

R007-01

Zoom meeting B : 11/2 PM2 (15:45-18:15)

15:45~16:00

## 次世代太陽風観測のためのデジタルフェーズドアレイ装置の開発2：多段接続による大規模アレイの実現

#岩井 一正<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 名大 ISEE

### Development of digital phased array instrument for next generation solar wind observation system 2: multistage FPGA connection

#Kazumasa Iwai<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> ISEE, Nagoya Univ.

Interplanetary scintillation (IPS) is a radio scattering phenomenon caused by the disturbances in the solar wind. It has been an important technique to investigate the global structure of the heliosphere. The IPS observation requires a large aperture area for the radio telescope to detect the IPS signature from many radio sources, which means the increasing number of the input signal. The next generation IPS observation system will require about 1000 of analog input signals. We have already developed a proto type of the digital phased array instrument. This instrument has 8 analog-digital converters (ADCs) and a field-programmable gate array (FPGA). This system enables us to form 8 beams simultaneously. In this study, we investigated a multistage connection of FPGAs based on the proto type system to develop a larger array system.

A large array antenna requires a separated ADC and FPGA modules, because the ADC modules should be located close to the front-end receivers, while FPGA modules should be in a stable environment. The newly designed system has an independent ADC module and FPGA module that are connected to the optical fibers. Eight of the input signals are digitized in the ADC module and transferred to the FPGA module. Then digital signals are converted to 16384-point complex spectra by the fast Fourier transform on the FPGA, and the beamforming can be performed by adding the eight complex spectra using arbitrary different delay filters. After the beamforming, the complex spectra are transferred to the next FPGA connected by the optical fiber. The next FPGA has eight input port and the same beamforming stage as the first one. Therefore, the FPGA in the second step can combine 64 analog signals. A multistage connection of the FPGAs enables us to form a larger array. FPGAs in all stages have a calibration sequence that makes a calibration table that compensates an amplitude and phase differences of the 8 signals. By Applying this table, we can quickly calibrate the amplitude and phase differences of antennas, receivers, and optical fibers between the FPGAs. We found that an array system of 64 input signal using the 8 ADC modules and 9 FPGA modules can be constructed within a realistic cost.

太陽風中の擾乱が電波を散乱することで惑星間空間シンチレーション (IPS) が発生する。太陽風のグローバルな3次元構造を導出するにはIPS観測が有効である。IPS観測では、散乱現象を検出できる天体数を増やすことで、より詳細に太陽風の空間構造を分解できるため、大規模なアレイアンテナによる高感度な電波観測が望まれる。本研究では、次世代太陽風観測用望遠鏡に搭載することを念頭にデジタルフェーズドアレイ装置の開発を行っている。次世代装置では入力信号数が1000程度になると想定される。これまでの開発研究で、8つのアナログ入力をデジタル処理し、8つのビームを出力できる実証実験機の開発に成功した。今回は、より大規模なアレイを構成することを目的として、実証実験機をベースに、多数の信号処理部を多段に接続したシステムの設計および基礎開発を行った。

大規模なアレイアンテナでは、アンテナを設置する面積が巨大化する。そこで、アンテナフロントエンド近傍に設置すべきAD部と、安定した室内環境への設置が望まれるFPGA部を分離し、両モジュールを長距離伝送用の光ファイバーで接続する構成にした。一つのADモジュールは最大8系統のアナログ信号を入力できる。FPGAモジュールでは、光ファイバーから8系統のデジタル信号に対して最大16384点のフーリエ変換を行い8つの複素スペクトルを生成し、それぞれに任意の異なる遅延フィルタをかけ加算することでビームフォーミングを行う。ビームフォーミング後の複素スペクトルを光ファイバーケーブルで接続した2段目のFPGAモジュールに伝送する。この2段目のFPGAモジュールに8個の入力ポートを設け、1段目と同様の8系統の信号をビームフォームする演算を実装することで、このFPGAモジュールでは64系統のアナログ信号を合成できることになる。この方式を多段に繰り返すことで、更に大規模なアレイを形成できる。全てのFPGAモジュールには各入力信号の位相と振幅が等しくなるよう調整できる校正テーブルを自動的に作成する校正システムを実装した。このことで、途中の光ファイバーによる伝送系を含めた校正を可能にした。将来の大規模アレイに向けた第一段階として64チャンネルの信号を8台のADモジュールと9台のFPGAモジュールで処理する系を実際に設計し、実現可能性を評価した結果、現実的なコストで建設可能であることがわかった。

**R007-02**

**Zoom meeting B : 11/2 PM2 (15:45-18:15)**

**16:00~16:15**

## **Distribution of Solar Wind Sources at the solar surface from 1985 to 2016**

#Kenichi Fujiki<sup>1</sup>, Munetoshi Tokumaru<sup>2</sup>, Kazumasa Iwai<sup>3</sup>)

(<sup>1</sup>ISEE., Nagoya Univ., (<sup>2</sup>ISEE, Nagoya Univ., (<sup>3</sup>ISEE, Nagoya Univ.

The global solar wind structure is usually observed as latitudinal bimodal structure, i.e. the slow solar wind (SSW) in lower latitudes and the fast solar wind (FSW) around the poles. The width of the SSW belt strongly depends on solar activity. During a solar minimum, the SSW belt is confined in a narrow region around the equator (20 deg.). The SSW belt extends to higher latitudes in a rising phase and covers the whole Sun during a solar maximum. Then, the SSW belt shrinks to lower latitudes in a declining phase. In JpGU 2021 meeting, we reported a good correlation ( $r \sim 0.7$ ) between the boundary latitude of the fast-slow solar wind and the tilt angle of the heliospheric current sheet (1). The high correlation indicates that the solar wind sources at lower latitudes increase during high solar activity periods. In this study, we determine the solar wind source region at the solar surface by the PFSS approximation of the coronal magnetic field using the synoptic magnetogram at Kitt Peak National Solar Observatory from 1985 to 2016. Each footpoint cluster of open magnetic fluxes on the solar surface is labeled as an isolated open flux region (a candidate of a coronal hole) by the coronal hole detection algorithm (2). Then, physical properties such as the average magnetic field strength, the physical area, the magnetic flux expansion rate, and the centroid coordinate of each open flux region are calculated. The average speed of the solar wind originated from each open flux region are derived from the interplanetary scintillation (IPS) observation at ISEE/Nagoya University. We plot the solar wind source on a butterfly map produced by using open magnetic field footpoints and compare the properties of the open flux region and solar wind speed. In this presentation, we discuss the variation of the distribution of solar wind sources and the connection to the global structure of the solar wind.

### References:

(1) Fujiki et al, JpGU2021, PEM14-P03, 2021, "Simple Estimation of the Global Solar Wind Structure"

(2) Fujiki et al, ApJL, p827, L41, 2016, "LONG-TERM TREND OF SOLAR CORONAL HOLE DISTRIBUTION FROM 1975 TO 2014"

**R007-03**

**Zoom meeting B : 11/2 PM2 (15:45-18:15)**

**16:15~16:30**

## **かにパルサーの巨大電波パルスを用いたサイクル24/25極小期における太陽コロナ密度測定**

#徳丸 宗利<sup>1)</sup>, 前田 龍哉<sup>1,2)</sup>, 俵 海人<sup>1,2)</sup>, 岳藤 一宏<sup>3)</sup>, 寺沢 敏夫<sup>4)</sup>

(<sup>1</sup>名大 ISEE,<sup>2</sup>名大・理・宇地研,<sup>3</sup>NICT 鹿島,<sup>4</sup>東大・宇宙線研

## **Coronal density measurements at Cycle 24/25 minimum using giant radio pulses of the Crab pulsar**

#Munetoshi Tokumaru<sup>1)</sup>, Ryuya Maeda<sup>1,2)</sup>, Kaito Tawara<sup>1,2)</sup>, Kazuhiro Takafuji<sup>3)</sup>, Toshio Terasawa<sup>4)</sup>

(<sup>1</sup>ISEE, Nagoya Univ.,<sup>2</sup>ISEE,Nagoya Univ.,<sup>3</sup>KSTC, NICT,<sup>4</sup>ICRR, U. Tokyo

Observations of the Crab pulsar have been conducted since 2017 at the Toyokawa observatory of Institute for Space-Earth Environmental Research (ISEE) of Nagoya University using the 327-MHz radiotelescope called the Solar Wind Imaging Facility Telescope (SWIFT). We derived dispersion measures (DMs), which represent the integration of electron density along the line of sight (LOS), from Crab pulsar observations. The LOS for the Crab pulsar approaches to the sun as close as 5 solar radii every mid-June; therefore, Crab pulsar DMs enable investigation of the plasma density distribution near the sun. We detected increases in DM, which were ascribed to the effect of the coronal plasma, from Crab pulsar observations in June 2018 and 2019. We determined the plasma density distribution near the sun by fitting a spherically symmetric model to observed DM increases. The best fit model had a flat radial slope, which was attributed to the effect of the coronal hole over the poles. This interpretation was verified from comparison between our DM data and LOASCO/C3 coronagraph observations. Further, the coronal density model obtained here was similar to that derived from earlier studies using DM measurements in solar minima or declining phases of the past solar cycles. This suggests that the plasma density level of this minimum remained unchanged from those in the past cycle despite of significant weakening solar activity in this cycle. A marked decline in the solar wind density was reported from in situ measurements in the Cycle 23/24 minimum and early part of the Cycle 24. In this study, we argued possible explanations to reconcile our result with earlier studies.

**R007-04**

**Zoom meeting B : 11/2 PM2 (15:45-18:15)**

**16:30~16:45**

## 太陽観測衛星の画像データを用いた磁気中性線の自動抽出システムの構築

#赤松 直<sup>1)</sup>, 山本 真行<sup>1)</sup>, 伴場 由美<sup>2)</sup>, 今田 晋亮<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 高知工科大, <sup>2)</sup> 名大

### Construction of an automatic extraction system for magnetic neutral lines using image data from solar observation satellites

#Nao Akamatsu<sup>1)</sup>, Masayuki Yamamoto<sup>1)</sup>, Yumi Bamba<sup>2)</sup>, Shinsuke Imada<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> KUT, <sup>2)</sup> Nagoya University

In this study, we used the observation data of the solar observation satellite SDO (Solar Dynamics Observatory) launched by NASA to automatically detect the local magnetic field structure that triggers the occurrence of solar flare, which is an explosion phenomenon on the sun. Flare occurs more frequently when solar activity becomes active, and when high-energy particles due to flare reach the earth, large-scale damage to earth orbiting satellites, aircrafts, transmission and distribution networks, communications, etc. may occur. So far, the sun has been observed by various methods, and research on the mechanism of solar flare generation has been conducted. Above all, the question of "when, where, and on what scale flare occurs", that is, "what triggers flare" remains as an extremely important issue when considering the space weather around the earth. Previous studies have produced results on the elucidation of the flare trigger mechanism using observation data from the Japanese solar observation satellite "Hinode" (Bamba, 2013). After that, a comparison was made using SDO observation data for the purpose of increasing the number of flare events and increasing the data sample for statistical analysis of the triggering process, and flare triggers can also be detected in the SDO observation data as was shown by Bamba et al. (2014).

Firstly, we attempted image analysis of M6.6 flare that occurred on February 13, 2011 in order to analyze one event with referring to the method of Banba (2013). The SDO observation data was downloaded from the Joint Science Operation Center (JSOC), loaded into Solar Software, and command line input was appropriately performed on the IDL (Interactive Data Language) CUI system to display the image. I have been handling image data on the system while working according to the SDO observation data analysis manual etc. that have been prepared so far to deepen my understanding. As a result, it was possible to extract a rough magnetic neutral line from a manually enlarged image of an arbitrary active area. From here, in order to analyze a finer structure, we are studying the optimum application method of image processing technology such as filter processing. In this presentation, we will use two types of simultaneous observation images observed by HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) and AIA (Atmospheric Imaging Assembly) among the SDO observation data, and automatically generate magnetic neutral lines for any active region. We will discuss the construction method of the extraction system and introduce the initial results.

本研究では、NASA が打ち上げた太陽観測衛星 SDO(Solar Dynamics Observatory) の観測データを用いて、太陽における爆発現象である太陽フレアが発生する際の、きっかけとなる局所磁場構造を自動検出するシステムを開発する。フレアは太陽活動が活発になった時に発生頻度が増え、フレアによる高エネルギー粒子が地球に到達すると地球周囲衛星、航空機、送配電網、通信等に大規模な被害が発生する場合がある。これまで様々な方法で太陽が観測され、太陽フレア発生機構に関する研究が行われてきた。中でも、「フレアがいつ・どこで・どの程度の規模で発生するのか」すなわち「何がフレアをトリガするのか」という問題は、地球周辺の宇宙天気を考える上でも極めて重要な課題として残されている。これまでの研究で、日本の太陽観測衛星「ひので」の観測データを用いたフレアトリガメカニズムの解明に関する成果が挙げられた(伴場, 2013)。その後、フレアのイベント数を増やしトリガプロセスの統計的な分析のためのデータサンプルを増やすことを目的として、SDO の観測データを用いた比較が行われ、SDO の観測データでもフレアトリガが検出可能であることが示された(伴場他, 2014)。

最初に、伴場 (2013) の手法を参考に 1 例の解析を行うべく 2011 年 2 月 13 日に発生した M6.6 フレアを対象に画像解析を試みた。SDO の観測データを Joint Science Operation Center(JSOC) からダウンロードし、Solar Software に読み込ませ、IDL(Interactive Data Language)CUI システム上でコマンドライン入力を行って画像表示させた。これまでに整備されている SDO 観測データ解析マニュアル等に沿って作業を行い理解を深めながら、システム上で画像データを扱ってきた。その結果として、手作業による任意の活動領域の拡大画像に対して、大まかな磁気中性線の抽出ができた。ここからさらに微細な構造の解析を行うため、フィルタ処理等の画像処理技術の最適な適用方法について検討を行っている。

本発表では、SDO 観測データのうち、HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) および AIA (Atmospheric Imaging Assembly) により観測された 2 種類の同時観測画像を用い、任意の活動領域に対して磁気中性線を自動抽出するシステムの構築手法について議論し、初期結果を紹介する。

R007-05

Zoom meeting B : 11/2 PM2 (15:45-18:15)

16:45~17:00

## 電波掩蔽観測による太陽風中の短周期密度変動の検出

#千葉 翔太<sup>1)</sup>, 今村 剛<sup>2)</sup>, 安藤 紘基<sup>3)</sup>

(<sup>1)</sup> 東大・新領域・複雑理工, (<sup>2)</sup> 東京大学, (<sup>3)</sup> 京産大

## Short-period density fluctuations in the solar wind detected in spacecraft radio signals

#Shota Chiba<sup>1)</sup>, Takeshi Imamura<sup>2)</sup>, Hiroki Ando<sup>3)</sup>

(<sup>1</sup>Complexity Science, University of Tokyo, (<sup>2</sup>The University of Tokyo, (<sup>3</sup>Kyoto Sangyo University

Radio occultation observations of the solar corona by spacecraft are made during solar conjunction. The inhomogeneity of density pattern in the solar wind plasma disturbs radio wave's phase, and we can derive the spatial structure of density fluctuations in the solar wind from received radio wave's phase fluctuations (e.g., Efimov et al., 2012, Woo and Armstrong, 1981). Quasi-periodic electron density fluctuations have been detected, termed as quasi-periodic component (QPC), with spacecraft radio occultation experiments and identified them as acoustic waves (e.g., Efimov et al., 2012, Miyamoto et al., 2014). Although the mean scale of the QPCs is about  $10^4$ - $10^5$  km, it is suggested by radio scintillation observations that the dissipation scale of turbulence around 10 solar radii is several km to 10 km (e.g., Coles and Harmon, 1989). We need to detect waves with a shorter wavelength than that detected so far and evaluate the energy transport. However, removing the ambiguity of the period  $2\pi$  on phase signals from high time-resolution data is difficult due to the limitation by the S/N ratio.

太陽コロナの電波掩蔽観測では、探査機から送信された電波が密度に濃淡のあるプラズマ(太陽風)を通過する際に、屈折率の不均一構造から生じる受信電波の周波数、位相や強度の擾乱から太陽風中の密度擾乱の空間構造を知ることが出来る(Efimov et al., 2012, Woo and Armstrong, 1981)。これまでに周波数変動から波長  $10^4$ - $10^5$  km の準周期的な密度変動がとらえられているが(e.g., Efimov et al., 2012, Miyamoto et al., 2014)、電波強度の観測からは空間スケール数 km~10 km 程で乱流が散逸することが示唆されており(e.g., Coles and Harmon, 1989)、このスケール間をつなぐ物理プロセスの解明が求められる。そのためにはこれまでの研究よりも短波長の波動までを検出してエネルギー輸送を評価する必要がある。しかし S/N 比の制約から、信号位相が持つ  $2\pi$  の整数倍の不定性をそのような高い時間分解能で除去することは困難であった。

JAXA の金星探査機「あかつき」の搭載する超高安定発振器(USO)は安定した高周波(8.4GHz)の信号を生成する発振器で、電波掩蔽観測に用いている。「あかつき」は今までに、太陽活動の極大期から極小期にかけてさまざまな太陽活動時期で電波掩蔽観測を行っており、累計数百時間にわたって記録された前例のない高品質かつ膨大なデータセットをもつ。本研究では、「あかつき」の掩蔽データのうち、位相擾乱の少ない $\sim 6$ 太陽半径より遠方の位相時系列データについて Wavelet 解析を行い、およそ数 100 km の空間スケールの波長に対応する細かな空間スケールの周期的な密度変動を検出した。本発表では、これらの解析の現段階での結果を報告する。

**R007-06**

**Zoom meeting B : 11/2 PM2 (15:45-18:15)**

**17:00~17:15**

## **太陽活動第23-24周期での Ordinary type III burst と Micro type III burst の出現特性の太陽活動依存性**

#関 佑一朗<sup>1)</sup>, 三澤 浩昭<sup>1)</sup>, 小原 隆博<sup>1)</sup>, 土屋 史紀<sup>1)</sup>, 増田 智<sup>2)</sup>, 岩井 一正<sup>3)</sup>, 森岡 昭<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 東北大・理・惑星プラズマ大気研究センター, <sup>2)</sup> 名大 STE 研, <sup>3)</sup> 名大 ISEE

## **Occurrence dependence on solar cycle for ordinary and micro type III bursts in solar cycles 23 and 24**

#Yuichiro Seki<sup>1)</sup>, Hiroaki Misawa<sup>1)</sup>, Takahiro Obara<sup>1)</sup>, Fuminori Tsuchiya<sup>1)</sup>, Satoshi Masuda<sup>2)</sup>, Kazumasa Iwai<sup>3)</sup>, Akira Morioka<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>PPARC, Tohoku Univ., <sup>2)</sup>STEL, Nagoya Univ., <sup>3)</sup>ISEE, Nagoya Univ.

Type III bursts are one of intense solar radio emissions and generally show a large negative frequency drift. Some of them originate above solar active regions and appear with solar flares. These type III bursts are hereafter referred to as ordinary type III bursts. On the other hand, type III bursts sometimes appear as clusters which are characterized by thousands of short-lived type III bursts lasting for a few days or more than a week (type III storm). Morioka et al. (2007; 2015) proposed the term ‘micro type III bursts’, which are elements of a type III storm. They also suggested that micro type III bursts originate near the edge of coronal streamers and are not just weaker forms of the ordinary type III bursts because a distribution of emitted power flux is different from that of ordinary type III bursts.

Generation processes of type III bursts are thought that high-energy electrons originally generated with magnetic reconnections excite Langmuir waves in the solar corona and/or interplanetary space, then the Langmuir waves are converted into electromagnetic waves, which are observed as type III bursts. It is therefore generally considered that the frequency of type III bursts reflects the plasma density in the solar corona and/or interplanetary space where the radio waves are generated, and their frequency drift rates (DRs) reflect the plasma density distribution and the radial velocity of high-energy electrons. The radial velocity of high-energy electrons is determined by not only the velocity of high-energy electrons but the radial component of the magnetic field along which the high-energy electrons propagate.

It is well known that density distributions of the solar plasma differ depending on the activity of solar surface area (ex. Aschwanden and Acton, 2001). This implies that the plasma density distribution varies with the solar cycle and therefore the DRs of type III bursts might show solar cycle dependence. Although the occurrence rates of type III bursts are known to show a positive correlation with solar cycle, our knowledge for solar cycle dependence of the DRs has been still limited (ex. Zhang et al., 2018). Moreover, there has been no study that classifies types of type III bursts as ordinary or micro, and analyzes long-term variations of their DRs.

In this study, we have investigated occurrence features of DRs for ordinary and micro type III bursts to clarify their solar cycle dependences. For this purpose, we have tried to make statistical analyses of type III bursts using a database of solar radio spectra observed with the Nancay Decameter Array (NDA). We have analyzed the low-resolution data (175 kHz frequency resolution, 1 second time resolution) of the NDA.

An automatic burst detection system was newly developed to make the statistical analyses. Threshold methods, Convolution Neural Network (CNN) methods, and least squares methods with curve fitting are applied to our detection system. From candidates of type III bursts detected by this system, we finally selected ordinary and micro type III bursts through a visual check.

Using the developed automatic detection system, we analyzed type III bursts for totally 10 years, 2012-2014 as around the solar maximum, 2007-2009 and 2017-2020 as around solar minimum, and detected about totally 3,500 simple well-isolated type III bursts, whose DRs are calculable. A preliminary result shows that the averages of DRs with a standard deviation at 40[MHz] for micro type III bursts are  $5.7 \pm 1.9$ [MHz/s] and  $6.6 \pm 2.3$ [MHz/s] around the solar maximum and minimum, respectively, while those for ordinary type III bursts are  $6.3 \pm 2.0$ [MHz/s] and  $7.0 \pm 2.6$ [MHz/s]. Although the differences in the average DRs are not more than  $1 \sigma$  for solar activities and types of bursts, the analyses suggest that the DRs for the ordinary type III bursts are larger than those of micro type III in both solar minimum and maximum, and the DRs for the solar minimum are larger than those for the solar maximum.

It is expected that larger DRs are produced by the energetic electrons moving faster (case-1), in steeper density gradients (case-2) and/or along magnetic fields with larger radial components (case-3). In order to understand the results of the DR differences, we are currently making careful evaluation especially for the possibilities of case-2 and 3.

In the presentation, we will show solar cycle dependence for the occurrence characteristics of both ordinary and micro type III bursts with the discussion of their expected background processes.

Acknowledgments: The solar radio spectrum data was provided by the Nancay Observatory, Observatoire de Paris, France. We would appreciate Dr. L. Lamy and the NDA operation group.

Type III burst は突発的な太陽電波放射の一つであり、大きな負の周波数ドリフトを示す特徴を持つ。Type III burst がフレアに伴って発生する場合、その type III burst を ordinary type III burst と呼ぶ。一方、Type III burst には、顕著なフレアを伴わずに発生し、数多くの継続時間の短い burst が断続的に長期間出現する場合があります、この現象を Type III storm と呼んでいる。Morioka et al. (2007; 2015) では Type III storms を構成する個々のバーストを micro type III burst と名付けた。Micro type III burst は ordinary type III burst と比べ概して電波強度が弱く、coronal streamer の端付近で発生していることが示唆されている。

Type III burst の発生過程として、磁気リコネクションに起因して生成・加速された高エネルギー電子が太陽コロナ・惑星空間中を磁力線に沿って伝搬する際に Langmuir 波を励起し、Langmuir 波が電磁波に変換され放射されると考えられている。従って、Type III burst の周波数は電波が発生する場所の太陽コロナ・惑星空間でのプラズマ密度を反映し、その周波数ドリフト率はプラズマ密度分布と高エネルギー電子の沿磁力線方向の速度を反映することになる。プラズマ密度分布は、一般に動径方向の関数として与えられているため、周波数ドリフトの解析から Type III burst 発生に関わる物理過程・状態を考察するには、電子が移動する磁場の向きの情報も重要となる。

太陽コロナのプラズマ密度分布は太陽表層域の活動状態によって異なることが知られている (ex. Aschwanden and Acton, 2001)。このことは、太陽活動周期の時間スケールで考えた場合、プラズマ密度分布が広域的には太陽活動度に応じて異なることを示唆する。Type III burst と太陽活動度との関係については、その出現頻度が活動度と正の相関を示すことは知られている。その一方で、コロナのプラズマ密度分布や電波励起源の高エネルギー電子速度が関係する周波数ドリフト率と太陽活動度の関係についての解析例は限られている (ex. Zhang et al., 2018)。また、ordinary type III burst と micro type III burst を分別し、それらの周波数ドリフト率の長期変動を同時に探査した研究は今までなされていない。

そこで本研究では、

(1) 太陽活動周期の時間スケールで、ordinary type III burst と micro type III burst の周波数ドリフト率が出現特性を示すのか、

(2) その変動特性はどのような物理過程・状態でもたらされるのか、

を明らかにしていくことを目的に、Type III burst の周波数ドリフト率の長期変化の解析を行った。この目的のために、長期間の太陽電波スペクトル連続観測が行われているフランスパリ天文台 Nancay Decameter Array (NDA) の低分解能データ (周波数分解能 175kHz、時間分解能 1sec) を使用した。

解析では、Type III burst の統計的な出現特性を捉えるために、Type III burst の自動検出プログラムを作成した。自動検出プログラムでは閾値法、CNN 法、そして曲線フィッティングを用いた最小二乗法を用いている。検出された Type III burst の候補から、今回の解析で扱う burst を目視で選定した。

開発した自動検出プログラムを用いて、2012 年-2014 年を太陽極大期付近の期間、2007 年-2009 年と 2017 年-2020 年を太陽極小期付近の期間とし、10 年分の観測データから約 3,500 イベントの解析可能な type III burst を検出した。40MHz での周波数ドリフト率の解析を行った結果、micro type III burst の周波数ドリフト率の平均値±標準偏差 ( $1\sigma$ ) は太陽極大期付近で  $5.7 \pm 1.9$ [MHz/s]、太陽極小期付近で  $6.6 \pm 2.3$ [MHz/s] となった。一方で、ordinary type III burst の周波数ドリフト率は太陽極大期で  $6.3 \pm 2.0$ [MHz/s]、太陽極小期付近で  $7.0 \pm 2.6$ [MHz/s] となった。各バーストの太陽活動度による周波数ドリフト率の違いや、同じ時期のバーストの違いによる周波数ドリフト率の違いは何れも  $1\sigma$  を超えないが、ordinary type III burst の方が micro type III burst よりも周波数ドリフト率が大きくなる傾向や、太陽極小期付近の burst の方が太陽極大期付近の burst よりも周波数ドリフト率が大きくなる傾向が見て取れる。

より大きな周波数ドリフト率を持つバーストを生成する要因として、☑高エネルギー電子の速度が速いこと、☑発生域のプラズマ密度が急勾配であること、および、☑電子伝搬路の磁場の向きが動径方向に近いこと、が挙げられる。現在、観測された周波数ドリフト率の特徴を理解するべく、特に☑と☑についての考察を慎重に進めている。

講演では、検出された Type III burst の統計解析に基づき、太陽活動度による長期変動特性を示すとともに、変動の背景にある物理過程・状態の考察を行う予定である。

謝辞：太陽電波スペクトルデータは、フランスパリ天文台 Nancay 観測所により提供された。L. Lamy 博士他 NDA 運用グループに感謝申し上げます。

**R007-07**

**Zoom meeting B : 11/2 PM2 (15:45-18:15)**

**17:15~17:30**

## **太陽 II 型および III 型電波バーストと高エネルギー粒子現象との関係**

#三澤 浩昭<sup>1)</sup>, 土屋 史紀<sup>2)</sup>, 小原 隆博<sup>3)</sup>, 関 佑一朗<sup>4)</sup>

(<sup>1)</sup> 東北大・理・惑星プラズマ大気研究センター, (<sup>2)</sup> 東北大・理・惑星プラズマ大気, (<sup>3)</sup> 東北大・惑星プラズマ研究センター, (<sup>4)</sup> ピーパーク

## **Relationship between solar energetic particle events and metric ? kilometric type II/III radio bursts**

#Hiroaki Misawa<sup>1)</sup>, Fuminori Tsuchiya<sup>2)</sup>, Takahiro Obara<sup>3)</sup>, Yuichiro Seki<sup>4)</sup>

(<sup>1)</sup>PPARC, Tohoku Univ., (<sup>2)</sup>Planet. Plasma Atmos. Res. Cent., Tohoku Univ., (<sup>3)</sup>PPARC, Tohoku University, (<sup>4)</sup>PPARC

It is known that type II and III bursts are sporadic and intense solar non-thermal radio phenomena, which are generally generated with coronal mass ejection (CME) and flare events, respectively. The bursts are also known to be highly correlated with the occurrence of solar energetic particles (SEP) with the energy of more than the MeV grade (ex. Miteva et al., 2017): type II bursts often occur with 'gradual' type SEP events, while type III bursts often occur with 'impulsive' type SEP events (ex. Reams, 2012). Since the fluence of energetic particles of gradual SEP events are generally larger than the that of impulsive SEP events, type II bursts are often more intensively analyzed to investigate their relationship, such as spectral characteristics of type II bursts with the magnitude of SEP. However, a theoretical study based on diffusive shock acceleration for generating sufficient amount of 'gradual SEP' requires pre-accelerated 'seed' particles (ex. Tylka & Lee, 2006). One of the candidates of the 'seed' particles is thought to be those generated though flares, so the investigation of the relationship between gradual SEP events and type III bursts is also important as well as that for type II bursts.

We have analyzed the relationship between SEP events and metric to kilometric type II/III radio bursts for investigating which spectral characteristics of the bursts including fine structures affect fluence & energy of SEP. In the analyses we have used the radio wave data observed by the IPRT/AMATERAS and Zao systems (Tohoku Univ.) in the metric - decametric wave ranges, the Nancay Decametric Array (Obs. de Paris) in the decametric wave range and the WIND/WAVES in the hectometric - kilometric wave ranges in main. In the presentation, we will introduce results of the analyses and discuss relationship between SEPs and spectral characteristics of type II/III bursts and also among them.

**R007-08**

**Zoom meeting B : 11/2 PM2 (15:45-18:15)**

**17:30~17:45**

## **An event study on electrostatic solitary wave excitation and electron distributions in the lunar wake boundary**

#Masaki N Nishino<sup>1</sup>, Yoshiya Kasahara<sup>2</sup>, Yuki Harada<sup>3</sup>, Yoshifumi Saito<sup>1</sup>, Hideo Tsunakawa<sup>1</sup>, Atsushi Kumamoto<sup>4</sup>, Shoichiro Yokota<sup>5</sup>, Futoshi Takahashi<sup>6</sup>, Masaki Matsushima<sup>7</sup>, Hidetoshi Shibuya<sup>8</sup>, Hisayoshi Shimizu<sup>9</sup>, Yukinaga Miyashita<sup>10,11</sup>

<sup>(1)</sup>JAXA, <sup>(2)</sup>Kanazawa Univ., <sup>(3)</sup>Dept. of Geophys., Kyoto Univ., <sup>(4)</sup>Dept. Geophys, Tohoku Univ., <sup>(5)</sup>Osaka Univ., <sup>(6)</sup>Kyushu Univ., <sup>(7)</sup>Tokyo Tech, <sup>(8)</sup>Doshisha University, <sup>(9)</sup>ERI, University of Tokyo, <sup>(10)</sup>KASI, <sup>(11)</sup>KUST

Electrostatic solitary wave (ESW) is a plasma wave commonly seen in space, and it is observed as broadband electrostatic noises (BENs) in frequency-time spectrograms due to its nature of the solitary waveforms. In the plasma environment around the Moon, spacecraft observations in recent decades have shown the existence of ESWs, but their excitation mechanism is not fully understood. Here we revisit an ESW event in the wake boundary previously reported by Hashimoto et al. (2010), focusing on the relation between BENs and electron pitch-angle distribution functions. We show that upward electron beams from the nightside lunar surface are effective for the excitation of ESWs, in contrast to the original interpretation by Hashimoto et al. (2010) that high-energy electrons accelerated by strong ambipolar electric fields generate ESWs in the region far from the Moon. When the BENs were observed by the Kaguya spacecraft in the wake boundary, the spacecraft's location was magnetically connected to the nightside lunar surface, and bi-streaming electron distributions of downward-going solar wind strahl component and upward-going field-aligned beams (at  $\sim 124$  eV) were detected. The interplanetary magnetic field was dominated by a positive  $B_z$  (i.e. the northward component), and strahl electrons travelled in the anti-parallel direction to the interplanetary magnetic field (i.e. southward), which enabled the strahl electrons to precipitate onto the nightside lunar surface directly. The incident solar wind electrons cause negative charging of the nightside lunar surface, which generates downward electric fields that accelerate electrons from the nightside surface toward higher altitudes along the magnetic field. The bidirectional electron distribution is not a sufficient condition for the ESW excitation, and the distribution of upward electron beams seems to be correlated with the ESW excitation. Ambipolar electric fields in the wake boundary should also contribute to the electron acceleration toward higher altitudes and the further intrusion of the solar wind ions into the deeper wake. We suggest that solar wind ion intrusion into the wake boundary is also an important factor that controls the excitation of ESWs by facilitating the influx of solar wind electrons there.

**R007-09**

**Zoom meeting D : 11/3 AM1 (9:00-10:30)**

**9:00~9:15**

## **Energy density composition in the inner heliosheath affected by pickup ions**

#Ken Tsubouchi<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>The University of Electro-Communications

The pressure equilibrium between the solar wind and the interstellar medium forms the heliosphere. Therefore, a precise evaluation of the energy density on the solar wind side (inner heliosheath; IHS) is necessary to understand the outer structure of the heliosphere, assuming the uniform interstellar environment. Recent observations by New Horizons estimated the density of pickup ions (PUIs) in the termination shock to be approximately 25% of the solar wind plasma. Because of its effectively high thermal energy, PUIs are the principal component in the pressure in the IHS. The presence of PUIs modifies the Rankine-Hugoniot relation at the termination shock, consequently affecting the energy partitioning between the plasma and the magnetic field in the downstream IHS. In this talk, I will present the results of hybrid simulations that contain the actual scale in the radial dimension showing the self-consistent formation of the termination shock and the heliopause. The effect of PUIs on the energy density composition in the IHS and the resultant variations in the IHS spatial scale are quantitatively verified.

R007-10

Zoom meeting D : 11/3 AM1 (9:00-10:30)

9:15~9:30

## 「ひさき」衛星による惑星間空間のヘリウム光学観測

#山崎 敦<sup>1)</sup>, 村上 豪<sup>2)</sup>, 吉岡 和夫<sup>3)</sup>, 木村 智樹<sup>4)</sup>, 土屋 史紀<sup>5)</sup>, 北元<sup>6)</sup>, 桑原 正輝<sup>7)</sup>, 益永 圭<sup>8)</sup>, 鍵谷 将人<sup>9)</sup>, 坂野井 健<sup>10)</sup>, 寺田 直樹<sup>11)</sup>, 笠羽 康正<sup>12)</sup>, 吉川 一朗<sup>13)</sup>, ひさき (SPRINT-A) プロジェクトチーム<sup>1)</sup>

(<sup>1)</sup>JAXA/宇宙研, (<sup>2)</sup>JAXA/宇宙研, (<sup>3)</sup>東大・新領域, (<sup>4)</sup>Tokyo University of Science, (<sup>5)</sup>東北大・理・惑星プラズマ大気研究センター, (<sup>6)</sup>東北大工業大学, (<sup>7)</sup>立教大, (<sup>8)</sup>JAXA/宇宙研, (<sup>9)</sup>東北大・理・惑星プラズマ大気研究センター, (<sup>10)</sup>東北大・理・惑星プラズマ大気研究センター, (<sup>11)</sup>東北大・理・地物, (<sup>12)</sup>東北大・理・惑星プラズマ大気研究センター, (<sup>13)</sup>東大・新領域

## EUV observation of neutral helium distribution in interplanetary space by Hisaki

#Atsushi Yamazaki<sup>1)</sup>, Go Murakami<sup>2)</sup>, Kazuo Yoshioka<sup>3)</sup>, Tomoki Kimura<sup>4)</sup>, Fuminori Tsuchiya<sup>5)</sup>, Hajime Kita<sup>6)</sup>, Masaki Kuwabara<sup>7)</sup>, Kei Masunaga<sup>8)</sup>, Masato Kagitani<sup>9)</sup>, Takeshi Sakanoi<sup>10)</sup>, Naoki Terada<sup>11)</sup>, Yasumasa Kasaba<sup>12)</sup>, Ichiro Yoshikawa<sup>13)</sup>, Hisaki (SPRINT-A)<sup>1)</sup>

(<sup>1)</sup>JAXA/ISAS, (<sup>2)</sup>ISAS/JAXA, (<sup>3)</sup>The Univ. of Tokyo, (<sup>4)</sup>Tokyo University of Science, (<sup>5)</sup>PPARC, Tohoku Univ., (<sup>6)</sup>Tohotech, (<sup>7)</sup>Rikkyo Univ., (<sup>8)</sup>JAXA/ISAS, (<sup>9)</sup>PPARC, Tohoku Univ., (<sup>10)</sup>PPARC, Tohoku Univ., (<sup>11)</sup>Dept. Geophys., Grad. Sch. Sci., Tohoku Univ., (<sup>12)</sup>PPARC, Tohoku Univ., (<sup>13)</sup>The Univ. of Tokyo

Interstellar medium flows into the heliosphere due to relative motion of the heliosphere and interstellar medium as interstellar wind. The main components of interstellar medium are neutral hydrogen and helium, and neutral particles can penetrate the heliosphere beyond the heliopause. Once neutrals are ionized by the solar ultraviolet light in the heliosphere, they are picked up by the solar wind and return back to the heliopause. Only neutral helium, however, can penetrate deep near the sun, because the ionization rate is low due to the high ionization energy.

The motion of neutral particles in the heliosphere is determined by solar gravity and solar radiation pressure. The orbits of helium atoms show Keplerian motions because the term of radiation pressure can be negligible. As a result, dense regions are formed on the downwind side of the interstellar wind. This is called a helium cone. The neutral helium distribution in the helium cone is dependent on the velocity and direction of the interstellar wind and the density and temperature of helium atoms in the interstellar medium. Although optical observation of neutral helium is a traditional study that has been done since the 1970s, it is a valuable method because it is possible to estimate the parameters of interstellar medium from the observation in interplanetary space.

The "Hisaki" (SPRINT-A) satellite has an extreme ultraviolet spectrograph with the wavelength range including resonance scattered light of helium atoms. Its main aim is to continuously observe magnetospheres and ionospheres of solar system planets, such as Jupiter, Mars, and Venus. Observation of resonance scattered light from helium atoms in interplanetary space is also carried out as an optional observation, when "Hisaki" passes through the helium cone between November and December from 2015 to 2020.

The direction and speed of interstellar wind are estimated by comparing the observation results with the emission distribution calculated from the simple model of helium cone formation. As a result, it is confirmed that the direction and speed of interstellar wind are consistent with previous observation results by other satellites, and that the direction of interstellar wind is temporally stable.

太陽圏と星間物質には相対速度があり、星間物質が星間風として太陽圏に衝突している。星間物質の主成分は水素とヘリウムであり、そのうち中性成分はヘリオポーズを超えて太陽圏に侵入することが可能である。太陽圏内で太陽の紫外線を受けてイオン化すると太陽風にヒックアップされヘリオポーズへ戻されるが、イオン化エネルギーの高いヘリウムはイオン化率が低く、ほとんどが中性のまま太陽近傍にまで深く侵入することができる。

太陽圏内での中性粒子の軌道は太陽重力と太陽光放射圧によって決まるが、放射圧の項はほとんど無視できるためヘリウム原子はケプラー運動をする。その結果、太陽の星間風の風下側に密度の濃い領域が形成され、ヘリウムコーンと呼ばれる。ヘリウムコーンのヘリウム分布は、星間風の速さと方向、星間空間でのヘリウム原子の密度と温度によって決定づけられる。1970年代から実施されている伝統的な研究方法であるが、惑星間空間に滞在しながら星間物質のパラメータ推定が可能であり、貴重な観測方法である。

「ひさき」(SPRINT-A)衛星は、極端紫外分光装置を搭載しており、ヘリウム原子の共鳴散乱光を検出することが可能である。「ひさき」の主目的は、木星、火星、金星などの太陽系惑星の磁気圏や電離圏の長期間にわたる連続惑星観測であるが、オプション観測として惑星間空間に分布するヘリウム原子からの共鳴散乱光観測も2015年から実施している。

ヘリウムコーン形成モデルから計算した発光分布と観測結果を比較することにより、星間風の方向と速さを推測した。その結果、これまでの他衛星の観測と一致することを確認し、星間風の方向と速さは時間的に安定していることを確認した。

R007-11

Zoom meeting D : 11/3 AM1 (9:00-10:30)

9:30~9:45

## 銀河宇宙線の振る舞いにおける太陽圏境界の役割に関する数値シミュレーション研究

#吉田 光太郎<sup>1)</sup>, 松清 修一<sup>1,2)</sup>, 鷺見 治一<sup>2)</sup>, 羽田 亨<sup>1,2)</sup>

(<sup>1)</sup> 九大・総理工, (<sup>2)</sup> 九大・国際宇宙天気科学・教育センター

### Simulation study on the roles of heliospheric boundaries in the behavior of galactic cosmic rays

#Kotaro Yoshida<sup>1)</sup>, Shuichi Matsukiyo<sup>1,2)</sup>, Haruichi Washimi<sup>2)</sup>, Tohru Hada<sup>1,2)</sup>

(<sup>1)</sup> IGSES, Kyushu Univ, (<sup>2)</sup> ICSWSE, Kyushu Univ

Most of the galactic cosmic rays (GCRs) coming from interstellar space are prevented from entering the heliosphere. Only a fraction of them can propagate deep inside the heliosphere and be observed on the Earth. The motion of a charged particle in the heliosphere is quite complex because of the solar modulation effects. Our goals in this study are to understand how the GCRs enter and reach deep inside the heliosphere and to determine the statistical behaviors of solar modulated GCRs at the level of particle trajectory.

We perform three-dimensional test particle simulation using electromagnetic field data of the heliosphere reproduced by an MHD simulation, which assumes that the solar magnetic field has positive polarity with zero tilt angle. Initially, a large number of monoenergetic protons are distributed in interstellar space and injected in random direction to the interstellar magnetic field.

In this presentation, we focus on the roles of heliospheric boundaries in particle orbit and statistics. For the particles with  $\gamma=10$  ( $\sim 10\text{GeV}$ ), invading particles propagate in the region where the local magnetic field is weak, e.g., the heliopause and the equatorial current sheet, where  $\gamma$  is the Lorentz factor. Particles are hard to propagate upstream the termination shock due to the supersonic outflow of the solar wind. Finally, a relatively large number of particles reach the high latitude inner boundary (at 50 AU from the Sun). Particles with  $\gamma=1000$  ( $\sim 1\text{TeV}$ ) level are almost insensitive to the small-scale structures of the heliosphere because of their large-gyro radius. Hence, Particles easily come into and out from the heliosphere. Some particles can resonate with the large-scale eddies in the tail region. Some other particles passing by the heliosphere are mirror reflected by the bottleneck structure of interstellar magnetic field surrounding the heliosphere and return to the heliosphere. The number of particles reaching the inner boundary is larger (smaller) at the tail (nose) side than average.

In the current simulation realistic effects such as the presence of MHD waves, the variation of magnetic polarity due to the solar activity, finite tilt angle of the solar magnetic moment, are omitted. These effects are essential for more accurate discussions and should be included in future works.

星間空間から飛来する銀河宇宙線のほとんどは太陽圏への侵入を妨げられる。圏内へ侵入した一部の粒子は、太陽変調による極めて複雑な運動を経験して地球で観測される。本研究の目的は、銀河宇宙線が太陽圏へどのように侵入して伝搬するのか、太陽変調による銀河宇宙線の統計的挙動、を粒子軌道のレベルで明らかにすることである。

本研究では、正極性、チルト角0度の定常太陽風磁場を仮定したMHD計算で再現された太陽圏の電磁場データを用いてテスト粒子計算を行った。多数の単一エネルギーのプロトンを星間空間に配置して、その後の粒子の軌道およびその統計を解析する。

本講演では特に太陽圏境界の役割に焦点を当て、ローレンツ因子  $\gamma=10$  ( $\sim 10\text{ GeV}$ ) と  $\gamma=1000$  ( $\sim 1\text{TeV}$ ) の粒子の統計的振る舞いについて議論する。 $\gamma=10$  の粒子は、太陽圏界面や赤道面電流シートなど、局所的に磁場が弱い領域に多く分布する。また、超音速太陽風の流れにより、深部まで伝搬してきた粒子は終端衝撃の上流を伝播しづらなことが確認された。最終的に、比較的多くの粒子が内側境界（太陽から50AU地点）の高緯度域に到達する。一方、 $\gamma=1000$  の粒子は、ジャイロ半径が大きいため、太陽圏のローカルな構造の影響をほとんど受けない。そのため、粒子は太陽圏を容易に出入りできる。一部の粒子は、太陽圏尾部の乱流によって共鳴的に散乱されることが確認された。また太陽圏をかすめて通り去ろうとする粒子のいくつかは、太陽圏を取り巻く星間磁場のボトルネック構造によってミラー反射され、太陽圏に侵入する。そして内側境界に到達した粒子の数は、境界の尾部（前部）側で多く（少なく）なることが確認された。

現在の計算モデルにおいては、太陽活動の影響（MHD波動、太陽磁場の極性の変化、チルト角の効果）は省いている。これらの効果はより正確な議論に不可欠であり、今後含める必要がある。

R007-12

Zoom meeting D : 11/3 AM1 (9:00-10:30)

9:45~10:00

## 地球バウショックにおけるホイッスラー波と電子加速効率の関係性

#増田 未希<sup>1)</sup>, 天野 孝伸<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup> 東京大学 地球惑星科学専攻, (<sup>2)</sup> 東大・理

### Relation between whistler waves and electron acceleration efficiency at Earth's bow shock

#Miki Masuda<sup>1)</sup>, Takanobu Amano<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup> Department of Earth and Planetary Science, Univ., (<sup>2)</sup> University of Tokyo

Non-thermal high-energy particles are frequently observed in space. Collisionless shock waves are one of the sources of acceleration of these particles. In fact, non-thermal particles with a power-law energy spectrum have been observed around collisionless shock waves in some events. However, how and when particle acceleration occurs at collisionless shock is not yet fully understood. For example, the first-order Fermi acceleration is a promising candidate for the acceleration process of particles with a power-law energy spectrum. In this mechanism, particles in the vicinity of the shock are trapped around the shock due to pitch-angle scattering by MHD waves. However, low-energy electrons cannot resonate with MHD waves. Other mechanisms are necessary to accelerate electrons to intermediate energies where the Fermi acceleration becomes efficient. To solve this problem, Katou & Amano (2019) proposed stochastic shock drift acceleration. The cyclotron resonant scattering with higher frequency waves plays an important role in this mechanism. The most promising candidate for the scatterer is whistler waves, which have frequencies from 10% to 50% of the electron cyclotron frequency. In this study, we consider the relation between whistler waves and electron acceleration in collisionless shock.

Oka et al. (2006) statistically investigated the relationship between the shock parameters and electron acceleration efficiency. They showed that the ratio between Alfvén Mach number to the whistler critical Mach number ( $M_A/M_{crit}^w$ ) correlates very well with the electron acceleration efficiency. Note that  $M_{crit}^w$  is defined with respect to the group velocity of the whistler wave normal to the shock, which leads to  $M_{crit}^w \propto \cos \theta_{Bn}$ . Oka et al. (2006) showed that harder energy spectra were found only at supercritical shocks with respect to the whistler critical Mach number ( $M_A/M_{crit}^w > 1$ ). That suggests that the whistler wave plays a significant role in electron acceleration, but the specific mechanism has not yet been understood.

Katou & Amano (2019) and Amano et al. (2020) predicted that electron acceleration occurs only when the intensity of the whistler wave exceeds a certain threshold which depends on frequency. This threshold is strongly dependent on  $M_A^{\Delta} = M_A / \cos \theta_{Bn}$ , and qualitatively consistent with Oka et al. (2006). However, since the wave intensity may generally vary with Mach number or  $\theta_{Bn}$ , more detailed investigation is necessary to confirm the theory.

The purpose of this study is to investigate the validity of this threshold statistically at Earth's bow shock. We use the data of shock crossing events observed by Magnetospheric MultiScale (MMS) spacecraft in burst mode. First, we confirmed that particles around the shock have a power-law energy spectrum. We integrate the data observed by Fast Plasma Investigation (FPI) integrated over 1s and calculated the time variation of the spectral index by fitting. To investigate the changes in the index between upstream and downstream we used the fast survey mode data as well. We also calculate the time variation of the wave power spectrum in the frequency band of the whistler wave by using Search Coil Magnetometers (SCM) at a 1s interval. Using these high time resolution data, we can resolve the internal structure of the shock. Based on the above data, we will discuss the relation between the whistler wave intensity (both absolute and relative to the theoretical threshold) and the electron acceleration efficiency.

宇宙空間には非熱的な高エネルギー荷電粒子が存在している。それらの粒子の加速源の一つとして無衝突衝撃波が挙げられ、実際に一部のイベントで無衝突衝撃波の周辺でベキ型のエネルギースペクトルを持つ非熱的粒子が観測されている。しかし、無衝突衝撃波における具体的な粒子の加速メカニズムや加速が起こる条件などについては未解明の点も残されている。例えば、ベキ型のスペクトルを持つ粒子の加速過程の候補として一次フェルミ加速がある。このメカニズムでは衝撃波近傍の粒子がMHD波動のピッチ角散乱により衝撃波周辺に捕捉される。しかし、低エネルギー電子はMHD波動と共鳴できないためフェルミ加速が効率的になる中間エネルギーまでの加速には他のメカニズムが必要であると考えられている。この課題に対してより高周波の波動とサイクロトロン共鳴散乱を考える統計的衝撃波ドリフト加速が提唱された (Katou & Amano, 2019)。散乱体として一番有力な候補が、サイクロトロン周波数の10%から50%程度の周波数を持つホイッスラー波である。本研究ではこのホイッスラー波と無衝突衝撃波における電子加速の関係性について考える。

衝撃波パラメータと電子加速効率の関係性を統計的に調べた先行研究として Oka et al. (2006) が挙げられる。Oka et al. (2006) ではパラメータの一つとしてホイッスラー臨界マッハ数 ( $M_{crit}^w$ ) とマッハ数 ( $M_A$ ) との比  $M_A/M_{crit}^w$  と電子加速効率に良い相関があることが示された。 $M_{crit}^w$  はホイッスラー波の群速度の衝撃波面に垂直な成分で定義され、衝撃波面と上流の磁場方向の成す角を  $\theta_{Bn}$  とした時、 $M_{crit}^w \propto \cos \theta_{Bn}$  となる。Oka et al. (2006) では超臨界の時にのみベキ指数が小さい、すなわち加速効率がよくなることを示した。これはホイッスラー波が電子加速に大きく関わっていることを示唆する結果であるが、その具体的なメカニズムはまだ理解されていない。

これを受けて Katou & Amano (2019) や Amano et al. (2020) では電子加速はホイッスラー波の強度がある閾値を超えた時のみに起こると予想し、その理論曲線を導いた。この閾値は  $M_A^\Lambda = M_A / \cos \theta_{Bn}$  に強く依存しており、定性的には Oka et al. (2006) と整合的である。しかし波の強度も一般にはマッハ数や  $\theta_{Bn}$  の関数として変動することが考えられるため、より詳細な調査が必要である。

本研究では地球バウショックの場合においてこの閾値の妥当性について統計的に調べることを目的とする。そのために Magnetospheric Multiscale(MMS) 衛星の burst mode で観測された衝撃はイベントのデータを用いる。まず、上で述べたように衝撃波付近でのエネルギー Spektrum がベキ型になっていることを確認した。この際 Fast Plasma Investigation(FPI) で観測されたデータを 1s 積分したものをを用い、フィッティングによってベキ指数の時間変化を求めた。衝撃波前後での変化を調べるため、上流および下流でも同様にベキ指数を求め、さらに同様に 1s 間隔で Search Coil Magnetometers(SCM) を用いてホイッスラー波の周波数帯におけるパワースpektrum の時間変化を求めた。これら高時間分解能のデータを用いることで衝撃波の内部構造を分解することが可能である。以上のデータをもとに、ホイッスラー波の絶対強度および理論閾値に対する相対強度と電子加速効率の関係性を議論する。

**R007-13**

**Zoom meeting D : 11/3 AM1 (9:00-10:30)**

**10:00~10:15**

## **On stochastic models for the pitch angle scattering of charged particles in the solar wind**

#Yasuhiro Nariyuki<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Faculty of Education, Univ. Toyama

The Fokker-Planck (FP) equations have widely been used to describe scattering of charged particles in space plasma. Although the quasi-linear theories (QLTs) give the diffusion coefficients through systematic coarse-graining of micro processes, the assumptions in QLTs are usually too strict for the solar wind plasma/solar energetic particles. In this talk, from the point of view of the stochastic processes, we discuss the generalization of diffusion models for the pitch angle scattering and parallel diffusion of charged particles. For instance, the FP model with the isotropic pitch angle diffusion coefficient (e.g., Shalchi, 2009; Yoon et al, 2009) corresponds to a Wright-Fisher model (e.g., Dangerfield et al, 2012). We will also discuss the relationship between the stochastic models and FP models of the cosmic ray transport with the adiabatic focusing (e.g., Litvinenko et al, 2013).