

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

---

# ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА

УДК 523.2+523.6+539.1.074+621.384.8

**ПРИБОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЙТРАЛЬНОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА  
И ЕГО ЛАБОРАТОРНОЕ ИСПЫТАНИЕ**

© 1995 г. КАЛИНИН А.Ц., ВЕРИГИН М.И., ГДАЛЕВИЧ Г.Л., САФРОНОВ А.Ю., ХЛОНД М.

Описан прибор ГАЗ-2, предназначенный для регистрации нейтральных атомов солнечного ветра с характерными энергиями  $\sim 1$  кэВ. Техника совпадений позволяет выделять быстрые атомы в присутствии больших потоков фотонов от Солнца. Применение времяпролетной методики позволяет также оценивать энергию регистрируемых атомов водорода. Представлены результаты лабораторных испытаний прибора, подготовленного для установки на космический аппарат РЕЛИКТ-2.

К настоящему времени накопилось довольно много экспериментальных фактов, позволяющих полагать, что в межпланетном пространстве есть потоки нейтральных атомов различного происхождения, отражающие физические процессы в солнечной системе и ее окрестности (см., например, серию статей в [1]). К ним относятся потоки атомов H и He, проникающих в солнечную систему вследствие ее движения относительно локальной межзвездной среды со скоростью  $V \approx 20$  км/с; нейтральные потоки солнечного ветра; энергичные нейтральные атомы из земной магнитосферы и магнитосфер других планет; потоки нейтрального газа, производимого ядрами комет и т.п.

До последнего времени не было возможности непосредственного (in situ) измерения нейтральных частиц, и сведения о них, полученные в основном оптическими и радиометодами, позволяют только оценивать интегральную плотность нейтрального газа вдоль луча зрения соответствующих инструментов. Единственные успешные непосредственные измерения потоков нейтрального газа (He) в межпланетном пространстве были проведены на борту космического аппарата ULYSSES в эксперименте GAS [2]. Однако методика измерений в этом эксперименте не позволяла регистрировать атомы водорода – основной компоненты межпланетного нейтрального газа, а также анализировать энергию зарегистрированных атомов. Ни одна из экспериментальных методик не позволила до сих пор получить информацию о содержании нейтрального водорода в солнечном ветре, и существуют только теоретические оценки характеристик этой составляющей.

С появлением компактных времяпролетных приборов появилась возможность измерить интенсивность и энергию нейтральных частиц в космических экспериментах и был предложен эксперимент с прибором ГАЗ-2 [3] для исследования нейтральных атомов водорода солнечного ветра с характерными энергиями  $E \sim 1$  кэВ. В настоящей статье описано устройство и приведены резуль-

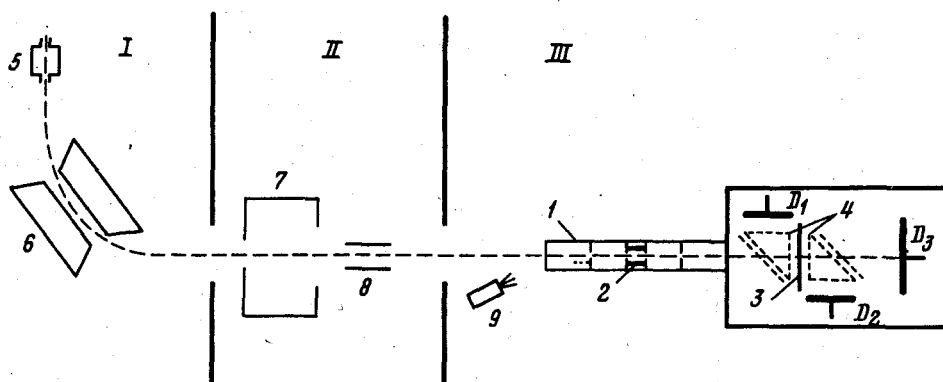


Рис.1. Схема прибора ГАЗ-2 и вакуумного стенда для его испытаний

таты лабораторных испытаний этого прибора, подготовленного к установке на космический аппарат РЕЛИКТ-2, который должен быть выведен в лангранжеву точку либрации  $L_2$  ориентировочно в 1997 г.

Особенность регистрации энергичных нейтральных атомов водорода солнечного ветра состоит в присутствии чрезвычайно больших потоков фотонов от Солнца. По имеющимся оценкам [4] этот поток на несколько порядков превосходит нейтральный солнечный ветер. Для регистрации быстрых нейтральных частиц с энергией 1 кэВ, в принципе, могут быть использованы электронные умножители. Особенно подходят для этой роли каналовые электронные умножители и, в частности, микроканальные пластины (м.к.п.) – использовалась промышленная сборка из двух м.к.п. ВЭУ-7. Однако наличие фотонов, которые также могут вызвать вторичные электроны, не позволяет воспользоваться ими напрямую.

Для преодоления этих трудностей в [5] было предложено, используя процесс выбивания электронов из тонкой фольги фотонами и частицами, выделять совпадения при последующей регистрации как этих фотонов и частиц, так и выбитых электронов из фольги.

В приборе ГАЗ-2 регистрируются совпадения акта вылета электрона из фольги и сигнала детектирования частицы детекторами на основе м.к.п. Схема прибора приведена на рис. 1 (вакуумная секция III). Он состоит из солнечной бленды 1 с постоянным магнитом 2 для удаления заряженных частиц (изготовленного из сплава SmCo и создающего магнитную индукцию  $\sim 0.15$  Тл в области 3 см вдоль оси бленды); тонкой углеродной фольги 3 (фольга толщиной  $\sim 100$  Å поддерживается сеткой из медной проволоки толщиной 5 мкм с ячейкой 30 мкм); двух электростатических зеркал 4 для направления выбитых из фольги электронов на детекторы  $D_1$  и  $D_2$ ; детектора  $D_3$ , предназначенного для регистрации быстрых частиц (и фотонов), прошедших через фольгу. Солнечная бленда, размещенная перед входом в прибор и позволяющая подавить поток фотонов в  $> 10^7$  раз, подробно описана в работе [6].

Ось прибора располагается под углом  $\sim 10^\circ$  к направлению на Солнце. Такой выбор основан на выполненном в [4] анализе отношения сигнал/шум, до-

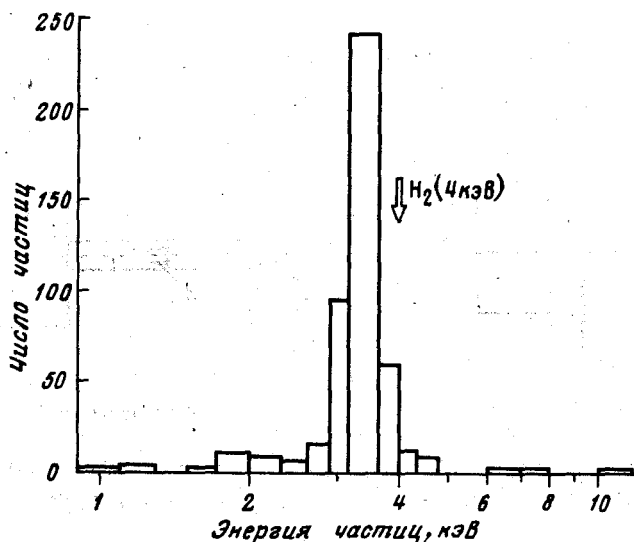


Рис.2. Времяпролетный спектр молекул водорода с первоначальной энергией 4 кэВ после прохождения ими углеродной фольги

стигающего максимума при отклонении оси прибора на  $7 \div 8^\circ$  от Солнца, и необходимостью избежать засветки прибора после регулярного (один раз в  $5 \div 7$  дней) изменения ориентации космического аппарата.

Быстрые нейтральные частицы и фотоны, пройдя бленду, попадают на углеродную фольгу толщиной  $80 \div 100 \text{ \AA}$ . Фотон может выбить электрон с передней стороны фольги и быть зарегистрированным детектором  $D_1$  (на отражение), выбить электрон с задней стороны фольги и быть зарегистрированным детектором  $D_2$  (на прострел) или же, пройдя фольгу и не выбив ни одного вторичного электрона, может быть зарегистрирован детектором  $D_3$ .

Быстрая частица может также выбить электрон из фольги на прострел или же на отражение и при этом (в отличие от фотона) она дополнительно может быть зарегистрирована детектором  $D_3$ . Регистрируя только те события, которые одновременно (в пределах выбранного временного интервала) вызывают срабатывание детекторов  $D_1$  и  $D_3$  или же  $D_2$  и  $D_3$ , можно эффективно отстроиться от сигналов, вызванных фотонами. Фотоны, в принципе, могут вызвать одновременное срабатывание детекторов  $D_1$  и  $D_3$  или  $D_2$  и  $D_3$  только тогда, когда два последовательных фотона регистрируются внутри временного интервала  $\sim 500 \text{ нс}$ .

Кроме того, с помощью прибора можно оценить энергию тяжелой частицы (при условии, что масса ее известна). Для этого для каждой тяжелой частицы измеряется время пролета базового расстояния (6 см) от стартового отметчика (тонкой фольги) до стопового детектора  $D_3$ . Стартовым сигналом времяпролетной схемы служит сигнал детектора  $D_1$  или  $D_2$ , зарегистрировавшего электрон, выбитый из фольги (с учетом времени пролета электрона от фольги до детек-

тора). Стоповым является сигнал детектора  $D_3$ , вызываемый ударом о детектор тяжелой частицы. Для каждой детектируемой тяжелой частицы измеренное время пролета преобразуется в цифровой код, по которому определяется счетный канал накопителя, в который прибавляется единица. При наборе достаточно большого числа событий в накопителе получают времяпролетный спектр, который легко преобразовать в энергетический спектр. Кроме того, прибор позволяет проводить измерения спектров для тройных совпадений, т.е. если тяжелая частица выбивает электроны как на прострел, так и на отражение и сама регистрируется детектором  $D_3$ . Эта методика позволяет дополнительно подавить фотонный шум. Для каждого детектора  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$  определяются также средние частоты поступающих с них сигналов.

Напряжения питания на каждый детектор подаются независимо и могут составлять 0; 2; 2.2 или 2.4 кВ в зависимости от поданной на прибор команды. Для защиты детекторов от перегрузки напряжение питания каждого из детекторов автоматически понижается на одну ступень вплоть до отключения питания, если средняя частота поступающих от него сигналов превышает пороговый уровень  $10^5$  импульсов/с.

Управление прибором в лабораторных условиях осуществляется с помощью контрольно-испытательной аппаратуры (к.и.а.) на основе персонального компьютера РС/АТ с применением специализированных интерфейсных плат [7]. К.и.а. выдает в блок электроники испытуемого прибора питающие напряжения, а также сигналы и команды для управления измерениями. Программное обеспечение на языке Pascal позволяло управлять прибором – определять напряжения на детекторах  $D_1 \div D_3$ , время накопления спектров, а также проводить тесты работоспособности прибора. Можно также принимать с прибора массивы данных и записывать их на диск, конвертировать полученные данные во времяпролетные спектры и визуализировать результаты на мониторе или же распечатывать их.

Для испытаний прибора собран стенд, показанный на рис. 1. Он состоит из ионного источника 5, анализирующего магнита 6, камеры перезарядки 7, отклоняющего конденсатора 8 и ультрафиолетовой лампы 9, расположенных в трех дифференциально откачиваемых вакуумных секциях I ÷ III. Пучок ионов, создаваемый ионным источником, ускоряется до нужной энергии и проходит через анализирующий магнит, в котором отбираются ионы требуемой массы. Далее пучок проходит через камеру перезарядки, где часть ионов превращается в нейтральные частицы. Используется резонансная или квазирезонансная перезарядка, и энергия нейтральных частиц практически не изменяется (перезарядка происходит на больших прицельных расстояниях). Неперезарядившиеся ионы можно удалить из пучка с помощью отклоняющего конденсатора. Ультрафиолетовая водородная лампа служит в качестве источника фотонов.

Исследования проводились как с блендой, так и без нее. Без бленды можно было регистрировать пучки ионов. Была проверена эффективность постоянного магнита, установленного в бленде, при удалении быстрых заряженных частиц. Выяснилось, что ионы  $H^{2+}$ ,  $He^+$  с энергиями вплоть до 4 кэВ (максимальная

энергия, использованная в этих опытах) не проходят в прибор. Мы исследовали регистрацию прибором пучков  $H_2$ , He,  $H_2^+$ ,  $He^+$  с энергиями от 1 до 4 кэВ.

На рис. 2 приведен времяпролетный спектр молекул водорода с энергией 4 кэВ. Максимум распределения соответствует энергии  $\sim 3.5$  кэВ. Сдвиг энергии возникает из-за потери энергии молекулой водорода при прохождении фольги. Аналогичные результаты получены и для других атомов, молекул и ионов.

На основании предложенной в [5] методики измерений абсолютных интенсивностей потоков частиц были определены вероятности регистрации детектором  $D_3$  нейтральных частиц. Метод основан на том, что приход частицы в прибор может приводить к двум (а в данном случае даже к трем) независимым физическим явлениям, которые регистрируются независимым образом. В нашем случае это эмиссия электрона из фольги (на прострел или отражение) и его регистрация и регистрация самой частицы. Если  $I_0$  – подлежащая измерению интенсивность потока нейтральных частиц, а  $P_2$  и  $P_3$  – вероятности регистрации первого и второго физических событий, то скорости счета детекторов  $D_2$  и  $D_3$  составляют  $I_2 = P_2 I_0$ ,  $I_3 = P_3 I_0$ , а скорость совпадений, т.е. одновременное срабатывание двух детекторов  $D_2$  и  $D_3$ , равна  $I_{23} = P_2 P_3 I_0$ . Из этих трех уравнений определяются  $I_0 = I_2 I_3 / I_{23}$  и  $P_3 = I_{23} / I_2$ . Вероятность  $P_3$  оказалась равной  $\approx 0.03$  для пучков He и  $H_2$  с энергией 3 кэВ. Такое маленькое значение  $P_3$  связано с тем, что при взаимодействии с фольгой происходит сильное рассеяние атомов и молекул и детектор  $D_3$  регистрирует только часть пучка  $I_0$ .

Аналогичным образом величину  $I_0$  можно оценить по показаниям детекторов  $D_1$ ,  $D_3$  и одновременному их срабатыванию:  $I_0 = I_1 I_3 / I_{13}$ , что позволяет увеличить надежность прибора.

Работоспособность прибора была проверена при наличии ультрафиолетового фона. Абсолютные потоки фотонов оценивались как из характеристик лампы и геометрии облучения, так и по регистрируемому потоку электронов, выбитых фотонами из фольги, по известному коэффициенту эмиссии электронов из углеродной фольги при облучении лайман- $\alpha$ -фотонами [8]. Оказалось, что энергетический спектр атомов хорошо выделяется для двойных совпадений при отношении числа фотонов к числу нейтральных частиц порядка  $(5 \div 7) \cdot 10^4$ . При этом можно регистрировать абсолютные потоки нейтральных частиц в пределах  $10^2 \div 10^4 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ .

При очень больших потоках фотонов на энергетическом спектре появлялся дополнительный пик (аналогичный пик появлялся и при небольшом потоке фотонов, но при очень большом времени экспозиции). Был сделан вывод, что этот пик связан с ионизацией молекул остаточного газа внутри прибора и их последующей регистрацией прибором (вакуум в камере III был  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  Торр, а в приборе давление остаточного газа несколько больше). Поскольку в космических условиях вакуум в приборе будет лучше, то ожидается, что этот дополнительный пик будет значительно меньше. Кроме того, ожидается, что в космических условиях интенсивность потока фотонов сильно уменьшится блендой.

Габаритные размеры прибора ГАЗ-2 составляют  $200 \times 200 \times 200$  мм, масса – 4.5 кг. Потребляемая мощность 3 Вт. Длина бленды 900 мм, масса 1.8 кг. На

борту спутника планируется проводить накопление результатов и передачу их на Землю с помощью телеметрической системы.

Работа частично поддержана Комитетом по научным исследованиям (Польша, контракт № 2Z6Z600105, с.13) и Центром космических исследований Польской Академии наук.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Physics of the outer heliosphere. COSPAR colloquia series. / Ed. by S. Grzedzielski, D.E. Page. Oxford: Pergamon press, 1990.V.1. P.1-409.
2. Witte M., Rosenbauer H., Keppler E. et al. // J. of Astrophys. Suppl. Ser. 1992. V.92. P.333.
3. Gruntman M.A., Leonas V.B. Препринт № 1109. М.: ИКИ АН СССР, 1986.
4. Bleszynski S., Grzedzielski S., Rucinski D., Jakimiec J. // Planet. Space Sci. 1992. V.40. № 11. P.1525.
5. Грунтман М.А., Морозов В.А. Препринт № 667. М.: ИКИ АН СССР, 1981.
6. Figliwicz J., Hlond M., Mrugalski Z., Pivonski A. // Scient. Instrum. 1991. V.6. № 3-4. P.45.
7. Hlond M. // Scient. Instrum. 1991. V.6. № 3-4. P.31.
8. Hsieh K.C., Keppler E., Schmidtke G. // J. Appl. Phys. 1980. V.51. P.2242.

Институт космических  
исследований РАН  
117810, Москва, Профсоюзная ул., 84/32

Поступила в редакцию  
16.XI.1994  
После доработки  
18.IV.1995