

МИНИАТЮРНЫЙ ВСЕНАПРАВЛЕННЫЙ ПРИБОР ДЛЯ АНАЛИЗА ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И МАСС-АНАЛИЗА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ВЫСОКИМ РАЗРЕШЕНИЕМ

*О.Л. Вайсберг¹, А.В. Лейбов¹, В.Н. Смирнов¹, Л.А. Аванов¹, В.С. Трошин¹,
В.Д. Мягких¹, В.Ф. Бабкин¹, В.А. Гришин¹, А.А. Скальский¹,
Н.И. Колесова¹, Ж-Ж. Бертелье², К. Торкар³, Ф. Леблан⁴*

¹ Институт космических исследований РАН, Москва

² Центр исследований Земли и планет, Сан-Мор, Франция

³ Институт космических исследований Австрийской АН, Грац, Австрия

⁴ Служба аэронавтики, Верье-ле-Буассон, Франция

Приводится описание принципа нового типа анализатора плазмы: панорамной «КАМЕРЫ ОЛЕГ» с полем зрения 2π , позволяющей одновременно получать полное изображение распределения потока заряженных частиц в полусфере. Угол зрения прибора превышает угол зрения других существующих плазменных приборов в 10–30 раз. Анализатор позволяет увеличить быстродействие плазменных измерений и уменьшает влияние быстрых изменений в плазме на качество измерений. Предложенный анализатор обеспечивает сильное ослабление ультрафиолетового фона. «КАМЕРА ОЛЕГ» может быть использована как питающая входная оптика для последующего анализа по энергии или массе ионов. Прибор обеспечивает возможность гибкого управления угловым и энергетическим разрешением, быстродействием и чувствительностью. На основе прибора «КАМЕРА ОЛЕГ» предложен масс-анализатор с возможностью получения изображения распределения потока заряженных частиц в полусфере раздельно для разных ионов.

Введение

Использование анализаторов плазмы является одним из наиболее важных и информативных методов диагностики космической плазмы. Они позволяют определить гидродинамические параметры потока: скорость, температуру и концентрацию,

распределение частиц в пространстве скоростей (трехмерную функцию распределения), распределение частиц по питч-углам в магнитном поле, состав ионов по массе и заряду и изотопный состав. При исследовании космической плазмы плазменные анализаторы позволяют исследовать пространственные и временные структуры и вариации характеристик плазмы в волновых структурах.

Плазменные анализаторы могут иметь различные характеристики в зависимости от предъявляемых требований и от необходимости исследования различных явлений: солнечного ветра, магнитосферной плазмы, авроральной плазмы, структуры ударных волн и разрывов, волновых явлений. Одними из важнейших требований, предъявляемых к плазменным анализаторам, являются быстрдействие и детальность измерений функций распределения.

Так как плазменные анализаторы с высоким разрешением в пространстве скоростей, по определению, имеют достаточно узкое поле зрения, то для повышения быстрдействия приборов приходится применять либо многоканальные анализаторы (примером такого подхода является многоканальный спектрометр БИФРАМ в проекте «Интершок» (*Bedrikov et al., 1985*)), либо искать другие пути увеличения угла обзора. Большое распространение получили электростатические анализаторы с расширенным полем зрения в направлении, перпендикулярном направлению дисперсии в приборе: четвертьсферические и полусферические анализаторы. Конечным продуктом эволюции этого направления является анализатор типа Top-Hat, который обладает кольцевым полем зрения в 360° (*Carlson et al., 1985*). Примером такого прибора является анализатор EESAH на космическом аппарате WIND (*Lin et al., 1995*) (рис. 1). Приборы такого типа размещаются на вращающихся космических аппаратах, что обеспечивает необходимый полный обзор всей сферы за половину периода вращения космического аппарата. Достигнутое при этом максимальное быстрдействие измерений трехмерной функции распределения составляет ~ 3 с. Так как прибор при этом производит сканирование по энергии, то измерения производятся дискретно в пространстве скоростей, т. е. покрытие сферы является далеко не полным. Дальнейшее существенное повышение быстрдействия может быть обеспечено установкой нескольких таких приборов на спутнике (что порождает

новые проблемы взаимной калибровки и увеличивает стоимость экспериментов).

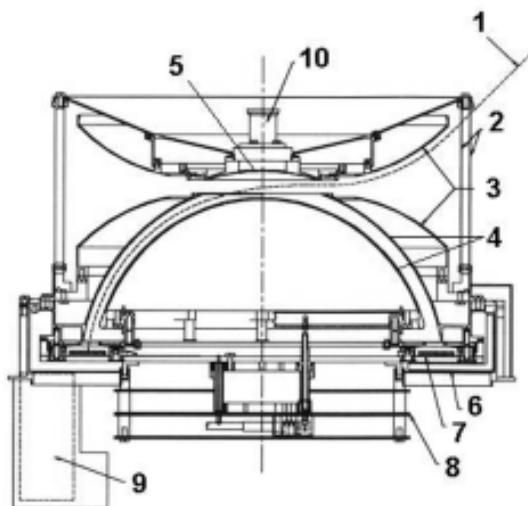


Рис. 1. Сечение цилиндрически-симметричного Top-Hat анализатора EESAH на космическом аппарате WIND (Lin et al., 1995):

- 1 — траектория иона; 2 — корпус; 3 — пластины углового сканера;*
- 4 — пластины анализатора энергий; 5 — «шапка», направляющая ионы в анализатор;*
- 6 — сцинтиллятор для контроля проникающих частиц;*
- 7 — микроканальный детектор частиц; 8 — плата предусилителя;*
- 9 — фотоумножитель для контроля проникающих частиц;*
- 10 — механизм открытия герметичной заглушки входа прибора*

Другим подходом к решению задачи широкого углового обзора является электростатическое сканирование. Такой прибор, трехмерный спектрометр энергий СКА-1, был установлен на «Хвостовом зонде» проекта «Интербол» (Vaisberg et al., 1995) (прибор был первоначально предложен для проекта ВЕГА, но был отвергнут руководством проекта). Перед тороидальным электростатическим анализатором был установлен электростатический сканер (рис. 2), обеспечивающий угловой обзор большей части полусферы (для трехмерных измерений на спутнике было установлено два противоположно направленных анализатора). Прибор СКА-1 обеспечивал быстрые трехмерные измерения на медленно вращающемся спутнике.

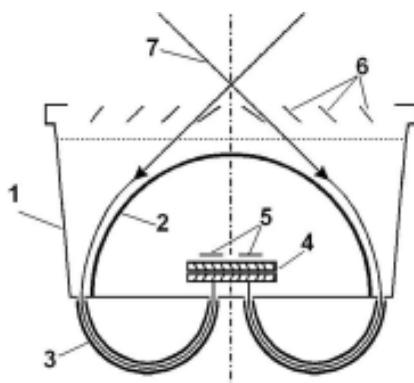


Рис. 2. Сечение цилиндрически-симметричного ионного спектрометра СКА-1 на «Хвостовом зонде» проекта «Интербол» (Vaisberg et al., 1995):

1 — внешний (земляной) электрод углового сканера; 2 — внутренний отрицательно поляризованный электрод углового сканера; 3 — пластины тороидального анализатора; 4 — сборка микроканальных пластин; 5 — секционированный ($\times 8$) коллектор; 6 — солнечная бленда для электрода 2; 7 — траектории ионов

Новый подход в увеличении поля зрения плазменного анализатора был найден при подготовке проекта Messenger к Меркурию (Zurbuchen et al., 2000). Найденное решение в приборе FIPS (рис. 3) позволяет одновременно регистрировать поток со значительной части полусферы (хотя этот прибор и называется полусферическим, на самом деле он осматривает почти точно половину полусферы, не покрывая околополюсную ее часть и приэкваториальную зону). Таким образом, задача обзора полусферы одним прибором остается нерешенной.

В данной работе описывается новый тип прибора — «КАМЕРА ОЛЕГ», являющаяся электронно-оптическим аналогом All-Sky Camera для съемок полярных сияний или линзы «рыбий глаз». Это первый прибор с полным одновременным незатененным обзором полусферы.

«КАМЕРА ОЛЕГ» всего неба для заряженных частиц

Аналог оптической линзы «рыбий глаз» или камеры всего неба, имеющий полное незатененное поле зрения в 2π (рис. 4),

описан в (Vaisberg et al., 2001). Цилиндрически-симметричное электростатическое зеркало обеспечивает однозначное соответствие между направлением на полусфере и местом попадания частицы на координатно-чувствительном детекторе на выходе. Форма зеркала выбрана так, что траектории частиц, проходящих через диафрагму перед детектором, пересекаются в узкой области у входного кольцевого окна. Это позволяет ограничить поток в прибор ультрафиолетового излучения. Напряжение на промежуточном плоском зеркале определяет верхнюю границу полосы пропускания по энергии. Для выбора нижней границы полосы пропускания необходимо перед детектором установить тормозящую сетку. Отношение энергии выбранного диапазона к подаваемому напряжению составляет ~ 1 , что ограничивает возможную верхнюю энергетическую границу измеряемых потоков частиц.

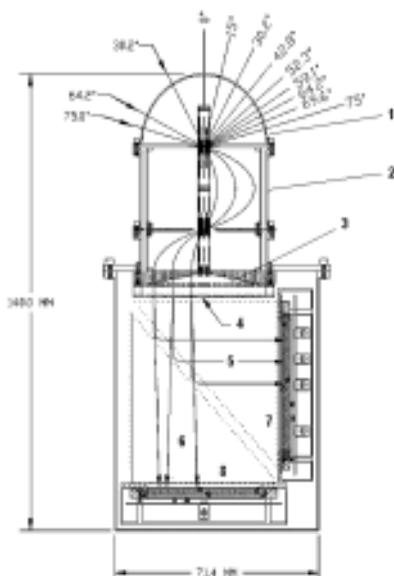


Рис. 3. Сечение цилиндрически-симметричного «полусферического» анализатора FIPS (Zurbischen et al., 2000): 1 — полусфера с отверстиями входных окон; 2 — цилиндрически-симметричный анализатор; 3 — пластина с выходными окнами; 4 — тонкая фольга; 5 — траектории выбитых из фольги электронов; 6 — траектории ионов; 7 — детектор электронов; 8 — микроканальный детектор ионов

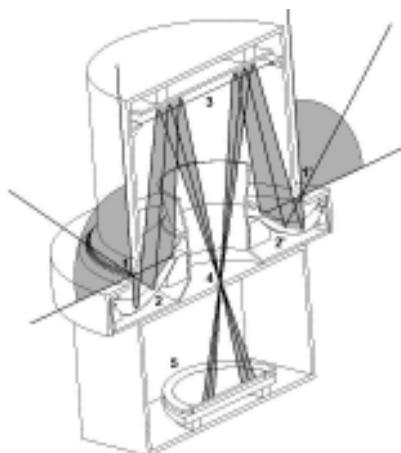


Рис. 4. Камера всего неба для заряженных частиц (Vaisberg et al., 2001):

1 — кольцевое входное окно; 2 — первичное изображающее электростатическое зеркало; 3 — вторичное плоское зеркало; 4 — выходное окно; 5 — микроканальная пластина, регистрирующая изображение полусферы

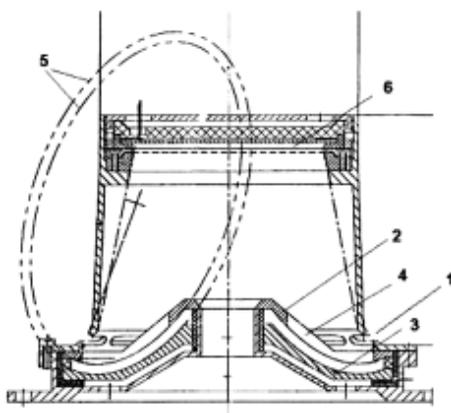


Рис. 5. Чертеж лабораторного макета прибора: 1 — входное окно; 2 — верхний электрод первичного зеркала; 3 — нижний электрод первичного зеркала; 4 — радиальная щель в первичном электроде; 5 — эллипсы, определяющие рабочие поверхности электродов первичного зеркала; 6 — вторичное плоское зеркало

Электронная оптика была выбрана с помощью компьютерного моделирования, и по результатам этого моделирования разработан чертеж лабораторного макета (рис. 5). Для упрощения изготовления верхнего электрода было решено вместо сетки сложной формы выполнить электрод сплошным с радиальными прорезями, через которые заряженные частицы могут проходить в рабочую зону зеркала (рис. 6).

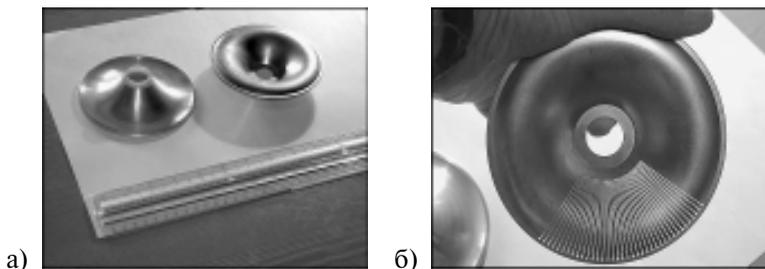


Рис. 6. Электроды первичного зеркала (а) и радиальные прорези в верхнем электроде зеркала (б)

Лабораторный макет прибора (рис. 7) был изготовлен в опытном производстве ИКИ РАН и испытан в вакуумной камере в лаборатории солнечного ветра на ионном пучке (рис. 8).



Рис. 7. Лабораторный макет прибора «КАМЕРА ОЛЕГ» в сборе

Результаты испытаний лабораторного макета приведены на рис. 9–11. Рисунок 9 показывает, что прибор обеспечивает достаточно равномерную чувствительность в пределах полярного угла $0-90^\circ$, причем вполне приемлемая чувствительность отмечается до угла $\sim 100^\circ$. Это позволит осуществлять взаимную ка-

либровку двух противоположно направленных датчиков на спутнике, если необходимо будет одновременно измерять трехмерную функцию распределения частиц.

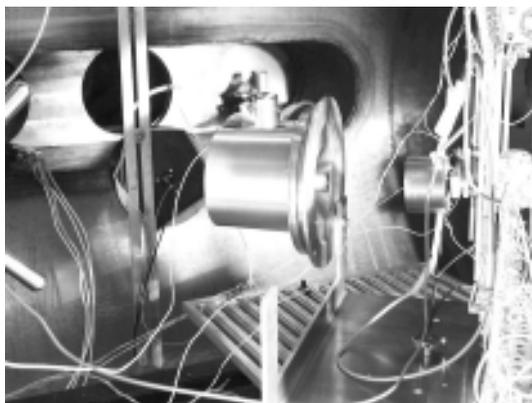


Рис. 8. Лабораторный макет прибора «КАМЕРА ОЛЕГ» в испытательном вакуумном стенде

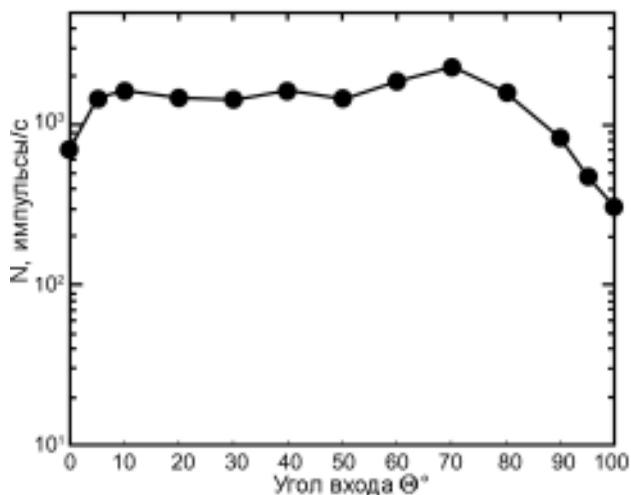


Рис. 9. Распределение чувствительности N макета прибора «КАМЕРА ОЛЕГ» по полярному углу θ

Рисунок 10 показывает передаточную функцию прибора: зависимость выходного угла частиц от входного. Имеются некоторые различия между численной моделью и экспериментом. Это, по-видимому, связано с ограниченной точностью расчета электрических полей в численной модели.

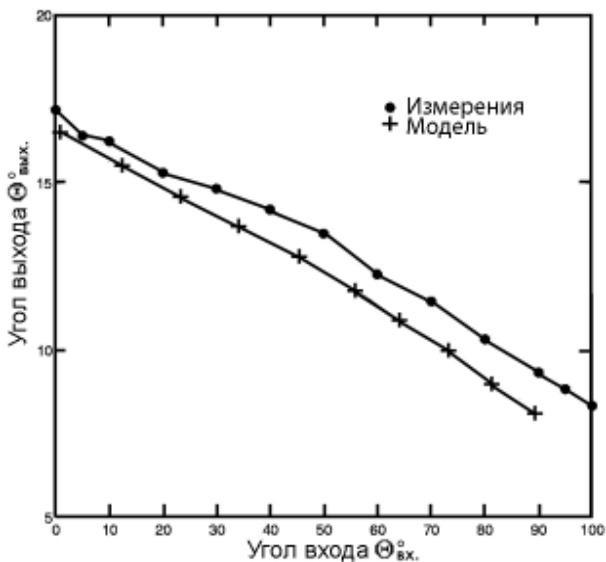


Рис. 10. Преобразование прибором «КАМЕРА ОЛЕГ» входного полярного угла Θ в выходной угол. Крестики — численная модель, кружки — измерения на макете

На рис. 11 приведена форма пятна на выходе прибора при освещении его однонаправленным пучком ионов и диаметре выходного отверстия 2 мм. Учет конечного размера выходного окна позволяет рассчитать собственную аппаратную функцию прибора (угловое размытие пучка электронной оптикой и сеткой вторичного зеркала). Величина этого размытия составляет $\sim 5^{\circ}$ и определяет предельное угловое разрешение прибора. Таким образом, лабораторные испытания доказали работоспособность камеры всего неба для заряженных частиц, возможность получения незатененного одномоментного изображения в пол-

ном поле зрения $>2\pi$. Угловое разрешение прибора также достаточно для решения большинства задач в измерениях космической плазмы и даже превышает возможности космического эксперимента с точки зрения пропускной способности телеметрической системы.

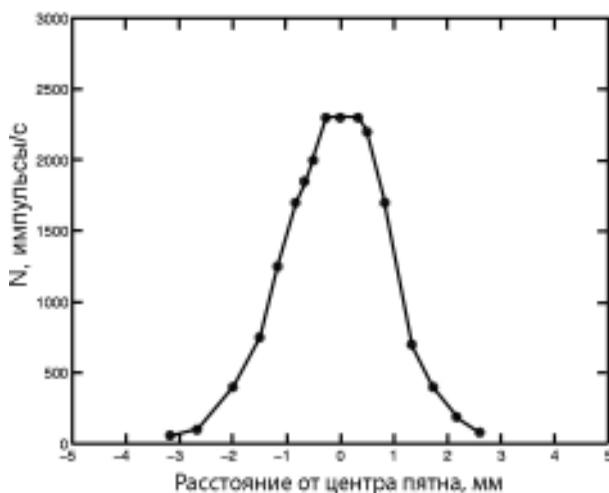


Рис. 11. Аппаратная функция прибора. Распределение интенсивности в пятне на изображающей плоскости, установленной на расстоянии 75 мм от выходного окна прибора с отверстием 2 мм. Освещение прибора производилось мононаправленным пучком ионов с энергией 2 кэВ

На выходе прибора «КАМЕРА ОЛЕГ» могут быть установлены дополнительные устройства для анализа частиц, энерго- и масс-анализаторы. На рис. 12 показан масс-спектрометр Шутяева, который установлен на выходе прибора «КАМЕРА ОЛЕГ» и позволяет получить распределение потока ионов разных масс по полусфере и массовый спектр плазмы. Предварительная оценка величины разрешения по массам составляет $M/DM > 100$. Причем этот массовый спектр является более достоверным, чем полученный обычными спектрометрами с ограниченным полем зрения, так как ионы разных масс могут иметь различные распределения по направлению полета. Этот прибор предложен нами для проектов Веры Colombo и «Фобос-Грунт».

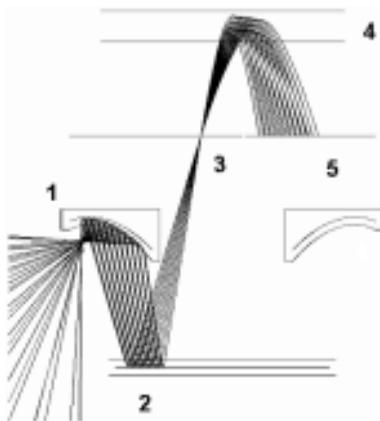


Рис. 12. Панорамный масс-спектрометр «КАМЕРА ОЛЕГ» с времяпролетным масс-спектрометром на выходе: 1 — первичное зеркало; 2 — вторичное зеркало; 3 — выходное окно камеры; 4 — электроды масс-спектрометра; 5 — плоскость детектирования

Заключение

Несмотря на очень высокий уровень развития спектрометров заряженных частиц для космических исследований, имеется необходимость в увеличении быстродействия и более детальном рассмотрении пространства скоростей. Нами предложен новый тип анализатора плазмы: панорамная камера. Достоинствами данного прибора являются:

- Полное (2π ср) поле зрения, без пропусков.
- Возможность регулировки ширины энергетического окна.
- Наилучшее угловое разрешение в центральной части поля зрения.
- Высокое угловое разрешение, не достижимое приборами других типов.
- Высокая степень защиты от УФ-излучения.
- Легкая адаптация к специфическим требованиям эксперимента (поле зрения, массовый анализ и т. д.).
- Гибкость в управлении энергетическим и угловым разрешением.

Прибор может использоваться в качестве питающей оптики для дополнительных анализаторов частиц.

Верхний предел энергетического диапазона ограничен источником напряжения, прилагаемого к электростатическим зеркалам.

Литература

- Bedrikov A., Belikova A., Fedorov A., Fuchs V., Hanzal V., Kuzmin V., Leibov A., Namestnik S., Nemecek Z., Notkin V., Richter M., Safrankova J., Vaisberg O., Yermolaev Yu., Zastenker G.* Complex of Plasma Spectrometers BIFRAM // Intershock Project / Ed. S. Fisher. Publ. N. 60 of the Astronomical Institute. Ondrejov. 1985. P. 113–142.
- Carlson C.W., Curtis D.W., Paschmann G., Michael W.* An instrument for rapidly measuring plasma distribution functions with high resolution // *Adv. Space Res.* 1985. V. 2, P. 67–70.
- Lin R.P., et al.* A three-dimensional plasma and energetic particle investigation for the Wind spacecraft // *Space Sci. Rev.* 1995. V. 71. P. 125.
- Neugebauer M., Snyder C.W.* The mission for Mariner II: preliminary observations, solar plasma experiment // *Science.* 1962. V. 138, N. 3545. P. 1095–1100.
- Vaisberg O.L., Leibov A.W., Avonov L.A., Smirnov V.N., Ivanova E.B., Klimashin A.A., Khazanov B.I., Cherkashin I.I., Iovlev M.V., Safronov A.Yu., Lichtenstein V.H.* Complex plasma analyzer SCA-1 // *Interball Mission and Payload.* RKA-IKI-CNES. 1995. P. 170–177.
- Vaisberg O., Goldstein B., Chornay D., Keller J., Avonov L., Smirnov V., Brinza D., Croley D., Sittler E., Moore T., Rozmarynowski P., Fuselier S., Ghielmetti A.* Ultra Fast Plasma Analyzer — an All-Sky Camera for Charged Particles // *The First Solar Orbiter Workshop.* May 14–18, 2001. Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain; ESA SP-493, 2001. P. 451–454.
- Zurbuchen T.H., Gloeckler G., Cain J.C., Lasley S.E., Shanks W.* A low-weight plasma instrument to be used in the inner heliosphere // *SPIE.* 2000.