

САМАРСКАЯ ОБЛАСТНАЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ШКОЛА

**ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА
БОЛЬШОГО ПЫЛЕВОГО КОЛЬЦА САТУРНА**

(научно-исследовательская работа)

Выполнила:

Черниченко Дарья,
10 класс СОФМШ

Научный руководитель:

Филиппов Юрий Петрович,
к.ф.-м.н., старший препода-
ватель кафедры общей и
теоретической физики
Самарского государствен-
ного университета

Самара, 2011 г.

Оглавление

Введение	3
Историческая хронология открытий колец Сатурна	3
Цель и задачи данной работы	12
1 Сатурн и его кольца	13
1.1 Современные представления о Сатурне	13
1.2 Физические свойства "классических" колец Сатурна	21
1.3 Природа пылевого кольца Сатурна	27
2 Расчет и анализ искомых величин	30
2.1 Модель Большого пылевого кольца Сатурна	30
2.2 Кинематические параметры пылевых частиц кольца	32
2.3 Массовые распределения пыли в кольце	35
2.4 Расчет объема БПК	38
2.5 Расчет концентрации и массовой плотности частиц различных классов в БПК	40
2.6 Определение средней массовой плотности и полной массы БПК	42
2.7 Расчет радиусов полости Роша и сферы Хилла Сатурна	44
2.7.1 Полость Роша Сатурна	44
2.7.2 Сфера Хилла Сатурна	46
Заключение	49
Литература	51

Введение

"На самом деле, когда мы видим, как эта величественная арка висит над экватором планеты без всякой видимой опоры или связи, наш разум спокойным оставаться не может. Мы не в состоянии примириться с этим явлением, не можем описывать его просто как факт наблюдений, не предполагая отыскать ему объяснения..." – Дж. К. Максвелл.

Историческая хронология открытий колец Сатурна

Сатурн, по истине, является одним из самых ярких символов космического пространства, излюбленным объектом многих художников, иллюстрирующих космическую тему. Главным «сокровищем» этой планеты, конечно, являются *кольца* (см. рис. 1). Идеально точные формы, необычность визуального сочетания со сферическим телом, их грандиозные масштабы в действительности завораживают любого зрителя. Несмотря на то, что Сатурн был известен с незапамятных времен (его можно наблюдать невооруженным глазом), его кольца разглядеть оказалось не просто.



Рис. 1. Сатурн и его кольца.

Г. Галилей в 1610 г. стал первым человеком, заметившим в телескоп у Сатурна некую странность [1]. "С великим удивлением я наблюдал Сатурн не в виде одной звезды, а состоящим из трех неподвижных почти касающихся

звезд (см. рис. 2.1), при этом центральная крупнее боковых и все три расположены на прямой линии..." – вспоминал Галилей. – "В трубу с меньшим увеличением они не видны как три отдельные звезды: Сатурн представляется удлинненной звездой в форме оливы". Галилей сравнивал боковые звезды с покорными слугителями, которые помогают престарелому Сатурну совершать свой путь и всегда держатся по обе стороны от него.

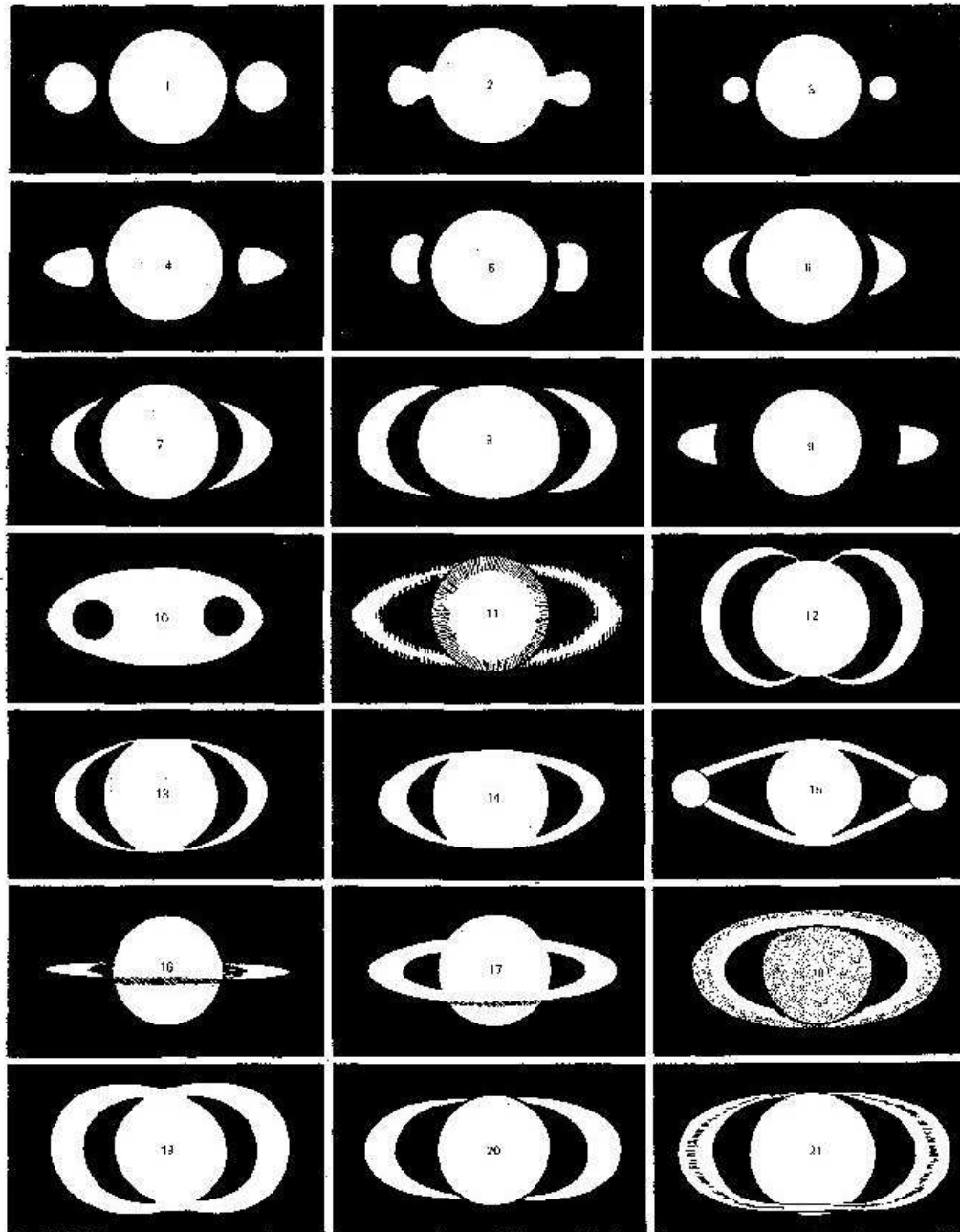


Рис. 2. Зарисовки системы Сатурна, выполненные в XVII веке: 1) Г. Галилей, 1610 год; 2) К. Шейнер, 1614 год; 3) П. Гассенди, 1633 год; 4) Дж. Риччиоли, 1640 год; 5)-8) Я. Гевелий, 1640-1650 годы; 9)-10) П. Гассенди, 1645 год; 11) Е. Дивини, 1647 год; 12) Ф. Фонтана, 1648 год; 13)-15) Дж. Риччиоли, 1648-1650 годы; 16)-17) Х. Гюйгенс, 1656, 1659 год; 18) Дж. Кампани, 1664 год; 19) В. Болл, 1665 год; 20) Я. Гевелий, 1675 год; 21) Ж. Кассини, 1676 год.

К тому моменту, уже открыв у Юпитера 4 галилеевых спутника и про-

наблюдая детально за их движением, Галилей был озадачен постоянством расположения «покорных служителей» у Сатурна.

Вскоре, однако, природа подшутила над исследователем. В 1612 году кольцо Сатурна оказалось повернутым к Земле ребром и "покорные служители" исчезли из поля зрения галилеевой трубы. "Что можно сказать об этом необычном превращении? – задавался вопросом Галилей. – Что две эти меньшие звезды исчезли, как это бывает с пятнами на Солнце? Сатурн съел своих детей? Или это действительно линзы моего телескопа так долго меня обманывали? И не только меня, но и многих других, наблюдавших со мной... Я полагаю, что после зимнего солнцестояния 1614 года они будут наблюдаться вновь".

И, действительно, в 1614 году "боковые звезды" Сатурна видел в свою трубу иезуит Кристофер Шейнер, в 1616 году – сам Галилей, а в 30 – 50-е годы XVII века их замечали такие известные наблюдатели, как Пьер Гассенди, Франческо Фонтана, Джованни-Батиста Риччиоли, Ян Гевелий (см. рис. 2) [2]. Но хотя отдельные зарисовки планеты определенно показывали кольцевые очертания, разгадать тайну неземного дива никак не удавалось. Галилею было суждено уйти в могилу, не познав причину этого явления. Даже Гевелий, ближе всех подошедший к разгадке (поскольку обнаружил периодичность смены фаз видимости Сатурна), так и не сумел разобраться, что же являются собой «покорные служители».

Эта загадка оставалась нераскрытой более 40 лет, до тех пор пока не пришел новый титан эпохи Возрождения – Христиан Гюйгенс. Он регулярно наблюдал Сатурн с 1655 года сначала в 12-футовый, а затем в новый 23-футовый телескоп. Уже в 1656 году он отмечал, что Сатурн "опоясан кольцом, тонким, плоским, нигде не прилегающим, к эклиптике наклоненным". В 1659 г. опубликовал новый труд, озаглавленный "Systema Saturnium". Здесь он уже во всеуслышание заявил о том, что Сатурн обладает кольцом. Предвидя "недоверие тех, кто считает необычным и неправильным", что он "приписывает небесному телу форму доселе не встречавшуюся, тогда как считается непреложным законом природы, что им подобает сферический вид", Гюйгенс подчеркнул: "я не измыслил это предположение благодаря своей фантазии и воображению..., а ясно вижу кольцо собственными глазами". В просвещенной Европе это произвело впечатление разорвавшейся бомбы. Противники учения Коперника со всех кафедр осмеивали Гюйгенса. Однако Гюйгенс был уверен в правильности своих мыслей, и вскоре он нашел строгое геометрическое объяснение, явлению пропажи колец из вида.

В 60-х годах XVII века конструкции телескопов стали уже куда совершеннее, появилось немало приборов с диаметром всего примерно в два дюйма (5 см), в которые можно уже было увидеть кольцо Сатурна без особого труда;

эти наблюдения как бы вошли в моду. Вскоре накопились сведения о всех капризах этого прекрасного объекта. Оказалось, что поведение кольца подвержено строгой цикличности. Дважды в течение каждого сатурнова года (29.5 земных лет) – первый раз, когда планета встает между созвездиями Тельца и Близнецов, и второй – когда она вступает в созвездие Стрельца, – земной наблюдатель видит кольцо во всей его первоизданной красе. В другие же два периода, когда Сатурн находится вблизи созвездий Рыб и Льва, кольцо, как заколдованное, исчезает, словно его и не бывало.

Ось вращения Сатурна и его кольца наклонена по отношению к плоскости его обращения вокруг Солнца примерно на 27° [3]. При обращении планеты вокруг Солнца кольцо сохраняет свое положение относительно планеты. Поэтому земным астрономам и удастся видеть его в разное время под различными углами (см. рис. 3). Дважды в течение сатурнова года оно полностью раскрывается и видно лучше всего и дважды становится к нам ребром, в эти периоды исчезая из вида.

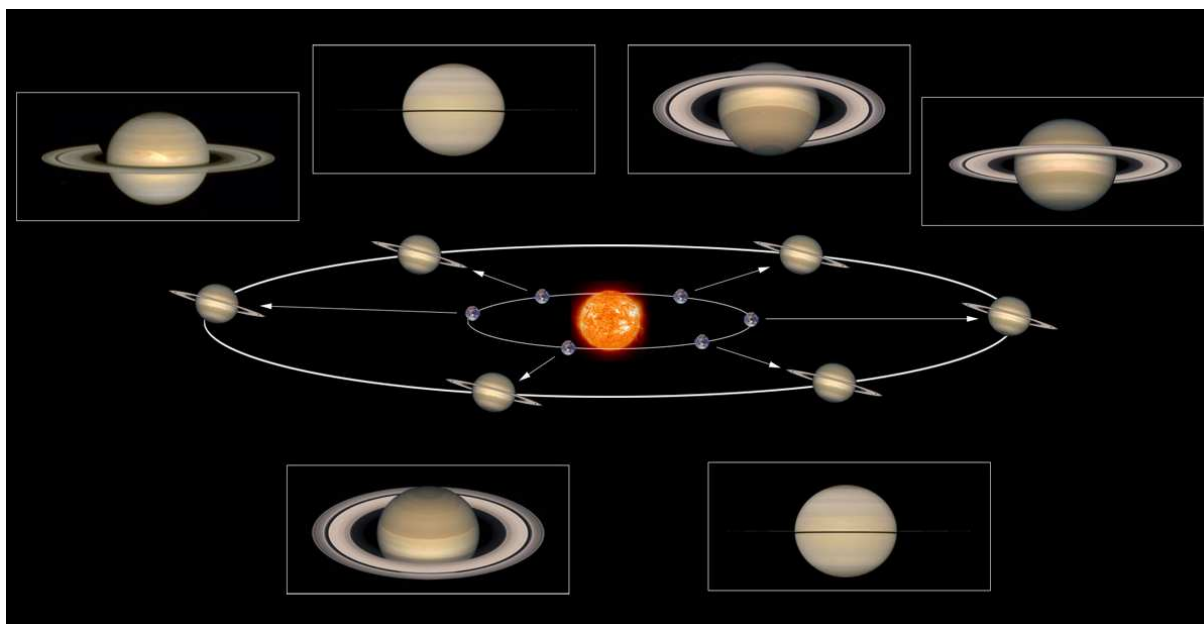


Рис. 3. Видимость Сатурна с Земли в разных точках его орбиты.

В 1664 году Джузеппе Кампани, один из признанных мастеров телескопостроения, проверяя качество своего 35-футового инструмента, "расщепил" кольцо Сатурна на два – внешнее, более темное, и внутреннее, светлое (кольца А и В по современному обозначению, введенному в XIX веке О.В. Струве). В 1665 г. англичанин У. Болл заметил посередине кольца вековую темную линию, но объяснить ее не смог, и его открытие особого интереса не привлекло. В 1675 году Христиан Гюйгенс и Жан-Доминик Кассини (создатель и первый директор Парижской обсерватории, талантливейший наблюдатель) обнаружили между этими двумя кольцами темную полосу. Ее впоследствии назвали делением Кассини. Таким образом, "классические" особенности кольца Са-

турна (см. рис. 1) были установлены в XVII столетии.

В 1837 г. немецкий астроном Иоганн Франц Энке заметил, что и само кольцо А не едино; оно рассечено очень слабо различимой полоской. Ее назвали делением Энке. Впрочем, оно оказалось довольно эфемерным, и иногда его не удается обнаружить даже в сильный телескоп. Да и знаменитое деление Кассини, хотя и более постоянное, тоже временами "раздваивается", а временами даже в сильные телескопы выглядит как едва различимый переход в яркости кольца А.

В 1838 г. молодой Галле (восемь лет спустя он обнаружил Нептун) заметил, что у Сатурна в кольцо В "вложено" еще одно, очень разреженное кольцо, так что через него даже можно ясно видеть саму планету. Сегодня его называют кольцом С. Но первые 12 лет после открытия оно оставалось как-то в забвении. Следует отметить, что еще в 1673 г. парижский астроном Жан Пикар намекал на вероятность существования полупрозрачного кольца Сатурна. В 1850 г. Джордж Филлипс Бонд в Кембридже (штат Массачусетс, США) заново его открыл.

Сегодня предполагается, что кольцо С постоянно теряет свою материю: она выпадает "дождем" на поверхность самого Сатурна. А на место "высыпавшейся" столь же постоянно поступает новая материя, которую это кольцо занимает у кольца В. Этот процесс объясняет факт размытости внутреннего края кольца С.

В 1907 г. французский астроном-любитель Жорж Фурнье заметил у Сатурна нечто, напоминающее еще одно кольцо, лежащее вне кольца С. Но он и сам не был в этом уверен. Ровно год спустя о таком же факте сообщил швейцарец М.Э. Шаер из Женевы. В следующие годы поступили противоречивые известия: в Гринвиче "дополнительное" кольцо никому не удалось наблюдать, а в Йеркской обсерватории Чикагского университета работавший там на мощном телескопе Эдуард Эмерсон Барнард его видел. Но этот астроном славился удивительно острым зрением; не каждый взялся бы опровергать то, что он утверждал.

В 1911 г. в Лилле (Франция) гипотетическое кольцо D якобы обнаружил астроном Р. Фонкхеер, после чего об этом явлении никто ничего нового не слышал больше 40 лет.

Лишь в 1952 г. опытный английский планетолог Р. М. Баум заметил кольцо D снова. Оно едва-едва светилось, и яркость его составляла не более 0.4 яркости кольца С. В 1954 г. эти наблюдения с оговорками подтвердили несколько человек, а в 1958 г. довольно уверенно – Р.Р. де Фрейтас Мурао, ведущий астроном в обсерватории Рио-де-Жанеро. Все это звучало не так уж убедительно, но все-таки теперь уже большинство специалистов склонялось к мнению, что кольцо D существует, по крайней мере время от времени...

Астроном С. Л. Ларсон из Аризонского университета наблюдал окрестности Сатурна при помощи 154-сантиметрового телескопа, снабженного особо высокочувствительным оборудованием, позволяющим фиксировать в пять раз более слабое свечение, чем это удастся с обычными фотографическими приборами [1]. Кроме того, эти наблюдения осуществлялись в таком диапазоне длин волн, в котором метан поглощает, а не отражает солнечное излучение. Это меняет дело, потому что атмосфера Сатурна содержит очень много метана, и при таких именно наблюдениях изображение планеты становится более тусклым, чем ее кольца, и их не засвечивает.

Два года потратил Ларсон на обработку полученных им материалов. Сперва, используя данные всех прежних наблюдений, он построил модель, показывающую, как яркость колец должна изменяться по мере продвижения от Сатурна к периферии его системы. Учел он, конечно, и те искажения, которые вносит в результаты исследования состояние нашей земной атмосферы в ночь наблюдения, и те, что зависят от оптики самого прибора. Оказалось, что фактические наблюдения хорошо совпадают с теоретической моделью и, следовательно, надежны.

Все это позволило Ларсону в 1979 г. выделить изображение кольца D и определить, что его свечение обладает всего 3 – 5% яркости наиболее светлой части всей системы колец Сатурна. Даже деление Кассини, почти свободное от частиц, и то обладает большей яркостью, чем кольцо D!

Но и это, как оказалось, не все. В том же 1979 г. пенсильванский астроном У. А. Фейбелман (обсерватория Аллегени, США) обнаружил относительно яркую линию, заметную, когда на кольца смотрят "с ребра". Оказалось, что эта линия простирается вдвое дальше от Сатурна, чем диаметр известной до тех пор системы его колец. Данные Фейбелмана использовал Б. Смит из Аризонского университета. Ему удалось вычислить, что плотность такого внешнего кольца E должна быть в 100 тысяч раз меньше, чем даже у ларсоновского кольца D.

Английским астрономам, работающим на Гринвичской обсерватории, все же удалось сфотографировать это сверхразреженное кольцо E. Вслед за ними это достижение было повторено американскими учеными, и, наконец, сомнения исчезли: у Сатурна есть не менее пяти колец, хотя и разных по плотности и свечению. Основная масса их материи, конечно, заключена в наиболее плотном кольце B.

Наступила эпоха непосредственного изучения космического пространства. Посланные человеком автоматические межпланетные станции должны были приступить к разведке дальних областей Солнечной системы. И, конечно, усилия ученых не пропали зря. Обработав материалы 1979 года, присланные межпланетной станцией "Пионер-11", Т. Герелс и Л. Эспосито обнаружили

существование узкого – километров в пятьсот шириной - кольца, которое они обозначили буквой F. Оно отделено от внешнего края кольца A расстоянием менее примерно в 4000 км. Новооткрытому пробелу присвоили наименование "деление Пионера".

Деление Кассини привычно считали чуть ли не пустым местом, настолько "ненаселенным" оно выглядит с Земли. "Пионер-11" с решительностью опроверг такое мнение. На его фотоснимках этот район выглядит весьма светлым и, следовательно, он содержит определенное количество частиц. Особенно интересно, что их скопление приходится как раз на середину этого пробела между кольцами.

Когда "Пионер-11" пролетал на расстоянии между 570 000 и 840 000 км от планеты, приборы записали такое поглощение . электронов и протонов, которое ученым показалось странным. Единственное, что оставалось предположить, что здесь, недалеко за пределами кольца A, пролегает еще одно неизвестное кольцо (ему дали индекс G), столь разреженное, что его не только с Земли, но и с "Пионера" оптическими средствами не различить. А вот на заряженные частицы радиационных поясов оно свое влияние оказывает.

В ноябре 1980 г. в окрестностях Сатурна появился новый наблюдатель – "Вояджер-1", прошедший в 124 000 километрах от планеты. Сразу же посыпались неожиданности. Если до сих пор считалось, что Сатурн обладает шестью, от силы – восемью кольцами, то сделанные "Вояджером-1" снимки показали: их количество измеряется сотнями, а быть может, даже близко к тысяче! Конечно, это не новооткрытые "полноправные" образования, а подразделения ранее уже наблюдавшихся колец. Каждое широкое кольцо Сатурна, оказалось, состоит из множества узеньких, которые подобны бороздкам на грампластинке. И некоторые из этих "бороздок" имеют различную ширину на разных своих участках.

Даже внутри деления Кассини обнаружено множество неизвестных ранее колец, состоящих из мелких частиц. За двое суток до максимального сближения с планетой приборы "Вояджера-1" заметили, что два из колец Сатурна обладают эксцентricностью, то есть планета находится не в их центре, а несколько в стороне. Это – еще один случай открытия эксцентricных колец после колец Урана [4].

Т.о. общая структура "классических колец" Сатурна, считая от поверхности Сатурна, состоит из колец D, C, B, A, F и E (см. рис. 4), причем кольца A, B и C в свою очередь делятся на многие сотни эфемерных "субколец", не удостоенных собственного наименования, даже буквенного. Не менее 99% всего солнечного света, отражаемого украшением Сатурна, дают лишь два кольца – сверкающие A и B.

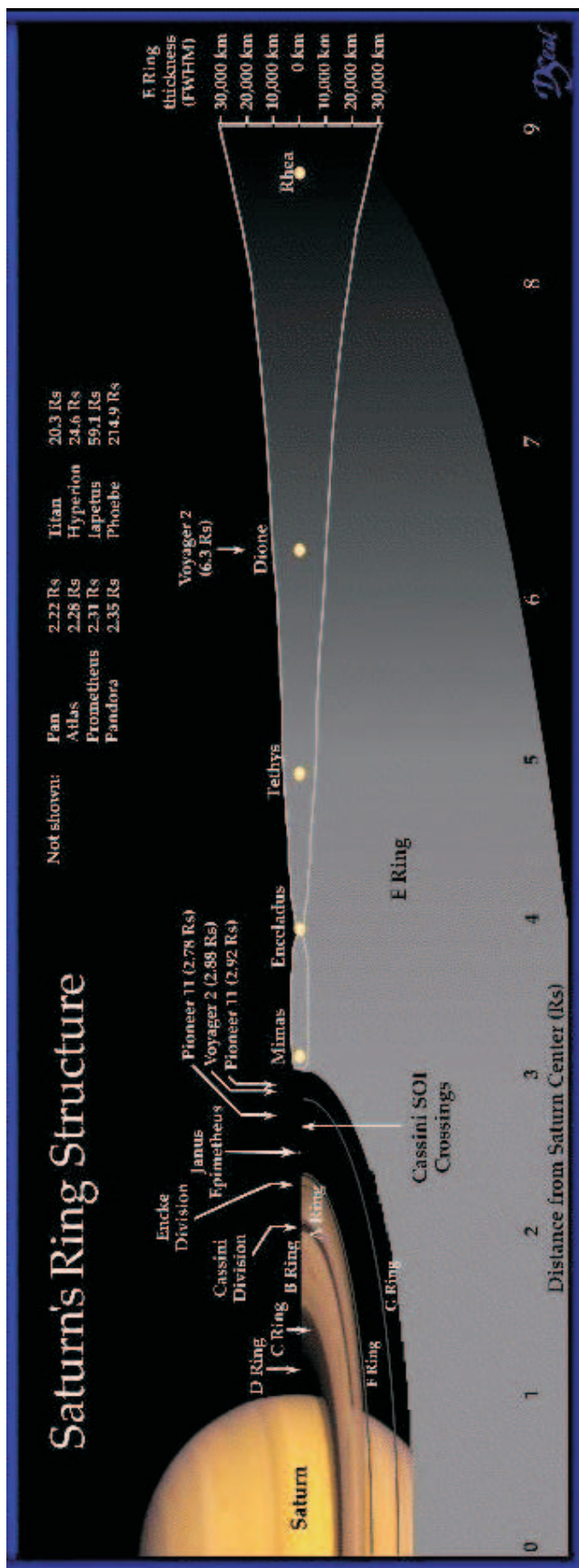


Рис. 4. Система "классических" колец и некоторых спутников Сатурна.



Анна Вербишер



Дуглас Гамильтон



Майкл Скрутский

Рис. 5. Авторы открытия пылевого кольца Сатурна.

В начале октября 2009 года в журнале Nature была опубликована статья [5] об открытии большого пылевого кольца (БПК) у Сатурна американскими астрономами: Анной Вербишер (Anne Verbiscer), профессором Майклом Скрутским (Michael F. Skrutskie) из университета Вирджинии, Чарлоттсвилл (University of Virginia, Charlottesville) и профессором физики Дугласом Гамильтоном (Douglas C. Hamilton) из университета Мэрилэнд (University of Maryland), см. рис. 5.

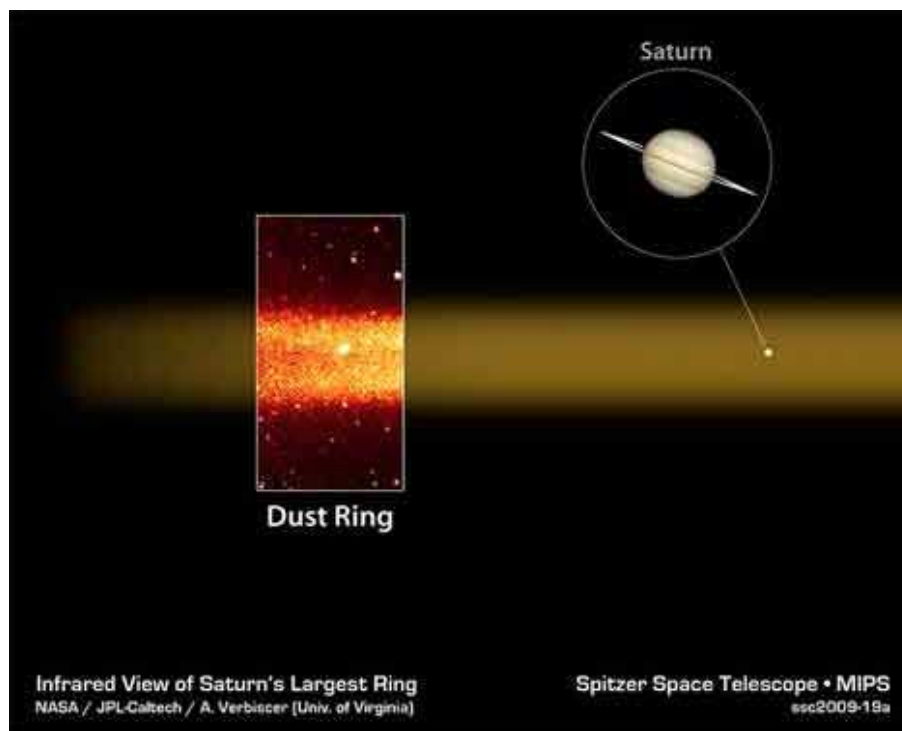


Рис. 6. Большое пылевое кольцо Сатурна "глазами" инфракрасного орбитального телескопа Спитцера. На первый план выдвинута часть наибольшего кольца Сатурна. Пылевое кольцо обнаружено космическим телескопом НАСА Spitzer, который зафиксировал инфракрасное излучение (повышенную температуру) от пылевидного материала, из которого состоит кольцо. Spitzer рассмотрел край кольца со своей орбиты вокруг Солнца.

Диаметр открытого кольца равен 300 радиусам Сатурна (см. рис. 6). Толщина также велика – приблизительно 40 радиусов. Угол наклона кольца составляет 27° к плоскости "классических" колец Сатурна. Изображение получено с помощью инфракрасного света с длиной волны 24 мкм.

"Это одно из очень больших колец. Если бы вы могли видеть кольцо, то его ширина соответствует двум полным дискам Луны на ночном небе Земли, по одной с каждой стороны Сатурна", – сказала Анна Вербишер.

Новое кольцо расположено на дальних пределах системы Сатурна. Основная часть материала кольца начинается около 6 млн. км от планеты и простирается еще дальше примерно на 12 млн. км. Один из дальних спутников Сатурна, Феба (Phoebe), вращается внутри нового кольца, и, вероятно, является основным источником пыли кольца.

Цель и задачи данной работы

Актуальность работы. Открытый объект находится под пристальным вниманием специалистов. Новое открытие принесло с собой много новых вопросов, требующих неотложного решения. И это прежде всего вызов теоретикам, которые сегодня ведут активные исследования данного объекта. Однако, проведенный автором настоящей работы анализ литературы, доступной широкому кругу читателей и посвященный данному кольцу, указал на крайне скудный перечень физических данных о кольце.

В связи со сказанным, главной целью настоящей работы является построение простейшей модели большого пылевого кольца (БПК) Сатурна и расчет его геометрических и динамических характеристик, а также кинематических характеристик пылевых частиц, составляющих его.

Согласно сформулированной цели, основными задачами настоящей работы являются следующие положения:

1. Расчет периода обращения, угловой и линейной скорости, центростремительного ускорения для пылевых частиц БПК Сатурна с использованием основных законов механики.

2. Расчет концентрации и массовой плотности пылевых частиц различных классов в БПК с использованием известных массовых распределений для кометной пыли.

3. Оценка объема БПК и его полной массы.

4. Расчет полости Роша и сферы Хилла для Сатурна. Анализ устойчивости кольца и возможности гравитационной конденсации тел больших размеров.

Основными методами решения поставленных задач являются:

1. Методы классической механики.

2. Методы статистической физики.

Данная работа имеет следующую структуру.

Первая глава посвящена современным физическим представлениям о Сатурне и его системе колец.

Во **второй главе** подробно представлены решения поставленных теоретических задач и их анализ.

Резюме по проделанной работе представлено в **заключении**. Финальная часть работы содержит список использованных источников.

Глава 1

Сатурн и его кольца

В настоящей главе будут представлены современные представления о Сатурне и его системе колец.

1.1 Современные представления о Сатурне

Под *системой Сатурн* принято традиционно понимать саму планету с кольцами, ее систему спутников и занимаемую ими часть пространства.



Рис. 7. Полноцветный вид Сатурна и его колец.

Планета Сатурн — шестая планета от Солнца (находится на среднем расстоянии 1433 млн. км (9.58 а. е.) от Солнца) и вторая по размерам планета в Солнечной системе после Юпитера (см. рис. 7). Сатурн вместе с Юпитером, Ураном и Нептуном образуют класс газовых гигантов и одновременно их относят к типу классических планет Солнечной системы. Сатурн назван в честь

римского бога Сатурна, аналога греческого Кроноса (Титана, отца Зевса) и вавилонского Нинурты.

Внешний вид. Планета известна человеку с самых древних времен. При наблюдениях планеты невооруженным глазом она выглядит как мутно-желтоватое точечное светило, похожее на обычную звезду. Однако Сатурн легко отличить от обычной звезды: данный объект является достаточно ярким на небосклоне и, что самое главное, он не мерцает подобно звездам: его свет распространяется ровно без каких-либо скоротечных колебаний. Максимальная