

APD を用いた 3-100keV 電子センサーの開発研究

Development of a measurement technique for 3-100 keV electrons using
Avalanche Photodiode

(地球電磁気・地球惑星圏学会)

代表研究者

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

向井 利典

Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)/ JAXA Toshifumi Mukai

共同研究者

東京大学大学院 理学系研究科院生

小笠原桂一

University of Tokyo

Keiichi Ogasawara

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

浅村 和史

ISAS/ JAXA

Kazushi Asamura

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

齋藤 義文

ISAS/ JAXA

Yoshifumi Saito

The information on energy spectra of 1-100keV electrons is expected to provide an important clue to understand heating and acceleration mechanisms of magnetospheric plasmas. However, there have been very few reliable data of electrons of several keV to several tens of keV, due to technical problems. This study aims to bridge this 'gap' by applying Avalanche Photodiodes (APDs) to the detection of electrons. The APD is a kind of p-n junction semiconductor with an internal avalanche gain. We have tested the performance of APDs (Type sp13989 and Z7966, Hamamatsu Photonics K.K.) in the electron measurements up to 40keV. The sp13989 responded to 2-40keV electrons with clear peaks in the output pulse height distributions and their good linearity to the electron energy. The energy resolution is lower than 1keV for 2-20keV electrons and 5keV for 40keV. In order to demonstrate its usefulness in space, an instrument has been developed to measure auroral precipitating electrons on the sounding rocket S-310-35. The rocket was launched from Andøya, Norway on 13 December 2004. The system worked well, and the energy spectra of 3.5-65 keV electrons were measured at low altitudes (90-140km) in the auroral ionosphere. The existence of a nonthermal tail in the energy spectra was clearly revealed with better accuracy than ever achieved.

研究目的

地球磁気圏プラズマにおいて、数 keV—数十 keV という電子は非常に重要な意味を持つ。電子の分布関数が熱的なマクスウェル分布関数から非熱的な分布関数に移るのがこのエネルギー帯であり、電子加速・加熱現象を表す象徴的なエネルギーレンジだからである。その上こういった数 keV—数十 keV の電子は磁気リコネクション領域やその近傍での加速現象、また放射線帯や無衝突衝撃波面での加熱現象など、磁気圏の様々な領域でしばしば観測されている。しかし、そのエネルギー領域は、低エネルギーと高エネルギーの電子検出技術の境目となっており、正確で信頼性のあるエネルギー分布の観測が難しいとされてきた。低エネルギー電子計測器では、静電分析器+MCP (Micro-Channel Plate) という方法が従来用いられてきており、上部に設置する静電分析器の形状と MCP のアノードの工夫により高い角度分解能やエネルギー分解能が実現されてきた。また、MCP は低エネルギーのプラズマ粒子に対して高い検出効率を持っている事もこれまで多用されてきた理由である。その一方、MCP のような 2 次電子増倍管はいくつかの問題点を孕んでいる。第一に、数 keV 以下の電子に対しては効率がよいが、数 keV を超える電子に対しては検出効率が低下してしまうという問題が挙げられる。宇宙空間では数 keV を超える電子のフラックスは非常に少なくなるので、数 keV 以上の電子観測の統計精度が上がらず、結果として時間分解能を上げられない。もう一つは、電子の較正実験において素子への入射電子数の絶対量を見積もるのが難しいため、検出効率を正確に求めることが難しいという実験技術上の問題がある。これらの要因から、このエネルギー領域で分布関数を正確に決定するのが非常に困難であった。さらに MCP には、高エネルギーの光子や粒子によるノイズ対策が難しい点がある。観測対象を全て 1 カウントとして計数する原理の MCP では、原理的にノイズの弁別が不可能であった。他方、高エネルギー側の電子観測においては、これまで固体検出素子 (SSD) が用いられてきた。SSD は数 keV 以上の電子に対してほぼ 100% の高検出効率で観測が行える (但し、電子が素子を突き抜けるエネルギーで上限がある)。また素子単体でも出力信号の波高から電子のエネルギーを求めることができ、ノイズ対策や検出効率対策が原理的に可能である。しかし数十 keV を下回るような低エネルギー電子に対しては、リーク電流や熱雑音といった雑音源に信号が埋れて測定は非常に困難であった。

以上のような困難に際し、アバランシェ・フォトダイオード (APD) という半導体素子を応用することで観測のギャップを埋めるのが本研究の目的である。APD は電子なだれ現象による内部利得により、荷電粒子入射時の電子正孔対生成数に対して数十倍の内部信号を生み出すことが可能であり、それによって高エネルギー分解能が実現される。APD は光検出素子として使用されるのが一般的であるが、最近では軟 X 線等の放射線計測素子としての研究も既に行われている。しかし、低エネルギーの電子入射に対する APD 出力の波高分析や温度依存性の詳細な研究は本研究が初めてであり、宇宙空間での電子検出への応用ももちろん世界初である。

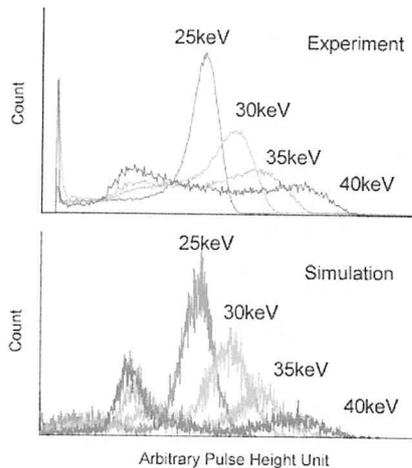


Fig.2 Pulse height distributions of the APD (Z7966) signal corresponding to higher energy electrons. The upper panel shows the result of the experiment and the lower panel shows the result of the Monte Carlo simulation. Secondary peaks at lower energy channels were formed by transmission of primary electrons.

2. 観測ロケットによる宇宙空間での実証試験

我々は APD 素子を検出部に用いた低エネルギー電子計測器を製作、校正し、JAXA 宇宙科学研究本部の観測ロケット S-310-35 号機に搭載した。この電子計測器は 4 つの APD を並べて用いており、計測器に入射した電子はコリメータを通った後、太陽光や散乱光の影響を除去するため一様磁場によって曲げられて検出される。磁場の効果で電子の軌道はエネルギーに応じて半径の違う弧を描き、4 つの APD は位置によってそれぞれ異なるエネルギーの電子を計測し、それに応じた強度の信号を出す。電子のエネルギーは個々の APD でさらに分解され、全部で 7ch のエネルギーレンジで計測できるようになっている。ロケット搭載のための振動、衝撃試験及び電磁環境、光環境試験等の環境実験を行い、S-310-35 号機は 2004 年の 12 月 13 日にノルウェーのアンドーヤロケット試験場より打ち上げられた。電子計測器は正常に動作して 3.5-65keV のオーロラ降込み電子の計測に成功した。数 keV - 数十 keV という電子の中で、オーロラ電子は自然界において最も身近なものである。この実験によって得られたエネルギースペクトル (E-t ダイアグラム) を以下の図(Fig.3)に示す。観測高度は 90 - 140 km で、オーロラ電子としてはもっとも低い高度における直接観測になるが、ロケットは観測開始から 1 分間に渡ってオーロラアークの激しい降込み電子を観測している。これは地上からのオーロラ撮像カメラの観測ともよく一致しており、APD が想定どおりに動作したことを示している。またフライト全般に渡り、ピッチ角上向き電子と下向き電子それぞれのエネルギースペクトルにおいて、下向きのフラックスが卓越していた。このスペクトルの違いは、電離層の大気との衝突をある程度経た後にも降込み電子がその源の情報を保持している可能性を示している。そこで我々は下向きのフラックスに電子輸送方程式を用いることで、スペクトルへの電離層大気の影響を取り除き、個々のスペクトルを評価した。オーロラ降込み電子のエネルギースペクトルは、数千 km 上空の電場での加速を経たマクスウェル分布になることが知られている。しかし同時に 10keV を超えるような高エネルギー側に尾を引く構造も見つかっており、これはオーロラ電子の源と考えられている磁気圏尾部領域のプラズマシートに存在する

電子の分布関数を反映しているのではないかと考えられてきたが、これまで詳細な議論はされてこなかった。その一つの原因には、10keV 領域での 2 次電子増倍管の検出効率の不確かさがあった。今回の観測でもやはり高エネルギー側にマクスウェル分布関数より卓越したフラックスが見つかった。これらは冪分布、あるいは低エネルギー側でマクスウェル分布、高エネルギー側で冪関数の特徴をもつ κ 分布関数でフィットされた。APD を検出器に用いたことにより検出効率の不確かさが減り、今回求めた 10keV 以上の電子の信頼性は高い。特にオーロラアークの外で見つかった κ 分布の κ (冪に相当) は、5 から 8 の範囲であり、プラズマシートにおける、加熱された電子の過去の観測例と非常によく一致していた。これは高エネルギーのオーロラ電子がプラズマシート起源であることの有力な証拠である。なお、このロケット実験は宇宙空間における電子計測への APD 素子の応用例として世界で初めてのものではあった。

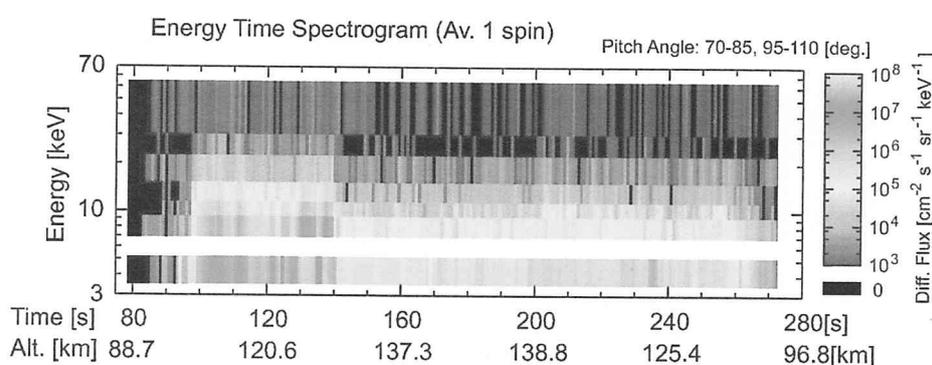


Fig.3 Energy-time spectrogram of electrons measured in the whole flight of the S-310-35. The color bar shows the differential flux of the electrons.

考察

APD が新型の衛星搭載技術として宇宙空間での電子計測に応用されるインパクトの大きさは計り知れない。我々が扱う宇宙空間プラズマは無衝突であり、地上ではごくありふれた熱平衡状態でも、宇宙空間で実現するには非常に長い時間を要し、非熱的な分布関数というものがある。プラズマ加速現象の後にはやはり非熱的な分布関数が生成され、宇宙空間に遍く存在している。Makishima, [1999] は、プラズマ加速による最高到達エネルギーが、加速の媒体となる系のサイズとその場でのローレンツ電場に依存していることを示唆した。身近なもので太陽表面の爆発現象、あるいは超新星残骸やブラックホールの X 線観測による結果は、非常に高エネルギーにまで加速された電子の存在を明らかにしているが、直接観測を行うことはいずれも不可能である。一方、我々の扱う地球磁気圏にも多くの非熱的な電子加速現象は数多く見つかっており、直接観測で検証できる。その結果から、上記のスケールリング則が本当に正しいのか検証される。また、その先には地球周辺での直接観測のデータが直接観測不可能な領域における粒子加速の物理にも応用

できるという可能性もある。宇宙空間は魅力的なサイエンスの場であるだけでなく、人類の活動の場という側面を持っている。非常に高いエネルギーにまで加速された宇宙空間のプラズマは、人体や電子機器にとっては有害な放射線である。特に磁気圏内部の地球近傍には放射線帯と呼ばれる領域があり、非常に高エネルギーの放射線が存在している。放射線帯電子の加速メカニズムが定量的に理解されれば、将来の宇宙利用の過程において有害な放射線を予知する技術にも繋がる。またAPDは素子自体でエネルギー分析が可能のため、非常に軽量、省電力で、なおかつ計測可能なエネルギー領域の広い検出器を製作できる。この特性を生かし、宇宙ステーションや人工衛星等に多く利用すれば、将来的には非常に強力な宇宙環境モニターとして広く利用される可能性もある。

研究発表

口頭発表

小笠原桂一, 向井利典, 斎藤義文, 高島健, 浅村和史, An energetic electron measurement during the flight of the sounding rocket S-310-35 using avalanche photodiodes, 地球惑星科学関連学会 2005年5月合同大会

小笠原桂一, 向井利典, 斎藤義文, 高島健, 浅村和史, アバランシェ・フォトダイオードを用いた電子計測器の開発: S-310-35号機による観測結果, 地球電磁気・地球惑星圏学会 2005年9月

誌上発表

Ogasawara, K., K. Asamura, T. Mukai, and Y. Saito, Avalanche Photodiodes for measurement of low-energy electrons, *Nucl. Instr. and Meth. A*, 545-3, pp.744-752, 2005

K. Ogasawara, K. Asamura, T. Takashima, Y. Saito and T. Mukai, Rocket Observation of Energetic Electrons in the Low-Altitude Auroral Ionosphere During the DELTA campaign, submitted to *Earth Planets and Space*