

EFFETTO DEI CAMPI MAGNETICI PRIMORDIALI

SUI FUTURI VINCOLI
DALLA CMB SULLE

ONDE GRAVITAZIONALI
INFLAZIONARIE

Fabrizio Renzi

Giovanni Cabass

Eleonora di Valentino

Alessandro Melchiorri

Luca Pagano

[\[arXiv:1803.03230v1](https://arxiv.org/abs/1803.03230v1) [astro-ph.CO]]

Fabrizio Renzi – Ph.D. Student

“ Sapienza ” – Università di Roma

INFN ROMA

IFAE 2018

COSMOLOGIA E CAMPI MAGNETICI

- I campi magnetici sono presenti in tutte le strutture dell'Universo (origine ?)
- La produzione di onde gravitazionali è prevista dai modelli inflazionari (test inflazione)
- Campi magnetici e onde gravitazionali possono essere usati come una "finestra" sulla fisica delle alte energie
- Specifici modelli di generazione del campo magnetico possono produrre uno spettro di modi B del tutto identico a quello predetto dai modelli inflazionari
- I futuri esperimenti volti alla misurazione dovranno come obiettivo principale la misurazione dei modi B di polarizzazione



Indagare cosmologie che prevedano sia modi inflazionari che modi magnetici

CAMPI MAGNETICI PRIMORDIALI

- Lo spettro di potenza (angolare) magnetico è modellato come un campo gaussiano omogeneo e isotropo.

$$P_B(k) = \begin{cases} Ak^{n_B} & k < k_D \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad B_\lambda^2 = \int_0^\infty \frac{k^2 dk}{2\pi^2} e^{-k^2 \lambda^2} P_B(k) = \frac{A}{2\pi^2} \frac{\Gamma(n_B + 3/2)}{\lambda^{n_B+3}}$$

$\lambda = 1 \text{ Mpc}$ e $A_B \equiv B_{1\text{Mpc}}$ nel seguito

- n_B tiene conto della storia di generazione del campo *i.e.* magnetogenesi

- ⇒ Meccanismi causali (*e.g.* transizioni di fase) favoriscono spettri con $n_B \geq 2$
- ⇒ Magnetogenesi inflazionarie e post-inflazionarie favoriscono spettri con $n_B \leq 0$

- k_D tiene conto della dissipazione del campo a causa della viscosità di radiazione alle piccole scale

Scala di Silk comobile \leftarrow $k_D^{-1} \approx l_\gamma v_A$ \rightarrow Velocità di Alfvén adimensionale

Funzione di correlazione a due punti



$$\langle B_i(\mathbf{k}) B_j^*(\mathbf{k}') \rangle = (2\pi)^3 \delta^{(3)}(\mathbf{k} - \mathbf{k}') P_{ij}(\hat{k}) P_B(k)$$

$$P_{ij} = \delta_{ij} - \hat{k}_i \hat{k}_j$$



Trascuriamo l'elicità del campo

MODI MAGNETICI

- Il campo magnetico è sorgente di due tipi di perturbazioni :

1. Modi passivi

- Generati prima del disaccoppiamento dei neutrini dal fluido cosmologico
- Crescono logaritmicamente
 $\propto \Pi_B \log \eta_\nu / \eta_B$

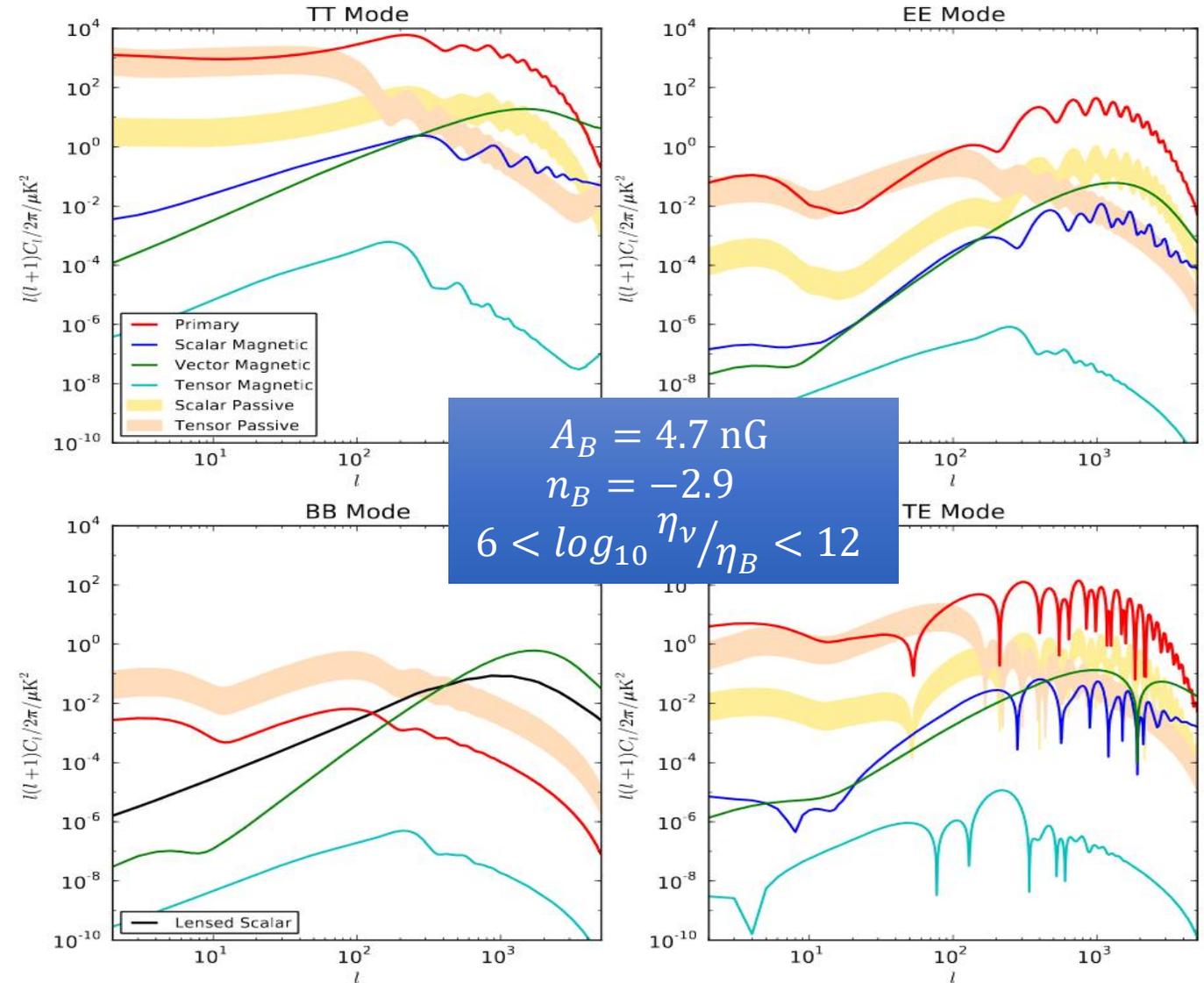
2. Modi compensanti

- Generati quando i neutrini compensano lo stress anisotropico del campo magnetico a $\eta > \eta_\nu$
- Modi a curvatura costante
 $\propto \Pi_B$

$\Pi_B \rightarrow$ stress anisotropo magnetico

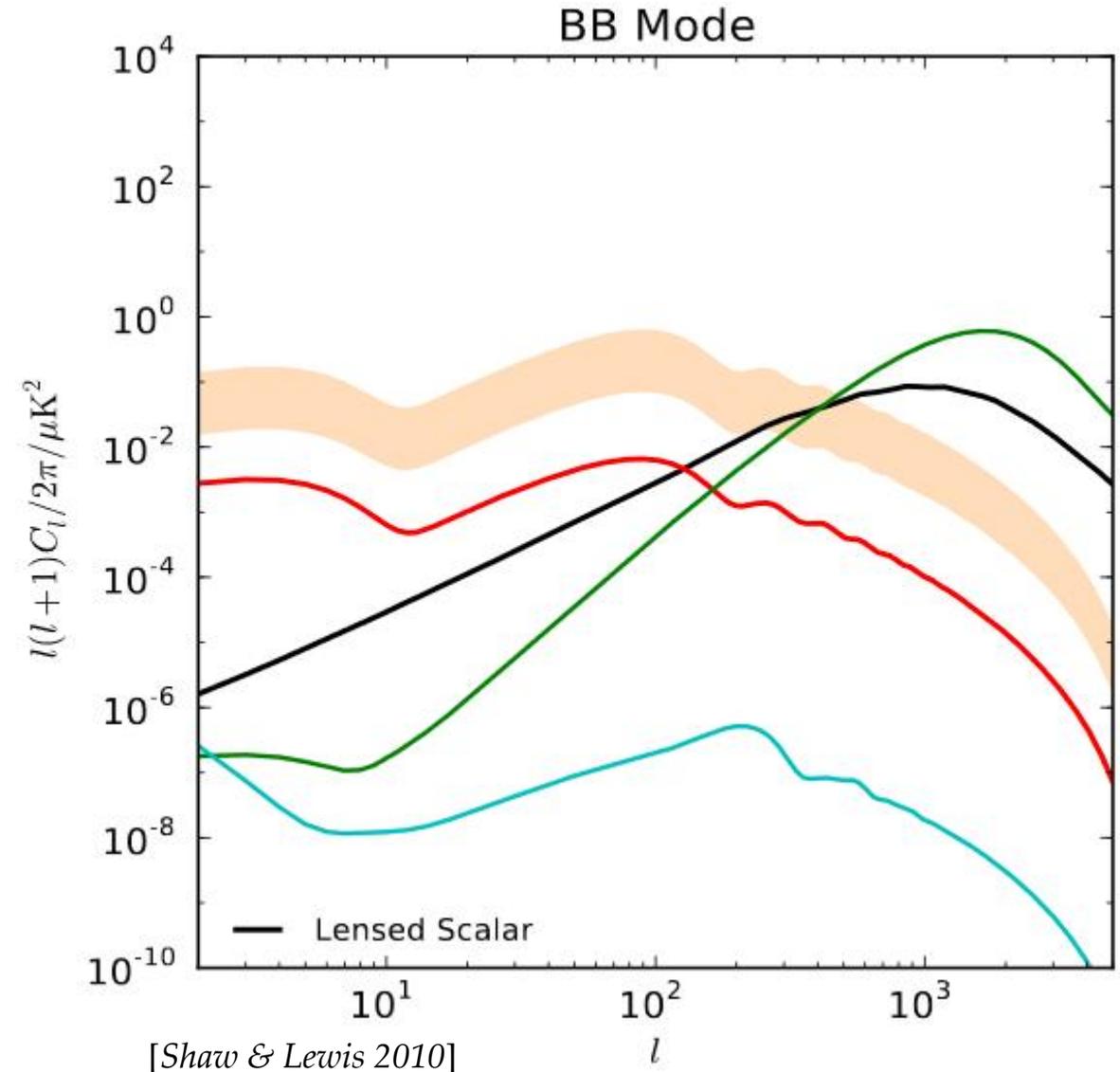
$\eta_B \rightarrow$ epoca di generazione del campo

$\eta_\nu \rightarrow$ epoca disaccoppiamento neutrini



MODI MAGNETICI

- Anche per ampiezze significative (~ 5 nG) sono importanti solo a grande scala in TT, TE ed EE
- I modi tensoriali passivi generano uno spettro BB equivalente ai modi tensoriali inflazionari.
 - Degenerazione tra campi magnetici e onde gravitazionali
- I modi vettoriali magnetici generano perturbazioni a piccola scala.
 - Questa caratteristica può essere usata per distinguere i due spettri.

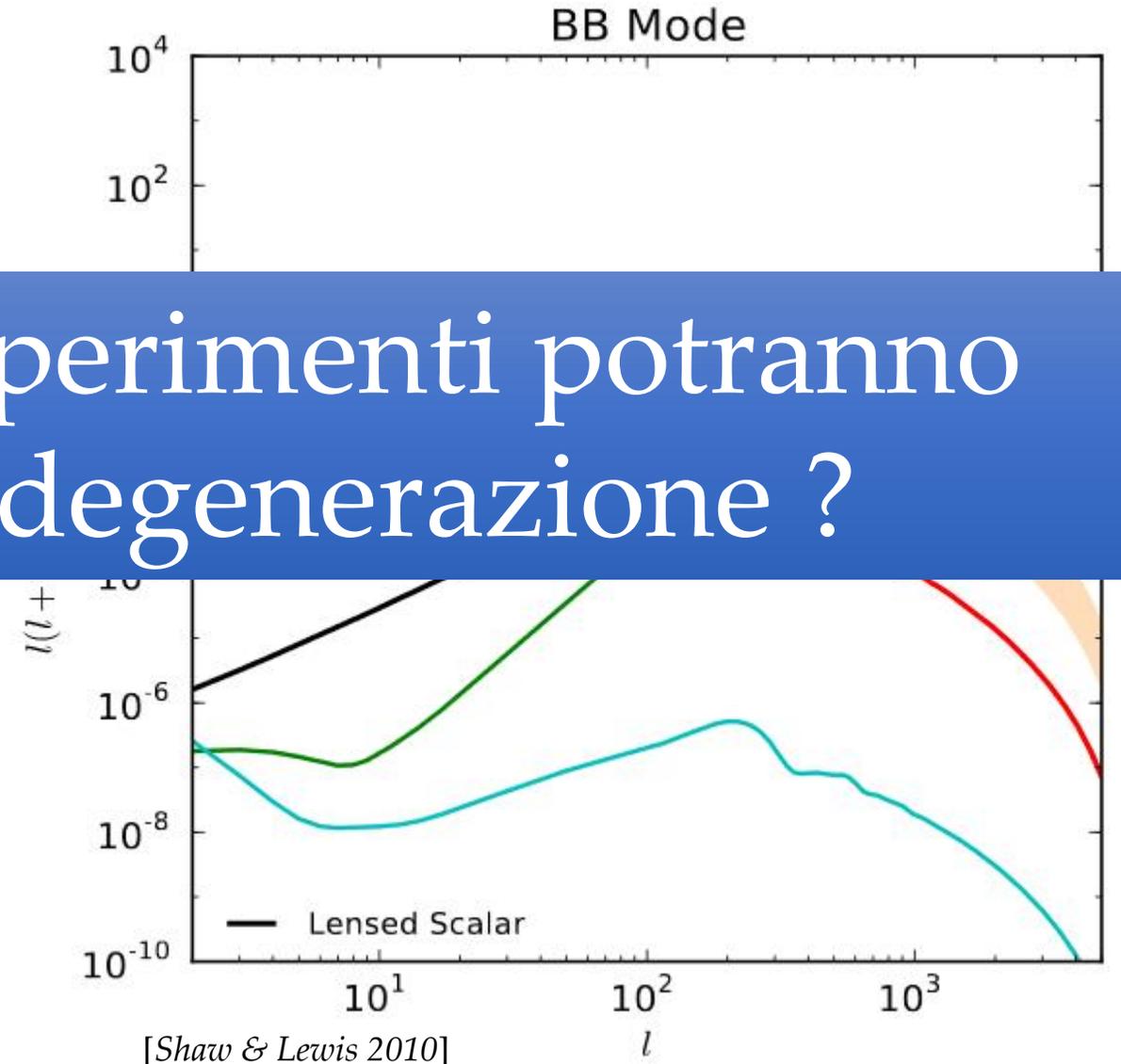


MODI MAGNETICI

- Anche per ampiezze significative (~ 5 nG) sono importanti solo a grande scala in TT, TE ed EE

Quali tra i futuri esperimenti potranno rompere questa degenerazione ?

- I modi vettoriali magnetici generano perturbazioni a piccola scala.
 - Questa caratteristica può essere usata per distinguere i due spettri.



METODO : ANALISI MCMC

- Spettro di potenza angolare + rumore generati nella forma:

$$C_{fid} = C_{\ell|fid} + N_{\ell}$$

$$N_{\ell} = w^{-1} \exp(\ell(\ell + 1)\theta^2/8\ln(2))$$

$$w \equiv [\mu K - rad] \rightarrow \text{power noise}$$

$$\theta \equiv [rad] \rightarrow \text{beam sperimentale}$$

- Assumiamo che non ci siano correlazioni tra i modi adiabatici primari e i modi magnetici

$$C_{\ell|fid} = C_{\ell}^{primari} + C_{\ell}^{passivi} + C_{\ell}^{compensati}$$

Esperimento	Beam [arcmin]	Power noise [$\mu K - arcmin$]	ℓ_{max}	ℓ_{min}	f_{sky}
PIXIE	96	3.0	500	2	0.7
LiteBIRD	30	3.2	3000	2	0.7
CORE-M5	3.7	2.0	3000	2	0.7
S3 (Deep)	1	4	3000	50	0.06
S3 (Wide)	1.4	8	3000	50	0.4
CMB-S4	3	1	3000	5	0.4

 Gli esperimenti in questione sono un'illustrazione di quanto si potrà ottenere in futuro

METODO : ANALISI MCMC

- Utilizziamo un modello fiduciale compatibile con i risultati più recenti rilasciati dalla collaborazione Planck [Planck 2015 Results XIII & XIX]
- Parametri magnetici compatibili con un modello Starobinsky :
 $r = 0.0042$
- I C_ℓ teorici sono confrontati con quelli fiduciali valutando la likelihood:

$$-2 \ln \mathcal{L} = \sum_\ell (\ell + 1) f_{sky} \left(\frac{D}{|C_{fid}|} + \ln \frac{|C_{fid}|}{|C_{theo}|} - 3 \right)$$

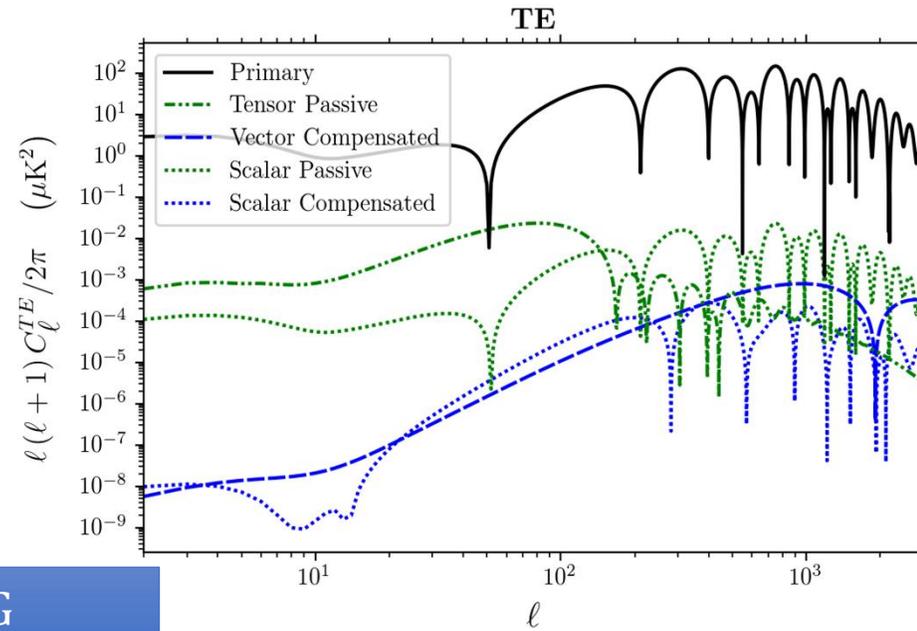
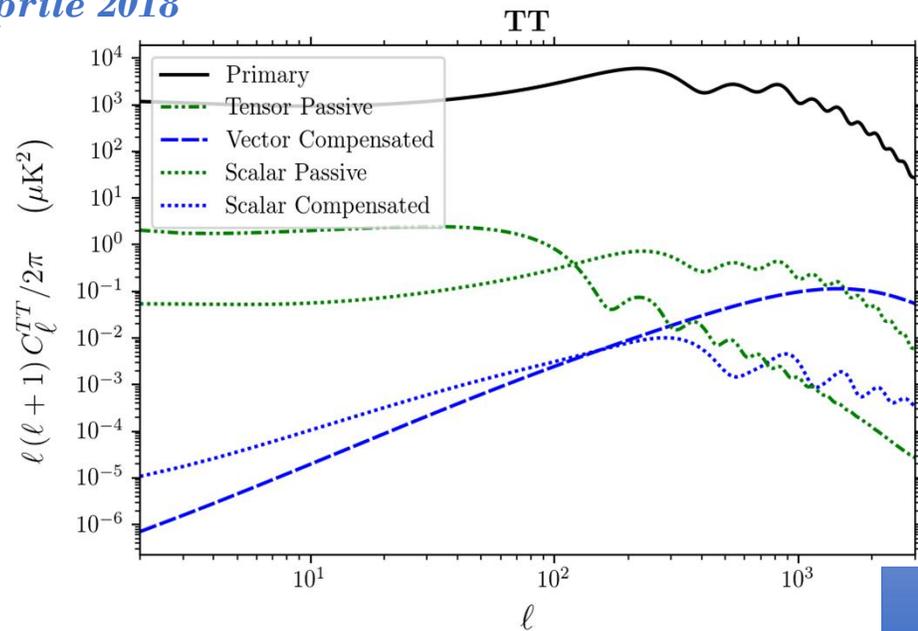
$$|C_{fid,theo}| = C_\ell^{TT} C_\ell^{EE} C_\ell^{BB} - (C_\ell^{TE})^2 C_\ell^{BB}$$

$$D = C_{theo}^{TT} C_{fid}^{EE} C_{fid}^{BB} + C_{fid}^{TT} C_{theo}^{EE} C_{fid}^{BB} + C_{fid}^{TE} C_{theo}^{EE} C_{fid}^{BB} - C_{fid}^{TE} (C_{fid}^{TE} C_{theo}^{BB} + 2C_{theo}^{TE} C_{fid}^{BB})$$

- Implementato utilizzando il codice COSMOMC + MagCAMB

<https://alexzucca90.github.io/MagCAMB> <http://cosmologist.info>

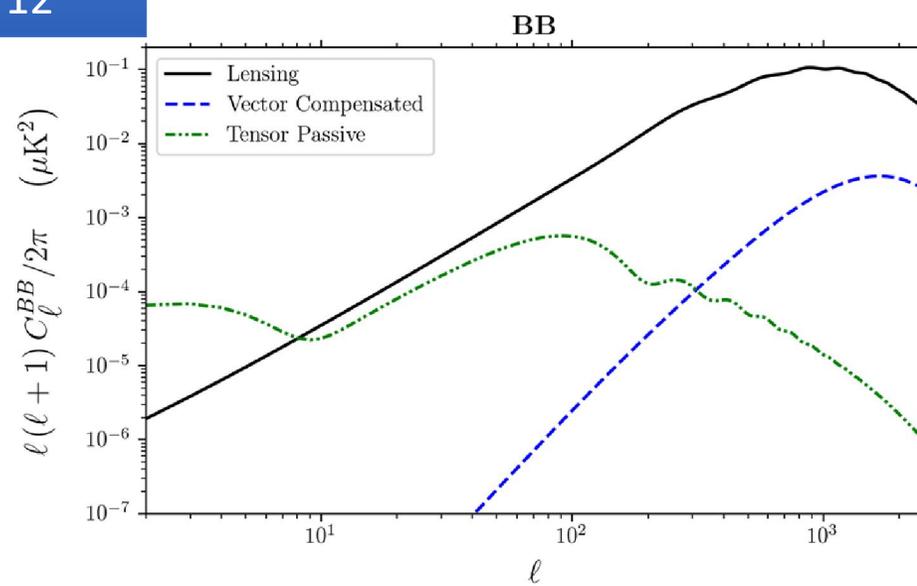
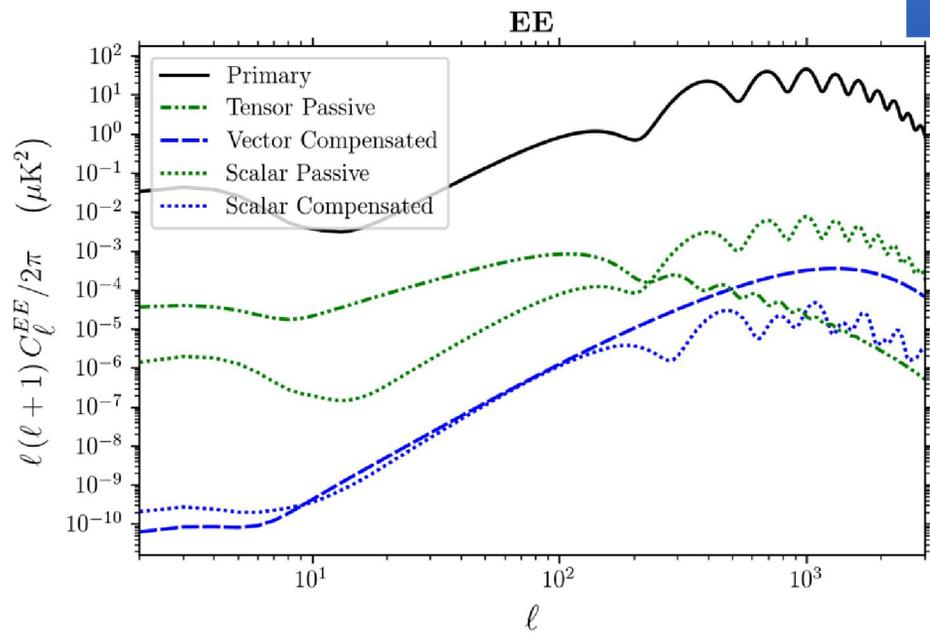
Modello Fiduciale	
$\Omega_b h^2$	0.02225
$\Omega_c h^2$	0.1198
τ	0.055
n_s	0.9645
$100\theta_{MC}$	1.04077
$\ln(10^{10} A_s)$	3.094
A_B (nG)	1.08
$\log_{10}(\eta_\nu/\eta_B)$	12
n_B	-2.9

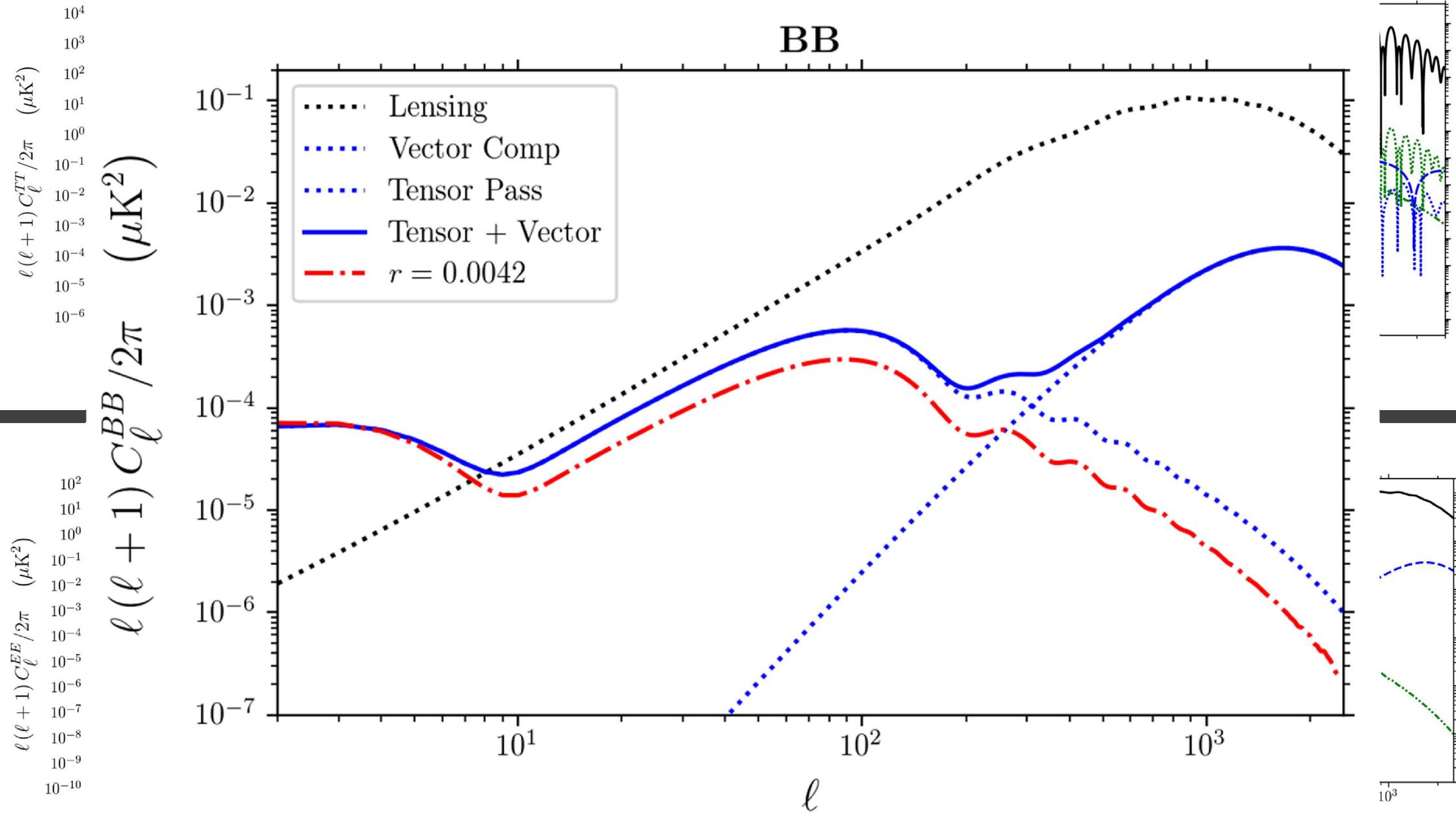


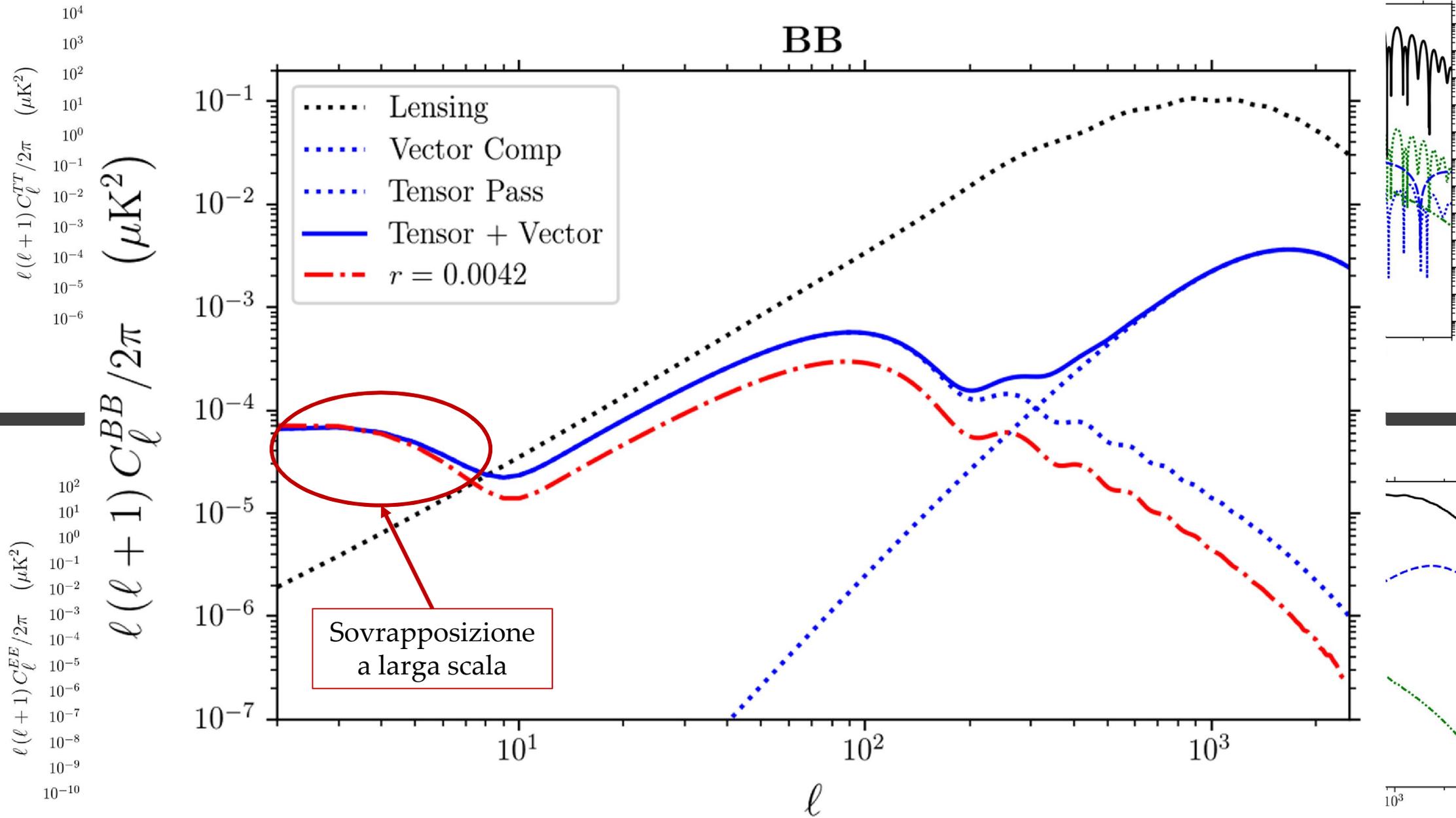
$$A_B = 1.08 \text{ nG}$$

$$n_B = -2.9$$

$$\log_{10}(\eta_\nu/\eta_B) = 12$$







ANALISI : VINCOLARE IL FIDUCIALE

- Abbiamo verificato la possibilità dei futuri esperimenti di vincolare correttamente i parametri magnetici del nostro fiduciale
 - PIXIE e LiteBIRD $\longrightarrow \sigma(A_B) \sim 0.06 - 0.03 \text{ nG}$
 - CORE-M5 e CMB-S4 $\longrightarrow \sigma(A_B) \sim 0.02 \text{ nG}$
 - S3 wide + deep \longrightarrow ottengono vincoli molto peggiori \longrightarrow minore precisione nel descrivere i modi B
- Lasciare libero $\log_{10}(\eta_\nu/\eta_B)$ indebolisce i vincoli di tutti gli esperimenti

	PIXIE	LiteBIRD	CORE-M5	S3 (Deep)	S3 (Wide)	CMB-S4
$\log_{10}(\eta_\nu/\eta_B) = 12$						
$A_B \text{ (nG)}$	1.074 ± 0.055	$1.078^{+0.034}_{-0.028}$	1.080 ± 0.019	$0.86^{+0.41}_{-0.13}$	$0.902^{+0.35}_{-0.098}$	1.079 ± 0.020
$\log_{10}(\eta_\nu/\eta_B) \text{ free}$						
$A_B \text{ (nG)}$	$1.16^{+0.15}_{-0.24}$	$1.15^{+0.12}_{-0.24}$	$1.066^{+0.064}_{-0.049}$	$0.89^{+0.41}_{-0.17}$	$0.89^{+0.45}_{-0.18}$	1.074 ± 0.032
$\log_{10}(\eta_\nu/\eta_B)$	/	/	$12.39^{+0.98}_{-1.7}$	/	$11.4^{+2.9}_{-4.0}$	$12.16^{+0.81}_{-0.97}$

ANALISI : VINCOLARE “ r ”

- Assumiamo un campo di ampiezza nulla e lasciamo r libero di variare
 - ⇒ quantificare quanto l’assunzione dell’assenza di un campo magnetico primordiale ($A_B = 0$) possa influenzare la determinazione del parametro r
- Tutti gli esperimenti considerati producono una forte evidenza di onde gravitazionali inflazionarie
 - i. il fiduciale utilizzato assumeva $r = 0$
- Un falso positivo è ottenuto come risultato dell’assunzione errata che non ci sia un campo magnetico

	PIXIE	LiteBIRD	CORE-M5	S3 (Deep)	S3 (Wide)	CMB-S4
$A_B = 0$						
r	$0.0065^{+0.0013}_{-0.0015}$	0.00733 ± 0.00088	0.00725 ± 0.00056	$0.0084^{+0.0039}_{-0.0052}$	$0.0084^{+0.0038}_{-0.0046}$	0.00717 ± 0.00072

ANALISI : VINCOLARE “ r ”

- Assumiamo una cosmologia con onde gravitazionali inflazionarie e campi magnetici

⇒ Comprendere quali esperimenti futuri possano discriminare fra A_B e r

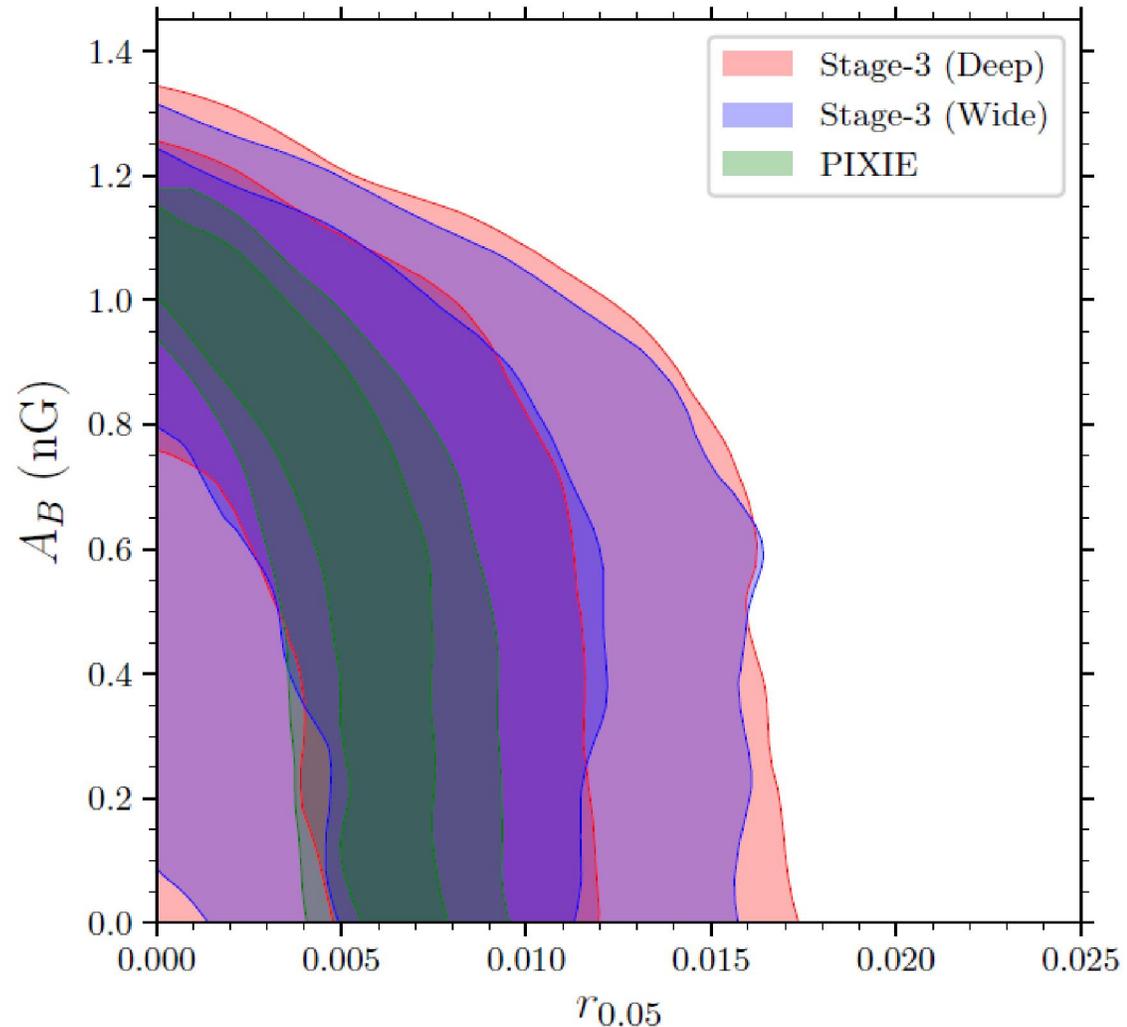
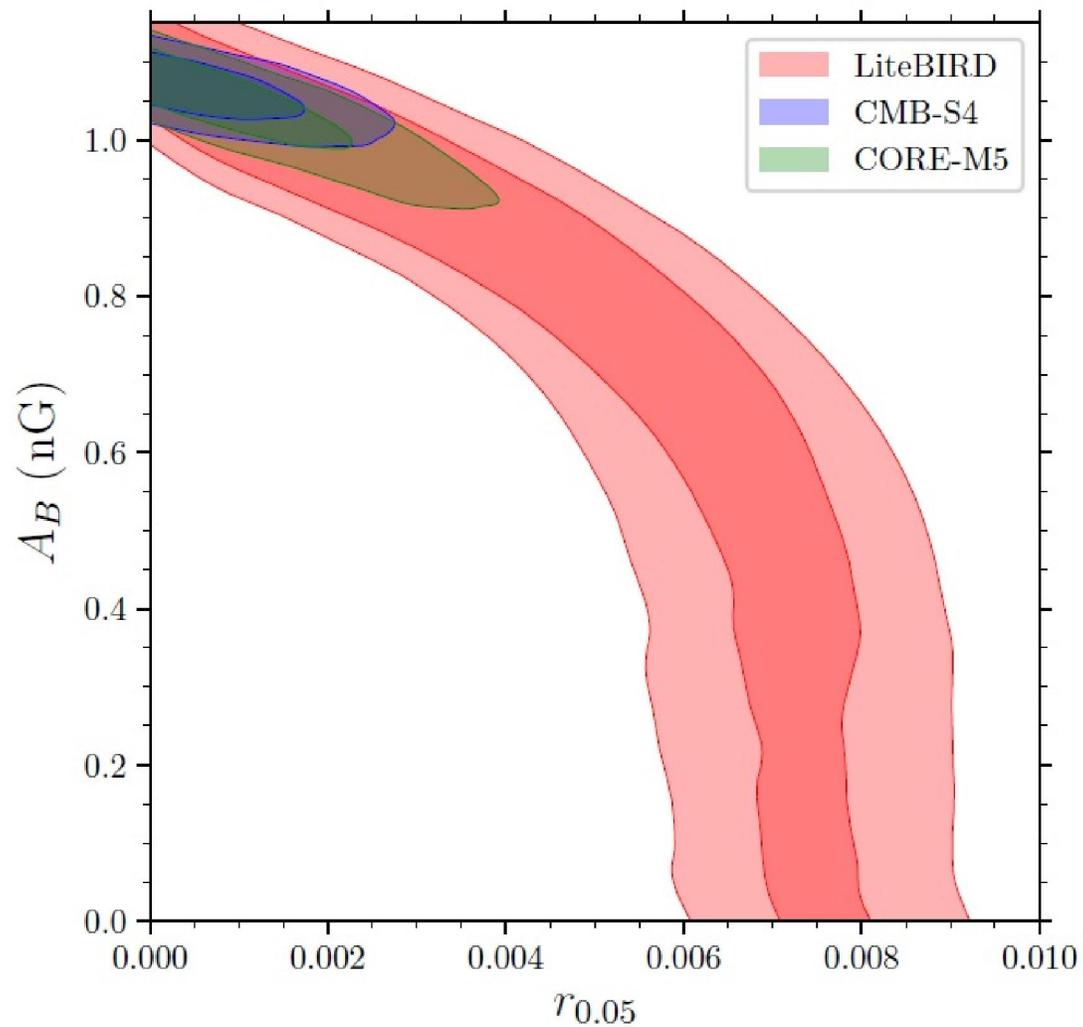
- i. Includere A_B indebolisce il “falso” vincolo su r

⇒ PIXIE, LiteBIRD, S3 → nessuna evidenza significativa per A_B e r *i.e.* sono degeneri

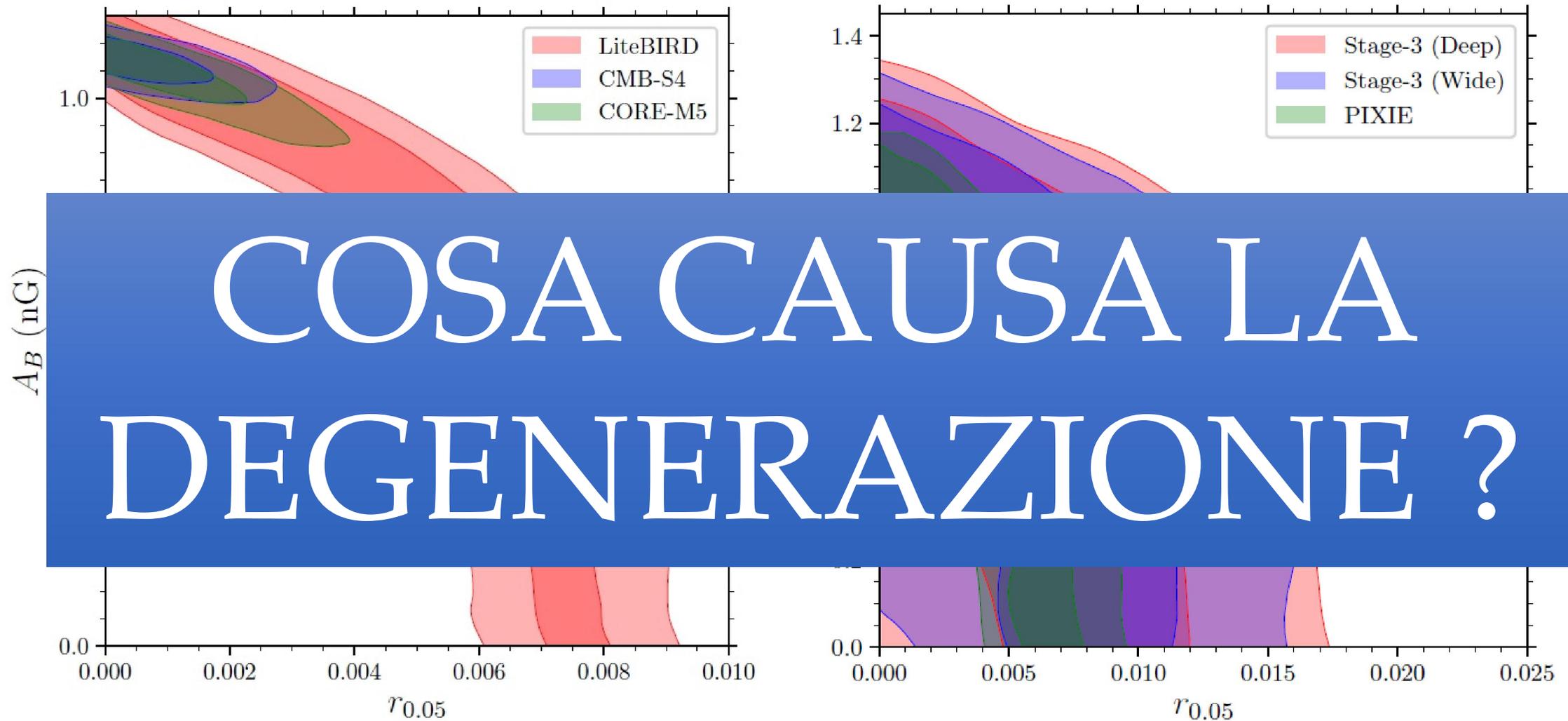
⇒ CORE-M5 e CMB-S4 → distinguono chiaramente A_B da r

- ii. Includere $\log_{10}(\eta_\nu/\eta_B)$ modifica significativamente i risultati per CORE / S4

	PIXIE	LiteBIRD	CORE-M5	S3 (Deep)	S3 (Wide)	CMB-S4
r	$0.0050^{+0.0028}_{-0.0019}$	$0.0050^{+0.0034}_{-0.0041}$	< 0.00149	$0.0070^{+0.0027}_{-0.0061}$	$0.0071^{+0.0032}_{-0.0057}$	< 0.00112
A_B (nG)	$0.59^{+0.45}_{-0.27}$	$0.66^{+0.45}_{-0.22}$	$1.034^{+0.052}_{-0.027}$	0.60 ± 0.34	$0.59^{+0.40}_{-0.36}$	$1.058^{+0.030}_{-0.024}$
r	$0.0049^{+0.0027}_{-0.0019}$	$0.0029^{+0.0014}_{-0.0024}$	$0.0029^{+0.0014}_{-0.0024}$	$0.0074^{+0.0032}_{-0.0060}$	$0.0071^{+0.0034}_{-0.0052}$	0.0031 ± 0.0017
A_B (nG)	< 0.847	$0.70^{+0.44}_{-0.36}$	$1.057^{+0.065}_{-0.049}$	$0.89^{+0.41}_{-0.17}$	$0.89^{+0.45}_{-0.18}$	1.074 ± 0.032
$\log_{10}(\eta_\nu/\eta_B)$	/	/	$9.7^{+1.9}_{-2.5}$	/	< 12.7	9.3 ± 1.8



	PIXIE	LiteBIRD	CORE-M5	S3 (Deep)	S3 (Wide)	CMB-S4
r	$0.0050^{+0.0028}_{-0.0019}$	$0.0050^{+0.0034}_{-0.0041}$	< 0.00149	$0.0070^{+0.0027}_{-0.0061}$	$0.0071^{+0.0032}_{-0.0057}$	< 0.00112
A_B (nG)	$0.59^{+0.45}_{-0.27}$	$0.66^{+0.45}_{-0.22}$	$1.034^{+0.052}_{-0.027}$	0.60 ± 0.34	$0.59^{+0.40}_{-0.36}$	$1.058^{+0.030}_{-0.024}$



	PIXIE	LiteBIRD	CORE-M5	S3 (Deep)	S3 (Wide)	CMB-S4
r	$0.0050^{+0.0028}_{-0.0019}$	$0.0050^{+0.0034}_{-0.0041}$	< 0.00149	$0.0070^{+0.0027}_{-0.0061}$	$0.0071^{+0.0032}_{-0.0057}$	< 0.00112
A_B (nG)	$0.59^{+0.45}_{-0.27}$	$0.66^{+0.45}_{-0.22}$	$1.034^{+0.052}_{-0.027}$	0.60 ± 0.34	$0.59^{+0.40}_{-0.36}$	$1.058^{+0.030}_{-0.024}$

L'IMPORTANZA DI MISURARE LE PICCOLE SCALE

- Consideriamo 2 modelli :

stesso χ_{min}^2 ma differenti valori di A_B e r

$$(1) : A_B = 1.064 \text{ nG} \quad r = 1.76 \times 10^{-5}$$

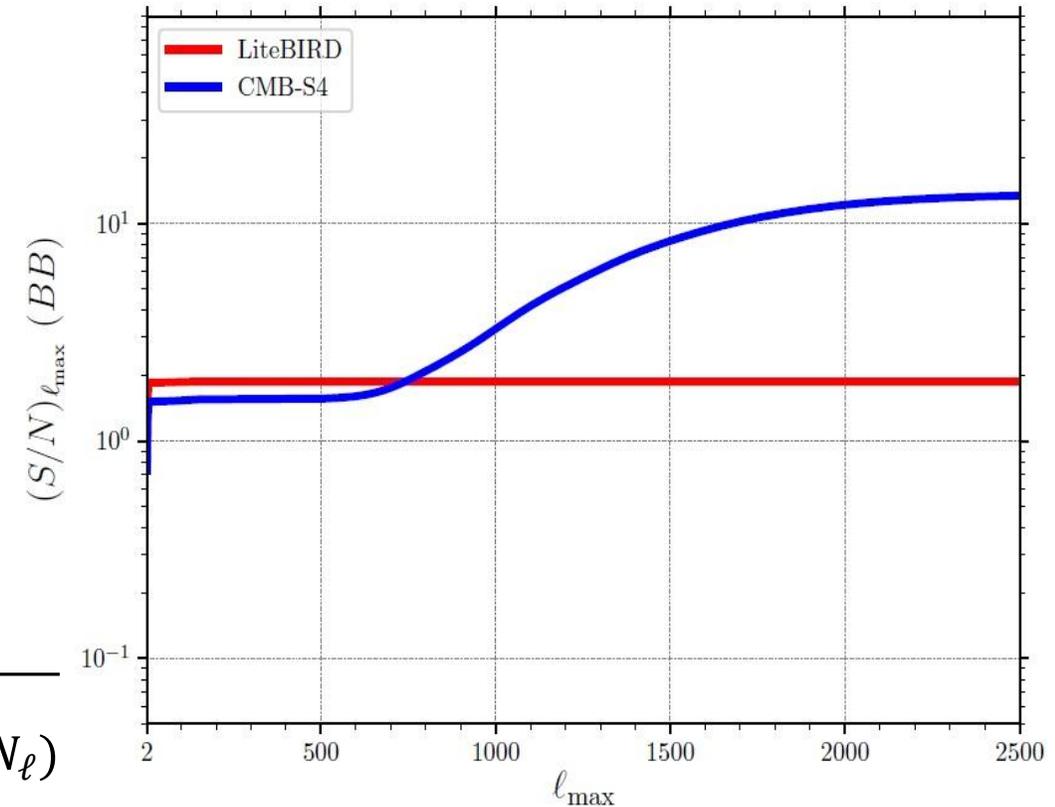
$$(2) : A_B = 7.57 \times 10^{-3} \text{ nG} \quad r = 7.22 \times 10^{-3}$$

➔ Quanto bene posso essere distinti da un dato esperimento?

- Costruiamo un rapporto segnale rumore cumulativo assumendo che non ci sia correlazione tra i multipoli

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\ell_{max}}^2 = \sum_{\ell=2}^{\ell_{max}} \frac{(C_{\ell}^{(2)} - C_{\ell}^{(1)})^2}{\sigma_{\ell}^2} ; \quad \sigma_{\ell} = \sqrt{\frac{2}{(2\ell + 1)f_{sky}} (C_{\ell}^{(1)} + N_{\ell})}$$

➔ Lo applichiamo ai soli modi B di polarizzazione per S4 e LBIRD



L'IMPORTANZA DI MISURARE LE PICCOLE SCALE

- L'importanza di misurare le piccole scale può essere dimostrata studiando come una variazione di ℓ_{max} influisce sulla determinazione dei parametri magnetici

➔ Utilizziamo S4 come esempio

- Costruiamo una likelihood esatta per i modi B

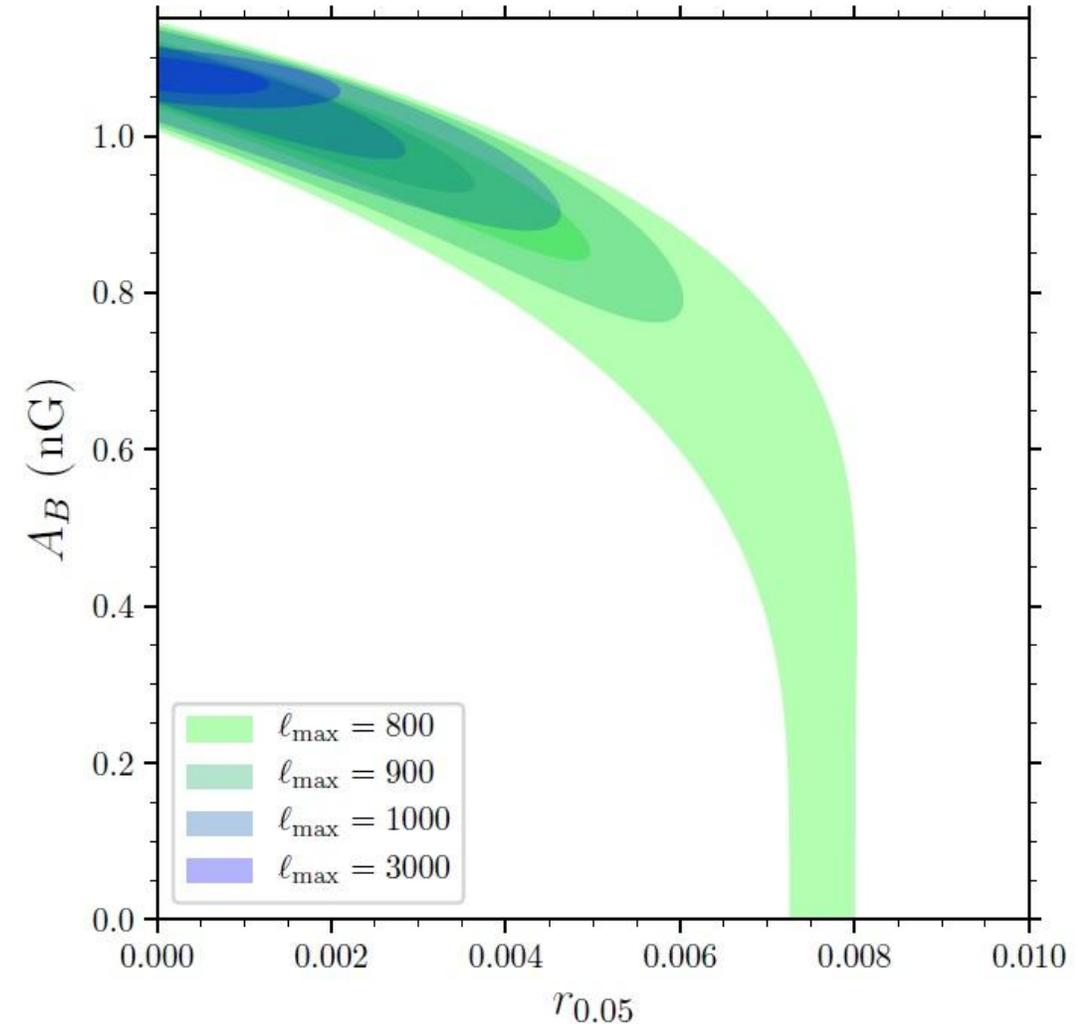
$$-2 \ln \mathcal{L} = \sum_{\ell} (\ell + 1) f_{sky} \left(\frac{\hat{C}_{\ell}}{\bar{C}_{\ell}} + \ln \frac{\bar{C}_{\ell}}{\hat{C}_{\ell}} - 1 \right)$$

$$\hat{C}_{\ell} = C_{\ell|fid}^{t+PMF} + N_{\ell} \quad \bar{C}_{\ell} = C_{\ell}^{t+PMF} + N_{\ell}$$

➔ La degenerazione può essere risolta misurando a

$$\ell_{max} \gtrsim 900$$

- Se $\ell_{max} < 900$ i vincoli su A_B e r sarebbero simili a quelli di LiteBIRD



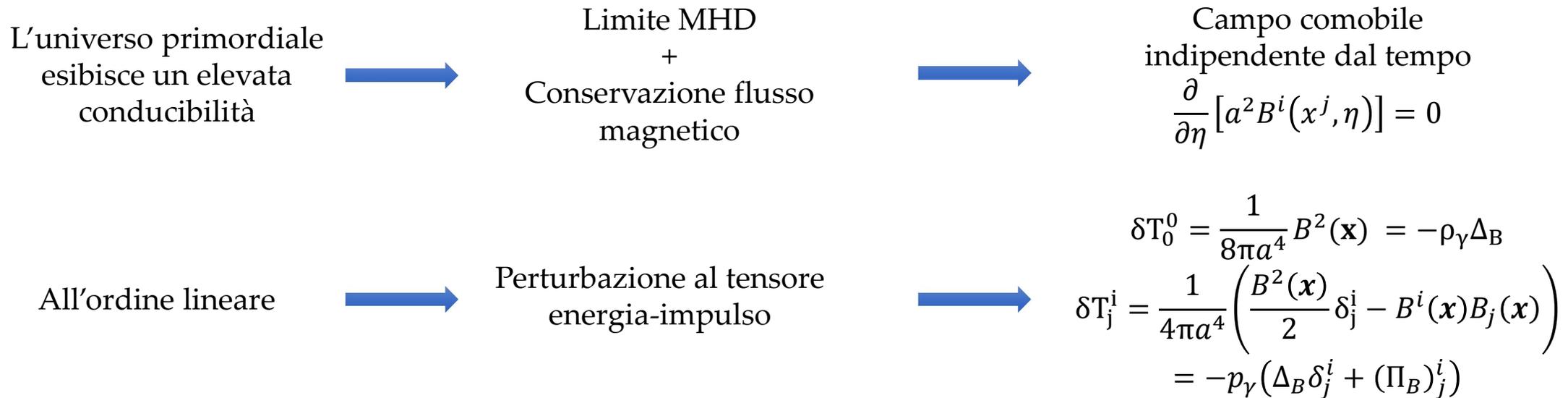
CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

- Abbiamo investigato la degenerazione tra onde gravitazionali inflazionarie e campi magnetici basate esclusivamente sulle informazioni derivabili dallo spettro di potenza angolare del fondo cosmico a microonde
- La degenerazione r vs A_B può essere risolta misurando efficientemente le piccole scale
- Alcuni degli esperimenti futuri non saranno di vincolare contemporaneamente entrambi i parametri
- Esistono altri modi di vincolare un campo magnetico primordiale :
 - i. Rotazione Faraday della CMB
 - ii. Storia di ionizzazione dell'Universo (distorsioni Compton-y)
 - iii. Non-Gaussianità magnetiche (bi-spettro e tri-spettro)

BACKUP SLIDES

CAMPI MAGNETICI PRIMORDIALI

- Assumiamo un campo magnetico stocastico $B^i(x^j, \eta)$, generato prima dell'epoca di disaccoppiamento dei neutrini $\eta_B < \eta_\nu$



- Δ_B : contributo magnetico al contrasto di densità ➔ I modi scalari associati sono di ampiezza trascurabile

- $(\Pi_B)_j^i$: stress anisotropo magnetico a traccia nulla ➔ $(\Pi_B)_{ij} = \Pi_B Q_{ij}^{(S)} + \Pi_B^{(V)} Q_{ij}^{(V)} + \Pi_B^{(T)} Q_{ij}^{(T)}$

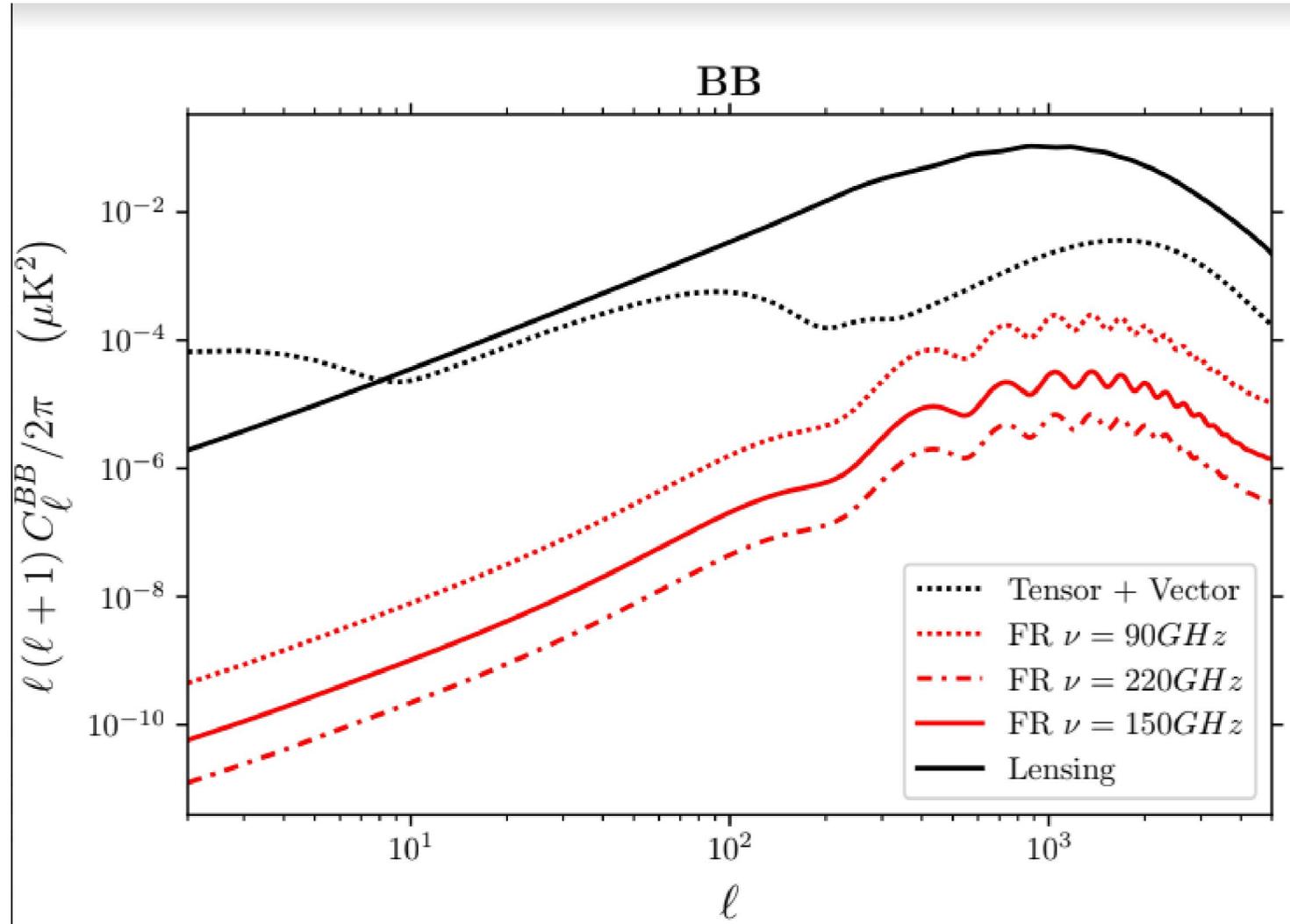
$Q_{ij}^{(S,V,T)}$: Set completo di autofunzioni del laplaciano

ROTAZIONE FARADAY

$$C_\ell^{BB} = \frac{2}{\pi} \int \frac{dk}{k} \Delta_M^2(k) W_\ell(k)$$

$$\Delta_M^2 \propto \left(\frac{90 \text{ GHz}}{\nu_0} \right)^4$$

$W_\ell(k) \Rightarrow$ *funzione finestra*

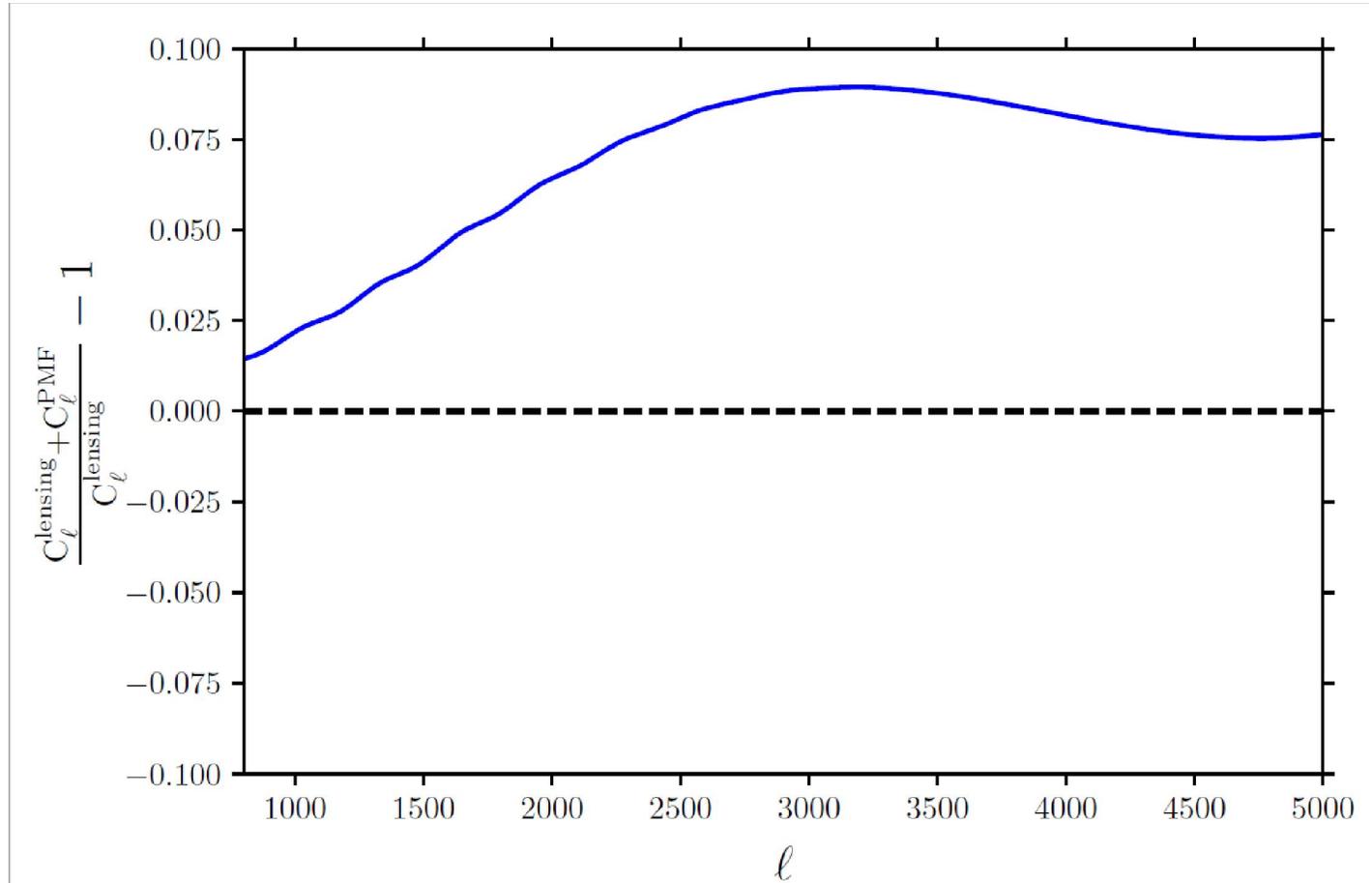


MODI B LARGA SCALA

- C'è un eccesso ad alti ℓ del 10% rispetto al lensing, generato dai modi vettoriali compensati
- Il lensing può essere vincolato efficientemente utilizzando TT, TE ed EE

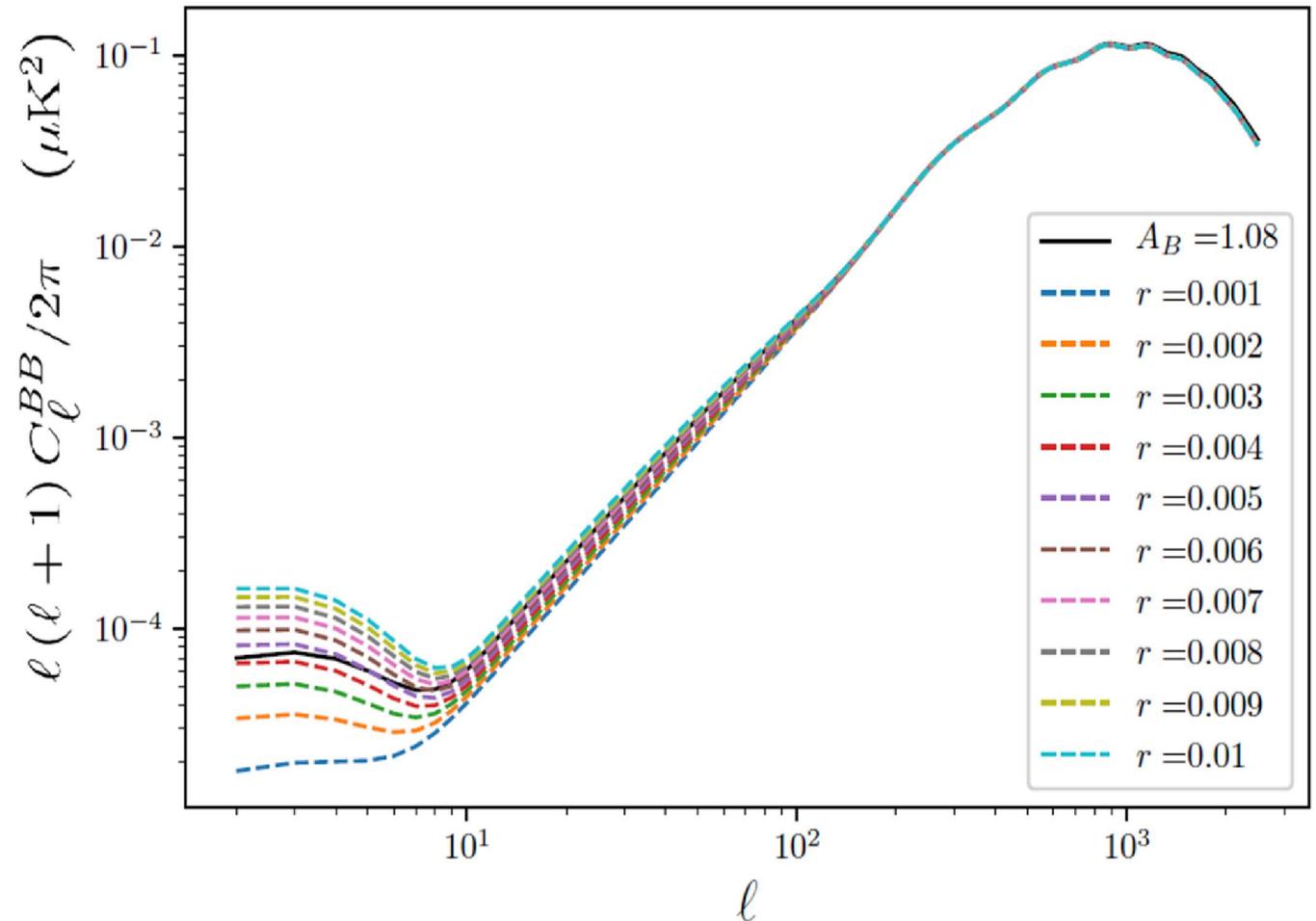
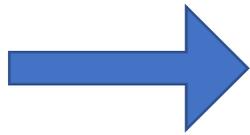


- Misurando i modi B a piccola scala è possibile vincolare l'ampiezza del campo magnetico



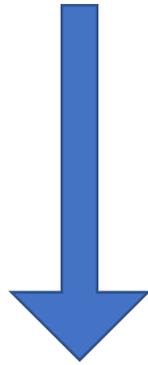
DEGENERAZIONE: r vs A_B

- Si sarebbe potuta scegliere una sovrapposizione diversa tra i modi inflazionari e quelli magnetici



DEGENERAZIONE: r vs β

- β è legato all'ampiezza dei modi tensoriali magnetici



- Degenerazione nel piano r vs $\log \frac{\eta_V}{\eta_B}$

