

# 天体の輻射過程におけるcoherencyについて

寺澤敏夫(理研iTHES)

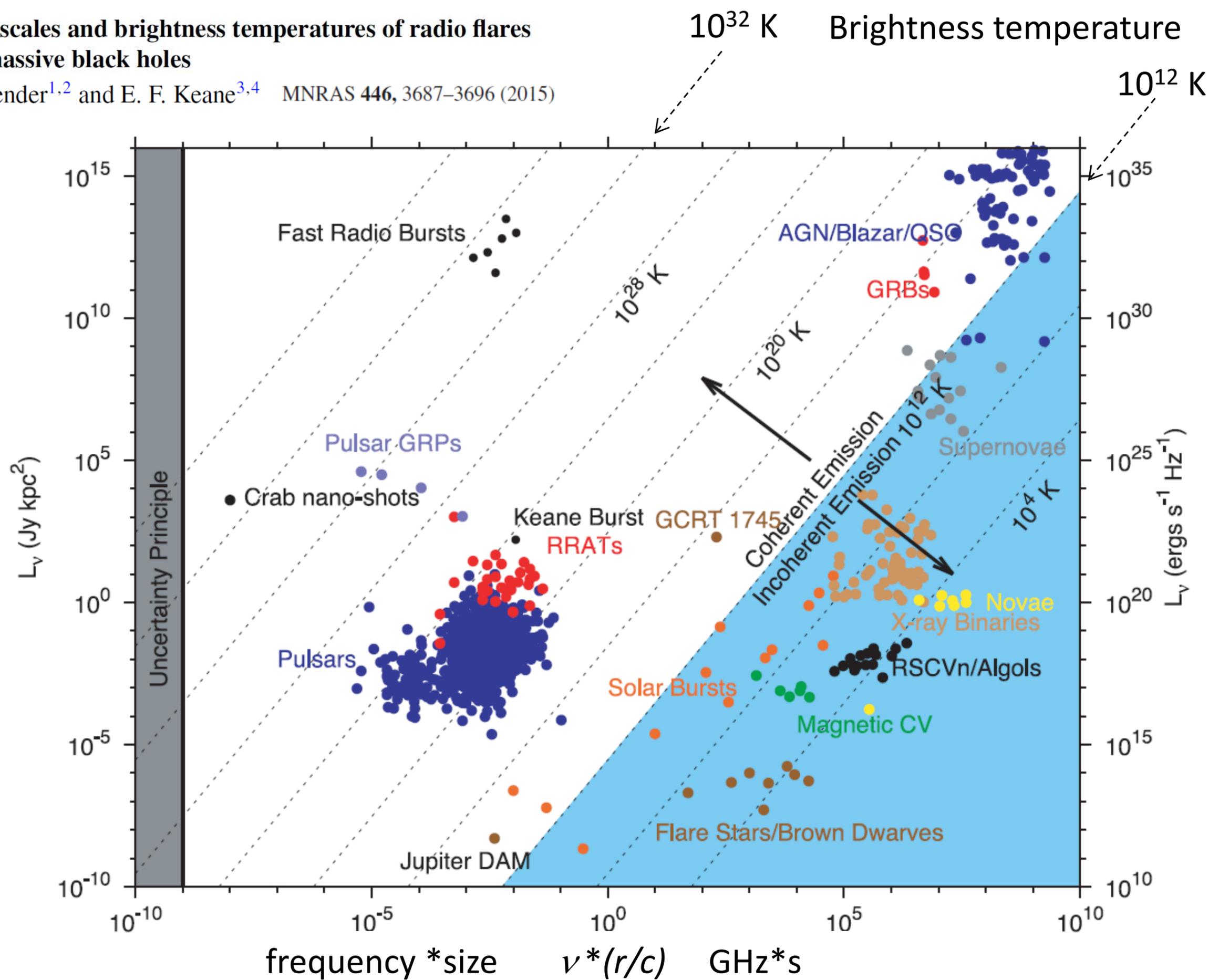
# Contents:

1. Introduction	1
On the Ultra-High Brightness Temperature examples:	
Fast Radio Bursts (FRBs)	
Pulsars' Giant Radio Pulses (GRPs)	
2. Incoherent vs. Coherent emissions	2
3. Heliospheric examples	
3.1 Type II/III Solar Radio Bursts	
→ Excitation of Langmuir waves by electron beams	3-1
3.2 Planetary Radio Waves	
Jovian Decametric Radiations (DAM)	
Earth's Auroral Kilometric Radiations (AKR)	
→ Cyclotron Maser Emission	3-2
4. More about Crab Pulsar's GRPs	4-1
4.1 Frequency spectra of GRPs	
4.2 Proposed models:	
Strong plasma turbulence (SPT)	
Free-electron-maser emission (FEM)	
Cyclotron instability emission (CIE)	
4.3 Puzzling feature of High Frequency Interpulse Spectra	4-3

The variability time-scales and brightness temperatures of radio flares from stars to supermassive black holes

M. Pietka,<sup>1,2\*</sup> R. P. Fender<sup>1,2</sup> and E. F. Keane<sup>3,4</sup> MNRAS 446, 3687–3696 (2015)

luminosity



**Figure 5.** Plotted is a variation of the Fig. 2, with  $L_\nu$  plotted against  $\nu W$  over an even wider range of parameter space. This allows us to identify the sources of coherent radio emission (pulsars, fast radio bursts, certain emission from Jupiter and the Sun, etc.) for comparison with the more slowly varying synchrotron transients. As can clearly be seen the correlation (Fig. 3, Table 1, equation 6) applies only to the imaging/synchrotron sources, and cannot be used for classifying beamformed/coherent sources.

# Luminosity vs. Brightness Temperature

$$L_\nu = \frac{2k_B T_b \nu^2}{c^2} 4\pi r^2$$

$\nu$ : frequency

$T_b$ : brightness temperature

$L_\nu$ : Luminosity

$r$ : source size

Further assumption:

$$r = c \delta t$$

where  $\delta t$  is the shortest time scale of variability.

# Luminosity vs. Brightness Temperature

$$L_\nu = \frac{2k_B T_b \nu^2}{c^2} 4\pi r^2$$

Further assumption:

$$r = c \delta t$$

where  $\delta t$  is the shortest time scale of variability.

$\nu$ : frequency

$L_\nu$ : Luminosity

$T_b$ : brightness temperature

$r$ : source size

Let  $T_m$  be the temperature of the radiating matter.

# Luminosity vs. Brightness Temperature

$$L_\nu = \frac{2k_B T_b \nu^2}{c^2} 4\pi r^2$$

Further assumption:

$$r = c \delta t$$

where  $\delta t$  is the shortest time scale of variability.

$\nu$ : frequency

$L_\nu$ : Luminosity

$T_b$ : brightness temperature

$r$ : source size

Let  $T_m$  be the temperature of the radiating matter.

Then, for BB (blackbody radiation),  $T_b = T_m$

(thermal equilibrium, optically thick, incoherent).

# Luminosity vs. Brightness Temperature

$$L_\nu = \frac{2k_B T_b \nu^2}{c^2} 4\pi r^2$$

Further assumption:

$$r = c \delta t$$

where  $\delta t$  is the shortest time scale of variability.

$\nu$ : frequency

$L_\nu$ : Luminosity

$T_b$ : brightness temperature

$r$ : source size

Let  $T_m$  be the temperature of the radiating matter.

Then, for BB (blackbody radiation),  $T_b = T_m$

(thermal equilibrium, optically thick, incoherent).

Optically thin BB case:

$$T_b < T_m$$

# Luminosity vs. Brightness Temperature

$$L_\nu = \frac{2k_B T_b \nu^2}{c^2} 4\pi r^2$$

Further assumption:

$$r = c \delta t$$

where  $\delta t$  is the shortest time scale of variability.

$\nu$ : frequency

$L_\nu$ : Luminosity

$T_b$ : brightness temperature

$r$ : source size

Let  $T_m$  be the temperature of the radiating matter.

Then, for BB (blackbody radiation),  $T_b = T_m$   
(thermal equilibrium, optically thick, incoherent).

Optically thin BB case:  $T_b < T_m$

Optically thin and non-BB (coherent) case:  
no general relationship

# Luminosity vs. Brightness Temperature

$$L_\nu = \frac{2k_B T_b \nu^2}{c^2} 4\pi r^2$$

Further assumption:

$$r = c \delta t$$

where  $\delta t$  is the shortest time scale of variability.

$\nu$ : frequency

$L_\nu$ : Luminosity

$T_b$ : brightness temperature

$r$ : source size

Let  $T_m$  be the temperature of the radiating matter.

Then, for BB (blackbody radiation),  $T_b = T_m$   
(thermal equilibrium, optically thick, incoherent).

Optically thin BB case:  $T_b < T_m$

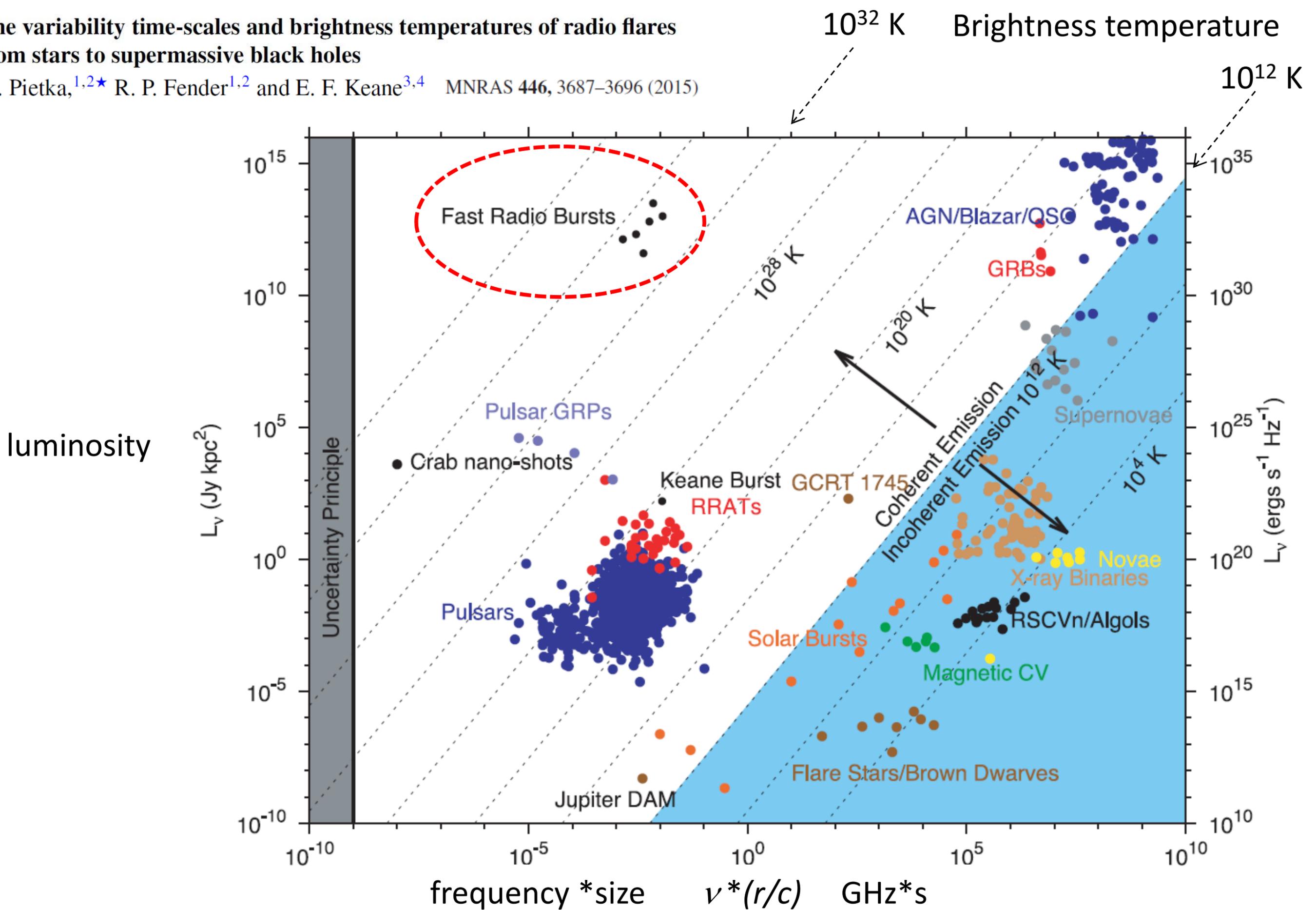
Optically thin and non-BB (coherent) case:

no general relationship

$T_b \gg T_m$  possible

The variability time-scales and brightness temperatures of radio flares from stars to supermassive black holes

M. Pietka,<sup>1,2\*</sup> R. P. Fender<sup>1,2</sup> and E. F. Keane<sup>3,4</sup> MNRAS 446, 3687–3696 (2015)



**Figure 5.** Plotted is a variation of the Fig. 2, with  $L_\nu$  plotted against  $\nu W$  over an even wider range of parameter space. This allows us to identify the sources of coherent radio emission (pulsars, fast radio bursts, certain emission from Jupiter and the Sun, etc.) for comparison with the more slowly varying synchrotron transients. As can clearly be seen the correlation (Fig. 3, Table 1, equation 6) applies only to the imaging/synchrotron sources, and cannot be used for classifying beamformed/coherent sources.

# FRB(fast radio burst)源の位置確定?

## LETTER

25 FEBRUARY 2016 | VOL 530 | NATURE | 453

doi:10.1038/nature17140

## The host galaxy of a fast radio burst

E. F. Keane<sup>1,2,3</sup>, S. Johnston<sup>4</sup>, S. Bhandari<sup>2,3</sup>, E. Barr<sup>2</sup>, N. D. R. Bhat<sup>3,5</sup>, M. Burgay<sup>6</sup>, M. Caleb<sup>2,3,7</sup>, C. Flynn<sup>2,3</sup>, A. Jameson<sup>2,3</sup>, M. Kramer<sup>8,9</sup>, E. Petroff<sup>2,3,4</sup>, A. Possenti<sup>6</sup>, W. van Straten<sup>2</sup>, M. Bailes<sup>2,3</sup>, S. Burke-Spolaor<sup>10</sup>, R. P. Eatough<sup>8</sup>, B. W. Stappers<sup>9</sup>, T. Totani<sup>11</sup>, M. Honma<sup>12,13</sup>, H. Furusawa<sup>12</sup>, T. Hattori<sup>14</sup>, T. Morokuma<sup>15,16</sup>, Y. Niino<sup>12</sup>, H. Sugai<sup>16</sup>, T. Terai<sup>14</sup>, N. Tominaga<sup>16,17</sup>, S. Yamasaki<sup>11</sup>, N. Yasuda<sup>16</sup>, R. Allen<sup>2</sup>, J. Cooke<sup>2,3</sup>, J. Jencson<sup>18</sup>, M. M. Kasliwal<sup>18</sup>, D. L. Kaplan<sup>19</sup>, S. J. Tingay<sup>3,5</sup>, A. Williams<sup>5</sup>, R. Wayth<sup>3,5</sup>, P. Chandra<sup>20</sup>, D. Perrodin<sup>6</sup>, M. Berezina<sup>8</sup>, M. Mickaliger<sup>9</sup> & C. Bassa<sup>21</sup>

前史： 1GHz付近の電波観測において正体不明の天体起源のパルスが発生することが報告されていた。天体起源とした根拠は顕著な群遅延効果が見いだされた↓ことである。最近、FRBというニックネームが付けられた。  
(Lorimer et al., 2007, Science)

群遅延の公式:

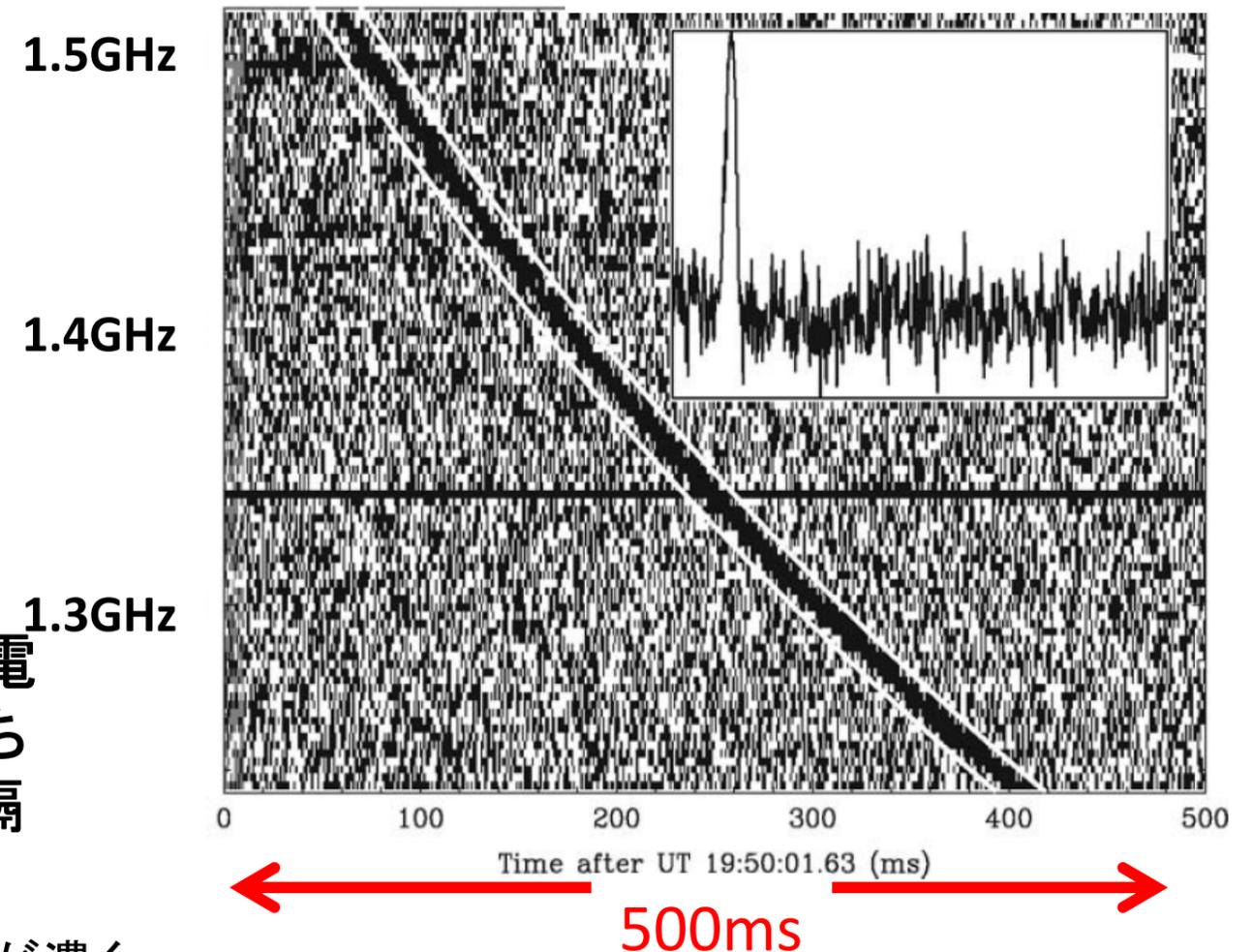
$$\delta t = \frac{2e^2}{m_e c} (f_1^{-2} - f_2^{-2}) DM$$

Dispersion measure:  $DM \equiv \int_0^L n_0 ds$

↑自由電子のcolumn density 単位  $\text{pc cm}^{-3}$   
ここで  $1\text{pc} = 3 \times 10^{18}\text{cm}$

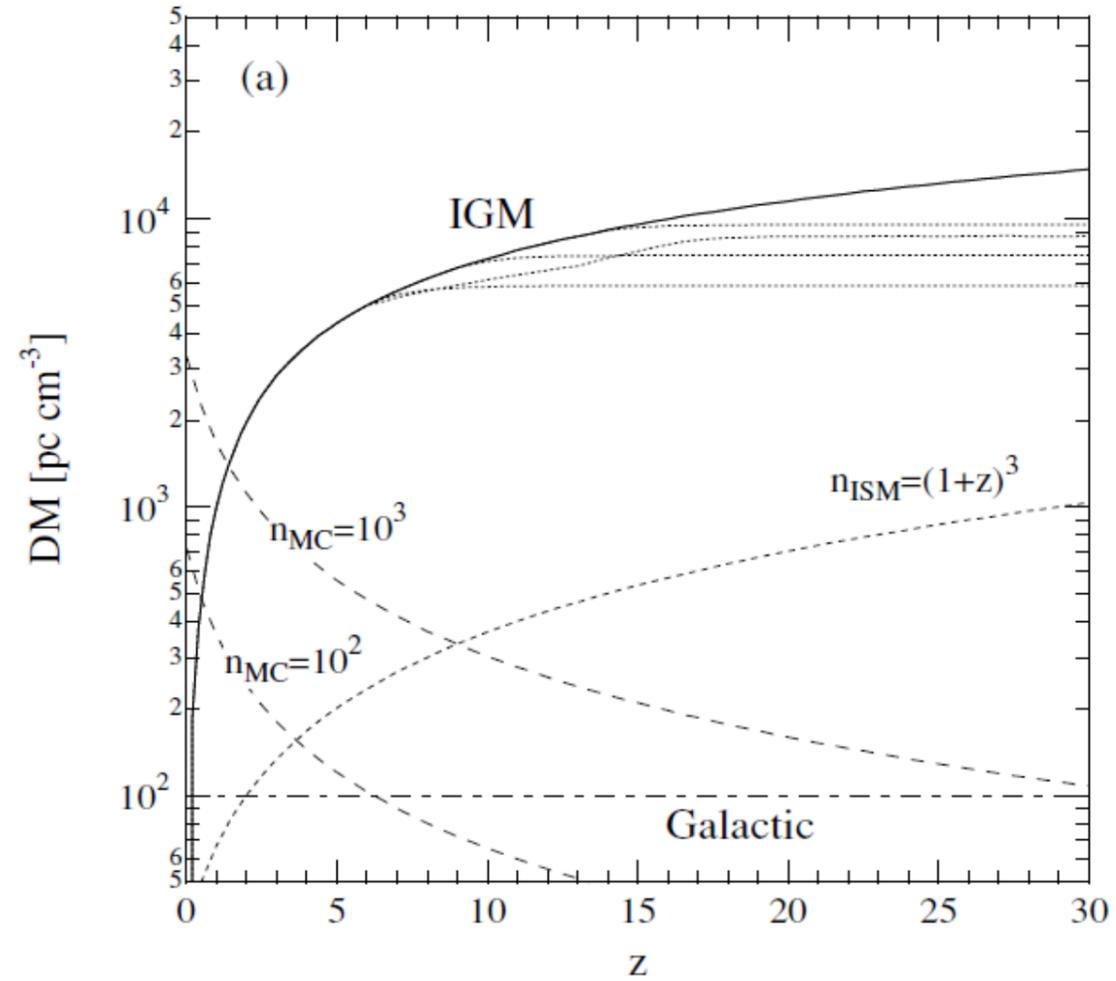
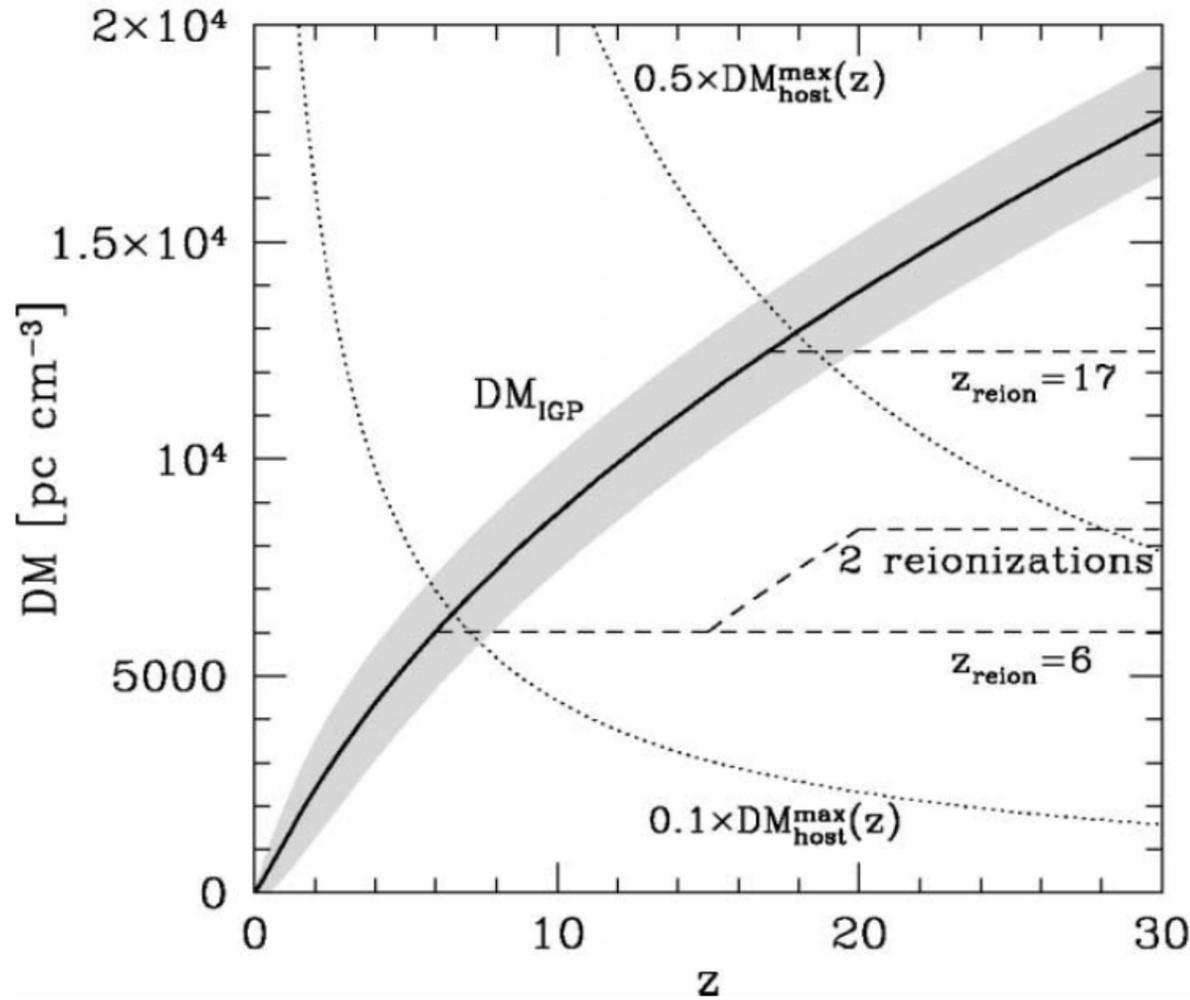
右図のFRBでは  $DM \sim 375 \text{ pc cm}^{-3}$  であり、銀河系内の電波源と考えるには高すぎ(\*)、赤方変偏移  $z \sim 0.3$  すなわち距離が 1Gpc (~30億光年) ほど離れた銀河系外の遠隔天体の可能性が示唆されてきた

(\* ) 銀河系内天体でも銀河中心方向の電波源であれば電子が濃く、この位のDMになることはありうるが、この観測例は方向違いである。



↑DM ~ 375  $\text{pc cm}^{-3}$  と算出

# 宇宙論的DM (左: 井岡 2003、 右: 井上 2004)



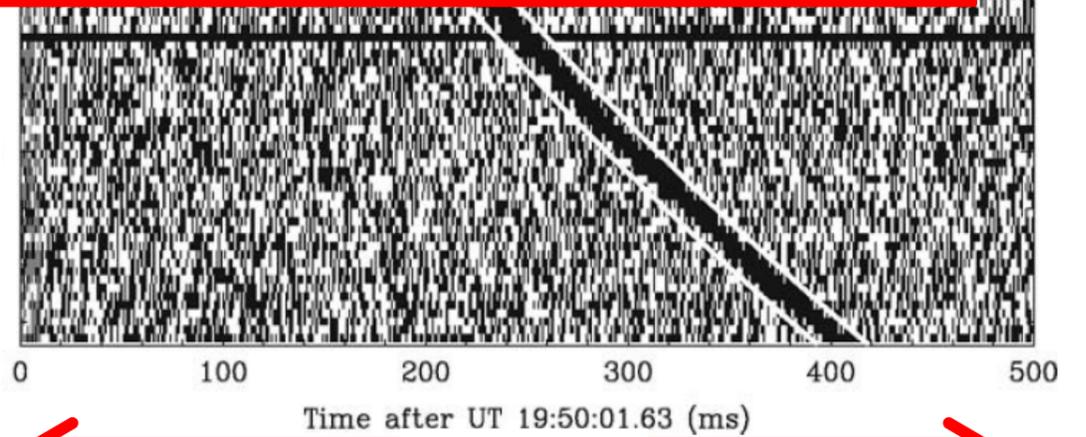
前  
さ  
FRB

報告  
、  
nce)

自由電子のcolumn density 単位  $\text{pc cm}^{-3}$   
ここで  $1\text{pc} = 3 \times 10^{18}\text{cm}$

右図のFRBでは  $\text{DM} \sim 375 \text{ pc cm}^{-3}$  であり、銀河系内の電波源と考えるには高すぎ(\*)、赤方変偏移  $z \sim 0.3$  すなわち距離が  $1\text{Gpc}$  ( $\sim 30$  億光年) ほど離れた銀河系外の遠隔天体の可能性が示唆されてきた

(\* ) 銀河系内天体でも銀河中心方向の電波源であれば電子が濃く、この位のDMになることはありうるが、この観測例は方向違いである。



$\uparrow \text{DM} \sim 375 \text{ pc cm}^{-3}$  と算出

# FRB(fast radio burst)源の位置確定?

## LETTER

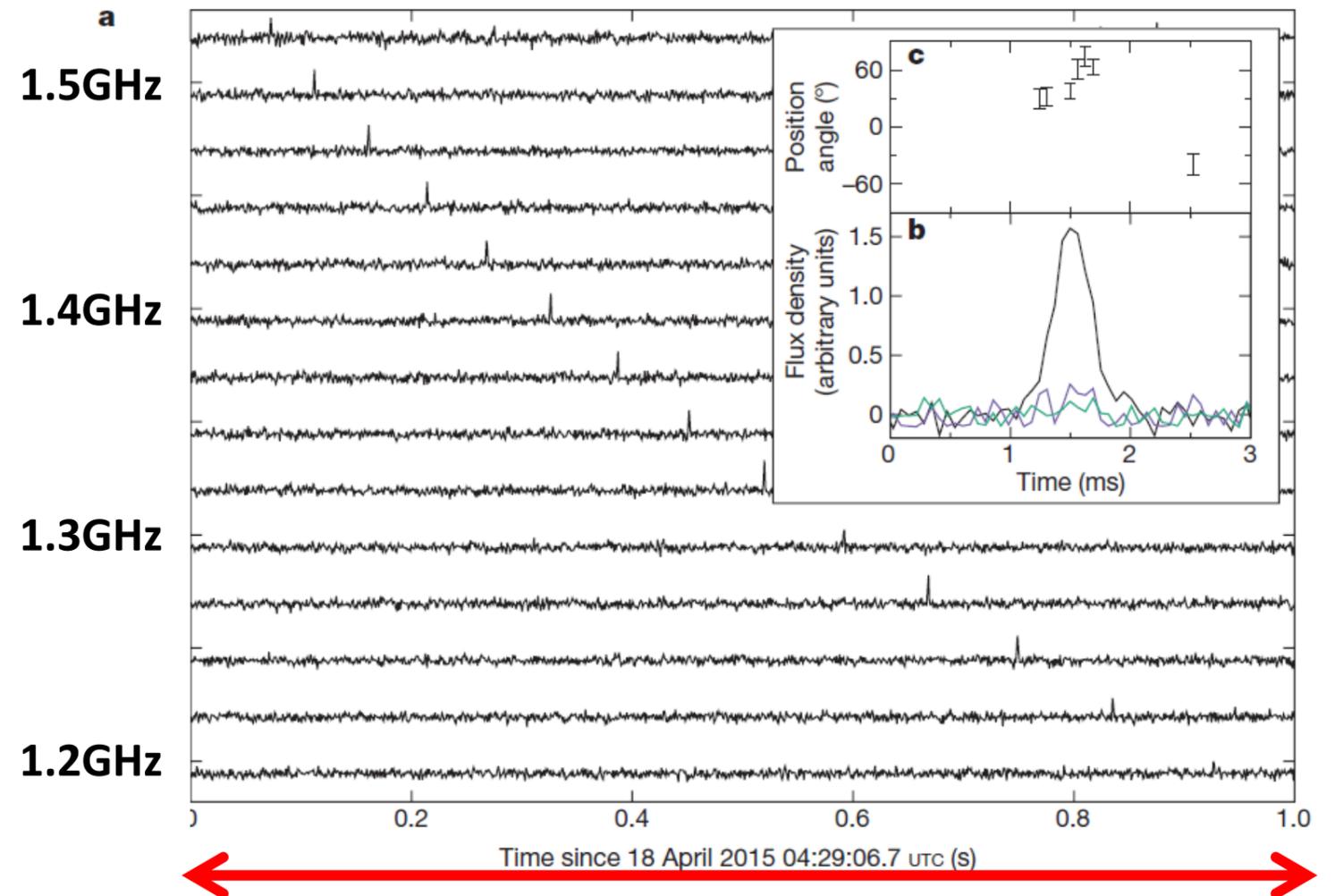
25 FEBRUARY 2016 | VOL 530 | NATURE | 453

doi:10.1038/nature17140

## The host galaxy of a fast radio burst

E. F. Keane<sup>1,2,3</sup>, S. Johnston<sup>4</sup>, S. Bhandari<sup>2,3</sup>, E. Barr<sup>2</sup>, N. D. R. Bhat<sup>3,5</sup>, M. Burgay<sup>6</sup>, M. Caleb<sup>2,3,7</sup>, C. Flynn<sup>2,3</sup>, A. Jameson<sup>2,3</sup>, M. Kramer<sup>8,9</sup>, E. Petroff<sup>2,3,4</sup>, A. Possenti<sup>6</sup>, W. van Straten<sup>2</sup>, M. Bailes<sup>2,3</sup>, S. Burke-Spolaor<sup>10</sup>, R. P. Eatough<sup>8</sup>, B. W. Stappers<sup>9</sup>, T. Totani<sup>11</sup>, M. Honma<sup>12,13</sup>, H. Furusawa<sup>12</sup>, T. Hattori<sup>14</sup>, T. Morokuma<sup>15,16</sup>, Y. Niino<sup>12</sup>, H. Sugai<sup>16</sup>, T. Terai<sup>14</sup>, N. Tominaga<sup>16,17</sup>, S. Yamasaki<sup>11</sup>, N. Yasuda<sup>16</sup>, R. Allen<sup>2</sup>, J. Cooke<sup>2,3</sup>, J. Jencson<sup>18</sup>, M. M. Kasliwal<sup>18</sup>, D. L. Kaplan<sup>19</sup>, S. J. Tingay<sup>3,5</sup>, A. Williams<sup>5</sup>, R. Wayth<sup>3,5</sup>, P. Chandra<sup>20</sup>, D. Perrodin<sup>6</sup>, M. Berezina<sup>8</sup>, M. Mickaliger<sup>9</sup> & C. Bassa<sup>21</sup>

昨年4月18日に観測されたFRBについて、国際ネットワーク観測により、その天体の属する母銀河 ( $z \sim 0.5 \rightarrow 2 \text{Gpc} \sim 60 \text{億光年}$ ) が決められた。決定的な役割を果たしたのは「すばる」望遠鏡である(戸谷ほか)。



↑DM ~ 776 pc cm<sup>-3</sup> と算出

# FRB(fast radio burst)源の位置確定?

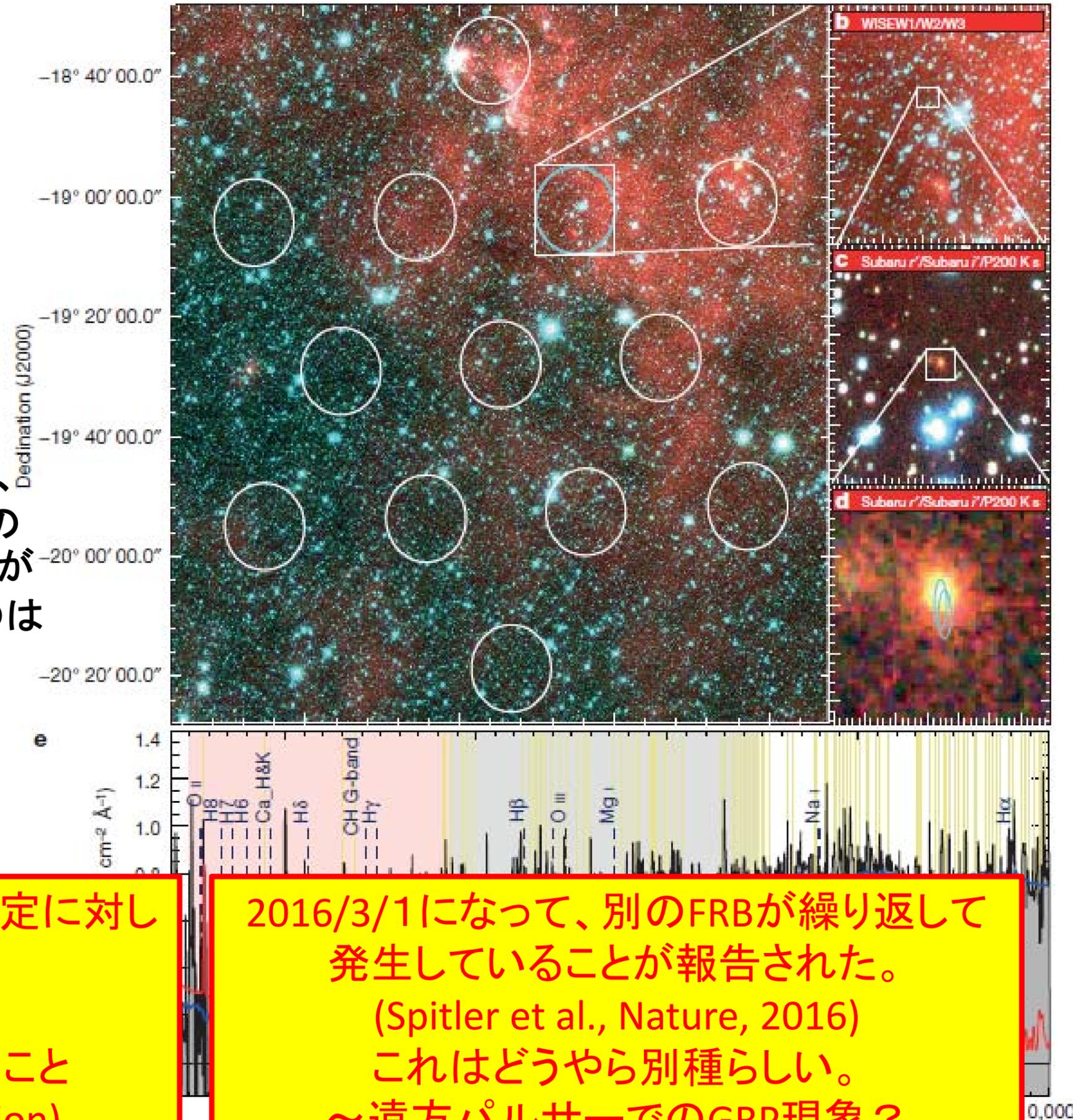
## LETTER

25 FEBRUARY 2016

### The host galaxy of

E. F. Keane<sup>1,2,3</sup>, S. Johnston<sup>4</sup>, S. Bhandari<sup>2,3</sup>, E. M. Kramer<sup>8,9</sup>, E. Petroff<sup>2,3,4</sup>, A. Possenti<sup>6</sup>, W. T. Totani<sup>11</sup>, M. Honma<sup>12,13</sup>, H. Furusawa<sup>12</sup>, T. H. S. Yamasaki<sup>11</sup>, N. Yasuda<sup>16</sup>, R. Allen<sup>2</sup>, J. Cooke<sup>1</sup>, R. Wayth<sup>3,5</sup>, P. Chandra<sup>20</sup>, D. Perrodin<sup>6</sup>, M. Be...

昨年4月18日に観測されたFRBについて、国際ネットワーク観測により、その天体の属する母銀河 ( $z \sim 0.5 \rightarrow 2 \text{Gpc} \sim 60 \text{億光年}$ ) が決められた。決定的な役割を果たしたのは「すばる」望遠鏡である(戸谷ほか)。



ただし、2016.2月末、母銀河の同定に対し疑義が提出された。

↑

原著者達は反論準備中とのこと  
(Totani, private communication)

2016/3/1になって、別のFRBが繰り返して発生していることが報告された。

(Spitler et al., Nature, 2016)

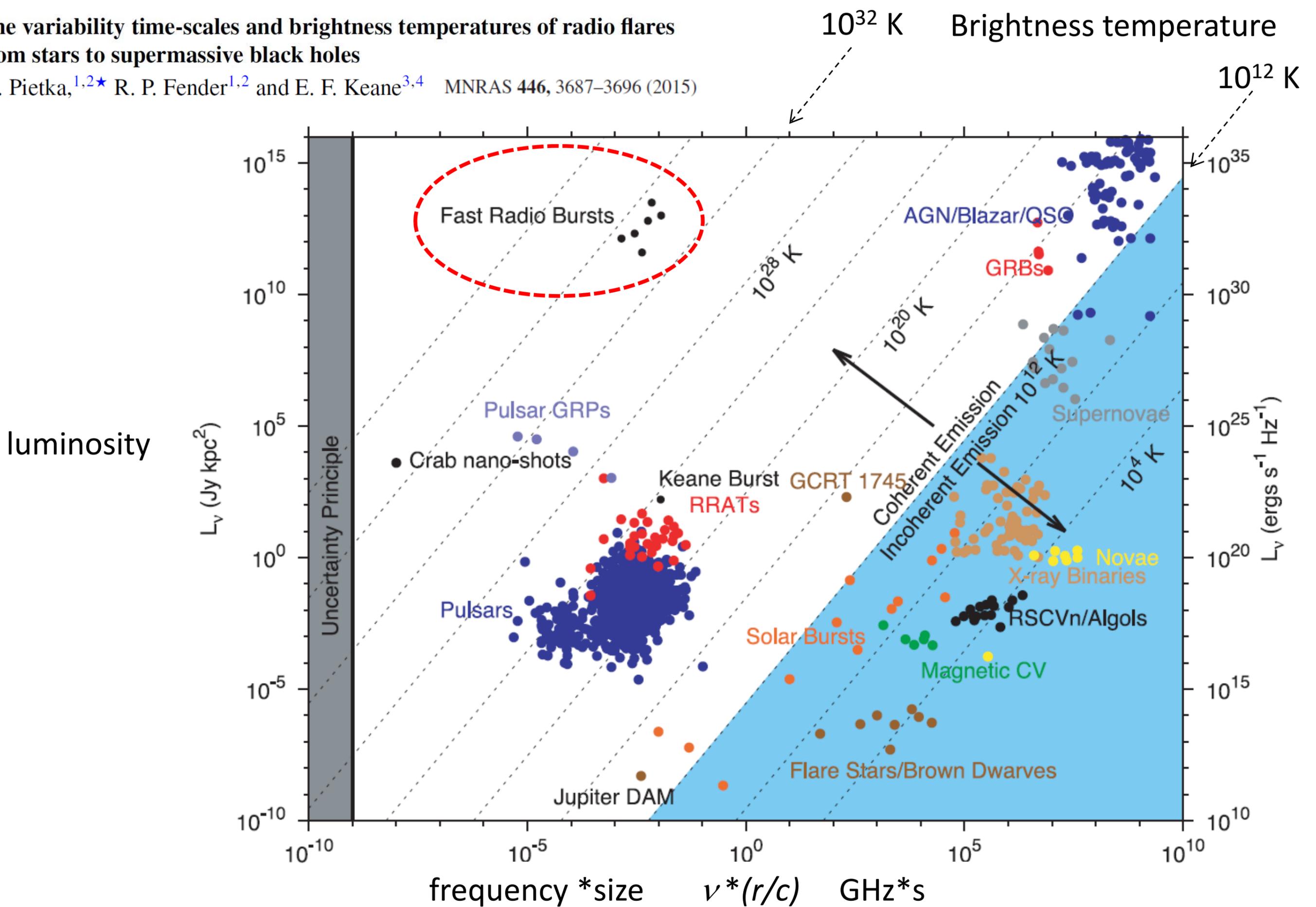
これはどうやら別種らしい。

～遠方パルサーでのGRP現象?

0,000

The variability time-scales and brightness temperatures of radio flares from stars to supermassive black holes

M. Pietka,<sup>1,2\*</sup> R. P. Fender<sup>1,2</sup> and E. F. Keane<sup>3,4</sup> MNRAS 446, 3687–3696 (2015)



**Figure 5.** Plotted is a variation of the Fig. 2, with  $L_\nu$  plotted against  $\nu W$  over an even wider range of parameter space. This allows us to identify the sources of coherent radio emission (pulsars, fast radio bursts, certain emission from Jupiter and the Sun, etc.) for comparison with the more slowly varying synchrotron transients. As can clearly be seen the correlation (Fig. 3, Table 1, equation 6) applies only to the imaging/synchrotron sources, and cannot be used for classifying beamformed/coherent sources.



# FRB(fast radio burst)源の位置確定?

## LETTER

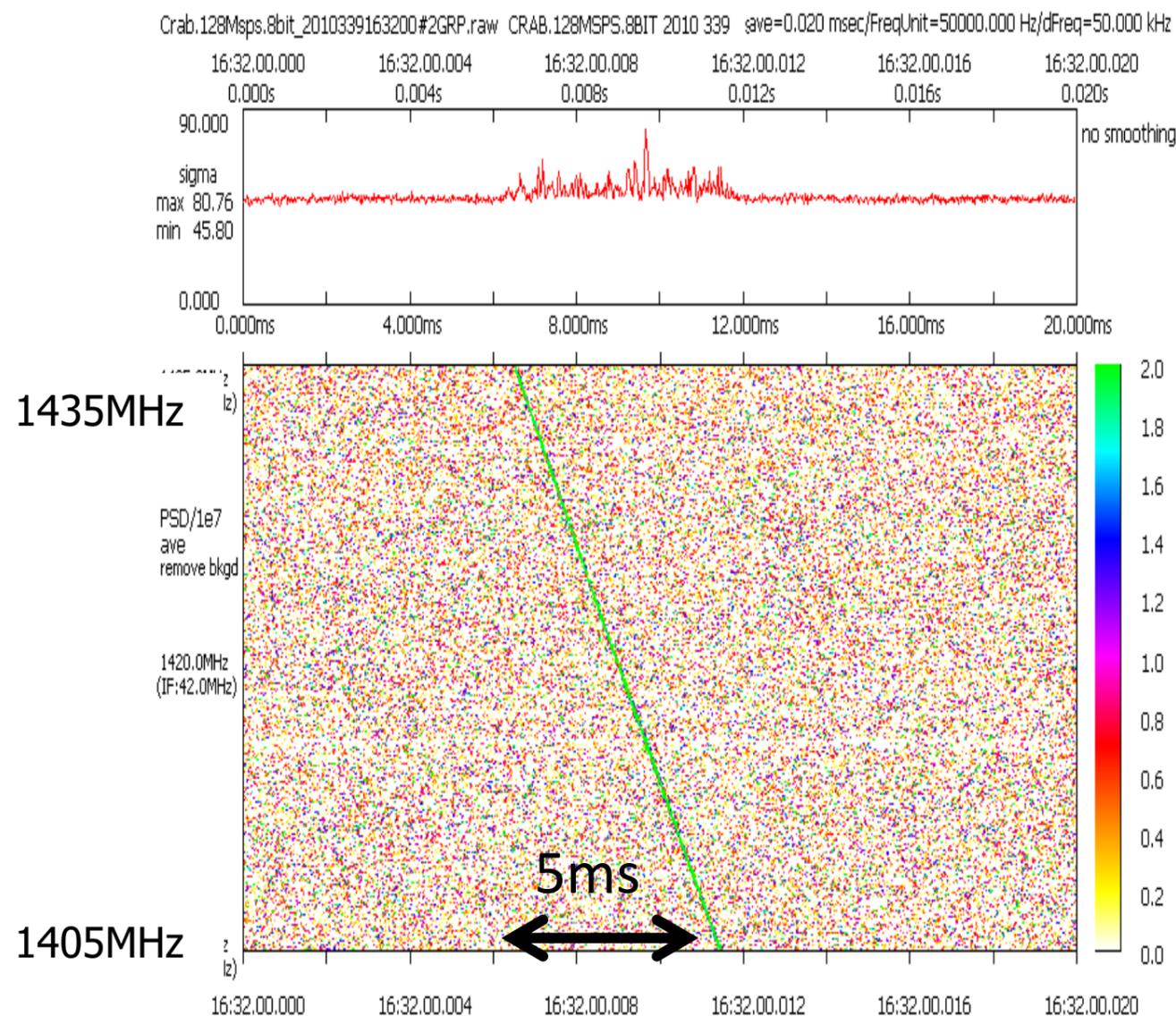
25 FEBRUARY 2016 | VOL 530 | NATURE | 453

doi:10.1038/nature17140

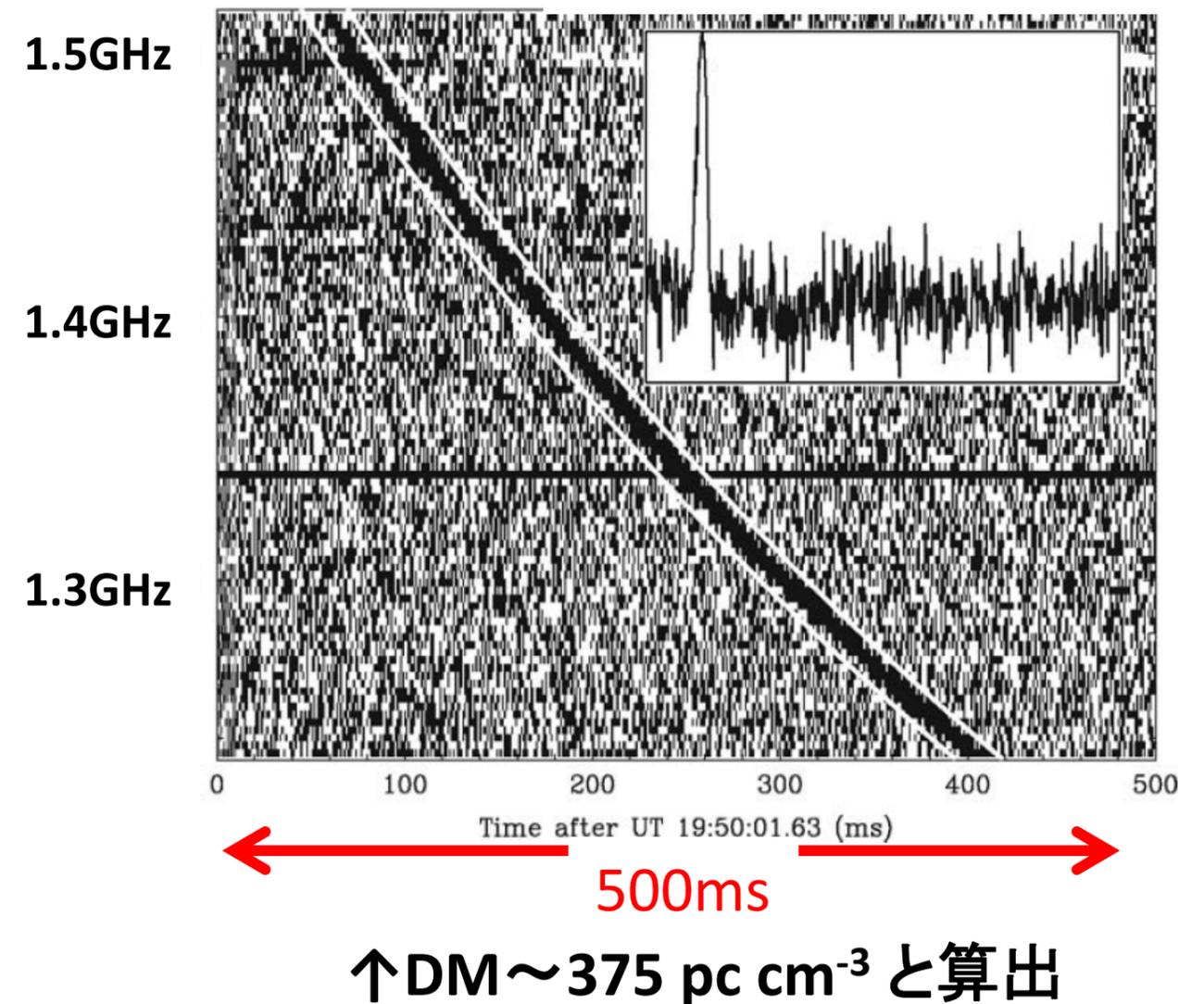
## The host galaxy of a fast radio burst

E. F. Keane<sup>1,2,3</sup>, S. Johnston<sup>4</sup>, S. Bhandari<sup>2,3</sup>, E. Barr<sup>2</sup>, N. D. R. Bhat<sup>3,5</sup>, M. Burgay<sup>6</sup>, M. Caleb<sup>2,3,7</sup>, C. Flynn<sup>2,3</sup>, A. Jameson<sup>2,3</sup>, M. Kramer<sup>8,9</sup>, E. Petroff<sup>2,3,4</sup>, A. Possenti<sup>6</sup>, W. van Straten<sup>2</sup>, M. Bailes<sup>2,3</sup>, S. Burke-Spolaor<sup>10</sup>, R. P. Eatough<sup>8</sup>, B. W. Stappers<sup>9</sup>, T. Totani<sup>11</sup>, M. Honma<sup>12,13</sup>, H. Furusawa<sup>12</sup>, T. Hattori<sup>14</sup>, T. Morokuma<sup>15,16</sup>, Y. Niino<sup>12</sup>, H. Sugai<sup>16</sup>, T. Terai<sup>14</sup>, N. Tominaga<sup>16,17</sup>, S. Yamasaki<sup>11</sup>, N. Yasuda<sup>16</sup>, R. Allen<sup>2</sup>, J. Cooke<sup>2,3</sup>, J. Jencson<sup>18</sup>, M. M. Kasliwal<sup>18</sup>, D. L. Kaplan<sup>19</sup>, S. J. Tingay<sup>3,5</sup>, A. Williams<sup>5</sup>, R. Wayth<sup>3,5</sup>, P. Chandra<sup>20</sup>, D. Perrodin<sup>6</sup>, M. Berezina<sup>8</sup>, M. Mickaliger<sup>9</sup> & C. Bassa<sup>21</sup>

### CrabパルサーのGRP(岳藤、関戸による,2011)

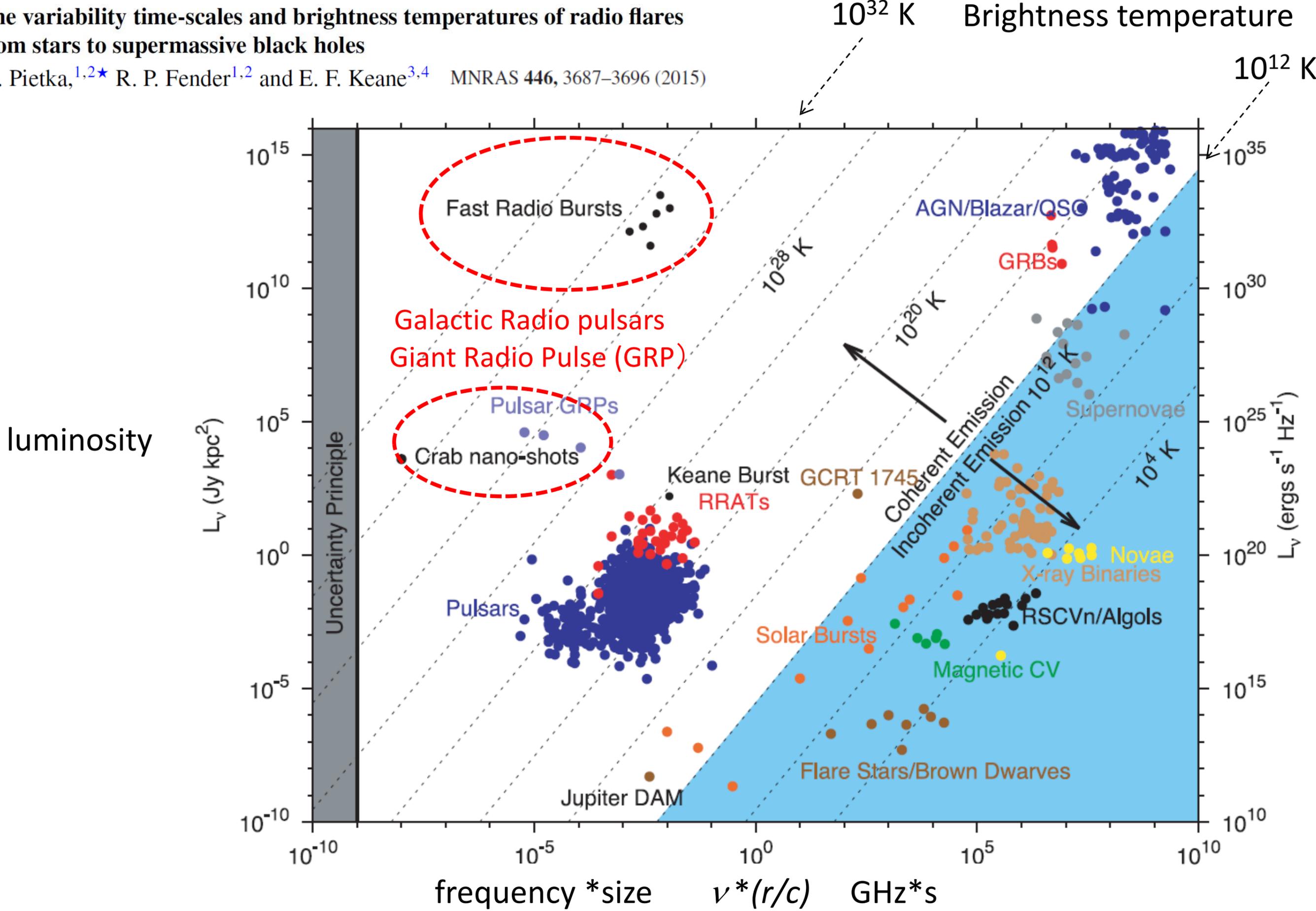


(Lorimer et al., 2007, Science)



The variability time-scales and brightness temperatures of radio flares from stars to supermassive black holes

M. Pietka,<sup>1,2\*</sup> R. P. Fender<sup>1,2</sup> and E. F. Keane<sup>3,4</sup> MNRAS 446, 3687–3696 (2015)



**Figure 5.** Plotted is a variation of the Fig. 2, with  $L_\nu$  plotted against  $\nu W$  over an even wider range of parameter space. This allows us to identify the sources of coherent radio emission (pulsars, fast radio bursts, certain emission from Jupiter and the Sun, etc.) for comparison with the more slowly varying synchrotron emission. Clearly be seen the correlation (Fig. 3, Table 1, equation 6) applies only to the imaging/synchrotron sources, and cannot be used for classifying beamformed/coherent sources.

Close

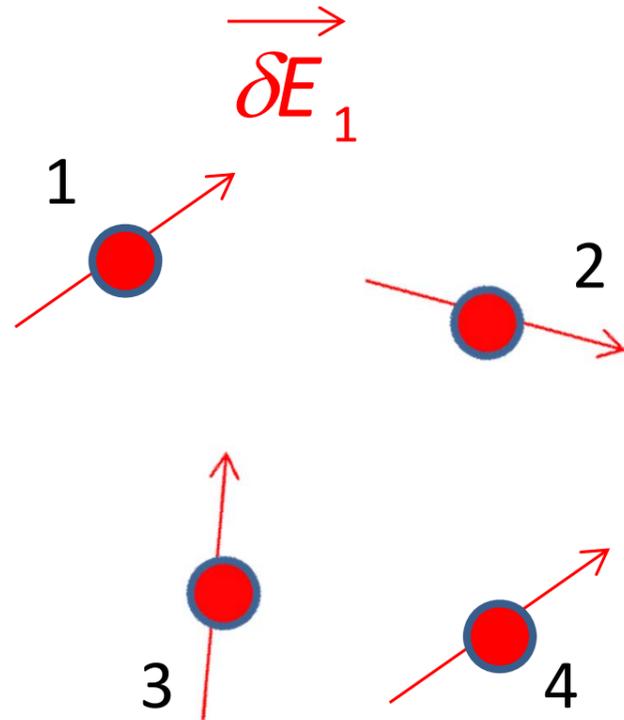
# Contents:

1. Introduction	1
On the Ultra-High Brightness Temperature examples:	
Fast Radio Bursts (FRBs)	
Pulsars' Giant Radio Pulses (GRPs)	2
2. Incoherent vs. Coherent emissions	
3. Heliospheric examples	
3.1 Type II/III Solar Radio Bursts	
→ Excitation of Langmuir waves by electron beams	3-1
3.2 Planetary Radio Waves	
Jovian Decametric Radiations (DAM)	
Earth's Auroral Kilometric Radiations (AKR)	3-2
→ Cyclotron Maser Emission	
4. More about Crab Pulsar's GRPs	4-1
4.1 Frequency spectra of GRPs	
4.2 Proposed models:	
Strong plasma turbulence (SPT)	
Free-electron-maser emission (FEM)	4-2
Cyclotron instability emission (CIE)	
4.3 Puzzling feature of High Frequency Interpulse Spectra	4-3

Incoherent

# $N$ Radiating electrons

それぞれの電子が観測者に与える電場  $\vec{\delta E}_k$   $k=1, \dots, N$



Radiating power

$$\propto \left| \vec{\delta E}_1 + \vec{\delta E}_2 + \dots \right|^2$$

$\vec{\delta E}_1, \vec{\delta E}_2, \dots$ は無相関

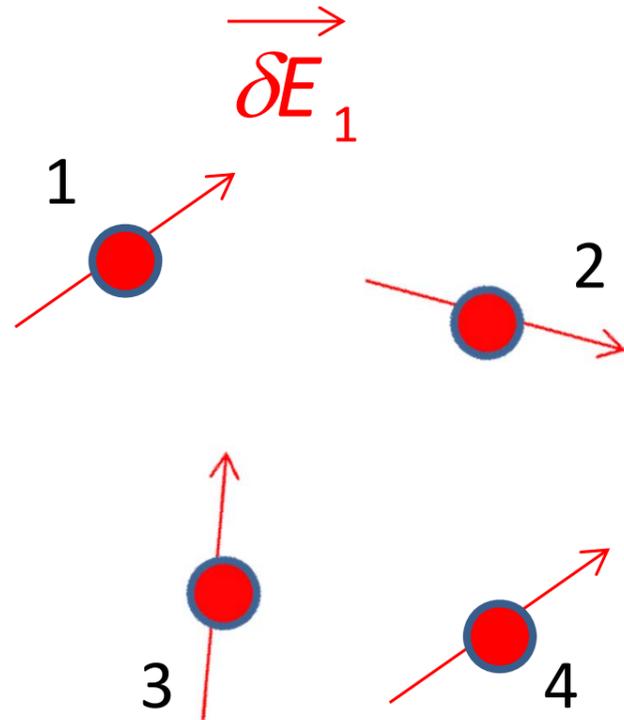
$$\longrightarrow \left| \vec{\delta E}_1 \right|^2 + \left| \vec{\delta E}_2 \right|^2 + \dots$$

$$\longrightarrow N \times \left| \vec{\delta E} \right|^2$$

Incoherent

$N$  Radiating electrons

それぞれの電子が観測者に与える電場  $\vec{\delta E}_k \quad k=1, \dots, N$



Radiating power

$$\propto |\vec{\delta E}_1 + \vec{\delta E}_2 + \dots|^2$$

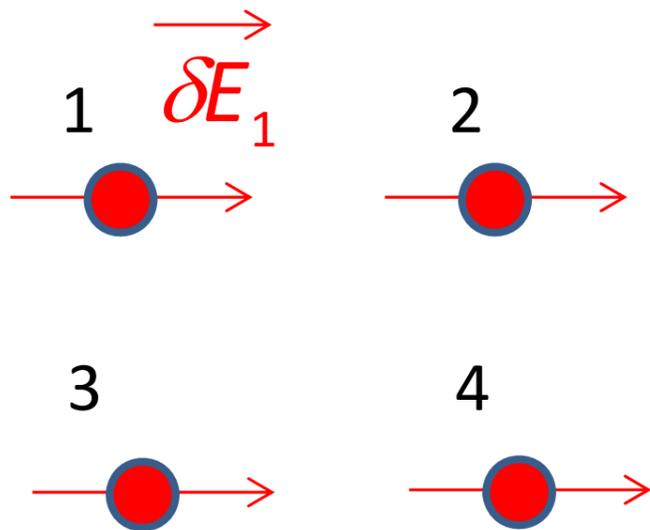
$\vec{\delta E}_1, \vec{\delta E}_2, \dots$ は無相関

$$\longrightarrow |\vec{\delta E}_1|^2 + |\vec{\delta E}_2|^2 + \dots$$

$$\longrightarrow N \times |\vec{\delta E}|^2$$

Coherent

$\vec{\delta E}_1, \vec{\delta E}_2, \dots$ が相関・同一位相



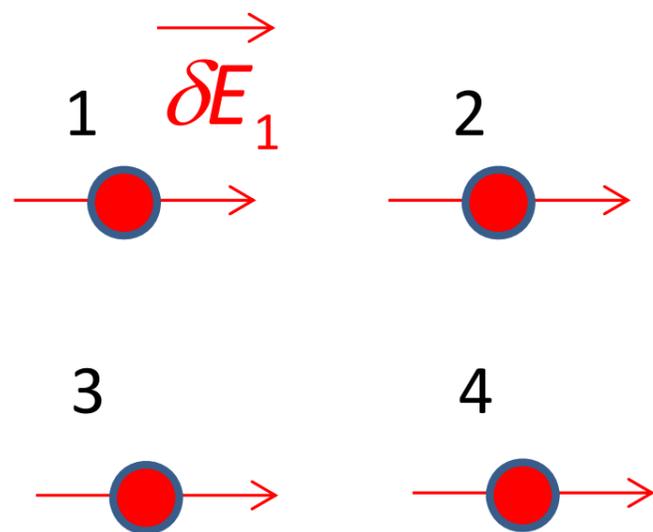
Radiating power

$$\propto |\vec{\delta E}_1 + \vec{\delta E}_2 + \dots|^2$$

$$\longrightarrow N^2 \times |\vec{\delta E}|^2$$

電子の運動の方向・位相を揃えるメカニズムが必要

Coherent



電子の運動の方向・  
位相を揃える  
メカニズムが必要

電子間の相関  
の実現



多体相互作用  
による



種々の不安定性により  
励起されたプラズマ波動

アイデアの直接的検証

地球近傍で観測される代表例:

○ビーム不安定性(二流体不安定性)

例: 太陽電波バーストⅡ型、Ⅲ型

○サイクロトロン不安定性(サイクロトロン・メーザー)

温度異方性→不安定化

例: 木星デカメートル電波、地球オーロラ電波

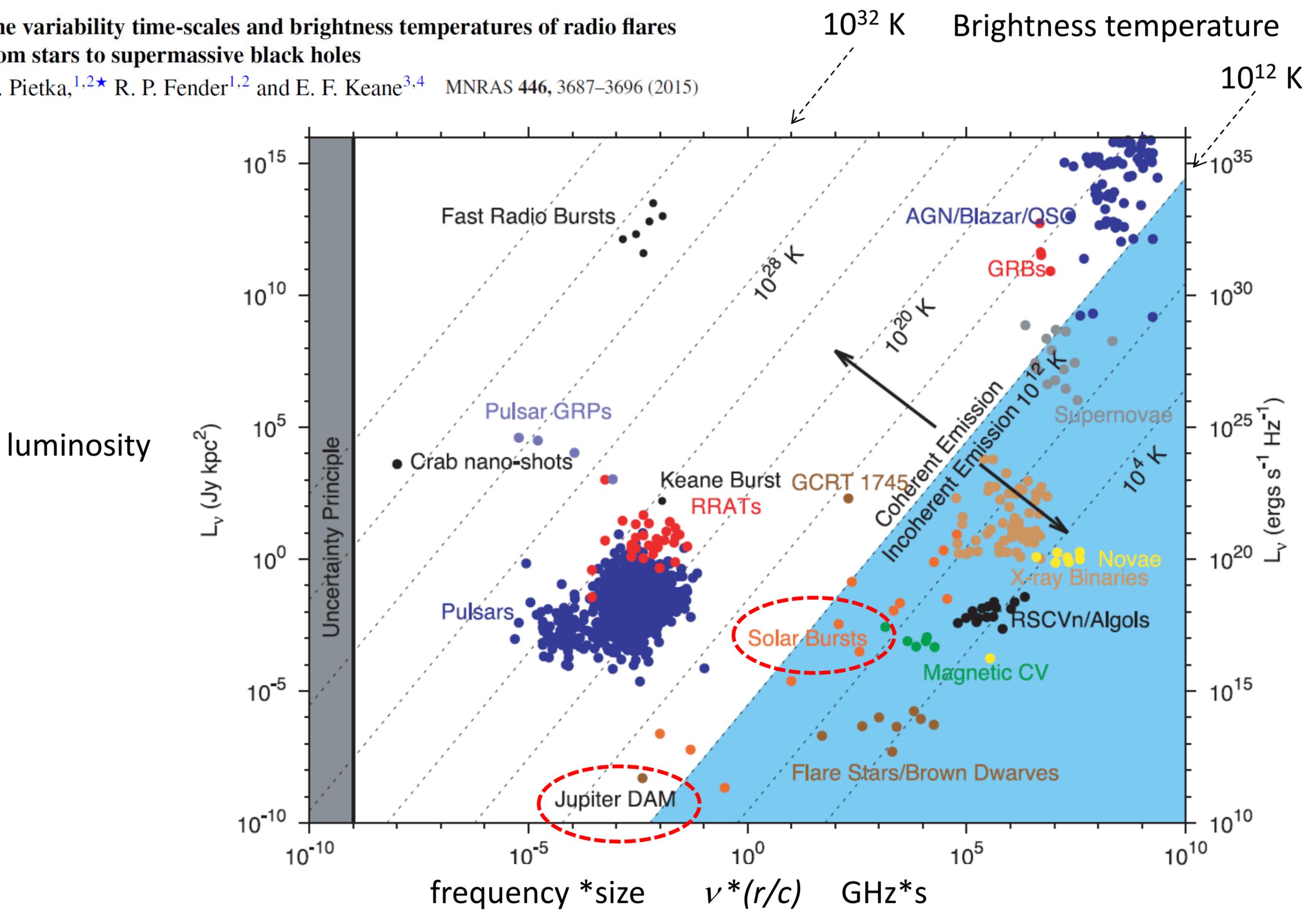
Close

# Contents:

1. Introduction	1
On the Ultra-High Brightness Temperature examples:	
Fast Radio Bursts (FRBs)	
Pulsars' Giant Radio Pulses (GRPs)	2
2. Incoherent vs. Coherent emissions	
3. Heliospheric examples	
3.1 Type II/III Solar Radio Bursts	
→ Excitation of Langmuir waves by electron beams	3-1
3.2 Planetary Radio Waves	
Jovian Decametric Radiations (DAM)	
Earth's Auroral Kilometric Radiations (AKR)	3-2
→ Cyclotron Maser Emission	
4. More about Crab Pulsar's GRPs	4-1
4.1 Frequency spectra of GRPs	
4.2 Proposed models:	
Strong plasma turbulence (SPT)	
Free-electron-maser emission (FEM)	4-2
Cyclotron instability emission (CIE)	
4.3 Puzzling feature of High Frequency Interpulse Spectra	4-3

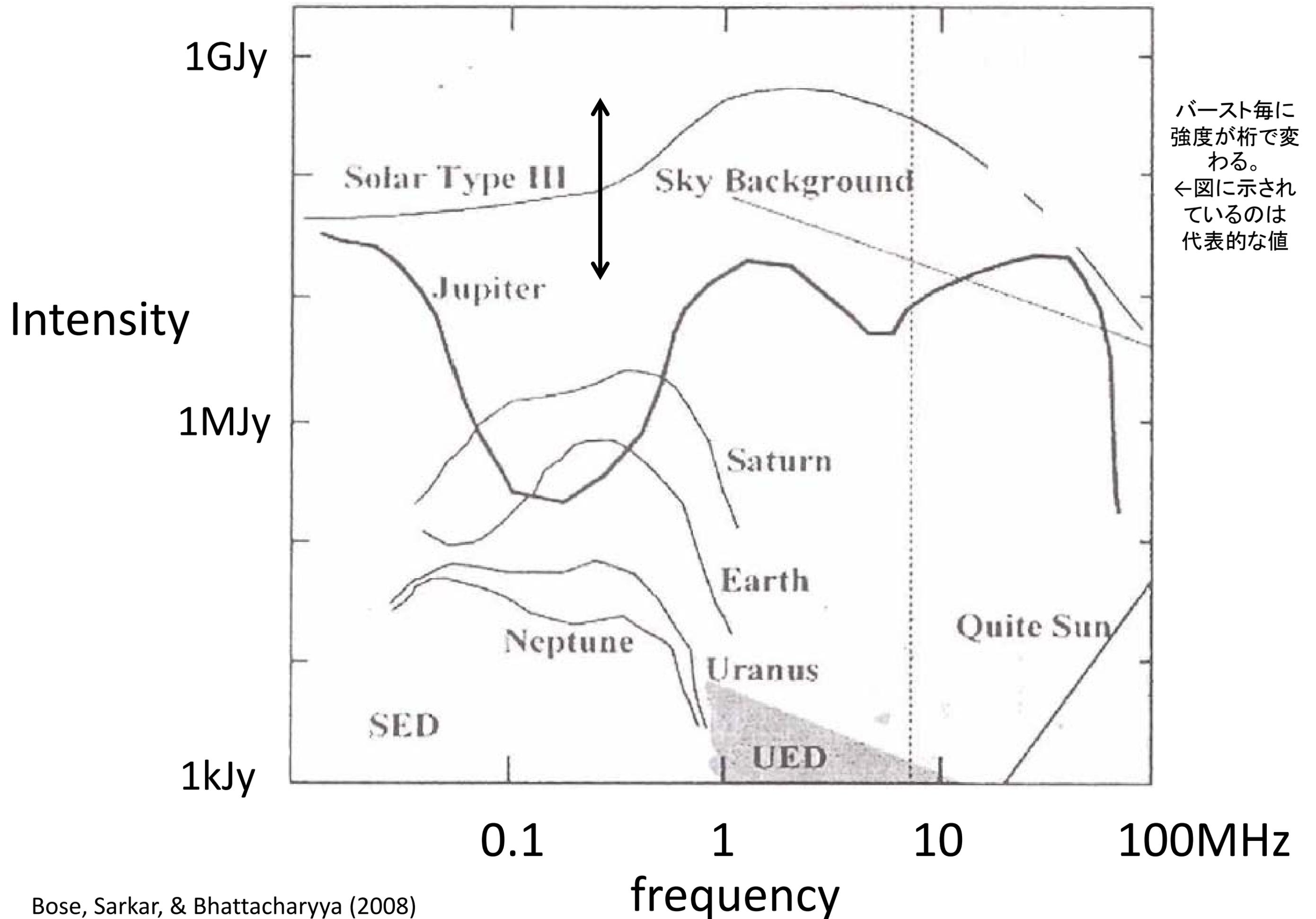
The variability time-scales and brightness temperatures of radio flares from stars to supermassive black holes

M. Pietka,<sup>1,2\*</sup> R. P. Fender<sup>1,2</sup> and E. F. Keane<sup>3,4</sup> MNRAS 446, 3687–3696 (2015)



**Figure 5.** Plotted is a variation of the Fig. 2, with  $L_\nu$  plotted against  $\nu W$  over an even wider range of parameter space. This allows us to identify the sources of coherent radio emission (pulsars, fast radio bursts, certain emission from Jupiter and the Sun, etc.) for comparison with the more slowly varying synchrotron transients. As can clearly be seen the correlation (Fig. 3, Table 1, equation 6) applies only to the imaging/synchrotron sources, and cannot be used for classifying beamformed/coherent sources.

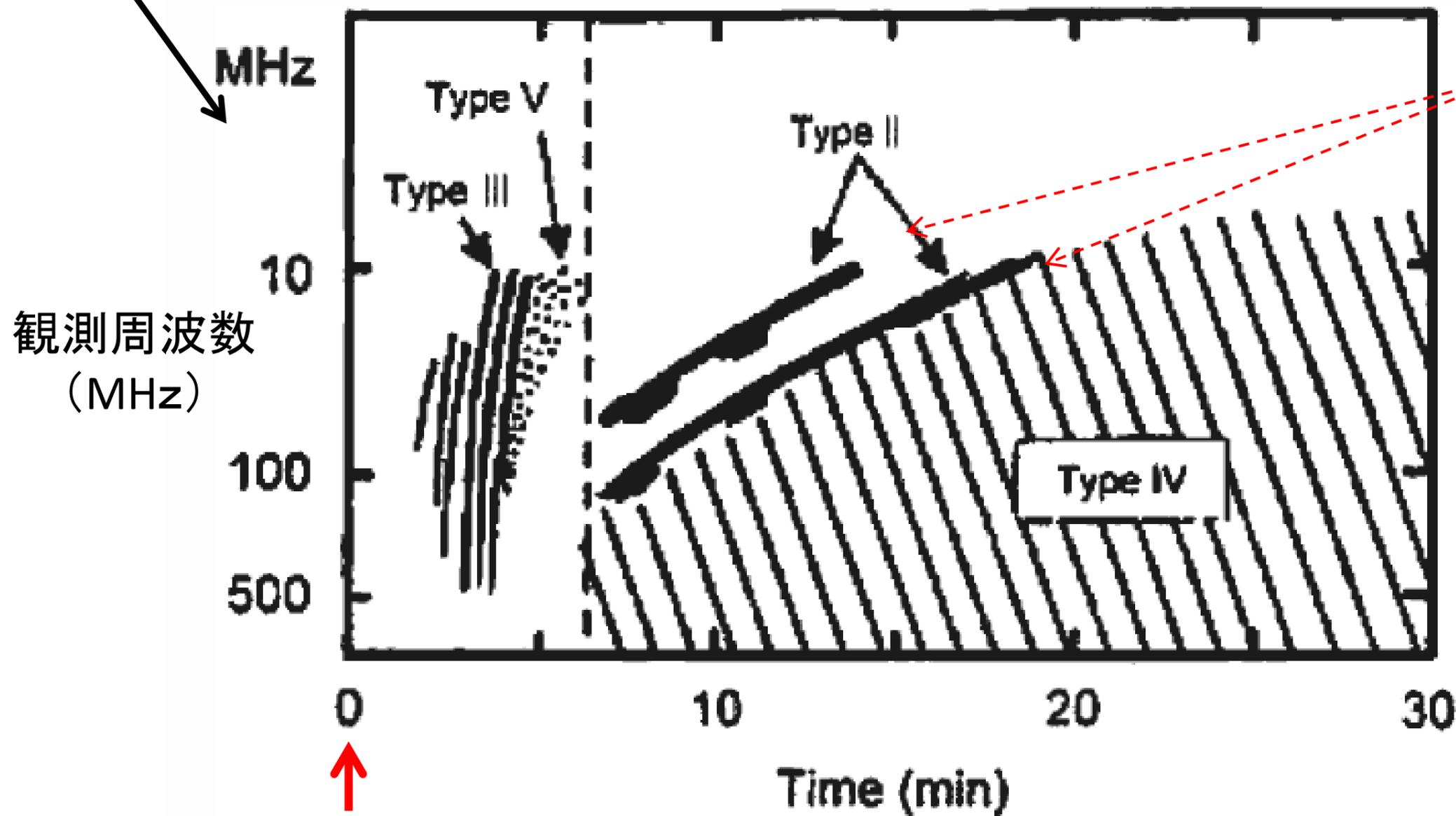
# Solar & Planetary Radio Emission



太陽面からの高度増加→プラズマ周波数低下  
を考慮して、縦軸は大小逆表示

最近のreview: Reid&Ratcliffe, arXiv:1404.6117

### 太陽電波バースト (from Wild+ 1963)



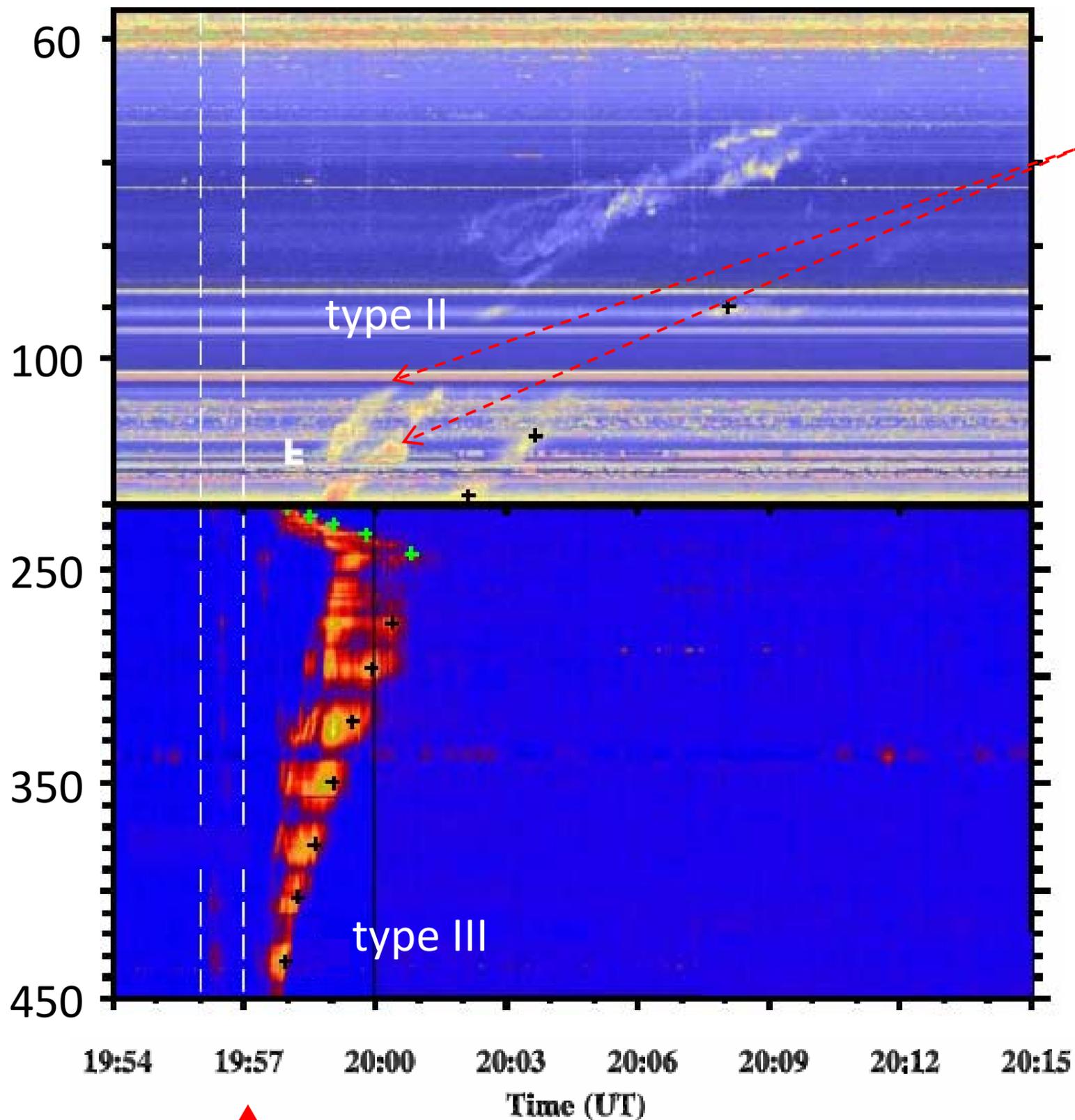
基本波、  
第二高調波  
の2つに分かれる  
ことがよくある  
(Type II, IIIの両方)

solar flare onset

太陽面からの高度増加→プラズマ周波数低下  
を考慮して、縦軸は大小逆表示

実際の観測例 (Kumar, Innes, Cho, 2016 ApJの図1を上下反転)

観測周波数  
(MHz)



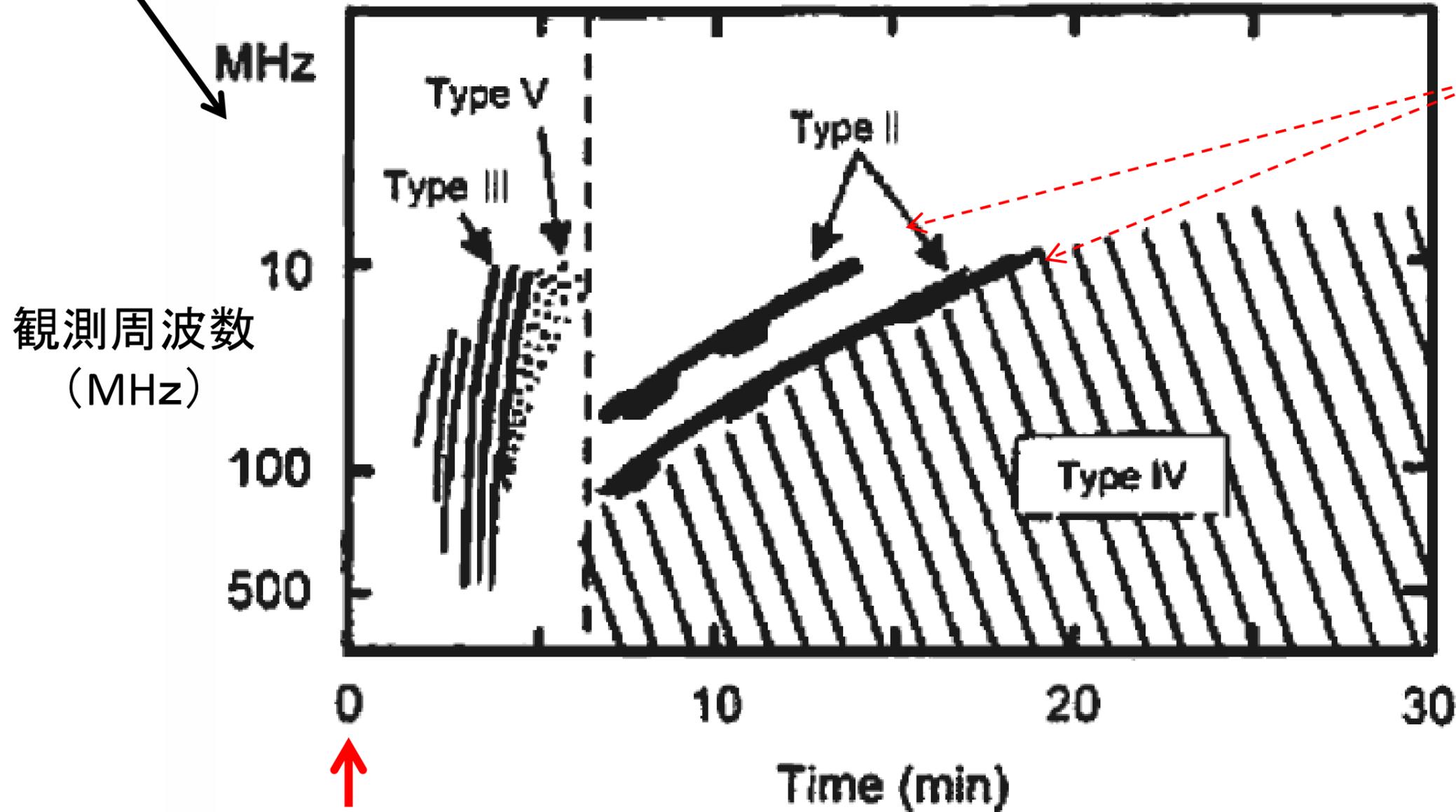
基本波、  
第二高調波  
の2つに分かれる  
ことがよくある  
(Type II, IIIの両方)

基本波の周波数  
~プラズマ振動数  
と考えるのが普通

solar flare onset

太陽面からの高度増加→プラズマ周波数低下  
を考慮して、縦軸は大小逆表示

### 太陽電波バースト (from Wild+ 1963)



基本波、  
第二高調波  
の2つに分かれる  
ことがよくある  
(Type II, IIIの両方)

基本波の周波数  
~プラズマ振動数  
と考えるのが普通

太陽風電子密度モデルにより周波数を高度に変換し、伝搬速度を推定すると、

Type IIの場合 → 1000-4000km/s

Type IIIの場合 → 光速の数分の1

## 太陽電波バーストⅡ型、Ⅲ型

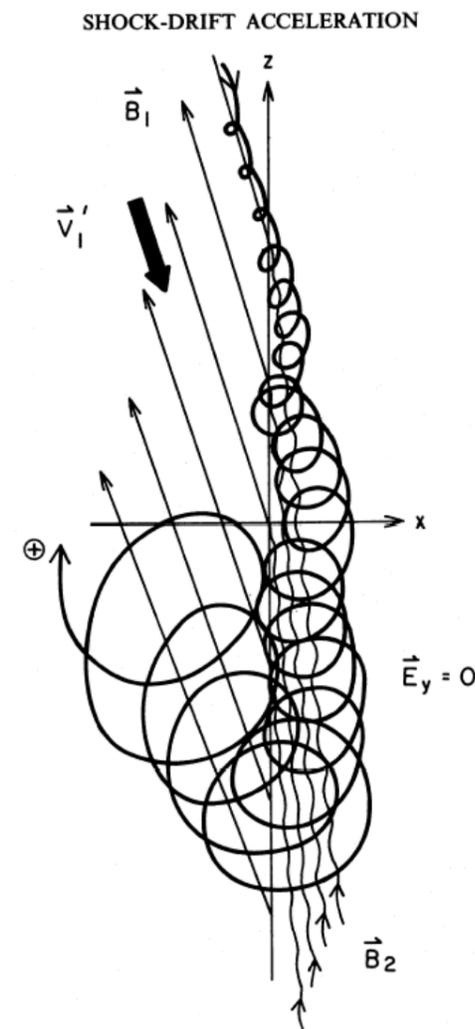
Ⅱ型、Ⅲ型は電子の起源が異なるだけで、輻射過程としては同種

Ⅱ型... 太陽フレアなどから放出された衝撃波が準垂直衝撃波(衝撃波角 $\sim 89^\circ$ ...)であるとき、電子がshock drift加速を受け、衝撃波上流にビームとなって放出  
観測される $1000\text{-}4000\text{km/s}$ の伝搬速度は衝撃波の速度を表す

Ⅲ型... 太陽コロナにおける磁気リコネクション(MRX)領域で加速された電子がビームとなって放出

shock drift加速

Chiueh (1989) ApJ

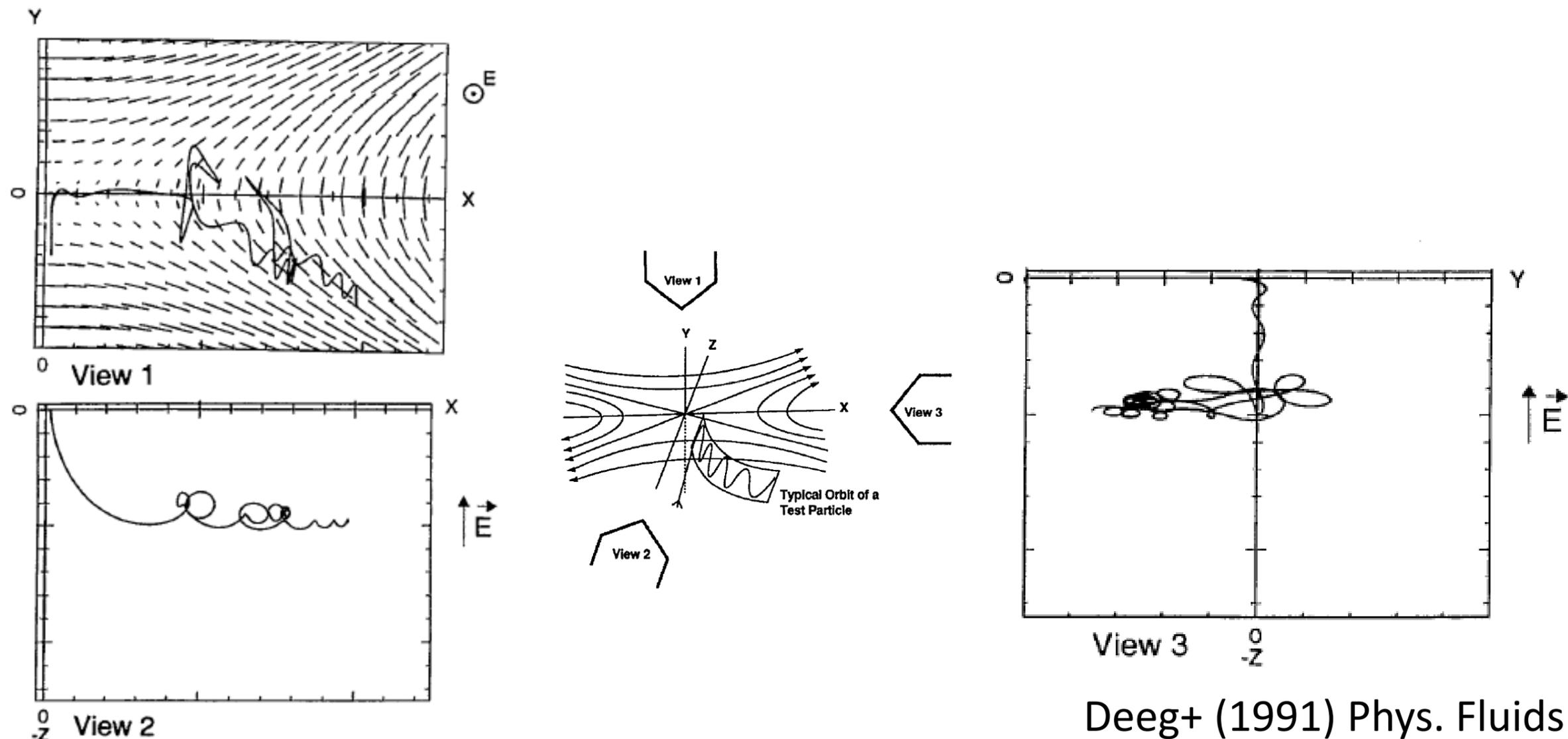


## 太陽電波バーストⅡ型、Ⅲ型

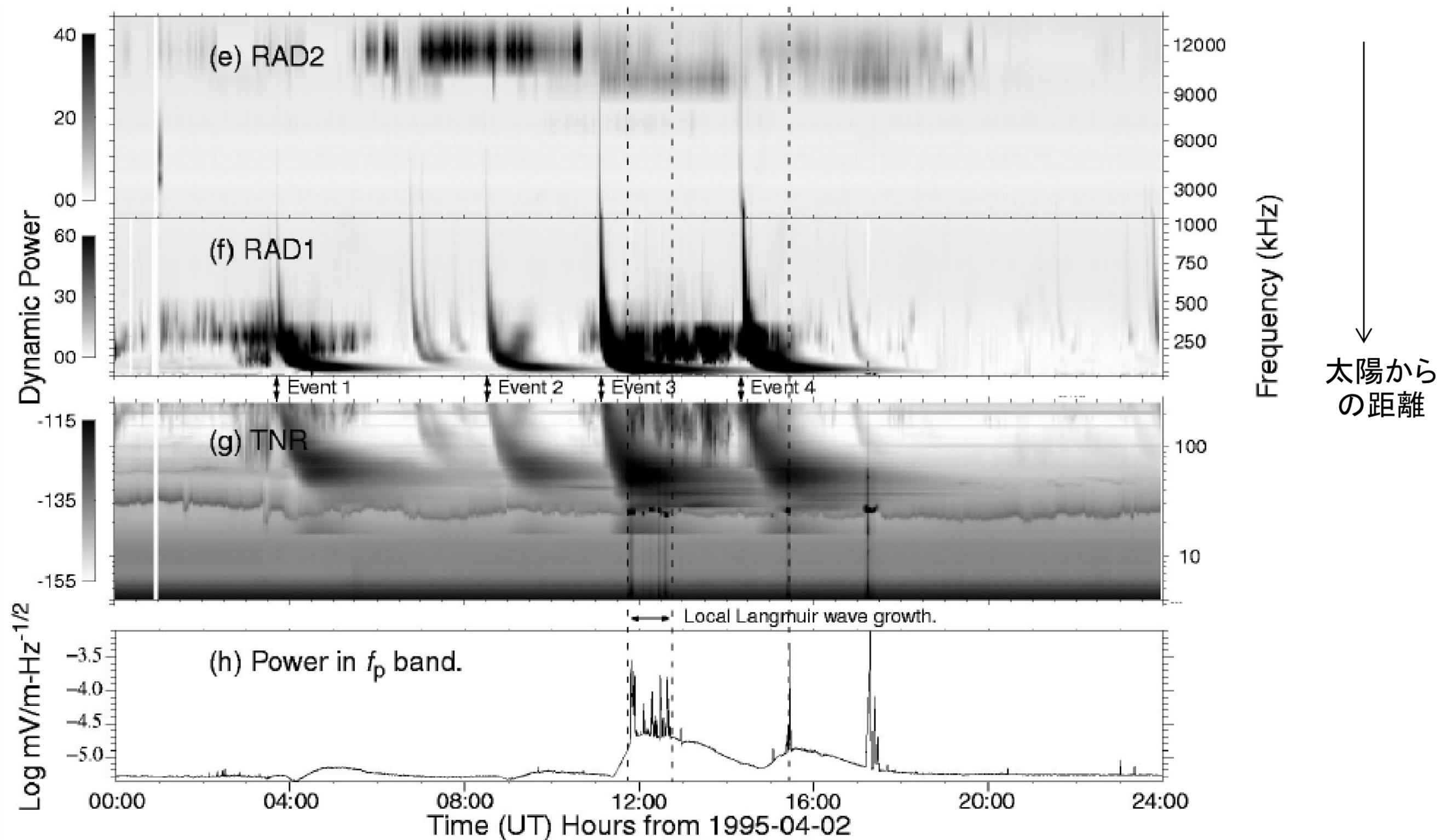
Ⅱ型、Ⅲ型は電子の起源が異なるだけで、輻射過程としては同種

Ⅱ型... 太陽フレアなどから放出された衝撃波が準垂直衝撃波(衝撃波角 $\sim 89^\circ$ ...)であるとき、電子がshock drift加速を受け、衝撃波上流にビームとなって放出観測される $1000\text{-}4000\text{km/s}$ の伝搬速度は衝撃波の速度を表す

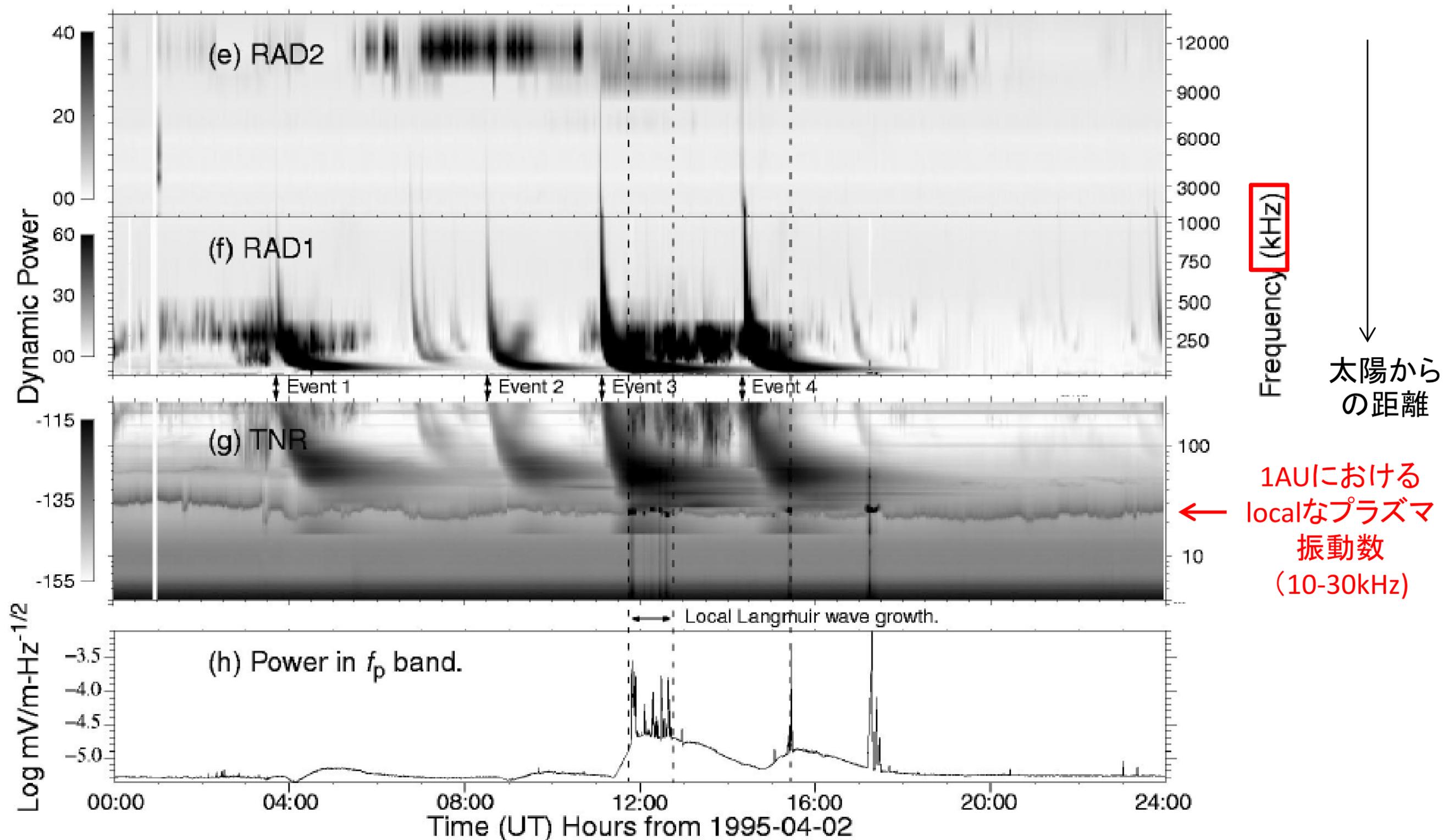
Ⅲ型... 太陽コロナにおける磁気リコネクション(MRX)領域で加速された電子がビームとなって放出観測される光速の数分の1の伝搬速度は数十keV電子の速度

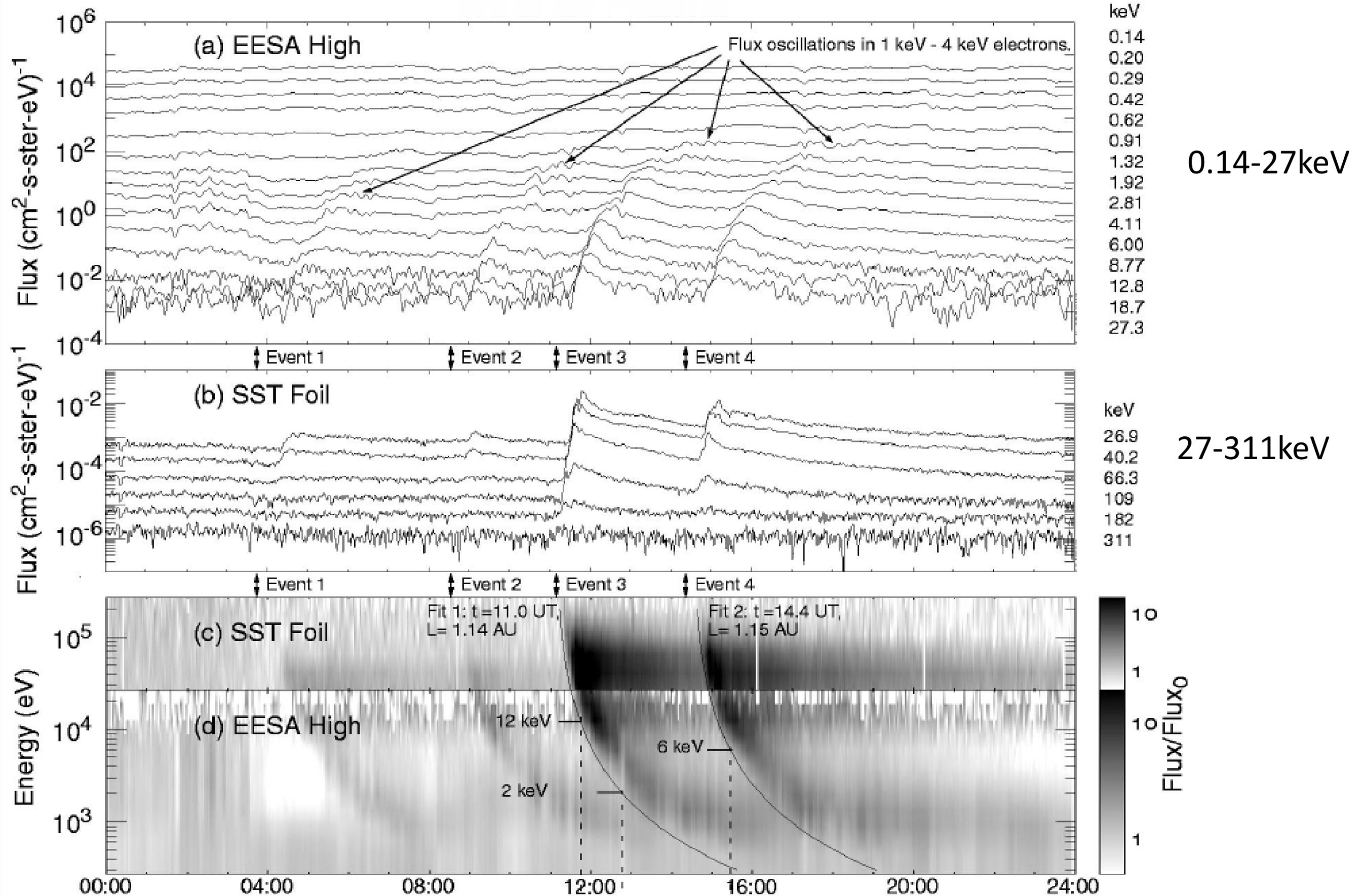


# Ⅲ型電波バースト 惑星間空間での低周波電波観測



Ⅲ型電波バースト 惑星間空間での低周波電波観測





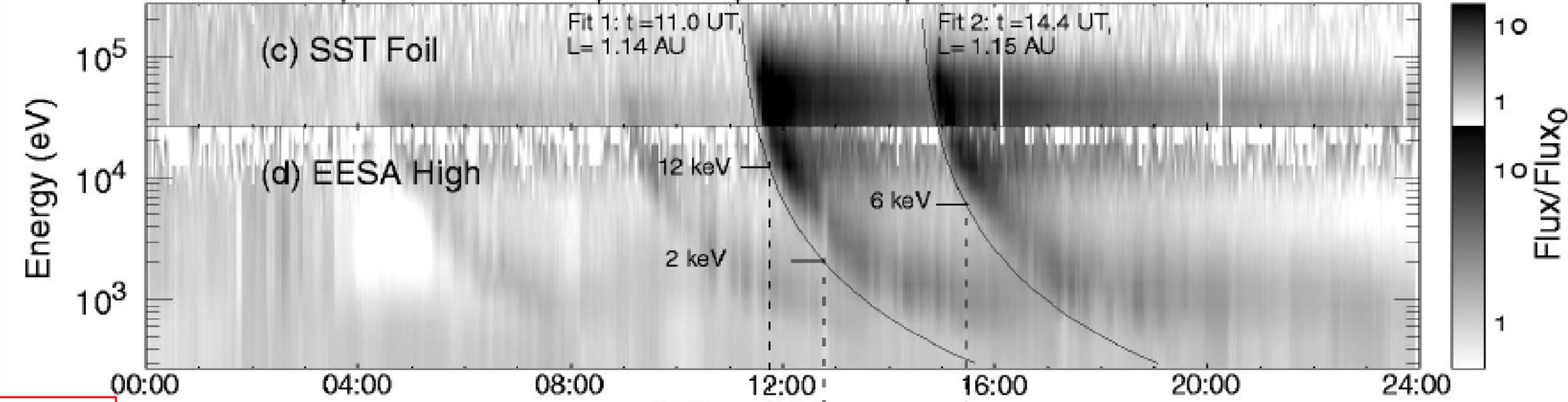
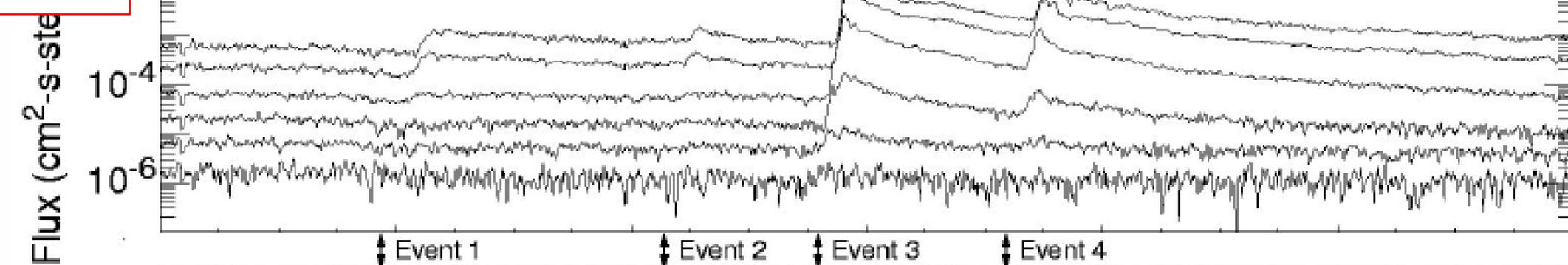
高エネルギー電子ほど早く到着

# 型電波バースト

電子と電波の観測をならべて見ると:

Erugun+1998 ApJ

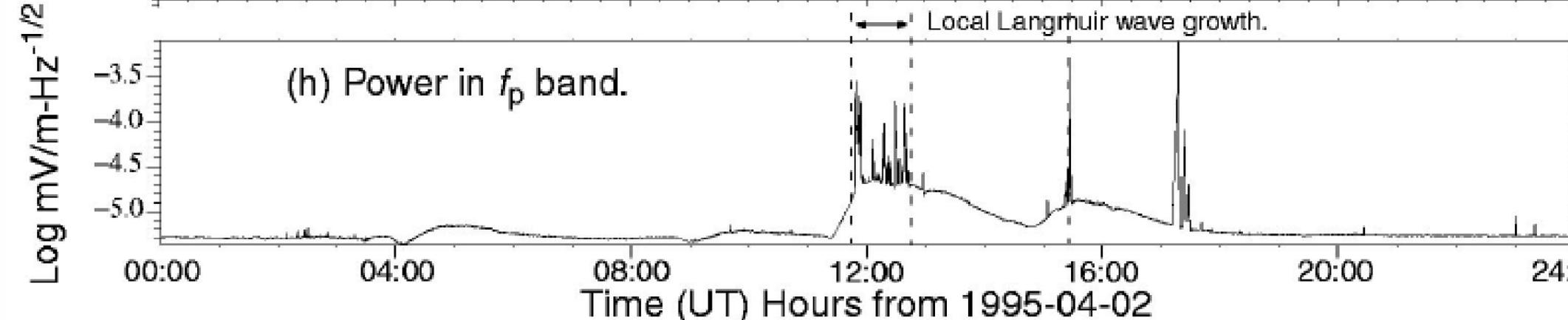
電子



電波



1AUにおける  
← localなプラズマ  
振動数  
(10-30kHz)



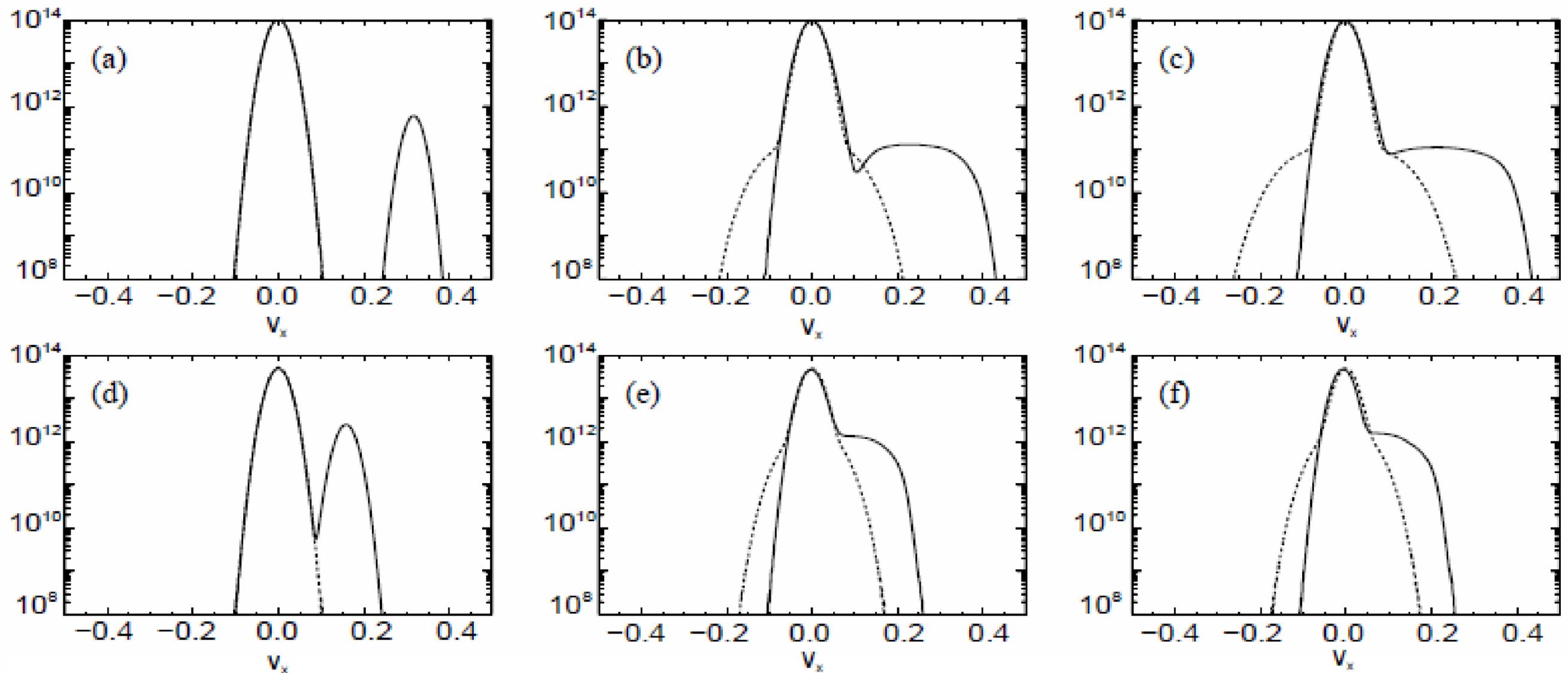
# ○ビーム不安定性(二流体不安定性)

電子ビーム

→ Langmuir波を励起(静電波:縦波)

→ 非線形変換プロセスにより電磁波(自由空間モード:横波)に変換

ビーム不安定性  $f(v)$  初期条件→時間発展(シミュレーション結果)

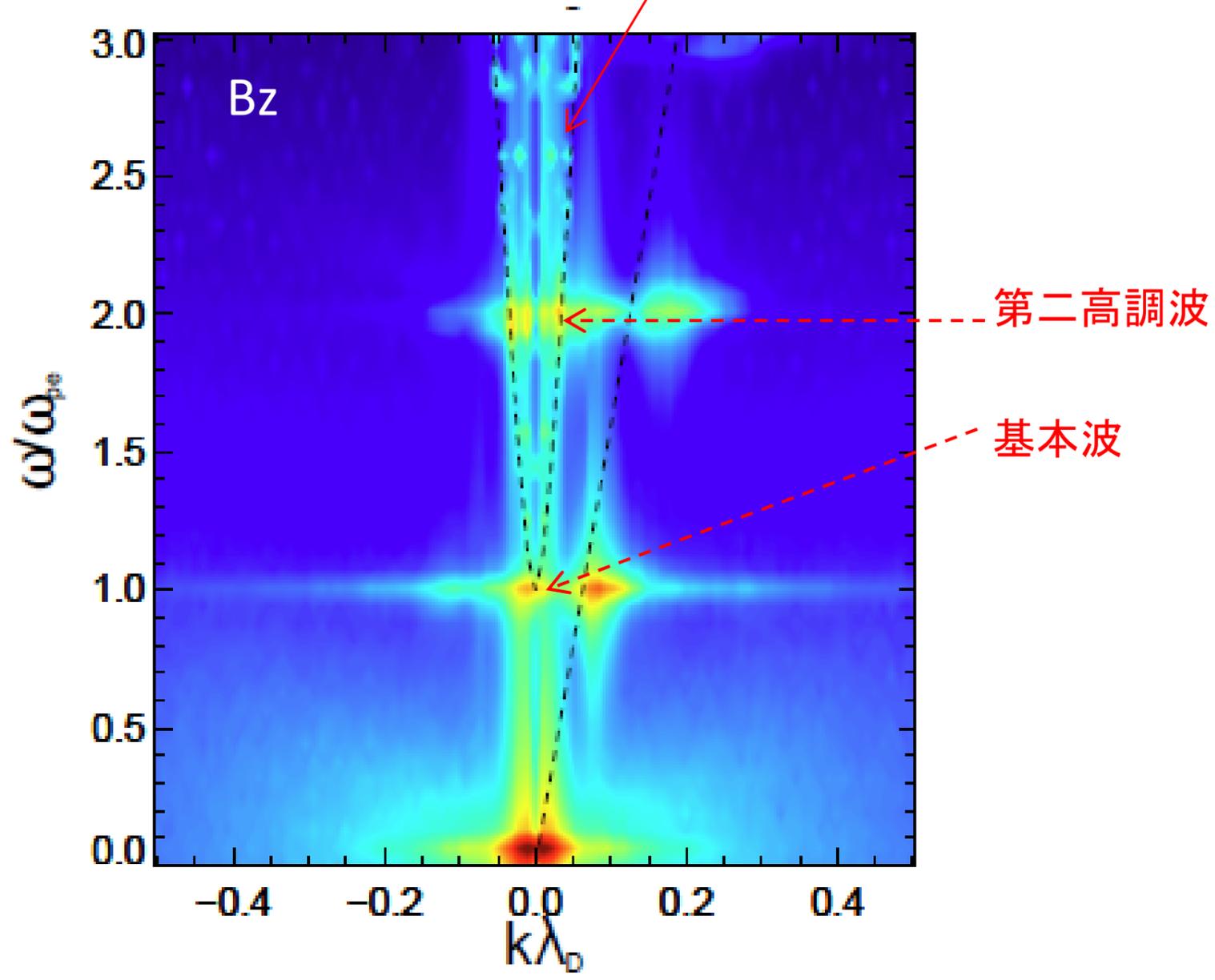
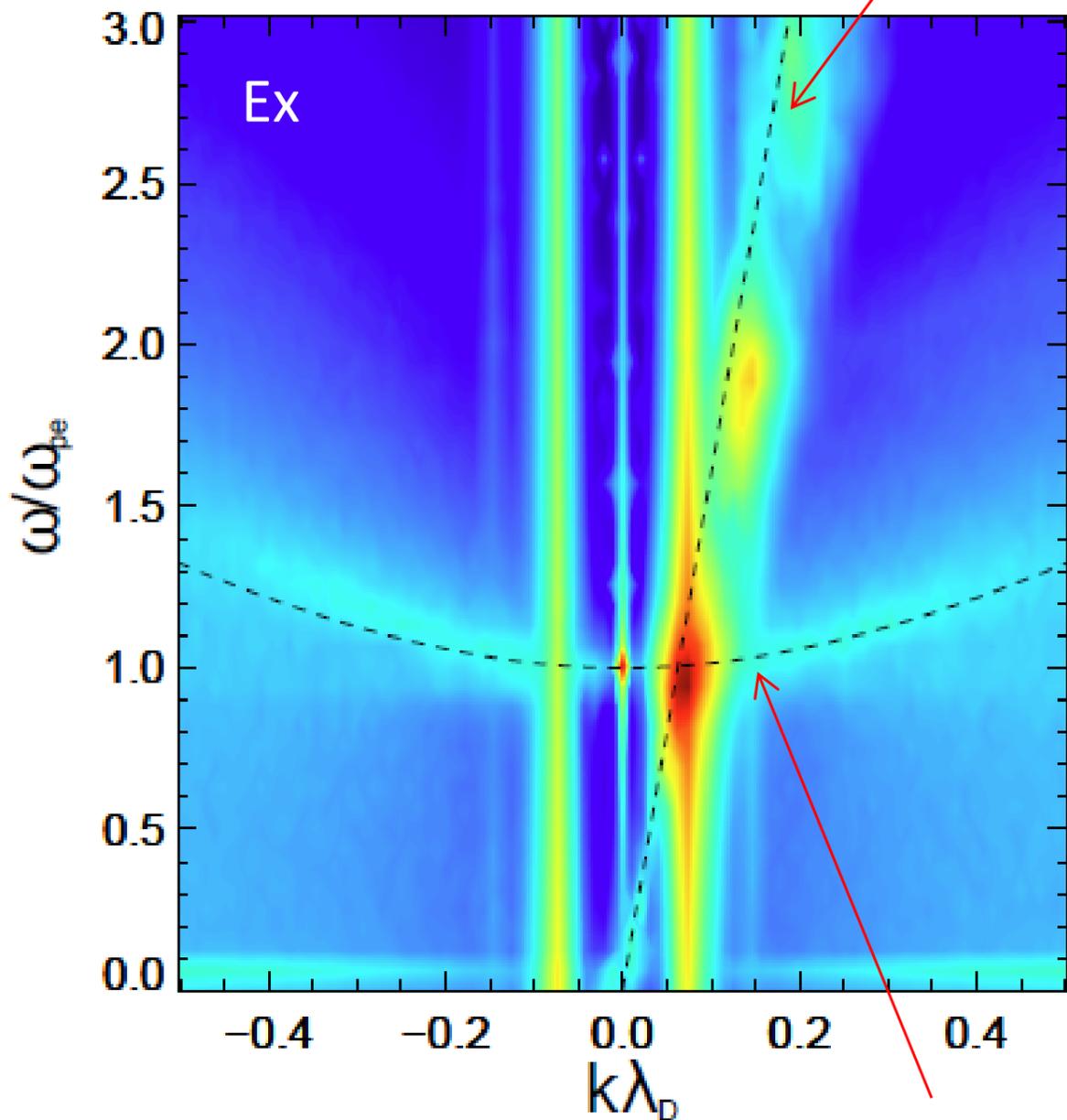


電子ビームのLandau共鳴条件

電磁波(自由空間モード)

励起された静電波

電磁波(自由空間モード)への変換



非線形変換プロセス

- Langmuir波 + 背景イオン音波( $\omega \sim 0$ ) → 基本波
- Langmuir波 + Langmuir波 → 第二高調波

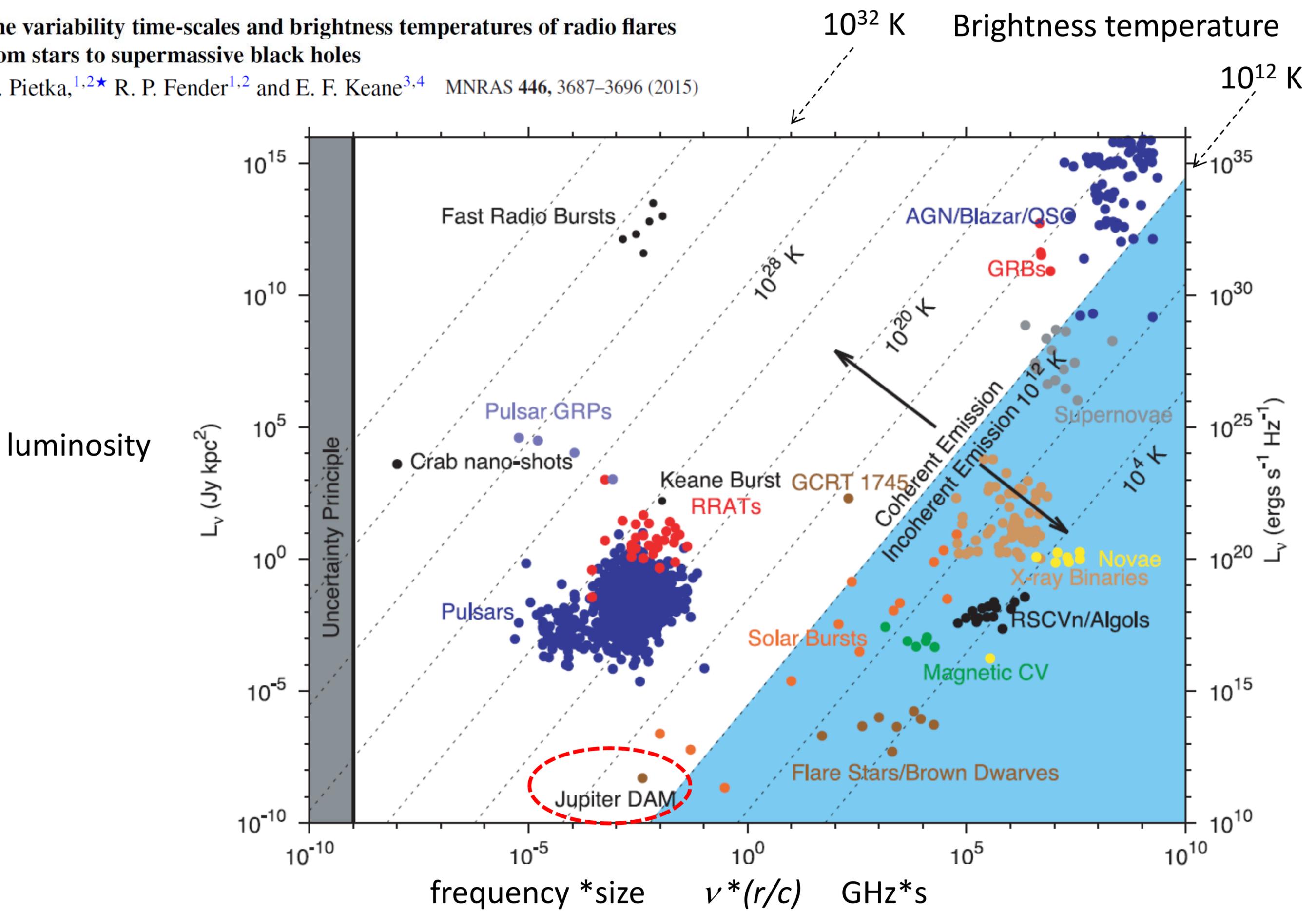
Close

# Contents:

1. Introduction	1
On the Ultra-High Brightness Temperature examples:	
Fast Radio Bursts (FRBs)	
Pulsars' Giant Radio Pulses (GRPs)	2
2. Incoherent vs. Coherent emissions	
3. Heliospheric examples	
3.1 Type II/III Solar Radio Bursts	
→ Excitation of Langmuir waves by electron beams	3-1
3.2 Planetary Radio Waves	
Jovian Decametric Radiations (DAM)	3-2
Earth's Auroral Kilometric Radiations (AKR)	
→ Cyclotron Maser Emission	
4. More about Crab Pulsar's GRPs	4-1
4.1 Frequency spectra of GRPs	
4.2 Proposed models:	
Strong plasma turbulence (SPT)	4-2
Free-electron-maser emission (FEM)	
Cyclotron instability emission (CIE)	
4.3 Puzzling feature of High Frequency Interpulse Spectra	4-3

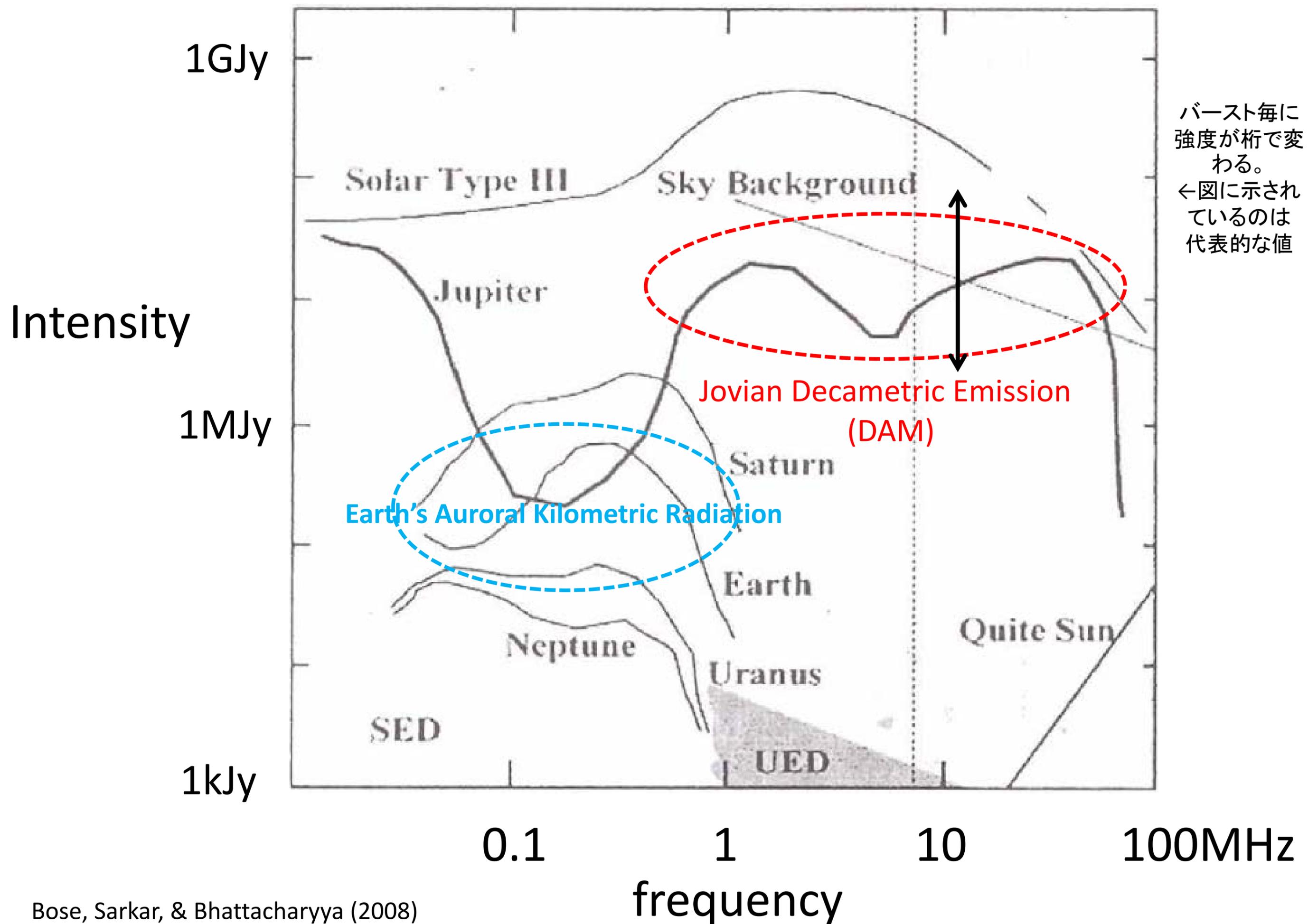
The variability time-scales and brightness temperatures of radio flares from stars to supermassive black holes

M. Pietka,<sup>1,2\*</sup> R. P. Fender<sup>1,2</sup> and E. F. Keane<sup>3,4</sup> MNRAS 446, 3687–3696 (2015)



**Figure 5.** Plotted is a variation of the Fig. 2, with  $L_\nu$  plotted against  $\nu W$  over an even wider range of parameter space. This allows us to identify the sources of coherent radio emission (pulsars, fast radio bursts, certain emission from Jupiter and the Sun, etc.) for comparison with the more slowly varying synchrotron transients. As can clearly be seen the correlation (Fig. 3, Table 1, equation 6) applies only to the imaging/synchrotron sources, and cannot be used for classifying beamformed/coherent sources.

# Solar & Planetary Radio Emission



バースト毎に強度が桁で変わる。  
←図に示されているのは代表的な値

○サイクロトロン不安定性(サイクロトロン・メーザー)

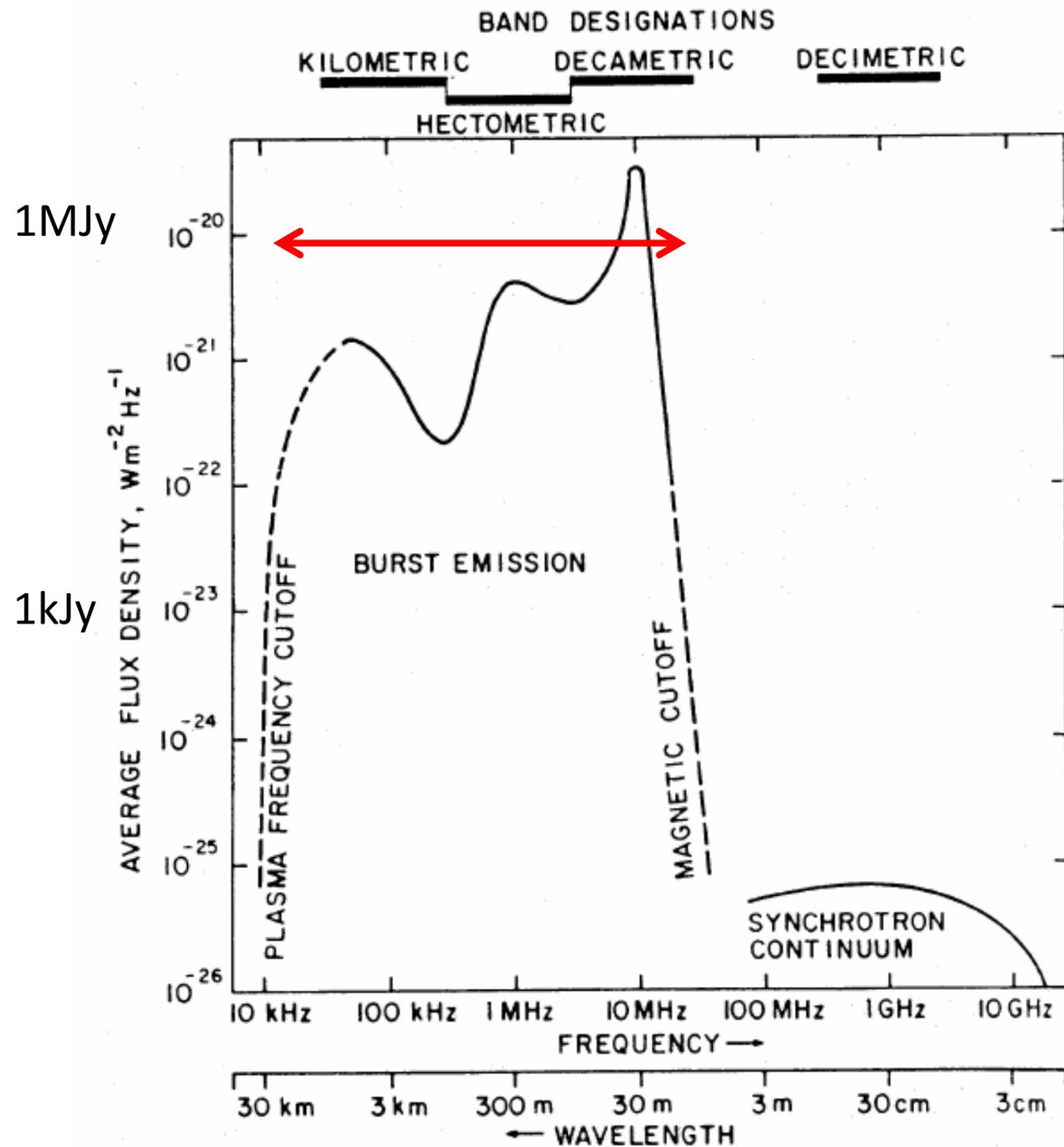
温度異方性→不安定化

例:木星デカメートル波電波、地球オーロラ電波

○サイクロトロン不安定性(サイクロトロン・メーザー)

温度異方性→不安定化

例: **木星デカメータ波電波**、地球オーロラ電波



Carr+(1983)

木星デカメータ波

Crab nebula観測の副産物

Burke & Franklin (1955) JGR 60, 215

... 22MHzでのCrab nebula観測

不定期なノイズの混入

木星の位置からであることがわかった

放射は数MHz~36MHzの範囲であり、

最大強度は $\sim 10^{-19} W / (m^2 Hz)$ に達する

→非熱的起源

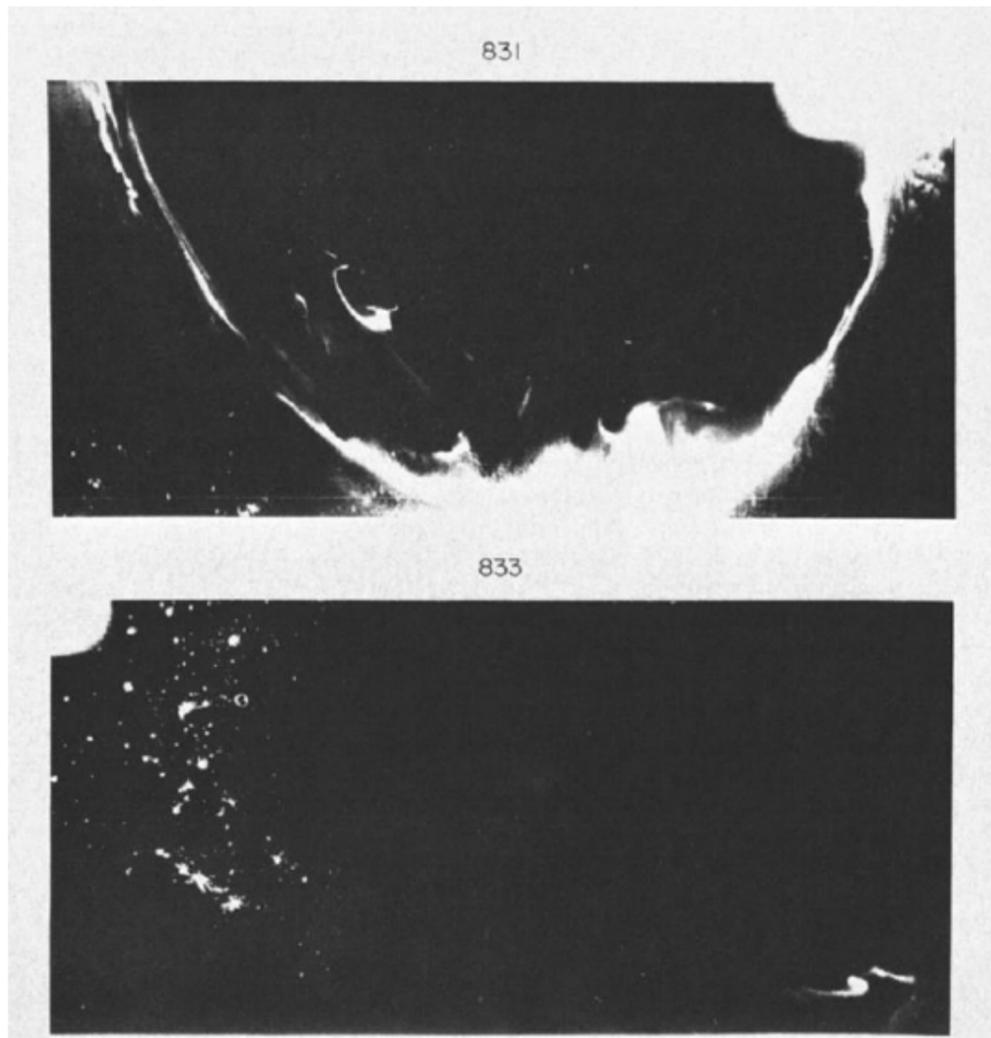
右偏波卓越の発見(~1958)

→ 木星磁場存在の証拠とされた

(後にPioneer/Voyagerが確認した磁場強度のピークは北極で~14Gであり、観測最高周波数36MHzはそこでの電子サイクロトロン周波数とほぼ一致)。

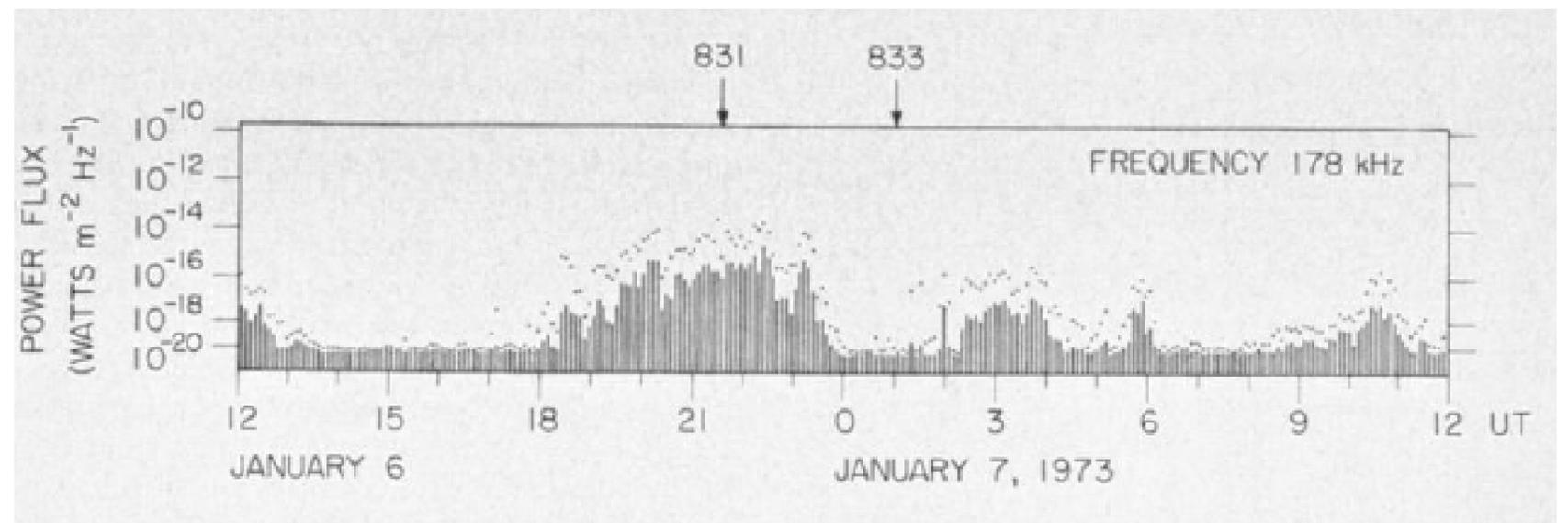
○サイクロトロン不安定性(サイクロトロン・メーザー)  
温度異方性→不安定化  
例:木星デカメートル波電波、**地球オーロラ電波**

### 地球の場合 Auroral Kilometric Radiation (AKR)



←極軌道を回る衛星からのオーロラのイメージ  
軌道番号831、833の比較:

831ではオーロラが輝いていたが、  
その2周回後の833ではオーロラは暗かった



個別の衛星による軌道番号831、833の178kHzでの電波強度の比較: 831では電波が強かったが、その2周回後の833では電波は弱かった

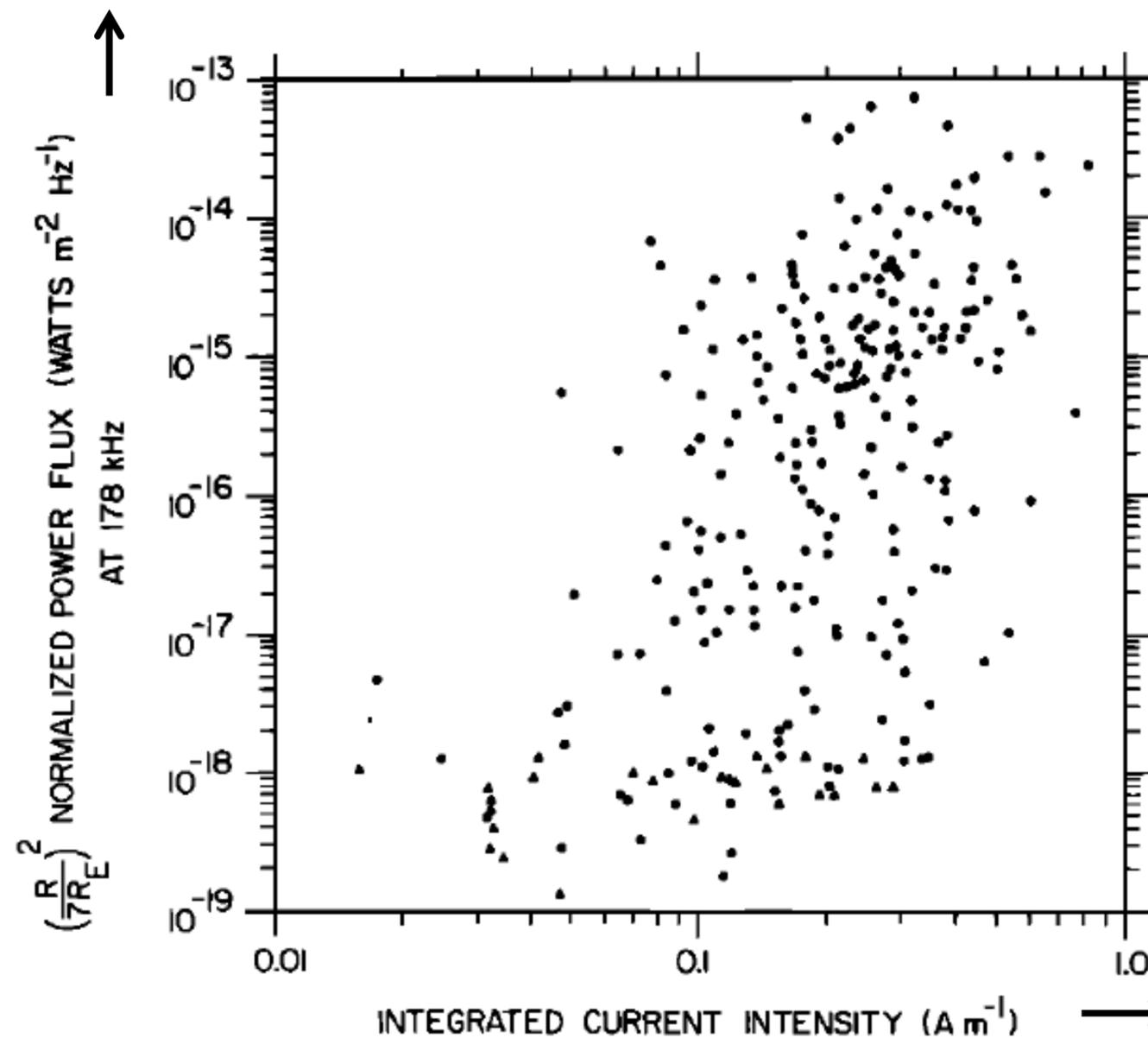
○サイクロトロン不安定性(サイクロトロン・メーザー)

温度異方性→不安定化

例:木星デカメータ波電波、**地球オーロラ電波**

地球の場合 Auroral Kilometric Radiation (AKR)

AKR強度



AKR強度とオーロラ電流強度  
ばらつきは大きいが正の相関あり

←1GJy

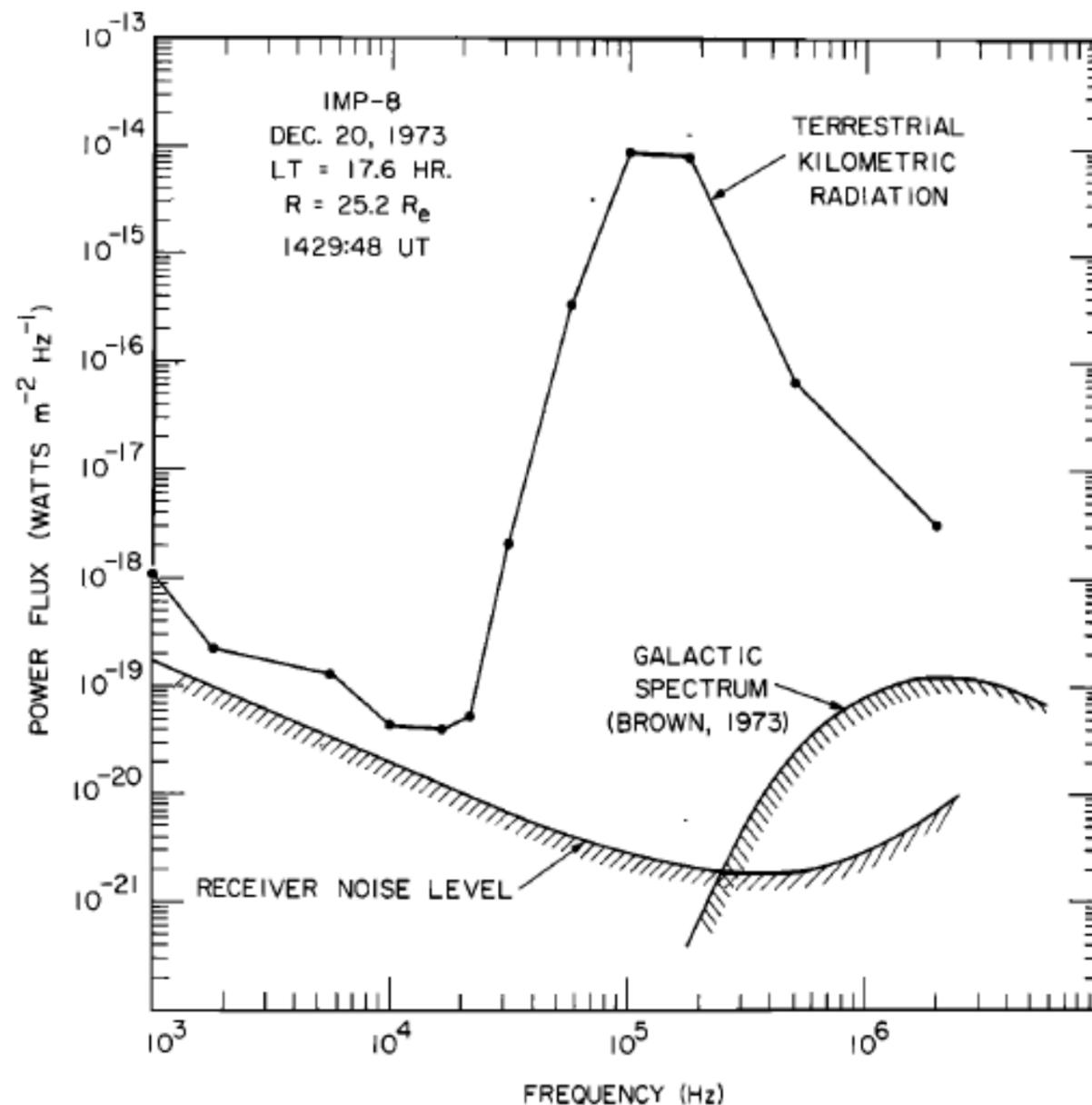
→ オーロラ電流強度

○サイクロトロン不安定性(サイクロトロン・メーザー)

温度異方性→不安定化

例:木星デカメータ波電波、**地球オーロラ電波**

地球の場合 Auroral Kilometric Radiation (AKR)



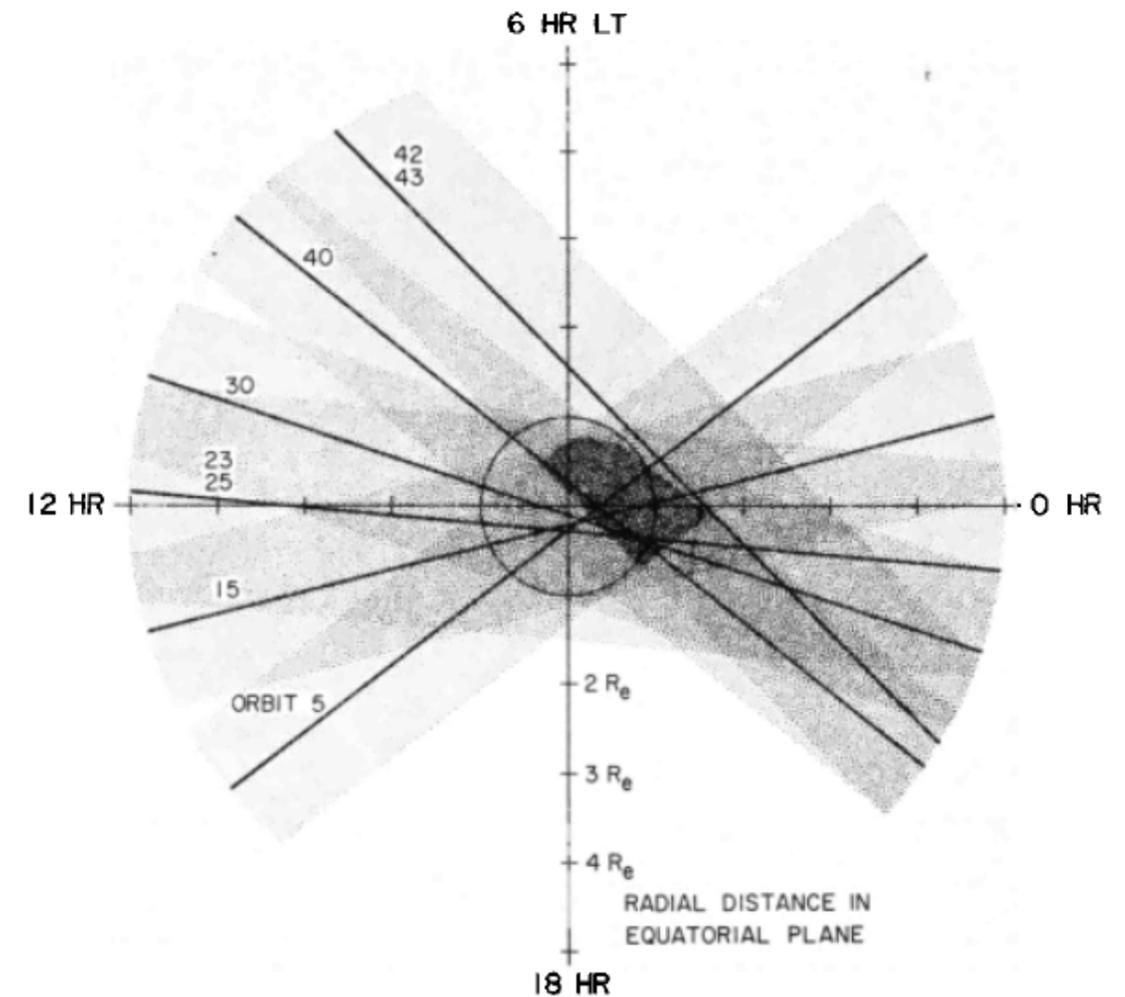
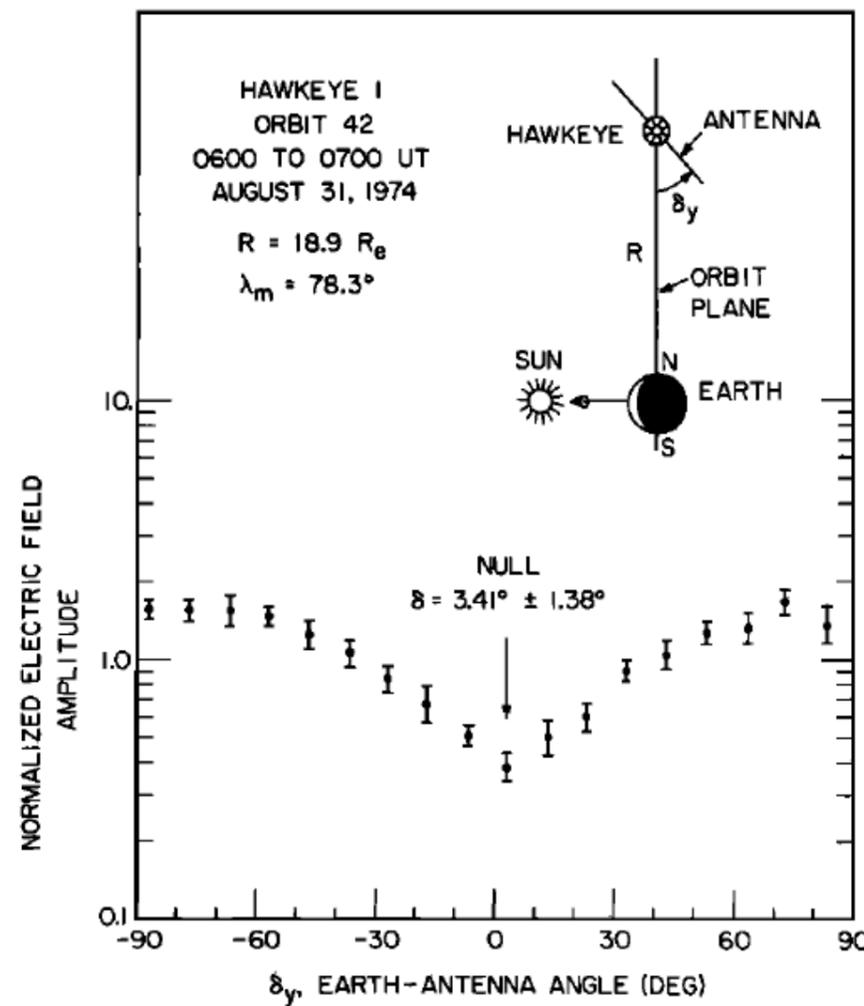
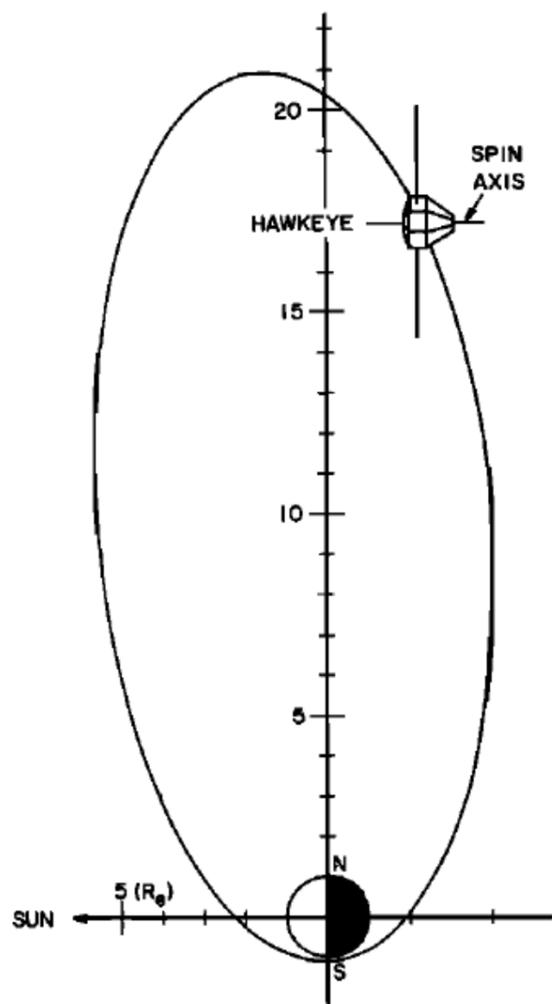
TKR(AKR)の周波数スペクトルの一例  
~100kHz(波長3km)にピーク

“Kilometric radiation”の名前の由来

←1GJy

○サイクロトロン不安定性(サイクロトロン・メーザー)  
 温度異方性→不安定化  
 例:木星デカメータ波電波、**地球オーロラ電波**

AKR発生領域の同定  
 人工衛星のダイポールアンテナの指向性を用いた方向探知による



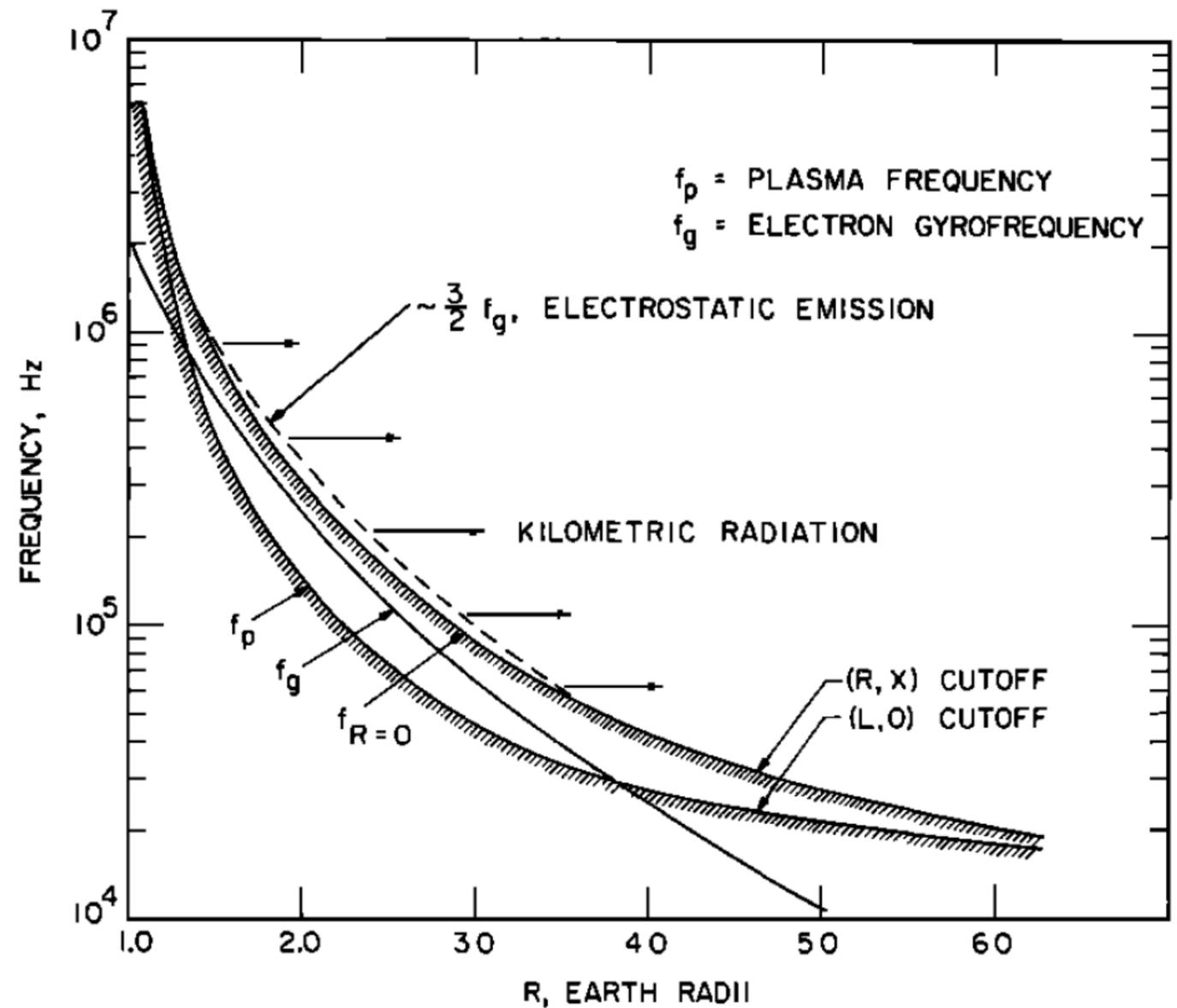
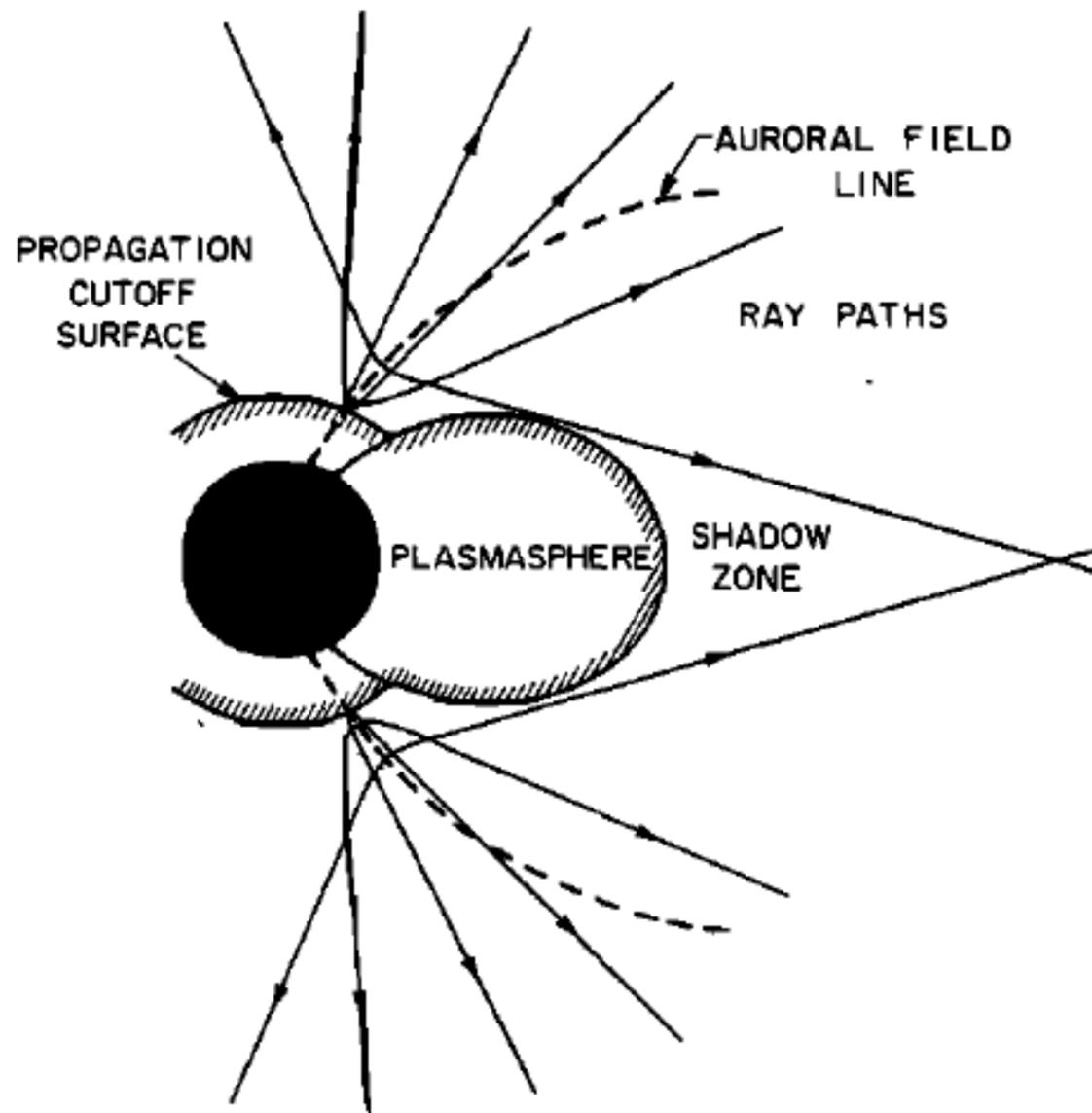
電波源は真夜中の少し前  
 (23LT頃)にある

○サイクロトロン不安定性(サイクロトロン・メーザー)

温度異方性→不安定化

例:木星デカメータ波電波、**地球オーロラ電波**

AKR発生領域の同定(2)



○サイクロトロン不安定性(サイクロトロン・メーカー)

温度異方性→不安定化

例:木星デカメータ波電波、地球オーロラ電波、**フレア星**

磁極近くの磁場の強い領域からの電子サイクロトロン由来の輻射を考えること

... この業界の支配的パラダイム

下の図はフレア星UV-Cetiからの電波放射モデル

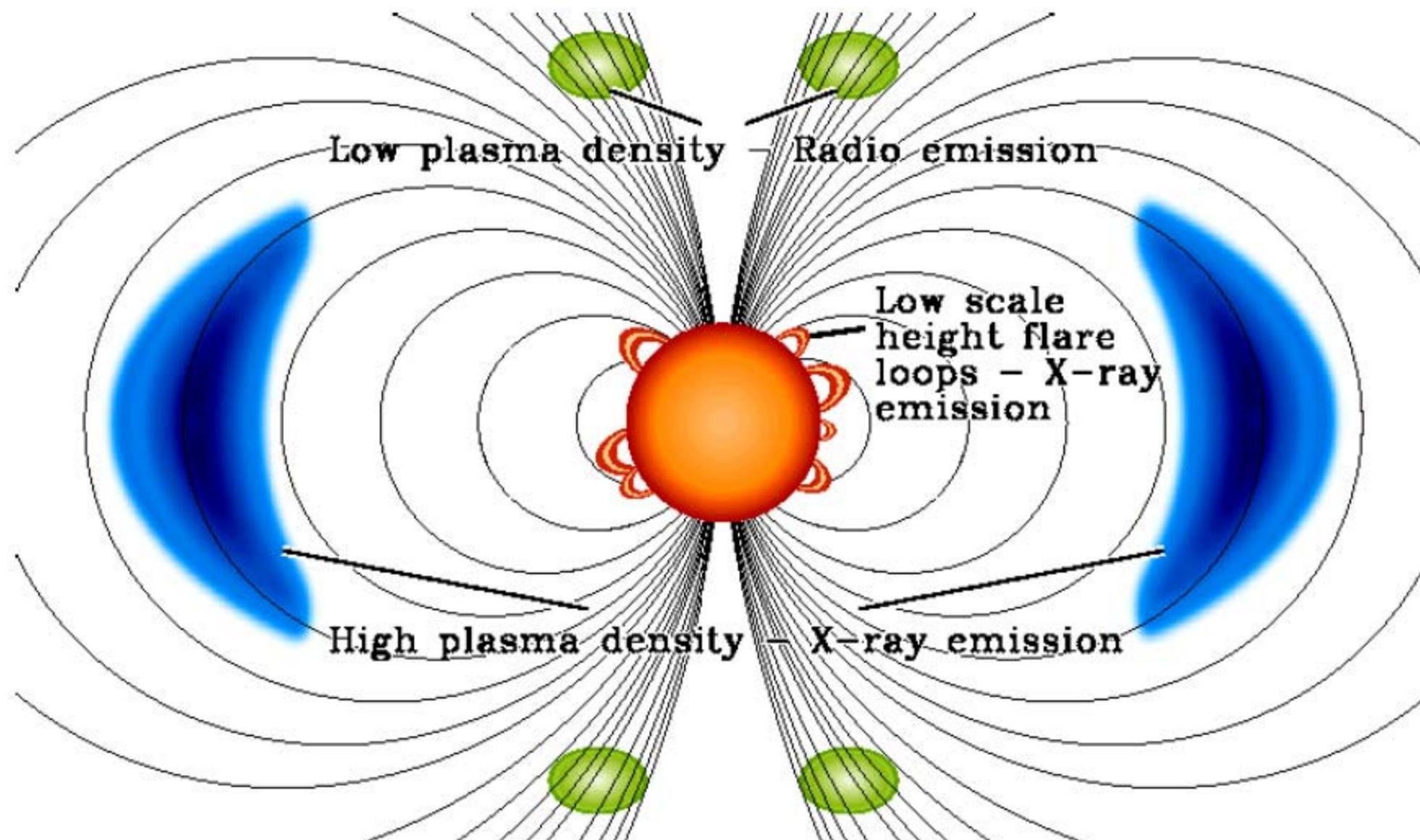
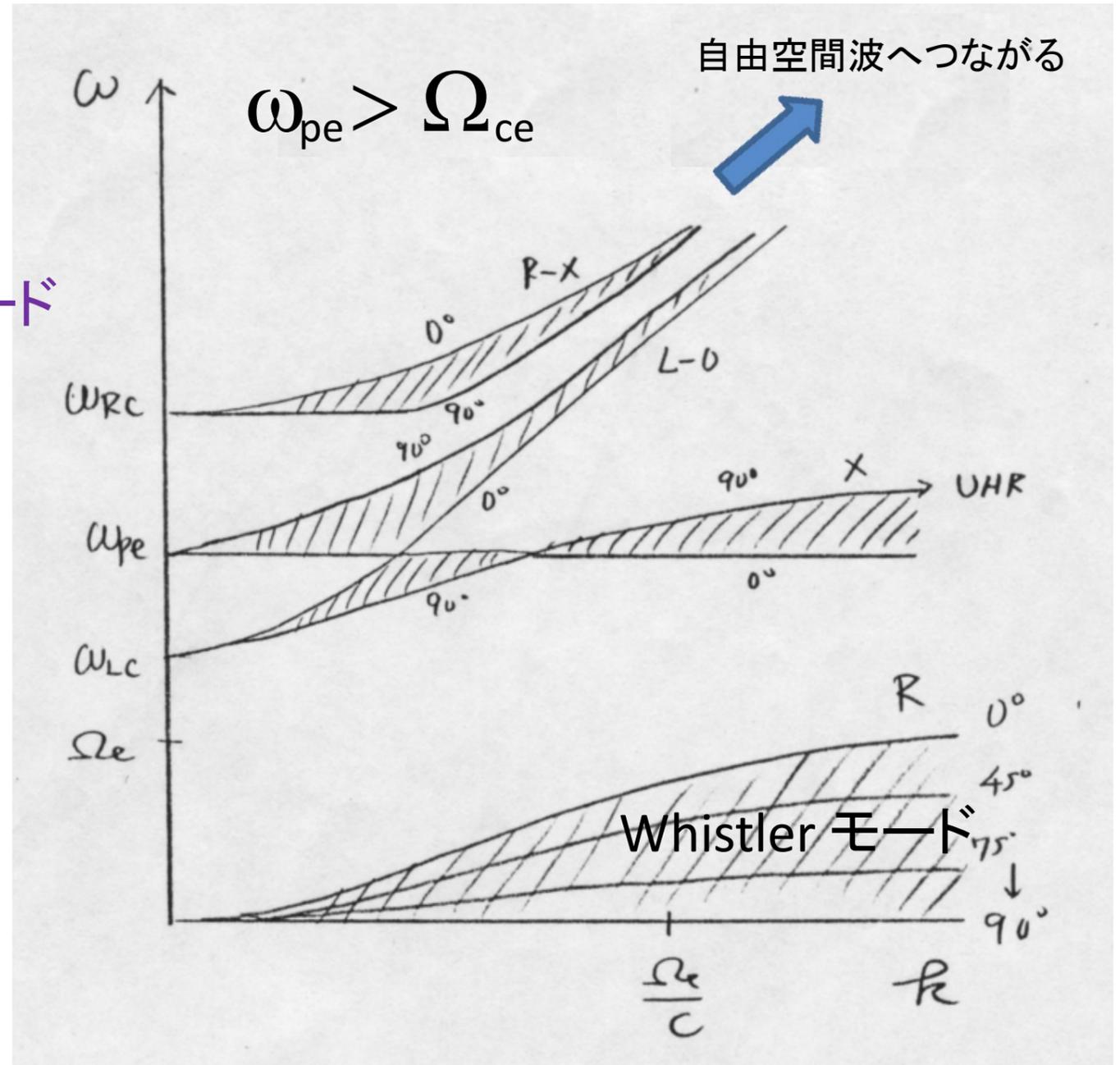
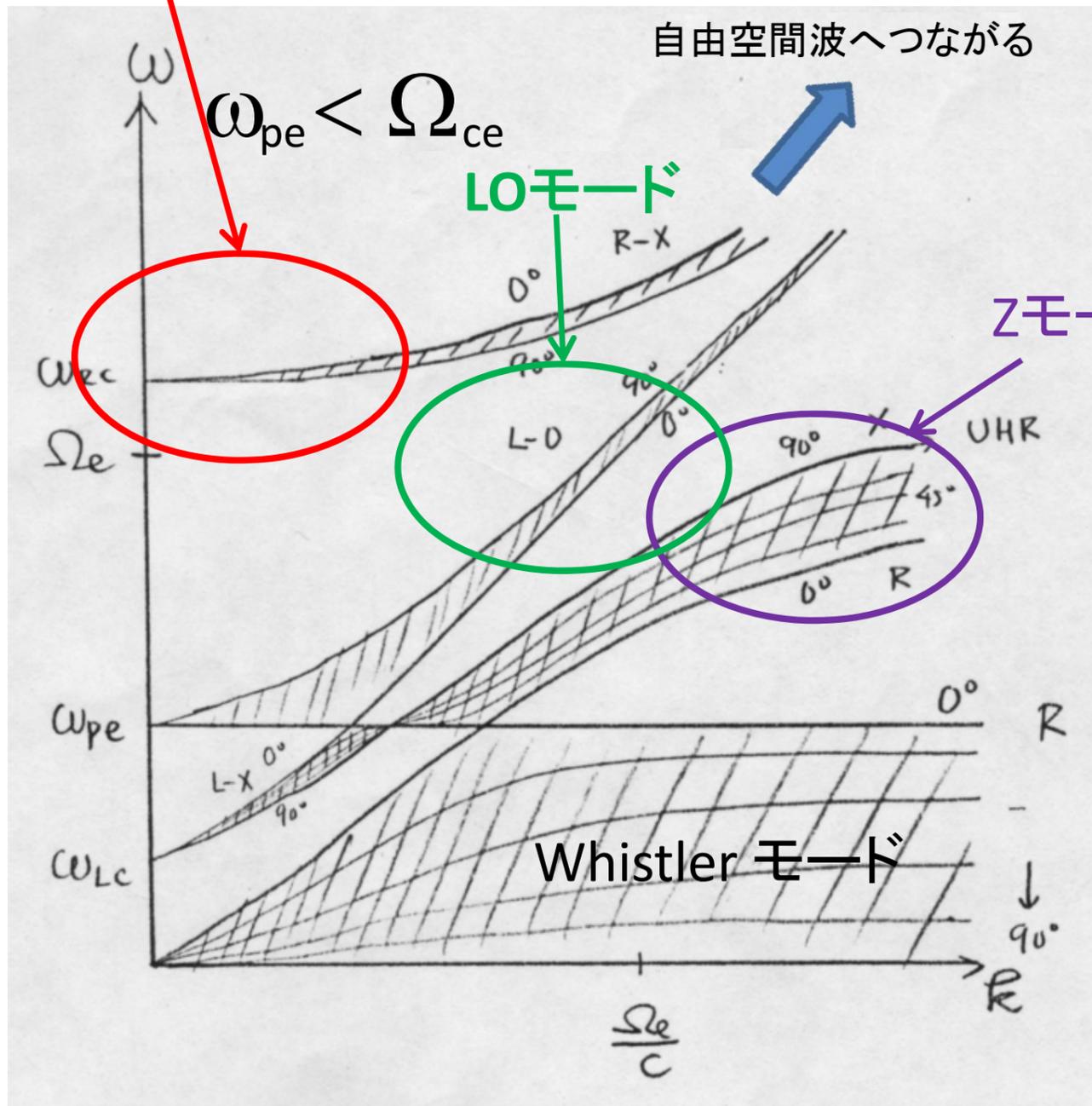


Fig. 3 Diagrammatic representation of radiation emission from the flare star UV-Ceti (Kellett et al. 2002)

RXモード

# Dispersion Relation for EM waves



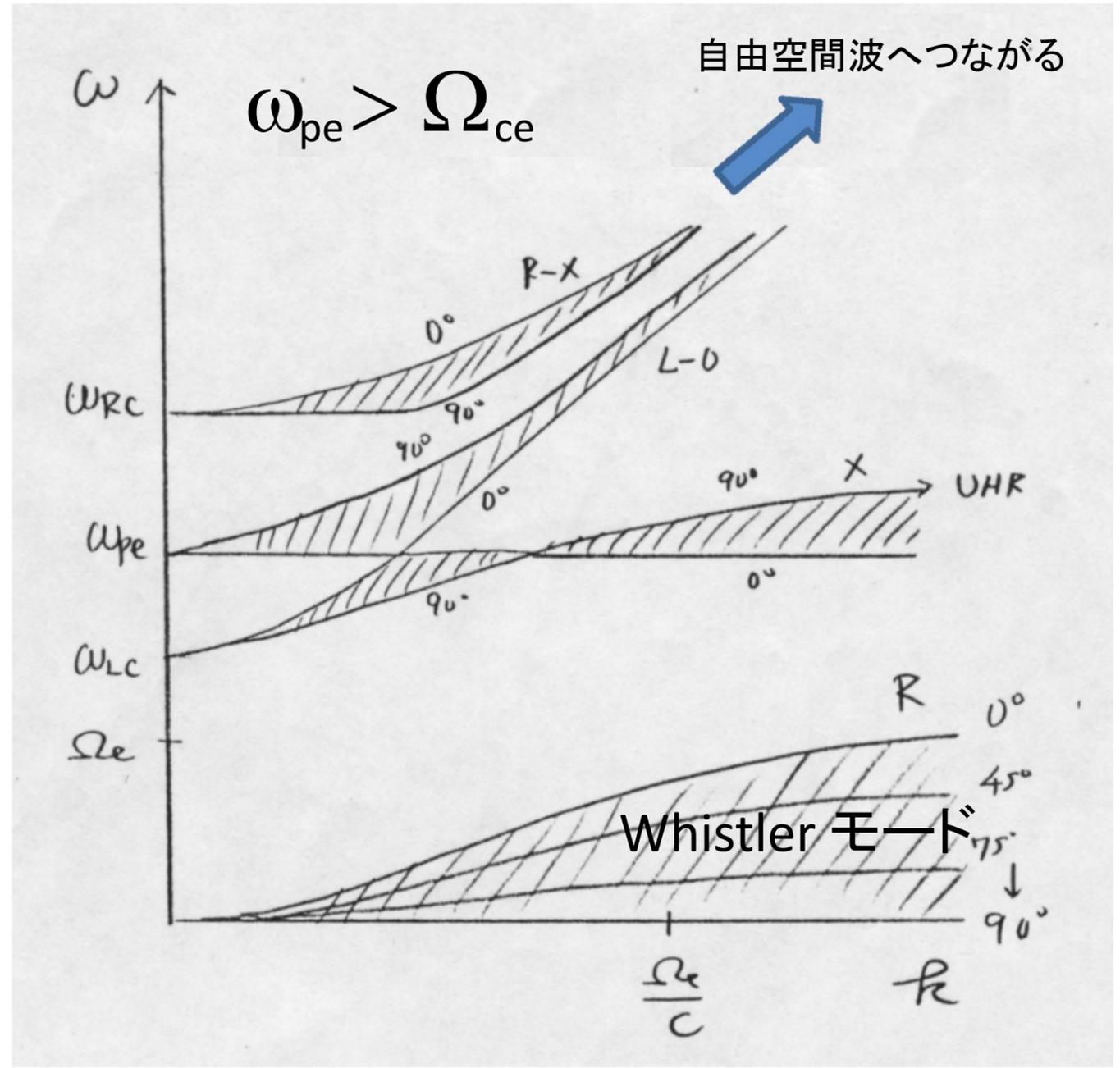
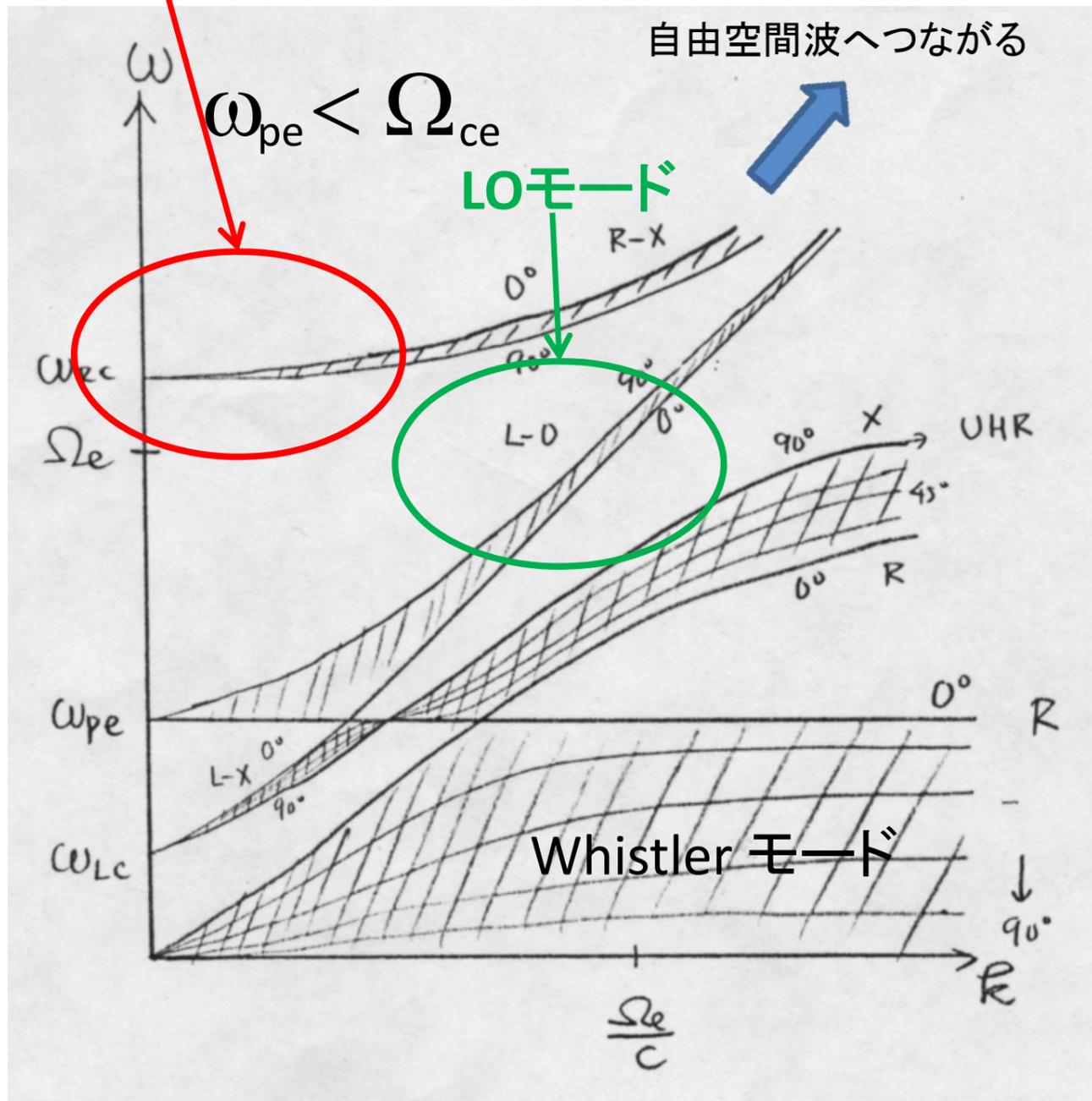
$\omega \sim \Omega_{ce}$  で励起された電磁波動が自由空間波となって外に出るのは  
 プラズマ振動数 < サイクロトロン振動数となる左の場合に限られる。

サイクロトロン周波数付近にはZ, LO, RXの3つのモードがあるが、Zモードは  
 自由空間モードにつながらないので除外

分散関係

RXモード

# Dispersion Relation for EM waves



$\omega \sim \Omega_{ce}$  で励起された電磁波動が自由空間波となって外に出るのは  
 プラズマ振動数 < サイクロトロン振動数となる左の場合に限られる。

サイクロトロン周波数付近にはZ, LO, RXの3つのモードがあるが、Zモードは  
 自由空間モードにつながらないので除外

RX、LOモードなら、同一モードで励起→伝搬できるので効率がよい。

分散関係

波動の励起をどう実現するか？

電子のサイクロトロン運動： $E_{\perp}$ エネルギーを波動に転化

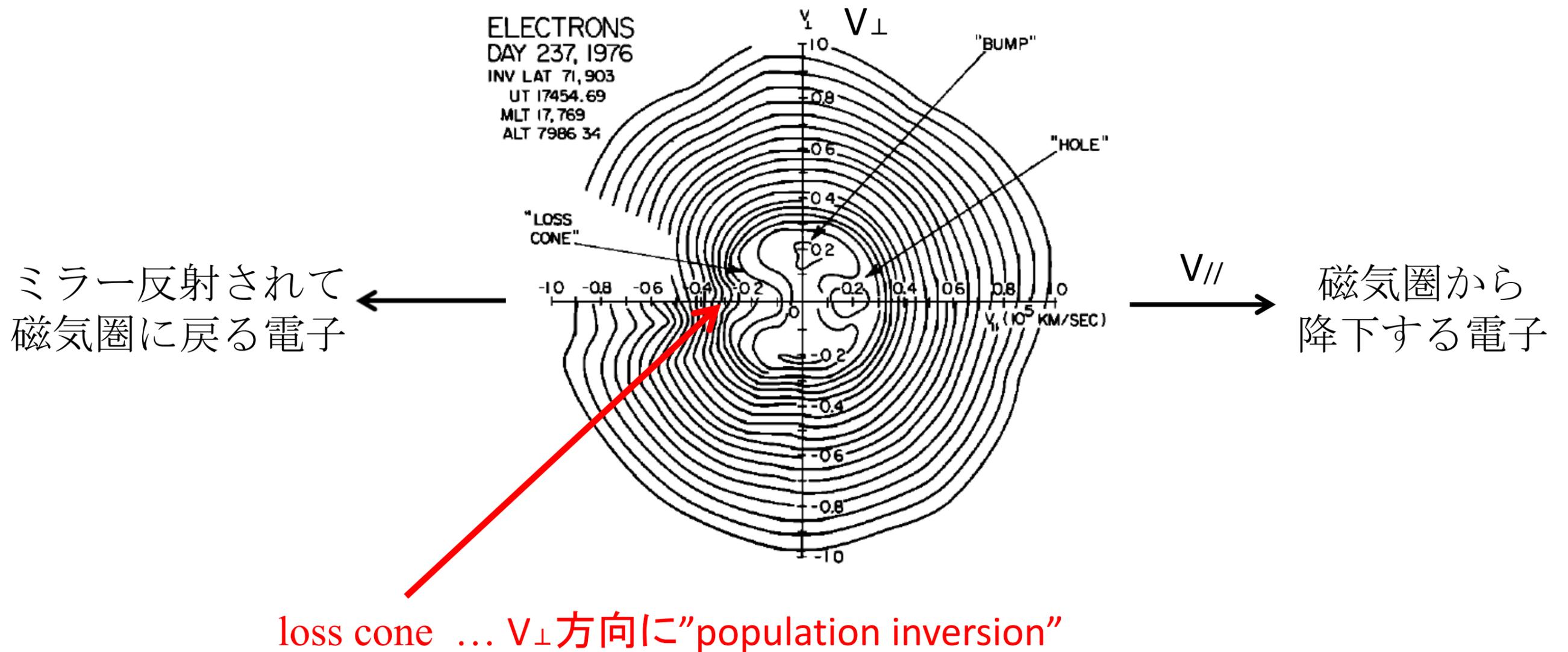
Wu&Leeモデル(1976)

オーロラ電場による電子の下向き加速(数～数十keV)

→ ピッチ角～0度の電子は電離層に入射して失われる

ピッチ角～90度の電子は電離層に入射する前に磁気ミラー反射

→ 被反射電子はロスコーン分布



$$1 - \frac{c^2 k^2}{\omega^2} + \frac{\omega_e^2}{\omega^2 n_e} \int d^3 v \left( \Omega_e \frac{\partial F_e}{\partial v_{\perp}} + k_{\parallel} v_{\perp} \frac{\partial F_e}{\partial v_{\parallel}} \right) \times \frac{v_{\perp} J_1'^2(b)}{(\omega - \Omega_e/\gamma - k_{\parallel} v_{\parallel})} = 0 \quad (1)$$

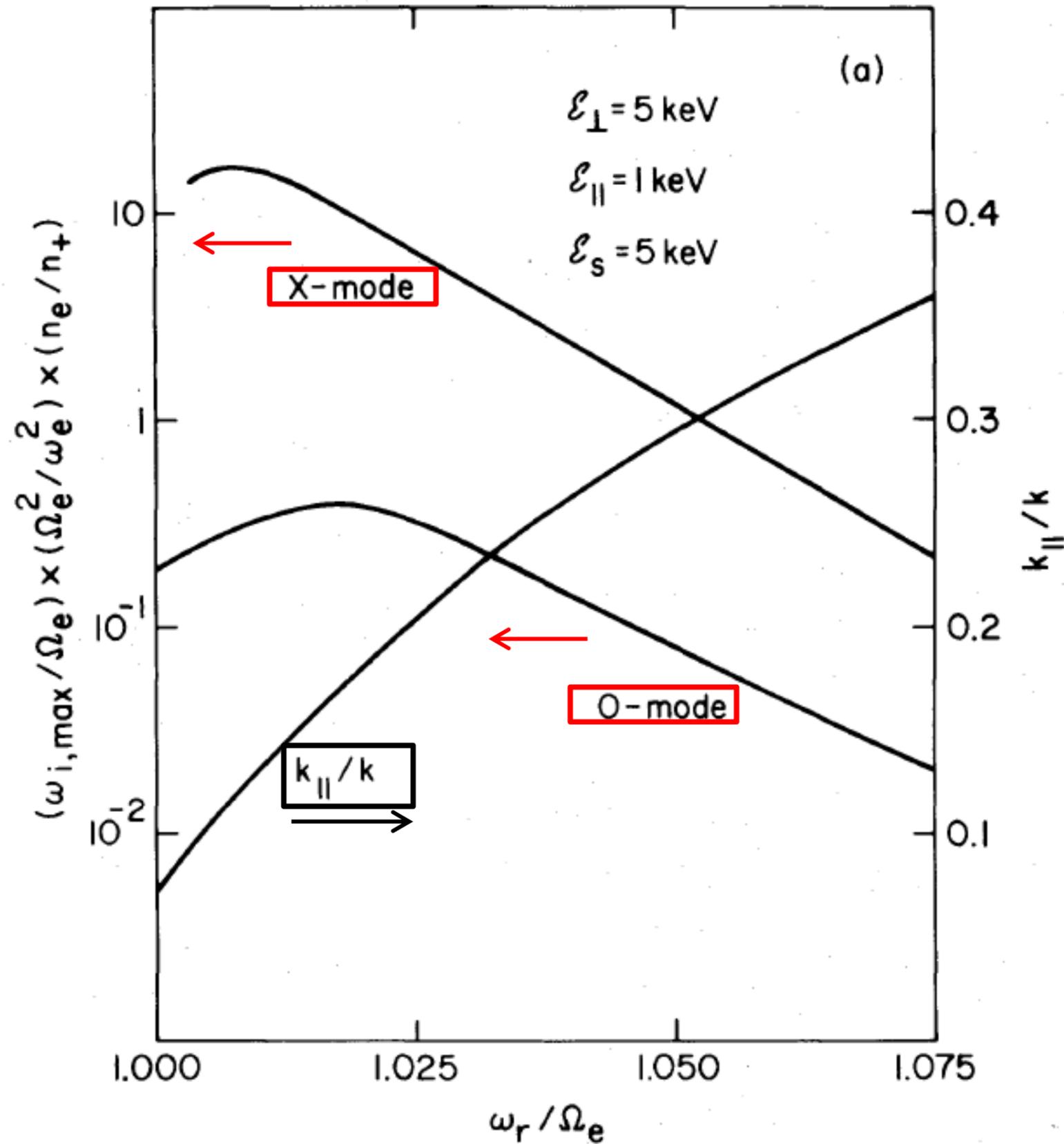
(for the extraordinary mode when  $c^2 k^2 \gg \omega_e^2$ ) and

$$1 - \frac{c^2 k_{\perp}^2}{\omega^2} + \frac{\omega_e^2}{\omega^2 n_e} \int d^3 v \left( \Omega_e \frac{\partial F_e}{\partial v_{\perp}} + k_{\parallel} v_{\perp} \frac{\partial F_e}{\partial v_{\parallel}} \right) \times \frac{v_{\parallel}^2 J_1^2(b)}{v_{\perp} (\omega - \Omega_e/\gamma - k_{\parallel} v_{\parallel})} = 0 \quad (2)$$

(for the ordinary mode), where  $J_1'(b) = dJ_1/db$ ,  $b = k_{\perp} v_{\perp} / \Omega_e$ , and  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ .

Wu&Leeモデル(1976) 計算結果の一例

(斜め伝搬なので、R-Xモードだけでなく、L-Oモードも励起されるが成長率が低い)



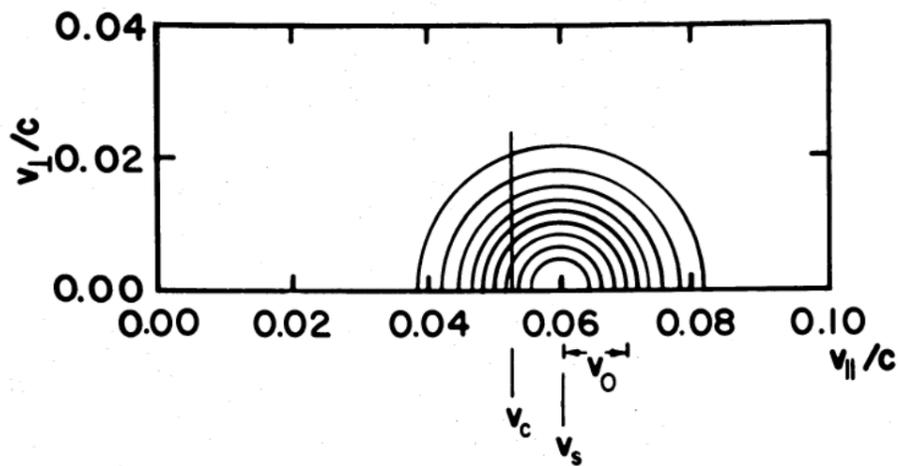
不安定性  
成長率

伝搬方向

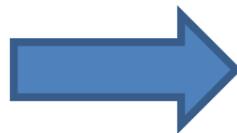
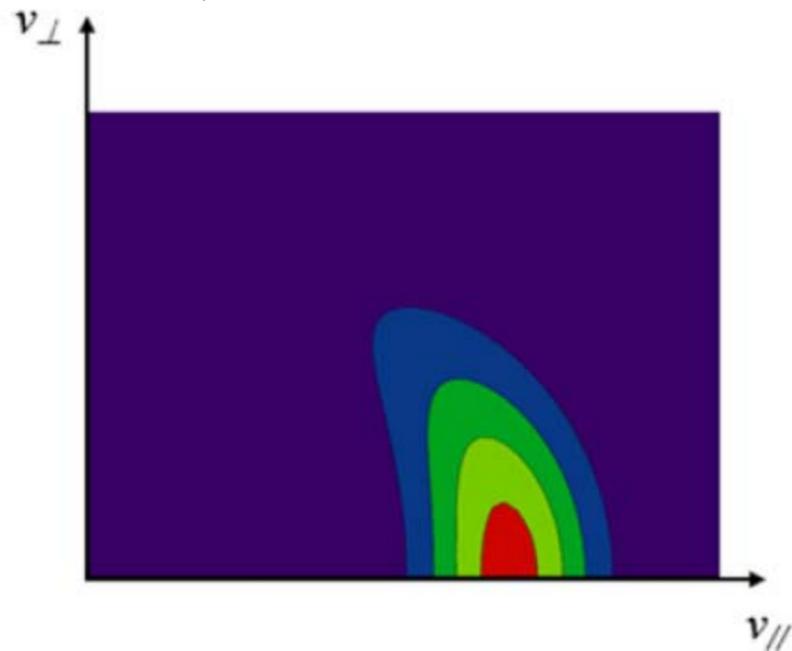
# 不安定性をどう実現するか？

最近の考え…磁気ミラー効果を考えることは一緒だが、反射された電子ではなく、加速直後のビーム分布のミラー効果による変形(→horseshoe形状)を考える。

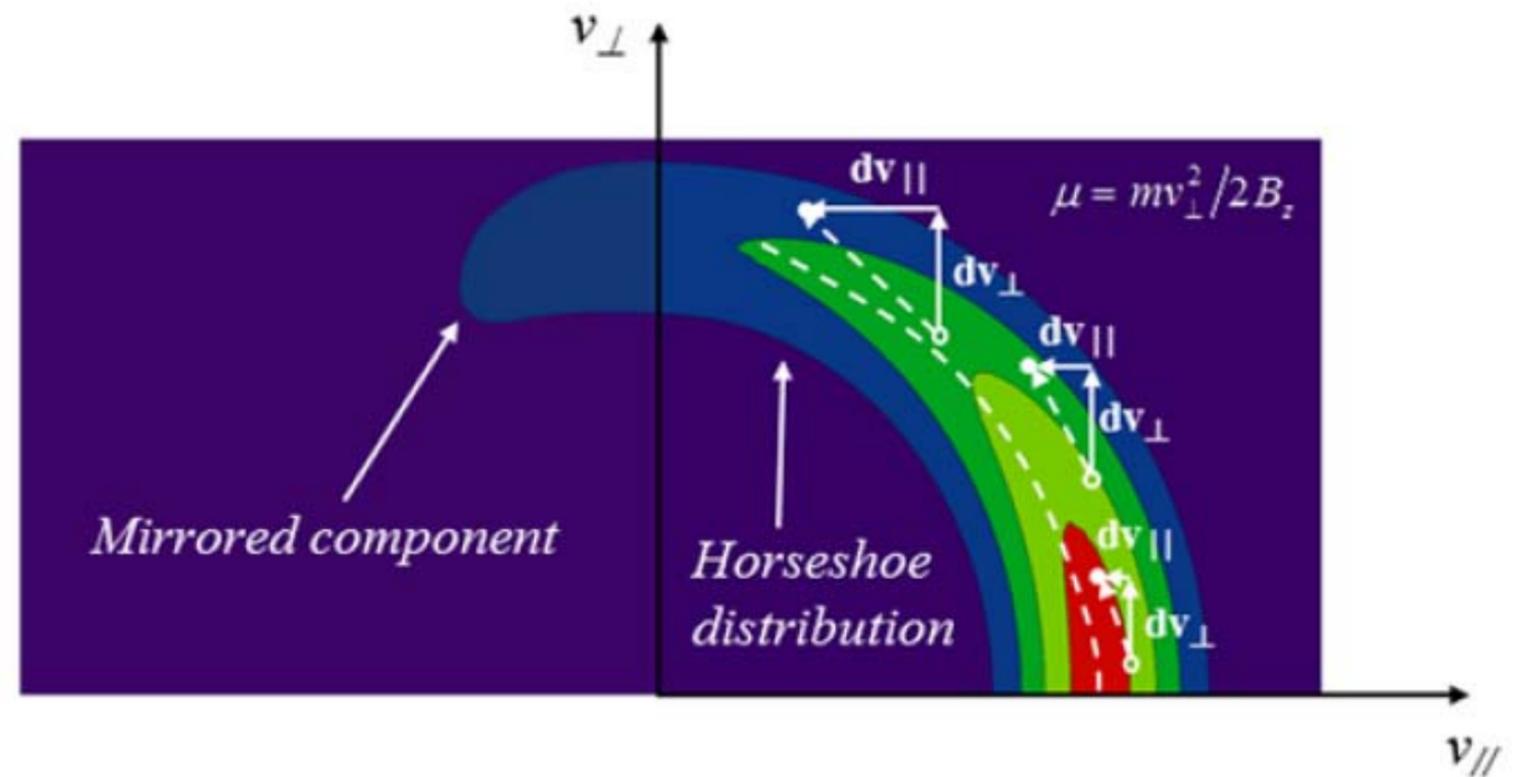
## 沿磁力線電場による加速直後



ミラー効果による変形

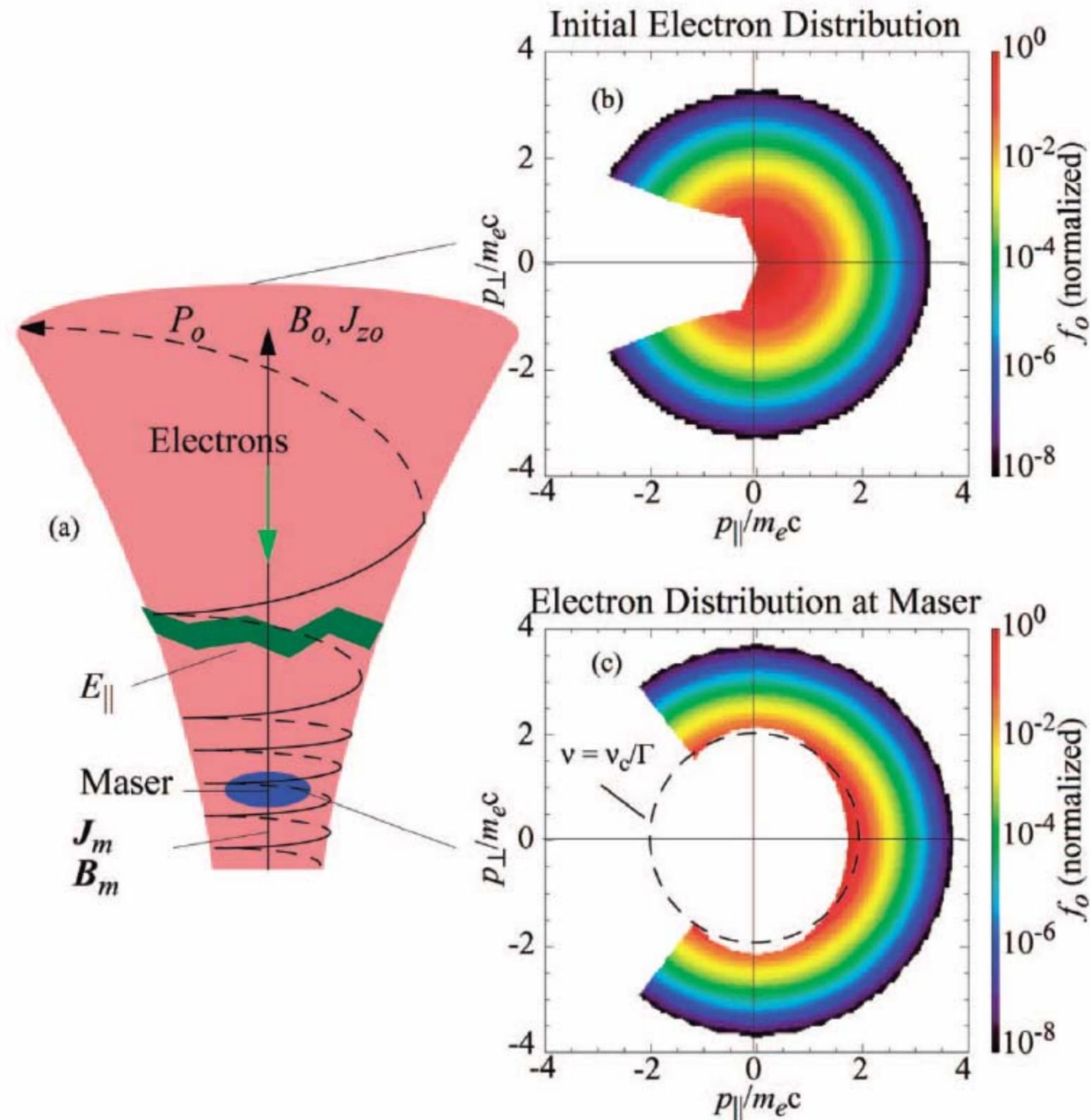


## Horseshoe分布の完成



CYCLOTRON MASER EMISSION FROM BLAZAR JETS?

MITCHELL C. BEGELMAN,<sup>1</sup> ROBERT E. ERGUN,<sup>2</sup> AND MARTIN J. REES<sup>3</sup>

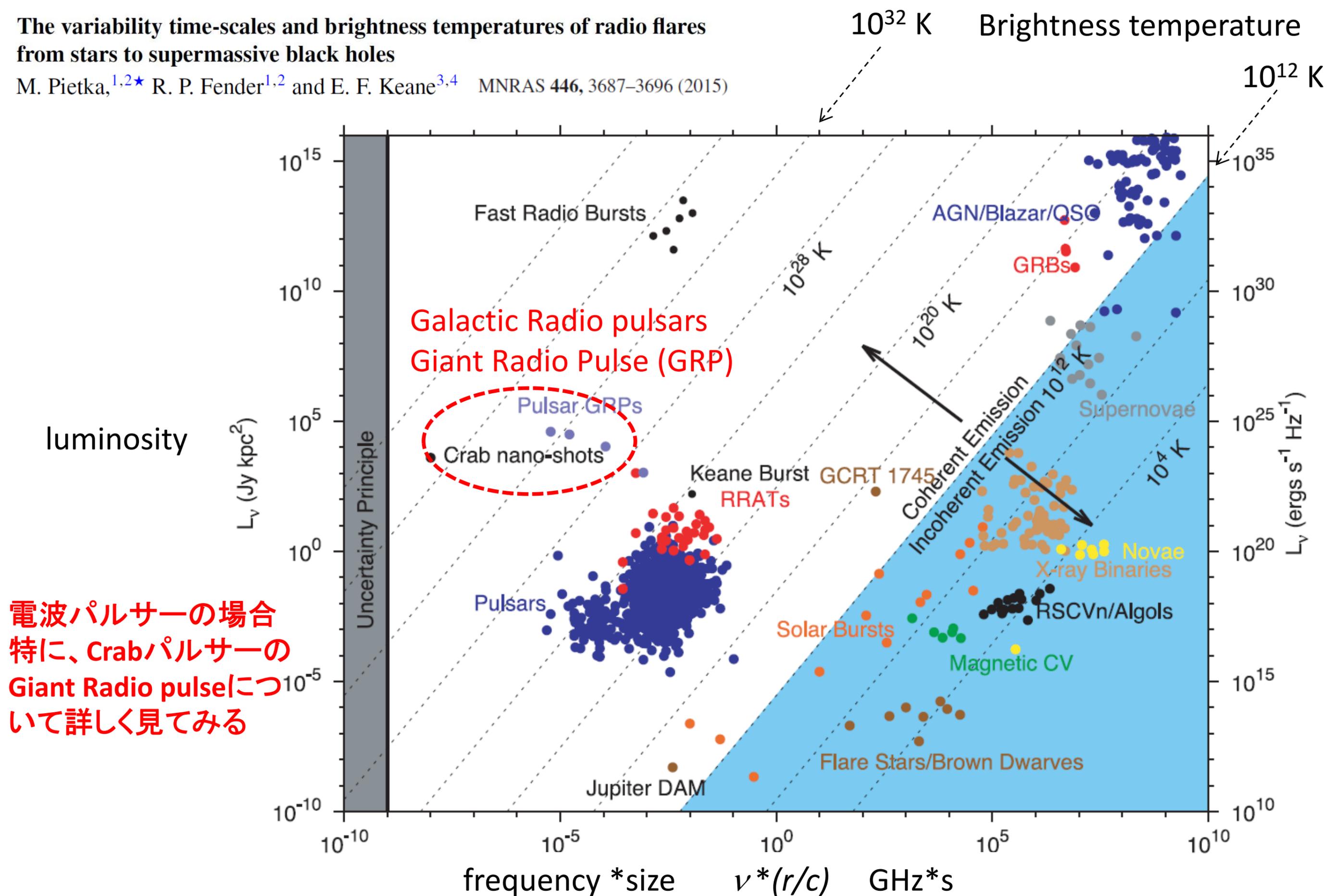


# Contents:

1. Introduction	1
On the Ultra-High Brightness Temperature examples:	
Fast Radio Bursts (FRBs)	
Pulsars' Giant Radio Pulses (GRPs)	
2. Incoherent vs. Coherent emissions	2
3. Heliospheric examples	
3.1 Type II/III Solar Radio Bursts	
→ Excitation of Langmuir waves by electron beams	3-1
3.2 Planetary Radio Waves	
Jovian Decametric Radiations (DAM)	
Earth's Auroral Kilometric Radiations (AKR)	
→ Cyclotron Maser Emission	3-2
4. More about Crab Pulsar's GRPs	4-1
4.1 Frequency spectra of GRPs	
4.2 Proposed models:	
Strong plasma turbulence (SPT)	
Free-electron-maser emission (FEM)	
Cyclotron instability emission (CIE)	
4.3 Puzzling feature of High Frequency Interpulse Spectra	4-3

The variability time-scales and brightness temperatures of radio flares from stars to supermassive black holes

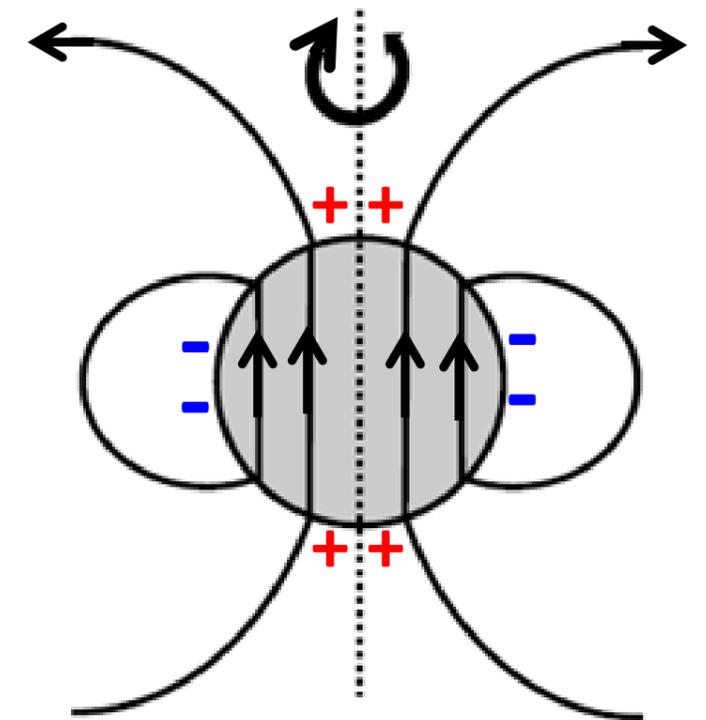
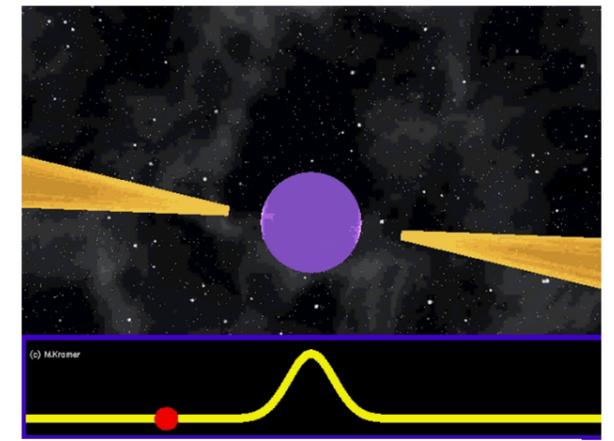
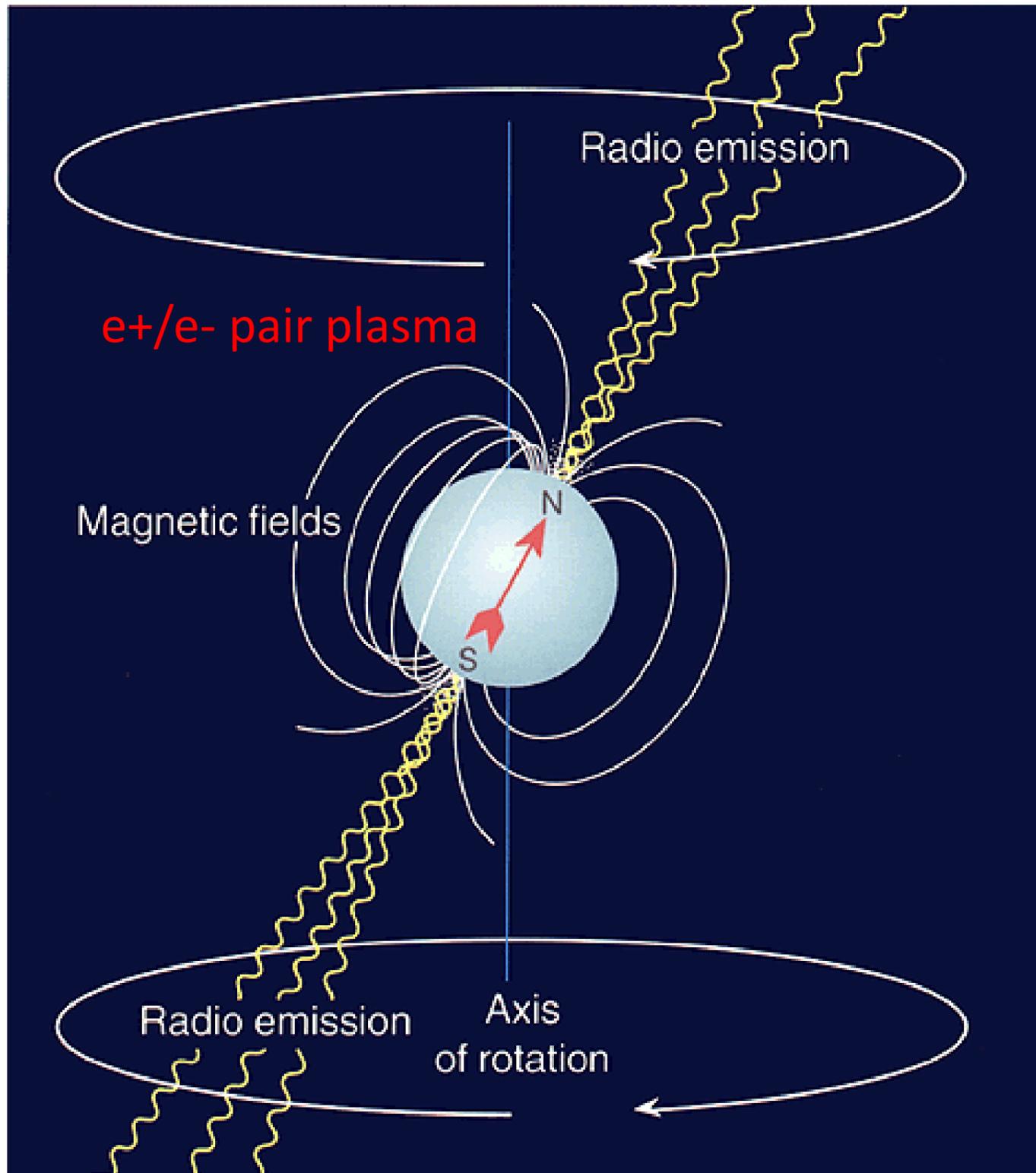
M. Pietka,<sup>1,2\*</sup> R. P. Fender<sup>1,2</sup> and E. F. Keane<sup>3,4</sup> MNRAS 446, 3687–3696 (2015)



電波パルサーの場合  
特に、Crabパルサーの  
Giant Radio pulseにつ  
いて詳しく見てみる

**Figure 5.** Plotted is a variation of the Fig. 2, with  $L_\nu$  plotted against  $\nu W$  over an even wider range of parameter space. This allows us to identify the sources of coherent radio emission (pulsars, fast radio bursts, certain emission from Jupiter and the Sun, etc.) for comparison with the more slowly varying synchrotron transients. As can clearly be seen the correlation (Fig. 3, Table 1, equation 6) applies only to the imaging/synchrotron sources, and cannot be used for classifying beamformed/coherent sources.

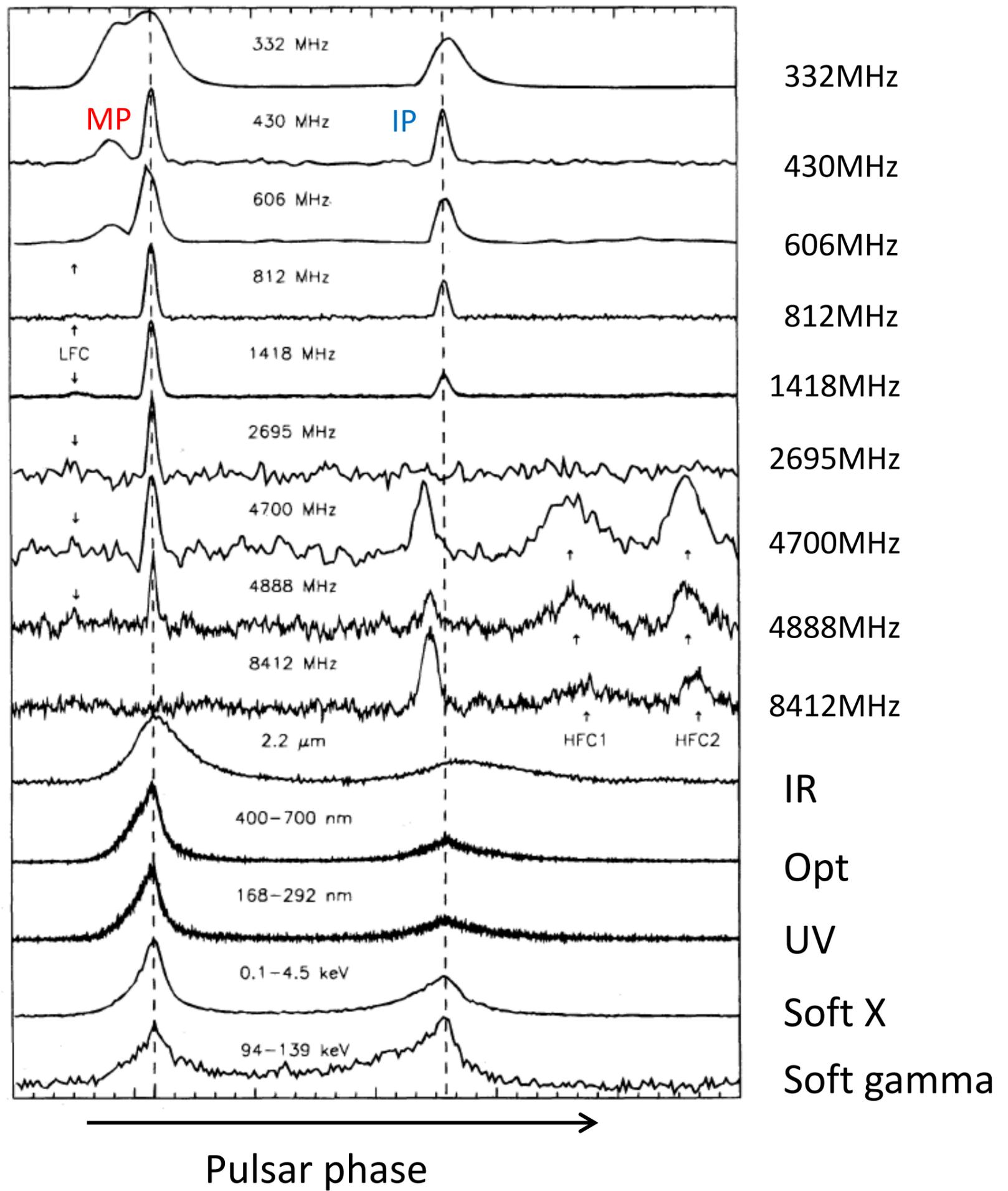
Pulsar = rapidly-rotating highly-magnetized neutron star  
 $B = 10^8 \sim 10^{15}$  G, spin period = ms  $\sim$  several s



rotating magnetic dipole  
 $\downarrow$   
 monopolar induction  
 $\downarrow$   
 electromotive force  $\sim 10^{18}$  V  
 (Crab pulsar's case)  
 $\downarrow$   
 discharge  
 e+/e- pair creation  
 acceleration

Crab pulsar  
Pulse profile

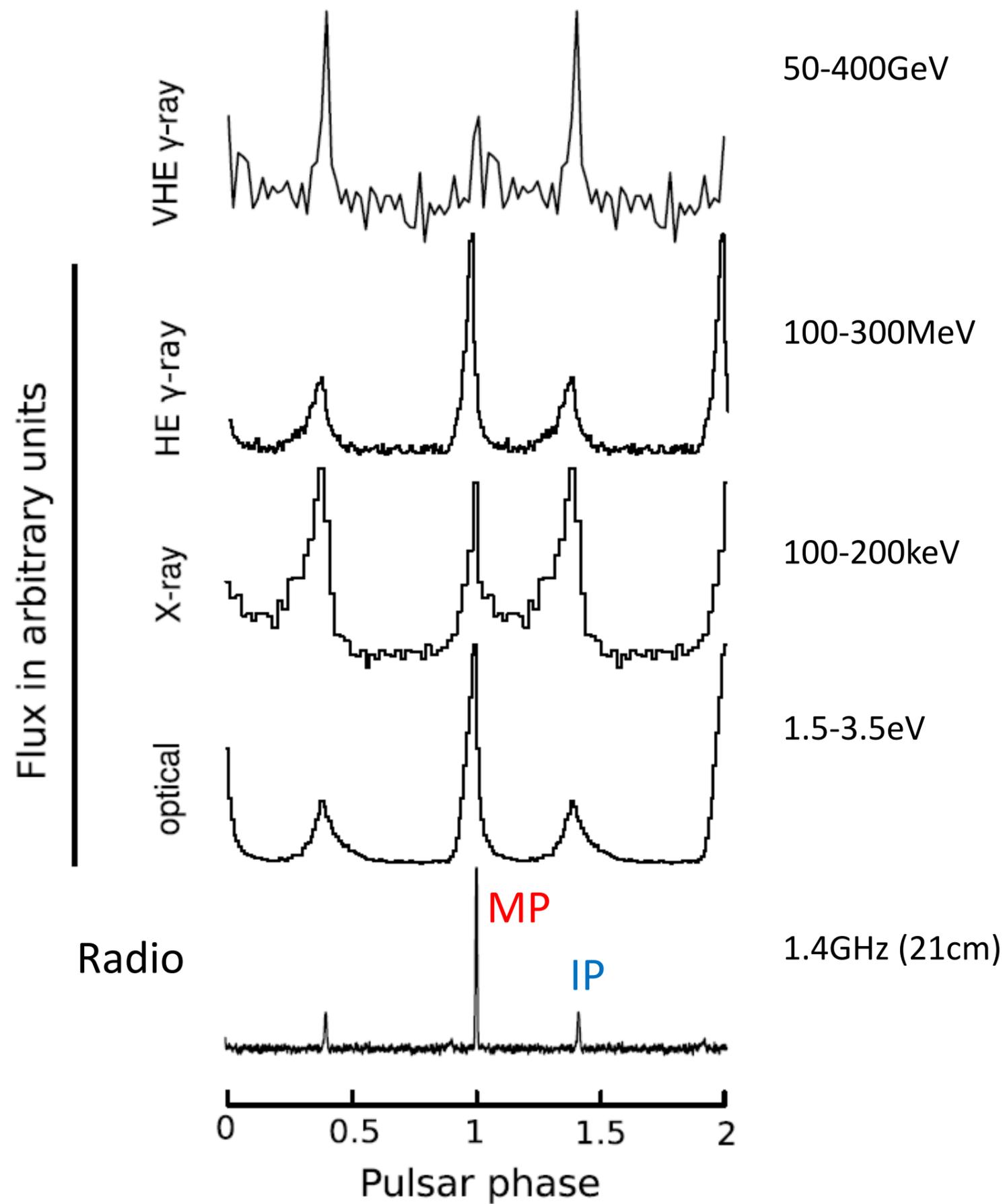
**MP=main pulse**  
**IP = interpulse**



Crab pulsar  
High energy pulse profile

MP=main pulse

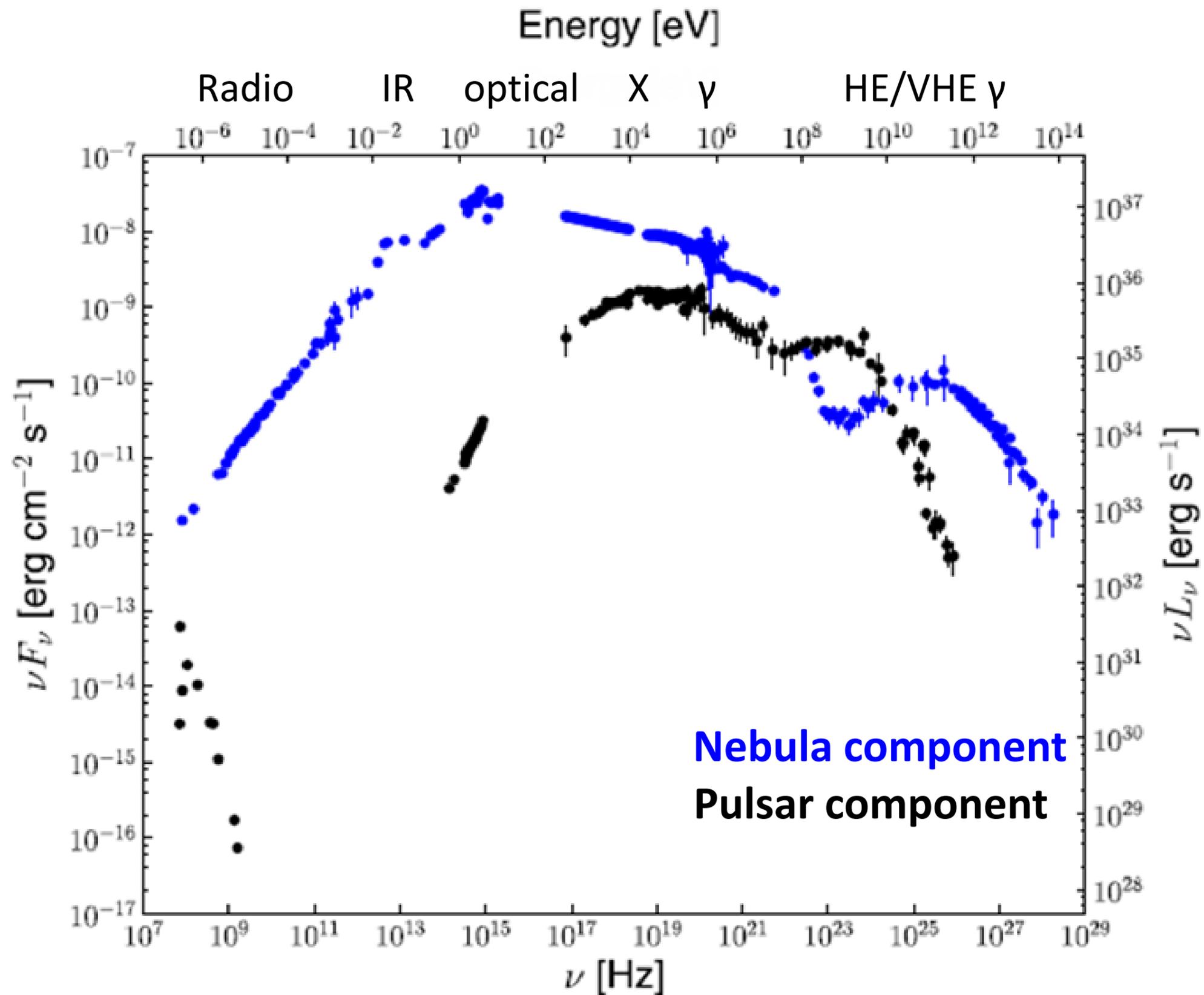
IP = interpulse



**Figure 3.** Flux as a function of phase for radio (1.4 GHz), (1.5–3.5 eV), x-ray (100–200 keV), HE gamma-ray (100–300 MeV) and VHE (50–400 GeV) gamma-ray energies. The data set is reproduced from Du *et al* (2012), with the addition of the optical data from Oosterbroek *et al* (2008) and VHE gamma-ray data from Aleksic *et al* (2012).

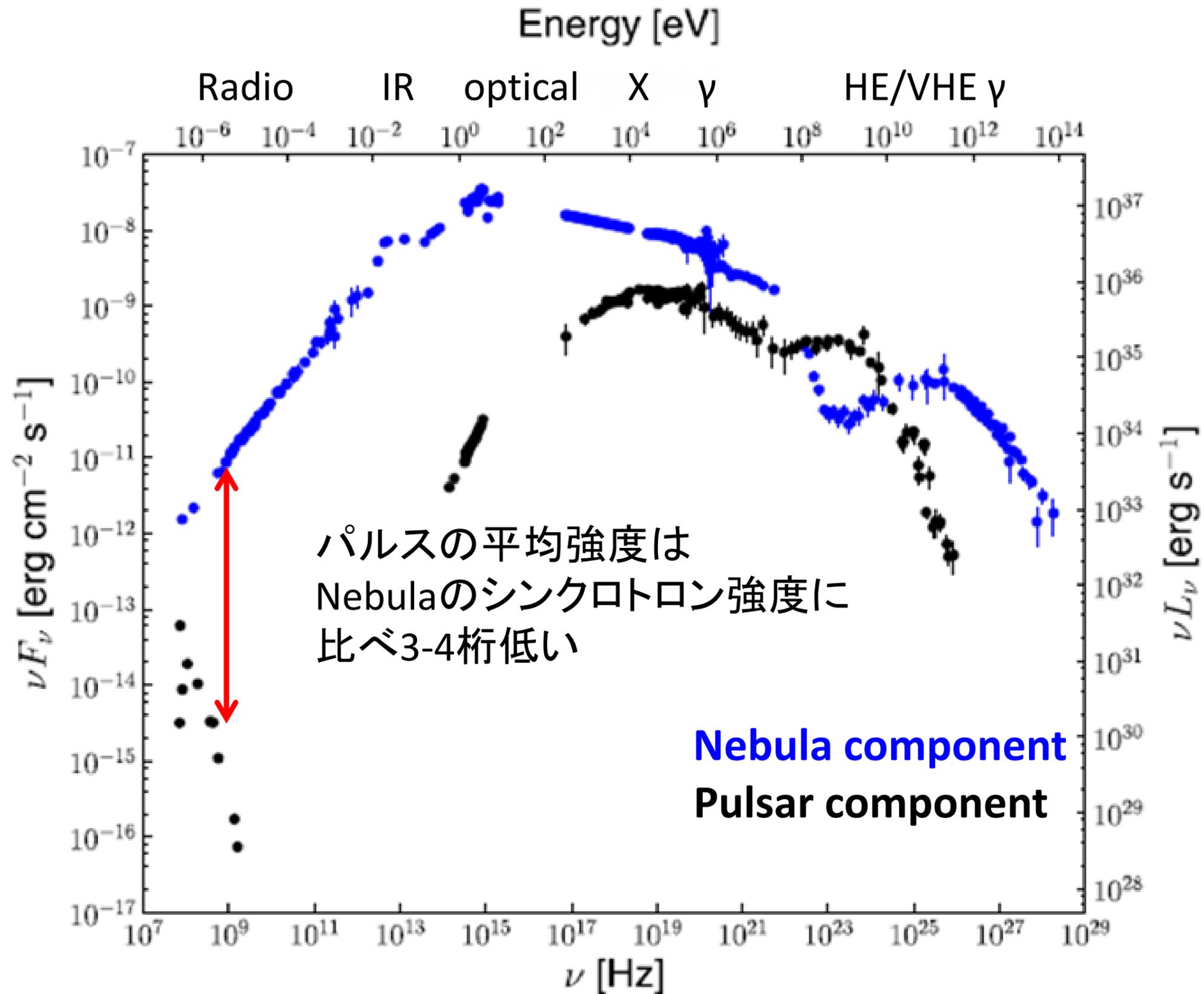
# Radiation from shock-accelerated relativistic electrons in the Crab nebula

Radiation from e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup> accelerated within the **pulsar's** magnetosphere



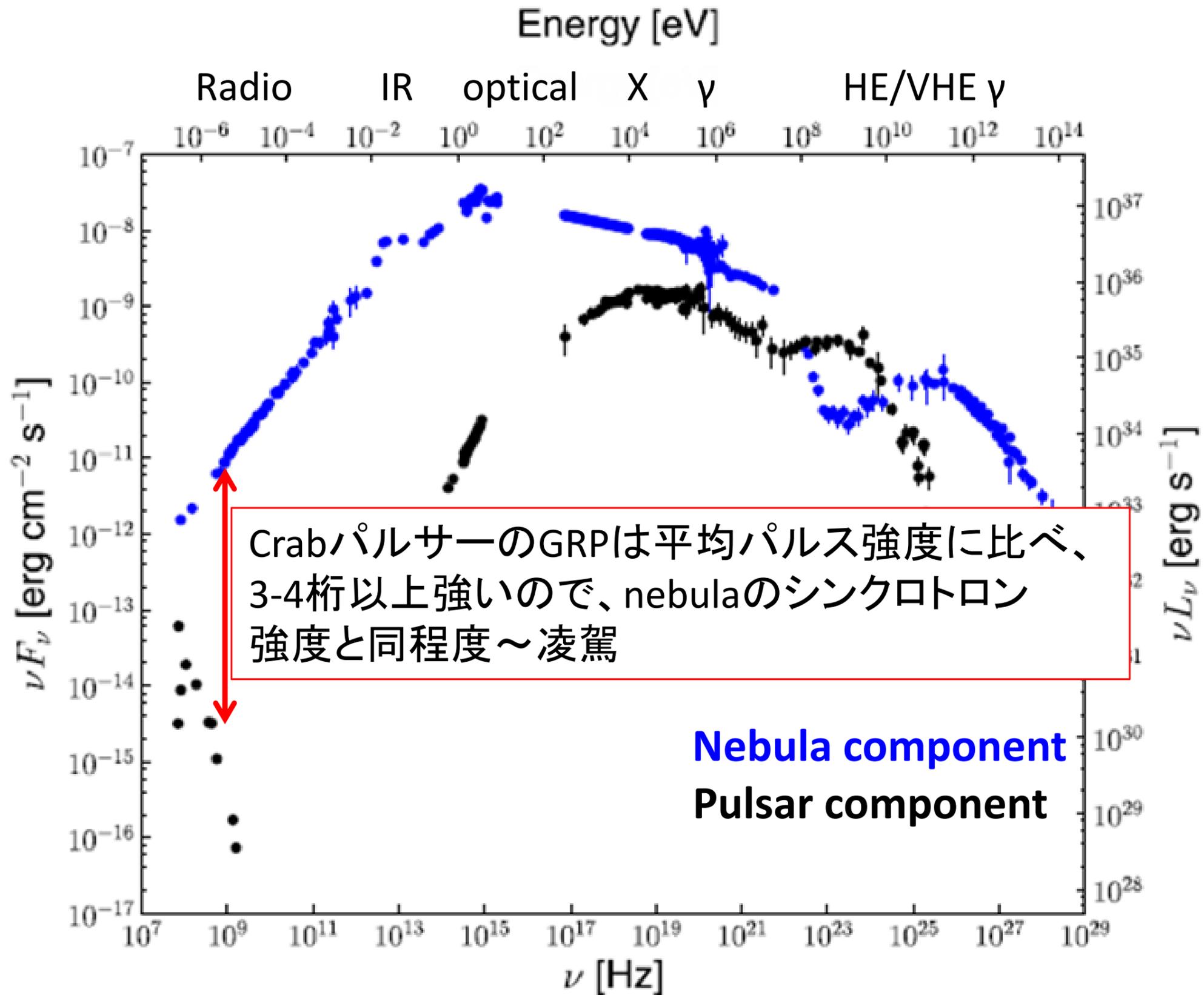
# Radiation from shock-accelerated relativistic electrons in the Crab nebula

Radiation from e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup> accelerated within the **pulsar's** magnetosphere



# Radiation from shock-accelerated relativistic electrons in the Crab nebula

Radiation from e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup> accelerated within the **pulsar's** magnetosphere

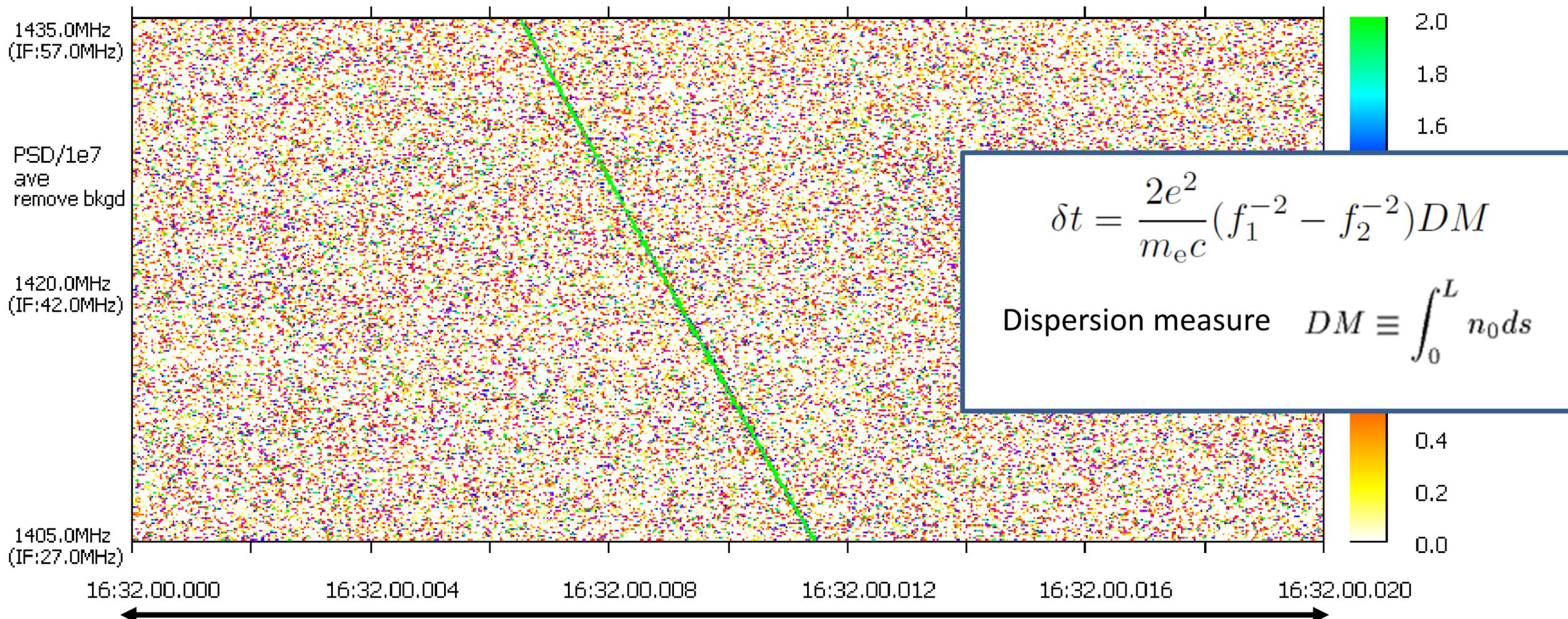
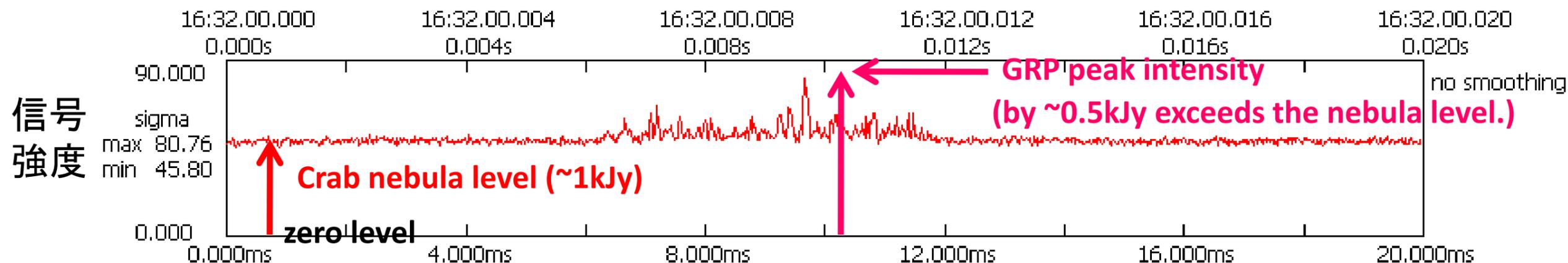


# 鹿島1.4GHz観測での最強GRPの1つ (Main pulse phase)



2010/12/05 Kashima 1405-1435MHz Crab GRP raw data

Crab.128Msps.8bit\_2010339163200#2GRP.raw CRAB.128MSPS.8BIT 2010 339 save=0.020 msec/FreqUnit=50000.000 Hz/d



20msのデータ

MP phase

$$1\text{Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2 \text{ Hz} = 10^{-4} \text{ SFU}$$

# 鹿島1.4GHz観測での最強GRPの1つ (Main pulse phase)



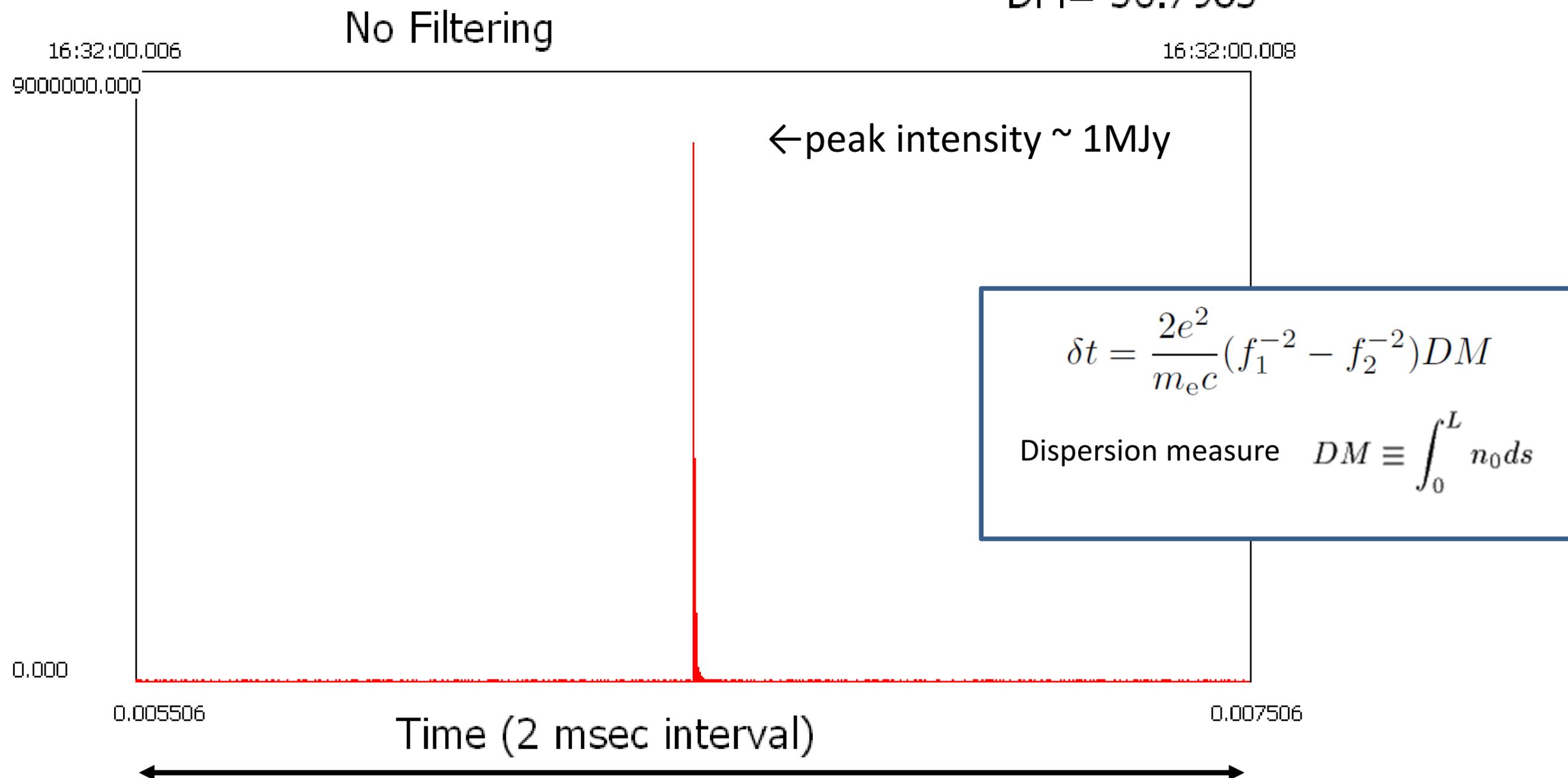
2010/12/05 Kashima 1405-1435MHz Crab GRP

**群遅延を補正した結果**

Crab.128Msps.8bit\_2010339163200#2GRP.raw // 2009-2010 mode  
start=0.000000sec duration=20 msec with DM= 56.798500

TimeShift=0.0000000000  
PwrBoost=1.000

No smoothing  
DM= 56.7985



2msのデータ  
**MP phase**

$1\text{Jy} = 10^{-26} \text{ W/m}^2 \text{ Hz} = 10^{-4} \text{ SFU}$

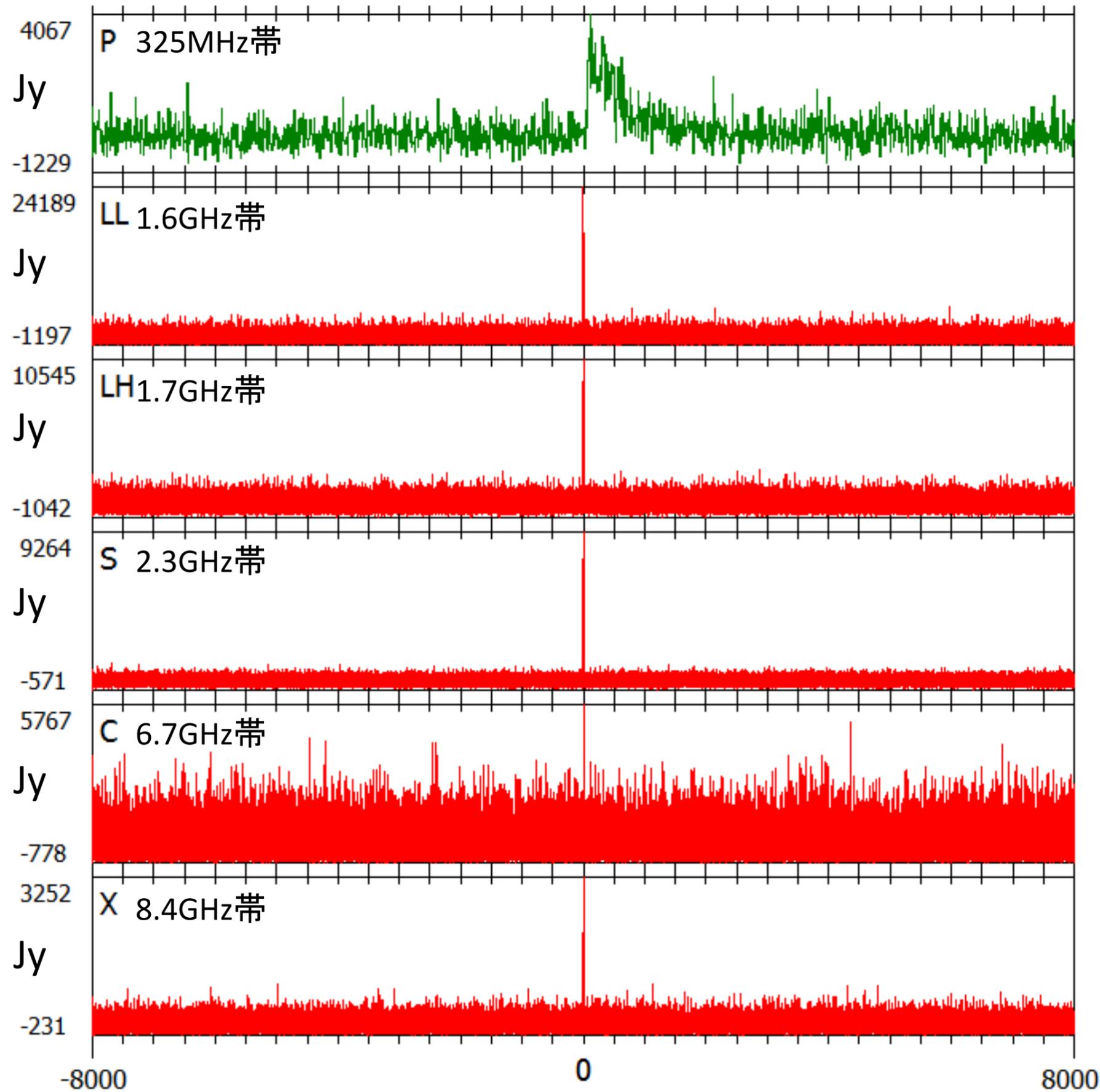
A GRP observed in all frequency bands between 325MHz and 8.4GHz

GRP #2677

t=0 at 01:32:29.295078900 TDB on September 7, 2014

— 10micro sec ave — 500micro sec ave — 125nano sec ave

これまでに報告された  
最も広帯域のMP GRPの例  
(Mikami+2016)



16ms

Mikami+2016

A GRP observed in all frequency bands between 325MHz and 8.4GHz

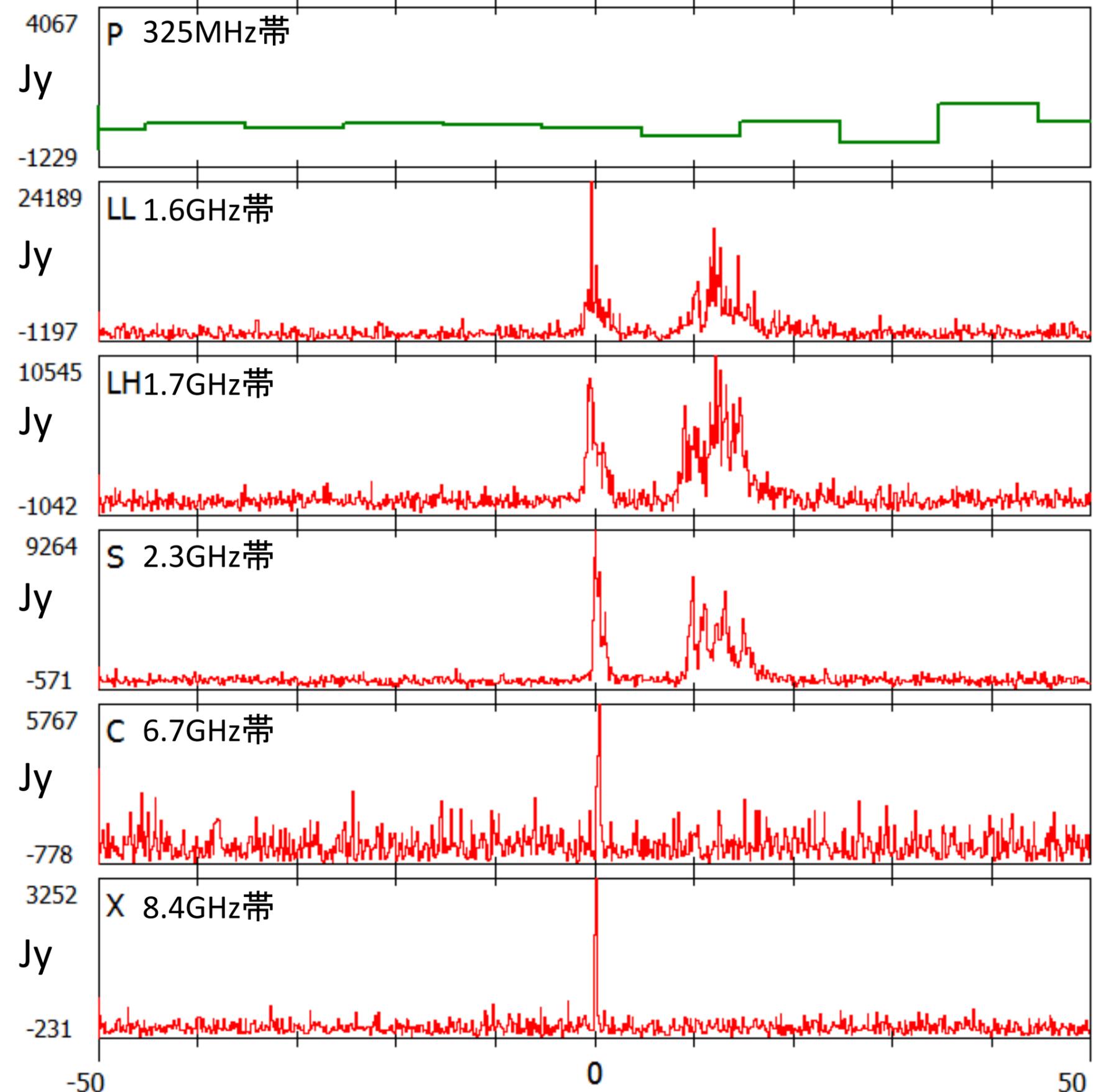
GRP #2677

t=0 at 01:32:29.295078900 TDB on September 7, 2014

— 10micro sec ave — 125nano sec ave — 1micro sec ave

これまでに報告された  
最も広帯域のMP GRPの例  
(Mikami+2016)

時間構造を詳しくみると:



100μs

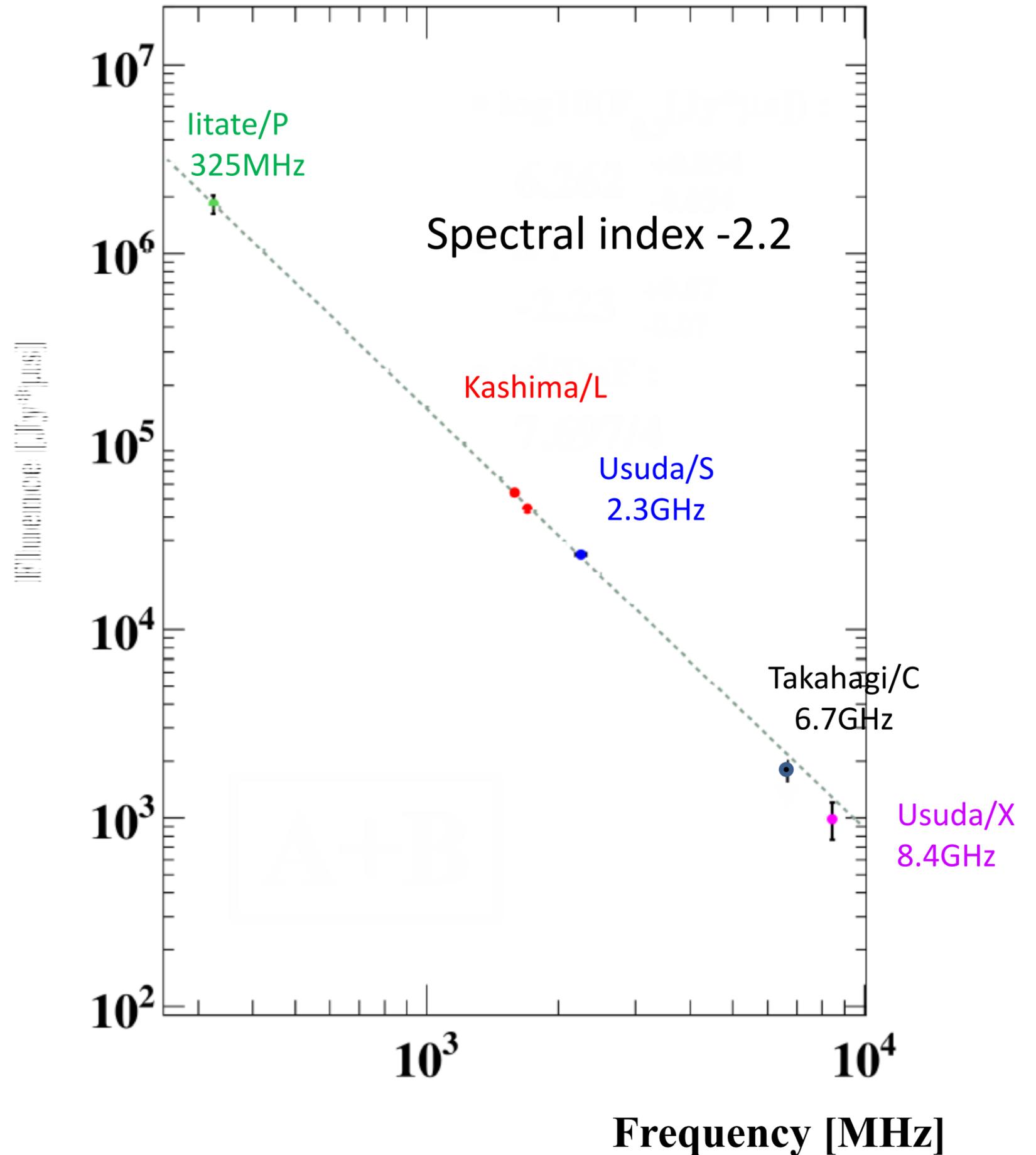
Mikami+2016

A GRP observed in all frequency bands between 325MHz and 8.4GHz

GRP #2677

これまでに報告された  
最も広帯域のMP GRPの例  
(Mikami+2016)

周波数スペクトルは  
ほぼべき型である

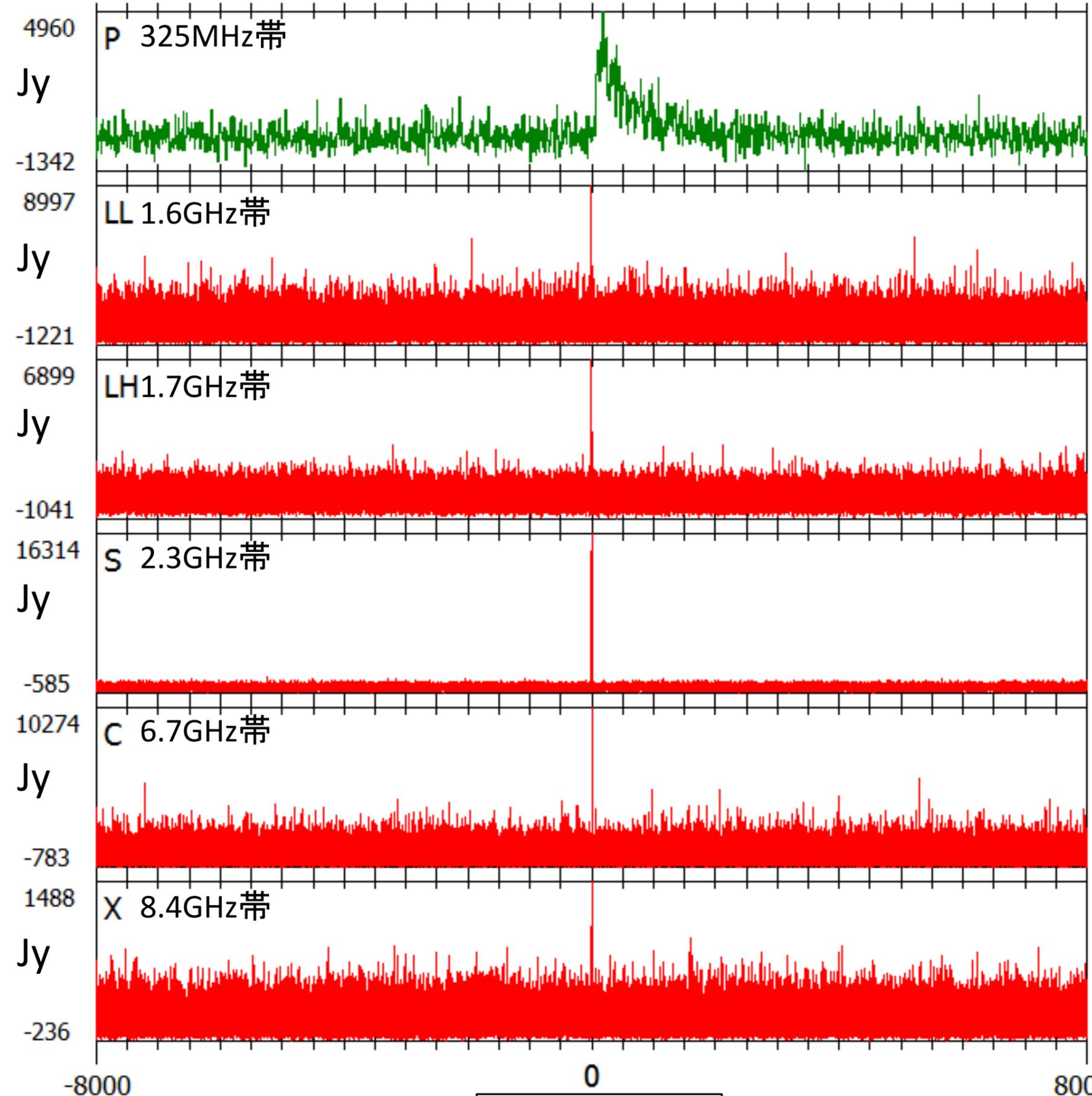


Mikami+2016

Another GRP observed in all frequency bands between 325MHz and 8.4GHz

t=0 at 01:22:41.702820810 TDB on September 7, 2014

— 10micro sec ave — 500micro sec ave — 125nano sec ave



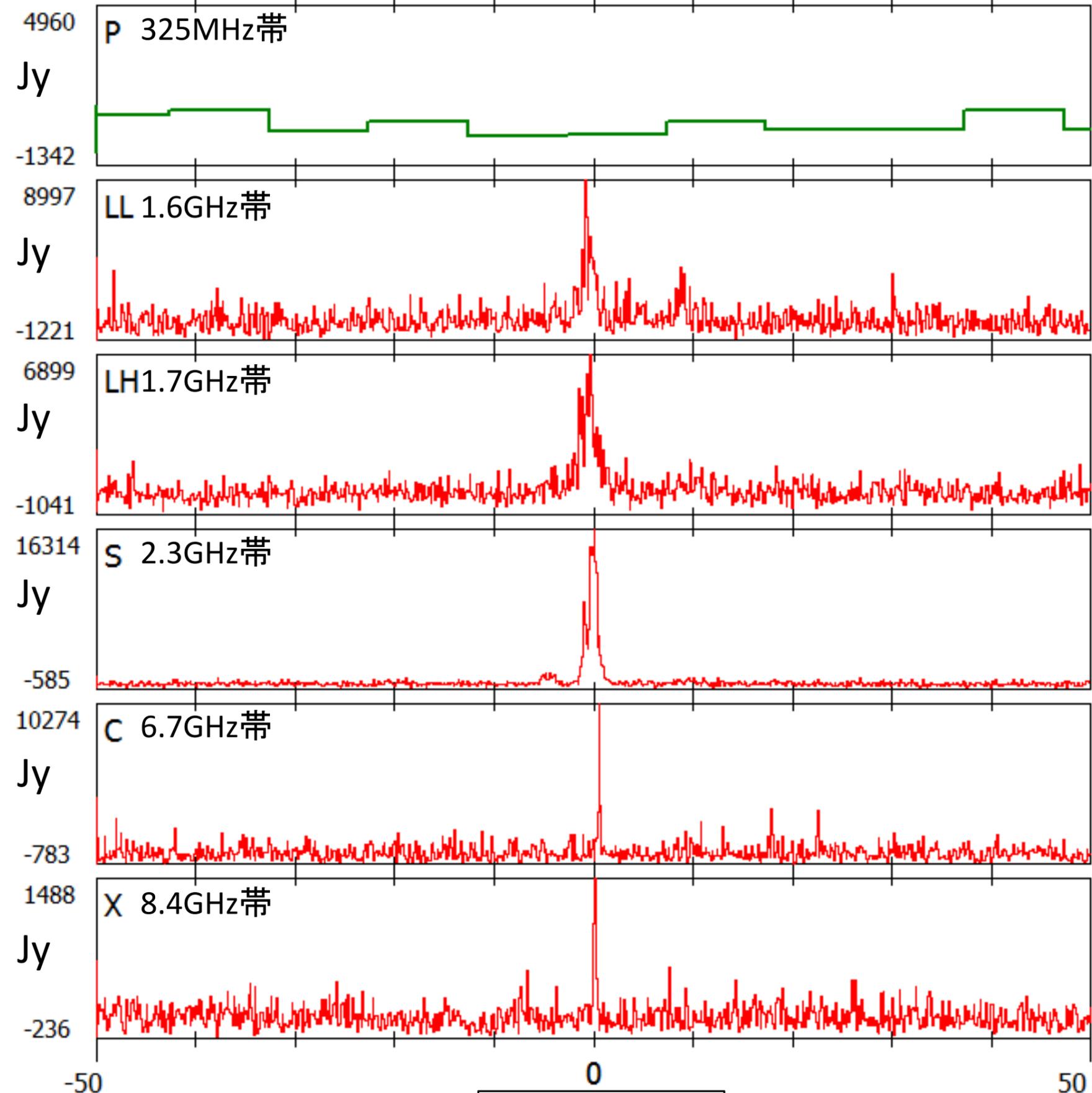
これまでに報告された最も広帯域のMP GRPの別の例 (Mikami+2016)

16ms

Another GRP observed in all frequency bands between 325MHz and 8.4GHz

t=0 at 01:22:41.702820810 TDB on September 7, 2014

— 10micro sec ave — 125nano sec ave — 1micro sec ave



これまでに報告された最も広帯域のMP GRPの別の例 (Mikami+2016)

時間構造を詳しくみると:

100 $\mu$ s

Mikami+2016

Another GRP observed in all frequency bands between 325MHz and 8.4GHz

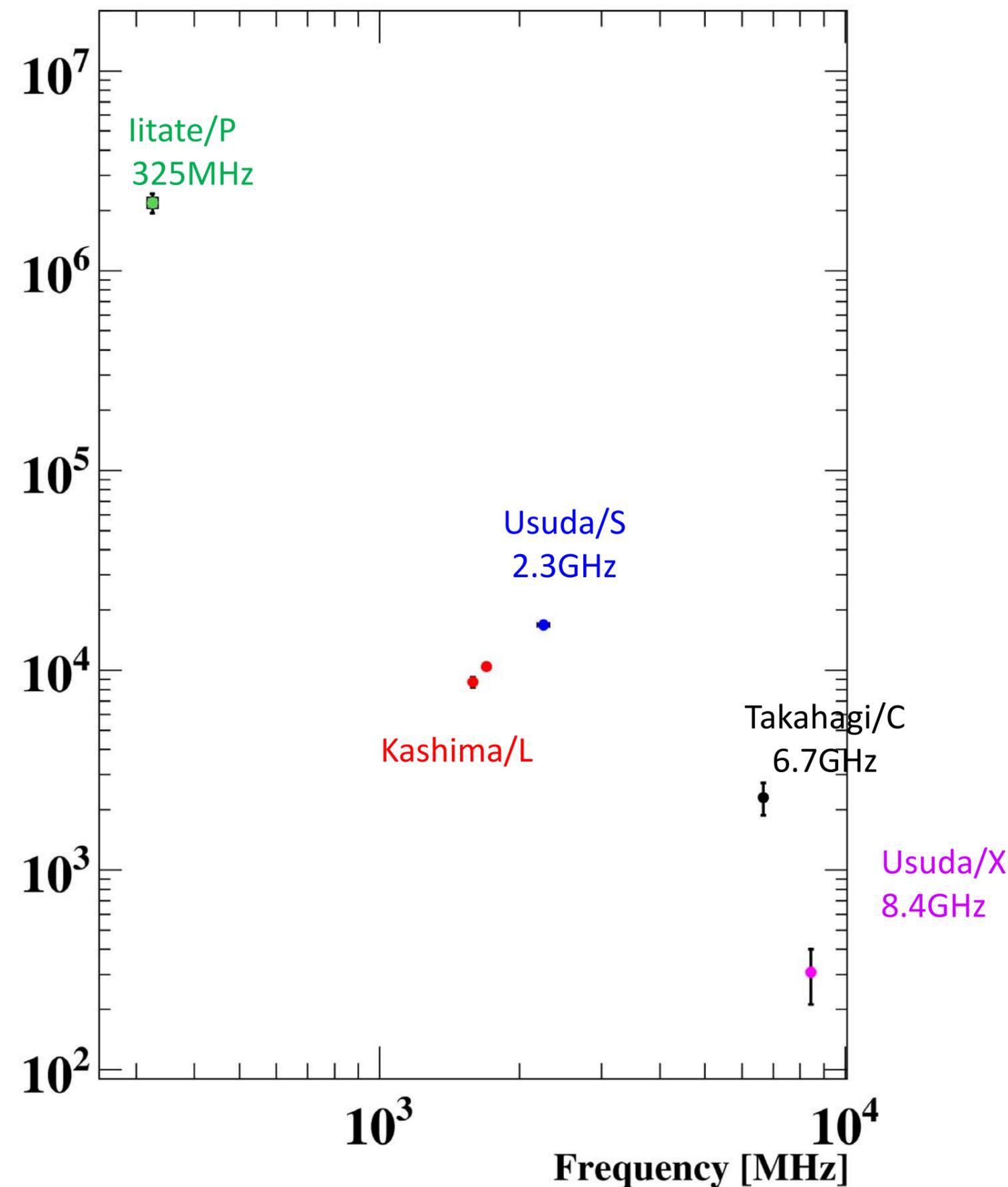
これまでに報告された最も広帯域のMP GRPの別の例  
(Mikami+2016)

周波数スペクトルはべき型ではない!

→べき型、非べき型 どちらのスペクトルも説明できるモデルが必要

GRP #2520

Fluence [Jy\* $\mu$ s]



Close

Mikami+2016

# Contents:

1. Introduction	1
On the Ultra-High Brightness Temperature examples:	
Fast Radio Bursts (FRBs)	
Pulsars' Giant Radio Pulses (GRPs)	2
2. Incoherent vs. Coherent emissions	
3. Heliospheric examples	
3.1 Type II/III Solar Radio Bursts	
→ Excitation of Langmuir waves by electron beams	3-1
3.2 Planetary Radio Waves	
Jovian Decametric Radiations (DAM)	
Earth's Auroral Kilometric Radiations (AKR)	3-2
→ Cyclotron Maser Emission	
4. More about Crab Pulsar's GRPs	4-1
4.1 Frequency spectra of GRPs	
4.2 Proposed models:	4-2
Strong plasma turbulence (SPT)	
Free-electron-maser emission (FEM)	
Cyclotron instability emission (CIE)	
4.3 Puzzling feature of High Frequency Interpulse Spectra	4-3

Crabパルサー電波の輻射プロセスにも諸説あり (Eilek&Hankins, 2016 JPP)

出発点として、パルサー磁気圏プラズマ内に電子ビームが放出されたとするのは多くのモデルの共通の前提。その後、

Strong plasma turbulence (SPT)

.... Solar II,III電波バースト類似？

Free-electron-maser emission (FEM)

Cyclotron instability emission (CIE)

.... 惑星電波類似？

## SPT

Solar II,III電波バーストの場合、電子ビームにより励起されたLangmuir波がもとであり、プラズマ振動数が基本となっている

→パルサーの場合の電子ビームによる不安定性の考察例 (Gedalin +, 2002)

ビーム不安定の舞台:

まず NonRelativistic pair plasma  
の分散関係をみておく

$$\Omega_e/2\pi = 2.76 \times 10^{19} B_{12} \text{ Hz}$$

$$\Omega_e$$

$$\omega/\omega_p$$

Langmuir

$$\omega_{pe} = 1$$

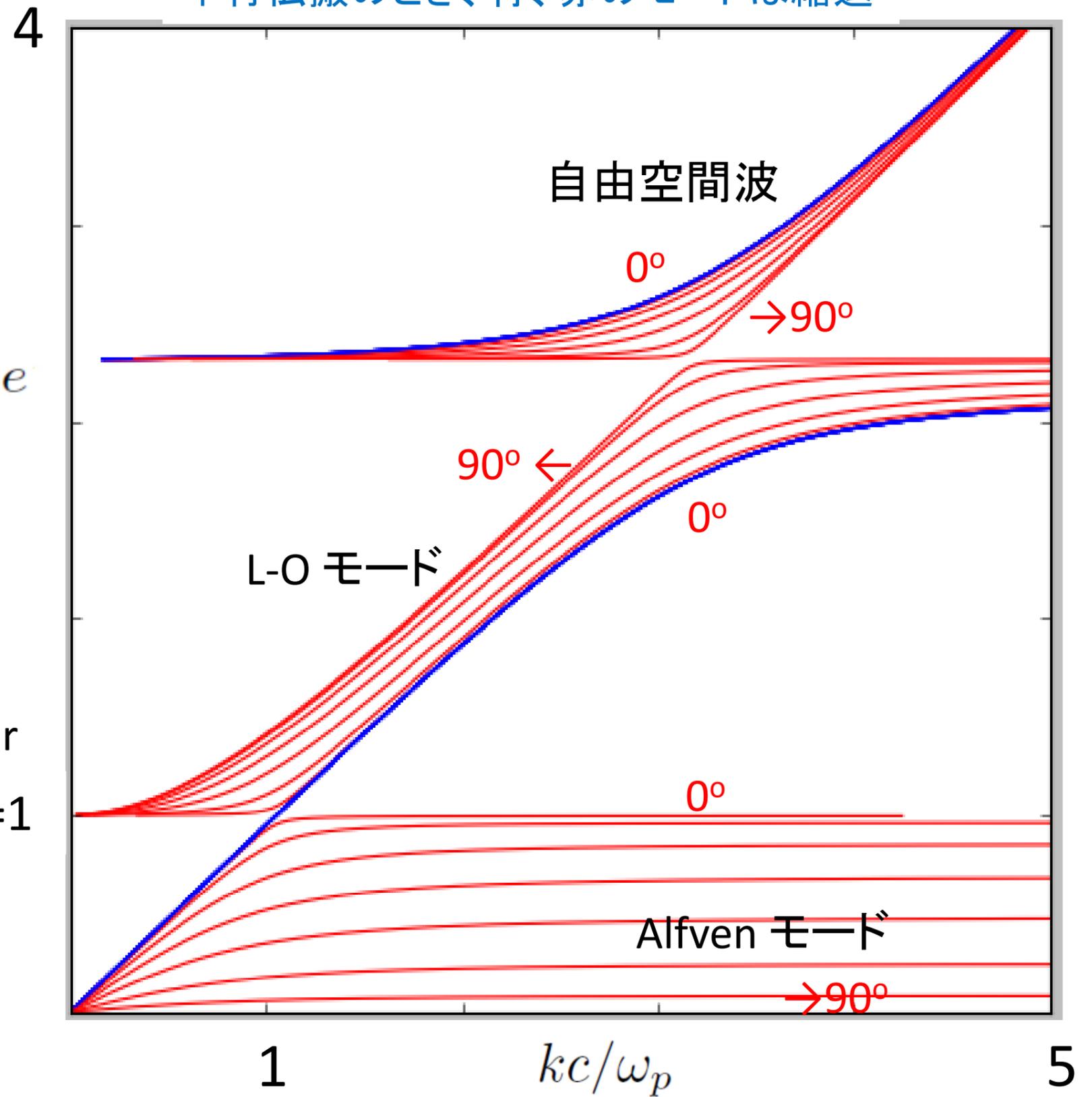
$$n_{GJ} = 6.94 \times 10^{10} B_{12}/P_{\text{sec}} \text{ cm}^{-3}$$

これにより、multiplicityをMとして、

$$\omega_{pe}/2\pi = 2.36 \times 10^{12} (MB_{12}/P_{\text{sec}})^{1/2} \text{ Hz}$$

ここで、 $M = 10^{2-6}$  (Manchester & Taylor, 1977)

青のモード(X)は角度によらない。  
平行伝搬のとき、青、赤のモードは縮退



# パルサー磁気圏のpair plasma中でのビーム不安定モデルの例

Gedalin, Gruman, Melrose (2002) PRL 88, 121101; MNRAS 337, 422-

$z \equiv \frac{\omega}{k_z c}$ 、伝搬角を $\theta$ とすると、分散関係は強磁場の極限で、

$$\frac{\omega^2}{\omega_p^2} = z^2 W(z) \frac{z^2 - 1}{z^2 - 1 - \tan^2 \theta}$$

により与えられる。ここで、

$$W(z) \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\beta - z} \frac{df_s}{du_z} du_z \quad (\text{ただし } \beta = u_z / \gamma)$$

と定義する( $f_s$ は分布関数)。

分布関数は $e^+, e^-$ の両方ともバックグラウンド成分(密度 $n_p$ 、速度 $v_p$ )とビーム成分(密度 $n_b$ 、速度 $v_b$ )で書けるとする。密度を $n_p$ で規格化し、 $\alpha = n_b / n_p$ として、

$$f_s = \delta(v - v_p) + \alpha \delta(v - v_b)$$

これに対し、

$$W(z) = \frac{1}{\gamma_p^3 (z - v_p)^2} + \frac{\alpha}{\gamma_b^3 (z - v_b)^2}$$

となる。 $z = v_b + \eta$  ( $|\eta| \ll v_b$ ) と置いて、

$$W(z) = 4\gamma_p + \frac{\alpha}{\gamma_b^3 \eta^2}$$

Substituting  $z = v_b + \eta$  and expanding in small quantities, including  $\theta \ll 1$ , one finds

$$\left(\frac{k_{\parallel}^2}{\omega_r^2}\right) \left[1 - \frac{\theta^2 \gamma_b^2}{2\gamma_b^2 \eta - 1}\right] = 1 + \frac{\alpha}{4\gamma_p \gamma_b^3 \eta^2}, \quad \text{\color{red}\etaについての3次式} \quad (6)$$

where, in the absence of the beam, the frequency  $\omega_r = 2\omega_p \gamma_p^{1/2}$  separates the region  $\omega \ll \omega_r$  where the L-O mode is highly superluminal and nearly longitudinal from the region  $\omega \gg \omega_r$  where it is nearly transverse with vacuum-like dispersion. For small propagation angles,  $\theta \gamma_b \ll 1$ , the dependence on the angle is negligible for  $|2\gamma_b^2 \eta - 1| \gg 1$ .

$$\kappa \equiv \frac{k_{\parallel}}{\omega_r} = \frac{k_{\parallel}}{2\omega_p \gamma_p^{1/2}}, \quad y \equiv 2\gamma_b^2 \eta, \quad \theta^2 \gamma_b^2 \equiv \delta, \quad a \equiv \frac{\alpha \gamma_b}{\gamma_p}$$

とおくと、(6) は

$$\kappa^2 \left(1 - \frac{\delta}{y - 1}\right) = 1 + \frac{a}{y^2}$$

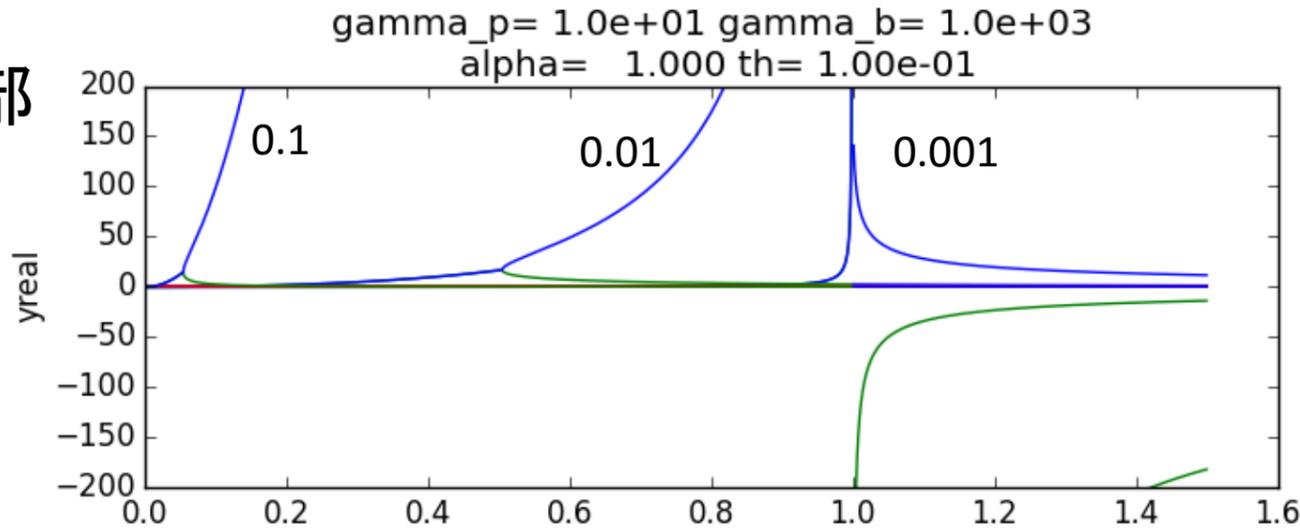
すなわち、

$$(\kappa^2 - 1)y^2(y - 1) - \kappa^2 \delta y^2 = a(y - 1)$$

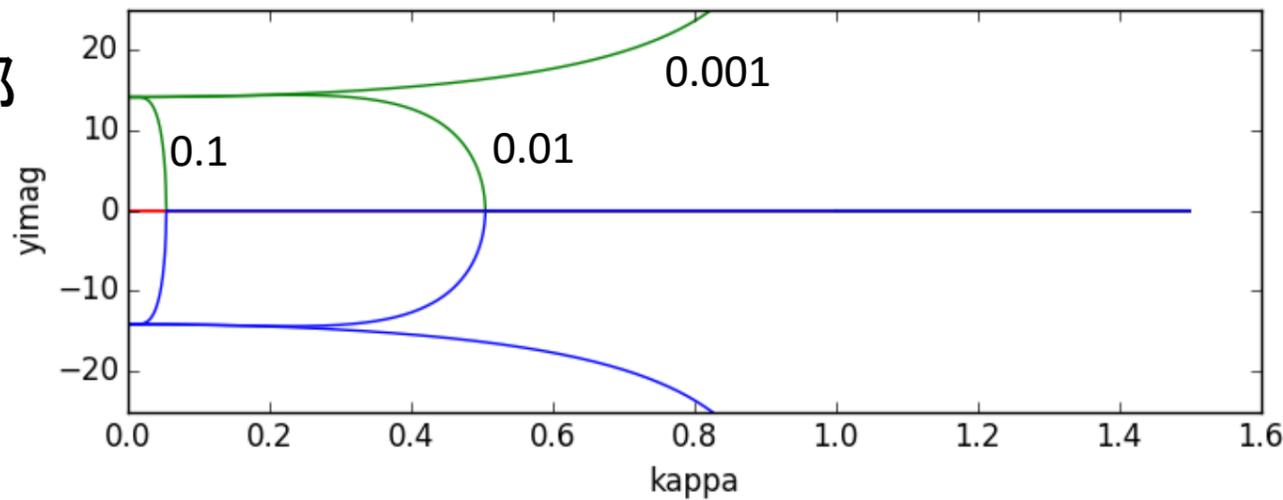
整理して、

$$y^3 - \frac{\kappa^2 + \kappa^2 \delta - 1}{\kappa^2 - 1} y^2 - \frac{a}{\kappa^2 - 1} y + \frac{a}{\kappa^2 - 1} = 0$$

y実部



y虚部



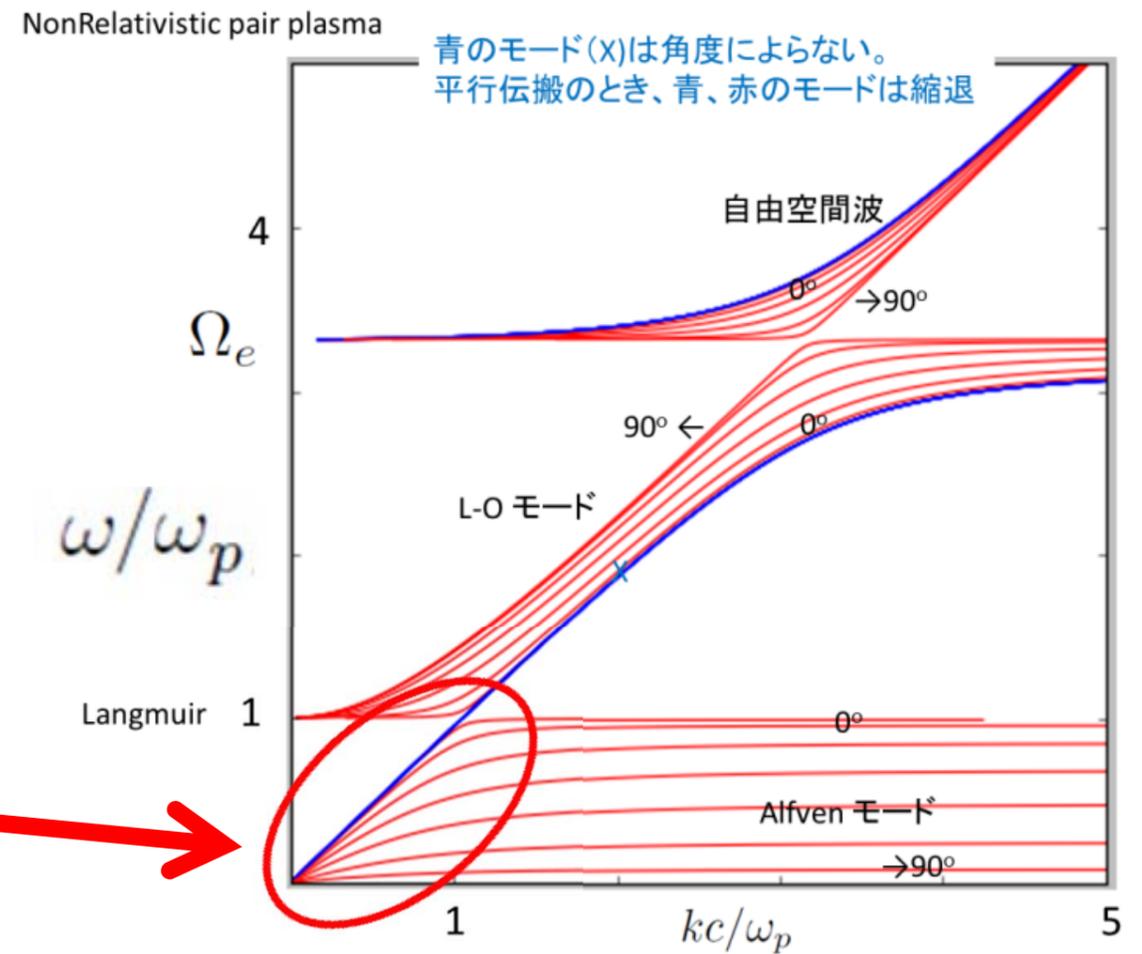
$$\gamma_p=10、\gamma_b=10^3、\alpha=1$$

励起された波動が自由空間波となるには、モード変換が必要。

不安定性で励起されるのはこの部分

←伝搬角  $\theta=0.1, 0.01, 0.001$  に対する分散関係

NRとの対応



## Crabパルサー電波の輻射プロセスにも諸説あり (Eilek&Hankins, 2016 JPP)

出発点として、パルサー磁気圏プラズマ内に電子ビームが放出されたとするのは多くのモデルの共通の前提。その後、

Strong plasma turbulence (SPT)

.... Solar II,III電波バースト類似？

Free-electron-maser emission (FEM)

Cyclotron instability emission (CIE)

.... 惑星電波類似？

### SPT

Solar II,III電波バーストの場合、電子ビームにより励起されたLangmuir波がもとであり、プラズマ振動数が基本となっている

→パルサーの場合の電子ビームによる不安定性の考察例 (Gedalin +, 2002)

→ Langmuir乱流形成 (e.g., ラングミュア乱流入門、安藤他2005、核融合学会誌)

→ 励起されたSPTからの輻射 (Weatherall 1997, 1998など)

## Crabパルサー電波の輻射プロセスにも諸説あり (Eilek&Hankins, 2016 JPP)

出発点として、パルサー磁気圏プラズマ内に電子ビームが放出されたとするのは多くのモデルの共通の前提。その後、

Strong plasma turbulence (SPT)

.... Solar II,III電波バースト類似？

Free-electron-maser emission (FEM)

Cyclotron instability emission (CIE)

.... 惑星電波類似？

### FEM

電子ビームありき、で始まるのはSPTと同じ。

励起したturbulenceとビームの相互作用により、ビームがcoherent bunchingして輻射をもたらす、と考える。

例 : Schopper, Ruhl, Kunzl, and Lesch (2003)

# Crabパルサー電波の輻射プロセスにも諸説あり (Eilek&Hankins, 2016 JPP)

出発点として、パルサー磁気圏プラズマ内に電子ビームが放出されたとするのは多くのモデルの共通の前提。その後、

Strong plasma turbulence (SPT)

.... Solar II,III電波バースト類似？

Free-electron-maser emission (FEM)

Cyclotron instability emission (CIE)

.... 惑星電波類似？

## CIE

電子ビームありき、で始まるのはSPT、FEMと同じ。

サイクロトロン共鳴を通して、横波が励起されると考える

例: Kazbegi, Machabeli, and Melikidze (1991),

Ljutikov, Machabeli, and Blandford (1999)

→必要な背景磁場、プラズマ密度に困難あり (Eilek & Hankins, 2016)

遅いplasma ( $\gamma_s$ )を早いビーム ( $\gamma_{res}$ )が追い抜くモデルを考えて

$$\nu_{obs}^{CIE} = \nu_B \frac{4\nu_B^2}{\nu_p^2} \frac{\gamma_s^3}{\gamma_{res}} \sim \text{GHz より}$$

$$B \sim 10^6 \text{G}, \gamma_{res} \sim 10^6 \text{ and } \gamma_s \text{ of order unity} \rightarrow n \sim 10^{16} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

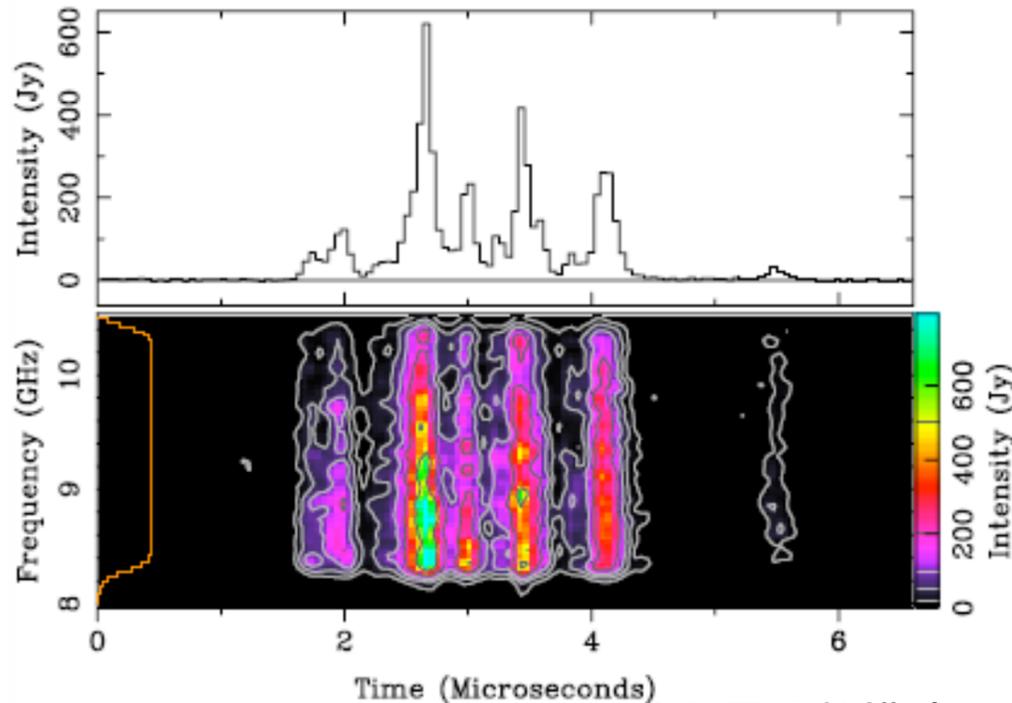
too dense!

# Contents:

1. Introduction	1
On the Ultra-High Brightness Temperature examples:	
Fast Radio Bursts (FRBs)	
Pulsars' Giant Radio Pulses (GRPs)	2
2. Incoherent vs. Coherent emissions	
3. Heliospheric examples	
3.1 Type II/III Solar Radio Bursts	
→ Excitation of Langmuir waves by electron beams	3-1
3.2 Planetary Radio Waves	
Jovian Decametric Radiations (DAM)	
Earth's Auroral Kilometric Radiations (AKR)	3-2
→ Cyclotron Maser Emission	
4. More about Crab Pulsar's GRPs	4-1
4.1 Frequency spectra of GRPs	
4.2 Proposed models:	
Strong plasma turbulence (SPT)	
Free-electron-maser emission (FEM)	4-2
Cyclotron instability emission (CIE)	
4.3 Puzzling feature of High Frequency Interpulse Spectra	4-3

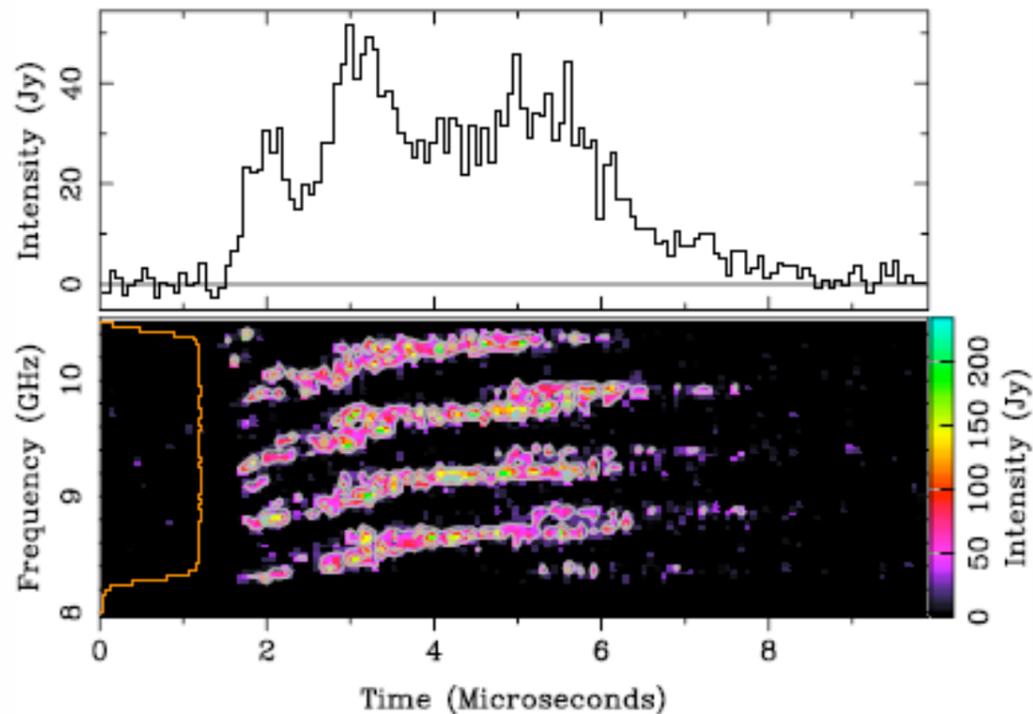
Remark CrabパルサーのGiant Pulseの周波数構造: Main pulseとHigh frequency Interpulseの違い (Hankins+, 2007-)

### Main pulse



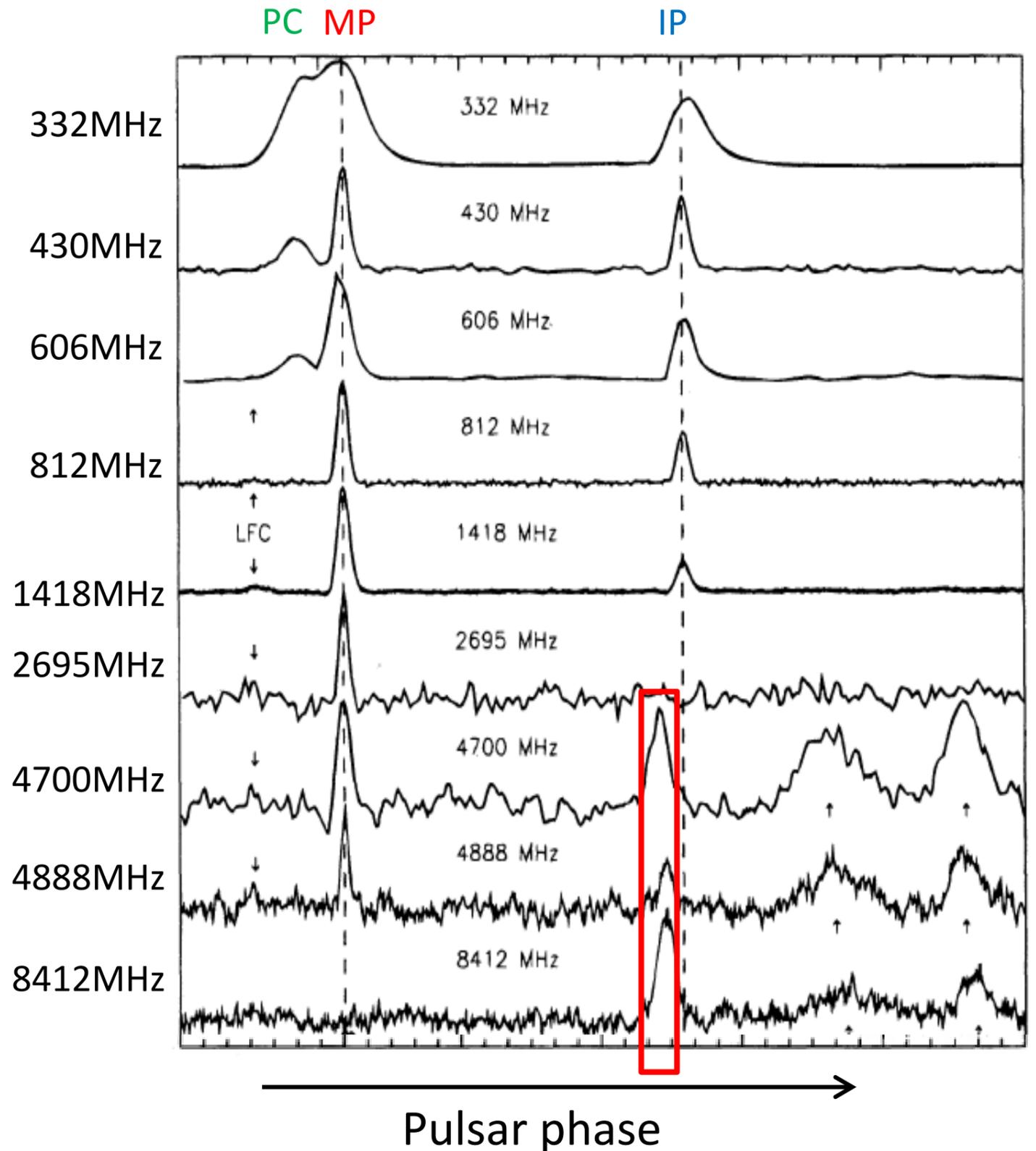
Mikami+ 2016の示したのは、↑のような周波数構造の「縦縞」が $< \sim 1$ GHzまで続いていることであった

### High frequency inter pulse



このような「横縞」が見出されたのは今のところCrab pulsarのみ

Crab pulsar: Lower frequency part (Moffet & Hankins, 1996)



High frequency inter pulse

Remark CrabパルサーのGiant Pulseの周波数構造: Main pulseとHigh frequency Interpulseの違い (Hankins+, 2007-)

輻射機構の説明は一筋縄では行かない!

Crab pulsar: Lower frequency part (Moffet & Hankins, 1996)

太陽電波のなかにも似たような周波数構造をもつバーストがあり、Zebraパターンと呼ばれている。

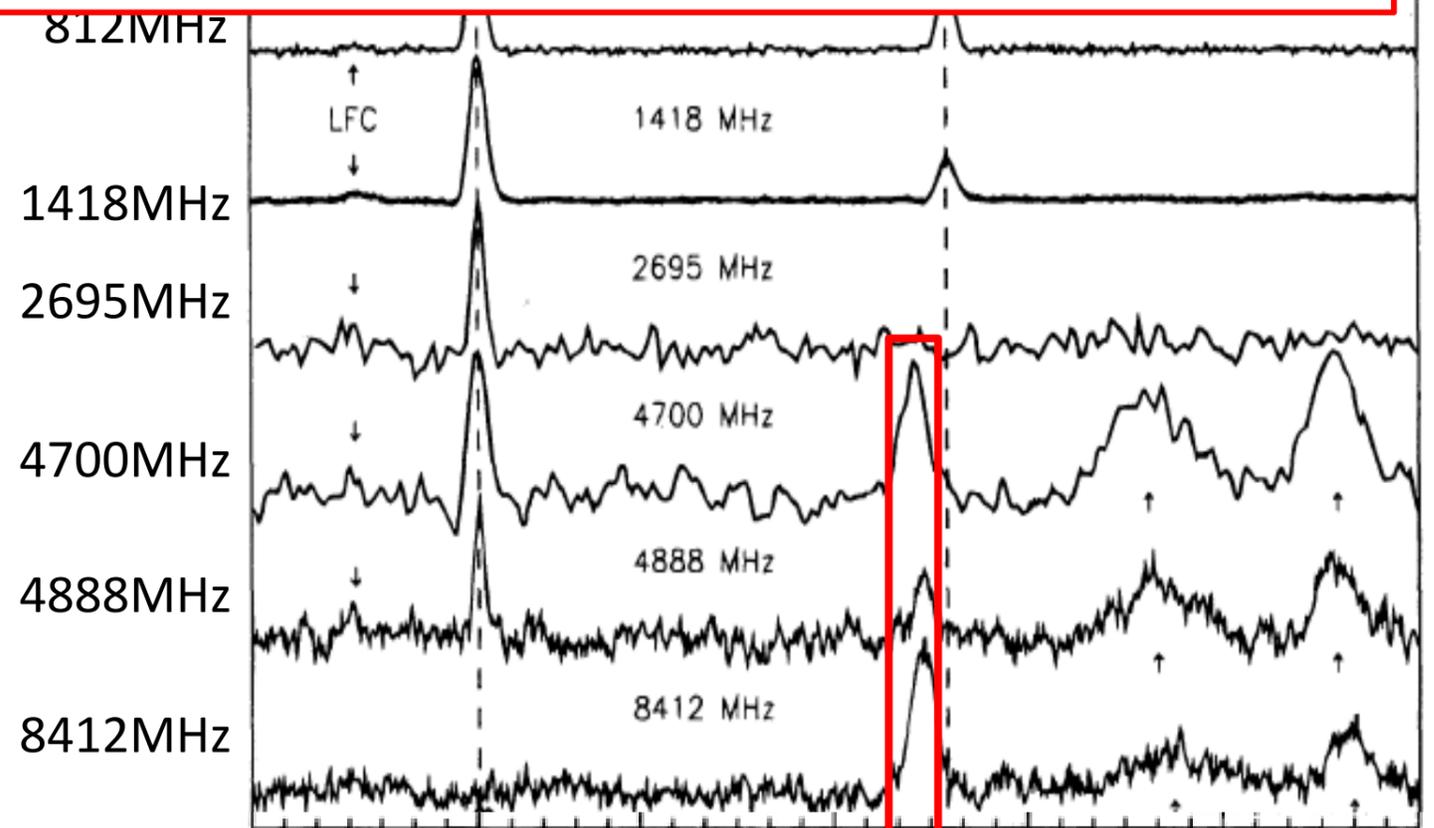
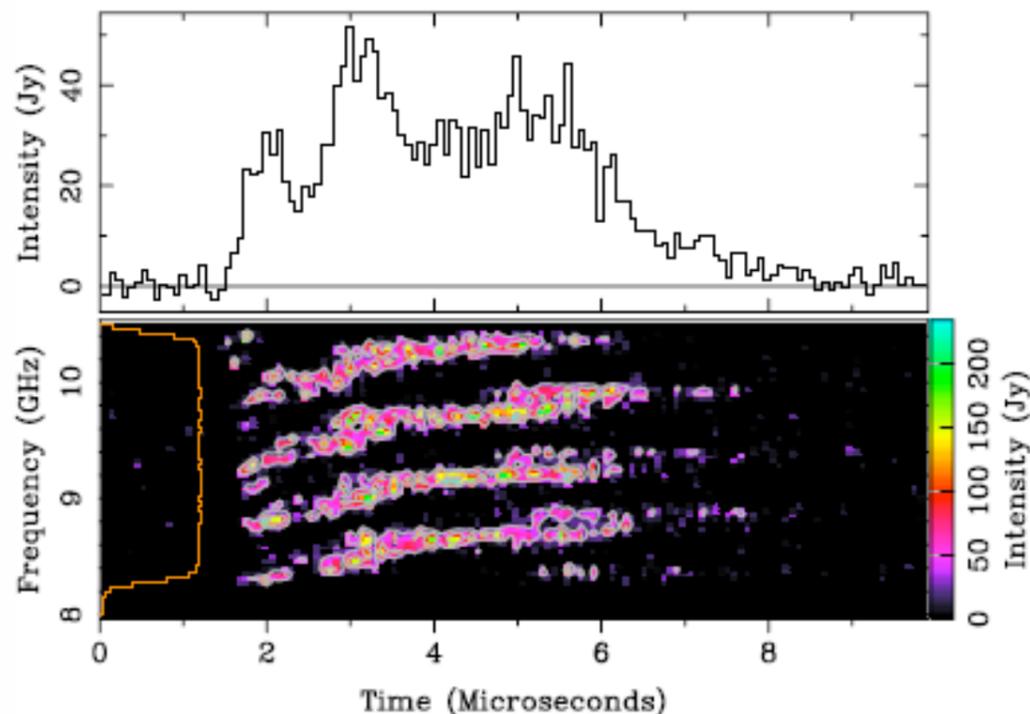
c.f. Chen, Bastian+ (2011) ApJ; Treumann+ (2011) Ann. Geophys; Zlotnick (2013) Solar Phys.;  
Tan+ (2014) ApJ

サイクロトロン周波数の高次高調波を考えるモデルがあり、それをCrabについて応用する提案がある。

e.g. Zheleznyakov+ (2012) Astron.Lett.; Karlicky (2013) AA

Mikami+ 2016の示したのは、↑のような周波数構造の「縦縞」が<~1GHzまで続いていることであった

High frequency inter pulse



Pulsar phase

High frequency interpulse

Close

このような「横縞」が見出されたのは今のところCrab pulsarのみ