ВСЕЛЕННАЯ и МЫ

Информационно-познавательный сайт
и научно-публицистический альманах
Астрономического Общества

2017 No. 6

"Две вещи наполняют душу всегда новым и все более сильным удивлением

и благоговением, чем чаще и продолжительней мы размышляем о них,

- это звездное небо надо мной и моральный закон во мне"

И.Кант

СОДЕРЖАНИЕ

Обращения к читателю

ОТ РЕДАКТОРА

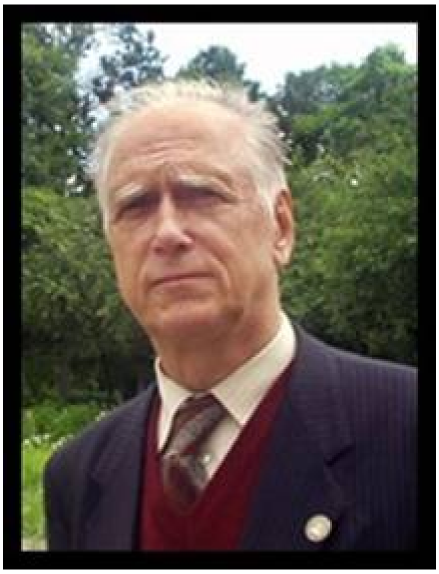
Николай САМУСЬ

Представляя прошлый номер электронного альманаха «Вселенная и Мы» во вводной статье, редактор номера д.ф.м.-н. С.А. Язев (Иркутск) очень тепло говорил о создателе и редакторе первой, бумажной версии журнала Эдварде Владимировиче Кононовиче. Увы, Э.В. Кононович скончался 26 сентября 2017 г. Мы открываем номер статьей его памяти.

Сергей Арктурович Язев писал также о том, что его с трудом уговорил стать редактора альманаха я, сопредседатель АстрО Н.Н. Самусь. Похоже, что я смог уговорить С.А. Язева только на один номер. Однако материал следующего выпуска был успешно собран, и выпускающим редактором нового номера пришлось стать мне. Я не теряю надежды, что С.А. Язев вернется к работе над альманахом, которую он так недавно и так успешно начал. В любом случае авторский коллектив и актив Международной общественной организации «Астрономическое Общество» намерены продолжить этот проект, который нам кажется полезным и для любителей астрономии, и для профессионалов-астрономов, желающих получить сведения о смежных областях любимой науки от специалистов.

В работе над номером мне оказала неоценимую помощь В.Л. Штаерман. В оформлении номера вновь использованы орнаменты, созданные Н.П. Кукаркиной. Обложку номера разработала О.В. Цысарь.

Памяти Эдварда Владимировича Кононовича
(08.11.1931 – 26.09.2017)



26 сентября 2017 года после продолжительной болезни на 86-м году жизни скончался Эдвард Владимирович Кононович, старейший преподаватель астрономии в МГУ, выдающийся педагог, доцент кафедры астрофизики и звездной астрономии, известный ученый, активный популяризатор науки и любительской астрономии, автор нескольких монографий и учебников и более 300 работ, опубликованных в российских и зарубежных изданиях, основатель научно-популярного альманаха «Вселенная и Мы».

Эдвард Владимирович Кононович родился в Москве 8 ноября 1931 года. Его мать, Тамара Сергеевна Кононович, происходила из семьи с давними дворянскими традициями, двоюродный дедушка по линии матери, Александр Константинович Кононович (1850–1910), возглавлял кафедру астрономии и университетскую обсерваторию в Новороссийском университете (ныне – Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова). Отец, Владимир Николаевич Сухомлинов, был художником. Брат отца был репрессирован в годы гражданской войны. Поэтому, во избежание возможных репрессий, Тамара Сергеевна дала сыну свою фамилию. Детство Эдварда Владимировича прошло в Антипьевском переулке (в 1962–1993 гг. – улица Маршала Шапошникова, ныне – Колымажный переулок Центрального административного округа г. Москвы). В 1950 году Эдвард Владимирович окончил 59-ю мужскую школу Киевского района г. Москвы и поступил на астрономическое отделение механико-математического факультета МГУ.

В 1955 году Эдвард Владимирович получил диплом с отличием МГУ и поступил в аспирантуру МГУ к Иосифу Самуиловичу Шкловскому. 29 января 1959 г. он защитил диссертацию «Модель солнечной хромосферы по внезатменным наблюдениям». Многие выпускники 1955-го года впоследствии стали известными астрономами: В.А. Брумберг, ЮИ. Гальперин, Л.М. Гиндилис, Н.С. Кардашев, В.Г. Курт, Т.В. Казачевская, Ю.Н. Парийский, Н.С. Соболева, Н.Н. Шефов и др.

15 октября 1958 г. Эдвард Владимирович был зачислен на должность младшего научного сотрудника Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ). С октября 1961 г. он стал работать ассистентом, с июля 1964 г. – и.о. доцента, с марта 1966 г. – доцентом на кафедре астрофизики астрономического отделения физического факультета МГУ. С тех

пор его педагогическая и научная деятельность была неразрывно связана с астрономическим отделением физфака МГУ и с ГАИШ МГУ.

В центре научных интересов Эдварда Владимировича всегда была физика Солнца. Широчайший кругозор и эрудированность позволяли ему охватывать многие направления физики Солнца: активные процессы в фотосфере, хромосфере и короне, магнитные поля, их связь с цикличностью солнечной активности и, как следствие этого, связь с солнечной активностью метеорологических и геомагнитных процессов на Земле. В последние годы основное направление исследований Эдварда Владимировича было связано с изучением солнечно-земных связей.

Эдвард Владимирович неоднократно говорил своим ученикам, что в основе науки должен лежать эксперимент, причем, желательно, ваш личный.

Э.В. Кононович участвовал почти во всех экспедициях ГАИШ по наблюдению полных солнечных затмений, занимаясь изучением верхних слоев солнечной атмосферы. Еще студентом в 1954 г. Эдвард Владимирович «влип», по определению А.Б. Делоне, в наблюдения солнечных затмений. В 1961 г. он был уже начальником экспедиции ГАИШ в Ростове-на-Дону. Затем был атолл Мануае в 1965 г., Мексика в 1970 г... Последним полным солнечным затмением, в наблюдении которого он активно участвовал, было затмение 29 марта 2006 г. Эдвард Владимирович курировал научные аспекты наблюдений этого затмения на территории Турции.

Неутомимость и жизненная энергия позволяли ему активно заниматься экспедиционными инструментами, что представляет особую сложность, сравнимую разве что с космическими технологиями. Его уникальные способности экспериментатора проявились еще в студенческие годы при разработке и реализации микрофотометра интенсивностей. Позднее были созданы узкополосные фильтры на основе интерферометров Фабри–Перо, экспедиционный солнечный телескоп, эшельный спектрограф и другие оригинальные установки, проведены инструментальные разработки, связанные с проблемой качества изображения для наземных наблюдений.

Неистощимая энергия Эдварда Владимировича позволяла ему работать в редколлегии Астрономического циркуляра, быть членом Ученого совета МГУ, участвовать в строительстве новых инструментов и солнечных наблюдениях на большинстве обсерваторий СССР и СНГ. В 1980-е годы по его инициативе на Тянь-Шаньской высокогорной экспедиции (ТШВЭ) ГАИШ под г. Алма-Атой был установлен 50-см горизонтальный солнечный телескоп фирмы Цейсс (HSFA), принадлежащий Астрономическому институту Академии наук Чехии. ТШВЭ – единственное место, где были установлены крупные солнечные инструменты ГАИШ. Очень много сил и энергии было отдано обустройству, монтажу, проведению первых пробных наблюдений. Эдвард Владимирович руководил наблюдениями по программе «Солнечный патруль». Развал Союза прервал эти работы.

В 1991 году была организована Краснопресненская лаборатория, где исследовались в основном вопросы гелиосейсмологии, которые в течение последних десяти лет признаны приоритетными в физике Солнца. Инициатором создания этой лаборатории, а с1998 по 2011 гг. фактическим ее руководителем был Эдвард Владимирович.

Эдвард Владимирович внес весомый вклад в общую методику астрономического преподавания в ВУЗах. Он предложил и довел до совершенства уникальный в современной истории вводный курс для студентов астрономических специальностей и на протяжении десятилетий являлся бессменным лектором, открывающим двери первокурсникам в мир современной науки. Много лет он читал курс общей астрономии для первокурсников, спецкурс «Физика Солнца» для старшекурсников. Он также предложил и несколько раз перерабатывал в соответствии с новыми требованиями уникальный для своего времени практикум по компьютерному моделированию для астрофизиков старших курсов, посвященный строению и эволюции звезд. Учебник по общей астрономии, «Курс общей астрономии» для студентов-астрономов, написанный им в соавторстве с П.И. Бакулиным и В.И. Морозом, выдержал семь изданий, как рекомендованное учебное пособие для студентов астрономических специальностей. Этот курс переведен на многие языки, на нем выросло не одно поколение астрономов у нас и за рубежом.

Переработанный вариант учебника получил широкое международное признание, вошел в золотой фонд изданных к юбилею МГУ учебников «Классический университетский учебник», переведен на несколько языков и издан за рубежом.

Эдвард Владимирович умел радоваться и гордиться успехами своих учеников, которые с теплотой вспоминают своего Учителя, требовательного, очень ответственного, бережно и деликатно взращивающего любые проблески таланта и инициативы в учениках.

Эдварда Владимировича считают своим учителем множество современных астрономов. Его ученики сейчас работают по всему бывшему Союзу. Профессор Ш.А. Эгамбердиев является директором Астрономического института им. Улугбека Академии наук Узбекистана. Р.Т. Сотникова преподает в Иркутском государственном Университете, М.Н. Храмова – в МГИМО. С.В. Аюков, В.А. Батурин, А.Б. Горшков, И.В. Миронова, И.Ф. Никулин, Т.В. Матвейчук, Г.В. Якунина и др. работали или продолжают работать в ГАИШ МГУ. Под его руководством защищены 10 диссертаций на соискание степени кандидата физико-математических наук.

Эдвард Владимирович был замечательным популяризатором астрономии. И не только выпускники ГАИШ могут считаться учениками Э.В. Кононовича. Не только сотрудники, студенты и аспиранты помнят его лекции в планетарии, выступления по телевидению, мультимидийный диск «Жизнь Земли в атмосфере Солнца». Он известен как автор или соавтор прекрасных книг по астрономии и физике Солнца: уже упоминавшегося «Курса общей астрономии» в соавторстве с П.И. Бакулиным и В.И. Морозом, современных учебников по астрономии для средней школы «Астрономия» и «Астрономия 11» в соавторстве с А.В. Засовым, книги «Физика–астрономия–окружающая среда» в соавторстве с А.А Фадеевой, Д.Ф Киселевой, А.В Засовым, серии книг по линии общества «Знание»: «Солнце – наша дневная звезда» и других. Прекрасное знание нескольких иностранных языков способствовало тому, что под его редакцией были изданы переводы многих книг зарубежных авторов по физике Солнца: «Строение и эволюция звезд», М. Шварцшильда, «Спокойное Солнце» Э. Гибсона, «Солнечная атмосфера» Г. Зирина и др. И каждый, в ком книги Эдварда Владимирович пробудили интерес к астрономии, может, вероятно, в какой-то степени считать себя его учеником.

Много сил Эдвард Владимирович отдал борьбе за сохранение курса Астрономии в школе, работал в постоянной комиссии по астрономии при министерстве просвещения СССР. Эдвард Владимирович являлся председателем Московского отделения Астрономо-Геодезического общества. Он отдал много сил сохранению исторического помещения МО АГО для популяризации современной науки среди энтузиастов астрономии.

Являясь членом Международного Астрономического Союза (МАС), в 1973–1976 гг. Эдвард Владимирович был вице-президентом Комиссии по астрономическому образованию, в 1976–1979 гг. – ее президентом, до 2015 г. – членом этой комиссии. Он был также членом Комиссии 12 «Излучение и структура Солнца», Отделения С (Education, Outreach and Heritage) МАС.

Преподавательская, научная и популяризаторская деятельность Эдварда Владимировича была отмечена Знаком ветерана труда, присвоением ему в 1999 г. звания Заслуженного преподавателя МГУ, памятным знаком МГУ им. М.В. Ломоносова, медалями ВДНХ и медалью в память 850-летия Москвы, почетными грамотами и другими наградами.

Знавшие Эдварда Владимировича коллеги по праву называли его «аристократом духа» и «романтиком науки».

От матери, Тамары Сергеевны, Эдвард Владимирович унаследовал любовь к классической музыке, часто посещал консерваторию, любил при встречах музицировать со своим чешским коллегой Петром Хайнцелем, который играл на скрипке.

Когда в 1992 г. «Астрономическое общество» решило создать свой научно-популярный альманах, Эдвард Владимирович согласился возглавить эту работу. И именно он дал новому изданию название «Вселенная и Мы». Человек высочайшей культуры, Эдвард Владимирович глубоко чувствовал и осознавал глубинную связь всех способов познания человеком мира, в котором он живет – через поэзию, музыку, живопись, науку… *«Мы и Космос. Космос и Мы. Или Космос без Нас? Нет, в Нашем Космосе Мы – суть. Значит, Космос в Нас, и потому Мы в Космосе. Всегда ли это было? А как долго еще будет?»* – писал он в предисловии к первому номеру альманаха. – *«Многие из Вас в душе – почитатели или любители астрономии. История и астрономия – единственные науки, удостоенные внимания муз. А у муз всегда есть поклонники. Но любители астрономии – не просто праздные воздыхатели музы астрономии – Урании. Это – вдохновенные творцы. В большинстве случаев от профессионалов они отличаются лишь тем, что хлеб свой насущный зарабатывают на ниве другой специальности, а занимаются астрономией для души…»*.

И позднее, в предисловии к четвертому выпуску: *«Каков бы ни был характер нашего творческого контакта с окружающим миром, его цель всегда познать его природу. Можно надеяться, что каждый раз при этом мы делаем пусть крохотный, но все же шаг вперед по пути этого познания»*.

Исключительно благодаря энтузиазму Эдварда Владимировича вышли первые четыре номера альманаха.

Светлая память об Эдварде Владимировиче, красивом и благородном, умном и дружелюбном человеке, по определению его французского коллеги Жана-Клода Виала, необыкновенном Учителе, известном ученом, замечательном популяризаторе астрономии, о его преданности астрономии навсегда останутся у родных и близких, друзей и коллег.

Мы надеемся, что и возобновление издания созданного им альманаха станет своеобразной данью памяти этого замечательного человека.

Мы признательны детям Эдварда Владимировича (Петру, Владимиру и Екатерине) и Ольге Борисовне Смирновой, а также Лилии Константиновне Ковалевой (Отдел кадров физфака МГУ) и Татьяне Викторовне Матвейчук (Отдел кадров ГАИШ МГУ) за предоставление биографических данных.

С.В. Аюков, В.В. Батурин, А.Б. Горшков, И.С. Ким, И.В. Миронова, В.Л. Штаерман

Астрономия из первых рук

От редактора. Публикуемая статья содержит разделы, которые могут оказаться несколько трудны для читателя, недостаточно знакомого с высшей математикой. Тем не менее, мы советуем хотя бы просмотреть их, чтобы, во-первых, сохранить полноту восприятия, и, во-вторых, оценить усилия, которые прилагают специалисты, развивающие эту столь важную для современной астрономии и космонавтики отрасль науки о небе.

ЗАМЕТКИ О РАЗВИТИИ АСТРОНОМИИ

Борис Петрович Кондратьев

доктор физико-математических наук, профессор,Кафедра небесной механики, астрометрии и гравиметрии,отделения астрономии физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Если исследователь хочет вникнуть в захватывающе интересный процесс рождения научной истины и понять, как на этом пути древние мыслители преодолевали трудности и заблуждения, то лучше всего обратиться к тому отрезку истории науки, который начинается с астрономии древних греков. Вся настоящая наука пропитана вдохновением эллинов, которые научили нас искать элементы красоты в окружающем Мире. Именно поэтому мы обращаем особое внимание на античную науку. Корни её уходят в древний Вавилон и Египет. Прослеживая генезис понятий в астрономии, мы убеждаемся в существовании одного важного правила: в истории науки понятие о гармонии и красоте не является чем-то застывшим, оно развивается и обновляется в процессе познания окружающего Мира. На смену наивным упованиям древних греков на равномерное движение планет по идеальным кругам, спустя почти двадцать веков приходят эллипсы Кеплера. Казалось бы, эти эллипсы нарушают все представления о гармонии во Вселенной, но в действительности с их приходом открывается новый уровень гармонии, превосходящий прежний. А под вуалью эллипсов скрывается структура КАМ-торов… В итоге мы начинаем лучше понимать настоящую Вселенную.

Во второй части работы рассматривается становление и развитие теории потенциала, играющей важную роль в современной физике и небесной механике. В третьей части дан эскиз современной небесной механики.

«Пусть никто, не знающий геометрии, не входит сюда», – начертал Платон на дверях своей Академии. Казалось бы, потомкам дан совершенно явный девиз, и недаром через много веков его воспроизвел Коперник в качестве эпиграфа к своему великому труду «Об обращении небесных сфер». Но вопросы взаимоотношения математики с естественными науками и, в частности, астрономией на самом деле не столь просты, как кажутся с первого взгляда. Посвящая данную заметку подобным вопросам, мы заранее приносим извинение за отрывочность и некоторую неизбежную субъективность высказываний.

1. Становление науки

Ныне астрономия является существенной частью точного естествознания. Интересно проследить историю этой науки и развитие некоторых её идей. Здесь мы ограничимся той областью знания, которой Лаплас дал гордое название «небесная механика».

Начать придется издалека. История астрономии, как и математики, совпадает с развитием человеческого общества и с появлением искусства счета. Никаких систематических знаний по физике и химии в те далекие времена ещё не было. Астрономия стала первой наукой и тем пробным камнем для ума человека, где неуспех был равносилен поражению в гонке на выживание. Как и нас, наших предков вдохновляла бездонная глубина звездного неба, а инстинкт подсказывал, что жизнь на Земле полностью зависит от Солнца и Космоса. Но эмоций, пусть и возвышенных, ещё не достаточно для становления и развития науки. Главной причиной раннего появления астрономии явилось то, что она помогала людям выжить. Звездное небо стало надежным ориентиром для человека на суше и на воде, а слежение за регулярным движением светил открывало возможность подстраивать (вначале – на бессознательном уровне!) свои ритмы под ритмы окружающей Природы. Созерцание неба с его периодической повторяемостью и дало (скорее, внушило!?) людям понятие о существовании естественных законов, управляющих Миром.

Характерно, что интерес к небу стимулировал развитие самой математики[1]. У древних греков геометрия достигла высокого совершенства, и неудивительно, что именно геометрические методы они применили для изучения небесных явлений. А объяснять было что! В течение тысячелетий наблюдались движения Солнца, Луны и планет среди кажущихся неподвижными звезд. Ещё в древнем Вавилоне знали Сарос (18.03 тропич. года) и эмпирическим способом научились точно предсказывать такие грандиозные космические события, как солнечные и лунные затмения.

Вместе с тем, быстрым развитие астрономии в ту эпоху отнюдь не являлось. Только в IV столетии до н. э. греки стали различать отдельные планеты в их движении по эклиптике. К этому времени в Греции уже сложилось развитое общество с высокой степенью гражданских свобод, возникли и расцвели десятки философских школ, однако по популярности астрономия уступала литературе и искусству.

Одной из причин её отставания было отсутствие тайны на небе, той тайны, которая брала бы за живое. И неудивительно, брошенная Природой перчатка – вот настоящий стимул развития науки! Толчок развитию астрономии дало одно обстоятельство. Внимательно изучая небо, древние мудрецы с удивлением осознали, что планеты на фоне звезд описывают какие-то странные петли. Странные, потому что они никак не укладывались в тогдашние представления эллинов! Геометры по складу

[1] Позднее, фактически из нужд небесной механики, возникло и исчисление бесконечно малых, после чего математика получила быстрое развитие.

ума, греки были влюблены в круг и шар и полагали, что любые движения в Космосе могут происходить только равномерно и только по кругам. Но как тогда совместить небесные петли, когда планеты вдруг останавливаются и начинают испуганно пятиться с востока на запад, с тем божественно вечным движением, которое присуще идеальным кругам? И попав в небесные силки, мысль греков трепетно забилась. Именно в загадке существования петель на небе греки почувствовали дерзкий вызов своему интеллекту. Вызов был принят – и в этом величие греков, – и важную роль в этом сыграл общий настрой в древней Элладе, где процветал культ «агона» (борьбы).

Объяснить парадокс существования петель стало для греков делом чести. Но как выбраться из расставленных природой силков? На помощь пришла математика. Евдокс первым пошел в нужном направлении. Для шести небесных тел он разработал систему из 27 (!) небесных сфер (Земля в центре). Механизм Евдокса обладал сложной кинематикой: вращение сфер было взаимосвязанным, а их оси вращения могли и не совпадать. Калипп довел число сфер до 34, а Аристотель – вот она, рука настоящего философа – превратил эти сферы в хрустальные. Позднее Аполлоний (первый из греков, изучивший конические сечения) осознал, что хрусталь – это уж слишком..., и предложил для нужд астрономии схему из простых кругов. Но сделал он это столь искусно – то была идея деферентов и эпициклов, что дело пошло. Нанизывая один эпицикл на другой (у Клавдия Птолемея их насчитывалось уже многие десятки!), греки смогли достичь приличного согласия теории и наблюдений.

С «высоты» современной науки легко бросить скептический взгляд на эпициклы. Мол, слишком запутанная кинематика, да и появились эти эпициклы как вследствие неудачного выбора начала системы отсчета и «прискорбной» ограниченности геоцентрического мировоззрения древних. Суров суд истории! Но вспомним: и Коперник в Гелиоцентрической системе Мира не смог полностью отказался от эпициклов. В математическом же отношении кинематическая теория эпициклов оказалась эквивалентной разложению координат планет в ряды Фурье (достижение французских математиков девятнадцатого века). И ещё. Даже современная теория движения планет, опирающаяся на суперкомпьютеры, испытывает огромные трудности в предсказании далекого будущего (на временах порядка миллиардов лет) нашей Солнечной системы. Причина этого – в нелинейности основных уравнений в небесной механике. Как следствие этой нелинейности, в современной небесной механике появились новые фундаментальные проблемы хаоса и резонансов. Так вот, этих «болячек» кинематика эпициклов (ведь для компьютера большое число эпициклов не преграда) не знает! Да и мерить углы между светилами – одно удовольствие, не надо вводить сложное понятие координатной системы.

Но вернёмся к эллинам. Поселившись (в мифах) на небесах, древние непостижимым образом поселили небеса в себе. Парадоксально, но именно серьезное отношение к небу создало и питало у них идеалистические настроения. Древние народы многого не понимали в окружающем мире и верили, что всё подвластно божественным силам, искали их покровительства и защиты. Но одно дело – повесить на шею маленький талисман, и совсем другое – выискивать (и, главное, находить!) знаки неумолимой судьбы в хитросплетениях траекторий светил на небе. Пусть отдыхает Малый Театр со знаменитой немой сценой в «Ревизоре», но для любого здравомыслящего астронома и физика такой выверт астрологов – удар ниже пояса. Таким приватным способом «нестандартно мыслящие ученые» (такие были всегда) решили раз и навсегда покончить со злободневной во все времена проблемой вопиющего разрыва между наукой и практикой бренной жизни. Так возникла астрология, поначалу представлявшая спасительный мостик в зазоре между наукой и практикой. Но с треском, ещё при Кеплере, лопнул надутый астрологами мыльный пузырь, и астрология выродилась в брызги псевдо-глубоких словесных манипуляций и пустых обещаний. Но – будем справедливы – и поныне астрологи сохранили верность своему истинному призванию - бескорыстный интерес к неустанному (24 часа в сутки) поиску «клиентов», которые могут ручку «позолотить».

Астрономия, как настоящая наука, не отвечает, конечно, на все вопросы, но зато помогает понять бессмысленность астрологии. К чести древних, и среди них далеко не все верили астрологам. Анаксагор, например, не только не поддержал «ценный почин» астрологов, но и с убийственной для них прямотой ученого утверждал, что Солнце – это просто раскаленный добела камень (по размерам не больше полуострова Пелопоннес!), и что Луна состоит отнюдь не из неведомого простым смертным «роговитого вещества» (современный вариант – из зеленого сыра, читайте «Записки сумасшедшего» Гоголя), а из того же вещества что и Земля. Эти рассуждения Анаксагора о Гелиосе и Селене подверглись гневному осуждению (измерять богов – это кощунство!) «продвинутых» граждан Эллады.

[1] Позднее, фактически из нужд небесной механики, возникло и исчисление бесконечно малых, после чего математика получила быстрое развитие.

2. От Коперника до Ньютона

Переход к гелиоцентризму открыл новые перспективы в астрономии. Квинтэссенция теории Коперника заключалась в выводе соотношения между синодическим (S) и сидерическим (T) периодами движения планет:

$$T = \frac{T_{\oplus} S}{S \pm T_{\oplus}}.$$

Но в математическом отношении эта теория оставалась пока на уровне древних греков. Та же идеализация круговых движений, приправленных кое-где эпициклами. Только Кеплер окончательно отверг пресловутые эпициклы и скрепил гелиоцентрическую систему мира установлением трех вполне точных (если пренебречь взаимными возмущениями тел) законов движения планет вокруг Солнца.

Впотьмах, в неразберихе реформаторской эпохи, в отблесках костров инквизиции пробирался на слабый свет истины неутомимый Кеплер. Сверхновая 1604 г. озарила его жизненный путь, и Кеплер выбрал достойную цель (судьба даровала ему бесценные наблюдения Тихо Браге): «либо движение этой планеты (Марса) поможет нам проникнуть в тайны астрономии, либо мы навсегда останемся невеждами в ней». Как новый сотрудник Тихо, начал он с тех же замысловатых узоров из эпициклов и деферентов, которые рисовали до него и другие. Но Марс упрямился, его отклонение от предвычисленного положения на небе достигало 5–6°. (И Коперник, и Кеплер в своей работе широко опирались на геометрические разработки Птолемея; в научной биографии Кеплера этот факт малоизвестен.) И только затратив немало сил, автор «Новой астрономии», *бесконечно веря в гармонию Вселенной,* сумел взглянуть на орбиты планет под таким – истинно кеплеровским! – углом зрения, под которым идеальные круги их орбит неожиданно превратились в реальные эллипсы! И хотя орбита Марса отличается от круга очень мало, а выявить крохотную неравномерность неторопливого бега по ней свирепого бородатого «бога войны» было и вовсе нелегко, трон Солнца по воле Кеплера послушно переместился в точку фокуса. Вот эти законы «от Кеплера»:

1. *Планеты движутся строго по эллиптическим траекториям, в одном из фокусов которого находится Солнце* $r = \frac{p}{1 + e\cos\upsilon}$;
2. *Радиус-вектор, соединяющий Солнце с планетой, заметает за равные промежутки времени равные площади;*
3. *Отношение* $\frac{a^3}{T^2}$ *постоянно для всех планетных орбит*.

А пылкое воображение, в сочетании с острым критическим умом, вело Кеплера дальше. Земля и Огненный Солнечный шар наделены движущей *душой,* и чем ближе они друг к другу, тем сильнее связь между их душами. От Солнца исходит исполинская сила (вслед за Уильямом Гильбертом немецкий учёный полагал, что эта сила магнитная, но иногда грезил и о гравитации по закону обратных расстояний), которая и удерживает планеты на эллиптических орбитах. Назревал прорыв в знаниях.

Всходила заря новой, *динамической* астрономии. В эфире (а что такое эфир в те века, как не слияние сознания с бесконечным Космосом!) уже витала идея закона всемирного тяготения. Вне объяснения остались только средние радиусы планетных орбит, и это беспокоило Кеплера, который пытался связать между собой эти радиусы, вписывая друг в друга правильные многогранники (пять Платоновых тел!).

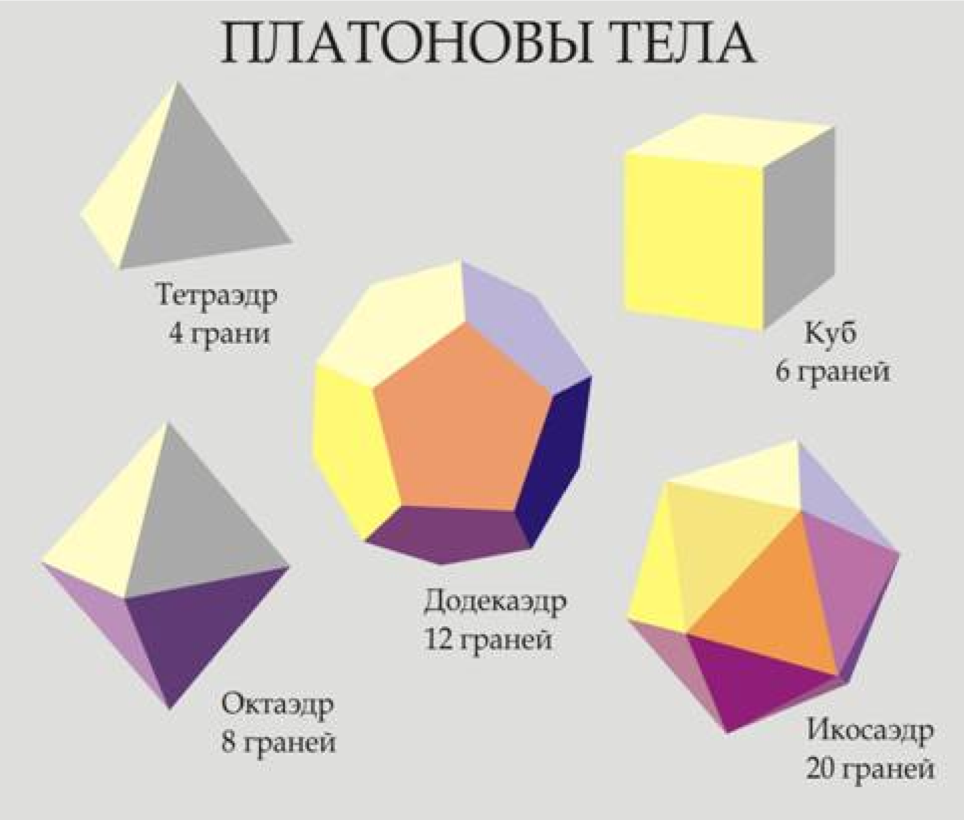


Рис. 1. Платоновы тела

Судьба этой оригинальной программы (Кеплер очень ею гордился) известна: она быстро пришла в противоречие с реальными наблюдениями и была забыта. Тем не менее, блестки теоретического мышления, столь характерные ныне для фундаментальной науки о микромире, у Кеплера видны очень ярко. А отзвуки этой астрономической программы слышны даже в труде Кеплера о форме очаровательных снежинок!

Гордый дух и прозорливость Джордано Бруно искали и нашли выход за пределами Солнечной системы. Придав далеким звездам статус раскаленных Солнц, окруженных свитами планет, в мировоззренческом плане он пошел дальше Коперника. Через четыре века открытие экзопланет подтвердило его гениальную догадку! Ныне тема экзопланет – в центре внимания астрономов.

Галилей, открывший фундаментальный закон инерции и много сделавший для защиты теории Коперника, был настроен более прагматично. Реалист и первооткрыватель экспериментального метода в физике, он, однако, не понял и не оценил открытия Кеплера (напрочь отмел его эллипсы, а заодно и влияние Луны на земные приливы).

Научная революция, начатая Коперником, была завершена Ньютоном (подчеркнём и влияние Декарта). Именно у Ньютона идущая от древних греков тенденция к унификации наблюдаемых черт движения тел солнечной системы получила блестящее завершение благодаря открытию закона Всемирного тяготения и развитию небесной механики.

3. На пути к динамике небесных тел

Понятие силы имеет первичный и в значительной мере — интуитивный характер[2]. У древних греков, при всей удивительной ясности их мышления, нет большей путаницы, чем в описании сил Природы. Не случайно Галилей впоследствии подверг полной ревизии учение Аристотеля о динамике.

В те далёкие времена несовершенство знаний не позволило Птолемею, а в эпоху Возрождения и самому Копернику[3], ввести силы для объяснения движения небесных светил. До Кеплера в астрономической картине мира все (со ссылкой на авторитет древних) уповали на равномерное движение по кругам в идеально совершенном божественном Космосе[4]. Но даже формальная замена кругов эллипсами в кинематической картине геоцентризма фактически мало бы что изменила (ведь

---

[2] Дать точное определение силы нелегко. Замечательный физик-педагог Р. В. Поль говорит: нет понятия более тёмного и загадочного, чем сила.

[3] Николай Коперник всё же смутно предчувствовал, что Солнце каким-то образом удерживает планеты и не даёт им разбегаться.

[4] Тем самым, Кеплер опроверг ходячую мысль, кредо приспособленцев всякой масти, что если бы геометрические аксиомы задевали интересы людей, они бы опровергались. Против эллипсов был даже Галилей, но Кеплер сумел-таки встать на «любимую мозоль» авторитетного мнения!

понятие *экванта* Птолемей уже ввёл!): только переход к гелиоцентрической картине мира и введение силы, направленной к Солнцу, наполняет эллиптические орбиты новым смыслом.

Но только через поколение Исааку Ньютону блеснула истина, открывшая путь к математическому описанию системы мира: *все, абсолютно все точечные тела притягивают друг друга по закону обратных квадратов.*

Неохотно, под давлением обстоятельств, Ньютон в конце жизни всё же признавал, что «стоял на плечах гигантов». Сейчас-то мы знаем, что без открытия Галилеем закона инерции, Кеплером трёх законов движения планет и настойчивых указаний Гука (обладавшего редкостной интуицией) и Борелли на закон обратных квадратов – не было бы и того самого яблока, наставившего двадцатилетнего, не по летам вдумчивого уроженца Вулсторпа на путь истинный. Однако Ньютон имел право на некоторую скупость в признаниях. До него закон обратных квадратов обсуждался только как эвристическая гипотеза. Но сама по себе эта гипотеза – лишь стрела, а нужны ещё упругая тетива математики и зоркий глаз лучника, чтобы стрела затрепетала в полёте и … идея проникла в сознание людей.

Молва, как водится, слегка исказила то волнующее событие в его жизни. На самом деле всё было наоборот: не яблоко попало в Ньютона, а Ньютон отладил лук и поданной предшественниками стрелой попал в самое «яблочко» проблемы!

Лишь волшебное прикосновение математики могло придать гипотезе $F \sim 1/r^2$ силу подлинного закона Природы[5]. В математическом же искусстве разность научных (читай – ньютоновских!) потенциалов между самим Ньютоном и большинством современников была такой, что вспыхнула вольтова дуга открытий необычайной яркости. Именно ньютоновские «Начала» побудили математиков и астрономов заняться трудными задачами о притяжении тел[6].

Так исподволь, в наблюдениях движения небесных светил и математической их обработке, окрылённая идеей закона всемирного тяготения, берёт своё начало небесная механика. Наблюдения – вот неиссякаемый источник интереса к этой науке.

Развитие науки сродни передаче – не всегда, правда, удачной – эстафетной палочки знаний от одного поколения к другому. Небесная механика развивались неуклонно, и палочка не терялась! Здесь работали кузнецы, ковавшие новую науку. И сейчас, в эпоху компьютеров, многие задачи теории не теряют своей исключительной актуальности.

[2] Дать точное определение силы нелегко. Замечательный физик-педагог Р. В. Поль говорит: нет понятия более тёмного и загадочного, чем сила.

[3] Николай Коперник всё же смутно предчувствовал, что Солнце каким-то образом удерживает планеты и не даёт им разбегаться.

[4] Тем самым, Кеплер опроверг ходячую мысль, кредо приспособленцев всякой масти, что если бы геометрические аксиомы задевали интересы людей, они бы опровергались. Против эллипсов был даже Галилей, но Кеплер сумел-таки встать на «любимую мозоль» авторитетного мнения!

[5] До Ньютона она не была подтверждена научными доводами [1].

[6] Разумеется, и сам Ньютон, а вслед за ним Эйлер, Лагранж и Лаплас сделали шаги вперед лишь в математическом описании гравитации.

4. Элементы классической теории потенциала

4.1. Лагранж и Лаплас, Грин и Гаусс вводят понятие потенциала

С открытием закона всемирного тяготения динамическая астрономия пошла в быстрый рост, но важное понятие *потенциала гравитационных сил* возникло как бы исподволь, незаметно. Ясно лишь, что к началу XIX века почва для семян теории потенциала была основательно подготовлена трудами Эйлера, Лагранжа, Лапласа. **Но где то первое семя**? Им стало введение в 1773 г. Лагранжем понятия *силовой функции,* производная по направлению от которой дает ньютоновскую силу притяжения. В 1782 г. Лаплас выводит для этой силовой функции вне массы знаменитое уравнение

$$\Delta\varphi = 0. \tag{1}$$

Согласно же Тодхантеру [1], понятие *силовой функции* впервые встречается у Лежандра, который, в свою очередь, ссылается на Лапласа.

[5] До Ньютона она не была подтверждена научными доводами [1].

[6] Разумеется, и сам Ньютон, а вслед за ним Эйлер, Лагранж и Лаплас сделали шаги вперед лишь в математическом описании гравитации.

Идея потенциала уже носилась в воздухе, хотя в явном виде термин *потенциал* появился позднее — в трудах Грина (1828) и Гаусса (1840). Любопытно, но даже немецкий ученый Клейн [2] отмечает: «не вполне ясно, откуда Гаусс заимствовал термин *потенциал*». Отметим, что само слово *потенциал* – от латинского *потенция,* т.е. возможность.

По закону обратных квадратов, сила притяжения точечной массы m на пробную точку единичной массы равна

$$F = G\frac{m}{\left|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}'\right|^2}. \qquad (2)$$

Эту силу как вектор удобно записать в виде градиента от функции $\varphi(\boldsymbol{x})$:

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{x}) = grad\varphi. \qquad (3)$$

Функция $\varphi(x)$ и называется *потенциалом.* Размерность потенциала – квадрат скорости.

Потенциал – энергетическая характеристика силового поля, и по смыслу потенциал в данной точке поля численно равен работе по выносу пробного тела единичной массы на бесконечность. В этом и залог универсальности данного понятия; например, сила в направлении вектора $\boldsymbol{s}$ равна просто производной по направлению от $\varphi(\boldsymbol{x})$:

$$F_s = \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{s}}\varphi(\boldsymbol{x}). \qquad (4)$$

Неудивительно, что понятие потенциала сыграло важную роль в открытии и становлении закона сохранения энергии.

В простейшем случае материальной точки потенциал равен

$$\varphi(r) = \frac{mG}{r}, \qquad (5)$$

$r = \left|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}'\right|$ – расстояние до испытуемой точки. Потенциал и силовое поле не изменятся, если под генерирующей его материальной точкой m понимать сферически симметричный гравитирующий шар. В сущности, это и был первый плод на древе теории!

В математической физике появляется теорема Остроградского – Гаусса: поток силы через поверхность S изнутри наружу равен[7]

$$\iint\limits_S F_n dS = \iint\limits_S \frac{\partial\varphi}{\partial\boldsymbol{n}}dS = -4\pi GM, \qquad (6)$$

где M – полная масса внутри поверхности S, а $\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{n}}$ – производная по внешней нормали к поверхности. Из неё, а также известной математической теоремы Грина вытекает, что

$$\iiint\limits_V \left(\Delta\varphi + 4\pi G\rho(\boldsymbol{x})\right)dV = 0. \qquad (7)$$

Отсюда и следует фундаментальное уравнение Пуассона (1813 г.):

$$\Delta\varphi = -4\pi G\rho(\boldsymbol{x}). \qquad (8)$$

Введение понятия потенциала стало ценной находкой, позволившей упростить и упорядочить многие громоздкие расчёты в небесной механике. Потенциал быстро вошёл в употребление и большинство задач в теории притяжения стали формулироваться так: *найти потенциал того или иного тела.*

Но шары и материальные точки – красивая, полезная, но всё же идеализация. На практике требуется знать *потенциал и силовые поля тел более сложной формы.* Здесь-то и начинаются проблемы! В конечном (аналитическом) виде и сейчас мало что известно.

---

[7] Эта теорема была выведена в 1828 г. М.В.Остроградским, причем для любого векторного поля, а в 1840 г. независимо применена К. Гауссом к электрическим зарядам. И есть все основания связывать эту теорему с именами обоих ученых.

Разумеется, есть различные обходные пути. Если конечное выражение потенциала неизвестно, в таких случаях часто используют представление потенциала в виде специальных рядов. Однако разложение потенциала в ряд – приём хотя и полезный, но всё же требующий теоретического осмысления. Например, сразу встаёт вопрос о сходимости этих рядов. Да и в аналитических исследованиях ряды далеко не всегда выручают, и требуется знать потенциал именно в конечном виде.

Правда, есть компьютер, это восьмое чудо Света. С его помощью в современной небесной механике и динамике звёздных систем для расчёта силовых полей в идеализированных (нередко, чересчур) сценариях зачастую прибегают к методу численного моделирования. Страницы многих журналов полны такими работами. Однако повальное увлечение численными расчётами лишает исследователя той глубины обобщения, которая возможна при аналитическом подходе. Сейчас, как и в золотой век небесной механики, любой заинтересованный учёный дорого бы дал за знание потенциалов и гравитационной энергии тел в виде конечных аналитических выражений.

Реалии же таковы, что возможности классической теории потенциала в поиске новых строгих решений оказались весьма ограниченными. Её ресурс, казалось, был исчерпан. Убедимся в этом, продолжая наш экскурс в классику.

[7] Эта теорема была выведена в 1828 г. М.В.Остроградским, причем для любого векторного поля, а в 1840 г. независимо применена К. Гауссом к электрическим зарядам. И есть все основания связывать эту теорему с именами обоих ученых.

4.2. Но потенциал получает название ньютоновского. Потенциал объёмных тел

Рассмотрим трёхмерное тело объёмом V с распределением плотности вещества $\rho(\boldsymbol{x})$. Потенциал такого тела на точку (внешнюю или внутреннюю) $\boldsymbol{x}$ выражается объёмным интегралом

$$\varphi(\boldsymbol{x}) = G\int_V \frac{\rho(\boldsymbol{x}')}{|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}'|}dV', \tag{9}$$

где $\rho(\boldsymbol{x}')$ — плотность, dV' — элемент объёма, а

$$D = |\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}'| = \sqrt{(x_1-x_1')^2+(x_2-x_2')^2+(x_3-x_3')^2} \tag{10}$$

— расстояние от точки интегрирования до испытуемой (пробной) точки. Формула Гаусса

$$\varphi(\boldsymbol{x}) = \frac{G\rho}{2}\oiint \cos\gamma' dS' \tag{11}$$

позволяет представить внутренний и внешний потенциал однородного объёмного тела интегралом по его поверхности. Здесь $\boldsymbol{x}$ – испытуемая точка, γ' – угол между единичной нормалью n к поверхности в (штрихованной) точке интегрирования и ортом отрезка D. Формула (10) применяется, например, при нахождении внутреннего потенциала однородного эллипсоида. Активно использовала её и С. В. Ковалевская при изучении колец Сатурна. Отметим следующее. Формула (10) гласит: потенциал объёмных масс однородного тела равен потенциалу неоднородного простого слоя с поверхностной плотностью

$$\sigma(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{2}\rho D\cos\gamma. \tag{12}$$

Такой поверхностный слой является *эквигравитирующим самому телу, но только в точке на конце отрезка* D. Это — эквигравитируемость «ad hoc»: слой Гаусса «изготавливается» для единственной пробной точки. Более общая теория, где изучаются гораздо более универсальные эквигравитирующие тела, когда эквигравитируемость имеет место уже *во всех точках внешнего пространства для того или иного тела*, рассматривается в монографии [3].

Следовательно, вне тела потенциал $\varphi(\boldsymbol{x})$ есть гармоническая функция координат, не имеющая в свободном пространстве ни максимума, ни минимума. Своё максимальное значение потенциал может принимать или внутри односвязного сплошного тела, или во внутренних его пустотах (каких конкретно – зависит от топологии фигуры). Минимальное значение (нуль) ньютоновский потенциал принимает на бесконечности.

4.3. Эквипотенциальные поверхности

Двигаясь, не надо совершать работу

Важное значение имеют *поверхности равного потенциала* (или *уровенные поверхности,* их же называют *эквипотенциальными)*

$$\varphi\left(x_1, x_2, x_3\right) = \varphi_0 = const.$$

В каждой точке[8] вектор силы гравитации перпендикулярен к уровенной поверхности (и направлен в сторону возрастания потенциала). Работа перемещения материальной точки по уровенной поверхности равна нулю. Уровенные поверхности данного тела с разными $\varphi_0 = const$ не могут пересекаться и не имеют между собой точек контакта.

На достаточно больших расстояниях от гравитирующего тела любой формы и с произвольной концентрацией вещества, когда значение постоянной φ_0 достаточно мало, эквипотенциальные поверхности целиком находятся вне тела, и чем дальше от него, тем более сферичными являются эти поверхности.

Напротив, с увеличением потенциала, начиная с некоторого его значения φ_0, уровенные поверхности целиком лежат внутри сплошного тела и с возрастанием потенциала всё ближе концентрируются вокруг точки его максимального значения[9].

Для промежуточных же значений φ_0 эквипотенциальные поверхности могут быть расположены частично внутри, а частично – вне притягивающего тела.

В каких случаях семейство эквипотенциальных поверхностей подразделяется на внешние и внутренние по отношению к поверхности тела? К таким телам принадлежат:

1) материальная точка (для которой все поверхности сферические и, разумеется, внешние);

2) однородный цельный шар и шар со сферически симметричным распределением плотности, а также тонкие или толстые сферические оболочки. Внешние эквиповерхности у них – концентрические сферы, сферы расположены и в пространстве, заполненном веществом толстых оболочек, в полостях же всех сферических оболочек эквипотенциально уже всё пространство и силы там равны нулю;

3) элементарный (тонкий) трёхосный эллипсоидальный гомеоид (гомотетическая оболочка). Сферические и сфероидальные гомеоиды – их частные случаи. Во внешнем пространстве уровенные поверхности у гомеоидов представлены семейством софокусных (внешней) границе эллипсоидов. Внутри и на поверхности таких оболочек в любой точке значение потенциала одинаковое и силы там (как и в полостях сферических оболочек) отсутствуют. В данном случае поверхность тела как сепаратриса разделяет два разных семейства поверхностей равного потенциала;

4) слой Робэна (1887), под которым понимается уровенный слой вещества на заранее заданной поверхности. Проблема отыскания такого уровенного слоя в общем случае приводит к решению сложного интегрального уравнения Робэна.

Поверхности равного потенциала дают наглядную пространственную картину силового поля, и там, где такие поверхности расположены более плотно, сила также будет больше. Эквипотенциальные поверхности следует, конечно, отличать от поверхностей одинаковой силы. Вообще говоря, эти поверхности не будут совпадать. Изучение взаимного пространственного расположения тех и других поверхностей часто представляет немалый интерес.

[8] За исключением особых точек, где направление силы притяжения оказывается неопределенным

[9] Заметим: точка максимума потенциала не совпадает, вообще говоря, ни с точкой центра масс, ни с точкой центра инерции тела.

4.4. Ряды Лапласа

Если квадратуры неуловимы

[8] За исключением особых точек, где направление силы притяжения оказывается неопределенным

[9] Заметим: точка максимума потенциала не совпадает, вообще говоря, ни с точкой центра масс, ни с точкой центра инерции тела.

По определению, ньютоновский потенциал $\varphi(\boldsymbol{x})$ гравитирующего тела T в точке $\boldsymbol{r} \equiv \boldsymbol{x}$ даётся интегралом (8). Однако при аналитических и численных расчётах использовать $\varphi(\boldsymbol{x})$ в виде интеграла часто бывает невозможно, главным образом из-за незнания реального распределения плотности вещества в теле. Поэтому для решения многих задач в небесной механике, геофизике и в смежных с ними областях науки ньютоновский потенциал гравитирующих тел представляют рядом по степеням r и по полиномам Лежандра. Для краткости такой ряд часто называют просто *рядом Лапласа.* Здесь мы будем иметь дело, в частности, с важным для приложений случаем, когда однородное гравитирующее тело имеет ось круговой (ротационной) симметрии.

Внешний потенциал осесимметричного тела может быть представлен рядом Лапласа [5]:

$$\varphi_{внешн}(r,\theta) = G\sum_{n=0}^{\infty} D_n r^{-(n+1)} P_n(\cos\theta), \tag{13}$$

где

$$r = \sqrt{x^2+y^2+z^2},\ \cos\theta = \frac{z}{r}, \tag{14}$$

$P_n(\cos\theta)$ — полиномы Лежандра, а коэффициенты D_n

$$D_n = \iiint_T \rho(r',\theta')(r')^n P_n(\cos\theta')\,dV' \tag{15}$$

выражают собой, как известно, мультипольные моменты распределения массы.

Представление *внутреннего потенциала осесимметричного тела* рядом Лапласа имеет вид:

$$\varphi_{внутр}(r,\theta) = G\sum_{n=0}^{\infty} \tilde{D}_n r^{-n} P_n(\cos\theta), \tag{16}$$

причём коэффициенты здесь равны

$$\tilde{D}_n = 2\pi\iint_{\tilde{S}} \tilde{\rho}(r',\theta')(r')^{1-n} P_n(\cos\theta')\sin\theta'\,dr'\,d\theta'. \tag{17}$$

4.5. Ньютоновский потенциал поверхностных распределений массы

Если тело имеет форму тонкого диска или, в более общем случае, представляет собой поверхность $S(x_1,x_2,x_3)$ с распределением плотности $\sigma(x_1,x_2,x_3)$, потенциал выражается интегралом

$$\varphi_{слоя}(\boldsymbol{x}) = G\iint_S \frac{\sigma(x')\,dS'}{D}. \tag{18}$$

где D из (9). Это - *потенциал простого слоя.* Многие его свойства в основном такие же, как и потенциала объёмных тел. Но важно следующее: хотя сам потенциал слоя и остаётся всюду непрерывной функцией координат испытуемой точки, однако нормальная (но не тангенциальная!) составляющая силы притяжения $\frac{\partial\varphi_{слоя}}{\partial\boldsymbol{n}}$ при переходе через слой терпит разрыв

$$\frac{\partial\varphi_{слоя}}{\partial n_1} - \frac{\partial\varphi_{слоя}}{\partial n_2} = -4\pi G\sigma(\boldsymbol{x}), \tag{19}$$

где n_1 и n_2 — нормали к притягивающей поверхности с обеих её сторон. В (19) представлено уравнение Пуассона для простого слоя.

4.6. Потенциал одномерных тел

Проще только материальная точка

Потенциал одномерного тела (прут, тонкое кольцо, завиток произвольной формы) с распределением плотности вещества $\mu(x_1,x_2,x_3)$ определяется интегралом вдоль него

$$\varphi(\boldsymbol{x}) = G\int_L \frac{\mu(x')\,dL'}{D}. \tag{20}$$

Например, потенциал однородного кругового колечка в точке x_3 на оси его симметрии равен

$$\varphi\left(x_3\right) = \frac{MG}{\sqrt{R^2 + x_3^2}} \tag{21}$$

(R — радиус круга).

Ньютоновский потенциал одномерных тел существует в любой точке внешнего пространства, но *в точках самого тела обращается в бесконечность.* Конечно, свойством сингулярности обладает и потенциал *отдельной материальной точки* (4). Но если к сингулярному поведению потенциала точки мы давно привыкли, то интересно понять, почему то же самое происходит и с потенциалом при «посадке» испытуемой точки на одномерное тело[10]. Причина, оказывается, в соревновании, которое происходит между коллективными силами, с одной стороны, и силой гравитации отдельной материальной точки с её стремлением к сингулярному поведению – с другой. Когда тело объёмно, то в окрестности точки касания находится много других материальных точек, которые в сумме подавляют эффект сингулярности отдельной материальной точки. Размывание индивидуального вклада точки, хотя и в более слабой степени (окружающих точек уже меньше!), происходит и в случае простого слоя. Если же тело одномерное, точку контакта окружает не так уж много соседних частиц: и чем ближе к пробной частице, тем меньше число соседей, тем слабее влияние коллектива на материальную точку стержня в месте контакта. В итоге коллектив соседних точек не справляется с сингулярностью отдельной частицы в месте контакта с одномерным телом. Одна частица перебарывает смягчающее влияние коллектива – и гравитационный потенциал неограниченно растёт. Кстати, для производных от потенциала ситуация должна быть ещё острее: ведь силы между частицами убывают быстрее, чем потенциалы (обратно квадрату расстояния).

До сих пор речь шла только о ньютоновском потенциале тел. Однако кроме него, в теории и практике часто рассматривают и логарифмические потенциалы.

[10] Действительно, при контакте испытуемой точки с поверхностью объемного или двумерного тела с потенциалом ничего не происходит.

4.7. Логарифмический потенциал

В силе — закон обратных расстояний

Для неограниченных тел потенциал и притяжение не имеют, вообще говоря, определённого смысла. Тем не менее, для *двумерных* цилиндрических тел сила притяжения существует и имеет физический смысл. Однако ньютонов потенциал (9) теперь заменяется логарифмическим потенциалом (22).

Покажем это. Пусть гравитирующий цилиндр с произвольным сечением S имеет длину $2H$ вдоль оси симметрии Ox_1, причём H значительно больше размеров сечения. Тогда потенциал (8) можно записать в виде

$$\varphi\left(x_2, x_3\right) = 2G\iint\limits_S \rho\left(\boldsymbol{x}'\right)\ln\frac{2H}{D}\,dx_2'dx'. \tag{22}$$

Здесь

$$D = \sqrt{\left(x_2 - x_2'\right)^2 + \left(x_3 - x_3'\right)^2} \tag{23}$$

– расстояние между пробной точкой и точкой интегрирования. Наличие логарифма под интегралом в (22) и определяет само название «логарифмический потенциал». Физически логарифм означает здесь, что ньютоновский закон обратных квадратов между материальными точками заменяется для двух материальных линий законом обратных расстояний.

Однако в итоговой формуле для потенциала некоторых конкретных двумерных цилиндрических тел логарифмы при объединении вкладов всех материальных линий формально исчезают[11]. Таков,

[10] Действительно, при контакте испытуемой точки с поверхностью объемного или двумерного тела с потенциалом ничего не происходит.
[11] Остается, однако, логарифмическая расходимость.

например, внутренний потенциал однородного эллиптического цилиндра с полуосями сечения a_2 и a_3:

$$\varphi_{\text{внутр}}(x_2, x_3) = \pi G\rho\left(I - A_2 x_2^2 - A_3 x_3^2\right), \tag{24}$$

где $I \to \infty$ (расходимость логарифмическая). Здесь коэффициенты

$$A_2 = \frac{2a_3}{a_2 + a_3},\ A_3 = \frac{2a_2}{a_2 + a_3}. \tag{25}$$

Ранее для эллиптического цилиндра был известен только один – *косвенный* (в асимптотическом пределе из потенциала однородного эллипсоида (28) или (31)) способ вывода выражения (24). В книге [3] разработан новый – *прямой* метод нахождения внутреннего и внешнего потенциала однородного эллиптического цилиндра, в котором мы непосредственно опираемся на исходную формулу (22).

[11] Остается, однако, логарифмическая расходимость.

4.8. Потенциалы однородных эллипсоидов, сфероидов и шаров

Плацдарм классической теории

Гравитирующий эллипсоид как объект исследования был известен ещё Ньютону. Проблема оказалась крепким орешком, и её решение стало заметной вехой в развитии математической физики XVIII — XIX столетий. Многие выдающиеся математики внесли свою лепту в исследование притяжения эллипсоидов. Исторически первыми основательно были изучены однородные эллипсоиды. На них оттачивалось мастерство Маклорена (1742), Лежандра (1785), Айвори (1809), Гаусса (1813), Родрига (1815), Дирихле (1839), см. [4].

Для *однородного шара* потенциалы просты:

$$\varphi_{\text{внутр}}(r) = \frac{2}{3}\pi G\rho\left(3R^2 - r^2\right),\ \left(r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}\right); \tag{26}$$

$$\varphi_{\text{внешн}}(r) = \frac{MG}{r}. \tag{27}$$

Внутренний потенциал однородного эллипсоида с плотностью ρ и полуосями a_1, a_2, a_3 есть квадратичная функция координат пробной точки x_i:

$$\varphi_{\text{внутр}}(\boldsymbol{x}) = \pi G\rho\left(I - A_1 x_1^2 - A_2 x_2^2 - A_3 x_3^2\right), \tag{28}$$

где коэффициенты

$$A_i = a_1 a_2 a_3 \int_0^\infty \frac{du}{\left(a_i^2 + u\right)\Delta(u)} \tag{29}$$

и величина нормированного потенциала в центре эллипсоида

$$I = a_1 a_2 a_3 \int_0^\infty \frac{du}{\Delta(u)} \tag{30}$$

выражаются в общем случае через стандартные неполные эллиптические интегралы. Здесь и ниже

$$\Delta(u) = \sqrt{\left(a_1^2 + u\right)\left(a_2^2 + u\right)\left(a_3^2 + u\right)}. \tag{31}$$

Внешний потенциал однородного эллипсоида уже не является квадратичной функцией координат пробной точки x_i:

$$\varphi_{\text{внешн}}(\boldsymbol{x}) = \pi G\rho \int_{\lambda}^{\infty} \frac{du}{\Delta(u)} \left(1 - \frac{x_1^2}{a_1^2+u} - \frac{x_2^2}{a_2^2+u} - \frac{x_3^2}{a_3^2+u}\right), \tag{32}$$

где $\lambda-$ эллипсоидальная координата испытуемой точки; эта λ есть положительный (т.е. наибольший) корень кубического уравнения

$$\frac{x_1^2}{a_1^2+\lambda} + \frac{x_2^2}{a_2^2+\lambda} + \frac{x_3^2}{a_3^2+\lambda} = 1. \tag{33}$$

4.9. Слоисто-неоднородные эллипсоиды с гомотетическими слоями

Мостик к реальности

Выше говорилось только об однородных эллипсоидах. Но для прикладных целей необходимо исследовать и неоднородные эллипсоиды. Однако однородный эллипсоид один, а неоднородных, различающихся степенью концентрации вещества – много. Мы остановимся здесь на самом, пожалуй, важном для астрофизических приложений типе неоднородного эллипсоида, вещество которого стратифицировано и плотность, постоянная на отдельных эллипсоидальных поверхностях, изменяется только от слоя к слою. Это – *слоисто-неоднородный эллипсоид.* До нас были известны потенциалы только таких слоисто-неоднородных эллипсоидов, где эллипсоидальные слои *гомотетичны,* т. е. подобны друг другу. Закон распределения плотности в них имеет вид $\rho = \rho(m)$, где

$$m^2 = \frac{x_1^2}{a_1^2} + \frac{x_2^2}{a_2^2} + \frac{x_3^2}{a_3^2}. \tag{34}$$

Эллипсоидами из гомотетичных слоёв занимался ещё Пуассон (1837), а в наше время некоторые методические улучшения внёс Чандрасекхар [4].

Внешний потенциал эллипсоида с гомотетическими слоями в пробной точке x_i даётся двойным интегралом

$$\varphi_{\text{внешн}}(\boldsymbol{x}) = \pi G a_1 a_2 a_3 \int_{\lambda}^{\infty} \frac{du}{\Delta(u)} \int_{m^2(u)}^{1} dm^2 \rho(m^2). \tag{35}$$

Здесь λ — эллипсоидальная координата пробной точки $\boldsymbol{x}$ относительно поверхности тела (см. выше уравнение (33)), а

$$m^2(u) = \frac{x_1^2}{a_1^2+u} + \frac{x_2^2}{a_2^2+u} + \frac{x_3^2}{a_3^2+u}. \tag{36}$$

Положив в (32) $\lambda = 0$, получим *внутренний потенциал эллипсоида с гомотетическими слоями* в пробной точке x_i:

$$\varphi_{\text{внутр}}(\boldsymbol{x}) = \pi G a_1 a_2 a_3 \int_{\lambda}^{\infty} \frac{du}{\Delta(u)} \int_{m^2(u)}^{1} \rho(m^2) dm^2. \tag{37}$$

4.10. О теореме Маклорена — Лапласа

Перевоплощаясь — остаюсь самим собой

Эта теорема является красой и гордостью классической теории потенциала

Однородные софокусные эллипсоиды притягивают внешнюю точку с силами, одинаково направленными, а по величине пропорциональными их массам.

Потенциалы двух однородных софокусных эллипсоидов на внешнюю точку относятся как массы этих эллипсоидов [6]

$$\varphi_{\text{внешн}}(\boldsymbol{x}) = \frac{M}{M'} \varphi'_{\text{внешн}}(\boldsymbol{x}). \tag{38}$$

4.11. Гравитационная энергия тел

Расстояния бесконечны — работа конечна

В астрономии для решения многих задач требуется знать гравитационную (потенциальную, она же – ньютоновская, в физике – электростатическая) энергию W тел разной формы. Численно – это работа по полному распылению гравитирующей массы. Но справедливо и обратное: W есть то количество энергии (например, тепловой), которая выделится (как известно, теплоёмкость гравитирующих систем отрицательна!) при конденсации гравитирующей массы из разреженного облака газа или пыли. Именно такие процессы играют важную роль при образовании галактик и звёзд.

В физике также часто требуется знать потенциальную энергию распределения электрических зарядов. Как скаляр, эта величина часто нужна при различных оценках энергии по порядку величины. В тензорном виде гравитационная энергия входит в вириальные уравнения при изучении равновесия и устойчивости тел [4].

По определению, гравитационная энергия тела объёмом T, имеющего распределение плотности $\rho(\boldsymbol{x})$ и потенциал $\varphi_{\text{внутр}}(\boldsymbol{x})$, даётся интегралом

$$W=-\frac{1}{2}\iiint_T \rho(\boldsymbol{x})\varphi(\boldsymbol{x})dV. \qquad (39)$$

В общем случае интеграл здесь шестикратный и не удивительно, что с помощью данной формулы лишь для некоторых тел можно получить результаты в конечном виде. Это, прежде всего, однородный шар с массой M и радиусом R:

$$W_{\text{шара}}=-\frac{3}{5}\frac{M^2G}{R}=-\frac{16}{15}\pi^2G\rho^2R^5, \qquad (40)$$

и однородный трёхосный эллипсоид

$$W_{\text{эл}}(1)=-\frac{3}{10}I(1)\frac{GM_{\text{эл}}^2}{a_1a_2a_3}=-\frac{2}{5}\pi G\rho I(1)M_{\text{эл}}, \qquad (41)$$

где I из (30).

5. Дальнейшие шаги в теории потенциала

Закон обратных квадратов, лежащий в фундаменте динамической астрономии, математически прост (даже элегантен), вместе с тем физически глубок и позволяет довольно легко формулировать много интересных задач в астрономии. Это приятно возбуждает исследователя, однако при решении задач лёгкость почти всегда куда-то испаряется и лопата впустую с визгом скребёт по камню. Лишь изредка Фортуна одарит Вас очаровательной улыбкой, и решение задачи удаётся выразить в конечном аналитическом виде. Увы, почтенная дама свои улыбки так просто не расточает! Трудные задачи теории потенциала далеко не всегда допускают строгие решения.

И тогда исследователь обращается к компьютеру. Но чрезмерное упование на численные расчёты лишает исследователя глубины обобщения, возможной при аналитическом подходе. Сильный перекос в развитии той или иной стороны современного подхода к исследованию Природы невыгоден для развития науки в целом. Запросы практики стимулируют развитие не только методов численного моделирования, но и ясно указывают на необходимость создания новых аналитических методов. С этой точки зрения и следует рассматривать содержание книги [3], где основное внимание уделяется развитию теории. Основное направление в ней — аналитическое.

5.1. Оболочки и слоисто-неоднородные эллипсоиды

Неоднородным эллипсоидам не столь «повезло», как однородным – они привлекли значительно меньше внимания исследователей из-за неопределённости в выборе закона плотности. Важной в этом направлении стала работа Ферререса. В ней решалась задача о потенциале эллипсоида, плотность которого представлена в виде

$$\rho(\boldsymbol{x})=\rho_0\left(\frac{x_1}{a_1}\right)^{\alpha}\left(\frac{x_2}{a_2}\right)^{\beta}\left(\frac{x_3}{a_3}\right)^{\gamma}. \qquad (42)$$

Однако ни сам Ферререс, ни его последователи (среди которых Дайсон, 1891 г. и Раус, 1892 г.) далеко не исчерпали всей проблемы.

Здесь нас будут интересовать неоднородные эллипсоиды с более сложной структурой слоёв, чем гомотетические (см. формулы (35) и (37)). И обобщение для эллипсоидов напрашивается естественное: многие тела в природе с хорошим приближением можно представить состоящими из наложенных друг на друга эллипсоидальных слоёв *с изменяющейся от слоя к слою сплюснутостью.* Ярким примером тел с такой структурой являются эллиптические галактики, а также звёзды, планеты и сгустки плазмы. Таким образом, на практике возникает необходимость изучения потенциалов и других характеристик именно слоисто-неоднородных тел.

Проблема эта трудная, и хотя вклад в потенциал от элементарной гомеоидальной оболочки хорошо известен, в целом слоисто-неоднородные эллипсоиды оставались изученными недостаточно полно. Именно поэтому при расчёте тензора потенциальной энергии для Е-галактик даже известные исследователи допускали ошибки.

Поясним это примером. Изучая эллипсоидальную гравитирующую подсистему, представим её внутренний потенциал суммой двух членов

$$\varphi(\boldsymbol{x}) = \varphi^{I}(\boldsymbol{x}) + \varphi^{II}(\boldsymbol{x}), \qquad (43)$$

где φ^{I} и $\varphi^{II}(\boldsymbol{x})$ – вклады соответственно от самой эллипсоидальной подсистемы и от внешней для неё оболочки. Для вычисления этих членов в книге [3] развит метод стратификации, и результаты получены в весьма компактной форме.

В данной проблеме немало интересного. Впоследствии выяснится, например, что внешний потенциал слоисто-неоднородного эллипсоида, состоящего из *софокусных* друг другу слоёв, не изменится при любой перестановке этих слоёв (и равен потенциалу, создаваемому во внешней точке однородным эллипсоидом той же массы и конгруэнтной поверхностью).

Явные пробелы остались от классиков и в изучении притяжения самих элементарных оболочек. Прежде всего, классики изучали лишь *эллипсоидальный гомеоид* и, едва ли полно, *фокалоид.* Но это – не слишком надёжный фундамент для решения новых серьёзных задач. Даже у гомеоида и фокалоида не были известны геометрические места точек равной толщины, без знания которых нельзя выявить некоторые тонкие свойства и у гравитирующих эллипсоидов. Кроме того, в книге [3] много внимания уделяется изучению свойств и более обширного семейства эллипсоидальных оболочек.

Кроме эллипсоидальных, в книге [3] рассматриваются и оболочки более общего типа: *обобщённые гомеоиды* и *фокалоиды.* Последние лишь в частном (простейшем) случае превращаются в эллипсоидальные оболочки. Подчеркнём, что введение оболочек обобщённого типа связано с общим планом наших исследований. Так, *обобщённые гомеоиды* активно используются при создании нового (третьего) метода нахождения гравитационной энергии тел. Очень интересными свойствами обладает и слой, названный в книге *обобщённым фокалоидом.* Например, именно *обобщённый фокалоид* является эквигравитирующим тому однородному телу, на котором данный слой создан выметанием массы. Обобщённые фокалоиды играют важную роль и при доказательстве свойства экстремальности гравитационной энергии однородного сжатого сфероида.

5.2 Тор

С *круговым тором* мы знакомы на примере бублика, спасательного круга или наполненных воздухом покрышек, на которых в детстве многие купались. Кольцевые и торообразные фигуры часто встречаются в Природе. Кольца есть у планет, звёзд и галактик, кольца – частое явление в гидродинамике и теории электричества. Мощные пылевые торы окружают загадочные активные ядра галактик.

Тор привлекал, конечно, внимание математиков, но астрономы и физики заинтересовались им сравнительно недавно. Уравнение поверхности тора

$$\left(R - R_0\right)^2 + x_3^2 = r_0^2, \qquad (44)$$

где R_0 – радиус осевой окружности, а r_0 – радиус рукава. Задача о пространственном потенциале гравитирующего тора давно назрела, но с математической точки зрения она весьма трудна. Именно поэтому гравитационные свойства тора до сих пор не изучены. Гениальный Риман посвятил притяжению тора одну из своих незаконченных работ, где, к сожалению, не учёл в полном виде граничные условия и не довёл до конца разложение потенциала в ряд Фурье. Тор рассматривается в [3], глава 7.

Прямой подход, использующий общую формулу (9), позволяет найти *потенциал тора* только на оси его симметрии.

Но все попытки найти таким же образом *пространственный* потенциал тора вне оси симметрии приводят к тому жалкому положению, когда перо исследователя упирается в трудно проходимые дебри математических расчётов.

Для достижения цели в [3] был предпринят обходной манёвр. Тор представлен как одномерное многообразие, как «стопка» элементарных широких колец (ещё пример расслоения сплошного тела на слои, только теперь слои плоские!). Потенциал же каждого отдельного кольца нам известен и выражается через полные эллиптические интегралы Лежандра. Интегрируя вклады от широких колец, в итоге и получим искомый *пространственный потенциал однородного кругового тора,* причем в таком виде, когда пробная точка может быть как внутренней по отношению к фигуре тора, так и внешней:

$$\begin{gathered}\frac{\varphi_{тора}(r,x_3)}{2\sqrt{2}G\rho R_0 r_0}=\int\limits_0^{2\pi}\left\{\left[c+2\left(R_1^2-\frac{r^2}{R_0^2}\right)\right]\mathrm{K}(k_1)+\right.\\ \left.+(a-c)\mathrm{E}(k_1)-2\frac{(x_3-r_0\sin\theta)^2}{R_0^2}\Pi[n,k_1]\right\}\frac{\cos\theta d\theta}{\sqrt{a-c}}.\end{gathered}\tag{45}$$

Здесь

$$\begin{gathered}R_1=1+\frac{r_0}{R_0}\cos\theta;\ a=\frac{2\left(r^2+(x_3-r_0\sin\theta)^2\right)}{R_0^2};\ n=\frac{a-b}{2\dfrac{r^2}{R_0^2}};\\ \begin{pmatrix}b\\c\end{pmatrix}=\frac{a}{2}-R_1^2\pm\sqrt{\left(\frac{a}{2}-R_1^2\right)^2+4R_1^2\frac{(x_3-r_0\sin\theta)^2}{R_0^2}},\end{gathered}\tag{46}$$

а модуль

$$k_1=\frac{1-k'}{1+k'}\le 1,\ k'=\sqrt{\frac{(r-R_1)^2+(x_3-r_0\sin\theta)^2}{(r+R_1)^2+(x_3-r_0\sin\theta)^2}}\le 1.\tag{47}$$

Таким образом, потенциал тора дается интегралами от стандартных полных эллиптических интегралов. Подчеркнем – *пробная точка для найденного потенциала тора может быть как внешней, так и внутренней*.

Важным является цикл из трех работ по представлению потенциала тора в виде ряда Лапласа по полиномам Лежандра (см. формулы (13) и (16)), где впервые в конечном виде были найдены коэффициенты этого ряда (см., например, [8] и цитируемую там литературу). Так, для «внутреннего» потенциала тора ряд Лапласа имеет вид

$$\varphi(r,\theta)=D_0+\sum_{m=1}^{\infty}D_{2m}r^{2m}P_{2m}(\cos\theta),\tag{48}$$

и коэффициенты этого ряда D_{2m} выражаются в аналитическом виде через гипергеометрическую функцию Гаусса $F\left(-\frac{1}{2},m+\frac{1}{2};2;k^2\right)$, зависящую от геометрического параметра тора $q=k={r_0}/{R_0}$.

Заслуживает внимания и метод суммирования ряда Лапласа [3] в одном частном случае.

Важным является открытие существования «зазора» [8], в котором потенциал тора нельзя уже представить в виде ряда Лапласа, причем сам зазор имеет пределы

$$\sqrt{R_0^2-r_0^2}\le r\le R_0.\tag{49}$$

Верхний и нижний пределы зазора (49) имеют простой геометрический смысл: это радиус осевой окружности тора и длина отрезка касательной к нему.

5.3. Эквигравитирующие тела

Ещё Ньютон был приятно удивлен возможностью замены внешнего поля гравитирующего шара полем центральной точечной массы[12]. Но шар – лишь частный случай трёхосного эллипсоида, и следующий шаг на этом увлекательном пути делает Маклорен (а также Лаплас): *однородные софокусные эллипсоиды равной массы создают во внешнем пространстве одинаковые гравитационные поля.*

Удивительно, но после столь замечательного начала теория эквигравитирующих тел на протяжении трёх веков фактически не развивалась. Причин тому нам видится несколько. Прежде всего, пионерские результаты Ньютона и Маклорена не были самоцелью, а представляли собой лишь побочный продукт исследований, которые проводились при штурме главной крепости математической физики той эпохи – задачи о потенциале однородного гравитирующего эллипсоида. Эллипсоид, конечно, уникальная фигура. И когда, после поисков, взору учёных открылось то, что его внутренний потенциал выражается чеканной квадратичной формой от координат пробной точки – то свет от этого изумительного открытия на долгое время затмил другие, более скромные результаты. К тому же, с освоением потенциалов однородного эллипсоида список задач, имеющих точное решение, неожиданно оказался почти исчерпанным. Порыв иссяк, пришло время мелких улучшений и поиска новых задач.

Другая причина забвения в том, что, сыграв важную роль при изучении однородного эллипсоида, теорема Маклорена – Лапласа на этом себя и исчерпала. Всему своё время! В той ситуации, чтобы двигаться вперёд, нужен был новый взгляд на проблему эквигравитирующих тел. А он, как мы теперь знаем, подразумевает активное применение функций комплексного переменного. Переход к понятию мнимых масс и мнимых распределений плотности вещества – всё это далеко выходило за рамки исследований того времени.

О практической важности проблемы эквигравитирующих тел говорит то, что в известном цикле работ группы Г. Н. Дубошина (Е. А. Гребеников, В. Г. Дёмин, Е. П. Аксёнов, Ю. А. Рябов) (см., например, [7]) изучалась так называемая обобщённая задача двух неподвижных центров. Ещё Эйлер установил интегрируемость уравнений движения третьего тела в задаче двух неподвижных центров. Так вот, задачу о движении искусственных спутников в гравитационном поле Земли (в некотором, правда, приближении) исследователям этой группы удалось загнать в прокрустово ложе обобщённой задачи двух неподвижных центров, моделируя гравитационное поле нашей планеты двумя точечными *мнимыми* массами. Идея интересная, однако в итоге эта задача всё же не послужила сигналом к активному развитию теории эквигравитирующих тел. Затравкой к этому явились другие результаты.

Задача о стержнях

В предельном варианте из теоремы Маклорена – Лапласа следует: внешнее притяжение вытянутого сфероида не изменится при его софокусном преобразовании в одномерный отрезок длиной $2i\sqrt{a_1^2 - a_3^3}$ с плотностью

$$\mu(\zeta) = \frac{3M}{4\sqrt{a_3^2 - a_1^3}}\left(1 - \frac{\zeta^2}{a_3^2 - a_1^3}\right). \qquad (50)$$

Именно этот стержень, расположенный между точками фокусов, является *эквигравитирущим* вытянутому сфероиду! Взглянем теперь на рис. 2, где изображены сечения трёх однородных тел: вытянутого сфероида ($a_3 > a_1$), шара ($a_3 = a_1$) и сжатого сфероида ($a_3 < a_1$). При переходе от вытянутого сфероида к шару эквигравитирующий стержень вырождается в материальную точку. Что же делается с этой эквигравитирующей материальной точкой при деформации данного шара в *сжатый сфероид?* Ответ парадоксален:

---

[12] Приятно удивлен — деликатно сказано. На самом же деле, утвердиться в законности замены шара точкой будущему автору «Начал» долгие годы никак не удавалось. Как пишет он в письме Хэлли от 20 июня, ещё в 1685 году, то есть менее чем за год до представления «Начал» Королевскому обществу, сам Ньютон продолжал считать *невозможной замену шара точкой.* Вот так! Поворотный к успеху момент – идея рассматривать не шар в целом, а притяжение отдельных сферических оболочек.

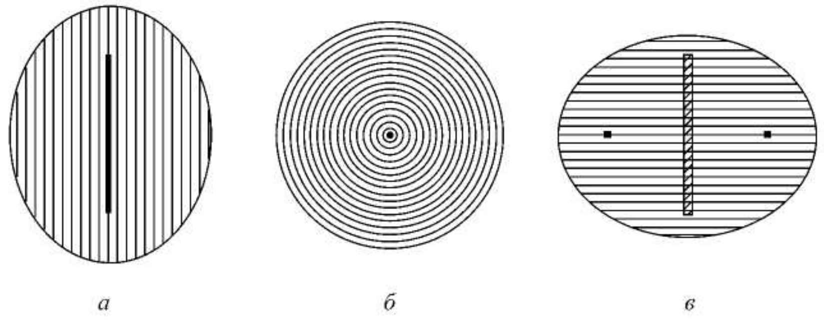


Рис. 2. Представление внешних гравитационных полей: *а* — вытянутого однородного сфероида с помощью неоднородного вещественного стержня; *б* — шара через материальную точку; *в* — однородного сжатого сфероида с помощью неоднородного стержня с чисто мнимым распределением плотности

эта точка преобразуется опять в одномерный стержень, имеющий, однако, *чисто мнимую плотность.* И закон распределения этой мнимой плотности вдоль стержня получается из (50) просто перестановкой местами a_3 и a_1:

$$\mu(\zeta) = \frac{3M}{4i\sqrt{a_1^2 - a_3^3}}\left(1 + \frac{\zeta^2}{a_1^2 - a_3^3}\right). \tag{51}$$

Подчеркнём: данный фокальный одномерный отрезок «длиной» $2i\sqrt{a_3^2 - a_1^3}$ обладает той же полной массой и, что главное, развивает в пространстве то же внешнее гравитационное поле, что и однородный сжатый сфероид!

В монографии [3] установлено следующее: в наборе эквигравитирующих элементов все *осесимметричные тела имеют эквигравитирующие стержни.* Такие стержни (иногда мы будем называть их *заменяющими отрезками)* позволяют не только в сравнительно более простом виде представить внешние поля гравитирующих (или заряженных электричеством) тел, но и открывают новые подходы к задачам о гравитационной энергии осесимметричных конфигураций.

Вопрос заключается в том, как такие стержни отыскивать! Для этого нужны специальные методы, разработке которых и посвящена часть книги [3].

Проблема эквигравитирующих тел развивается у нас в трёх направлениях.

Первое направление связано с разработкой теории эквигравитирующих стержней. *Такие стержни могут иметь как реальные, так и мнимые распределения плотности.* Масса и внешний потенциал стержней с мнимыми плотностями остаются вещественными в силу мнимого характера «длины» самого стержня. При двух особых точках[13] эквигравитирующие стержни являются *цельными,* если же особых точек больше, то стержни могут быть или составные, или образовывать *эквигравитирующие «скелеты».*

Подчеркнём, однако: внешние гравитационные поля некоторых осесимметричных тел не всегда удаётся представить одними только стержнями. И тогда на помощь стержням приходят *изолированные материальные точки.* Например, если шаровой сегмент больше полушара, то его внешнее поле может быть представлено только *совокупностью мнимого стержня и реальной точечной массы.*

Второе направление: представление внешних гравитационных полей объёмных тел с экваториальной плоскостью симметрии с помощью специальных *дисков.* Часто (но не всегда!) такие *эквигравитирующие диски* можно находить по известным *эквигравитирующим стержням.* Обратное же верно всегда: *для любого однородного или неоднородного круглого диска можно найти эквигравитирующий стержень, а значит, и эквигравитирующее объёмное тело.* Таким образом, удаётся построить даже цепочки эквигравитирующих тел типа «сфероид (или оболочка) – диск – стержень».

---

[13] Особыми точками могут быть точки изломов на поверхности тела или особые точки аналитического продолжения внешнего потенциала внутрь тела.

В-третьих, в [3] значительно расширена, в сравнении с классической теорией, область применения метода *софокусных преобразований*. Прежде всего, мы модифицируем сам метод *софокусных преобразований* и прилагаем его не только к сплошным *однородным* эллипсоидам (как это делали Маклорен, Айвори и Лаплас), но и к эллипсоидам *слоисто-неоднородным* (причём со стратификацией самого общего вида!) и даже – к *однородным и неоднородным оболочкам*[14]. Это приводит к результатам, значительно расширяющим теорию: оказывается, *любые элементарные эллипсоидальные оболочки и сплошные слоисто-неоднородные эллипсоиды, связанные специальными софокусными преобразованиями, являются эквигравитирующими.*

Важным достижением на этом новом направлении в теории потенциала стало нахождение в конечном виде выражения пространственного потенциала для однородного и неоднородного эллиптического диска [3], причем сделано это было через эквигравитирующий диску слоисто-неоднородный эллипсоид! Удалось найти и систему эквигравитирующих элементов для однородного кругового тора.

[12] Приятно удивлен — деликатно сказано. На самом же деле, утвердиться в законности замены шара точкой будущему автору «Начал» долгие годы никак не удавалось. Как пишет он в письме Хэлли от 20 июня, ещё в 1685 году, то есть менее чем за год до представления «Начал» Королевскому обществу, сам Ньютон продолжал считать *невозможной замену шара точкой.* Вот так! Поворотный к успеху момент – идея рассматривать не шар в целом, а притяжение отдельных сферических оболочек.

[13] Особыми точками могут быть точки изломов на поверхности тела или особые точки аналитического продолжения внешнего потенциала внутрь тела.

[14] У Маклорена и Лапласа софокусным преобразованиям подвергались только сплошные однородные эллипсоиды и сфероиды. У Шаля также рассматриваются только элементарные софокусные гомеоиды .

5.4. Гравитационная энергия тел

Задача о гравитационной энергии шарового сегмента (арбузной горбушки).

Шар, восхищавший ещё древних, и сейчас, если иметь в виду его гравитационные свойства, таит в себе много неизвестного. Вот задача, ставшая стимулом к развитию новых методов в теории притяжения.

Как уже отмечалось, выражение гравитационной энергии однородного цельного шара (40) давно известно. Но разрежем шар-арбуз и спросим: *какую гравитационную энергию имеет отделенный от него шаровой сегмент?* Задача эта новая и ранее не была (а обычным методом – и не могла быть) решена[15]. Настоящим сюрпризом явилось то, что потенциальная энергия шарового сегмента (и даже составленных из него линз) выражается через элементарные функции! В качестве примера приведем изящное выражение гравитационной энергии для половинки однородного шара:

$$W_{полушара} = -\frac{2}{45}\pi G \rho^2 R^5 \left(32 - 3\pi\right). \qquad (52)$$

Из попыток решения подобных задач и берут начало новые методы, разработанные в [3]. Подчеркнём – в этой книге само понятие гравитационной (потенциальной) энергии подверглось фундаментальной переработке и расширению. Судите сами.

Классический подход опирается на определение гравитационной энергии в виде *двойной суммы попарных взаимных энергий дискретных точек:*

[14] У Маклорена и Лапласа софокусным преобразованиям подвергались только сплошные однородные эллипсоиды и сфероиды. У Шаля также рассматриваются только элементарные софокусные гомеоиды .

[15] На международной конференции в Петрозаводске в 1993 г. автором было предложено пари: тому, кто за три месяца найдёт гравитационную энергию однородного сегмента, я отдаю свою (тогдашнюю) месячную зарплату. Пари было принято, но моё материальное благополучие тогда не пострадало!

$$W = -G\sum_{k=2}^{N}\sum_{i=1}^{k-1}\frac{m_k m_i}{r_{ki}}. \tag{53}$$

При непрерывном распределении вещества формула (53) эквивалентна ранее упомянутой (39). Но общая формула (39) требует знания внутреннего потенциала тела и поэтому малопригодна для решения большинства конкретных задач.

Новым методам нахождения гравитационной энергии посвящены главы 12, 13 и 14 в книге [3]. В дополнение к указанным общим формулам там выведены новые формулы. Дадим некоторым из них краткую характеристику.

Так, формула

$$W = -\frac{1}{5}\rho\iint_S \varphi(\boldsymbol{x})\,\boldsymbol{x}d\boldsymbol{S} \tag{54}$$

подразумевает интегрирование потенциала не по объёму, а по поверхности тела *S,* что часто упрощает решение некоторых задач.

Третий метод, выраженный формулой

$$W = -\frac{G}{2}\sum_{n=0}^{\infty} D_n\tilde{D}_n + \frac{1}{3}\pi G\rho J, \tag{55}$$

представляет энергию в виде суммы произведений D_n и $\tilde{D}_n$ коэффициентов в разложениях в ряд Лапласа потенциала тела во внешней (13) и внутренней (16) точках соответственно. Аналогичная формула получена и для тел, не имеющих осевой симметрии. Число членов суммы зависит от симметрии тела; для однородного шара, сфероида или эллипсоида $n = 0$. Четвёртый метод демонстрирует совершенно иной подход к данной проблеме:

$$W = -\frac{1}{10i\pi G}\oint \varphi_{\text{внешн}}(\zeta)\left(2\varphi_{\text{внутр}}(\zeta) - \zeta\frac{d\varphi_{\text{внутр}}}{d\zeta}\right)d\zeta. \tag{56}$$

Здесь внешний и внутренний потенциал тела берутся на оси симметрии и затем в них x_3 заменяется на ζ; интегрирование в этой формуле производится по контуру фигуры в комплексной плоскости. Таким образом, данный метод нахождения гравитационной энергии тел сводится к вычислению контурных интегралов в комплексной плоскости.

Ещё один оригинальный способ дан в § 14.6 из [3]: при нахождении *W* тела мы опираемся на нахождение *взаимной потенциальной энергии точек этого тела с эквигравитирующими ему элементами* (сравните с методом, выраженным формулой (52)!). Например, если у тела *T* есть *единственный эквигравитирующий стержень* (или любой другой эквигравитирующий элемент) с плотностью $\mu(\zeta)$, полная гравитационная энергия такого тела будет равна

$$W = -\frac{1}{2}\oint \varphi_{\text{внутр}}(\zeta)\mu(\zeta)d\zeta + \frac{1}{3}\pi G\rho\left(J - \int\zeta^2\mu(\zeta)d\zeta\right). \tag{57}$$

Интегрирование в этой формуле распространяется на все точки данного эквигравитирующего элемента.

Подчеркнём, что каждая из указанный выше формул характеризует и принципиально новый подход к нахождению гравитационной энергии. В совокупности, эти методы позволяют решать задачи, которые ранее не ставились, да и не могли быть поставлены. Развивая теорию, мы всё глубже проникаем в суть проблемы!

Как, например, получить *гравитационную энергию однородной лунки,* ограниченной двумя участками сферы? Забегая вперёд, заметим, что ответ совершенно нетривиален: оказывается, достаточно в выражении ньютоновской энергии *W* у асимметричной линзы (которое нами также найдено) обратить знаки у радиуса R_1 и высоты h_1 для одной из половин линзы, и – как из-под плаща фокусника! – явится требуемый ответ. Этот результат удивителен уже потому, что как таковая, потенциальная энергия тел не является даже аддитивной по массе величиной.

Но и это не всё: анализ задачи с лункой ведёт нас ещё дальше. Легко представить, как из асимметричной линзы при подборе параметров получается слепленная из двух шаров «снежная баба». Если затем мысленно совершить указанный на рис. 3 поворот на 180^0

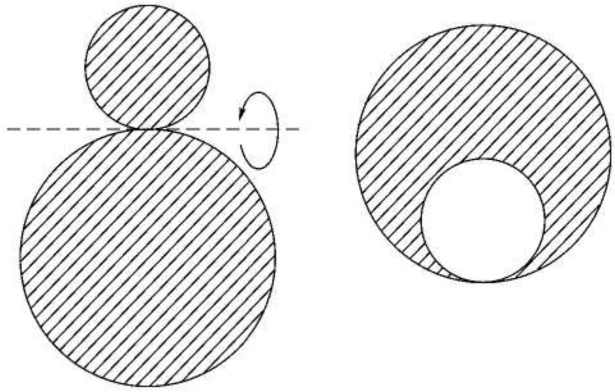


Рис. 3. Поворот малого шара — и из «снеговика» образуется лунка со сходящимися острыми концами

нижнего шара, из снеговика образуется однородная лунка со сведенными вместе острыми концами. Так вот – энергию последней мы получим из выражения всё той же лунки в пределе сходящихся у неё «рогов»!

И здесь у читателя может сложиться обманчивое впечатление о решаемости подряд любых задач по гравитационной энергии. Это не так! Почти все задачи по нахождению точных выражений для гравитационной энергии тел, выходящие за рамки известных результатов для шаров и однородных эллипсоидов, сложны и их решение требует немалых усилий. Уже сама постановка вопроса о гравитационной энергии тел нестандартной формы сразу приводит нас к тем труднейшим вопросам математической физики, которые не только ещё не решены, но даже ещё не получили ясной математической формулировки. Проблема эта требует основательной проработки, и для решения новых задач необходимо и создание принципиально новых, нестандартных подходов.

Итак, исходя из единственного предположения о характере взаимодействия двух частиц, стало возможным делать предсказания и проверять в наблюдениях и на опыте многочисленные следствия из теории. Прогресс в теории притяжения был несомненен.

15 На международной конференции в Петрозаводске в 1993 г. автором было предложено пари: тому, кто за три месяца найдёт гравитационную энергию однородного сегмента, я отдаю свою (тогдашнюю) месячную зарплату. Пари было принято, но моё материальное благополучие тогда не пострадало!

6. Небесная механика

6.1. Теоретические основы

С открытием закона Всемирного тяготения на смену геометрическому методу описания движения небесных тел пришел современный динамический подход. Напомним, что динамика исходит из знания сил, которые действуют в системе. Сейчас-то мы знаем, что правильное описание сил – это ключ к составлению дифференциальных уравнений движения и надежный способ познания Природы. На этом пути и были заложены основы небесной механики, что открыло возможности для изучения самых разнообразных движений небесных тел.

В основе небесной механики лежат динамические уравнения. Рассмотрим движение в потенциальном поле, которое описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{d^2x}{dt^2}=\frac{\partial\varphi}{\partial x};\qquad \frac{d^2y}{dt^2}=\frac{\partial\varphi}{\partial y};\qquad \frac{d^2z}{dt^2}=\frac{\partial\varphi}{\partial z},\qquad (58)$$

где $\varphi(x, y, z)$ – заданный потенциал гравитационных сил. Размерность пространства не обязательно равна трем – часто встречаются случаи двумерного и одномерного движения. Иногда, кроме гравитационных, следует учитывать электрические и магнитные силы; в других задачах надо принимать во внимание конечные размеры тела (предполагая форму тела неизменной и допуская только его повороты); иногда поле не задается извне, а возникает как результат взаимодействия рассматриваемых тел; многие задачи следует рассматривать во вращающейся системе координат; свою специфику имеют и задачи о движении тела по заданной искривленной поверхности, и т.д. Сила теории в том, что всё это, а также многое другое, можно описать с помощью уравнений Гамильтона

$$\frac{dq_i}{dt}=\frac{\partial H}{\partial p_i};\quad \frac{dp_i}{dt}=\frac{\partial H}{\partial q_i},\ i=1,2\ldots N\qquad (59)$$

при подходящей функции (*гамильтониане*) $H(q_1\ldots q_N, p_1\ldots p_N)$. Здесь N выражает число степеней свободы системы. Ввиду простоты и симметрии, (59) называют каноническими уравнениями. Уравнения Гамильтона прекрасно работают не только в классической, но и в квантовой механике, и в специальной теории относительности. Для обычного потенциального поля, когда справедливы уравнения (58), q_i отождествляются с координатами, а p_i – с импульсами, т.е. с компонентами скорости, умноженными на массу. (Для одной частицы умножение на массу не столь существенно, но оно обязательно при анализе взаимодействия нескольких различных тел.) Тогда

$$H=\frac{m}{2}\dot{\vec{r}}^{\,2}+\Phi(\vec{r}).\qquad (60)$$

При наличии вращения или (для заряженных частиц) магнитного поля, определение импульса включает в себя дополнительные члены. Существуют специальные правила выбора канонических преобразований, сохраняющих форму (59).

Формальная обратимость уравнений классической механики выражается в инвариантности уравнений (59) по отношению к замене

$$t\to -t,\ p_i\to -p_i,\ (i=1,\ 2\ldots N).\qquad (61)$$

Поэтому, например, алгоритмы расчёта траектории небесного тела или артиллерийского снаряда без учета сопротивления воздуха одинаково хорошо работают при расчёте от прошлого к будущему и наоборот. Канонические уравнения Гамильтона (59) выражают собой классический *принцип причинности*.

6.2 Задача двух тел

Эта задача – первая по важности в табели о рангах задач небесной механики. В ней рассматривается движение двух материальных точек с массой M и m, взаимодействующих по закону обратных квадратов. В системе отсчета, связанной с центром масс, относительное движение происходит в потенциале

$$\varphi=\frac{\kappa^2}{r},\ \kappa^2=G(M+m), r=\sqrt{x^2+y^2+z^2},\qquad (62)$$

и в сокращенной векторной форме имеют вид

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}+\kappa^2\frac{\mathbf{r}}{r^3}=0.\qquad (63)$$

Уравнения (63) представляют собой систему из шести нелинейных дифференциальных уравнений 1-го порядка и имеют четыре первых интеграла движения. Среди них – закон сохранения кинетической энергии (интеграл энергии)

$$\upsilon^2=\kappa^2\left(\frac{2}{r}+h\right)\qquad (64)$$

(здесь υ – скорость, h – постоянная энергии). Уравнения (63) полностью решаются. Орбита представляет собой плоскую кривую, и движение может происходить по коническим сечениям: в зависимости от начальных условий, это будет эллипс, парабола или гипербола. Финитное движение происходит по эллиптической орбите и является периодическим. Оно полностью определяется шестью величинами (элементами орбиты):

$$a, e, \Omega, \omega, i, \tau.\qquad (65)$$

Здесь Ω – угол долготы восходящего узла орбиты, ω – долгота её перицентра, i – угол наклона плоскости орбиты к эклиптике, a – большая полуось, e – эксцентриситет, τ – параметр, определяющий положение тела на орбите в каждый момент времени.

Знание законов движения в задаче двух тел имеет исключительно важное практическое значение при исследовании орбит планет и спутников Солнечной системы. Ведь если бы в нашу систему входило не одно Солнце, а двойная или тройная звезда (а таких систем в Галактике большинство), то движения планет были бы столь запутанными, что разобраться в этом было бы не под силу. Но – Солнце у нас только одно и его масса почти на три порядка превышает массу всех планет, поэтому в первом приближении каждая из планет движется вокруг Солнца по указанному кеплеровскому эллипсу. Эти благоприятные обстоятельства и способствовали возникновению и развитию всей астрономии.

Подчеркнем, что задача двух тел имеет исключительно важное значение не только для изучения движения тел в Солнечной системе, но и вне её: при исследовании орбит экзопланет, кратных звезд, звездных скоплений и даже галактик.

Однако необходимо отметить, что существует ряд веских причин, ограничивающих применение задачи двух тел. Речь идет о существовании малых сил – возмущений, которые могут вызвать со временем заметные отклонения от кеплеровского движения.

6.3 Теория возмущений

Согласно закону Всемирного тяготения, все тела в Космосе влияют друг на друга, что возмущает их движение по траекториям. Настоящая небесная механика начинается с вопроса, как учитывать эти взаимные возмущения тел. Собственно, любые факторы, которые приводят к отклонению силы от закона обратных квадратов или делают её нецентральной, представляют собой возмущения кеплеровского движения. Простой пример – это вращение тела, которое делает его форму сжатой с полюсов, а притяжение сжатого тела и создает указанные выше возмущения на движение пробного тела. Другой пример – задача трех тел, которая составляет большой кусок небесной механики и имеет многочисленные практические применения в астрономии. Таким образом, основную часть современной небесной механики составляет именно теория возмущений.

Первый шаг в теории возмущений состоит в представлении потенциала (силовой функции) в виде двух слагаемых

$$\Phi = V + R, \tag{66}$$

где V – та часть силовой функции, для которой известно общее решение дифференциальных уравнений движения в аналитическом виде. Тогда R представляет собой возмущающую часть силовой функции.

Далее для достижения цели в теории возмущений применяются разные методы.

6.3.1 Метод оскулирующей орбиты

Исторически первым стал метод вариации параметров кеплеровской орбиты, предложенный Лагранжем. Суть его в следующем. Рассмотрим движение пробного тела в системе, где главную роль играет центральная сила от тела с наибольшей массой, однако есть также малые возмущающие силы. Пусть на какой-то момент времени мы определили эллиптическую орбиту этого пробного тела. Однако под действием возмущений это тело будет отклоняться от намеченной орбиты. Поэтому определим параметры эллипса на новый момент времени. Очевидно, параметры нового эллипса будут отличаться от параметров прежнего. Идея Лагранжа заключается в том, что движение пробного тела можно на любой момент времени представить движением по эллипсу, элементы которого будут зависеть от времени: $a = a(t), e = e(t), \Omega = \Omega(t),$ и т.д. Говорят, что пробное тело (планета, спутник) движется по оскулирующей орбите. Для элементов оскулирующей орбиты сравнительно просто можно составить дифференциальные уравнения, в правые части которых будут входить производные от возмущающей функции R. Это будут уравнения вида [6]

$$\frac{da}{dt} = \sum_{j=1}^{3} \alpha_{ij} \frac{\partial R}{\partial \beta_j}, \text{ и т.д.,} \tag{67}$$

где α_{ij} – некоторые коэффициенты. Решать такие уравнения можно разными способами. Один из них – это

6.3.2 метод малого параметра.

По смыслу, малость возмущающей функции обеспечивается некоторым малым параметром рассматриваемой задачи. Учитывая это, применяют разложение возмущающей функции по степеням малого параметра:

$$R = R^{(1)} + R^{(2)} + R^{(3)} + \dots \qquad (68)$$

Неизвестная в правой части тоже представляется рядом по степеням малого параметра

$$a = a^{(0)} + R^{(1)} + R^{(2)} + \dots \qquad (69)$$

Затем в уравнениях (67) приравниваем слева и справа члены одинакового порядка малости, после чего выводим и решаем уравнения для возмущаемой величины.

6.3.3 Другие методы решения задач

В небесной механике широко применяются различные приближенные аналитические методы. Особо отметим также качественные методы изучения движений небесных тел и их устойчивости. Именно для задач небесной механики эти важные и глубокие методы разработал Пуанкаре. Сейчас качественные методы широко применяются во всех областях точного естествознания, где встречаются неинтегрируемые (а таких большинство!) дифференциальные уравнения.

6.3.4 Численные и аналитико-численные методы

По роду своей деятельности, небесные механики всегда были хорошими вычислителями. С развитием вычислительной техники и появлением специальных компьютеров численные методы решения дифференциальных уравнений стали применяться в небесной механике особенно активно. Были разработаны специальные вычислительные алгоритмы для решения задачи N тел. Именно с помощью компьютеров удалось получить ответы на важные вопросы во многих областях небесной механики. Вот пример. А.М. Ляпунов и А. Пуанкаре независимо друг от друга установили, что в окрестности сфероидов Маклорена и эллипсоидов Якоби существуют неэллипсоидальные фигуры равновесия. Для одной из таких фигур –грушевидной – крупнейшие ученые того времени предсказывали, что такая фигура должна делиться на две части. Именно по этой схеме, полагал Д. Дарвин, Луна могла отделиться от Земли. Каково же было удивление, когда вдруг обнаружилось, что последовательность грушевидных фигур заканчивается не делением фнгуры, а появлением «носика» на её конце, из которого происходит извержение жидкости. И этот важный результат был получен с помощью компьютеров!

Подчеркнем, что движение всех планет, их спутников, а также астероидов и комет в той или иной степени является возмущенными. Элементы орбит планет Солнечной системы изменяются со временем очень мало, поэтому для них элементы орбит принято давать на какую-то эпоху, а затем уже отдельной строкой учитывать поправки от возмущений. Элементы же орбит большинства спутников (например, Луны) изменяются значительно быстрее. Очень сложно учитывать возмущения для большинства экзопланет у других звезд. Так, заведомо нецентральной будет сила, действующая на планету в системе двойных звезд. Траектория движения планет в кратных звездных системах может быть очень сложной.

6.4 Зачем нужна и чего достигла небесная механика

До этого мы рассматривали вопросы, как и над чем работают» ученые в небесной механике. «Хозяйство», которым занимается небесная механика, огромно и сложно. Едва ли можно указать задачи в современной динамической астрономии, где бы не использовались методы небесной механики. По ходу изложения мы отмечали достижения этой науки. Продолжим наш разговор, но ограничимся здесь кратким списком приложений небесной механики.

– *Космонавтика и полеты космических аппаратов.* Интерес к небесной механике значительно возрос в последние десятилетия в связи с необходимостью расчета орбит искусственных спутников Земли, Луны и планет, а также траекторий межпланетных космических аппаратов. Любой полёт в космос основан на знании гравитационных полей небесных тел и на точном расчёте траекторий движения космических аппаратов. Здесь небесная механика незаменима, достижения её исключительно велики. Чего стоят, например, открытия, предсказанные «на кончике пера»: 1759 год – возвращение кометы Галлея (Клеро), открытие в 1846 г. планеты Нептун (Адамс и Леверье), и далее, как из рога изобилия: спутники планет, пояс Койпера, падение кометы Шумейкеров-Леви на Юпитер и т.д. Проявлением мощи методов небесной механики является та точность, с какой рассчитываются траектории полетов космических аппаратов («Вояджер-2» после серии сложнейших гравитационных маневров в гравитационных полях Юпитера и Сатурна при подлете к Нептуну отклонился всего на 30 км!). Изучением движения ракет, искусственных спутников и космических аппаратов занимается новая ветвь небесной механики – астродинамика.

– *Создание точных эфемерид планет и их спутников в Солнечной системе*. Эта колоссальная по объему работа. Мощные компьютеры сделали возможным быстрое решение многих небесно-механических задач с высокой точностью. Подчеркнем, что вследствие эволюции Солнечной системы работа по расчету эфемерид полностью никогда не будет завершена.

– *Расчет орбит тел (звезд) в разных силовых полях и возможных сценариев эволюции звездных систем и галактик*. С помощью новых вычислительных технологий стало возможным решать грандиозные задачи, ранее не доступные классической небесной механике. Например: на мощных компьютерах можно проследить на протяжении миллиардов лет эволюцию скопления, состоящего из сотен тысяч звезд; можно детально рассчитать, как исказится форма двух сталкивающихся галактик. Недавно выяснилось, например, что приливное взаимодействие между сближающимися галактиками Млечный Путь и Андромеда уже началось!

– *Динамика и эволюция системы Земля-Луна и орбит спутников у других планет*. Включает в себя методы не только классической небесной механики, но и создание принципиально новых физических моделей эволюции орбит спутников, учитывающих вязкость как в самой планете, так и в спутнике. Двигаясь в этом направлении, можно будет понять, почему одни спутники удаляются от центральной планеты (как Луна от Земли), другие же (спутник Ио у Юпитера) приближаются к ней. Работы здесь непочатый край. Результаты имеют важное значение для прогноза о будущем жизни на Земле.

– *Геодинамика*. Изучение вращения, строения и формы Земли, прогнозирование землетрясений и извержений вулканов имеет прямое отношение к вопросу о выживании человечества на Земле.

– *Создание и обслуживание систем спутниковой навигации*. Это новое и исключительно важное направление, преобразившее нашу повседневную жизнь (мобильники, смартфоны, определение географических координат точек на поверхности Земли). Запуск спутников для этого требует знания многих факторов, в том числе и структуры гравитационного поля Земли. Пока созданы только две системы спутников, способные покрывать весь земной шар (GPS и ГЛОНАСС).

– *Экзопланеты.* Через четыре века после трагической смерти Джордано Бруно астрономы подтвердили его догадку о существовании экзопланет у других звезд. Важное достижение современной астрономии! Сейчас известно несколько тысяч экзопланетных систем. Исследование движения экзопланет и эволюции их орбит также проводится методами небесной механики. Однако о точности, достигнутой для тел Солнечной системы, пока остается только мечтать.

– *Теория фигур равновесия.* Эта отрасль небесной механики также имеет многочисленные применения к планетам и их спутникам, к звездам (включая сложнейшую проблему кратных систем) и даже к галактикам. Применение компьютеров впервые позволило рассчитать эволюцию неэллипсоидальных фигур равновесия. Пуанкаре и Ляпунов очень бы удивились, узнав, что известная грушевидная фигура не делится на две части (эта последовательность заканчивается фигурой с особой точкой, из которой начинает истекать струя жидкости или газа).

– *Релятивистская небесная механика*. С появлением общей теории относительности, одновременно с релятивистской астрофизикой и релятивистской космологией, возникла также и релятивистская небесная механика. Повышение точности наблюдений сделало актуальным учет релятивистских поправок в движении некоторых небесных тел в Солнечной системе. Именно по аномалии в движении перигелия Меркурия, установленной ещё Леверье в рамках классической небесной механики, впервые удалось проверить предсказания ОТО. В последнее время возрастание точности измерения времени и расстояний радиотехническими методами также делают необходимым учет эффектов ОТО. Для Солнечной системы применение ОТО способствует повышению точности решений небесно-механических задач. Большие перспективы релятивистская небесная механика имеет в изучении экзопланет и, особенно, в двойных пульсарах, где косвенно предсказала существование гравитационных волн. Это открытие недавно подтвердилось!

Заключение

На примере теории потенциала и небесной механики мы рассмотрели здесь вопросы развития науки. В качестве примеров, мы подробно остановились на развитии теории потенциала и небесной механики. Для чего нужна небесная механика, какие методы есть в её арсенале, как она отвечает на прямые жизненные запросы человека. Разумеется, искусственные спутники и космические корабли, мобильники, смартфоны и iPhone –далеко не все, что сделала возможным в нашей жизни эта замечательная наука.

До недавнего времени лишь звезды и кометы будили воображение и напоминали о существовании неизведанного мира. Еще лет двадцать назад мы почти ничего не знали о космических телах за орбитой Нептуна. Только Плутон, сыгравший роль первой ласточки из пояса Койпера, долгое время был единственным исключением. С совершенствованием средств наблюдения положение начало быстро меняться, и сейчас нам известно, что там, в бездонных глубинах Космоса, откуда Солнце видится лишь яркой звездочкой, степенно и неспешно движутся огромные каменно-ледяные астероиды и планетоиды. История нашей цивилизации от древнегреческого марафона до вожделенного iPhone не покроет и малой части периода обращения в 12 тыс. лет у недавно открытой карликовой планеты Седны. Той самой Седны, которая может уходить за пояс Койпера настолько далеко, что оттуда рукой подать до подлинной *terra incognita* – до облака Оорта.

Кроме того, открыты и другие объекты Солнечной системы – семейства новых спутников у планет-гигантов. Обнаружены кольца вокруг астероидов-кентавров. Это кольца особые, они расположены за предельным радиусом Роша и поэтому их эволюция может протекать совершенно иначе, чем в обычных кольцах планет Солнечной системы.

Особенно важным является открытие экзопланет у других звезд. Их изучение вызвало огромный интерес не только у астрономов, но также химиков и биологов.

Из-за недостатка места мы не рассмотрели такие важные вопросы в современной небесной механике, как КАМ-теорию, проблему резонансов и проблему хаотического движения тел в Солнечной системе. Кстати сказать, хаотическое движение для тел Солнечной системы возможно только на огромных (космогонических) интервалах времени и, следовательно, жизни человека прямо этот феномен не угрожает.

Наука движется в неизведанные дали. На смену наивным упованиям древних греков на равномерное движение планет по идеальным кругам, спустя почти двадцать веков пришли эллипсы Кеплера. Казалось бы, эти эллипсы нарушают все представления о гармонии во Вселенной, но в действительности, с их приходом открывается новый уровень гармонии, превосходящий прежний. А под вуалью эллипсов проглядывает уже структура КАМ-торов, и мы глубже начинаем понимать настоящую Вселенную. Природа не всегда соответствует нашим представлениям, открытия всегда таят неожиданное – это и есть кредо настоящей науки!

Список литературы

1.Тодхантер И. История математических теорий притяжения и фигуры Земли. – М.: УРСС, 2002.

2.Клейн Ф. Лекции о развитии математики в XIX столетии, т. 1. – М.: Наука, 1989.

3.Кондратьев Б.П. Теория потенциала. Новые методы и задачи с решениями. - М.: Мир, 2007.

4.Чандрасекхар С. Эллипсоидальные фигуры равновесия. М.: Мир, 1973.

5.Субботин М.Ф. Курс небесной механики. – М.–Л.: Гостехиздат, 1943. Т. 3.

6.Дубошин Г.Н. Небесная механика. Основные задачи и методы. – 3-е изд. – М.: Наука, 1975. – Ч. 1.

7.Абалакин В.К., Аксенов Е.П., Гребеников Е.А., Демин В.Г., Рябов Ю.А. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. – М.: Наука, 1976.

8.Кондратьев Б.П. О радиусе сходимости ряда Лапласа для внутреннего потенциала гравитирующего тора. ЖТФ, т. 80, № 12, с. 105–106, 2010.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

Ольга Касьяновна СИЛЬЧЕНКО
д.ф.-м.н., зав. отделом Физики эмиссионных звезд и галактик ГАИШ МГУ, лауреат Государственной премии

Галактики – огромные гравитационно связанные конгломераты звезд, содержащие также некоторое количество газа и пыли. Интересно, что формы, или, как говорят астрономы, морфология галактик, не слишком разнообразны в ближней Вселенной. Эдвин Хаббл, с работ которого 100 лет назад и началась внегалактическая астрономия, выделил, собственно, всего два главных типа галактик – эллиптические и спиральные. Можно немного детализировать это разбиение: существуют дисковые галактики без спиральных ветвей – их называют линзовидными, а в центрах спиральных галактик могут быть заметны вытянутые перемычки – бары. Но сути это не меняет: галактики бывают либо однородными сфероидами – их мало, либо двухкомпонентными дисковыми системами, состоящими из большого звездного диска и компактного сфероидального балджа в центре этого диска – таких большинство. Первые Хаббл назвал «ранними типами», а последние – «поздними». Вкладывал ли он эволюционный смысл в свою морфологическую классификацию? Сам он это отрицал. Но почему «ранние» и «поздние»? Не казалось ли Хабблу, что сложные многокомпонентные спиральные галактики развиваются из простых эллиптических? В любом случае, по ходу исследований выяснилось, что спиральные галактики не могут вырасти из эллиптических: эллиптические в среднем намного массивнее спиральных.

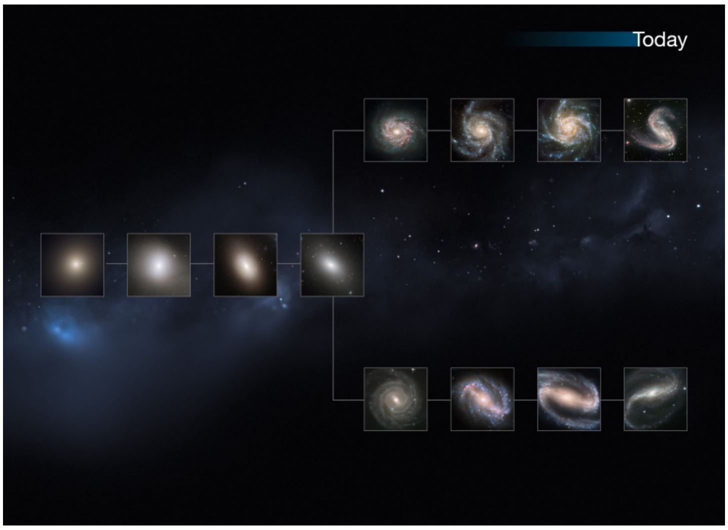


Рис. 1. Классификационная схема («вилка») Хаббла – мы до сих пор классифицируем галактики по схеме, которую Эдвин Хаббла предложил в 1936 году. Слева – ранние типы, справа – поздние типы галактик. Кредит ESA/Hubble & NASA.

Когда космологи выстроили теоретическую единую картину эволюции Вселенной на основе гравитации темной материи, они перевернули «вилку Хаббла» другим концом. Это не из эллиптических галактик вырастают спиральные, а наоборот, сначала формируются чистые диски, а потом они встречаются, сливаются, и конечный продукт слияния, как показывают модели, выглядит как типичная эллиптическая галактика – сфероидальный объект, со слабым вращением и большой массой. В рамках этого сценария сначала рождаются маленькие дисковые галактики, а самыми последними, буквально пару-тройку миллиардов лет назад, в мир являются гигантские эллиптические галактики. Тогда получается правильный вектор набора массы и, что тоже очень важно, вполне возможная эволюция момента вращения: самые первые галактики должны быстро вращаться, а вот потом, бурно сливаясь, они момент вращения могут потерять. Схема выглядит логичной; но укладываются ли в нее все наблюдательные свойства галактик разных морфологических типов?

КРАСИВЫЕ АНГЛИЙСКИЕ СЛОВА: QUENCHING...

Как показывают цифровые (предпринятые с ПЗС-приемниками) фотометрические обзоры галактик в ближней Вселенной, все галактики делятся на два больших класса по цвету: галактики бывают либо голубые, либо красные. Эти две области распределения галактик на диаграмме цвет – абсолютная звездная величина называют «красная последовательность» и «голубое облако». А галактик с промежуточным, зеленым, цветом – обитателей поэтической «зеленой долины» – встречается крайне мало. Вы тут же спросите: а как связано это разделение на два класса по цвету с морфологическим разделением по Хабблу – на спиральные и эллиптические галактики? Действительно, связано напрямую: эллиптические галактики, при ближайшем рассмотрении – это те, которые красные, а те галактики, которые голубые, в большинстве своем спиральные. Голубые они потому, что в них прямо сейчас идет звездообразование – рождаются массивные, очень яркие, горячие звезды. А в эллиптических галактиках звездообразования нет, и уже очень давно. Тут возникает, правда, некая загвоздка с линзовидными галактиками (которых, между прочим, в ближней Вселенной в 3–5 раз больше, чем эллиптических). Они по морфологии дисковые и иногда вовсе не имеют балджей (см. рис. 2) – но при этом они красные. Обитают на «красной последовательности». И вот тут опять всплывает извечная мечта внегалактических астрономов – к любой классификации привязать эволюцию. Немедленно после обнаружения «красной последовательности» и «голубого облака» на диаграмме цвет – абсолютная звездная величина начали рисовать эволюционные треки – стрелки направления эволюции; и почему-то все стрелки идут снизу вверх, из голубых в красные. Действительно, как превратить дисковую голубую спиральную галактику в дисковую же, но красную, линзовидную галактику? Нужно просто остановить звездообразование в диске, например, убрав оттуда весь газ, из которого образуются звезды. Так родился ключевой термин современных представлений об эволюции галактик – “quenching”. То есть, остановка звездообразования.

Механизмов для остановки звездообразования, или удаления газа из крупномасштабного диска галактики, теоретики предложили целый букет. Можно задействовать гравитационные механизмы – пусть рядом пролетит массивный сосед или на диск упадет маломассивный спутник. Тогда спокойный газовый диск взволнуется, турбулизуется, начнет терять момент и сползать к центру галактики. В центре соберется много газа и произойдет быстрая мощная вспышка звездообразования, которая нарастит балдж; а вот в диске газа больше не останется, и звездообразование в нем быстро прекратится. Можно также обратиться к горячей (рентгеновской) межгалактической среде в скоплениях галактик. Поскольку она горячая – в ней и давление повышенное. А если новоприбывшая в скопление спиральная галактика еще и быстро летит сквозь эту горячую среду – то есть падает к центру скопления, то, как показывают расчеты, лобовое давление горячей среды выдувает холодный газ из внешних частей диска. Соответственно, и в этом случае звездообразование в диске прекращается. Обратите внимание: все механизмы превращения спиральных галактик в линзовидные, а голубых дисковых галактик – в красные дисковые, в рамках этого сценария требуют плотного окружения – скопления или в крайнем случае богатой массивной группы галактик. Действительно, известно, что в скоплениях галактик до 50%–60% всех членов – это линзовидные галактики. А в поле их всего 15%. Благоприятные условия для формирования линзовидных галактик в скоплениях? Однако если мы посмотрим на ПОЛНЫЙ процент галактик в скоплениях – это 7%. Умножаем на 60% – только 4% ВСЕХ галактик ближней Вселенной составляют линзовидные галактики в скоплениях. А, соответственно, 11% ВСЕХ галактик ближней

Вселенной – это линзовидные галактики поля. То есть, в абсолютном выражении в поле в 3 раза больше линзовидных галактик, чем в скоплениях. А тут-то они как образовались? Теоретики молчат...

Сильную поддержку идее остановки звездообразования в дисковых галактиках в процессе их «впадания» в скопления принес так называемый эффект Батчера–Эмлера, обнаруженный при наблюдениях далеких скоплений галактик в конце 70-х годов XX века. В богатых скоплениях на z=0.4, похожих по форме, массе и населенности на близкое скопление Coma, были обнаружены во множестве голубые галактики. А в скоплении Coma их нет – в скоплении Coma преобладают галактики линзовидные. Так вот же! – сказали все, – вот падение галактик со звездообразованием на скопления, падение, которое должно закончиться выметанием газа и остановкой звездообразования. И – превращением упавших в скопление спиральных галактик в линзовидные. Красное смещение z=0.4 соответствует расстоянию от нас в 4 млрд световых лет. То есть мы сейчас видим в скоплениях Батчера–Эмлера галактики такими, какими они были 4 млрд лет назад. И если мы принимаем сценарий превращения спиральных галактик в линзовидные, это значит, что близкие к нам линзовидные галактики 4 млрд лет назад были спиральными и имели бурное звездообразование в дисках. Позвольте, сказали уже мы, но мы же можем измерить возраст звездного населения в дисках ближайших линзовидных галактик, и если вышеупомянутый сценарий верен, этот возраст будет близок к 4 млрд лет – потому что именно 4 млрд лет назад в дисках этих галактик перестали образовываться молодые звезды. Мы померили этот возраст, получив спектры дисков двух десятков линзовидных галактик на российском 6-метровом телескопе. Потом британцы померили возраст в дюжине дисков линзовидных галактик скопления Virgo на 8-метровом телескопе Gemini. Результаты наших работ оказались сходными: подавляющее большинство дисков линзовидных галактик в близких скоплениях и массивных группах оказались старше 10 млрд лет. Сценарий с превращением спиральных галактик в линзовидные в скоплениях на z=0.4 не подтвердился!

И тут я остановлюсь и спрошу: почему именно quenching? Почему направление эволюции должно быть именно из голубых в красные? Да, есть механизмы удаления газа из дисков галактик. В скоплении Девы мы наблюдаем красивые газовые хвосты у некоторых спиральных галактик – это лобовое давление горячей межгалактической среды очищает внешние части дисков. Газа – а именно, нейтрального водорода – в спиральных галактиках скоплений меньше, чем в спиральных галактиках поля. Но они не перестают от этого быть спиральными! И звездообразование в них сейчас наблюдается – и в центре, и в хвостах. И потом, в скоплениях проживает заведомое меньшинство всех галактик; то есть воздействиям, удаляющим газ, подвержены считанные проценты от всех спиральных галактик ближней Вселенной. А не навевает ли численное превосходство голубых галактик мысль, что эволюционные треки могут быть направлены и в другую сторону – из красных галактик в голубые? Ведь если на диск линзовидной галактики упадет в какой-то произвольный момент некоторое заметное количество газа – например, упадет иррегулярный спутник, вроде Магеллановых Облаков – то в диске линзовидной галактики может начаться звездообразование, начнет формироваться тонкий, динамически холодный звездный диск, подверженный внутренним неустойчивостям, и она может на глазах превратиться в галактику спиральную. Но об этом чуть позже. А пока…

...И DOWNSIZING

В рамках картины стандартной модели с холодной темной материей, предложенной космологами для эволюции всей Вселенной, гигантские эллиптические галактики образуются последними, при слияниях галактик спиральных, то есть при слиянии галактик, у которых есть газ. Это означает, что в результате слияния из суммарных запасов газа двух сливающихся спиральных галактик должно образоваться заметное количество новых звезд. Таким образом, гигантские эллиптические галактики должны обладать самым молодым звездным населением в центре. Это предсказание прямо противоположно тому, что реально наблюдается в близких эллиптических галактиках: самые массивные из них содержат самые старые звезды, есть прямая и довольно тесная корреляция масса –возраст звезд для эллиптических галактик. Это наблюдательное явление; а то, что гигантские галактики обладают самым старым звездным населением, то есть сформировали его раньше всех, получило красивое английское название DOWNSIZING, что в самом широком смысле обозначает постепенный сдвиг фокуса всех событий – естественно, событий, имеющих отношение к формированию и эволюции галактик – от гигантских галактик к маленьким. Downsizing с идеологической точки зрения выглядит прямой противоположностью иерархическому скучиванию – предсказанию космологических моделей о том, что сначала должны формироваться самые маленькие галактики, а потом они будут сливаться во все бóльшие и бóльшие конгломераты.

Как только решающее слово было произнесено, downsizing стали находить абсолютно во всем. Например, в космической истории звездообразования. После полета большого инфракрасного телескопа Herschel с охлаждаемым зеркалом были построены функции светимости в инфракрасном диапазоне для далеких галактик – вплоть до красного смещения больше 4, когда Вселенной не было еще и 2 млрд лет. Светимость в далеком инфракрасном диапазоне, на длине волны в системе галактики около 100 мкм – это излучение пыли, нагреваемой молодыми массивными звездами, оно характеризует темпы текущего звездообразования. Вот эти темпы и померил телескоп Herschel в больших выборках галактик, наблюдаемых 8 млрд лет назад (z=1), 10 млрд лет (z=2), 11 млрд лет (z=3) назад... Оказалось, что на больших красных смещениях не только выше в среднем темпы звездообразования в галактиках – но и звездообразование идет в основном в более массивных галактиках, а не рядом с нами. В современной локальной Вселенной все текущее звездообразование сосредоточено в небольших галактиках – спиральных и иррегулярных. В самых же массивных галактиках на z=0 звездообразование не идет – это в основном галактики эллиптические, со старым звездным населением. А вот на z=2 бурное звездообразование идет в дисковых галактиках массой около 100 млрд солнечных масс – то есть в очень массивных галактиках. Но дисковых. Однако эти диски выглядят совсем не так, как диски современных спиральных галактик. Это комковатые и довольно толстые диски – области звездообразования в них гигантские, размером 1–1.5 кпк, и толщина дисков подстроена под размеры этих областей. Быстрые турбулентные движения гигантских газовых облаков в далеких дисках таковы, что равновесная толщина этих газовых дисков превышает 1 кпк. И естественно, из этих толстых газовых дисков в ходе бурного звездообразования, за времена, существенно меньшие 1 млрд лет, «вылупляются» такие же толстые звездные диски. Они формируются быстро, за 400–800 млн лет, на красном смещении 2 (т.е. 10 млрд лет назад). И они толстые. Что это нам напоминает? Правильно! Диски современных линзовидных галактик!

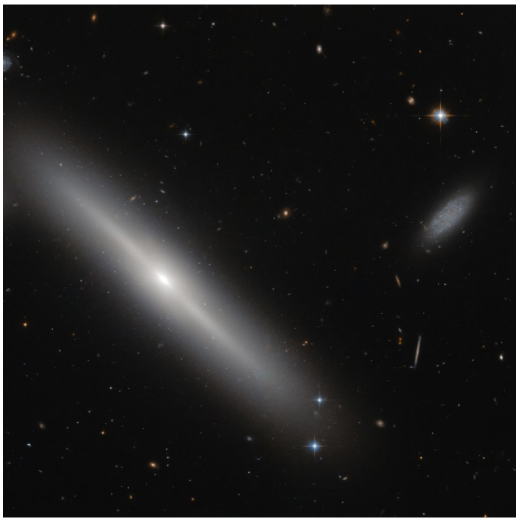


Рис. 2. NGC 5308 (слева) – близкая линзовидная галактика, которую мы наблюдаем в ориентации «с ребра». Видно, какой у нее толстый большой звездный диск; а вот балдж совсем маленький. Кредит ESA/Hubble & NASA.

ЭМПИРИЧЕСКИЕ СЦЕНАРИИ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ ГАЛАКТИК

Сейчас с крупными телескопами легко (или, по крайней мере, достаточно быстро) набираются обширные наблюдения десятков и тысяч галактик на больших красных смещениях, вплоть до z~8. На этом красном смещении мы наблюдаем Вселенную всего через полмиллиарда лет после Большого Взрыва. А сейчас, на z=0, возраст Вселенной около 14 млрд лет. То есть с крупными телескопами мы видим «на просвет» 95% всей эволюционной истории галактик. Мы видим, какими были галактики 5, 8, 10, 12 млрд лет назад… Это означает, что мы можем связать то, что мы видим, в эволюционную последовательность – построить эмпирический сценарий эволюции галактик.

Примером успешного начинания такого рода является эмпирический сценарий эволюции эллиптических галактик. Как я упоминала выше, космологи плохо предсказывают свойства гигантских эллиптических галактик в рамках своих глобальных моделей. Уже давно астрономам было ясно, что надо что-то делать. И вот в 2007 году был опубликован неожиданный и потрясающий наблюдательный результат. По наблюдениям выборки массивных эллиптических галактик на z=2 – то есть 10 млрд лет назад! – было обнаружено, что их размеры раз в 6 меньше, чем размеры близких эллиптических галактик аналогичной массы. При том, что в них ни тогда, 10 млрд лет назад, ни сейчас, ни в промежутке между двумя эпохами не было и нет звездообразования! Теоретики-динамики стали перебирать механизмы, которые могут привести к такому значительному «расширению» галактик без существенного увеличения их массы. Действительно, при «большом мержинге», когда сливаются галактики сравнимых масс (а именно «большой мержинг» настойчиво рекомендовали космологи для производства эллиптических галактик), центральная плотность продукта слияния получается существенно меньше, чем центральная плотность галактик до слияния. Но не в 100 же раз! При большом мержинге размер галактики растет пропорционально массе. Это значит, что чтобы получить из эллиптической галактики размером 1 кпк на z=2 эллиптическую галактику размером 5 кпк на z=0, нужно и массу ее увеличить в 5 раз! А она и на z=2, 10 млрд лет назад, «весила» 300 млрд солнечных масс. То есть если мы начнем сливать эллиптические галактики на z=2 «большим мержингом», мы через 10 млрд лет, на z=0, получим сверхмассивных монстров, которых в природе не наблюдается. Однако, если подвергнуть массивные эллиптические галактики на z=2 множественному «малому мержингу», то есть уронить на большую галактику несколько маленьких спутников, каждый меньше, чем 10% массы хозяйской галактики, у такого «продукта» размер вырастет как квадрат массы. То есть можно получить требуемое значительное увеличение размера галактики ценой весьма скромного наращения массы. В результате такого рассмотрения динамических механизмов и родился «двухэтапный сценарий» формирования и эволюции эллиптических галактик, принятый сейчас большинством специалистов в области внегалактической астрономии. На самой начальной стадии, в первые 1–2 млрд лет эпохи формирования галактик, в результате некоего быстрого события (которое так и хочется назвать «монолитным коллапсом протогалактического облака»), сопровождавшегося интенсивным и эффективным звездообразованием, образовалась достаточно массивная «затравка» – компактная сфероидальная галактика, состоящая только из звезд. Уже к z=2 в этой затравке полностью прекратилось звездообразование (почему – вопрос отдельный). Далее, от z=2 до z=0, на затравку падали спутники этой массивной галактики, изначально вращавшиеся вокруг нее в общем темном гало. Из ошметков спутников формировались внешние части этой эллиптической галактики и – расширялась часть центральная. Такой сценарий удовлетворяет всем наблюдательным данным; но он собран из чисто эмпирических фактов и не имеет прямого отношения к космологической картине эволюции Вселенной.

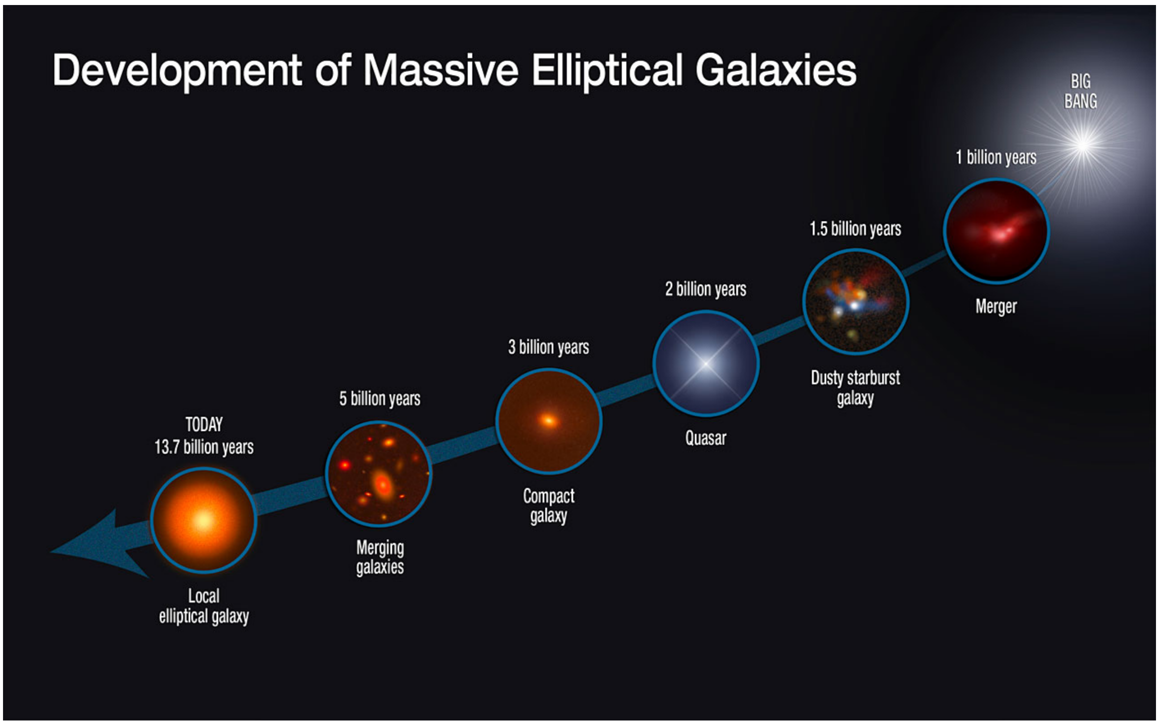


Рис. 3. Современный сценария формирования эллиптических галактик: сначала формируется компактная массивная звездная «затравка», потом на нее во множестве падают маленькие спутники без газа. `Кредит ESA/Hubble & NASA.`

ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Вот в этом месте надо остановиться и уточнить, откуда мы можем знать длительность события звездообразования, если оно произошло 10–12 млрд лет назад, а мы сейчас наблюдаем только его последствия – старое звездное население.

Дело в том, что прямые оценки возраста звезд и звездных населений старше 10 млрд лет весьма неточны – их точность в лучшем случае 1.5 млрд лет, а чаще – 3 млрд лет. Как же мы можем утверждать, что событие звездообразования длилось меньше 1 млрд лет? На помощь приходит измерение химического состава звезд и теория химической эволюции, точнее – теория нуклеосинтеза в разных космических источниках. Основными поставщиками новых тяжелых химических элементов в межзвездную среду являются сверхновые звезды. Однако сверхновые звезды бывают разные, и химия у них тоже разная. Например, если вы посмотрите на свежий выброс сверхновой 2-го типа (core-collapse), то в этом выбросе отношение содержания магния к железу будет в 2–3 раза больше, чем мы наблюдаем на Солнце. А как же Солнце могло получить свой химический состав? На помощь приходят сверхновые типа 1а. Их выброс – почти чистое железо (точнее, никель, но он радиоактивный и весь распадается в железо на шкале нескольких месяцев). На одну сверхновую звезду типа 1а – полмассы Солнца чистого, новенького железа! Замечательная особенность состоит в том, что сверхновые 2-го типа массово взрываются прямо сразу после начала звездообразования – их «родителями» являются очень массивные звезды, которые живут не дольше 10–30 млн лет. А вот «родителями» сверхновых типа 1а являются белые карлики в двойных системах – они могут при рождении быть и не очень массивными и спокойно прожить до вспышки и 300 млн, и 2–3 млрд лет. То есть для каждого события звездообразования вспышки его сверхновых типа 1а *отсрочены* по сравнению со вспышками сверхновых 2-го типа. Теперь представим себе, что звездообразование прекратилось через 100 млн лет после своего начала. Все сверхновые 2-го типа уже взорвались, а сверхновые типа 1а – и не начинали взрываться. Их новое железо уже не войдет в звезды – потому что звездообразование прекратилось. Звездное население, рожденное в этом событии, будет иметь отношение магния к железу, как у выброса сверхновой 2-го типа, то есть в 2–3 раза выше, чем у Солнца. А Солнце имеет свой такой солнечный (именно так!) химический состав потому, что родилось в тонком диске Галактики, где звездообразование идет с примерно постоянной интенсивностью последние 8 млрд лет. И когда исследователи намерили в спектрах гигантских эллиптических галактик отношение магния к железу 2–3 солнечных – и чем массивнее эллиптическая галактика, тем выше отношение магния к железу в ее звездах!, сразу стало ясно, что все эти 100 млрд звезд образовались в короткой мощной вспышке звездообразования и не имеют никакого отношения к дискам спиральных галактик и к их возможным слияниям («большому мержингу»).

ЭВОЛЮЦИЯ ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИК: ВЗГЛЯД НАБЛЮДАТЕЛЯ

ВременЫе шкалы эволюции подсистем дисковых галактик – самый важный параметр, который определяет все. Что по поводу временнЫх шкал мы можем сказать на примере нашей собственной Галактики – самой хорошо изученной из всех дисковых галактик? У нас есть четыре крупномасштабных структурных компонента, и звездный состав трех из них – тонкого диска, толстого диска и звездного гало – мы можем в деталях изучить, измеряя параметры звезд в окрестностях Солнца. Недоступен высокоточным измерениям только балдж, до которого как минимум 6 кпк. Для трех остальных звездных подсистем по соотношению магния и железа в атмосферах звезд и по индивидуальным оценкам возрастов субгигантов мы знаем, что: тонкий звездный диск, с вертикальным размером около 300 пк, начал формироваться около 8–9 млрд лет назад (z=1) и поддерживал примерно постоянный темп звездообразования и постоянный химический состав звезд (!) последние 5–8 млрд лет; толстый диск образовался быстро, за время, меньшее 1 млрд лет, и было это 10–12 млрд лет назад. Да, между окончанием формирования толстого диска и началом звездообразования в тонком диске был временнóй зазор, 2–3 млрд лет, когда звездообразование в нашей Галактике не шло; очевидно, в этот период времени, между z=2 (10 млрд

лет назад) и z=1 (8–9 млрд лет назад) наша Галактика была **линзовидной**, и она начала превращаться в спиральную только после z=1. Что касается звездного гало, то это небольшая по массе и самая старая звездная подсистема – она формировалась в короткой (в коротких?) вспышке (вспышках?) звездообразования, длительностью порядка 100 млн лет, около 13 млрд лет назад.
(На самом деле, я бы с удовольствием сказала: 14–15 млрд лет назад; но космологический возраст Вселенной ограничивает).

Постоянство химического состава звезд в тонком диске Галактики долгое время вызывало крайнее недоумение: если звездообразование идет, то новые тяжелые элементы должны образовываться, поступать в межзвездный газ и входить в следующие поколения звезд. Почему же средняя металличность звезд не увеличивается со временем? Это удивительный факт назвали «парадокс G-карликов», потому что среди G-карликов – звезд массой примерно одна масса Солнца – из-за их долгого времени жизни должны встречаться звезды всех возрастов, от 0 до 8 млрд лет; и то, что у всех G-карликов тонкого диска солнечный химический состав, абсолютно противоречит нашим интуитивным представлениям о ходе химической эволюции. Решение этого парадокса нашли в допущении постоянной аккреции на диск внешнего малометалличного газа – этот внешний газ, размешиваясь в межзвездной среде диска, разбавляет возросшее в результате звездного нуклеосинтеза содержание тяжелых элементов и поддерживает постоянный во времени химический состав звезд тонкого диска.

Для других спиральных галактик необходимость постоянной аккреции внешнего холодного газа вытекает еще из того факта, что текущих запасов газа абсолютно всем спиральным галактикам ближней Вселенной должно хватить только на 2 млрд лет звездообразования. Но это звездообразование уже идет гораздо дольше! Короче, все согласились, что на спиральные галактики все время откуда-то снаружи падает холодный газ, и современные темпы звездообразования примерно равны темпам этой аккреции: сколько газа в единицу времени упало, столько и превратилось в звезды.

Но если на большинство галактик снаружи время от времени падает газ – типичное направление эволюции должно быть из красных в синие! Как у нашей собственной Галактики: сначала был красный диск без звездообразования, потом откуда-то появился источник газа – и начал формироваться тонкий диск, в котором развилась спиральная структура. И произошло это примерно на z=1. Вообще z=1 – это какой-то выделенный момент эволюции: начиная с этого времени, во Вселенной в целом начали падать «космические» темпы звездообразования. Тогда же в галактиках появились бары и вообще возникли хаббловские типы галактик – похоже, что именно с этой эпохи стали формироваться тонкие звездные диски, подверженные гравитационным неустойчивостям, рождающим бары и спирали; а до этого времени звездные диски были толстыми и бароустойчивыми.

Итак, внешняя аккреция газа играет ключевую роль в эволюции спиральных галактик последние 8 млрд лет, благодаря ей спиральные галактики поддерживают формирование своих тонких звездных дисков и вообще говоря, благодаря ей собственно и становятся спиральными. До этого, между z=2 и z=1, все дисковые галактики были линзовидными. Так, может быть, современные линзовидные галактики и являются линзовидными только потому, что для них не нашлось источника аккреции внешнего холодного газа? Они вовсе не превращались в линзовидные из спиральных, как до сих пор все думают. Наоборот, они не смогли превратиться из линзовидных в спиральные, потому что для такого превращения нужна была обильная аккреция внешнего холодного газа, а у них она почему-то не случилась. Например, потому, что в скоплениях галактик все галактики погружены в горячую (рентгеновскую) межгалактическую среду, в которой холодные аккреционные потоки не выживают. Отсюда доминирование линзовидных галактик именно в скоплениях.

Рис. 4. Линзовидная галактика NGC 4111 – тоже наблюдаемая «с ребра». В центре – полярный газово-пылевой диск. Отличная иллюстрация того, что на линзовидные галактики также идет аккреция газа извне. Кредит ESA/Hubble & NASA.

На самом деле, нельзя сказать, что на линзовидные галактики поля никогда не идет аккреция газа извне. Когда в спектральном обзоре ATLAS-3D, включающем полную выборку галактик ранних типов в объеме ближней Вселенной до расстояния 40 Мпк от нас, навели статистику присутствия холодного газа – нейтрального или молекулярного водорода, то оказалось, что в линзовидных галактиках скопления Virgo газ действительно встречается редко. А вот в разреженном окружении половина всех линзовидных галактик имеет заметное содержание холодного газа! Почему же в этом газе не идет звездообразование? Ну, во-первых, иногда идет – только не по всему диску и не в спиралях, а в отдельных кольцевых структурах, которые наблюдаются в четверти всех линзовидных галактик. А во-вторых, именно в линзовидных галактиках поля газ очень часто распределен не в крупномасштабном звездном диске, а в некоторых наклонных структурах. И момент вращения его, соответственно, направлен совсем не так, как момент вращения звездного компонента диска. На рис. 4 приведен пример крайней рассогласованности моментов вращения газа и звезд – в линзовидной галактике NGC 4111, видимой с ребра, газ (и пыль) образует в центре диск, полярный по отношению к звездному диску. Оси вращения газа и звезд в этой галактике перпендикулярны друг другу. Похоже, в таких структурах не идет звездообразование именно потому, что газ, вместо того чтобы спокойно лежать, остывать, образовывать звезды в диске, на самом деле крутится в наклонной плоскости, пересекает гравитационную яму звездного диска, греется и возбуждается при этом ударными волнами. Тогда судьба изначально дисковой галактики поля зависит не только от количества холодного газа, который она может аккрецировать, но и от геометрии аккреционных потоков. Если газ натекает плавно в плоскость – он будет формировать тонкий диск; если же струя бьет под углом – тонкий диск формироваться не будет, и галактика останется линзовидной.

Для развития этой идеи нам совершенно необходимо, наконец, **увидеть аккреционные потоки.** До сих пор мы знаем про аккрецию холодного газа на диски, мы верим в нее – но не видим! Не видим самого процесса аккреции – видим только конечный результат. Ключевой проблемой дальнейшего развития наших представлений об эволюции дисковых галактик является отождествление источников аккреции газа на диски галактик и исследование этих источников – в развертке по времени и в зависимости от внешних условий. Именно в этом направлении следует ожидать прорыва и успеха в построении общих эмпирических сценариев эволюции дисковых галактик.

СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА

Галина Валентиновна ЯКУНИНА

к.ф.-м.н., сотрудник отдела Физики Солнца ГАИШ МГУ, многократно принимала участие в экспедициях по наблюдениям солнечных затмений.

Солнечная корона – один из самых красивых астрономических объектов, наблюдаемых с Земли. Она становится видна только во время полных солнечных затмений. Когда дневное светило постепенно исчезает «в пасти дракона» (точнее, в тени Луны) и гаснет его последний луч, появляется «бриллиантовое кольцо», затем вспыхивает жемчужное сияние солнечной короны.

Это описание полного солнечного затмения, какие видны только тем наблюдателям, для которых диск Луны полностью скрывает диск Солнца.

Во все времена солнечные затмения вызывали у людей и восторг, и страх, и удивление. И в наше время в памяти людей, хотя бы раз наблюдавших это прекрасное явление, остается неизгладимый след на всю жизнь.

В глубокой древности считали, что солнечные затмения происходят потому, что дракон пытается пожрать Солнце. В память об этом период обращения Луны относительно узлов ее орбиты – точек пересечения ею плоскости эклиптики называется драконическим месяцем. Драконический месяц примерно равен 27,2 суткам.

Однако постоянные внимательные наблюдения неба довольно скоро привели жрецов-астрономов к пониманию того, что не дракон, а что-то иное является причиной солнечных затмений.

Самое раннее упоминание о солнечном затмении встречается в источниках древнего Китая (затмение 22 октября 2134 г. до н. э.). В древнем Китае, как и у многих других древних народов, солнечные затмения считались предвестниками великих бедствий.

Первыми научились предсказывать затмения в древнем Вавилоне. Оттуда до нас дошел список затмений, самое раннее из которых произошло в 763 г. до н.э. (эти знания были использованы и звездочетами Древнего Египта). Древние вавилоняне не знали истинных причин затмений, но установив некоторые закономерности в их наступлении, вычислили период их повторяемости (сарос) и научились предсказывать их на много лет вперед.

Умение предсказывать солнечные затмения давало звездочетам не только огромную власть, но и налагало огромную ответственность. Ошибка в предсказании затмения расценивалась как государственное преступление, и, по легенде, допустивших ошибку астрономов казнили.

Солнечное затмение 28 мая 585 г. до н. э. произошло во время битвы между Лидией и Мидией и стало самым известным, поскольку было связано с окончанием пятилетней войны между враждующими островами. Зрелище полного солнечного затмения было настолько ошеломляющим, что обе враждующие стороны сразу прекратили боевые действия и заключили мирный договор. Это затмение предсказал Фалес Милетский, знаменитый греческий астроном и философ.

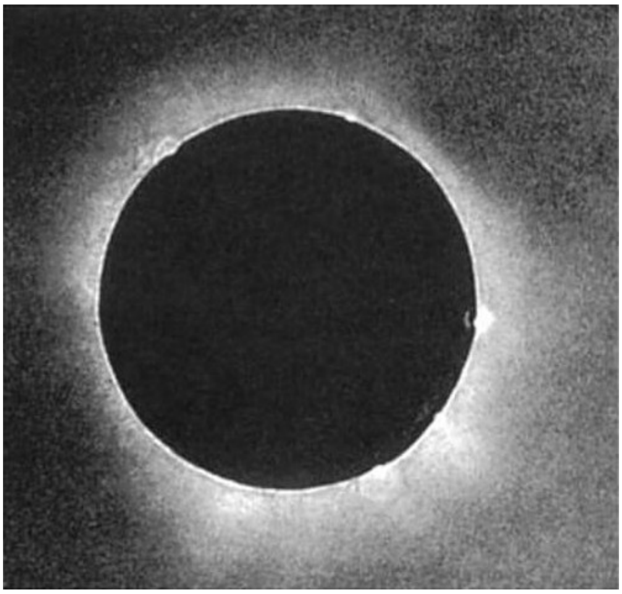
В знаменитом «Каноне затмений» Оппольцера 1887 г. (каноном называют точные таблицы затмений) содержатся данные о 8000 солнечных затмениях за 3368 лет. В среднем за 100 лет происходит 238 затмений Солнца, из них только 66 полных.

Солнечные затмения были и остаются крайне важным событием для астрономов. Они помогают уточнить элементы орбиты Земли вокруг Солнца и Луны вокруг Земли, размеры всех трех космических тел, получить другие данные, например, о температуре и скоростях газа в короне.

Корона – самая внешняя часть солнечной атмосферы. Из-за невысокой яркости ее можно наблюдать только во время полных солнечных затмений. В эти короткие моменты можно видеть серебристо-жемчужное сияние, имеющее лучистую структуру и со всех сторон окружающее Солнце.

Над темным диском Луны видна хромосфера, тонкий слой атмосферы Солнца, светящийся красноватым светом (за что и получил свое название: хромос по-гречески значит «цвет»). Когда крошечная часть солнечного диска еще не исчезла, между горами на краю Луны сияет так называемое «бриллиантовое кольцо».

Изобретение фотографии дало астрономам объективный и документальный метод исследования. Впервые полное солнечное затмение было сфотографировано 28 июля 1851 года.



Фотография полного солнечного затмения 28 июля 1851 года. Получена Иоганом Берковским в Королевской обсерватории в Кёнигсберге (ныне Калининград). Это 9 цикл солнечной активности (начало – 1843, максимум – 1948, конец - 1855 г). Фотография получена после максимума цикла. Продолжительность цикла была 12.4 года. Корона не совсем симметричная, промежуточного вида. Сильно вытянута вправо.

Затмение – явление быстротечное. Наибольшая продолжительность наблюдаемого на Земле затмения – менее 8 минут. И за это время надо успеть получить как можно больше снимков солнечной короны. На фото можно видеть внешнюю атмосферу Солнца (корону) в виде серебристого тумана.

В начале прошлого века Пулковский астроном Алексей Павлович Ганский (1870–1908) обнаружил связь формы короны с магнитными полями Солнца. Общая форма короны и ее структура изменяются в течение цикла солнечной активности, то есть с периодом примерно 11 лет. В начале и в конце цикла, когда пятен на Солнце мало, протяженность и яркость короны невелики, лучи вытянуты преимущественно вдоль экватора. У полюсов в это время отчетливо видны полярные щеточки. В максимуме солнечной активности лучей наблюдается намного больше, они прослеживаются вокруг всего диска Солнца (Луны), имеют различную форму и ориентацию. Это говорит о более сложной структуре магнитных полей. На рис.1 приведены зарисовки солнечной короны, собранные и исследованные А.П. Ганским в моменты максимумов и минимумов солнечной активности. Величина вертикальной линии в центре каждого рисунка короны показывает число солнечных пятен (по рис. 45 из книги Э.В. Кононовича «Солнце – дневная звезда»).

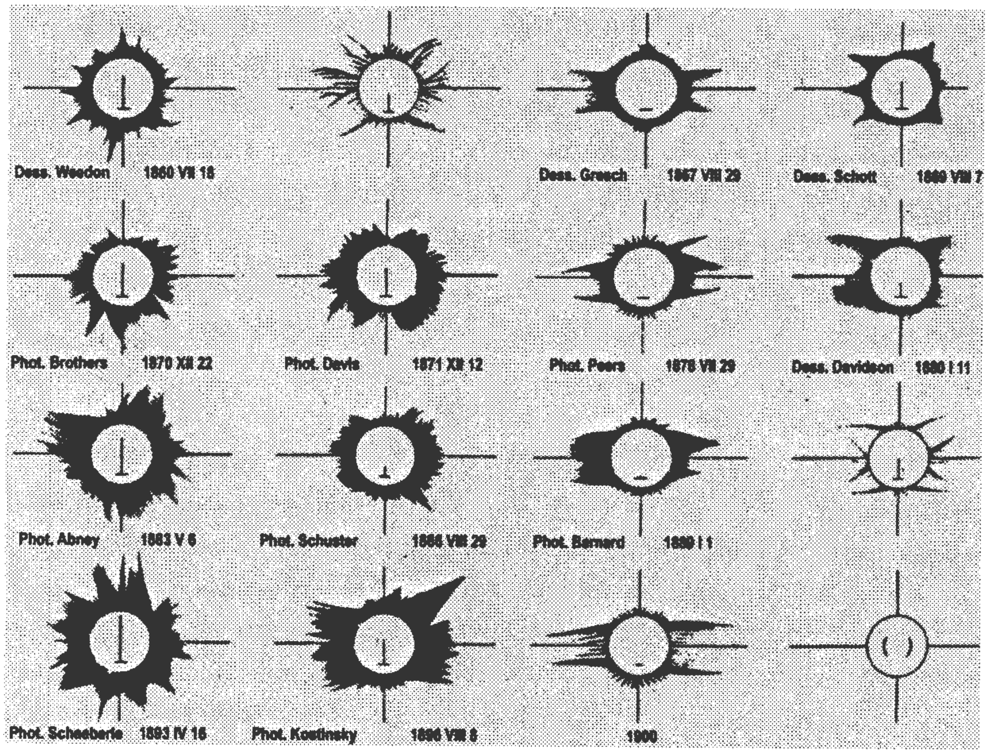


Рис. 1. Различные формы солнечной короны, исследованные А.П. Ганским на разных фазах солнечной активности: в максимуме, минимуме и промежуточных фазах. (По рис.45 из книги Э.В. Кононовича «Солнце – дневная звезда»).

Затмение в Новосибирске 1 августа 2008 г. (http://byaki.net/index.php?newsid=12428) наблюдалось в минимуме солнечной активности. Корона должна была иметь два длинных луча вдоль экватора. Такая форма соответствовала бы минимуму солнечной активности. «В максимуме активности корона, как лохматый человек из лучей, а в минимуме активности она как усатый человек. Сейчас должны были наблюдаться два длинных уса (луча) в экваториальной плоскости. Их не было видно. Это немного необычно», – сказал член-корреспондент РАН В.М. Григорьев.

Аномальная (не соответствующая фазе цикла) форма короны в 2006, 2008, 2009 гг. была связана, возможно, с затяжной фазой спада 23-го цикла (минимум затянулся почти на 3 года). Вопрос о причинах задержки минимума 23 цикла пока остается неясным.

Рис. 2. Полное солнечное затмение 1 августа 2008 г. Тонкая структура короны (с сайта www.MrEclipse.com).

Солнечную корону разделяют на внутреннюю и внешнюю. Внутренняя корона простирается до высоты около 500 000 км и состоит из разреженной плазмы – смеси ионов и свободных электронов. Внешняя корона простирается до высоты более чем в 2 млн. км. В ее состав входят мельчайшие твердые частицы, которые отражают солнечный свет и придают ей светло-желтый оттенок. Температура внутренней короны оценивается примерно в 1 млн. градусов. Природа внешней короны (F- короны) была загадкой. Оказалось, что F-корона – это продолжение в корону зодиакального света, состоящего из пылевых частиц (Х. ван де Хюлст).

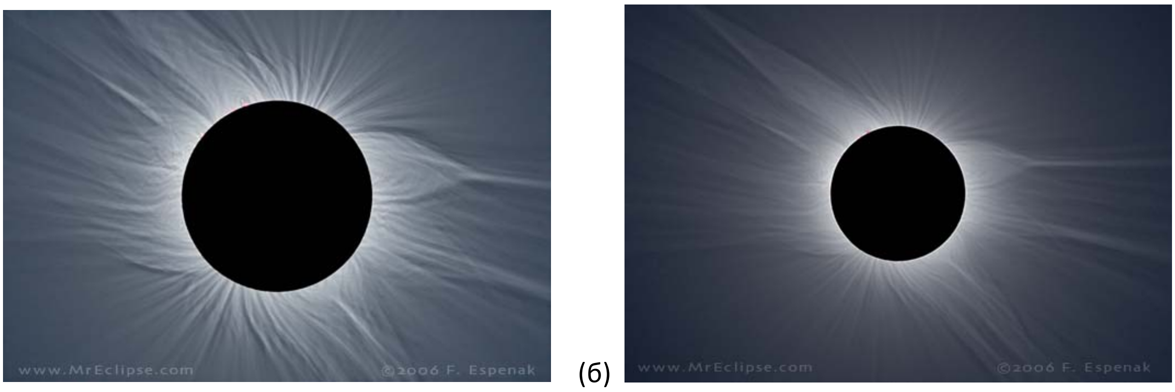
Радиоизлучение Солнца было обнаружено в 1942–1943 гг., но то, что его источником является корона, стало окончательно ясно только во время наблюдения солнечного затмения 1947 г. в Бразилии. Когда Луна закрыла диск Солнца, радиоизлучение продолжало регистрироваться антеннами радиотелескопов. Так было доказано, что радиоизлучение исходит именно из короны Солнца. С тех пор корону Солнца изучают и методами радиоастрономии.

Теперь есть специальные телескопы-коронографы, есть космические аппараты, постоянно наблюдающие Солнце, но многие особенности короны становятся видны только во время полных солнечных затмений.

По фотографиям короны, получаемым во время полных солнечных затмений можно исследовать структуру короны.

Многочисленные снимки, сделанные с разными выдержками, дают возможность «увидеть» структуру короны от внутренних областей до внешних. На этих снимках видно, что корональные лучи расположены в минимуме солнечной активности преимущественно во внутренних областях короны и их интенсивность быстро уменьшается. Получить и внутренние области короны, и внешние, лежащие на расстоянии более пяти радиусов Солнца, на одном снимке позволяют радиальные фильтры. Радиальный фильтр – это нейтральный фильтр с плотностью, убывающей от центра к краю. Пропускание фильтра рассчитывается под конкретное затмение (зависит от яркости короны) и меняется вдоль радиуса фильтра примерно в 10000 раз. Фильтр компенсирует быстрое убывание яркости короны с удалением от края Солнца. Это позволяет фотографировать одновременно, без передержек, и слабые детали короны, и хромосферу. Без использования радиальных фильтров сфотографировать корону на один кадр практически невозможно.

На рис. 3 приведены композитные изображения короны 2006 г., составленные из нескольких ее изображений с разными экспозициями. Видна тонкая структура во внутренней (а) и внешней (б) короне.

(а)


(б)

Рис. 3. Полное солнечное затмение 29 марта 2006 г. Внутренняя (а) и внешняя (б) корона.
Оцените длину корональных лучей в радиусах Солнца на этих снимках.
Данные с сайта http://www.mreclipse.com/SEphoto/TSE2006/TSE2006galleryD.html

По снимкам короны, полученным во время полных затмений с помощью разнообразных инструментов, изучают форму короны, детали её строения, движение лучей, а также измеряют яркость в различных точках короны

Данные, полученные в результате наблюдений во время солнечных затмений на протяжении последних десятилетий, позволили глубже проникнуть в существо солнечных явлений. Наблюдения подтвердили быстрые изменения в короне.

Структура солнечной короны исследуется давно, и на фотографиях видно, что она чрезвычайно сложна и динамична и зависит, с одной стороны, от пространственного распределения активных образований на поверхности Солнца, а с другой – от фазы солнечного цикла. На рис. 1 приведены типичные конфигурации солнечной короны для максимума и минимума цикла, описанные еще в конце XIX в. А. П. Ганским.

Рис. 4. Полное солнечное затмение 11 июля 1991 г.

Рис. 5. Полные солнечное затмение 1998 г. и 1999 г.

На рис. 4 и 5 приводятся фотографии короны в белом свете. Эти фотографии составлены из 20 отдельных изображений. Благодаря этому мы можем видеть структуру внутренней и внешней короны одновременнно на одном снимке.

Как уже упоминалось, в период минимума цикла в короне, как правило, наблюдаются два квазисимметричных радиальных «луча» на восточном и западном лимбах, вытянутые вдоль солнечного экватора; на полюсах наблюдаются «полярные щеточки», или «перья». Внешний вид щеточек долгое время служил наиболее достоверным доказательством существования общего магнитного поля Солнца. В период максимумов корона выглядит «растрепанной», корональные лучи наблюдаются практически на всех широтах. На рис.6 приведены современные фотографии короны в максимуме и минимуме солнечных циклов.

Задание: Отметьте фотографии короны, относящиеся к максимуму и минимуму циклов. Вспомните описание затмения 2008 г., наблюдавшегося в Новосибирске.

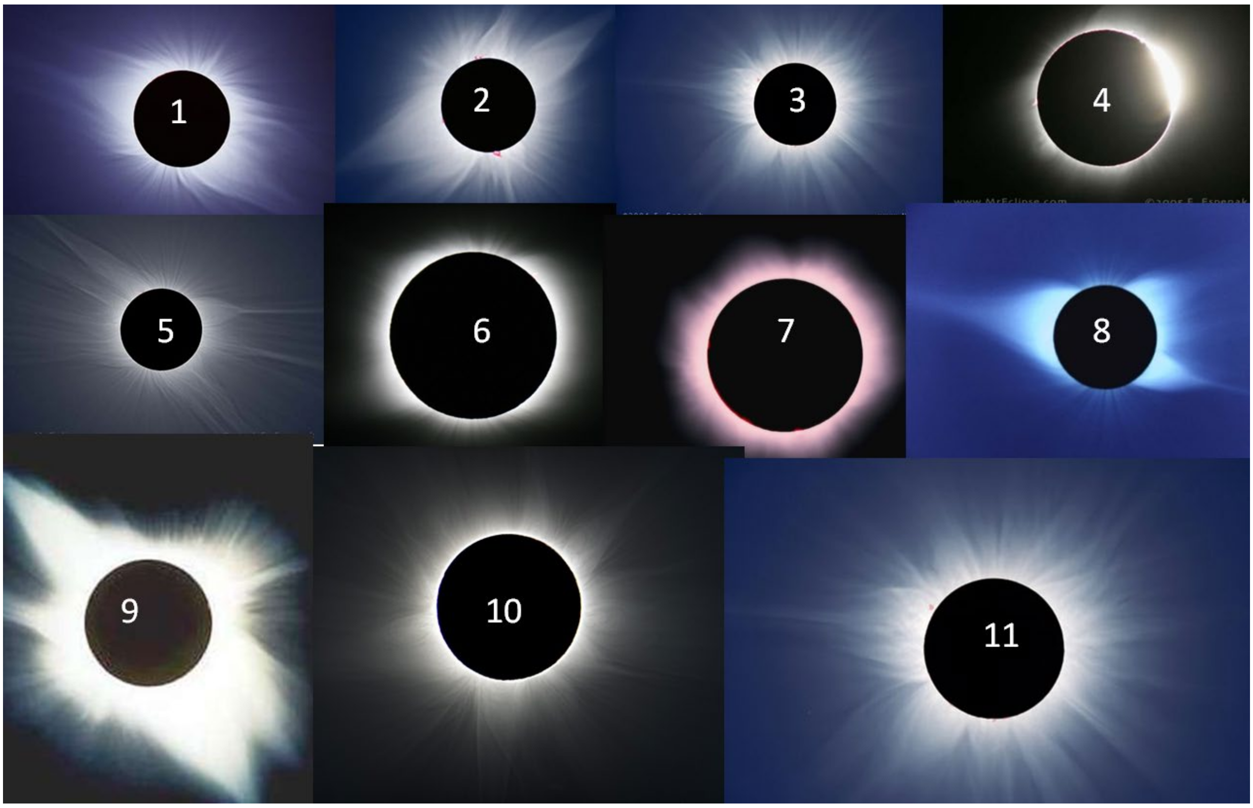


Рис.6. Различные формы солнечной короны. Фотографии короны в белом свете в моменты разных фаз солнечных циклов.

Как видно на рис. 6, форма короны при разных затмениях различна. Она не остается постоянной и меняется в зависимости от фазы цикла солнечной активности. В годы, когда на Солнце много пятен, корона почти круглая. Когда же пятен на поверхности Солнца мало, корона сильно вытянута в плоскости экватора. Корона очень неоднородна. В ней наблюдаются лучи, дуги, отдельные сгущения, полярные щеточки. Детали короны неразрывно связаны с пятнами и факелами, а также с явлениями, происходящими в фотосфере и хромосфере.

Корона Солнца — самая внешняя часть его атмосферы, самая разреженная, самая горячая и самая близкая к нам. Структура короны очень сложная и изменчивая. Яркость короны в миллион раз слабее яркости Солнца, а ее температура очень высокая — 1–2 млн. градусов.

В последние годы было установлено, что солнечная корона распространяется значительно дальше, чем предполагалось ранее. Оптическое излучение короны прослеживается на 10–20 радиусов Солнца. Наиболее удаленные от Солнца части солнечной короны простираются за пределы орбиты нашей планеты.

Корона простирается до орбиты Земли в виде постоянно движущегося потока плазмы – солнечного ветра. Вблизи Земли скорость солнечного ветра составляет в среднем 400– 500 км/с и может достигать 1000 км/с. Распространяясь далеко за пределы орбит Юпитера и Сатурна, солнечный ветер образует гигантскую гелиосферу. Жизнь нашей планеты Земля происходит в атмосфере Солнца!

В 1942 г. советский астроном Н.М. Субботина высказала интересное предположение, что знаменитое изображение крылатого Солнца у египтян, этот их священный и любимый, наравне со скарабеем, символ, есть не что иное, как изображение Солнца с его короной. (Б.А. Воронцов-Вельяминов. «Очерки о вселенной»).

Несколько тысяч лет назад строители египетских пирамид взирали на чудесное и загадочное явление короны, на крылатое Солнце, но приходится признать, что и для нас оно представляет все еще немало загадок.

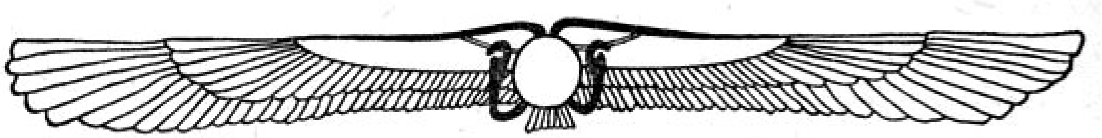


Рис. 7. Крылатое Солнце - священный символ в Древнем Египте, по-видимому, изображало Солнце с протуберанцами и лучами короны.

Рис.8. А это фотографии крылатого Солнца.

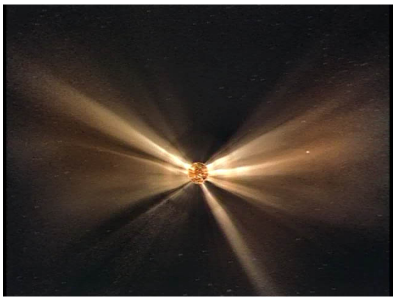


Рис.9. А это изображение получено с космического аппарата SOHO. Изображение составное. В линии железа FeXV 284 Å показана корона над диском Солнца, температура около 2 млн. К. Внешняя корона в ультрафиолетовом свете (излучение кислорода OVI)–- солнечный ветер. А дальше изображение с коронографа – белый свет. Поле зрения около 32 диаметров Солнца, или примерно 45 млн. км.

Как добываются астрономические знания

МОБИЛЬНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ТЕЛЕСКОПОВ РОБОТОВ

Владимир Михайлович ЛИПУНОВ

доктор физ-мат. наук, профессор, заведующий Лабораторией космического мониторинга ГАИШ МГУ В Московском университете читает курсы лекций «Теоретическая астрофизика», «Астрофизика нейтронный заезд и черных дыр», ведет семинары по курсу «Общая астрофизика». Член Европейского астрономического общества. Лауреат Всесоюзного конкурса общества «Знание»

Гамма-всплески — это выбросы гамма-излучения чудовищной мощности. Они порождаются взрывом где-то в космосе, длятся секунды или минуты. Это самые мощные и яркие объекты во Вселенной. Считается, что они происходят при взрывах сверхновых звезд или слиянии двух нейтронных звезд.

Гамма-всплески случайно обнаружили в середине 1960-х годов американские военные спутники. Пять лет информацию о них не разглашали, но в 1970-м году их переоткрыли гражданские астрономы, в том числе советские. Сразу появились сотни гипотез об их природе. Одни ученые считали, что, поскольку всплески очень мощные, это близкие к нам объекты, расположенные в пределах Солнечной системы. Другие уверяли, что, поскольку гамма-всплески не привязаны к каким-то конкретным участкам неба, а появляются с равной вероятностью в любом месте, они возникают очень далеко и идут с окраин космоса.

Сначала гамма-всплески наблюдали только со спутников. Однако в 1999 году наступил поворот: американский астрофизик Карл Акерлоф, работая в Лос-Аламосе, зафиксировал с помощью роботизированного телескопа с ПЗС-матрицей оптические следы гамма-всплесков. Проще говоря, снял их профессиональным цифровым фотоаппаратом.

Узнав об открытии Акерлофа, мы решили тоже построить небольшой телескоп для наблюдения гамма-всплесков.

Но для этого нужен был полностью автономный телескоп, работающий без участия людей, под управлением компьютерной программы. Он должен был уметь сам принимать решения и наводиться на нужные участки неба.

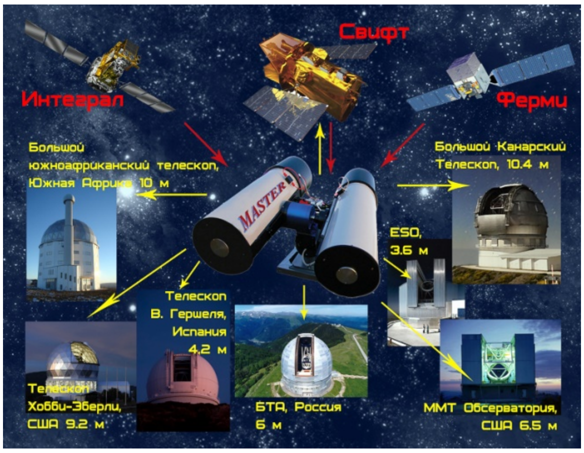
Первый телескоп МАСТЕР (Мобильная Астрономическая Система ТЕлескопов Роботов) построили в 2003 году в Подмосковье, в деревне Востряково под Домодедово. Наблюдения велись шесть лет, и было обнаружено всего два гамма-всплеска.

Гамма-всплески не привязаны к каким-то конкретным участкам неба. Они появляются с равной вероятностью в любом месте, и совершенно непонятно, где их искать, на какой участок неба в данный момент должен смотреть телескоп. Значит, нужна сеть телескопов, причем в местах, где больше возможностей для наблюдения – ведь в Подмосковье всего 20 пригодных для наблюдения ясных ночей в году.
В 2008 году проект МАСТЕР получил государственную поддержку, и началось строительство сети телескопов.

Робот-телескоп МАСТЕР-II-Урал, изготовленный ОАО "Московское объединение "Оптика", установленный в Коуровской астрономической обсерватории в ноябре 2008 года.

В 2011 году сеть телескопов была в основном готова, но и по сей день продолжает развиваться.

Теперь телескопы сети МАСТЕР располагаются под Благовещенском на территории бывшего филиала Пулковской обсерватории, под Иркутском в астрофизическом центре Тунка, в Коуровской обсерватории Уральского федерального университета, под Кисловодском на Кавказской горной обсерватории МГУ, под Москвой. Еще три телескопа работают за рубежом: в Аргентине, в обсерватории Сазерленд в ЮАР и на острове Тенерифе (там 300 наблюдательных ночей в году). Это и называется Мобильной Астрономической Системой Телескопов-Роботов — МАСТЕР.



Во всех пунктах устанавливаются полностью идентичные комплексы МАСТЕР 2, позволяющие одновременно получать 2 изображения в широкополосных фильтрах или двух поляризациях. Каждый телескоп МАСТЕР состоит из двух подзорных труб диаметром 40 см. При наведении на объект в трубы подставляют фильтры-поляроиды, чтобы обнаружить поляризацию гамма-всплеска, то есть направленность электромагнитных волн (согласно гипотезам, она должна быть, но пока ее никто не обнаружил, и это тоже важный научный результат).

Телескопы установлены на быстрой паралактической монтировке, способной наводиться со скоростью 50 градусов в секунду под автоматическим куполом. Они могут работать как в полностью автономном режиме без участия человека, так и в режиме удаленного (по Интернету) управления. Телескопы снабжены третьей осью, позволяющей сводить трубы параллельно при наблюдении быстро изменяющихся объектов синхронно в разных фильтрах или в разных плоскостях поляризации. А при обзоре неба трубы телескопов разводятся, и общее поле зрения оказывается равным 8 квадратных градусам.

Таким образом, сейчас в России работают 8 труб с общим полем зрения 32 квадратных градуса и чувствительностью 20 звездная величина в безлунную ночь за 3 минуты экспозиции.

Обсерватории МАСТЕРа, помимо светосильных телескопов, оснащены камерами сверхширокого поля МАСТЕР VWF (Very Wide Field), способными получать снимки без перерывов со скоростью до 7 кадров в секунду и полем зрения 400 квадратных градусов. В настоящее время сеть МАСТЕР имеет 12 камер сверхширокого поля с общим полем зрения почти 5000 квадратных градусов. Эти камеры предназначены для предварительного и синхронного наблюдения гамма-всплесков при их случайном попадании в поле зрения камер сверхширокого поля. Главная их задача — регистрация собственного оптического излучения коротких гамма-всплесков, пока ещё не наблюдавшихся никем. Предельная звездная величина камер близка к 14 при суммарной экспозиции несколько минут.

Робот-телескоп МАСТЕР II на острове Тенерифе (Канарские Острова, Испания) в обсерватории Тейде Канарского института астрофизики (май 2015 г.)

Для изучения гамма-всплесков астрономы придумали глобальный астрофизический эксперимент. В нем участвуют космические гамма-телескопы, центр дальней космической связи, центр изучения гамма-всплесков НАСА и оптические телескопы на Земле. Обнаружив какое-то событие, космические телескопы посылают в центр НАСА оповещения – алерты. Наземные телескопы считывают алерты и в считанные секунды наводят свои трубы на указанные в них координаты неба, чтобы как можно лучше рассмотреть и сфотографировать объект. Этот эксперимент основан на трех научно-технических революциях, состоявшихся перед началом XXI века: появление глобальной сети Интернет, появление мощных персональных компьютеров, появление быстрых ПЗС-приемников оптического изучения.

Вся сложность состоит в том, чтобы быстро, пока гамма-всплеск еще «жив», сделать 4 шага:

1. Гамма-всплески регистрируются космическими гамма-телескопами (Swift, Fermi, INTEGRAL и др.).

2. После обработки принятого гамма-излучения на борту, координаты всплеска направляются в Центр Международной сети изучения гамма-всплесков, расположенный на сайте НАСА (GCN). Первые два шага занимают примерно от 10 до 40 сек.

3. Полученные координаты рассылаются по сети Интернет по всем наземным телескопам-роботам (0.5 сек).

4. Телескопы-роботы наводятся по полученным координатам (на это тратится от 7 до 40 секунд у небольших телескопов, до полуметра, и от нескольких минут до часов у двухметровых и более телескопов) и получают изображения в оптическом или инфракрасном свете.

Роботизированные телескопы — это не просто телескопы, наводящиеся автоматически по заданной программе. Они способны автономно выбирать стратегию обзора неба, обрабатывать огромные потоки информации в режиме реального времени. В сети МАСТЕР ежесуточный поток информации измеряется терабайтами.

Сеть МАСТЕР является одной из самых эффективных систем мониторинга космических взрывов в мире.

С учетом этой специфики нами впервые создан пакет программ обработки астрономических данных, позволяющий в реальном времени решать следующий комплекс задач:

• определять абсолютные координаты и блеск всех объектов, попавших в кадр размером 4 кв. градусов (и до 1000 кв. градусов в случае камер сверхширокого поля);
• классифицировать объекты по типам (звезды, галактики, астероиды и т.д.);
• обнаруживать транзиентные (быстропеременные) объекты;
• проводить первичную классификацию транзиентных объектов.

Для изучения любых типов объектов создана и поддерживается база данных, в которой собраны результаты всех наблюдений.

"Транзиентное" небо

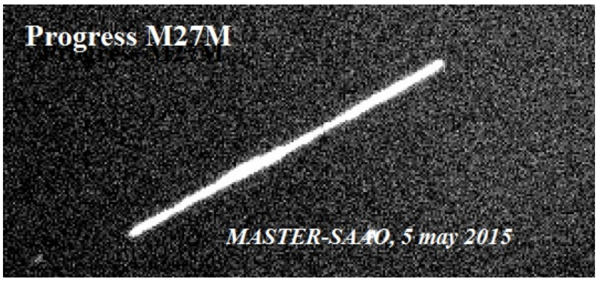
Проект МАСТЕР позволяет нашим ученым изучать масштабные выбросы энергии (гамма-всплески), взрывы новых и сверхновых звезд, расположенных в миллиардах световых лет от Земли. Кроме того, телескопы российской роботизированной сети могут походя, так сказать, отслеживать кометы, астероиды, объекты космического мусора. Так, например, расположенные в Бурятии два однотипных телескопа 40-сантиметрового диаметра оптики по сигналу со спутника способны в течение 20 секунд автономно навестись на точку гамма-всплеска. Максимальное время работы без человеческого технического обслуживания сейчас более месяца. На сегодняшний день сеть телескопов МАСТЕР не имеет аналогов в России.

Одно из преимуществ сети МАСТЕР состоит в идентичности оборудования, что позволяет проводить непрерывные наблюдения одного объекта в течение нескольких суток (в зимнее время) в одной фотометрической системе.

Учеными группы МАСТЕР за 10 лет создано математическое обеспечение, которое позволяет в автоматическом режиме проводить мониторинг ближнего и дальнего космического пространства на всех обсерваториях сети МАСТЕР (Благовещенск, Иркутск, Екатеринбург, Кисловодск, ЮАР, Канарские острова и Аргентина), и получать полную информацию обо всех объектах на каждом изображении через 1–2 минуты после считывания с ПЗС-камеры, включая распознавание движущихся объектов и определение параметров их движения. Список объектов включает в себя:

- оптические источники гамма-всплесков;
- сверхновые звезды различных типов;
- вспышки активных ядер галактик и квазаров;
- вспышки новых и новоподобных звезд в нашей Галактике и в галактике Андромеды;
- вспышки карликовых новых звезд, в том числе выскоамплитудные (катаклизмические переменные);
- переменные звезды типа UV Cet;
- затменные звезды типа Epsilon Aurigae (падение блеска на 5 величин);
- кометы (C/2015 G2 MASTER и C/2015 K1 MASTER);
- астероиды, в том числе потенциально-опасные;
- оптические транзиенты, расположенные на расстояниях от нескольких сотен до миллиарда световых лет.
-

Снимок кометы C/2014 Q2 (Лавджоя), сделанный с помощью телескопа-робота МАСТЕР, расположенного вблизи Байкала



Один из телескопов-роботов Глобальной российской сети МАСТЕР поймал в небе над Южной Африкой взорвавшийся при выводе на орбиту грузовой "Прогресс М27М".

Информация по каждому объекту на кадре включает историю предыдущих наблюдений данной области на всех обсерваториях сети МАСТЕР, а также опубликованные в международных центрах данные каталогов и обзоров.

В последние несколько лет МАСТЕР является лидером по ранним наблюдениям собственного оптического излучения гамма-вслесков и открытию ярких оптических транзиентов. Спектральные исследования открываемых МАСТЕРом объектов проводят крупнейшие наземные и космические телескопы мира:

10,4-м телескоп GCT (Большой Канарский Телескоп, Испания) — научная телеграмма GCN,

- 10-м телескоп SALT (ЮАР),
- 4,2-м WHT (Великобритания-Испания),
- 3,6-м NTT (ESO, Чили),
- 9,2-м HET (США),
- гамма-обсерватории Swift и ИНТЕГРАЛ (кооперация ЕС, России, США),
- 6-м БТА САО РАН (Россия) — научная телеграмма GCN,
- 2,1-м Guillermo Haro (Мексика),
- 1,8-м Copernico telescope (Италия),

1,5-м Fred Lawrence Whipple (США) и др.

Раньше астрономы, наблюдая небо, месяцами и годами ночи напролет сидели в башнях-телескопах. Теперь наблюдение объекта занимает минуты или секунды. Данные о начале гамма-всплеска поступают в центр НАСА через 5 секунд, а еще через 15-20 секунд их подхватывает, к примеру, телескоп МАСТЕР на Урале, потом телескоп на Кавказе и так далее. Сделанные телескопами снимки попадают в архив, откуда их берут «искатели».

Искателями называют людей, которые ищут новые объекты во Вселенной. Часто это волонтеры, увлеченные астрономией и готовые тратить свое время, чтобы помочь науке. Они получают пароль от архива, берут оттуда снимки, сравнивают их, анализируют, и, найдя что-то новое, передают астрономам. Астрономы составляют «астрономическую телеграмму», указывают среди ее авторов искателя и отправляют в Международный центр обработки телеграмм, чтобы «застолбить» приоритет открытия космического объекта. В год МАСТЕР посылает больше сотни таких телеграмм: сейчас он делает половину всех наблюдений гамма-всплесков в мире, а искатели совершают открытия за чашкой кофе. Разделы для волонтеров на сайте архива так и называются: Master-coffee и Master-tea.

В проекте МАСТЕР искателей не хватает. Накапливается очень много информации, и нужны люди, чтобы ее анализировать (только с января по май 2017 г. МАСТЕР обнаружил около 90 транзиетов). Так что, если Вы, прочитав эту статью, всерьез заинтересовались работой системы МАСТЕР и решили попробовать себя в роли искателя, свяжитесь с нами. Мы подробно расскажем, что и как надо делать, проинструктируем, поможем на первых порах. А потом Вы будете уже самостоятельно работать в поте лица и, возможно, время от времени открывать что-то новое во Вселенной.

PS **Когда этот номер журнала был уже практически готов, в журнале Nature вышла статья В.М.Липунова и др. об открытии поляризации собственного оптического излучения гамма-всплесков.**

Впервые в истории исследования гамма-всплесков телескопами МАСТЕР была зарегистрирована поляризация оптического излучения гамма-всплеска в тот момента, когда вспышка еще продолжалась.

Гамма-всплеск GRB160625B оказался одним из самых мощных космических взрывов этого типа, который возник в узком потоке релятивистских частиц, ускоренных электромагнитным полем образующейся на наших глазах на другом конце Вселенной быстровращающейся черной дыры.

Обнаруженная поляризация собственного оптического излучения прямо показала, что жерло самой мощной космической пушки образовано упорядоченным мощным магнитным полем, сформированным образующейся черной дырой.

Этот великолепный астрофизический эксперимент удался благодаря взаимодействию ученых нескольких стран, создавших уникальное роботизированное оборудование в гамма-

лучах, инфракрасном излучении, и единственной в мире глобальной оптической поисковой сетью телескопов-роботов МАСТЕР, созданной по программе развития МГУ имени М.В.Ломоносова при поддержке Московского Объединения «Оптика». Среди соавторов статьи в Nature ученые России, Испании, ЮАР, США, Мексики, Великобритании, Италии, Израиля, Австралии.

Подробнее об этом открытии можно прочесть на сайтах: http://www.sai.msu.ru/news/2017/07/27/grb_polar.html и http://www.pereplet.ru/nauka/7083.html#7083

Астрономия и общество

ЗВЕЗДА КЕНТАВРА

Николай Николаевич САМУСЬ

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела нестационарных звезд и звездной спектроскопии Института астрономии РАН, руководитель группы переменных звезд ИНАСАН, главный редактор Общего Каталога Переменных Звезд, сопредседатель Международной общественной организации «Астрономическое общество». Преподает в МГУ, выступает с научно-популярными лекциями.

Начнем со стихотворения великого русского писателя и поэта Ивана Алексеевича Бунина (1870–1953). В стихотворении есть загадки.

Тезей

Тезей уснул в венке из мирт и лавра.
Зыбь клонит мачту в черных парусах.
Зеленым золотом горит звезда Кентавра
На южных небесах.

Забыв о ней, гребцы склоняют вежды,
Поют в дремоте сладкой… О Тезей!

Вновь пропитал Кентавр ткань праздничной одежды
Палящим ядом змей.

Мы в радости доверчивы, как дети.
Нас тешит мирт, пьянит победный лавр.
Один Эгей не спал над морем в звездном свете,
Когда всходил Кентавр.
1907

О чем речь, в целом понятно. В мифе о Тезее (сейчас чаще пишут не Тезей, а Тесей) герой, возвращаясь в Афины с Крита после победы над Минотавром, уснул и не заменил черные паруса своего корабля на белые, победные. Царь Эгей решил, что сын погиб, и бросился в море. Беду принесла звезда Кентавра, как когда-то яд, добытый кентавром Нессом, погубил Геракла, надевшего одежду, пропитанную этим ядом.

О какой звезде идет речь? На небе, собственно, два Кентавра. Это созвездия Стрельца (рис. 1) и Кентавра (раньше его предпочитали называть созвездием Центавра; рис. 2). Рассматривая старинные карты, помните, что это как бы изображения звездного глобуса снаружи, а мы смотрим на небо «изнутри», и для нас левая и правая стороны карты меняются местами. Легенды разнятся, но чаще всего считают, что Стрелец – это кентавр Кротос, а Центавр – кентавр Хирон. В созвездии Стрельца нет выделяющихся по блеску «золотых» звезд, а в созвездии Кентавра есть. Это Ригель Кентаурус (официально принятое Международным астрономическим союзом в 2016 г. название этой звезды), или Толиман. Слова «Ригель Кентаурус» значат «копыто Кентавра»; на приведенной карте это копыто – самое правое, звезда чуть выше его. Чаще всего звезду называют, впрочем, не по имени, а просто α Кентавра. В конце заметки мы коротко расскажем об этой интересной звездной системе. В научно-популярных книгах на английском языке звёзды α Кентавра и β Кентавра (другое переднее копыто) часто называют “pointers”, то есть «указатели»: проведенная через них линия указывает на созвездие Южного Креста. В современных звездных каталогах α и β Кентавра – звезды несколько ярче 0-й и ярче 1-й величины.

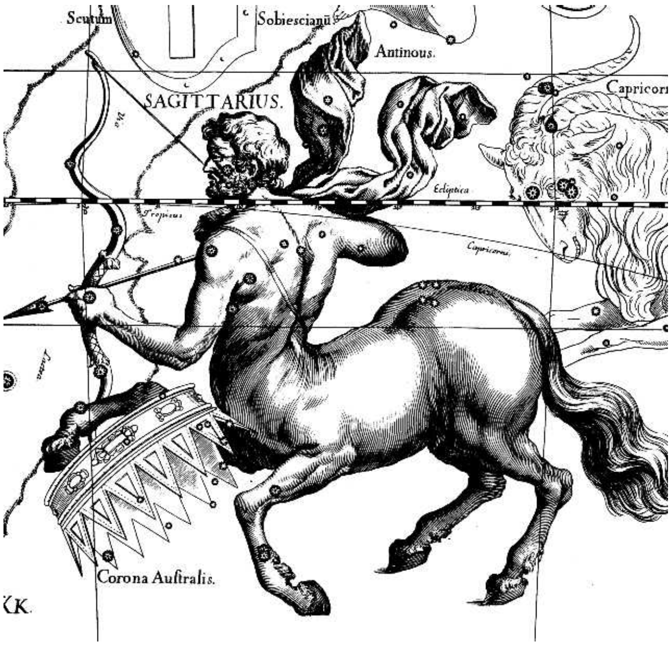


Рис. 1. Созвездие Стрельца (Sagittarius) на старинной звездной карте. Север вверху, восток справа. Видны также созвездия Южной Короны (Corona Australis), Щита (Щит Собесского, Scutum

Sobiescianum) и голова Козерога (Capricornus). Отмечено также ныне не существующее созвездие Антиноя (Antinous). Полосатая линия – эклиптика, Стрелец – созвездие зодиакальное.

Рис. 2. Созвездие Кентавра на старинной звездной карте. Север вверху, восток справа. У задних ног Кентавра – созвездие Южного Креста (Crux), слева – Гидра (Hydra). Слева внизу – не существующее ныне созвездие Дуб Карла (Robur Carolinum).

Вроде бы звезду Кентавра мы нашли. Но вот первая загадка. Склонение α Кентавра составляет минус 61 градус, и ее не видно ни на широте Афин (38°), ни на широте Крита (35°). Как могла она светить кораблю Тесея? Но вспомним, когда было дело. Полагают, что Тесей жил не то в XIII веке до нашей эры, не то на рубеже X–IX веков до н.э. В те времена полюс мира был не около звезды α Малой Медведицы, как сейчас, а ближе к звезде α Дракона, и Кентавр на широте Афин над горизонтом поднимался. Если это не случайное озарение И.А. Бунина, то удивительно, какими знаниями его всего за 5 лет наделила Елецкая гимназия, где ему к тому же, как сообщают биографии, не давалась математика. Потом он из гимназии ушел и занимался с частным учителем в основном гуманитарными предметами.

Вторая загадка заинтересовала лично меня намного раньше, чем первая. Строки «Зеленым золотом горит звезда Кентавра на южных небесах» попались мне на глаза задолго до того, как я прочитал стихотворение целиком: они были в какой-то публикации использованы как эпиграф. Впервые я увидел звезду α Кентавра в 1985 году в Аддис-Абебе. Хотя в те времена город был по ночам освещен не очень хорошо, все-таки это город, и я рассматривал новые для меня звезды и созвездия в театральный бинокль. Когда я посмотрел на α Кентавра, меня поразил ее странный цвет. Пожалуй, лучшего описания этого цвета, чем бунинское «зеленое золото», и не придумать. В чем причина такого цвета, я постараюсь объяснить ниже. Но меня не оставляла мысль, что эпитет «зеленое золото» поэт не мог придумать, если сам он α Кентавра не видел. Вскоре я узнал, что Бунин путешествовал по южным морям, бывал на Цейлоне, где звезда α Кентавра прекрасно видна, и как-то успокоился. Но на Цейлоне Бунин побывал года через три после написания «Тезея»! В 1907 г. он совершил со своей спутницей жизни, В.Н. Муромцевой, путешествие в Сирию, Палестину и Египет. Из Египта он мог увидеть α Кентавра совсем низко над горизонтом; вероятно, как и я, он смотрел в бинокль. И год под стихотворением – как раз 1907. Или это опять поэтическое озарение?

Так почему же α Кентавра светит «зеленым золотом»? Звезда эта тройная. Главная пара содержит неплохой двойник нашего Солнца спектрального класса G2V, его видимая величина –0.01. Вторая звезда пары имеет видимую величину +1.34 и спектральный класс K1V. Компоненты пары движутся по довольно вытянутой орбите с периодом 79 лет и большой полуосью 18″. В театральный бинокль мы видим звезды пары, в общем, как одну звезду. А цвет действительно должен казаться странным. Главная звезда – желтая, ее спутник – скорее красный. При наблюдении звездной пары, компоненты которой сильно отличаются по цвету, наше восприятие играет с нами шутки. Разглядывая яркие звезды на небе, вы вряд ли назовете хоть одну из них зеленой. А при наблюдении в телескоп тесных звездных пар одна из звезд пары вполне может показаться зеленой! Именно так я объясняю «зеленое золото» моего (и бунинского?) восприятия α Кентавра. При наблюдении двух звезд пары вместе суммарная звездная величина окажется равной –0.27, и мы наблюдаем α Кентавра как третью по блеску звезду ночного неба, после Сириуса и Канопуса. По абсолютной звездной величине оба компонента пары α Кентавра – звезды довольно заурядные, но они очень близко от нас в пространстве, поэтому мы их видим яркими.

А вот ближайшей к нам среди всех известных звезд является третий компонент системы α Кентавра, Проксима (Ближайшая) Кентавра, звезда 11-й величины, отстоящая от главной пары более чем на 2 градуса. Это красный карлик спектрального класса M5.5Ve. Буква “e” в обозначении спектрального класса Проксимы означает, что в ее спектре наблюдаются эмиссионные линии. Красные карлики с эмиссионными спектрами, как правило, оказываются вспыхивающими переменными звездами. Действительно, Проксима – известная вспыхивающая звезда. В Общем каталоге переменных звезд она носит имя V645 Кентавра, в синих лучах амплитуда ее вспышек превышает целую звездную величину. По данным канадского микроспутника MOST, непрерывно наблюдавшего Проксиму недели подряд, иногда в сутки происходит сразу несколько довольно сильных вспышек.

В 2016 г. в престижном журнале “Nature” была опубликована статья большого коллектива авторов (Г. Англада-Эскуде и др.), в которой сообщалось об открытии у Проксимы Кентавра планеты в зоне, пригодной для обитания. Это послужило укреплению замыслов отправки к Проксиме одного из самых первых межзвездных космических зондов. Наверное, ближайшая звезда – подходящая цель для начала полетов к звездам, но обольщаться насчет обитаемости нашего тесного соседа, активной вспыхивающей звезды, не стоит. Представляете, что было бы, если бы наше Солнце каждый день, а то и по несколько раз на день, начинало жарить вдвое сильнее!

ПРИЧУДЫ ЛУНЫ, ИЛИ КАК АВРААМА ЛИНКОЛЬНА ОБВИНЯЛИ ВО ЛЖИ .

Вера Львовна Штаерман
секретарь Международной общественной организации «Астрономическое Общество»

Авраам Линкольн, 16-й президент Соединенных Штатов Америки, славился своей абсолютной честностью. Но однажды его чуть было не обвинили в обмане.

Вот как было дело.

Вечером 29 августа 1857 г. в городке Виргинз Гроув (штата Иллинойс) имело место собрание некой религиозной общины. Когда собравшиеся расходились (около 9 вечера), луна ярко светила на абсолютно чистом небе. А около 11 вечера недалеко от места собрания произошло убийство.

Линкольн, тогда член коллегии адвокатов, был многим обязан семье человека, которого обвинили в этом убийстве, и взялся защищать его в суде.

Собственно говоря, все обвинение держалось на показаниях одного свидетеля, который утверждал, что, находясь «футах в 150 от того места», т.е. метрах в 50 от места убийства, ясно видел «при свете почти полной Луны, которая стояла высоко в небе», как обвиняемый ударил жертву свинцовой трубой.

Во время процесса Линкольн, заставив свидетеля дважды повторить это утверждение, предъявил присяжным «Сельский альманах» где, в частности, указывалось время восхода и захода Солнца и Луны на каждый день. Согласно «Альманаху», в день убийства Луна «шла низко» и в 11 вечера уже была у самого горизонта, так что трудно было что-либо «ясно видеть» при ее свете. То есть свидетель лгал. И жюри присяжных после краткого совещания признало обвиняемого невиновным.

Но ощущение противоречия осталось, и чем дальше, тем сильнее тревожило умы. Во время собрания Луна «ярко светила». Это помнили многие. Так как же она вскоре после конца собрания могла оказаться «у самого горизонта»?

Даже биографы Линкольна, доброжелательно к нему настроенные, высказывали сомнение: может быть, он, стремясь спасти ни в чем не повинного человека и члена семьи, которой был многим обязан, один раз в жизни погрешил-таки против истины?

А уж недруги Линкольна неоднократно, в частности, во время его президентских кампаний, пытались использовать историю с альманахом против него. Выдвигались самые разные предположения: Линкольн предъявил суду альманах не за тот год; альманах был открыт не на той странице; Линкольн просто подделал Альманах: исправил несколько цифр и распечатал изготовленные им самим страницы в местной типографии. И так далее.

«Сельский альманах» за 1857 г. удалось разыскать (хотя тот конкретный экземпляр, которым пользовался Линкольн, не сохранился). И, действительно, Альманах утверждал, что 29 августа 1857 г. Луна «шла низко», в 7:44 вечера прошла через меридиан, а в 11:00 была только на 8^{o} выше горизонта. Так, может быть, в «Альманахе» была допущена ошибка?

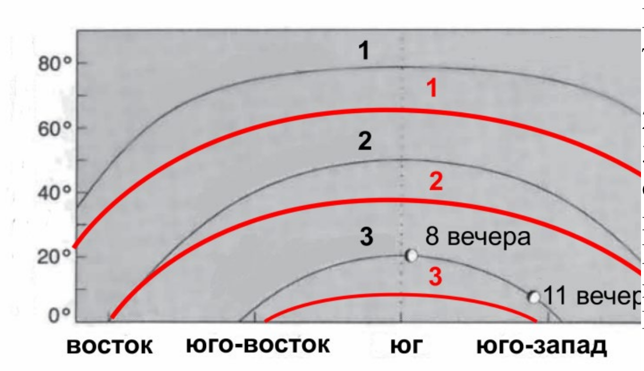
Вообще говоря, вопросы движения Луны по небу и, в частности, время ее восхода и захода в тот или иной день находятся в компетенции астрономии. И биографы Линкольна обратились к астрономам. Астрономы все посчитали и ответили, что никакого противоречия нет: Луна, действительно, «ярко светила» во время собрания и, действительно зашла в то самое время, которое было указано в «Сельском альманахе».

Дело в том, что время, которое Луна на данной географической широте проводит над горизонтом, и ее высота на небе зависят в основном от ее склонения.

Вспомните, как ведет себя Луна зимой и летом. Зимой, когда Солнце находится к югу от экватора и «идет низко», Луна в фазах, близких к полнолунию, противостоит ему, то есть «идет высоко» по северной части эклиптики. Тогда она видна на фоне созвездий Близнецов и Тельца и светит практически всю ночь. А летом Солнце и полная Луна как бы меняются местами: Солнце бывает на небе долго, а Луна «идет низко» мимо созвездий Скорпиона, Змееносца (созвездие Змееносца не считается зодиакальным, хотя частично находится на эклиптике и Солнце и Луна проходят и на его фоне), Стрельца и Козерога и быстро заходит за горизонт. Но это еще не все.

Эклиптика наклонена к плоскости небесного экватора под углом 23,5°, а орбита Луны наклонена на 5^{o} к плоскости эклиптики, так что когда наклон земной оси (23.5^{o}) складывается с наклоном лунной орбиты к эклиптике (5^{o}), склонения Луны могут принимать, так сказать, экстремальные значения. Луна пересекает эклиптику в двух точках – так называемых узлах лунной орбиты. Узел, после прохождения которого Луна поднимается над эклиптикой, называется восходящим узлом, а противоположный узел – нисходящим. Максимального отклонения к северу или к югу от эклиптики Луна достигает в 90° от каждого узла. (В это время Луна даже «касается» таких не зодиакальных созвездий, как Возничий, Кит, Ворон, Орион, Секстант). Но узлы лунной орбиты не неподвижны. Из-за прецессии лунной орбиты они перемещаются по эклиптике навстречу Луне (т.е. с востока на запад), совершая полный оборот за 18,61 лет. Когда восходящий узел лунной орбиты совпадает с точкой весеннего равноденствия, нисходящий узел оказывается в точке равноденствия осеннего. В этом случае максимального северного удаления от эклиптики Луна достигнет над самой северной ее точкой. Тогда максимальная Луны высота $h_{\max}$ будет равна 90° минус географическая широта места наблюдений плюс 23,5° и плюс 5° (62,5° для широты Москвы). А при отклонении на максимальный угол к югу от самого южного участка эклиптики это будет совсем низкая Луна: $h_{\min}$ = 90° – географическая широта места наблюдений – 23,5° – 5° (5,5° для широты Москвы 55° 45' 7").

29 августа 1857 г. склонение Луны (в тот день не «почти полной», а на 2 дня старше первой четверти) равнялось -28.6^{o}. На широте городка Виргинз Гроув (40^{o} 10') Луна прошла через меридиан в 7:44 вечера на высоте 20^{o}, в 11 вечера была примерно в 8^{o} над горизонтом и зашла в 0 часов 04 минуты 30 августа. На путь от меридиана до горизонта ей потребовалось немногим больше 4 часов.



На рисунке показана приблизительная траектория движения:
1 – "высокой" Луны,
2 –Луны на экваторе,
3 – "низкой" Луны;
серая линия – для широты Виргинз Гроув,
красная – для широты Москвы.
Горизонтальная ось – страны света,
вертикальная – высота Луны над горизонтом.
Рис. В.Н.Семенцова

Такая ситуация, как мы уже упоминали, повторяется каждые 18,6 лет, как и солнечные затмения (известный Метонов цикл), и по той же причине – из-за смещения узлов лунной орбиты вдоль эклиптики. Последний раз Луна «шла низко над южным горизонтом» в 2006 г. В следующий раз это произойдет в 2025. Так что поживем – увидим.

А мораль сей басни такова: астрономию надо знать, хотя бы элементарную. Иначе можно попасть в неловкое положение.

А.Куинджи. Дарьяльское ущелье. Лунная ночь. 1890-1895.

ОБ ОДНОЙ ОШИБКЕ, КОТОРУЮ НЕ ЗАМЕЧАЛИ НЕСКОЛЬКО ДЕСЯТИЛЕТИЙ

Ирина Константиновна ЛАПИНА

сотрудник Пресненской обсерватории и музея ГАИШ МГУ

Во многих публикациях о Московском планетарии приводят фото, сделанное в июне 1929 г., где на фоне строящегося здания «звездного дома» стоят три человека. Подписи гласят, что это К.Н. Шистовский, выдержавший конкурс на замещение должности директора и возглавивший первый планетарий страны еще за год до его открытия, и архитекторы – авторы проекта этого необычного здания – М.О. Барщ и М.И. Синявский.

То, что крайний слева – это Константин Николаевич Шистовский, выпускник астрономического отделения Московского университета, уже защитивший к этому времени диссертацию на степень кандидата физ.-мат. наук, в 1936 г. получивший звание Героя Труда за проведение гравиметрических работ на Курской магнитной аномалии, сомнения не вызывает. Но кто же Барщ, а кто Синявский?

Михаилу Исааковичу Синявскому в 1929 г. было от роду 34 года, а Михаилу Осиповичу Барщу и вовсе лишь 25 лет. Даже плохое качество старой фотографии не может ввести в заблуждение в отношении возраста персонажей – крайний справа еще довольно молодой, а вот стоящий в центре невысокий человек, наверное, вдвое старше. И это обескураживает: значит, улыбающийся седовласый солидный мужчина в центре группы никак не может быть ни одним из названных архитекторов. А в последнее время можно найти публикации в электронных изданиях, где указывают, что именно человек в центре этой группы — М.О. Барщ. И откуда такая уверенность?

Однако если поискать внимательнее и тщательнее, то всемогущий Интернет выдает настоящие фото Барща и Синявского, и становится ясно, что рядом с Шистовским стоят совершенно другие люди.

Поиски в разрозненных подборках старых фотографий, хранящихся в частных коллекциях, увенчались успехом и не оставили сомнений: рядом с К.Н. Шистовским на фоне строящегося планетария стоят представитель фирмы «Карл Цейс», шеф-монтер Пауль Ланге и первый механик Московского планетария С.В. Лебедев. Об этом говорит надпись на обороте двух фотографий (фото 2 и фото 3), на которых мы видим их уже в круглом зале около аппарата. Лебедев, работавший прежде киномехаником, был принят в штат планетария летом 1929 г.

Музеи и коллекции – в том числе и частные – хранят немало имен и событий из истории астрономии и астрономических организаций – профессиональных, любительских и просветительских. Значит, историко-архивные изыскания принесут еще немало интересных открытий.

Фото 1. К.Н. Шистовский, ПаульЛанге, С.В. Лебедев

Фото 2. Монтаж оптико-механического аппарата «планетарий». Слева Пауль Ланге, на лестнице С.В. Лебедев

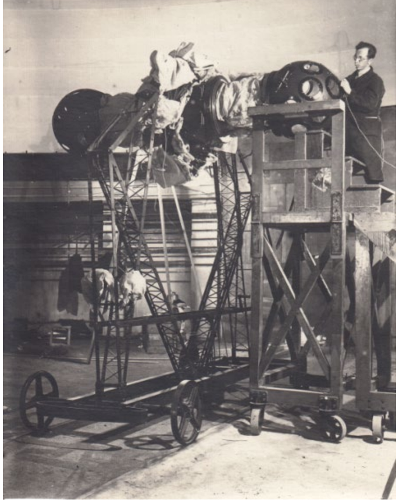


Фото 3. С.В. Лебедев на монтаже аппарата

Фото 4. М.И. Синявский. 1950-е гг.

Фото 5. Группа архитекторов Госплана РСФСР, 1930 г.
Крайний слева – М.О. Барщ,
справа в профиль – Г.А. Зундблат,
тоже принимавший участие в разработке проекта здания планетария

Фантастика

МАШИНА, КОТОРАЯ ВЫИГРАЛА ВОЙНУ

Айзек АЗИМОВ
Перевод с английского В.Л. Штаерман

Праздновать будут еще долго. Атмосфера праздника чувствовалась даже в пустоте и тишине подземных помещений Мультивака.

Да, здесь было пусто и тихо. Впервые за десять лет техники не бегали по коридорам, не возились с огромным компьютером. Странные узоры слабых мигающих огоньков погасли. Потоки вводимой и выводимой информации иссякли.

Ненадолго, конечно: проблемы мирного времени тоже будут требовать быстрых решений. Но сейчас, на один день, возможно на неделю, даже Мультивак мог отпраздновать великое событие, отдохнуть.

Леймер Свифт снял форменную фуражку, в которой всегда чувствовал себя неуютно, и взглянул в пустой главный проход гигантского компьютера. Потом опустился в вертящееся кресло одного из операторов и расслабился.

– Мне даже будет не хватать всего этого, в каком-то смысле, – сказал он. – Трудно теперь припомнить время, когда не было войны с Денебом. Кажется просто неестественным, что мы будем жить мирно и без страха смотреть на звезды.

Два человека, которые находились в этом маленьком помещении вместе с исполнительным директором Солнечной Федерации, были гораздо моложе его. Ни у того, ни у другого не было такой седины в волосах, ни один не выглядел настолько уставшим.

Джон Хендерсон, с трудом сдерживавший чувство облегчения, сказал:

– Они уничтожены. Уничтожены! Я повторяю себе это снова и снова и все еще не могу поверить. Мы столько говорили об этом все эти долгие годы, а угроза постоянно висела над Землей и ее мирами, над каждым из людей. И вот мы живы, а они разогнаны и уничтожены. Они нам больше не опасны, и никогда не будут опасны.

– Благодаря Мультиваку, – сказал Свифт, безмятежно глядя на сурового Яблонского, который все годы войны был главным интерпретатором научного оракула. – Не так ли, Макс?

Яблонский пожал плечами. Он автоматически опустил руку в карман за сигаретами, и тут же ее отдернул. Из тысяч обитателей тоннелей Мультивака только он имел право на курение, но последнее время старался пользоваться этим правом как можно реже.

– Ну, так они говорят, – сказал он, указывая большим пальцем наверх.

– Ревнуете, Макс?

– Потому что они славят Мультивак? Потому что Мультивак – величайший герой этой войны? –

Скуластое лицо Яблонского выразило подобающее пренебрежение. – Мне-то что за дело? Если им так хочется, пусть Мультивак будет машиной, которая выиграла войну.

Хендерсон искоса посмотрел на своих собеседников. В этом мирном уголке обезумевшего мегаполиса, среди интерлюдии между опасностями войны и трудностями мирного времени, в то краткое мгновение, когда они могли расслабиться и вкусить покой, он сознавал одно: тяжесть лежащей на нем вины.

И вдруг он почувствовал, что больше не может ее нести. Во время войны – да, но теперь… Хендерсон сказал:

– Мультивак тут ни при чем. Это просто машина.

– Большая машина, – заметил Свифт.

– Значит, просто большая машина. Не лучше данных, которые в него вводили.

Он вдруг сам испугался своих слов и замолчал.

Яблонский посмотрел на него, опять стал шарить в кармане в поисках сигарет. И опять вынул пустую руку.

– Вам виднее. Вы представляли данные. Или Вы хотите с сказать, что это Ваша заслуга?

– Какая заслуга, – зло сказал Хендерсон. – Что вы знаете о данных, с которыми должен был работать Мультивак. Данные, пережеванные сотнями подсобных компьютеров здесь, на Земле, на Луне, на Марсе, даже на Титане? Титан всегда с задержкой, всегда такое чувство, что его цифры приведут к неожиданным отклонениям.

– Кто угодно сошел бы от этого с ума, – заметил Свифт с ласковым сочувствием. Хендерсон покачал головой.

– Дело было не только в этом. Признаюсь, восемь лет назад, когда я занял должность старшего программиста, мне было неспокойно. Но тогда везде царило оживление. Война еще была похожа на игру. Эдакое приключение без реального риска. Мы еще не дошли до той стадии, когда кораблями вынуждены были управлять люди, а межзвездные деформаторы пространства, если их точно нацелить, могли мгновенно поглотить планету. А потом, когда начались настоящие трудности… Вы ничего об этом не знаете, – зло добавил он.

– Так скажите нам, – предложил Свифт. – Все уже позади. Мы победили.

– Да, – Хендерсон кивнул головой. Думать надо об этом: Земля победила, так что все к лучшему. Просто все эти данные были бессмысленны.

– Бессмысленны? В прямом смысле слова? – спросил Яблонсикй.

– Именно. А чего Вы ждали? Вы ничего не понимаете, потому что не вникали в это, как я. Вы, Макс, никогда не покидали Мультивак, а Вы, господин директор, правительственную резиденцию. Только изредка инспектировали что-нибудь, и тогда Вам показывали то, что они хотели, чтобы Вы увидели.

– Я не так плохо это понимал, как Вы могли думать, – заметил Свифт.

– А понимали Вы, насколько данные о человеческих ресурсах, вообще все данные, стали ненадежны и неверны под конец войны? Начальство, и военное, и гражданское, заботилось только о том, чтобы показать собственную важность, так сказать. Старались маскировать то, что было плохо и выпячивать то, что было хорошо. Машины машинами, а программисты и интерпретаторы результатов думали о собственной шкуре и о том, как бы выдвинуться. И с этим ничего нельзя было поделать. Я пробовал, но у меня не получилось.

– Конечно, – ласково утешил его Свифт. – Я знаю, что Вы делали, что могли.

На сей раз Яблонский закурил.

– И, тем не менее, Вы передавали данные Мультиваку. И ничего не говорили о ненадежности.

– А как я мог сказать? А если бы сказал, как Вы могли рискнуть мне поверить? Все наши действия направлял Мультиваке. Он был нашим главным оружием. Денеб ничего подобного не имел. В самые страшные минуты люди не падали духом, потому что верили в Мультивак.

– Это верно, – заметил Свифт.

– А если бы я сказал вам, что данные недостоверны, что бы Вы могли сделать? Только выгнать меня и заменить кем-то. А что этот кто-то стал бы делать?

– А что делали Вы? – спросил Яблонский.

– Ну, раз уж мы победили, могу признаться: я исправлял данные.

– Как? – поинтересовался Свифт.

– Интуиция, я думаю. Я возился с данными, пока они не начинали выглядеть прилично. Сначала мне было страшно. Я менял что-то тут, что-то там, убирал то, чего в реальности никак не могло быть… Но когда небеса не разверзлись, я осмелел. Я просто писал данные, как надо. Я даже сделал собственную программу для приложения к Мультиваку, и оно готовило для меня данные.

– Случайные числа? – спросил Яблонский.

– Нет. Я вводил ряд необходимых отклонений.

Яблонский неожиданно улыбнулся, его темные глаза сверкнули из-под опущенных век.

– Трижды мне сообщали о несанкционированном использовании приставки, и трижды я пропускал это мимо ушей. Если бы это имело значение, я проследил бы за использованием приставки, поймал Вас, Джон, и понял бы, что Вы делаете. Но в то время ничто, касающееся Мультивака, уже не имело значения. Так что Вы ускользнули.

– Что значит, не имело значения? – подозрительно спросил Хендерсон.

– Ничего. Думаю, если бы я сказал Вам тогда, я избавил бы Вас от лишних волнений. Но, с другой стороны, если бы Вы сказали мне, что Вы делали, Вы избавили бы от лишних волнений меня. Почему Вы считали, что Мультивак будет работать исправно, какие бы данные в него ни вводили?

– А он работал не исправно? – спросил Свифт.

– Не очень. На него нельзя было полагаться. В конце концов, где были мои инженеры и техники в последние годы войны? Работали с компьютерами разных космических аппаратов. А я должен был доверяться юнцам или ветеранам, давным-давно отставшим от жизни. И, кроме того, думаете, я мог доверять «железу», которое мне присылали с заводов? Заводам было не лучше чем мне, в смысле персонала. Так что мне не важно, были ли данные, которые я вводил в Мультивак, достоверны. Результаты были недостоверны. Это я знаю.

– И что вы предпринимали? – спросил Хендерсон.

– То же, что и Вы, Джон. Я вводил поправку. Я приводил результаты в порядок по интуиции. И таким образом машина выиграла войну.

Свифт откинулся на спинку кресла и вытянул ноги.

– Какие откровения! Получается, что материалы, которые передавали мне, которыми я должен был руководствоваться при принятии решений, были сделанной вручную интерпретацией вручную сфабрикованных данных. Не так ли?

– Похоже, так, – сказал Яблонский.

– Значит, я, действительно, был прав, не очень на них полагаясь, – сказал Свифт.

–Не полагались?

Яблонский, несмотря на только что сделанное признание, умудрился показаться оскорбленным в своих профессиональных чувствах.

– Боюсь, что нет. Мультивак как будто говорил: «Ударь туда, а не сюда, делай то, а не это; выжди, не начинай активных действий». Но я никогда не мог быть уверен в том, что он говорил именно то, что он как будто бы говорил. Или что он на самом деле хотел сказать. Или в том, что он действительно имел в виду то, что говорил. Я никогда не мог быть уверен.

– Но итоговые доклады всегда были достаточно однозначны, сэр, – возразил Яблонский.

– Возможно. Для тех, кто не должен был принимать решения. Но не для меня. Ужас ответственности за принятые решения был невыносим, и даже Мультивак не мог облегчить это бремя. Но, главное, я был прав, когда сомневался, и это – огромное для меня облегчение.

В обстановке взаимных откровений Яблонский забыл о чинах и званиях.

– А что делали Вы, Леймер? В конце концов, Вы принимали то или иное решение. Как?

– Ну, возможно, нам пора уходить отсюда, но, сначала я вам скажу. Почему бы нет? Я пользовался компьютером, Макс, но более древним, чем Мультивак. Куда более древним.

Он опустил руку в карман и достал пачку сигарет и несколько мелких монет. Старые, потертые монеты тех времен, когда деньги еще не были заменены кредитными картами.

Свифт смущенно улыбнулся.

– Мне все еще приятно носить их в кармане. Я тогда чувствую, что у меня есть деньги. Старому человеку трудно отказаться от привычек молодости.

Он опять опустил монеты в карман, одну за другой – все, кроме последней. Ее он зажал между пальцами и задумчиво на нее посмотрел.

– Мультивак – не первый компьютер, друзья, не самый известный и не такой, какой может снять груз ответственности с человека, который вынужден принимать решения. Войну, *действительно*, выиграла машина, Джон. Или, по крайней мере, очень простое расчетное устройство. Я пользовался им каждый раз, когда мне приходилось принимать особенно ответственное решение.

С легкой улыбкой он подкинул монету, которую держал в руке. Монета блеснула в воздухе, перевернулась несколько раз и упала на протянутую ладонь Свифта. Его пальцы сомкнулись вокруг нее, Он положил монетку на тыльную сторону левой руки, все еще накрывая ее правой.

– Орел или решка, господа? – спросил Свифт.

Машина для принятия решений

АВЕРС РЕВЕРС

Юмор

ИЗ КОЗЬМЫ ПРУТКОВА

МЫСЛИ И АФОРИЗМЫ

Одно легкомыслие может восставать против какого-либо труда. Всякий труд полезен тем, что убивает время, которое, однако, нисколько от этого не уменьшается.

У человека для того поставлена голова вверху, чтобы он не ходил вверх ногами.

Человек! Возведи взор свой от земли к небу – какой удивления достойный является там порядок!

Гений мыслит и осознает. Человек обыкновенный приводит в исполнение. Дурак пользуется и не благодарит.

Земной шар, обращаясь в беспредельном пространстве, служит пьедесталом для всего, на нем обретающегося.

Во всех частях земного шара имеются свои, иной раз даже любопытные, другие части.

Если бы вся вселенная обратилась в одно государство, то можно бы повсюду установить одинаковые законы.

Отыщи всему начало, и ты многое поймешь.

Из записок моего деда.

И малые в астрономии познания большую царедворцам услугу оказать могут.

Индийский царь Вардигес, покорными слугами своими окруженный, однажды до самого заката солнечного неловкостью плясавшего перед ним медведя потешался, и напоследок воскликнул:

– Половину сокровищей, о верноподданные, тому, кто первее прочих сказать может, почто сие четвероногое непрестанно морду свою к небесам обращает, будто там что знакомое, а, паче, приятное себе находит?

– Доподлинно, – ответствовал царю, немало не медля, степенный царедворец, – оно там, уповаю, двух своих подруг, большую и малую, обрести успело. – Причем на двух в небе «медведиц» указать государю не замедлил.

Ответу сему весьма довольным оставшись, царь тотчас, в веселом расположении, в покой свой вошел и обещание свое в тот же день исполнить не оставил.

Для начинающих

БЕСЕДЫ НА ДЕТСКОЙ ПЛОЩАДКЕ.

Держу я в услуженье штат
Для разного труда.
Кто, Что и Как, зовут ребят,
Зачем, Куда, Когда.

Я шлю их по своим делам
На запад и восток,
А как вернутся, всем им дам
Передохнуть чуток.

С утра для них работы нет
(Когда на службе я),
А также в ужин и обед
Я глух и нем, друзья.

Но слуг без отдыха гонять
Привык мой юный друг.
С утра проснется – и опять
В дорогу шлет он слуг!

Летят сначала от него,
Потом, стремглав, к нему:

Пятьсот усердных Отчего,
Пять тысяч Почему!

Р.Киплинг
Перевод А.Н.Бабушкиной.

БЕСЕДЫ НА ДЕТСКОЙ ПЛОЩАДКЕ

– Ну, давай домой собираться. Поздно уже. Солнышко скоро сядет.
– А куда оно сядет?
– Как, «куда»?
– Ну, говорят, что оно вечером садится в большое такое кресло – трон называется, и спит там до утра. А еще говорят, что оно садится в лодку и плывет всю ночь через море, а потом возвращается уже с другой стороны.
– Ну, это сказки. Это люди так думали раньше, давно-давно. Мы до сих пор говорим: «солнце село, солнце встало», или «солнце зашло, солнце взошло», хотя теперь все отлично знают, что оно не садится и не встает, а на самом деле Земля вращается, и Солнце освещает то одну ее часть, то другую.
– Как это – Земля вращается. А я вот стою на земле и не вращаюсь.
– Просто ты вращаешься вместе с Землей, и потому не замечаешь вращения. Это как на карусели – ты крутишься, а тебе кажется, что все крутится вокруг тебя. Вот, садись на карусельку, я тебя покручу.
Видишь, как все вращается вокруг тебя? И я как будто вращаюсь. Ты летишь ко мне – солнышко встает; ты летишь от меня – солнышко заходит.
– Здорово! А вокруг чего Земля вращается? Карусель крутится вокруг палки, к которой круг приделан, а Земля вокруг чего?
– Вокруг своей оси. Эта палка, вокруг которой карусель крутится – ее ось. Но она отдельно от круга стоит, ты ее видишь. А земная ось внутри самой Земли.
– Как это внутри? Если она внутри Земли, она должна вместе с ней крутиться.
– Нет. Смотри, я тебе покажу. Вот, видишь мячик? Давай его закрутим. Видишь? Две его точки не крутятся. Одна – которой он касается земли, а вторая напротив нее. Быстрее всего крутится серединка мячика, а чем ближе к этим двум точкам, тем вращение медленнее. И между ними внутри мячика как бы проходит линия, которая их соединяет. Это ось, вокруг которой вращается мячик. Вот, давай направим на него фонарик. Будет так, как будто на мячике то утро наступает, день, то вечер.
– Здорово! Значит, мяч – как будто Земля, а фонарик – солнышко?
– Именно. Только настоящее солнышко уже совсем зашло, даже звезды видны стали. Пойдем скорее домой, ужинать.
– А ты мне еще про солнышко расскажешь?
– Расскажу.
– И про Землю? И про звезды?
– Расскажу, если хочешь. Только не сейчас. После ужина. Или завтра утром. А пока бежим скорее домой.

ОТВЕТЫ НА ЗАДАНИЕ В СТАТЬЕ «СОЛНЕЧНАЯ КОРОНА»

Форма солнечной короны
ОТВЕТЫ

Номер	Дата затмения	Форма короны
1	1998, 26.02	Промежуточная
2	1999, 11.08	Близкая к максимуму
3	2001, 21.06	Максимум активности
4	2005, 8.04	Промежуточная
5	2006,29.03	Минимум активности
6	2008, 1.08	Минимум активности
7	2001, 21.06	Максимум активности
8	1994, 3.11	Минимум активности

9	2006, 29.03	Минимум активности
10	2009, 22.07	Минимум активности
11	2001, 21.06	Максимум активности

Номер цикла	Начало цикла, минимум	Максимум цикла	Конец цикла, минимум	Продолжительность в годах
20	X 1964	XI 1968	VI 1976	11,83
21	VI 1976	XII 1979	VIII 1986	10,25
22	IX 1986	VII 1989	V 1996	9,58
23	VI 1996	IV 2000	XII 2008	12.7
24	I 2009	IV 2014	IV 2021 прогноз	12 прогноз