



ISSN 1349-1113
JAXA-RR-05-022

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

BepiColombo水星探査計画にむけた極端紫外光検出器
(MCP)の量子効率向上に関する研究

吉岡和夫・彦坂健太郎・村上 豪・野澤宏大
山崎 敦・吉川一郎・笠羽康正

2006年 3 月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

BepiColombo水星探査計画にむけた極端紫外光検出器 (MCP) の量子効率向上に関する研究

吉岡和夫¹, 彦坂健太郎¹, 村上豪¹, 野澤宏大²
山崎敦³, 吉川一朗¹, 笠羽康正⁴

Development of micro channel plates for the BepiColombo mission
by

Kazuo YOSHIOKA¹, Kentaro HIKOSAKA¹, Go MURAKAMI¹, Hiromasa NOZAWA²
Atsushi YAMAZAKI³, Ichiro YOSHIKAWA¹, Yasumasa KASABA⁴

Abstract : An ultraviolet spectrometer, PHEBUS (Probing Of Hermean Exosphere By Ultraviolet Spectroscopy) that will be loaded onto the MPO (Mercury Planetary Orbiter) in the BepiColombo mission is under development. The instrument is designed to measure far ultraviolet and extreme ultraviolet radiations from the atmosphere of Mercury, which could not be identified by the Mariner - 10 mission. In this paper we show the results of experiments about micro channel plates (MCPs) that will be employed in the Spectroscopy system. The results show;

- A) The electron multiplier with CsI evaporated anode shows higher quantum detection efficiency than the bared MCPs by a factor of 4 to 50 in the extreme ultraviolet.
- B) The quantum detection efficiencies of CsI and KBr evaporated MCPs are at the same level as bared ones in the wavelength shorter than 100 nm, and higher by a factor of 3 to 10 over 100 nm.
- C) For extreme ultraviolet, angler dependence exhibits a quantum detection efficiency peak at an angle of about 30 degrees relative to the channel axis.

要 旨

我々はBepiColombo水星探査計画において水星表層探査機 (Mercury Planetary Orbiter: MPO) に搭載される紫外線分光観測装置 (Probing Of Hermean Exosphere By Ultraviolet Spectroscopy: PHEBUS) の開発を進めている。PHEBUSは紫外線領域にある水星大気の共鳴散乱光の検出を目的としており、特に極端紫外領域に高い感度をもつことが特徴である。この装置の極端紫外光検出部にはマイクロチャンネルプレート (MCP) という二次元電子増倍器を用いる。本論文ではMCPの量子効率の向上について検証した結果を報告する。

1 東京大学
2 立教大学
3 東北大学
4 宇宙航空研究開発機構

MCPは量子効率を向上させるために仕事関数の小さな物質（光電物質）を入射面に蒸着して用いることがある。この手法は紫外線検出には有効であることが知られているが、極端紫外光に対する有効性には未だ一貫した見解は得られていない。そこで我々は極端紫外光に対して量子効率を向上させるための蒸着条件を見出す目的で、以下の実験を行った。

- (A) 電子増倍管を用いた光電物質 (CsI) の量子効率の測定。
- (B) 光電物質を蒸着したMCP (以下、光電物質付MCPとする) と蒸着していないMCP (以下、未蒸着MCPとする) の量子効率の測定。
- (C) 入射角を変化させた場合の光電物質付 MCP と未蒸着 MCP の量子効率の測定。

その結果、電子増倍管では光電面に光電物質を蒸着することで、量子効率が数倍から数十倍向上することを確認した。しかしバイアス角が 12° のMCPに光電物質を蒸着したところ、波長100 nm以下の極端紫外光に対しては量子効率の向上は見られなかった。また、光電物質付MCPの量子効率は未蒸着MCPよりも入射角依存性が強く、 30° 付近で最大の量子効率をもち、未蒸着のものに比べて2倍から5倍に量子効率を向上させられるという結論を得た。

1. はじめに

2013年の打ち上げを目指し日欧が協力して推し進めているBepiColombo水星探査計画は二機の探査機で構成されている。磁気圏探査機 (Mercury Magnetospheric Orbiter: MMO) は、水星の磁場・磁気圏構造の解明及びナトリウムを主成分とする希薄大気の大規模構造・変動を観測することを主な目的とする。一方、表層探査機 (Mercury Planetary Orbiter: MPO) は、水星の表層・内部構造の解明を主な目的とし、その搭載機器の一つに水星大気紫外線分光観測装置 (PHEBUS) がある。これは紫外線領域にある水星大気の共鳴散乱光を検出するための装置である。

1974年と75年にマリナー10号探査機が水星近傍をフライバイした際に、水素、酸素とヘリウムの存在が紫外線分光観測によって確認され、80年代には地上観測からナトリウムとカリウム大気存在が確認された [1], [2], [3]。さらに近年高分散エッセル分光器を用いた地上観測によって可視連続光の中にカルシウム大気の輝線が発見された [4]。カルシウムのような不揮発性元素の存在は水星大気多様性を示唆しており、今後地上観測装置の整備、改良によりそれが明らかにされるであろう。

一方で、地上からでは観測できない紫外線領域の大気光観測はマリナー10号探査機以来一度も行われていない。この領域にはナトリウムイオン、カリウムイオンや地球型惑星に普遍的に存在する希ガスの輝線があり、水星大気の変遷や磁気圏への流出経路の解明にはこれらを分光観測することが求められている。

本論文ではPHEBUSの開発課題である極端紫外光検出器 (MCP) の量子効率の向上を目的とした実験結果を報告する。

2. PHEBUS

PHEBUSは波長50 nmから330 nmの領域にある水星大気の共鳴散乱光を極端紫外領域 (EUV: 50 - 150 nm) と遠紫外領域 (FUV: 140 - 330 nm) の二系統に分離して観測する分光観測装置である (図2.1)。

受光部 (①) から入射した共鳴散乱光は反射鏡によってスリット (②) に集光され、回折格子 (③) で分光される。本装置では2つの回折格子を用いることで、入射光をFUVとEUVの2系統に分離する。それぞれの検出部には二次元電子増倍器としてMCPを用いる。PHEBUSの規格表を表2.1に示す。

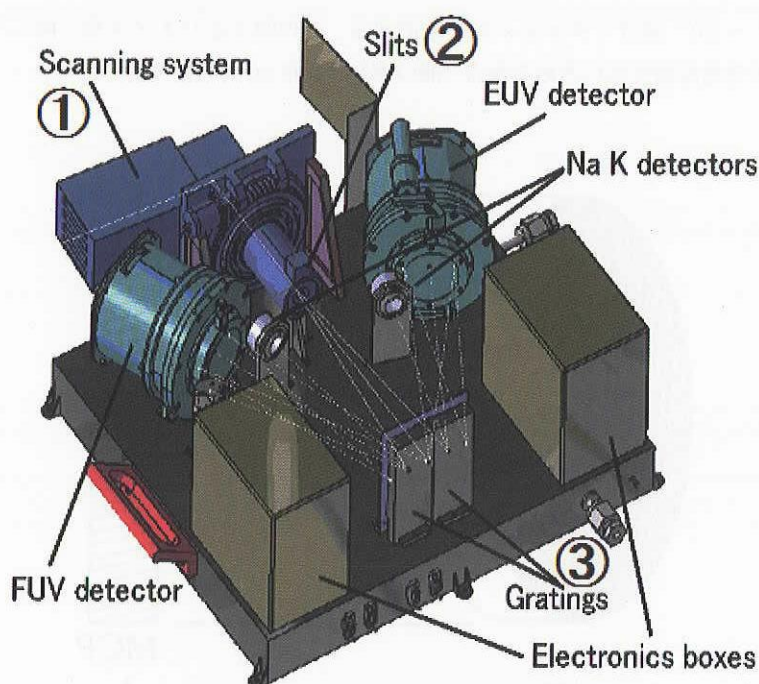


図2.1 PHEBUSの概観

表2.1 PHEBUSの規格

観測波長	50 - 330 nm
波長分解能	1 nm (EUV), 2 nm (FUV)
位置分解能	0.28° (15 km)
感度	1 count/s/R
視野角	1° × 0.1°
分光器	トロイダル回折格子
検出装置	MCP RAE
光電物質	CsI or KBr : EUV, CsTe : FUV
重量・電力	3.7 kg, 3.3 W

3. マイクロチャンネルプレート (MCP)

3.1. MCPの仕組

MCPは電子やイオンの他に、紫外線、真空紫外線、軟X線から硬X線にも感度を持つ検出器である。直径 $6 \mu\text{m}$ ~ $25 \mu\text{m}$ 、長さ 0.24 mm ~ 1.0 mm という非常に細い鉛ガラスの管 (チャンネル) を数百万本束ねて薄い板状に仕上げた構造をしている (図 3.1 a)。MCPの両端には高電圧を印加する。各チャンネルに入射した粒子や光電子が内壁に衝突して二次電子を放出し、生成された複数の二次電子は電場中で加速され再び内壁に衝突し、同様に新たな二次電子を生成する。この二次電子再放出を繰り返すことによって電気信号として検出できるレベルまで電子を増倍させる (図 3.2)。一本一本のチャンネルがこのように独立した二次電子増倍器として働くため、全体として二次元の電子増倍器を形成するという仕組みになっている。また、MCPは効率よく電子を増倍させる目的で、入

射面垂直軸に対して $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 傾けてチャンネルを配置する。この傾きをバイアス角と呼んでいる(図3.1b)。チャンネルの開口面積が受光面積全体に占める割合(開口率)は通常60%程度である[8]。

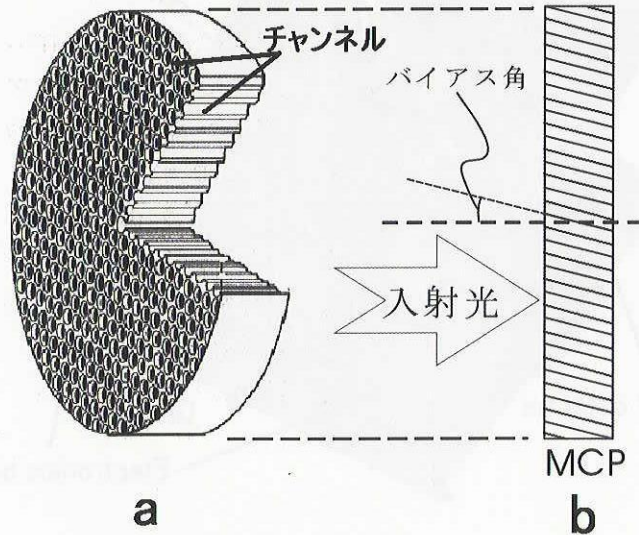


図3.1 MCPの構造

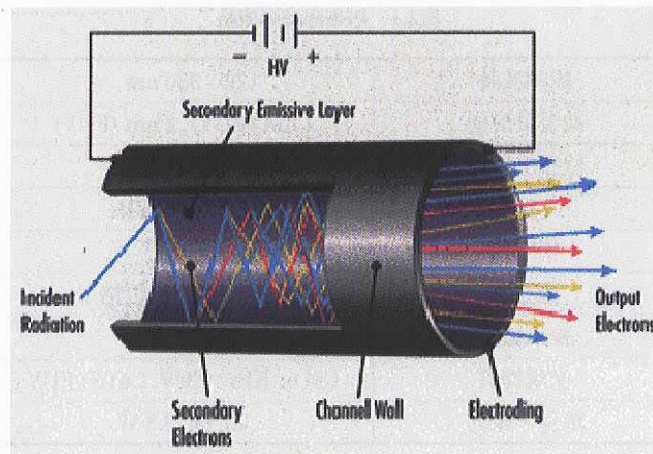


図3.2 電子増幅の仕組み

電場中で加速された電子が、二次電子再生成を繰り返す。

3.2. 光電物質

MCPの量子効率を向上させるために表面に光電物質を蒸着するという手法が広く用いられてきた(図3.3)。Planet-B (JAXA) やSOHO (NASA) の衛星計画では極端紫外光を検出する目的でCsI, KBr付MCPを用いてきた[5], [6], [7], [8]しかし, IMAGE (NASA) の衛星計画では光電物質を蒸着することで逆に極端紫外光に対する量子効率が低下してしまうという結論に達した結果, 打ち上げ直前に未蒸着MCPに変更したという報告もある(図3.4)[9]。このように, 極端紫外光の検出でMCPに光電物質を蒸着するという手法の有効性は未だ一貫した見解は得られておらず, 開発途上といえる。

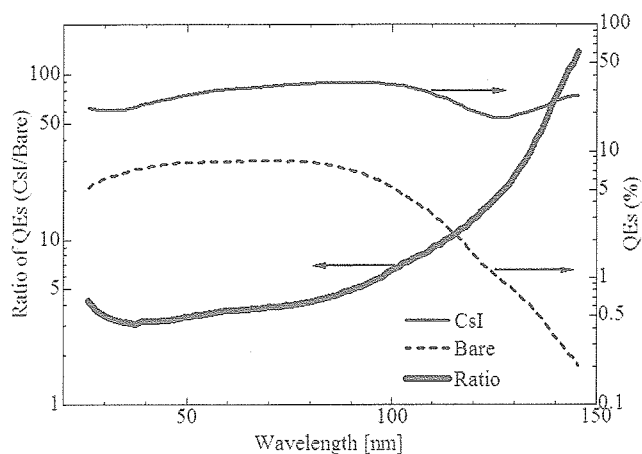


図3.3 光電物質による量子効率の変化 (波松ホトニクス技術資料より)
 実線及び点線はCsI付MCPと未蒸着MCPの量子効率(理論値)を表す。
 太線はそれらの比(CsI付MCP/未蒸着MCP)を表す。

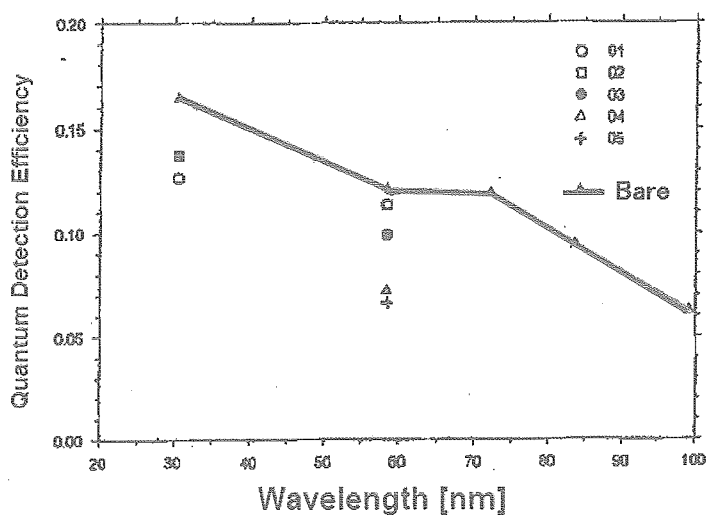


図3.4 光電物質による量子効率の変化 (B. R. Sandel et al. 2000 より)
 太線は未蒸着MCPの量子効率, 01から05の各点は光電物質付MCPの量子効率を表す。

4. 実験

図4.1のように構成された装置を用いて, 実験A, B, Cを行った。

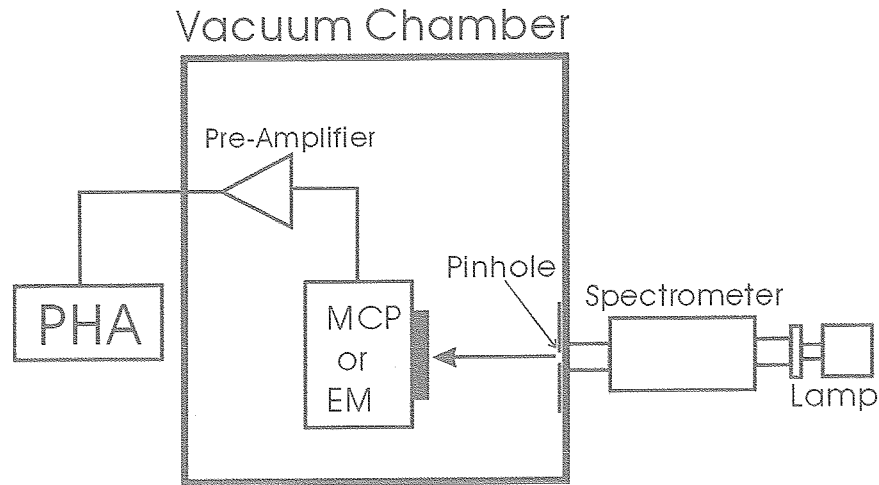


図4.1 実験装置の構成

ガスフローランプ及び重水素ランプから出た極端紫外光は回折格子で分光され、真空チェンバーに入る。検出器からの信号は増幅器を介して大気側で波高解析される。

実験A 電子増倍管を用いた光電物質 (CsI) の量子効率の測定

電子増倍管 (Electron Multiplier: EM) を用いて、代表的な光電物質であるCsIの極端紫外光に対する量子効率を測定した。本実験では、EMの光電面にCsIを蒸着し (図4.2および図4.3)、極端紫外光に対する感度を未蒸着MCPと比較した。光源にはガスフローランプと重水素ランプを用いてネオン、アルゴンと重水素の輝線及び連続光を照射した (表4.1)。これらの気体は水星大気構成要素であると予想されている。

表4.1 照射した光とガスの種類

ガスの種類	波長
ネオン	46.2 nm, 73.5 nm
アルゴン	104.8 nm, 106.6 nm
重水素	121.6 nm, 134.7 nm

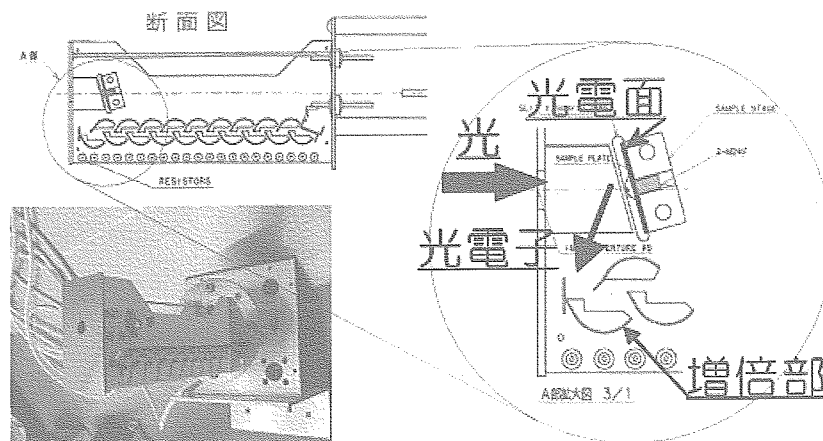


図4.2 実験に使用した電子増倍管

光電面と増倍部には500Vの電圧を印加する。光電面から放出された光電子は電場中で加速され増倍部に取り込まれる。

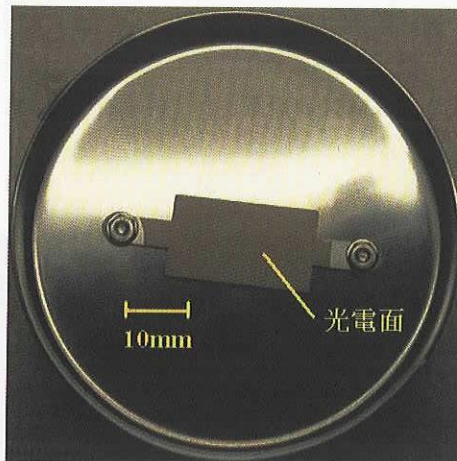


図4.3 CsIを蒸着した光電面

電子増倍管に取り付けて使用する。蒸着の厚さは 300 nmとした。

実験 B 光電物質付MCPと未蒸着MCPの量子効率の測定

光電物質としてCsIとKBrを左右に半分づつ蒸着したMCP（表 4.2 および図 4.4）と、未蒸着MCPの極端紫外光に対する量子効率を比較した。照射した光は実験 Aと同じ 6 波長を用いた。

表4.2 実験に使用したMCPの規格

製造	浜松ホトニクス
段数	2段
チャンネルの直径	12 μm
チャンネルの長さ	0.48 mm
バイアス角	12°
光電物質	KBr CsI
蒸着の深さ	6 μm

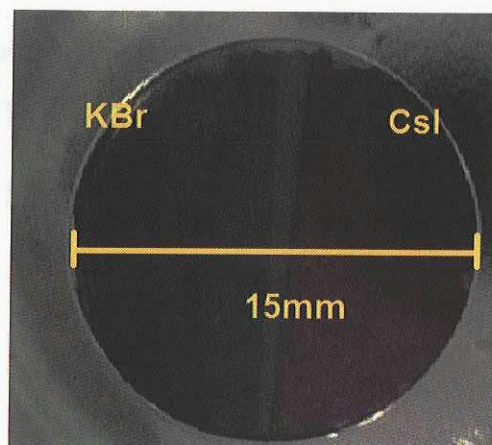


図4.4 実験に使用した光電物質付MCPの表面

左半分に KBr, 右半分に CsI を蒸着してある。

実験 C 入射角を変化させた場合の光電物質付MCPと未蒸着MCPの量子効率の測定

CsI付MCPと未蒸着MCPの量子効率を、入射角を変化させて測定した。波長46.2nmと121.6nmの極端紫外光を照射し量子効率を測定した。本実験ではMCPが設置されている治具全体を回転させることで入射角を制御した(図4.5)。

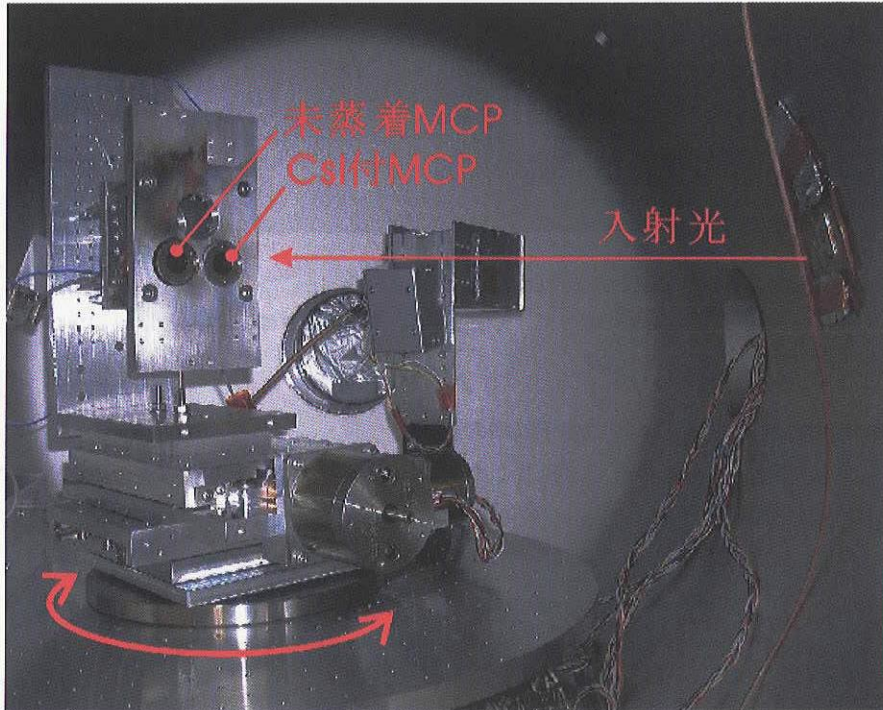


図4.5 MCPを治具に取り付けた状態。
治具を回転させて、MCPへの光の入射角を制御する。

5. 実験結果

実験 A

光電面にCsIを蒸着したEMの量子効率を図5.1に示す。この結果から、CsIは波長100nm以下の光に対しては、未蒸着MCPと比べて3倍から10倍高い量子効率を、波長100nm以上の光に対しては50倍から100倍高い量子効率を持つことが確認された。

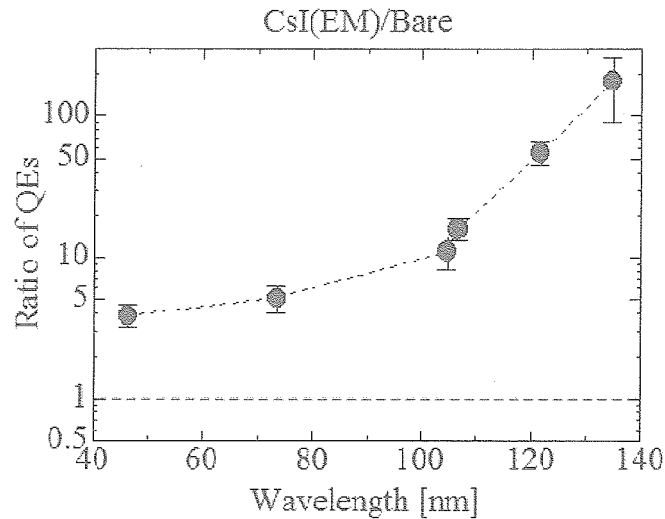


図5.1 CsIによる量子効率の変化

横軸は入射光の波長を表し、縦軸は光電面にCsIを蒸着したEMと未蒸着MCPの量子効率の比を表す。ここでは、MCPの開口率を60%として補正している。

実験 B

CsI/KBr付MCPと未蒸着MCPの量子効率を比較した結果を図5.2および図5.3に示す。波長100nm以下の光に対しては光電物質を蒸着することによる量子効率の向上は確認されず、波長によっては未蒸着MCPよりも低くなってしまった。また、波長100nm以上の光に対しては3倍から10倍に向上したが、これも実験項目Aの結果から期待できるほどではなかった。光電物質の種類による量子効率の大きな違いは見られなかった。

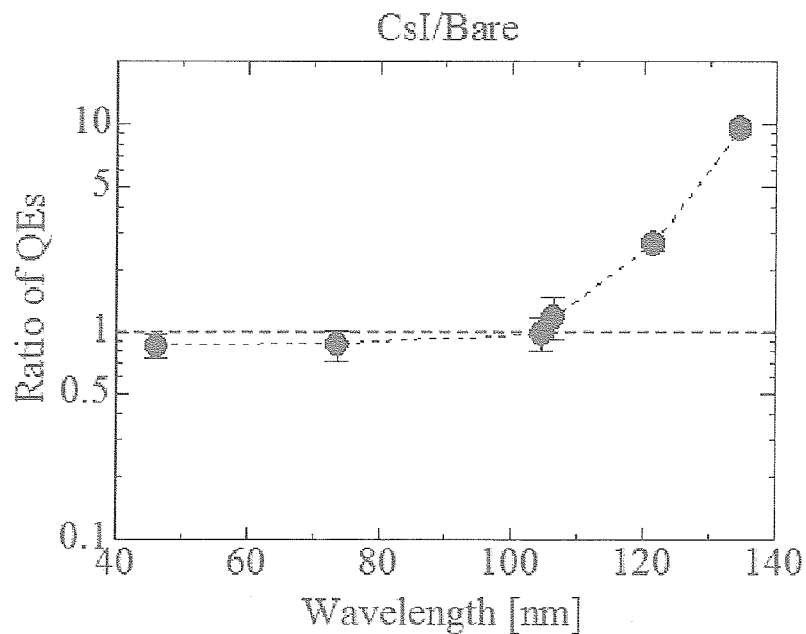


図5.2 CsIによる量子効率の変化

横軸は入射波長を表し、縦軸は量子効率の比 (CsI付 / 未蒸着MCP) を表す。

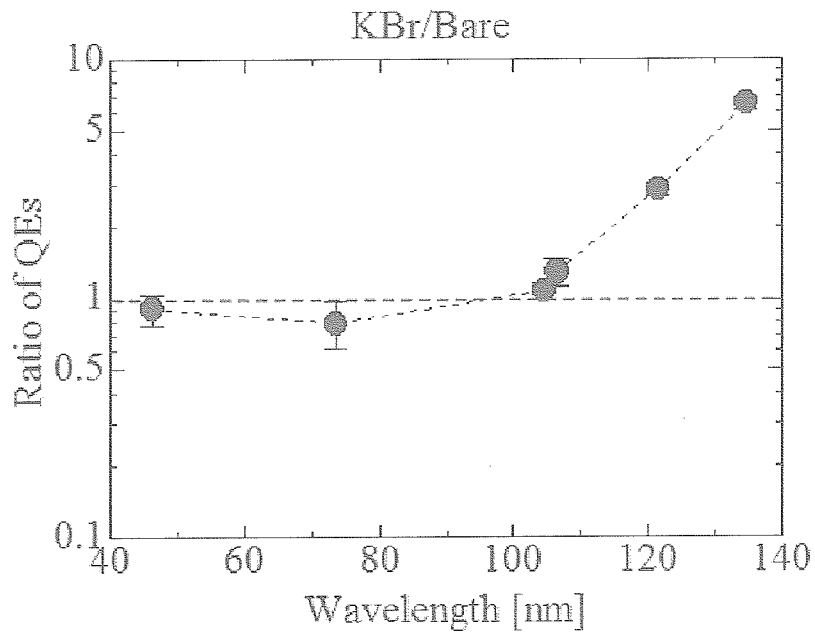


図5.3 KBrによる量子効率の変化

横軸は入射波長を表し、縦軸は量子効率の比（KBr付 / 未蒸着MCP）を表す。

実験 C

入射角を変えて光電物質付MCPと未蒸着MCPの量子効率を測定した結果を図5.5及び図5.6に示す。なお、MCPによる電子の増倍率は一定ではなく、図5.5に示すような分布を持ち、これを波高分布と呼ぶ。この分布の低利得側はノイズの影響を大きく受けるため、本実験ではピークより高利得側（図5.4斜線部）のみを計数して量子効率を比較した。

この結果、未蒸着MCPは入射角 10° 付近で最大の量子効率を示した。一方CsI付MCPでは 30° 付近までは量子効率は高くなるが、それ以上大きくしても向上は見られなかった。また、未蒸着MCPよりもCsI付MCPの方が量子効率の入射角依存性が大きいことが確認された。

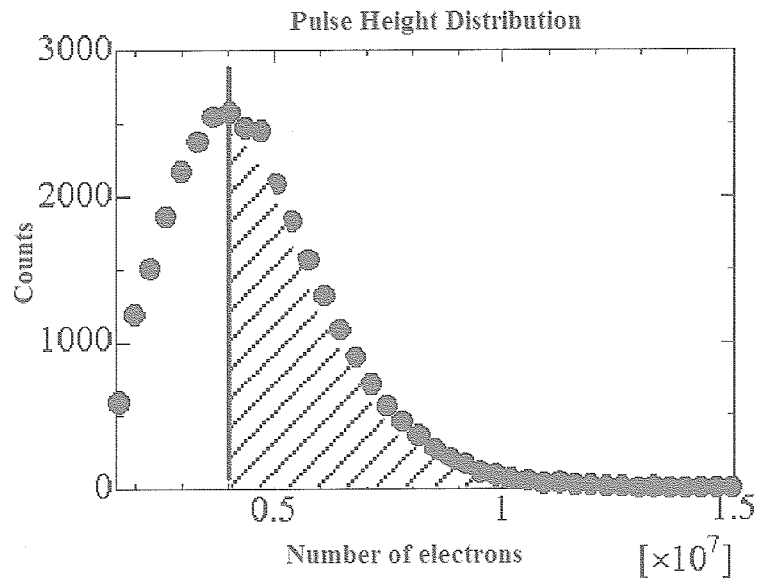


図5.4 波高分布

横軸は電子数、縦軸は頻度を表す。

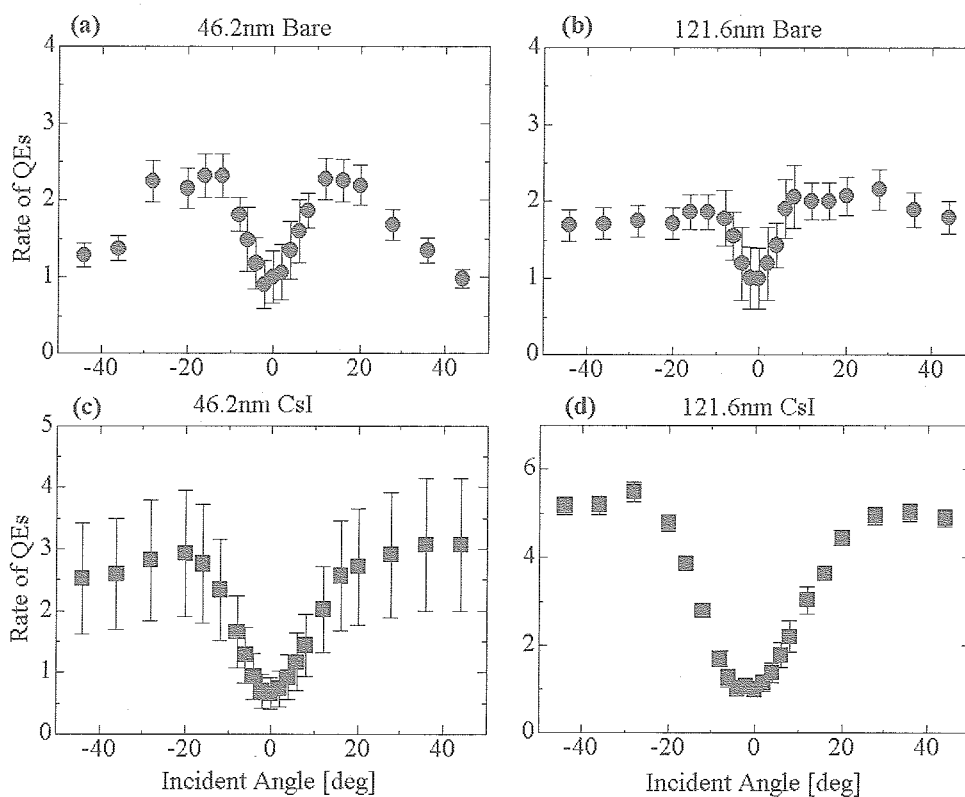


図5.5 量子効率の入射角依存性

(a), (c) は波長 46.2 nm, (b), (d) は 121.6 nm の光に対する量子効率を表す。
 また, (a), (b) は未蒸着MCP, (c), (d) はCsI付MCPである。
 どのグラフも横軸はMCPのチャンネルに対する光の入射角を表し、
 縦軸は入射角が 0° のときを1として規格化した量子効率を表している。

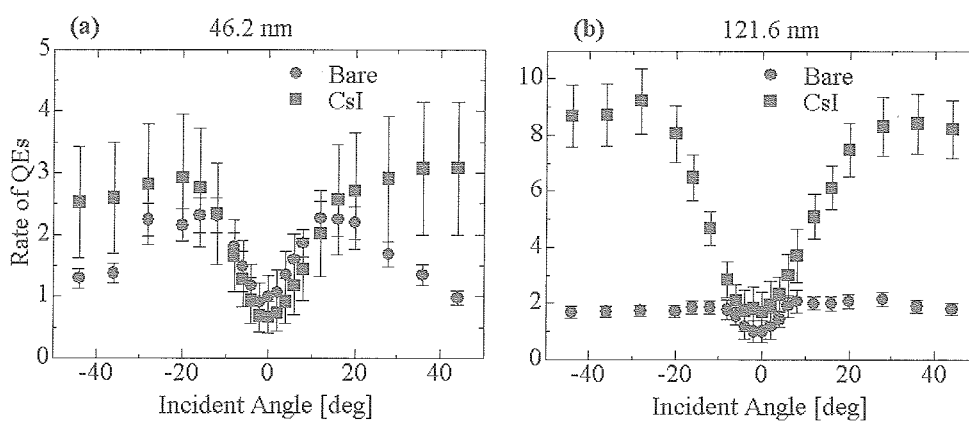


図5.6 量子効率の入射角依存性の比較

(a) は入射波長 46.2 nm, (b) は 121.6 nm としたときの量子効率の入射角依存性を、
 CsI付MCPと未蒸着MCPとで比較したグラフである。横軸はMCPのチャンネルに対する光の入射角
 を表し、縦軸は未蒸着MCPの入射角 0° のときを1として規格化した量子効率を表している。

6. 理論式との比較

前章までの実験結果を定量的に解釈するために、平面に蒸着された CsI への光の入射角 α と量子効率 $QE(\alpha)$ の関係を表した Fraser 1983, [11] のモデルを MCP に適用させる。

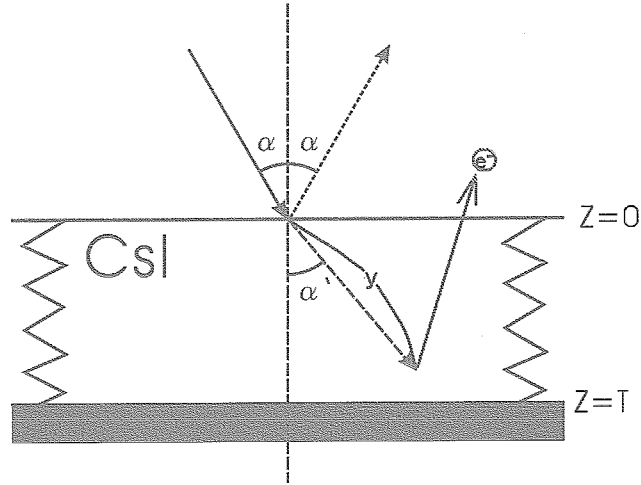


図6.1 CsIに角 α で入射した光が、屈折角 α' で進入し、深さ z の位置で光電効果を起こし、二次電子を放出する。

まず、反射によるエネルギー損失から

$$\frac{QE(\alpha)}{QE(normal)} \propto \frac{1 - R(\alpha)}{1 - R(normal)} \quad (1)$$

という関係を得る。 $R(\alpha)$ はフレネルの法則から得られる反射率、 α' は屈折角である (図 6.1)。 また、表面からの深さ z から $z + dz$ の層から二次電子が放出される確率を $P(z)$ とすると、

$$P(z) \propto \exp\left[-\frac{\mu \cdot z}{\cos \alpha'}\right] \times \exp\left[-\frac{z}{L_s}\right] \quad (2)$$

と表せる。ここで、 μ [/cm] は CsI の光吸収計数、 L_s [cm] は電子の脱出長、 T [nm] は蒸着の厚さである。(2) 式を $z = 0$ から $z = T$ まで積分することで

$$\begin{aligned} \frac{QE(\alpha)}{QE(normal)} &\propto \frac{\int_{y=0}^{y=T/\cos \alpha} \exp[-y(\mu + \cos \alpha'/L_s)] dy}{\int_{z=0}^{z=T} \exp[-z(\mu + 1/L_s)] dz} \\ &= \frac{\mu + 1/L_s}{\mu + \cos \alpha'/L_s} \times \frac{1 - \exp\left[-T\left(\frac{\mu}{\cos \alpha'} + \frac{1}{L_s}\right)\right]}{1 - \exp\left[-T\left(\mu + \frac{1}{L_s}\right)\right]} \end{aligned} \quad (3)$$

という関係を得る。ただし $y \equiv z/\cos \alpha'$ とした。(1) 式及び (3) 式から、入射角と量子効率の関係を表す Fraser の式 (4) を得る。

$$\frac{QE(\alpha)}{QE(normal)} = \frac{1-R(\alpha)}{1-R(normal)} \times \frac{\mu + 1/L_s}{\mu + \cos\alpha'/L_s} \times \frac{1 - \exp[-T(\frac{\mu}{\cos\alpha'} + \frac{1}{L_s})]}{1 - \exp[-T(\mu + \frac{1}{L_s})]} \quad (4)$$

このモデルを MCP のチャンネルに対する入射角と量子効率の関係に適応させて計算した。すなわち、MCPの内壁には厚さ T [nm] で CsI が蒸着してあり、そこに入射した光が放出させる二次電子の数を角度の変数として計算した。その結果と、実験から得られた結果を比較したものが図 6.2 である。理論式は 300 [nm] の厚さで蒸着された CsI に、121.6 nm の光を照射した場合とし、 $\mu = 3 \times 10^4 [\text{cm}^{-1}]$ $L_s = 3 \times 10^{-8} [\text{cm}]$ として計算した [12], [13]。この図を見ると、CsI を蒸着した MCP は入射角 30° 付近で量子効率が最大になるという実験 C の結果がこのモデルで説明できることがわかる。

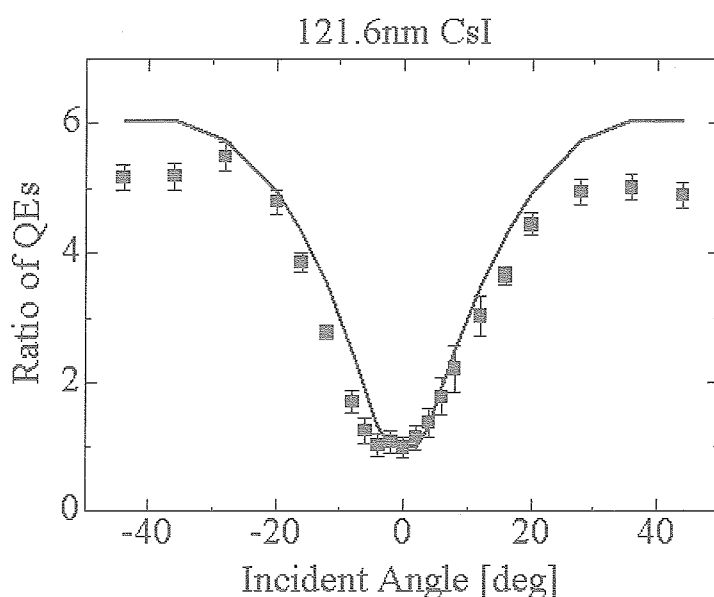


図6.2 量子効率と入射角の関係（理論値との比較）

理論式から導かれる特性を実線で表した。

7. まとめ

我々は電子増倍管を用いた実験によって、光電物質（CsI）には極端紫外光に対する量子効率を4倍から100倍向上させる効果があることを確認した。しかし、バイアス角 12° のMCPに光電物質を蒸着したところ、量子効率の向上は見られなかった。これは、光電物質を蒸着することで開口率が低下したためと考えられる。通常MCPの開口率は60%程度であるが、光電物質を蒸着すると約10%低下する。また、未蒸着MCPは入射角10度付近で、光電物質付MCPは入射角 30° 付近で最も高い量子効率をもつことが確認された。これは、平面上に蒸着された光電物質の量子効率と、入射角の関係を記述したFraserのモデルをMCPに対して適用した計算結果とよく一致した。すなわち、入射角が小さいときは光電物質に照射された極端紫外光の反射率が高いため、量子効率は低くなり、入射角を大きくしていくと反射率が下がり量子効率は高くなるが、 30° を超えると光の進入深さが増して二次電子放出率が低下する効果が卓越すると考えられる。

以上から、我々はMCPを用いて極端紫外光を検出する際には、バイアス角を 30° にとり光電物質を蒸着することで、未蒸着のものとは比べて2倍から5倍に量子効率を向上させられるという結論を得た。

8. 参考文献

- [1] Broadfoot, A. L., S. Kumar, M. J. Belton, M. B. McElroy, Mercury's atmosphere from Mariner 10: Preliminary results, *Science*, Vol. 185, pp. 166-169, 1974.
- [2] Potter, A., and T. Morgan, Discovery of sodium in the atmosphere of Mercury, *Science*, Vol. 229, pp. 651-653, 1985.
- [3] Potter, A., and T. Morgan, Potassium in the Atmosphere of Mercury, *Icarus*, Vol. 67, pp. 336-340, 1986.
- [4] Bida, T. A., R. M. Killen, and T. Morgan, Discovery of calcium in Mercury's atmosphere, *Nature*, Vol. 404, pp. 159-161, 2000.
- [5] Taguchi, M., H. Fukunishi, S. Watanabe, S. Okano, Y. Takahashi, and T. D. Kawahara, Ultraviolet imaging spectrometer (UVS) experiment on board the NOZOMI spacecraft: Instrumentation and initial results, *Earth, Planets and Space*, Vol. 52, pp. 49-60, 2001.
- [6] Yoshikawa, I., A. Yamazaki, K. Shiomi, M. Nakamura, K. Yamashita, Y. Saito, M. Hirahara, K. Takizawa, W. Miyake, and S. Matsuura, Development of a compact EUV photometer for imaging the planetary magnetosphere, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, Issue A11, pp. 26057-26074, 2001.
- [7] Siegmund, O. H. W., M. A. Gummin, T. Sasseen, P. Jelinsky, G. A. Gaines, J. Hull, L. M. Stock, M. Edgar, B. Welsh, S. Jelinsky, and J. Vallerga, Microchannel Plates for the UVCS and SUMER instruments on the SOHO satellite, Eds. Oswald H. Siegmund, John V. Vallerga, *EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VI*, Proc. SPIE Vol. 2518, pp. 344-355, 1995.
- [8] MCPアッセンブリ技術資料 (浜松ホトニクス株式会社)
- [9] Sandel, B. R., A. L. Broadfoot, C. C. Curtis, R. A. King, T. C. Stone, R. H. Hill, J. Chen, O. H. W. Siegmund, R. Raffanti, D. D. Allred, R. S. Turley, and D. L. Gallagher, The extreme ultraviolet imager for the IMAGE mission, *Space Science Reviews* Vol. 91, pp. 197-242, 2000.
- [10] Tremsin, A. S., O. H. W. Siegmund, The dependence of quantum efficiency of alkali halide photocathodes on the radiation incidence angle, Eds. Oswald H. Siegmund, Kathryn A. Flanagan, *EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Instrumentation for Astronomy VI*, Proc. SPIE vol. 2518, pp. 344-355, 1995. Proc. SPIE, Vol.3765, pp. 441-451, 1999.
- [11] Fraser, G. W., The characterization of x-ray photocathodes in the wavelength band 1-300Å, *Nuclear Instruments and Methods*, Vol. 206, pp. 251-263, 1983.
- [12] Cardona, M., R. Haensel, D. Lynch, and B. Sonntag, Optical properties of the rubidium and cesium halides in the extreme ultraviolet, *Physical Review B*, Vol. 2, Issue 4, pp. 1117-1131, 1970.
- [13] Boutboul, T., A. Akkerman, A. Breskin, R. Chechik, Escape length of ultraviolet induced photoelectrons in alkali iodide and CsBr evaporated films: Measurements and modeling, *Journal of Applied Physics*, Vol. 84, Issue 5, pp. 2890-2896, 1998.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-05-022

発行 平成 18 年 3 月 24 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1

URL:<http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株)フジブランド

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記をお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現2-1-1

TEL:029-868-2079 FAX:029-868-2956

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※本書の一部または全部を無断複写、転載、電子媒体に加工すること禁じます。

