

低频射电波在等离子天体探测中的特殊作用

吴德金、陈玲

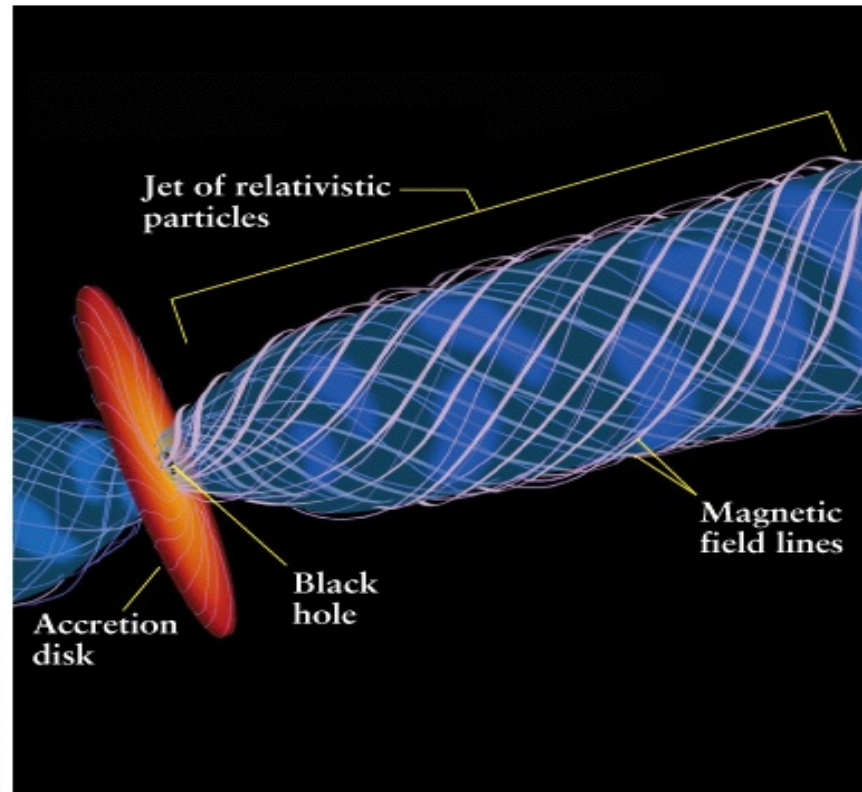
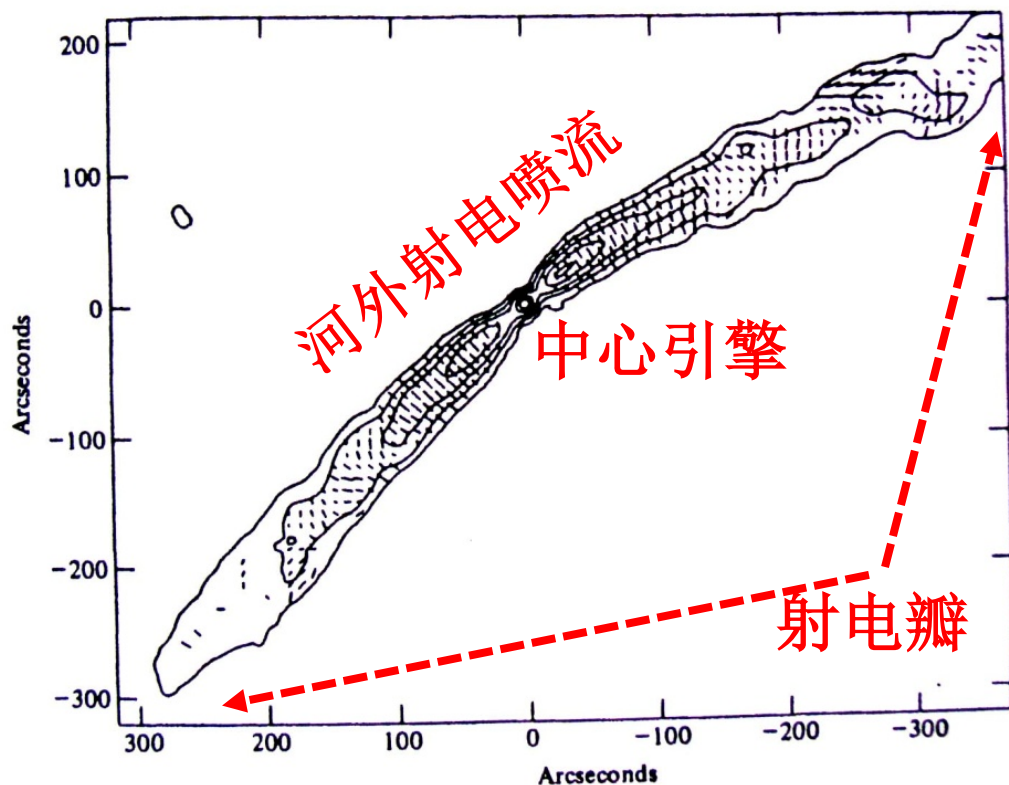
中国科学院紫金山天文台

- 等离子天体的介观动力学过程
- 基于射电技术探测研究的优势
- 太阳大气介观动力学过程的射电观测

长期困扰的难题： 非热高能粒子加速机制

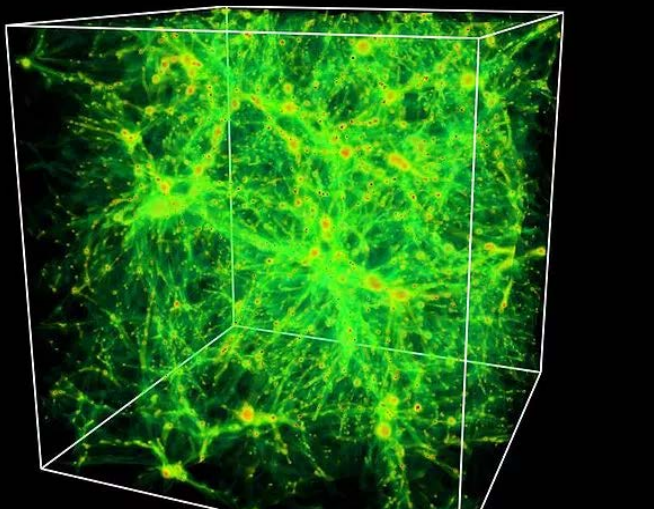
$$L_{AGN} \sim 10^{46} \text{ erg/s}; m_{BH} \sim 10^8 M_{Sun}$$

$$d_{jet} \sim 0.1 - 1 \text{ Mpc}; B \sim 1 - 10 \mu\text{G}$$



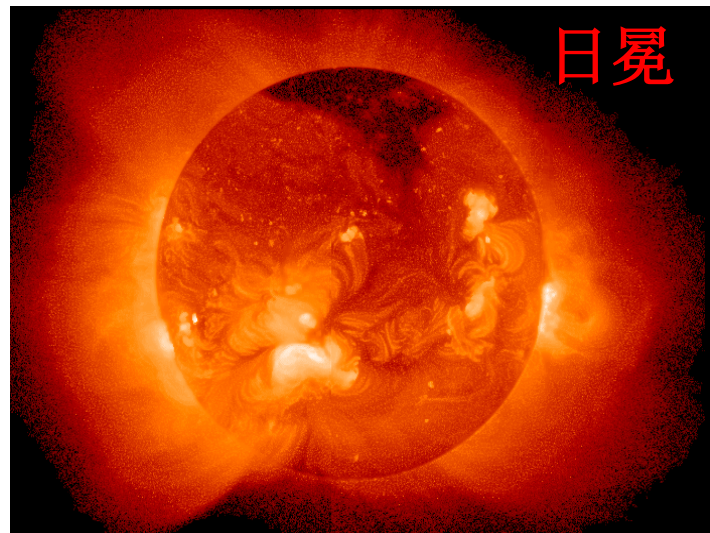
观测显示在各类宇宙天体中普遍存在具有非热幂率能谱的高能粒子束流，如太阳耀斑高能粒子、河外射电喷流、以及宇宙线粒子等。它们的加速机制至今依然成谜？

长期困扰的难题：高温等离子体加热机制

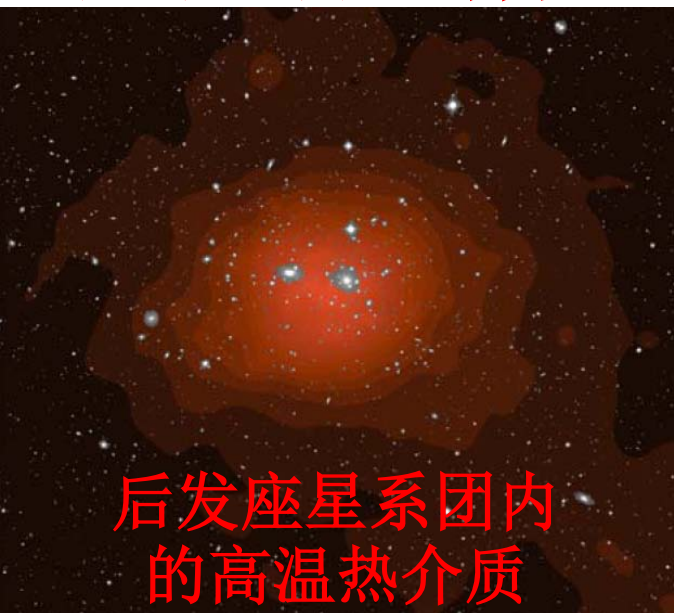


Sunyaev-Zel'dovich效应与星系际热介质

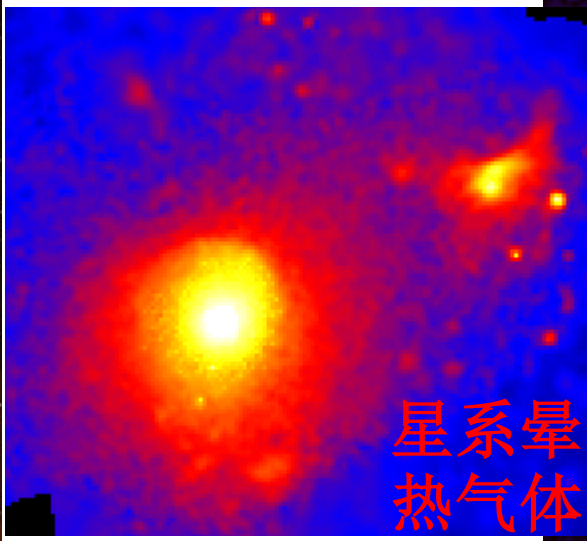
占宇宙可观测物质90%的宇宙弥散介质，大都是以稀薄高温等离子体的形式分布在广袤的宇宙空间。它们的加热机制是什么？



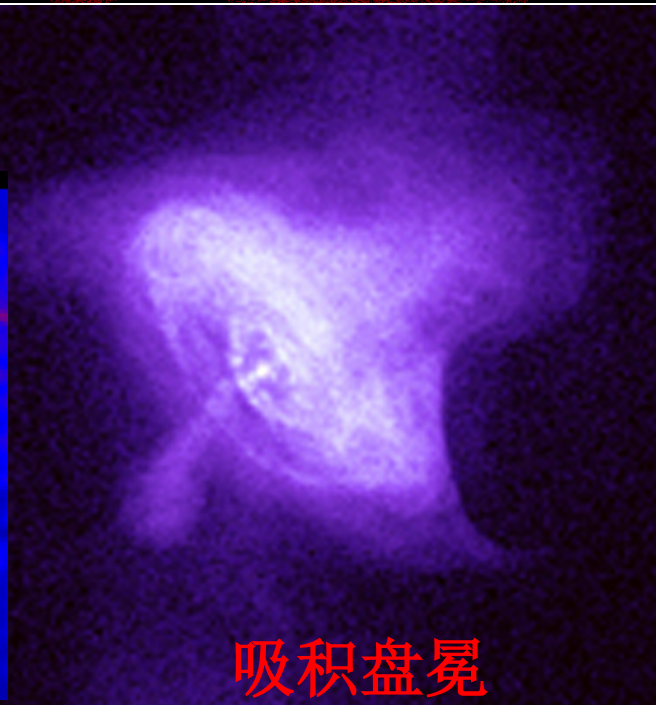
日冕



后发座星系团内的高温热介质

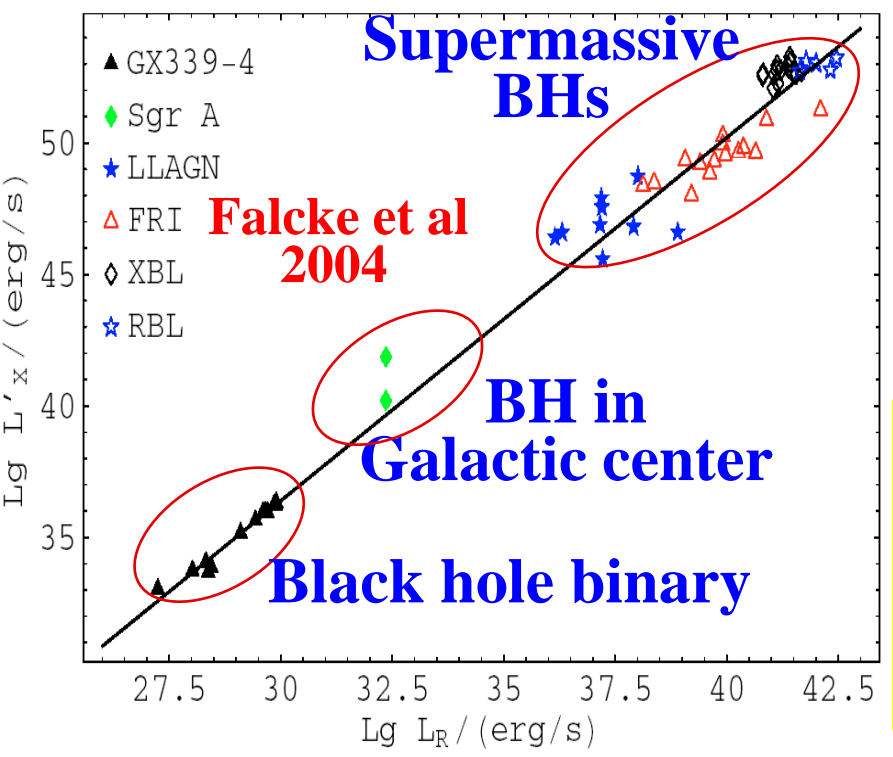
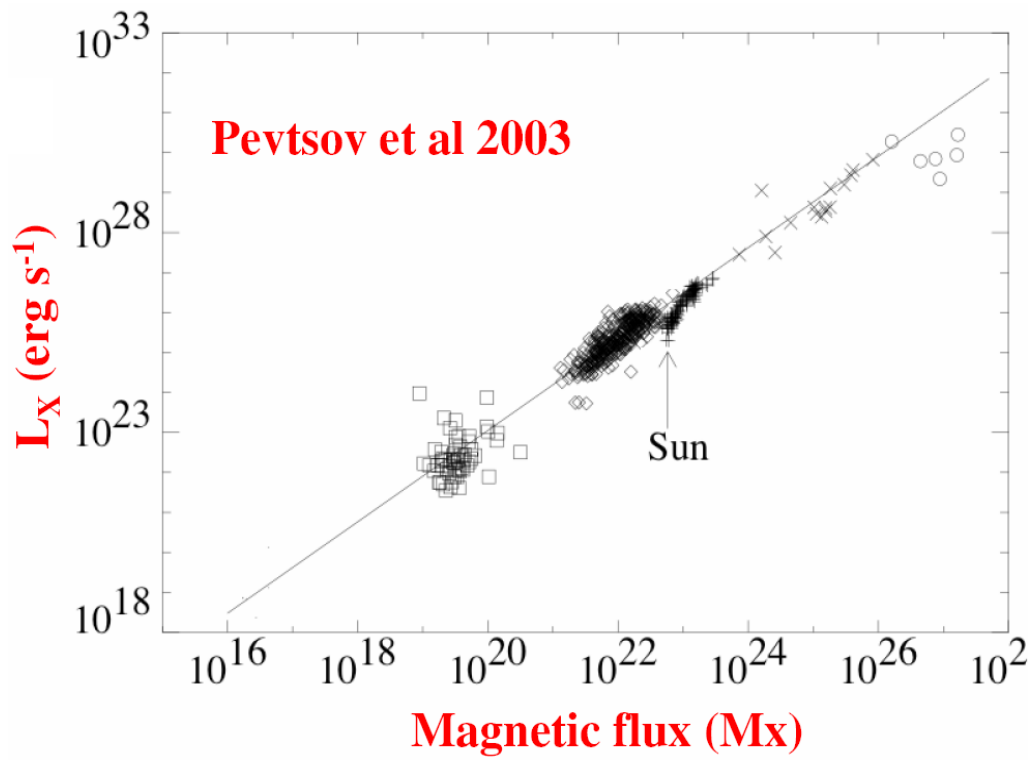
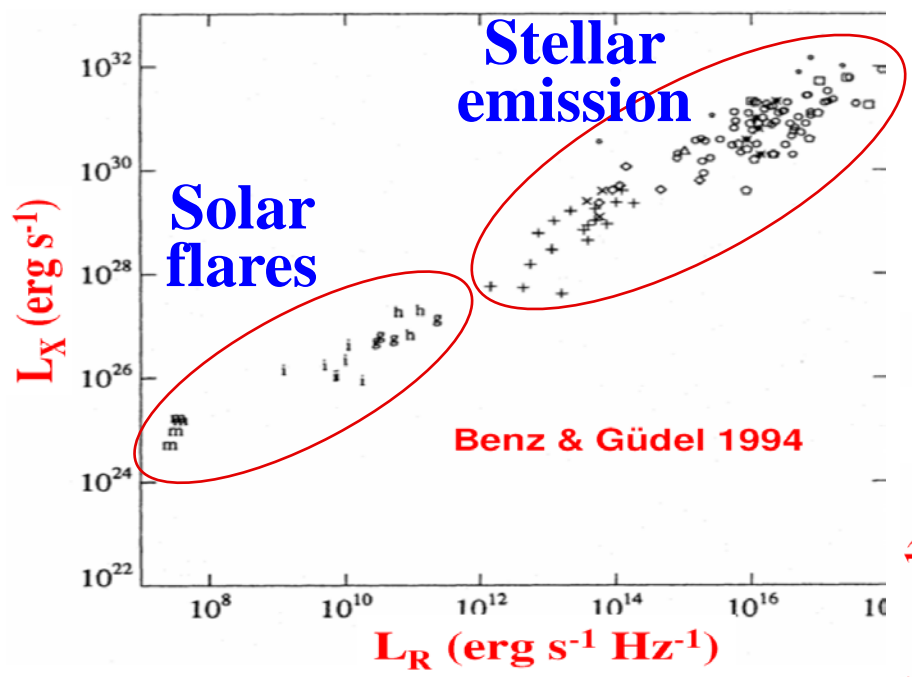


星系晕热气体



吸积盘冕

长期困扰的难题：能量爆发转换驱动机制



观测研究显示，各类天体爆发活动现象的驱动能量主要源自电磁能的突然释放，但电磁能储存和转换的驱动机制仍是有待解决的难题。

等离子天体中三个不同尺度上的动力学过程

微观尺度动力学：微观粒子间的近距离相互作用过程引起的动力学现象，其中单个粒子动力学行为起主要作用，如等离子天体的自发辐射过程。

微观尺度：
如朗道长度

$$\lambda_L \propto N_D^{-2/3} d \propto d$$
$$N_D \sim 10^{10} - 10^{20}$$

介观尺度动力学：大量粒子集体相互作用引起的动力学现象，其中多粒子通过共同的自洽电磁场相互作用，以“有组织”的“集体相干”方式形成本质上不同于微观尺度上单粒子动力学的集体动力学结构（等离子体元胞）和现象（元爆发，如等离子天体的相干辐射过程）。

介观尺度：
如德拜长度

$$\lambda_D \propto N_D \lambda_L$$
$$\propto N_D^{1/3} d \propto d$$

宏观尺度动力学：在更大的宏观尺度上，由于静电屏蔽效应，动力学过程主要表现为等离子体元胞之间的耦合现象，其中自组织过程将可能起重要作用，并导致耗散结构或混沌状态的形成。

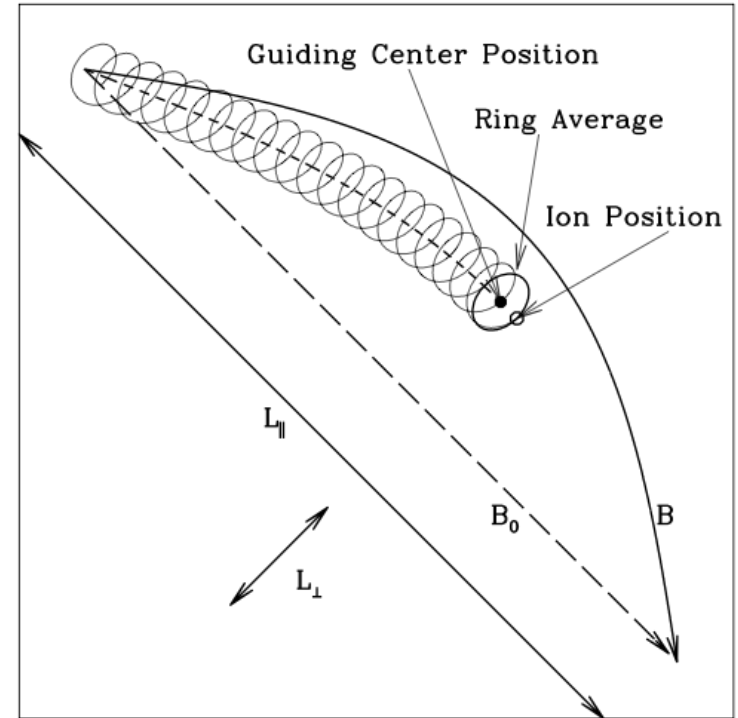
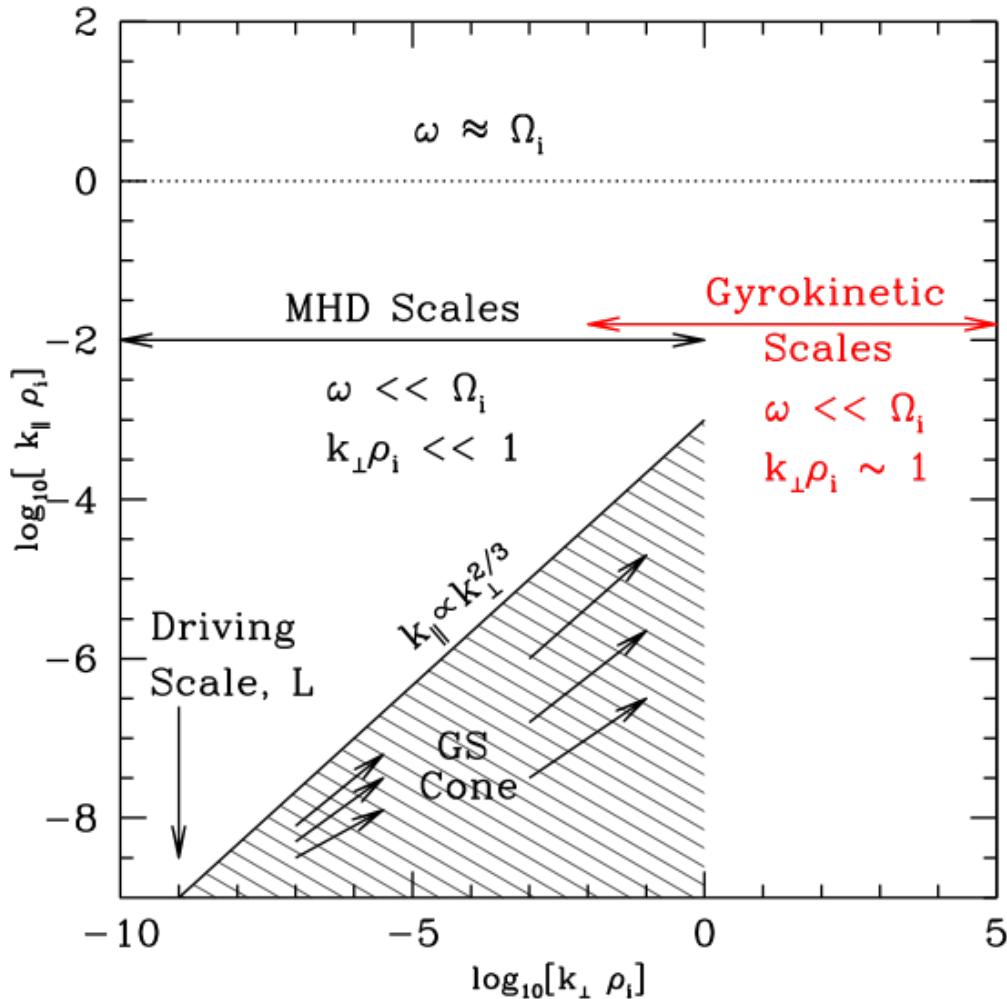
宏观尺度：
如空间梯度

$$L \propto \lambda_D$$

等离子天体粒子集体相互作用的介观尺度

- **朗道长度**：单个带电粒子独立相互作用尺度，也是微观物理过程（碰撞、辐射等）的特征尺度；
- **德拜长度**：等离子体电子静电波的特征尺度，也是非相对论环境中等离子体集体相互作用过程的最小尺度；
- **离子回旋半径**：离子在准静态磁场约束下集体相干运动的特征尺度（非相对论环境中电场力远大于磁场力）；
- **电子惯性长度**：电子波动电磁场约束下集体相干运动的特征尺度或即电子波粒相互作用的特征尺度，如电子振荡周期内光波的传播距离；
- **离子惯性长度**：离子波动电磁场约束下集体相干运动的特征尺度或即离子波粒相互作用的特征尺度，如离子回旋周期内阿尔文波的传播距离。

MHD and Gyro-kinetic Scales

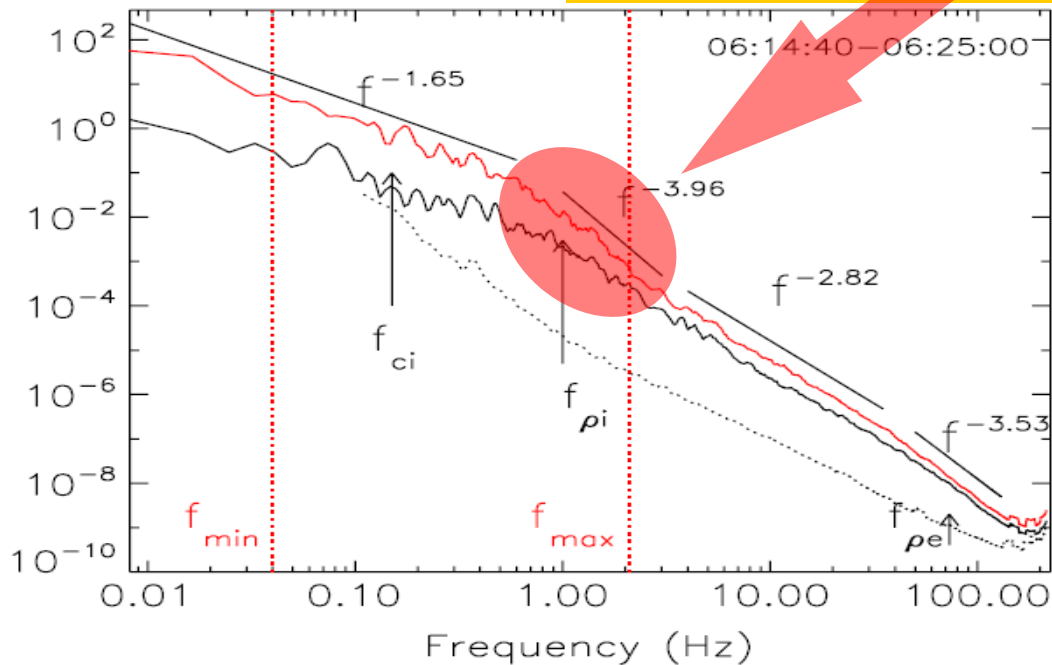
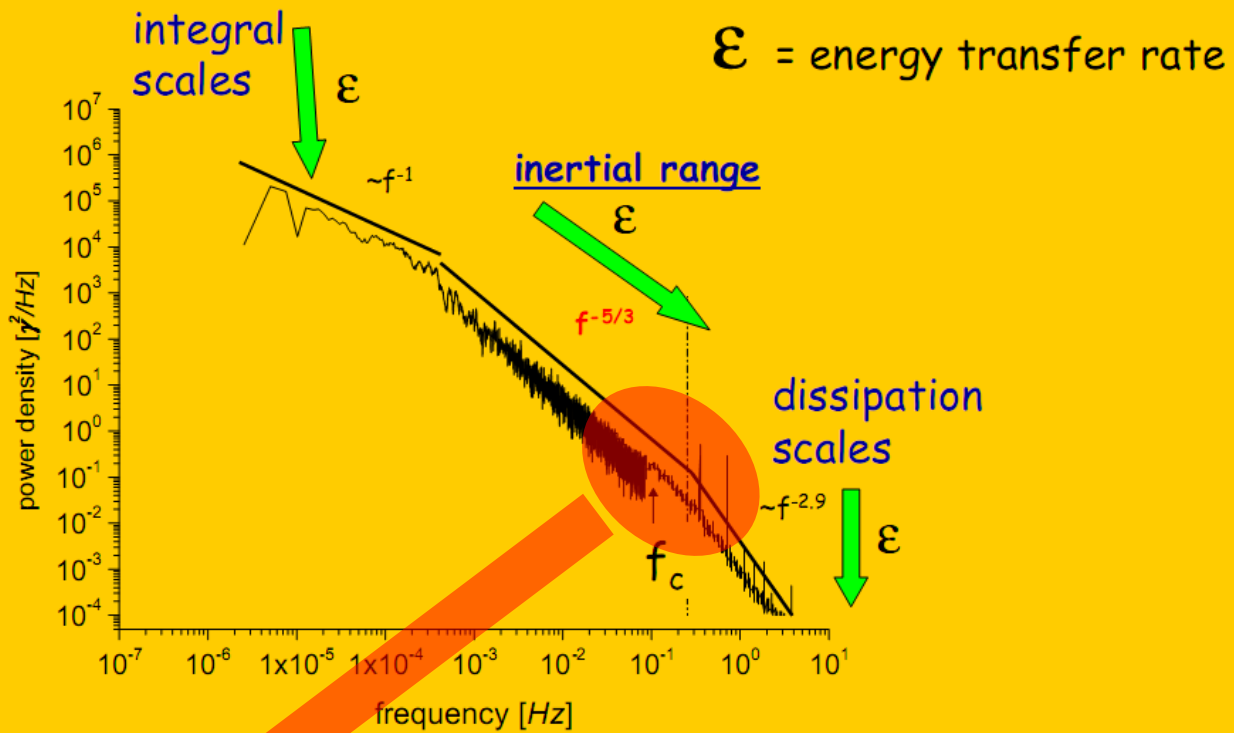


Howes et al., ApJ, 651, 590, 2006
 Schekochihin et al., ApJS, 182, 310, 2009

- ✓ ion gyroradius ρ_i
- ✓ ion gyroradius at electron temperature ρ_s
- ✓ ion inertial length λ_i
- ✓ electron inertial length λ_e

Gyrokinetic turbulence

Sahraoui et al., 2010

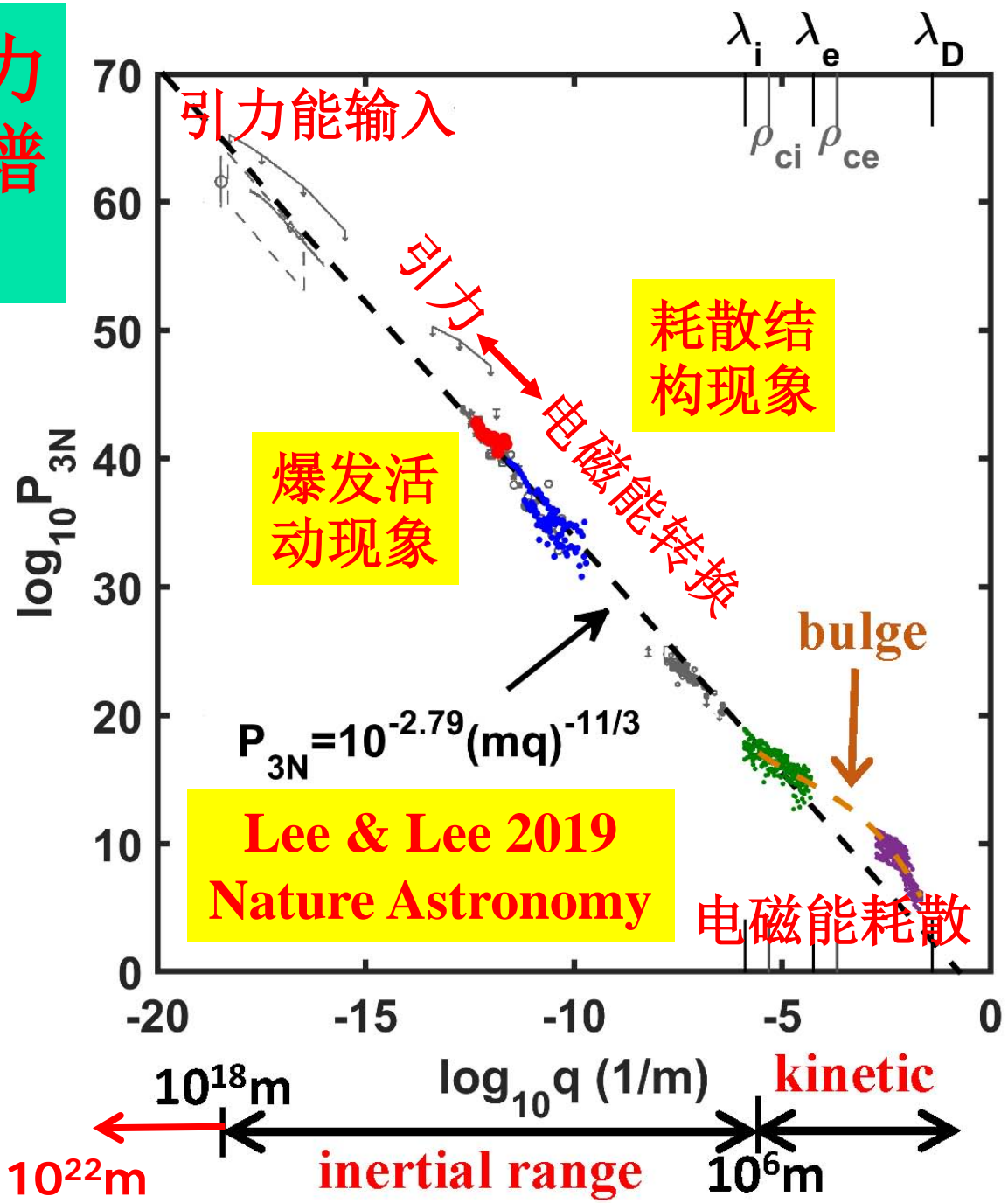


- ✓ ion gyroradius ρ_i
- ✓ ion gyroradius at electron temperature ρ_s
- ✓ ion inertial length λ_i
- ✓ electron inertial length λ_e

从星系团到粒子动力学尺度：宇宙湍动谱的普适性问题

行星、恒星、星系核等局部引力中心只占宇宙可观测物质的~10%，其余约90%的物质都是以弥散介质的形式存在的，它们的物理状态和动力学行为在宇宙结构与演化中将起重要作用。

在引力和电磁力的竞争与合作下，能量从宇宙学尺度向小尺度串级直至在微观粒子动力学尺度上耗散（热化）。



宏观现象与微观过程间的鸿沟：介观动力学

理论分析研究：等离子天体介观尺度 (meso-scale) 动力学的物理本质就是等离子体内由于带电粒子间长程电磁力耦合导致形成的各种本征模。目前，人们对这些本征模的理解，基本上还是在只适用于小扰动的线性理论水平。而本征模动力学的实质就是等离子元胞内多粒子间的强非线性作用，对其非线性特性所知甚少。

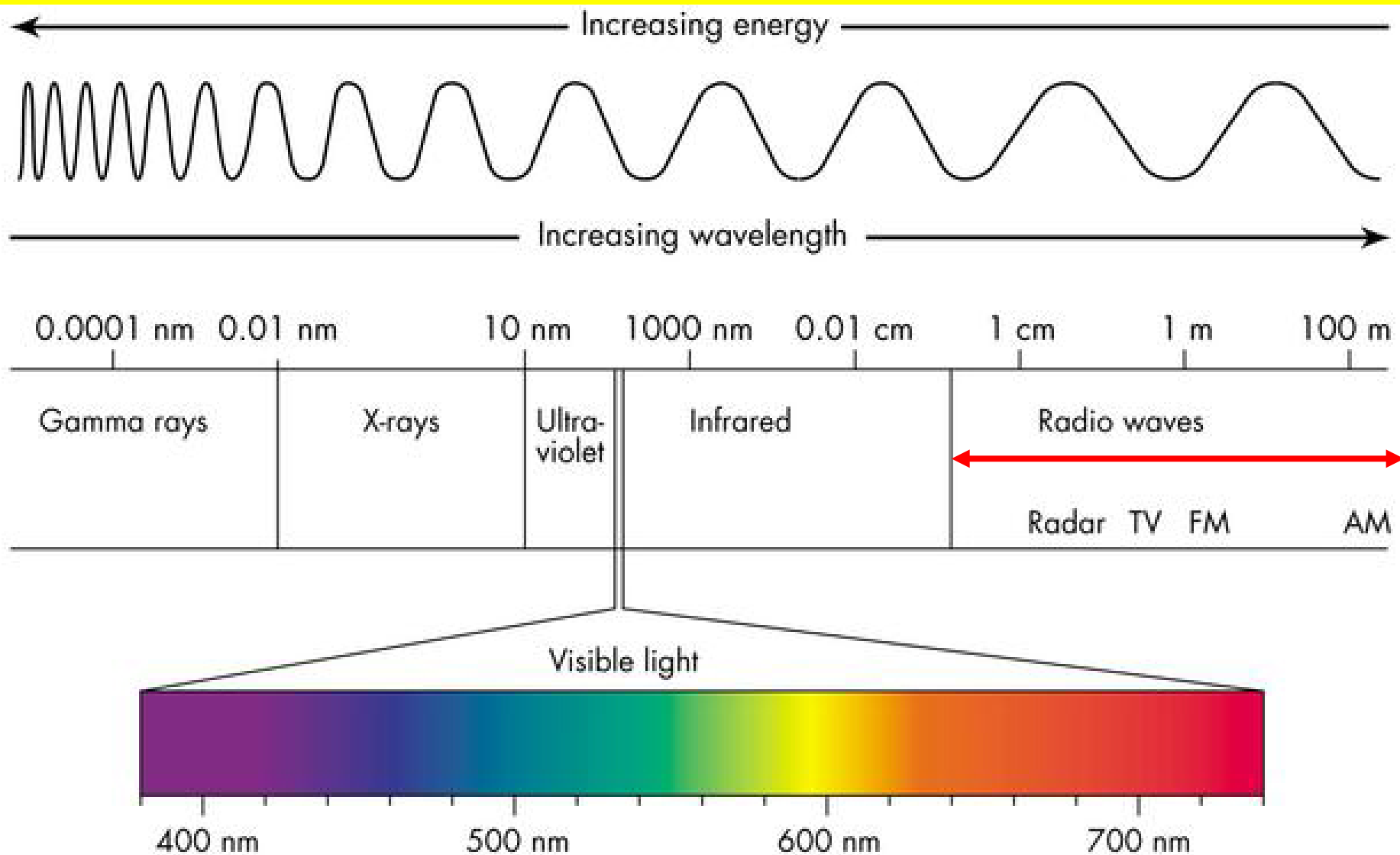
数值模拟研究：由于每个介观等离子元胞都包含有巨大数量的带电粒子，而研究的宏观系统又是由大量元胞组成，特别是这些宏观系统基本上都是开放系统，不确定的边界条件对元胞间的自组织过程及其耗散结构状态具有显著影响，给数值模拟带来困难。

实验观测研究：现代科学本就是在实验验证的基础上建立起来的。不过，地面实验室难以模拟天体环境下的真实等离子体状态，而天体物理学的实验手段主要就是通过天体电磁辐射的观测验证。能够对介观尺度等离子元胞或其元爆发过程的电磁辐射进行有效探测的波段，目前唯有射电波段的辐射才有可能。

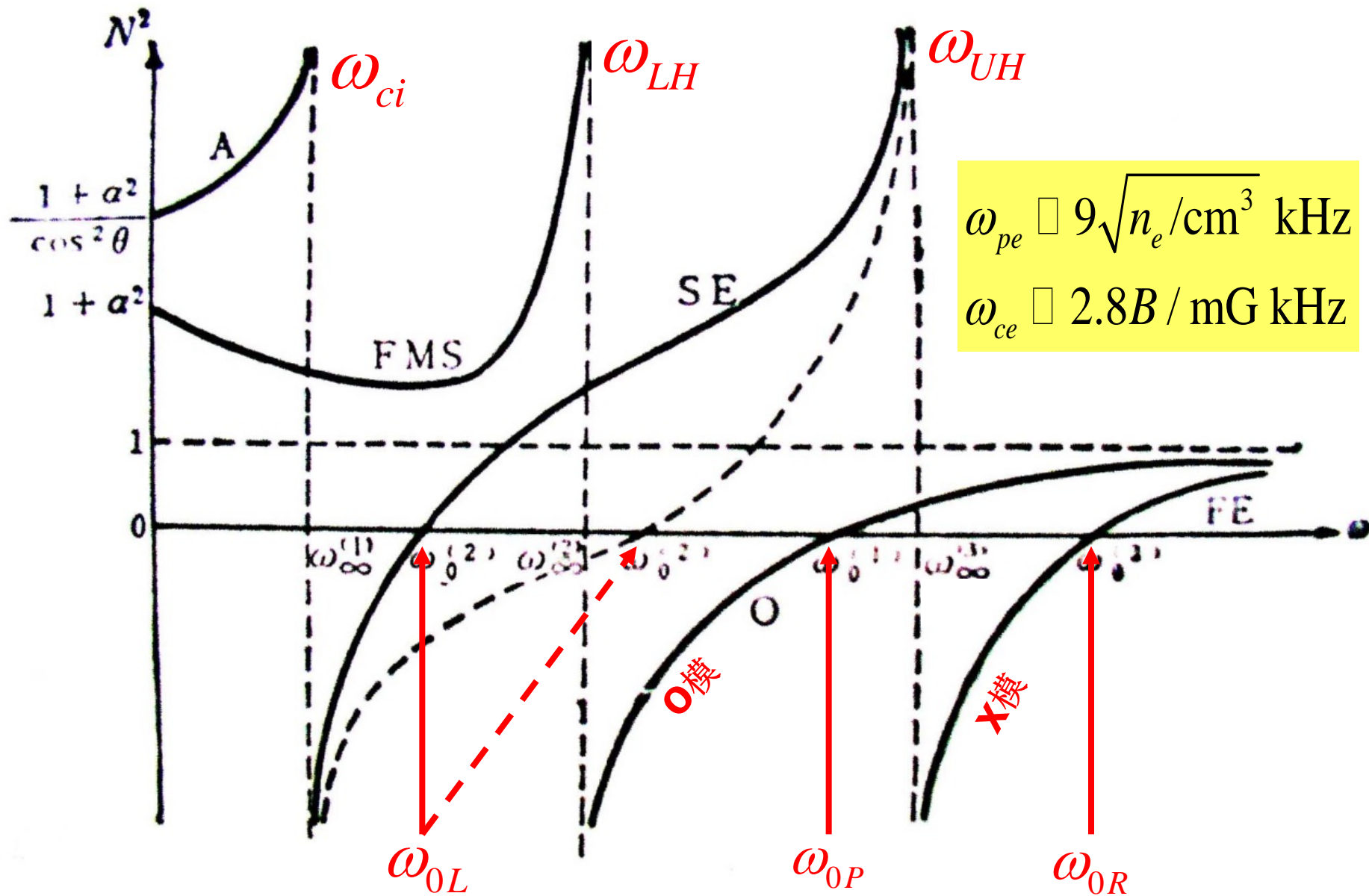
- 等离子天体的介观动力学过程
- 基于射电技术探测研究的优势
- 太阳大气介观动力学过程的射电观测

射电波的波段范围

射电波的波长范围从毫米波到十万米波，跨越8个数量级。



射电辐射与等离子体过程特殊的密切关系



射电辐射机制的复杂性：物理信息最丰富

millimeter bands, for bremsstrahlung generation of X-rays and for the nuclear processes involved in the γ -ray emission. However, at radio wavelengths the situation has become much more complex. Indeed, gyro- and synchrotron emission processes in magnetic fields, although providing excellent results on mapping large-scale structures, have turned out to be of value only on large spatial and long temporal scales. Depending on the magnetic field strength and the energy of the radiating plasma component, radio emission processes may even 'pollute' the electromagnetic spectrum deep into the optical and even into the γ -ray domains. When it comes to the observation of short-time radiation events, which for the time being can be detected only from objects located close-by in our galaxy or from extremely violent remote emitters, these simple classical theories fail. One is then thrown back to the consideration of plasma emission processes, which are accessible either under grossly non-astronomical conditions in the laboratory or with somewhat better correspondence in near-Earth space. This is where progress in understanding those mechanisms has been achieved and with what we will deal in this review.

Over the last few decades it has been realized in observational astronomy

Treumann: The electron-cyclotron maser for astrophysical application (AAR 13, 229, 2006)

- ✓ 背景等离子体密度、磁场等源区环境参量；
- ✓ 辐射电子束能量和速度的分布特征；
- ✓ 辐射源的运动状态；等等

爆发射电辐射提供“立体”诊断手段

辐射源区等离子体特征频率
上产生的辐射

$$\omega \approx \omega_{ce}(B), \omega_{pe}(n_e)$$

- ✓ 其它波段辐射：辐射频率与辐射粒子的能量有关（如光学、X射线）；
- ✓ 射电波段辐射：辐射频率与源区等离子体密度、磁场等环境的特征参量有关；
- ✓ 源区的物理诊断：如果其它波段的诊断比作拍X片（视向叠加，平面诊断信息），射电波段提供的诊断就是做CT片（断层扫描，立体诊断信息）。

除实地测量外，最详尽的天体物理研究手段！与实地测量相比，具有测量空间范围广、持续时间长的优势。

射电爆发辐射机制本身具有相干性特征

- 光学波段：自发热辐射
- X射线波段：自发热/非热辐射
- 射电波段：相干/感应辐射更易探测

单个电子的辐射强度： i

N个电子的总辐射强度： I

- 完全随机辐射： $I_0 = Ni$
- 完全相干辐射： $I_C = N^2 i = NI_0$
- 一般相干辐射： $Ni < I < N^2 i$

单个射电暴中的
相干电子数约为

$$N \sim 10^{20}$$

$$I_C \sim 10^{3-6} I_0$$

射电辐射机制的相干性使其更易在小尺度源内产生探测灵敏度之上的辐射强度，而非相干辐射难以在小尺度源内产生达到探测灵敏度之上的辐射强度，即使提高观测分辨率也将无济于事。

太阳的低射电背景更有利于弱射电暴探测

- From Quiet Sun
- Slowly Varying Component
- Short-Lasting, Rapidly Varying Bursts (Storms)

Releasing total Energy:
 10^{-6} of white-light flare
 10^3 of quiet solar radio

Wild, Smerd & Weiss,
Solar Bursts, ARA&A,
1, 291, 1963

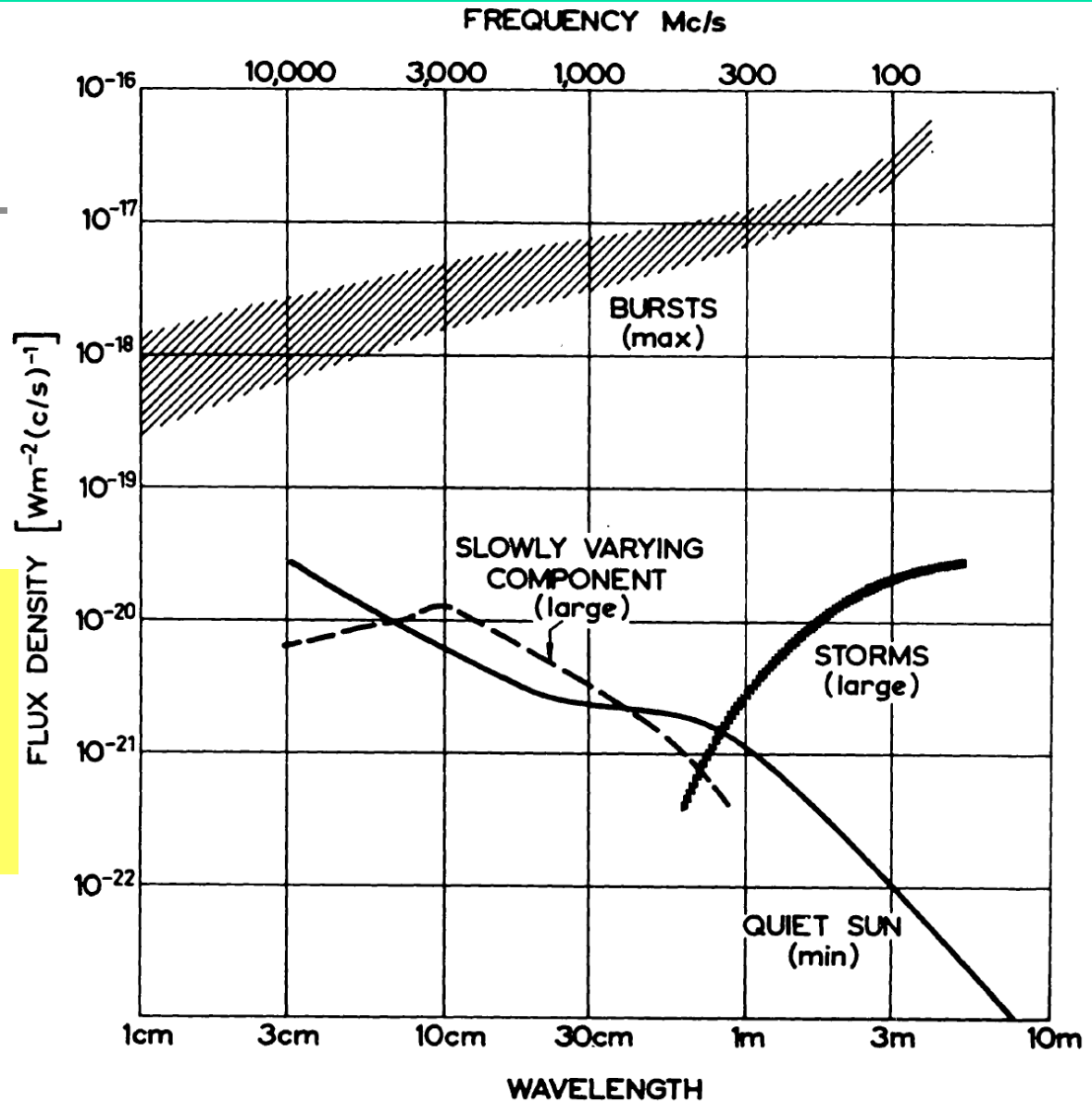
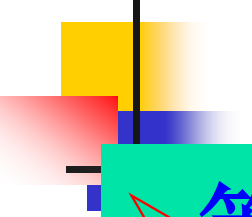
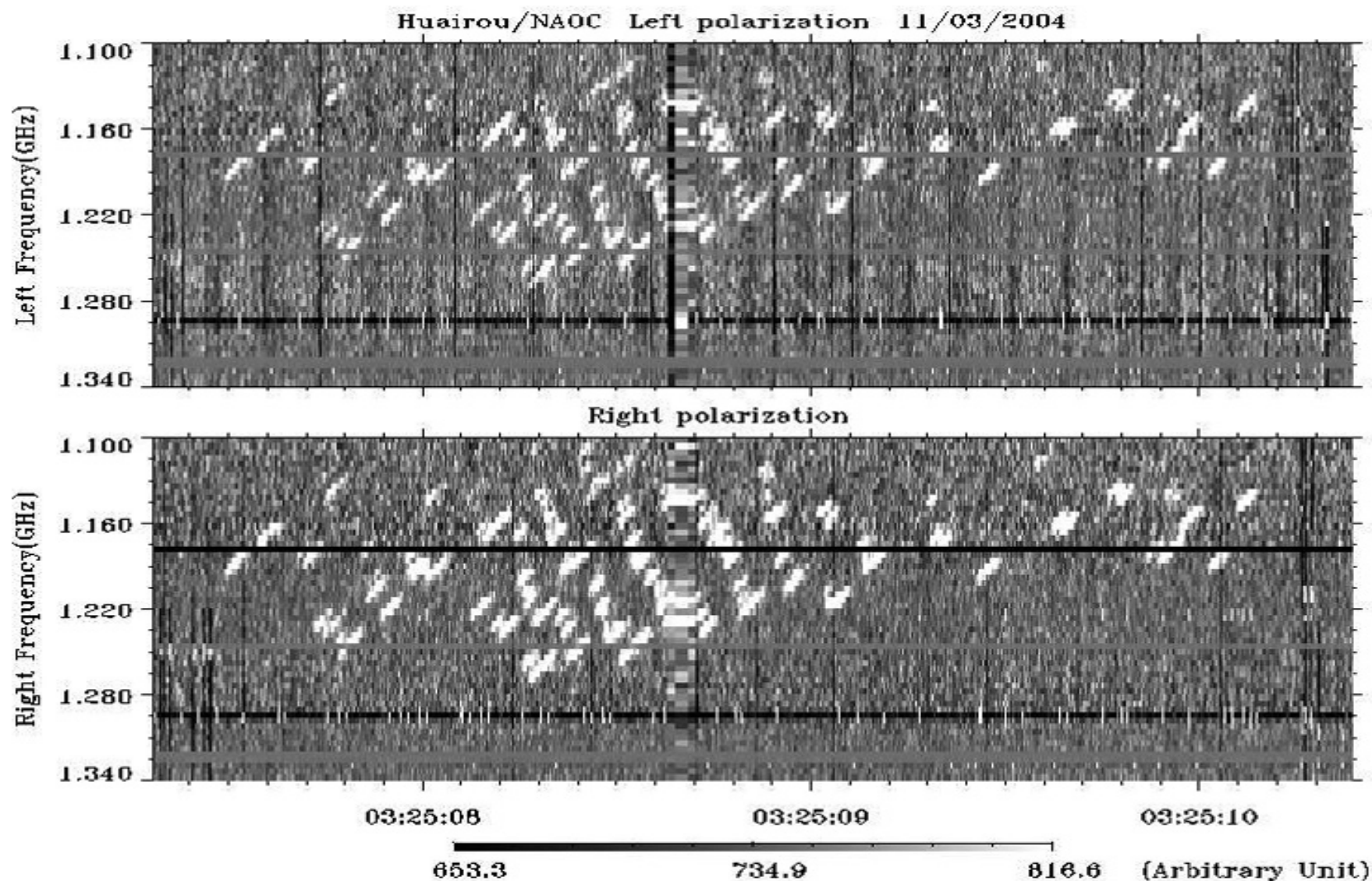


FIG. 1. Indicating the intensity of the various components of solar radio emission.

- 
- 等离子天体的介观动力学过程
 - 基于射电技术探测研究的优势
 - 太阳大气介观动力学过程的射电观测

SMDs Before Several Hours of A Flare

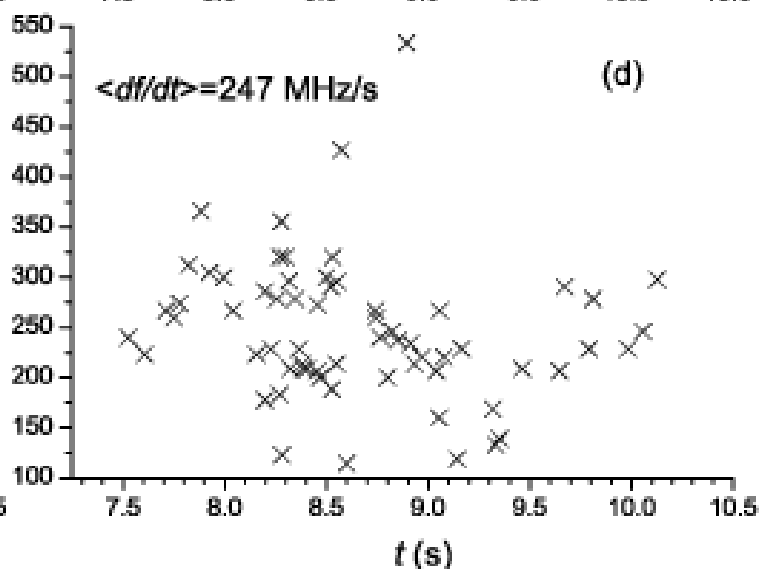
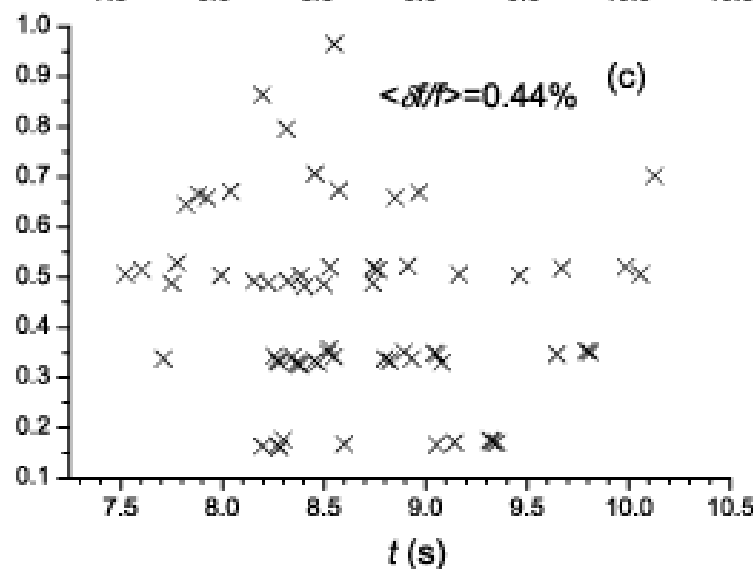
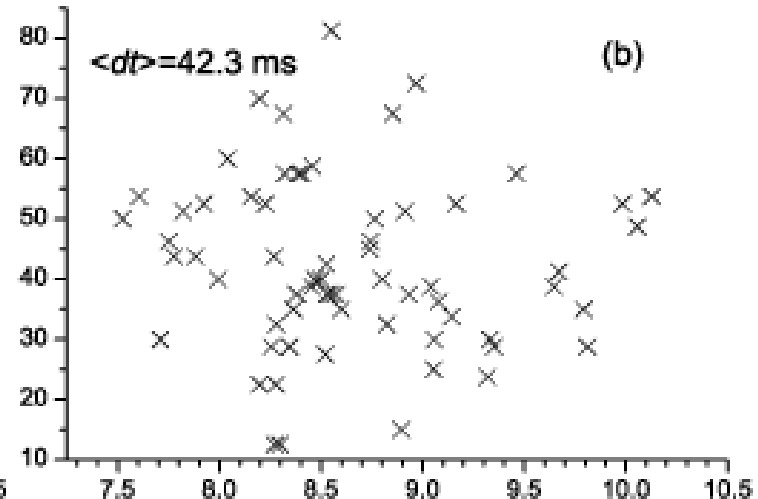
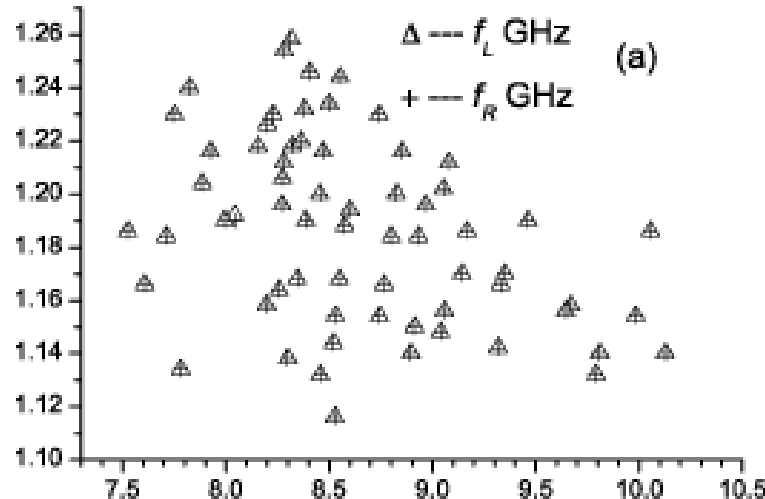
Wu et al., ApJL 665, L171, 2007



Observation Features of SMDs

中心频率: ~ 1.186 GHz

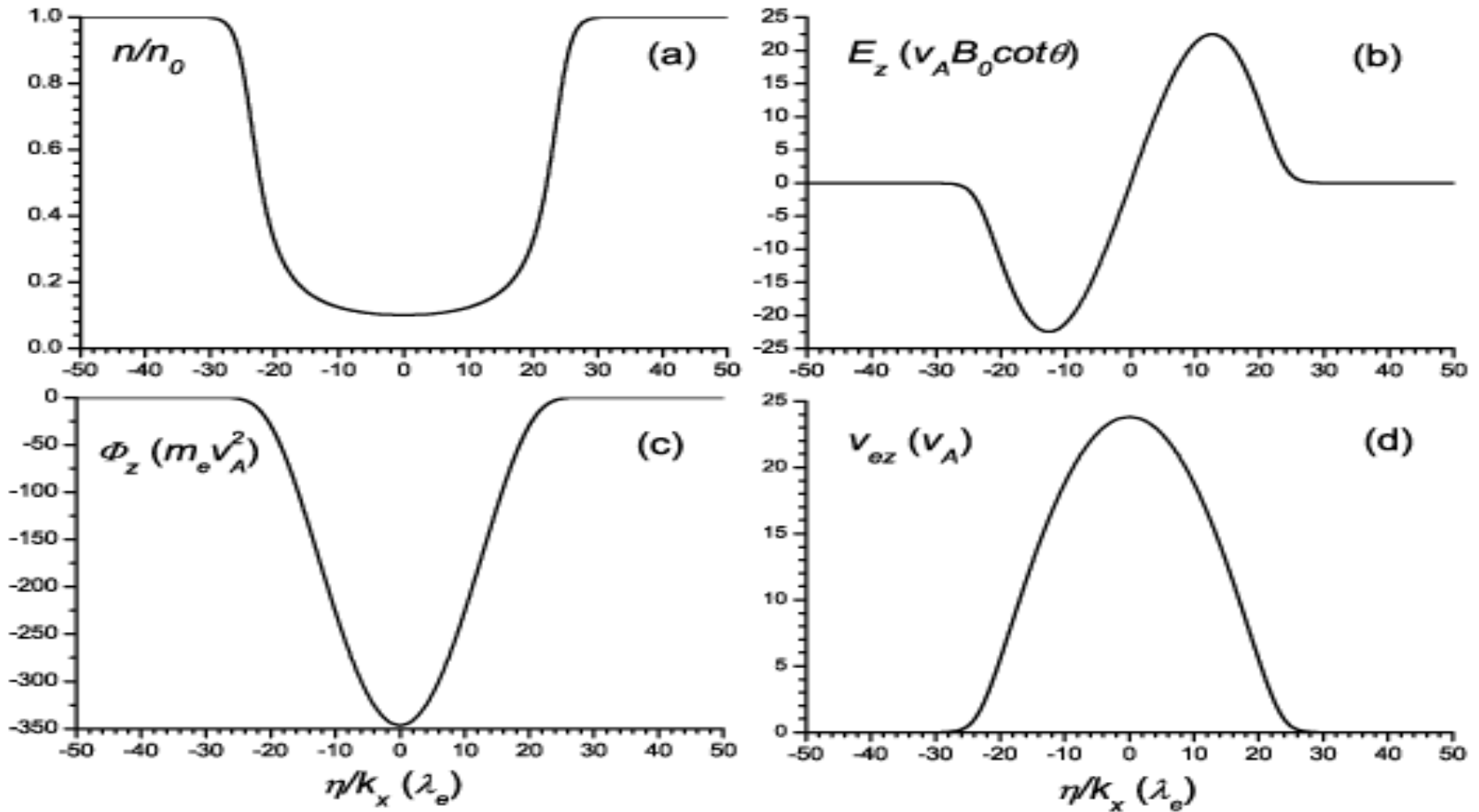
短寿命: $10 \sim 80$ ms



窄带宽: $< 1\%$

中频漂: $100 \sim 550$ MHz/s

Model for Solitary Kinetic Alfvén Waves



密度振幅: ~ 0.9 ; 特征尺度: $\sim 50\lambda_e$; 电子速度: $\sim 20 v_A$

SMDS Model by SKAW

辐射源尺度: $\lambda_{\parallel} \sim (\delta f/f)L \sim 4 \text{ km}$ (Benz, 1986)

横向尺度: $\sim 50\lambda_e \sim 10 \text{ m}$ (\ll 场向尺度)

辐射源速度: $V_A \sim 6000 \text{ km/s}$ ($df/dt \sim 250 \text{ MHz/s}$)

特征频率: $f_A \sim V_A/\lambda_{\parallel} \sim 0.001\text{-}0.01 f_{ci}$ ($\ll f_{ci}$)

辐射源寿命: $\sim 50 \text{ ms}$ (Voitenko & Goossens, 2000)

辐射电子能量: $\sim 50 \text{ keV}$ ($V_{ez} \sim 20V_A \sim 0.4c$)

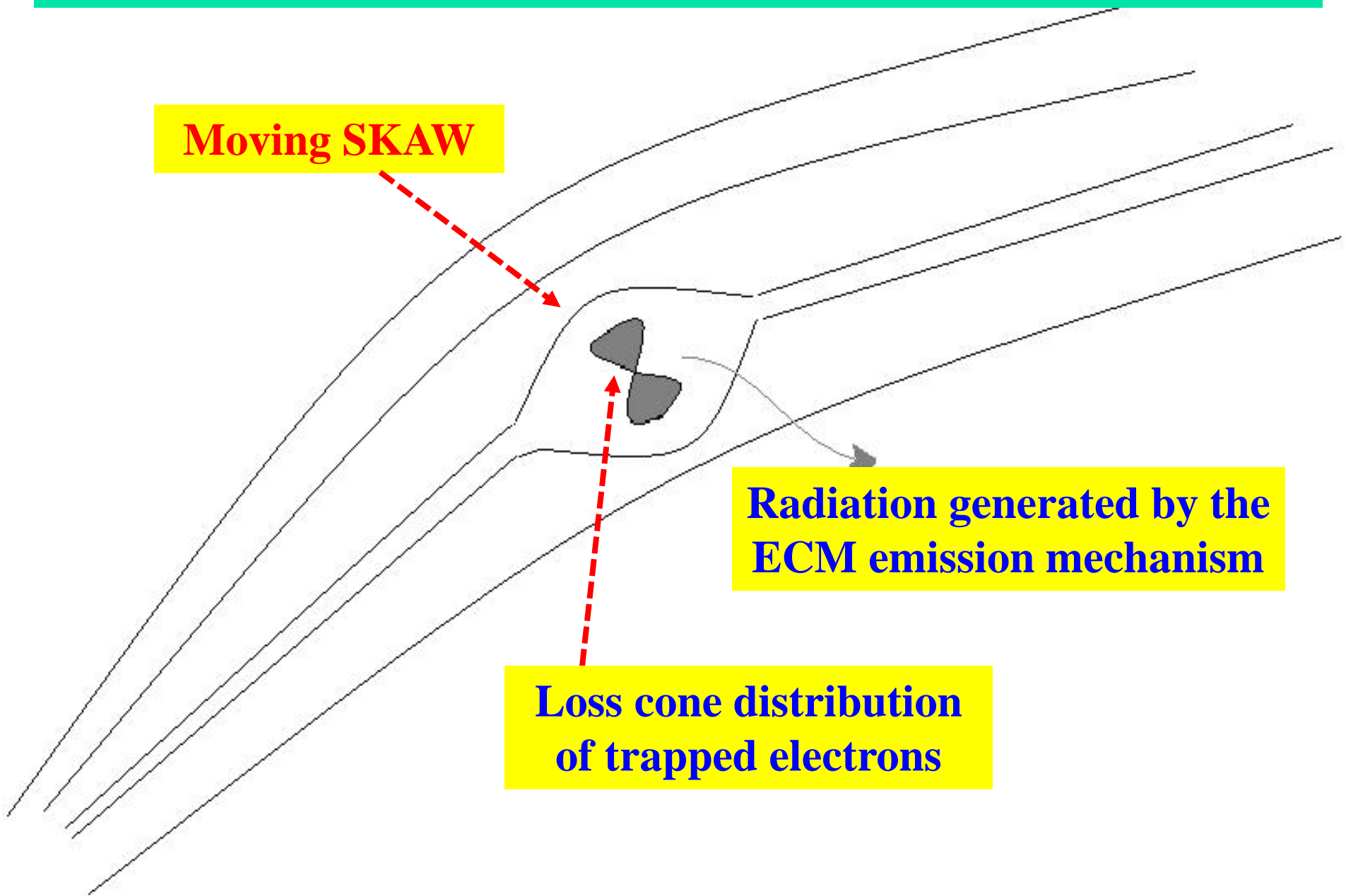
辐射电子密度: $n_b \sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ($n_0 \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$)

Scenario for SMDs Produced by SKAWs

Moving SKAW

**Radiation generated by the
ECM emission mechanism**

**Loss cone distribution
of trapped electrons**



SOLAR MICROWAVE DRIFTING SPIKES AND SOLITARY KINETIC ALFVEN WAVES

D. J. Wu, J. Huang, J. F. Tang, and Y. H. Yan
The Astrophysical Journal, 665: L171–L174, 2007 August 20

presented by
Gelu M. Nita

G. M. Nita, CSTR, NJIT

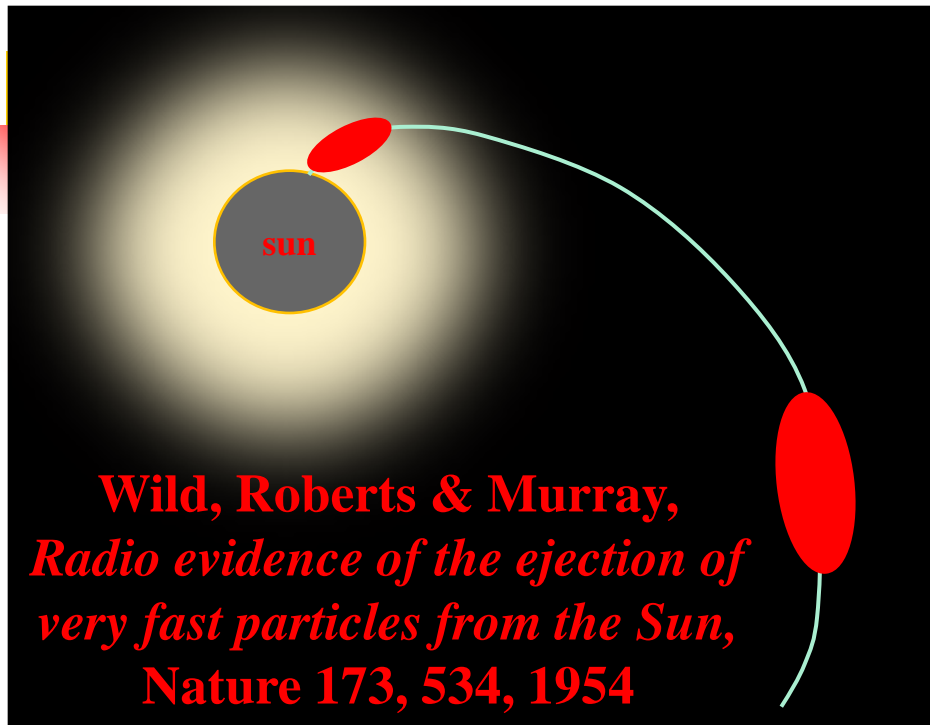


The Frequency Agile Solar Radio telescope (FASR) Subsystem Testbed (FST) is a new, three-element interferometer, utilizing three antennas of the Owens Valley Solar Array.

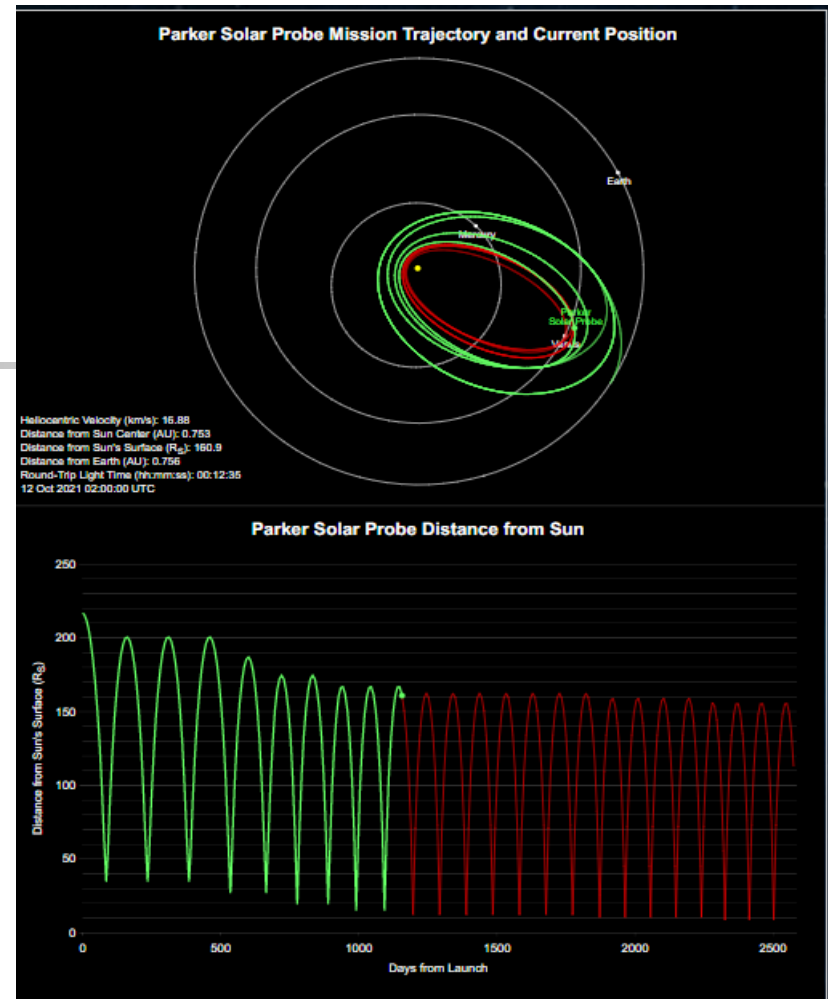
Motivations for selecting this paper

- Mechanisms driving eruptive phenomena and elementary processes occurring at the smallest coherent scales have been outstanding problems in solar physics.
- In this Letter, a novel kind of fine structures of solar radio bursts, “solar microwave drifting spikes” (SMDSs), is reported.
- The frequency range in which these structures were observed and the frequency and time resolutions of the observing instrument exactly match the observational abilities of the NJIT’s FST instrument.
- If proven correct, the interpretation presented in this Letter may provide diagnostics for some characteristic parameters of solar corona in the flaring region, which may be applied if similar events are observed by FST.

PSP: 太阳风加速区



帕克太阳探针卫星的抵近观测

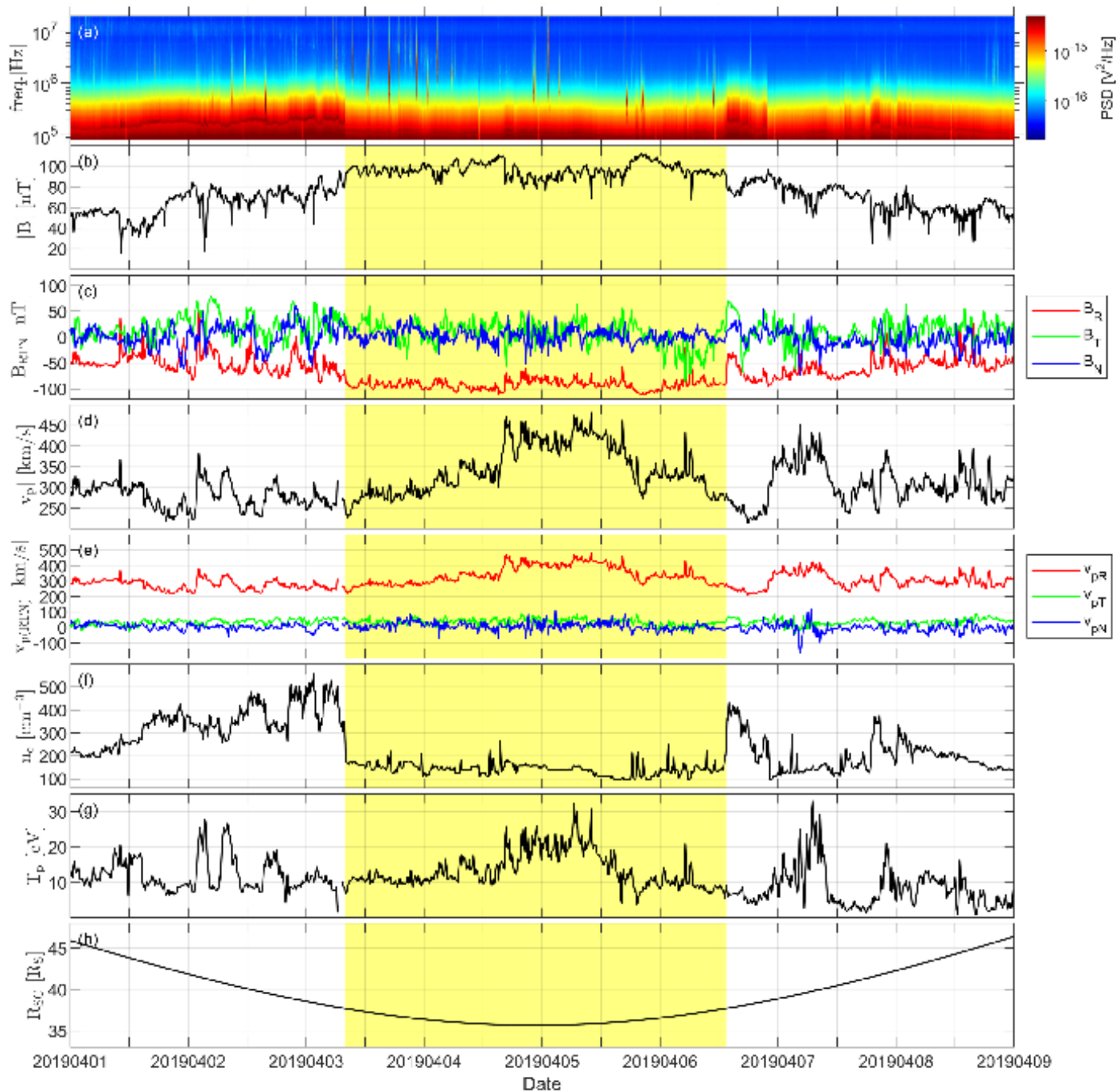


L. Chen, et al., An interplanetary type IIIb SRB observed by PSP and its emission mechanism, ApJL, 915, L22, 2021.

B. Ma, et al., Statistics of low frequency limits for type III SRBs observed by PSP during its encounters 1-5, ApJL, 913, L1, 2021

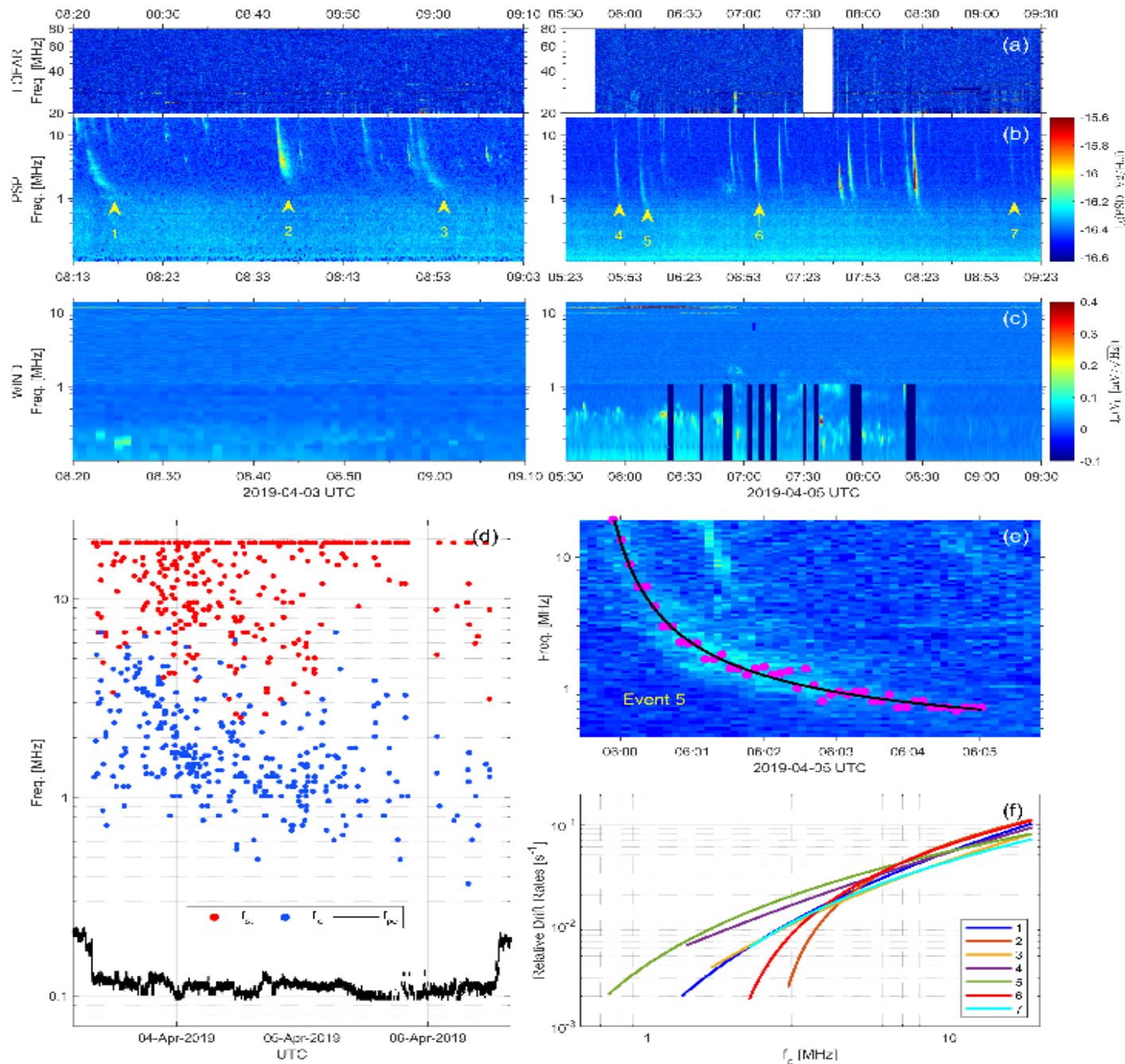
PSP穿越 一个相对 宁静磁通 量管时观 测到大量 小尺度的 弱射电暴

*L. Chen et al.,
ApJ, accepted
(2023)*



进一步的分析显示 这些弱射电暴可能 源自介观尺度孤波 内加速电子的相干 辐射

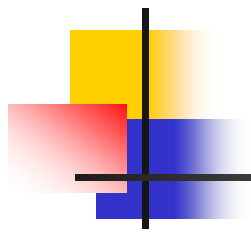
*L. Chen et al.,
ApJ, accepted
(2023)*



总结

等离子体介观动力学过程直接观测的挑战

- ✓ **射电辐射的特殊作用：** 等离子体介观动力学过程是理解等离子体天体宏观高能现象与微观粒子过程间物理联系的关键因素，而射电辐射、尤其是频率接近等离子体特征频率的低频射电辐射在等离子体介观动力学的探测研究上具有独特优势；
- ✓ **需要高分辨率观测：** 观测显示等离子体介观尺度上的元爆发辐射（如孤波辐射）确实是存在的，但其动力学特性的进一步观测分析需要更高分辨率的观测；
- ✓ **需要高灵敏度观测：** 介观尺度上的孤波辐射强度相对微弱，为能够有效观测到介观尺度辐射源动力学谱的精细结构特征，还需要进一步提高观测高灵敏度。



The end

Thanks for your attention