

CMB-S4

Riunione Preventivi-INFN 2026, 9 Luglio 2025
Nicola Bartolo



Overview

1. CMB-S4: target scientifici e rilevanza
astroparticellare
2. CMB-S4 e contesto internazionale
3. Opportunità e interesse della comunità italiana

Finestra unica sulla fisica fondamentale

Come si forma la materia “ordinaria”?

Esistono particelle ancora sconosciute?
Come si sono formati i semi dell'Universo attuale?
Esistono le onde gravitazionali primordiali?
Cosa possiamo dire della natura quantistica della gravità?

Che cos'è l'energia oscura?

Einstein aveva ragione sulla gravità?

Che cos'è la materia oscura?

Universo “neonato”

Universo oggi

14 miliardi di anni

soglia di energia di LHC

secondi: 10^{-32}

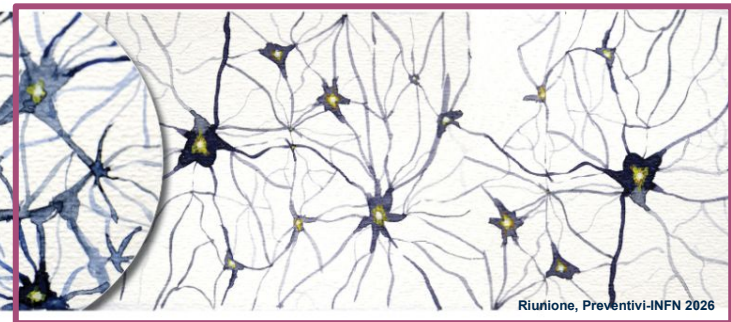
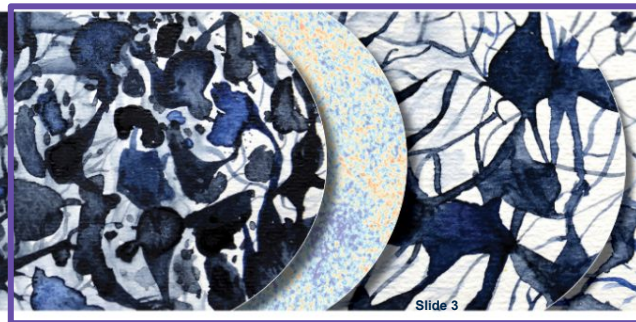
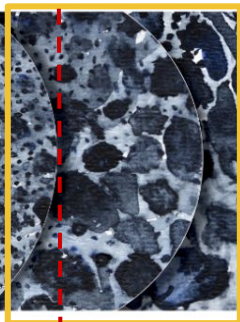
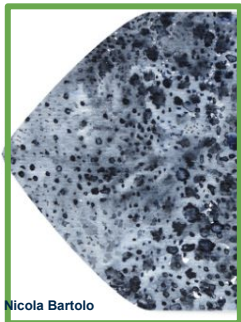
secondi: 1

secondi: 100

anni: 380000

anni: 500 milioni

anni: miliardi



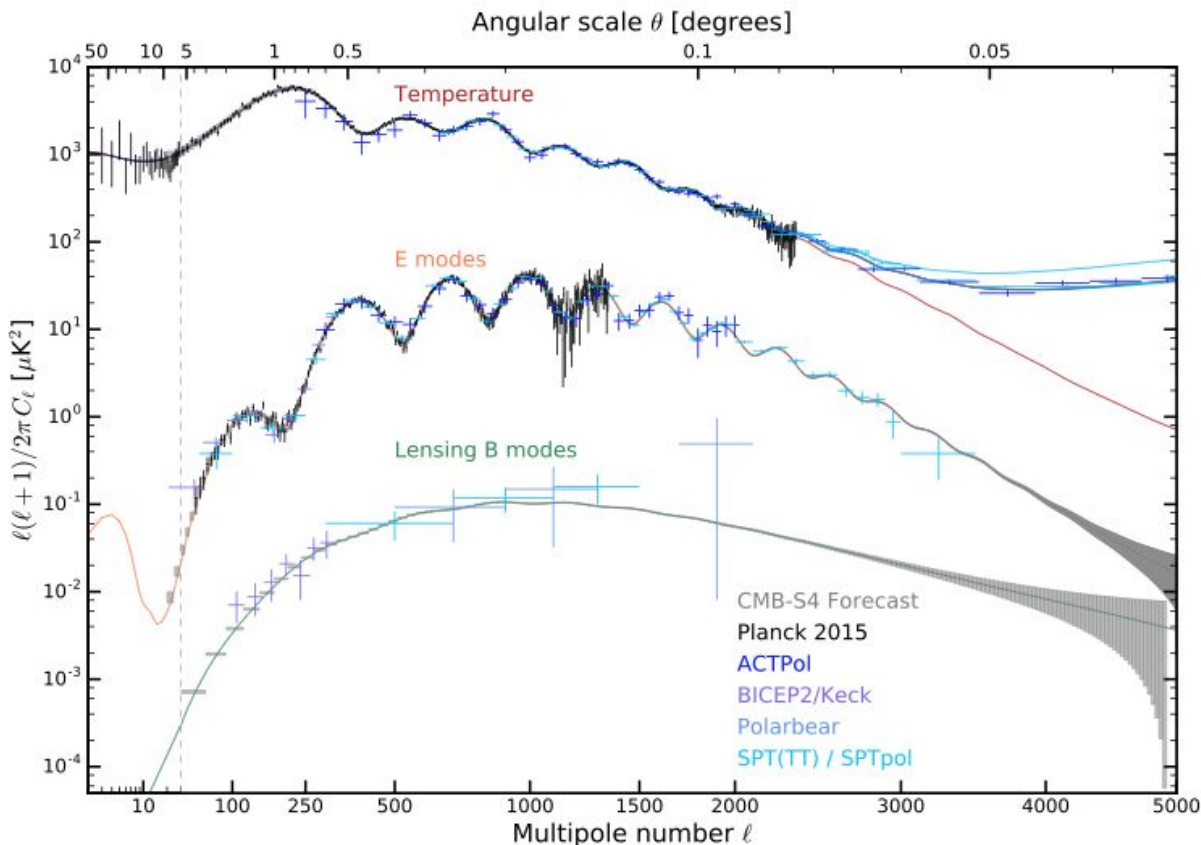
Science Goals di CMB-S4

- Goal 1: Test models of inflation by measuring or putting upper limits on r , the ratio of tensor fluctuations to scalar fluctuations. -> Fisica dell'Universo primordiale
- Goal 2: Determine the role of light relic particles in fundamental physics, and in the structure and evolution of the Universe. -> Fisica delle interazioni fondamentali
- Goal 3: Measure the emergence of galaxy clusters as we know them today. -> Dark matter, dark energy, test di GR a grande scala
- Goal 4: Explore the millimeter-wave transient sky, e.g. to constrain GRB mechanisms
-> Astrofisica Multimessenger

CMB-S4 è considerato a tutti gli effetti
un esperimento di fisica particellare e fondamentale
cfr [H. Murayama@CERN](#) (chair di P5)

CMB-S4: A precision CMB Powerhouse

CMB-S4 is designed to make transformative measurements of the CMB temperature and polarization in order to cross critical thresholds in key cosmological parameters



Primordial Gravitational Waves and Inflation

Inflationary B-modes are a Big Deal!

- A key test of inflation and our origins.

$$\text{time} = 10^{-36} \left(\frac{r}{0.01} \right)^{-\frac{1}{2}} \text{ seconds}$$

- A relic from 10^{36} times earlier than the light elements created at $t = 1$ second.

$$\text{energy} = 10^{16} \left(\frac{r}{0.01} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ GeV}$$

- Probing physics at the scale of superstring theory, a trillion times beyond the reach of the LHC.
- Insights into quantum gravity.

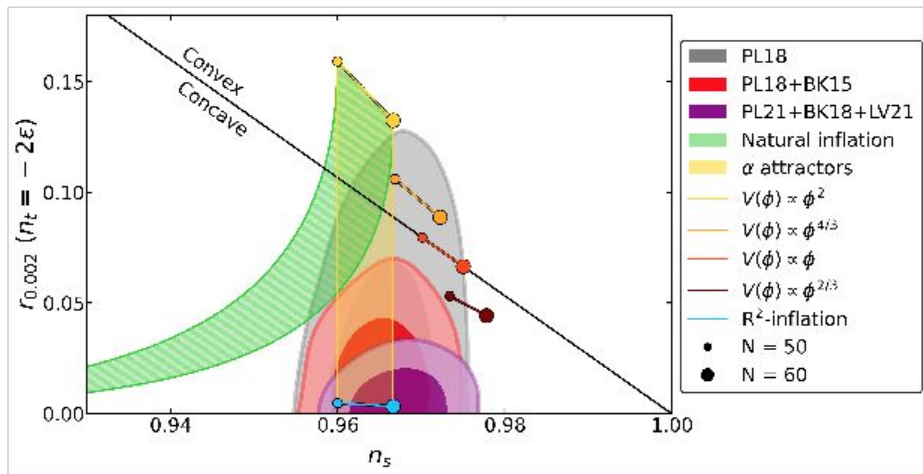
From 2014 P5 Report:

“(CMB) experiments now have the capability to access the ultra-high energy physics of inflation and important neutrino properties. These measurements are of central significance to particle physics.”

From 2020 A&A Decadal Survey:

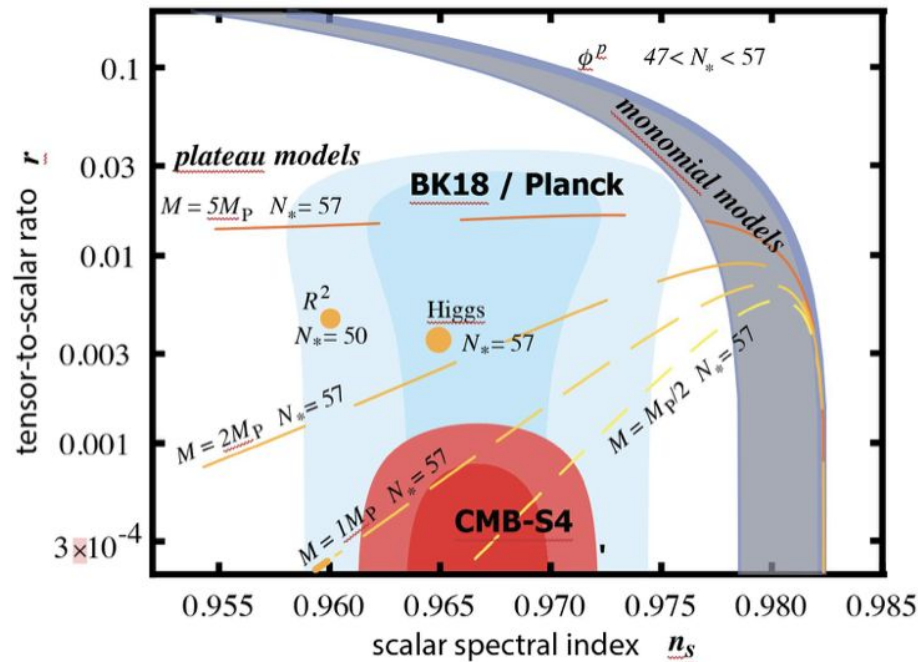
“One of the most exciting opportunities in the coming decade is that CMB measurements may reveal remnant gravitational waves from this early epoch.”

Current constraints and what we can learn with CMB-S4



Galloni, Bartolo, Matarrese, Migliaccio, Ricciardone, Vittorio '23)

$$r_{0.01} < 0.028 \quad @95\%CL$$

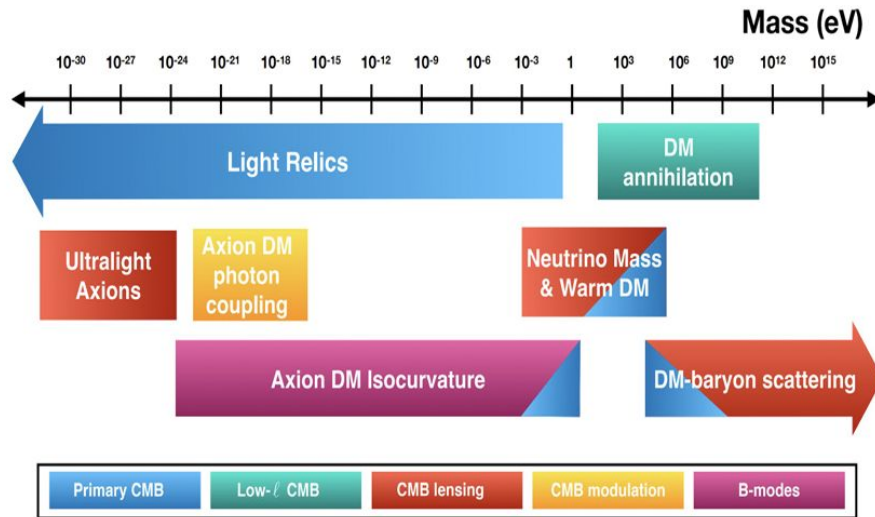


CMB-S4 Science Req. 1.0:

- if $r > 0.003$: measure at equivalent 5σ
- if $r = 0$ set $r \leq 0.001$ at 95% CL

Light Thermal Relics and the Dark Universe

CMB Insights Into The Dark Universe Across The Mass Spectrum



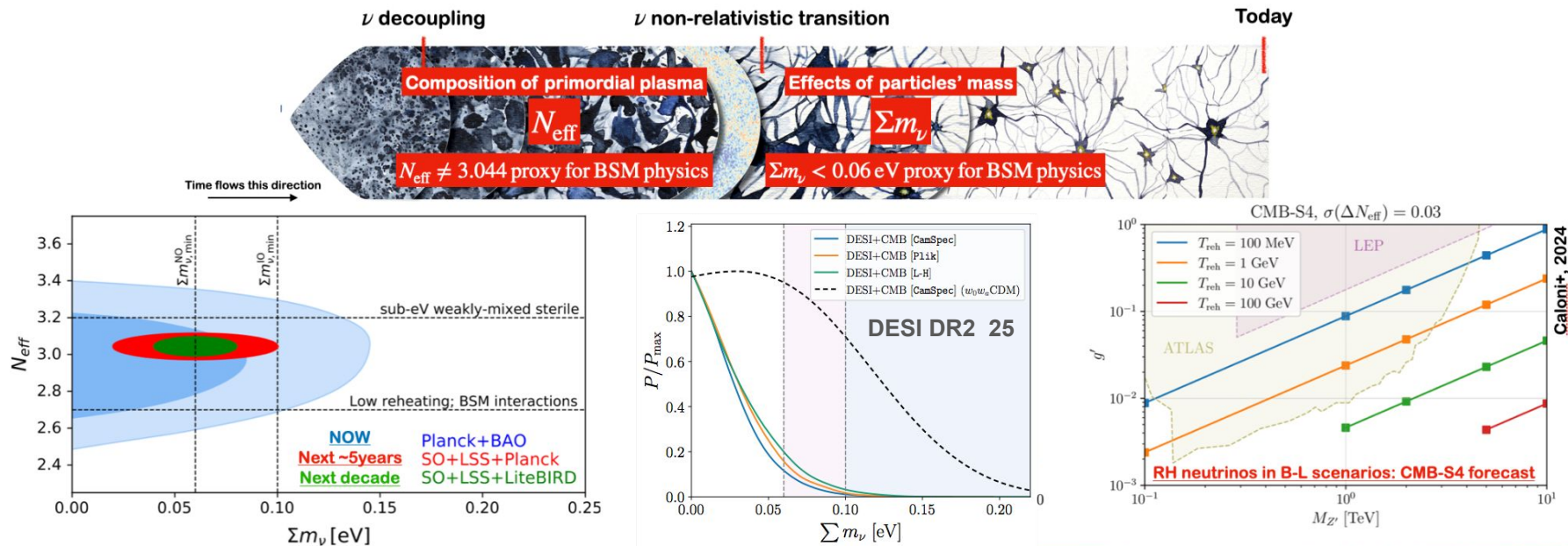
CMB-S4 will probe **dark sector physics** across an enormous range in mass

CMB-S4 will **detect all light relics that decoupled after the start of the QCD transition (from Quark Soup to Matter-as-we-know-it), providing orders of magnitude improvement on the freeze-out temperature of any thermal relic.**

Additional **light particles that appear in extensions to the standard model will be constrained by CMB-S4, e.g., sterile neutrinos, axions, dark radiation, gravitinos, etc.**

CMB-S4 will provide many constraints of cosmology and particle physics over a enormous range of mass scales.

Light relics, including neutrinos, uniquely shape the Universe.
Observations of cosmological probes unlock information from different epochs.



Current data in agreement with standard picture:

3 (very) light active neutrinos interacting weakly and gravitationally

BUT

1. Very (too?) tight upper bound on neutrino masses
 $\sum m_\nu < 0.064$ eV, 95%CL, CMB+DESI in LCDM, close to oscillation threshold
2. Some scatter (still within 1-2 σ) in N_{eff} from different CMB data;
some BSM scenarios (new interactions, new species)
still allowed within current uncertainty

WHAT NEXT from coming CMB+LSS (~5-10 years)?

1. $\sigma(\Sigma m_\nu) = 15$ meV: **guaranteed** either first-ever mass measurement or evidence for BSM physics (unstable neutrinos, non-LCDM cosmology, ...)
2. $\sigma(N_{\text{eff}}) = 0.03$: **guaranteed** to probe still viable BSM scenarios in complementarity with lab (electromagnetic neutrino properties, BSM interactions, exotic species)

CMB-S4: flagship experiment degli anni 2030+

- Supportato da 2 agenzie: NSF (storica agenzia per CMB) e DOE (novita'!)
- Dal P5-2024 report emerge una fortissima raccomandazione per CMB-S4.
Forte supporto anche da edizione precedente e da Astro2020 decadal survey;
- Citato in APPEC roadmap;
- Redefinition of design report presentato a open symposium per ESPP

- Design originale: 2 siti, Atacama (LATs) e South Pole (SATs)
- Timeline originale: completamento installazione e inizio operazioni agli inizi di anni 2030, con una campagna di osservazione di 7 anni.

Contesto internazionale

NSF ha deciso che *must prioritize the recapitalization of critical infrastructure at the South Pole so that the groundbreaking research it enables can continue to thrive* (Chris Smith, interim director di NSF Astronomical Sciences Division, 7 Maggio 2024)

Stop per base antartica di CMB-S4 (sito dedicato a osservazione di modi B)

Decisione politica, non legata alla scienza (anche IceCube coinvolto, ma non solo),
supporto dalle agenzie (DOE e NSF) pieno,

2 report richiesti da agenzie su

a) nuovo design tutto in Cile;

b) sinergia con esperimenti già operativi

Report sottomessi a Maggio 2025, in attesa di risposta da agenzie (dopo estate almeno)

Nuovo design concept:

- approccio a fasi; prima fase: 1 LAT e 6 SAT

- forte sinergia e combinazione con dati raccolti da Simons Observatory e South Pole Observatory

Timeline: inizio operazioni 2033, 10 anni di survey

CMB-S4 e comunità italiana

L'Italia è da sempre un leading player in CMB theory, analysis e instrumentation

Ruoli chiave a livello istituzionale e come comunità partecipante a missioni da pallone e dallo spazio(**) -> continuità con LiteBIRD!

Ruoli chiave nella scienza e nel management a livello individuale in esperimenti da terra

-> opportuno capitalizzare tramite un supporto strutturato!

See e.g., CMB-S4/INFN MoU; LiteBIRD/CMB-S4 synergy WP in LiteBIRD INFN project

Il futuro è promettente: comunità giovane e dinamica, formata e supportata da membri senior e che gode di pieno riconoscimento da grandi collaborazioni

Enormi opportunità anche per membri provenienti da altre comunità: sinergie

(**) Il gruppo di PD ha avuto un ruolo centrale per l'analisi dati e interpretazione per la fisica dell'Universo primordiale

CMB-S4 e comunità italiana

Letter of intent per la richiesta di apertura nuova sigla in CSN2 |
presentata il 2 di Luglio

I tempi sono serrati (finestra di ~2 anni, oltre la quale la partecipazione non sarà garantita neanche a livello individuale) e la “concorrenza” sui pacchetti negoziabili forte (altri Paesi in fase di negoziazione con CMB-S4)

Richiesta di sigla CMB-S4 in CSN2:

- breve durata (2 anni) per supportare fase di design
- contributo per simulazione, analisi end-to-end, instrument design
 - 10 nodi, ~16 FTE

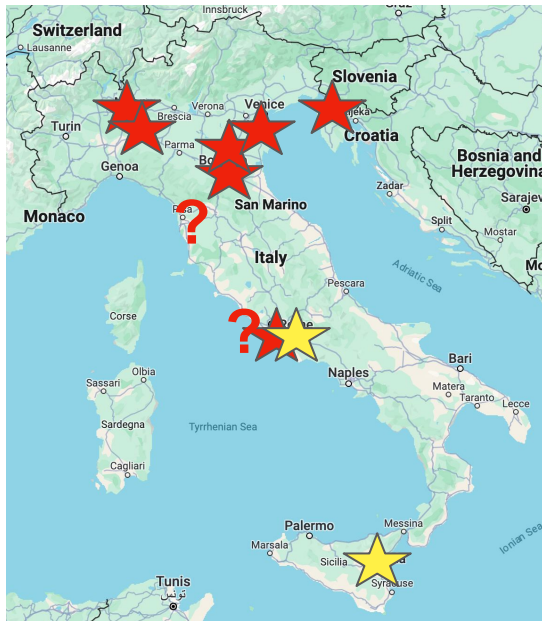
blande richieste economiche (missioni), richieste di calcolo (2.5M/2 anni)

L'obiettivo è non perdere l'opportunità di partecipare
come Italia e con contributo congruo a uno degli esperimenti di punta del prossimo futuro
Siamo aperti a contributi hardware e DM dall'intera comunità INFN -> gerbinom@fe.infn.it

CMB-S4 e comunità italiana

Le richieste del project di CMB-S4 sollecitano contributi soprattutto nelle aree della WBS dell'esperimento che devono essere rinforzate: criogenia, termovuoto, elettronica di lettura, testing e commissioning di componenti hardware, modellizzazione e simulazione, data management, riduzione e analisi. Eventuali contributi hardware sono da contrattare dopo la fase di redesign. Sono tutte aree in cui la comunità italiana è forte e che riusciremmo a coprire.

- ★ Nodo
- ★ Nuovo Nodo
- ? In discussione



FE
TS
MiB
CT

Mi
BO
PD
Roma1
Roma2
PI (?)
LNF (?)

Totale ~16FTE

CMB-S4 e comunità italiana

Le richieste del project di CMB-S4 sollecitano contributi soprattutto nelle aree della WBS dell'esperimento che devono essere rinforzate: criogenia, termovuoto, elettronica di lettura, testing e commissioning di componenti hardware, modellizzazione e simulazione, data management, riduzione e analisi. Eventuali contributi hardware sono da contrattare dopo la fase di redesign. Sono tutte aree in cui la comunità italiana è forte e che riusciremmo a coprire.

- ★ Nodo
- ★ Nuovo Nodo
- ? In discussione



Padova

Staff members:

N. Bartolo RL 0.2 FTE

M. Liguori 0.2 FTE

D. Bertacca 0.2 FTE

Post-docs:

Raganvendra H.V. 0.2 FTE

PhD students:

Chaima Batzami 0.3 FTE

Bartolomeo Bottazi Baldi 0.2 FTE

Jessie Arnoulds De Kruijf 0.2 FTE

Ferrara, RL/RN Martina Gerbino, 2 FTE: data management, simulazione, analisi.

INFN-LNF, maybe to join in the future RL Luca Porcelli, 1 FTE: criogenia, termovuoto, commissioning, simulazione.

SISSA, RL Nicoletta Krachmalnicoff, 1.8 FTE: data management, modellizzazione del segnale, simulazione, analisi.

Catania, RL Giuseppe Puglisi, 2.75 FTE: simulazioni, modellizzazione di effetti strumentali e del segnale, analisi.

INAF OA-TS e OAS-BO, RL Marco Frailis e Daniela Paoletti (1.55 FTE, eventualmente in supporto ad altre sezioni), data management, pipeline building, simulations, analysis, modelling, instrumental modelling, criogenia, assembly, testing.

Roma Tor Vergata, RL Alessia Ritacco, 1.5 FTE, instrumental modelling, simulazione, analisi. NB: sono in corso discussioni, ancora in fase preliminare, con Tor Vergata per un possibile contributo HW. Sono coinvolti nella discussione il Direttore e il Coordinatore locale.

Milano, RL Loris Colombo, 1.5 FTE, hardware design e testing, ottiche, calibrazione, simulazione, pipeline building, data management.

Roma 1, RL Luca Lamagna, 2.4 FTE, cryostat testing, module testing, raw timeline analysis.

Pisa, RL Andrea Tartari, to join in the future, readout electronics, simulazioni.

Padova, RL Nicola Bartolo, 1.5 FTE, data management e analisi.

Milano Bicocca, RL Federico Nati, 1.5 FTE, strumentazione (readout, calibrazione, criogenia, elettronica), acquisizione dati e data analysis raw

Perché la CMB da terra?

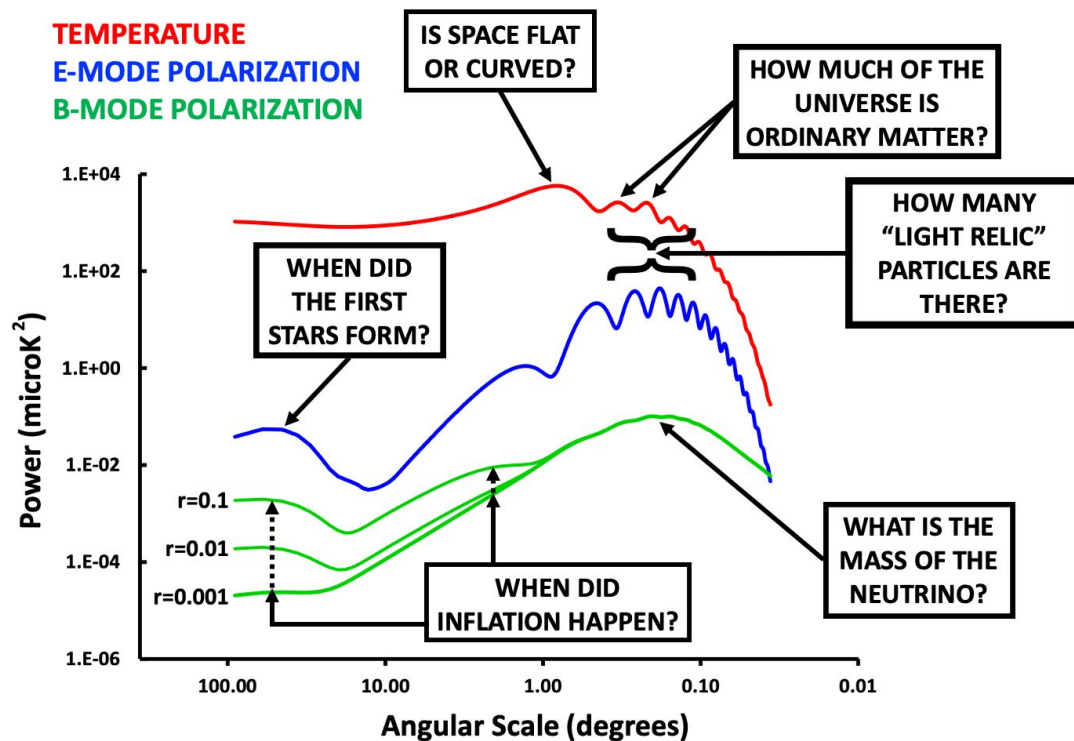
Unicità e sinergia
(terra-spazio, ma anche CMB - non CMB - lab)

Wealth Of CMB Science

Angular Power Spectra Guide

Il racconto delle origini, evoluzione e definizione dell'Universo è racchiuso nel debole segnale di anisotropie della CMB in intensità e polarizzazione

Per estrarre il segnale, dobbiamo osservare le anisotropie su scale angolari dal grado all'arcominuto con estrema sensibilità e robustezza



Come si osserva la CMB

- Osserviamo a mm-wavelengths dove emette la CMB!

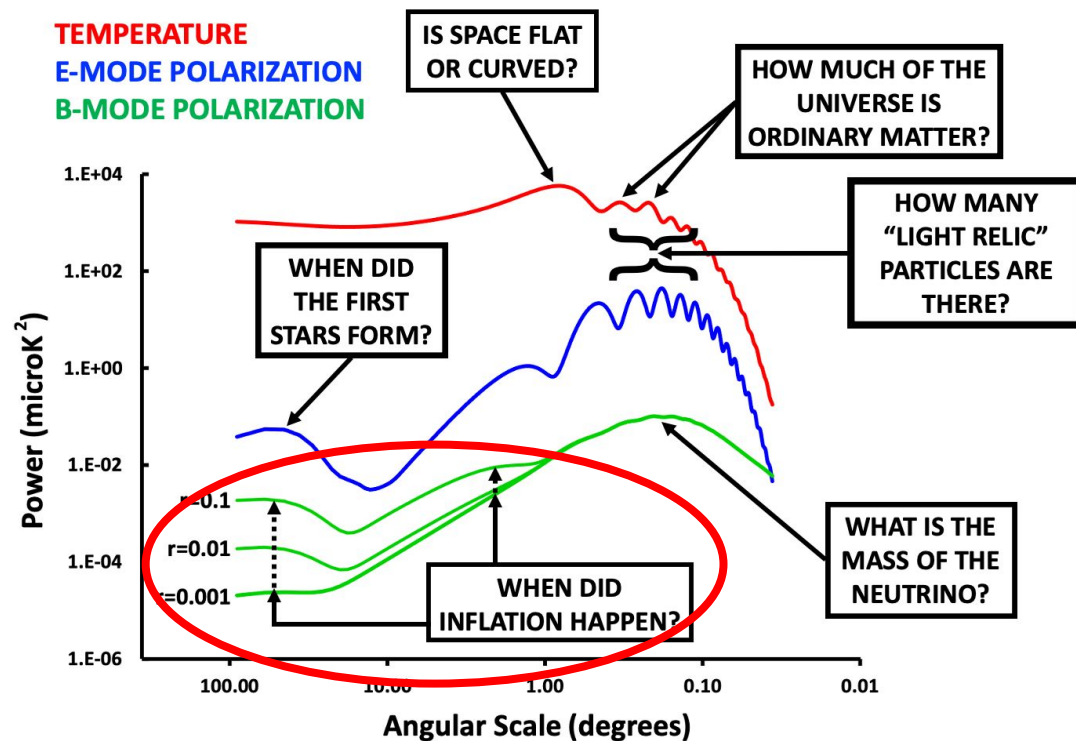
A queste frequenze,

- La point spread function (“beam”) è data dalla diffrazione del telescopio e dalle ottiche, non dall’atmosfera -> grandi aperture per piccole scale, solo da terra (da qualche grado ad arcominuti)
- Per separare l’emissione della CMB dai foreground, e.g., dust e sincrotrone, occorre osservare in diverse bande sia sopra che sotto il picco della CMB, spaziando da 15 mm a 1 mm e oltre (da 20 a 300 GHz e oltre). -> poche finestre da terra, migliore copertura dallo spazio
- Il monopolio della CMB a 3K riempie uniformemente il cielo e domina il segnale anisotropo (vogliamo misurare sub- μ K fluctuations di un 3 K background):
 - I detector di CMB osservano l’intensità incidente e sono limitati dal background i.e., il rumore è dominato dalla statistica dei fotoni in arrivo (decine di miliardi di fotoni, soprattutto dall’atmosfera) -> misure dallo spazio sono più “pulite”
 - E’ desiderabile osservare quanto più cielo possibile (statistica) e nelle migliori condizioni di stabilità termica -> misure dallo spazio sono più complete e “stabili” e permettono di sondare le scale angolari più grandi ($2 < l < 30$)
 -
- Pertanto complementarieta` importante per:
 - caratterizzare entrambi i picchi
 - provvedere a informazioni su foreground da spazio per telescopi a terra
 - migliorare le misure dallo spazio con i dati da terra relativamente al lensing.

Sinergia con spazio et al

Angular Power Spectra Guide

- Osservare entrambi i picchi: primo solo da spazio, secondo meglio da terra
- Maggiore copertura in frequenza da spazio
- Ma info necessarie per pulire il segnale da effetti di weak lensing solo da terra
- Sinergia con interferometri (ET), **ma CMB è l'unica finestra sui modelli standard**

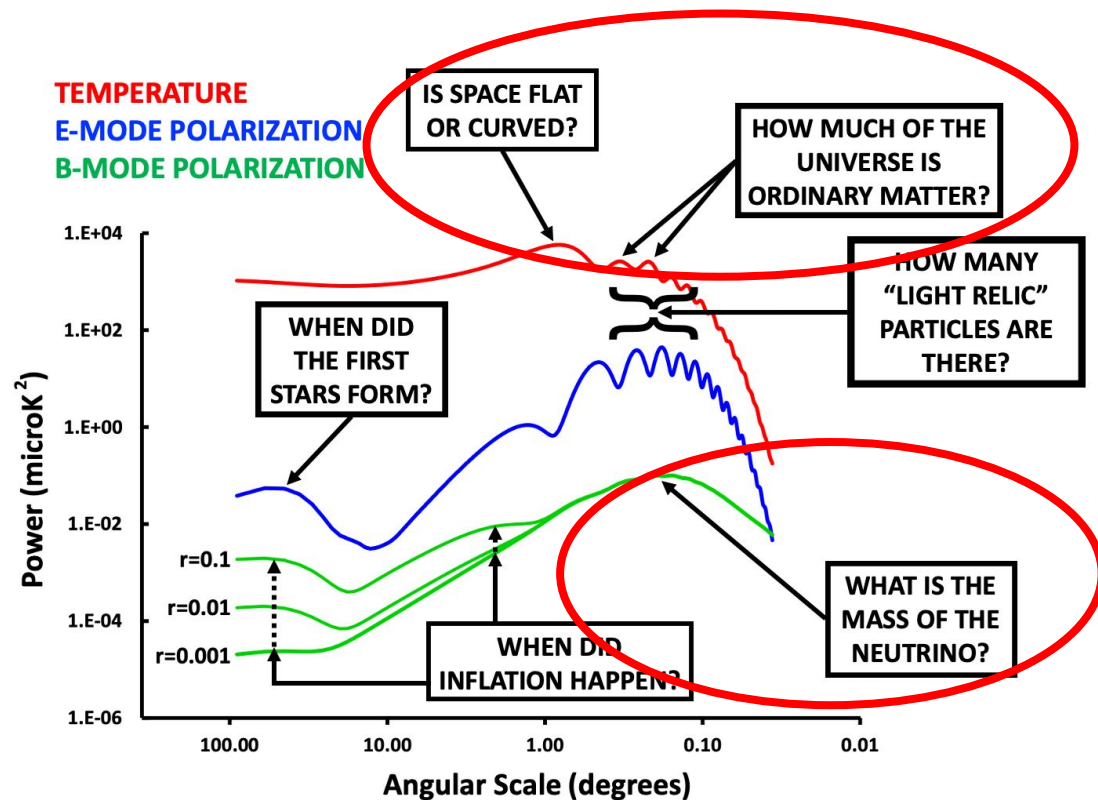


Vedi talk di N. Bartolo

Sinergia con spazio et al

Angular Power Spectra Guide

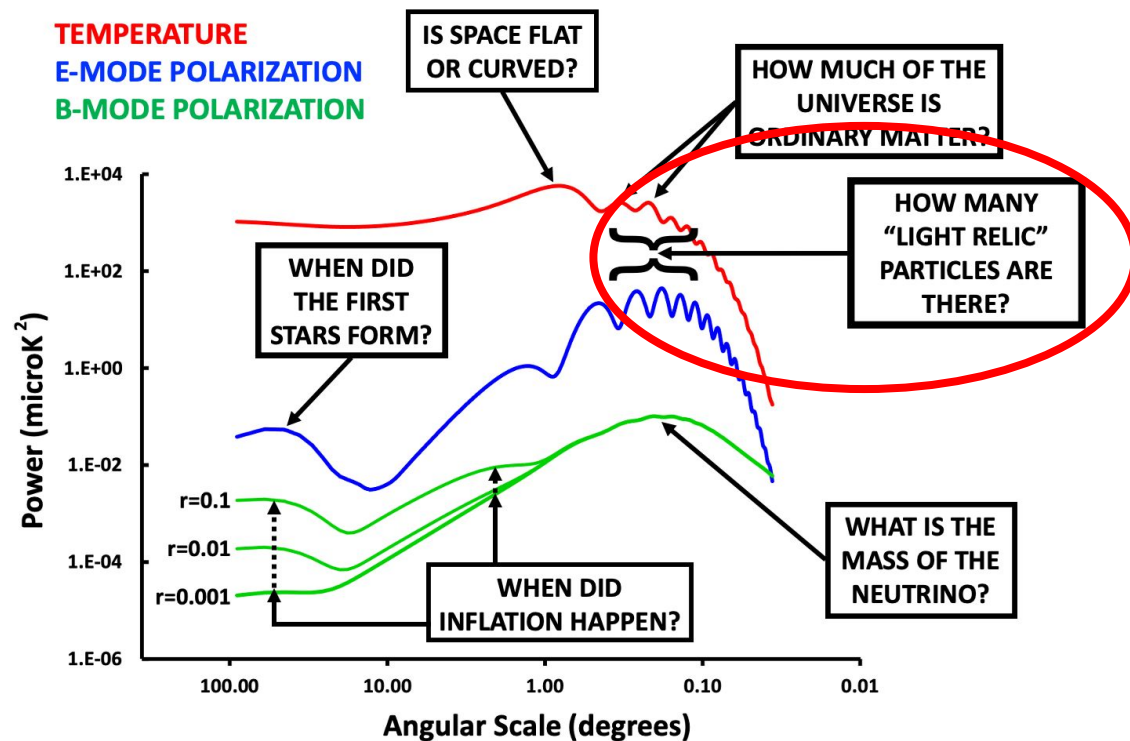
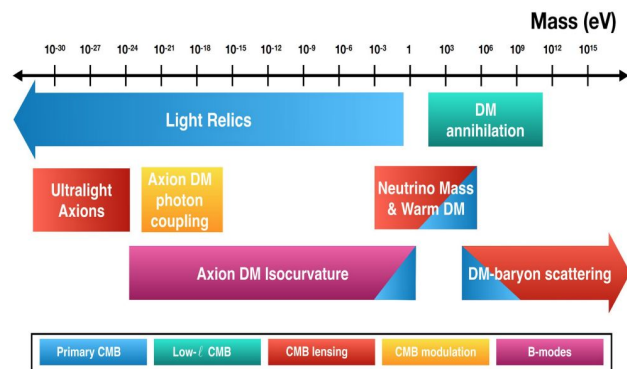
- Sinergia con survey di strutture cosmologiche (Euclid)
- Necessari entrambi per conferme indipendenti di misure (specie in BSM cosmo, e.g., $w_0 \neq -1$; $m_{\nu} \neq 0$)
- NB: piccole scale inaccessibili con LiteBIRD
- Sinergia con lab: implicazioni di $m_{\nu} \sim 0.06 \text{ eV}$ o minore?



Sinergia con spazio et al

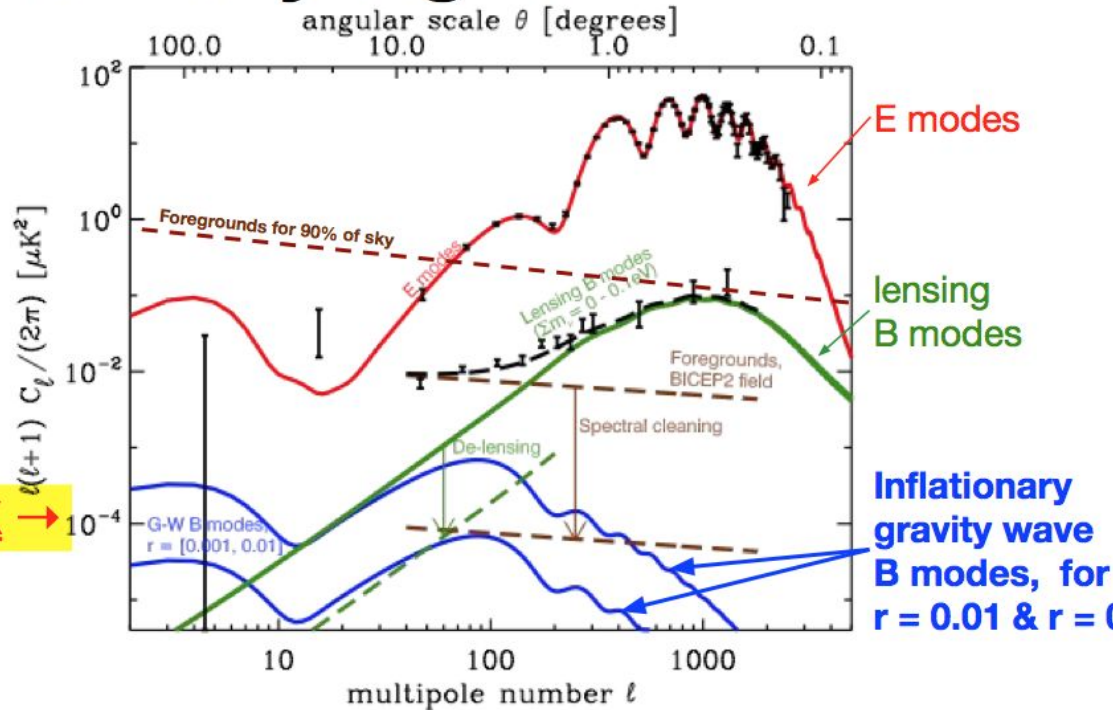
Angular Power Spectra Guide

- Solo da piccolissime scale, quindi solo da terra
- Sinergia con lab e HEaP (nuovi candidati di dark matter, esplorazione regioni inaccessibili da lab e astro, cross-check di risultati)



Back-up slides

Making a definitive measurement of the Inflationary signal



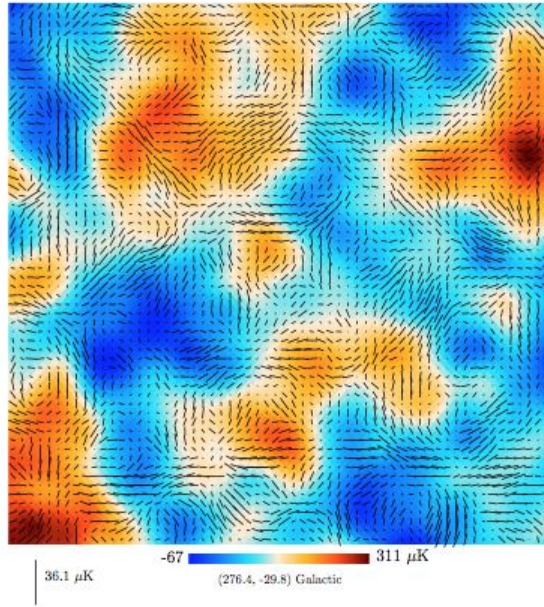
10 nK →

The signature is **10 nK fluctuations** on a 3K signal, measured by an experiment operating in a 300K environment

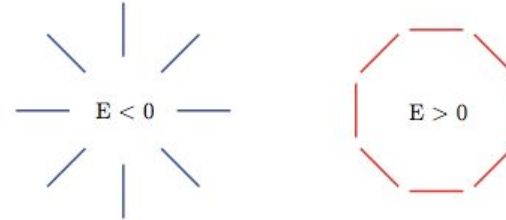
Foregrounds mitigation and de-lensing requires multiple frequency bands and broad angular range with exceptional sensitivity and control of systematics

CMB-S4 must dig two orders of magnitude deeper than current experiments, and through the foreground-dominated regime

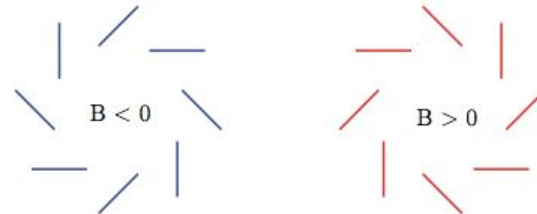
CMB polarization & Primordial GWs



E-mode (produced by scalar & tensor perturbations): measured



B-mode (produced only by Tensor perturbations):
not measured yet (apart the one from lensing)



$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} \quad \alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1}(U/Q)$$

$$(Q + iU)(\hat{n}) = \sum_{\ell, m} a_{\ell m}^{(\pm 2)} [\pm 2 Y_{\ell m}(\hat{n})]$$

$$a_{\ell m}^E \equiv -\frac{1}{2} (a_{\ell m}^{(2)} + a_{\ell m}^{(-2)}) \quad a_{\ell m}^B \equiv -\frac{1}{2i} (a_{\ell m}^{(2)} - a_{\ell m}^{(-2)})$$