



---

## Una parametrizzazione generale per testare cosmologie "non standard" a piccole scale

Riccardo Murgia  
SISSA & INFN, Trieste

**(principalmente) basato su:**

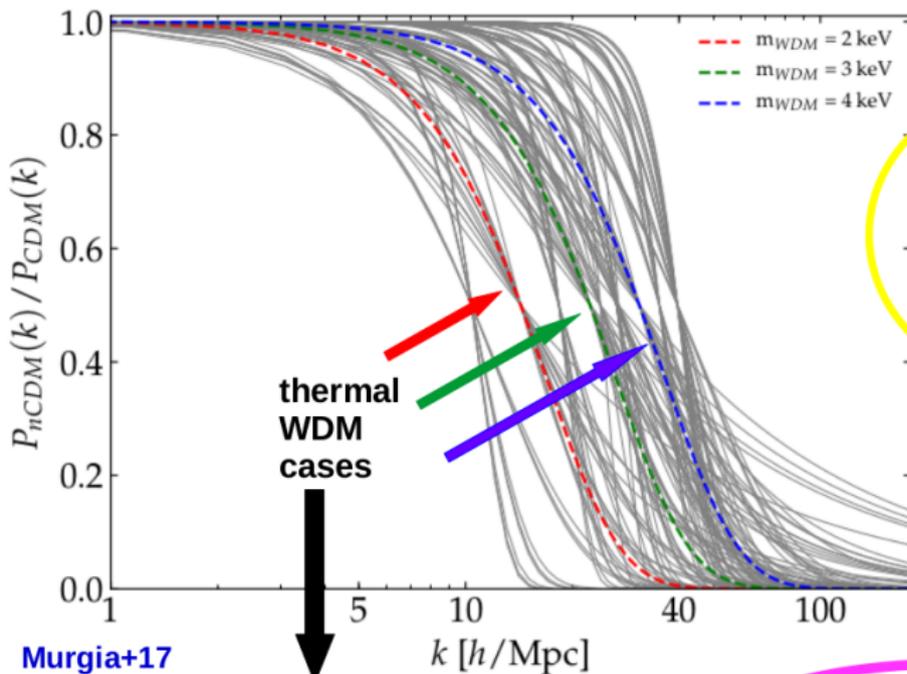
RM, Merle, Viel, Totzauer, Schneider, 2017, **JCAP 1711 046 (2017)** [arXiv:1704.07838]

RM, Viel, Iršič, 2018, **PRD 98 8 083540 (2018)** [arXiv:1806.08371]

**IFAE - Incontri di Fisica delle Alte Energie, 2019**

Napoli, 10 Aprile 2019

# Un approccio nuovo e generale: metodo e parametrizzazione (I)



Transfer function describing the small-scale power suppression:

$$T^2(k) = \left[ \frac{P(k)_{nCDM}}{P(k)_{CDM}} \right]$$

non cold & (non) thermal DM

Standard approach

$$T(k) = [1 + (\alpha k)^{2\nu}]^{-5/\nu}$$

$\Rightarrow$

New general approach

$$T(k) = [1 + (\alpha k)^\beta]^\gamma$$

## Un approccio nuovo e generale: metodo e parametrizzazione (II)

**Approccio standard**

$$T(k) = [1 + (\alpha k)^{2\nu}]^{-5/\nu}$$

$\Rightarrow$

**Approccio generale**

$$T(k) = [1 + (\alpha k)^\beta]^\gamma$$

# Un approccio nuovo e generale: metodo e parametrizzazione (II)

## Approccio standard

$$T(k) = [1 + (\alpha k)^{2\nu}]^{-5/\nu} \quad \Rightarrow$$

$$T^2(k) = 0.5$$



$$k_{1/2} = ((0.5)^{-\nu/10} - 1)^{1/2\nu} \alpha^{-1}$$

## Approccio generale

$$T(k) = [1 + (\alpha k)^\beta]^\gamma$$

$$T^2(k) = 0.5$$



$$k_{1/2} = ((0.5)^{1/2\gamma} - 1)^{1/\beta} \alpha^{-1}$$

# Un approccio nuovo e generale: metodo e parametrizzazione (II)

## Approccio standard

$$T(k) = [1 + (\alpha k)^{2\nu}]^{-5/\nu} \quad \Rightarrow$$

$$T^2(k) = 0.5$$



$$k_{1/2} = ((0.5)^{-\nu/10} - 1)^{1/2\nu} \alpha^{-1}$$

- corrispondenza uno-a-uno:

$$\alpha \leftrightarrow m_{\text{WDM}} \leftrightarrow k_{1/2}$$

$$m'_{\text{WDM}} = 2 \text{ keV} \leftrightarrow k'_{1/2} = 14.323 \text{ h/Mpc}$$

$$m''_{\text{WDM}} = 3 \text{ keV} \leftrightarrow k''_{1/2} = 22.463 \text{ h/Mpc}$$

$$m'''_{\text{WDM}} = 4 \text{ keV} \leftrightarrow k'''_{1/2} = 30.914 \text{ h/Mpc}$$

## Approccio generale

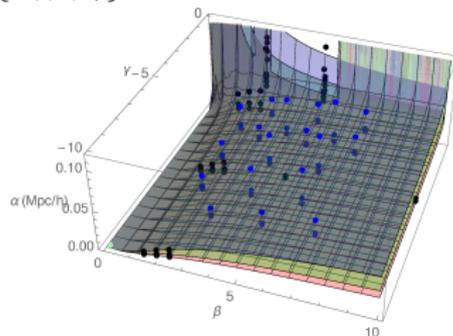
$$T(k) = [1 + (\alpha k)^\beta]^\gamma$$

$$T^2(k) = 0.5$$



$$k_{1/2} = ((0.5)^{1/2\gamma} - 1)^{1/\beta} \alpha^{-1}$$

- limiti su  $m_{\text{WDM}}$  (o su  $k_{1/2}$ ) sono mappati in superfici 3D nello spazio  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$



## Connessione con i modelli (astro)particellari

Essendo in grado di riprodurre svariate forme della soppressione nello spettro di potenza della materia, la nuova parametrizzazione descrive accuratamente diversi dei piu' plausibili modelli (astro)particellari di materia oscura non fredda e non termica:

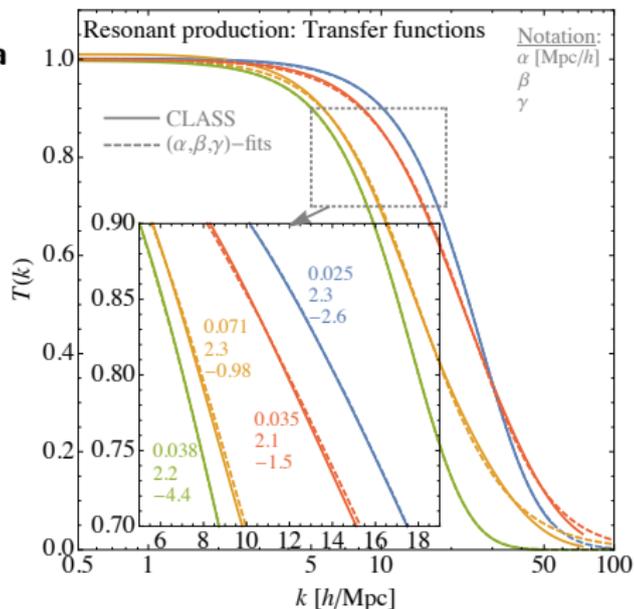
**RM, Merle, Viel, Totzauer, Schneider, 2017, JCAP 1711 046 [arXiv:1704.07838]**

## Connessione con i modelli (astro)particellari

Essendo in grado di riprodurre svariate forme della soppressione nello spettro di potenza della materia, la nuova parametrizzazione descrive accuratamente diversi dei più plausibili modelli (astro)particellari di materia oscura non fredda e non termica:

RM, Merle, Viel, Totzauer, Schneider, 2017, JCAP 1711 046 [arXiv:1704.07838]

### – Neutrini sterili prodotti in risonanza

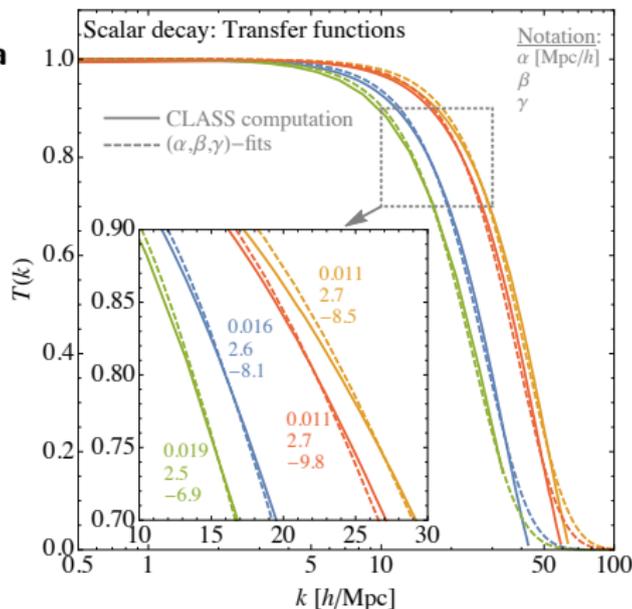


## Connessione con i modelli (astro)particellari

Essendo in grado di riprodurre svariate forme della soppressione nello spettro di potenza della materia, la nuova parametrizzazione descrive accuratamente diversi dei piu' plausibili modelli (astro)particellari di materia oscura non fredda e non termica:

**RM, Merle, Viel, Totzauer, Schneider, 2017, JCAP 1711 046 [arXiv:1704.07838]**

- Neutrini sterili prodotti in risonanza
- Neutrini sterili prodotti da decadimenti

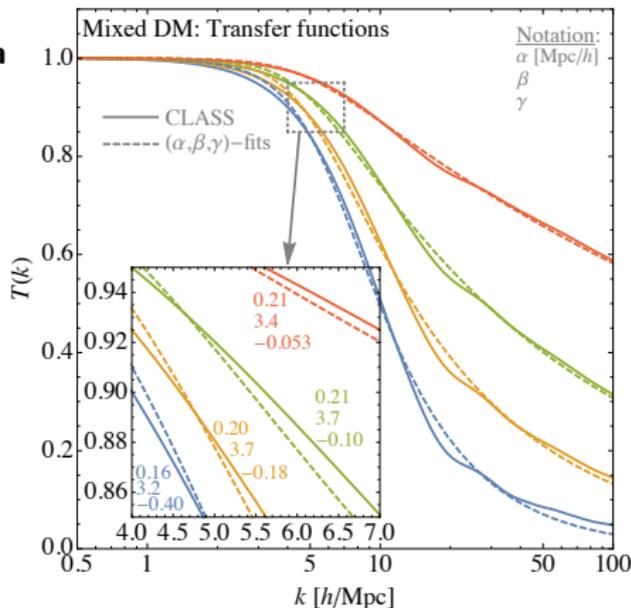


## Connessione con i modelli (astro)particellari

Essendo in grado di riprodurre svariate forme della soppressione nello spettro di potenza della materia, la nuova parametrizzazione descrive accuratamente diversi dei piu' plausibili modelli (astro)particellari di materia oscura non fredda e non termica:

**RM, Merle, Viel, Totzauer, Schneider, 2017, JCAP 1711 046 [arXiv:1704.07838]**

- Neutrini sterili prodotti in risonanza
- Neutrini sterili prodotti da decadimenti
- Fluidi misti (cold + warm DM)

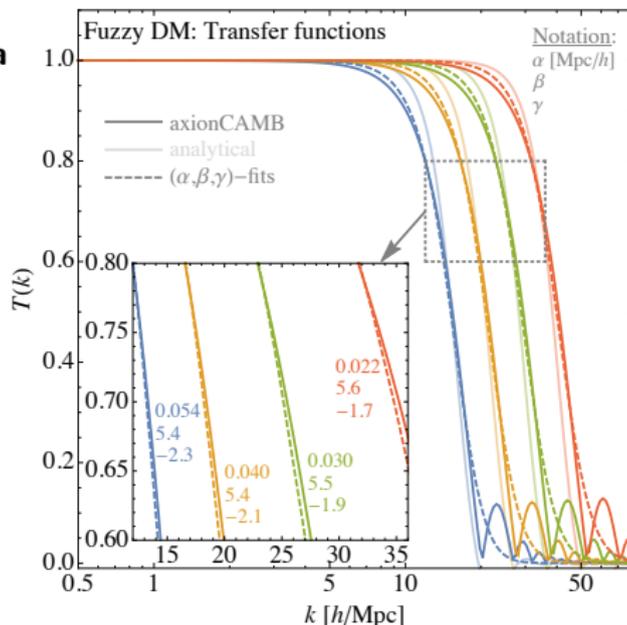


## Connessione con i modelli (astro)particellari

Essendo in grado di riprodurre svariate forme della soppressione nello spettro di potenza della materia, la nuova parametrizzazione descrive accuratamente diversi dei piu' plausibili modelli (astro)particellari di materia oscura non fredda e non termica:

**RM, Merle, Viel, Totzauer, Schneider, 2017, JCAP 1711 046 [arXiv:1704.07838]**

- Neutrini sterili prodotti in risonanza
- Neutrini sterili prodotti da decadimenti
- Fluidi misti (cold + warm DM)
- Particelle scalari ultra-leggere (Fuzzy DM)

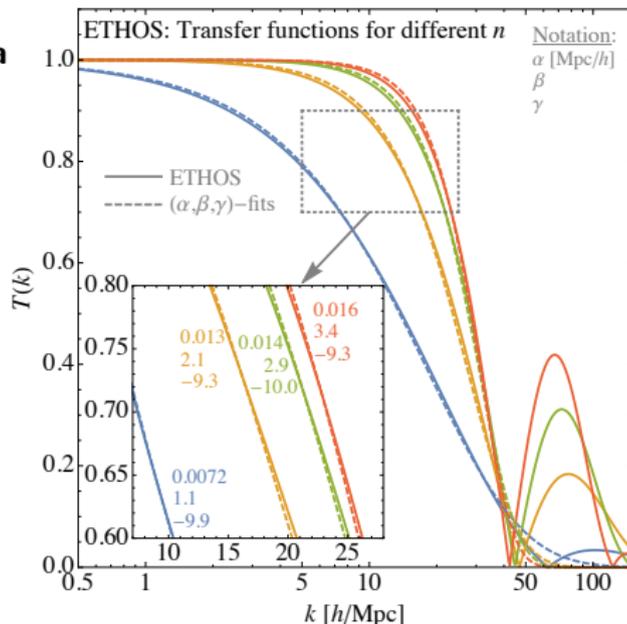


## Connessione con i modelli (astro)particellari

Essendo in grado di riprodurre svariate forme della soppressione nello spettro di potenza della materia, la nuova parametrizzazione descrive accuratamente diversi dei piu' plausibili modelli (astro)particellari di materia oscura non fredda e non termica:

**RM, Merle, Viel, Totzauer, Schneider, 2017, JCAP 1711 046 [arXiv:1704.07838]**

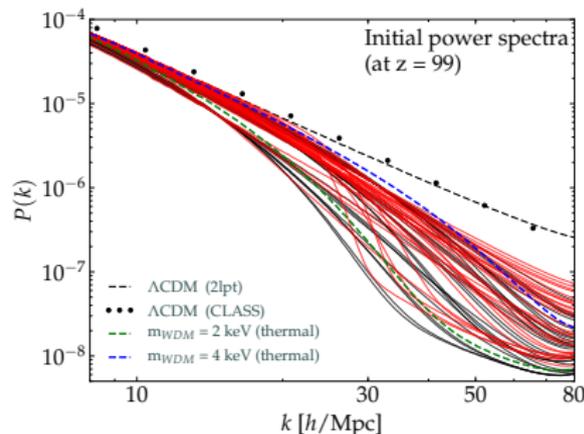
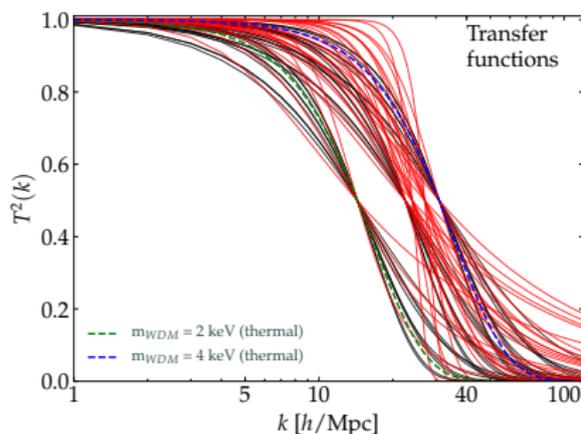
- Neutrini sterili prodotti in risonanza
- Neutrini sterili prodotti da decadimenti
- Fluidi misti (cold + warm DM)
- Particelle scalari ultra-leggere (Fuzzy DM)
- Effective Theory Of Structure formation (ETHOS)\*



\* Vogelsberger et al. (2015), Cyr-Racine et al. (2015)

# Simulazioni idrodinamiche (I)

- Abbiamo modificato il codice 2LPTic<sup>1</sup>, generatore di condizioni iniziali per simulazioni cosmologiche, implementando la nuova formula per  $T(k)$ : ora ha come input  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$  invece che  $m_{\text{WDM}}$  e calcola la relativa funzione di trasferimento con la nuova formula generale

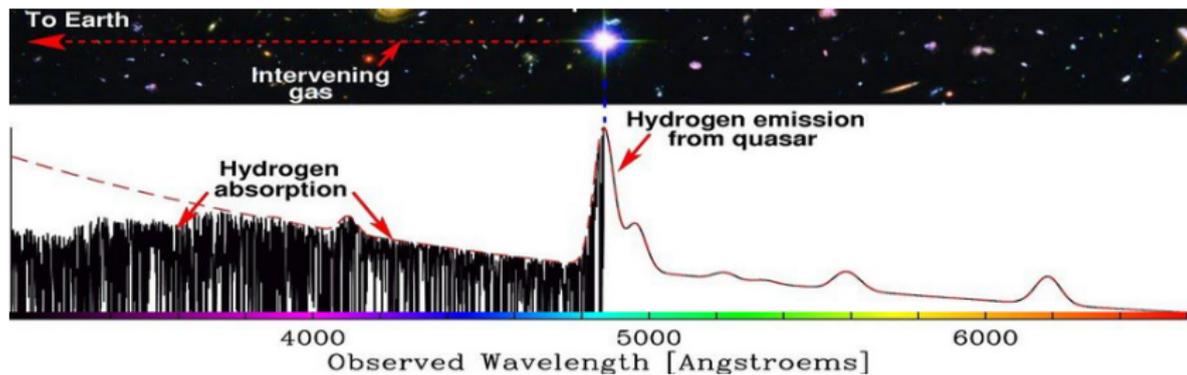


- Abbiamo usato tali condizioni iniziali per realizzare una griglia di simulazioni idrodinamiche che campionano lo spazio  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ , usando GADGET-3<sup>2</sup> ( $512^3$  particelle in una scatola di 20 Mpc/h di lato, fino a redshift  $z = 2$ ).

<sup>1</sup> Crocce et al. (2006)

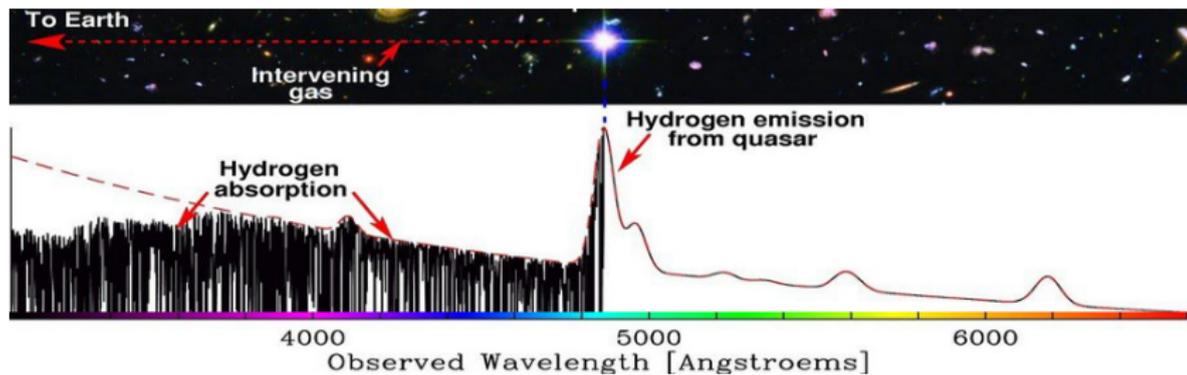
<sup>2</sup> Springel et al. (2000), Springel (2005)

## Simulazioni idrodinamiche (II)



- L'obiettivo e' di confrontare il nostro set di simulazioni con la foresta Lyman- $\alpha$ , in modo da estrarre dei limiti su  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$

# Simulazioni idrodinamiche (II)



- L'obiettivo e' di confrontare il nostro set di simulazioni con la foresta Lyman- $\alpha$ , in modo da estrarre dei limiti su  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$
- Per ciascuna simulazione abbiamo estratto lo **spettro di potenza 1D del flusso**  $P_F(k, z)$ , che e' la grandezza studiata nelle osservazioni della foresta Lyman- $\alpha$ .



$$P_F(k, z, \alpha, \beta, \gamma, \bar{F}(z), T_{\text{IGM}}(z), \sigma_8, z_{\text{reio}}, n_{\text{eff}}, f_{\text{UV}})$$

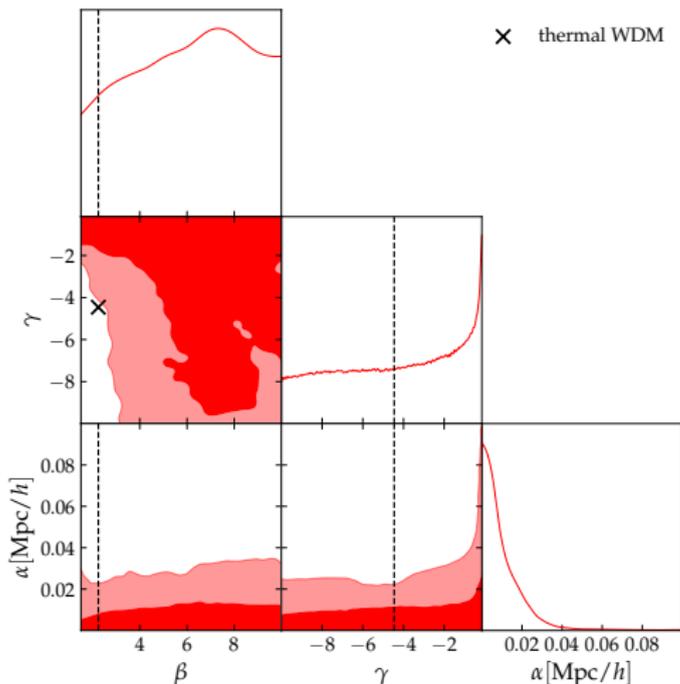
↔ ↔ ↔ ↔

non-standard DM astrophysical cosmological

# Limiti su $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ dalla foresta Lyman- $\alpha$

Abbiamo realizzato un'analisi via Monte Carlo Markov Chain (MCMC) coi dati forniti dagli spettrografi MIKE e HIRES ( $4.2 \leq z \leq 5.4$ ), ed estratto dei limiti su  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$

RM, Viel, Iršič, 2018, PRD 98 8 083540 [arXiv:1806.08371]



Constraint on the **SHAPE** of the power suppression

$$|\beta/\gamma| < 14$$

$$\alpha < 0.03 \text{ Mpc}/h$$

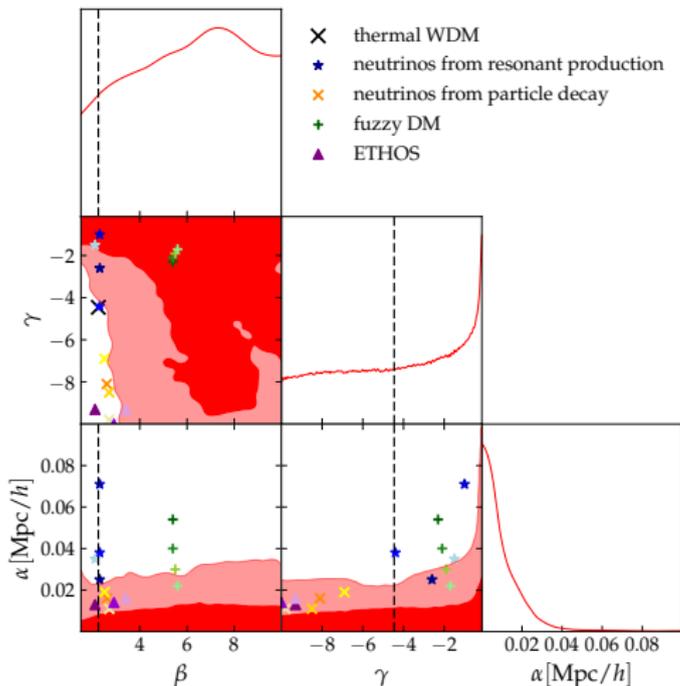
( $2\sigma$  C.L.)

Constraint on the **SCALE** of the power suppression

# Limiti su $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ dalla foresta Lyman- $\alpha$

Abbiamo realizzato un'analisi via Monte Carlo Markov Chain (MCMC) coi dati forniti dagli spettrografi MIKE e HIRES ( $4.2 \leq z \leq 5.4$ ), ed estratto dei limiti su  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$

RM, Viel, Iršič, 2018, PRD 98 8 083540 [arXiv:1806.08371]



Constraint on the **SHAPE** of the power suppression

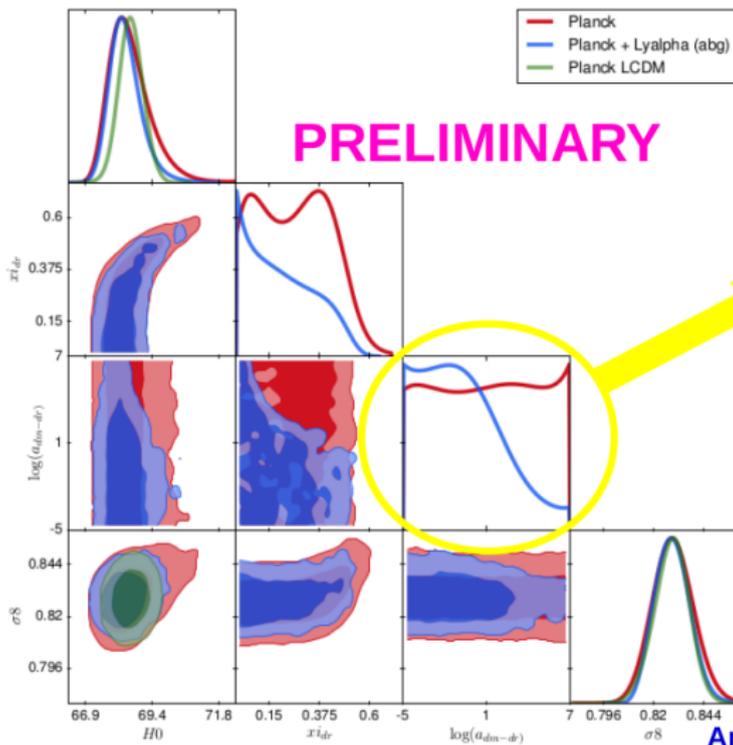
$$|\beta/\gamma| < 14$$

$$\alpha < 0.03 \text{ Mpc}/h$$

( $2\sigma$  C.L.)

Constraint on the **SCALE** of the power suppression

# Modelli di interazione tra materia oscura e radiazione oscura



**PRELIMINARY**

**Significant tightening of the limit on the DM-DR interaction strength**

**DM – Dark Radiation interaction models**

**NEW MontePython LIKELIHOOD based on {alpha,beta,gamma}**

**Archidiacono, Hooper, Murgia+(in prep.)**

## Potenziali problemi

- 1) Possiamo approssimare la dinamica dei modelli testati come non collisionale, durante la fase di evoluzione non lineare? (e.g., per modelli di fuzzy DM)

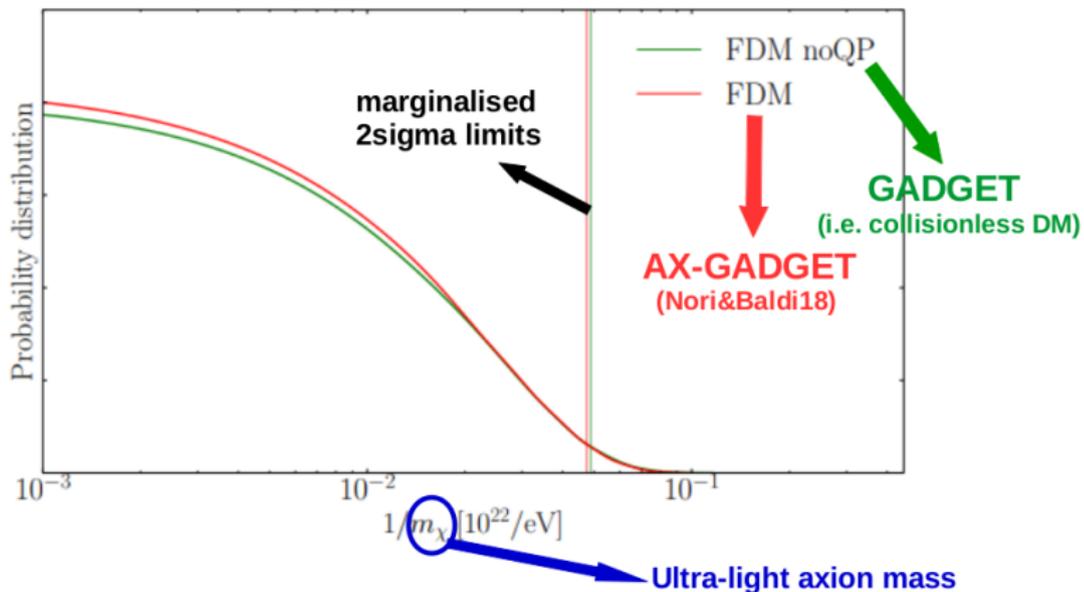
Nori, RM, Iršič, Baldi, Viel, 2018, MNRAS 482 3 [arXiv:1809.09619]

- 2) Possiamo ignorare eventuali oscillazioni nello spettro lineare iniziale? (e.g., ETHOS)

Archidiacono, Hooper, Lesgourgues, RM, Viel, in prep. [arXiv:19xx.xxxx]

- 3) Possiamo riprodurre scenari caratterizzati da un plateau nella soppressione di potenza? (e.g., frazioni di materia oscura non fredda  $f_{\text{nCDM}} < 100\%$ )

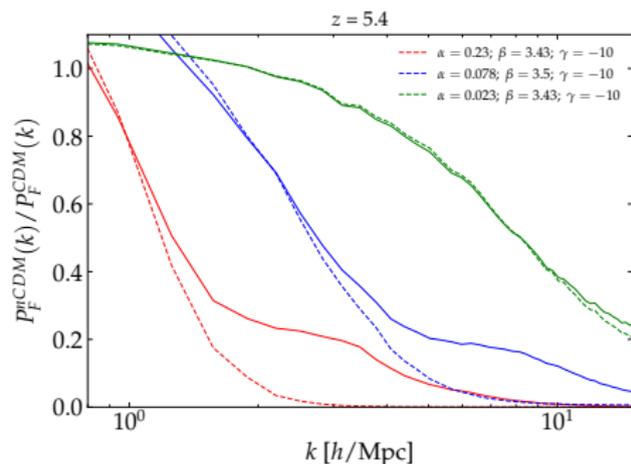
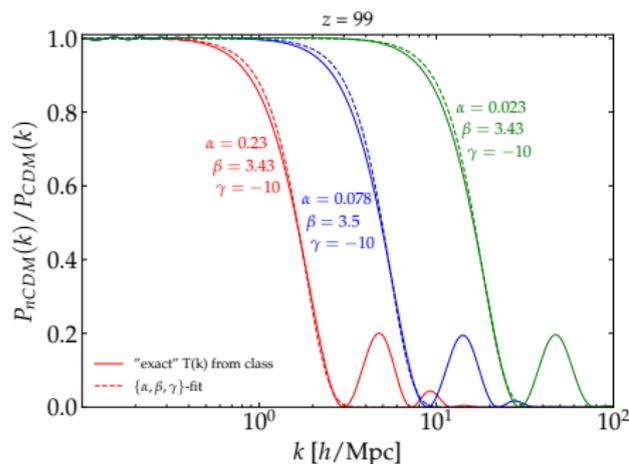
# Primo problema potenziale: la dinamica della Fuzzy DM (FDM)



**QP** → **Quantum Pressure implemented in the non-linear dynamics (i.e. in AX-GADGET)**

Nori, RM, Iršič, Baldi, Viel, 2018, MNRAS 482 3 [arXiv:1809.09619]

## Secondo problema potenziale: oscillazioni a piccole scale (I)



$$\alpha = 0.23; \beta = 3.43; \gamma = -10;$$

$$\alpha = 0.078; \beta = 3.5; \gamma = -10;$$

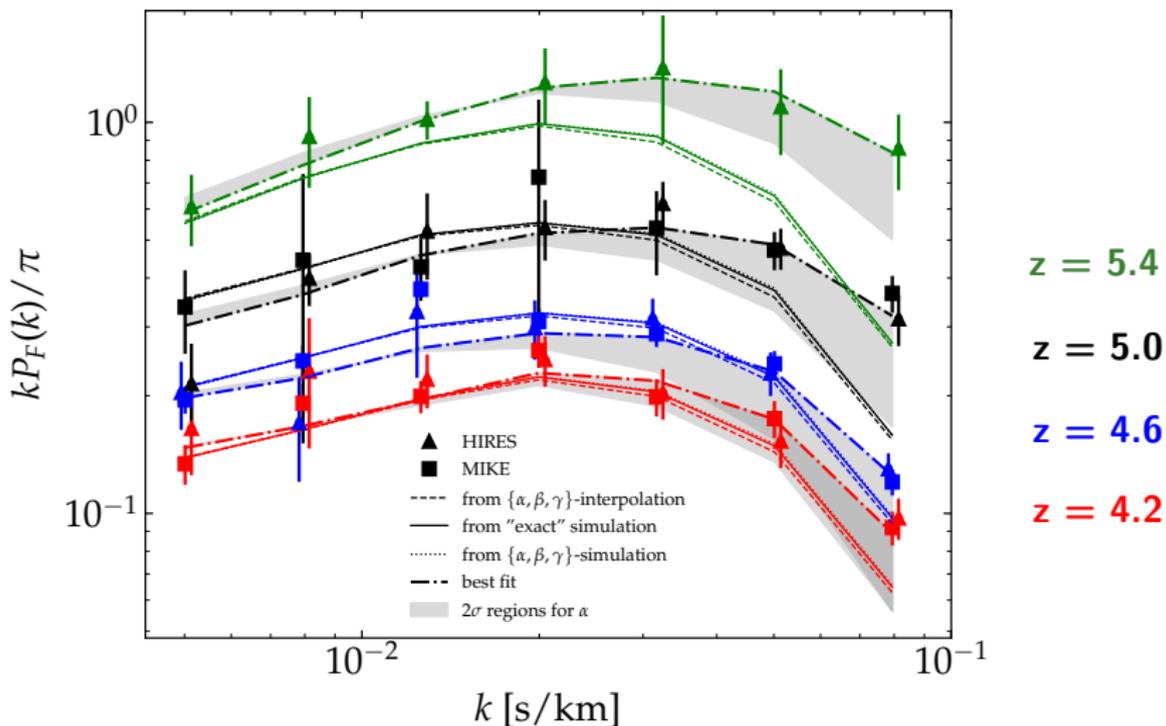
$$\alpha = 0.023; \beta = 3.43; \gamma = -10$$



**tasso d'interazione tra materia oscura  
e radiazione oscura**

RM, Viel, Iršič, 2018, PRD 98 8 083540 [arXiv:1806.08371]

## Secondo problema potenziale: oscillazioni a piccole scale (II)

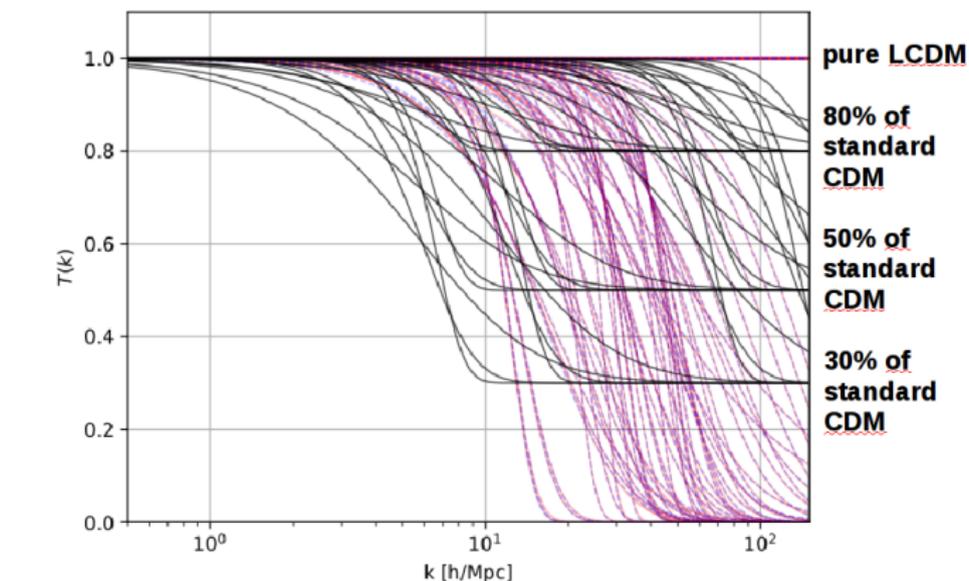


RM, Viel, Iršič, 2018, PRD 98 8 083540 [arXiv:1806.08371]

## Terzo problema potenziale: $f_{\text{nCDM}} < 100\%$

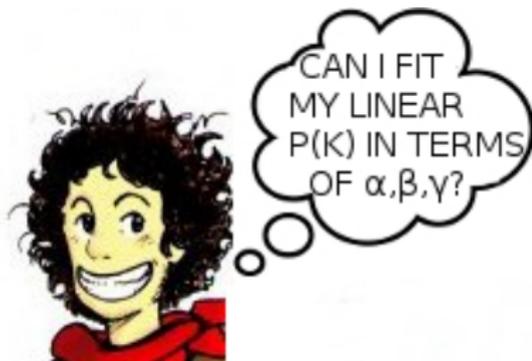
$$T(k) = [1 + (\alpha k)^\beta]^\gamma \quad \Rightarrow \quad T(k) = (1 - \delta) \cdot [1 + (\alpha k)^\beta]^{-1.5 \cdot \beta} + \delta$$

A better parameterization for fitting power suppressions featuring a plateau!



**PRELIMINARY**

## Messaggio da portare a casa

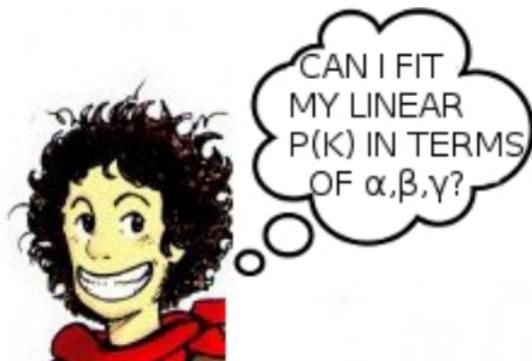


**E ora...**

**SE la risposta e' SI...**

...non servono nuove simulazioni per testare il relativo modello con la foresta Lyman- $\alpha$ !

## Messaggio da portare a casa



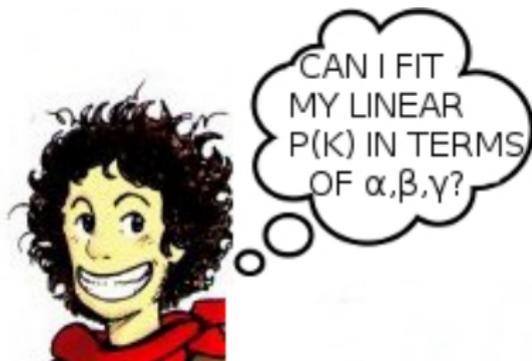
**E ora...**

**SE la risposta e' SI...**

...non servono nuove simulazioni per testare il relativo modello con la foresta Lyman- $\alpha$ !

**OK, ma come posso esplorare sistematicamente lo spazio dei parametri (astro)particellari?**

## Messaggio da portare a casa



E ora...

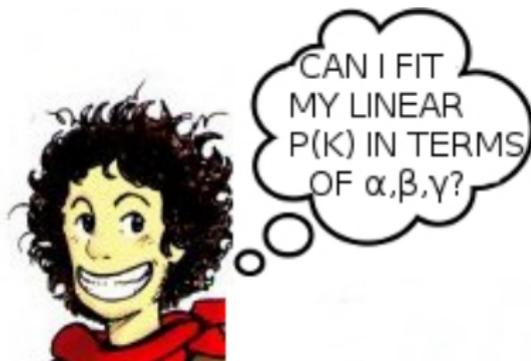
**SE la risposta e' SI...**

...non servono nuove simulazioni per testare il relativo modello con la foresta Lyman- $\alpha$ !

**OK, ma come posso esplorare sistematicamente lo spazio dei parametri (astro)particellari?**

Tramite una **nuova likelihood per MontePython**, che traduce automaticamente i limiti su  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$  in limiti sul modello di fisica fondamentale considerato

# Messaggio da portare a casa



## **SE la risposta e' SI...**

...non servono nuove simulazioni per testare il relativo modello con la foresta Lyman- $\alpha$ !

**OK, ma come posso esplorare sistematicamente lo spazio dei parametri (astro)particellari?**

Tramite una **nuova likelihood per MontePython**, che traduce automaticamente i limiti su  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$  in limiti sul modello di fisica fondamentale considerato

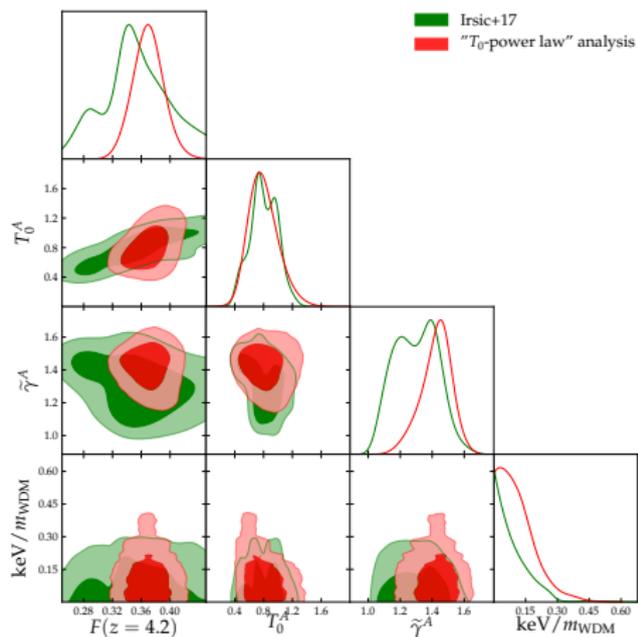
## **E ora...**

- 1) Focus su classi di modelli interessanti:
  - interazioni DM-radiazione oscura
  - interazioni DM-barioni
  - altri scenari con distribuzioni non termiche dei momenti
- 2) Previsioni per future osservazioni della foresta Lyman- $\alpha$

**Thanks for the attention!**

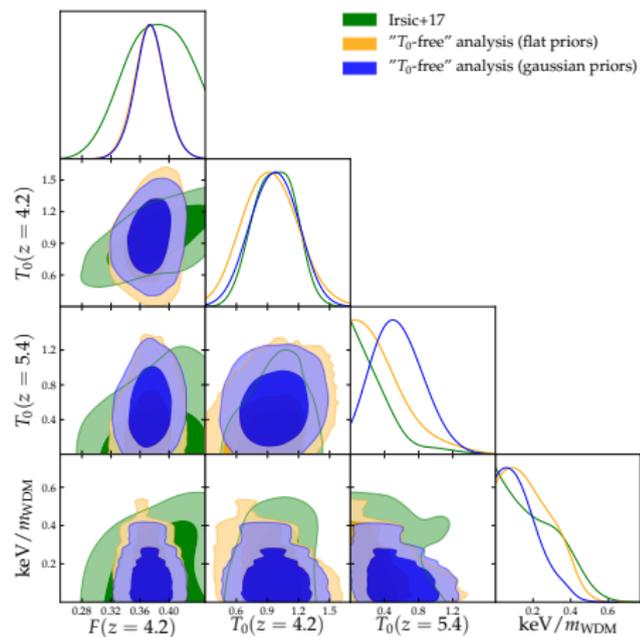
**Gratzias meda po s'attenzioni!**

# Reproducing the previous thermal WDM limits



**Irsic+17:**  $m_{\text{WDM}} > 4.1 \text{ keV}$  ( $2\sigma$ )

**RM+18:**  $m_{\text{WDM}} > 3.6 \text{ keV}$  ( $2\sigma$ )



**Irsic+17:**  $m_{\text{WDM}} > 2.1 \text{ keV}$  ( $2\sigma$ )

**RM+18:**  $m_{\text{WDM}} > 2.7 \text{ keV}$  ( $m_{\text{WDM}} > 2.2 \text{ keV}$ ) ( $2\sigma$ )

**RM, Viel, Iršič, 2018, PRD 98 8 083540 [arXiv:1806.08371]**

# Interpolation scheme & MCMC sampler

- 1) Accurate interpolation method for estimating the expected flux power spectrum in any  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$ -point sampling the volume embraced by the sparse, non-regular grid of simulations

$$\text{Ordinary Kriging method} \Rightarrow P_F(k, z, \{\alpha, \beta, \gamma\}) = \sum_{i=1}^N \lambda_i P_F(k, z, \{\alpha, \beta, \gamma\}_i)$$

with:

$$\lambda_i \equiv \frac{D(\{\alpha, \beta, \gamma\}_i, \{\alpha, \beta, \gamma\})^{-1}}{\sum_{j=1}^N D(\{\alpha, \beta, \gamma\}_j, \{\alpha, \beta, \gamma\})^{-1}};$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1;$$

$$D(\{\alpha, \beta, \gamma\}', \{\alpha, \beta, \gamma\}) \equiv ([(\alpha'_{norm} - \alpha_{norm})^2 + (\beta'_{norm} - \beta_{norm})^2 + (\gamma'_{norm} - \gamma_{norm})^2]^{1/2} + \epsilon)^\xi;$$

$$\xi = 5; \quad \epsilon = 10^{-9}; \quad \alpha_{norm} \equiv \frac{\alpha}{\alpha_{max} - \alpha_{min}}, \dots$$

- 2) Comprehensive Monte Carlo Markov Chain (MCMC) analyses of the Lyman- $\alpha$  forest data, in order to extract absolute constraints on  $\{\alpha, \beta, \gamma\}$  easily translatable to bounds on the fundamental  $n$ CDM properties (**emcee** sampler<sup>3</sup>)

<sup>3</sup><http://dfm.io/emcee/current/>