

Corso di Laurea triennale in Fisica (L-30)



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO**

# **Stima delle proprietà di sistemi ottici nelle microonde tramite l'utilizzo di reti neurali**

Relatore: Maurizio TOMASI  
Correlatore: Cristian FRANCESCHET  
Correlatrice: Sabrina REALINI

Tesi di Laurea di:  
Eleonora GATTI  
Matricola: 885664

Anno Accademico 2019/2020



# Indice

<b>1</b>	<b>Sistemi ottici nelle microonde</b>	<b>5</b>
1.1	Utilizzo delle microonde in astrofisica . . . . .	5
1.2	Diagramma di radiazione . . . . .	7
1.3	Simulazione di sistemi ottici . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Regressione con reti neurali</b>	<b>13</b>
2.1	Machine learning e tipi di rete . . . . .	13
2.2	Struttura di una rete neurale . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Previsione delle proprietà di un diagramma di radiazione</b>	<b>15</b>
3.1	Interpolazione . . . . .	15
3.1.1	Interp2d . . . . .	15
3.1.2	Curve Fit . . . . .	15
3.1.3	Risultati dell'interpolazione . . . . .	15
3.2	Reti neurali . . . . .	15
3.2.1	Architettura della rete . . . . .	15
3.2.2	Pre Training . . . . .	15
3.2.3	Training . . . . .	15
3.3	Confronto di risultati . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>17</b>



# Capitolo 1

## Sistemi ottici nelle microonde

Quasi tutta l'informazione che abbiamo a disposizione su oggetti astronomici molto distanti è contenuta nella radiazione elettromagnetica emessa. Per secoli l'unico tipo di analisi possibile è stata quella nello spettro del visibile. Oggigiorno esistono svariate branche dell'astrofisica che analizzano segnali provenienti dall'Universo a diverse frequenze elettromagnetiche; una di queste branche riguarda lo studio del cosmo attraverso le microonde.

### 1.1 Utilizzo delle microonde in astrofisica

Il range delle lunghezze d'onda delle microonde è  $\lambda \sim 1\text{mm} \div 10\text{cm}^1$ .

È estremamente importante fare osservazioni a grandi lunghezze d'onda, nel millimetrico e oltre, poichè esistono numerosissime sorgenti cosmologiche che emettono in questo range e possono essere analizzate tramite sistemi ottici nelle microonde. I segnali più comunemente studiati in radio astronomia e attraverso le microonde sono:

- radiazione emessa da gas ionizzato;
- radiazione di sincrotrone, dovuta al moto di particelle cariche libere di muoversi nell'Universo e deviate da campi magnetici;
- effetto Sunyaev-Zeldovich, che permette di rivelare ammassi di galassie altrimenti non visibili;
- emissioni del Sole;
- radiazioni da regioni *HII*; si tratta di regioni nello spazio in cui sono presenti stelle molto calde (di tipo O o di tipo B) che ionizzano il gas intorno ad esse il quale emette nelle microonde e nel radio;
- supernovae e resti di supernovae<sup>2</sup>;

---

<sup>1</sup>Il confine tra onde radio e microonde non è netto, spesso si parla di radio estendendo il range di lunghezze d'onda anche a quello delle microonde.

<sup>2</sup>La Crab Nebula, per esempio, è estremamente visibile nelle microonde.

- pulsar;
- radio galassie;
- CMB.

In questo lavoro di tesi lo studio è stato effettuato su sistemi ottici designati all'analisi della CMB.

La **CMB**, Cosmic Microwave Background, è la radiazione a microonde di fondo cosmico che permea l'intero Universo. Secondo il *Modello Cosmologico Standard (SCM)* l'Universo ha avuto origine circa 14 miliardi di anni fa da una singolarità iniziale: il *Big Bang*. Nei primissimi istanti dopo il *Big Bang* vi fu una rapidissima fase di espansione ( $10^{-33}$  s), detta *inflazione*, seguita da un'espansione più lenta e regolare, che continua tutt'ora. Inizialmente materia e radiazione erano in equilibrio in un plasma estremamente caldo; la progressiva espansione ha causato un abbassamento della temperatura del plasma. L'equilibrio tra materia e radiazione venne a mancare quando la temperatura raggiunse  $T \simeq 3000$  K. Questo causò il *disaccoppiamento* tra materia e radiazione: la maggior parte degli elettroni venne catturata dai nuclei atomici permettendo la formazione dei primi atomi neutri. Convenzionalmente si considera come tempo al quale si è verificato il *disaccoppiamento* tra materia e radiazione l'istante  $t_{dec}$  in cui il libero cammino medio dei fotoni divenne maggiore della scala dell'Universo osservabile. Questo accadde a circa 380 000 anni dal *Big Bang* e da allora i fotoni primordiali sono liberi di vagare nello spazio e sono i responsabili della radiazione a microonde di fondo cosmico. Nell'ipotesi semplificata di un Universo non in espansione, i fotoni primordiali che possiamo osservare oggi dalla Terra sono quelli che all'istante  $t_{dec}$  si trovavano ad una distanza  $c(t_{now} - t_{dec})$ ; il che significa che per ogni istante un osservatore sulla Terra può osservare solo i fotoni emessi da un guscio sferico che prende il nome di *Last Scattering Surface* (LSS). Generalizzando il caso ad un Universo in espansione il concetto rimane lo stesso ma diventa matematicamente più complesso. I fotoni della CMB che vengono oggi misurati rappresentano una radiazione quasi-isotropa il cui spettro è quello di corpo nero a una temperatura  $T \approx 2.73$  K. Per studiare le proprietà della CMB sulla sfera definita dalla LSS è utile utilizzare una decomposizione in *armoniche sferiche*  $Y_l^m(\theta, \phi)$ . La decomposizione in armoniche sferiche di una funzione  $f(\theta, \phi)$  su una sfera è data da:

$$f(\theta, \phi) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell}^m(\theta, \phi)$$

dove  $a_{\ell m}$  sono coefficienti complessi che contengono informazioni sia sull'ampiezza che sulla fase delle armoniche sulla sfera. Tuttavia, data l'arbitrarietà del sistema di riferimento che si utilizza quando si compie un'analisi statistica della CMB, la fase può essere trascurata; diventa quindi più interessante utilizzare la quantità:

$$C_{\ell} = \langle a_{\ell m} a_{\ell m}^* \rangle$$

detta **spettro di potenza**. Nel caso di misura da parte di un solo strumento la media  $\langle \cdot \rangle$  è effettuata su tutti i possibili valori di  $m$ .

La radiazione della CMB è polarizzata. Esistono due tipi di polarizzazione chiamati *modi E* e *modi B*. Una misura dei modi B permetterebbe una verifica del paradigma dell'inflazione.<sup>3</sup>

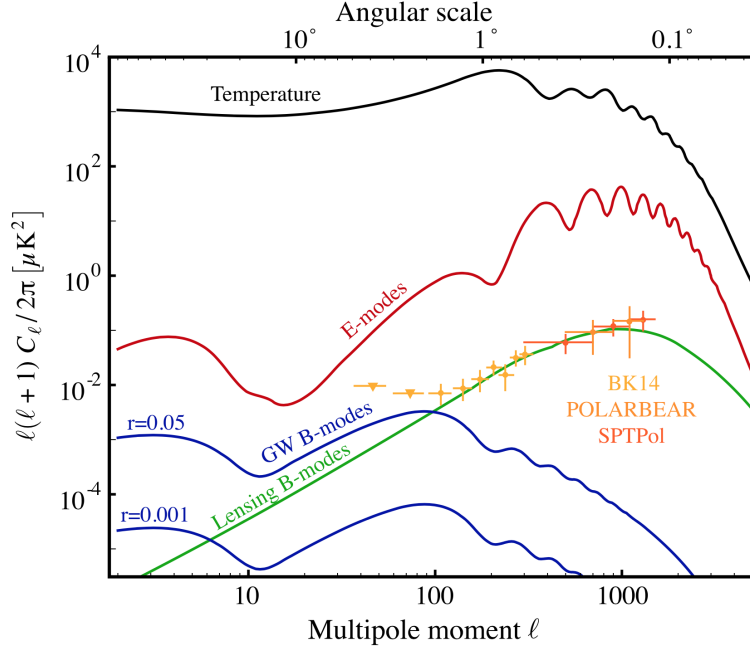


Figura 1.1: Predizioni teoriche dello spettro di potenza della temperatura (in nero), dei modi E (in rosso) e dei modi B (in blu). Lo spettro di potenza dei modi B è rappresentato per due valori diversi di  $r$  ( $r=0.001$  e  $r=0.05$ ) [1].

Se vogliamo effettuare una corretta misura della polarizzazione della CMB è necessario sottrarre al segnale misurato tutte le anisotropie dovute a oggetti presenti tra l'osservatore e la LSS. Si utilizza comunemente il termine *foreground* per riferirsi a tutte le emissioni nell'intervallo di frequenze compreso tra 10 e 1000 GHz presenti tra noi e il guscio sferico definito dalla LSS. Il problema della separazione delle componenti (*component separation*) implica la necessità di effettuare misure a multibanda lungo tutto il range di frequenze comprese tra 10 e 1000 GHz con un'altissima risoluzione così da caratterizzare il foreground ed ottenere una mappa pulita della CMB.

## 1.2 Diagramma di radiazione

Un sistema ottico è un dispositivo il cui scopo è quello di registrare la luce proveniente dal cielo e mandarla ad un rivelatore. Data la vastità di campi in cui può essere effettuato uno studio nelle microonde, è di fondamentale importanza avere a disposizione un sistema ottico che permetta questo tipo di analisi.

Per l'analisi della CMB è nostro interesse studiare la direzione di provenienza della radiazione. Consideriamo quindi, d'ora in poi, un fascio d'antenna modellato

<sup>3</sup>In cosmologia  $r$  è un parametro che prende il nome di rapporto tensore-scalare ed è definito come il rapporto tra la potenza dei modi B e dei modi E primordiali.

per misurare il segnale che proviene da una direzione specifica. La risposta di un sistema ottico ideale può essere allora rappresentata come una delta di Dirac: non nulla solo lungo la linea di vista. Tuttavia i fenomeni di interferenza e diffrazione rendono la situazione molto più complessa; in particolare nella radio astronomia e nell'astronomia a microonde il problema è particolarmente importante poichè le dimensioni degli elementi ottici degli strumenti sono comparabili alle lunghezze d'onda d'interesse.

La risposta angolare di un sistema ottico è quantificata da una funzione  $\gamma(\theta, \phi)$  detta *beam function* che definisce il **diagramma di radiazione**. Idealmente  $\gamma(\theta, \phi)$  dovrebbe corrispondere a una delta di Dirac<sup>4</sup>, quello che viene in realtà osservato è una risposta simile a quella riportata in Fig. 1.2. È possibile osservare la presenza di un *main beam* e di lobi secondari. Tipicamente la maggior parte della radiazione è contenuta nel main beam. A partire dal diagramma di radiazione si definiscono

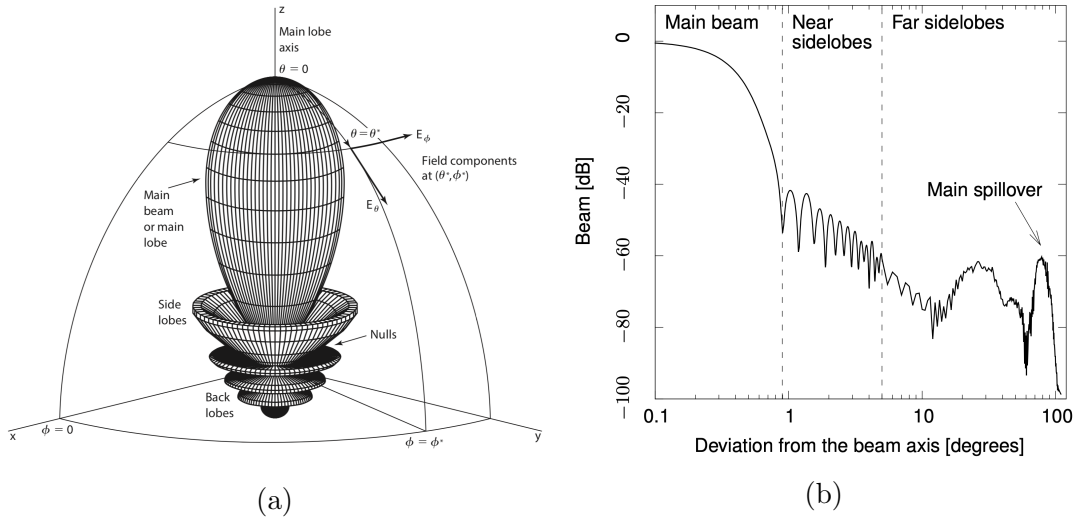


Figura 1.2: Tipico andamento della *beam function*  $\gamma(\theta, \phi)$ . La Fig. 1.2a rappresenta il diagramma di radiazione tridimensionale di un'antenna direzionale. [6]. La Fig. 1.2b rappresenta una sezione dello stesso grafico su un piano parallelo all'asse del main lobe. [3]

alcuni parametri che permettono una sua descrizione; tali parametri sono i protagonisti di questo lavoro di tesi. La **Full Width Half Maximum** (FWHM) del main beam è la larghezza angolare a metà della sua altezza ed è uno dei parametri più importanti e più diffusi per la caratterizzazione della risoluzione di uno strumento<sup>5</sup>. Nel corso dei prossimi capitoli verranno considerati due diversi valori per la FWHM, rispetto all'asse  $x$  e rispetto all'asse  $y$ . Attraverso queste due grandezze è possibile definire un ulteriore parametro: l'**ellitticità**. Questa è definita come il rapporto tra le due FWHM ponendo al numeratore la più grande tra  $\text{FWHM}_x$  e  $\text{FWHM}_y$ . Hanno inoltre grande importanza i parametri che riguardano la pola-

<sup>4</sup>Questa idealizzazione viene spesso chiamata *pencil beam idealization*

<sup>5</sup>Tale parametro viene anche indicato come  $\theta_{FWHM}$



rizzazione. Supponiamo di studiare un'antenna in trasmissione<sup>6</sup> e considerare un segnale polarizzato linearmente lungo una determinata direzione. È possibile definire una componente *co-polare* ed una componente *cross-polare* della radiazione. La componente co-polare è la radiazione irradiata lungo la direzione originale di polarizzazione mentre la componente cross-polare è la radiazione irradiata lungo la direzione perpendicolare a quella originale. In particolare i parametri utilizzati nei prossimi capitoli riguardano la componente **co-polare massima** e la componente **cross-polare massima**.

Per fare misurazioni di CMB è necessario richiedere alcune condizioni relative agli strumenti ottici. In riferimento alla Fig. 1.1 si nota che una certa scala angolare mi permette di selezionare i multipoli che è possibile osservare; è quindi necessario avere una FWHM che permetta di risolvere i dettagli della CMB entro certe scale angolari. La relazione approssimata che lega il valore di  $\ell$  alla FWHM è:  $\ell \sim 180^\circ/\theta_{FWHM}$ . Inoltre spostandosi verso la parte inferiore del grafico sono rappresentati i segnali più deboli; poichè si ha grande interesse nel misurare i modi B è necessaria una grande sensibilità strumentale. Per raggiungere elevate sensibilità è fondamentale avere a disposizione vasti piani focali che mi permettano di utilizzare un elevato numero di rivelatori. Infine, per avere una misura pulita della CMB, è essenziale rimuovere tutti i foreground e avere quindi a disposizione misure a tante frequenze diverse, il che si traduce ancora una volta nella richiesta di un elevato numero di rivelatori.

### 1.3 Simulazione di sistemi ottici

Simulare un sistema ottico significa studiare quanta potenza viene ricevuta in funzione dell'angolo rispetto alla linea di vista. Esistono diversi software in grado di simulare un fascio d'antenna e quindi la sua risposta angolare.

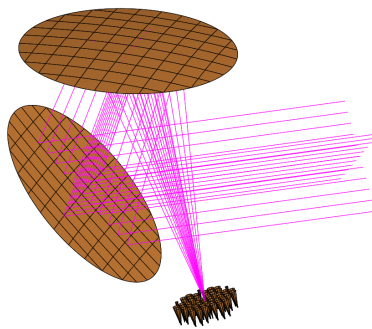


Figura 1.3: Modello in GRASP del telescopio di STRIP.

Nel corso di questo lavoro di tesi ho utilizzato dei dati relativi ad un particolare strumento per l'analisi della CMB: *STRIP*. Lo strumento STRIP (STRatospheric

---

<sup>6</sup>Strumenti ottici per lo studio della CMB lavorano in ricezione ma è possibile studiare alternativamente un'antenna in trasmissione per il *principio di reciprocità*.

Italian Polarimeter) fa parte dell'esperimento internazionale *LSPE* (Large-Scale Polarization Explorer) ideato per effettuare misure di CMB ad elevate scale angolari. In particolare STRIP è stato progettato per la misura di radiazione a basse frequenze; esso presenta 49 antenne a 43 GHz e 6 antenne a 90 GHz. In Fig. 1.3 è rappresentato il modello di STRIP attraverso il software *GRASP* (General Reflector Antenna Software Package). Attraverso GRASP è stato possibile ottenere la tabella in Fig. 1.4 che riporta le caratteristiche del beam data una posizione  $(x, y, z)$  sulla superficie focale.

GRASP è uno strumento molto potente che permette di simulare sistemi ottici complessi. Tuttavia i tempi di calcolo di GRASP sono elevati<sup>7</sup>; per ogni simulazione, e quindi per ogni antenna, vengono costruiti dei grafici come quelli riportati in Fig. 1.5 e poi da quelli vengono ricavati i valori riportati nel dataset 1.4.

	id	x	y	z	fwhm_x	fwhm_y	e	co_max	cx_max
0	21	-0.316965	0.326756	50	0.398546	0.365183	1.091361	53.84	13,1
1	42	-0.318192	0.272044	50	0.364137	0.398634	1.094738	53.86	12,79
2	63	-0.319138	0.217441	50	0.364608	0.396464	1.087371	53.88	12,11
3	83	-0.320197	0.163140	45	0.361428	0.384678	1.064326	54.07	12,21
4	103	-0.321053	0.108822	40	0.358714	0.376443	1.049424	54.20	11,6
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
164	3464	0.329983	-0.108774	45	0.351460	0.385294	1.096266	54.17	12,91
165	3486	0.330462	-0.163029	50	0.351985	0.395278	1.122996	54.04	13,01
166	3507	0.331717	-0.217468	50	0.351115	0.398046	1.133661	54.02	12,87
167	3528	0.333326	-0.271998	50	0.350770	0.401112	1.143520	53.99	13,38
168	3549	0.335293	-0.326679	50	0.350950	0.404582	1.152821	53.95	13,95

Figura 1.4: Dataset relativo allo strumento STRIP ottenuto tramite la simulazione in GRASP. Tale dataset è stato utilizzato per l'analisi descritta nei capitoli successivi.

Nel caso di STRIP è ancora possibile simulare l'intera ottica tramite GRASP poichè il numero di antenne è piuttosto limitato. Tuttavia per sistemi ottici più complessi in cui il numero di antenne diventa di circa 2 ordini di grandezza superiore, risulta del tutto impossibile effettuare una simulazione completa dell'intera ottica. È quindi nata la necessità di trovare una via alternativa che permetta di stimare i parametri che descrivono il beam in una qualsiasi posizione.

<sup>7</sup>Per produrre i dati in Fig. 1.4 sono stati impiegati due giorni.

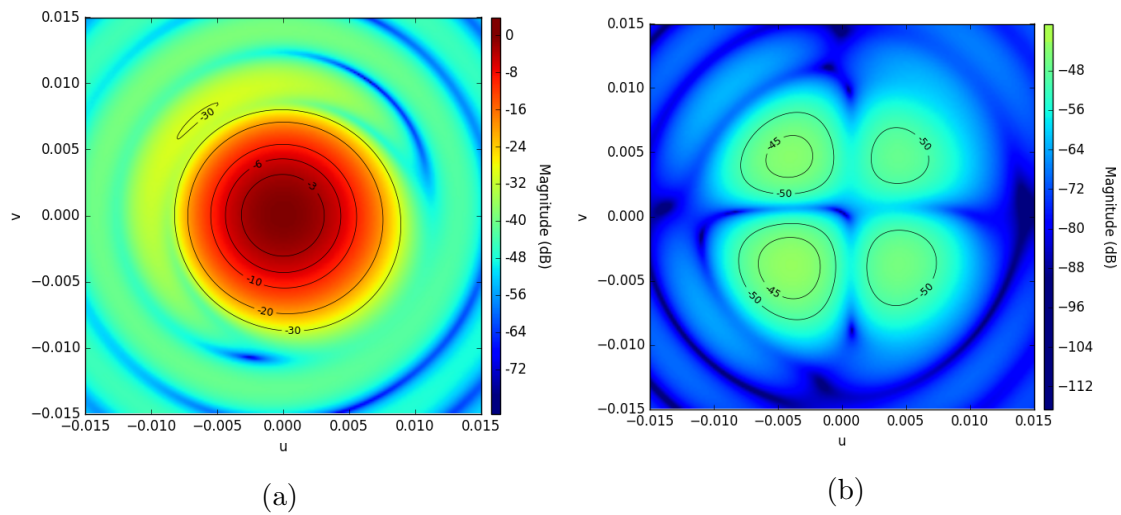


Figura 1.5: Diagramma della componente co-polare 1.5a e della componente cross-polare 1.5b di un'antenna off-axis. È possibile notare come il profilo del beam sia leggermente ellittico; per il sistema ottico di STRIP infatti l'ellitticità del fascio aumenta spostandosi dal centro del piano focale.



# Capitolo 2

## Regressione con reti neurali

2.1 Machine learning e tipi di rete

2.2 Struttura di una rete neurale



# Capitolo 3

## Previsione delle proprietà di un diagramma di radiazione

### 3.1 Interpolazione

#### 3.1.1 Interp2d

#### 3.1.2 Curve Fit

#### 3.1.3 Risultati dell'interpolazione

### 3.2 Reti neurali

#### 3.2.1 Architettura della rete

#### 3.2.2 Pre Training

#### 3.2.3 Training

### 3.3 Confronto di risultati





## Capitolo 4

## Conclusioni



# Bibliografia

- [1] K. N. Abazajian, P. Adshead, Z. Ahmed, S. W. Allen, D. Alonso, K. S. Arnold, C. Baccigalupi, J. G. Bartlett, N. Battaglia, B. A. Benson, C. A. Bischoff, J. Borrill, V. Buza, E. Calabrese, R. Caldwell, J. E. Carlstrom, C. L. Chang, T. M. Crawford, F.-Y. Cyr-Racine, F. De Bernardis, T. de Haan, S. di Serego Alighieri, J. Dunkley, C. Dvorkin, J. Errard, G. Fabbian, S. Feeney, S. Ferraro, J. P. Filippini, R. Flauger, G. M. Fuller, V. Gluscevic, D. Green, D. Grin, E. Grohs, J. W. Henning, J. C. Hill, R. Hlozek, G. Holder, W. Holzapfel, W. Hu, K. M. Huffenberger, R. Keskitalo, L. Knox, A. Kosowsky, J. Kovac, E. D. Kovetz, C.-L. Kuo, A. Kusaka, M. Le Jeune, A. T. Lee, M. Lilley, M. Loverde, M. S. Madhavacheril, A. Mantz, D. J. E. Marsh, J. McMahon, P. D. Meerburg, J. Meyers, A. D. Miller, J. B. Munoz, H. N. Nguyen, M. D. Niemack, M. Peloso, J. Peloton, L. Pogosian, C. Pryke, M. Raveri, C. L. Reichardt, G. Rocha, A. Rotti, E. Schaan, M. M. Schmittfull, D. Scott, N. Sehgal, S. Shandera, B. D. Sherwin, T. L. Smith, L. Sorbo, G. D. Starkman, K. T. Story, A. van Engelen, J. D. Vieira, S. Watson, N. Whitehorn, and W. L. Kimmy Wu. CMB-S4 Science Book, First Edition. page arXiv:1610.02743, Oct 2016.
- [2] F. Chollet. *Deep Learning with Python*. Manning, 2018.
- [3] Planck Collaboration, Aghanim, N., Armitage-Caplan, C., Arnaud, M., Ashdown, M., Atrio-Barandela, F., Aumont, J., Baccigalupi, C., Banday, A. J., Barreiro, R. B., Battaner, E., Benabed, K., Benoît, A., Benoit-Lévy, A., Bernard, J.-P., Bersanelli, M., Bielewicz, P., Bobin, J., Bock, J. J., Bonaldi, A., Bonavera, L., Bond, J. R., Borrill, J., Bouchet, F. R., Bridges, M., Bucher, M., Burigana, C., Butler, R. C., Cappellini, B., Cardoso, J.-F., Catalano, A., Chabballu, A., Chen, X., Chiang, L.-Y., Christensen, P. R., Church, S., Colombi, S., Colombo, L. P. L., Crill, B. P., Curto, A., Cuttaia, F., Danese, L., Davies, R. D., Davis, R. J., de Bernardis, P., de Rosa, A., de Zotti, G., Delabrouille, J., Dickinson, C., Diego, J. M., Dole, H., Donzelli, S., Doré, O., Douspis, M., Dupac, X., Efstathiou, G., Enßlin, T. A., Eriksen, H. K., Finelli, F., Forni, O., Frailis, M., Franceschi, E., Gaier, T. C., Galeotta, S., Ganga, K., Giard, M., Giardino, G., Giraud-Héraud, Y., Gjerløw, E., González-Nuevo, J., Górski, K. M., Gratton, S., Gregorio, A., Gruppuso, A., Hansen, F. K., Hanson, D., Harrison, D., Henrot-Versillé, S., Hernández-Monteagudo, C., Herranz, D., Hildebrandt, S. R., Hivon, E., Hobson, M., Holmes, W. A., Hornstrup, A., Hovest, W., Huffenberger, K. M., Jaffe, A. H., Jaffe, T. R., Jewell, J., Jones, W. C.,

- Juvela, M., Kangaslahti, P., Keihänen, E., Keskitalo, R., Kisner, T. S., Knoche, J., Knox, L., Kunz, M., Kurki-Suonio, H., Lagache, G., Lähteenmäki, A., Lamarre, J.-M., Lasenby, A., Laureijs, R. J., Lawrence, C. R., Leach, S., Leahy, J. P., Leonardi, R., Lesgourgues, J., Liguori, M., Lilje, P. B., Linden-Vørnle, M., López-Caniego, M., Lubin, P. M., Macías-Pérez, J. F., Maino, D., Mandolesi, N., Maris, M., Marshall, D. J., Martin, P. G., Martínez-González, E., Masi, S., Massardi, M., Matarrese, S., Matthai, F., Mazzotta, P., Meinhold, P. R., Melchiorri, A., Mendes, L., Mennella, A., Migliaccio, M., Mitra, S., Moneti, A., Montier, L., Morgante, G., Mortlock, D., Moss, A., Munshi, D., Naselsky, P., Natoli, P., Netterfield, C. B., Nørgaard-Nielsen, H. U., Novikov, D., Novikov, I., O'Dwyer, I. J., Osborne, S., Paci, F., Pagano, L., Paladini, R., Paoletti, D., Partridge, B., Pasian, F., Patanchon, G., Pearson, D., Peel, M., Perdereau, O., Perotto, L., Perrotta, F., Pierpaoli, E., Pietrobon, D., Plaszczyński, S., Pointecouteau, E., Polenta, G., Ponthieu, N., Popa, L., Poutanen, T., Pratt, G. W., Prézeau, G., Prunet, S., Puget, J.-L., Rachen, J. P., Rebolo, R., Reinecke, M., Remazeilles, M., Ricciardi, S., Riller, T., Rocha, G., Rosset, C., Rossetti, M., Roudier, G., Rubiño-Martín, J. A., Rusholme, B., Sandri, M., Santos, D., Scott, D., Seiffert, M. D., Shellard, E. P. S., Spencer, L. D., Starck, J.-L., Stolyarov, V., Stompor, R., Sureau, F., Sutton, D., Suur-Uski, A.-S., Sygnet, J.-F., Tauber, J. A., Tavagnacco, D., Terenzi, L., Toffolatti, L., Tomasi, M., Tristram, M., Tucci, M., Tuovinen, J., Türler, M., Umana, G., Valenziano, L., Valiviita, J., Van Tent, B., Varis, J., Vielva, P., Villa, F., Vittorio, N., Wade, L. A., Wandelt, B. D., Watson, R., Wilkinson, A., Yvon, D., Zacchei, A., and Zonca, A. Planck 2013 results. v. lfi calibration. *A&A*, 571:A5, 2014.
- [4] S. Silver and I. of Electrical Engineers. *Microwave Antenna Theory and Design*. IEE electromagnetic waves series. P. Peregrinus, 1984.
- [5] E. Stevens and L. Antiga. *Deep Learning with PyTorch*. Manning, 2019.
- [6] M. Tomasi, C. Franceschet, and S. Realini. The quest for cmb b-modes.
- [7] T. Wilson and S. Hüttemeister. *Tools of Radio Astronomy: Problems and Solutions*. Astronomy and Astrophysics Library. Springer Berlin Heidelberg, 2012.