

太陽からの電波

柴崎清登

野辺山太陽電波観測所

概要

- 序
- 太陽からの電波放射機構
- 観測装置(野辺山電波ヘリオグラフ)
- Sun as a Start Observation
- 恒星からの電波
- 恒星からの電波放射機構
- 恒星活動と電波放射
- 今後の恒星電波観測の進展

太陽物理学と恒星物理学

太陽物理学

- 対象がひとつ
- 近い
 - 明るい
 - 表面の構造が見える
 - 時間変化(活動)が見える
(エネルギー流に駆動された
時間的空間的散逸構造の観測)
 - 地球への直接的影響
- 同時観測のための充実した観測装置群(多波長同時に活動現象観測、地上・衛星)
- プラズマ物理学の実験場
- 惑星間物理学・地球物理学への入力

恒星物理学

- 対象が多い
- 遠い
 - 観測装置の大型化、高感度化、新たな技術の導入により、状況は変わりつつある。
- 新たな観測装置によるデータの積み重ねが可能(時間変動のない部分)

電波の特徴

- 太陽・恒星の大気は高温のため $h\nu \ll kT$ となり、粒子ではなく波として扱える。(古典論、レイリー-ジーンズ則)
- 量子遷移に較べて単純(電子からの放射であるため、元素組成や熱平衡の問題を回避)
- 連続光の場合、得られる情報量が少ない。ドップラー効果を受けない。
- 大気の窓にあり、地上から大型装置による観測が可能である。
- 大気や天候の影響が少ない。昼夜、雨や曇りでも観測可。
- 波長が長いために、観測装置が大きい。干渉計技術の発達により、大陸間や衛星を組み合わせた観測が可。

電波のもたらす情報

- 強度、偏波(円)
 - － 周波数(波長)の関数として
 - 連続波スペクトル(電子のエネルギー分布、磁場の向きや強さ等)
 - － 空間の関数として(電波マップ)
 - － 時間の関数として(バースト)
 - － 偏波
 - 吸収係数の磁場依存性を用いた視線磁場測定(コロナの高温プラズマ中の磁場測定が可能)
 - 磁化プラズマ中の伝搬における偏波反転
 - － バースト時には、上記情報を同時に測定する必要がある。(多周波での多素子電波干渉計が必要)

太陽からの電波放射機構

- Incoherent emission (電子の加速度運動)
 - 電子とイオンとの衝突 (電気力が遠隔力であるため)
 - f-f 放射 (熱制動放射、主に陽子との衝突)
 - 電子のラーモア運動
 - Gyro-resonance 放射 (磁気共鳴放射、熱電子)
 - Gyro-synchrotron 放射 (磁気制動放射、非熱電子)
- Coherent emission (m波～dm波)
 - プラズマ放射 (電磁波への変換が必要)
 - メーザー放射 (イオンサイクロトロンメーザー)
 - ダイナミックスペクトル観測 (ここでは触れない、飯舘等)
- 参考文献
 - G.A. Dulk: Ann. Rev. Astron. Astrophys 23, 169 (1985)

f-f 放射

- 電波強度 (I)と輝度温度 (T_b)

- $I = k_B T_b f^2 / c^2$

- $T_b = T[1 - \exp(-\tau)] + T_{b0} \exp(-\tau)$ cloud model

- $\tau = \xi f^2 T^{-3/2} \cdot \int N^2 dl$

- $= 7 \times 10^{-4} \cdot EM_{27} T_6^{-3/2}$

- $T_b = T \quad \tau \gg 1$

- $= T \tau \quad \tau \ll 1$

(電子はイオンに較べて熱平衡になりやすい。イオン化した水素(陽子)との衝突が主。)

Gyro-resonance emission

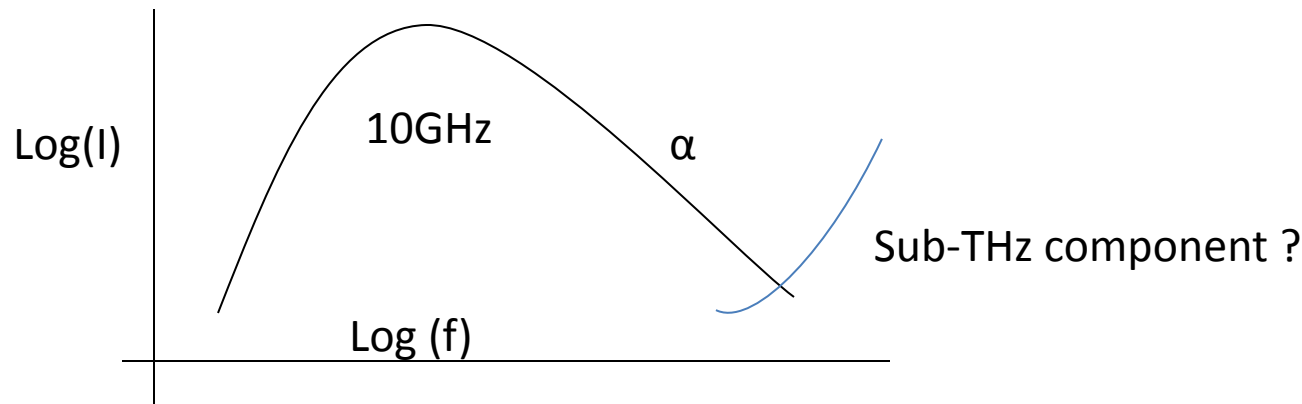
- $f_B = 2.8 \times B$ MHz
 - この2~3倍の高調波の等磁場面
 - 2000ガウス・3倍高調波 17GHz
- 共鳴層の厚さ
 - $L = L_B \times v/c$
- $\tau \propto NT^{s-1}$
- 黒点暗部の強い磁場領域からの放射
 - 円偏波率が非常に高い(~100%)

Gyro-synchrotron emission

- 非熱的電子(パワー則で高エネルギーにのびた部分)からの、 $10 \sim 100 f_B$ の放射
- フレア時の粒子加速の研究
 - 硬X線は電子が高密度領域で制動放射
 - 電波(マイクロ波)は磁場による磁気制動放射
 - ループ状に輝く

Gyro-synchrotron emission

- 放射の周波数スペクトルから電子のエネルギースペクトルの情報を得る
 - $N(E)dE = K E^{-\delta} dE$
 - 電波の周波数スペクトル指数 (α)
 - $\alpha = 0.9\delta - 1.2$



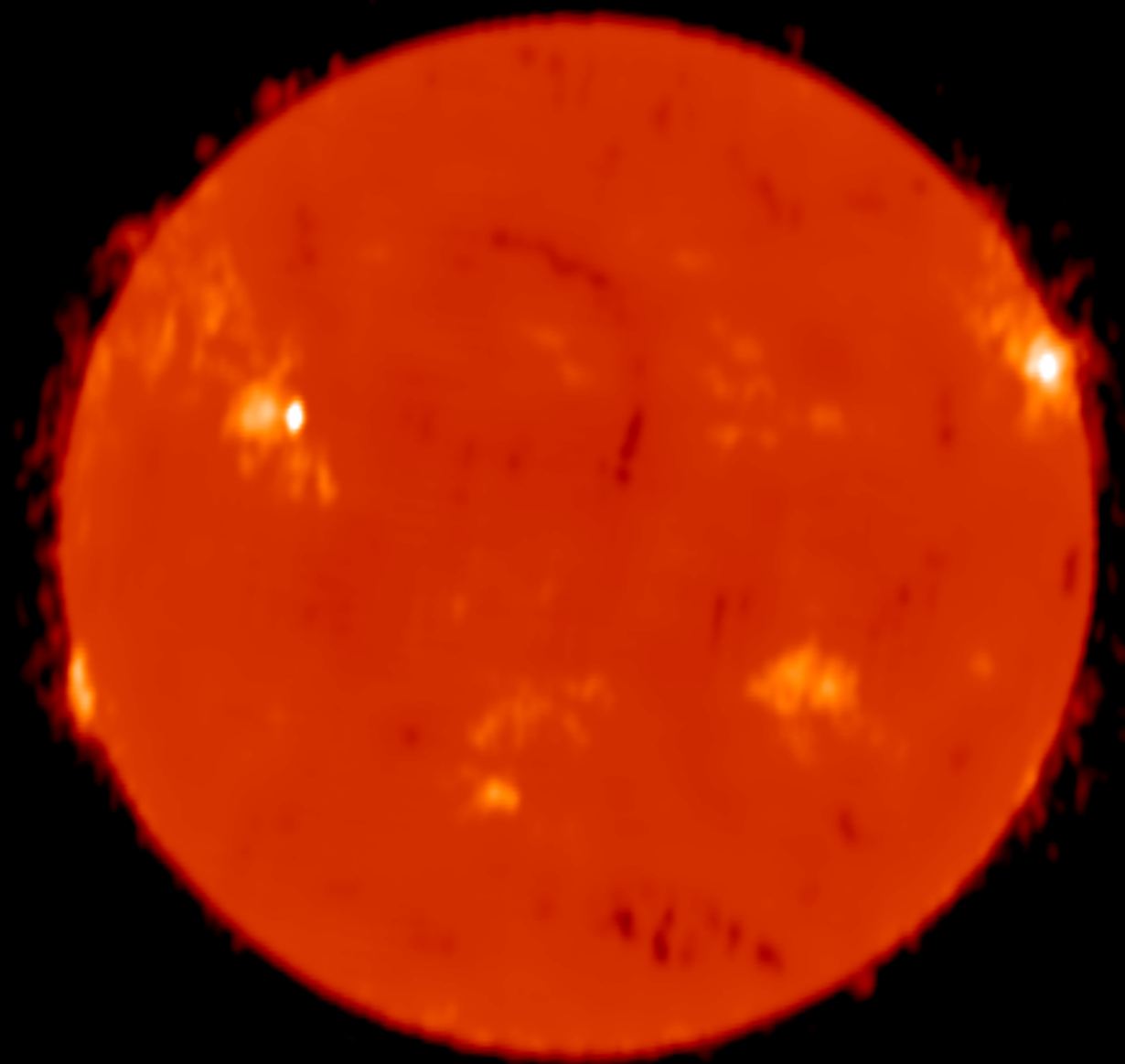
野辺山電波ヘリオグラフ

- 太陽観測専用の電波干渉計
 - 直径80cmのパラボラアンテナ84基
 - 東西490m、南北220mに配置
 - 観測周波数 17GHzと34GHz
 - 空間分解能10秒角（太陽表面で約7000km、太陽半径の1／100）
 - 時間分解能1秒（フレア時は100ミリ秒）
 - 連続8時間（曇りや雨の日も観測可能）
- 世界の観測装置（ルーチン観測干渉計）
 - m波：フランス
 - cm波：ロシア（5GHz）

Nobeyama Radioheliograph



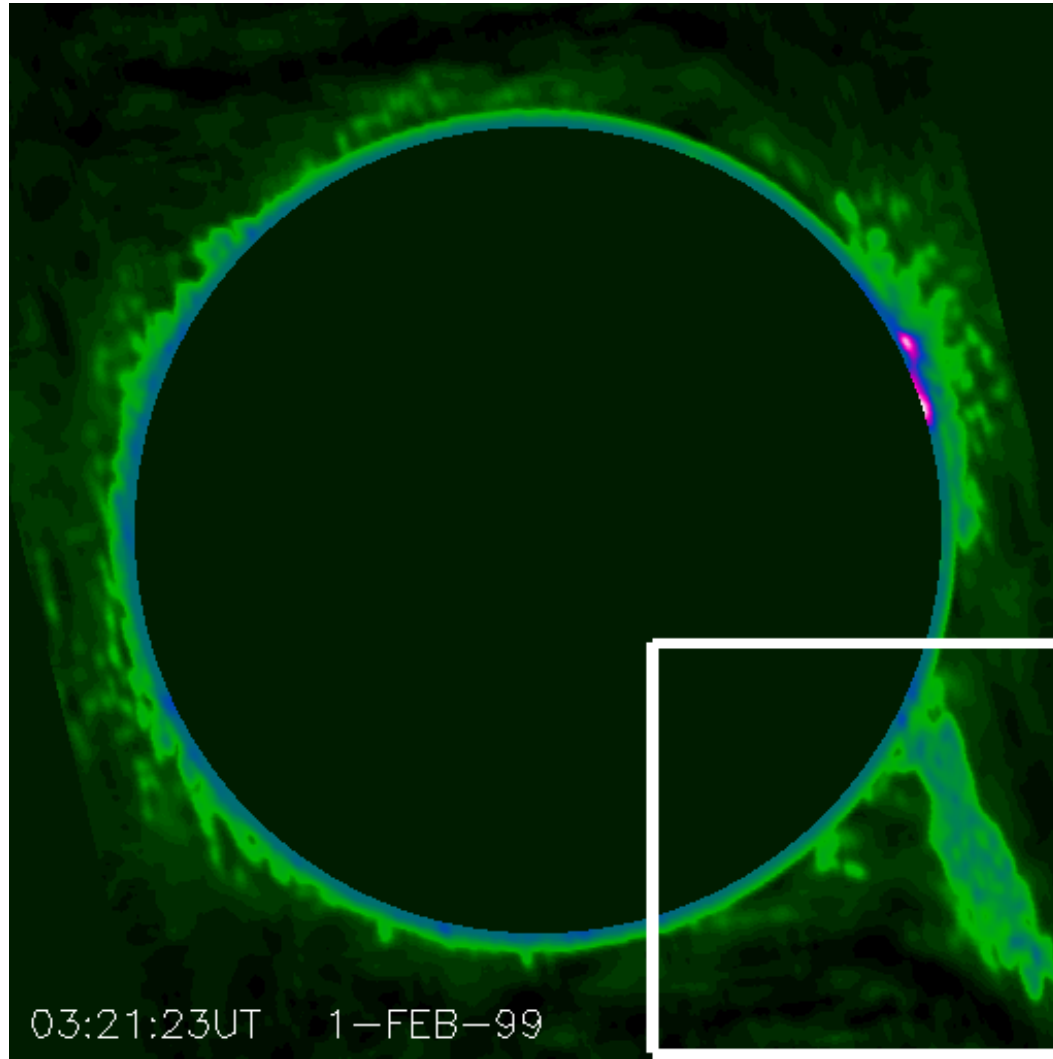
NOBEYAMA RADIO HELIOGRAPH 17GHz (R+L)



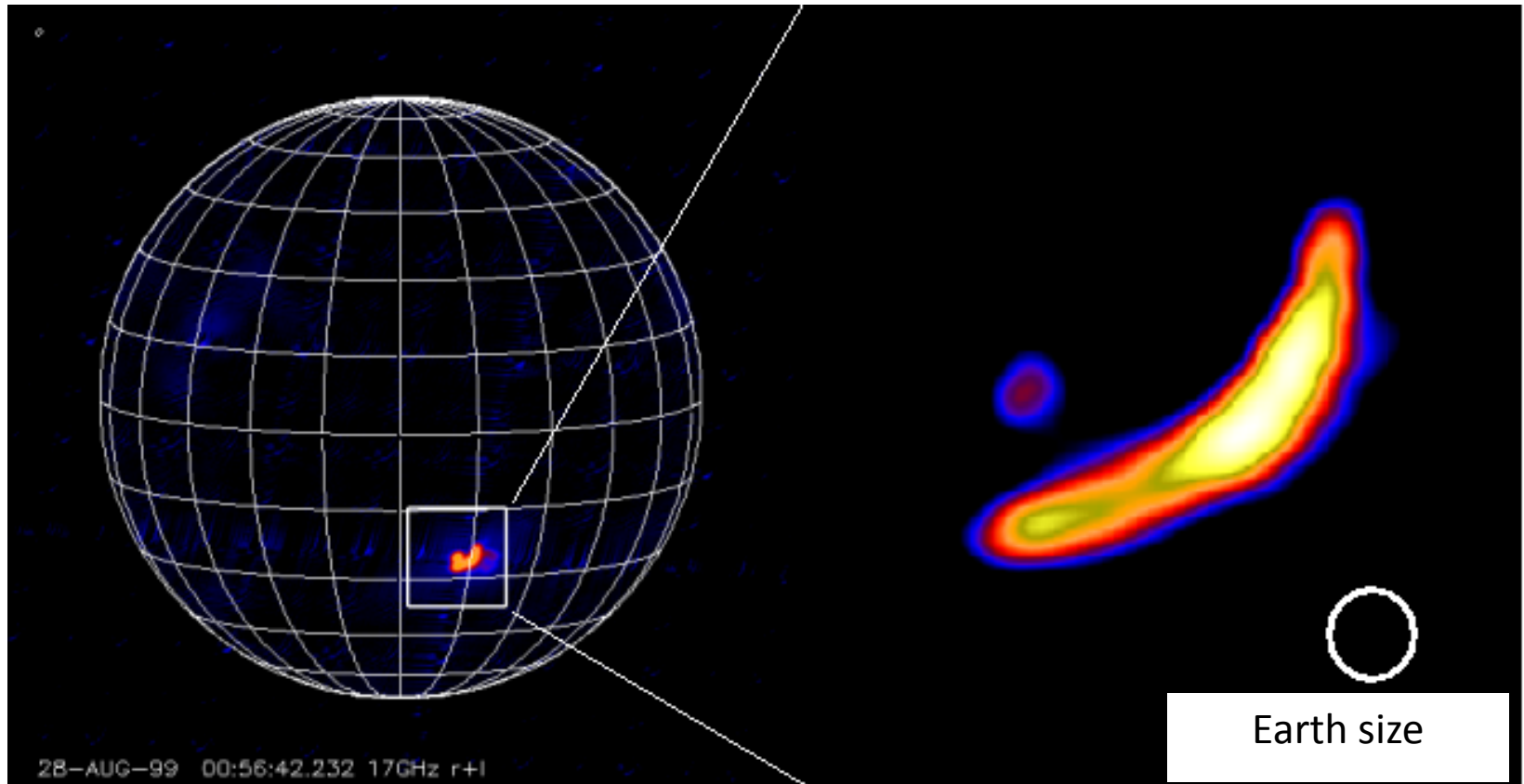
SOLAR NORTH IS UP
CENTER
(257 , 257)/ PIXEL
PEAK
152001 K
PIXEL SIZE
4.911 (ARCSEC)
SOLAR RADIUS
987.762 (ARCSEC)
SOLAR POLAR ANGLE
6.6139 (DEGREE)
SOLAR B0
-1.8685 (DEGREE)
DATA
LOGSCALE
MAX=1E4.8 : MIN=1E3

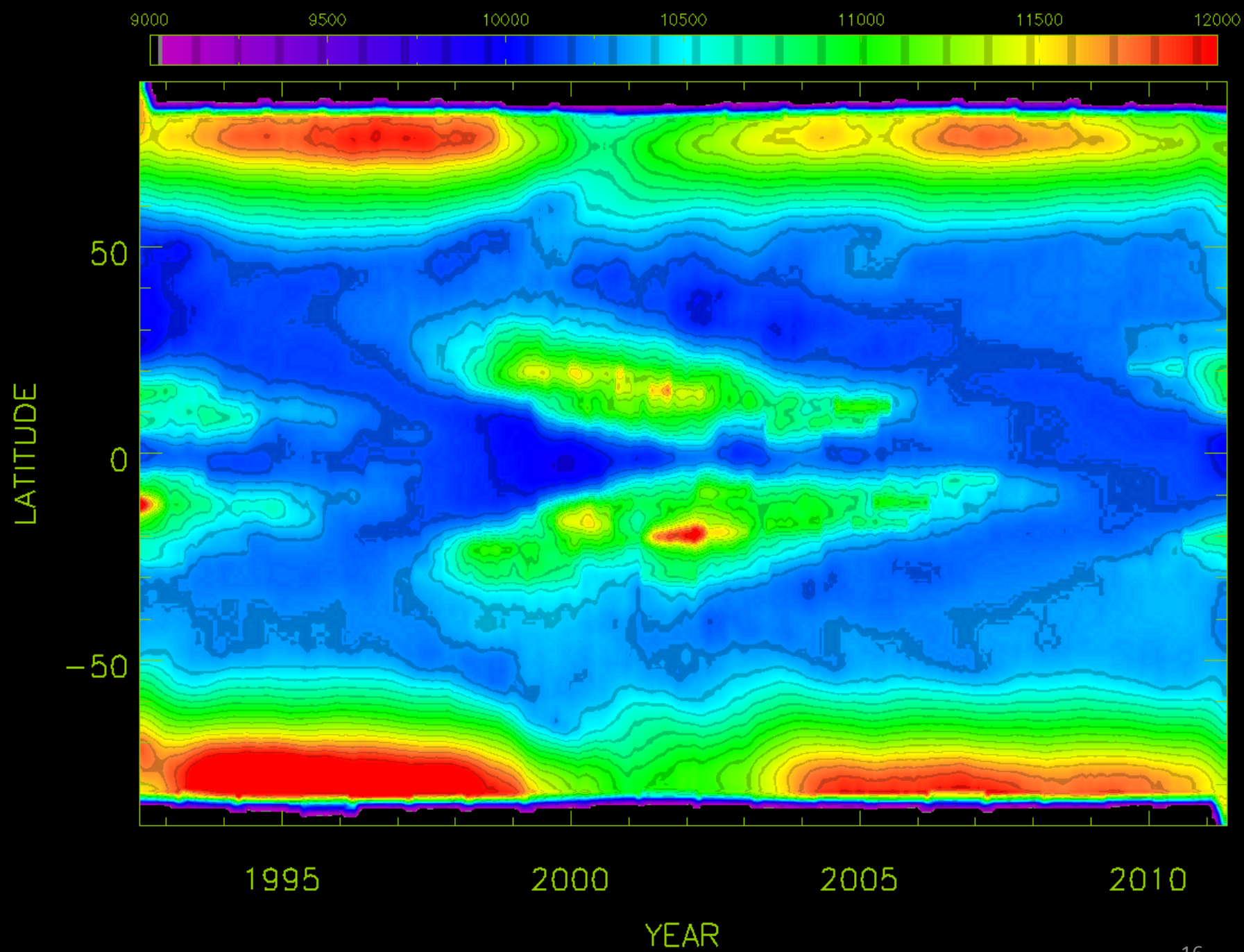
2011-12-23 02:44:32.496

Prominence eruption



Nonthermal electron injection (filling process of nonthermal loop with light speed)





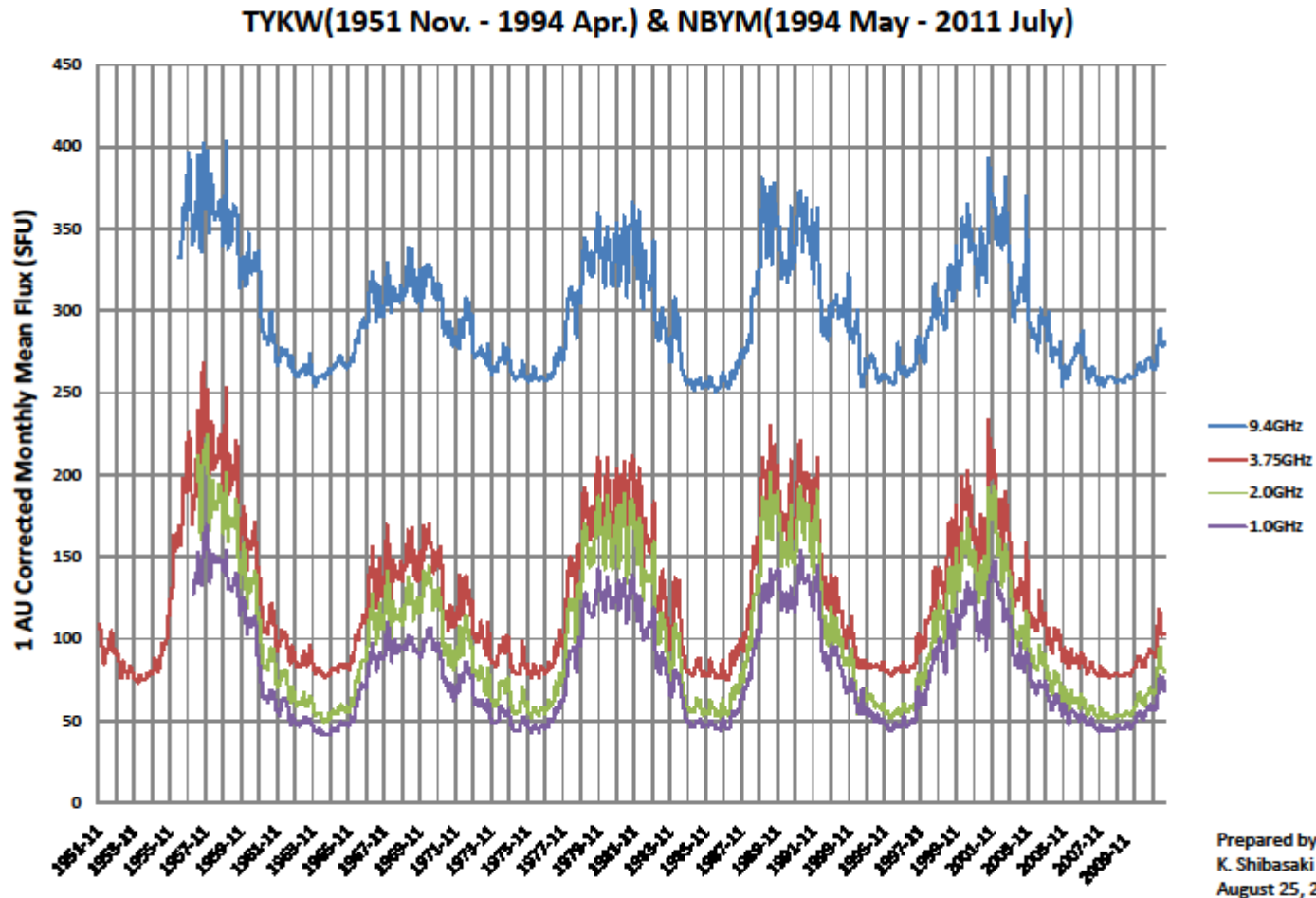
Sun as a Star Observation

Nobeyama Radio Polarimeters



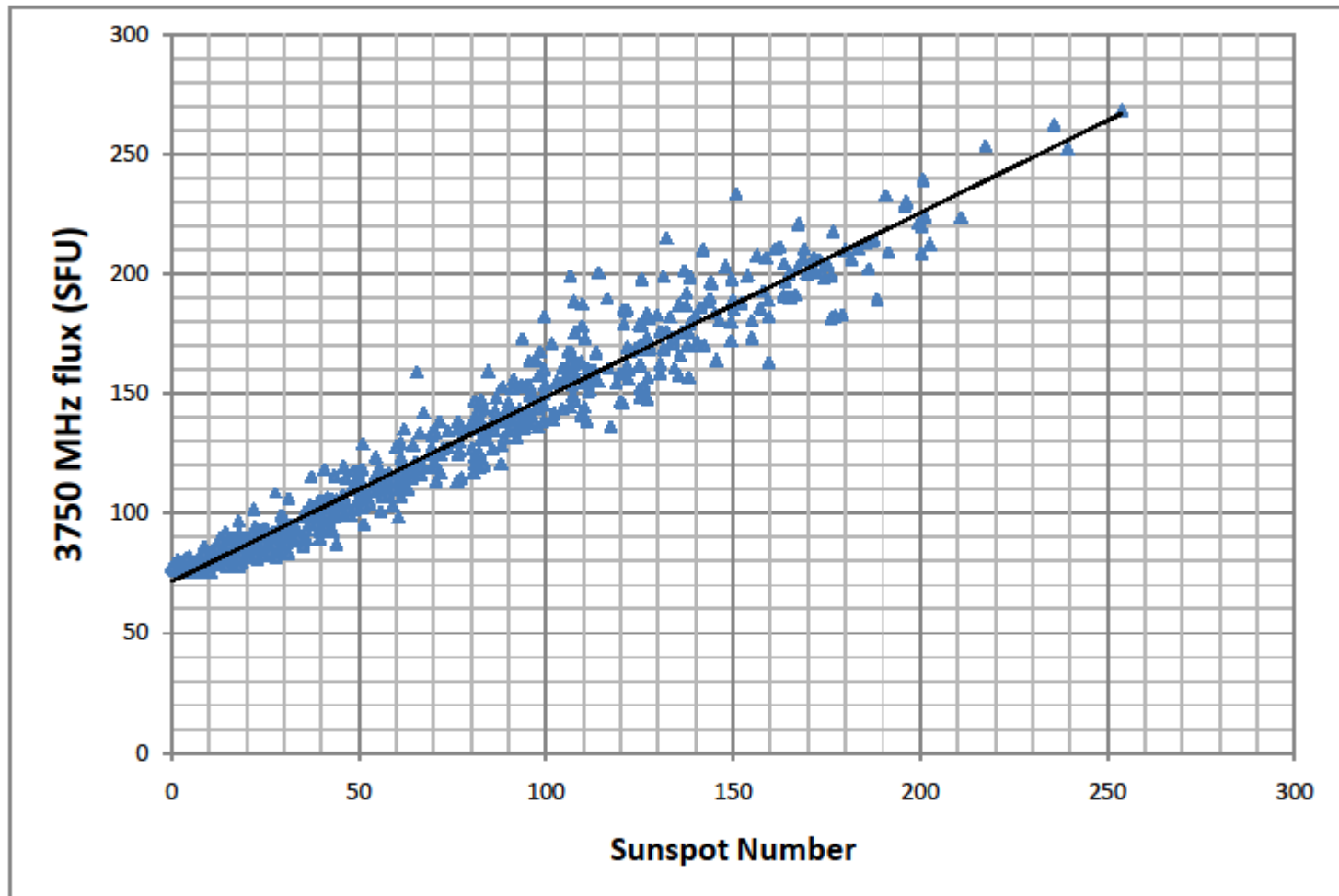
Canada: 2.8GHz (F10.7) 1947~、米軍(多周波、多地点、RSTN)

Sixty year measurement of Radio Flux



長期間安定したデータ校正の手法の確立

Correlation between 3.75GHz Flux (NBYM) and Sunspot Number(ISN/SIDC)



相関係数=0.976

恒星からの電波

参考文献、M. Guedel: Ann. Rev. Astron. Astrophys 40, 217 (2002)
“Stellar Radio Astronomy: Probing Stellar Atmospheres from
Protostars to Giants”

(以下の図はすべてこの文献より)

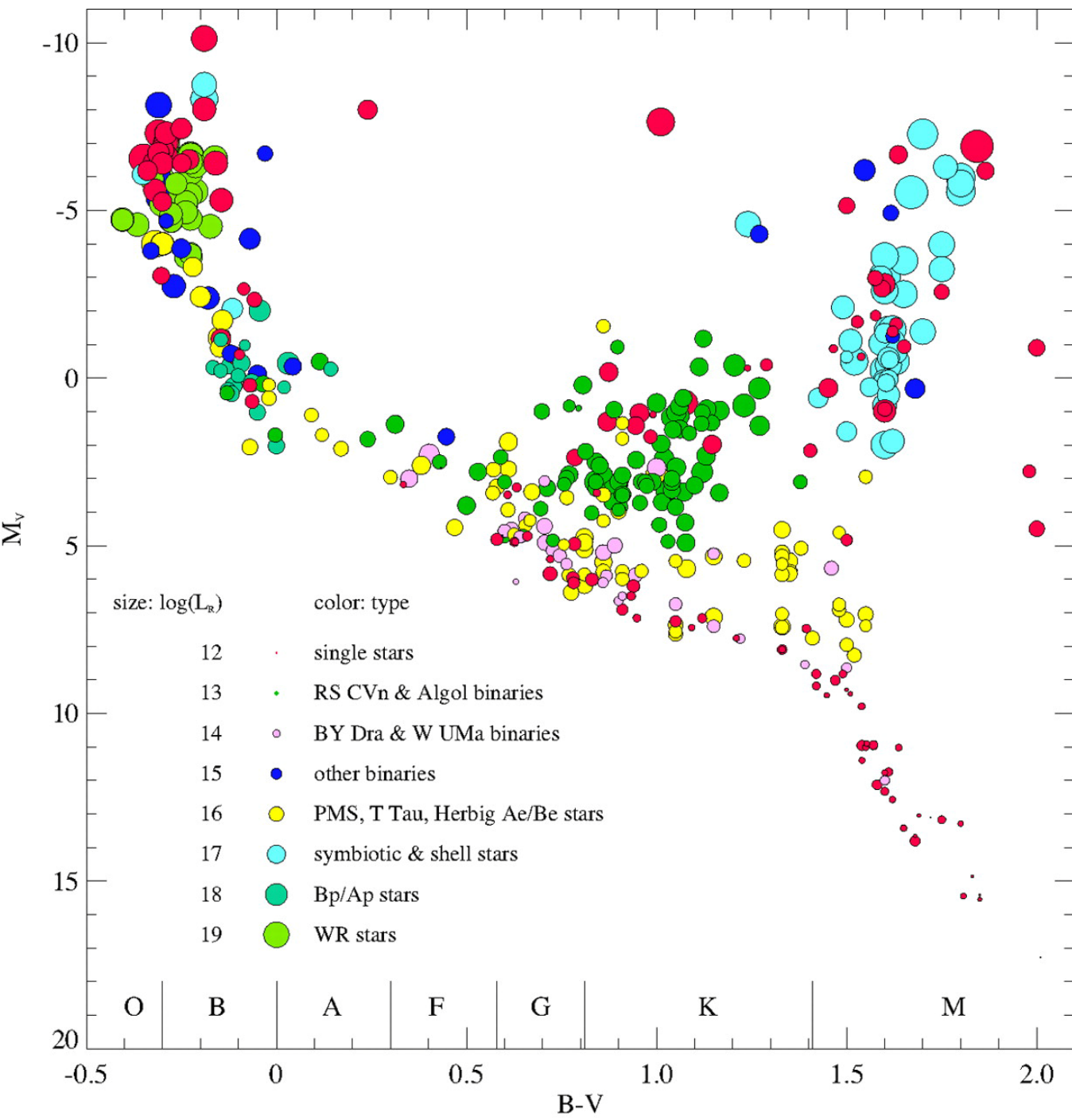


Figure 1 HR diagram showing 440 radio-detected stars.

- Coherent burst emission (m-dm bursts)
 - Plasma wave, electron cyclotron maser
- Incoherent: gyrosynchrotron
(磁場＋非熱的電子)
 - steady にもかかわらず
 - スペクトルがGHz帯にピーク
 - 電波観測の重要性(磁場、高エネルギー電子)
- 星風／mass loss、磁気圏
- 赤色巨星や近くの星で光球・彩層からの熱放射

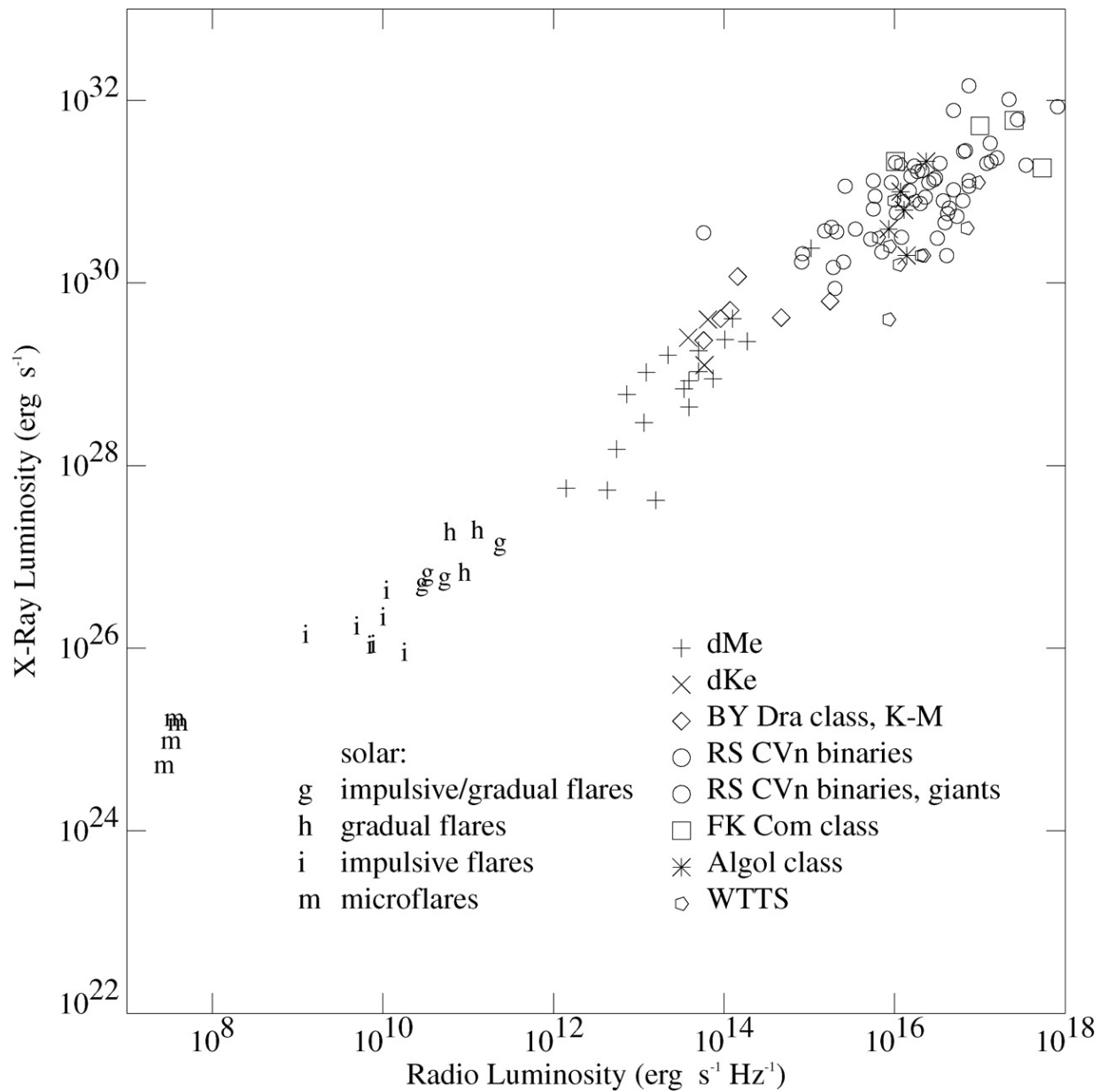


Figure 6 Correlation between quiescent radio and X-ray luminosities of magnetically active stars (*symbols*) and solar flares (*letters*) (after Benz & Güdel 1994). **加熱／加速のエネルギー分配則が共通？**

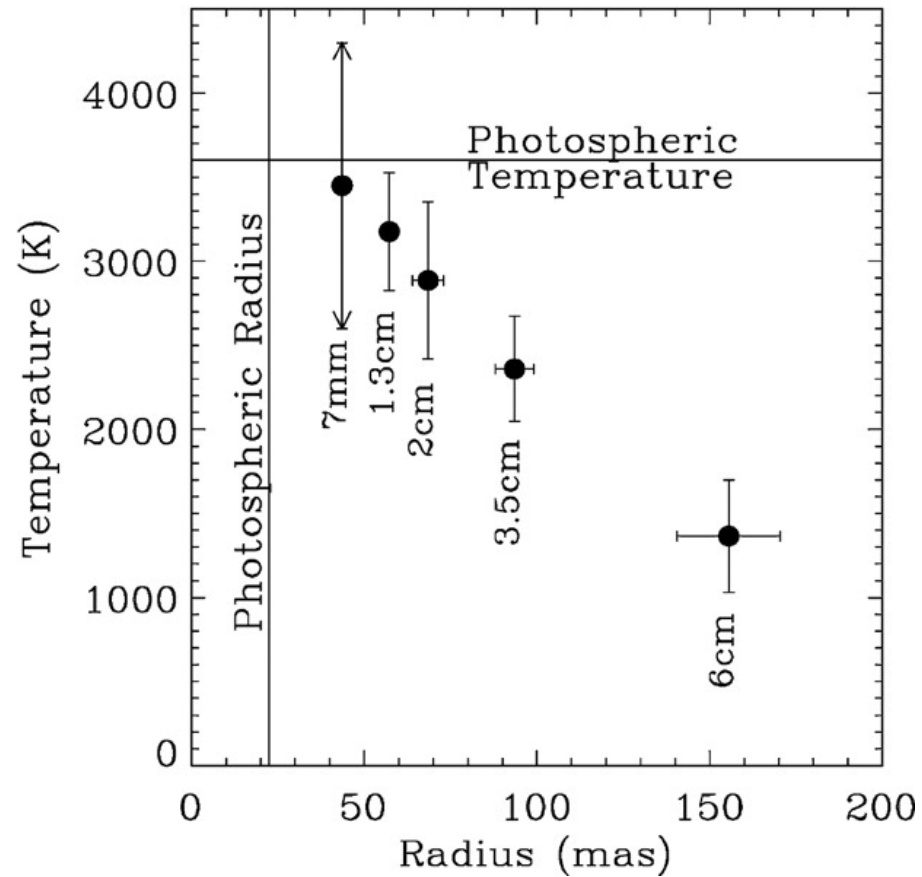
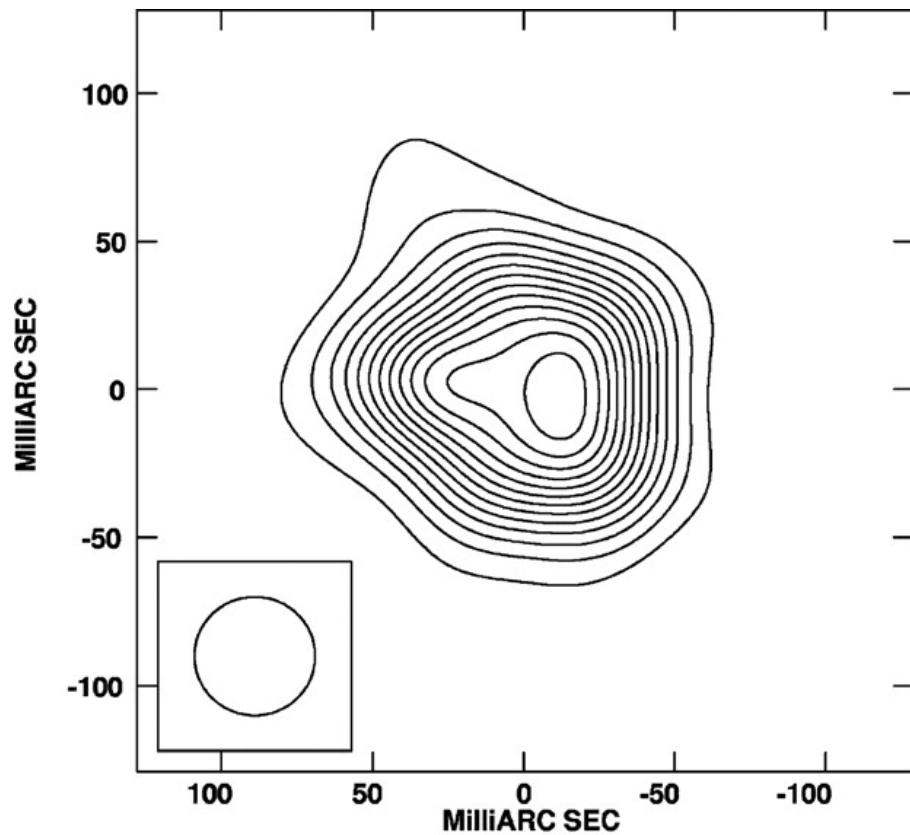


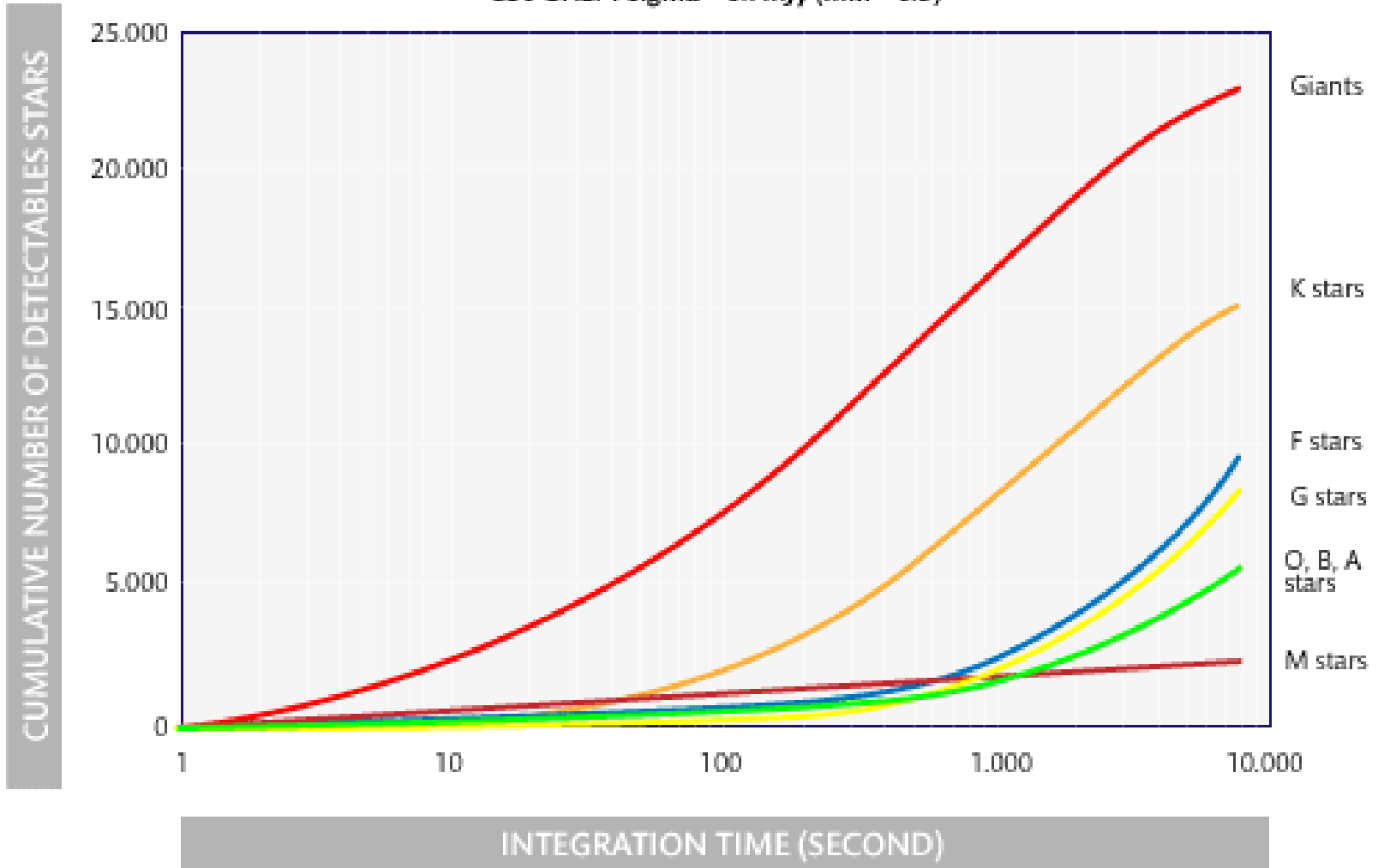
Figure 9 (a) Betelgeuse observed at 43 GHz. The radio photosphere of this star is resolved, with an angular resolution of 40 mas. (b) The atmospheric temperature of Betelgeuse as a function of radius, observed at different frequencies. (From Lim et al. 1998) (reproduced with the permission of *Nature*.)

今後の観測の進展

- 非熱的放射
 - 低周波で強いので、E-VLAの活躍
 - VLBIによる空間構造観測
- 熱的放射
 - $S \sim \nu^2$ なので、高周波観測で有利
 - ALMAによる貢献(フラックス測定?、空間構造)
 - sub-mm波VLBIによる空間構造観測

Stars detectable with ALMA

850 GHz. 1 sigma = 0.7 mJy (min^{-0.5})



The Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) will allow scientists to determine the radius and the rotation of stars and identify the chemical composition of dust being emitted from red supergiant stars (a star which is 10 to 1,000 times the diameter of our Sun, such as Betelgeuse). (ALMA Web Pageより)