



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA
LA SAPIENZA**

FACOLTÀ DI SCIENZA MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
ASTRONOMIA E ASTROFISICA

**Ottimizzazione delle osservazioni di
polarizzazione della CMB tramite
pallone stratosferico LSPE**

Autore : Davide Guerra, Paolo Marcoccia, Lorenzo Zanisi

Indice

1	Introduzione	7
1.1	Universo in espansione e Big Bang	7
1.2	La Radiazione Cosmica di Fondo (CMB)	9
1.3	La Polarizzazione della CMB	12
1.3.1	Formalismo	12
1.3.2	Sorgenti della polarizzazione del CMB	14
2	Descrizione dell'apparato strumentale LSPE	17
2.1	L'apparato SWIPE	17
2.1.1	I rivelatori di SWIPE	18
2.1.2	Il modulatore in polarizzazione	19
2.2	Descrizione del simulatore CONVOLVER	20
2.2.1	Coordinate di partenza della missione	21
2.2.2	Elevazione iniziale e range di elevazione	21
2.2.3	Lunghezza della missione in giorni	21
2.2.4	Frequenza di Campionamento	21
2.2.5	Velocità di rotazione dello strumento	22
2.2.6	Rotazione dell'HWP	22
2.2.7	Rumore e convoluzione dei beam	22
2.2.8	Caratteristiche del sistema di rivelatori	22
3	Strategia osservativa per LSPE	23
3.1	Operazioni preliminari	23
3.1.1	Parametri considerati	23
3.1.2	I foregrounds	24
3.1.3	Criteri di selezione	25
3.2	Simulazioni effettuate	28
3.3	Analisi simulazioni	29
3.3.1	Coperture del cielo osservato	29
3.3.2	Tabelle analisi dati	29
3.3.3	Grafici analisi dati	30
3.4	Effetto dei foregrounds sulla stima di r	34
3.4.1	Le simulazioni	34
3.4.2	I diversi contributi a σ_r	34
3.5	I risultati	36
	Appendices	45
A	Tabelle	47
B	Codici utilizzati	55
B.1	Rotazione delle mappe	55
B.2	Pipeline per le simulazioni descritte in 3.3	56
B.3	MODIFY HEADER	58
B.4	P_bad e σ_{QQ}	59

B.5	Pipeline per le simulazioni descritte in (3.5)	61
B.5.1	Generazione della funzione di trasferimento	61
B.5.2	La produzione delle immagini e delle sigma	62

Abstract

In questo documento si espongono i risultati di simulazioni numeriche relative all'ottimizzazione della strategia osservativa di LSPE (*Large Scale Polarization Explorer*), futuro esperimento su pallone stratosferico volto ad ottenere una misura dei *modi B* della polarizzazione della CMB. Il payload ospiterà due strumenti, STRIP (*STRatospheric Italian Polarimeter*) e SWIPE (*Short Wavelength Instrument for the Polarization Explorer*); tuttavia in questo lavoro si tratterà esclusivamente del secondo.

Le simulazioni sono state effettuate con il fine di individuare un opportuno insieme di parametri, relativi all'osservazione, che consentano di massimizzare la frazione di cielo libera da foreground galattici. In particolare, si sono considerati :

- la scelta del luogo di lancio tra *Kiruna* (coordinate $67.8N$ $20.2E$) e *Longyearbyen* (coordinate $78.2N$ $15.6E$) ;
- La scelta della miglior combinazione tra elevazione iniziale e range di elevazione dello strumento.

La durata della missione è stata invece fissata a 13 giorni.

Sono state utilizzate più strategie allo scopo di determinare i parametri ottimali, le quali forniscono informazioni diverse circa la frazione di cielo osservata.

Sebbene non sia stato possibile ottenere un insieme di parametri che accordi i diversi criteri impiegati, si sono ottenuti dei vincoli ragionevoli sull'ordine di grandezza della sensibilità di SWIPE sulla misura dei modi tensoriali della CMB. Inoltre si sono osservate le differenti coperture realizzate nei diversi casi.

L'esposizione è organizzata come segue. Nel **Capitolo 1**, dopo alcuni richiami riguardanti il *Modello Cosmologico Standard*, viene discussa la polarizzazione della CMB, con particolare riferimento ai modi B dovuti alle perturbazioni tensoriali, generate durante la fase inflattiva. Nel **Capitolo 2** si descrivono brevemente l'apparato strumentale e il codice utilizzato, dando poi spazio alla presentazione dei parametri strumentali in input al programma e ad alcune opzioni di mapmaking. Nel **Capitolo 3** verranno invece esposte le tecniche utilizzate per definire la strategia osservativa ed infine sono riportati i risultati ottenuti.

Capitolo 1

Introduzione

In questa parte iniziale dell'elaborato si introducono le caratteristiche principali dell'universo e della *radiazione di fondo cosmica*.

1.1 Universo in espansione e Big Bang

Dalle osservazioni sperimentali dell'ultimo secolo si è osservato che l'Universo è in espansione, inoltre su larga scala, arrivando a distanze di $\sim 100 \text{ Mpc}$, risulta essere caratterizzato da una globale *Omogeneità* ed *Isotropia*.

Il modello di Universo attualmente in miglior accordo con i dati sperimentali è il modello ΛCDM , in cui alla normale materia barionica e alla componente radiativa si aggiungono altri fattori, che vanno a modificare sia la materia che l'energia che costituisce l'Universo:

- *Dark Matter*: componente dell'Universo in grado di interagire solo gravitazionalmente con le altre componenti;
- *Costante Cosmologica*: ulteriore componente dell'Universo che va a definire la cosiddetta *Dark Energy*, una forma ancora ignota di energia, in principio introdotta da Einstein al fine di ottenere un Universo statico.

L'aggiunta di una componente di *Dark Matter* è stata necessaria per via di alcune incongruenze della teoria standard, tra le quali vi è l'incongruenza tra le predizioni teoriche inerenti la formazione delle *Large Scale Structures* che si sarebbero dovute formare in un Universo con sola componente barionica e radiativa, rispetto agli scenari di formazione di Strutture inferiti dalle osservazioni.

La *Dark Energy* invece è stata chiamata in causa per spiegare il fenomeno dell'*accelerazione dell'espansione cosmica*, osservata direttamente da *Perlmutter* in [7] e *Riess* in [8], ormai confermata da ulteriori più recenti osservazioni.

Osserviamo che per un Universo non statico l'elemento invariante di linea può essere espresso come :

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right], \quad (1.1)$$

in cui con il termine $a(t)$ si definisce il *fattore di scala* che descrive la variazione della distanza propria tra due punti generici dovuta all'espansione dell'Universo, mentre k rappresenta la *curvatura spaziale*. Si identificano universi *aperti* ($k = -1$), universi *piatti* ($k = 0$), ed universi *chiusi* ($k = 1$).

Utilizzando le *equazioni di Einstein* descritte dalle seguenti equazioni:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1.2)$$

associate alla metrica 1.1, e assumendo il tensore energia impulso di un fluido perfetto, si ottengono le *equazioni di Friedman* seguenti:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \quad (1.3)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3P) \quad (1.4)$$

dove ρ è la densità media e P la pressione.

Utilizzando la legge $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$ risulta essere inoltre possibile mostrare che è verificata la seguente equazione:

$$\dot{\rho} + 3\frac{\dot{a}}{a}(P + \rho) = 0 . \quad (1.5)$$

Utilizzando le suddette equazioni corredate di una equazione di stato del tipo

$$P = w\rho , \quad (1.6)$$

con $w = 0$ per la materia e $w = 1/3$ per la radiazione, si ricavano l'andamento del *fattore di scala* in funzione del tempo al variare del valore di k (riportato nel grafico in **Figura 1.1**), e il comportamento di ρ per materia relativistica e non relativistica (**Figura 1.2**).

Come si osserva, la soluzione per a risulta in ogni caso singolare. Tale singolarità iniziale, denominata *Big Bang*, è dovuta al fatto che le distanze tra i componenti dell'Universo tendono ad annullarsi per via del tendere a 0 del fattore di scala $a(t)$. Questo in particolare implica che ρ diventi infinita. È infatti logico aspettarsi che la densità delle componenti Barionica e Radiativa, andando a ritroso nel tempo, abbiano un andamento divergente, vista la loro inversa proporzionalità con il volume che risulta essere funzione di $a(t)$.

Dal grafico in **Figura 1.2** inoltre è possibile osservare un Universo costituito da una fase iniziale in cui la componente radiativa domina la densità totale rispetto a tutte le altre componenti. Seguendo la sua evoluzione si passa poi attraverso una fase di uguaglianza tra componente radiativa e barionica¹, fino ad arrivare a una fase in cui la componente barionica domina l'evoluzione dell'Universo. Infine si ha l'ultima fase in cui ora si trova l'Universo odierno, che risulta essere caratterizzata dal dominio della *costante cosmologica*.

¹ Questa fase è denominata *epoca dell'equivalenza*.

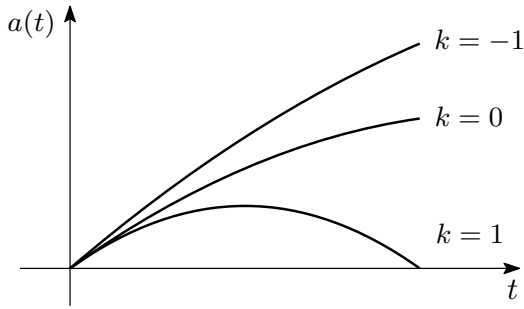


Figura 1.1: Andamento del fattore di scala al variare della curvatura dello spazio-tempo k .

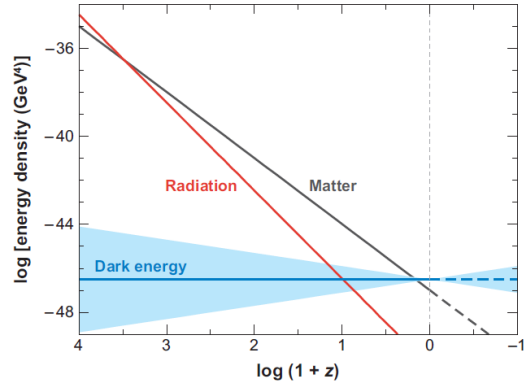


Figura 1.2: Andamento delle componenti dell'Universo in funzione del redshift z .

In ere primordiali, la componente radiativa e barionica possono essere considerate accoppiate in un fluido estremamente denso e caldo; in tale situazione anche gli atomi più leggeri sono incapaci a formarsi e i fotoni del fluido possono essere considerati intrappolati nello stesso per via del minimo cammino libero medio.

Solo con l'espandersi dell'Universo le componenti sono state in grado di disaccoppiarsi, permettendo ai fotoni di "scappare" riuscendo a portare informazioni sullo stato dell'Universo all'*Epoca del Disaccoppiamento*. Tale radiazione è ancora osservabile dall'odierno Universo e va sotto il nome di *C.M.B (Cosmic Microwave Background)*.

1.2 La Radiazione Cosmica di Fondo (CMB)

La *Radiazione cosmica di fondo* rappresenta la radiazione elettromagnetica residua prodotta dal *Big Bang* che tutt'oggi permea l'intero Universo. La sua scoperta avvenne per mano di *Arno Penzias* e *Robert Woodrow Wilson* nel 1964 [9], ed è stata la prova definitiva a favore del modello standard del *Big Bang*.

Tale radiazione appare in qualsiasi direzione si guardi nella banda delle microonde e non può essere associata a nessun corpo celeste, per questo si assume che sia dovuta alla radiazione termica che all'epoca della ricombinazione si è disaccoppiata dal plasma primordiale.

In seguito alla prima formazione di atomi stabili, per via del raffreddamento del plasma primordiale e dei fotoni, il tasso di assorbimento della radiazione dovuto all'interazione tra la componente radiativa e quella barionica subisce un brusco calo. In questa situazione i fotoni hanno la possibilità di riuscire a sfuggire dal fluido per viaggiare in tutto lo spazio, portando l'informazione sulle prime fasi dell'Universo².

Nel tragitto fino alla Terra ovviamente tali fotoni perderanno gran parte dell'energia, motivo per cui lo spettro della radiazione non è quello di un corpo a elevata temperatura,

² La *CMB* può essere intesa come una "fotografia" dell'Universo all'epoca del disaccoppiamento tra i fotoni e il plasma primordiale, e si parla di un'epoca risalente a ~ 379000 anni dopo il Big Bang

come dovrebbe essere l'Universo nelle prime fasi, bensì appare nella banda delle microonde (tra 250 MHz e i 300 GHz).

Essendo radiazione termica si può modellizzare lo spettro di tale radiazione come quello di un *Corpo Nero*, ovvero descritto dalla funzione di distribuzione descritta dall'equazione (1.7):

$$I(\nu)d\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu . \quad (1.7)$$

Si osserva in particolare che facendo un fit a spettro di *Corpo Nero*, la radiazione della CMB segue proprio l'andamento di un *Corpo Nero* avente temperatura $T = 2.725 \text{ K}$, con una precisione sull'isotropia di una parte su centomila, diventando il miglior esempio di spettro di *Corpo Nero* attualmente disponibile nell'Universo.

Osservando il grafico riportato in **Figura 2.1**, in cui si confrontano i dati sperimentali con un corpo nero teorico a $T = 2.725 \text{ K}$ si evince che la radiazione di CMB è descritta proprio da uno spettro di *Corpo Nero*.

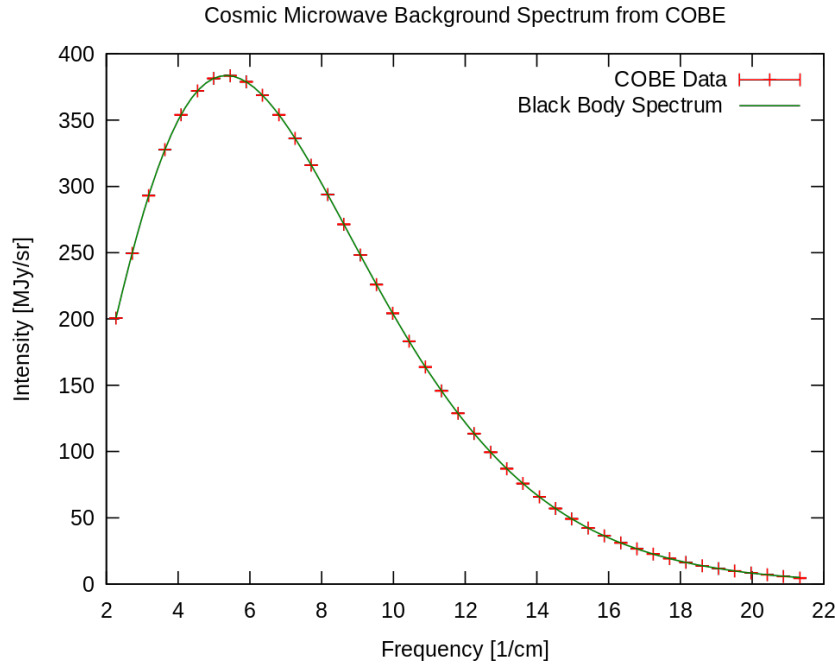


Figura 1.3: Confronto tra lo spettro teorico di *Corpo Nero* e lo spettro della CMB, mediante i dati dell'esperimento *COBE*.

Come è stato ormai mostrato da numerosi esperimenti, tra i quali *BOOMERanG*, *WMAP* e *Planck* la radiazione di CMB presenta delle *anisotropie* in temperatura $\delta T/T$, le cui proprietà statistiche sono di grande interesse.

È possibile espandere in armoniche sferiche la quantità $\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi)$:

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{\ell=1}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell,m} Y_{\ell,m}(\theta, \phi) , \quad (1.8)$$

dove si ricorda che $-\ell \leq m \leq \ell$.

Ciò a cui si è interessati sono le proprietà statistiche dei coefficienti $a_{\ell,m}$, che sono le seguenti:

$$\begin{cases} \langle a_{\ell,m} \rangle = 0 \\ \langle a_{\ell,m} a_{\ell',m'}^* \rangle = \delta_{\ell,\ell'} \delta_{m,m'} \tilde{C}_{\ell} \end{cases} \quad (1.9)$$

essendo \tilde{C}_{ℓ} la varianza, avendo poi usato l'ortogonalità delle armoniche sferiche e il fatto che la varianza non può dipendere da m , in quanto per l'angolo azimutale ϕ non è possibile scegliere una origine senza rinunciare all'ipotesi di isotropia.

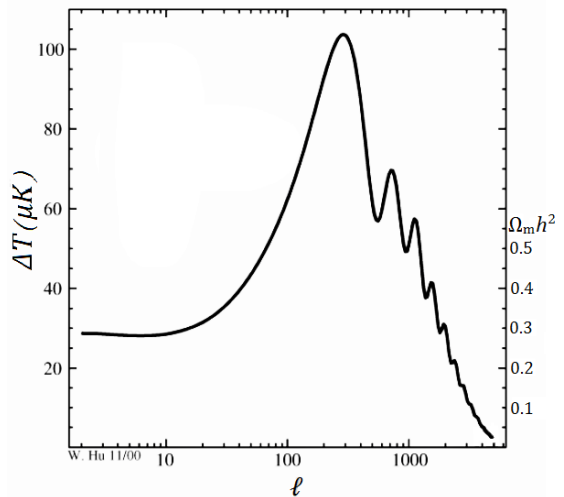
Tuttavia questa quantità è definita per una media di *ensemble*, che osservativamente non risulta essere misurabile³. Il motivo di ciò risiede nel fatto che per ogni ℓ esistono $2\ell + 1$ valori di m , si può pensare quindi di costruire una nuova quantità che tenga conto delle proprietà di tutti gli $a_{\ell,m}$ ad ℓ fissato, come nell'equazione seguente:

$$C_{\ell} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} |a_{\ell,m}|^2 . \quad (1.10)$$

Si definisce **spettro di potenza angolare in temperatura** l'oggetto descritto nell'equazione (1.11):

$$D_{\ell}^{TT} = \Delta T^2 = \ell(\ell + 1) \frac{C_{\ell}}{2\pi} \quad (1.11)$$

Essendo lo spettro di potenza angolare più leggibile, la maggior parte dei metodi di stima dei parametri cosmologici si basa sull'analisi di quest'ultimo, il cui andamento in funzione di ℓ è visibile nel grafico di fianco, ottenuto mediante un modello teorico.



³ La radiazione di CMB che si osserva è solo una delle infinite possibili realizzazioni.

1.3 La Polarizzazione della CMB

1.3.1 Formalismo

Al fine di descrivere al meglio la polarizzazione della luce, è opportuno introdurre i cosiddetti *parametri di Stokes*. Si consideri un'onda piana monocromatica⁴ le cui componenti del campo elettrico sono:

$$\begin{cases} E_x = E_{0x} \cos(\omega t - \xi_x) \\ E_y = E_{0y} \cos(\omega t - \xi_y) \end{cases} \quad (1.12)$$

Si può ora iniziare a definire i parametri di Stokes: l'intensità dell'onda monocromatica risulta essere data mediante l'utilizzo della equazione (1.13) seguente:

$$I = E_{0x}^2 + E_{0y}^2. \quad (1.13)$$

Le componenti di polarizzazione, rispettivamente lungo gli assi x ed y , sono direzionati a $\pm 45^\circ$ da essi e risultano essere i seguenti:

$$Q = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \quad (1.14)$$

$$U = 2E_{0x}E_{0y} \cos(\xi_x - \xi_y), \quad (1.15)$$

mentre la polarizzazione circolare risulta essere definita come

$$V = 2E_{0x}E_{0y} \sin(\xi_x - \xi_y). \quad (1.16)$$

Tuttavia, poichè lo *scattering Thomson* non produce polarizzazione circolare, è possibile ignorare quest'ultima definizione.

I parametri di Stokes sono dipendenti dalla scelta del sistema di riferimento. In particolare, denominando $R_{ij}(\alpha)$ la matrice che opera una rotazione di un angolo α sugli assi del sistema di riferimento, i parametri di Stokes Q ed U nel nuovo riferimento saranno dati dalla trasformazione descritta nell'equazione (1.17) seguente:

$$\begin{pmatrix} Q' \\ U' \end{pmatrix} = R(2\alpha) \begin{pmatrix} Q \\ U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(2\alpha) & \sin(2\alpha) \\ -\sin(2\alpha) & \cos(2\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q \\ U \end{pmatrix}. \quad (1.17)$$

Una descrizione alternativa ed equivalente del problema è possibile data in termini del cosiddetto *tensore di polarizzazione* seguente:

$$P_{ij}(\vec{n}) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} Q(\vec{n}) & U(\vec{n}) \\ U(\vec{n}) & -Q(\vec{n}) \end{pmatrix}, \quad (1.18)$$

dove \vec{n} indica la direzione di osservazione in cielo $\vec{n} = (n_x, n_y)$. L'oggetto appena descritto $P_{ij}(\vec{n})$ risulta essere un tensore doppio simmetrico e a traccia nulla.

⁴ Si considera il sistema di riferimento in cui la direzione di propagazione dell'onda è quella dell'asse z .

Questa proprietà permette di vedere come si comporta $P_{ij}(\vec{n})$ sotto rotazione:

$$P'_{ij} = R_{ki}(\alpha) R_{lj}(\alpha) P_{kl} , \quad (1.19)$$

ed è possibile verificare che Q ed U trasformano come nell'equazione (1.17). Si definisce inoltre il modulo della polarizzazione come espresso nell'equazione (1.20) seguente:

$$|P| = \sqrt{Q^2 + U^2}. \quad (1.20)$$

Esiste una ulteriore definizione per la polarizzazione, che risulta anche essere più pratica della precedente, ed è data dalla seguente formula:

$$P = Q + iU . \quad (1.21)$$

Per questa quantità complessa restano invariate le proprietà di rotazione menzionate precedentemente nel formalismo tensoriale. Risulta essere utile espandere P nella base delle armoniche sferiche, generalizzate al caso di un campo di spin 2, $_{\pm 2}Y_{lm}$, il tutto è descritto nella seguente equazione:

$$\begin{cases} Q + iU = \sum_{l,m} a_{+2,lm-2} Y_{lm} \\ Q - iU = \sum_{l,m} a_{-2,lm+2} Y_{lm} \end{cases} \quad (1.22)$$

Introducendo allora le seguenti quantità:

$$a_{E,lm} = -\frac{1}{2}(a_{2,lm} + a_{-2,lm}) \quad (1.23)$$

$$a_{B,lm} = \frac{i}{2}(a_{2,lm} - a_{-2,lm}) , \quad (1.24)$$

è possibile definire i cosiddetti *modi E* ed i *modi B* della polarizzazione, visionabili nelle due sequenti equazioni:

$$E(\vec{n}) = \sum_{l,m} a_{E,lm} Y_{lm}(\vec{n}) \quad (1.25)$$

$$B(\vec{n}) = \sum_{l,m} a_{B,lm} Y_{lm}(\vec{n}) . \quad (1.26)$$

Questi campi risultano essere invarianti sotto rotazioni, il che si rende particolarmente utile in questo contesto: come si può osservare in **Figura 1.4**, i pattern di polarizzazione dati dai modi E e dai modi B sono molto peculiari. Si definiscono i seguenti spettri di potenza angolare:

$$C_\ell^{EE} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{E,lm}^* a_{E,lm} \quad (1.27a)$$

$$C_\ell^{TE} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{T,lm}^* a_{E,lm} \quad (1.27b)$$

$$C_\ell^{BB} = \frac{1}{2\ell+1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{B,lm}^* a_{B,lm} . \quad (1.27c)$$

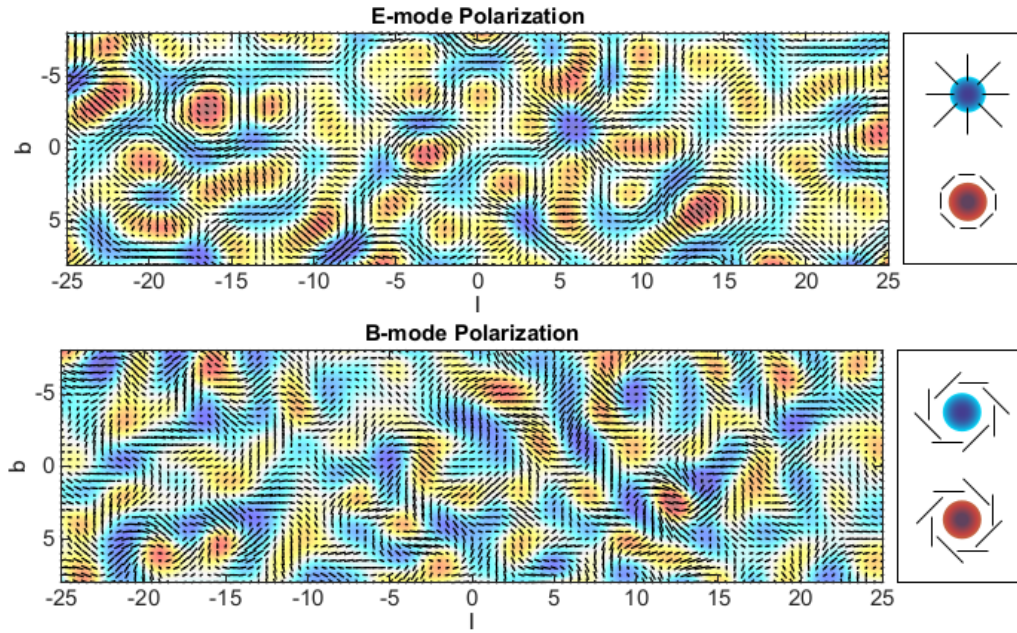


Figura 1.4: Patterns di polarizzazione dati dai modi B e dai modi E. (*Cabella & Kamionkowski*, [10])

1.3.2 Sorgenti della polarizzazione del CMB

Si può comprendere il motivo per il quale la radiazione proveniente dalla superficie di ultimo scattering (LSS, *last scattering surface*) risulti polarizzata se si considera l'interazione dei fotoni con la materia mediante scattering Thomson. Un centro scatteratore, come può essere un elettrone, interagisce con la radiazione incidente, diffondendola (**Figura 1.5**).

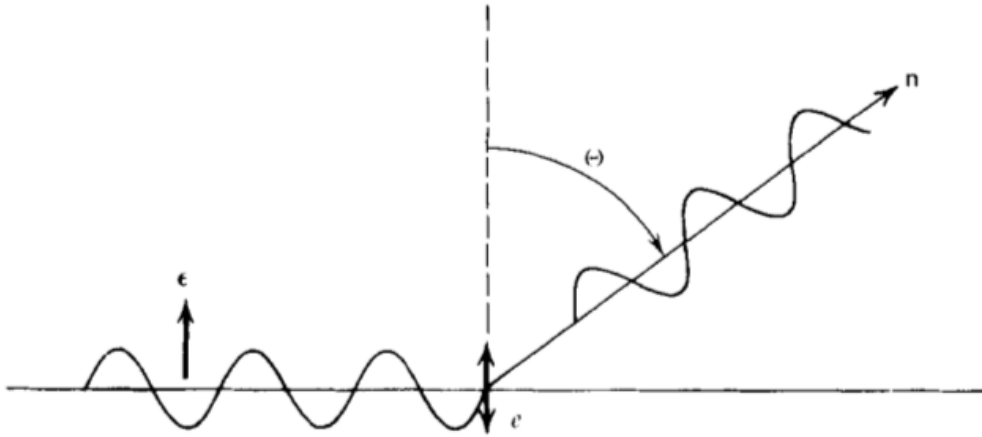


Figura 1.5: Schematizzazione della diffusione della radiazione ad un angolo θ da parte di un elettrone

La sezione d'urto differenziale di questo processo risulta essere data dalla seguente equazione:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = r_e^2 \sin^2 \theta , \quad (1.28)$$

dove r_e indica il raggio classico dell'elettrone e θ l'angolo di scattering.

La radiazione scatterata, visibile in **Figura 1.5**, risulta polarizzata nel piano individuato dal vettore polarizzazione incidente e dalla linea di vista che sul grafico appena citato risulta essere la direzione \vec{n} . Evidentemente il discorso vale anche nel caso in cui la radiazione incidente provenga da diverse direzioni. Si ricorda infatti che l'elettromagnetismo è una teoria lineare e quindi i campi risultanti dall'interazione vanno semplicemente a sommarsi.

Segue quindi che se l'elettrone si trova in una regione in cui l'intensità della radiazione è identica in tutte le direzioni, allora la radiazione scatterata non può essere polarizzata. Se invece la radiazione non ha le suddette caratteristiche, allora risulta possibile che la radiazione scatterata lungo la linea di vista sia polarizzata⁵. Risulta dunque chiaro che le anisotropie di temperatura contribuiscono molto attivamente alla polarizzazione della CMB tramite l'accoppiamento radiazione-materia fornito dallo scattering Thomson.

La *teoria dell'inflazione* [18] prevede l'esistenza di un cosiddetto **fondo stocastico di onde gravitazionali**, la cui potenza in spazio di Fourier risulta pari a:

$$\Delta_h^2(k) = 2 \left(\frac{H}{\pi M_{Pl}} \right)^2 , \quad (1.29)$$

dove $H \propto \sqrt{V}$ è il *parametro di Hubble*, che è legato al potenziale inflattivo, con M_{Pl} la *massa di Planck*.

è possibile dimostrare che in questo contesto si possono avere sia modi B che modi E, utilizzando l'equazione delle geodetiche dei fotoni in uno spaziotempo così definito e tenendo conto dello scattering Thomson.

D'altra parte, si dimostra anche che perturbazioni di densità non sono in grado di produrre modi B. Pertanto una misura di essi nella polarizzazione della CMB sarebbe la prova lampante che l'inflazione è avvenuta.

Un'altra predizione dell'inflazione è che lo spettro delle perturbazioni di densità primordiali si sia generato dalle fluttuazioni quantistiche del campo scalare, portate ad essere di dimensioni maggiori dell'orizzonte durante l'epoca inflattiva. La potenza in questo caso risulta essere data dalla seguente equazione (1.30) :

$$\Delta_R^2(k) = \frac{1}{8\epsilon} \left(\frac{H}{\pi M_{Pl}} \right)^2 . \quad (1.30)$$

⁵ In questo caso infatti i contributi alla polarizzazione osservata non si elidono completamente

Si definisce dunque il *tensor-to-scalar ratio*, r , come

$$r = \frac{\Delta_h^2}{\Delta_R^2}. \quad (1.31)$$

L'obiettivo degli odierni esperimenti, incluso *LSPE*, è misurare se, entro una certa soglia, sia possibile affermare che $r \neq 0$. Questo confermerebbe la validità dell'ipotesi inflattiva.

Capitolo 2

Descrizione dell'apparato strumentale LSPE

2.1 L'apparato SWIPE

L'apparato *Swipe*, acronimo di *Short Wavelength Instrument for the Polarization Explorer* è un *Polarimetro di Stokes* basato su un freddo (circa $4K$) modulatore di polarizzazione ad *Half Wave Plate*, integrato con un telescopio rifrattivo da $50cm$ di apertura, un beamsplitter polarizzatore a *wire grid* e due larghi piani focali che ospitano 326 bolometri, i quali lavorano a frequenze di 140 GHz , 220 GHz e 240 GHz [2]. Tutto l'apparato è raffreddato da un *criostato L_4He* e un refrigeratore a 3He , permettendo ai bolometri di lavorare a una temperatura di all'incirca $0.3K$ minimizzando il rumore termico.

Il raffreddamento dell'apparato è suddiviso su differenti shell concentriche passando da zone più calde verso l'esterno fino ad arrivare alla zona centrale più fredda come rappresentato in **Figura 2.1** :

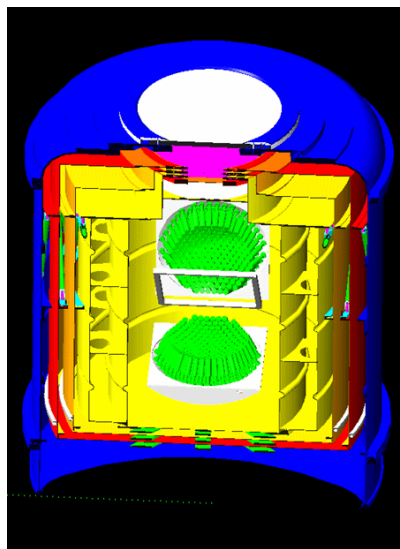


Figura 2.1: Tagliato della struttura a shell dell'apparato Swipe, le zone più calde sono blu mentre le zone più fredde sono gialle.

La shell blu è in equilibrio termico con l'ambiente esterno. Andando verso l'interno vi è una shell rossa ($\approx 170 K$), una shell arancione ($\approx 40 K$), la cisterna dell' He^4 in giallo, il modulatore di polarizzazione in viola e infine il beamsplitter e i due array di rivelatori in verde.

Il diametro esterno del sistema è di circa $140cm$, mentre la posizione dei rivelatori sulla griglia in funzione della frequenza è invece mostrata in **Figura 2.2**:

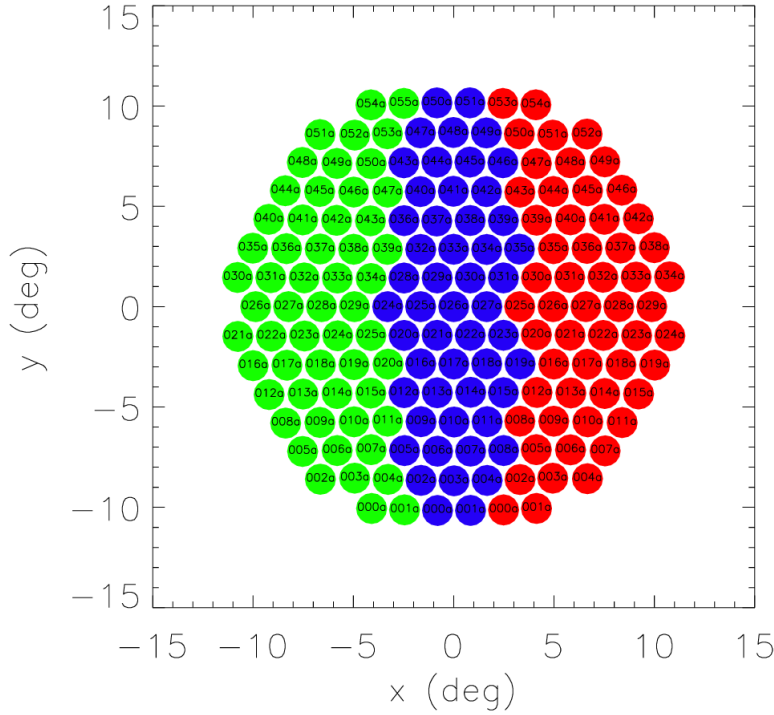


Figura 2.2: Posizione dei rivelatori in funzione della frequenza per Swipe. I rivelatori in verde sono associati alla frequenza di $220 GHz$, quelli in blu alla frequenza di $240 GHz$ ed infine quelli in rosso alla frequenza di $140 GHz$

2.1.1 I rivelatori di SWIPE

Il sistema SWIPE utilizza *rivelatori bolometrici TES* a ragnatela che ricevono la radiazione dal piano focale con l'ausilio di *feedhorns*, come risulta osservabile in **Figura 2.3**:

Su ognuno dei due piani focali sono presenti 110 rivelatori per la frequenza di $140 GHz$, 112 per quella di $220 GHz$ e 104 per il canale a $240 GHz$. I NET dei rivelatori sono rispettivamente $16 \mu K/\sqrt{Hz}$, $66 \mu K/\sqrt{Hz}$ e $138 \mu K/\sqrt{Hz}$.

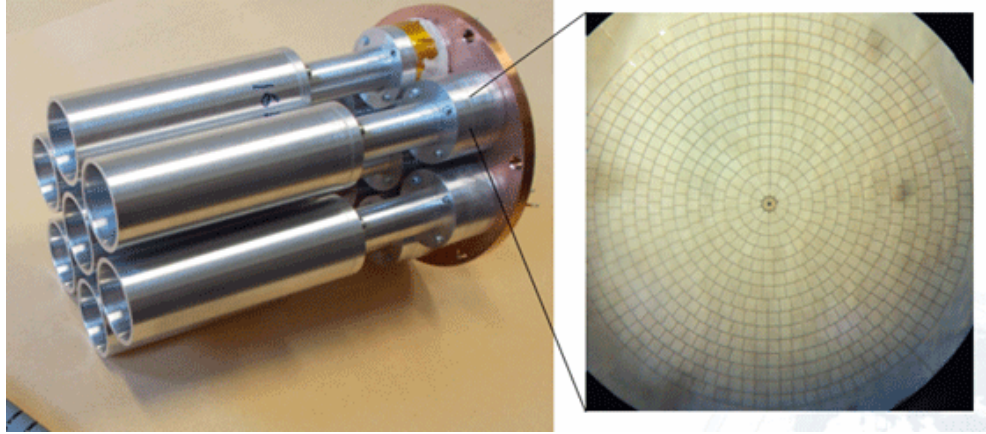


Figura 2.3: Foto di un rivelatore di Swipe, nella foto a sinistra è visibile il sistema a *feedhorns* atto a canalizzare la radiazione incidente sul rivelatore, mentre nella foto a destra è mostrata la struttura a ragnatela del rivelatore bolometrico.

2.1.2 Il modulatore in polarizzazione

Il segnale in ingresso è modulato tramite l'utilizzo di una *Half Wave Plate* (HWP) da 50 cm di diametro. Essa è posizionata immediatamente dietro l'apertura e i filtri termici. L'orientazione della HWP viene modificata di 22.5 gradi (con una frequenza da individuare) utilizzando un *rotatore criogenico* come quello mostrato in **Figura 2.4** in modo da poter acquisire entrambi i parametri di stokes da un singolo rivelatore. Tuttavia, la possibilità di modulare il segnale tramite una HWP rotante a velocità angolare costante è in fase di sperimentazione.

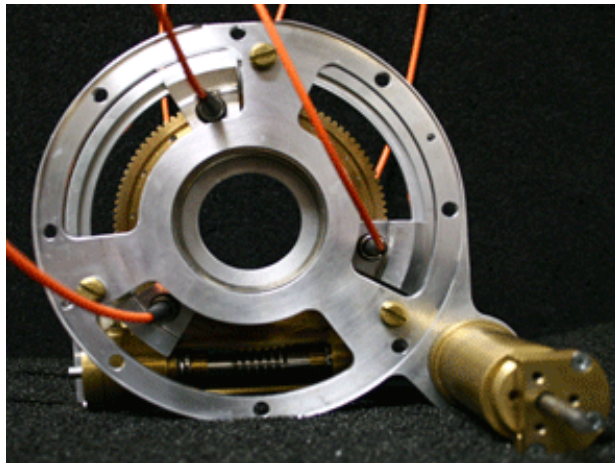


Figura 2.4: Esempio del dispositivo di Pilot [19] atto a ruotare il modulatore di polarizzazione.

2.2 Descrizione del simulatore CONVOLVER

I dati acquisiti da SWIPE in funzione dei parametri strumentali liberi sono stati simulati tramite l'utilizzo del software *Convolver*.

Esso è scritto in *Fortran90* ed è pensato per essere parallelizzato per detector, in particolare ogni MPI process si occupa di un detector.

Data una mappa in input e una posizione geografica, simula la frazione di cielo osservata durante il periodo della missione, basandosi sull'angolazione iniziale rispetto all'orizzonte del rivelatore e il range totale di variazione di elevazione nel periodo della missione.

Dato l'angolo iniziale dell'HWP è inoltre possibile simulare la sua rotazione durante la missione, impostando una rotazione di tipo continuo, con una data frequenza di rotazione per minuto, o a step, selezionando la variazione di angolo per singolo step e il numero di step per ora.

La mappa in input corrisponde alla mappa dei foreground galattici che ostacolano la misura dei modi B. La contaminazione data dai foreground è approfondita nella **Sezione 3.1.2**. Il risultato dell'osservazione sarà quindi riportato all'utente sotto forma di file .fits, che potrà essere graficato sfruttando il modulo *healpy* di Python o *HEALpix* di IDL. In particolare nel file .fits generato sono contenuti i seguenti output per la frazione di cielo osservato :

- la mappa in temperatura T ;
- la mappa associata al parametro di Stokes U ;
- la mappa associata al parametro di Stokes Q ;
- la varianza associata a T , Q ed U ;
- le covarianze TQ , TU , QU .

I pixel della frazione di cielo non osservata durante la missione avranno per tutte le mappe un valore pari a `!HEALPIX.BAD_VALUE = $-1.637\,50 \times 10^{30}$` . I parametri variabili della simulazione invece verranno letti dal programma nella chiamata tramite il passaggio del documento *params.ini*.

Di conseguenza risulta possibile provare diverse configurazioni dei parametri per la missione senza riaccedere al listato originale ma semplicemente variando i parametri di default scritti nel file *params.ini*.

Di seguito si elencano i principali parametri liberi, i quali possono essere sfruttati dal convolver per eseguire la simulazione. I programmi sviluppati e utilizzati dal gruppo di laboratorio possono essere visionati in **Appendice B**.

2.2.1 Coordinate di partenza della missione

Il simulatore permette di lanciare la missione da qualsiasi punto sulla terra a patto di fornire le opportune coordinate geografiche, cioè Latitudine e Longitudine.

Facendo partire il pallone da un punto diverso sulla terra, si osserverà una frazione di cielo differente. Cambiando le coordinate opportunamente e tenendo fissi gli altri parametri, la frazione di cielo osservata rispetto alla mappa intera può aumentare o diminuire. Ciò è legato anche al cambiamento nella copertura del cielo osservato.

2.2.2 Elevazione iniziale e range di elevazione

Due parametri fondamentali, grazie ai quali è possibile migliorare le osservazioni, sono l'*elevazione iniziale* e il *range di elevazione*.

L'*elevazione iniziale* rappresenta l'elevazione dello strumento in gradi rispetto all'orizzonte, mentre il *range di elevazione* indica l'elevazione totale nell'arco dell'intera durata della missione.

L'elevazione dello strumento viene modificata ogni giorno della quantità *elevation range/durata della missione*.

Per quanto il simulatore accetti qualsiasi valore combinato di parametri *elvstrt/elvrng* bisogna tuttavia tenere conto del fatto che il reale apparato non è progettato per osservare con una inclinazione rispetto all'orizzonte superiore ai 60° . Di conseguenza è consigliata una scelta di questi due parametri tali che $elvstrt + elvrng < 60^\circ$.

Questi parametri, insieme alle coordinate di partenza della missione, sono fondamentali per la determinazione della frazione di cielo osservata e il tempo impegnato nell'osservazione di ogni pixel della mappa osservata. Di conseguenza, mediante un opportuna combinazione di questi due parametri, è possibile incrementare il numero di pixel osservati e la qualità degli stessi.

2.2.3 Lunghezza della missione in giorni

Tale parametro rappresenta la durata in giorni che l'apparato LSPE impiega nell'osservazione del cielo. I limiti fisici della missione impongono una scelta quasi obbligata di questo parametro: non è possibile operare una previsione accurata rispetto all'esperimento reale aumentando la durata della missione simulata.

2.2.4 Frequenza di Campionamento

Questo parametro rappresenta la frequenza di acquisizione dell'immagine per i rivelatori. Imponendo, ad esempio, una frequenza di campionamento pari a 100 Hz , il sistema acquisisce 100 immagini al secondo da ciascun rivelatore attivo nella simulazione.

Aumentando la frequenza di campionamento, in principio, si hanno numerosi dati in ingresso per ciascun rivelatore sul piano focale. Bisogna tuttavia considerare i limiti strumentali dell'apparato determinati dall'elettronica. Impostare una frequenza di acquisizione troppo elevata, rispetto ai tempi scala dell'elettronica, comporterebbe una corruzione dei dati osservati in ingresso e si finirebbe per peggiorare i risultati dell'osservazione anziché migliorarli.

2.2.5 Velocità di rotazione dello strumento

Il parametro rappresenta la velocità di rotazione del payload, espresso in giri compiuti dal payload per minuto (*RPM*). Si osserva, però, che una velocità di rotazione troppo elevata non è riproducibile fisicamente.

2.2.6 Rotazione dell'HWP

Si ricorda che è possibile simulare la rotazione dell'HWP in modo continuo o a step. Nel primo caso si può impostare una frequenza di rotazione dell'HWP in *Hz*; nel secondo caso invece bisogna impostare il numero di step per ora e la variazione dell'angolo per ogni step.

La rotazione continua, come implementata nel simulatore, è ancora in fase di sperimentazione.

2.2.7 Rumore e convoluzione dei beam

Risulta possibile introdurre nella mappa in uscita il rumore $1/f$.

L'osservazione può anche essere simulata sfruttando dei beam non gaussiani. In tal caso è necessario fornire al simulatore il percorso a un file con la lista dei beam da convolvere e il raggio di convoluzione dei beam in gradi.

2.2.8 Caratteristiche del sistema di rivelatori

Le caratteristiche dei due piani focali del telescopio, con la relativa posizione dei rivelatori, la loro frequenza di lavoro e altre informazioni caratterizzanti gli strumenti usati devono essere forniti al simulatore nel file denominato *InstrumentDB*.

I rivelatori da usare nella simulazione potranno poi essere attivati o disattivati direttamente dal *params.ini*, aggiungendoli nella sezione *detectors* tramite il loro codice identificativo.

Bisogna tuttavia osservare che il carico di lavoro della macchina, aumentando il numero di rivelatori attivi, incrementa notevolmente, fino ad essere eccessivo nel caso non si stiano eseguendo simulazioni in parallelo.

Capitolo 3

Strategia osservativa per LSPE

Lo scopo delle simulazioni effettuate sul server *planck.roma1.infn.it* è quello di individuare un insieme di parametri che ottimizzino la riuscita della missione. A tal fine, sono stati utilizzati diversi criteri e metodi che verranno esposti in questo capitolo.

L'analisi delle simulazioni e la costruzione della pipeline sono state effettuate utilizzando le routines di *HEALpix* implementate in IDL e in Python. I codici sviluppati e utilizzati si trovano in appendice B.

3.1 Operazioni preliminari

3.1.1 Parametri considerati

Dei parametri di interesse per l'esperimento elencati nel **Capitolo 2.2** alcuni sono stati fatti variare per studiare l'effetto di essi sull'osservazione delle mappe in input, mentre altri sono rimasti fissi in tutte le simulazioni. Vale lo stesso per alcune opzioni di mapmaking.

Per quanto riguarda il luogo di lancio, sono state effettuate simulazioni sia considerando un lancio da Kiruna che da Longyearbyen. I parametri di elevazione iniziale scelti variano tra 30° e 45° , mentre il range totale di elevazione è scelto di volta in volta pari a 5° , 10° oppure 15° .

La lunghezza della missione è stata considerata pari a 13 giorni, con inizio il primo gennaio 2017. Tuttavia si ritiene che un cambio di data non abbia un particolare effetto sui risultati ottenuti, in quanto il payload è dotato di una velocità di rotazione uniforme, quindi lo strumento osserverebbe la medesima zona di cielo in qualsiasi periodo dell'anno. Chiaramente la libertà della scelta della data del lancio è in ogni caso condizionata dalla richiesta che la missione venga svolta durante il buio inverno polare.

Sono state studiate eventuali variazioni nei risultati variando lo spin del payload. A tal fine si è presa in esame una missione lanciata da Kiruna con elevazione iniziale pari a 30° e range di elevazione pari a 15° . La velocità angolare è stata fatta variare tra 1 *rpm* e 5 *rpm*, ottenendo variazioni dell'ordine dello 0.001% nel numero dei pixel accettabili (selezionati con il "criterio del lensing", esposto nella **Sezione 3.1.3**). Si ritiene sia ragionevole supporre che questo risultato sia estendibile alle altre configurazioni di

(*elevationstart*, *elevationrange*) e che pertanto sia indice di una sostanziale indipendenza della buona riuscita della missione dallo spin del payload. Si è pertanto considerata una velocità angolare di 3 rpm .

Per quanto riguarda il rate di acquisizione, si è considerato un sampling rate pari a 20 Hz . Venendo alla strumentazione atta alla modulazione della polarizzazione, la wire grid è rimasta fissa a 45° , mentre l'HWP è stata mossa a step di 22.5° con una di frequenza di 20 step/ora . L'effetto di una modifica dell'angolo della wire grid non è stato indagato in questo lavoro, così come quello di implementare una HWP rotante a velocità angolare costante.

Sono stati assunti beam gaussiani dell'ampiezza di 84 arcmin FWHM, non includendo la convoluzione con i beam reali nella procedura di mapmaking, in quanto molto dispendiosa in termini di tempo di calcolo.

Per quanto riguarda le mappe in input e in output si è scelto di utilizzare $N_{side} = 256$ per non appesantire inutilmente le simulazioni con una risoluzione eccessivamente grande, che SWIPE non è comunque in grado di raggiungere.

Nelle simulazioni non è stato considerato il rumore di tipo $1/f$, che sarà comunque possibile filtrare in sede di analisi dati. L'unico rumore rilevante ai nostri scopi è quindi costituito dal NET dei rivelatori, come esposto nel **Capitolo 2**.

3.1.2 I foregrounds

Tramite l'apparato LSPE si vuole ottenere una misura dei *modi B* della polarizzazione della CMB. L'impedimento principale a questo scopo è dato dalla presenza di foregrounds polarizzati che inquinano il segnale. I foregrounds considerati in questo lavoro sono i seguenti:

- emissione termica da polvere interstellare ;
- emissione di sincrotrone ;
- AME (Anomalous Microwave Emission) ;
- Lensing gravitazionale da Large Scale Structures .

La Figura 3.1 mostra l'andamento in frequenza dei foreground rispetto alla CMB.

L'emissione di sincrotrone (legata al sincrotrone galattico), quella dovuta alla polvere e l'AME (presumibilmente dovuta a spinning dust, [12] e [13]) sono concentrate prevalentemente sul piano galattico, al contrario di quanto si osserva per il pattern di lensing. Quest'ultimo risulta essere legato al percorso della radiazione dalla superficie di ultimo scattering alla Terra, indipendentemente dai fenomeni fisici che avvengono nella Via Lattea.

Le mappe di foreground sono state generate dal Dr. *Luca Pagano*, secondo quanto descritto in [14].

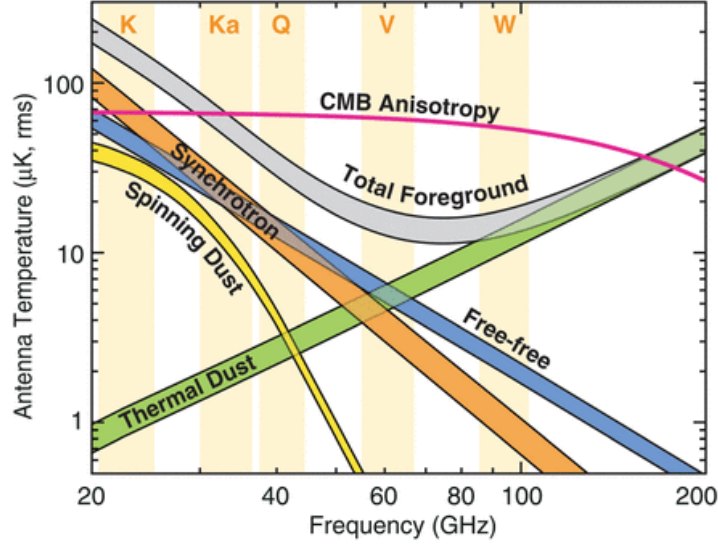


Figura 3.1: Andamento dei vari foreground e dell'emissione della CMB, [11].

3.1.3 Criteri di selezione

Il lensing

Uno degli obbiettivi di questo lavoro è costituito dall'individuazione di una zona di cielo in cui la contaminazione data dai foreground sia minima. A questo scopo si è individuato come primo parametro utile la deviazione standard del lensing da Large Scale Structures, data dalla seguente formula

$$\sigma_L^2 = \frac{1}{4\pi} \sum_{\ell \geq 2} C_\ell^{BB} (2\ell + 1) , \quad (3.1)$$

dove i C_ℓ^{BB} sono ottenuti dalla mappa di lensing fornita dai risultati della missione *Planck* in [6].

Il valore numerico di σ_L è stato calcolato essere pari a

$$\sigma_L = 0.0402 \mu K_{\text{CMB}} \text{ arcmin} .$$

Nelle simulazioni si sono considerati accettabili quei pixel che fossero entro $5\sigma_L$ oppure entro $10\sigma_L$, ottenendo di volta in volta frazioni di cielo più o meno grandi al variare del luogo di lancio dell'esperimento¹. Da un confronto tra le **Figure 3.4** e **3.3** con la **Figura 3.4**, si osserva che i pixel migliori sono al di fuori del piano galattico, come aspettato.

Simulazioni preliminari hanno mostrato che l'AME risulta completamente trascurabile per le frequenze di interesse di SWIPE. Considerando la frequenza alla quale è atteso un maggiore inquinamento dovuto all'AME, e cioè 140 GHz , il massimo di P , Q ed U risulta essere minore di σ_L di un ordine di grandezza. Una selezione dei pixel accettabili in base al criterio sopra esposto ha quindi avuto esito positivo per l'intera mappa di AME, a ciascuna frequenza. Di conseguenza, essa non verrà ulteriormente considerata nel resto di questo lavoro.

¹ Questa scelta è dettata dall'eliminazione dei pixel contaminati, evitando una selezione troppo rigida.

Dust only @140 GHz for P

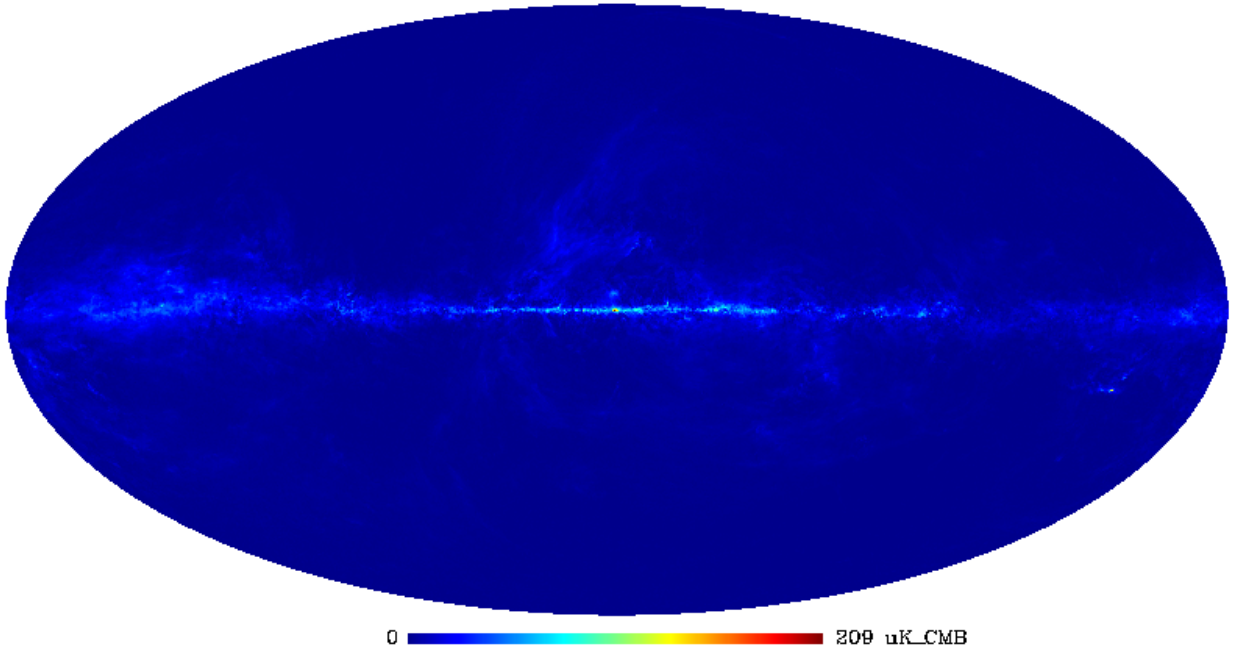


Figura 3.2: Mappa di dust @ 140 GHz in P

Dust only @140 GHz for P @5sigma

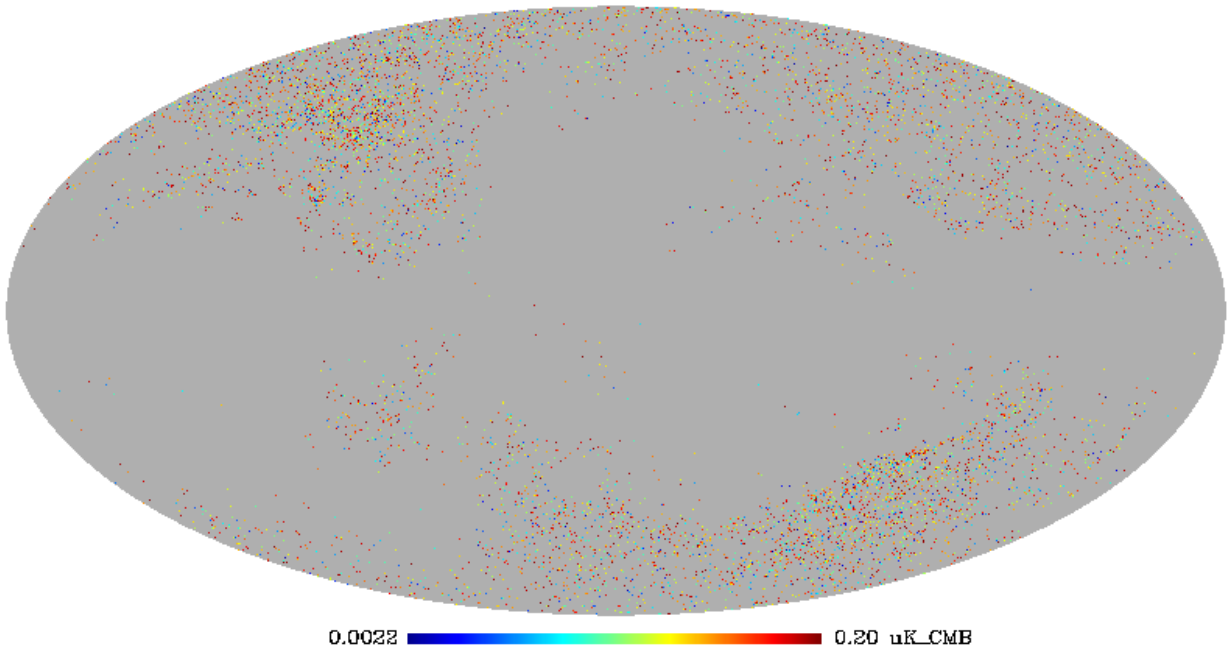


Figura 3.3: Mappa di dust @ 140 GHz in P. I pixel oscurati sono quelli per cui il segnale è maggiore di $5\sigma_L$

Dust only @140 GHz for P @10sigma

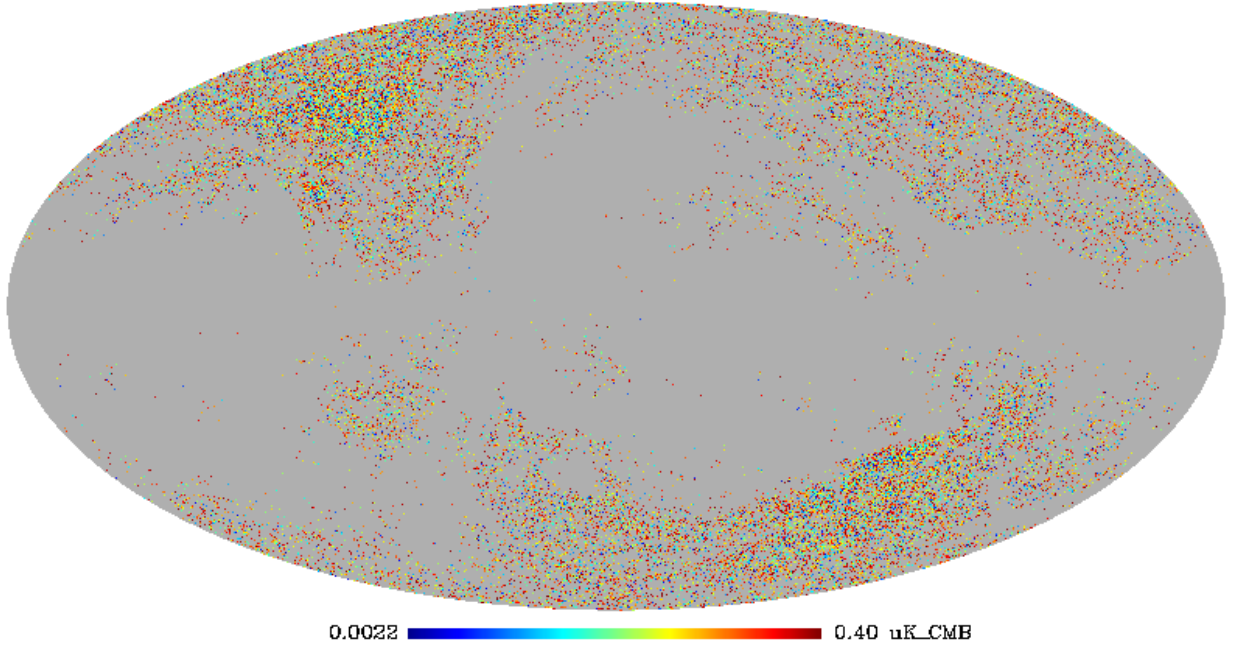


Figura 3.4: Mappa di dust @ 140 GHz in P. I pixel oscurati sono quelli per cui il segnale è maggiore di $10\sigma_L$

Il rumore della mappa

Un ulteriore parametro che si è utilizzato, al fine di ottimizzare l'osservazione, è definito come σ_{QQ} , calcolato mediante la seguente formula:

$$\sigma_{QQ} = \left(\sum_{i=1}^{N_{pix}} \frac{1}{\sigma_{pix}^2} \right)^{-1/2}, \quad (3.2)$$

dove σ_{pix}^2 rappresenta la varianza nella componente $P = \sqrt{Q^2 + U^2}$, (espressa in μK), calcolata per ogni singolo pixel dal codice in **Appendice B.4**. Il valore di σ_{QQ} può essere calcolato sui pixel ottimali o sui pixel osservati dallo strumento, cambiando opportunamente il valore di N_{pix} . Inoltre è possibile affermare che, nel momento in cui σ_{pix} risulta costante per ogni pixel, allora vale la seguente equazione:

$$\sigma_{QQ} = \frac{NET}{\sqrt{T_{tot}}}, \quad (3.3)$$

dove T_{tot} rappresenta la durata dell'intera missione. In quest'ultima definizione si osserva l'inversa proporzionalità tra il parametro σ_{QQ} e il tempo d'osservazione totale.

Il rumore della mappa può essere utilizzato come selettore dei parametri ottimali: il suo valore risulta essere inversamente proporzionale al tempo impiegato dal simulatore nel osservare il singolo pixel. Da ciò si deduce che minore è il valore di σ_{QQ} e maggiore è il tempo di osservazione del singolo pixel, dando una maggiore qualità del segnale ricevuto dal simulatore.

3.2 Simulazioni effettuate

Nella seguente sezione si affronta la discussione delle varie simulazioni, il cui scopo è quello di trovare la combinazione migliore dei parametri, descritti precedentemente, per osservare al meglio la *CMB*. Sono state svolte numerose simulazioni: all'inizio con i parametri sono stati modificati di poco, mentre successivamente sono stati fatti variare maggiormente, per coprire un range maggiore nello spazio dei parametri.

Risulta essere possibile raggruppare le simulazioni in quattro parti:

- **Simulazione 1** . Le prime simulazioni, effettuate mediante tre soli detector per canale di frequenza, si trovano in questo gruppo. In questa prima parte si è familiarizzato con l'utilizzo e la gestione del simulatore, delle mappe e dei linguaggi di programmazione necessari (IDL e *python*).
- **Simulazione 2** . Sono state effettuate simulazioni incentrate sulla ricerca della configurazione che permette di massimizzare la frazione di cielo osservata meno contaminata² .
Questa analisi ha portato ad una prima valutazione della scelta migliore dei parametri, da poter utilizzare poi nell'esperimento reale.
- **Simulazione 3** . Si è osservato che la scelta dei parametri ottimali è legata non solo al “criterio del *lensing*”, ma anche al tempo che lo strumento impiega nell'osservazione dei pixel migliori, ovvero al rapporto rumore. Una stima di questo è data dal parametro σ_{QQ} , descritto nella **Sezione 3.1.3** .
A differenza delle simulazioni precedenti, queste sono realizzate con dieci detector per ogni canale di frequenza, disposti opportunamente lungo il piano focale in **Figura 2.2** .
- **Simulazione 4** . L'ultimo gruppo di simulazioni è quello che rappresenta la parte conclusiva dello studio, in cui si analizzano le varie configurazioni e si cerca di ottenere quella combinazione di parametri ottimale per l'osservazione della *CMB*.

Nel successivo paragrafo si andrà a studiare quest'ultimo gruppo di simulazioni, poiché risultano essere le più complete e accurate dal punto di vista dell'analisi, rispetto alle altre simulazioni.

² La contaminazione è discussa nella **Sezione 3.1.3** .

3.3 Analisi simulazioni

Le simulazioni descritte ed analizzate in questa sezione si riferiscono al quelle dell'ultimo gruppo di simulazioni, descritto nella **Sezione 3.2** . La caratteristica in comune di tutte le configurazioni dei parametri è il fatto di utilizzare sempre gli stessi dieci rivelatori per ogni frequenza.

Il simulatore è impostato sulla variazione dei parametri che definiscono l'*elevation start* e l'*elevation range*, mentre l'analisi si divide in due grandi blocchi, determinati dalla scelta della soglia minima, che definisce la qualità del pixel osservato: si sceglie di utilizzare 5σ o 10σ .

Per rendere i risultati chiari e sintetici, si sceglie di inserire il tutto nelle tabelle riportate **Appendice A** in , e di graficare l'andamento delle quantità che definiscono l'efficacia del sistema di parametri utilizzato, in funzione dell'*elevation start* e dell'*elevation range*.

3.3.1 Coperture del cielo osservato

Ogni scelta di un insieme di parametri comporta una variazione della copertura del cielo osservato dall'esperimento. La scelta del luogo di lancio è determinante poichè si ha una netta distizione della frazione di cielo osservabile dalle due zone, come verrà evidenziato nella **Sezione 3.5**.

Si rimanda la visione ai grafici in **Figura 3.10** e in **Figura 3.11**.

3.3.2 Tabelle analisi dati

Nelle tabelle in **Appendice A**, sono presenti i dati relativi all'analisi delle simulazioni descritte precedentemente. I valori riportati sono:

- ElevRange : indica il valore del parametro *elevation range*, spesso in gradi;
- ElevStart : indica il valore del parametro *elevation start*, spesso anch'esso in gradi
- Obs.Pix : indica la percentuale di pixel osservati rispetto al numero complessivo di pixel³ ;
- Good.Pix.Obs , Good.Pix.tot : sono rispettivamente la percentuale di pixel buoni, secondo il criterio del lensing descritto nella **sezione 3.1.3**, rispetto al numero di pixel osservati e al numero di pixel totali della mappa;
- Good. σ , Tot. σ : rappresentano il valore del parametro σ_{QQ} , descritto nel paragrafo 3.1.3, calcolato rispettivamente sui pixel buoni e sui pixel totali osservati.

³ Il numero totale di pixel in cui è divisa una mappa con $n_{side} = 256$ risulta essere $N_{pix} = 12n_{side}^2 = 786432$ pixel.

Per studiare al meglio i risultati ottenuti si rimanda alla sezione successiva, in cui vengono discussi i grafici ottenuti mediante i dati nelle tabelle fin'ora descritte.

3.3.3 Grafici analisi dati

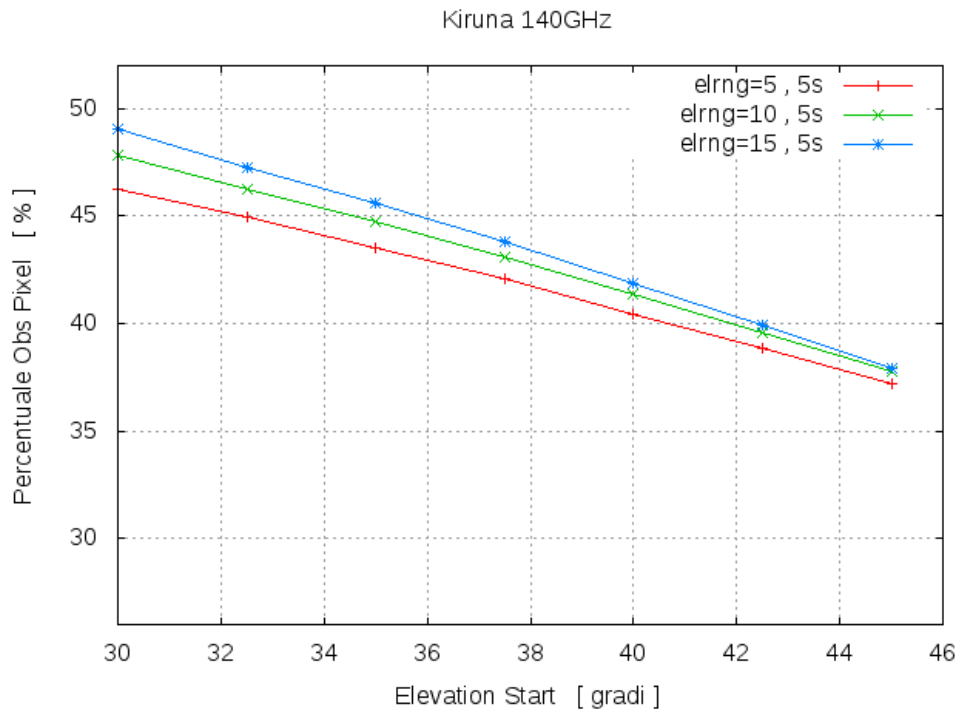
Si riportano in questa sezione i grafici delle quantità che determinano il numero di pixel migliori: la percentuale dei pixel accettati rispetto ai pixel totali della mappa, il valore del parametro σ_{QQ} calcolato solo su di essi⁴.

Osservando i grafici, si possono trarre le seguenti conclusioni:

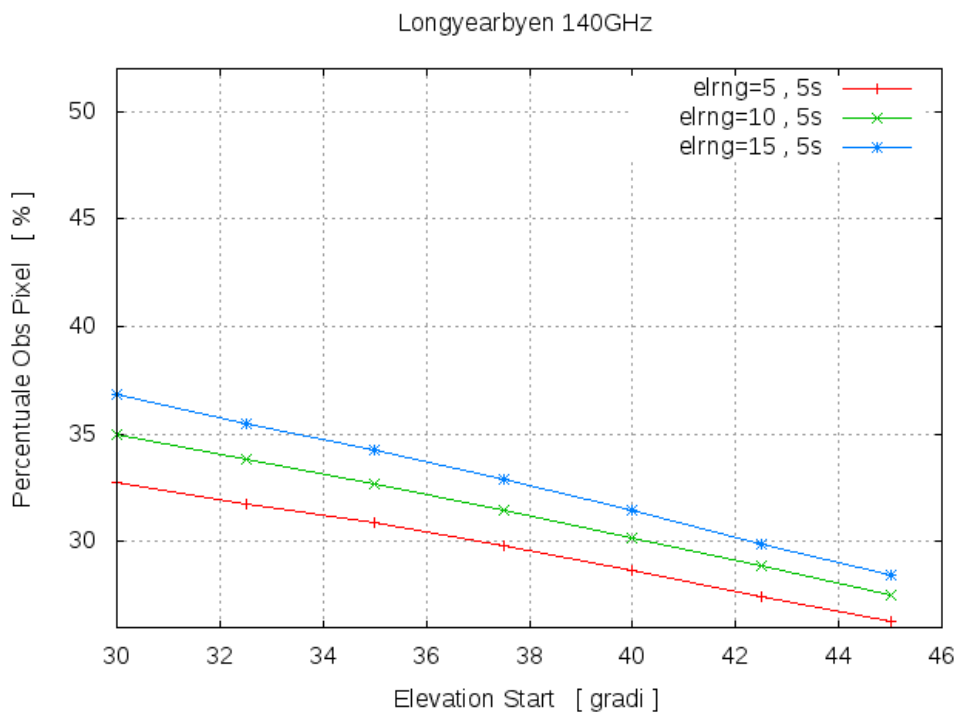
- nei grafici in **Figura 3.6**, la scelta migliore dei parametri risulta essere quella tendente a valori bassi di elevazione iniziale, essendo alto il valore della percentuale di pixel ottimali;
- in **Figura 3.7** si evince, invece, che ad elevati valori di elevazione iniziale si ottengono le configurazioni migliori, essendo minimi i valori di σ_{QQ} ;
- si nota, in **Figura 3.5**, che la percentuale di pixel osservati per le varie configurazioni scelte è una funzione decrescente dell'elevation start e crescente dell'elevation range;
- aumentando la soglia del lensing usata si aumenta l'efficienza dei parametri ottimali in tutti i casi descritti ora.

Per ottenere la combinazione migliore dei parametri, bisogna dunque tener conto di numerosi fattori. Ciò porta alla ricerca di quella configurazione che soddisfi contemporaneamente al meglio i vari criteri di selezione.

⁴ Si osserva dalle tabelle in **Appendice A** che il valore di questo parametro, calcolato su tutti i pixel, non cambia al variare di *elevation start*

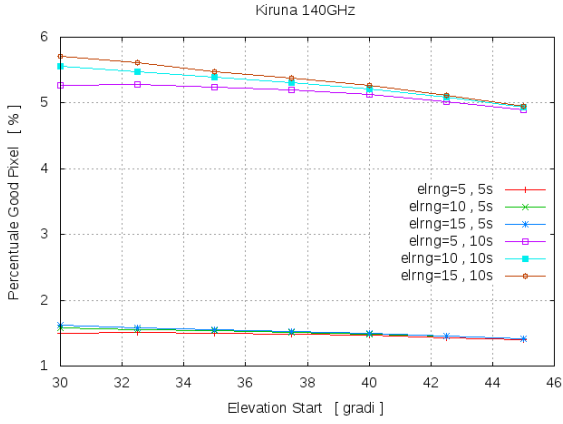


(a) Kiruna 140 GHz.

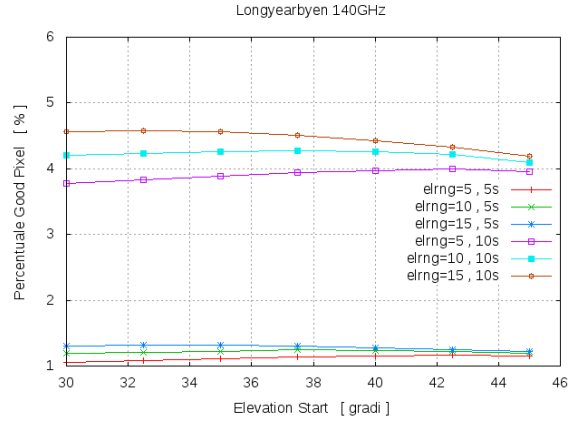


(b) Longyearbyen 140 GHz.

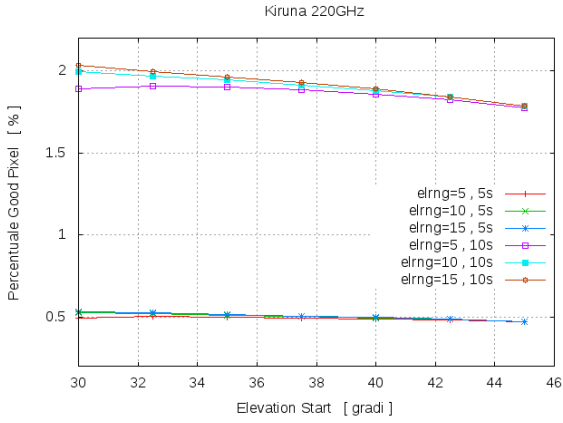
Figura 3.5: Andamento della percentuale dei pixel osservati, in funzione dell'*elevation start* e dell'*elevation range*, per le simulazioni effettuate da *Kiruna* (in alto) e da *Longyearbyen* (in basso), per la frequenza di 140 GHz.



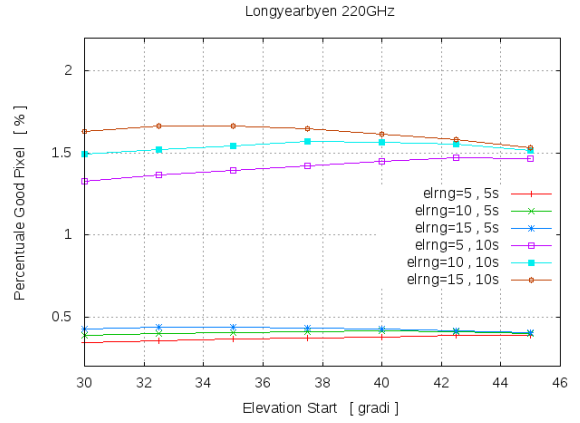
(a) Kiruna 140 GHz.



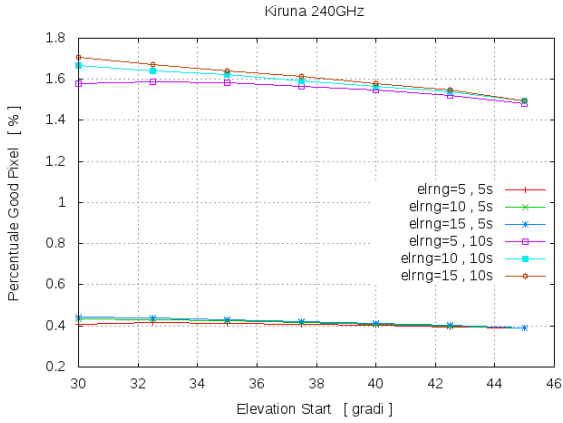
(b) Longyearbyen 140 GHz.



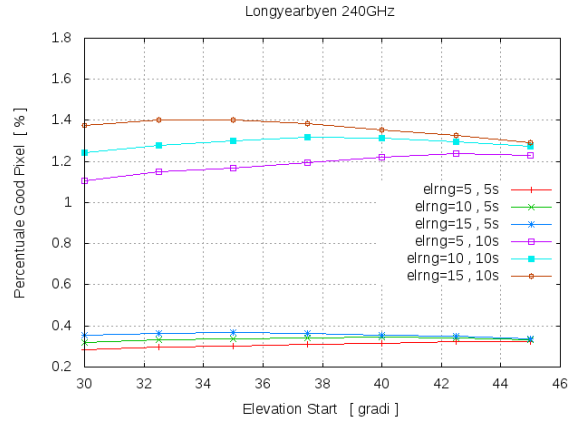
(c) Kiruna 220 GHz.



(d) Longyearbyen 220 GHz.

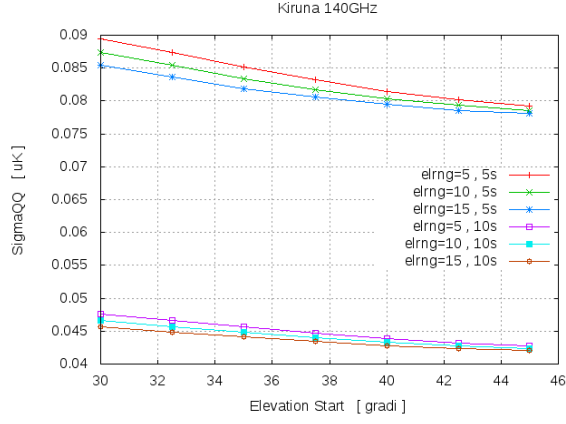


(e) Kiruna 240 GHz.

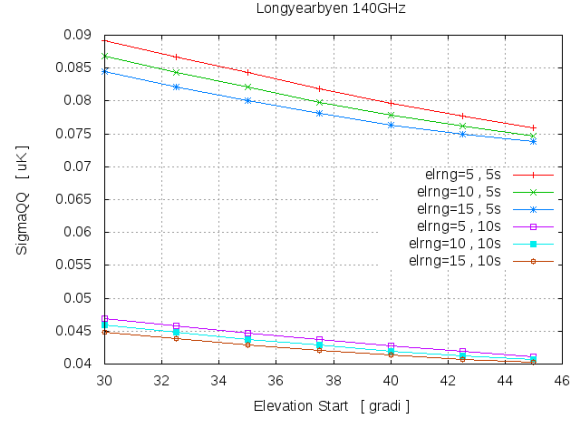


(f) Longyearbyen 240 GHz.

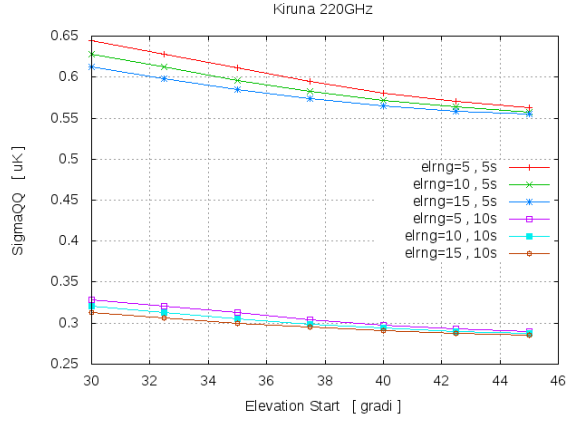
Figura 3.6: Andamento della percentuale di pixel buoni sul totale, in funzione dell'elevation start e dell'elevation range, per le simulazioni effettuate da Kiruna (a sinistra) e da Longyearbyen (a destra), per ogni frequenza osservata.



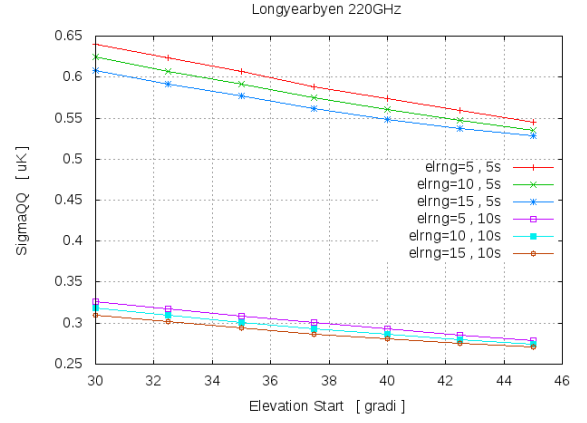
(a) Kiruna 140 GHz.



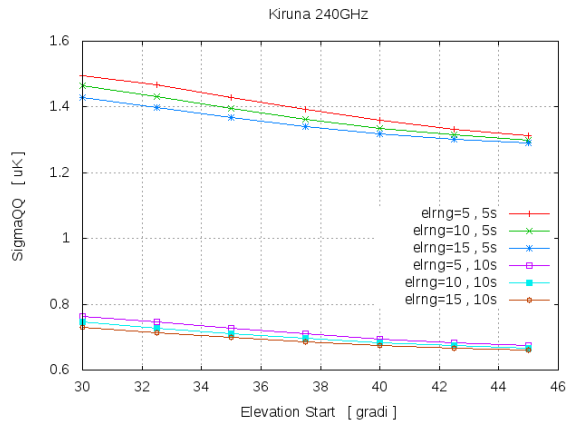
(b) Longyearbyen 140 GHz.



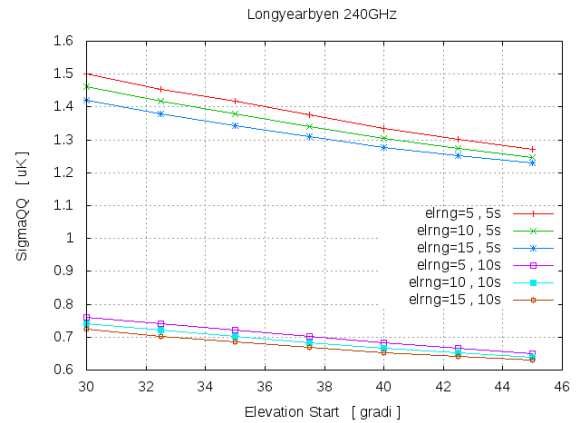
(c) Kiruna 220 GHz.



(d) Longyearbyen 220 GHz.



(e) Kiruna 240 GHz.



(f) Longyearbyen 240 GHz.

Figura 3.7: Andamento del parametro σ_{QQ} , in funzione dell'elevation start e dell'elevation range, per le simulazioni effettuate da *Kiruna* (a sinistra) e da *Longyearbyen* (a destra), per ogni frequenza osservata.

3.4 Effetto dei foregrounds sulla stima di r

In questa sezione si presentano i risultati di simulazioni mirate ad ottenere limiti teorici alla misura del *tensor-to-scalar ratio* r . I risultati che vengono riportati sono da intendersi come stime che nella realtà potrebbero variare, a causa di effetti di non idealità non inclusi nelle simulazioni, come spiegato nella **Sezione 3.5**.

3.4.1 Le simulazioni

Si sono considerate missioni lanciate da Kiruna e Longyearbyen. Per ognuno dei due luoghi di lancio l'elevazione iniziale è stata fatta variare tra 30° e 45° , a step di 5° . Per fissata elevazione iniziale, il range di elevazione ha assunto valori pari a 5° , 10° e 15° . Si sono considerati esclusivamente i detectors a 140 GHz , poiché risulta essere la frequenza alla quale l'inquinamento da parte dei foreground è minimo, in relazione alla successiva fase di *component separation* per i dati reali. Sono stati utilizzati 10 detectors per ogni canale su un singolo piano focale, posizionati tre in alto, tre in basso e quattro al centro, con riferimento alla **Figura 2.2**. Nell'analisi successiva si è tenuto conto del numero di detectors utilizzati, riscalandolo il tutto con il numero totale di detectors per ogni canale in frequenza.

L'obiettivo di queste simulazioni è quello di massimizzare la sensibilità su r , ovvero minimizzare la seguente quantità [15]:

$$\sigma_r = \frac{0.1}{f_{sky}} \left(\sum_{\ell_{min}}^{\ell_{max}} \frac{2\ell + 1}{2} \left[\frac{C_\ell^{IGW}(r = 0.1)}{C_\ell^{fg} + C_\ell^n + C_\ell^{lens}} \right]^2 \right)^{-1/2}, \quad (3.4)$$

dove f_{sky} è la frazione di cielo osservata, $C_\ell^{IGW}(r = 0.1)$ sono i C_ℓ dei modi B dati dalle onde gravitazionali, ipotizzati per $r = 0.1$, mentre C_ℓ^{fg} , C_ℓ^n e C_ℓ^{lens} sono rispettivamente i C_ℓ dei modi B indotti dai foregrounds galattici, dal rumore strumentale e dal lensing. Si osserva che l'argomento della sommatoria è legato al rapporto segnale/rumore della misura, e quindi risulta di particolare interesse conoscere il suo comportamento. Il valore numerico della quantità definita in 3.4 è di fatto il minimo r rivelabile, con significatività del 68%.

3.4.2 I diversi contributi a σ_r

Per quanto riguarda $C_\ell^{IGW}(r = 0.1)$ e C_ℓ^{lens} , essi sono stati calcolati mediante il codice CAMB (*Code for Anisotropies in the Microwave Background* [17]). Al contrario, le simulazioni hanno fornito C_ℓ^{fg} e C_ℓ^n .

Il foreground galattico.

I C_ℓ^{fg} sono stati ottenuti utilizzando il metodo della funzione di trasferimento, mediante i seguenti passaggi:

1. Si genera una mappa con uno spettro di potenza qualunque con la routine *synfast*. Qui si è scelto $C_\ell = 1000(\ell + 1)^{-2.4}$ in quanto simile in forma a quello atteso per i foreground (si veda ad esempio [15]) ;
2. Si osserva la mappa per le diverse configurazioni di range di elevazione, elevazione iniziale e luogo di lancio ;
3. Si calcolano i C_ℓ delle mappe osservate grazie alla routine *anafast* ;
4. Si costruisce una funzione di trasferimento data da:

$$T_\ell = \frac{C_{\ell,in}}{C_{\ell,out}} ; \quad (3.5)$$

5. Si procede con l'osservazione delle mappe di foreground (polvere e sincrotrone combinate) ;
6. Si calcolano infine i C_ℓ del foreground come nella seguente formula:

$$C_\ell^{fg} = T_\ell C_{\ell,obs}^{fg} , \quad (3.6)$$

dove $C_{\ell,obs}^{fg}$ è ottenuto con *anafast*.

Il metodo è stato implementato mediante una pipeline mista in Python e IDL. L'utilizzo di una funzione di trasferimento per il calcolo dei C_ℓ è necessario nel momento in cui l'osservazione è limitata a una frazione di cielo. Infatti, senza il suo utilizzo, la potenza del segnale alle diverse scale angolari risulterebbe falsata dal fatto che non si ha a disposizione l'intero cielo per calcolarla. Questo metodo, sebbene piuttosto rozzo, è in grado di fornire risultati attendibili, almeno al primo ordine.

Il rumore strumentale.

Si discutono ora gli effetti del rumore intrinseco dei detector. Il suo spettro di potenza è dato dalla seguente equazione:

$$C_\ell^n = \frac{4\pi f_{sky} NET_{array}^2}{T_{obs}} , \quad (3.7)$$

dove $NET_{array} = NET/\sqrt{N_{detectors}}$. Il NET (*Noise Equivalent Temperature*) equivale al minimo segnale in temperatura rivelabile, a una data frequenza. Al contrario di quanto fatto per i foreground galattici, in questo caso non è necessario utilizzare una funzione di trasferimento, poiché l'informazione sulla frazione di cielo osservata è già presente nella definizione. Il valore numerico del NET per singolo detector è, alla frequenza di 140 GHz, pari a $16 \mu K/\sqrt{\text{Hz}}$.

3.5 I risultati

Per ogni configurazione dei parametri di osservazione, si è valutato il contributo alla sommatoria presente nell'equazione (3.4) dei diversi contaminanti, azzerando ora il contributo dei foreground galattici, ora quello del rumore strumentale, per osservare a quali scale angolari risultano dominanti rispettivamente. Successivamente si è ipotizzato che effettuando la *component separation* si possa ottenere uno spettro di foreground galattici residui pari a un decimo in ampiezza di quello osservato e, da ultimo, si è anche considerata una efficienza nel delensing pari al 90%, ottenendo il miglior σ_r per il run selezionato.

Nelle tabelle 3.3 e 3.6 sono mostrati i valori numerici di σ_r ottenuti dalle simulazioni per le diverse configurazioni di range di elevazione ed elevazione iniziale. Si osserva che in media si ha un miglioramento di un ordine di grandezza in seguito alla *component separation*. Considerando anche il delensing, si ottengono valori ancora minori, sebbene questa miglioria non sia determinante. I valori ottimali di σ_r sono selezionati con il colore arancione. Per Kiruna la configurazione più efficace è dunque data dalla scelta di $elevationstart = 45^\circ$ e $elevationrange = 15^\circ$, mentre per Longyearbyen le configurazioni relative a ($elevationstart = 30^\circ$, $elevationrange = 10^\circ$) e ($elevationstart = 35^\circ$, $elevationrange = 15^\circ$) risultano egualmente accettabili. In assoluto, il miglior valore di σ_r si ottiene lanciando da Kiruna con i suddetti parametri.

In ogni caso, è opportuno fare le seguenti osservazioni:

- nelle simulazioni si è considerato lo strumento come ideale. In particolare, non si sono considerati beam non gaussiani, la presenza del rumore $1/f$, il drift della traiettoria effettiva del payload rispetto a quella simulata;
- nell'analisi si è assunta una performance ottimale nell'ambito della *component separation* e del delensing, cosa che non è detto sia fattibile in sede di analisi dei dati acquisiti dallo strumento. Tale osservazione resta di poco conto per quanto riguarda il delensing, che incrementa irrisoriamente la sensibilità. Del resto LSPE è progettato per ottenere una misura di polarizzazione su larga scala, laddove il contributo del lensing è minore. Inoltre la rimozione dei foreground è stata considerata identica per tutte le configurazioni, cosa che non risulta in generale vera.

In Figura 3.8 si riporta il contributo delle sorgenti di contaminazione del segnale, che danno luogo all'andamento complessivo dell'argomento della sommatoria presente nell'equazione (3.4) per il miglior dato relativo a Kiruna, il quale a sua volta è graficato in **Figura 3.9**.

Si osserva che la peculiarità della forma dello spettro dei foreground galattici è dovuta al metodo con cui questi vengono calcolati. Questo giustifica la forma dei grafici riportati in **Figura 3.9**, nel quale è conservata la memoria del comportamento dello spettro dei foreground. Inoltre si può notare come l'andamento mostrato in **Figura 3.9** sia consistente con quello degli spettri in **Figura 3.8**: ad alti ℓ domina il rumore (e infatti, quando si considera nullo, il rapporto segnale/rumore aumenta), mentre a bassi ℓ dominano i foreground galattici (per lo stesso motivo). Di particolare rilevanza è il fatto che l'effetto di un delensing ottimale risulta minimo.

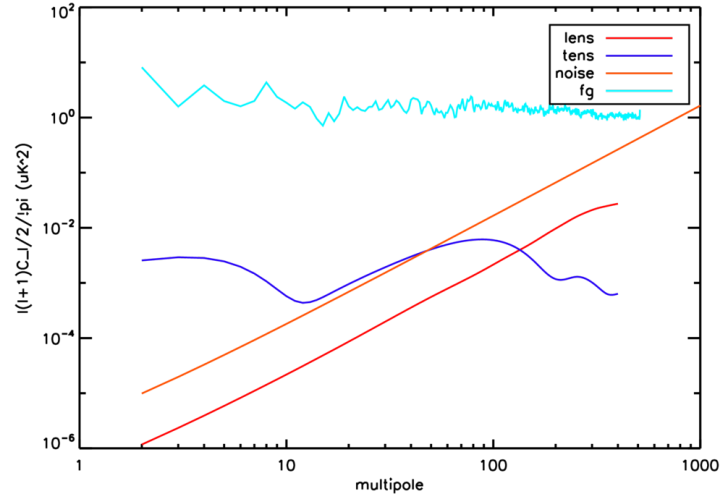
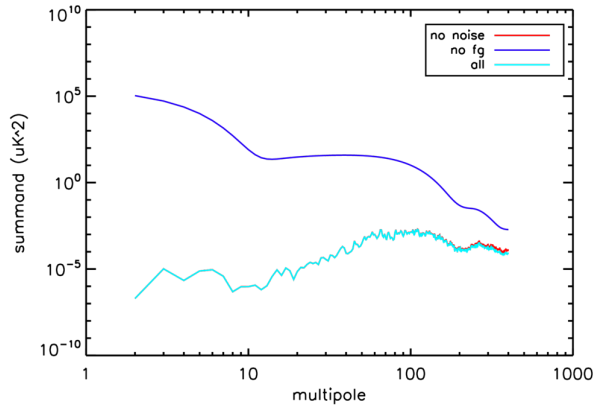
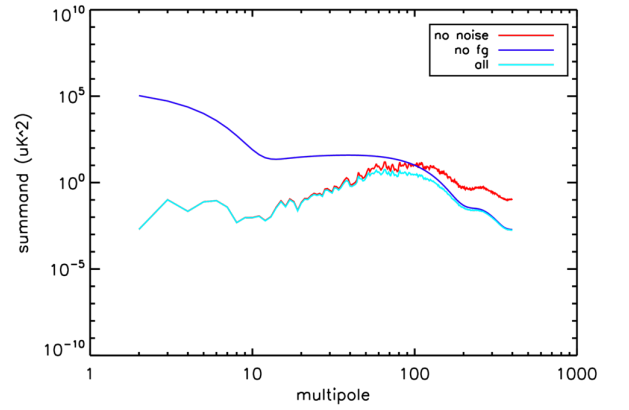


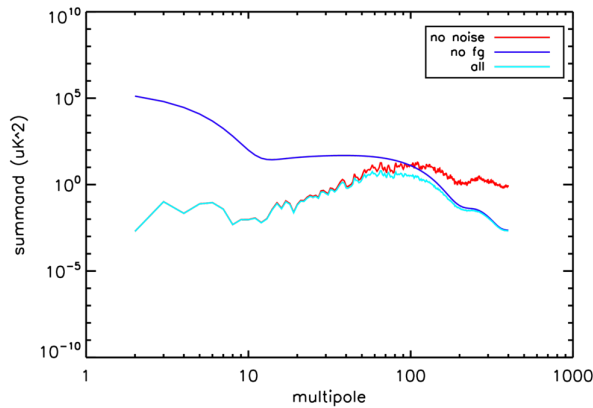
Figura 3.8: Spettri di potenza per rumore, lensing, modi tensoriali per $r=0.1$ e foregrounds.



(a) Kiruna:raw



(b) Kiruna: comp. sep.



(c) Kiruna: comp. sep. +delensing

Figura 3.9: Andamento del rapporto segnale/rumore. Caso (a): senza aver operato alcuna pulizia dei dati. Caso (b): dopo aver abbattuto il foreground di un fattore 100. Caso (c): come (b) e avendo considerato un delensing in grado di ridurre il contributo del lensing di un fattore 10.

Q for Kiruna elvstart=35 elvrng=15 @140GHz

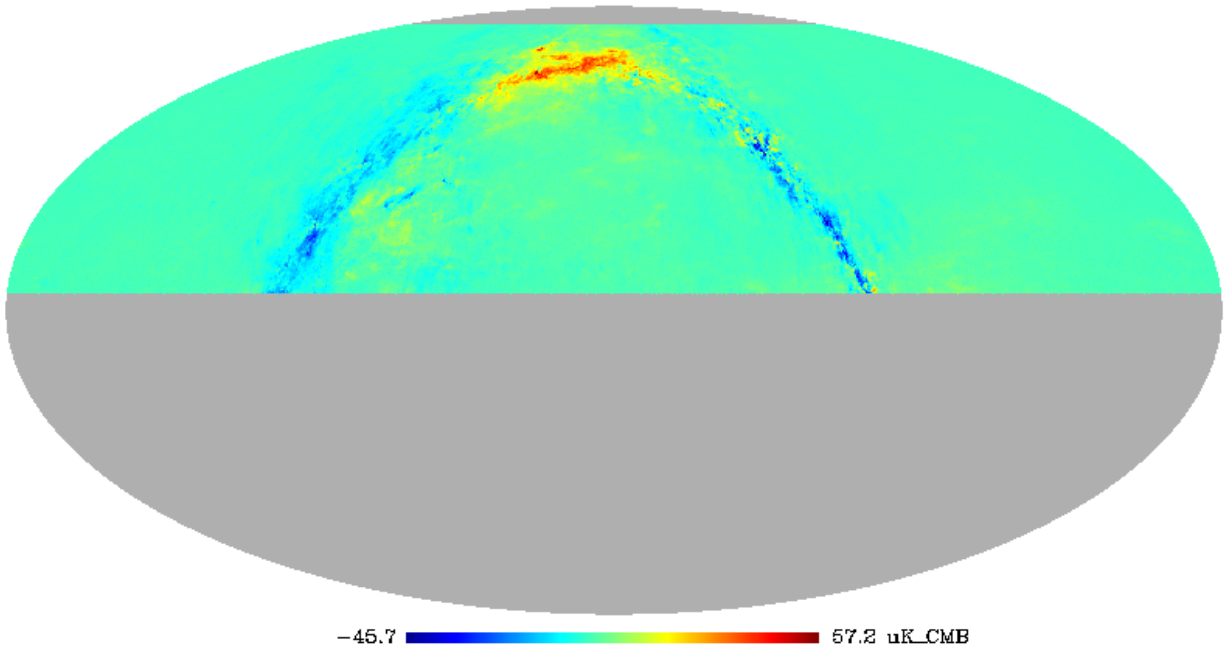


Figura 3.10: Copertura osservata da Kiruna a 140 *GHz*, in cui elvstart=35° ed elvrng=15°

Q for Longyearbyen elvstart=35 elvrng=15 @140GHz

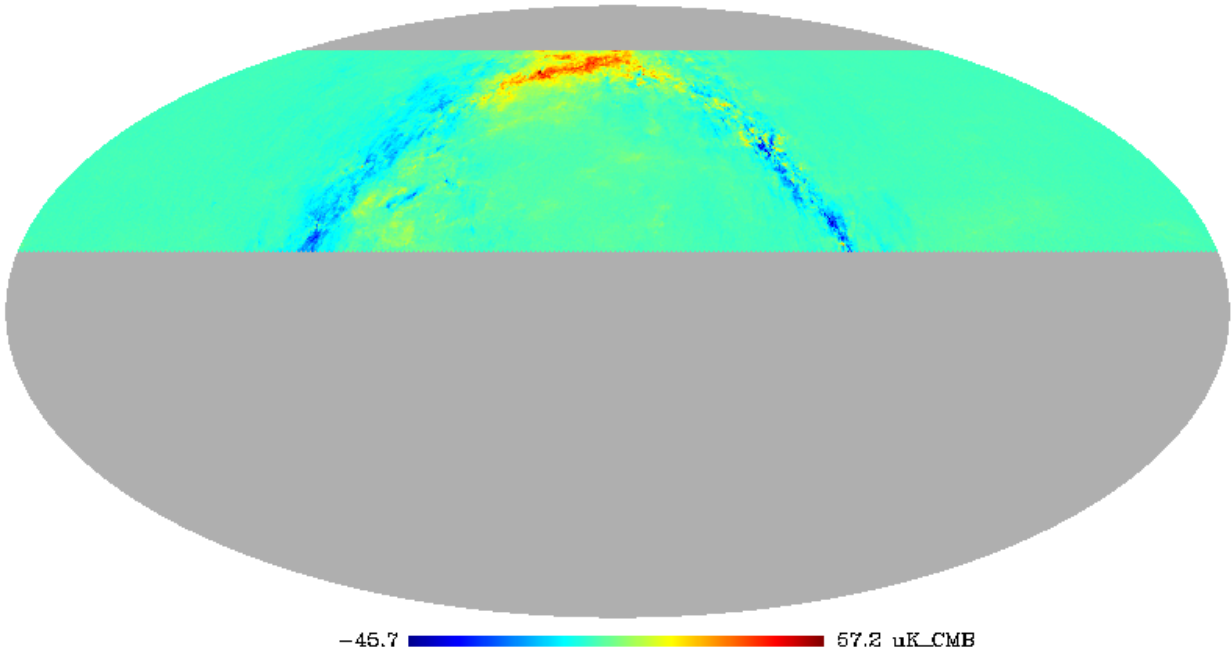


Figura 3.11: Copertura osservata da Longyearbyen a 140 *GHz*, in cui elvstart=35° ed elvrng=15°

Al fine di testare la validità di quanto trovato, si è operato un confronto con i risultati di simulazioni basate sul codice numerico *CMB4CAST*, elaborato da *Errard & Feeney, Peiris and Jaffe* [16], per il quale è prevista una interfaccia online (<http://portal.neresc.gov/project/mp107/index.html>) supportata dal NERSC (*National Energy Research Scientific Computing centre*). I parametri da fornire al simulatore sono:

- la frazione di cielo osservata (si assumono elevate latitudini galattiche, per considerare le zone di cielo meno contaminate);
- le frequenze dei canali utilizzati;
- la sensibilità di ogni canale;
- l'ampiezza del beam (supposto gaussiano);
- indici spettrali dei foreground galattici (si sono scelti $\beta_d = 1.59$, $\beta_s = -3.1$) e la temperatura della polvere ($T = 19.6$ K) [5].

Inoltre è possibile scegliere tra alcune opzioni di delensing (CMBxCMB, CMBxLSS, CMBxCIB) e se includere o meno i dati ottenuti dalla missione *Planck*.

Inserendo i parametri di SWIPE, una frazione di cielo pari a⁵ $f_{sky} = 0.3$, e scegliendo come modalità di delensing CMBxLSS si sono ottenuti i seguenti valori di σ_r :

- $\sigma_r = 6.89 \times 10^{-2}$ senza combo con i dati di Planck ;
- $\sigma_r = 6.76 \times 10^{-3}$ richiedendo la combo con i dati di Planck .

Dal confronto tra queste simulazioni e quelle effettuate mediante il server planck.roma1.infn.it è possibile ricavare alcune informazioni. In primo luogo, si osserva che l'ordine di grandezza per σ_r è lo stesso in entrambi i casi, considerando i valori riportati nelle tabelle 3.3 e 3.6. Chiaramente gli output delle simulazioni effettuate tramite il codice *Convolver* forniscono informazioni più dettagliate sulla copertura del cielo, rispetto a *CMB4CAST*, pertanto è ragionevole ritenere che, qualitativamente, il matching dell'ordine di grandezza indichi che i risultati riportati nelle tabelle sono sensati, a meno dei *caveat* elencati in precedenza. In secondo luogo, si nota che considerare i dati di Planck incrementa la sensibilità di un ordine di grandezza. Se ciò sia sufficiente a bilanciare gli effetti di non idealità citati sopra è una questione che non è stata indagata in questo lavoro.

⁵valore medio di copertura per le simulazioni effettuate sul server planck@roma1.infn.it

Tabella 3.1: Kiruna (raw)

<i>elevationstart/elevationrange</i>	5	10	15
30	9.20×10^{-1}	6.96×10^{-1}	6.71×10^{-1}
35	5.79×10^{-1}	5.47×10^{-1}	5.26×10^{-1}
40	6.01×10^{-1}	5.80×10^{-1}	5.64×10^{-1}
45	6.67×10^{-1}	6.48×10^{-1}	6.41×10^{-1}

Tabella 3.2: Kiruna (fattore 100 in component separation)

<i>elevationstart/elevationrange</i>	5	10	15
30	1.96×10^{-2}	1.65×10^{-2}	1.61×10^{-2}
35	1.48×10^{-2}	1.43×10^{-2}	1.40×10^{-2}
40	1.53×10^{-2}	1.49×10^{-2}	1.47×10^{-2}
45	1.62×10^{-2}	1.59×10^{-2}	1.58×10^{-2}

Tabella 3.3: Kiruna (component separation + fattore 10 in delensing)

<i>elevationstart/elevationrange</i>	5	10	15
30	1.86×10^{-2}	1.57×10^{-2}	1.54×10^{-2}
35	1.42×10^{-2}	1.37×10^{-2}	1.34×10^{-2}
40	1.46×10^{-2}	1.43×10^{-2}	1.41×10^{-2}
45	1.54×10^{-2}	1.52×10^{-2}	1.51×10^{-2}

Tabella 3.4: Longyearbyen (raw)

<i>elevationstart/elevationrange</i>	5	10	15
30	7.75×10^{-1}	7.47×10^{-1}	9.83×10^{-1}
35	8.85×10^{-1}	8.76×10^{-1}	7.67×10^{-1}
40	1.04	9.57×10^{-1}	8.23×10^{-1}
45	1.20	1.06	9.53×10^{-1}

Tabella 3.5: Longyearbyen (fattore 100 in component separation)

<i>elevationstart/elevationrange</i>	5	10	15
30	1.83×10^{-2}	1.78×10^{-2}	2.08×10^{-2}
35	1.97×10^{-2}	1.92×10^{-2}	1.77×10^{-2}
40	2.12×10^{-2}	2.02×10^{-2}	1.83×10^{-2}
45	2.36×10^{-2}	2.16×10^{-2}	2.00×10^{-2}

Tabella 3.6: Longyearbyen (component separation + fattore 10 in delensing)

<i>elevationstart/elevationrange</i>	5	10	15
30	1.73×10^{-2}	1.69×10^{-2}	1.97×10^{-2}
35	1.87×10^{-2}	1.82×10^{-2}	1.69×10^{-2}
40	2.01×10^{-2}	1.91×10^{-2}	1.74×10^{-2}
45	2.23×10^{-2}	2.05×10^{-2}	1.91×10^{-2}

Conclusioni

In questo lavoro si sono relazionati i risultati ottenuti da simulazioni numeriche volte ad individuare i parametri che ottimizzano la riuscita dell'esperimento su pallone stratosferico LSPE.

Mediante l'utilizzo del programma *Convolver* si sono compiute osservazioni simulate di mappe di foreground create alle frequenze di interesse per lo strumento SWIPE. È stata dunque definita una prima quantità, σ_L , la quale rappresenta la deviazione standard del segnale di lensing gravitazionale da Large Scale Structures. Si sono scelte $5\sigma_L$ e $10\sigma_L$ come valori soglia per valutare la qualità del singolo pixel osservato, assumendo di essere in grado di effettuare una ottimale component separation per valori misurati inferiori alla soglia, concludendo che secondo questo criterio è opportuno privilegiare osservazioni con elevation start pari a 30° ed elevation range di 15° con lancio da Kiruna.

Si è definito un secondo parametro, σ_{QQ} , legato al rumore sui pixel osservati: per minore σ_{QQ} si hanno parametri di osservazione migliori. Dall'analisi effettuata, risulta che l'andamento di questo parametro è anticorrelato con quello osservato per σ_L .

Si è infine studiato l'effetto dei foreground sulla sensibilità nella rivelazione del *tensor-to-scalar ratio* r , concludendo che, per LSPE, il maggior ostacolo è costituito dalla presenza dei foregrounds galattici, i valori del cui spettro di potenza risultano particolarmente elevati alle grandi scale angolari, ovvero quelle di maggior interesse per LSPE. Le approssimazioni fatte in questa sede, in particolare sulla component separation, sul delensing e sul calcolo dello spettro di potenza dei foreground galattici consentono soltanto di individuare l'ordine di grandezza atteso per la sensibilità. Da un confronto con simulazioni simili, operate mediante *CMB4CAST*, si ottengono valori della sensibilità dello stesso ordine di grandezza di quelli ricavati nel presente lavoro, mostrando che questi ultimi sono ragionevoli.

Bibliografia

- [1] Joshua A. Frieman, Michael S. Turner, and Dragan Huterer. *Dark Energy and the Accelerating Universe*. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, Vol. 46: 385-432, Massachusetts, 2008.
- [2] P. de Bernardis, S. Aiola, G. Amico, et al. *SWIPE: a bolometric polarimeter for the Large-Scale Polarization Explorer*. Proceedings of the SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2012 Conference, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI, Amsterdam, paper n.8452-125, 2012, <https://arxiv.org/abs/1208.0282?context=astro-ph.CO>
- [3] The LSPE collaboration: S. Aiola, et al. *The Large-Scale Polarization Explorer (LSPE)*. SPIE proceedings of the Astronomical Telescopes + Instrumentation 2012 Conference, Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, Amsterdam, paper n.8446-277, 2012, <https://arxiv.org/abs/1208.0281>.
- [4] M. Tristram, K. Ganga. *Data analysis methods for the cosmic microwave background*. Astrophysical Journal, 2008, <https://arxiv.org/abs/0708.1429>.
- [5] Planck Collaboration: P. A. R. Ade, et al. *Planck 2015 results. XIV. Dark energy and modified gravity*. Astronomy and Astrophysics manuscript no. A16, 2016, <https://arxiv.org/abs/1502.01590>.
- [6] Planck Collaboration: P. A. R. Ade, et al. *Planck intermediate results. XLI. A map of lensing-induced B-modes*. arXiv:1512.02882 [astro-ph.CO], 2016, <https://arxiv.org/abs/1512.02882>.
- [7] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, et al. *Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae*. Astrophysical Journal, 1998, <https://arxiv.org/abs/astro-ph/9812133>.
- [8] A. G. Riess, A. V. Filippenko, P. Challis, et al. *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*. Astronomical Journal, Volume 116, Issue 3, pp. 1009-1038, 1998.
- [9] A. A. Penzias, R. W. Wilson. *A Measurement of the Flux Density of CAS A At 4080 Mc/s*. Astrophysical Journal Letters. 142: 1149–1154, 1965, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1965ApJ...142.1149P>.
- [10] P. Cabella, M. Kamionkowski. *Theory of Cosmic Microwave Background Polarization*. arXiv:astro-ph/0403392, 2005, <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0403392>.

- [11] C. L. Bennett, et al. *Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results*. Astrophysical Journal, Volume 208, Issue 2, id.20, 54 pp, 2013.
- [12] A. Kogut, A. J. Banday, C. L. Bennett, et al. *Microwave Emission at High Galactic Latitudes in the Four-Year DMR Sky Maps*. Astrophysical Journal Letters, 464, p.653, 1996.
- [13] E. M. Leitch, A. C. S. Readhead, J. T. Pearson & S. Myers. *An Anomalous Component of Galactic Emission*. Astrophysical Journal Letters, 486: L23, 1997.
- [14] C. Hervías. *Sky Model Code*.
<http://www.jb.man.ac.uk/~chervias/sky-model-code.pdf>.
- [15] M. Kamionkowski, E. D. Kovetz. *The Quest for B Modes from Inflationary Gravitational Waves*. Annual Reviews of Astronomy Astrophysics, 2016,
<https://arxiv.org/abs/1510.06042>.
- [16] J. Errard, S. M. Feeney, H. V. Peiris, A. H. Jaffe. *Robust forecasts on fundamental physics from the foreground-obscured, gravitationally-lensed CMB polarization*. arXiv:1509.06770 [astro-ph.CO], 2016, <https://arxiv.org/abs/1509.06770>.
- [17] A. Lewis, A. Challinor. *CAMB: Code for Anisotropies in the Microwave Background*. November, 2016, <http://camb.info/>.
- [18] A. H. Guth. *Inflation*. <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0404546>.
- [19] *The PILOT Project*.
pilot.irap.omp.eu/PAGE_PILLOT/SITE_OFFICIEL/ACCUEIL/Le_projet_en.html
- [20] L. Lello, D. Boyanovsky. *Tensor to scalar ratio and large scale power suppression from pre-slow roll initial conditions*. <https://arxiv.org/abs/1312.4251>.

Appendices

Appendice A

Tabelle

Tabella A.1: Dati della mappa osservata da *Kiruna*, alla frequenza 140 GHz , con la soglia a 5σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	46.25	3.238	1.498	0.08942	0.01611
	32.5	44.94	3.358	1.509	0.08732	0.01611
	35.0	43.53	3.451	1.502	0.08513	0.01611
	37.5	42.07	3.526	1.483	0.08319	0.01611
	40.0	40.47	3.619	1.465	0.08147	0.01611
	42.5	38.88	3.687	1.434	0.08014	0.01610
	45.0	37.23	3.758	1.399	0.07921	0.01610
10	30.0	47.80	3.311	1.583	0.08744	0.01613
	32.5	46.27	3.369	1.559	0.08538	0.01612
	35.0	44.74	3.438	1.538	0.08340	0.01612
	37.5	43.11	3.505	1.511	0.08172	0.01612
	40.0	41.34	3.591	1.484	0.08040	0.01612
	42.5	39.58	3.671	1.453	0.07931	0.01612
	45.0	37.75	3.738	1.411	0.07851	0.01611
15	30.0	49.03	3.301	1.618	0.08540	0.01611
	32.5	47.24	3.359	1.582	0.08360	0.01611
	35.0	45.63	3.414	1.558	0.08191	0.01611
	37.5	43.83	3.493	1.531	0.08056	0.01610
	40.0	41.89	3.576	1.498	0.07946	0.01610
	42.5	39.96	3.653	1.460	0.07858	0.01610
	45.0	37.95	3.726	1.414	0.07807	0.01610

Tabella A.2: Dati della mappa osservata da *Kiruna*, alla frequenza 140 GHz, con la soglia a 10σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	46.25	11.399	5.272	0.04757	0.01611
	32.5	44.94	11.738	5.275	0.04666	0.01611
	35.0	43.53	12.046	5.244	0.04564	0.01611
	37.5	42.07	12.349	5.195	0.04468	0.01611
	40.0	40.47	12.681	5.133	0.04388	0.01611
	42.5	38.88	12.900	5.016	0.04323	0.01610
	45.0	37.23	13.141	4.892	0.04272	0.01610
10	30.0	47.80	11.633	5.560	0.04669	0.01613
	32.5	46.27	11.825	5.471	0.04572	0.01612
	35.0	44.74	12.044	5.389	0.04480	0.01612
	37.5	43.11	12.306	5.305	0.04400	0.01612
	40.0	41.34	12.623	5.218	0.04334	0.01612
	42.5	39.58	12.847	5.085	0.04277	0.01612
	45.0	37.75	13.077	4.936	0.04233	0.01611
15	30.0	49.03	11.642	5.708	0.04572	0.01611
	32.5	47.46	11.834	5.617	0.04488	0.01611
	35.0	45.63	12.002	5.477	0.04409	0.01611
	37.5	43.83	12.269	5.378	0.04339	0.01610
	40.0	41.89	12.570	5.265	0.04281	0.01610
	42.5	39.96	12.799	5.115	0.04236	0.01610
	45.0	37.95	13.040	4.949	0.04206	0.01610

Tabella A.3: Dati della mappa osservata da *Kiruna*, alla frequenza 220 GHz, con la soglia a 5σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	46.26	1.064	0.492	0.64429	0.06645
	32.5	45.07	1.115	0.503	0.62842	0.06647
	35.0	43.61	1.142	0.498	0.61133	0.06649
	37.5	42.20	1.169	0.493	0.59466	0.06648
	40.0	40.60	1.201	0.488	0.58052	0.06644
	42.5	39.01	1.232	0.481	0.57065	0.06642
	45.0	37.36	1.253	0.468	0.56320	0.06640
10	30.0	47.62	1.103	0.525	0.62814	0.06646
	32.5	46.16	1.126	0.520	0.61205	0.06646
	35.0	44.59	1.142	0.509	0.59636	0.06645
	37.5	43.02	1.166	0.502	0.58289	0.06644
	40.0	41.30	1.193	0.493	0.57167	0.06645
	42.5	39.48	1.230	0.486	0.56346	0.06646
	45.0	37.73	1.249	0.471	0.55748	0.06644
15	30.0	48.48	1.102	0.534	0.61225	0.06646
	32.5	46.87	1.123	0.526	0.59823	0.06644
	35.0	45.20	1.139	0.515	0.58535	0.06644
	37.5	43.40	1.164	0.505	0.57430	0.06645
	40.0	41.50	1.194	0.496	0.56498	0.06644
	42.5	39.62	1.226	0.486	0.55821	0.06644
	45.0	37.70	1.249	0.471	0.55454	0.06643

Tabella A.4: Dati della mappa osservata da *Kiruna*, alla frequenza 220 *GHz*, con la soglia a 10σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	46.26	4.082	1.888	0.32850	0.06645
	32.5	45.07	4.232	1.907	0.32067	0.06647
	35.0	43.61	4.358	1.901	0.31247	0.06649
	37.5	42.20	4.462	1.883	0.30452	0.06648
	40.0	40.60	4.581	1.860	0.29802	0.06644
	42.5	39.01	4.671	1.822	0.29354	0.06642
	45.0	37.36	4.752	1.775	0.29006	0.06640
10	30.0	47.62	4.190	1.995	0.32073	0.06646
	32.5	46.16	4.268	1.970	0.31275	0.06646
	35.0	44.59	4.359	1.944	0.30529	0.06645
	37.5	43.02	4.447	1.913	0.29913	0.06644
	40.0	41.30	4.550	1.879	0.29403	0.06645
	42.5	39.48	4.660	1.840	0.29022	0.06646
	45.0	37.73	4.734	1.786	0.28718	0.06644
15	30.0	48.48	4.193	2.033	0.31311	0.06646
	32.5	46.87	4.261	1.997	0.30630	0.06644
	35.0	45.20	4.340	1.962	0.30012	0.06644
	37.5	43.40	4.447	1.930	0.29490	0.06645
	40.0	41.50	4.549	1.888	0.29074	0.06644
	42.5	39.62	4.645	1.840	0.28767	0.06644
	45.0	37.70	4.733	1.784	0.28581	0.06643

Tabella A.5: Dati della mappa osservata da *Kiruna*, alla frequenza 240 *GHz*, con la soglia a 5σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	47.68	0.857	0.409	1.49615	0.13899
	32.5	46.31	0.896	0.415	1.46705	0.13897
	35.0	44.90	0.921	0.414	1.42802	0.13893
	37.5	43.47	0.940	0.409	1.39155	0.13891
	40.0	41.86	0.961	0.402	1.35960	0.13894
	42.5	40.28	0.983	0.396	1.33132	0.13895
	45.0	38.45	1.009	0.388	1.31347	0.13887
10	30.0	49.21	0.884	0.435	1.46385	0.13899
	32.5	47.66	0.903	0.430	1.43146	0.13900
	35.0	46.08	0.919	0.424	1.39453	0.13898
	37.5	44.49	0.934	0.416	1.36130	0.13894
	40.0	42.70	0.954	0.407	1.33594	0.13890
	42.5	40.94	0.978	0.400	1.31588	0.13891
	45.0	38.96	1.002	0.390	1.29958	0.13891
15	30.0	50.42	0.883	0.445	1.42904	0.13898
	32.5	48.71	0.898	0.437	1.39706	0.13896
	35.0	46.95	0.912	0.428	1.36716	0.13895
	37.5	45.18	0.930	0.420	1.34115	0.13890
	40.0	43.22	0.949	0.410	1.31923	0.13886
	42.5	41.29	0.974	0.402	1.30030	0.13884
	45.0	39.13	0.999	0.391	1.28942	0.13882

Tabella A.6: Dati della mappa osservata da *Kiruna*, alla frequenza 240 GHz, con la soglia a 10σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	47.68	3.316	1.581	0.76276	0.13899
	32.5	46.31	3.427	1.587	0.74604	0.13897
	35.0	44.90	3.529	1.585	0.72607	0.13893
	37.5	43.47	3.604	1.567	0.70912	0.13891
	40.0	41.86	3.696	1.547	0.69446	0.13894
	42.5	40.28	3.773	1.520	0.68193	0.13895
	45.0	38.45	3.855	1.482	0.67377	0.13887
10	30.0	49.21	3.391	1.669	0.74512	0.13899
	32.5	47.66	3.445	1.642	0.72841	0.13900
	35.0	46.08	3.521	1.623	0.71046	0.13898
	37.5	44.49	3.583	1.594	0.69590	0.13894
	40.0	42.70	3.670	1.567	0.68415	0.13890
	42.5	40.94	3.760	1.540	0.67414	0.13891
	45.0	38.96	3.838	1.495	0.66666	0.13891
15	30.0	50.42	3.390	1.709	0.72846	0.13898
	32.5	48.71	3.431	1.671	0.71270	0.13896
	35.0	46.95	3.498	1.642	0.69835	0.13895
	37.5	45.18	3.572	1.614	0.68574	0.13890
	40.0	43.22	3.657	1.581	0.67557	0.13886
	42.5	41.29	3.744	1.546	0.66724	0.13884
	45.0	39.13	3.827	1.497	0.66164	0.13882

Tabella A.7: Dati della mappa osservata da *Longyearbyen*, alla frequenza 140 GHz, con la soglia a 5σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	32.74	3.207	1.050	0.08913	0.01608
	32.5	31.74	3.404	1.080	0.08673	0.01608
	35.0	30.85	3.586	1.106	0.08428	0.01608
	37.5	29.80	3.800	1.132	0.08180	0.01608
	40.0	28.66	4.019	1.152	0.07964	0.01608
	42.5	27.44	4.253	1.167	0.07766	0.01607
	45.0	26.26	4.408	1.158	0.07586	0.01607
10	30.0	34.97	3.394	1.187	0.08686	0.01609
	32.5	33.81	3.573	1.208	0.08440	0.01609
	35.0	32.69	3.746	1.224	0.08209	0.01609
	37.5	31.48	3.946	1.242	0.07982	0.01608
	40.0	30.18	4.109	1.240	0.07782	0.01608
	42.5	28.85	4.246	1.225	0.07618	0.01608
	45.0	27.50	4.341	1.194	0.07470	0.01608
15	30.0	36.84	3.540	1.304	0.08445	0.01608
	32.5	35.51	3.718	1.320	0.08212	0.01608
	35.0	34.23	3.849	1.318	0.08004	0.01608
	37.5	32.91	3.964	1.305	0.07807	0.01608
	40.0	31.45	4.068	1.279	0.07637	0.01608
	42.5	29.91	4.184	1.251	0.07497	0.01608
	45.0	28.43	4.274	1.215	0.07379	0.01608

Tabella A.8: Dati della mappa osservata da *Longyearbyen*, alla frequenza 140 GHz, con la soglia a 10σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	32.74	11.545	3.780	0.04695	0.01608
	32.5	31.74	12.073	3.831	0.04579	0.01608
	35.0	30.85	12.612	3.891	0.04471	0.01608
	37.5	29.80	13.210	3.936	0.04368	0.01608
	40.0	28.66	13.847	3.969	0.04275	0.01608
	42.5	27.44	14.556	3.994	0.04189	0.01607
	45.0	26.26	15.038	3.949	0.04111	0.01607
10	30.0	34.97	12.003	4.198	0.04592	0.01609
	32.5	33.81	12.499	4.226	0.04482	0.01609
	35.0	32.69	13.030	4.259	0.04378	0.01609
	37.5	31.48	13.593	4.279	0.04283	0.01608
	40.0	30.18	14.122	4.263	0.04197	0.01608
	42.5	28.85	14.605	4.213	0.04125	0.01608
	45.0	27.50	14.904	4.099	0.04063	0.01608
15	30.0	36.84	12.400	4.568	0.04486	0.01608
	32.5	35.51	12.879	4.574	0.04383	0.01608
	35.0	34.23	13.331	4.563	0.04290	0.01608
	37.5	32.91	13.706	4.511	0.04208	0.01608
	40.0	31.45	14.057	4.421	0.04134	0.01608
	42.5	29.91	14.466	4.326	0.04074	0.01608
	45.0	28.43	14.742	4.191	0.04023	0.01608

Tabella A.9: Dati della mappa osservata da *Longyearbyen*, alla frequenza 220 GHz, con la soglia a 5σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	32.74	1.046	0.342	0.64028	0.06630
	32.5	31.87	1.114	0.355	0.62346	0.06631
	35.0	30.98	1.176	0.364	0.60642	0.06630
	37.5	29.93	1.244	0.372	0.58838	0.06630
	40.0	28.79	1.314	0.378	0.57428	0.06629
	42.5	27.57	1.402	0.386	0.55934	0.06629
	45.0	26.39	1.465	0.387	0.54495	0.06629
10	30.0	34.96	1.108	0.387	0.62484	0.06634
	32.5	33.91	1.173	0.398	0.60675	0.06633
	35.0	32.82	1.230	0.404	0.59119	0.06632
	37.5	31.61	1.305	0.412	0.57493	0.06633
	40.0	30.31	1.363	0.413	0.56025	0.06634
	42.5	28.98	1.412	0.409	0.54719	0.06634
	45.0	27.63	1.445	0.399	0.53491	0.06634
15	30.0	36.57	1.163	0.425	0.60766	0.06635
	32.5	35.43	1.233	0.437	0.59197	0.06634
	35.0	34.20	1.285	0.439	0.57681	0.06634
	37.5	32.86	1.322	0.434	0.56122	0.06634
	40.0	31.39	1.358	0.426	0.54862	0.06634
	42.5	29.93	1.396	0.418	0.53783	0.06635
	45.0	28.41	1.427	0.405	0.52796	0.06635

Tabella A.10: Dati della mappa osservata da *Longyearbyen*, alla frequenza 220 GHz, con la soglia a 10σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	32.74	4.050	1.326	0.32616	0.06630
	32.5	31.87	4.290	1.367	0.31743	0.06631
	35.0	30.98	4.505	1.396	0.30884	0.06630
	37.5	29.93	4.750	1.422	0.30034	0.06630
	40.0	28.79	5.035	1.450	0.29257	0.06629
	42.5	27.57	5.343	1.473	0.28523	0.06629
	45.0	26.39	5.550	1.465	0.27875	0.06629
10	30.0	34.96	4.275	1.495	0.31808	0.06634
	32.5	33.91	4.487	1.522	0.30928	0.06633
	35.0	32.82	4.707	1.545	0.30112	0.06632
	37.5	31.61	4.961	1.568	0.29321	0.06633
	40.0	30.31	5.167	1.566	0.28600	0.06634
	42.5	28.98	5.355	1.552	0.27970	0.06634
	45.0	27.63	5.482	1.515	0.27429	0.06634
15	30.0	36.57	4.466	1.633	0.30966	0.06635
	32.5	35.43	4.693	1.663	0.30153	0.06634
	35.0	34.20	4.868	1.665	0.29391	0.06634
	37.5	32.86	5.013	1.647	0.28675	0.06634
	40.0	31.39	5.148	1.616	0.28057	0.06634
	42.5	29.93	5.290	1.583	0.27548	0.06635
	45.0	28.41	5.400	1.534	0.27101	0.06635

Tabella A.11: Dati della mappa osservata da *Longyearbyen*, alla frequenza 240 GHz, con la soglia a 5σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	34.11	0.831	0.283	1.50020	0.13866
	32.5	33.21	0.894	0.297	1.45477	0.13865
	35.0	32.23	0.941	0.303	1.41747	0.13865
	37.5	31.12	0.993	0.309	1.37740	0.13864
	40.0	29.97	1.053	0.316	1.33535	0.13864
	42.5	28.77	1.130	0.325	1.30249	0.13864
	45.0	27.60	1.169	0.323	1.27175	0.13863
10	30.0	36.25	0.883	0.320	1.46164	0.13874
	32.5	35.27	0.939	0.331	1.41732	0.13871
	35.0	34.13	0.984	0.336	1.37771	0.13870
	37.5	32.77	1.043	0.342	1.34020	0.13869
	40.0	31.52	1.093	0.345	1.30470	0.13867
	42.5	30.16	1.136	0.343	1.27420	0.13867
	45.0	28.80	1.155	0.333	1.24746	0.13866
15	30.0	38.17	0.924	0.353	1.41940	0.13872
	32.5	36.94	0.986	0.364	1.38014	0.13869
	35.0	35.71	1.027	0.367	1.34366	0.13869
	37.5	34.19	1.058	0.362	1.30951	0.13869
	40.0	32.75	1.083	0.355	1.27803	0.13870
	42.5	31.23	1.119	0.349	1.25173	0.13870
	45.0	29.69	1.137	0.338	1.22883	0.13869

Tabella A.12: Dati della mappa osservata da *Longyearbyen*, alla frequenza 240 GHz, con la soglia a 10σ .

ElevRange	elevStart	Obs.Pix	Good.Pix.Obs	Good.Pix.Tot	Good. σ	Tot. σ
5	30.0	34.11	3.250	1.108	0.76146	0.13866
	32.5	33.21	3.463	1.150	0.74061	0.13865
	35.0	32.23	3.623	1.168	0.72147	0.13865
	37.5	31.12	3.839	1.195	0.70191	0.13864
	40.0	29.97	4.068	1.219	0.68238	0.13864
	42.5	28.77	4.303	1.238	0.66494	0.13864
	45.0	27.60	4.464	1.232	0.64898	0.13863
10	30.0	36.25	3.429	1.243	0.74215	0.13874
	32.5	35.27	3.623	1.278	0.72242	0.13871
	35.0	34.13	3.808	1.300	0.70301	0.13870
	37.5	32.77	4.017	1.317	0.68368	0.13869
	40.0	31.52	4.166	1.313	0.66639	0.13867
	42.5	30.16	4.305	1.298	0.65127	0.13867
	45.0	28.80	4.417	1.272	0.63808	0.13866
15	30.0	38.17	3.601	1.374	0.72298	0.13872
	32.5	36.95	3.794	1.402	0.70350	0.13869
	35.0	35.71	3.925	1.401	0.68493	0.13869
	37.5	34.19	4.045	1.383	0.66859	0.13869
	40.0	32.75	4.135	1.354	0.65337	0.13870
	42.5	31.23	4.250	1.327	0.64061	0.13870
	45.0	29.69	4.353	1.293	0.63002	0.13869

Appendice B

Codici utilizzati

B.1 Rotazione delle mappe

ROT.PRO

Le mappe di foreground date in ingresso al convolver, per svolgere le simulazioni, erano inizialmente in coordinate galattiche. Per simulare una osservazione dalla terra tuttavia è necessario portare queste ultime in coordinate celesti: la conversione è stata eseguita utilizzando il seguente codice in IDL.

```
PRO rot, filein, fileout
```

```
INIT_HEALPIX
```

```
read_fits_map,filein ,m,NSIDE=nside, ORDERING=order, COORDSYS=c
```

```
npix=n_elements(m[*,0])
```

```
pixC=lindgen(npix)
```

```
pix2vec_ring,nside,pixC,vecC
```

```
vecG=rotate_coord(vecC,Inco='C',Outco='G')
```

```
vec2pix_ring,nside,vecG,pixG
```

```
mout=m*0+!HEALPIX.BADVALUE
```

```
i = lindgen(npix)
```

```
mout[i,0]=m[pixG[i],0]
```

```
QU = m[pixG[i],1:2]
```

```
vuv=rotate_coord(vecG[i,*],Inco='G',Outco='C', Stokes_parameters=QU)
```

```
mout[i,1:2] = QU
```

```
write_tqu, fileout, mout, coordsys='C', ordering='ring'
```

```
END
```

B.2 Pipeline per le simulazioni descritte in 3.3

Dato l'elevato numero di simulazioni da svolgere, cambiando i valori del params.ini, si è scelto di costruire una pipeline capace di automatizzare il tutto.

La pipeline, una volta avviata, provvede a lanciare il programma e cambiare dopo ogni esecuzione i parametri del params.ini, in modo da poter lanciare la simulazione successiva, fino a costruire le mappe per tutti i casi in esame.

Si riporta di seguito il codice utilizzato per automatizzare le simulazioni.

```
import sys
import os
from astropy.io import fits

xkir = "67.8"
ykir = "20.2"

xlng = "78.2"
ylng = "15.6"

for h in range(1,3) :      # indice per la scelta del luogo, 1 per longyear 2 per kiruna
    if(h==1):
        locality = "longyearbyen"
    if(h==2):
        locality = "kiruna"

i=int(0)
for i in range(1,4) :      # indice per la scelta della frequenza
    if i==1:
        frequency = "140"
    if i==2:
        frequency = "220"
    if i==3:
        frequency = "240"
j=int(0)
for j in range(1,4) :      # indice per la scelta dell'elvrng
    elvrng = 5.0*j
    elvr=str(elvrng)
    k=int(0)

    for k in range(0,7) :      # indice per la scelta dell'elvstart, va da 30 a 45
        elvstrt = 30.0 +k*2.5
        elvs= str(elvstrt)

        os.system("cp less_params.txt fileapp.txt")
        fileout = open("fileapp.txt","a")

    done=0
    # condizioni dipendenti dal primo ciclo del luogo (Coordinate)
```



```

if(h==1):
    fileout.write("latitude = "+xlng+"\n")
if(h==2):
    fileout.write("# latitude = "+xlng+"\n")

if(h==1):
    fileout.write("longitude = "+ylng+"\n")
if(h==2) :
    fileout.write("# longitude = "+ylng+"\n")

if(h==1) :
    fileout.write("# latitude = "+xkir+"\n")
if(h==2) :
    fileout.write("latitude = "+xkir+"\n")

if(h==1):
    fileout.write("# longitude = "+ykir+"\n")
if(h==2):
    fileout.write("longitude = "+ykir+"\n")

# condizioni dipendenti dal cambio di frequenza (mappe in ingresso e rivelatori)

fileout.write("input_map =
inputs/fg/lspe_"+frequency+"fg_tqu_C_256.fits\n")

fileout.write("detectors ="+frequen-
cy+"_051a:"+frequency+"_050a:"+frequency+"_044a:"+frequency+"_047a:"+frequency+"_035a:"+
# condizioni dipendenti dal cambio di elevation range(settaggio elvrng e cartella
out)

fileout.write("elevation_start = "+elvs+"\n")
fileout.write("elevation_range = "+elvr+"\n")

num = int(elvrng)
n=str(num)
nn = n
fileout.write("out_map_dir =
outputs/lab2016/simulazione4/"+locality+"/"+frequency+"/elv"+n+"\n")

num = int(k +1)
n=str(num)
fileout.write("out_map_root = run"+n+"\n")

num = int(k +1)
n=str(num)
fileout.write("out_coverage_root = run"+n+"_coverage\n")

filein.close()
fileout.close()

outdata = "/da-
```

```

ta/lab2016/svn/lspe_simulator/outputs/lab2016/simulazione4/"+locality+"/"+frequency+"/elv"+nn+"
os.system("mpirun.mpich -n 10 ./convolver fileapp.txt | tee "+outdata)
os.system("rm fileapp.txt")

num=int(elvrng)
n=str(num)
os.chdir("outputs/lab2016/simulazione4/"+locality+"/"+frequency+"/elv"+n)
    num=int(k+1)
n=str(num)
hdulist=fits.open("run"+n+"tot.fits")
hdu=hdulist[1]
q=int(0)
hdu.header["COORDSYS"]="C"
for q in range(2,10) :
    nq=str(q)
    hdu.header["TTYPE"+nq]="simulazione"+nq

hdu.writeto("run"+n+"tot.fits", clobber=True)

os.chdir("../..../..../..../..")

print("\n\nsimulazione di elv"+str(int(elvrng))+ " numero
"+str(int(k+1))+ "\n\n")

END

```

B.3 MODIFY HEADER

Questo programma è stato utilizzato per modificare la denominazione dei campi contenuti nelle mappe: avendo tutte lo stesso nome, non era possibile operare una analisi.

PRO modifyheader, filein

h=headfits(filein, ext=1)

for i=2,9 do begin

sxaddpar, h, 'TTYPE'+strtrim(i,2), 'simulazione'+strtrim(i,2)

endfor

modfits, filein, 0, h, exten=1

END

B.4 P_{bad} e σ_{QQ}

L'analisi delle mappe è stata ottenuta mediante il seguente codice, che calcola sia il numero di pixel ottimali per l'osservazione, secondo il metodo del lensing, sia il parametro σ_{QQ} . Il codice è stato utilizzato per le simulazioni in entrambe le località suggerite, ma si propone ora solamente quello utilizzato per Kiruna.

```
import sys
import numpy as np
import healpy as hp
import os

a=int(sys.argv[1])

for i in range(0,3):
    if i==0:
        name='140'
        out140=open('out140.txt','w')
    elif i==1:
        name='220'
        out220=open('out220.txt','w')
    elif i==2:
        name='240'
        out240=open('out240.txt','w')

os.chdir('/data/lab2016/svn/lspe_simulator/outputs/lab2016/simulazione4/kiruna')

for k in range(0,3):
    if k==0:
        elvrng='elv5'
    if k==1:
        elvrng='elv10'
    if k==2:
        elvrng='elv15'
    os.chdir(name+'/' + elvrng)

    b=name+'/' + elvrng
    print(b)
    c=0
    for j in range(1,8):
        print('%i %i %i\n' %(i, k, j))
        Q=hp.read_map('run'+str(j)+'tot.fits', field=(1,))
        U=hp.read_map('run'+str(j)+'tot.fits', field=(2,))
        P=Q
        QQ=hp.read_map('run'+str(j)+'tot.fits', field=(4,))
        UU=hp.read_map('run'+str(j)+'tot.fits', field=(5,))
        PP=QQ
```

```

for l in range(0,len(Q)):      # DEFINIZIONE DI P
    if Q[l]== -1.6375E30:
        P[l]=Q[l]
        PP[l]=QQ[l]
    else:
        P[l]=np.sqrt(Q[l]*Q[l] +U[l]*U[l])
        PP[l]=np.sqrt(QQ[l]*QQ[l] +UU[l]*UU[l])

treshold=a*0.040174209      #—>sigma lensing
sigma2QQinv=0.0
sigma2QQinvtot=0.0
sigmaQQ=0.0
sigmaQQtot=0.0
contobs=0
cont=0
contQ=0
contU=0

for l in range(0, len(Q)):    # CALCOLA I PIXEL ACCETTABILI
    if P[l] != -1.6375e+30:
        contobs= contobs +1
        if P[l] > treshold:
            cont= cont +1
        else:
            sigma2QQinv = sigma2QQinv + 1.0/PP[l]
            sigma2QQinvtot = sigma2QQinvtot + 1.0/PP[l]

        if abs(Q[l]) > treshold:
            contQ= contQ+1
        if abs(U[l]) > treshold:
            contU= contU +1

sigmaQQ = 1.0/np.sqrt(sigma2QQinv)
sigmaQQtot = 1.0/np.sqrt(sigma2QQinvtot)

if i==0:
    out140.write('%i\t%.3f\t%i\t%.3f\t%i\t%.3f\t%.8f\t%.8f\n' %(cont,
100*float(cont)/float(contobs), contQ, 100*float(contQ)/float(contobs), contU,
100*float(contU)/float(contobs), sigmaQQ, sigmaQQtot))
    if j==7:
        out140.write('\n\n\n\n\n')
elif i==1:
    out220.write('%i\t%.3f\t%i\t%.3f\t%i\t%.3f\t%.8f\t%.8f\n' %(cont,
100*float(cont)/float(contobs), contQ, 100*float(contQ)/float(contobs), contU,
100*float(contU)/float(contobs), sigmaQQ, sigmaQQtot))
    if j==7:
        out220.write('\n\n\n\n\n')

```

```

        elif i==2:
            out240.write('%i\t%.3f\t%i\t%.3f\t%i\t%.3f\t%.8f\t%.8f\n' %(cont,
100*float(cont)/float(contobs), contQ, 100*float(contQ)/float(contobs), contU,
100*float(contU)/float(contobs), sigmaQQ, sigmaQQtot))
            if j==7:
                out240.write('\n\n\n\n\n\n\n')

os.chdir('/data/lab2016/svn/lspe_simulator/outputs/lab2016/simulazione4/kiruna/')
b='/data/lab2016/svn/lspe_simulator/outputs/lab2016/simulazione4/kiruna/'
print(b)

out140.close()
out220.close()
out240.close()

if (a==5) :
    os.system('mv out140.txt analisi_5sigma')
    os.system('mv out220.txt analisi_5sigma')
    os.system('mv out240.txt analisi_5sigma')

elif (a==10) :
    os.system('mv out140.txt analisi_10sigma')
    os.system('mv out220.txt analisi_10sigma')
    os.system('mv out240.txt analisi_10sigma')

```

B.5 Pipeline per le simulazioni descritte in (3.5)

B.5.1 Generazione della funzione di trasferimento

Per ottenere la mappa di prova dai $C_{\ell, in}$, si è utilizzata la routine *synfast*. È stato possibile simulare l'osservazione di tale mappa, variando i parametri dell'osservazione con un codice analogo a quello presentato in B.2. Si è dunque ottenuta la funzione di trasferimento per ogni configurazione tramite le seguenti routines:

```

pro Tl_all
Lon='/Longyearbyen/Long/'
Kir='/Kiruna/Kir/'
for i=1,2 do begin
    if i eq 1 then locality=Lon else locality=Kir
    for k=0,2 do begin
        elv=5+ k*5
        for j=0,2 do begin
            elvstart= 30 + j*5
            outdir='/data/lab2016/svn/lspe_simulator/kamion_review'+locality
                +'nonmasked/elv'+strtrim(elv,2)+'/' +strtrim(elvstart, 2)
            filemap=outdir+'run'+strtrim(j+1,2)+'tot.fits'

```

```

h=headfits(outdir+'/run'+strtrim(j+1,2)+'tot.fits', ext=1)
sxaddpar, h, 'POLAR', 'T'
modfits, outdir+'/run'+strtrim(j+1,2)+'tot.fits', 0, h, exten=1
openw, 10, outdir+'/parameters.dat'
;updates params.dat for anafast
printf, 10, 'simul_type = 2'
printf, 10, 'nlmax = 512'
printf, 10, 'theta_cut_deg = 0'
printf, 10, 'infile =' + filemap
printf, 10, 'outfile = ' + outdir + '/cl_out1.fits'
close, 10
spawn, 'anafast ' + outdir + '/parameters.dat'
;calls anafast
cl_in=outdir+'/cl_in.fits'
; cl=1000*(1+1)-2.4
cl_out=outdir+'/cl_out1.fits'
; cl observed
retrieve_tl, cl_in, cl_out, outdir
endfor
endfor
endfor
PRO retrieve_Tl, file_cl_in, file_cl_out, outdir

fits2cl, cl_in, file_cl_in
fits2cl, cl_out, file_cl_out

l=lindgen(n_elements(cl_in[*,1]))+2
T=make_array(n_elements(cl_in[*,1]),4,/double)

T[l,*]=cl_in[l,*]/cl_out[l,*]
cl2fits, T, outdir+'/Tl.fits' ;produces the transfer function

END

```

B.5.2 La produzione delle immagini e delle sigma

Per ogni configurazione si sono prodotte le σ_r date dalla 3.4 e figure analoghe a quelle riportate nella sezione (3.5) mediante i seguenti codici:

```

pro make_images

Lon='/Longyearbyen/Long/'
Kir='/Kiruna/Kir/'

cont=0
openr, 10, 'fsky.dat'
for i=1,2 do begin ;Kir, Lon
  if i eq 1 then locality=Lon else locality=Kir

```

```

for k=0,2 do begin
  elv=5+ k*5
  for j=0,3 do begin
    elvstart= 30 + j*5

    outdir='/data/lab2016/svn/lspe_simulator/kamion_review'+locality
      +'nonmasked/elv'+strtrim(elv,2)+'/'+strtrim(elvstart, 2)

    indir= '/data/lab2016/svn/lspe_simulator/outputs/lab2016/simulazione4'
      +locality+'140/elv'+strtrim(elv,2)

    spawn, 'cd '+outdir+' ; mkdir old ; mv * old ; cd -'
    spawn, ' cd '+outdir+'/old ; cp Tl.fits .. ; cd -'

    inmap = indir+'/run'+strtrim( 2*j +1, 2)+'tot.fits'
    h=headfits(inmap, ext=1)
    sxaddpar, h, 'POLAR', 'T'
    modfits, inmap, 0, h, exten=1

    openw, 20, outdir+'/parameters.dat'
    printf, 20, 'simul_type = 2'
    printf, 20, 'nlmax = 512'
    printf, 20, 'theta_cut_deg = 0'
    printf, 20, 'iter_order = 0'
    printf, 20, 'infile = '+inmap
    printf, 20, 'outfile = '+outdir+'/cl_fg'+strtrim( 2*j +1, 2)+'fits' ;; NB cl_fg are
the cls on the OBS sky. must be weighted with transfer function
    printf, 20, 'regression = 0'
    close, 20

    spawn,'anafast '+outdir+'/parameters.dat'

    readf, 10, f
    fig_last, outdir+'/Tl.fits', outdir+'/cl_fg'+strtrim( 2*j +1, 2)+'fits', f, outdir

  endfor
endfor
close, 10
end

```

```

pro fig_last, Tlfile, cl_obsfile, f_sky

if (Tl eq !NULL) or (cl_obsfile eq !null) or f_sky eq !null then begin
  print, 'Syntax: fig, transfer_function_file, filecl_obs, fsky'
  exit

```

```

endif

loadct, 39
dirdata = '/home/fp/src/lspe/sensitivity/new_sensitivity/spectra/'

;starts from l=2
l = lindgen(999)+2
;starts from l=0
ll=lindgen(999)

;outputs from readcol have lmin=2
readcol, dirdata + 'r_0.1_lensedCls.dat', l1, t1, e1, b1, te1
readcol, dirdata + 'r_0.1_tensCls.dat', l2, t2, e2, b2, te2

;b1-> Cl lensing
;b2-> Cl GW (r=0.1)

; using NET=16, fsky=0.3, tobs=13 d, Nd=100

Nl = 8.588e-6*f_sky*100/110 / 0.3 ; uK_cmb^2 sr
GB = gaussbeam(84., 999)
Bl=GB

remove, [0,1], Bl

bfg = 0

signal = sqrt(2./(2.*ll+1)/f_sky)*Nl/GB^2
bn = l*(l+1)/2/!pi*Nl ;l>=2

sigman = ll*(ll+1)/2/!pi*signal

fits2cl, T, Tlfile

fits2cl, cl_obs, cl_obsfile

k=lindgen(n_elements(cl_obs[*],0))-1
cl_app=make_array(n_elements(cl_obs[*],0)-1,n_elements(cl_obs[0,*]))
cl_app[0:max(k),*]=cl_obs[0:max(k),*]
i=n_elements(T[0,*])-1
cl_app1=cl_app
cl_app1[k,0:i]=cl_app[k,0:i]*T[k,0:i]

j=lindgen(max(k)-1)
cl_ok=make_array(max(j)+1, i+1)
cl_ok[0:max(j),0:i]=cl_app1[2:max(k),0:i]

bfg=l*(l+1)/2/!pi * cl_ok[*],2

tk=5
set_plot, 'ps'

```



```

!p.thick = tk
!x.thick = tk
!y.thick = tk
!p.charthick = tk

device, file='lenstensfg.ps', /color
plot, l1, b1, /xlog, /ylog, ytit='l(l+1)C_l/2/!pi', xtit='multipole', thick=6, yr=[1.e-5,
1.e1], /nodata
oplot, l1, b1, col=250, thick=5
oplot, l2, b2, col=50, thick=5
oplot, l, bn, col=222, thick=5 ; noise
oplot, l, bfg, col=100, thick=5
legend, ['lens','tens','noise','fg'], linestyle=0, colors=[250,50,222,100],/right device, /close

lrange = (ll gt -1)

;without foreground
summand_a = lrange* ((2*l)+1)/2 *(b2/(bfg*0+bn+b1))2
sigma_a = 0.1/f_sky / sqrt( total( summand_a ) )

;without noise
summand_b = lrange* (2*(l)+1)/2 *(b2/(bfg+bn*0+b1))2
sigma_b = 0.1/f_sky / sqrt( total( summand_b ) )

;total
summand = lrange* (2*l+1)/2 *(b2/(bfg+bn+b1))2
sigma = 0.1/f_sky / sqrt( total( summand ) )

str=[sigma_a, sigma_b, sigma]

device, file = 'Lfig2_kw_3.ps', /color
plot, l, summand_a, /xlog , /ylog, yr=[1.e-5,1.e2], thick = 8, chars = 1.3,
xtit='multipole', ytit='summand', /nodata
oplot, l, summand_b, thick=5, col=250
oplot, l, summand_a, thick=5, col=50
oplot, l, summand, thick=5, col=100
legend, ['no noise','no fg','all'], linestyle=0, colors=[250,50,100], /right device, /close

; after component separation (factor 10 in fg amplitude)

bfg *= 0.01

summand_a1 = lrange* (2*(l)+1)/2 *(b2/(bfg*0+bn+b1))2
sigma_a1 = 0.1/f_sky / sqrt( total( summand_a1 ) )

summand_b1 = lrange* (2*(l)+1)/2 *(b2/(bfg+bn*0+b1))2
sigma_b1 = 0.1/f_sky / sqrt( total( summand_b1 ) )

summand1 = lrange* (2*(l)+1)/2 *(b2/(bfg+bn+b1))2
sigma1 = 0.1/f_sky / sqrt( total( summand1 ) )

```

```

str1=[sigma_a1, sigma_b1, sigma1]

device, file = 'Lfig2_kw_3_clean.ps', /color
plot, l, summand_a1, /xlog , /ylog, yr=[1.e-5,1.e2], thick = 8, chars = 1.3,
xtit='multipole', ytit='summand', /nodata
oplot, l, summand_b1, thick=5, col=250
oplot, l, summand_a1, thick=5, col=50
oplot, l, summand1, thick=5, col=100
legend, ['no noise', 'no fg', 'all'], linestyle=0, colors=[250,50,100], /right device, /close
summand_a2 = lrange* (2*(l)+1)/2 *(b2/(bfg*0+bn+b1*b1fac))2
sigma_a2 = 0.1/f_sky / sqrt( total( summand_a2 ) )

summand_b2 = lrange* (2*(l)+1)/2 *(b2/(bfg+bn*0+b1*b1fac))2
sigma_b2 = 0.1/f_sky / sqrt( total( summand_b2 ) )

summand2 = lrange* (2*(l)+1)/2 *(b2/(bfg+bn+b1*b1fac))2
sigma2 = 0.1/f_sky / sqrt( total( summand2 ) )

str2=[sigma_a2,sigma_b2,sigma2]

device, file = 'Lfig2_kw_3_clean_clean.ps', /color
plot, l, summand_a2, /xlog , /ylog, yr=[1.e-5,1.e2], thick = 8, chars = 1.3,
xtit='multipole', ytit='summand', /nodata
oplot, l, summand_b2, thick=5, col=250
oplot, l, summand_a2, thick=5, col=50
oplot, l, summand2, thick=5, col=100
legend, ['no noise', 'no fg', 'all'], linestyle=0, colors=[250,50,100], /right

device, /close
openw, 10, 'sigma.dat'

printf,10,'no_foreground no_noise total'
printf, 10, str
printf, 10, str1
printf, 10, str2

close, /all

end

```

