

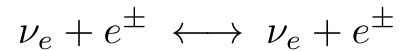
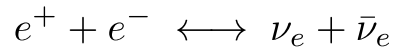
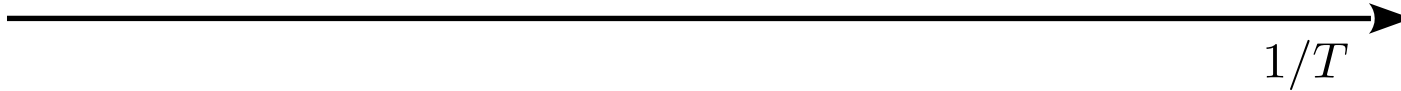
VINCOLI COSMOLOGICI A LIGHT RELICS

Luca Caloni
Università degli Studi di Ferrara & INFN

IFAE 2024, Firenze, 3 aprile 2024

FONDO COSMICO DI NEUTRINI

- Il modello cosmologico standard predice la presenza di un fondo cosmico di neutrini analogo a quello di fotoni (CMB)

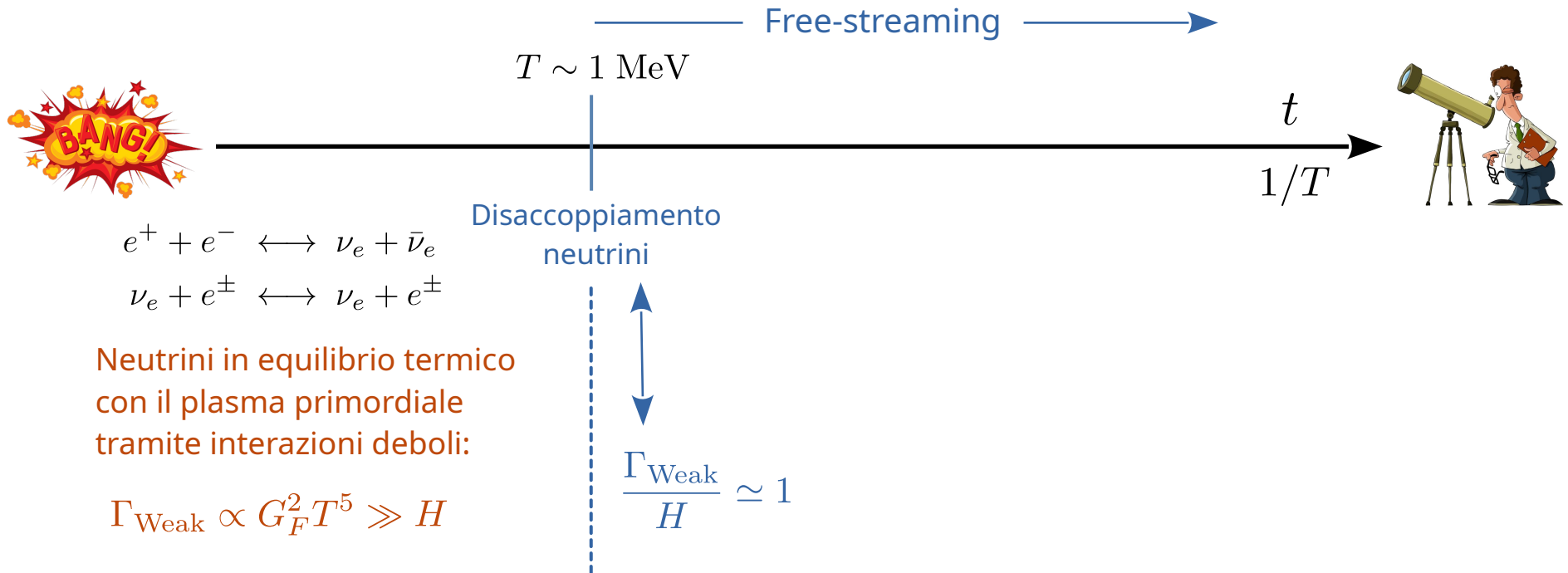


Neutrini in equilibrio termico
con il plasma primordiale
tramite interazioni deboli:

$$\Gamma_{\text{Weak}} \propto G_F^2 T^5 \gg H$$

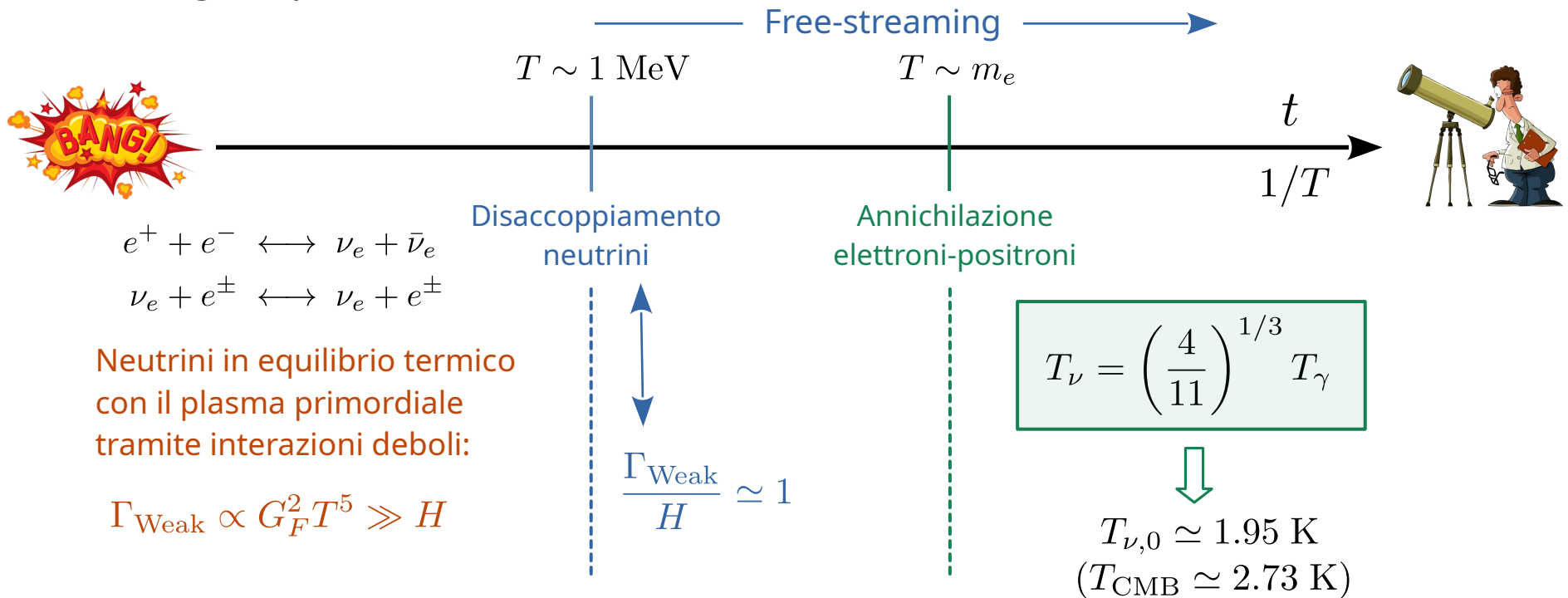
FONDO COSMICO DI NEUTRINI

- Il modello cosmologico standard predice la presenza di un fondo cosmico di neutrini analogo a quello di fotoni (CMB)



FONDO COSMICO DI NEUTRINI

- Il modello cosmologico standard predice la presenza di un fondo cosmico di neutrini analogo a quello di fotoni (CMB)



FONDO COSMICO DI NEUTRINI

- Densità di energia in radiazione dopo annichilazione elettroni-positroni:

$$\rho_{\text{rad}} = \rho_{\gamma} \left[1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_{\text{eff}} \right] \longleftarrow N_{\text{eff}} \equiv N_{\text{eff}}^{\text{SM}} + \Delta N_{\text{eff}}$$

FONDO COSMICO DI NEUTRINI

- Densità di energia in radiazione dopo annichilazione elettroni-positroni:

$$\rho_{\text{rad}} = \rho_{\gamma} \left[1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_{\text{eff}} \right]$$

$N_{\text{eff}} \equiv N_{\text{eff}}^{\text{SM}} + \Delta N_{\text{eff}}$

- Il valore atteso all'interno del Modello Standard è stato calcolato con grande precisione (decoupling non istantaneo, oscillazione neutrini, correzioni di QED a temperatura finita):

[Mangano et al: Phys. Lett. B 534 (2002) 8-16]
[Bennett et al: JCAP 04 (2021) 073]
[Akita, Yamaguchi: JCAP 08 (2020) 012]
[Froustey et al: JCAP 12 (2020) 015]

$$N_{\text{eff}}^{\text{SM}} = 3.0440 \pm 0.0002$$

Errore teorico ben al di sotto della sensibilità di esperimenti futuri!

FONDO COSMICO DI NEUTRINI

- Densità di energia in radiazione dopo annichilazione elettroni-positroni:

$$\rho_{\text{rad}} = \rho_{\gamma} \left[1 + \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11} \right)^{4/3} N_{\text{eff}} \right]$$

$N_{\text{eff}} \equiv N_{\text{eff}}^{\text{SM}} + \Delta N_{\text{eff}}$

- Il valore atteso all'interno del Modello Standard è stato calcolato con grande precisione (decoupling non istantaneo, oscillazione neutrini, correzioni di QED a temperatura finita):

[Mangano et al: Phys. Lett. B 534 (2002) 8-16]
[Bennett et al: JCAP 04 (2021) 073]
[Akita, Yamaguchi: JCAP 08 (2020) 012]
[Froustey et al: JCAP 12 (2020) 015]

$$N_{\text{eff}}^{\text{SM}} = 3.0440 \pm 0.0002$$

Errore teorico ben al di sotto della sensibilità di esperimenti futuri!

- Vincolo da Planck+BAO (95% CL):

Consistente con predizione SM!

$$N_{\text{eff}} = 2.99^{+0.34}_{-0.33}$$



$$\Delta N_{\text{eff}} < 0.30$$

Quale tipo di fisica ci permette di vincolare il limite

$$\Delta N_{\text{eff}} < 0.30 ?$$

Quale tipo di fisica ci permette di vincolare il limite

$$\Delta N_{\text{eff}} < 0.30 ?$$

Esperimenti futuri di CMB misureranno ΔN_{eff} con maggiore precisione:

$$\sigma(\Delta N_{\text{eff}})_{\text{SO}} = 0.05$$

$$\sigma(\Delta N_{\text{eff}})_{\text{CMB-S4}} = 0.03$$

Quali sono le implicazioni per fisica BSM?

N_{eff} COME PROBE DI NUOVA FISICA



FISICA DEL NEUTRINO

Modifiche alla fisica del
neutrino che ne alterino il
disaccoppiamento
(interazioni non standard)

N_{eff} COME PROBE DI NUOVA FISICA



FISICA DEL NEUTRINO

Modifiche alla fisica del neutrino che ne alterino il disaccoppiamento
(interazioni non standard)

DARK RADIATION

Presenza di particelle leggere fossili (light relics):

- neutrini sterili
- assioni o ALPs termiche
- dark photons
- (onde gravitazionali primordiali)
- ...

N_{eff} COME PROBE DI NUOVA FISICA



FISICA DEL NEUTRINO

Modifiche alla fisica del neutrino che ne alterino il disaccoppiamento
(interazioni non standard)

DARK RADIATION

Presenza di particelle leggere fossili (*light relics*):

- neutrini sterili
- assioni o ALPs termiche
- dark photons
- (onde gravitazionali primordiali)
- ...

ALTRO

- Modifiche alla storia termica dell'Universo
- ...

N_{eff} COME PROBE DI NUOVA FISICA



FISICA DEL NEUTRINO

Modifiche alla fisica del neutrino che ne alterino il disaccoppiamento (interazioni non standard)



DARK RADIATION

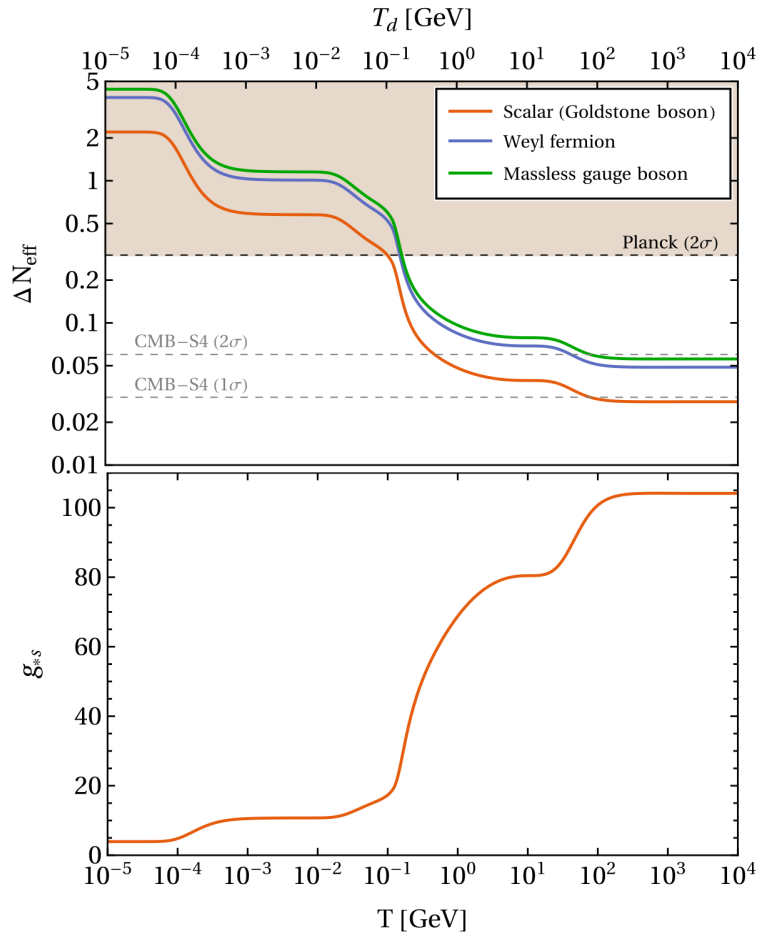
Presenza di particelle leggere fossili (light relics):

- neutrini sterili
- assioni o ALPs termiche
- dark photons
- (onde gravitazionali primordiali)
- ...

ALTRO

- Modifiche alla storia termica dell'Universo
- ...

FREEZE-OUT DI LIGHT RELICS



- Per una specie inizialmente all'equilibrio termico con il plasma e che disaccoppia alla temperatura T_d :

$$\Delta N_{\text{eff}} \simeq 0.027 \times g_{*\Phi} \left(\frac{g_{*s}(T_d)}{106.75} \right)^{-4/3}$$

- Planck esclude light relics termiche che si siano disaccoppiate dopo la transizione di fase della QCD
- Il contributo minimo a ΔN_{eff} si ha quando il decoupling avviene a temperature maggiori della massa della particella più pesante (quark top) ~ sensibilità di CMB-S4

[Planck collaboration: Astron. Astrophys. 641 (2020) A6]

[CMB-S4 collaboration: 1610.02743]

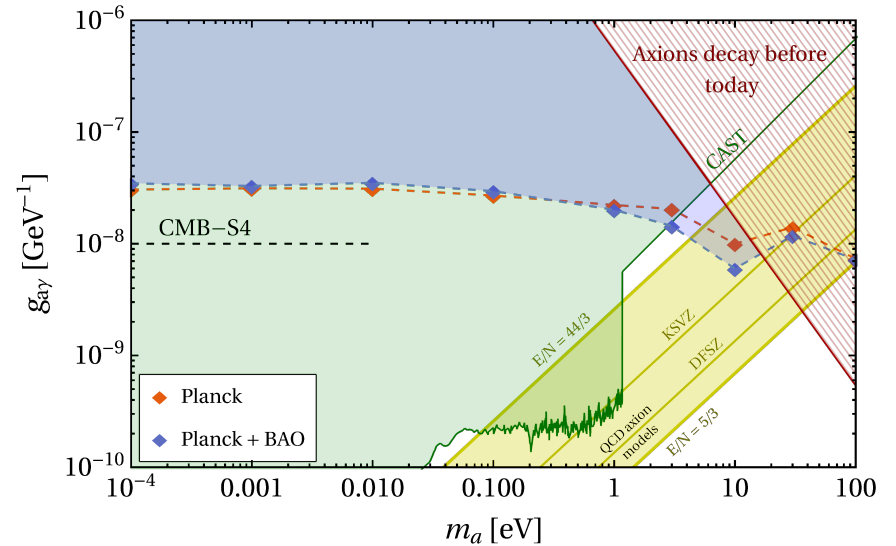
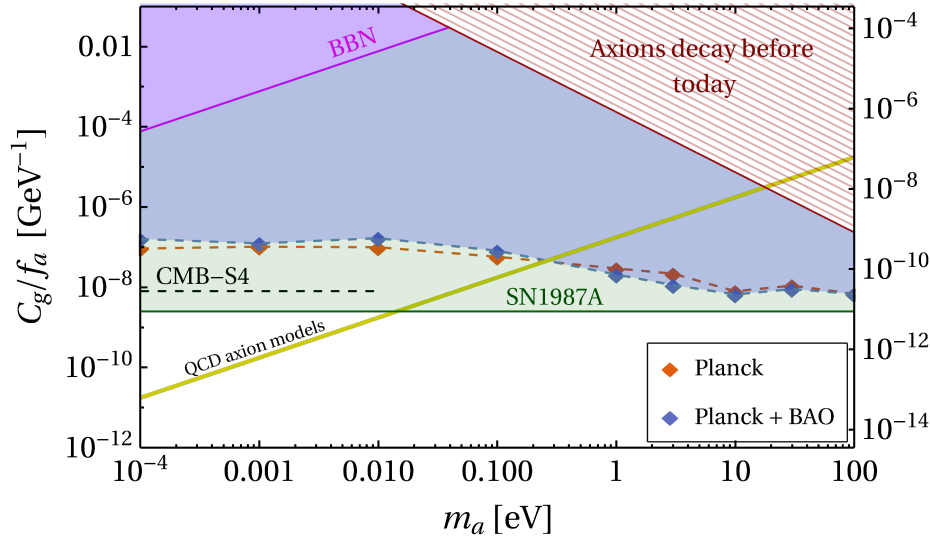
ALPs TERMICHE



$$\mathcal{L}_{\text{eff}} \supset \frac{1}{2}(\partial^\mu a)(\partial_\mu a) - \frac{1}{2}m_0^2 a^2 + \frac{\alpha_s}{8\pi} \frac{C_g}{f_a} a G_{\mu\nu}^i \tilde{G}^{\mu\nu,i} + \frac{1}{4} g_{a\gamma} a F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$$

Produzione tramite accoppiamento con i gluoni (assione QCD)

Produzione tramite accoppiamento con i fotoni



CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

- La cosmologia gioca un ruolo importante nel vincolare le proprietà di particelle leggere fossili (light relics)
- Per light relics prodotte via freeze-out, il vincolo di Planck su ΔN_{eff} ci permette di escludere la presenza di particelle che si siano disaccoppiate dal plasma primordiale dopo la transizione di fase della QCD
- Caso concreto: vincoli ad assioni e ALPs

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

- La cosmologia gioca un ruolo importante nel vincolare le proprietà di particelle leggere fossili (light relics)
- Per light relics prodotte via freeze-out, il vincolo di Planck su ΔN_{eff} ci permette di escludere la presenza di particelle che si siano disaccoppiate dal plasma primordiale dopo la transizione di fase della QCD
- Caso concreto: vincoli ad assioni e ALPs
- Osservazioni future di CMB vincoleranno N_{eff} con maggiore precisione:
 - Sensibilità \sim contributo minimo ΔN_{eff}
 - Sensibilità a diversi meccanismi di produzione (e.g., freeze-in)

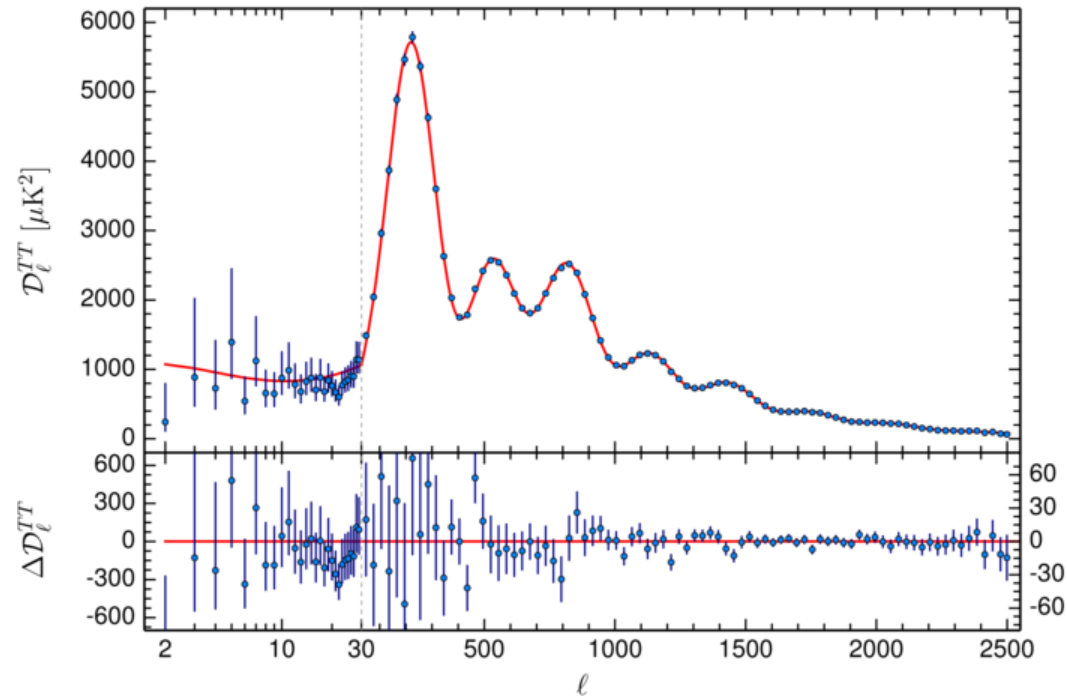
CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

- La cosmologia gioca un ruolo importante nel vincolare le proprietà di particelle leggere fossili (light relics)
- Per light relics prodotte via freeze-out, il vincolo di Planck su ΔN_{eff} ci permette di escludere la presenza di particelle che si siano disaccoppiate dal plasma primordiale dopo la transizione di fase della QCD
- Caso concreto: vincoli ad assioni e ALPs
- Osservazioni future di CMB vincoleranno N_{eff} con maggiore precisione:
 - Sensibilità \sim contributo minimo ΔN_{eff}
 - Sensibilità a diversi meccanismi di produzione (e.g., freeze-in)

Grazie per l'attenzione!

BACKUP SLIDES

CMB: SPETTRO DI POTENZA ANGOLARE



[Planck collaboration: Astron. Astrophys. 641 (2020) A6]

ASSIONE DELLA QCD E ALPs

- L'assione della QCD è uno pseudo Nambu-Goldstone boson (PNG) derivante dalla SSB di una simmetria U(1) globale, introdotta come soluzione allo strong CP problem della QCD
- Gli assioni sono **leggeri** e **weaky-coupled**:

$$g_a \propto m_a \propto \frac{1}{f_a}$$



⇒ Difficili da rivelare direttamente, ma possono giocare un ruolo importante in cosmologia

- Più in generale, le axion-like particles (ALPs) sono una predizione comune a molte teorie BSM (e.g., teoria delle stringhe). **Nel caso delle ALPs, massa e couplings sono disaccoppiati!**

ALPs: COUPLING CON FOTONI

- The leading contribution to axion production is the Primakoff effect, i.e. photon conversion to axions in the presence of charged particles (Q): $Q + \gamma \rightarrow Q + a$

- Scattering rate for Primakoff effect:

$$\Gamma_{Q\gamma \rightarrow Qa} \simeq \frac{\alpha_{\text{EM}} g_{a\gamma}^2 \pi^2}{36\zeta(3)} \left[\log\left(\frac{T^2}{m_\gamma^2}\right) + 0.82 \right] n_Q \quad \xrightarrow{\text{Freeze-out: } H(T_d) \simeq \Gamma}$$

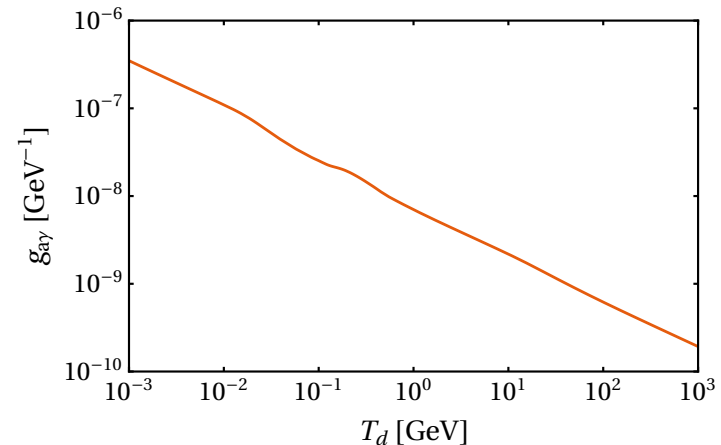
[Bolz, Brandenburg, Buchmuller: hep-ph/0012052]

[Cadamuro, Redondo: 1110.2895]

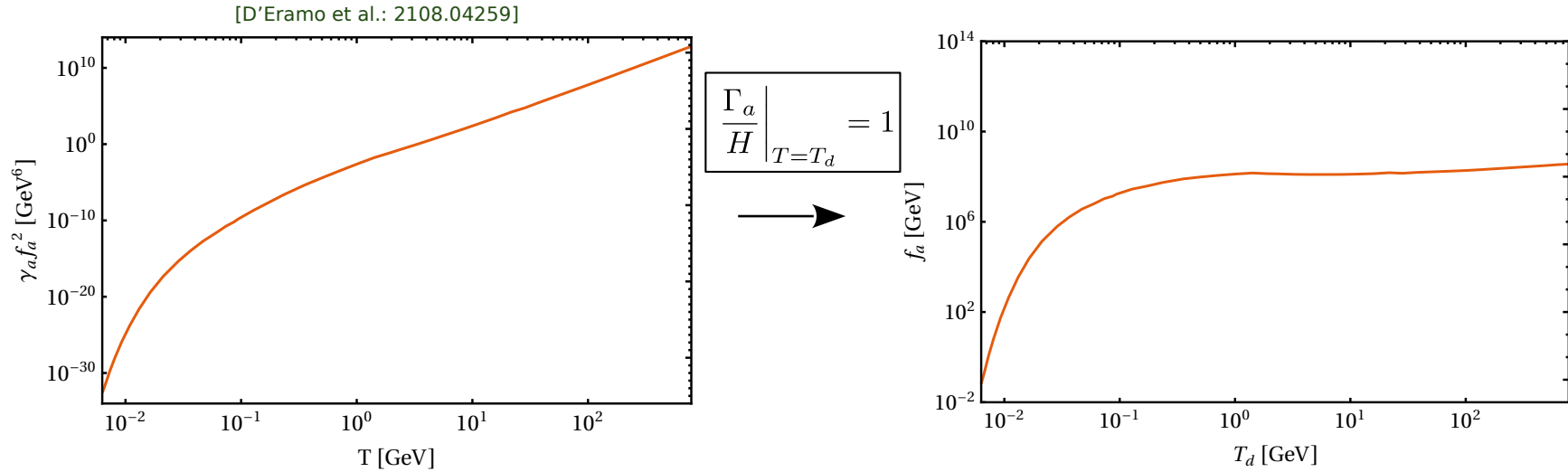
$$g_{a\gamma} \simeq 10^{-8} \times \frac{\sqrt{g_*}}{g_Q} \left(\frac{T_d}{\text{GeV}}\right)^{-1} \text{GeV}^{-1}$$

where:

- $n_Q = \sum_i Q_i^2 n_i \equiv (\zeta(3)/\pi^2) g_Q(T) T^3$
- $g_Q(T) = \sum_i Q_i^2 g_{*,i}(T)$
- $m_\gamma = \frac{T}{6\alpha_{\text{EM}} \sqrt{g_Q(T)}}$



ALPs: COUPLING CON GLUONI



Relevant processes:

- Above QCDPT: $g + g \longrightarrow g + a$, $q + \bar{q} \longrightarrow g + a$, $q/\bar{q} + g \longrightarrow q/\bar{q} + a$
- Below QCDPT: $\pi^+ \pi^- \longrightarrow \pi^0 + a$, $\pi^+ + \pi^0 \longrightarrow \pi^+ + a$, $\pi^- + \pi^0 \longrightarrow \pi^- + a$