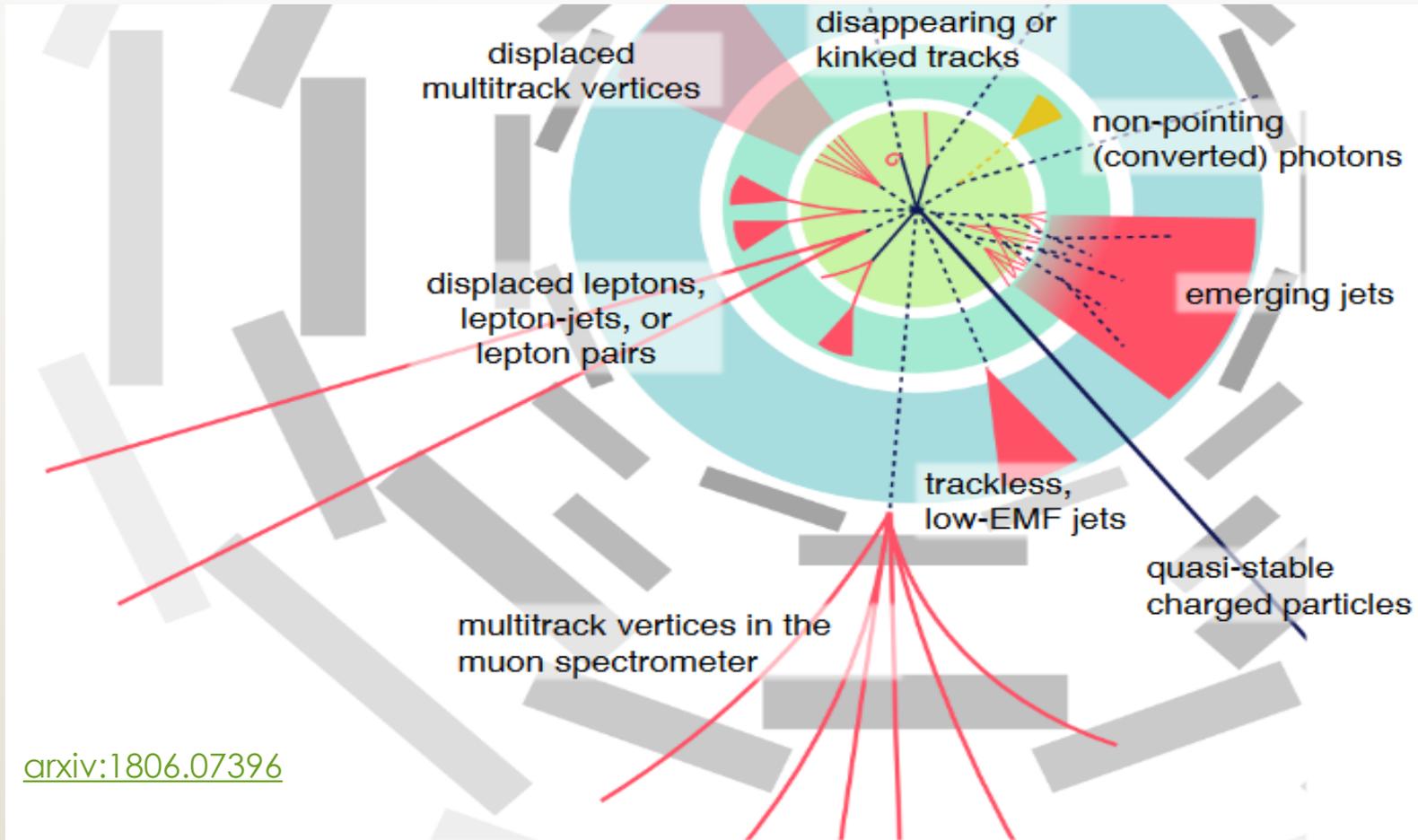
...aspettando i primi risultati!

SUSY	GGM $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow Z\tilde{G}$	displaced dimuon	32.9	$\tilde{\chi}_1^0$ lifetime	0.029-18.0 m	$m(\tilde{g}) = 1.1$ TeV, $m(\tilde{\chi}_1^0) = 1.0$ TeV
	GMSB	non-pointing or delayed $\gamma$	139	$\tilde{\chi}_1^0$ lifetime	0.24-2.4 m	$m(\tilde{\chi}_1^0, \tilde{G}) = 60, 20$ GeV, $\mathcal{B}_H = 2\%$
	GMSB $\tilde{\ell} \rightarrow \ell\tilde{G}$	displaced lepton	139	$\tilde{\ell}$ lifetime	6-750 mm	$m(\tilde{\ell}) = 600$ GeV
	GMSB $\tilde{\tau} \rightarrow \tau\tilde{G}$	displaced lepton	139	$\tilde{\tau}$ lifetime	9-270 mm	$m(\tilde{\ell}) = 200$ GeV
	AMSB $pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^\mp$	disappearing track	136	$\tilde{\chi}_1^\pm$ lifetime	0.06-3.06 m	$m(\tilde{\chi}_1^\pm) = 650$ GeV
	AMSB $pp \rightarrow \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^\pm \tilde{\chi}_1^\mp$	large pixel dE/dx	139	$\tilde{\chi}_1^\pm$ lifetime	0.3-30.0 m	$m(\tilde{\chi}_1^\pm) = 600$ GeV
	Stealth SUSY	2 MS vertices	36.1	$\tilde{S}$ lifetime	0.1-519 m	$\mathcal{B}(\tilde{g} \rightarrow \tilde{S}g) = 0.1$ , $m(\tilde{g}) = 500$ GeV
	Split SUSY	large pixel dE/dx	139	$\tilde{g}$ lifetime	> 0.45 m	$m(\tilde{g}) = 1.8$ TeV, $m(\tilde{\chi}_1^0) = 100$ GeV
	Split SUSY	displaced vtx + $E_T^{\text{miss}}$	32.8	$\tilde{g}$ lifetime	0.03-13.2 m	$m(\tilde{g}) = 1.8$ TeV, $m(\tilde{\chi}_1^0) = 100$ GeV
Split SUSY	0 $\ell$ , 2 - 6 jets + $E_T^{\text{miss}}$	36.1	$\tilde{g}$ lifetime	0.0-2.1 m	$m(\tilde{g}) = 1.8$ TeV, $m(\tilde{\chi}_1^0) = 100$ GeV	
Higgs BR = 10%	$H \rightarrow ss$	displaced dimuon	32.9	$s$ lifetime	0.31-72.4 m	$m(s) = 35$ GeV
	$H \rightarrow ss$	2 low-EMF trackless jets	139	$s$ lifetime	0.19-6.94 m	$m(s) = 35$ GeV
	VH with $H \rightarrow ss \rightarrow bbbb$	2 $\ell$ + 2 displ. vertices	139	$s$ lifetime	4-85 mm	$m(s) = 35$ GeV
	FRVZ $H \rightarrow 2\gamma_d + X$	2 $\mu$ -jets	139	$\gamma_d$ lifetime	654-939 mm	$m(\gamma_d) = 400$ MeV
	FRVZ $H \rightarrow 4\gamma_d + X$	2 $\mu$ -jets	139	$\gamma_d$ lifetime	2.7-54 mm	$m(\gamma_d) = 400$ MeV
	$H \rightarrow Z_d Z_d$	displaced dimuon	32.9	$Z_d$ lifetime	0.009-24.0 m	$m(Z_d) = 40$ GeV
	$H \rightarrow ZZ_d$	2 $e, \mu$ + low-EMF trackless jet	36.1	$Z_d$ lifetime	0.21-5.2 m	$m(Z_d) = 10$ GeV
Scalar	$\Phi(200 \text{ GeV}) \rightarrow ss$	low-EMF trk-less jets, MS vtx	36.1	$s$ lifetime	0.41-51.5 m	$\sigma \times \mathcal{B} = 1$ pb, $m(s) = 50$ GeV
	$\Phi(600 \text{ GeV}) \rightarrow ss$	low-EMF trk-less jets, MS vtx	36.1	$s$ lifetime	0.04-21.4 m	$\sigma \times \mathcal{B} = 1$ pb, $m(s) = 50$ GeV
	$\Phi(1 \text{ TeV}) \rightarrow ss$	low-EMF trk-less jets, MS vtx	36.1	$s$ lifetime	0.06-52.4 m	$\sigma \times \mathcal{B} = 1$ pb, $m(s) = 150$ GeV
L	$W \rightarrow N\ell, N \rightarrow \ell\ell\nu$	displaced vtx ( $\mu\mu, \mu e, ee$ ) + $\mu$	139	$N$ lifetime	0.74-42 mm	$m(N) = 6$ GeV, Dirac
	$W \rightarrow N\ell, N \rightarrow \ell\ell\nu$	displaced vtx ( $\mu\mu, \mu e, ee$ ) + $\mu$	139	$N$ lifetime	3.1-33 mm	$m(N) = 6$ GeV, Majorana

Grazie



# Backup



# Ultime novità

**Nuovo** limite per ricerca di SUSY (non ancora incluso nella tabella)

- RPV  $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qq\bar{q}$  con segnatura displaced vertex + jets [2301.13866](#)
- pone limite sulla vita media di 0.00135-9.0 m 95% CL ( $m(\tilde{\chi}_1^0)=1.0$  TeV)

**Nuovo** limite per ricerca di SUSY (non ancora incluso nella tabella)

- GMSB produzione di coppia di  $\tilde{\mu}$  con vita media  $\tau \sim \mathcal{O}(1-10)$ ps, ciascuno che decade in  $\tilde{\mu} \rightarrow \tilde{G} + \mu$ , con segnatura due tracce prompt con IP  $|d_0| > 0.1$  mm] [ATLAS-CONF-2023-018](#)
- $\rightarrow$  come target un range di vita media "intermedio" rispetto a quelli studiati finora
- no eventi osservati, pone nuovi limiti di esclusione nel modello GMSB e indipendenti dal modello

Intervalli di esclusione di vita media di  $\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{g}, s, \gamma_d, N$  aggiornati per molte analisi e modelli teorici

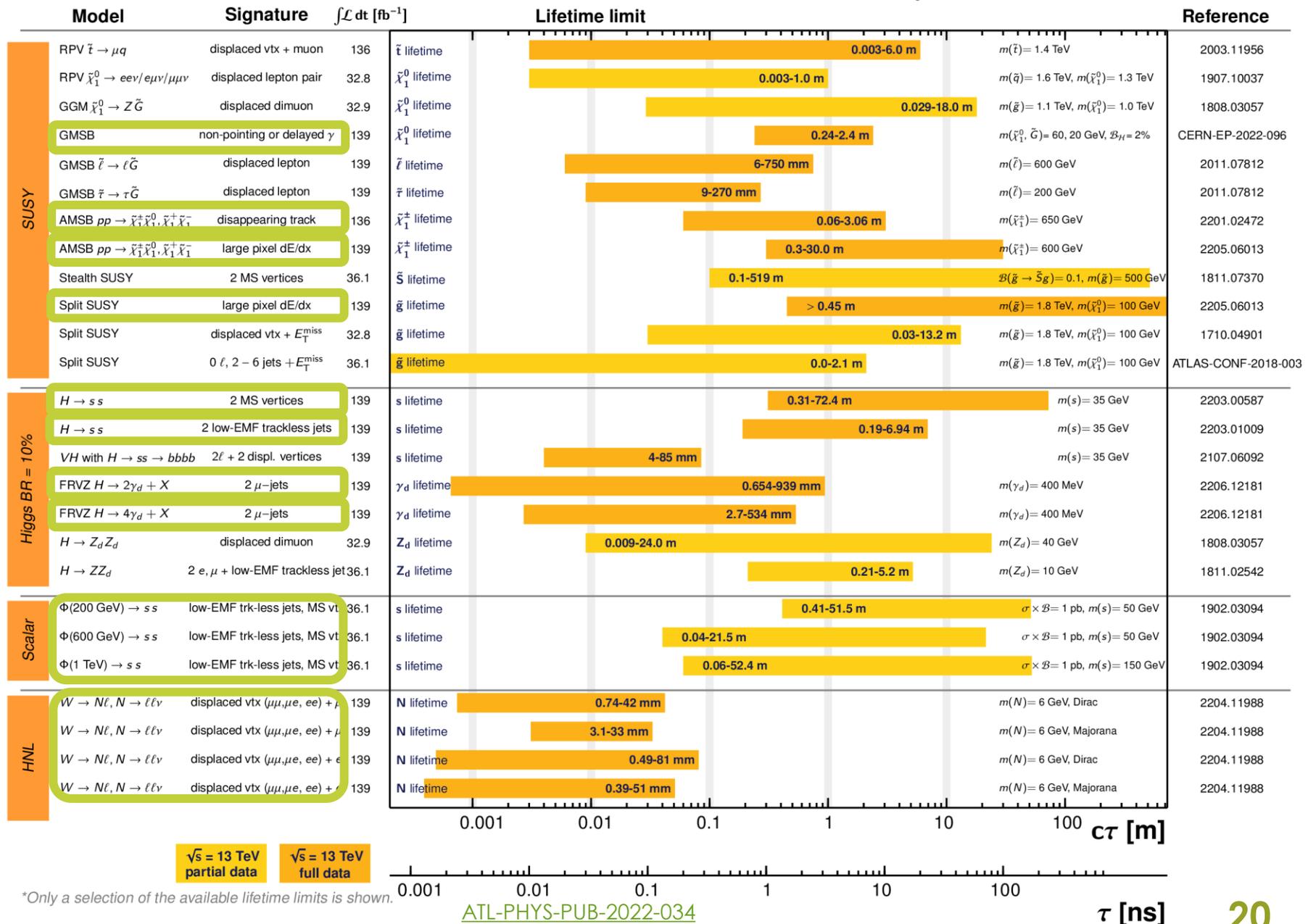
## ATLAS Long-lived Particle Searches\* - 95% CL Exclusion

Status: July 2022

$$\int \mathcal{L} dt = (32.8 - 139) \text{ fb}^{-1}$$

ATLAS Preliminary

$$\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$$



$\sqrt{s} = 13$  TeV  
partial data

$\sqrt{s} = 13$  TeV  
full data

\*Only a selection of the available lifetime limits is shown.

ATL-PHYS-PUB-2022-034

$\tau$  [ns]