

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАНИЦ ГЕЛИОСФЕРЫ: АНАЛИЗ ДАННЫХ КА IBEX (NASA) и Voyagers (NASA)

В.В. Измоленов

МГУ им. М.В. Ломоносова

&

Институт Космических Исследований РАН

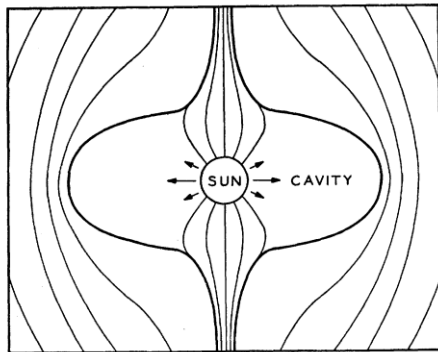
В 2005-2012 на космических аппаратах Вояджер 1 и 2, и Interstellar Boundary Explorer (IBEX) были получены новые уникальные экспериментальные данные о границе гелиосферы, часть из которых еще только предстоит понять и осмыслить.

Объект исследования – область взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой

(гелиосфера, граница гелиосферы, гелио-сферный интерфейс, гелиосферный ударный слой, гелиошис)

Открытие солнечного ветра на советских КА Луна 2/3 и Венера 1
(Грингауз и др. 1960)

Поиск ответа на вопрос: Где заканчивается солнечный ветер
и начинается межзвездная среда?
Что при этом происходит?



Davis (1955), Parker (1961)

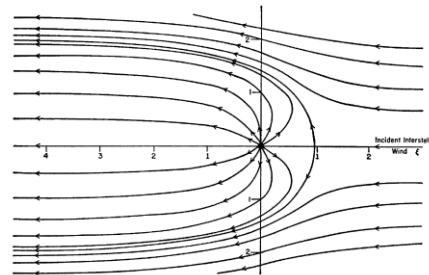
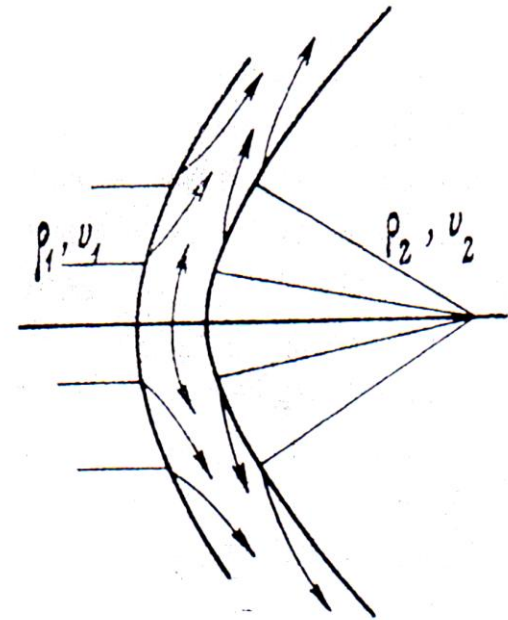
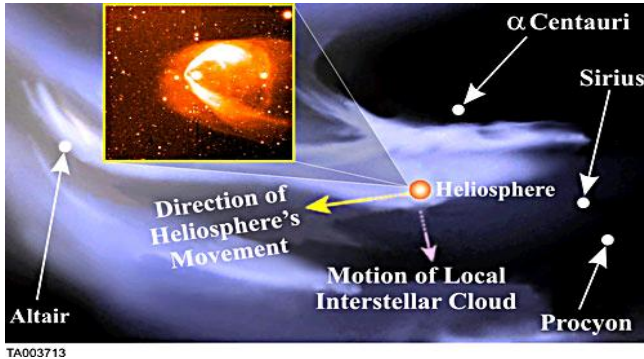


FIG. 1.—The streamlines of the subsonic, nearly incompressible, hydrodynamic flow of a stellar wind beyond the shock transition ($r = R$) in the presence of a subsonic interstellar wind carrying no significant magnetic field.

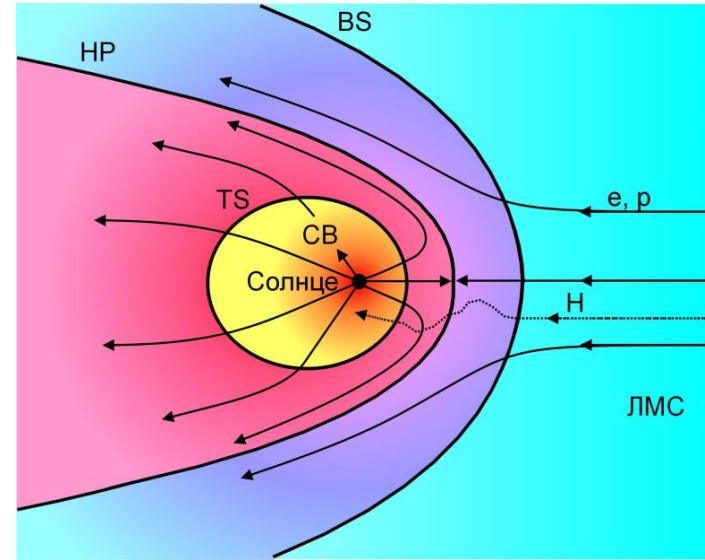


Баранов, Краснобаев,
Куликовский (1970, ДАН ССРС)

Свойства границы гелиосферы определяются взаимодействием с окружающей межзвездной средой

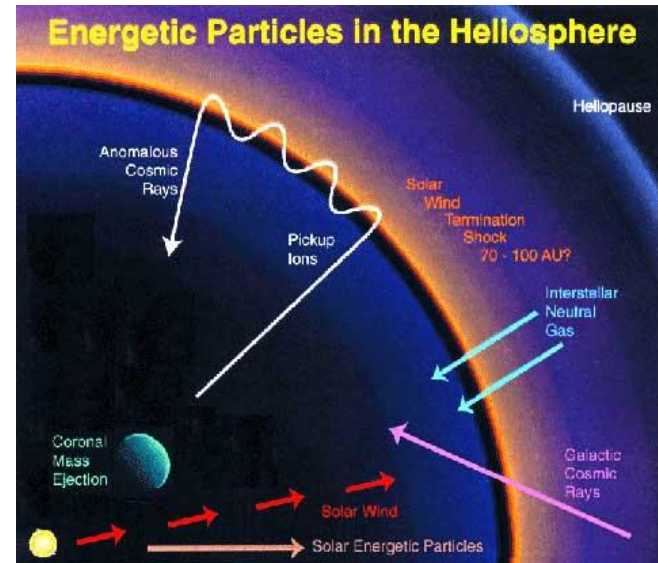


Межзвездная среда – частично ионизованная плазма



Взаимодействие солнечного ветра с локальной межзвездной средой имеет многокомпонентный характер (плазма, межзвездные атомы водорода, энергичные частицы – захваченные протоны, аномальные космические лучи, ЭНА).

Модель: требуется трехмерная нестационарная кинетико-МГД модель => суперкомпьютеры



КА исследующие границы гелиосферы:

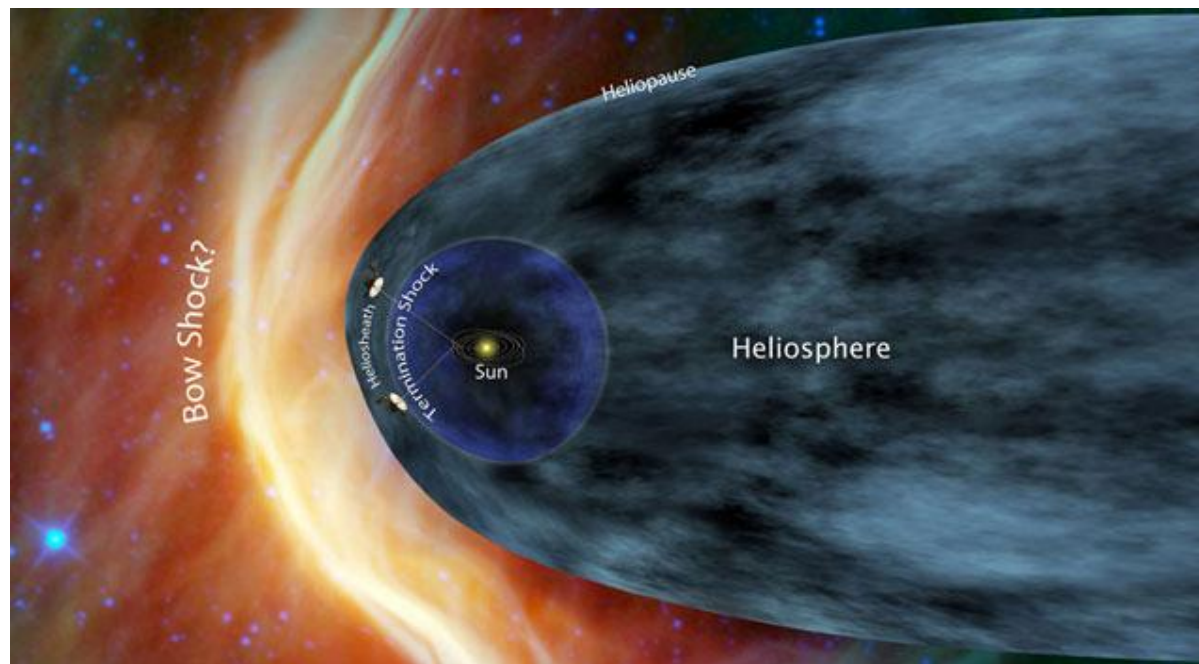
Voyager 1 (запуск 1977, сейчас на 122 а.е.)

Voyager 2 (запуск 1977, сейчас на 99.74 а.е.),

Interstellar Boundary Explorer (IBEX, запуск 2009, на орбите Земли)

+ отдельные приборы/специальные измерения на

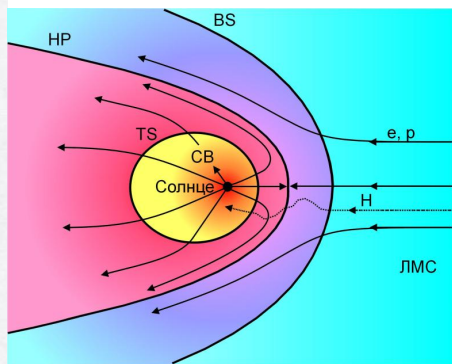
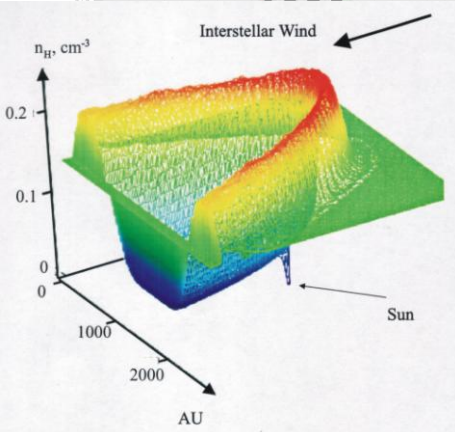
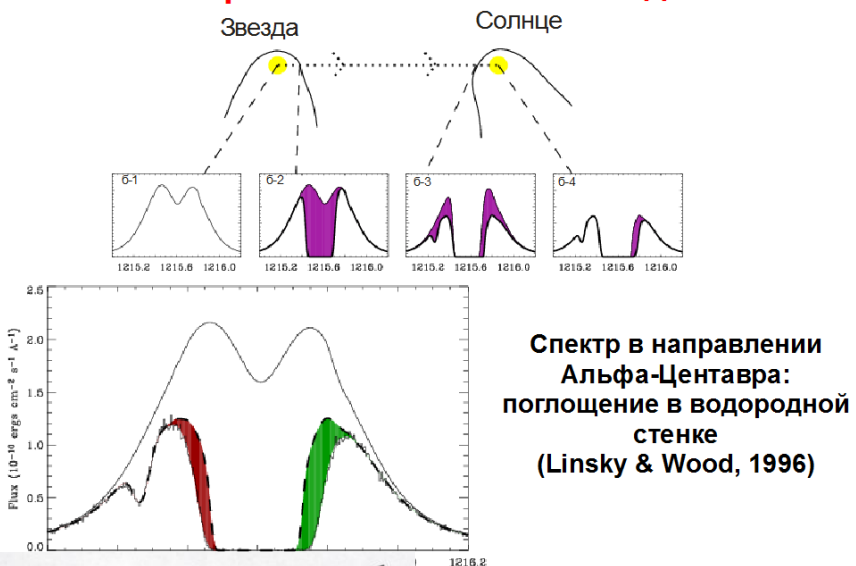
других КА: SOHO/SWAN, HST, Ulysses/GAS, Cassini



До 2007 г. мы «знали» (думали, что знаем), что происходит на границе гелиосферы

(т.е. все существующие на это время экспериментальные данные можно было объяснить в рамках единой теоретической модели)

Спектры поглощения в линии Лайман-альфа в направлении ближних звезд



Пересечение гелиосферной ударной волны:

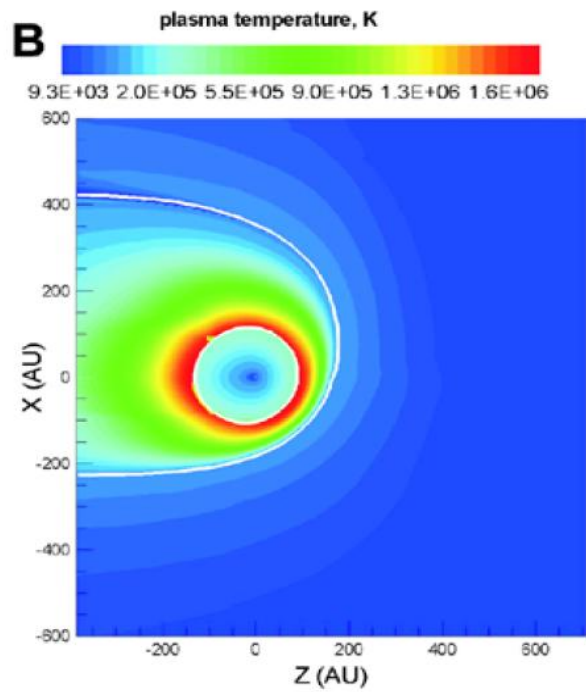
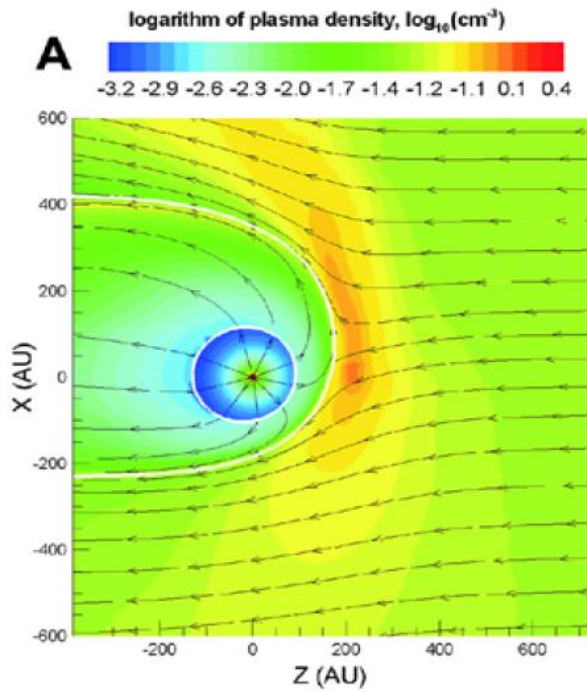
Вояджер 1: декабрь 2004, 94 а.е.

Вояджер 2: сентябрь 2007, 84 а.е.

**Первый сюрприз = > сильная асимметрия ударной волны
=> величина межзвездного магнитного поля $\sim 4-5$ мкГаусс.**

Влияние межзвездного магнитного поля на положение поверхностей разрыва

(Izmodenov et al., Space Sci. Rev., 2009)



$B_{\text{LIC}} = 4.375 \mu\text{G}$

$(B_{\text{LIC}} V_{\text{LIC}}) = 15^\circ$

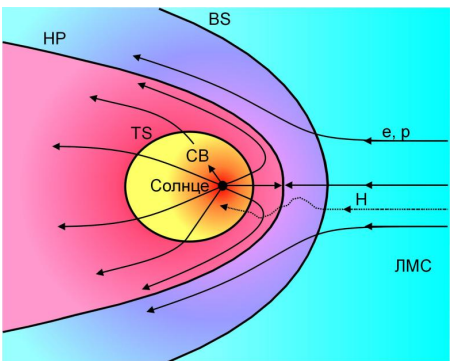
$M = 1.97$

$M_A = 0.678$

$M_{Z^+} = 0.675$

⇒ Головной ударной волны скорее всего нет.

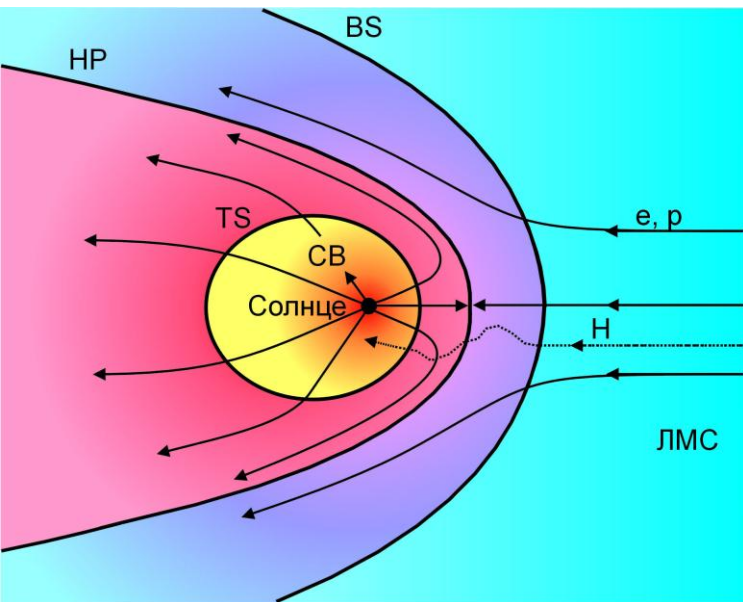
Вывод подтвержден в McComas et al. (Science, 2012).



КА Interstellar Boundary Explorer (запуск 19 октября 2008)

Основная цель проекта IBEX – дистанционное (с орбиты Земли) определение энергетических распределений протонов во внутреннем ударном слое

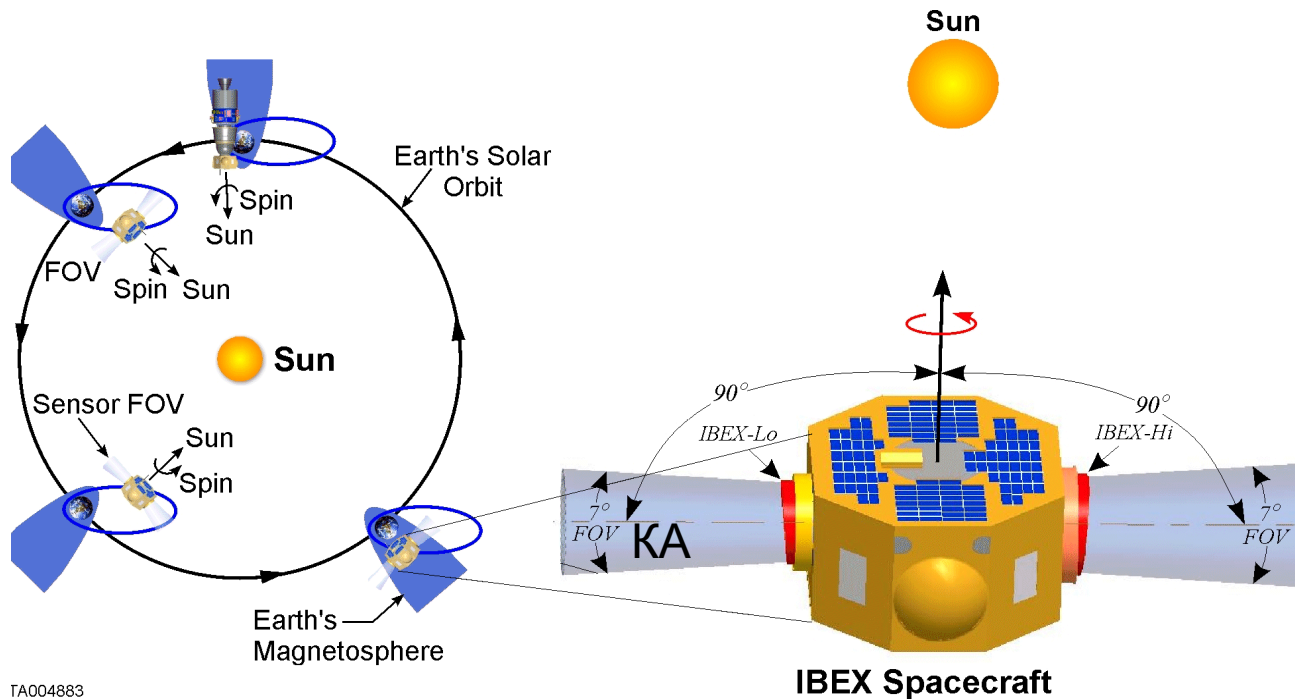
ИДЕЯ (Грунтман, 1980-е года, ИКИ):



Перезарядка межзвездных атомов на энергичных протонах в области гелиосферного ударного слоя => рождаются энергичные атомы (ЭНА) =>

часть из них возвращается внутрь гелиосферы, где и может быть измерена

IBEX – NASA SMEX mission



Измеряет потоки атомов (водорода, гелия, кислорода) в диапазоне ~ 0.2 эВ to ~ 6 кэВ. => Вращение позволяет получить полную карту неба 1 раз в 6 месяцев.

ТИПИЧНЫЕ КАРТЫ ЭНА, КОТОРЫЕ ОЖИДАЛИСЬ ДО ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРВЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

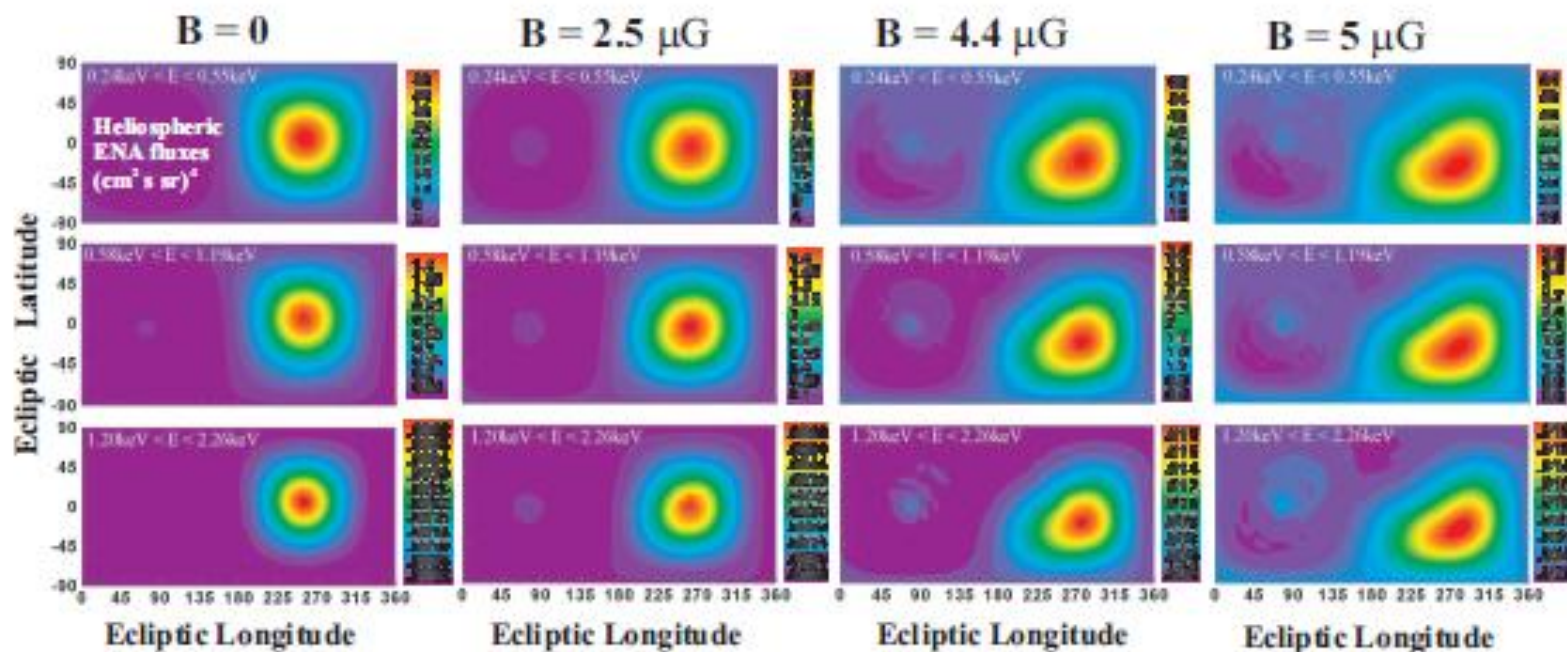
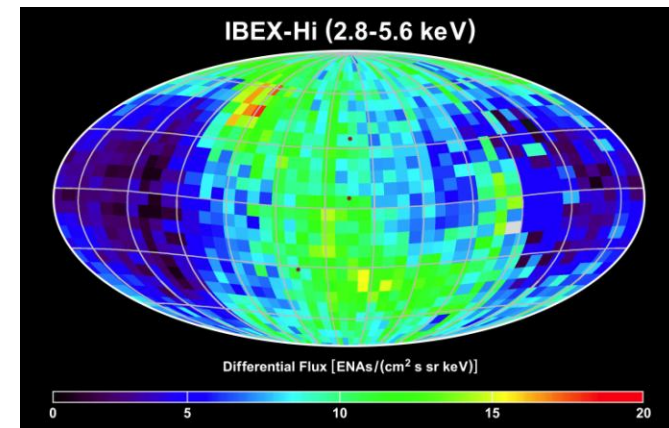
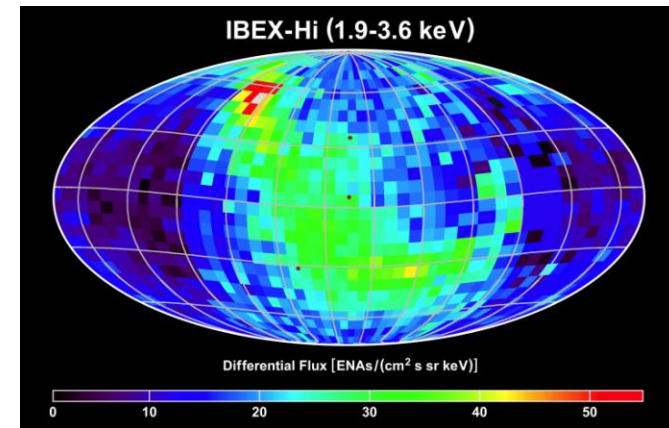
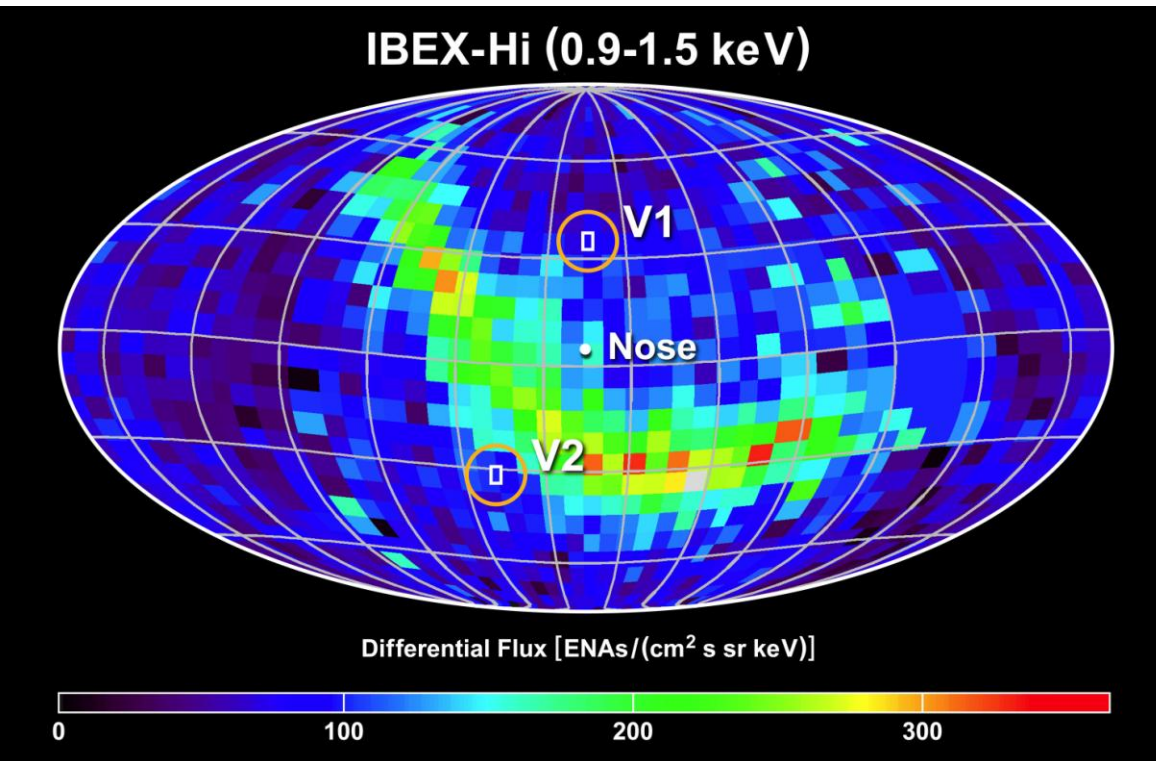


Fig. 7 Maps of heliospheric ENA fluxes that were calculated by using 3D kinetic-MHD model by Izmodenov et al. (2005a). Results are shown for $\alpha=15^\circ$ and different values of the interstellar magnetic field.

Первые измерения IBEX – открытие **пояса энергичных нейтралов**

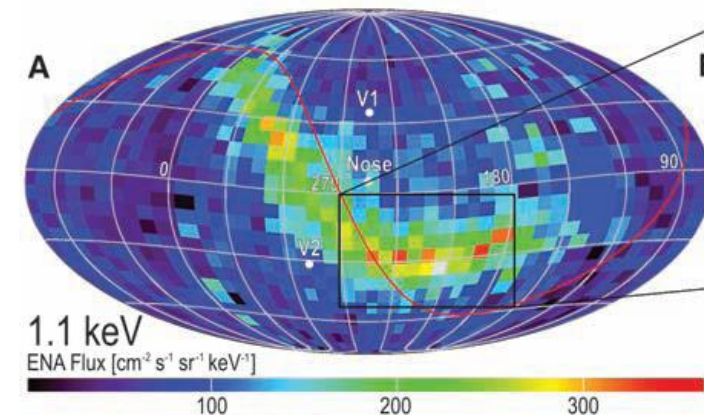
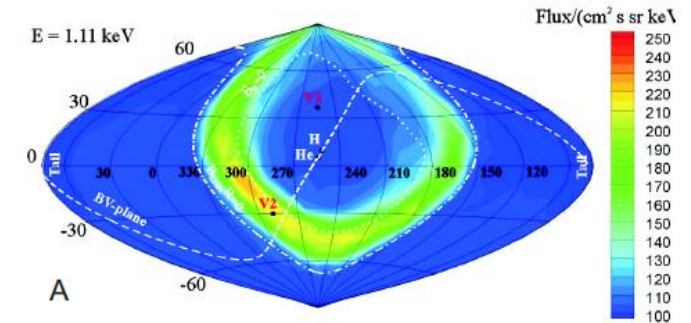
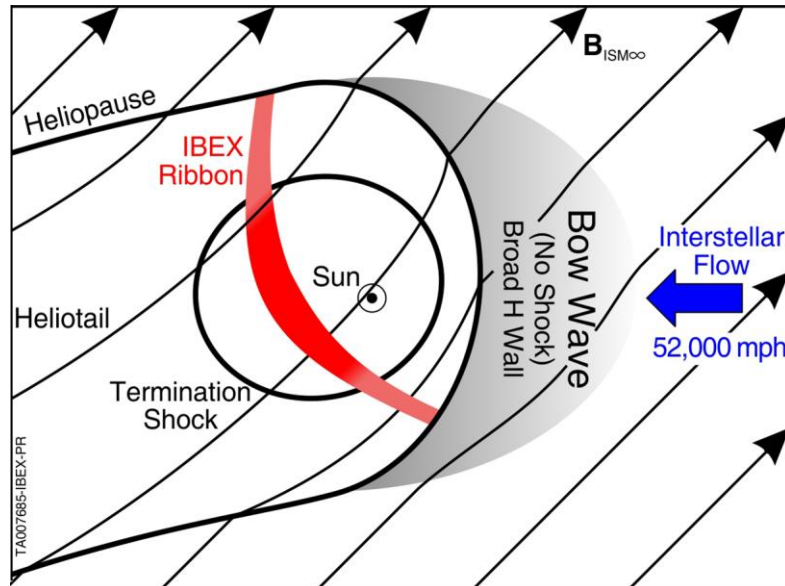
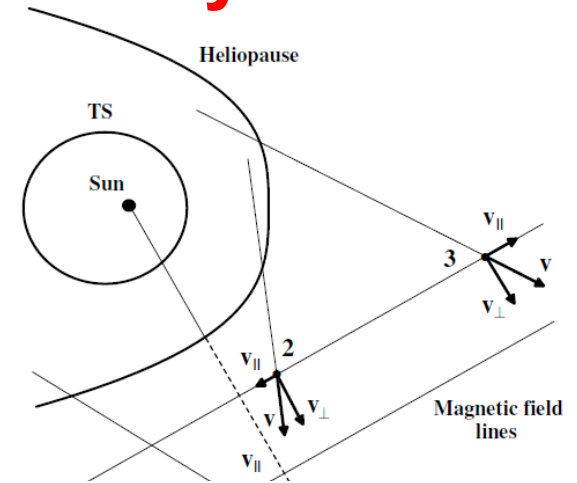


Science, vol. 326, 2009

Природа пояса ЭНА окончательно не установлена

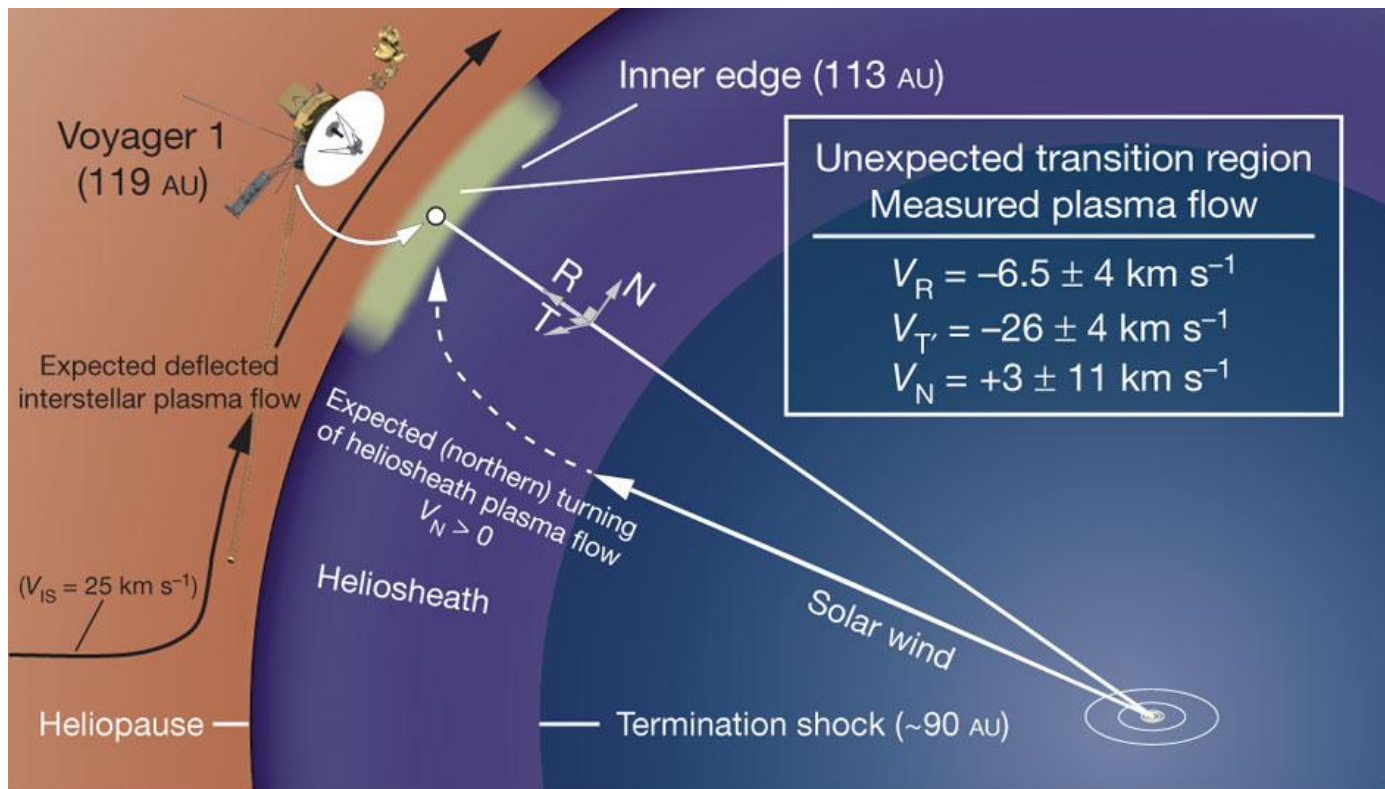
Сравнивая геометрию пояса с результатами трехмерного моделирования замечено, что положение пояса совпадает с направлениями $B_r=0$, (в которых магнитное поле перпендикулярно лучу зрения от Солнца.

=> Один из возможных механизмов образования пояса: двойная перезарядка в межзвездной среде + кумулятивный эффект в окрестностях магнитных зеркал.



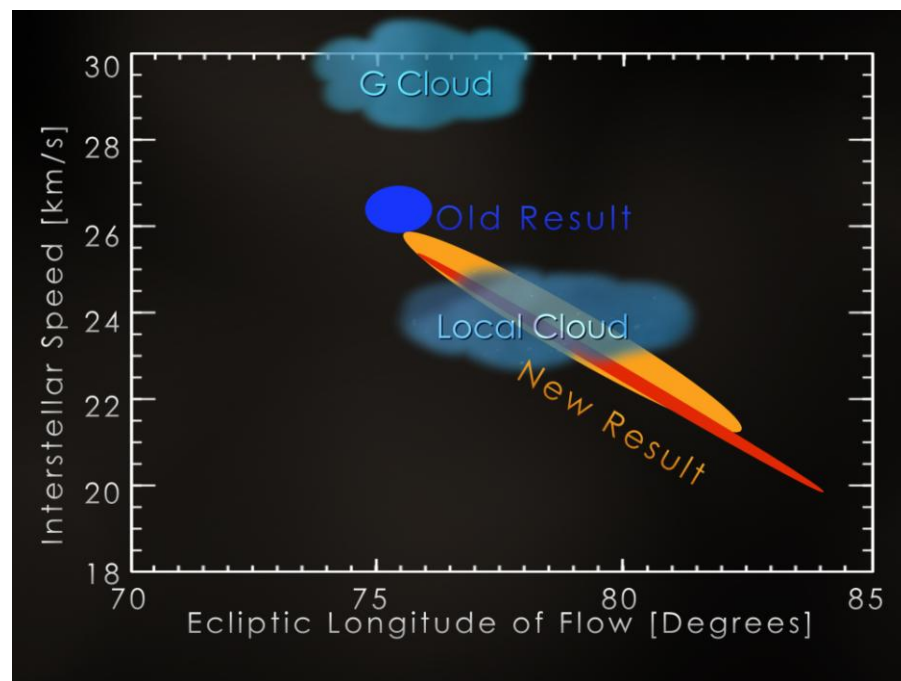
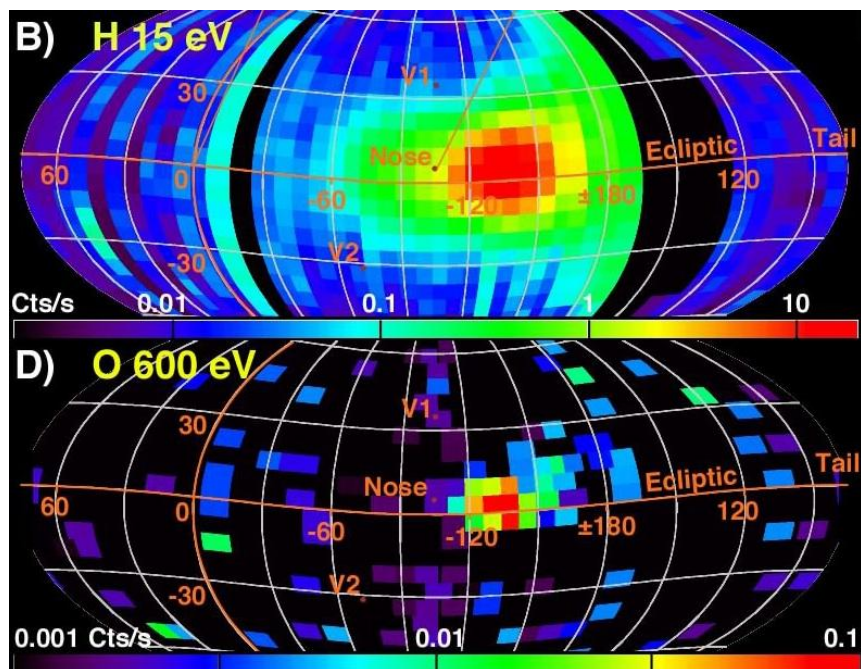
Новости с границы гелиосферы: НЕОЖИДАННОСТИ ПРОДОЛЖАЮТСЯ!!!!

1. С середины 2011 г. Вояджер 1 вошел в «stagnation region/layer» и возможно находится недалеко от гелиопаузы;



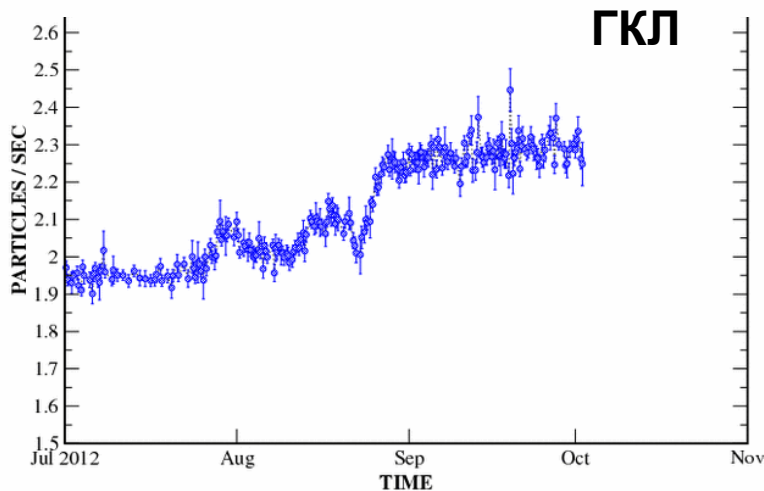
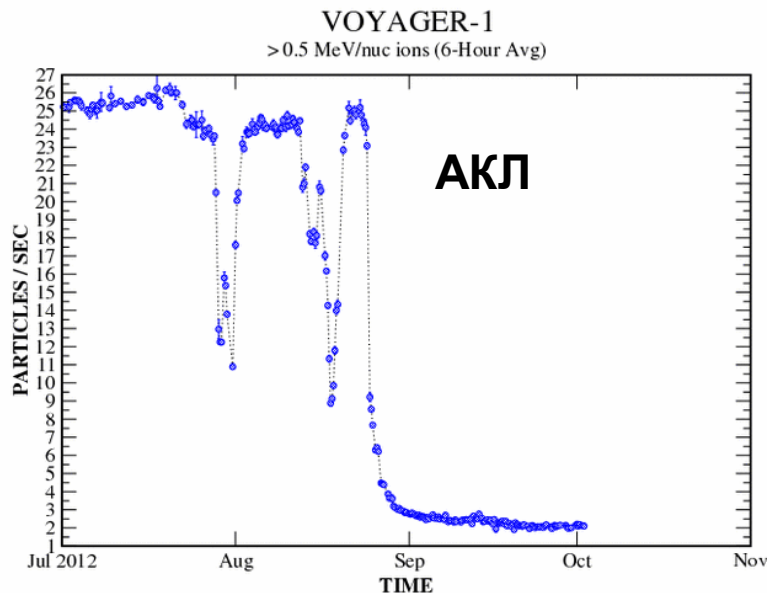
КА IBEX: результаты прибора IBEX-Lo

- Впервые на КА IBEX были экспериментально обнаружены вторичные атомы кислорода (предсказаны в 1997 г) и гелия (!!!! – никто не ожидал!!!!)



- Анализ данных, полученных на КА IBEX: возможно, что скорость и температура в локальном межзвездном облаке отличается (немного, но существенно) от принятой в настоящее время.

Измерение потоков АКЛ и ГКЛ: Вояджер 1 пересек гелиопаузу?



Июль- август 2012

Резкое уменьшение потоков АКЛ и одновременное увеличение ГКЛ

⇒ **Пересечение гелиопаузы?**

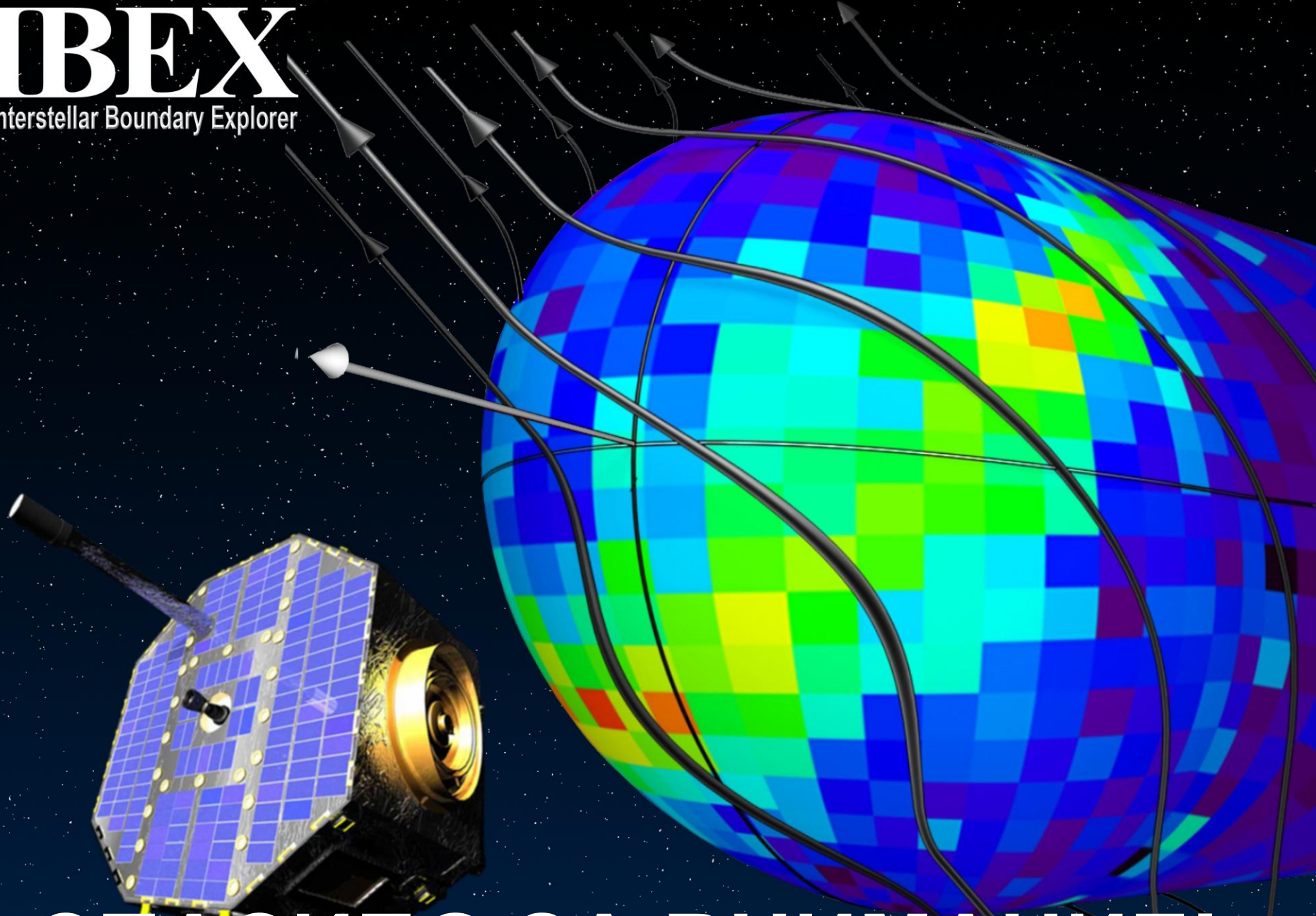
⇒ **Окончательное подтверждение (опровержение) после опубликования данных по магнитному полю.**

⇒ **Если гелиопауза в направлении Вояджера 1 находится на расстоянии 122 а.е.**

⇒ **Противоречит предсказаниям современных моделей границы гелиосферы (HP > 140 а.е.)**

IBEX

Interstellar Boundary Explorer



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Гелиосфера на кухне

