

修士論文

次世代惑星探査に向けた
高エネルギー粒子観測器の開発

山崎 潤

東京大学大学院理学系研究科

地球惑星科学専攻

宇宙惑星科学講座

平成 25 年 1 月

Abstract

In-situ measurements by spacecraft in various planetary magnetospheres (Earth, Mercury, Jupiter and other planets) have revealed many aspects of space plasma dynamics. The origins of magnetospheric plasmas are planetary atmospheres, moons, and the solar wind. Their initial energies are from $<1\text{eV}$ to a few keV. On the other hand, it is also well known that particles with MeV-range energies (or higher) exist in magnetospheres. However, transport and acceleration of these particles are not yet understood, partly due to the energy gap (\sim a few 10s keV \acute{o} a few 100s keV) between low energy particle spectrometers and high energy particle spectrometers. These are major questions in magnetospheric physics and are important targets for Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO), Exploration of energization and Radiation in Geospace (ERG), and JUPiter ICy moon Explorer (JUICE) missions planned by JAXA and/or ESA (and NASA).

In order to elucidate the transport and acceleration processes, in-situ ion composition measurements with a wide energy range from eV to MeV are required. Due to technical limitations, however, the energy gap between the spectrometers still remains. Additionally, the tight demands on spacecraft resources make a smaller and lighter device highly desirable. In this study, therefore, a new high energy particle spectrometer (HEP) is examined, aiming at an extension of the lower energy coverage as well as reduction in size and weight.

As the first part of this study, performance tests of a test-model HEP-ion (High Energy Particle instrument for ions) for MMO were carried out to verify that the test model works as planned. The experiment results agreed with the numerical simulation.

Secondly, a new solid-state detector (SSD) with a thin dead layer has been produced to lower the minimum detectable energy for ERG and JUICE. Through laboratory experiments, the thickness of the dead layer is found to be approximately one fourth of the one used for MMO. We have confirmed that the SSD is able to measure particles including heavy particles (such as N and, O) down to 30keV.

In order to reduce the size and weight, a new HEP sensor head which can measure both ions and electrons was also designed. The volume and mass are approximately half compared to the total values of HEP-ion and HEP-ele onboard MMO.

Finally, the most challenging issue for particle measurements by JUICE is that energetic electrons ($>$ a few MeV) penetrate through the spacecraft and sensor chassis, and can be detected by MCPs and SSDs, causing background noise. Therefore the reduction of the noise count rate is the key for this Jupiter mission. Although the sensor shielding can decrease the noise level to some extent, a limitation on the mass makes thick shielding impracticable. Thus, an alternative way for the noise rejection is needed. I shrunk the area of detectors to reduce the noise, and it allows us to thin the shielding from 25mm to 15mm whereas maintaining the noise rate at less than 5% of the signal count rate.

概要

宇宙プラズマのダイナミクスを解明するため、これまで地球磁気圏を中心に水星磁気圏や木星磁気圏など、太陽系に存在する様々な磁気圏で人工衛星によるその場観測が行われてきた。プラズマの起源として、主に磁気圏内(電離圏や衛星)起源と太陽風起源の2つが考えられており、イオン源から供給されるプラズマのエネルギーはそれぞれ、 $\sim 1\text{eV}$ 、数 keV 程度である。また、多くの磁気圏では $\text{eV}-\text{MeV}$ 帯を中心に6桁以上ものエネルギーレンジに渡って荷電粒子が存在していることが知られている。しかし、これまでの低エネルギー粒子観測器と高エネルギー粒子観測器のエネルギーレンジの間には粒子種によって大きなギャップ(\sim 数 $10\text{keV}-$ 数 100keV)が存在していたため、上記のイオン源から放出されるプラズマ($\text{eV}-$ 数 keV)がどのように輸送され、数 $10\text{keV}-\text{MeV}$ まで加速されているのかという問題は未解明である。これは磁気圏物理学の主要課題であり、現在日本あるいは欧米との協力のもとで進められている Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO)や Exploration of energization and Radiation in Geospace (ERG), JUpiter ICy moon Explorer (JUICE)といった衛星計画でも重要なターゲットとなる。

粒子輸送・加速といった詳細なプラズマメカニズムを解明するためには、それぞれの磁気圏で $\text{eV}-\text{MeV}$ まで一貫して質量分析を伴った粒子観測が不可欠である。しかし、現在も技術的な問題により、低エネルギー粒子観測器と高エネルギー粒子観測器のエネルギーレンジの間にはギャップが存在するのが現状である。また、リソースの観点から観測器の更なる小型・軽量化が求められている。本研究では、新たな高エネルギー粒子観測器開発の中で、特にエネルギーレンジ下限の拡大ならびに装置の小型・軽量化に取り組んだ。

まずは、上記の将来ミッションの1つ MMO に搭載予定の高エネルギーイオン分析器(HEP-ion)のテストモデルが設計通りの性能を出せているか評価するための試験を行った。性能試験で得られた結果とシミュレーション結果を比較すると、両者はよく一致しており分析器が設計通りの性能を出せていることがわかった。

次に、ERG や JUICE に向けて高エネルギー粒子観測器の低エネルギー側レンジ拡大のため、新たに不感層を薄くした SSD の製作・試験を行った。実験結果から、新たに製作した SSD の不感層の厚さは MMO 搭載品に比べ $1/4$ 程度であり、重イオン(N, O など)を含め $\sim 30\text{keV}/q$ まで計測可能になったことを確認した。

また、本研究内では、JUICE への搭載を目指し小型・軽量化を図るため 1 つのセンサヘッドでイオンと電子両方を計測する観測器をデザインした。そのサイズ・質量はそれぞれ MMO 搭載の高エネルギーイオン・電子分析器各 1 台の合算値と比較して半分程度に抑えられることがわかった。

最後に、JUICE における困難として数 MeV 以上の高エネルギー電子が検出部に到達し引き起こす背景ノイズが挙げられる。そのため観測器開発の際、ノイズ対策が鍵を握る。シールドを用いてある程度ノイズを減らせるが、シールドの厚さに比例して質量が増加するため、その他の対策も必要となる。本設計では検出部のサイズを縮小することでノイズ低減を図った。その結果、真の信号に対するノイズの割合を 5% 以下に抑えるために必要なシールドの厚みを 25mm から 15mm に薄くすることが可能となった。