

# Assunzioni teoriche nella determinazione del numero effettivo di neutrini

---

LUDOVICO MARK CAPPARELLI – INFN – SAPIENZA, UNIVERSITÀ DI  
ROMA

# I gradi di libertà leggeri: $N_{eff}$

---

- $N_{eff}$  misura il numero di gradi di libertà relativistici nel plasma prima della ricombinazione.

- $$\frac{\rho_{leggeri}}{\rho_\gamma} = N_{eff} \frac{7}{8} \left(\frac{4}{11}\right)^{\frac{4}{3}}$$

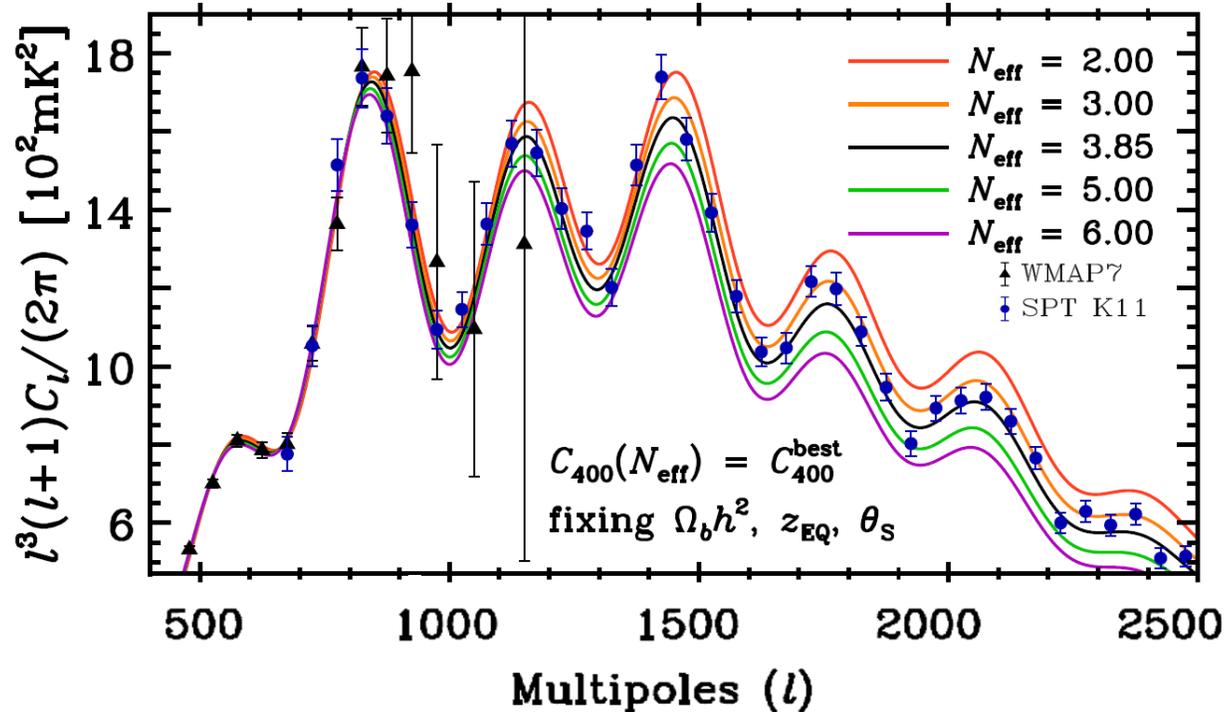
- Nel modello standard sono relativistici, durante la ricombinazione, fotoni  $\gamma$  e 3 neutrini  $\nu$ . Non interagiscono tra loro.  $N_{eff}^{(SM)} = 3.046$ .
- Particelle leggere con accoppiamenti piccoli **possono essere prodotti in precedenza, rimanendo come fondo** e cambiando  $N_{eff}$ .
- $$\Delta N_{eff} = N_{eff} - N_{eff}^{(SM)}$$

# I gradi di liberta leggeri: $N_{eff}$

---

- Un bosone relativistico con  $T_f$  contribuisce:  $\frac{4g}{7} \left( \frac{43}{4g_*(T_f)} \right)^{\frac{4}{3}}$ .
- Il caso peggiore è se  $T_f > M_{top}$ , quando  $g_* = 106.75$ . Per cui un bosone di spin zero contribuisce  $\Delta N_{eff} > 0.027$ .
- Un fermione di Weyl contribuisce  $\Delta N_{eff} > 0.047$ .
- **Molto interessante se misure cosmologiche potessero determinare  $N_{eff}$  con una incertezza di  $\sim 0.03$**

# $N_{\text{eff}}$ dalle anisotropie nella CMB



Z. Hou et al., Phys.Rev. D87 (2013) 083008

- Aumentare la materia relativistica diminuisce la potenza della CMB su piccole scale.
- Planck 2015:  $N_{\text{eff}} = 3.13^{+0.30}_{-0.34}$
- Consistente con il modello standard.

# Migliorare sensibilità $N_{eff}$

---

- Importante raggiungere una sensibilità di 0.03 su  $N_{eff}$  per falsificare, o meno, molti modelli di nuova fisica.
- Obiettivo scientifico di **CMB Stage-4 (S-4)** è raggiungere questa sensibilità con una misura su CMB. (vedi CMB S-4 Science Book)

Configurazione	Beam	Rumore	$L_{max}$	$L_{min}$	$f_{sky}$
CMB S-4	3'	1 $\mu$ K/arcmin	3000	5	0.4
S-4+ (ipotetico)	1'	0.5 $\mu$ K/arcmin	5000	2	0.4

# Migliorare sensibilità $N_{\text{eff}}$

---

- CMB S-4 afferma di poter raggiungere la sensibilità richiesta. **Ma questo dipende da alcune assunzioni teoriche.**
- Ne abbiamo studiate due importanti:
  - Presenza di un running dell'indice spettrale delle perturbazioni scalari.
  - Errore sistematico dovuto all'incertezza sulla vita media del neutrone.

Configurazione	Beam	Rumore	$L_{\text{max}}$	$L_{\text{min}}$	$f_{\text{sky}}$
CMB S-4	3'	1 $\mu\text{K}/\text{arcmin}$	3000	5	0.4
S-4+ (ipotetico)	1'	0.5 $\mu\text{K}/\text{arcmin}$	5000	2	0.4

# Metodo

---

- Generiamo un possibile risultato sperimentale usando il software CAMB ( <https://camb.info/> ) che risolve le equazioni di Boltzmann.
- Ai  $C_l$  fiduciali sommiamo un rumore sperimentale  $N_l$ .
- Il fiduciale assume  $\Lambda$ CDM con parametri dati da best fit PLANCK.
- Eseguiamo una analisi MCMC (MonteCarlo Markov Chain) per ottenere le probabilità a posteriori sui parametri del modello.
- Idealmente, si ottengono distribuzioni centrate sui parametri usati per generare i dati. **L'utilità è nella determinazione dell'incertezza sui parametri.**

# Spettro perturbazioni: $n_{run}$

- Spettro perturbazioni primordiali:

$$P_p(k) = \left(\frac{k}{k_*}\right)^{n_s - 1 + \frac{1}{2}n_{run}} \ln \frac{k}{k_*}$$

- Planck 2015:  $n_s = 0.9655 \pm 0.0062$ .

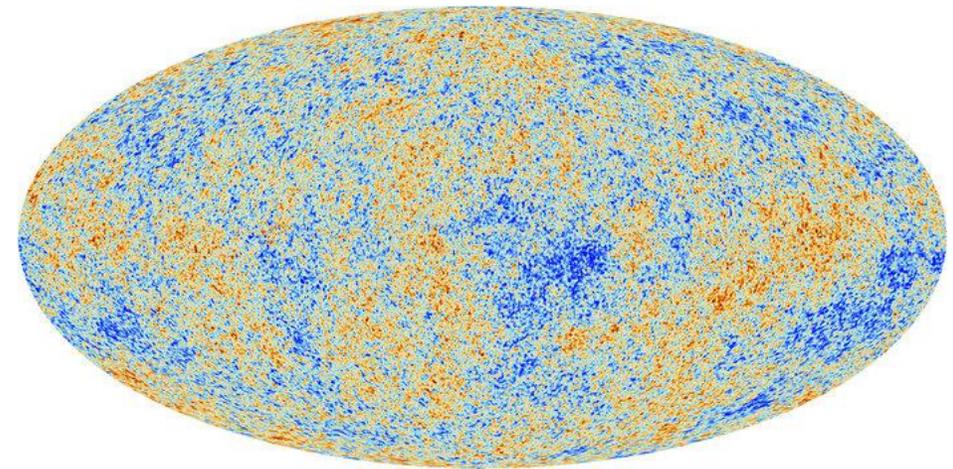
*Quasi invariante di scala.*

- $n_{run}$  consistente con zero.

- **Origine fisica delle perturbazioni ignota.**

- Inflazione “slow-roll” predice naturalmente:

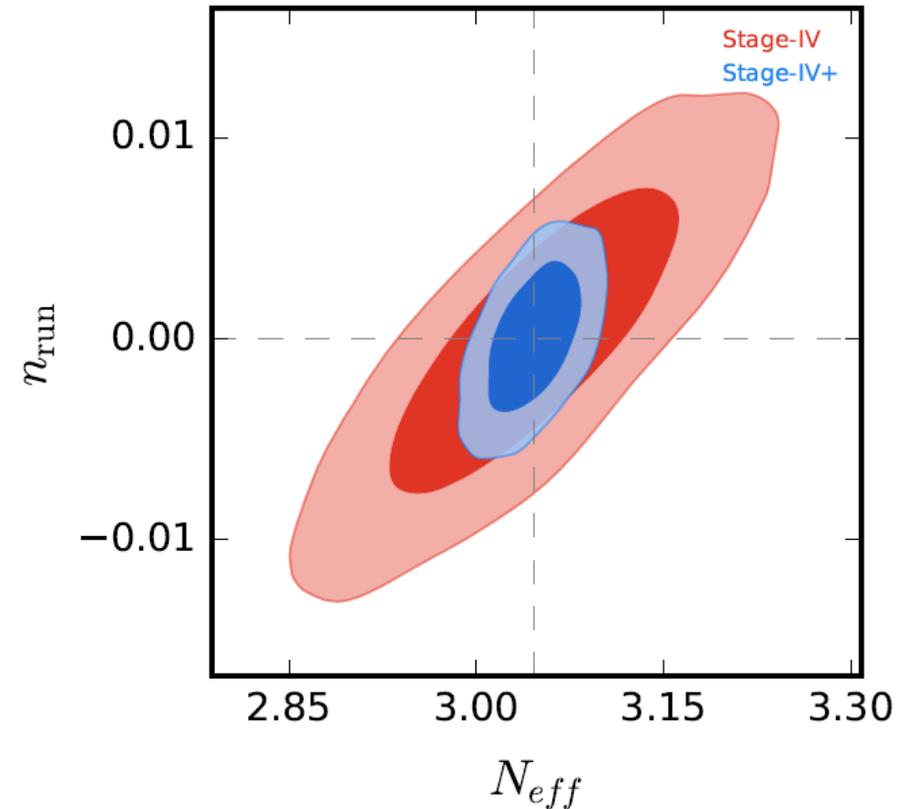
$$n_{run} \sim -\frac{1}{2}(1 - n_s)^2 \sim -0.001$$



ESA/Planck 2015

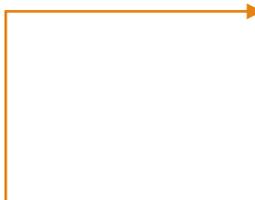
# Degenerazione con $n_{run}$

- Per S-4,  $N_{eff}$  è degenere con  $n_{run}$
- Fissare  $n_{run}$  introduce un bias sulla misura di  $N_{eff}$ .
- Se considero un possibile running l'errore su  $N_{eff}$  passa da 0.043 a 0.076.
- Situazione migliore per S-4+



# Degenerazione con $n_{run}$

Caso	$N_{eff}$ , CMB S-4	$N_{eff}$ , S-4+
Variando $n_{run}$	$3.049 \pm 0.076$	$3.048 \pm 0.026$
$n_{run} = 0$	$3.048 \pm 0.043$	$3.047 \pm 0.021$
$n_{run} = 0.002$	$3.019 \pm 0.043$	$3.035 \pm 0.021$
$n_{run} = 0.004$	$2.996 \pm 0.044$	$3.024 \pm 0.021$
$n_{run} = -0.002$	$3.074 \pm 0.044$	$3.056 \pm 0.021$
$n_{run} = -0.004$	$3.098 \pm 0.044$	$3.071 \pm 0.019$



Negli ultimi casi, abbiamo generato dati con  $\Lambda$ CDM +  $n_{run}$  e osservato che succede se non lo considerassimo nel MCMC

# Vita media del neutrone

---

- **Tensioni tra diverse misure della vita media del neutrone.**
- Misure a fascio:  $\tau_n = (887.7 \pm 1.2[stat] \pm 1.9[sys])s$
- Misure in bottiglia:  $\tau_n = (878.5 \pm 0.7[stat] \pm 0.3[sys])s$
- Discordanza di  $\sim 4\sigma$
- Importante perché determina la predizione teorica dell'abbondanza di Elio.
- Anche  $N_{eff}$  determina l'abbondanza di Elio, controllando la velocità di espansione durante la nucleosintesi.
- Nelle simulazioni finora l'abbondanza di Elio aiuta a vincolare  $N_{eff}$

# Vita media del neutrone

Caso	$N_{eff}$ , CMB S-4	$N_{eff}$ , S-4+
$\tau_n = 880.2s$	$3.048 \pm 0.043$	$3.047 \pm 0.021$
$\tau_n = 888.0s$	$3.062 \pm 0.040$	$3.064 \pm 0.021$
$\tau_n = 877.0s$	$3.039 \pm 0.041$	$3.037 \pm 0.020$

- In entrambi i possibili esperimenti, l'incertezza sulla vita media del neutrone può dare un errore sistematico di  $\sim 0.02$ .
- Confrontabile con il segnale di una particella leggera.
- **È necessario fare chiarezza sugli esperimenti discordanti.**

Grazie dell'ascolto!

---