

Martina Ressegotti
(INFN Genova)

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

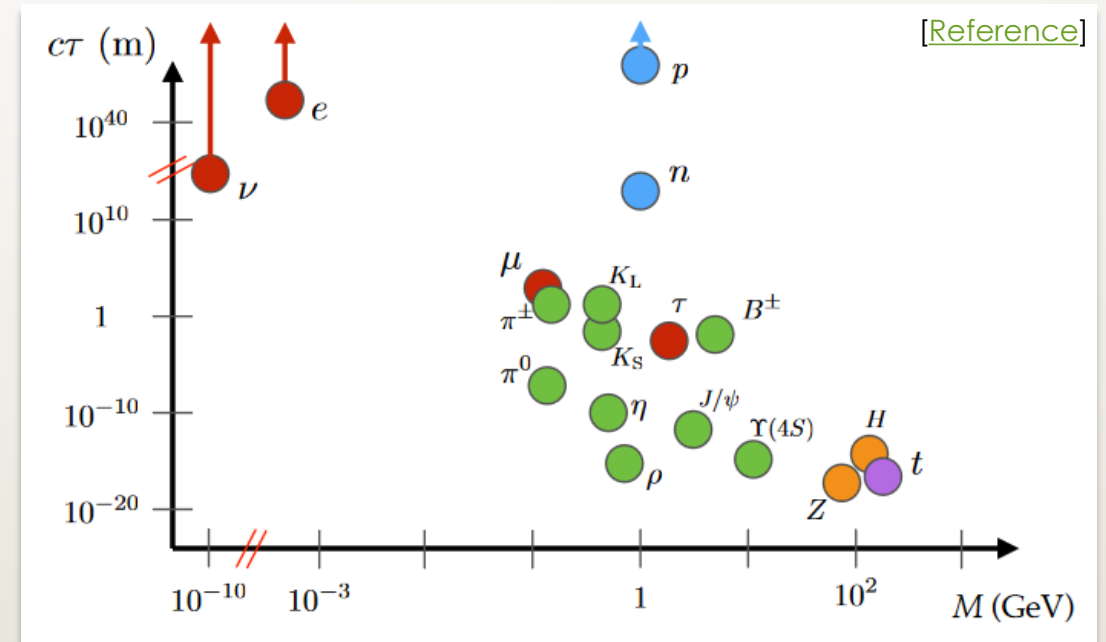
Ricerca di particelle a lunga vita media in collisioni p-p a 13 TeV con l'esperimento ATLAS

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**



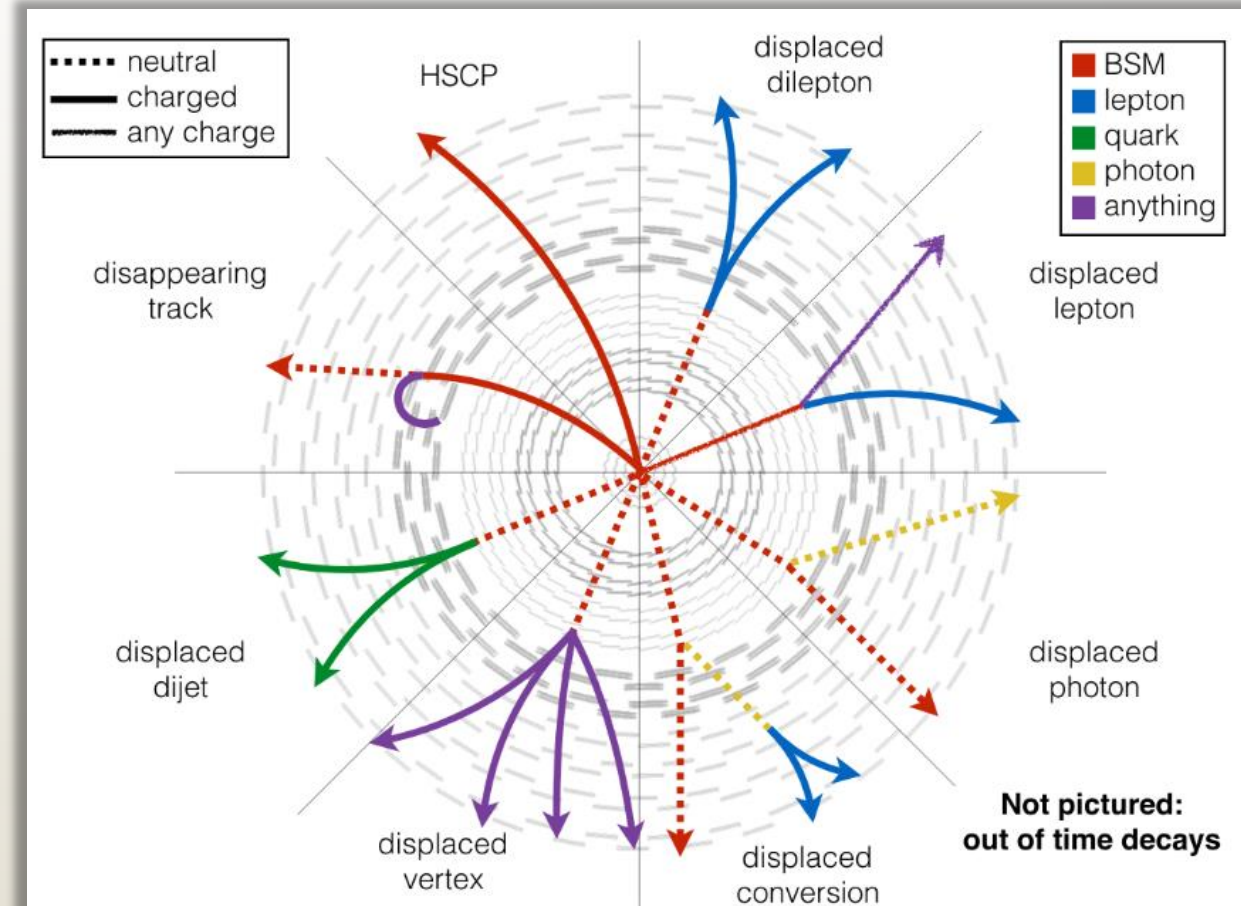
Come rivelare LLPs?

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]

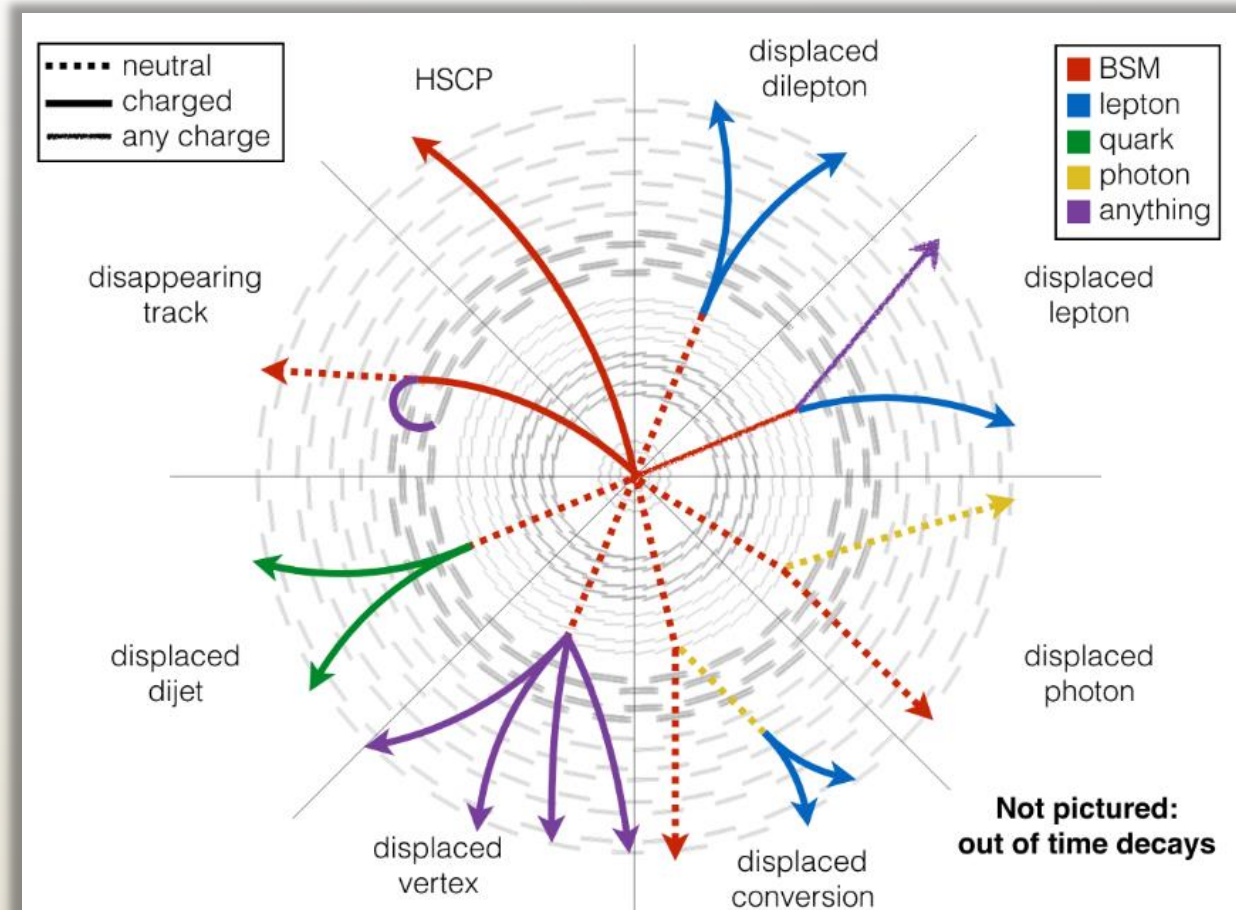
Come rivelare LLPs?

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

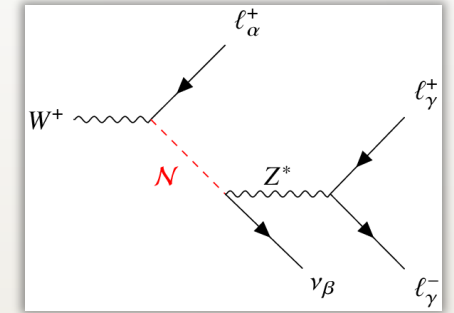
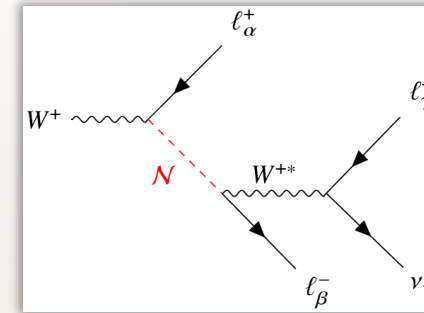
- Intervalli di esclusione di sezioni d'urto e vite medie in costante aggiornamento
- Selezionato alcune di queste (→) in base alla segnatura/strategia utilizzata e eventi osservati

Heavy Neutral Lepton con coppia di leptoni displaced

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

Target:

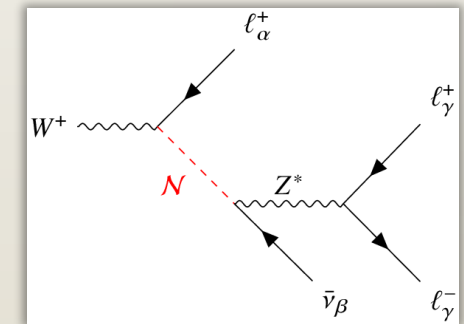
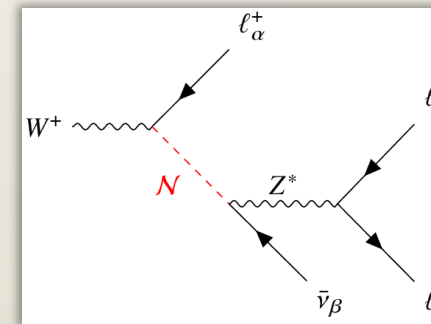
- Heavy Neutral Lepton (HNL) N prodotto dal decadimento $W \rightarrow Nl$ ($l = e, \mu$), che decade in due leptoni carichi (displaced) e un neutrino
- Sensibilità: $m = O(3-20)$ GeV, $c\tau \sim 1-100$ mm
- Produrre limiti per la prima volta anche per scenari con **flavour-mixing** (motivati da oscillazioni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

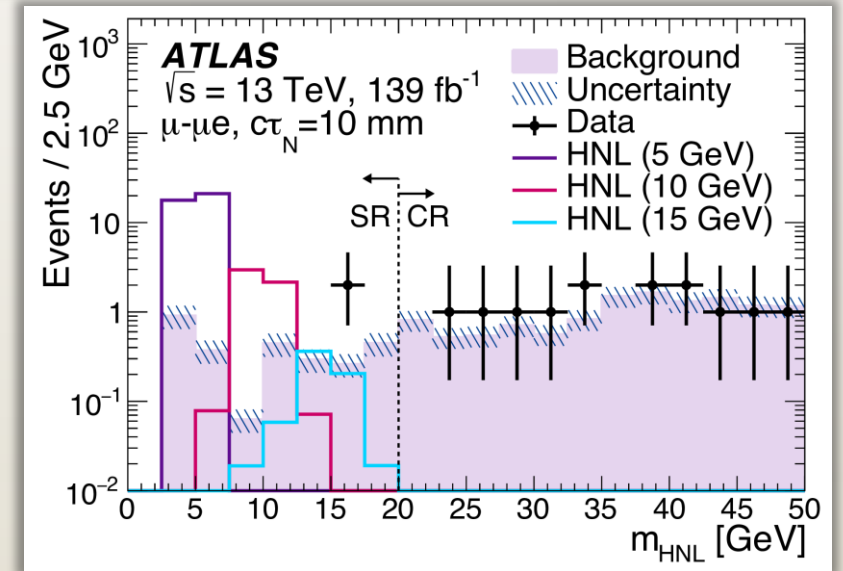
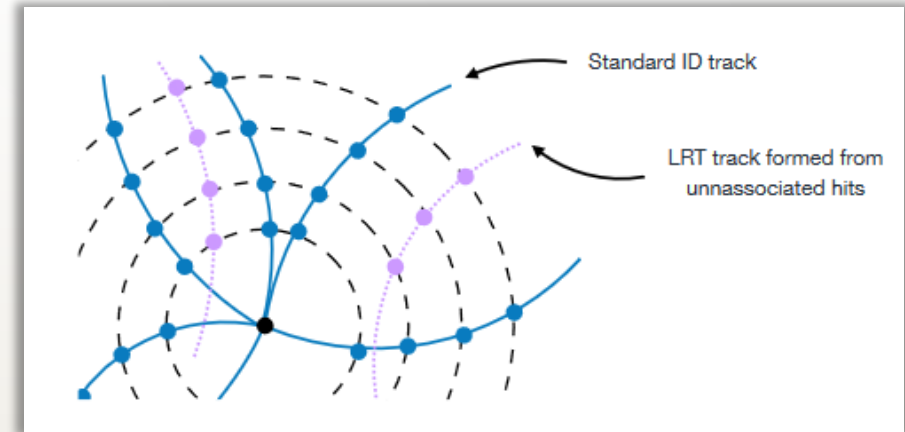
arxiv:2204.11988

- **Strategia:**

- Nuovo: massa di N dalla conservazione del quadrimpulso

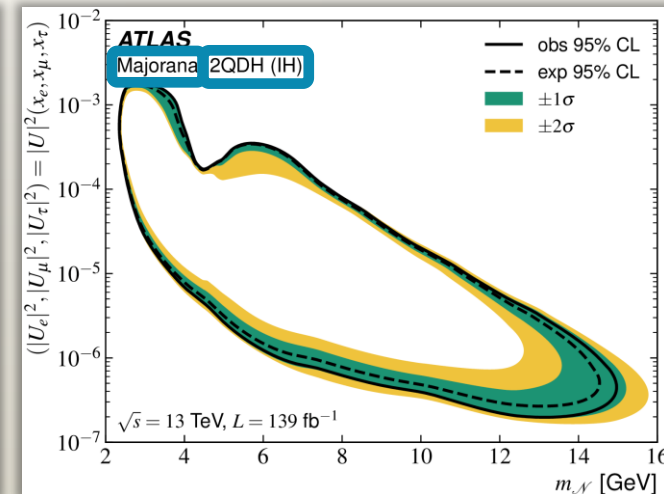
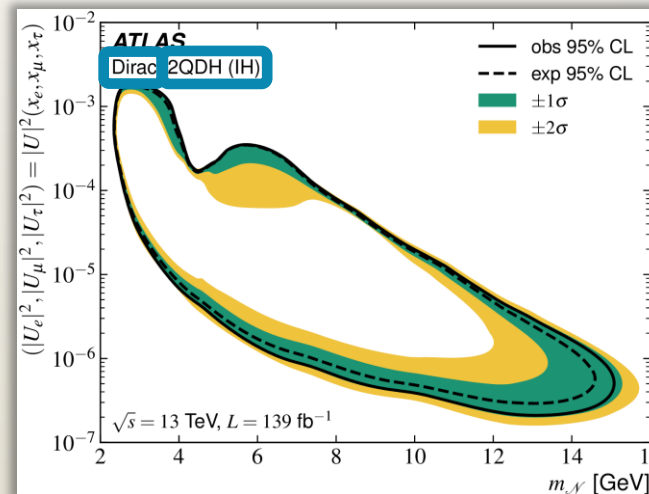
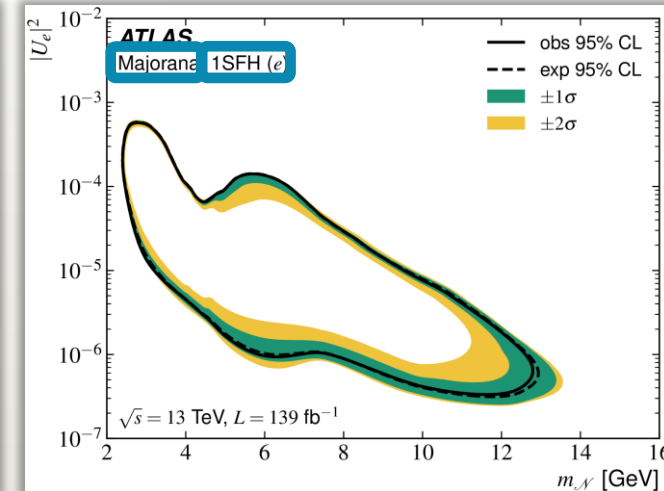
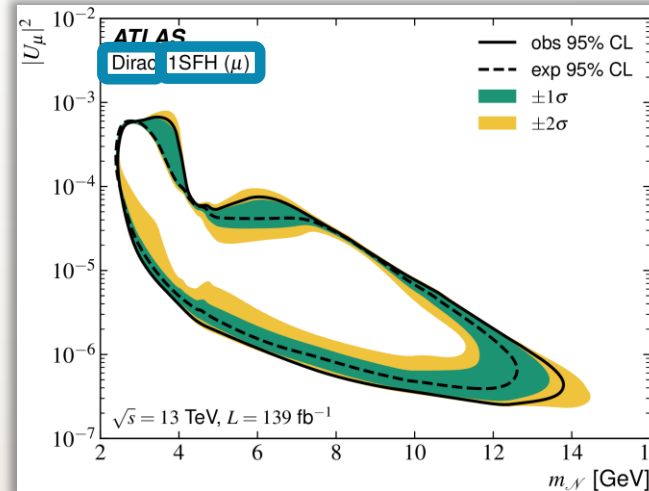
$$m_N^2 = (P_{l_\beta} + P_{l_\gamma} + P_{\nu_\gamma})^2$$

- Usa tracciamento con grande raggio per i leptoni displaced
- Canali separati per sapore del leptone (e/μ)
- 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 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

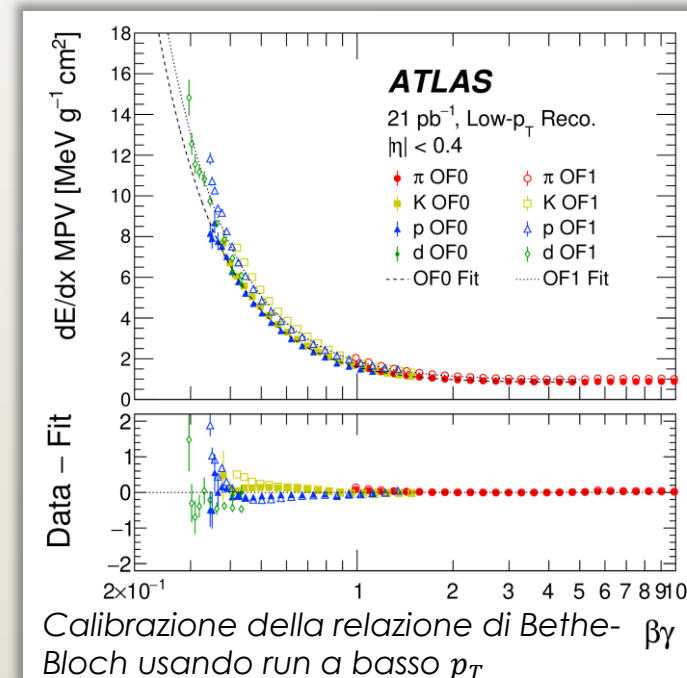
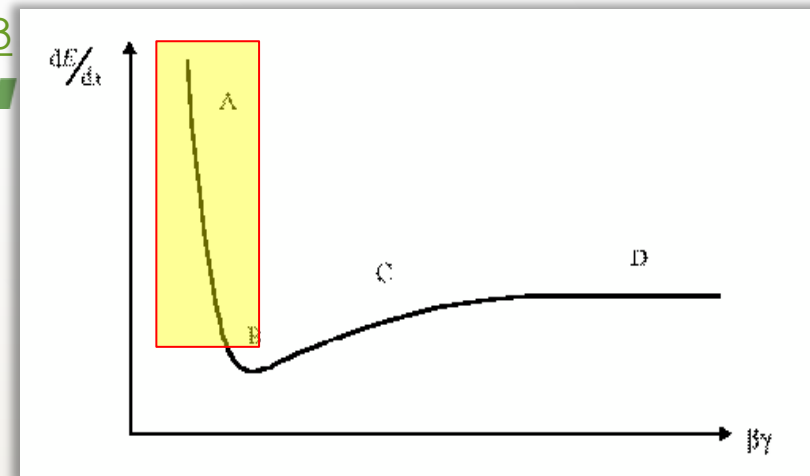
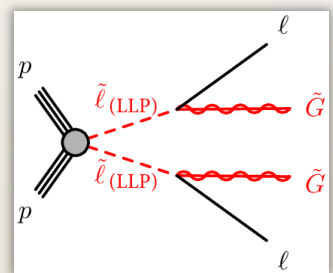
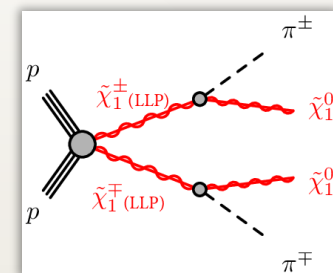
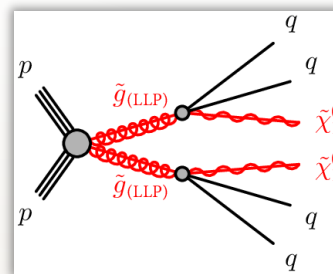
- **Target:**

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

- **Strategia:**

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

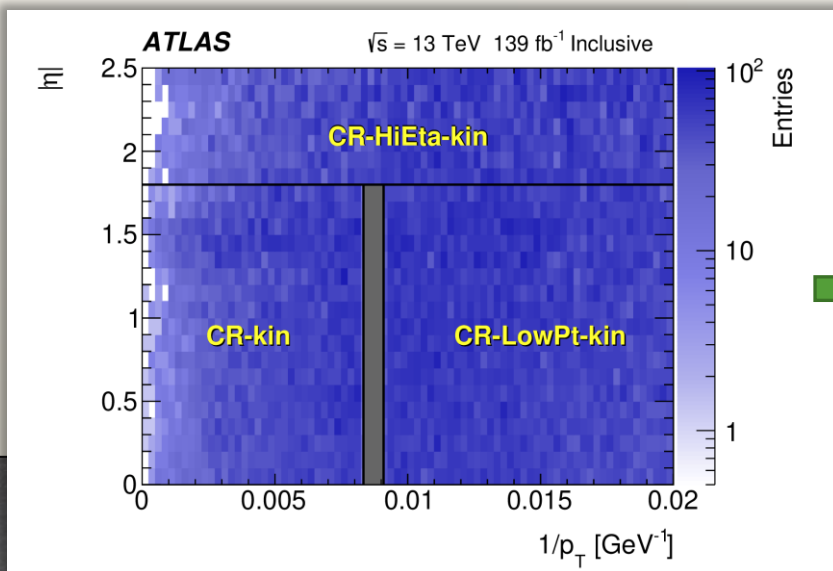
$$m_{dE/dx} = \frac{p_{reco}}{\beta\gamma \left(\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle_{corr} \right)}$$



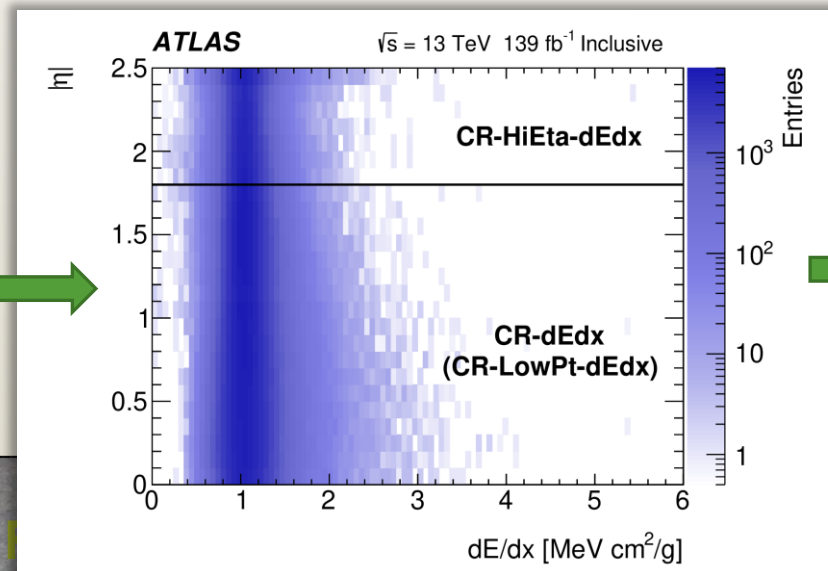
- **Strategia:**

- **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 $g^{-1} cm^2$) [si pone $dE/dx=1$ MeV $g^{-1} cm^2$ 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 $1/p_T$, η e dE/dx , validati in regioni di validazione (una a basso p_T , una a alto η)

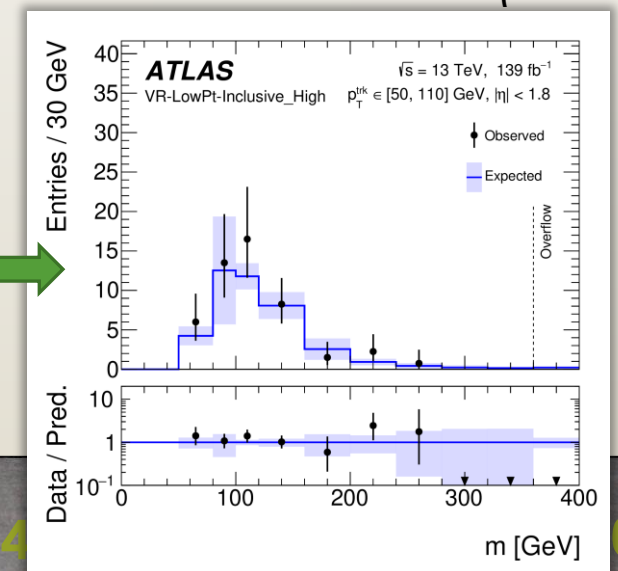
Estrazione di ($1/p_T$, η)



Estrazione di dE/dx (per η considerato)



Calcolo della massa ($m = \frac{p}{\beta\gamma}$)



Pixel dE/dx

arxiv:2205.06013

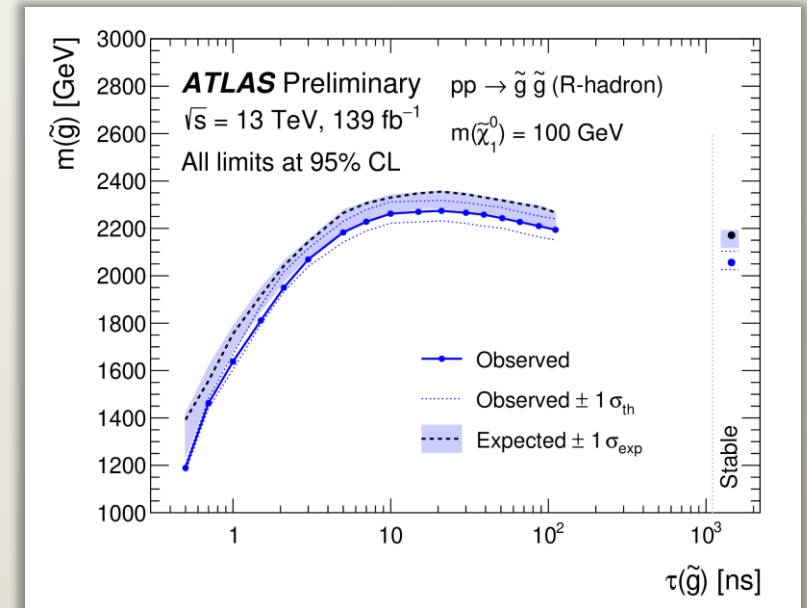
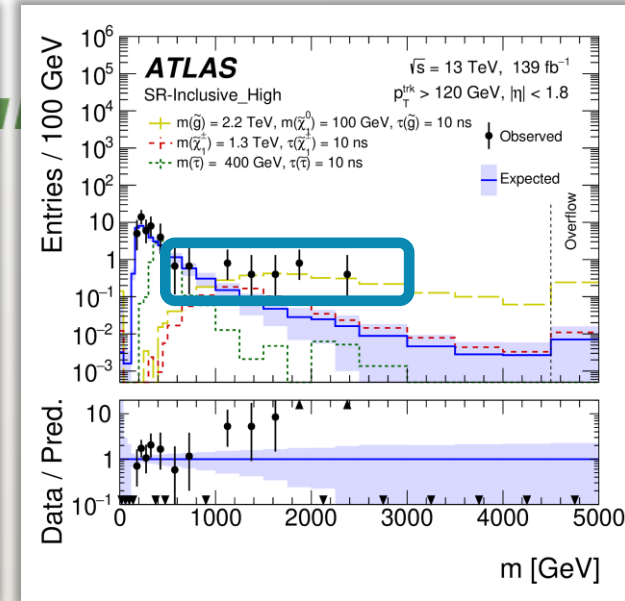
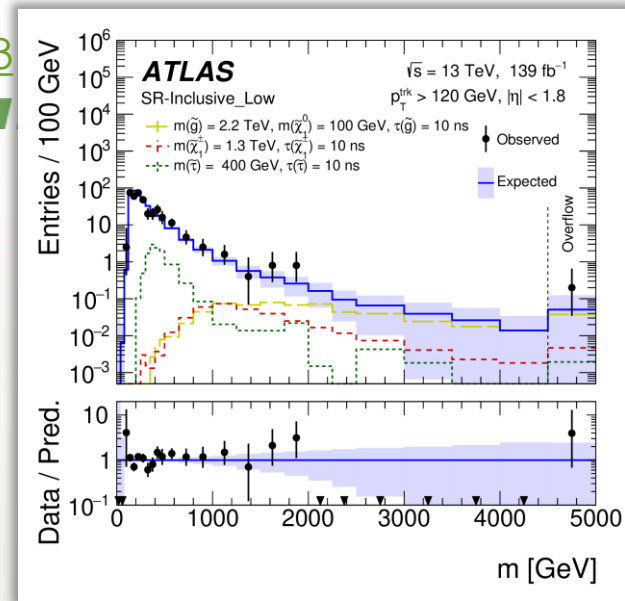


• Risultati:

- Dati compatibili con background atteso per la maggior parte delle regioni di segnale
- Eccesso di eventi con significanza 3.3σ (7 osservati, 0.7 ± 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 β nel MS e nel calorimetro sono consistenti con $\beta=1 \rightarrow$ non confermano basso β
- **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

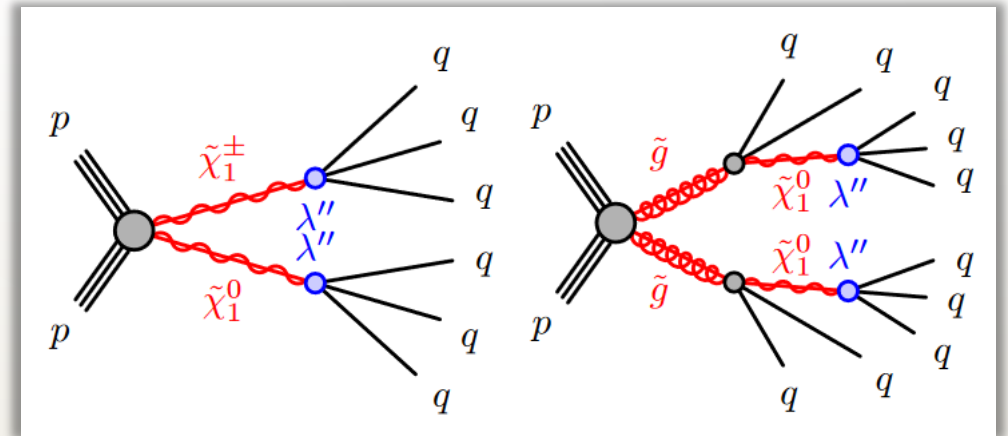
• Nuova analisi in corso:

- 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

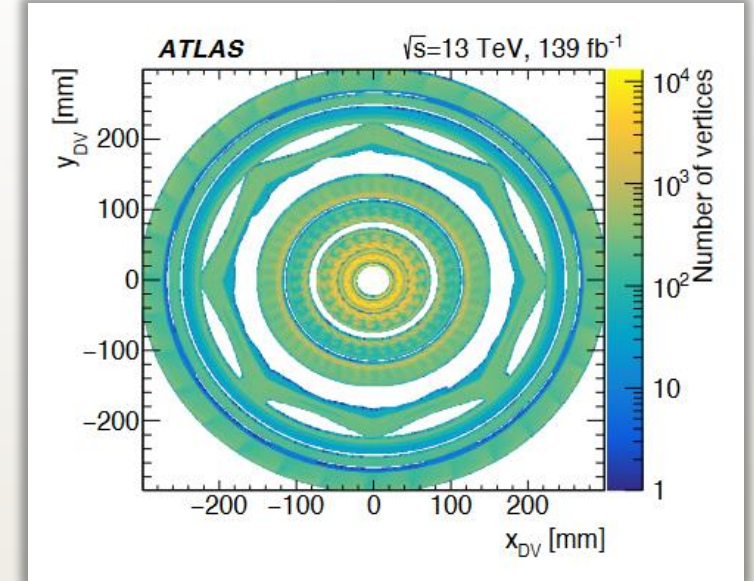
- **Target:** modelli RPV SUSY semplificati in cui neutralino/chargino hanno $\tau < O(10)$ ns a causa di piccole costanti di accoppiamento (λ'') e con BR=100% in stati finali con quark light-flavour
- **Segnatura:** vertice displaced, massivo, con molteplici tracce e molteplici jet energetici
- **Background:** 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)

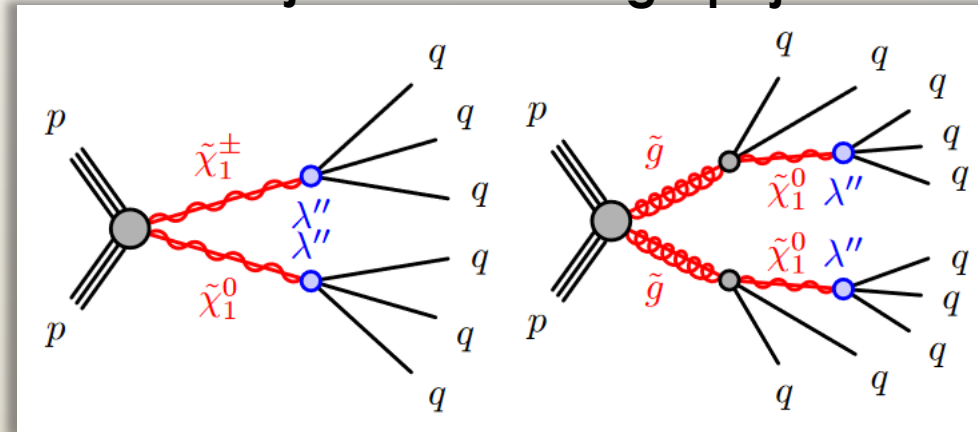


ed una delle due selezioni:

- **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

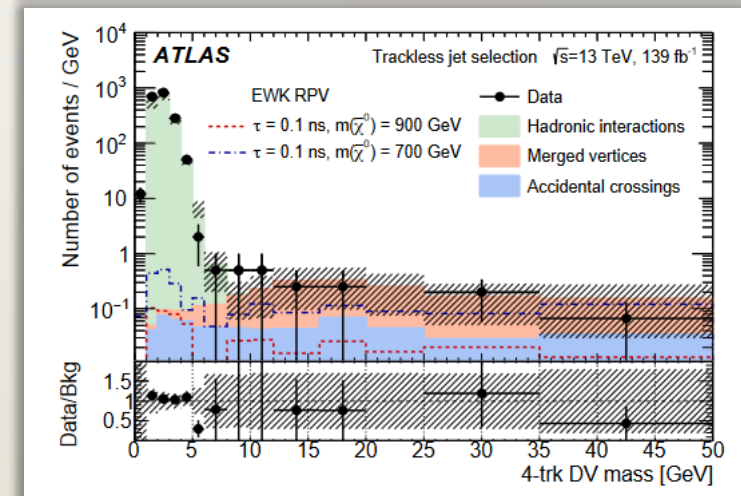
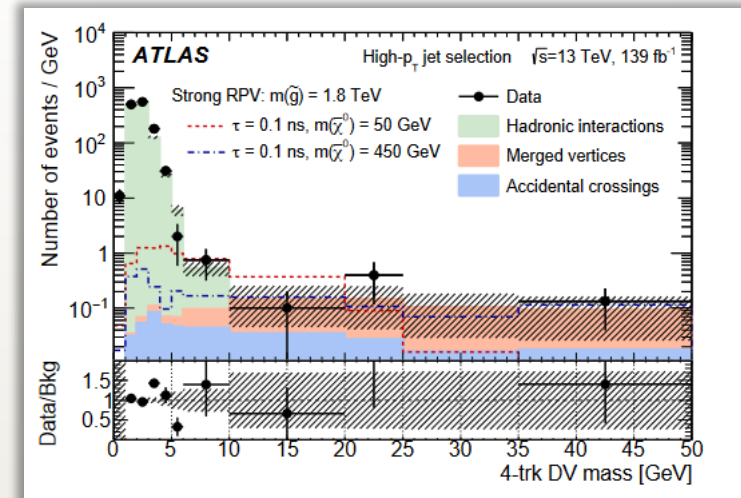
High- p_T jet SR



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



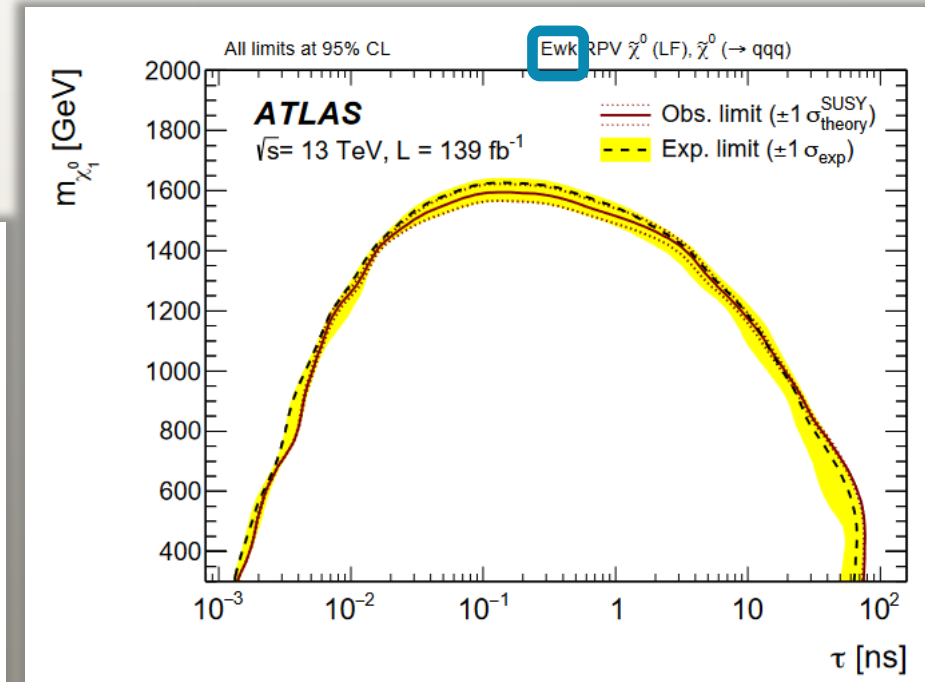
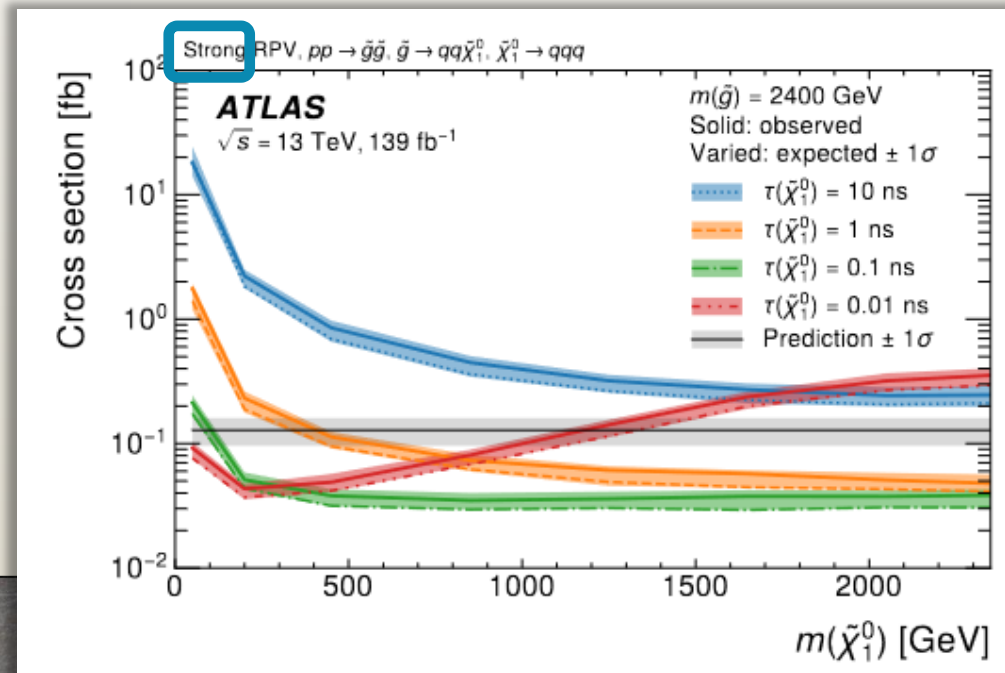
Background stimato nelle VR per DV con 4 tracce (5 tracce usate nella SR)

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_{obs}^{95}	S_{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

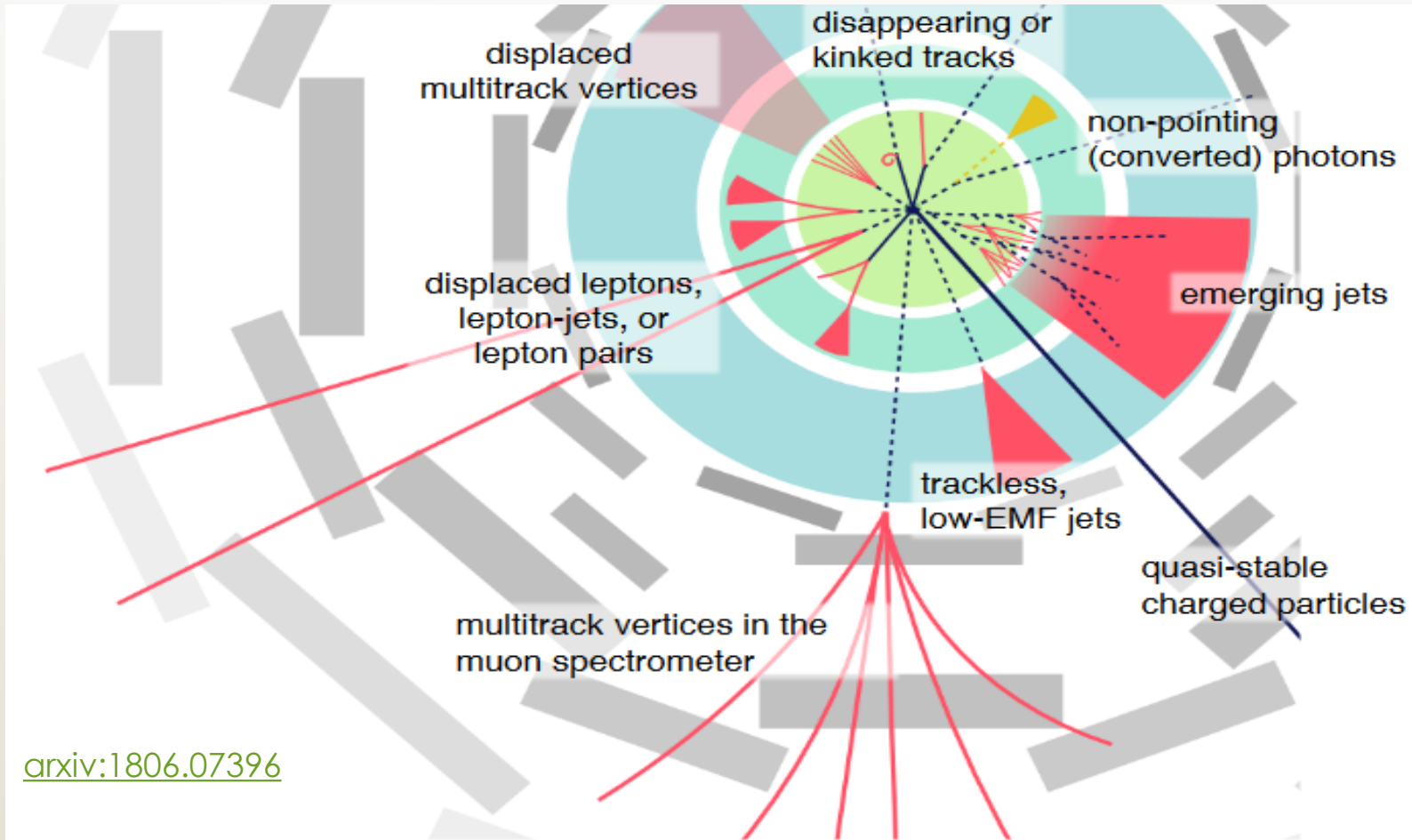
...aspettando i primi risultati!

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 γ	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^{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 ℓ , 2 - 6 jets + E_T^{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 ℓ + 2 displ. vertices	139	s lifetime	4-85 mm	$m(s) = 35$ GeV
	FRVZ $H \rightarrow 2\gamma_d + X$	2 μ -jets	139	γ_d lifetime	654-939 mm	$m(\gamma_d) = 400$ MeV
	FRVZ $H \rightarrow 4\gamma_d + X$	2 μ -jets	139	γ_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, μ + 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 ($\mu\mu, \mu e, ee$) + μ	139	N lifetime	0.74-42 mm	$m(N) = 6$ GeV, Dirac
	$W \rightarrow N\ell, N \rightarrow \ell\ell\nu$	displaced vtx ($\mu\mu, \mu e, ee$) + μ	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 $\tau \sim O(1-10)$ 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](#)
- 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

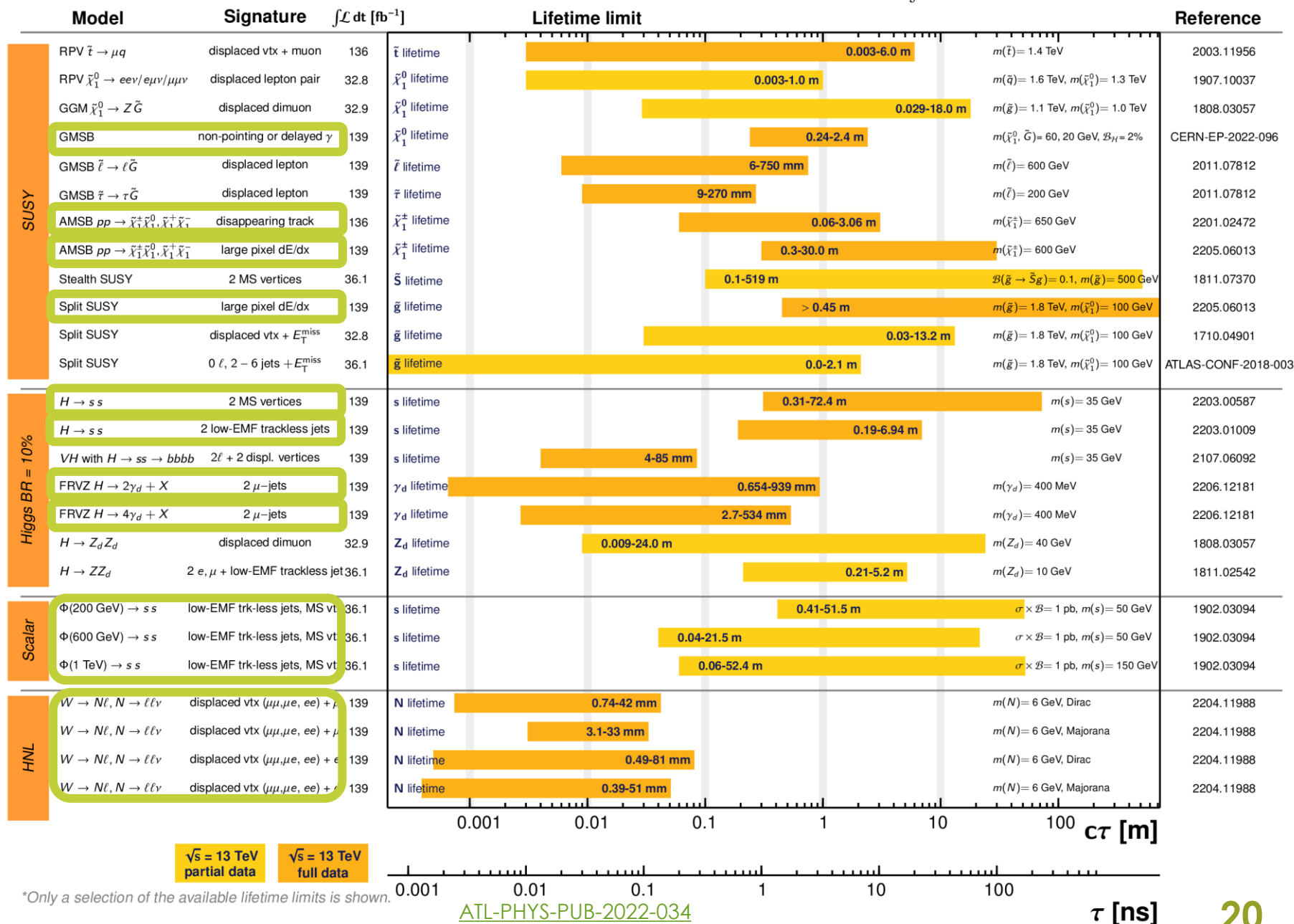
ATLAS Long-lived Particle Searches* - 95% CL Exclusion

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

τ [ns]