

Межзвездные атомы водорода в Солнечной системе: способ диагностики параметров межзвездной среды и границы гелиосферы



Катушкина О.А.^{1,2}, Измоленов В.В.^{1,2,3},
Алексашов Д.Б.^{1,3}, Малама Ю.Г.^{1,3}

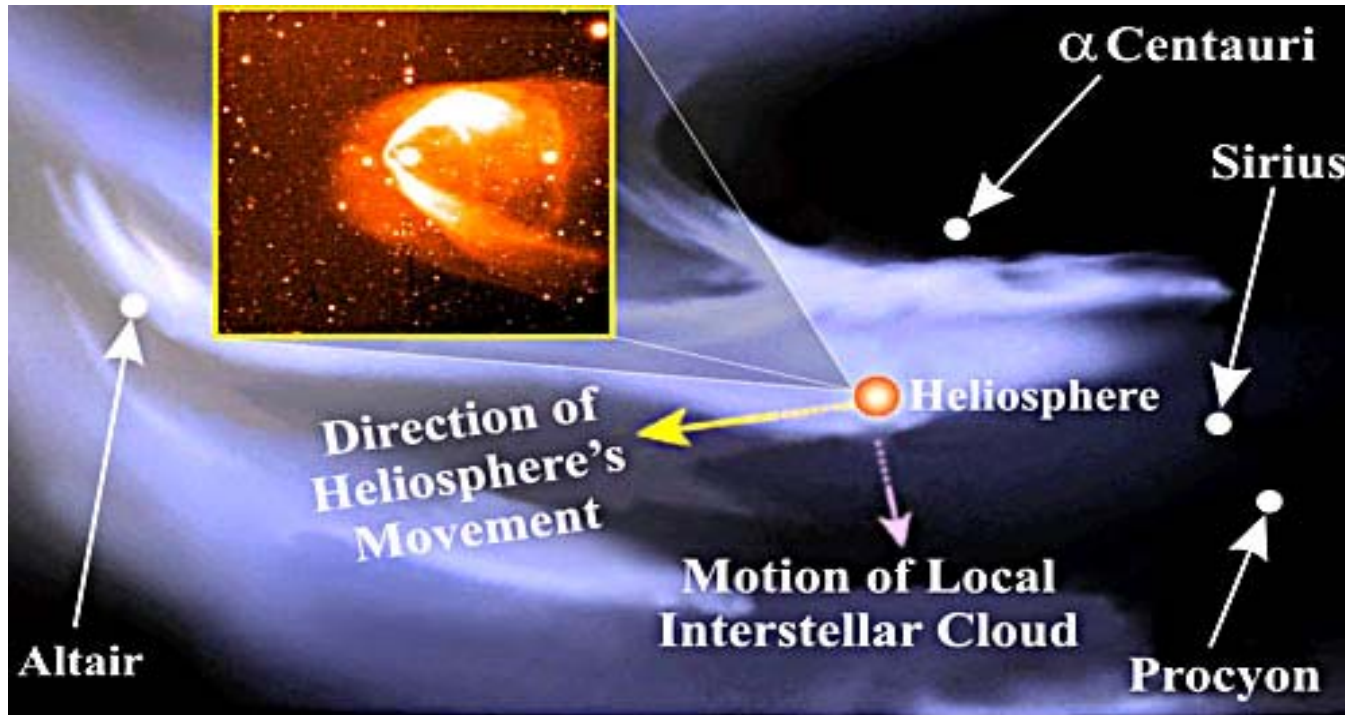
- (1) Институт космических исследований РАН,
- (2) механико-математический ф-т
МГУ им. М.В. Ломоносова,
- (3) Институт проблем механики им.
А.Ю. Ишлинского РАН



Содержание доклада

- *Введение:* взаимодействие солнечного ветра с межзвездной средой: гелиосфера и гелиосферный ударный слой
- *Часть 1:* межзвездные атомы водорода в гелиосфере
- *Часть 2:* применение разработанной модели для расчета параметров рассеянного солнечного Лайман-альфа излучение в гелиосфере (анализ данных SOHO/SWAN)
- *Заключение*

Локальная межзвездная среда



TA003713

Локальное Межзвездное Облако (ЛМО):
частично-ионизованная водородная плазма
(H, e, p, He и др.)

$T \sim 6700 \text{ K}$

$n_p \sim 0.02 - 0.1 \text{ cm}^{-3}$, $n_H \sim 0.1 - 0.2 \text{ cm}^{-3}$

$V \sim 23\text{-}26 \text{ km/s} \Rightarrow$ **«межзвездный ветер»**

Солнечный ветер

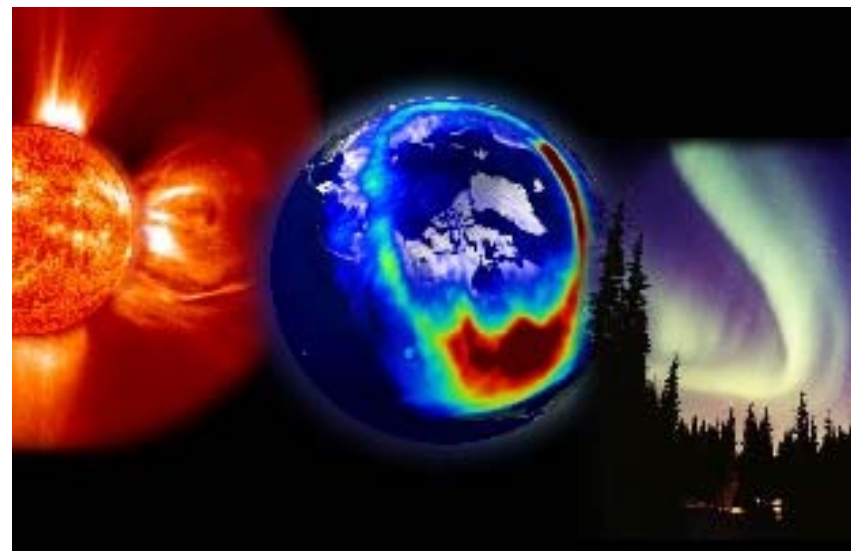
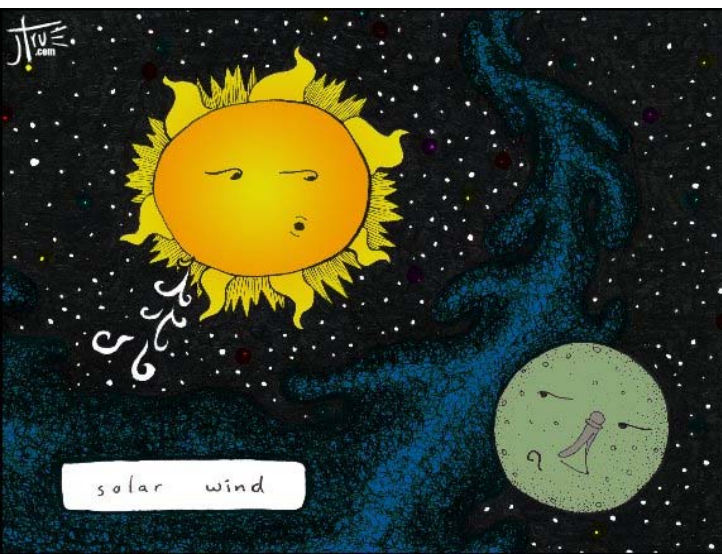


Parker E., Astrophysical Journal, vol. 128, p.664 (1958) – первое теоретическое предсказание с.в.



from SOHO: At 00:54 UT 01/07/2013
скорость: 549 km/s,
концентрация: 0.95 p/cm³

1959-1962 –
первые измерения
с.в. (Грингауз и др.
1960; Neugebauer
& Snyder, 1962)



Взаимодействие солнечного ветра с локальной межзвездной средой

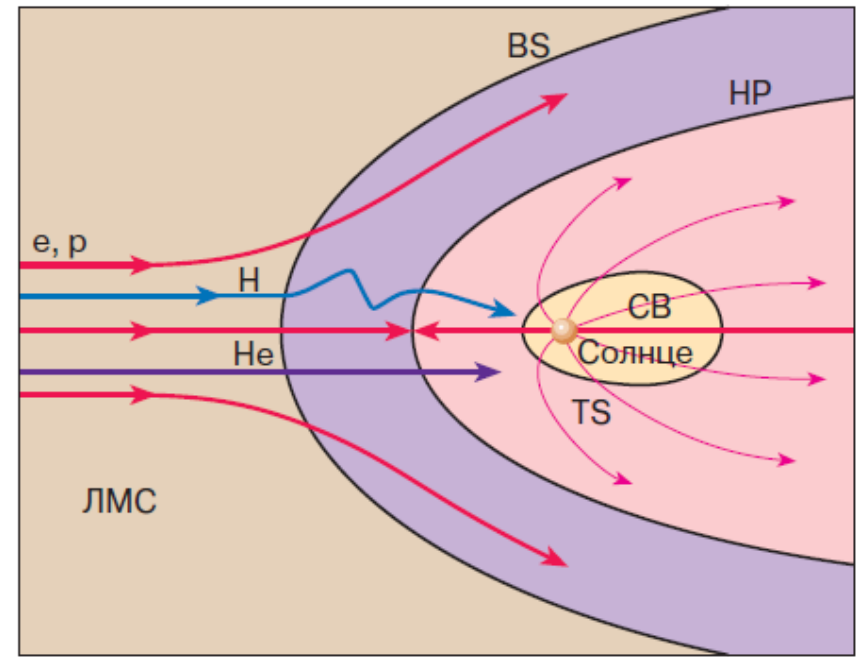
*солнечный ветер + межзвездный ветер =
образование гелиосферного ударного слоя*

гелиосфера – область космического пространства, занятая солнечным ветром
граница гелиосферы – **гелиопауза** (HP) (~ 120-150 а.е. от Солнца)

Качественная картина **гелиосферного ударного слоя**:

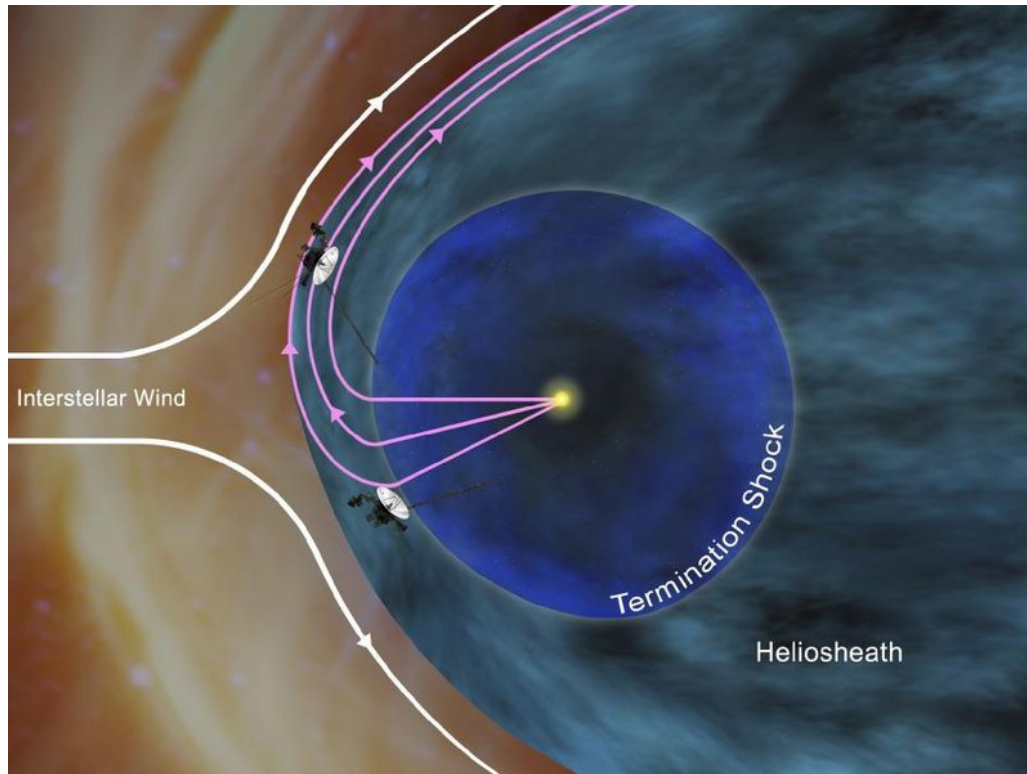
Кинетико-газодинамические модели:

- Баранов, Краснобаев, Куликовский (ДАН СССР, 1970).
Приближение тонкого слоя для обтекания солнечного ветра гиперзвуковым потоком полностью ионизированной плазмы локальной межзвездной среды.
- Baranov & Malama (J. of Geophys. Res., 1993)
Первая самосогласованная кинетико-газодинамическая модель взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой
- в дальнейшем модель активно развивалась путем введения новых физических явлений (альфа-частицы, магнитное поле, неравновесный характер плазмы, солнечный цикл и др.) – Baranov et al., 1998; Izmodenov et al., 2005; Izmodenov et al., 2009; и др.



Баранов В.Б., Соровский
образовательный журнал

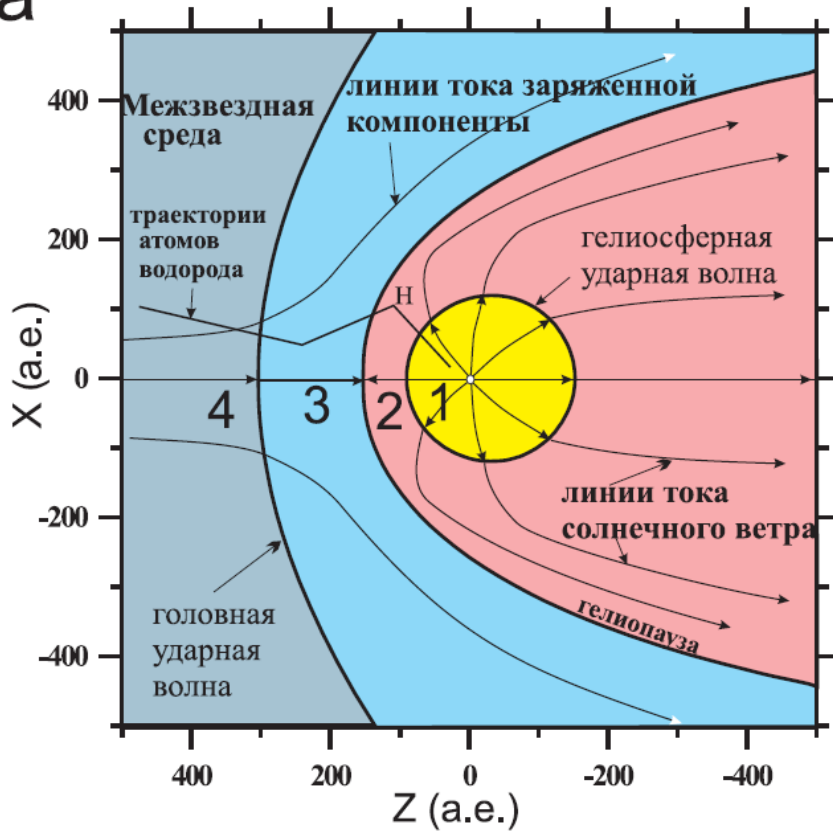
Экспериментальное подтверждение существования гелиосферного ударного слоя: Voyager-1/2



- Вояджер 1 и 2 были запущены NASA в 1977 г. и до сих пор летят и работают!
- декабрь 2004 г. Вояджер-1 пересек TS на расстоянии **94** а.е.
- август 2007 г. Вояджер-2 пересек TS на расстоянии **84** а.е.
(в 1993 г. было предсказано, что расстояние до TS = **90** а.е.)
- 12.09.2013 г. – **сообщение NASA** о том, что Вояджер-1 пересек гелиопаузу в августе 2012 г. (122 а.е.), Garnett et al., Science, 2013

ЧАСТЬ 1: Межзвездные атомы водорода в гелиосфере (почему они интересны и зачем их исследовать?)

а



- Основная компонента межзвездной среды; (90 %; $n_{\text{H,ЛМС}} = 0.14-0.18 \text{ см}^{-3}$)

- Проникают внутрь гелиосферы через область гелиосферного ударного слоя за счет больших длин свободного пробега

- Являются практически единственными представителями ЛМС в гелиосфере

- Внутри гелиосферы атомы H являются основным источником информации о межзвездной среде и о границе гелиосферы;

- доступны для прямых (IBEX) и косвенных измерений (рассеянное Лайман-альфа излучение – SOHO, Cassini, Voyagers, HST)

Цель работы:

численное моделирование распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере: детальное описание функции распределения атомов по скоростям вблизи Солнца

Мотивация:

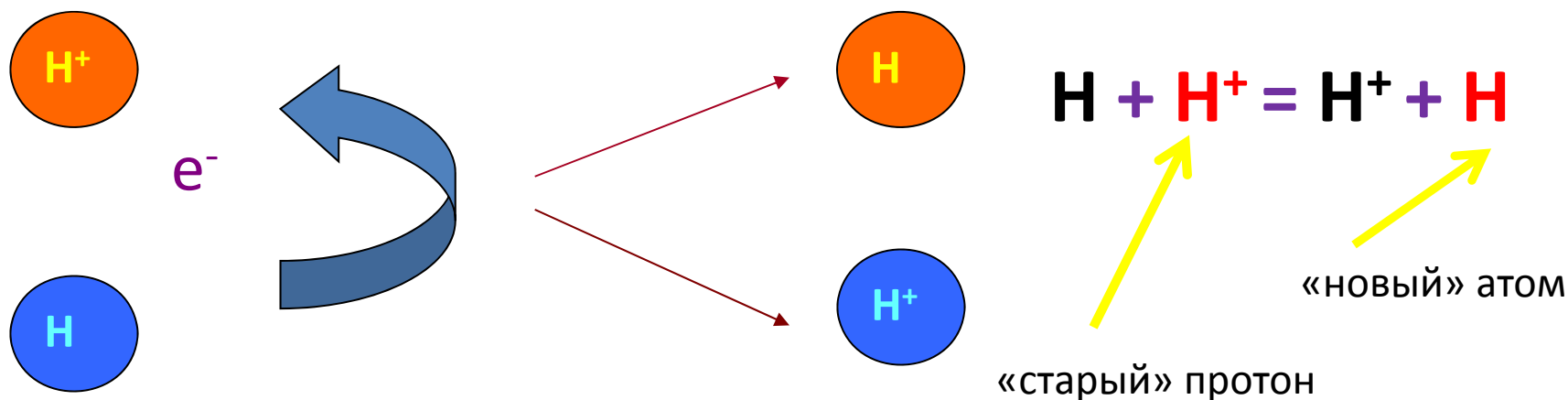
- анализ и интерпретация многочисленных данных по Лайман-альфа излучению (SOHO/SWAN, HST, Cassini и др.)
- анализ измерений низкоэнергичных атомов водорода прибором IBEX-Lo

Задачи:

- исследование свойств границы гелиосферы
- определение параметров (скорости, температуры и магнитного поля) межзвездной среды
- определение зависимости параметров солнечного ветра от гелиошироты

Процесс перезарядки атомов на протонах

атомы водорода взаимодействуют с протонами через процесс перезарядки:



В результате перезарядки образуются новые атомы водорода, распределение которых отражает локальные свойства плазмы в области их рождения

«первичные» межзвездные атомы проникают непосредственно из ЛМС без перезарядки

«вторичные» межзвездные атомы рождаются из первичных в результате перезарядки в районе гелиопаузы



Распределение атомов водорода в гелиосфере зависит от свойств ЛМС, а также от свойств плазмы в районе границы гелиосферы

Модель распределения атомов водорода вблизи Солнца

Кинетическое уравнение для функции распределения атомов по скоростям:

$$\frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)}{\partial t} + \mathbf{w} \cdot \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{F}(r, \lambda, v_r, t) \cdot \frac{\partial f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)}{\partial \mathbf{w}} = -\beta(r, \lambda, t) \cdot f(\mathbf{r}, \mathbf{w}, t)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{rad} = -\frac{G \cdot M_s \cdot (1 - \mu)}{r^2} \cdot \frac{\mathbf{r}}{r} \quad \mu = |\mathbf{F}_{rad}| / |\mathbf{F}_g|$$

r – расстояние от Солнца

t – время

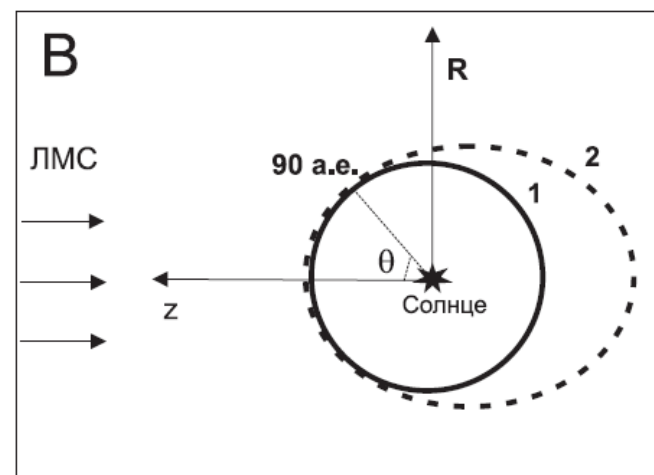
λ – гелиоширота

v_r – радиальная скорость

$$\beta(r, \lambda, t) = (\beta_{ex,E}(\lambda, t) + \beta_{ph,E}(\lambda, t)) \left(\frac{r_E}{r} \right)^2 = \beta_E(\lambda, t) \left(\frac{r_E}{r} \right)^2$$

Параметры, определяющие влияние Солнца ($\mathbf{F}_{rad}$, β_E), являются функциями времени и гелиошироты, что делает задачу трехмерной и нестационарной

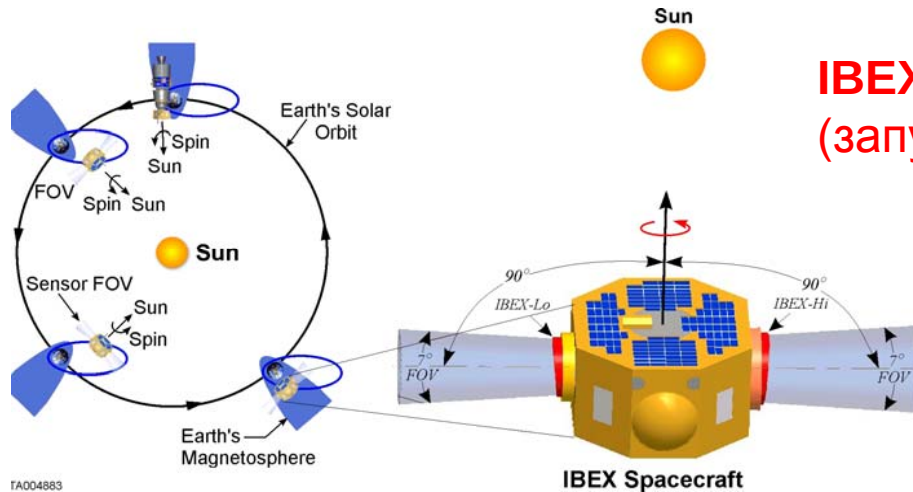
На расстоянии 90 а.е. от Солнца задается граничное условие для функции распределения атомов с учетом процессов, происходящих на границе гелиосферы (Baranov, Malama 1993; Izmodenov et al., 2001; Izmodenov et al., 2009).



Необходимость параллельных вычислений

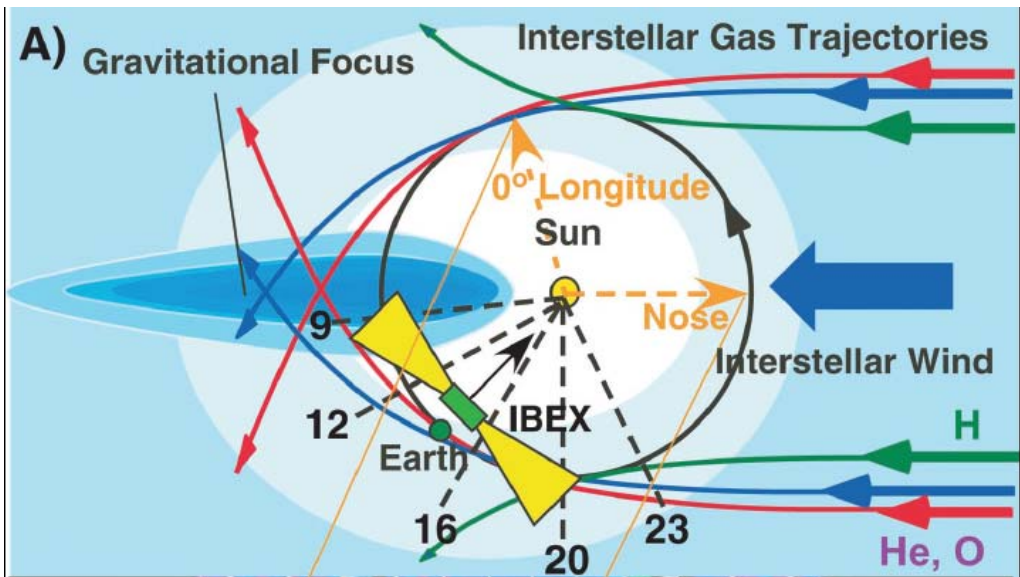
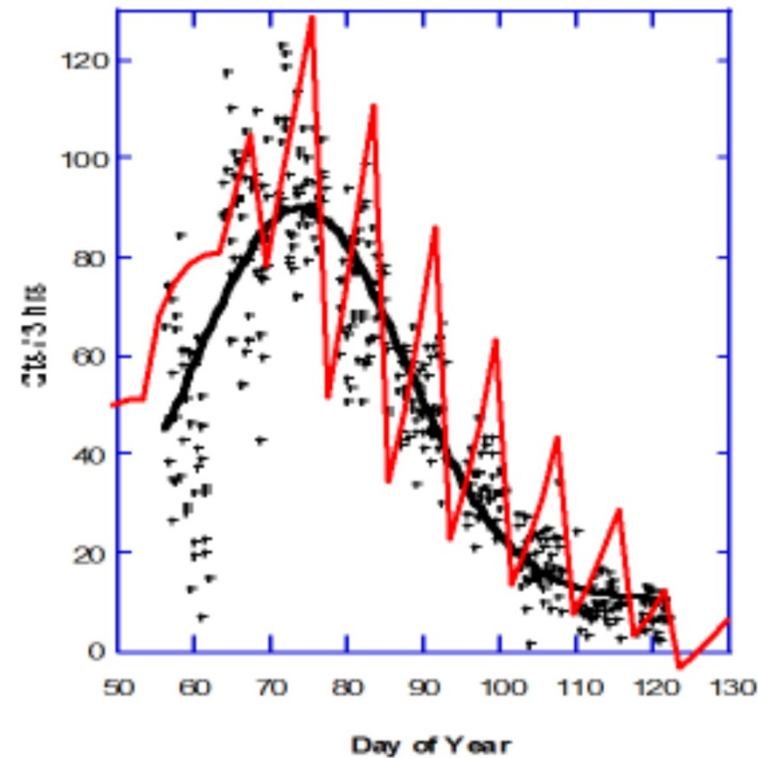
- внутренний ресурс параллелизма:
независимые траектории атомов
- трехмерная и нестационарная задача +
нужна хорошая точность для анализа данных
= длительные расчеты
- большой объем экспериментальных данных,
которые нужно проанализировать
- программа написана на языке Fortran и
распараллелина с помощью MPI (расчеты на
суперкомпьютерах «Ломоносов» и
«Чебышев»)
- в будущем планируется перейти на GPU

Первые результаты сравнения с данными IBEX-Lo:



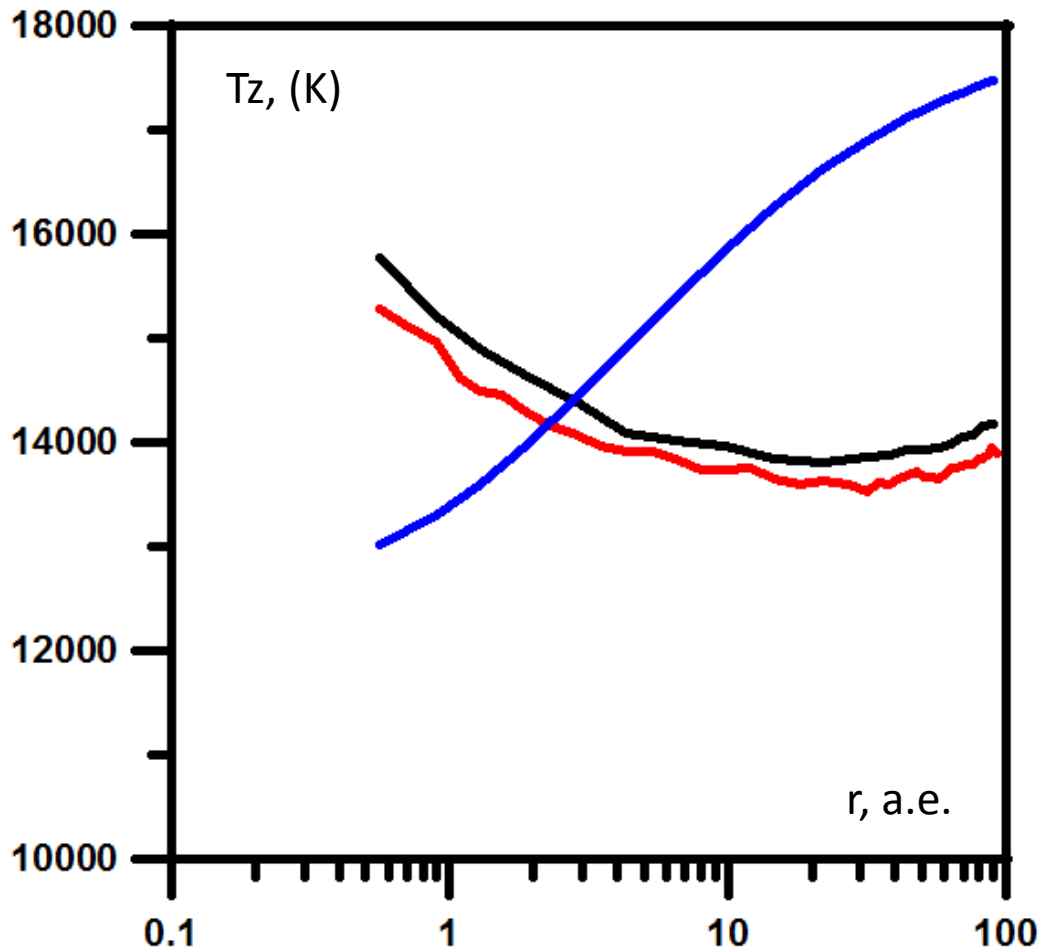
IBEX – Interstellar Boundary Explorer
(запуск – 2008 г.)

IBEX-Lo 2009 Interstellar Hydrogen



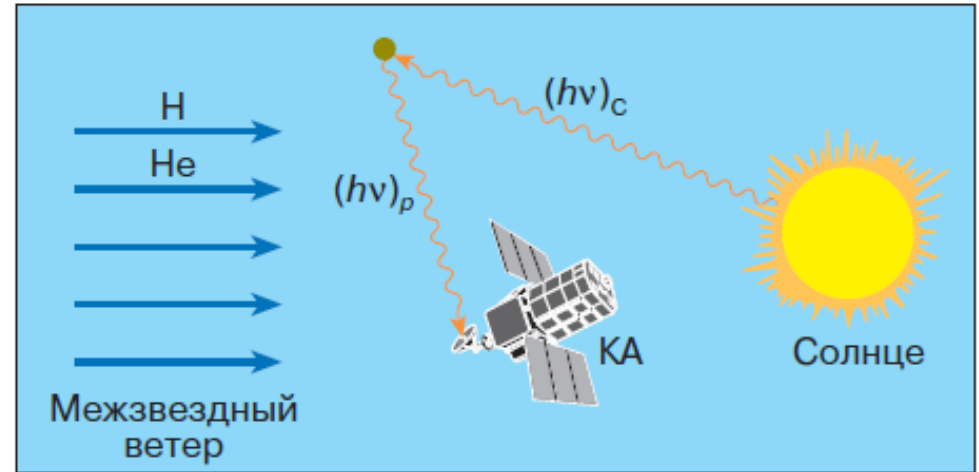
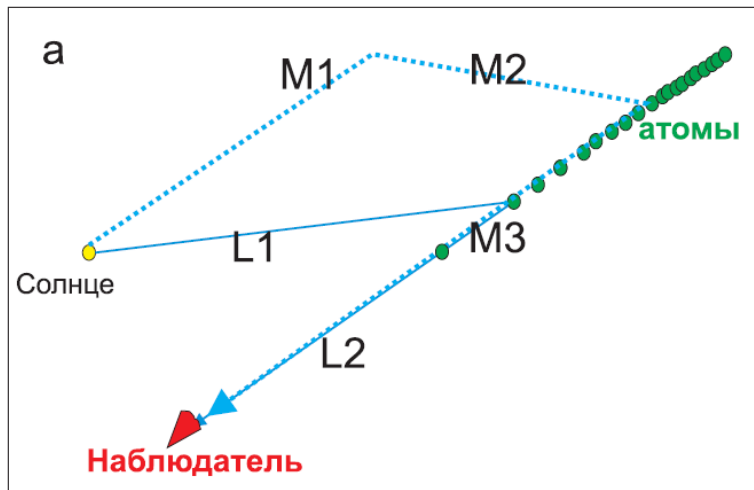
Влияние гелиосферного ударного слоя на распределение атомов вблизи Солнца

$$T_z(\mathbf{r}) = \frac{m_H}{k \cdot n_H(\mathbf{r})} \int f(\mathbf{r}, \mathbf{w}) \cdot (V_z(\mathbf{r}) - w_z)^2 d\mathbf{w} \quad - \text{«кинетическая температура»}$$



классическая модель без учета эффектов границы гелиосферы;
разработанная модель с учетом эффектов границы гелиосферы;
самосогласованная модель (Baranov & Malama, 1993)

ЧАСТЬ 2: Рассеянное солнечное Лайман-альфа излучение



Ly- α излучение: длина волны в центре линии = 1215 ангстрем

Шкловский (1959), Kupperian et al., (1959) - первые измерения на ракетах

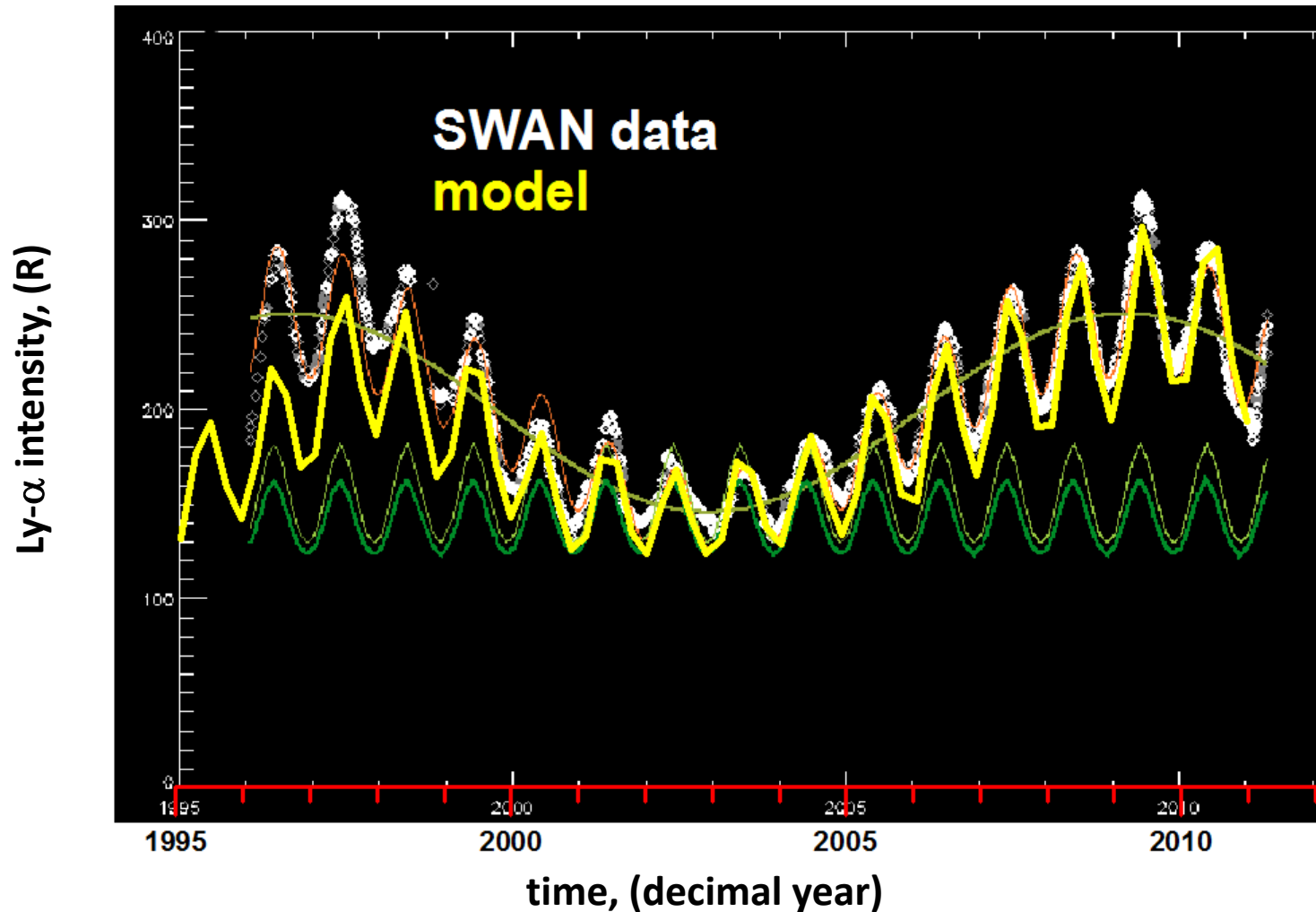
Курт и др. 1965, 1967, 1968 – измерения на станциях Венера-2,3,4.

Bertaux and Blamont, Thomas and Krassa (1971) - Эксперимент на OGO-5, обнаружение параллакс-эффекта.

Дальнейшие измерения: «Прогноз-5,6» (Курт, Миронова, Bertaux, Lallement), SOHO/SWAN (Bertaux, Quemerais, Lallement) и др.

На межзвездных атомах водорода в гелиосфере рассеиваются солнечные Лайман-альфа фотоны => образуется рассеянное излучения, измеряемое на различных КА

Интенсивность в направлении северного полюса в эклиптических координатах: сравнение с данными SOHO/SWAN

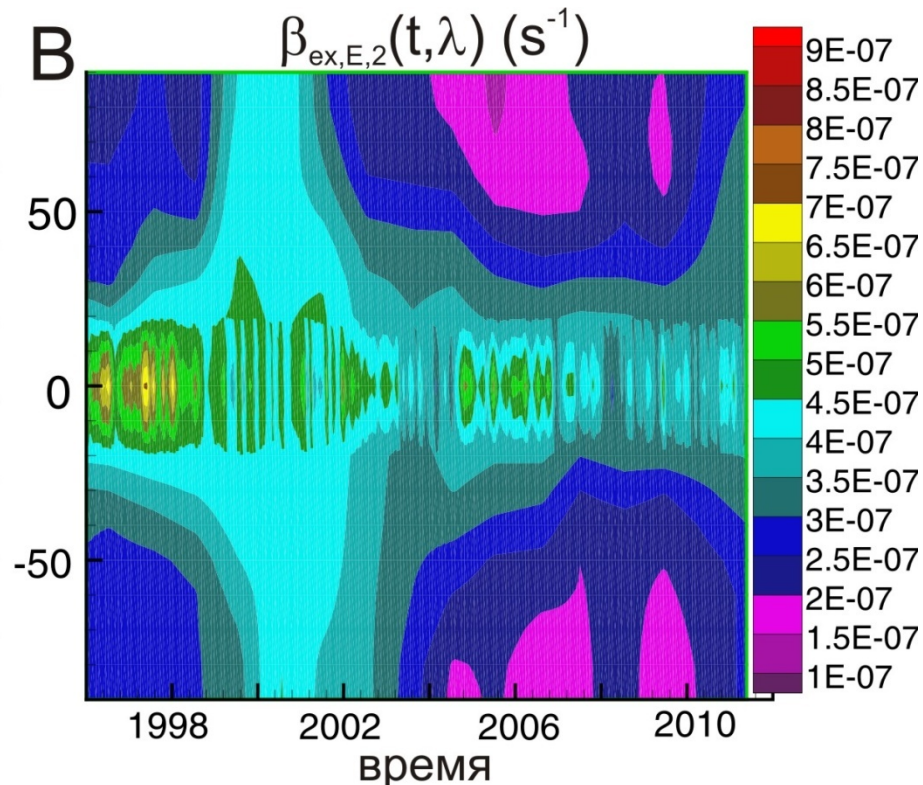
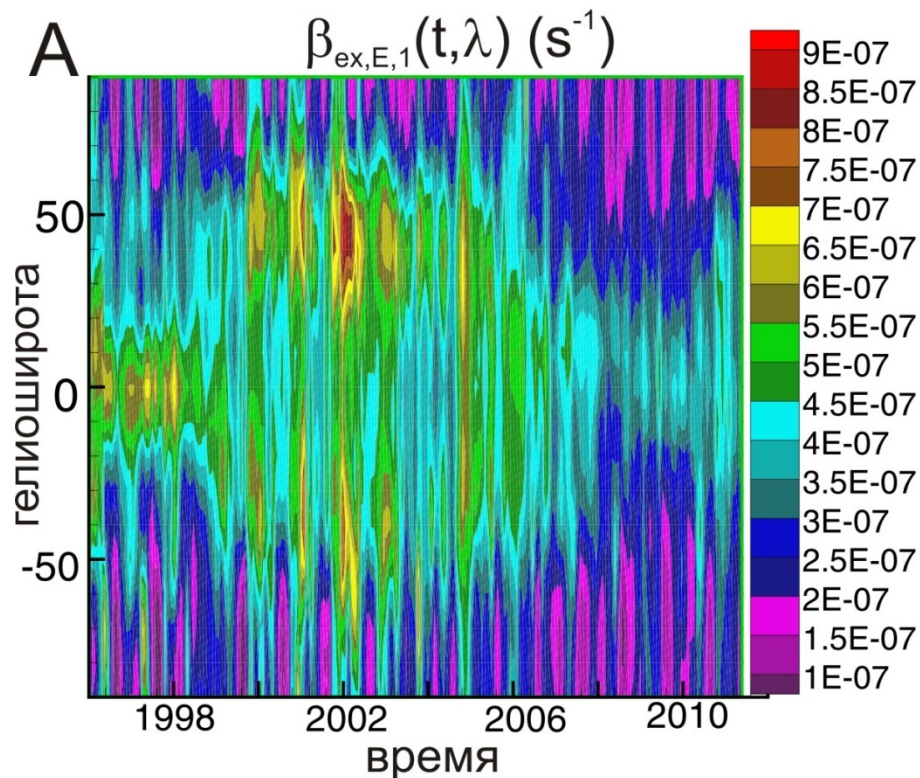


Определения зависимости параметров солнечного ветра от гелиошироты

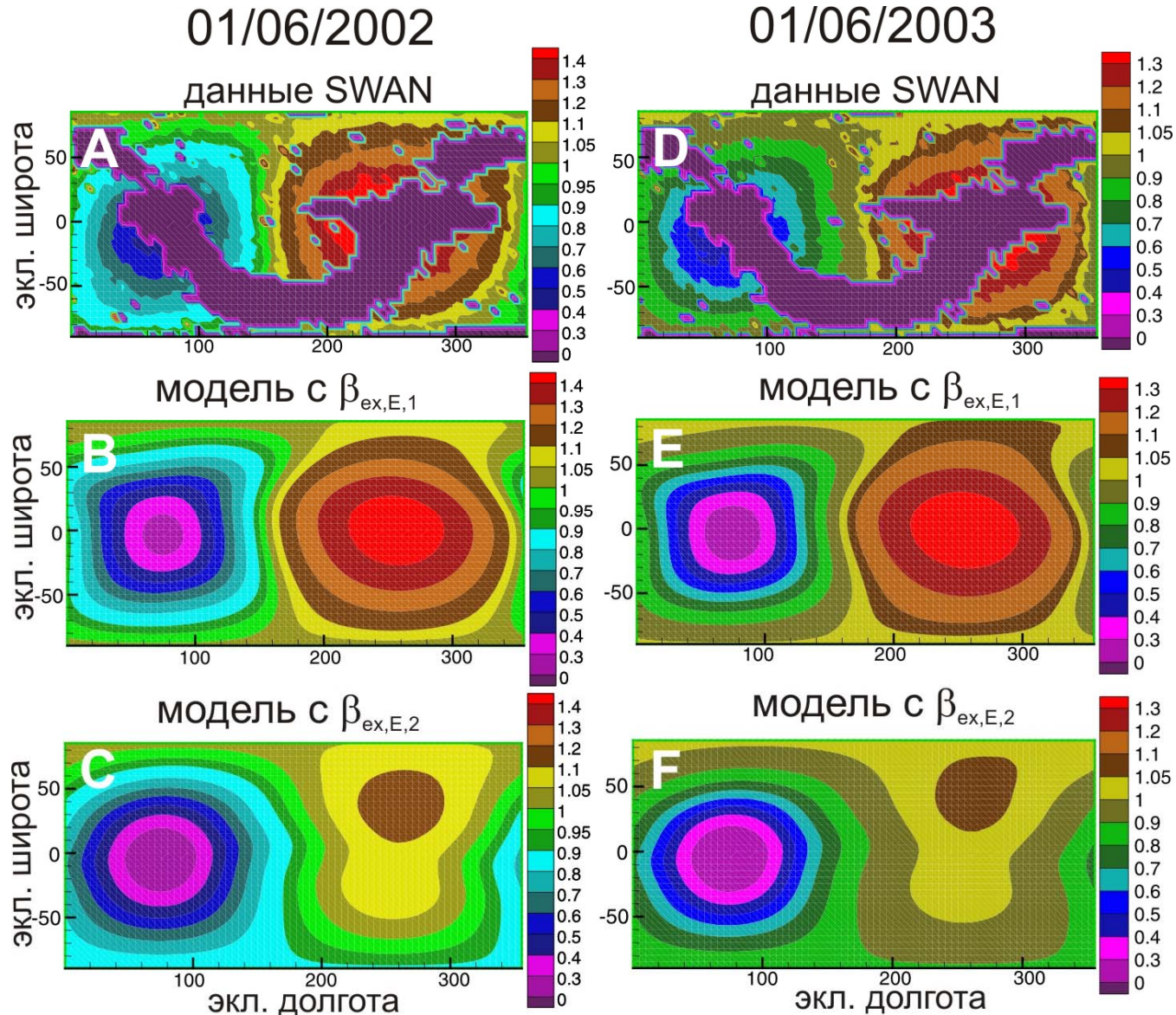
ПОТОК СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВРЕМЕНИ И ГЕЛИОШИРОТЫ:

Quemerais et al., 2006, JGR;
Lallement et al., 2010
SWAN + OMNI (in ecliptic)

Sokol et al., 2012
Ulysses + IPS



Карты неба в интенсивности Лайман-альфа излучения: сравнение с данными SOHO/SWAN



(Katushkina et al., Journal of Geophysical Res., 2013)

Заключение

- Разработанная 3D нестационарная кинетическая модель распределения межзвездных атомов в гелиосфере активно используется для анализа экспериментальных данных с космических аппаратов (IBEX, SOHO, Ulysses, Hubble Space Telescope, Cassini и др.)
- распределение атомов водорода в гелиосфере несет в себе информацию о параметрах ЛМС, свойствах границы гелиосферы, а также о параметрах и структуре солнечного ветра.
- задача обладает внутренним параллелизмом, и распараллеливание позволяет многократно ускорить вычисления

Спасибо за внимание!

