

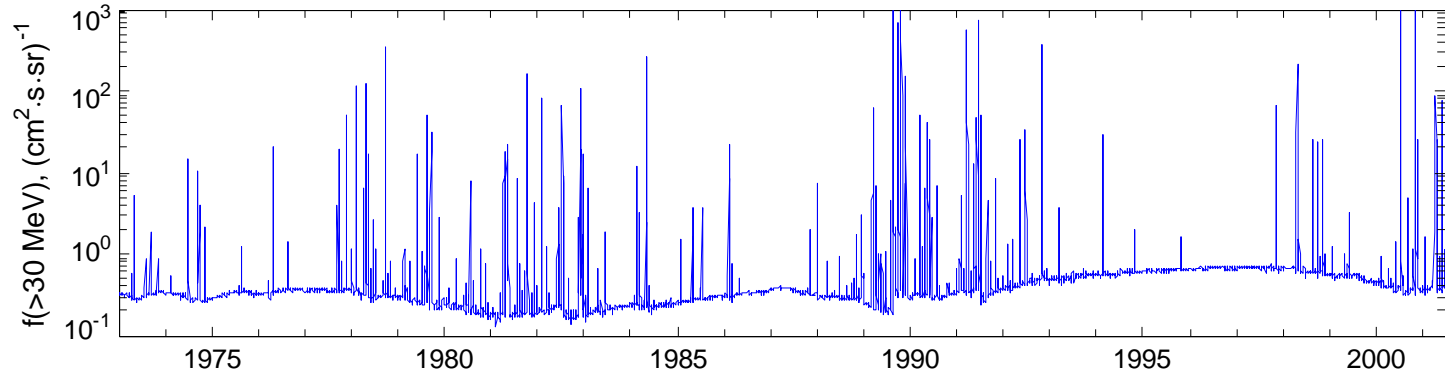


# Радиационные условия при полётах к планетам-гигантам

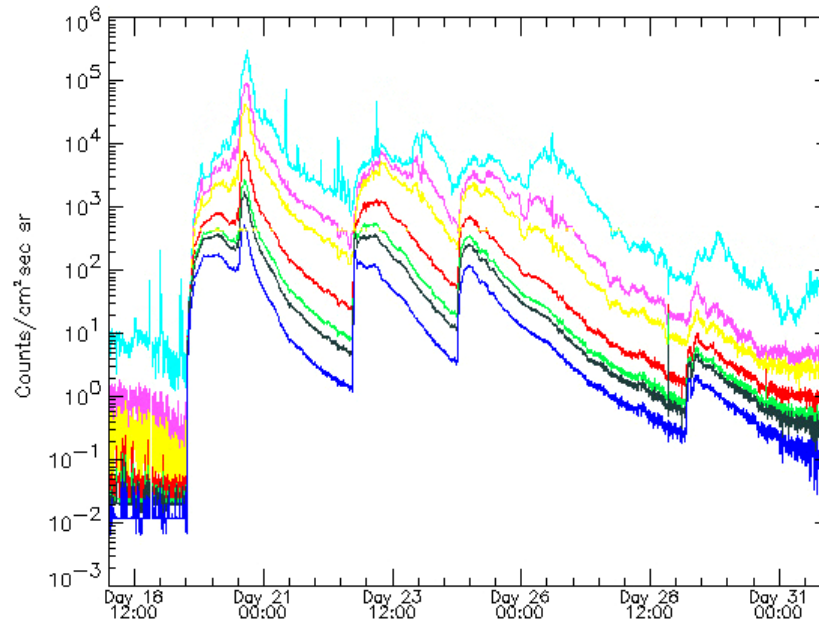
Подзолко М. В.

- воздействие частиц СКЛ и ГКЛ при межпланетных полётах;
- радиационные условия полёта в магнитосфере Юпитера
- потоки энергичных частиц в магнитосферах Сатурна, Урана, Нептуна
- возможные космофизические эксперименты во время полёта к дальним планетам при помощи основных приборов КА

# Потоки частиц СКЛ и ГКЛ в межпланетном пространстве

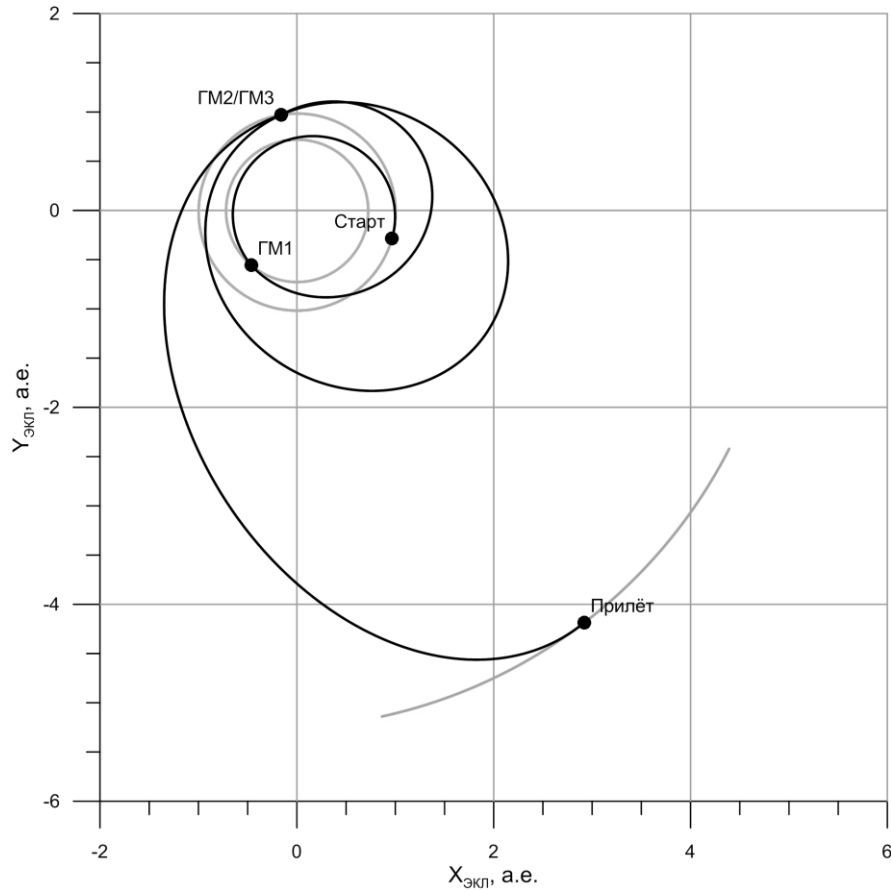


Потоки протонов с  $E > 30$  МэВ по данным КА IMP-8 на высокой околоземной орбите.

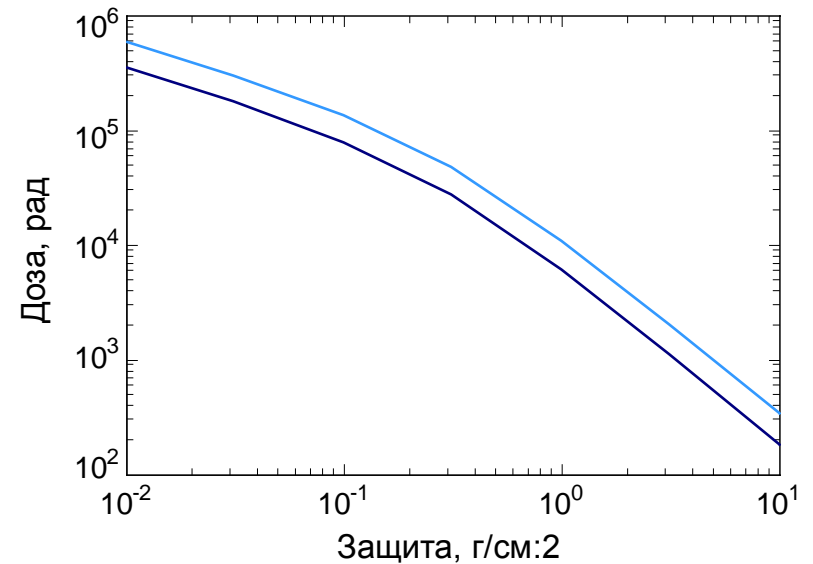
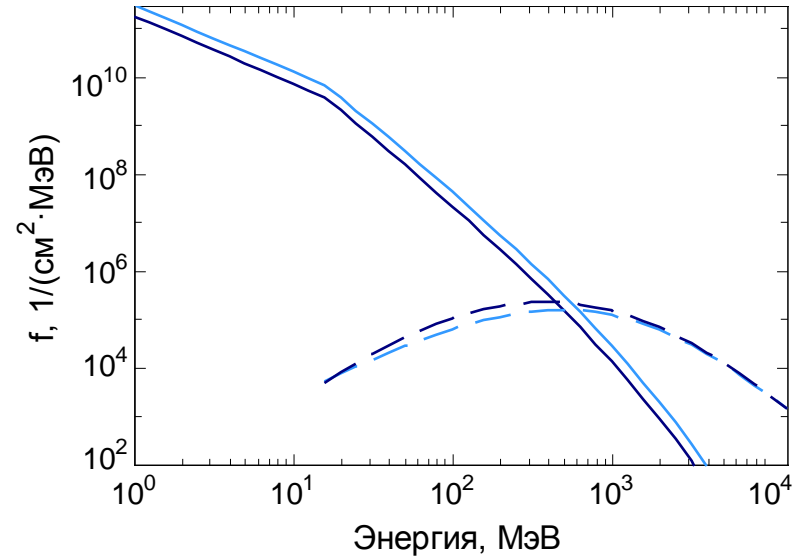


Потоки протонов с  $E > 1$ ,  $> 5$ ,  $> 10$ ,  $> 30$ ,  $> 50$ ,  $> 60$  и  $> 100$  МэВ по данным КА GOES-7 на геостационарной орбите в экстремальном солнечном событии октября 1989 г.

# Воздействие частиц СКЛ и ГКЛ при межпланетных полётах

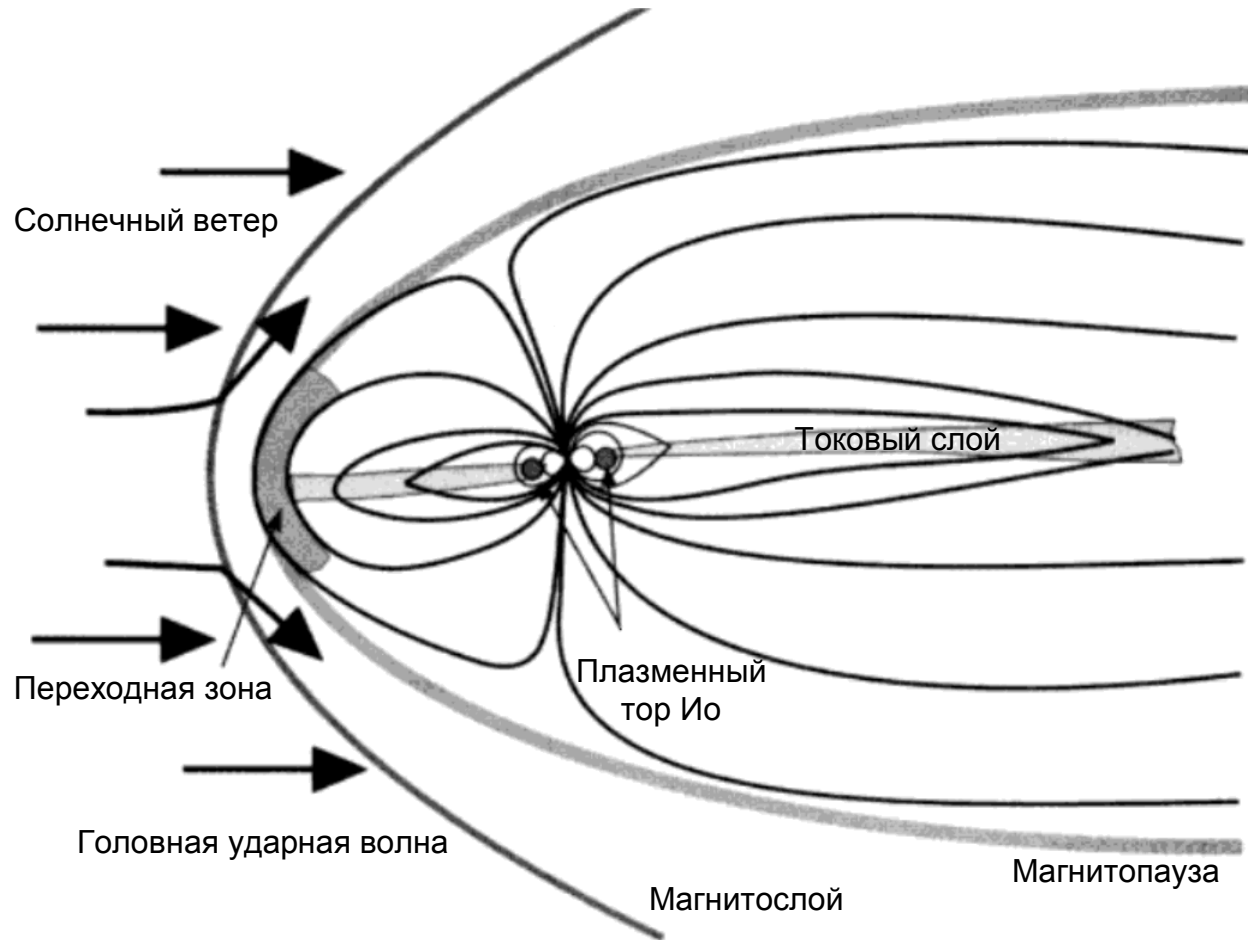


Вариант траектории полёта к Юпитеру (Мартынов и др., Вестник НПО им. Лавочкина, 2016): старт в 2026 г. (7-й год солнечного цикла), длительность >6 лет, гравитационные манёвры у Венеры и 2 у Земли.



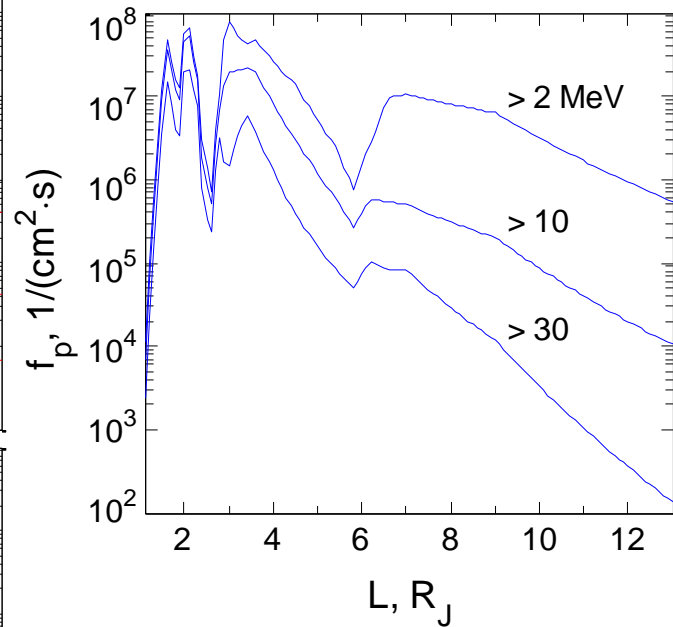
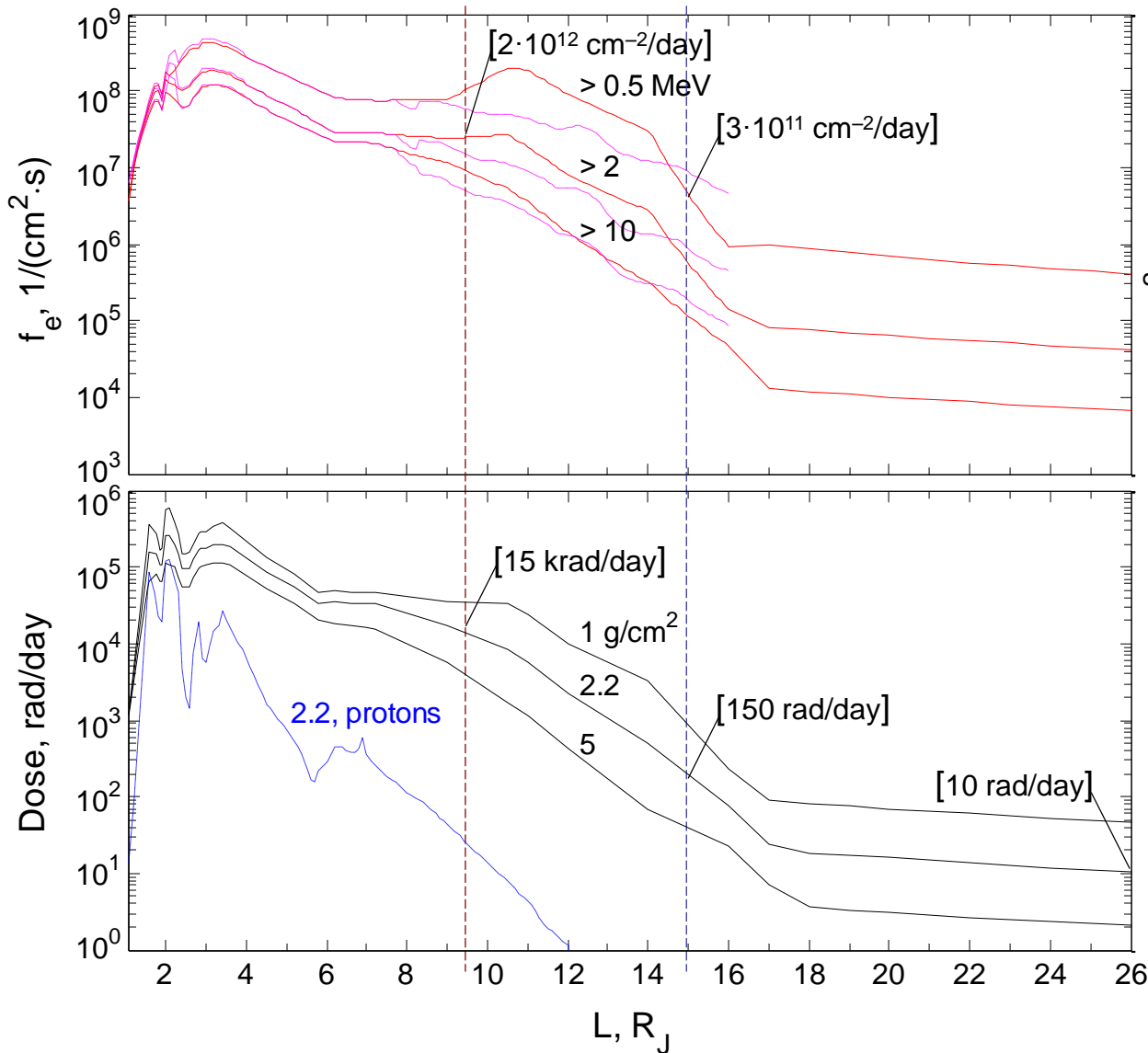
Энергетические спектры и дозы для старта в 7-м и 4-м году цикла (светл. и тёмн. кривые).

# Потоки энергичных заряженных частиц в магнитосфере Юпитера

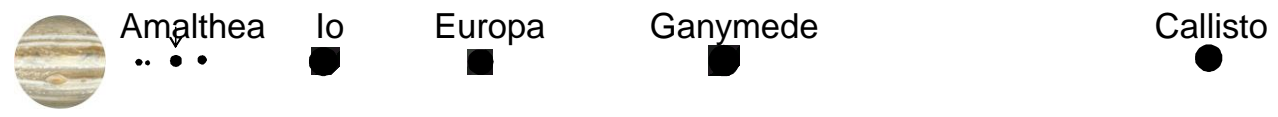


Структура магнитосферы Юпитера.

# Потоки энергичных заряженных частиц в магнитосфере Юпитера



Экваториальные профили потоков электронов с  $E > 0.5$ ,  $> 2$  и  $> 10$  МэВ (верхний левый график), протонов с  $E > 2$ ,  $> 10$  и  $> 30$  МэВ (правый) и доз за защитами 1, 2.2 и 5 г/см<sup>2</sup> (нижний) в окрестности Юпитера.

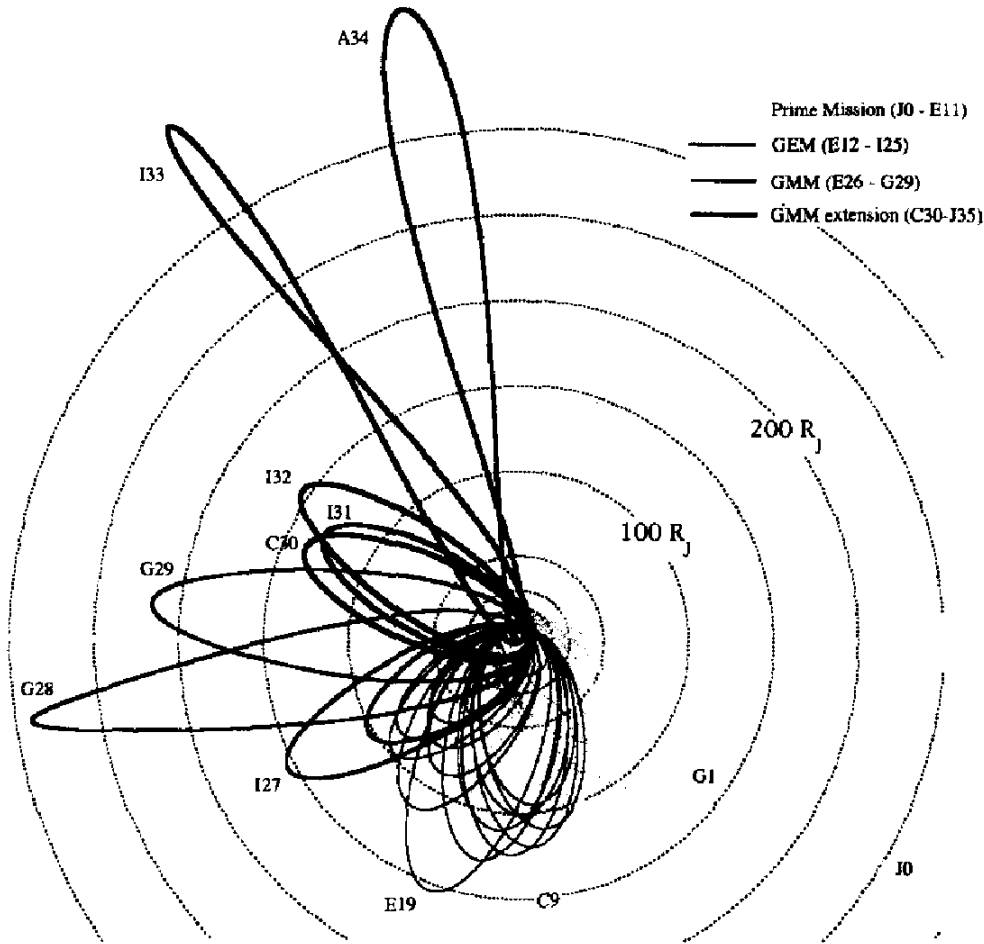


# Потоки энергичных заряженных частиц в магнитосфере Юпитера

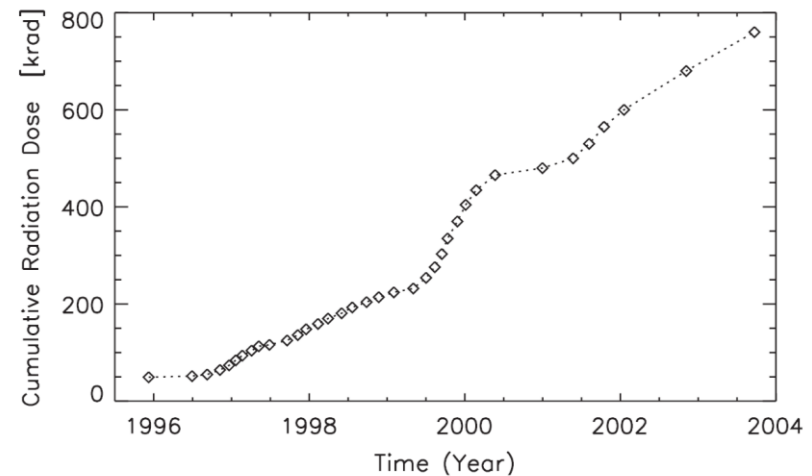
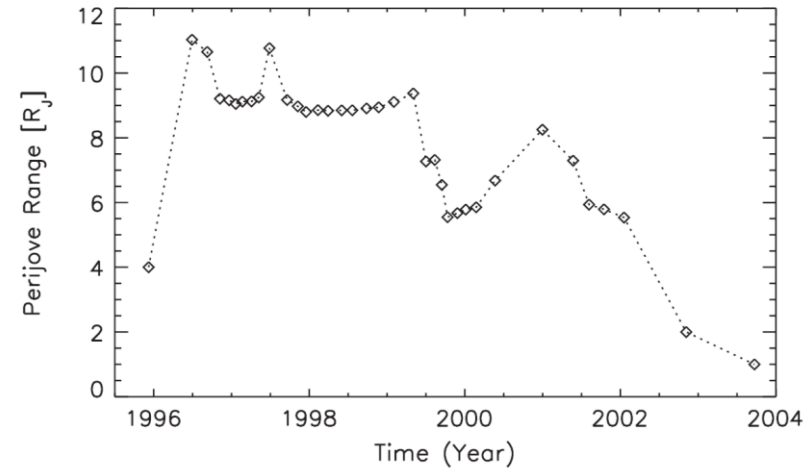
## Экспериментальные измерения потоков частиц в магнитосфере Юпитера

mission	time	orbit	experiments	doses
Pioneer 10	Dec. 1973	Fly-by at 130 ths. km from Jupiter ( $2.8 R_J$ )	Magnetic field, electrons: 0.06 to >35 MeV, protons: 0.6 to >80 MeV	$4.5 \cdot 10^5$ rad at 3 mm Al
Pioneer 11	Dec. 1974	Fly-by at 43 ths. km ( $1.6 R_J$ ), high incl. orb.		$1.2 \cdot 10^5$ rad at 3 mm Al
Voyager 1	March 1979	Fly-by at 207 ths. km ( $4 R_J$ )	Magnetic field, low-energy particles, electrons: 3–110 MeV, ions: 1–500 MeV/nuc	$\approx 5 \cdot 10^5$ rad
Voyager 2	July 1979	Fly-by at 570 ths. km ( $9 R_J$ )		
Ulysses	Feb. 1992	Fly-by at 378 ths. km ( $6.3 R_J$ ), high incl. orb.	Magnetic field, electrons: 0.03 to >170 MeV ions: 0.05–75 MeV/nuc	estim. $6 \cdot 10^4$ rad
Galileo	1995–2003	35 highly elliptical orbital segments with $r_{\pi}$ typically 6–11 $R_J$	Magnetic field, electrons: 15 keV to >11 MeV, ions: 10 keV to 200 MeV/nuc	Designed for 150 krad at 2.2 g/cm <sup>2</sup> , sustained >650 krad; “remarkably healthy”, but damaged some electronic systems
Cassini	Nov. 2000	Fly-by at 10 mln. km ( $140 R_J$ )	Magnetic field sync. w/Galileo, high-energy electrons (radiation spectrometer)	
New Horizons	Feb. 2007	Fly-by at 2.3 mln. km ( $32 R_J$ )	Local and remote (radio-spectrometer) magnetic field and charged particle measurements	
Juno	Jul. 2016 – now	polar highly-elliptical orbit, pericenter height 4200 km	magnetic field, plasma, electrons and ions 0.02–1 MeV	25 krad behind $\approx 1$ cm titanium

# Потоки энергичных заряженных частиц в магнитосфере Юпитера

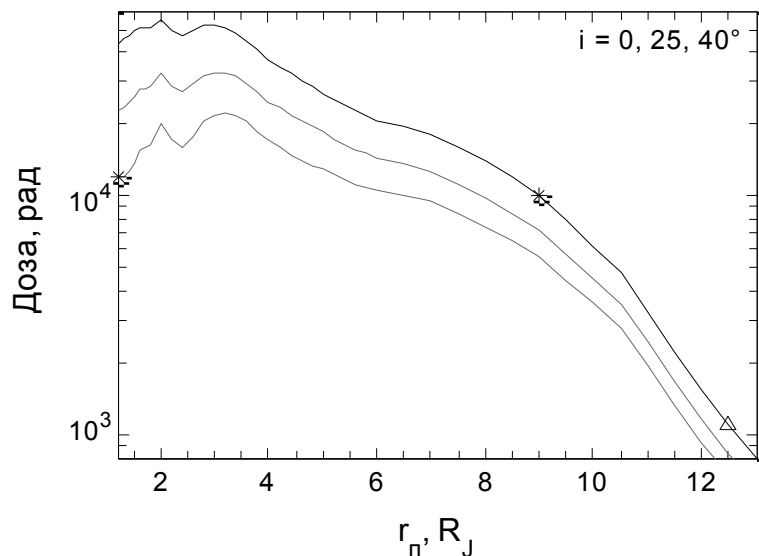


Galileo orbit (D. L. Bindschadler et al., Project Galileo: Final Mission Status, IAC 2003, 13 p.): 35 highly elliptical trajectory segments, when it flies by Galilean moons, typical perijove  $r_{\text{TP}}$  6–11  $R_J$ , total time at that radial dist.  $\approx$  2 months, thus  $\approx$  650 krad dose seems to agree with calculated above.

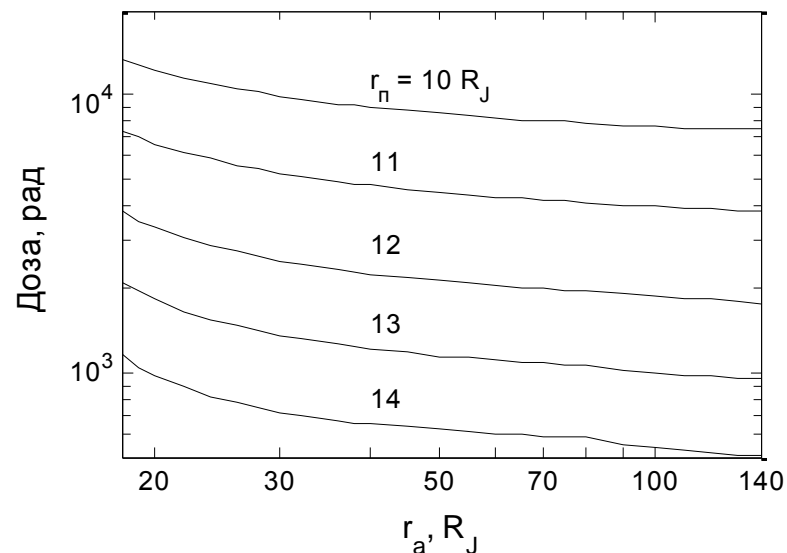


Galileo perijove (upper graphic) and estimated radiation dose under  $2.2 \text{ g/cm}^2$  (lower graphic) (H. Kruger et al., Planetary and Space Science, v. 53, 11, 2005, referred to D. L. Bindschadler private comment).

# Потоки энергичных заряженных частиц в магнитосфере Юпитера



Зависимость доз радиации за защитой 2.2 г/см<sup>2</sup> за время манёвра подлёта и выхода на орбиту вокруг Юпитера от радиуса перигелия для наклонений орбит 0, 25 и 40°. Асимптотическая скорость 6 км/с, импульс двигателями в перигелии, большая полуось итоговой орбиты 225  $R_J$ .

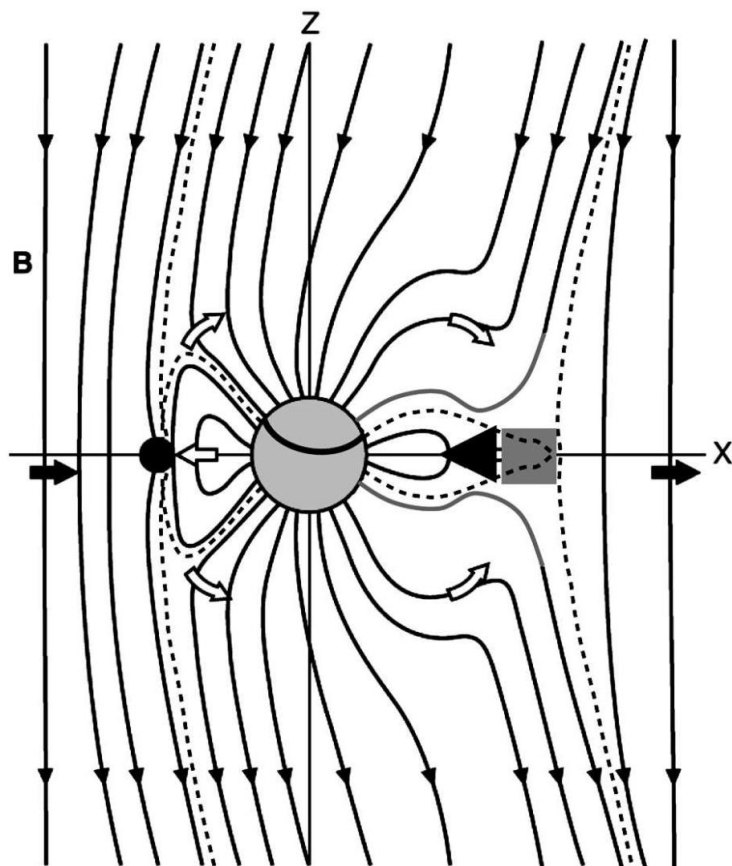


Дозы радиации за защитой 2.2 г/см<sup>2</sup> за 1 виток орбиты вокруг Юпитера в зависимости от апоцентра орбиты  $r_a$  для значений перигелия  $r_p = 10, 11, 12, 13$  и  $14 R_J$ .

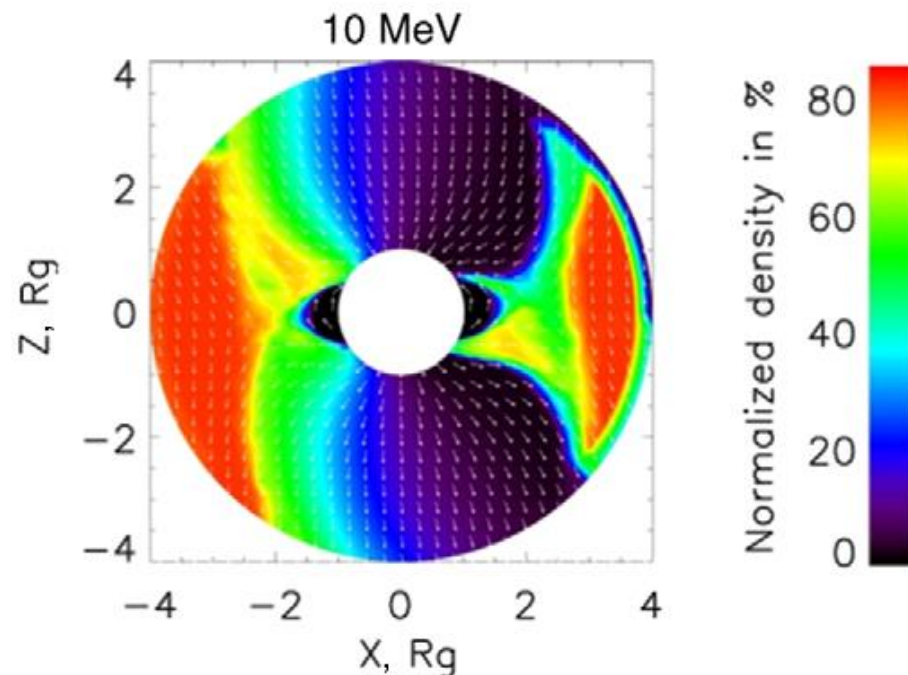
(Podzolko et al., Advances in Space Research, 2011.)



# Особенности потоков заряженных частиц вблизи спутников Юпитера

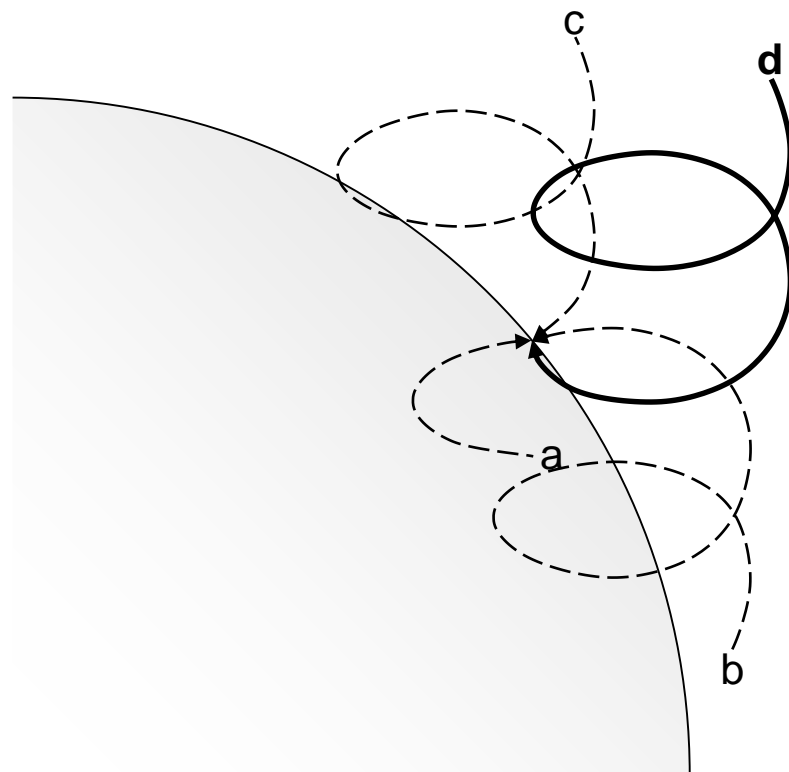
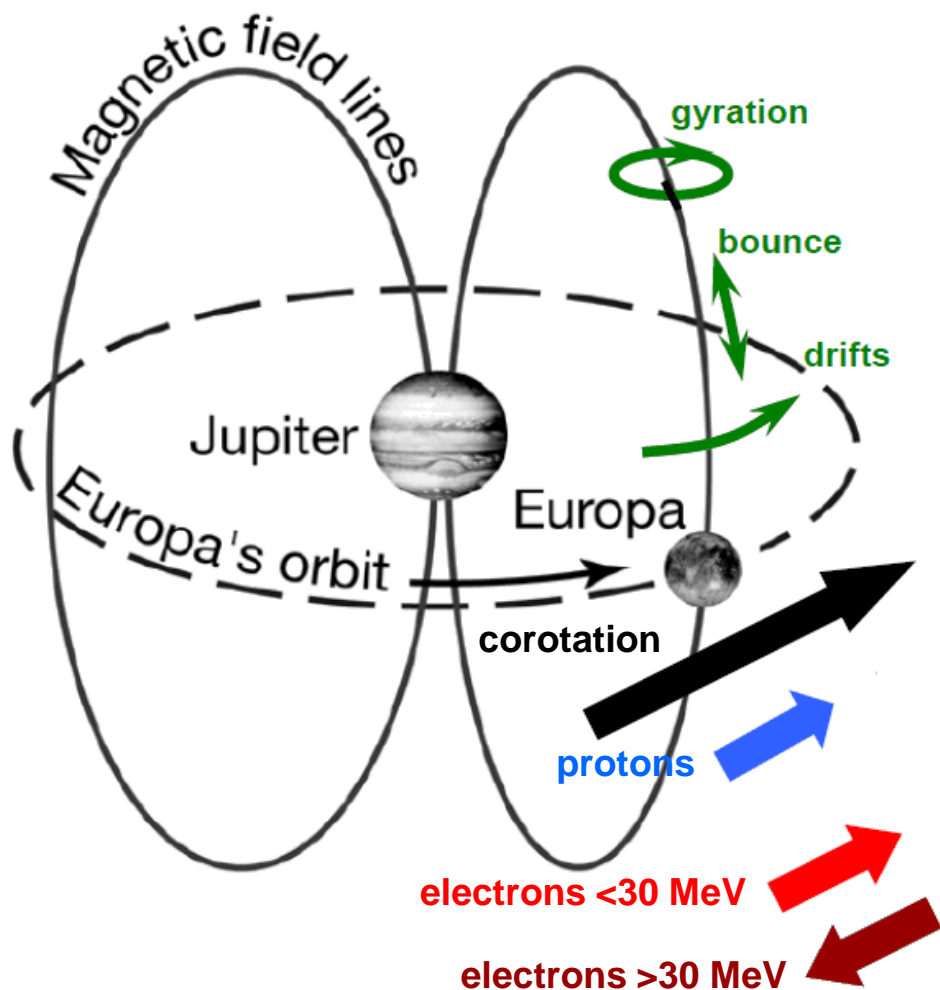


Взаимодействие магнитного поля Ганимеда с плазмосферой Юпитера.



Моделирование пространственного распределения потоков электронов вблизи Ганимеда (Allioux et al., 2013): суперпозиция дипольного поля Ганимеда с полем Юпитера, приближение ведущего центра.

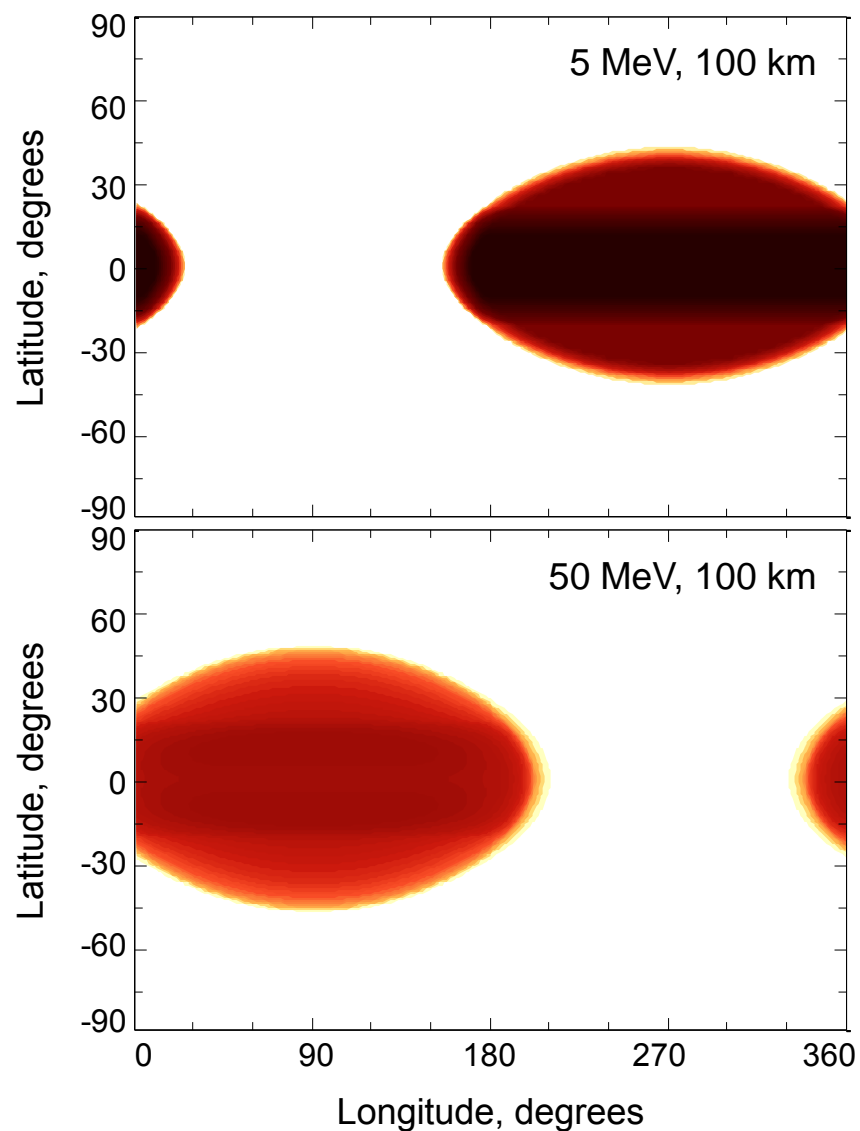
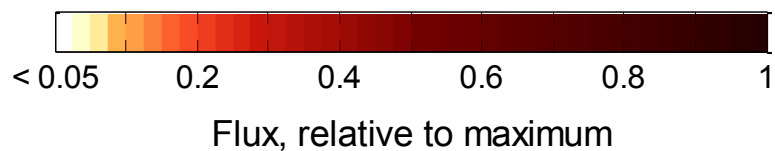
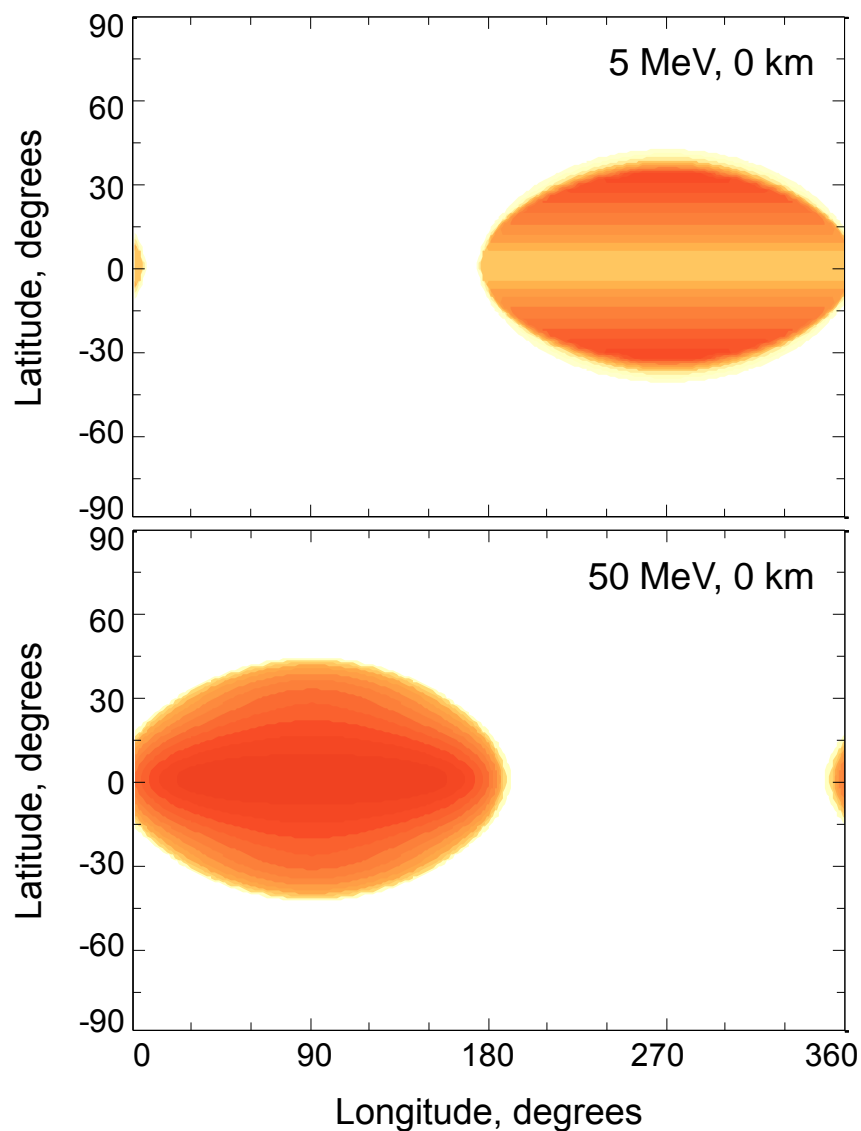
# Особенности потоков заряженных частиц вблизи спутников Юпитера



Основные компоненты движения частиц в магнитном поле Юпитера относительно Европы.

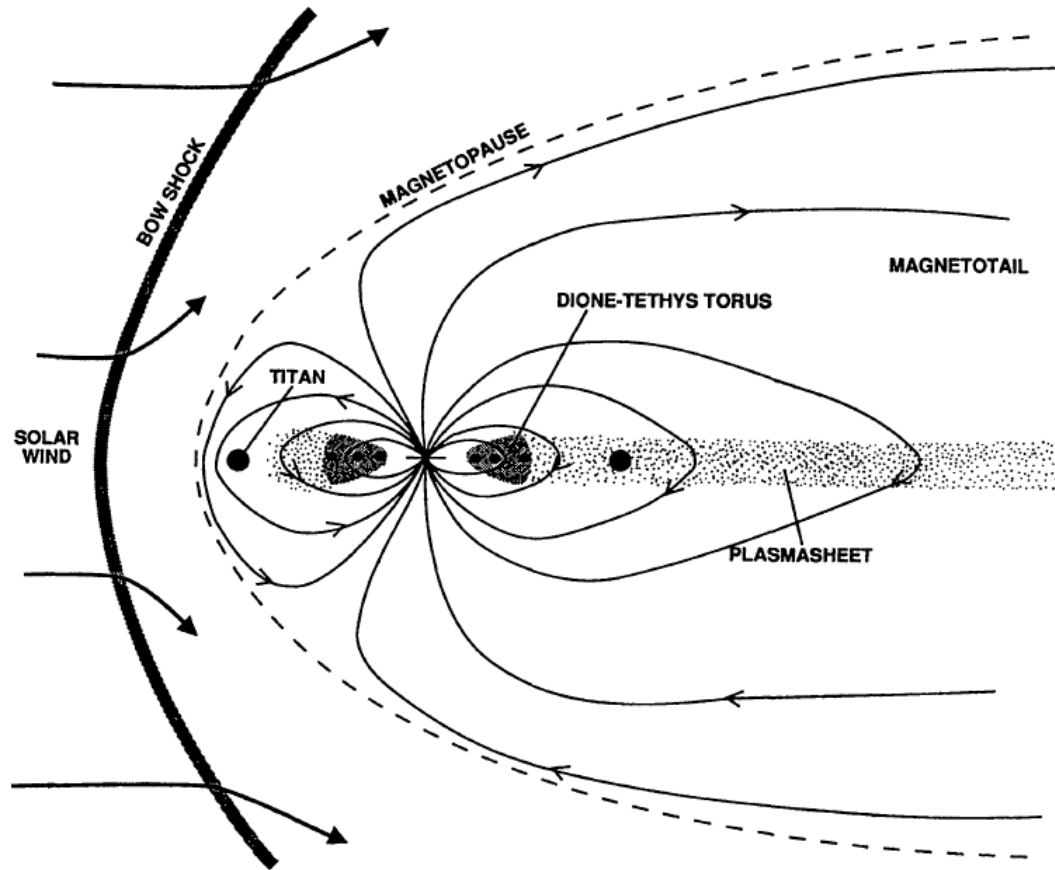
Реализуемые и блокируемые траектории прихода частицы в данную точку поверхности Европы.

# Особенности потоков заряженных частиц вблизи спутников Юпитера



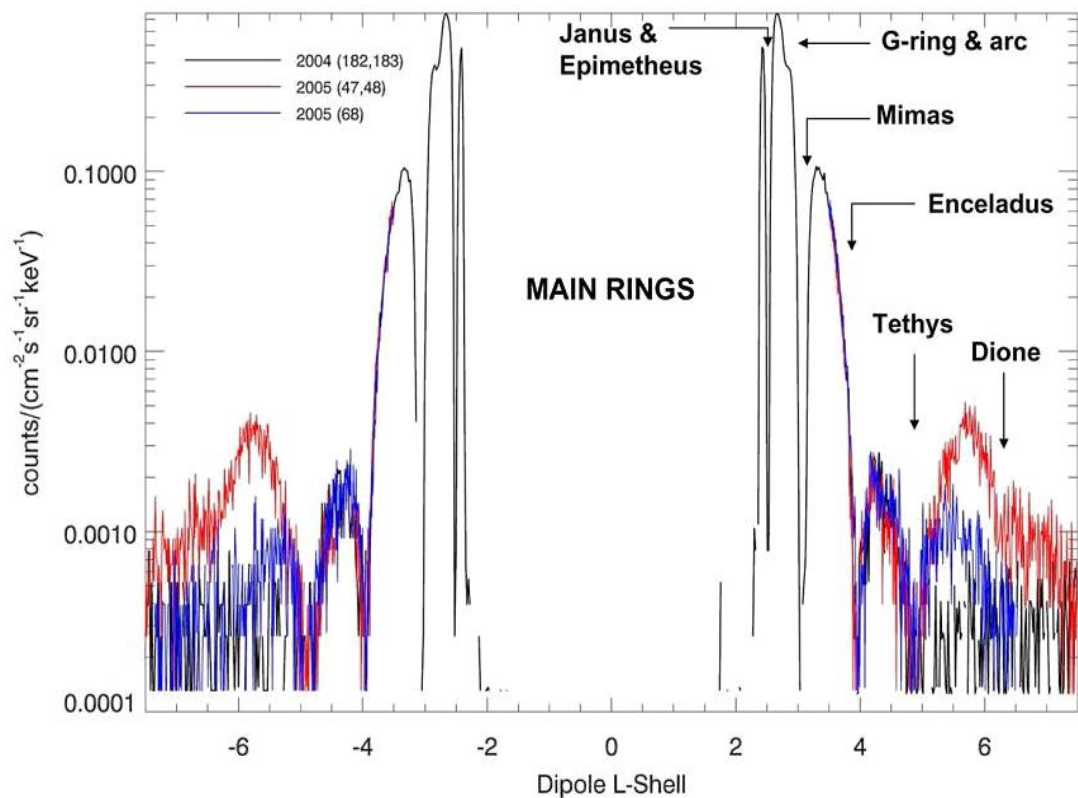
Распределение потоков электронов на поверхности Европы и на высоте 100 км.

# Потоки энергичных заряженных частиц вблизи Сатурна



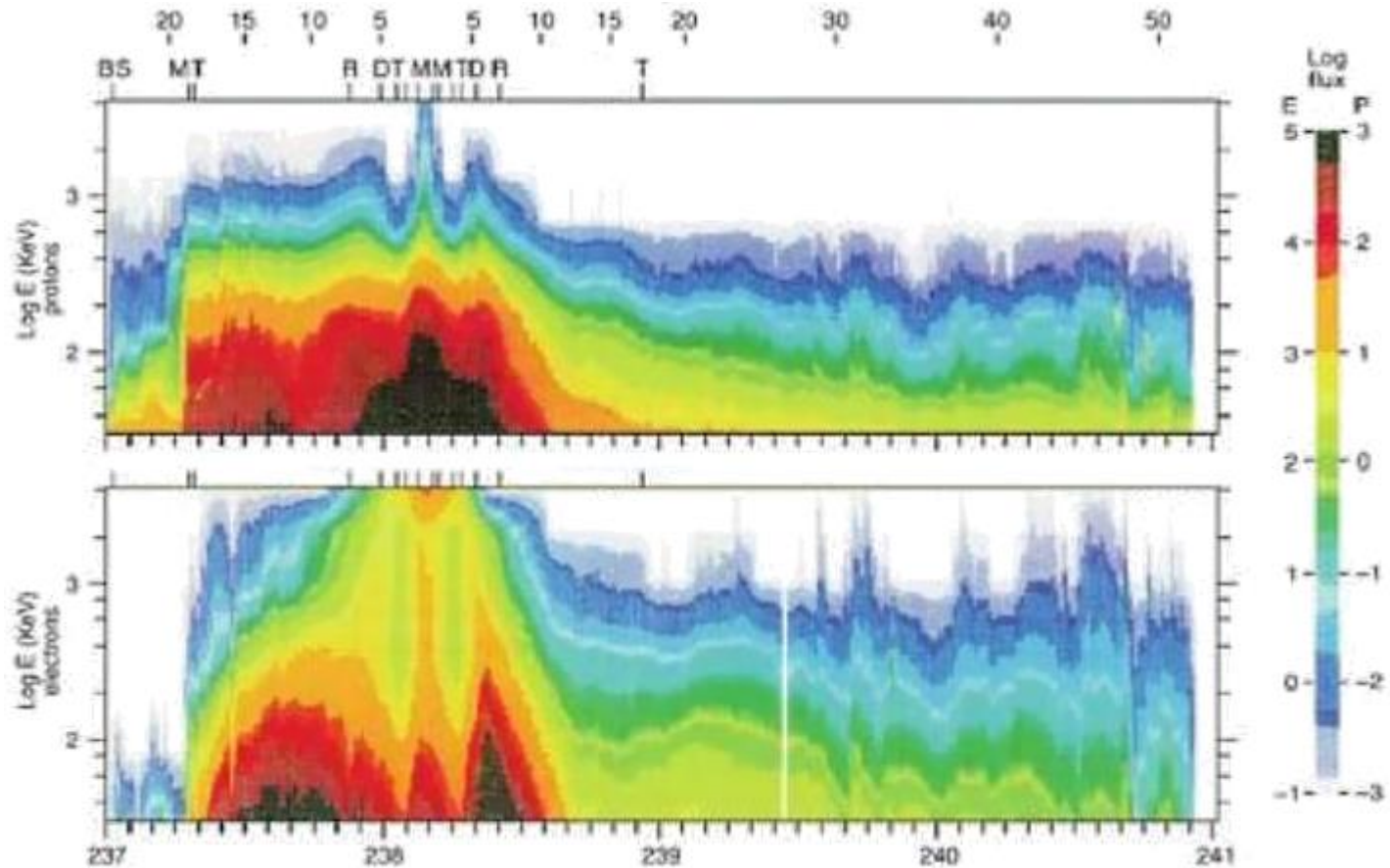
Структура магнитосферы Сатурна

# Потоки энергичных заряженных частиц вблизи Сатурна



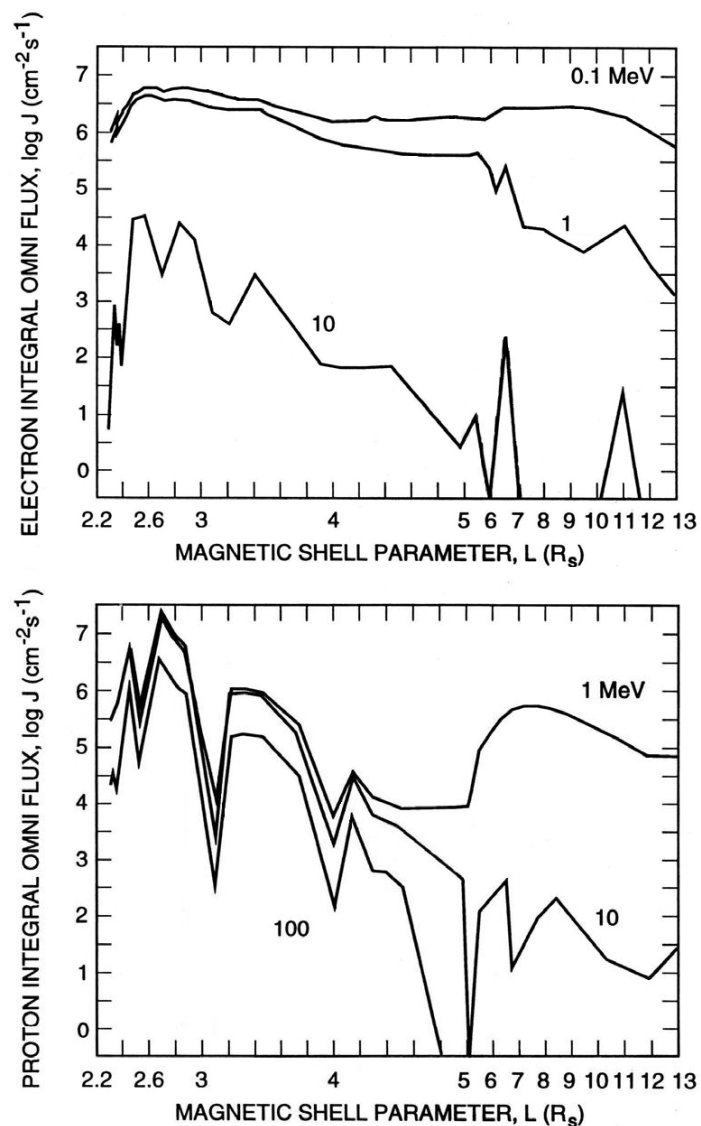
Скорости счёта протонов с энергиями 2.28–4.49 МэВ/нуклон по данным детектора LEMMS КА Cassini во время его сближения с Сатурном в 2004 (невозмущённое состояние магнитосфера) и 2005 гг. (возмущённое).

# Потоки энергичных заряженных частиц вблизи Сатурна



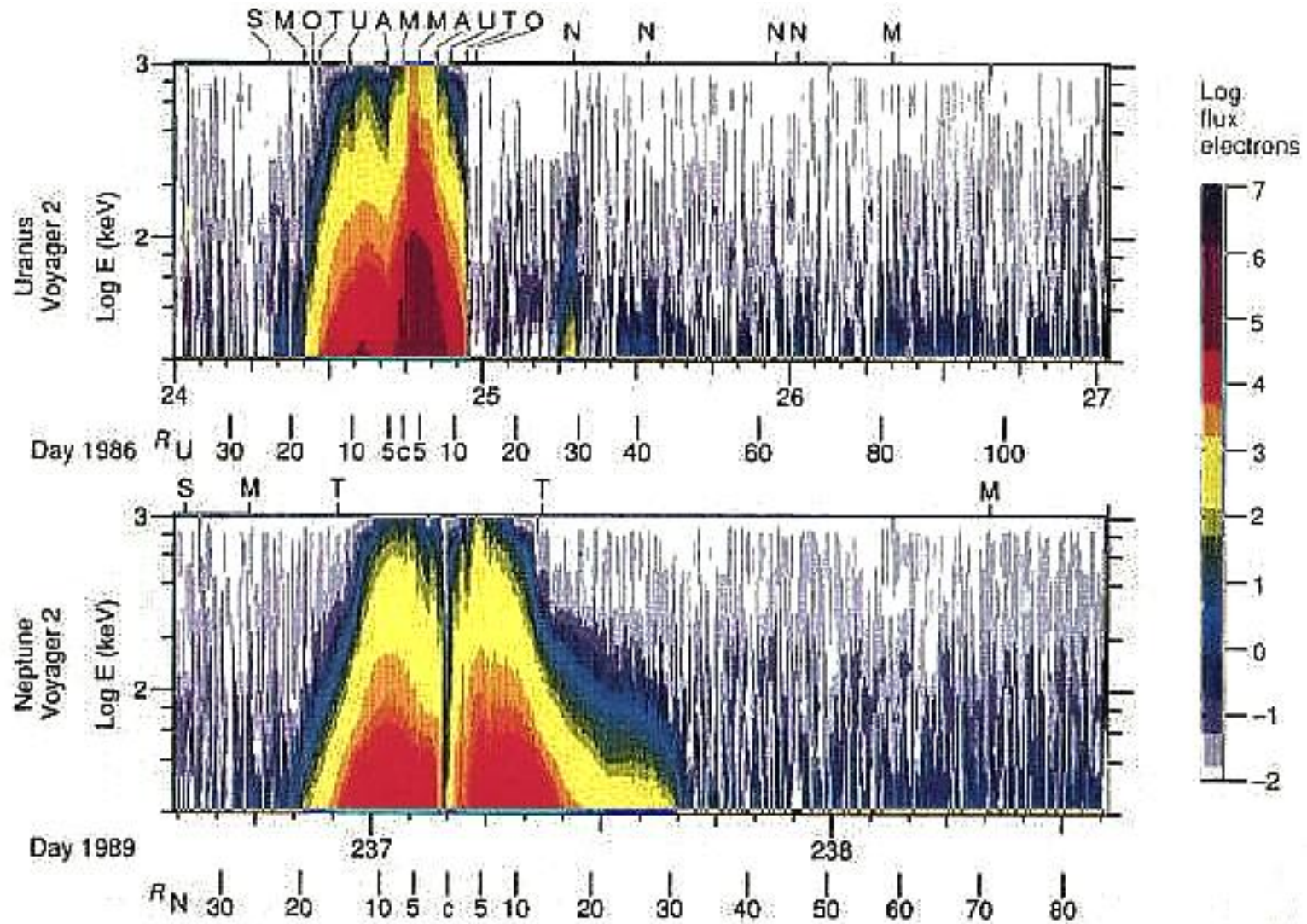
Дифференциальные потоки протонов (верхний график) и электронов (нижний) с  $E = 30$  кэВ – 40 МэВ измеренные Voyager-2 при пролёте Сатурна. По горизонтальной оси внизу – время (дни года), вверху – радиальное расстояние до центра планеты, положение головной ударной волны и магнитопаузы и орбит лун Титан, Рея, Диона, Тетфия Энцелад и Мимас.

# Потоки энергичных заряженных частиц вблизи Сатурна



Экваториальные профили интегральных потоков электронов с  $E > 0.1, 1$  и  $10$  МэВ (верхний график) и протонов с  $E > 1, 10$  и  $100$  МэВ (нижний) в радиационных поясах Сатурна, по модели (Divine, 1990), основанной на измерениях Pioneer-11, Voyager-1, -2.

# Потоки энергичных заряженных частиц вблизи Урана и Нептуна



Дифференциальные потоки электронов с  $E = 20$  кэВ – 1 МэВ, измеренные Voyager 2 при пролётах Урана (верхний график) и Нептуна (нижний). Указано время (дни года), радиальное расстояние до планет, положение ударной волны и границы магнитосферы и лун планет.



# Возможные эксперименты при помощи «вторичных» измерений

Автоматическая межпланетная станция к дальним планетам будет иметь ограниченную массу, энергоснабжение, объём передаваемых данных для полезной научной нагрузки.

Но можно предложить ряд экспериментов по изучению ионизирующей радиации с помощью измерений «вторичных» параметров основными приборами КА:

## 1. Дозиметр на основе полупроводникового детектора.

Фактически, может измерять не только накопленную дозу, но энерговыделение каждой пролетевшей частицы, то есть фактически поток и энергетический спектр частиц.

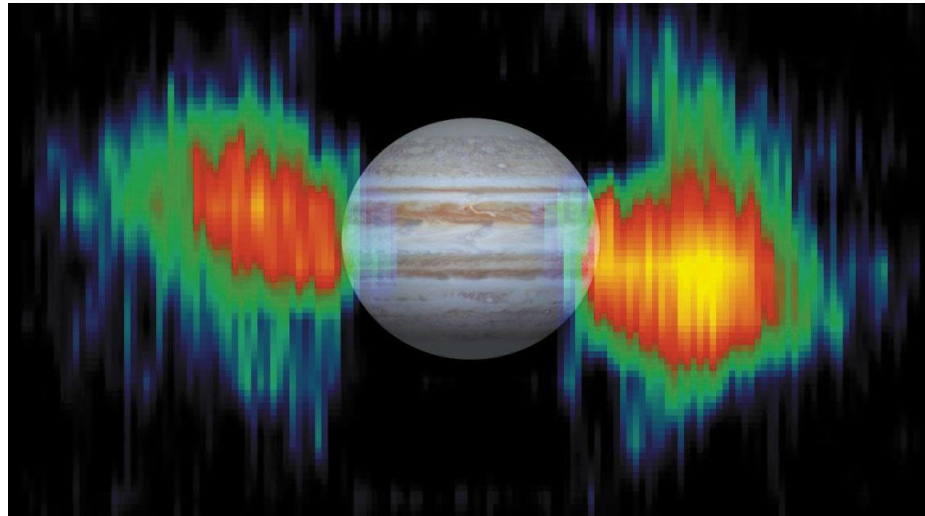
– Энерговыделение также зависит от типа частицы (электроны, протоны, ядра...). Но мы можем учитывать имеющиеся знания об элементном составе и форме спектра частиц СКЛ, ГКЛ, радиационных поясов.

– Используемый детектор по-видимому будет регистрировать частицы с энергиями  $<100\text{--}200$  МэВ/нуклон. Но максимум ГКЛ приходится на  $300\text{--}700$  МэВ/нуклон. Однако высокоэнергичные частицы генерируют вторичные частицы меньших энергий в материалах КА, которые также будут регистрироваться в детектором. Зная общую форму спектра ГКЛ, и имея 3d-модель КА, можно с помощью ПО типа GEANT-4 или SHIELD реконструировать поток ГКЛ бóльших энергий (см., например, моделирование для КА SOHO: Kühl et al., Solar Physics, 2016).

# Возможные эксперименты при помощи «вторичных» измерений

2. Радио-антенна дециметрового или декаметрового диапазона.

Удалённые измерения потоков релятивистских электронов внутреннего радиационного пояса Юпитера – регистрируя излучение, генерируемое электронами из-за их гировращения вокруг магнитных силовых линий.

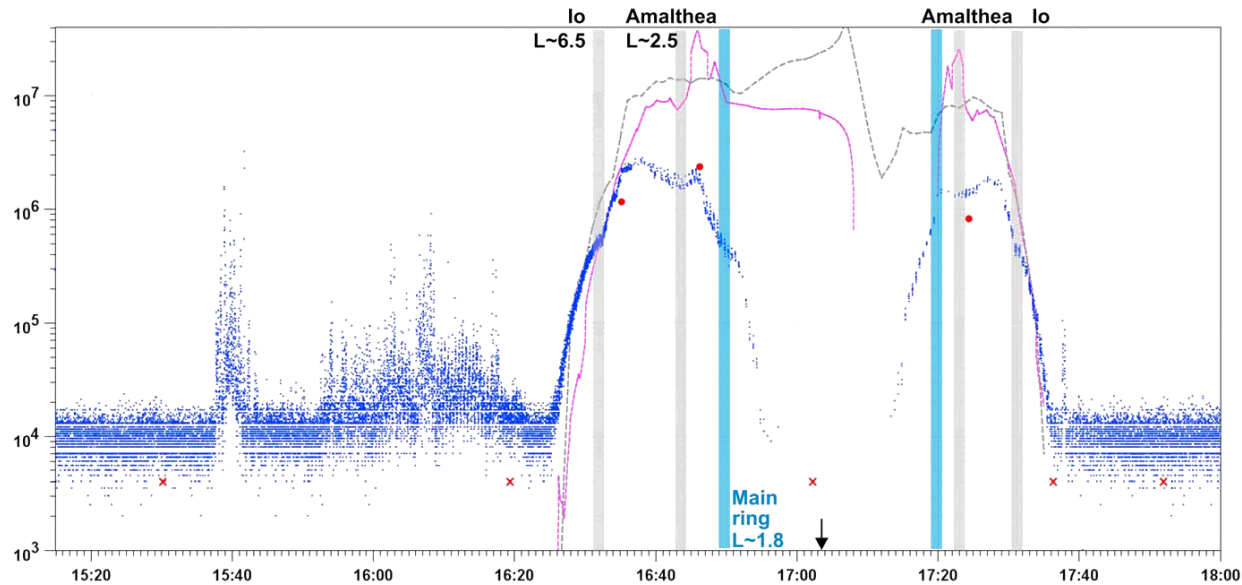


Изображение поясов электронов Юпитера, полученное КА Cassini в январе 2001 г. с помощью регистрации излучения 13.8 МГц при пролёте Юпитера на расстояниях  $\geq 10$  млн. км

# Возможные эксперименты при помощи «вторичных» измерений

## 3. Звёздные датчики.

Измерения потоков электронов радиационных поясов Юпитера при пролёте на расстоянии  $\leq 6-8$  радиусов планеты – посредством анализа сигнала от электронов в звёздных датчиках.



Потоки электронов с  $E > 10$  МэВ по данным звёздных датчиков КА Juno на 3-м витке орбиты 11.12.2016 (тёмные точки) и данным радиометрических измерений Cassini (светлые кривые) (Becker et al., Geophysical Research Letters, 2017)

## Возможные эксперименты при помощи «вторичных» измерений

4. Контроллеры оперативной и постоянной памяти с коррекцией ошибок.

Энергичные космические протоны и ядра способны вызывать т. н. «одиночные ошибки» (Single Event Upsets) в микросхемах памяти: частица, пролетев через микросхему, теряет энергию на ионизацию, в результате генерируется ток, способный изменить значение регистра: 0 меняется на 1 и наоборот.

Например за полгода полёта мисси Deep Impact к комете Темпеля 1 в 2005 г. контроллеры памяти 3 бортовых компьютеров VAE Rad750 зарегистрировали в сумме 530 одиночных ошибок (Clark, Deep Impact – 1st look inside a comet, 2005).

Для миссии к дальним планетам необходим контроллер ОЗУ как минимум с простым кодом Хэмминга коррекции одиночных и обнаружения двойных ошибок, а лучше кодом Рида-Соломона исправления многобитовых ошибок (Подзолко, Вестник МГУ, 2017), и аппаратная или программная многобитовая коррекция ошибок в ПЗУ, сканирующие память постоянно в фоновом режиме.

Регистрируемые данные об ошибках могут характеризовать потоки энергичных заряженных частиц в космосе и их воздействие на микросхемы.