



**A model of diffuse Galactic radio
emission from 10 MHz to 100 GHz**

Angélica de Oliveira-Costa *et al*, 2008, MNRAS

のレビュー

柏野 大地

名古屋大学

abstract

- diffuse galactic radio emissionを理解することは、銀河研究のみならず、宇宙論的観測の前景放射をminimizeする上でもとても大事。
- 11枚の異なる周波数の全天マップを3つのPrincipal componentでフィットする。

Goals

- Global sky model (GSM) をつくる:
空の任意の方向、任意の周波数の
Galactic emissionを予言したい。
- 精度をちゃんと定量化したい。
- 精度が良いことに加え、**簡単であること**
が望ましい

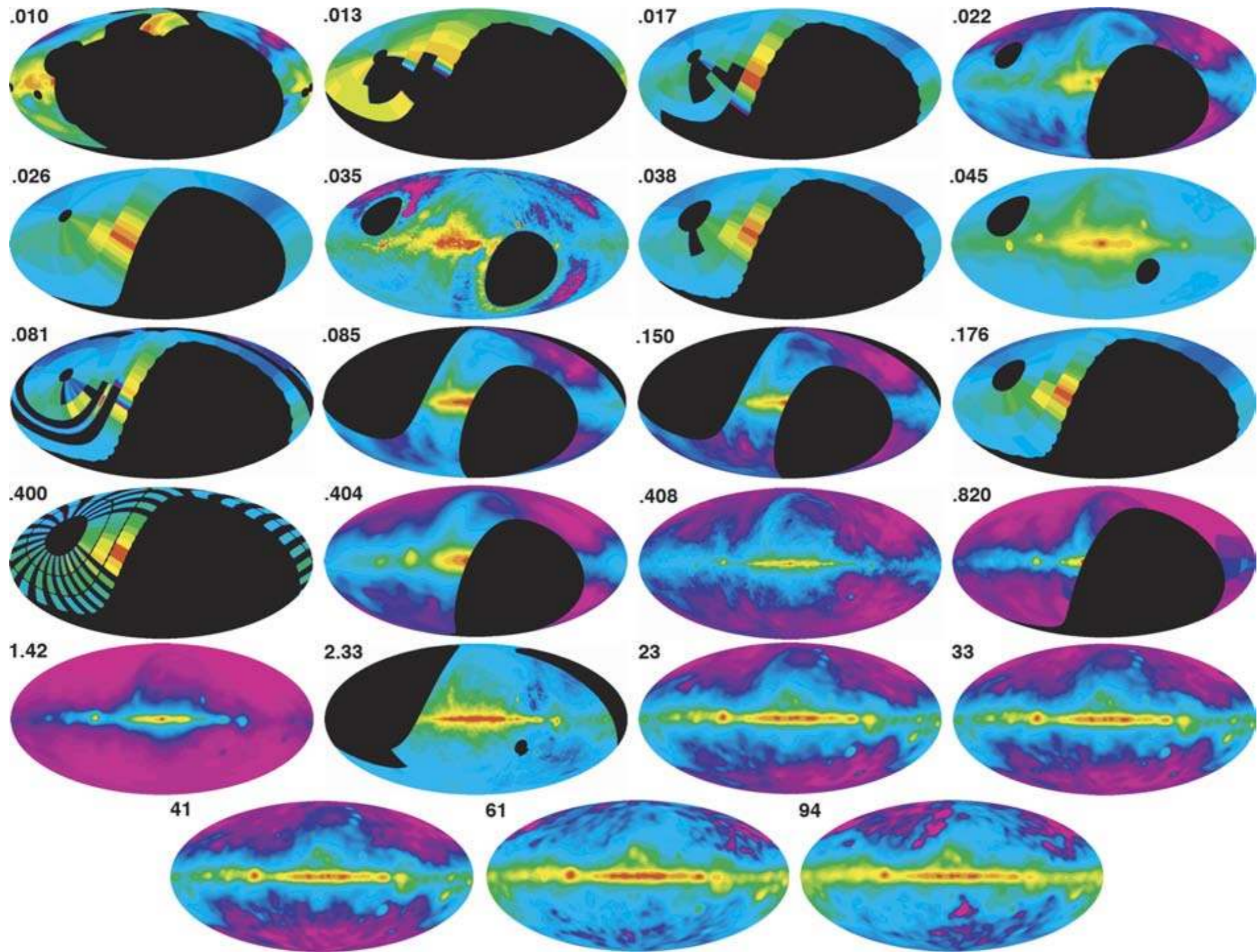
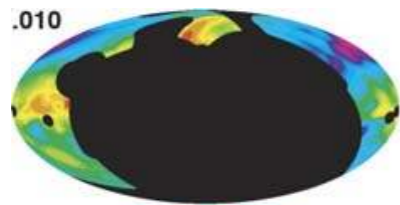
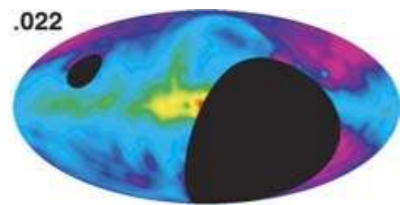


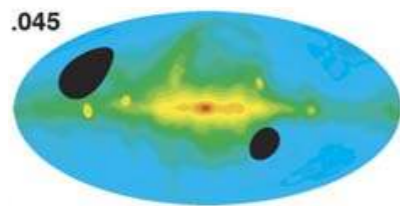
Figure 1. The maps show (from left- to right-hand side, top to bottom) are the 0.010, 0.0135, 0.0175, 0.022, 0.026, 0.0345, 0.038, 0.045, 0.0815, 0.085, 0.150, 0.176, 0.400, 0.404, 0.408, 0.820, 1.42, 2.326 GHz, and the CMB-free *WMAP* foreground maps at 23, 33, 41, 61 and 94 GHz. All the maps are in Galactic coordinates and shown in Mollweide projection, where the Galactic Centre is at the middle of the map and Galactic longitude increases to the left-hand side.



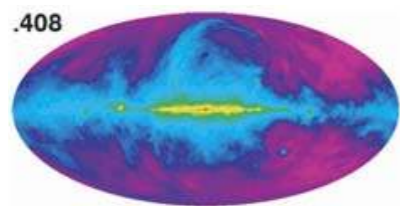
10 MHz



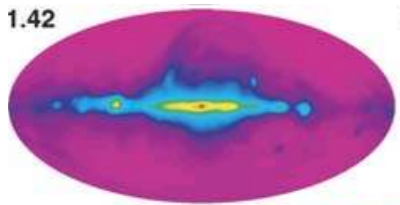
22 MHz



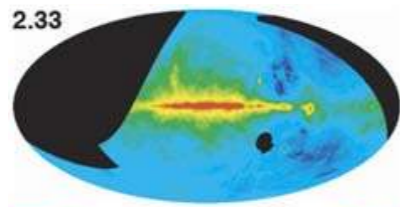
45 MHz



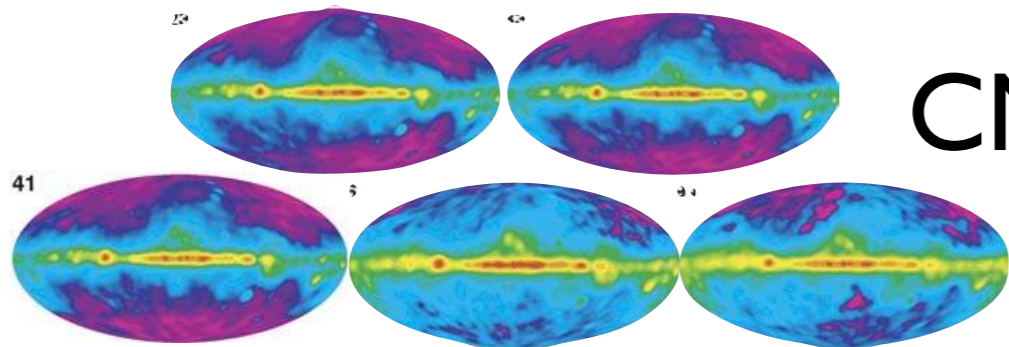
408 MHz



1.42 GHz



2.326 GHz



CMB-free WMAP foreground maps
23, 33, 41, 61, 94 GHz

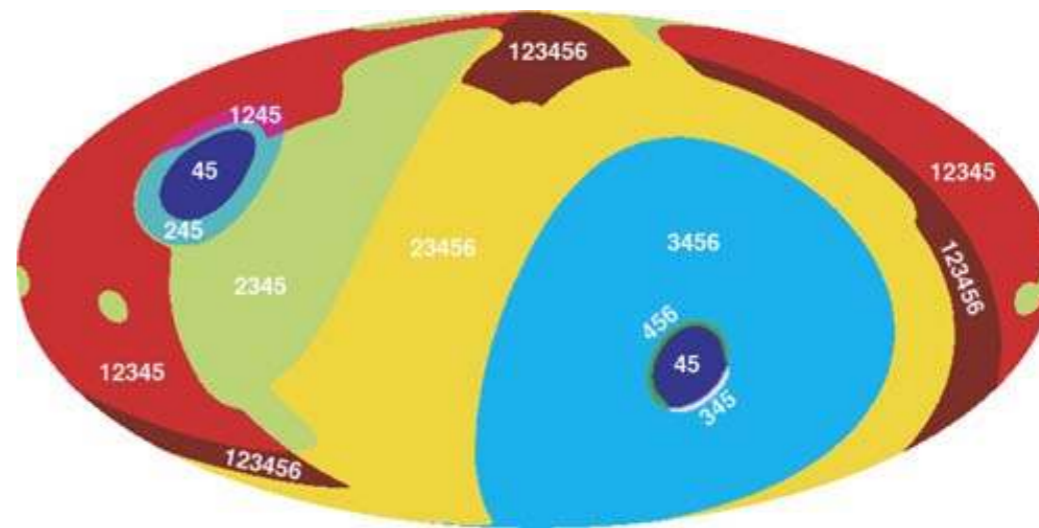


Figure 2. Sky coverage/overlap, in Galactic coordinates, of the six key maps below the *WMAP* frequencies: the numbers from 1 to 6 correspond to 10, 22, 45, 408, 1420 and 2326 MHz, respectively.

Method comparison

- Single-component models
- Polynomial and spline model
- Principal component analysis

Single-component models

- low- ν ではsynchrotron radiationが優勢

- Power-law

$$T(\hat{r}_i, \nu) = T(\hat{r}_i, \nu_*) \left(\frac{\nu}{\nu_*} \right)^\beta$$

➡全然ダメ

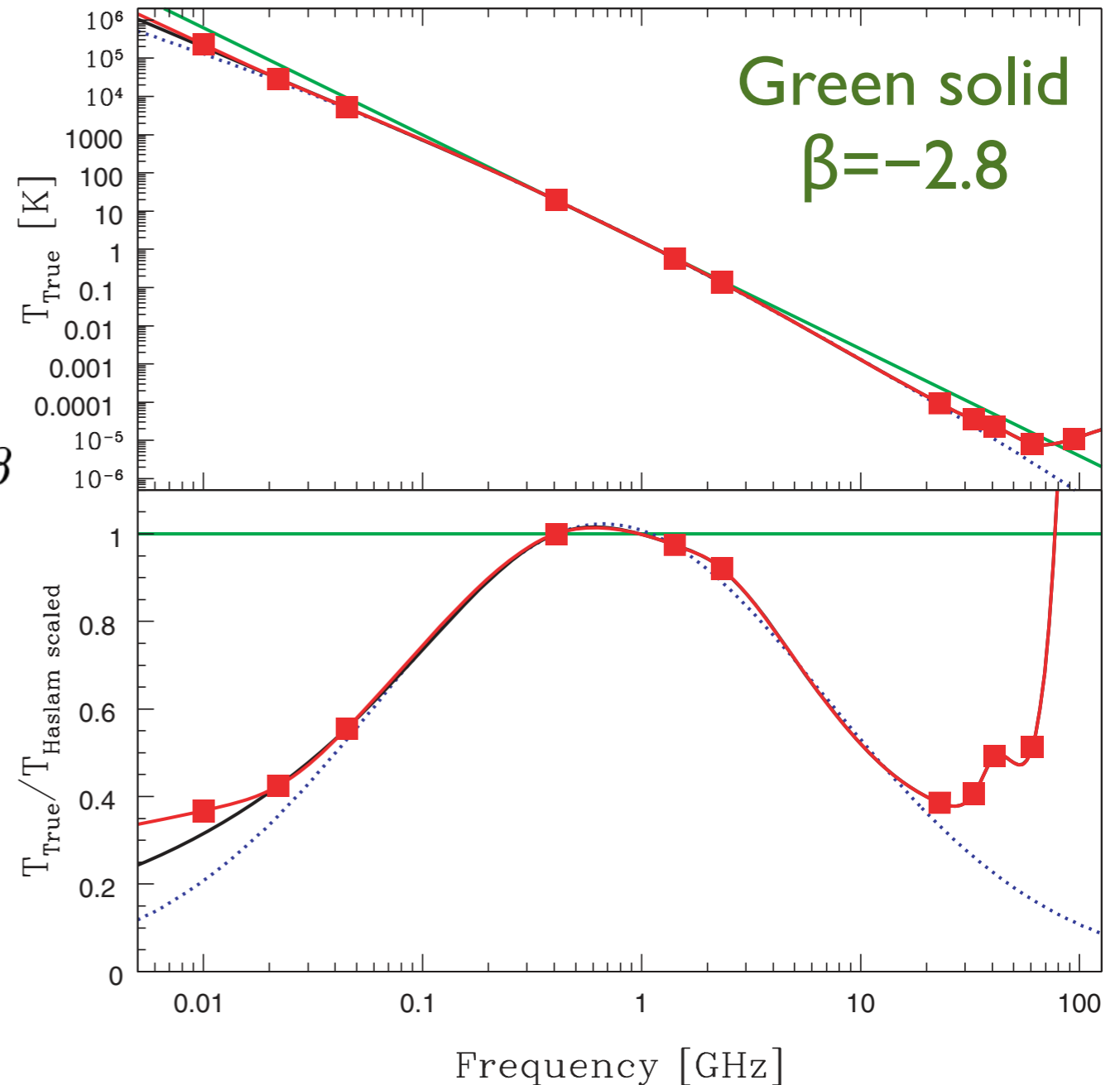


Figure 3. Comparison between the different GSM methods presented in Section 3.2. Squares show the 11 measurements available at a pixel at $(l, b) = (11^\circ.3, 89^\circ.6)$. Lines show fits based on power-law-scaling of the Haslam map

- 銀河の星間物質はとても複雑でいろんな相互作用がある。
- High- ν ではfree-freeやダスト放射が卓越してくる。
- 放射成分の割合が空の方向により異なる。
つまり周波数依存性は空の方向により異なる。

- Galactic ISMはとても複雑でいろんな相互作用がある。

- High- ν ではfreeze-freeゆがみ放射が卓越してくる。
そんなに簡単ではない

- 放射成分の割合が空の方向により異なる。

つまり周波数依存性は空の方向により異なる。

Polynomial and spline fitting

- **Quadratic polynomial** (logT-logvでフィットするのが良い)

$$\ln T(\hat{r}_i, \nu) = \alpha(\hat{r}_i) + \beta(\hat{r}_i) \ln \frac{\nu}{\nu_*} + \gamma(\hat{r}_i) \left(\ln \frac{\nu}{\nu_*} \right)^2$$

高周波側のスペクトルを再現できない。

パラメータを増やすか？

➡ overfitting (過剰適応)の問題

➡ 簡単でなくなる

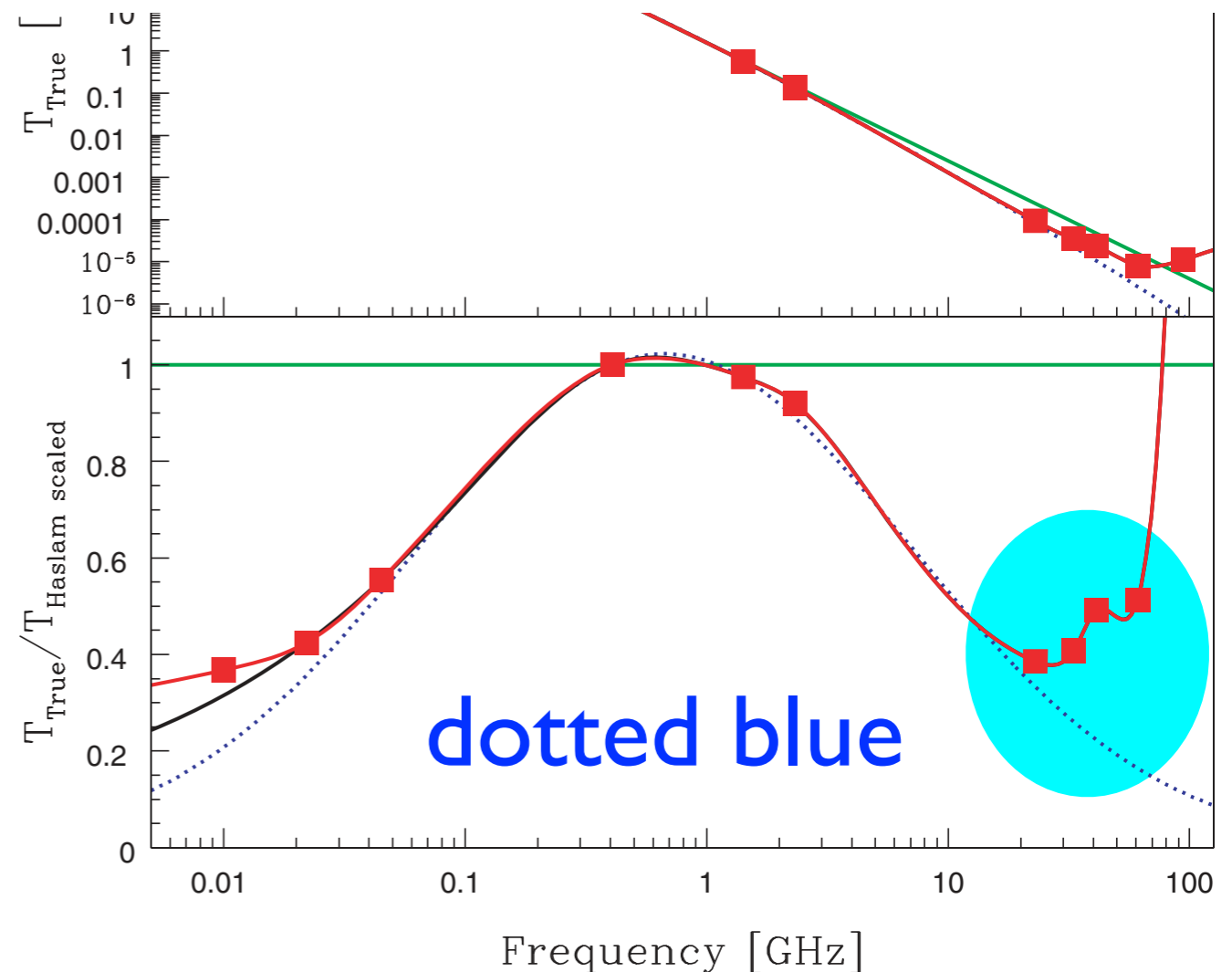


Figure 3. Comparison between the different GSM methods presented in

- **Spline fitting**はどうか？
- 一番左側 (10MHz) だけ外し、うまく外挿できるか？

splineは物理的な意味合いを全く考えず、ただ点をつなぐだけなので、点がない場所を外挿できない。

だめ

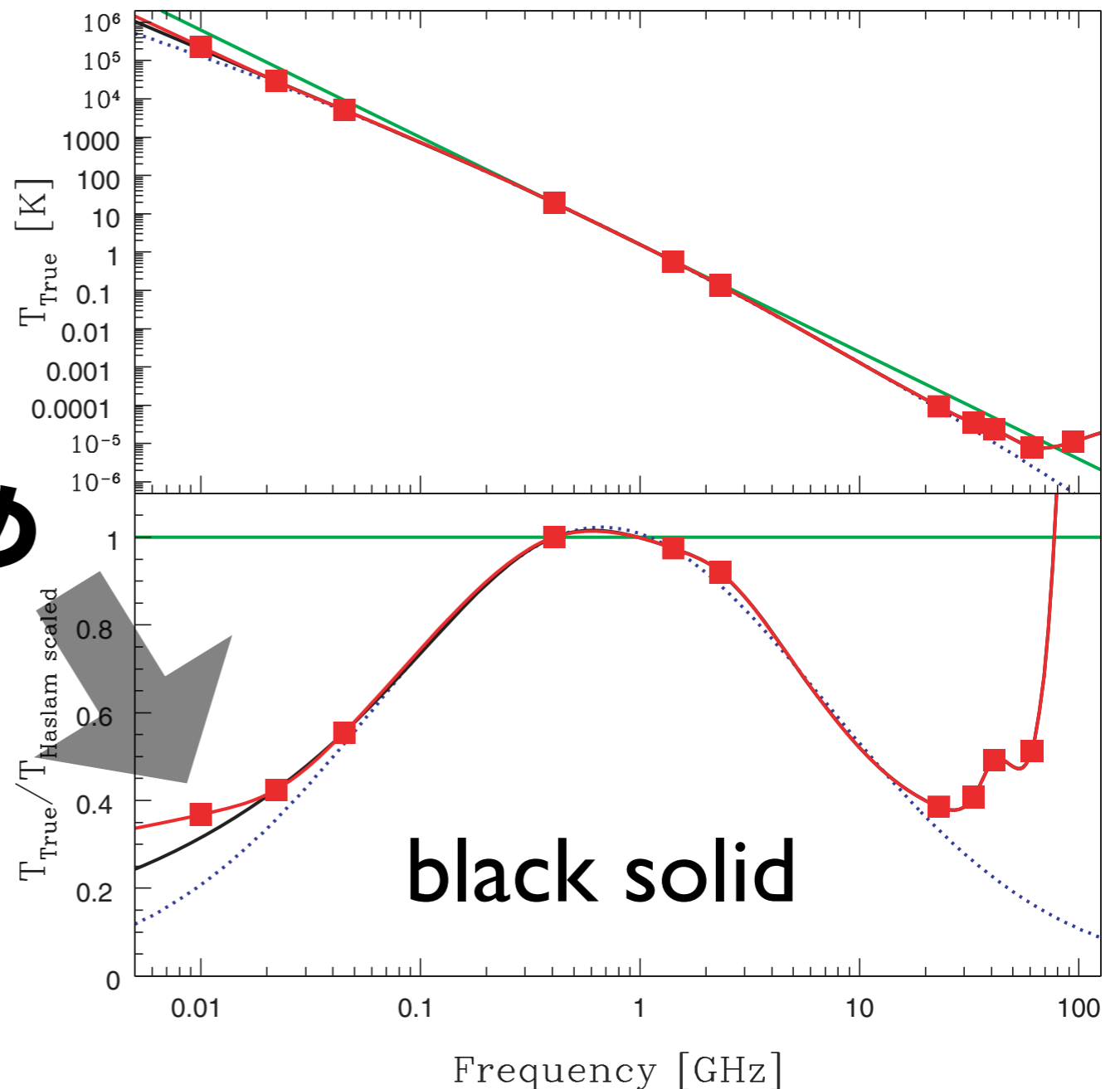


Figure 3. Comparison between the different GSM methods presented in

● Spline fittingの欠点

- ✓ 外挿が苦手。多くのinput mapが空を部分的にしかカバーしておらず、方向によりいろんな周波数のデータが抜け落ちているため、うまく外挿できる手法が必要。
- ✓ さらにinput mapの一つがnoisyだと、モデルに強く伝播してしまう。
- ✓ $\log T$ - $\log v$ で表現すると、観測誤差の扱いなどがややこしい。でもlinearではフィットがさらに悪くなる。

- **Spline fittingの欠点**

- ✓ 外挿が苦手。多くのinput mapが空を部分的にしかカバーしておらず、方向によりいろんな周波数のデータが抜け落ちているため、うまく外挿できる

手法が必要。
ということで、主成分分析!

- ✓ さらにinput mapの一つがnoisyだと、モデルに強く伝播してしまう。

- ✓ $\log T$ - $\log v$ で表現すると、観測誤差の扱いなどがややこしい。でもlinearではフィットがさらに悪くなる。

Principal component analysis

- 11 freq. 全てそろっている部分:

- ▶ 11 x 11 matrix of second moments: $\mathbf{C} \equiv \frac{1}{n_{\text{pix}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{pix}}} \mathbf{y}_i \mathbf{y}_i^t$

- ▶ Dimensionless correlation matrix:
➡ normalized maps

$$R_{jk} \equiv \frac{C_{jk}}{\sigma_j \sigma_k}$$

- ▶ Diagonalize \mathbf{R} : $\mathbf{R} = \mathbf{P} \mathbf{\Lambda} \mathbf{P}^t$

- ▶ Principal components: $\mathbf{a}_i = \mathbf{P}^t \mathbf{z}_i$, $\mathbf{z}_i = \mathbf{P} \mathbf{a}$.

- どの領域も、6以上の周波数データがある。

- ▶ 5以下の主成分でフィットできる。精度は？

- 固有値

はじめの数個の主成分でほとんど全ての情報をカバーしている。

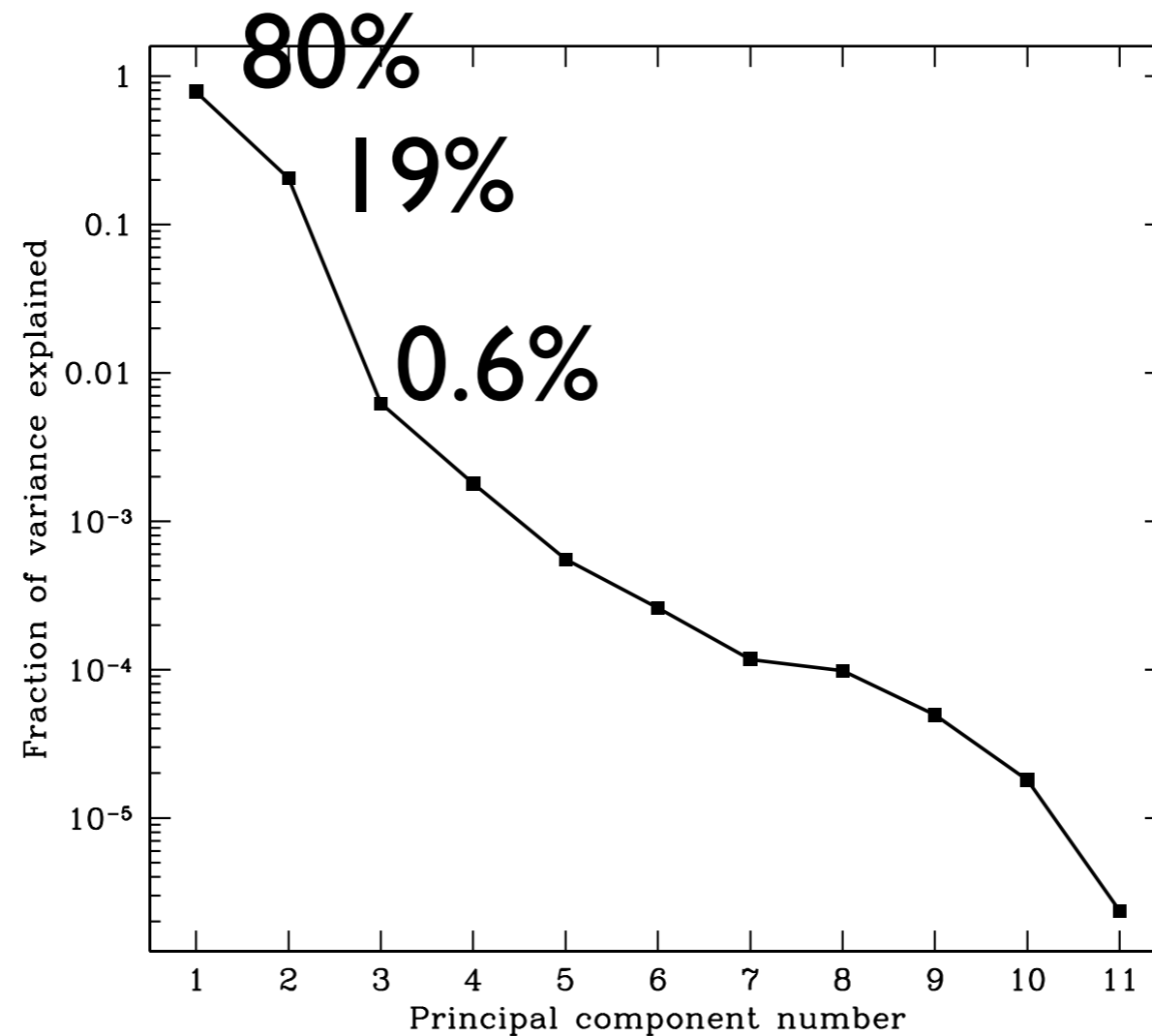
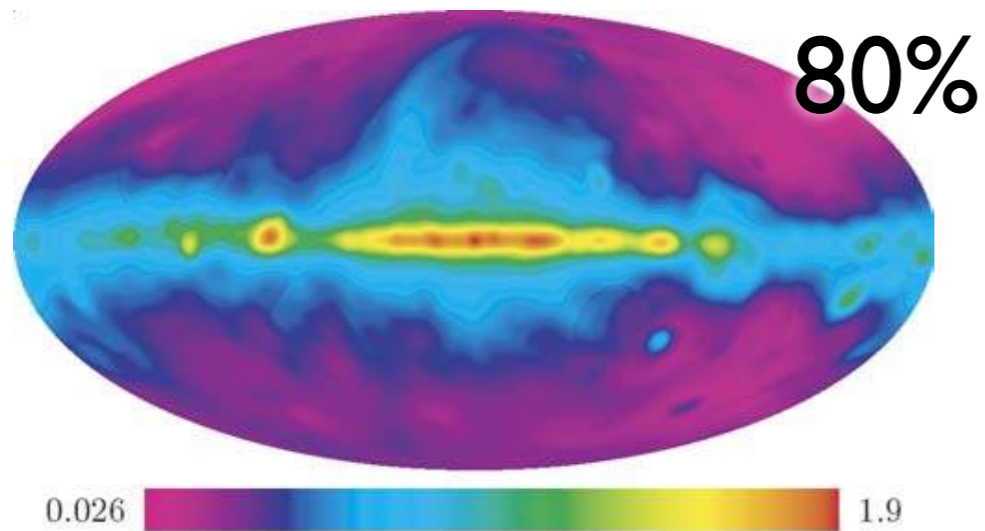


Figure 4. The eigenvalues $\lambda_i/11$ for the 11 principal components, which can be interpreted as the fraction of the total variance at the 11 frequencies that each component explains.

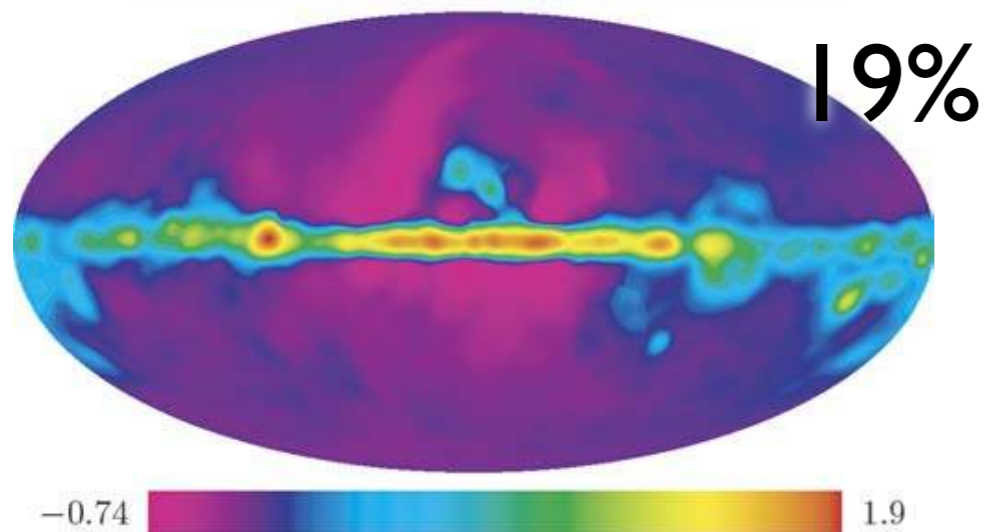
Principal components



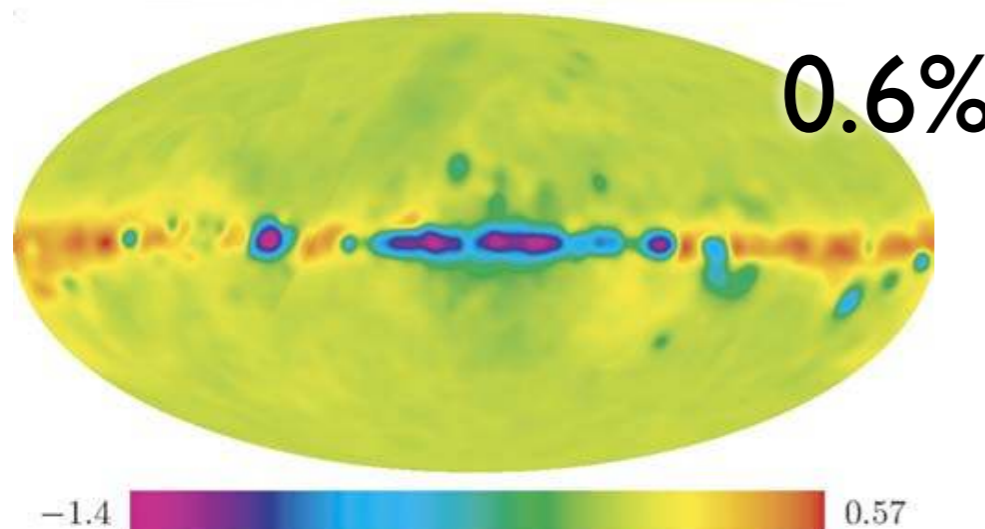
1st PC traces

the total amount of “stuff”

漠然とした“モノ”



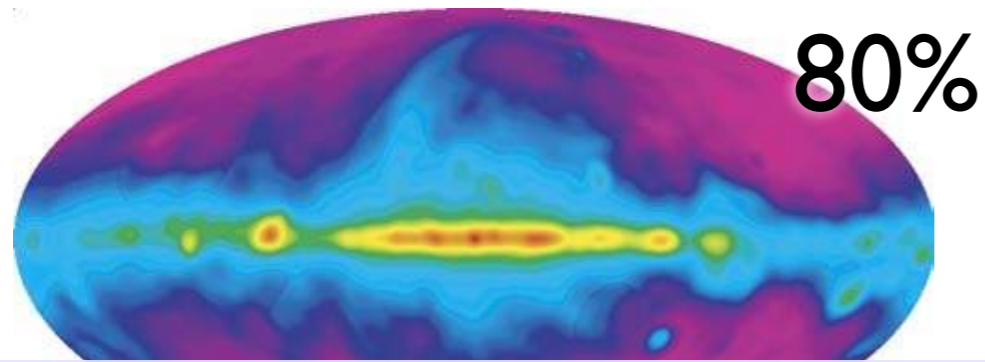
2nd PC encodes what fraction is due to **synchrotron radiation**



3rd PC encodes what fraction of **non-synchrotron radiation** is due to **thermal dust radiation**

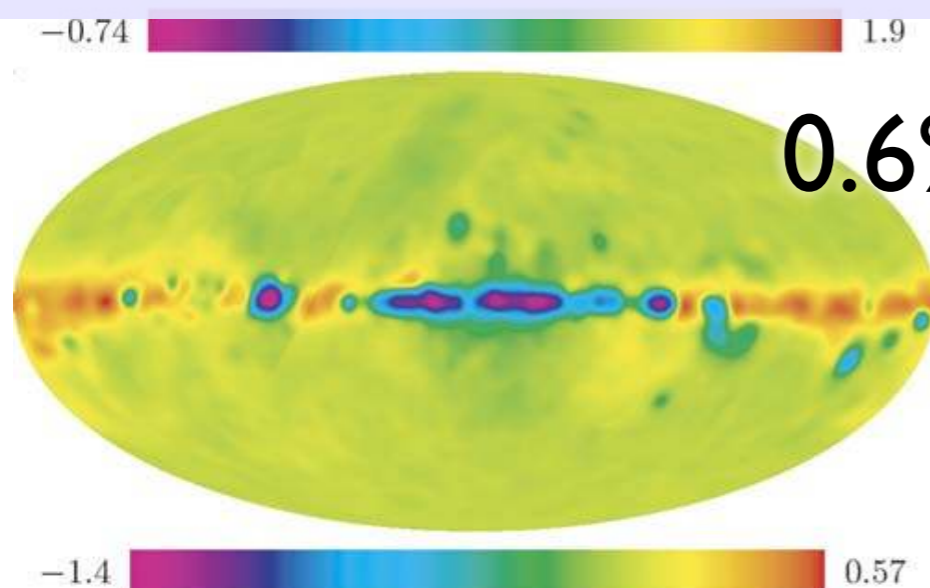
Figure 6. The first three principal components, which can be crudely in-

Principal components



1st PC traces
the total amount of “**stuff**”

Physical componentは強く相関するが、
これらの成分には相関がない **by definition**

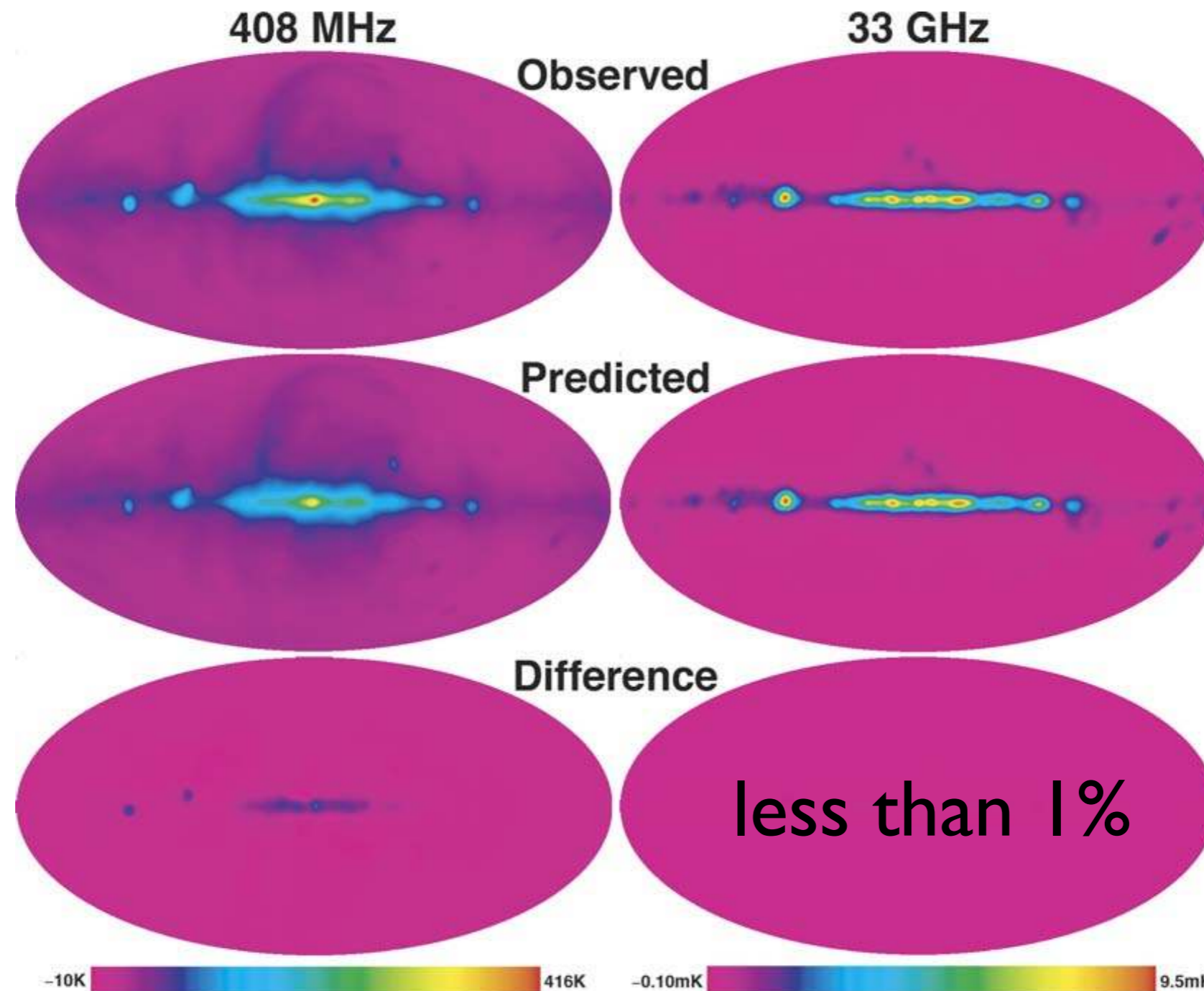


0.6% 3rd PC encodes what fraction of
non-synchrotron radiation is
due to **thermal dust radiation**

Figure 6. The first three principal components, which can be crudely in-

Accuracy

他の10成分を使って主成分分析をして、
第1-3成分で再構成したマップと実際の観測マップの比較



Accuracy

他の10成分を使って主成分分析をして、
第1-3成分で再構成したマップと実際の観測マップの比較

408 MHz

33 GHz

Observed

実際は11freq.全て使うので、
さらに精度が向上するはず

Difference

less than 1%

-10K 416K

-0.10mK 9.5mK

何成分目まで使うのが良いか？

Table 3. Relative rms error in the sky region 123456.

ν (GHz)	Optimal	Principal components used					Unexplained fraction
		1	2	3	4	5	
0.010	0.062	0.543	0.078	0.072	0.065	0.066	0.003 87
0.022	0.036	0.450	0.064	0.060	0.039	0.038	0.001 26
0.045	0.035	0.438	0.046	0.046	0.038	0.038	0.001 21
0.408	0.034	0.379	0.044	0.044	0.039	0.039	0.001 15
1.420	0.111	0.386	0.135	0.135	0.150	0.196	0.012 35
2.326	0.075	0.235	0.084	0.083	0.081	0.137	0.005 62
23	0.015	0.463	0.058	0.026	0.026	0.026	0.000 24
33	0.006	0.504	0.086	0.009	0.008	0.008	0.000 04
41	0.009	0.519	0.089	0.017	0.015	0.015	0.000 08
61	0.018	0.542	0.023	0.023	0.023	0.023	0.000 33
94	0.057	0.538	0.225	0.059	0.059	0.059	0.003 28

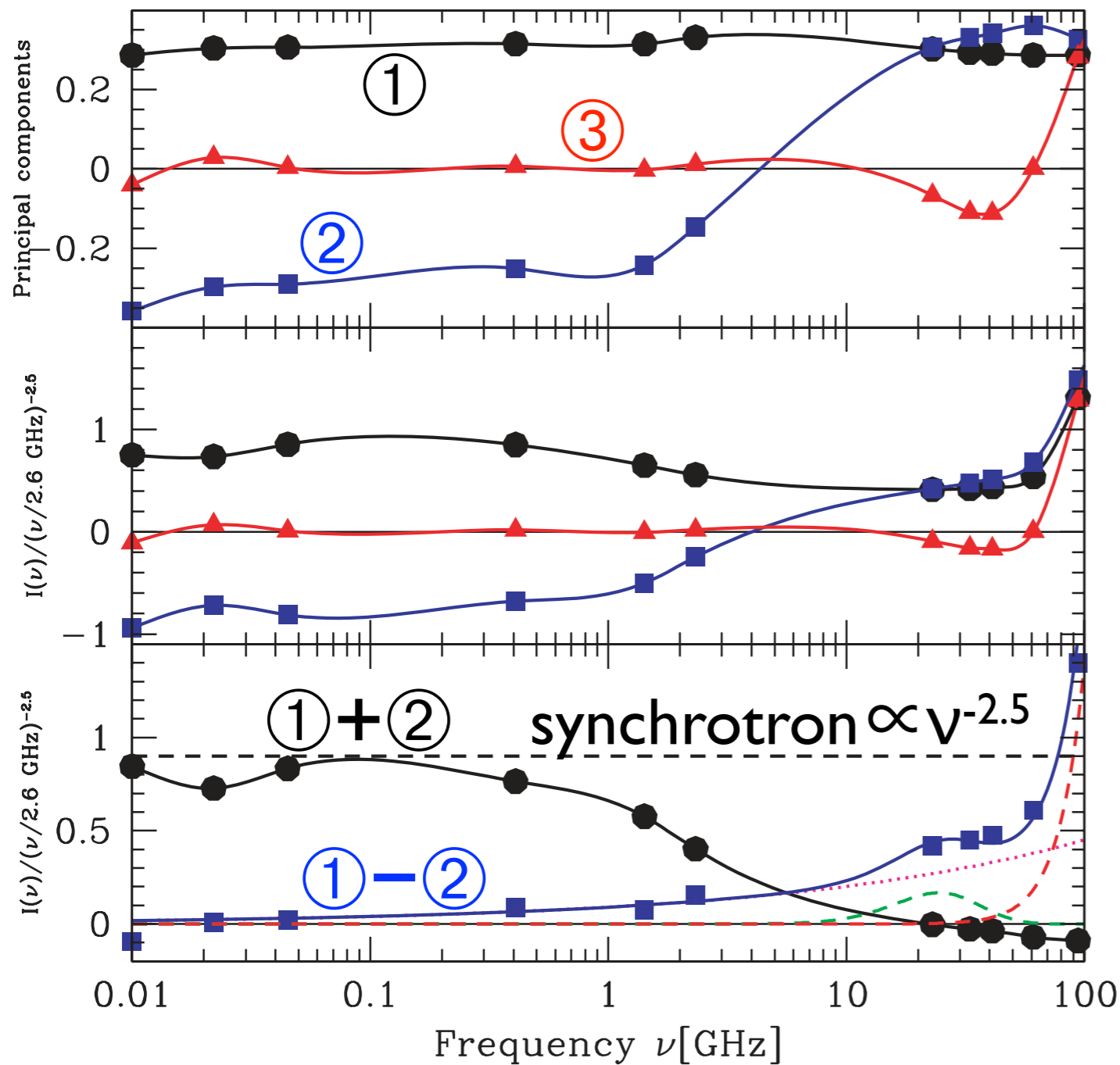
3成分目までは精度の向上が見られる

Table 3. Relative rms error in the sky region 123456.

ν (GHz)	Optimal	Principal components used					Unexplained fraction
		1	2	3	4	5	
0.010	0.062	0.543	0.078	0.072	0.065	0.066	0.003 87
0.022	0.036	0.450	0.064	0.060	0.039	0.038	0.001 26
0.045	0.035	0.438	0.046	0.046	0.038	0.038	0.001 21
0.408	0.034	0.379	0.044	0.044	0.039	0.039	0.001 15
1.420	0.111	0.386	0.135	0.135	0.150	0.196	0.012 35
2.326	0.075	0.235	0.084	0.083	0.081	0.137	0.005 62
23	0.015	0.463	0.058	0.026	0.026	0.026	0.000 24
33	0.006	0.504	0.086	0.009	0.008	0.008	0.000 04
41	0.009	0.519	0.089	0.017	0.015	0.015	0.000 08
61	0.018	0.542	0.023	0.023	0.023	0.023	0.000 33
94	0.057	0.538	0.225	0.059	0.059	0.059	0.003 28

Physical interpretation

3 主成分の周波数依存性



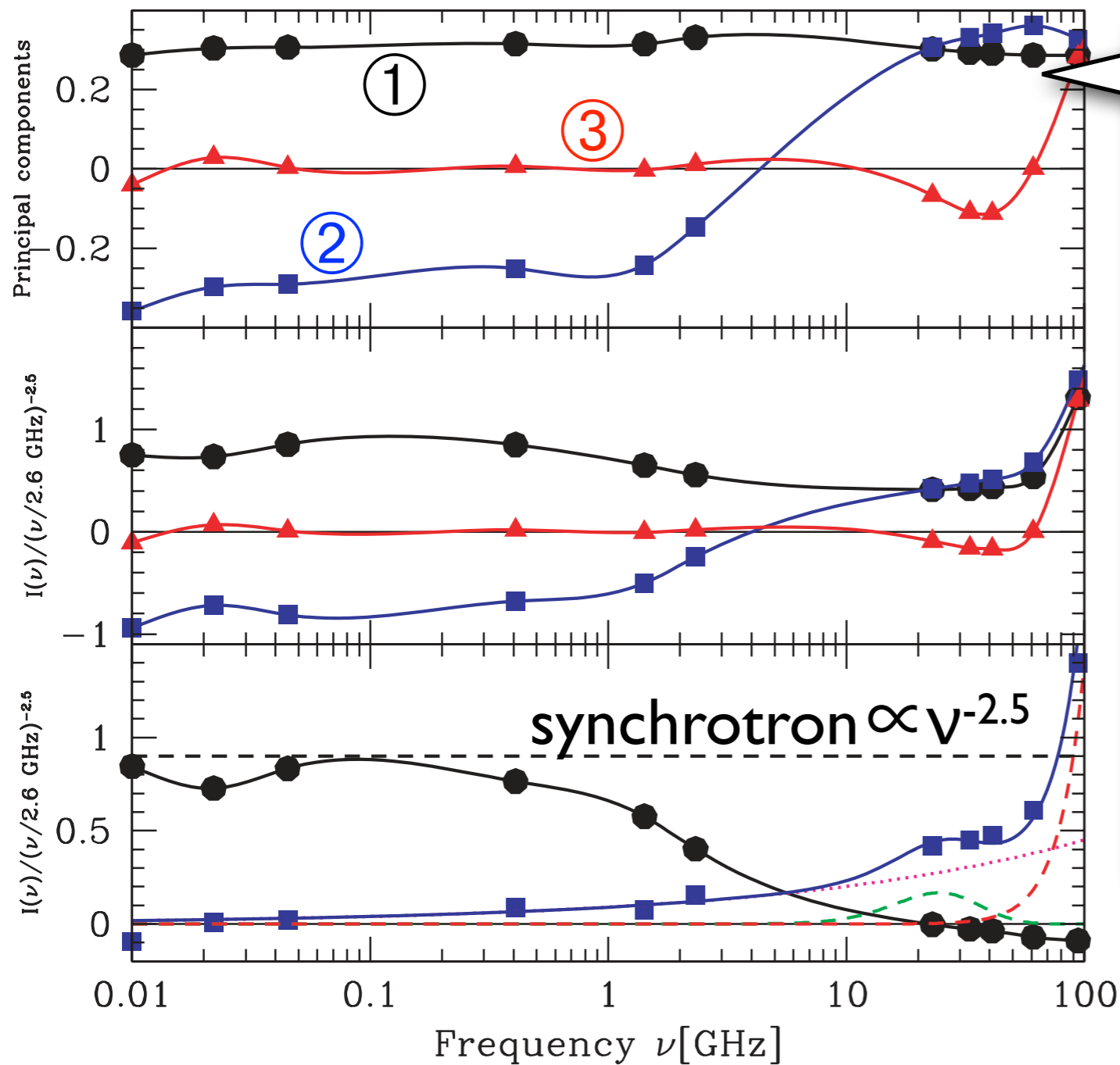
Principal components

$\text{RMS} * f_{\text{PC}} / (\nu / 2.6 \text{ GHz})^{-2.5}$

free-free
spinning dust
thermal dust

Figure 5. The frequency dependence is plotted for the first three principal components, labelled by black dots, blue squares and red triangles, respectively. The top panel is in units of the total rms fluctuations at each frequency, whereas the middle panel shows the sky brightness temperature divided by $(\nu/2.6 \text{ GHz})^{-2.5}$ to keep all frequencies on roughly the same scale. The bot-

3 主成分の周波数依存性



第1主成分:

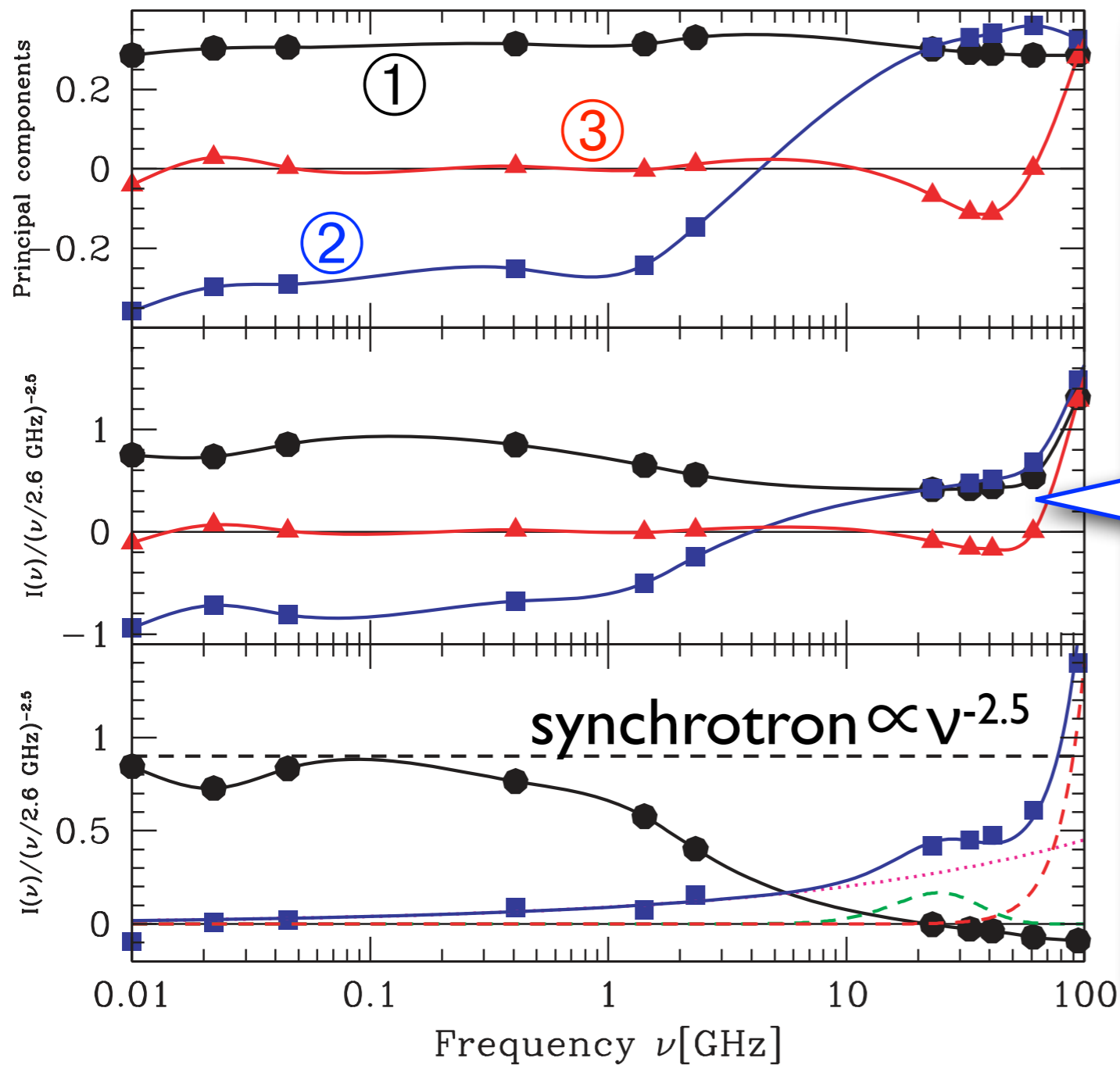
全周波数帯に平等に依存

➡ **trace the amount of 'stuff'**

他の成分は異なるphysical componentの割合を記述していると考えられる。

Figure 5. The frequency dependence is plotted for the first three principal components, labelled by black dots, blue squares and red triangles, respectively. The top panel is in units of the total rms fluctuations at each frequency, whereas the middle panel shows the sky brightness temperature divided by $(\nu/2.6 \text{ GHz})^{-2.5}$ to keep all frequencies on roughly the same scale. The bot-

3 主成分の周波数依存性



第2主成分:

$\nu \leq 2\text{GHz}$ では $\propto \nu^{-2.5}$

つまり Synchrotron-like。

high ν ではFF + spinning dust + thermal dustをトレースして
るっぽい...?

➡ 全放射における

synchrotron放射の割合

Figure 5. The frequency dependence is plotted for the first three principal components, labelled by black dots, blue squares and red triangles, respectively. The top panel is in units of the total rms fluctuations at each frequency, whereas the middle panel shows the sky brightness temperature divided by $(\nu/2.6\text{ GHz})^{-2.5}$ to keep all frequencies on roughly the same scale. The bot-

3 主成分の周波数依存性

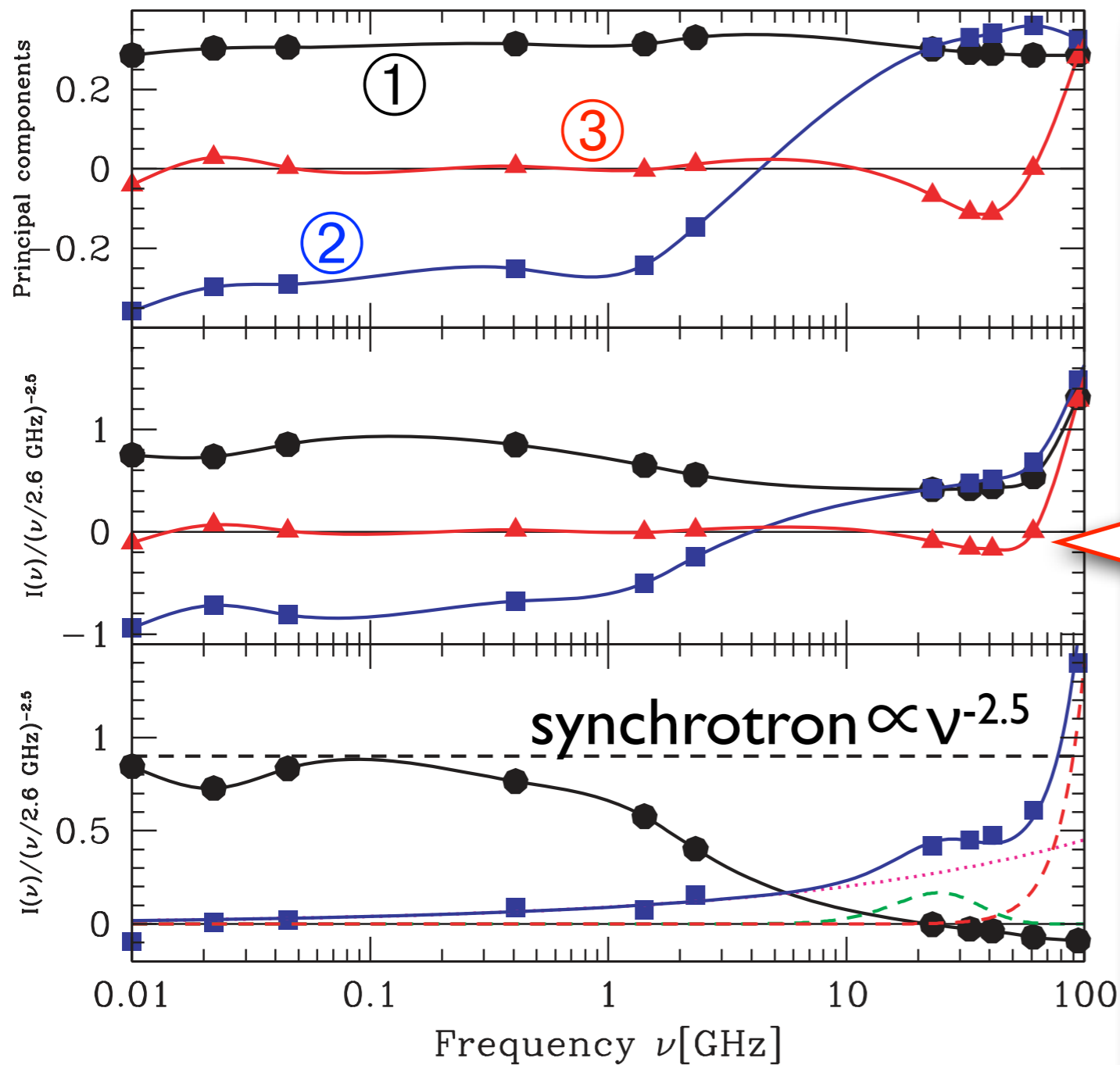


Figure 5. The frequency dependence is plotted for the first three principal components, labelled by black dots, blue squares and red triangles, respectively. The top panel is in units of the total rms fluctuations at each frequency, whereas the middle panel shows the sky brightness temperature divided by $(\nu/2.6 \text{ GHz})^{-2.5}$ to keep all frequencies on roughly the same scale. The bot-

第3主成分:

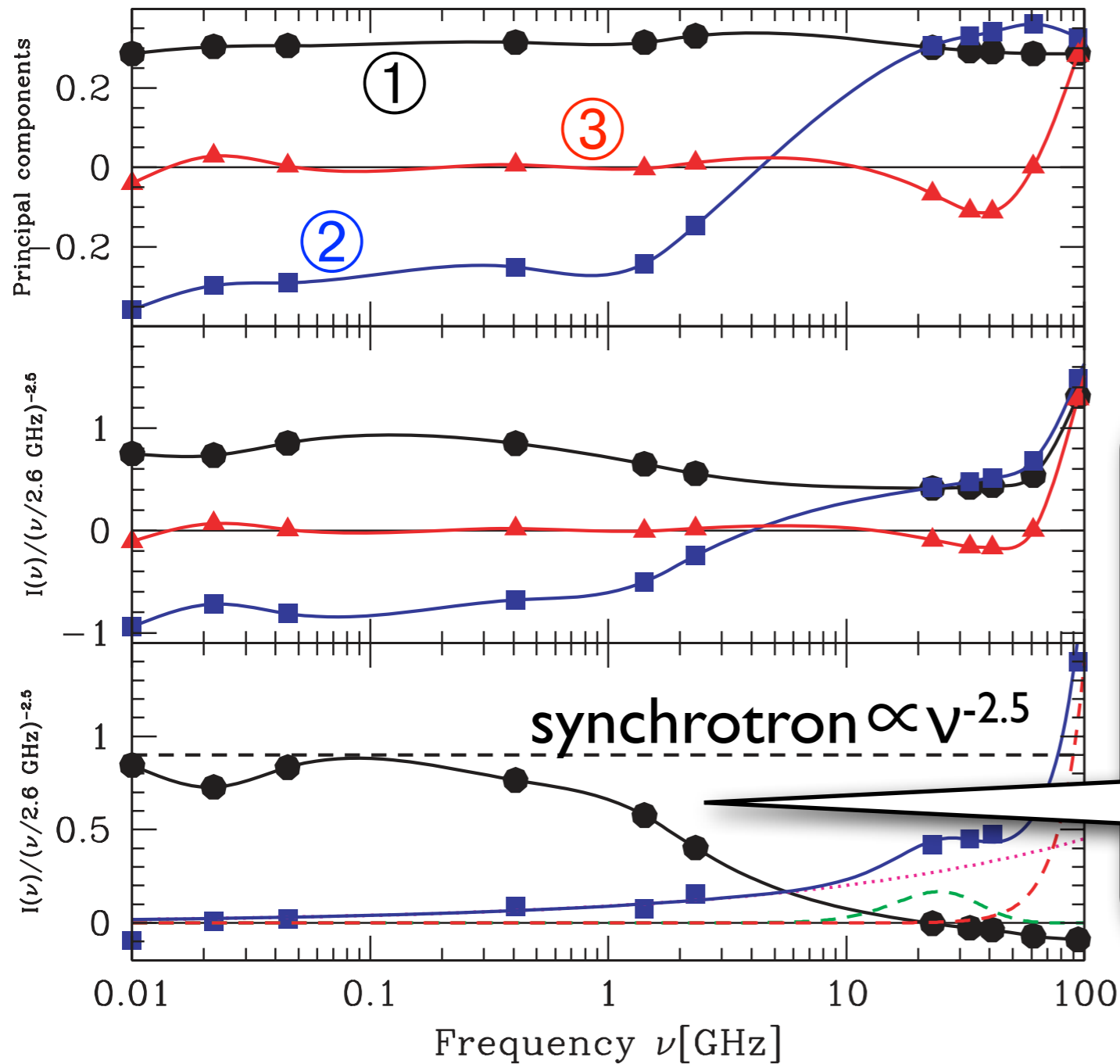
high ν : thermal dustっぽい。
spinning dustの部分がネガ
ティブに現れている。

low ν はほぼゼロ。

- free-free
- spinning dust
- thermal dust

➡ non-synchrotron放射の
うちthermal dustが
占める割合

3 主成分の周波数依存性



Principal components

1+2成分 (ほんとは1+(-2))

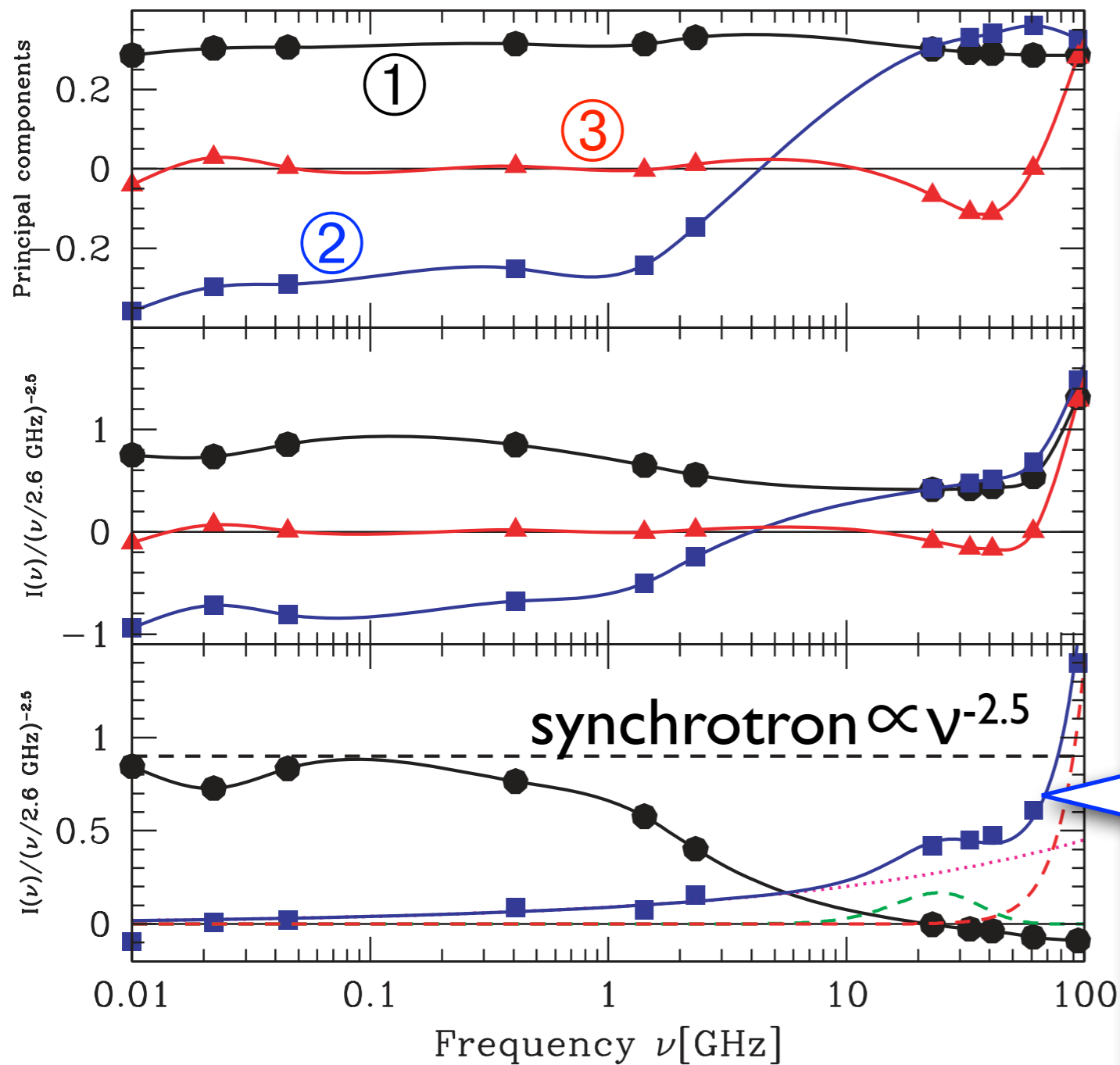
low ν : $\propto \nu^{-2.5}$

high ν : 徐々に急勾配に

⇒ Synchrotron template

Figure 5. The frequency dependence is plotted for the first three principal components, labelled by black dots, blue squares and red triangles, respectively. The top panel is in units of the total rms fluctuations at each frequency, whereas the middle panel shows the sky brightness temperature divided by $(\nu/2.6 \text{ GHz})^{-2.5}$ to keep all frequencies on roughly the same scale. The bot-

3 主成分の周波数依存性



1-2成分 (ほんとは1-(-2))

..... free-free

----- spinning dust

----- thermal dust

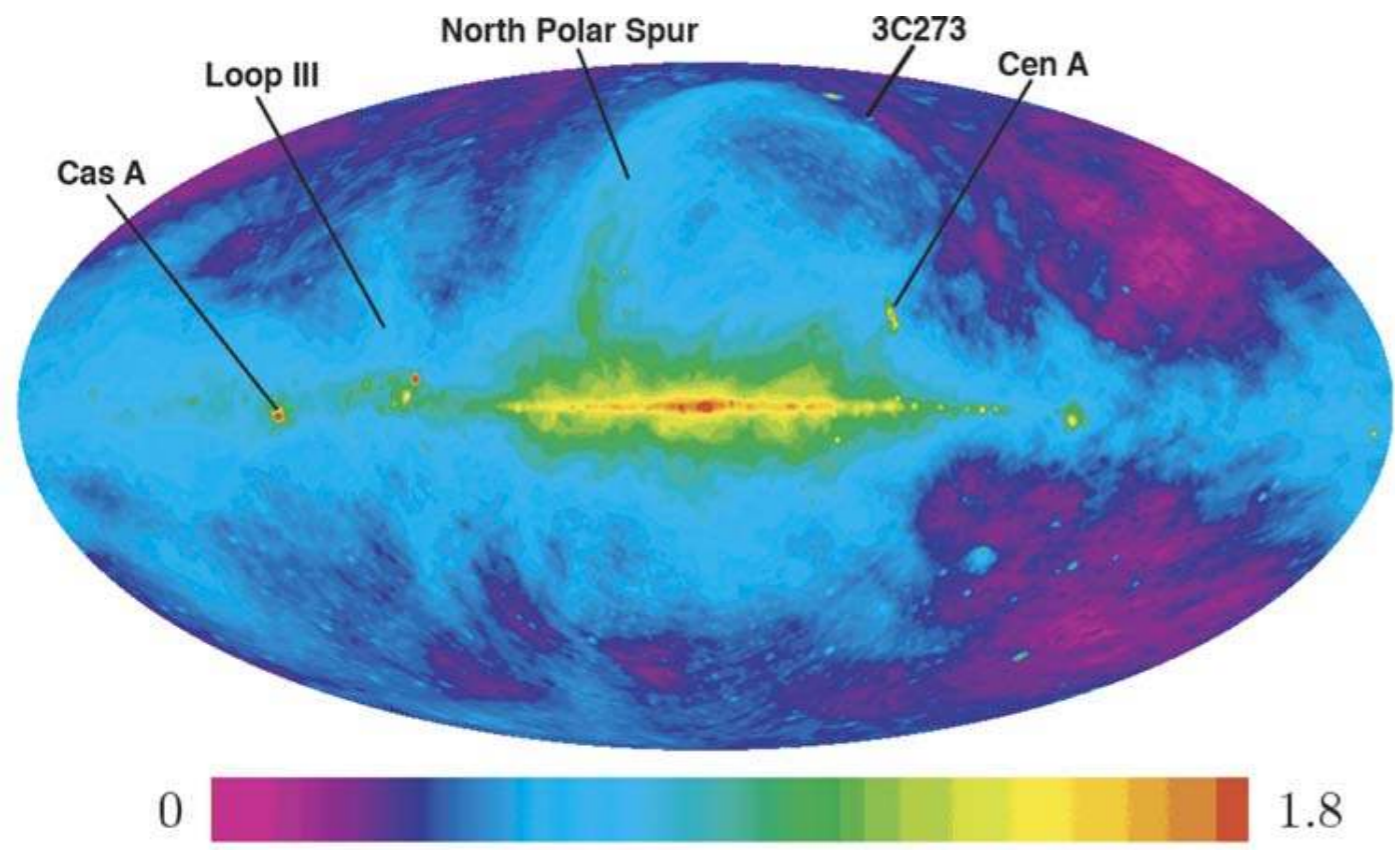
~~~~~ sum of these

free-free + spinning dust + thermal dust をトレースしている

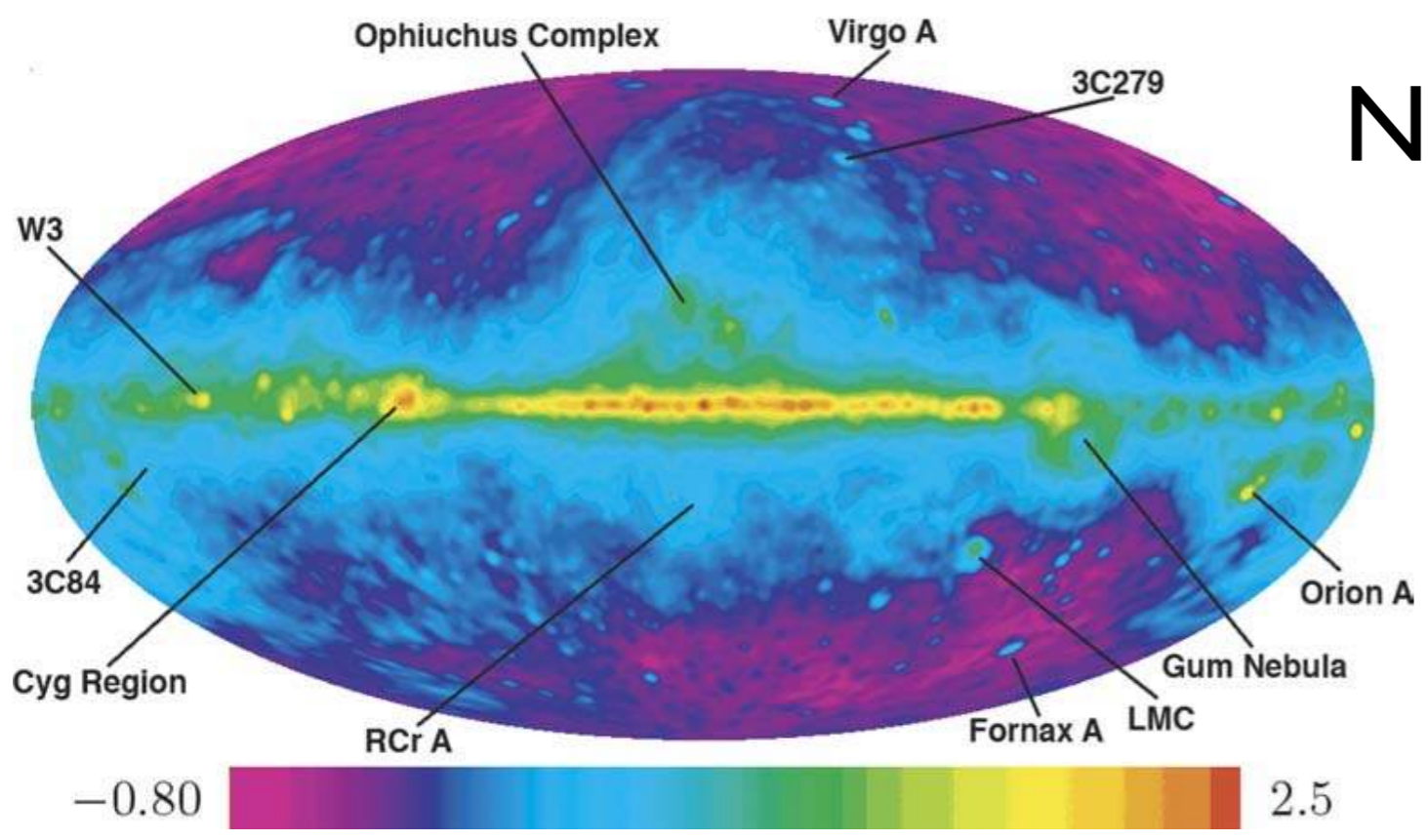
➡ **Non-synchrotron template**

**Figure 5.** The frequency dependence is plotted for the first three principal components, labelled by black dots, blue squares and red triangles, respectively. The top panel is in units of the total rms fluctuations at each frequency, whereas the middle panel shows the sky brightness temperature divided by  $(\nu/2.6 \text{ GHz})^{-2.5}$  to keep all frequencies on roughly the same scale. The bot-

# Synchrotron template

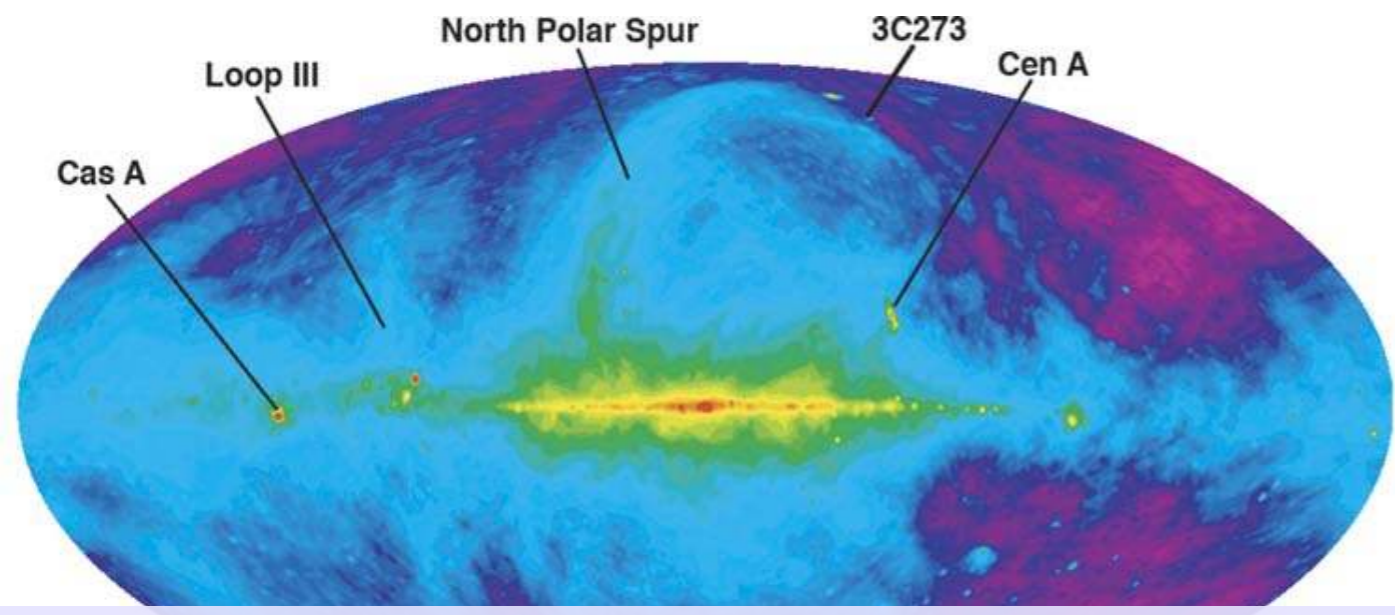


# Non-synchrotron template

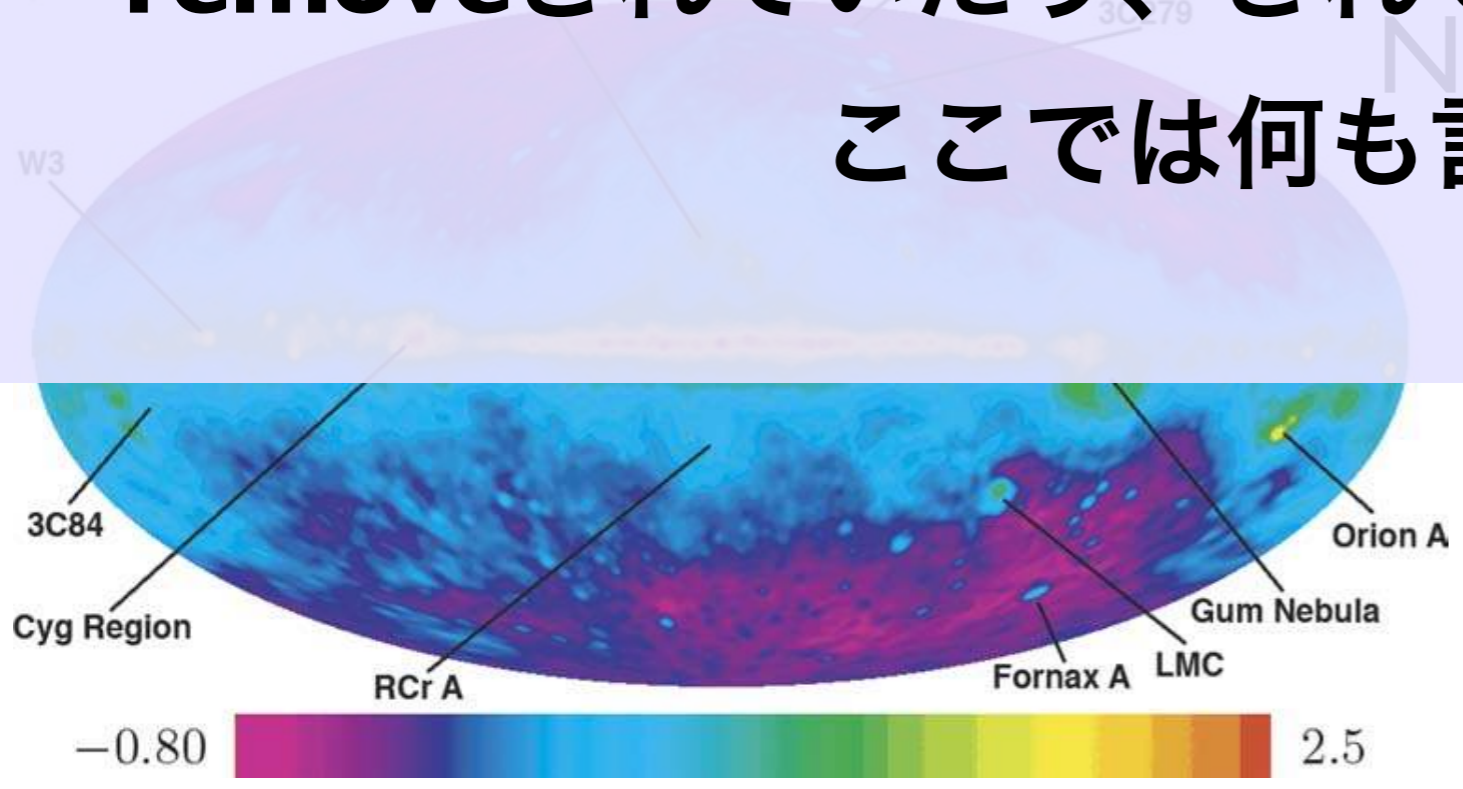


Synchrotron (top) and non-synchrotron (bottom) templates are the sum and difference of our first two principal components, where the colour scale corresponds to  $\log(T/1\text{ K})$ . Labels indicate bright objects in our Galaxy such as supernova remnants (Cas A, North Polar Spur, Loop III), an emission nebula (Orion A), giant molecular clouds (Orion A, R Corona Australis, the Ophiuchus Complex, W3) and an active star-forming region (Cygnus region) and extragalactic sources like giant elliptical galaxies (Virgo A, Fornax A), radio galaxies (Centaurus A, 3C84) and quasars (3C273, 3C279).

# Synchrotron template



ポイントソースについては、マップによって  
**remove**されていたり、されていなかったりなので、  
ここでは何も言えない



Synchrotron (top) and non-synchrotron (bottom) templates are the sum and difference of our first two principal components, where the colour scale is proportional to  $\log(T/1\text{ K})$ . Labels indicate bright objects in our Galaxy such as supernova remnants (Cas A, North Polar Spur, Loop III), an emission nebula (Gum Nebula), giant molecular clouds (Orion A, R Corona Australis, the Ophiucus Complex, W3) and an active star-forming region (Cygnus region) and extragalactic sources like giant elliptical galaxies (Virgo A, Fornax A), radio galaxies (Centaurus A, 3C84) and quasars (3C273, 3C279).

# Conclusions

- 3つの成分で  $l$  freq. マップをフィットできた。  
精度は波長、場所によるが 1-10%以内！
- 3つの主成分で、ほとんど全ての情報をカバーできる。
- 3成分でよくフィットできるということは、  
**physical component**は強く相関しているということ。
- **21cm線観測**に活かすためには、系外ポイントソースや偏光成分に拡張することが重要。
- **Cosmological information**の宝の山は $\sim 10^4$ 倍ほどでかい  
前景放射に埋もれている！大変だけど頑張らなきゃいけない！