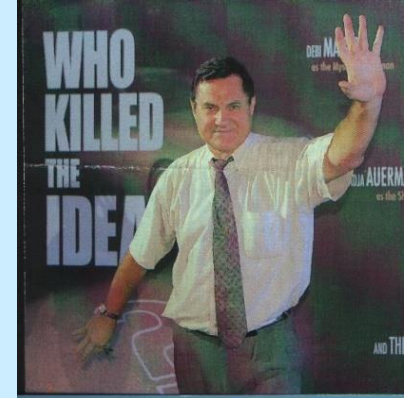




Российская Академия Наук
Научно-Координационная Сессия
Исследования Неидеальной Плазмы
Москва. 4-5 декабря 2024



Объединенный Институт Высоких Температур РАН

**Фундаментальная Роль Магнитосферы Сатурна
в Происхождении Видимых Плотных Колец.**

Определена Сила Расталкивания Кусков Льда,

Предсказанная Максвеллом в 1856 году

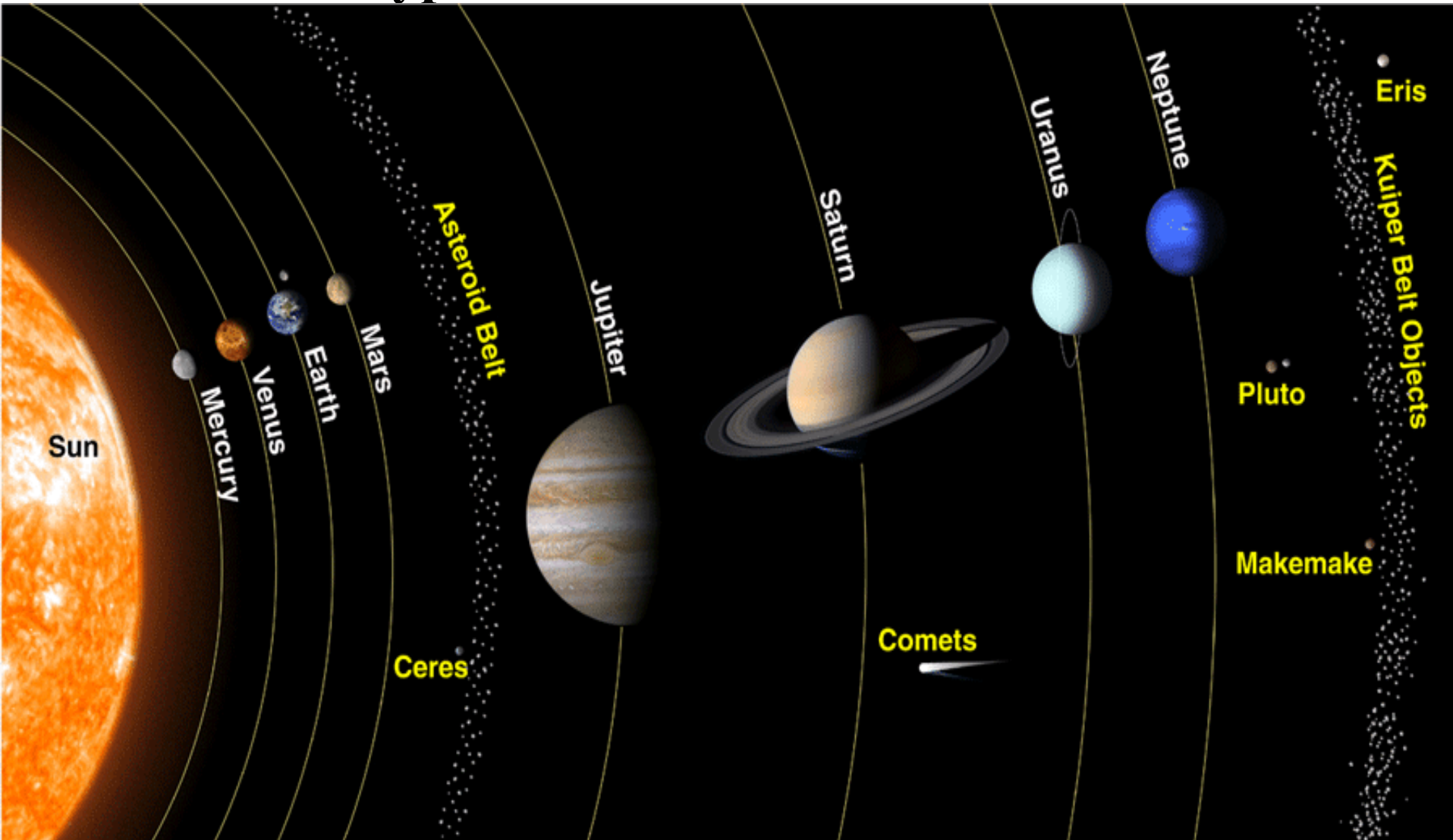
Владимир В. Черный, Сергей В. Капранов

Институт Современной Науки, Москва, Россия.

Институт Биологии Южных Морей имени А.О. Ковалевского РАН.

chernyv@bk.ru, sergey.v.kapranov@yandex.ru

Сатурн – 6-ая планета от Солнца.

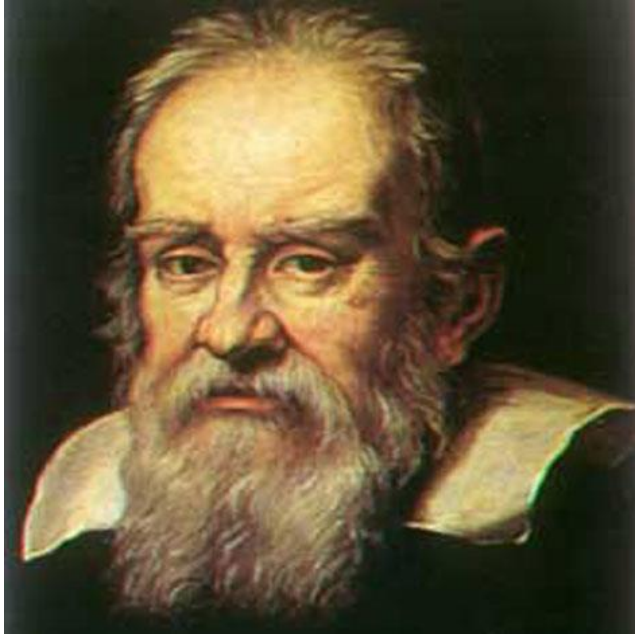


Credit: https://www.drishtiias.com/images/uploads/1597306901_image3.png

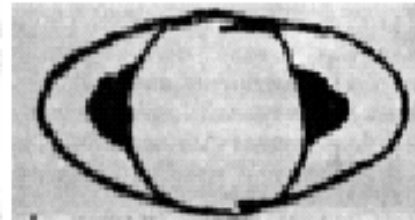
<https://www.drishtiias.com/daily-updates/daily-news-analysis/dwarf-planet-ceres>, NASA/JPL/SSI

Г. Галилей впервые наблюдал кольца Сатурна в 1610.

Галилей: «Я наблюдал за самой высокой тройной планетой».
Он пришел к выводу, что кольца были своего рода "руками».



1610



1616

В 1655 Х. Гюйгенс обнаружил, что Сатурн окружен сплошным кольцом, и открыл Титан. В 1675 Д. Кассини обнаружил, что видимый диск состоит из множества колец, и нашел луны: Япет, Рея, Тетис и Диона. В честь этих ученых миссию к Сатурну называли "Кассини-Гюйгенс".

Credit: <https://attic.gsfc.nasa.gov/huygensgcms/Shistory.htm>



Saturn • March 22, 2004
Hubble Space Telescope • ACS

Диск Колец Сатурна в Размерах

EARTH — SOLAR SYSTEM — MOON

Earth-Moon distance & object sizes to scale



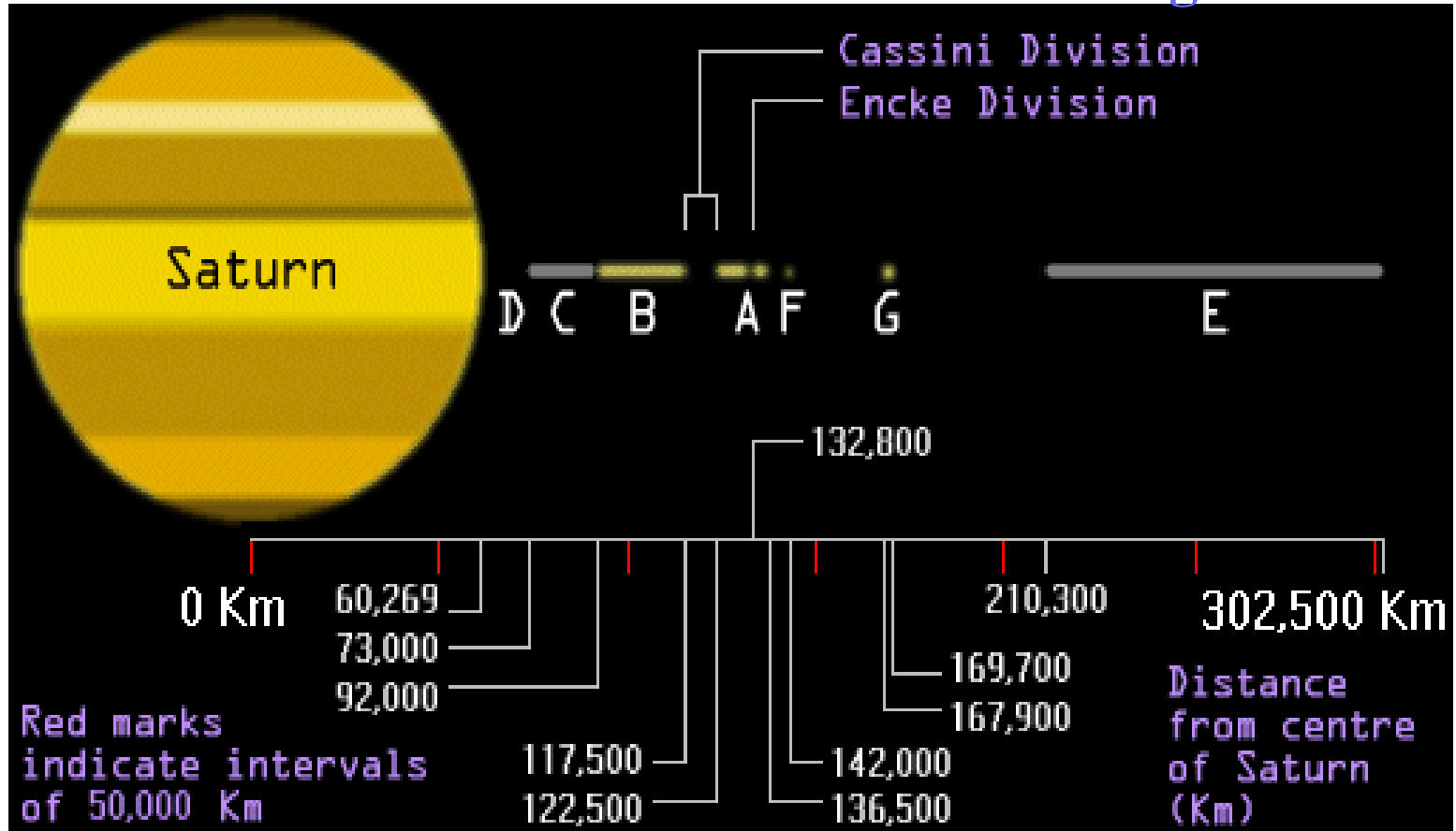
RINGS OF SATURN UNWOUND

James O'Donoghue / NASA imagery — T: @physicsJ

James O'Donoghue / NASA Imagery – T: @physicsJ

Credit: NASA/JPL/Space Science Institute

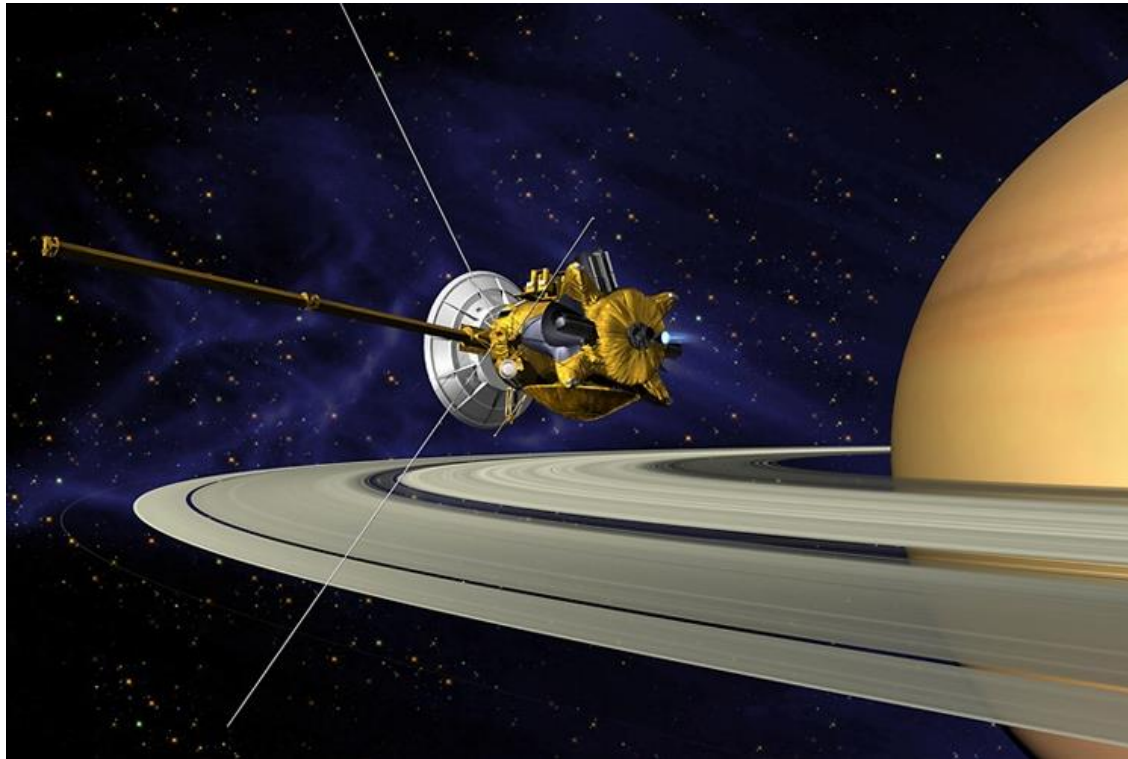
SATURN is the real Lord of the Rings



There are few major divisions - *D* Ring, *C* Ring, *B* Ring, Cassini Division, *A* Ring, Roche Division, *F* Ring, *G* Ring, *E* ring.

http://www.tivas.org.uk/solsys/tas_solsys_saturn.html Credit: NASA/JPL/SSI

Миссия Кассини-Гюйгенс к планете Сатурн. 5.10.1997- 15.09.2017



В 1982 НАСА и Европейский фонд науки создали рабочую группу. **В миссии Кассини участвовали:** НАСА, Европейское космическое агентство, Итальянское космическое агентство, академические и промышленные организации, 260 ученых из 27 стран. **В задачу Кассини входило изучение колец Сатурна. Стоимость проекта \$3,9 млрд.**

В 1900 британский физик лорд Уильям Кельвин сказал:
"Сегодня в физике нет ничего нового, что можно было бы открыть.
Все, что остается, - это все более и более точное измерение."



Зонд Кассини - общие данные:
Cassini Probe, Press kit ,15.10.1997
NASA, JPL, European Space Agency, Italian Space Agency

Высота - 6.7 m, Ширина - 4 m.

Стартовый вес - 5710 kg.

Зонд Гюйгенс - 320 kg.

Инструменты - 36 kg.

Топливо - 3130 kg.

2 реактивных двигателя, тяга 445 ньютонов

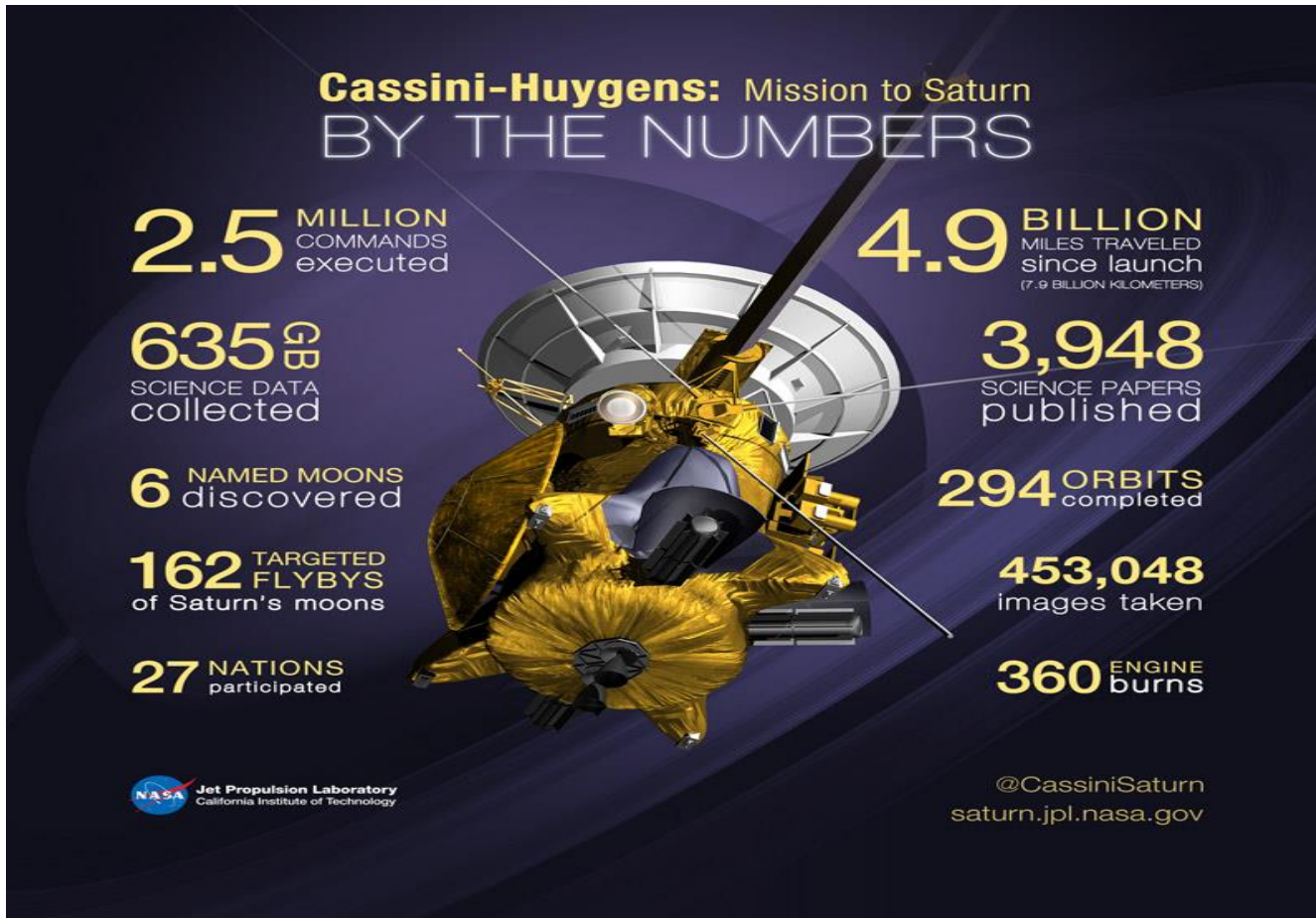
16 двигателей стабилизации и

маневрирования с низкой тягой

https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/cassini.pdf

Credit: NASA, JPL, ESA

Cassini-Huygens: Mission to Saturn by the numbers (2004-2017)

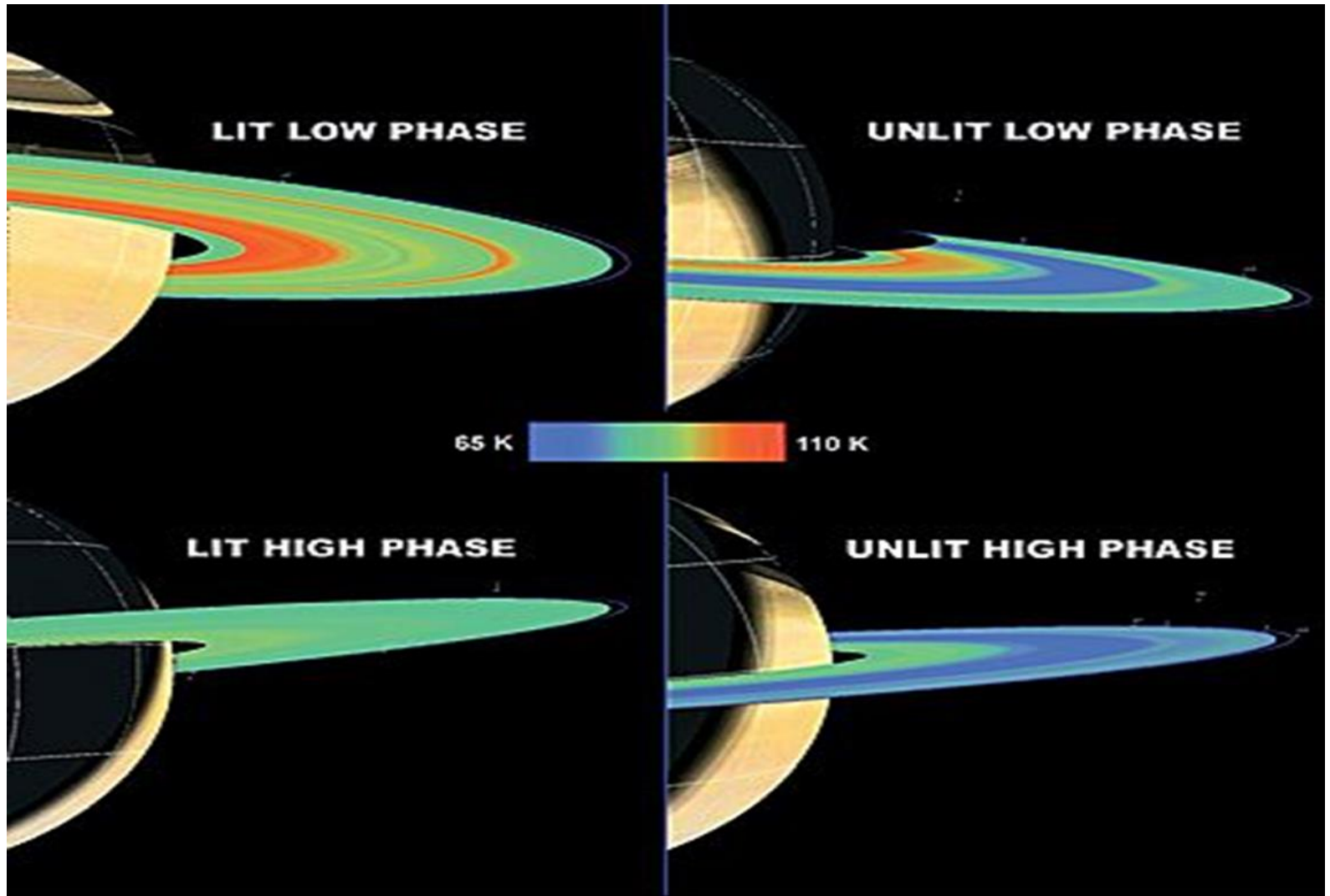


<https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/overview/>

Credit: saturn.gpl.nasa.gov

Температура колец Сатурна

credit: Saturn.jpl.nasa.gov



Нерешенные проблемы видимых плотных колец Сатурна, представленные гравитационными моделями

- 1) Каким образом плотные кольца, площадь которых растянута по радиусу на сотни тысяч км, удерживаются в открытом космическом пространстве? Ведь отношение толщины диска колец к их протяженности в тысячи раз меньше для листа А4**
- 2) Почему куски льда колец попадают на экватор Сатурна?**
- 3) Каким образом плотные кольца образуют стабильную дискообразную структуру на экваторе Сатурна?**
- 4) Как объяснить сильную плоскостность диска колец Сатурна?**
- 5) Как объяснить разделение плотных колец внутри их тонкой структуры?**
- 6) Какая сила разделяет куски льда в плотных кольцах и не позволяет им слипаться даже при колебаниях гравитации Сатурна и действия пролетающих в щелях спутников? Почему Максвелл не знал эту силу?**

Известные гравитационные модели не способны объяснить многие явления в плотных кольцах Сатурна, наблюдаемые зондом Кассини

Все модели изучают, как лед мог появиться в кольцах

Они не описывают процесс появления дисковой структуры

1990. A. Fridman, N. Gorkavyi. *Physics of Planetary Rings*. 1990. Захват астероида Сатурном. Резонансы между гравитацией планеты и спутников компенсируют или усиливают распределение кусков в определенном слое и образуют кольца

2010. R. Sappir. *Происхождение колец Сатурна в результате удаления мантии потерявшего спутника размером с Титан*. *Nature*, 2010, 468, 943–946. Спутник с силикатным ядром и ледяной мантией. Проходя предел Роша приливная сила разрушает его, а обломки ледяной мантии образуют кольца

2022. J. Wisdom et al. *Разрушение спутника может объяснить наклон оси Сатурна и молодость колец*. *Science*, 377, 6612. У Сатурна был спутник из льда, его орбиту нарушила орбитальная миграция Титана. Нестабильность системы разорвало луну ближе предела Роша, ее осколки образовали кольца.

2023. L. F. A. Teodoro et al. *Недавнее ударное происхождение колец Сатурна и спутников среднего размера*. *ApJ*, 955, 2. Изучают столкновение ледяных лун, типа Диона и Рея, благодаря неустойчивости в системе спутников Сатурна из-за орбитальных резонансов. Осколки выбросов чистого льда размещаются на орбитах внутри предела Роша. Они могли сформировать кольца, или даже омолодить уже существующие кольца.

Газрушение большого ледяного тела и образование колец

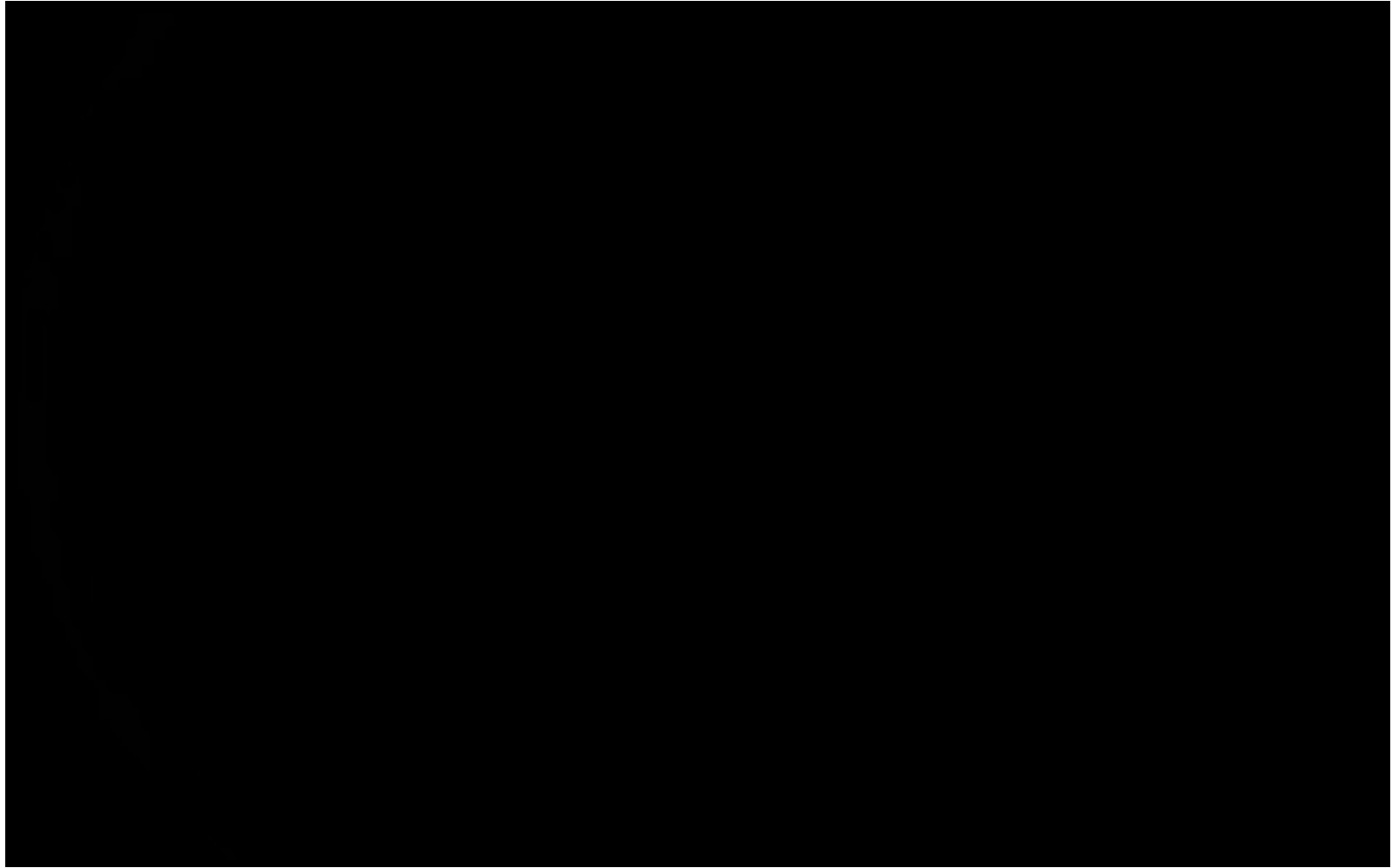
Robin Canup: "Origin of Saturn's rings and inner moons by mass removal from a lost Titan-sized satellite".

Nature, 468, 943–946, 16.12.2010. doi:10.1038/nature09661



ГРАВИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ВИДИМЫХ ПЛОТНЫХ КОЛЕЦ САТУРНА

<https://www.youtube.com/watch?v=Pu6xyTPARBQ> Credit: HDKOSMOS



После 4-х миссий НАСА к Сатурну: Pioneer 11 (1979), Voyager 1 (1980),

Voyager 2 (1981) и Кассини (2004-2017). Вывод такой:

Происхождение видимых плотных колец Сатурна все еще остается под вопросом

Гравитационные модели дают ответ только на вопрос: Откуда мог взяться лед в кольцах, дополнительно к тому, который уже мог быть в протопланетном облаке.

Гравитационные модели не объясняют процесс образования колец на экваторе Сатурна, происхождение тонкой структуры колец, разделение колец и кусков льда.

МНЕНИЯ УЧЕНЫХ – УЧАСТНИКОВ МИССИИ КАССИНИ

«Гравитационные механизмы образования плотных колец, не дают убедительного объяснения наблюдаемых особенностей». A. Crida, S. Chernoz. *Nature*. 2010, 468, 903-905.

«Вопрос о происхождении и эволюции кольцевой системы до сих пор не решен. Что является причиной тонкой структуры? Будущие разработки должны пролить свет на происхождение плотных колец, а также на то, как они достигли своей нынешней конфигурации». L. Esposito. *Annu. Rev. Earth & Planet Sci.* 210, 38, 383-410.

«После грандиозного финала Кассини, существует ли консенсус относительно происхождения и возраста плотных колец?» P. Estrada, R. Durisen, J. Cuzzi. *American Geophysical Union Meet. New Orleans*, 2017.12.12. Paper 298112.

«Гипотеза молодых колец имеет ряд нерешенных проблем. Другие интерпретации, совместимые с кольцами, такими же старыми, как Солнечная система, все еще возможны». A. Crida, S. Chernoz et al. *Nature Astronomy*. 16 Sept. 2019. 3. 967-970.

**Какой Комментарий Можно Сделать
в Качестве Ответа на Вопрос о Нерешенных Проблемах
Происхождения Видимых Плотных Колец Сатурна,
рассмотренных в гравитационных моделях**

Ответ Очевиден:

Возникшие проблемы ведут нас к главному вопросу:

**Все ли явления, наблюдаемые зондом Кассини
в плотных кольца Сатурна, возникают только
за счет действия гравитационного поля?**

Или необходимо учесть другие взаимодействия?

**Учитывая нерешенность проблемы, мы предложили
исследовать действие магнитного поля Сатурна на
происхождение его колец**

СВОЙСТВА ЛЬДА В ПЛОТНЫХ КОЛЬЦАХ САТУРНА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ЗОНДА КАССИНИ

1) Куски плотных колец имеют размеры от см до нескольких м.

Они на 90-95% состоят из водяного льда.

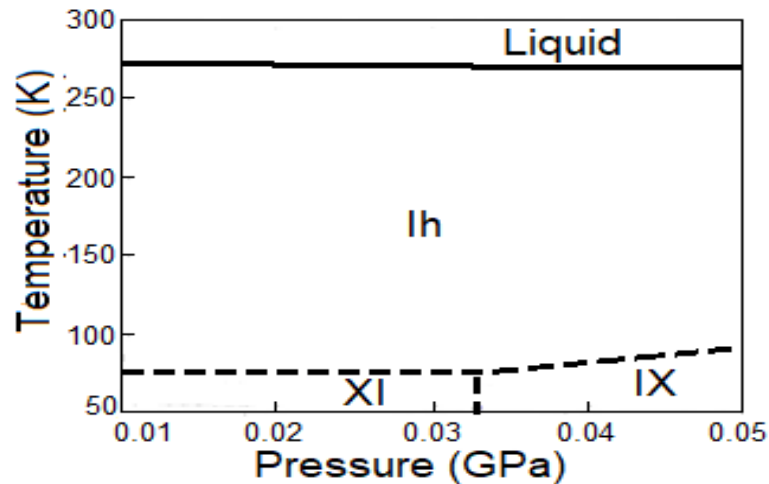
L. Esposito *AREPS* 2010, J. Cuzzi et al. *Science*. 2010. 327

2) Соотношение изотопов D/H льда плотных колец Сатурна такое, как и для земного льда. R. Clark et al. *Icarus*, 2019, 321

3) Земной лед XI стабилен ниже 73К, и он Диамагнитный.

R. J. Hemley. *ARPC*. 2000, 51, 763; F. Senftle, A. Thorpe. *Nature*. 1962, 194;

V. Tchernyi, S. Kapranov. *Res. Notes AAS*. 2021, 5, 255.



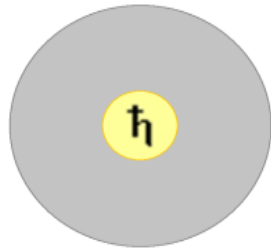
КАКУЮ ПРОБЛЕМУ НУЖНО РЕШИТЬ, ЧТОБЫ ПОНЯТЬ РОЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ САТУРНА В ПРОИСХОЖДЕНИИ ПЛОТНЫХ КОЛЕЦ?

1) Используем теорию малой туманности В. Сафронова, МГУ (1917-1999) :

Эволюция протопланетного облака и образование Земли и планет. NASA, 1972.

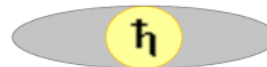
Perotti G. et al 2023: Телескоп Уэбб обнаружил воду в протопланетном облаке формирующихся планет. Значит нужно понять, как орбиты диамагнитных ледяных кусков льда протопланетного облака с радиусом предела Роша могут оказаться в плоскости экватора Сатурна, и образовать диск из колец, **см. схему на рис.:**

Saturn within Roche Limit-Size Cloud

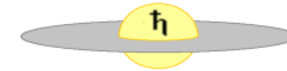


Сатурн внутри облака с радиусом предела Роша

Saturn with Disk of Rings



Преобразование протопланетного облака с кусками льда в диск с плотными кольцами на экваторе Сатурна



2) В случае образования ледяных кусков в облаке при гравитационном разрушении тела размером с Титан или при столкновении двух лун, или из остатков туманности Сатурна, нужно решить проблему движения куска льда внутри облака радиуса Роша в гравитационном и магнитном полях Сатурна, чтобы понять какова роль магнитного поля в этом процессе

Магнитная Анизотропная Аккреция как дополнительный процесс к Гравитационной Аккреции в происхождении плотных колец

На куски диамагнитного льда в протопланетном облаке Сатурна дополнительно к гравитационному полю действует и магнитное поле. Куски льда в кольцах обладают диамагнетизмом. Возникает сила диамагнитного выталкивания. Магнитная энергия куска диамагнитного льда имеет минимальное значение на магнитном экваторе, который совпадает с географическим экватором. В результате действия всех сил орбиты кусков льда смещаются в плоскость экватора Сатурна. В конце движения все куски льда блокируются в трехмерной магнитной яме в плоскости экватора Сатурна. Действие магнитного поля оказывает стабилизирующее действие на систему колец. В результате совместного действия гравитационного и магнитного полей Сатурна на куски диамагнитного льда образуется устойчивая система плотных колец.

[Tchernyi VV, Kapranov S.V. How Saturn could create rings by itself. The third force of diamagnetic expulsion and the mechanism of the magnetic anisotropic accretion of the origin of Saturn's rings // arXiv.org/abs/2104.03967. 2021.](#)

Для куска льда, движущегося около Сатурна по орбите постоянного радиуса, получаем уравнение для зенитного угла:

$$\ddot{\theta}_{S-p} + \dot{\theta}_{S-p} \cot \theta_{S-p} = \frac{GM_S}{r_{S-p}^3} \cot \theta_{S-p} + \frac{3C\mu_0^2 m_S m_p}{2\pi^2 r_{S-p}^8 M_p} \cot \theta_{S-p} \cos^2 \theta_{S-p}$$

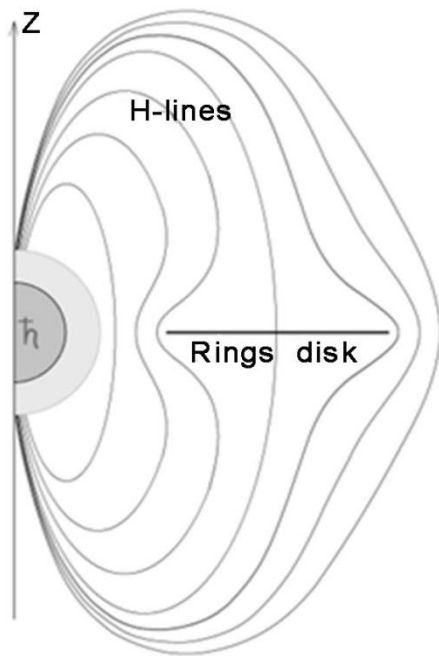
его решение $\theta = \pi/2$ указывает: **1) на сильную сжатость диска плотных колец Сатурна. 2) на захват кусков льда в плоскости экватора, где они занимают положение с наименьшей энергией.**

Для азимутальной скорости получаем:

$$\dot{\phi}_{S-p} = \sqrt{GM_S/r_{S-p}^3 + 3C\mu_0^2 m_S m_p / (8\pi^2 r_{S-p}^8 M_p)}$$

- Видно, что сила тяжести на орбите куска льда уравновешивается центробежной силой и силой диамагнитного выталкивания.
- **Действие осесимметричного магнитного поля Сатурна обеспечивает устойчивость диска колец.**
- Действие магнитного поля растет с уменьшением размер куска льда.

**Стабильность плотных колец внутри диска.
Деформация магнитных силовых линий Сатурна
диском плотных колец из-за диамагнетизма кусков льда**



**Магнитная яма на экваторе Сатурна
изменяет картину магнитных силовых
линий. Куски льда плотных колец
захватываются на магнитном экваторе
Сатурна в магнитной яме. Это устойчивое
положение для кусков льда:
Вертикально – за счет минимальной
энергии кусков льда на экваторе.
Горизонтально – благодаря неоднородности
магнитного поля по радиусу.**

Образование Тонкой Структуры Плотных Колец под Действием Магнетизма Сатурна и Диамагнетизма Кусков Льда

- **Тонкая структура плотных колец – это результат перераспределения кусков льда в области градиента плотности магнитного потока.**
- **Линии магнитного поля Сатурна стремятся пройти через области с наибольшей плотностью магнитного потока. Куски диамагнитного льда собираются в областях с низкой плотностью магнитного потока.**
- **Сила диамагнитного выталкивания образует резкие края плотных колец**
- **Сгущения и разрежения кусков льда в участках колец выглядят как система плотных колец.**



Tchernyi, V., Kapranov S. arxiv.org/abs/2204.03414. 7.04.2022

Tchernyi, V., Pospelov, A. *Astrophysics & Space Sci.*, 2007, 307, 4, 347-356.

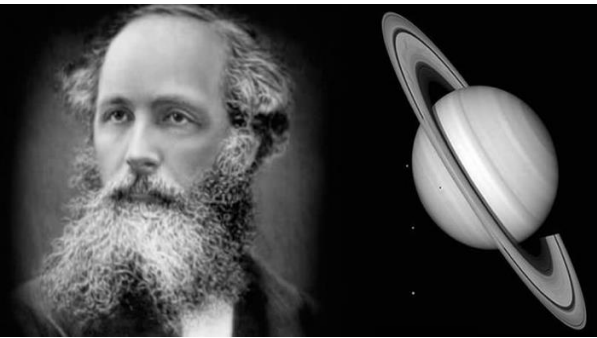
Разделение и притяжение кусков льда плотных колец под действием гравитационных и магнитных полей

- Кассини наблюдал устойчивое равновесное положение кусками льда в плотных кольцах. Это означает, что силы отталкивания и притяжения кусков льда уравнивают друг друга.
- При меньших расстояниях между кусками льда куски не могут слипнуться, так как сила магнитного расталкивания велика. Также им невозможно разлететься на бесконечность, так как гравитационное притяжение между ними велико.
- Для точного расчета I_0 и его зависимости от размеров кусков необходимо знание магнитной восприимчивости льда.



Сила отталкивания между кусками льда достаточно велика. Она способна удерживать куски внутри кольца даже в том случае, когда искривление края кольца произошло из-за притяжения, возникшего между кусками кольца и спутником, движущимся в щели между кольцами.

Дж. Максвелл доказал, что видимые плотные кольца Сатурна состоят из отдельных кусков. Это обеспечивает стабильность колец.



J. Maxwell. On the Stability of the Motion of Saturn's Rings. MNRAS. 1859, 18.

Adams prize, 1857.

Но Максвелл также утверждал, что плотные кольца должны упасть на Сатурн

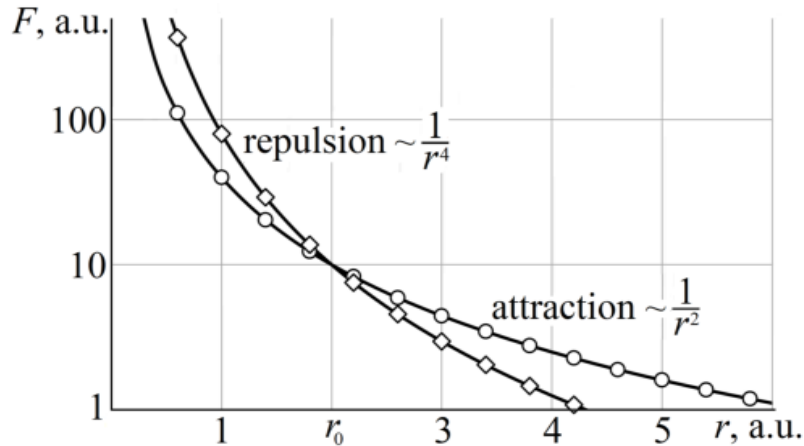
Максвелл доказал: диск плотных колец может быть устойчивым только если он состоит из роя несвязанных между собой кусков. Стабильность колец обеспечивается их притяжением к Сатурну и взаимным движением Сатурна и кусков. Используя анализ Фурье, он изучил распространение волн в таком кольце и показал, что при определенных условиях куски не сталкиваются друг с другом. В случае двух колец он обнаружил, что при определенном соотношении их радиусов возникает устойчивость системы колец.

Но Максвелл не знал, какая сила разделяет кольца на куски. В его время не было известно, что кольца состоят из кусков льда и что лед диамагнитный. Это стало известно только по результатам Миссии Кассини в 2004-2017 гг.

Picture courtesy of: <https://lernodo-newtonic.com/maxwell-contributions>

Роль магнетизма Сатурна в равновесном разделении кусков плотных колец

Решается задача о взаимодействии двух одинаковых однородно намагниченных диамагнитных сфер во внешнем магнитном поле. Если массы кусков льда равны, то при балансе гравитационных и магнитных сил, $F_g + F_m = 0$, равновесие происходит, когда



$$r_0 = \left(\frac{R}{r_{Sp}} \right)^3 \frac{m_S}{M_p} \left| \frac{\mu - \mu_0}{\mu + 2\mu_0} \right| \sqrt{\frac{3\mu_0}{4\pi G}}$$

Рис. Зависимость сил отталкивания и притяжения от расстояния между кусками льда

R – радиус частицы, μ и μ_0 – магнитные проницаемости. M_p – масса частицы, m_s – магнитный момент Сатурна.

[Tchernyi V.V., Kapranov S.V.](#) J.C. Maxwell had almost solved the rings origin problem, but in his time, there was no data on particles // [Space Research Today. Letter to the Editor. N. 219. April 2024. N. 219. P. 80-85.](#)

[Tchernyi V. et al.](#) The Repulsion Force Between Ice Bodies in Dense Rings of Saturn, J.C. Maxwell Proposed in 1856 // [Advances in Theoretical and Computational Physics. 2024. V. 7. No. 3. P. 1–3.](#)

ВЫВОДЫ

Впервые решена задача образования колец на экваторе Сатурна. На основе данных зонда Кассини предложена теория происхождения плотных колец Сатурна, решившая эту 400-летнюю загадку с 1610 г.

Открыт новый физический эффект в происхождении плотных колец Сатурна, связанный с фундаментальной ролью его магнитного поля в этом процессе: Магнитная Анизотропная Аккреция Диаманитных Кусков Льда Протопланетного Облака Сатурн.

Определена сила в теории Максвелла, 1856, разделяющая куски льда в плотных кольцах Сатурна – сила расталкивания диаманетиков.

Дано интервью Американскому Астрономическому Обществу, 2020.

Результаты наших исследований доложены на международных конференциях в России, США, Китае, Австралии, Франции, Италии.

На Западе снят научно-популярный 4-мин. фильм о нашей теории.

Key References

- Tchernyi V.V., Kapranov S.V.. Contribution of Magnetism to the Origin of Saturn's Rings. **The Astrophysical Journal**, 2020, V. 894, No. 1.
 - Journal Author Series: Vladimir Tchernyi on 2020ApJ...894...62T <https://youtu.be/La7RmcWGUTQ>
 - Tchernyi VV, Kapranov S.V. How Saturn could create rings by itself. The third force of diamagnetic expulsion and the mechanism of the magnetic anisotropic accretion of the origin of Saturn's rings // [arXiv.org/abs/2104.03967](https://arxiv.org/abs/2104.03967). 2021.
 - Tchernyi V.V., Kapranov S.V. To the problem of the properties of Saturn's rings' ice // **Research Notes of AAS**. 2021. V. 5. N. 10. Article 255. DOI:10.3847/2515-5172/ac348c.
 - Tchernyi V.V., Kapranov S.V., A.Yu. Pospelov. Role of Electromagnetism in the Origin of Saturn's Rings Due to Diamagnetism of Their Ice Particles: J. C. Maxwell Had Almost Solved the Rings Origin Problem // **URSI Radio Science Letters**, 3:69, 2021. <https://doi.org/10.46620/21-0069>
 - Tchernyi VV, Kapranov SV. The Role of diamagnetism in the separation of particles and sharp edges of the Saturn's rings // [arXiv.org/abs/2204.03414](https://arxiv.org/abs/2204.03414). 2022.
 - Tchernyi V.V., Kapranov S.V. J.C. Maxwell had almost solved the rings origin problem, but in his time, there was no data on particles // **Space Research Today. Letter to the Editor**. N. 219. April 2024. N. 219. P. 80-85.
 - Tchernyi V.V., Kapranov S.V., Belodedov M.V. The Repulsion Force Between Ice Bodies in Dense Rings of Saturn, J.C. Maxwell Proposed in 1856 // **Advances in Theoretical and Computational Physics**. 2024. V. 7. No. 3. P. 1–3.
- 4-min. movie about Tchernyi-Kapranov theory:** The mystery of Saturn's rings solved by magnetism? <https://youtu.be/AI6AaMJoR4>

СМИ: Новые известия, 11.04.2023.

«Намагниченный лед: Российские ученые узнали, как появились кольца у Сатурна»

<https://newizv.ru/news/2023-04-11/namagnichenny-lyed-rossiyskie-uchenye-uznali-kak-poyavilis-koltsa-saturna-403911>

Спасибо за внимание!