

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК



Серия "Научно-биографическая литература"

Основана в 1959 году

РЕДКОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

"НАУЧНО-БИОГРАФИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА"
И ИСТОРИКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ КОМИССИЯ
ИНСТИТУТА ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ РАН
ПО РАЗРАБОТКЕ НАУЧНЫХ БИОГРАФИЙ ДЕЯТЕЛЕЙ
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ:

*А.Т. Григорьян, В.И. Кузнецов, Б.В. Левшин,
З.К. Соколовская (ученый секретарь), В.Н. Сокольский,
Ю.И. Соловьев, А.С. Федоров (зам. председателя),
И.А. Федосеев (зам. председателя),
А.Л. Янин (председатель), М.Г. Ярошевский*

А. В. Козенко

Артур Стенли

ЭДДИНГТОН

1882 – 1944

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук
А.А. ГУРШТЕЙН



МОСКВА
«НАУКА»
1997

ББК 22.63

К59

УДК 523.04(092) А.С. Эддингтон

Рецензенты:

доктор-физико-математических наук, профессор В.Н. ЖАРКОВ,
кандидат физико-математических наук С.И. БЛИННИКОВ

Козенко А.В.

К59 Артур Стенли Эддингтон. 1882–1944. – М.: Наука, 1997. –
144 с., ил. – (Научно-биографическая литература)
ISBN 5-02-003651-X

В книге рассказано о жизни и деятельности выдающегося английского астрофизика и физика-теоретика сэра Артура Стенли Эддингтона, который совместно с другими крупнейшими теоретиками был в ряду создателей теоретической астрофизики как отрасли научного знания. Он внес фундаментальный вклад в изучение звездных движений, теорию внутреннего строения звезд, теорию относительности и космологию. Эддингтон был крупным организатором науки: директором Кембриджской обсерватории, президентом Королевского астрономического общества, президентом Международного астрономического союза.

Для астрономов, астрофизиков, всех интересующихся историей познания тайн Вселенной.

К 1605040000-021 209–96, II полугодие
042(02)-97

ББК 22.63

ISBN 5-02-003651-X

© А.В. Козенко, 1997

© Российская академия наук
и издательство "Наука", серия
"Научно-биографическая литература"
(разработка, составление,
художественное оформление),
1959 (год основания), 1997

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая вниманию читателя книга посвящена выдающемуся английскому астрофизику Артуру Стенли Эддингтону. Он известен прежде всего как ученый, открывший человечеству природу звезд. Эддингтон, наряду с Карлом Шварцшильдом и Джеймсом Джинсом, – один из создателей нового научного направления – теоретической астрофизики.

Большую роль он также сыграл в распространении и признании эйнштейновской теории относительности. Особое значение для этого имели его наблюдения отклонений звездных световых лучей, проходящих около солнечного диска во время полного солнечного затмения 29 мая 1919 г. Блестящее совпадение результатов наблюдений с теоретически предсказанными на основе общей теории относительности смещениями несомненно способствовало ее триумфу. Эддингтоном была написана одна из первых монографий в этой новой области физики "Математическая теория относительности", отличавшаяся ясностью и полнотой изложения. Она была переведена в нашей стране и издана в 1934 г., что явилось определенным вкладом в развитие физического образования в России.

В 1923 г. Артур Эддингтон был избран членом-корреспондентом Российской академии наук, его авторитет в научных кругах России был очень высок.

Эддингтон внес значительный вклад в философию науки и идеологию масонства, разработав новую эпистемологию – "селективный субъективизм" и детально развив символогию. В книге этим вопросам, наряду с историко-научным анализом оригинальных астрономических, астрофизических и физических концепций Эддингтона, уделено особое внимание.

При работе над книгой автор использовал архивные материалы, собранные им в библиотеках и архивах Лондонского Королевского общества, Королевского астрономического общества, Тринити-колледжа Кембриджского университета, Института астрономии Кембриджского университета, а также любезно предоставленные материалы из личных архивов леди Джинс (Кливленд-Лодж, Доркинг) и леди Джеффрис (Кембридж). При изложении биографических деталей основным источником

служила книга бывшего ученика Эддингтона, в дальнейшем профессора университета в Канаде Виберта Дугласа "Жизнь Артура Стенли Эддингтона" [218], являющаяся и по настоящее время наиболее полным собранием сведений об Эддингтоне.

Автор с благодарностью вспоминает свои встречи и беседы с людьми, знавшими Эддингтона и его семью или имевшими какие-либо документы и материалы, освещающие ту или иную сторону его жизни и деятельности. Здесь прежде всего следует назвать членов Лондонского Королевского общества Реймонда Артура Литлтона, сэра Мартина Риса, Майкла Вульфсона, сэра Германа Бонди, а также леди Джинс и леди Джеффрис. Большое значение имело творческое общение с И.С. Шкловским, Оуэном Гингеричем, А.А. Гурштейном, В.Н. Жарковым, С.И. Блинниковым и В.П. Визгиным.

Существенную и разнообразную помощь при подготовке рукописи к печати оказала Л.В. Потапова.

Всем им автор выражает глубокую благодарность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного научного фонда Дж. Сороса, грант № ZZ5000/133.

ДЕТСТВО И ОТРОЧЕСТВО

Артур Стенли Эддингтон родился 28 декабря 1882 г. в г. Кендал. Этот небольшой город с населением около 12 тыс. человек был единственным в западном графстве Вестморленд¹, расположенном на Кембрийском полуострове. Город был основан в 1189 г. бароном Ричардом Куером де Лион. Вблизи города в норманнском замке родилась Катерина Пэрр, впоследствии королева Англии – последняя супруга короля Генриха VIII. В Кендале, или Киркби-Кендале, еще с XIV в. стала развиваться прядильная промышленность, когда Эдуард III пригласил туда фламандских прядильщиков. Поэтому в городе было много прядильных и ткацких фабрик. Но они не портили, как это часто случалось в английских городах конца XIX в., его красивых окрестностей. Город выгодно располагался в долине реки Кент между возвышенностями и холмами. На одном из холмов – живописные развалины старинного замка. Кендал был связан железной дорогой с близлежащим озером Уиндермир, на берегах которого строились фешенебельные отели и коттеджи.

Семья, в которой родился будущий ученый, отличалась высокой культурой и глубокой религиозностью. Его отец – Артур Генри Эддингтон принадлежал к семье квакеров из Сомерсета, члены которой были фермерами, по крайней мере, на протяжении четырех поколений. А мать – Сара Энн Шоут – из Дарлингтона, фамилия которой, возможно, имеет голландское происхождение, была из рода Джона Кэмма, умершего в 1658 г. Он и другой ее предок, Джон Аудленд, стояли у самых истоков квакерского движения и были активными сотрудниками и последователями Джорджа Фокса в его миссионерской деятельности на юго-западе Англии в середине XVII в.

Что же представляет собой это религиозное течение², определившее жизнь семьи Эддингтонов?

Основателем вероучения был Джордж Фокс – сын простого ткача. Еще в юности, будучи сапожным подмастерьем, он в 19 лет услышал "внутренний голос". Оставив родину, "порвав с семьей и товарищами", он отправился проповедовать религиозную истину. Признавая только внутреннее откровение, которое указывает путь к спасению, и отвергая внешнюю обрядность, он высказывался также и против суда,

¹ Ныне графство Камбрия.

² Подробнее см. G.H. Gortman [319].

присяги, военной службы, налогов и т.п. Эти идеи не могли не навлечь на него преследований: он неоднократно сидел в тюрьме и в сумасшедшем доме, был бит кнутом. После крушения Английской революции XVII в. радикальное сектантство потеряло свой социально-политический характер и превратилось в мирное религиозно-этическое учение.

Самоназвание секты – Общество друзей внутреннего света, но от своих противников оно получило распространившееся насмешливое прозвище – квакеры, т.е. трясущиеся, дрожащие – намек на судороги при религиозном экстазе. Еще в первые годы республики квакеры-республиканцы стояли во главе религиозно-революционной оппозиции Кромвелю. Пришедшее разочарование в реформах английской революции привнесло новые идеи в проповедуемое учение. Квакеры стали утверждать, что не следует рассчитывать на людей, не следует ничего ожидать от смены лиц, стоящих у власти. Путь преобразования общества они видят в нравственном самоусовершенствовании личности.

Основу вероучения квакеров составляет представление о том, что Бог заключен в сердцах всех людей. Истину следует искать во "внутреннем свете", который может зажегся в каждом человеке независимо от его расы или социального положения. Это озарение означает присутствие в человеке божественного начала и его победу над грехом. Для обретения озарения нужна прежде всего безмолвная молитва, т.е. внутренняя сосредоточенность мыслей на Боге. Именно поэтому квакеры отвергают внешнюю обрядность и церковную иерархию, не признают религиозных таинств, не крестятся и не причащаются. У них нет регламентированного обряда богослужения. Проповедует тот участник молитвенного собрания, который почувствовал, что его озарил внутренний свет.

Требования морали квакеров подразумевают безусловную правдивость и честность во всем, неприязнительность, простоту, отказ от роскоши и развлечений. Они не признают титулов, ко всем обращаются на "ты" и т.д. Квакеры широко занимаются благотворительностью, активно поддерживают пацифистское движение, участвуют в борьбе против расизма и национализма. (Следует отметить, что квакеры первыми потребовали отмены рабства.)

Квакеры, отвергая развлечения, одобряют только полезные практические или научные знания. Высказывались даже идеи, что "внутреннее просветление" может заменить собой все знания, кроме, конечно, знаний домашнего обихода.

Воспитание в духе квакерской традиции сказалось на всей последующей жизни Артура Эддингтона, многие аспекты которой без учета этого обстоятельства вообще трудно понять.

Отец Эддингтона – Артур Генри – родился в 1850 г. Он получил высшее образование, закончив Лондонский университет со степенью бакалавра искусств, причем зимой 1874/75 г. специализировался по филологии в Гейдельберге у знаменитого Куно Фишера, оказавшего на

него большое влияние. К. Фишер был выдающимся знатоком истории философии, а также изысканным писателем-стилистом и искусным лектором. Он примыкал к гегельянству, проповедовал пантеизм, но главным итогом его деятельности явилась 10-томная "История новой философии", над которой Фишер работал на протяжении 40 лет.

Впоследствии Артур Генри Эддингтон стал директором Стрэмонгейтской школы в Кендале. Эта школа, существовавшая с 1698 до 1932 г., находилась под управлением старой Кендалской квакерской благотворительной организации, а собрание Общества друзей в Кендале имело право утверждать назначение директора школы. Хорошо исполняя свои обязанности, отец Эддингтона быстро завоевал уважение в Обществе друзей и перед ним открывалась блестящая карьера. К несчастью, во время эпидемии тифа 1884 г. он заболел и скончался в возрасте всего 34 лет.

После смерти мужа Сара Эддингтон с шестилетней Уинифрид и двухлетним Артуром вернулась в Сомерсет. Обладая очень ограниченными средствами, она поселилась вместе со своей свекровью Рахиль Эддингтон в приморском городке Вестон-на-Мэре. После смерти свекрови в 1886 г. Сара Эддингтон с детьми переехала в Вэрзин на Уоллискот-роуд и прожила там до 1914 г.

Все детство Артура Стенли Эддингтона прошло на юго-западе Англии – красивейшем крае, имеющем богатую историю. Природный ландшафт его с римским поселением, разбросанным по холмам Уорля, похож на декорации для пьес о легендарном короле Артуре. Вот что писал об этом крае в конце XIX в. Э. Реклю:

"Город Вестон-на-Мэре, куда собираются для купания жители Бристоля, признается по своему положению одной из лучших купальных местностей на берегах Англии. Лесистые крутизны Уорль-Хилла защищают его с севера от холодных ветров; плоский берег, почти в два километра шириной, простирающийся перед городом, покрывается волнами при каждом приливе. Вдали на западе виднеются два острова Стип-Гольм и Флат-Гольм, и берега Уэльса, а на востоке поля, очаровательные по своей роскошной зелени и превосходные по своему плодородию, отлого поднимаются к основанию возвышенностей.

Вестон – единственный город Сомерсета, лежащий на берегу моря. В маленьком бассейне Брю, среди равнины, над которой возвышаются на севере Мендинские высоты, находятся Шептон-Моллет, старинное епископское местечко Уэлльз, в котором возвышается собор, украшенный прекрасными статуями, и Глэстонберри, аббатство которого было одним из самых значительных в Англии" [275, с. 80–81].

У Стенли, как всегда называли его мать и сестра, рано проявились необыкновенные способности. У него была удивительная память и интерес к большим числам. Еще до того как научиться читать, Стенли выучил таблицу умножения до 24×24 . Пробовал сосчитать буквы в Библии. В четыре года, гуляя вечером с матерью, он пытался сосчитать и звезды. По собственному признанию Эддингтона, он начал интересоваться астрономией, привлекавшей его большими числами, по-



Артур Эддингтон – школьник.
Вестон-на-Мэре

стоянно встречающимися в этой науке, когда ему было всего шесть лет.

В десятилетнем возрасте Стенли с увлечением наблюдает небо в трехдюймовый телескоп, предоставленный ему директором школы. Тогда же он начал дома выступать с "лекциями" по астрономии, рассказывая о самых разных небесных телах, таких, как Луна, Солнце, Юпитер и т.п. Стенли использовал в качестве трибуны ступеньки лестницы, а его аудитория часто состояла из одного человека – старого слуги.

Стенли учился сначала дома, а в 1893–1898 годах был приходящим учеником³ в частной Бринмелианской школе в Вестоне. Письма юного Эддингтона к сестре, которая в 1896 г. училась, как говорят англичане, на континенте, проливают свет на его увлечения в это время. Вот отрывки из некоторых: «"Мой доклад по астрономии прошел очень хорошо. Я полагаю ты слышала об аэролите⁴ дневного света, который взорвался над Мадридом в понедельник...", "Я был очень доволен, получив черновик Юпитера..." (черновик статьи в школьном журнале. – В.Д.), "Что ты думаешь по поводу сообщения о достижении Нансеном Северного полюса? Я не сильно доверяю ему, но я надеюсь, что это правда" (В действительности Нансен достиг пределов 4 градусов от полюса. – В.Д.)» [218, с. 3–4].

В 15-летнем возрасте Эддингтон написал сочинение "Полное затмение Солнца", в котором, в частности, есть такие слова: "...экспедиции посылались из различных стран Европы, часто включавших величайших в мире астрономов для того, чтобы они могли сделать наблюдения" (сочинение хранится в библиотеке Тринити-колледжа). По мнению Лорена Грехема, участие Эддингтона в экспедиции по наблюдению солнечного затмения в 1919 г. явилось "буквальным осуществлением юношеской мечты" [321, с. 70].

Всего в 1896–1898 годах Эддингтон написал 13 сочинений по астрономии. Это "Астрономия" в шести статьях, "Метеоры", "Сэр Джон

³ Как правило, учащиеся частных школ в Англии были полными пансионерами и домой возвращались лишь на каникулы.

⁴ Аэролит – устаревшее название, в современной научной литературе употребляется термин "каменный метеорит", состоит в основном из силикатов.

Франклин", "Астрономическое сообщение", "Марс", "Времена года", "Три знаменитых ранних астронома (Коперник, Браге, Кеплер)" и уже упоминавшееся "Полное затмение Солнца"⁵.

Но склонность к научным изысканиям не сделала Эддингтона замкнутым и нелюдимым, предпочитающим одиночество молодым человеком. По общему мнению, он был ярким, привлекательным мальчиком и любимцем всей школы. Эддингтон также увлекался спортом и хорошо играл в крикет и футбол.

Автор очерков о британских ученых XX в. Гроувер так характеризует жизнь юного Эддингтона: "У Эддингтона были суровые, хотя и не несчастные школьные годы в Вестоне. Его мать была бедной, но не деклассировалась вследствие несчастной судьбы, и Эддингтон воспитывался в атмосфере среднего класса в курортном месте, что способствовало усилению его индивидуалистических наклонностей" [219, с. 140].

Как-то Стенли посчастливилось побывать на публичной лекции известного астронома, профессора Кембриджского университета сэра Роберта Болла, который выступал в Вестоне-на-Мэре. Увлекательный рассказ Болла, крупного специалиста в области изучения приливов и превосходного лектора, еще более укрепил стремление Эддингтона стать астрономом.

Успехи Эддингтона в школе были высоко оценены. В 1898 г. он получил от Совета по школам графства Сомерсет стипендию на три года в 60 фунтов стерлингов в год, что в те времена было вполне достаточно для продолжения образования. Это позволило ему поступить в Оуэновский колледж в Манчестере в неполных шестнадцать лет. Директором колледжа был Дж. Грехем, одно время замещавший отца Эддингтона в пору его директорства в Кендале. Один из преподавателей колледжа У. Фокнер писал в 1951 г.: "Я хорошо помню Эддингтона, вошедшего в холл. Маленький мальчик пришел в колледж в берете. Неслышанно! В те дни были приняты котелки, берет был совершенно немыслим. Однако вскоре стало ясно: то, что было под беретом было настолько же экстраординарно, как и сам берет, и молодой человек показал своим тьютерам (преподавателям-репетиторам. – А.К.) по математике лучшие способы решения задач, чем кто-либо другой из учившихся в колледже" [цит. по: 218, с. 4–5].

В течение последующих трех лет Эддингтон сосредоточился преимущественно на изучении математики, посещая лекции выдающегося педагога профессора Хоарса Лэмба – автора знаменитого курса гидродинамики, и физики под руководством профессора А. Шустера. Надо сказать, что Артур Шустер был крупным физиком. Окончив Гейдельбергский университет, он становится британским подданным и работает в Кавендишской лаборатории сначала с Дж. Максвеллом, а затем с Дж. Рэлеем, а в 1879 г. его избирают членом Лондонского Королевского общества. А. Шустер – автор многих работ в области

⁵ Все рукописи хранятся в библиотеке Тринити-колледжа Кембриджского университета, каталожный № 0.11.22.

спектроскопии, радиометрии, земного магнетизма и сейсмологии. Особо следует отметить, что он впервые получил фотографию спектра солнечной короны (1882 г.) и первый предположил существование электрона в атоме (1897 г.).

По завершении образования в Манчестере Эддингтону была присвоена степень бакалавра наук по физике.

СТУДЕНЧЕСКИЕ ГОДЫ И НАЧАЛО НАУЧНОЙ РАБОТЫ

Осенью 1902 г. Эддингтон поступил в Тринити-колледж (колледж Св. Троицы) Кембриджского университета. Это было учебное заведение, в то время дававшее лучшее образование в области физико-математических наук. Университет в Кембридже один из старейших в мире. Его самый старый колледж Св. Петра был основан в 1257 г., всего на девять лет позже открытия Университета в Оксфорде. Мировую славу Кембриджскому университету принес гениальный английский ученый Исаак Ньютон, который учился и преподавал в его Тринити-колледже с 1661 по 1696 г.

Первые три года учебы в Кембридже Эддингтон жил в епископальном общежитии. Он был очень сосредоточен на учебе и подготовке к "математическому трайпосу" – конкурсным экзаменам по математике. Это были очень сложные экзамены, установленные еще в XVIII в., со специальной системой подготовки к ним. Тем не менее, по воспоминаниям однокурсников, он не держался отчужденно с ними. У Стенли была небольшая компания друзей, с которыми он играл в теннис и шары, совершал велосипедные и пешие прогулки. Это были К.Дж.А. Тримбл, ставший учителем, Е.Дж. Элиот, впоследствии государственный служащий, Ф.М. Стрэттон и Дж.У. Никольсон, также избравшие своей профессией астрофизику. Обычно все они собирались в комнате Эддингтона в колледже. Наиболее близким другом Эддингтона был К.Дж.А. Тримбл. Они одновременно поступили в Тринити, очень часто общались и почти все выходные дни проводили вместе. Только в его обществе Стенли мог полностью отбросить свою неуверенность и застенчивость. Со временем их отношения не изменились, они навсегда остались близкими друзьями.

Интересные сведения о жизни Эддингтона в студенческие годы содержатся в его дневнике¹, который он начал вести еще в Тринити. По дневнику мы можем видеть, как Стенли постепенно, но основательно, знакомится с классической литературой от Гомера до Шекспира и Мильтона. Знание французского, немецкого и итальянского языков позволяет ему читать Мольера, Гёте и Данте в оригинале. Он впервые прочитал рубаи в 1904 г. и был очарован ими. По-видимому, он читал четверостишия великого персидского поэта-суфия Омара Хайяма в

¹ Дневник хранится в библиотеке Тринити-колледжа Кембриджского университета, каталожный № Add. Ms. b. 48.

переводах Эдварда Фицджеральда, впервые увидевших свет в 1859 г. и положивших начало всемирной современной славе этого поэта Востока. Из этих рубаи он взял одно четверостишие и поместил на обложку своего дневника:

Движеньем руки создавалось писание,
И вечен сей труд всеблагой.
Все мерзкие козни не встанут преградой,
И он не пожертвует светлой строкой.

Когда Стенли хотел развлечься, он обращался к легкой литературе, которая доставляет удовольствие как детям, так и взрослым, например "Алиса в стране чудес" Льюиса Кэрролла. Уже на склоне лет сам Эддингтон рассказывал выдающемуся астрофизику Чандрасекару, что в свои школьные годы он играл в игру на построение английских фраз, которые были бы грамматически правильными, но лишёнными смысла в манере Льюиса Кэрролла. Он привел такой пример: "To stand by the hedge and sound like a turnip" ("стоять изгородью и звучать как репа". – А.К.) [214, с. 3].

В студенческие годы Стенли был равнодушен к музыке. Его друзья знали и любили музыку и старались развить в нем склонность к ней. Однако только в 1906 г., после того как Эддингтон услышал оперу Гуно "Фауст", он стал посещать оперные спектакли.

В большие каникулы 1903 г. Эддингтон впервые совершил заграничное путешествие в Швейцарию. Его туристический поход в Альпах пролегал в окрестностях Давоса. Но ни тогда, ни в последующих туристических поездках он не старался серьезно заняться альпинизмом.

Эддингтон был страстным велосипедистом и часто совершал велосипедные прогулки. А в 1905 г. он проехал в общей сложности 2669 миль. Но наиболее протяженное велосипедное путешествие он совершил в апреле 1937 г., когда проехал 122 мили от Донкастера до Кембриджа. Эддингтон отмечал маршруты своих путешествий на Бартоломеевской туристической карте. В юности по обыкновению, а в последние годы жизни всегда, эти поездки Эддингтон совершал один. Он любил уединение.

В дневнике Эддингтона отражено также и его участие в жизни университетского сообщества. Его отношение к студенческому политическому клубу видно из следующего резюме: "Вначале я усердно посещал дебаты в течение двух лет, но никогда не выступал. На третий год я не часто там задерживался надолго, а на четвертый уже не посещал их совсем. Наилучшей в клубе была речь Ллойд Джорджа" [218, с. 9].

Зато в 1903 г. Эддингтон вступил в Шахматный клуб, на следующий год стал секретарем клуба, а позднее и вице-президентом. Он часто играл в товарищеских матчах. Эддингтон также раз в две недели посещал собрания Математического общества Тринити. Осенью 1904 г. он стал еще и членом Клуба V²V, основанного профессором П.В. Биваном, Дж.Ф. Камероном, Дж.Х. Джинсом и некоторыми другими

специалистами по прикладной математике. Пожалуй, это был его самый любимый Клуб, за девять месяцев он последовательно занимал должности секретаря, вице-президента и президента, и когда Эддингтон вернулся в Кембридж в 1913 г., он прежде всего восстановил членство в этом Клубе.

В студенческие годы Эддингтон участвовал также в работе разных объединений: Кембриджского математического клуба, Кавендишского (физического) общества, Союза нонконформистов и неформального литературного клуба, где в основном читали Шекспира.

Наиболее талантливым тьютером по математике в Кембридже был Р.А. Герман. Эддингтон с радостью занимался с ним. В традициях математического трайпоса Герман учил не только находить решение различных математических задач, но и добиваться его элегантности. Эддингтон находил эстетическое наслаждение в поисках красивых математических решений.

Эддингтон слушал лекции таких выдающихся профессоров, как Е.Т. Уиттекер, А.Н. Уайтхед и Е.В. Барнес. Уиттекер стал в 1906 г. Королевским астрономом Ирландии и профессором математики Эдинбургского университета. Именно ему были переданы неопубликованные рукописи Эддингтона (после его смерти в 1944 г.) и им же редактировалась монография Эддингтона "Фундаментальная теория". Барнес получил сан епископа Бирмингема будучи и доктором богословия, и доктором наук. Им была написана фундаментальная монография "Возникновение христианства". Уайтхед впоследствии занял должность профессора в Лондоне, а затем в Гарварде (США). Он совместно с Бертраном Расселом написал выдающуюся книгу "Основания математики" и также получил широкую известность благодаря своим философским произведениям.

Эддингтон сдал математический трайпос через два года после начала обучения, как это делали и другие наиболее способные студенты, например за несколько лет до него – Джеймс Джинс. Когда были подведены итоги, оказалось, что Эддингтон на первом месте. Никогда еще студент-второкурсник не получал звания "сеньор вранглер". На следующий год он сдал II часть математического трайпоса и занял первое место в первом классе. Еще через год ему была присвоена ученая степень бакалавра искусств Кембриджского университета. Его мать и сестра присутствовали на церемонии присуждения степени в июне 1905 г. в Кембридже.

Те годы правления короля Эдуарда VII с 1902 по 1910 г. Эддингтон вспоминал как сравнительно спокойные и благополучные. Не может вызывать сомнения, что это действительно было так для тех, кто имел возможность получать образование в привилегированных английских университетах даже не в силу положения и средств семьи, а благодаря собственным выдающимся способностям. Война им была известна лишь по рассказам. Тем не менее для победы в англо-бурской войне 1899–1902 гг. в Южную Африку было направлено около 250 тыс. английских солдат.



**А. Эддингтон – "сеньор вранглер".
Кембридж, 1905 г.**

С 1895 по 1905 г. в Соединенном Королевстве правил блок консерваторов и либерал-юнионистов. Пост премьер-министра занимал лидер консерваторов маркиз Солсбери, но ведущее положение в кабинете вскоре занял Джозеф Чемберлен, имевший портфель министра колоний. Он был главным идеологом колониализма. "Только в этой политике, – говорил Чемберлен, – я вижу решение огромных социальных проблем, которые окружают нас". С 1903 г. он выступал также с пропагандой протекционизма в интересах британских монополий.

Сохранять стабильное положение в стране консервативной партии помогала искусная политика, которая во многом следовала принципам, выработанным Бенджамин Дизраэли, – это была

политика нового торизма. В соответствии с ней у партии были три основные задачи: сохранять национальную церковь, оградить целостность Британской державы и улучшить положение народных масс. В одном из обращений к избирателям Дизраэли говорил: "Было бы желательно, чтобы правительство выказывало побольше энергии в своей внешней политике и поменьше во внутренней". Тем не менее он ясно понимал ту простую истину, которая остается скрытой за семью печатями для всех недалеких государственных руководителей, что золотой фонд страны – это ее интеллектуальная элита. Он считал, что одна из основных задач английской конституции – возводить в дворянство даровитых людей и что она должна совершенно игнорировать их происхождение. И еще одно положение, с которым нельзя не согласиться: "Здоровье народа, – говорил Дизраэли, – важнейший из вопросов, какие только могут привлекать внимание государственного человека". Да и сам консерватизм понимался им не как запрещение изменений, а как консервативные изменения, т.е. без катастрофических потрясений.

И действительно, если изменения в Англии и происходили, то они происходили плавно без потрясений, и Эддингтон почти не замечал их. Он жил в небольшом спокойном университетском городе. Его финансовые возможности были вполне сносными. Вместе со стипендиями и различными премиями его общий доход за 1889–1903 гг. составил 862 фунта стерлингов. Таким образом, он мог тратить от 150 до 250 фунтов в год, что по тем временам было вполне достаточной



**А. Эддингтон и Дж. Дж. Томсон в Кавендишской лаборатории.
Кембридж, 1905 г.**

суммой. Эддингтон сначала имел стипендию 75 фунтов, а затем получил стипендию Тринити в 100 фунтов в год и стипендию в 50 фунтов от Лондонского университета.

После окончания курса обучения в Кембриджском университете, завершившегося присуждением степени бакалавра в июне 1905 г., Эддингтон уезжает отдохнуть на лето в Ирландию, а в сентябре возвращается в Кембридж. Он предполагает заниматься математическими исследованиями, а также поработать в Кавендишской лаборатории. Несомненно, работа в этой физической лаборатории сформировала Эддингтона как физика. Лабораторию возглавлял Дж.Дж. Томсон (преемник Дж.К. Максвелла и Дж.У. Рэлея), открывший в 1897 г. электрон. На тихой улочке Фри-скул-лейн в свое

время стажировались Э. Резерфорд, П. Ланжевен и многие другие исследователи, ставшие впоследствии выдающимися физиками.

Пробуя себя и как физик-экспериментатор, Эддингтон работал в Кавендишской лаборатории над определением скорости, с которой отрицательные частицы начинают движение при эмиссии с раскаленных металлов. Он проводил некоторые предварительные опыты по установлению связи между электродвижущей силой и током, не давшие результатов. На то имелись определенные причины, но Эддингтон начинал терять уверенность в себе.

Вскоре Эддингтону удалось получить место лектора, главным образом, как он считал, вследствие отъезда Джеймса Джинса в Принстон, куда последний был приглашен на должность профессора прикладной математики. Эддингтона взяли на место Джинса, и он начал читать свой первый курс лекций в университете. Это был курс лекций по сферической тригонометрии, и студенты не без основания считали его скучным. (Что неудивительно, ведь слушать лекции по данному предмету очень утомительно из-за длинных однообразных выкладок.)

Эддингтон тщательно готовился к лекциям и даже на рождественские каникулы позаимствовал черную доску, практикуясь писать на ней. Основные предметы, которые преподавал Эддингтон, были – гидростатика, гидродинамика и электродинамика. Когда не удалось найти лектора на вакансию по инженерным вопросам, влияющие в Кембридже профессора, такие как Р. Болл и Е. Барнес, попросили Эддингтона временно читать лекции и по этой тематике.

В начале 1906 г. страна была возбуждена предстоящими парламентскими выборами, и большинство студентов проявляли высокую политическую активность. Эддингтон придерживался либеральных взглядов всю жизнь. Он считал их гармоничными с идейными устремлениями квакеров, и в том числе с "непротивлением злу насилием". С этих же позиций он смотрел и на предвыборную лихорадку, и на бурную сцену в Кембриджском либеральном клубе, когда стало известно, что Артур Джеймс Бальфур потерпел поражение. Этот лидер консерваторов показал себя "завзятым сторонником репрессий" еще в бытность свою министром по делам Ирландии в конце прошлого века.

На выборах абсолютное большинство мест в парламенте завоевала Либеральная партия во главе с Г. Кэмпбелл-Баннерманом. В кабинет входили и такие, ставшие впоследствии знаменитыми политическими деятелями, министры, как Д. Ллойд Джордж и У. Черчилль. Успех либералам обеспечил значительный сдвиг влево в настроении широких слоев избирателей. С самых первых шагов правительство стало проводить политику умеренных социальных реформ и также укреплять обороноспособность страны, учитывая возможность начала войны в Европе. Уже в 1906 г. правительство провело через парламент закон о трудовых конфликтах, восстановив право на стачку. Через год был принят закон о пенсии по старости, а впоследствии было также введено государственное страхование по болезни, инвалидности и безработице. Вместе с тем рост государственных расходов требовал пополнения

бюджета, и это совершалось за счет введения косвенных налогов и налогов на землю. Ллойд Джордж считал, что положил начало процессу перераспределения собственности в пользу широких народных масс. Консерваторы назвали новый бюджет "революционным в принципе и социалистическим по существу". Но разрушительных социальных конфликтов в стране удалось избежать. Англия продолжала идти по пути развития и прогресса сравнительно плавно. Эддингтон полностью разделял такой стиль правления и искренне восхищался сэром Генри Кэмпбелл-Баннерманом, умевшим, как никто другой, сплачивать разнообразные течения, образующие прогрессивное большинство в парламенте.

Скоре после парламентских выборов, приведших к переменам в Англии, и в жизни Эддингтона произошло важное событие. Он получил письмо от Королевского астронома сэра Уильяма Кристи с предложением занять должность главного ассистента Королевской обсерватории в Гринвиче.

Эддингтон с радостью принял предложение работать в Гринвичской обсерватории. Астрономия еще в детстве увлекала его, но он не имел серьезного опыта астрономических наблюдений. Может быть его несколько смущала и необходимость работы в ночное время. Так, в письме к своей матери он надеется: "Моя работа будет главным образом в дневное время, но в течение первого года моей работы я особенно много буду наблюдать по ночам – хорошее занятие для того, чтобы в совершенстве понять инструменты" [218, с. 14].

Это был очень важный семилетний период в жизни ученого, за который из специалиста по прикладной математике и физике получился профессиональный астроном и астрофизик.

18 февраля 1906 г. Эддингтон приступил к работе в Обсерватории. Первые дни он гостил у П.Х. Ковелла, который также занимал должность главного ассистента, а затем ему была предоставлена квартира в Блэкхеафе.

В самом начале работы Эддингтону пришлось изучать основы практической астрономии: работу с каталогами, статистические методы обработки наблюдений, теорию инструментальных ошибок и многое другое.



Профессор
Роус Болл

Для того чтобы быть в курсе всех последних событий в астрономической науке, Эддингтон должен был посещать ежемесячные собрания Королевского астрономического общества. Его пригласили и в Клуб Королевского астрономического общества как гостя сэра Уильяма Кристи для участия в чествовании сэра Эдмунда Уиттекера по случаю его назначения Королевским астрономом в Ирландии. "Обед был ирландским в честь назначения... Болл сказал речь. За мое здоровье выпили, и я сказал в ответ несколько слов", – записал в своем дневнике Эддингтон. В апреле 1906 г. он был избран действительным членом Королевского астрономического общества, а на следующий год стал 193-м по счету членом его Клуба [218, с. 15].

Клуб Королевского астрономического общества (КАО) – частная ассоциация наиболее влиятельных его членов, из которой оно и возникло. Это произошло, когда состоятельные джентельмены-дилетанты, обедавшие в Масонской таверне в Лондоне в среду 12 января 1820 г., решили основать научное астрономическое сообщество. Тогда члены Клуба, как правило, обедали вместе перед собраниями Общества, где и определяли основные направления его работы. В настоящее время обеды в клубе проходят после собраний, что находится в большем соответствии с современными обычаями [326]. Само Общество располагается в Бэрлингтон-хаусе на Пикадилли, а члены Клуба собираются на обеды в "Атенеум-клуб" на Пэлл-Мэлл. Члены Клуба составляют внутренний круг КАО и всего Британского астрономического сообщества в целом.

Королевское астрономическое общество – старейшее астрономическое общество в мире. Вначале оно носило название Лондонское астрономическое общество, а в 1831 г. королевским указом ему было присвоено его нынешнее название. Патроном Общества с того времени является Монарх. Общество, кроме регулярных ежемесячных заседаний, проводит раз в год, обычно в феврале, общее годовое собрание. За выдающийся вклад в развитие астрономической науки Обществом регулярно присуждаются различные премии, Золотая и именные медали. В настоящее время выдающиеся астрофизики награждаются медалью им. Эддингтона.

Занятия Эддингтона с 1906 г. проблемой собственного движения звезд в связи с концепцией звездных потоков Каптейна вовлекли его в разгоревшуюся в астрономическом мире полемику. Эддингтона поддерживал сэр Дэвид Гилл, долгое время бывший близким сотрудником Каптейна, в 1907 г. вернувшийся из Южной Африки, где он провел много лет как астроном Его Величества, возглавляя Обсерваторию в Кейптауне. Надо сказать, что поддержка сэра Дэвида, очень влиятельного представителя астрономической науки Англии, способствовала быстрому успеху Эддингтона.

Но в начале своей астрономической карьеры Эддингтону пришлось заниматься самой рутинной работой. Он писал в конце мая 1906 г.: "Что касается работы в Обсерватории, то прошло шесть или более недель прежде, чем я нашел проблемы, которыми следовало бы за-

няться. Я имел большую ясную задачу контроля положения 12 тыс. звезд для нового каталога, к которому только что приступил. Эта работа требовала приблизительно 100 часов. Я сделал определенное количество нудной работы, ежедневные и еженедельные отчеты; старался получить для работы окуляр с обращающей призмой. Я наблюдал немного с вертикальным кругом и ассистировал в наблюдениях дрожаний от работающей механической станции. Я также начал большое исследование звездных движений и регулярно занимаюсь полагающейся мне половиной вычислительной работы. Исследование азимутальной погрешности (в связи с вариацией долгот) оказалось преждевременным. Я также уделяю значительное внимание результатам наблюдений Эроса в 1900–1901 гг. Я работаю над электронной теорией без заметных результатов" [218, с. 15].

В первые два года работы в Гринвиче Эддингтон в основном занимался анализом наблюдений астероида Эрос, а также уточнением координат звезд, так как программа наблюдений Эроса выявила значительные ошибки в определении положения звезд на фотопластиках, используемых для сравнения. Кроме этой рутинной работы, он выбрал для самостоятельного исследования собственные движения звезд.

Июль 1906 г. он посвятил подготовке к экзамену на звание члена Тринити.

Звание члена колледжа в Кембридже было эквивалентно званию доктора философии и делало последнее излишним. Оно не требовало постоянного проживания в Кембридже и какой-либо работы в университете. Первая попытка Эддингтона представить работу по движению звезд [1] на звание члена Тринити в 1906 г. оказалась не столь успешной. Но после благоприятного приема доклада Эддингтона на эту тему в Королевском астрономическом обществе в 1907 г. его избрание прошло весьма гладко. За эту работу он в том же году получил Смитсоновскую премию в Кембридже.

В августе, во время непродолжительного отпуска, Эддингтон посетил Голландию. Он побывал в живописном старом университетском городе Лейдене, осмотрел местную обсерваторию, уик-энд провел с профессором Каптейном во Вризе вблизи Гронингена.

После возвращения в Гринвич Эддингтон написал две статьи для 11-го издания Британской энциклопедии².

В январе 1908 г. Каптейн приехал в Англию получить почетный адрес Королевского астрономического общества. Он остановился в Эмблдоне, в Суррее, у Франклина-Адамса – любителя, построившего частную обсерваторию. Последний был хорошо известен в астрономических кругах своими фотографиями звездного неба. Сэр Дэвид Гилл и А. Эддингтон гостили там в то же время. Эддингтон смог

² "Это статьи "Звезды" и "Туманности". Тем самым Эддингтон продолжил свою популяризаторскую деятельность, начатую в апреле 1907 г. лекцией в Британской астрономической ассоциации – организации, созданной для широкого круга любителей астрономии.

обсудить интересовавшие его вопросы, связанные с диаграммами звезд Франклина-Адамса и подсчета звезд, с наиболее знающими эти проблемы специалистами.

В следующие летние каникулы Эддингтон участвовал в парусном плавании у берегов Норфолка, а затем посетил Дублин, в котором состоялось сентябрьское заседание Британской ассоциации. В его дневнике есть упоминание о прочитанной им Тернеровской лекции о комете Галлея и четырех ирландских пьесах, которые он посмотрел в театре У.Б. Йитса.

В начале 1909 г. Эддингтону, уже занимавшемуся проблемой измерения широт, и Гарольду Кристи (сыну сэра Уильяма) было поручено провести новые измерения долготы геодезической станции и монумента Спенсера на о-ве Мальта.

Королевский астроном сэр Спенсер Джонс писал:

"Причина, по которой потребовалось новое определение, состояла в расхождении в одну секунду времени между более ранним определением Ауверса и Гилла в 1875 г. при наблюдении прохождения Венеры и измерениями, проведенными служащими Гидрографического департамента Адмиралтейства.

Наблюдения Эддингтона и Кристи дали для долготы монумента Спенсера $0^h 58^m 2.955s \pm 0.010s E$ в близком согласии с определением Ауверса и Гилла $0^h 58^m 2.65s$ и таким образом решили вопрос.

Наблюдения по определению долгот не сложны, но требуют аккуратности и внимания. Результаты измерений показали, что Эддингтон был искусный наблюдатель. Он всегда считался преимущественно астрономом-теоретиком, и часто не обращает внимание на то, что когда он работал в Гринвиче, то получил прекрасную подготовку в наблюдениях и участвовал в различных программах наблюдений, знакомясь с наблюдательной астрономией, что впоследствии оказалось для него небесполезно" [цит. по: 218, с. 16].

26 марта 1909 г. Эддингтон читает в Королевском институте лекцию "Некоторые последние результаты астрономических исследований". Королевский институт был основан в 1799 г. графом Рамфордом – Бенджамином Томпсоном, родившимся в колониальной Америке в 1753 г., ставшим затем членом Королевского общества в очень молодом возрасте (26 лет) и позднее, благодаря службе у курфюрста Баварии, графом Священной Римской империи. Интересно, что он не только основал институт в Лондоне, но и сам спроектировал его главный зал. Кресла в нем расположены амфитеатром и дают возможность посетителям хорошо видеть все, что демонстрируется во время лекции. До настоящего времени Королевский институт выполняет важнейшую функцию популяризации науки, и его членом может быть каждый, интересующийся ею.

Летом 1909 г. А. Эддингтон с Дж.Дж. Томсоном и Э. Резерфордом посетили Виннипег для участия в Собрании Британской ассоциации. (Эта организация была основана в 1831 г. для популяризации научных

знаний; Эддингтон занимал должность секретаря секции А: физика, математика и астрономия.) После осмотра различных достопримечательностей от Квебека до Скалистых гор Эддингтон заметил, что поистине наибольшее наслаждение он получил от Ниагарского водопада.

В это же время в Гринвичской обсерватории происходили некоторые перемены. Ковелл ушел из Обсерватории и стал главой Ведомства морского ежегодника. Сотрудников становилось все меньше. К тому же стало ухудшаться здоровье У. Кристи. Все это неблагоприятно сказывалось на положении дел в Обсерватории.

"Предварительный общий каталог" Босса появился в апреле 1910 г., и Эддингтон начал работать с ним. Он также проводил наблюдения на 28-дюймовом экваториальном инструменте.

Осенью сэр Уильям Кристи вышел в отставку. Его преемником в Королевской обсерватории стал Фрэнк Дайсон – очень доброжелательный человек и способный астроном, с которым у Эддингтона были прекрасные отношения.

В последний год своей работы в Гринвиче Эддингтон с двумя другими коллегами по Обсерватории Ф. Стреттоном и С. Чепменом, впоследствии видными профессорами, в разные годы занимавшими, как и Эддингтон, пост Президента Королевского астрономического общества, начал редактировать журнал "Observatory". Журнал был основан профессором У. Кристи в 1887 г. Хотя этот журнал издавался частным образом, он всегда был тесно связан с КАО. Его редактировали наиболее влиятельные члены Общества. В отличие от "Memoirs" и "Monthly Notices", которые публикуют основательные статьи, содержащие результаты исследований, он сообщает о докладах и неформальных дискуссиях на собраниях КАО, другие новости. В нем также приводятся открытые дискуссии по спорным проблемам, публикации писем читателей, редакционных заметок. Участие в работе редакции этого журнала способствовало известности Эддингтона, когда он был еще в сравнительно молодом возрасте.

Там же в своем дневнике, где Эддингтон указывает на работу в журнале, он отмечает, что по мере вовлечения его в более крупные исследовательские программы и занятие им более ответственных постов, возрастает его занятость. Жизнь Эддингтона и в этот период, и позднее, в основном посвящена работе. "Эти дополнительные обязанности делают меня гораздо более занятым, чем я был когда-либо ранее, и я думаю, я начал ощущать их некоторую тяжесть. Все равно, я сейчас более доволен и свободен от ощущения скуки жизни, которую помню по более ранним временам".

В общении Эддингтон ограничивается практически только коллегами-астрономами и друзьями по учебе в Тринити, а также членами кваркерской общины.

Дневник Эддингтона освещает и некоторые стороны его личной жизни, особенно в первые три года гринвичского периода. Так, очень часто в нем появляется имя Эммелин Ийтс. Эммелин была сестрой

товарища Эддингтона по велосипедным прогулкам и, возможно, дальнего родственника Реджинальда Ийтса (Рекса – как называли его близкие друзья). Мисс Ийтс, кроме матери и сестры, единственная женщина, которая постоянно упоминалась в дневнике Эддингтона. Часто семьи Эддингтонов и Ийтсов вместе проводили уик-энды, посещали театры. К концу 1908 г. Ийтсы очевидно решили, что Эддингтон собирается сделать предложение Эммелин, и постарались ускорить ход событий. Но сразу стало ясно, что Эддингтон не имел подобных намерений. Объяснение в дневнике Эддингтона показывает его способность игнорировать ситуацию, которая представляется ему неподходящей:

"Несколько странные отношения существуют между миссис Ийтс и Эммелин с одной стороны и мной с другой, по причине, что я не делаю того, что, вероятно, они полагают я должен делать... но так как Рекс игнорирует натянутость, и моя совесть не упрекает меня, я устроился очень удобно".

С общепринятой точки зрения Эддингтон вел довольно замкнутую жизнь. Он никогда не был женат и, по-видимому, даже не имел желания жениться. Первый биограф Эддингтона В. Дуглас писал: "Его работа была его жизнь, и его жизнь была его работа" [218, с. 30].

В 1912 г. в жизни Эддингтона произошли два важных события. Он был назначен секретарем Королевского астрономического общества и совершил свою первую экспедицию для наблюдения солнечного затмения. Он и два его ассистента Дэвидсон и Аткинсон отплыли в Бразилию в сентябре. Инструменты были установлены в Пасса-Куатро. Но в день затмения 10 октября случился сильный ливень, помешавший наблюдениям. Эта экспедиция была последним значительным событием в гринвичском периоде жизни Эддингтона.

Всякий раз, когда Эддингтон имел свободными не менее двух недель, он планировал активный отдых в озерном крае на севере Англии, в горах Уэльса или отправлялся в путешествие за границу. В 1911 г. он вместе с матерью совершил круиз вдоль берегов Норвегии. Его интересовало все: пейзажи, атмосферные эффекты, полярное солнце и лапландцы с их лайками.

На другой год он взял с собой сестру в Байрет, где они посещали Вагнеровский оперный фестиваль. (В тот год оперой "Парсифаль" Рихарда Вагнера дирижировал легендарный Карл Мук.)

Каникулы не только давали возможность путешествовать. Именно в отпускное время Эддингтон принимал активное участие в деятельности Общества друзей, особенно в Гильдии учителей, основанной в 1896 г., и в Воскресных школах, которые появились в 1897 г.

В 1908 году в школе вместе с Эддингтоном были Рекс Ийтс и близкий друг еще по временам обучения в Тринити К.Дж.А. Тримбл, который возглавил благотворительную школу имени Иисуса Христа.

В. Дуглас писал в своей книге, что в одну из прогулок, еще в первые годы их дружбы, они, устав, остановились в придорожной гостинице и заказали около двенадцати литров имбирного: приятель Эддингтона недавно "опробовал" дружеский совет, что немного джина

превращает просто шипучий напиток в настоящий нектар. Он предложил подобное дополнение, но Эддингтон отказался и пришел в совершенное негодование, так как у него выпивка всегда ассоциировалась с картинами Хогарта, изображающими дебоширов. Среди вещей, запретных для него из-за строгого религиозного воспитания, были алкоголь, табак и театр. Однако постепенно он преодолел эти запреты: стал часто посещать театр и сделался заядлым курильщиком трубки. Что касается алкоголя, то хотя он и не отказывался, особенно в последние годы жизни, от бокала вина, но всегда предпочитал безалкогольные напитки.

Во время другого похода, когда они с Тримблем остановились в Мэкинлете в Среднем Уэльсе, Эддингтон решил зайти в синематограф. Несмотря на душную переполненную народом комнату, вспоминал его приятель, он не столько смотрел на мерцающий экран, сколько наблюдал за поведением молодых шахтеров и слушал их комментарии. По-видимому, Эддингтон заинтересовался людьми мало ему знакомого социального слоя.

Свой поход вдоль побережья Корнуэлла Эддингтон вспоминал так: "Мы были совершенно промокшими все шесть дней, но это были лучшие наши каникулы". Однако поход был внезапно оборван пришедшим известием об его избрании Плюмианским профессором Кембриджского университета.

ПЛЮМИАНСКИЙ ПРОФЕССОР АСТРОНОМИИ

Плодотворная работа Эддингтона в различных областях астрономической науки давала ему возможность претендовать на вакансию Плюмианского профессора астрономии в Кембриджском университете, и в 1913 г. он был избран на эту почетную должность. А год спустя он был избран членом Лондонского Королевского общества. Это была блестящая карьера для молодого ученого, ведь Эддингтону было немногим более 30 лет.

Эддингтон получил должность Плюмианского профессора после смерти сэра Джорджа Дарвина.

Сэр Джордж Говард Дарвин – сын великого естествоиспытателя Черльза Дарвина – был выдающимся специалистом в области теории приливов и теории фигуры небесных тел – областях знания, находящихся на стыке астрономии и геофизики. А сама должность Плюмианского профессора астрономии была основана для преподавания астрономии еще в 1704 г. Надо отметить, правда, что первоначально эта должность была предложена Джеймсу Джинсу, получившему всемирное признание молодому члену Королевского общества. Но Джинс, будучи к этому времени уже материально независимым человеком, отказался от нее в пользу Эддингтона – более молодого (разница в их возрасте составляла 5 лет) и наиболее перспективного среди всех английских астрономов. Как и в 1905 г., когда его взяли в Кембридж на место Джинса, уехавшего тогда в Принстон, так и сейчас он во второй раз занял должность, первоначально предложенную его более старшему коллеге.

После окончания первого семестра Эддингтон поехал в Сомерсет. Рождество 1913 г. было последним, которое он с сестрой и матерью провел в их доме в Вестоне-на-Мэре.

Когда умер сэр Роберт Болл, открылась вакансия директора Обсерватории Кембриджского университета. В марте 1914 г. были преодолены наконец формальные трудности, связанные с возможностью совмещения двух должностей в Университете, и Плюмианский профессор стал директором Обсерватории. Новая должность предоставила ему возможность поселиться в просторной директорской квартире в восточном крыле главного здания Обсерватории. Эддингтон сразу же воспользовался этой возможностью, а также пригласил свою сестру и мать поселиться вместе с ним.

На Благовещение в 1914 г. Эддингтон с семьей переехал в свой

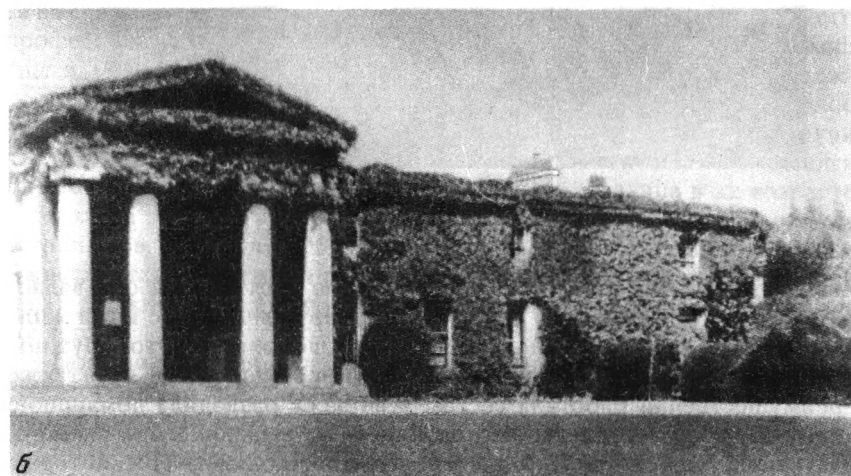
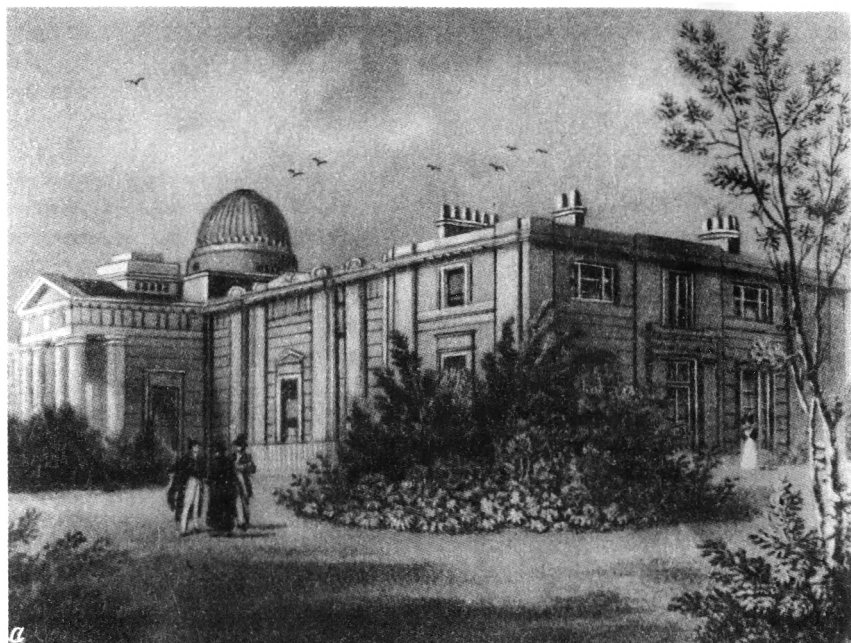


**А. Эддингтон играет в шахматы с матерью и сестрой.
Вестон-на-Мэре**

новый дом. С тех пор мисс Эддингтон три десятилетия оставалась хозяйкой в доме брата; до самой своей смерти в 1924 г. с ними жила и их мать. Абердинский терьер и кот дополняли это дружное семейство. Эддингтон очень любил свой небольшой сад, где также преимущественно работала сестра. Она даже разводила домашнюю птицу. Друзья и коллеги, посещавшие дом выдающегося ученого, никогда не забывали того радушия и счастливой атмосферы, которые они ощущали там.

В августе 1914 г., будучи секретарем секции А Британской ассоциации, Эддингтон посещает ее Собрание, на сей раз состоявшееся в Австралии, где выступает с докладом "Звезды и их движение".

Но эти дни уже омрачались предчувствиями надвигающейся войны. 3-го августа Эддингтон пишет: "Мы определенно слышали о войне между Германией и Россией. Каждому здесь представляется не требующим доказательств, что Англия также вступит в войну. Это кажется невероятным. Мы с беспокойством ждем новостей" [218, с. 91].



Здание Обсерватория в Кембридже
а – вид с востока на главный вход и директорские апартаменты, начало XIX в.;
б – главный вход, 1930 г.

Памятный день 4-го августа – в этот день Англия объявила войну Германии – застал Эддингтона в Аделаиде.

Возвращаясь домой после проведения Собрания, ученые не испытывали никаких неудобств из-за войны, за исключением лишь только отсутствия огней на палубе. Когда корабль вернулся в Англию, война продолжалась уже три месяца.

Как члену Общества друзей по убеждению и по семейной традиции, религиозные взгляды мешали Эддингтону воспринимать жизнь, как это делают обычные люди. Он не мог прямо или косвенно участвовать в каких-либо мероприятиях, связанных с войной. Если бы Эддингтон был мобилизован, это могло бы иметь самые трагические для него последствия. Но Кембриджский университет подтвердил, что национальным интересам соответствовало бы, чтобы он оставался на своей должности в Университете.

В 1918 г. война приближалась к решающим событиям и Военное министерство начало перерегистрацию лиц, ранее освобожденных от военной службы. Эддингтон был причислен ко 2-му разряду по медицинскому освидетельствованию, ему было 35 лет и он был одинокий. Военная комиссия, состоявшая из трех гражданских лиц, во главе с майором С.Г. Говардом прибыла в Кембридж 14 июня. Глава комиссии заявил, что способности Эддингтона могут быть лучше применены, если он будет в распоряжении правительства, добавив, что он не думает, что профессор Эддингтон может быть мобилизован как простой солдат. На это Эддингтон ответил: "Я отказываюсь идти на военную службу по религиозно-этическим мотивам". Решение комиссии было весьма либеральным, оно соглашалось с апелляцией и разрешало освобождение от призыва до 1 августа 1918 г.

Это решение оставляло время для дальнейших слушаний дела. Заседание 27 июня проводила комиссия, состоявшая исключительно из гражданских лиц, под председательством мистера Джорджа Тернера. Обосновывая свою просьбу об освобождении от военной службы, Эддингтон сказал: "Мое неприятие войны имеет религиозные причины. Я не могу поверить, что Бог зовет меня идти убивать людей, многие из которых воодушевлены теми же чувствами патриотизма и мнимым религиозным долгом, который посылает моего противника в бой. Утверждать, что наш религиозный долг отброшен моральным прогрессом, и принимать участие во вспышке гнева и варварства войны полностью противоречит моим взглядам на то, что представляет собой христианская религия. Даже если воздержание отказника ведет к выбору между победой и поражением, мы не можем искренне помогать нации, преднамеренно неподчиняющейся гласу божьему" [218, с. 93].

Эддингтон, как все квакеры, был убежденным пацифистом.

На заседании комиссии 11 июля позиция Эддингтона была поддержана письмом Королевского астронома сэра Фрэнка Дайсона. В конечном итоге комиссия приняла решение об освобождении Эддингтона от военной службы. Плюмианский профессор астрономии и директор

Обсерватории Кембриджского университета смог продолжать исследования и готовиться к наблюдению предстоящего солнечного затмения.

У английских ученых интерес к возможности наблюдения искривления лучей света, считает автор фундаментальной научной биографии Эйнштейна А. Пайс, возник после знакомства с работами Эйнштейна по общей теории относительности (ОТО).

Первая мировая война оборвала непосредственные связи между учеными Великобритании и Германии, но Эддингтон, будучи секретарем Королевского астрономического общества в 1912–1917 гг., поддерживал связь с Германией через нейтральную Голландию. Когда де Ситтер, преподававший в Лейденском университете, получил последние статьи Эйнштейна, он послал копии их Эддингтону, добавив к ним свои собственные работы в этой области 1916–1917 гг. Его обзорная статья в июньском 1917 г. выпуске журнала "Observatory" [377] и три крупные работы в "MNRAS"¹ [378–380] сразу привлекли к себе внимание. Еще более распространению идей Эйнштейна способствовал доклад Эддингтона на заседании Королевского астрономического общества в феврале 1917 г., в котором он акцентировал внимание на необходимости обнаружения отклонения лучей света для проверки ОТО. Впоследствии доклад по просьбе Лондонского физического общества был опубликован отдельным изданием [49] и стал, по сути говоря, первым полным изложением ОТО, появившимся на английском языке².

В 1920 г., когда вышло второе издание данного "Сообщения...", отклонение света в гравитационном поле уже было подтверждено. Это было сделано экспедицией Гринвичской обсерватории и Королевского общества на о-в Принсипи для наблюдения полного солнечного затмения 29 мая 1919 г. Подготовка экспедиции в разгар войны была связана со значительными трудностями. Но Королевский астроном сэр Фрэнк Дайсон понимал всю важность проведения наблюдения, которое может служить тестом для эйнштейновской теории тем более, что положение Солнца в момент полной фазы затмения было близко к ярким звездам скопления Гиад. Он получил правительственный грант в 1000 фунтов и, планируя проведение экспедиции, естественно, обратился к Эддингтону, бывшему долгое время сотрудником Королевской обсерватории в Гринвиче и ставшему лидером в области релятивистской физики в Англии.

В кабинете директора Гринвичской обсерватории вечером, накануне начала экспедиции, Дайсон с Эддингтоном и другими ее участниками обсуждали последние детали. Они окончательно согласились с тем, что величина отклонения, рассчитанная по теории Эйнштейна, в два раза должна превышать отклонение света по ньютоновской теории. Е.Т. Коттингем, который был ассистентом Эддингтона, спросил: "Что будет значить, если мы получим двойную эйнштейновскую

¹ Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (Ежемесячные записки Королевского астрономического общества).

² Первое обращение Эддингтона к теме релятивистской теории тяготения можно увидеть в его статье "Гравитация" [29].

оценку отклонения?" На что сэр Фрэнк ответил: "Тогда Эддингтон сойдет с ума, и Вы вернетесь домой один". Три месяца позже на Принсипи, когда Эддингтон провел свои первые измерения, он обратился к своему ассистенту со словами: "Коттингем, Вам не придется возвращаться домой одному".

Вот отрывок из воспоминаний об этой экспедиции, приведенный по дневнику Эддингтона:

"3 июня. Мы продолжаем фотографировать, по две фотографии каждую ночь после затмения и проводим все дни за измерениями. Облачная погода расстроила мои планы, и я старался проводить измерения другими способами, вместо запланированных, и поэтому я не мог сделать какого-либо предварительного сообщения о результате. Но одна пластина, которую я обработал, дала результат, согласующийся с предсказанным по теории Эйнштейна" [цит. по: 218, с. 40].

Это было событие, которое Эддингтон никогда не забывал. Он даже сочинил стихи об экспедиции в форме любимых им рубаи, которые и прочел на торжественном обеде в честь завершения экспедиции:

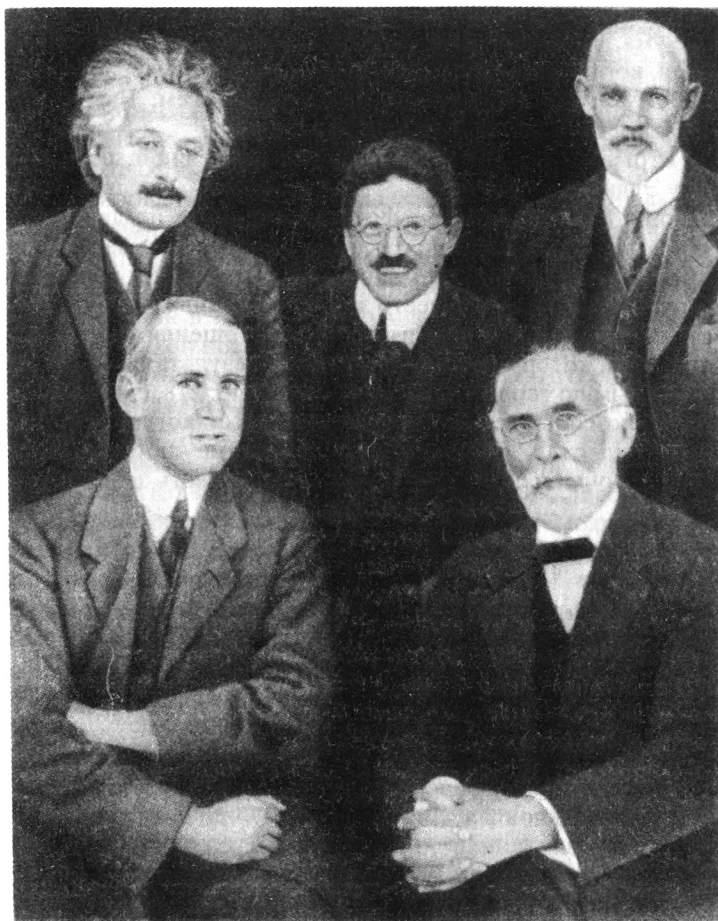
Об измерениях отчет я дам;
Что свет весом – одно лишь ясно нам.
Одно лишь ясно, остальное спорно:
Вблизи от Солнца путь луча не прям³.

Это было великое событие не только в жизни Эддингтона, но и в жизни создателя ОТО – Эйнштейна. Вот что рассказывает об этом А. Пайс:

«Эддингтон в своем предварительном докладе на заседании Британской ассоциации, проходившей в Борнмуте с 9 по 13 сентября, сообщил, что лучи света отклонились на угол от 0.87'' до значения, вдвое большего. Эти сведения дошли до Лоренца. (Через ван дер Пола, присутствовавшего на заседании.) Лоренц тут же телеграфировал Эйнштейну, которого сообщение взволновало – это неудивительно, ведь он ждал его семь лет. Затем настало 6 ноября 1919 г., день, когда Эйнштейн был канонизирован.

После 1905 г., совершив два первоклассных чуда, Эйнштейн стал "блаженным". Состоявшееся 6 ноября 1919 г. совместное заседание Королевского общества и Королевского астрономического общества напоминало обряд конгрегации. В качестве постулятора выступал Дайсон, которому помогали адвокаты-прокураторы Кроммелин и Эддингтон. Выступавший первым Дайсон в заключение сказал: "После тщательного изучения фотопластинок я готов заявить, что расчеты Эйнштейна подтверждены. Получен совершенно определенный результат, в соответствии с которым свет отклоняется согласно закону тяготения Эйнштейна". С дальнейшими разъяснениями выступил Кроммелин, после чего слово взял Эддингтон, заявивший, что результаты, полученные на Принсипи, подтверждают данные экспедиции в Собраль, и пере-

³ Стихотворный перевод Н.Н. Петровой [210].



Слева направо: стоят – А. Эйнштейн, П. Эренфест, В. де Ситтер;
сидят – А. Эддингтон, Г. Лоренц.
Лейден, 1923 г.

числил два несомненно установленных чуда, сотворенных уже в ранге "блаженного": объяснение смещения перигелия Меркурия и искривления лучей света на угол $(1.98 \pm 0.30)''$ и $(1.61 \pm 0.30)''$; такие результаты были получены соответственно в Собрале и на Принсипи. "Адвокат дьявола" Людвиг Зильберштейн выдвинул критические замечания: "Пока нет достаточных оснований утверждать, что искривление лучей света, наличие которого я признаю, вызывается тяготением". Он также требовал подтвердить наличие красного смещения: "Если красное смещение не удастся обнаружить (как было до сих пор), вся теория рухнет". Указывая на висящий в зале портрет Ньютона, Зильберштейн воззвал к конгрегации: "Память об этом великом чело-

веке заставляет нас с огромной осторожностью относиться к попыткам изменить или полностью пересмотреть его закон тяготения".

Председательствовавший на заседании президент Королевского общества кавалер ордена "За заслуги" Джозеф Джон Томсон, выслушав петицию "*instantier, instantius, instantissime*"⁴, провозгласил буллу канонизации: "Это самый важный результат, полученный в теории тяготения со времен Ньютона, и весьма символично, что о нем объявлено на заседании Общества, столь тесно связанного с именем великого ученого... Этот результат – одно из высочайших достижений человеческого разума" [270, с. 290–293].

С этим собранием связан анекдотичный случай, о котором поведал Чандрасекер: «Эддингтон вспомнил, что после окончания объединенного заседания Королевского общества и Королевского астрономического общества, Людвиг Зильберштейн подошел к нему и сказал: "Профессор Эддингтон, Вы, должно быть, один из трех человек в мире, которые понимают общую теорию относительности". На замешательство Эддингтона по поводу этого утверждения, Зильберштейн заметил: "Не скромничайте, Эддингтон", на что Эддингтон ответил: "Напротив, я стараюсь понять кто этот третий человек"» [214, с. 30]. Эддингтон не мог считать Зильберштейна приверженцем эйнштейновской общей теории относительности, так как последний опубликовал в 1918 г. работу, в которой, хотя и сохранил принцип общей ковариантности, но отрицал принцип эквивалентности по причине того, что он ставил тяготение "в совершенно исключительное и привилегированное положение" [376]. Зильберштейна также критиковали Ф.А. Линдеман и Г. Джеффрис на следующем заседании Королевского астрономического общества 17 декабря 1919 г., в котором приняли участие А. Эддингтон, Дж. Джинс, О. Лодж и которое также было посвящено обсуждению теории относительности [314].

Надо сказать, что все же для полной уверенности Эддингтону пришлось привлечь для измерений фотографии второй экспедиции в Собрале, которые вышли значительно лучшего качества, так как погода не подвела бразильскую экспедицию.

Эддингтон прекрасно понимал все значение новых идей Эйнштейна, их роль для математики, физики и философии, и отчетливо осознавал, что релятивистская теория – главное направление прогресса в физической науке и уже нельзя вернуться назад к старым представлениям. Однако он понимал, что необходимо подтверждение теории тремя важнейшими тестами. К тому времени два теста уже были успешно проведены и оставался последний – наиболее важный. Эддингтон написал об этом Эйнштейну. И вскоре получил ответ (письмо от 15 декабря 1919 г. из Берлина), начинавшийся следующими словами:

"Дорогой господин Эддингтон!

Прежде всего я должен пожелать Вам успеха в вашей трудной

⁴ "Быстро, быстрее, как можно быстрее" (лат.) – произносится при причислении к лику святых главой католической церкви.

экспедиции. Учитывая тот громадный интерес к теории относительности, который Вы проявили с самого начала, я думаю, я могу считать, что мы в долгу прежде всего перед Вами за Вашу инициативу, что эта экспедиция состоялась. Я изумлен тем интересом, который мои английские коллеги проявляют к теории, несмотря на ее трудности" [цит. по: 218, с. 41].

Эйнштейн понимал важность подобной проверки и говорил: "Если окажется, что этот эффект не существует, тогда вся теория должна быть отброшена".

В предисловии ко второму изданию своего "Сообщения..." Эддингтон привел результаты наблюдений солнечного затмения и затем добавил, что так как третий тест, смещение линий в солнечном спектре поглощения в красную сторону, еще не подтвержден, он воздерживается от окончательного суждения. В главе "Экспериментальная проверка", где описываются три теста, он замечал о последнем: "Трудности теста столь велики, что мы можем, наверно, отложить приговор, но было бы тщетно отрицать серьезность этого несомненного опровержения эйнштейновской теории... смещение фраунгоферовых линий – это необходимое и основное условие для подтверждения теории Эйнштейна... Если бы смещение солнечных линий было бы подтверждено, это было бы первым экспериментальным подтверждением, что релятивистские эффекты сохраняются в квантовых явлениях" [218, с. 41].

В Обсерватории Маунт-Вилсон доктор Сент-Джон безуспешно пытался измерить эйнштейновское смещение в солнечном спектре, для этого выделяя предсказанное микроскопическое смещение линий от различных доплеровских смещений из-за турбулентности и конвективных течений. Когда Эддингтон писал в январе 1918 г. У.С. Адамсу письмо о движении звезд, он закончил его замечанием: "Последняя статья Сент-Джона принесла мне бессонную ночь – старался совместить релятивистскую теорию с результатами или наоборот. Я не могу сделать какой-либо выбор" [218, с. 42].

В двадцатые годы Эддингтон публикует ряд статей по теории относительности в "Philosophical Magazine и Transaction of the Royal Society". Несколько его статей по теории гравитации и электронной теории материи появились в "Observatory". В выпуске этого журнала за июнь 1920 г. помещено его письмо, в котором он в ответ на вопрос читателя Свисса объясняет значение сделанного Эйнштейном предсказания красного смещения в солнечном спектре. Там же можно было найти юмористическое стихотворение из журнала "Панч", посвященное Эйнштейну и Эпштейну. Оба были весьма популярны. Научные теории Эйнштейна вызывали неподдельный интерес у мыслящей публики своей парадоксальностью. А ранние скульптуры Эпштейна⁵ шокировали консервативно мыслящих художников и английский средний класс.

⁵ Впоследствии Эпштейн выполнил прекрасный скульптурный портрет Эйнштейна. Он был подарен леди Джинс Фитцвиллиам музею Кембриджского университета, где и хранится в настоящее время.

Физик Эйнштейн и скульптор Эпштейн
Развеяли туман в головах всех людей.
Не устоял Ньютон в борьбе идей,
И пал классицизм во славе дней.

Физик Эйнштейн академиков сразил,
Скульптор Эпштейн обывателей изумил.
Первый вдали параллельные скрестил,
Второй образы божественные обновил.

Кроме научных работ по теории относительности, Эддингтон написал популярную книгу "Пространство, время и гравитация" [62], в которой при минимальном использовании математического аппарата попытался объяснить основные идеи теории для широкого круга читателей. Книга вышла в 1920 г. в издательстве Кембриджского университета.

* * *

Многие тысячи людей на четырех континентах слушали публичные выступления Эддингтона.

Вот как вспоминала лекцию Эддингтона о результатах экспедиции по наблюдению солнечного затмения Сесилия Пейн-Гапошкина, впоследствии ставшая профессором Гарвардского университета, крупным специалистом по звездным атмосферам и переменным звездам:

"Большой зал был переполнен. Лектор, изящный смуглый молодой человек, полностью погруженный в свои мысли, казалось, смотрел мимо своих слушателей. Он изложил основы теории относительности, как никто другой до него. Он рассказал о предсказанном Эйнштейном отклонении световых лучей при прохождении около Солнца и описал свою проверку этого предсказания... Вернувшись домой, я обнаружила, что могу записать по памяти всю лекцию слово в слово. Я не могла спать три ночи подряд" [356].

Эддингтон популяризировал астрофизику в самых широких кругах публики. Он вспоминал свою лекцию в Обществе имени Джона Рэя (студенческом обществе), президент которого, студент-третьекурсник медицинской специальности, представляя Эддингтона, сказал о нем как о профессоре астрологии (!) в университете. И это только один из многочисленных курьезов, связанных с такой популяризаторской деятельностью.

В. Дуглас в книге об Эддингтоне вспоминает о своих встречах с ним, когда он был в 1921 г. студентом-исследователем в Кавендишской лаборатории и посещал курс лекций по практической астрономии. Число слушателей было небольшим – семь или восемь человек. И как-то во втором семестре Эддингтон пригласил студентов на чай в субботу к пяти часам. «Мы пришли в назначенное время и нас встретили мисс Эддингтон и ее мать. Мы уже готовились начать пить чай в ярко освещенной гостиной, когда в передней слышались шаги, и миссис Эддингтон воскликнула: "Это Стенли наконец". Он вошел в комнату потирая руки, его лицо пылало, так как он на велосипеде возвращался

с уроков гольфа, и довольно холодный ветер всю дорогу дул ему навстречу. Он, видимо, был не в духе, но сразу присоединился к группе студентов у окна и вступил в непринужденную беседу с ними. В этой гостиной сохранялась традиционная обстановка, обращала на себя внимание большая плетеная корзинка, отделанная бисером – работа Элизабет Крезе, предки которой известны со второй половины восемнадцатого века. Это большая редкость находится сейчас в Фитцвиллиам-музее в Кембридже» [218, с. 108–109].

Дуглас вспоминал кабинет Эддингтона с лежащими на полу и софе пачками оттисков и множеством книг на полках по стенам, с отдельным шкафом, полным детективами и сочинениями П.Г. Вудхауса⁶.

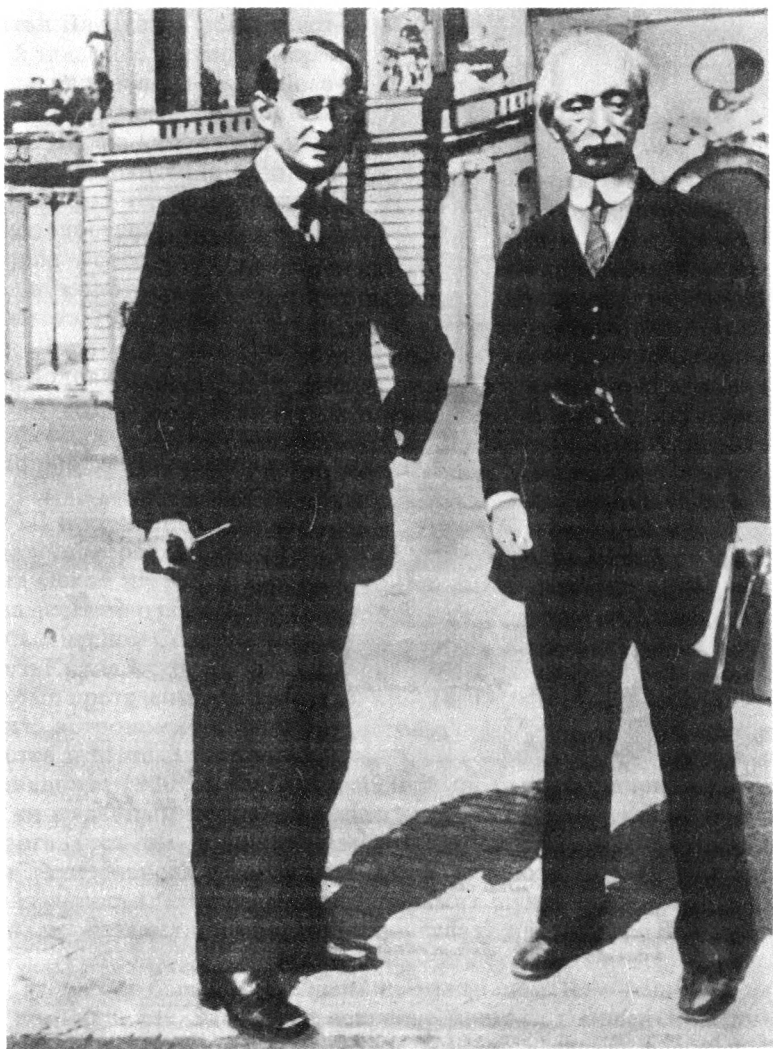
Профессор Сمارт вспоминал эпизод, произошедший с Милном, бывшим в ту пору профессором в Манчестере. Милн специально приехал в Кембридж к Эддингтону для того, чтобы обсудить результаты своей теоретической работы. Возвращаясь из кабинета Эддингтона через библиотеку Обсерватории, он остановился и воскликнул: "Я сомневаюсь, уж человек ли Эддингтон?!" Милн затем объяснил свое изумление. Оказывается, как только Милн рассказал о своей задаче, Эддингтон встал из-за стола, подошел к окну, остановился, держа руки за спиной и пристально смотря в даль. После нескольких минут размышления Эддингтон повернулся к Милну и спокойно сказал, какой ответ он ожидает. Результат в точности соответствовал полученному в работе Милна. Эддингтон действительно обладал способностью быстро решить правильно поставленную задачу. Так, когда он узнал об открытии Джинсом эффекта вязкости излучения в звезде [250, с. 82] в 1926 г., о котором Джинс собирался доложить на собрании КАО, он написал свое решение на почтовой открытке и послал ее Джинсу. Эту открытку Джинс получил перед собранием. Их результаты совпадали.

Так как некоторые окна западного крыла здания Обсерватории выходили на окно кабинета Эддингтона, имеются многочисленные свидетельства, что он часто долгими часами ходил по своей комнате или стоял, погруженный в мысли у окна, смотря на небо, и, что он, как правило, работал до поздней ночи.

Когда бывшим студентам или коллегам Эддингтона случалось писать ему о своих работах, он всегда отвечал конструктивной критикой или похвалой. Но его рецензии не всегда бывали достаточно объективны и полны. В них он обычно развивал собственные идеи, стимулированные рецензируемой работой, а не обсуждал идеи автора.

В переписке Эддингтона с профессором де Дондером из Брюссельского университета можно найти очень теплые отзывы о Жорже Леметре – юном бельгийском студенте, который начал работать под его руководством в прошлую сессию: "Я нашел Ж. Леметра блестящим студентом, удивительно быстро и ясно мыслящим и с большими математическими способностями. Он сделал несколько замечательных

⁶ Известный английский писатель П.Г. Вудхаус, автор популярных юмористических романов и рассказов.



**А. Эддингтон и Я. Каптейн в Риме
на Первом съезде Международного астрономического союза, 1922 г.**

работ во время пребывания здесь, которые, я надеюсь, он скоро опубликует. Я надеюсь, что его сотрудничество с Шепли в Гарварде также будет успешным. В случае, если его кандидатура будет рассматриваться на какую-либо должность в Бельгии, я могу дать ему наилучшие рекомендации" [218, с. 111].

Два письма Эддингтона к П.А.М. Дираку иллюстрируют тот живой интерес, который маститый ученый питал к своим студентам и более молодым коллегам. Первое по поводу представленной Эддингтоном

1926 Dec 8

Dear Jeans

I have made engagements which will necessitate my missing three R.A.S. meetings next year.

In these circumstances it is best that I should be off the Council and make room for someone able to attend. Will you mention this when the nominations come up?

This has nothing to do with the Resolutions which I have recorded - being an accidental coincidence.

Yours sincerely

A. L. Eddington

статьи Дирака по релятивистской динамике частиц, которая была направлена в "Philosophical Magazine...". Эддингтон писал Дираку, что статья нуждается в добавлении вводного параграфа, чтобы сделать ее более доступной читателям. Второе – собственно не письмо, а короткая записка от 10 марта 1926 г., приглашающая Дирака на чай во второй половине дня в субботу, около 4.15, для встречи с профессором Зоммерфельдом, который остановился у него.

На протяжении 20-х и 30-х годов университетские и академические нагрузки Эддингтона постоянно росли. Три года он был членом Совета Лондонского Королевского общества. Он был президентом Королевского астрономического общества и Математической ассоциации с 1930 по 1932 г. В 1936 г. он был назначен секретарем по иностранным делам Королевского астрономического общества и оставался им до самой смерти. В 1938 г. он стал президентом Международного астрономического союза. Все эти должности и обязанности, кроме представительских функций, требовали большой, но незаметной постороннему глазу административной работы.

Эддингтон был и прилежным прихожанином. Кембриджские квакеры помнили, как Эддингтон искренне молился в молельном доме на Йесус-лэйн. Он всегда отказывался от чести сидеть впереди залы, напротив основной части молящихся. Доктор Анна Н. Биддер писала: "Он сидел одиноко в продолжение собрания и после него, иногда с закрытыми глазами, но чаще пристально смотря в окно на небо. Я всегда чувствовала, что его религиозные переживания выражались в понятиях, которые были бы непостижимы большинству из нас. Однажды он встал и продекламировал короткий отрывок писания, в другой раз целую поэму из писания в три или четыре строфы, не делая каких-либо комментариев. В течение многих лет он ревизовал счета Общества [друзей, что составляло] часть простого, скромного служения..." [218, с. 98].

Эддингтон, случалось, сам сочинял четверостишия религиозного



**Портрет сэра Артура Эддингтона.
Рисунок художника
Августа Джона**

или философского содержания. Так, на экземпляре своей "Философии физической науки", подаренной Э.А. Милну, Эддингтон написал:

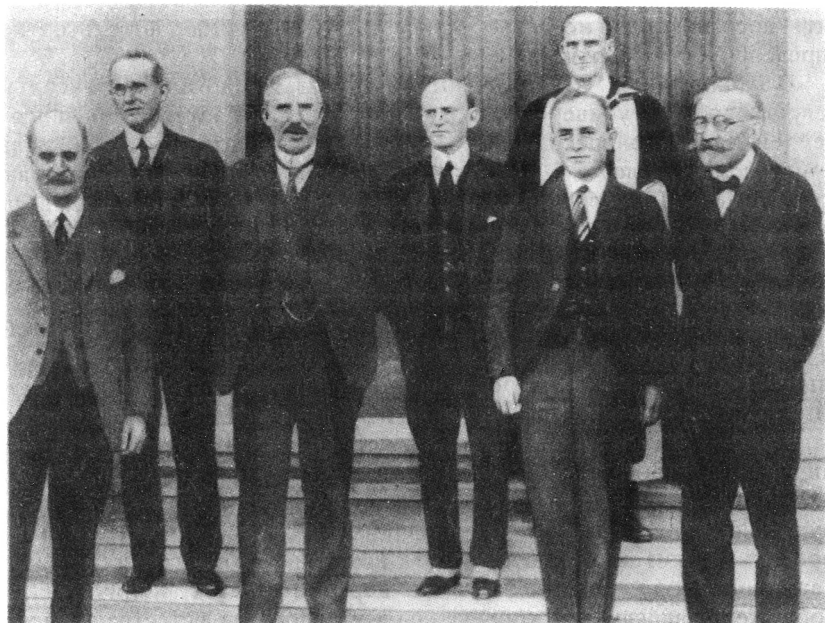
С берегов Гранта, из колледжа,
Где штудировал ты разные "измы",
Забавляясь эпистемологией
И селективным субъективизмом.

Как-то после ленча с Л.А. Пэрсом в Йесус-колледже (Кембридж) Эддингтон не захотел ехать на автомобиле назад в Обсерваторию, и они пошли вместе пешком по Мэдинглей-роуд. На вопрос, в каком возрасте он впервые заинтересовался астрономией, Эддингтон ответил, что не помнит себя без интереса к астрономии, и с огоньком в глазах добавил, что когда он был мальчишкой, его великой мечтой было стать Королевским астрономом. Но теперь в годы зрелости ни должность Королевского астронома в Гринвиче, ни приглашения в Америку не могут заставить его навсегда покинуть Кембридж. Кресло Плюмианского профессора, членство в Тринити и квартира в Обсерватории обеспечивают ему такую окружающую обстановку и степень свободы, которые подходят к его способностям и темпераменту. Эддингтон был прирожденным физиком, а Кембридж в те годы был "физической" столицей мира. Здесь, в Кавендишской лаборатории, Э. Резерфорд с сотрудниками делали великие открытия в атомной физике, что стимулировало и исследования в области теоретической физики.

С 14 по 22 июля 1925 г. в Кембридже состоялся II конгресс Международного астрономического союза (МАС). Естественно, большая часть ответственности за его проведение падала на Плюмианского профессора. На этом конгрессе он был избран вице-президентом МАС. Эддингтон в том же году был избран членом "Атенеума" – Лондонского научного клуба по Правилу II, по которому избирались персоны, имеющие выдающиеся научные заслуги. Его предложили к избранию Чарлз Скотт Шеррингтон и Эрнст Резерфорд. Действительно, мировое признание Эддингтона росло с каждым годом. Даже из Советской России, которая в то время не поддерживала широких международных научных связей, ему пришло письмо о признании⁷. Профессор С.П. Глазенап – президент Русского астрономического общества – писал Эддингтону в августе 1926 г. из Ленинграда:

"Я имею честь информировать Вас, что Русское астрономическое общество на последнем собрании единогласно избрало Вас почетным членом в знак признания Ваших замечательных научных работ, являющихся одними из наиболее глубоких и прекрасных, которые в истории нашей возлюбленной Науки отмечались. Я не буду в этом письме пытаться перечислить все оригинальные идеи, которые Вы щедро распространяли по королевству Астрономии, как и пытаться охарактеризовать блестящие и очаровательные Ваши книги, высоко оцениваемые и изучаемые в нашей стране" [218, с. 100].

⁷ Ранее, в 1923 г., А. Эддингтон был избран иностранным членом-корреспондентом Российской академии наук.



**На открытии Физической лаборатории
Бристольского университета 22 октября 1927 г.**
(слева направо: У.Г. Брэгг, А. Эддингтон, Э. Резерфорд, А. Фаулер,
М. Борн, П. Ланжевен, на заднем плане – А.М. Тиндалл)

Следующая осень была отмечена открытием новой Физической лаборатории им. Генри Герберта Вилла в Бристольском университете и присуждением от ее имени почетной степени доктора наук шести выдающимся физикам – М. Борну, П. Ланжевену, У.Г. Брэггу, А.С. Эддингтону, А. Фаулеру и Э. Резерфорду. В сезон 1927/28 г. Эддингтон получил более 40 приглашений прочесть лекции. По принятым им приглашениям одна лекция была прочитана в Гамбургском университете, а другая в Варшаве на собрании по случаю 200-летней годовщины со дня смерти Ньютона.

Английский историк науки и писатель И.Дж. Гроувер так описывает Эддингтона в это время: "По первому впечатлению Эддингтон был высокий, чисто выбритый, с поджарой фигурой человек. Его лицо было необычайно бледно с резко очерченным, если не упрямым, ртом, с нависающими бровями над глубоко сидящими задумчивыми глазами, единственно подвижными на его спокойном лице.

Он был молчалив и почти неспособен говорить сразу, без подготовки. Только нижняя часть зрачков его глаз была видна, остальная пряталась за густыми ресницами. Он долго размышлял над тем, что ему сказали, и только глаза двигались, как ищущие цель прожектора. Вскоре они останавливались на собеседнике, но он все еще ничего не говорил, ресницы делали один взмах, другой. Станным было бы ожи-

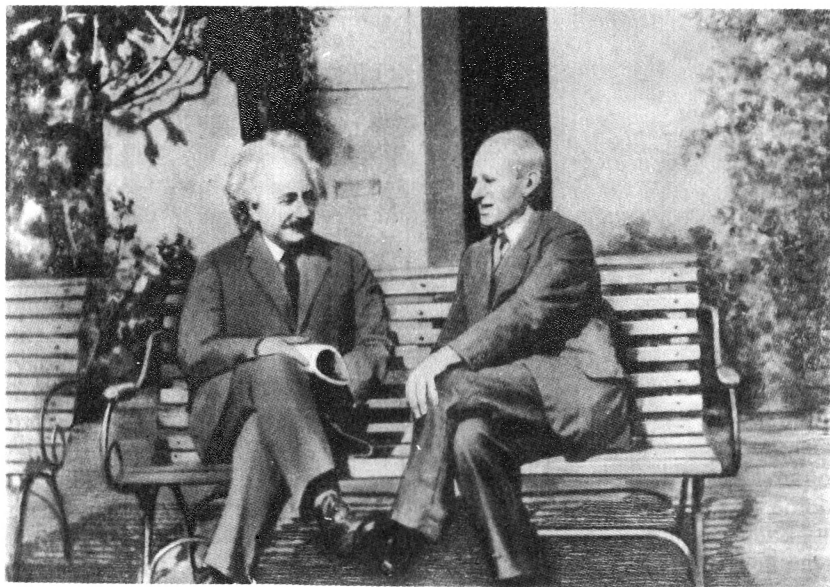
дать продолжения, но затем, когда ты уже начинал потеть от неопределенности, он отвечал на вопрос" [219].

В начале лета 1928 г. Эддингтон впервые приехал в Стокгольм, оттуда в древний университетский город Упсалу, а затем отправился в Лейден на III конгресс Международного астрономического союза. Конгресс состоялся с 5 по 13 июля. На нем была учреждена новая комиссия – N35 "Строение звезд", президентом ее был избран Эддингтон.

* * *

Мы уже писали о том признании, какое получила теория Эйнштейна на ноябрьском 1919 г. собрании Королевского астрономического общества. В обычных условиях было бы естественно ожидать, что Золотая медаль Общества следующего, 1920 года будет присуждена Альберту Эйнштейну. Тем более, что в декабре 1919 г. он был выбран кандидатом на Золотую медаль простым большинством голосов. Тогда же Эддингтон имел неосторожность сообщить об этом решении своему другу квакеру, который должен был посетить Германию, и просил его передать Эйнштейну, что он будет награжден Золотой медалью в следующем году. Однако, как это нередко бывает, политические соображения внесли свои коррективы в, казалось бы, естественный ход событий научной жизни. На январском 1920 г. собрании Королевского астрономического общества, на котором для утверждения предыдущего предложения требовалась квота в $\frac{3}{4}$ голосов, не удалось собрать необходимого большинства. Конечно, скорее всего, это произошло потому, что Эйнштейн как член Прусской академии наук имел немецкое гражданство. Возможно также, на решение повлияло и то, что на собрании отсутствовали оба влиятельных члена Общества, первоначально представивших Эйнштейна к награде – Герберт Холл Тёрнер, директор Обсерватории в Оксфорде, и Джеймс Джинс [326, с. 20]. Как бы там ни было, но Эддингтону пришлось спешно писать оправдательные письма Эйнштейну. Когда, в соответствии с правилами, в ноябре 1920 г. снова рассматривались кандидаты на представление к Золотой медали 1921 г., имя Эйнштейна опять было упомянуто, но мнения слишком сильно разделились и его кандидатура не прошла. Только в 1926 г. Эйнштейн смог получить по праву уже несколько лет принадлежавшую ему Золотую медаль (в 1920 г. она так и не была никому вручена). Ее вручил ему президент Королевского астрономического общества Дж. Джинс, который также выступил с приветственным словом [280, с. 37–38].

Следует, однако, заметить, что эти внутренние разногласия в Обществе не изменили положительного отношения к нему Эйнштейна. В период, когда он читал лекции по теории относительности в Англии, то в сопровождении Эрвина Фрица Фрейндлиха, профессора Университета Сент-Эндрюз, посетил собрание Королевского астрономического общества 10 июня 1921 г. В это время президентом КАО был Эддингтон. Председательствуя на собрании, он приветствовал великого физи-

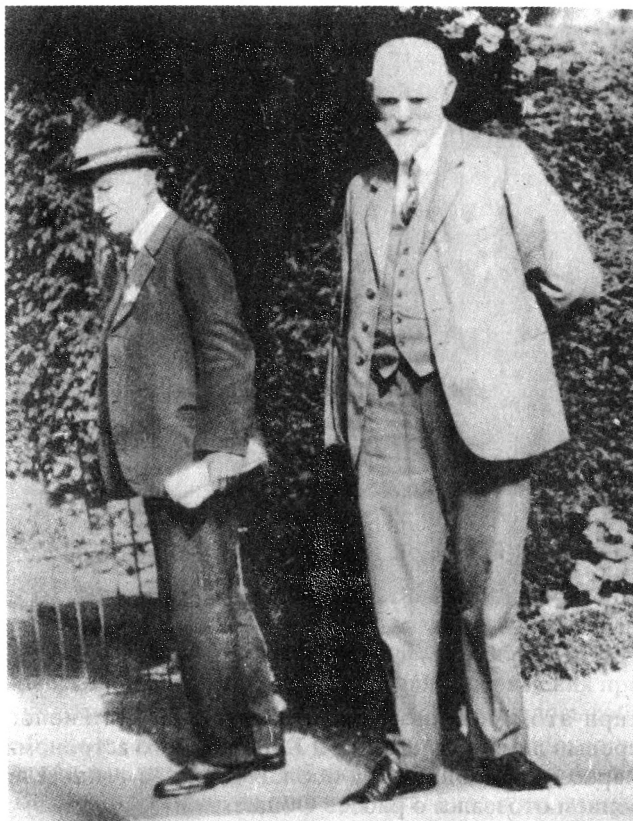


**А. Эйнштейн и А. Эддингтон у здания Обсерватории.
Кембридж, 1930 г.**

ка, сказав при этом, используя релятивистскую терминологию, что наконец мировые линии Эйнштейна и Королевского астрономического общества пересеклись. Эйнштейн поблагодарил за теплый прием и с удовлетворением отозвался о работе Общества.

Когда Эйнштейн приехал в Кембридж в июне 1930 г. в связи с присуждением ему почетной степени доктора наук, он остановился у Эддингтона. Рассказывая об этом визите через 24 года, Эйнштейн вспоминал, что в это время состоялась церемония объявления в честь Дня рождения короля Георга V списка лиц, получивших рыцарское достоинство. В нем было и имя Артура Эддингтона. Эйнштейн отмечал гордость и радость мисс Эддингтон, вызванные успехами брата – теперь сэра Артура. Эддингтон приглашал великого физика к себе еще с начала 20-х годов, но тогда Эйнштейн не смог найти возможность посетить Эддингтона. Только в 1930 г. он приехал в Кембридж. Эйнштейну у Эддингтона был оказан самый сердечный прием. Имея общие научные интересы в области релятивистской физики, ученые много времени провели в дискуссиях, оказавшихся для них весьма полезными. Еще до визита Эйнштейн писал Эддингтону: "Мне бы хотелось приехать в Англию без всяких других причин, как только иметь удовольствие беседовать с Вами..."

В том же году в Берлине состоялся Всемирный энергетический конгресс, на котором основными докладчиками были Эйнштейн и Эддингтон. Эддингтон выступил с докладом о субатомной энергии. А в конце года прочитал серию лекций по той же теме в Мадриде.



А. Эддингтон и В. де Ситтер.
Кембридж, 1931 г.

Летом, с 3 по 10 августа 1938 г. в Стокгольме проходил конгресс МАС под председательством Э. Эсклангона – директора Парижской обсерватории. На нем Эддингтон был избран седьмым президентом этой международной организации. В своей президентской речи он сказал о контрасте хороших перспектив развития астрономии в связи с вступлением в строй 200-дюймового телескопа на Паломарской обсерватории и ухудшающейся политической ситуацией: "...международную ситуацию никто не отважится пророчить. Но если в международной политике небо представляется в тяжелых облаках, то наша встреча в Стокгольме – это Солнце, выглядывающее из-за облаков..." [293, с. 117].

* * *

Когда началась вторая мировая война, Эддингтону шел пятьдесят седьмой год, конечно, и речи не было о призыве его в армию. Но Кембридж опустел, сократилось не только число студентов, но и аспи-

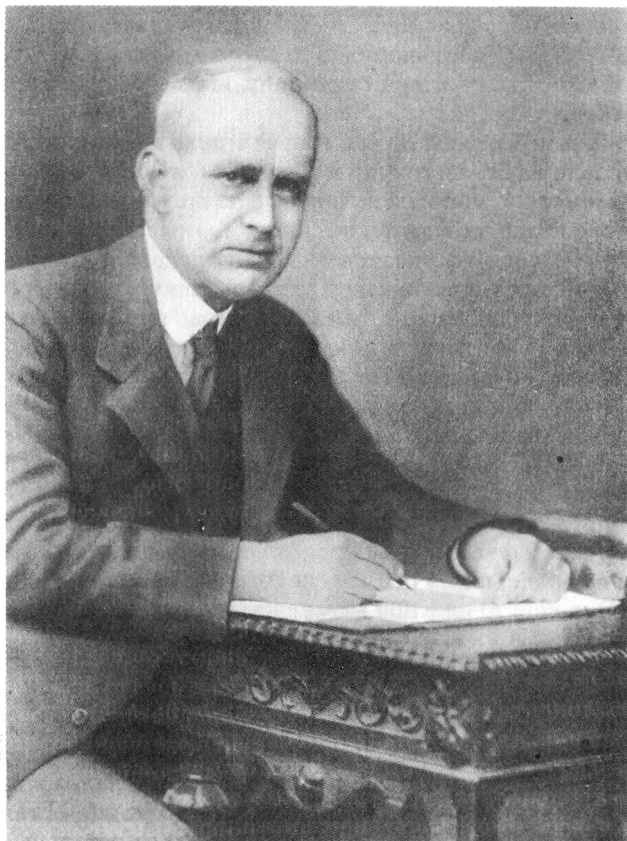
рантов. В своем последнем письме В. Дугласу Эддингтон писал в декабре 1943 г.: "Нам довольно хорошо здесь; о чем я больше всего сожалею, так это об отсутствии стимулирующих научных исследований студентов" [218, с. 113].

Политические взгляды Эддингтона всегда были самобытны и логически следовали из его внутренних убеждений и представлений о мире. Так, во время первой мировой войны он в числе многих других, лучших представителей западной интеллигенции, не поддается шовинистическому психозу. Вслед за писателем Дж. Голсуорси, который еще в 1915 г. в своей публицистической статье "Искусство и война" [236] выразил твердое убеждение в том, что война "при всем ее размахе и ужасе" не может уничтожить понимания между людьми, подавить их духовно, Эддингтон также возвышает свой голос. В 1916 г. в статье "Будущее интернациональной науки" ("Observatory" [39]) он выражает протест против мнения тех, кто считает сотрудничество с немецкими учеными после войны немыслимым вследствие того, "что они включены в общее осуждение нации". Он призвал к возобновлению международного сотрудничества в астрономии как можно быстрее после войны, если только эта наука не хочет испытывать постоянной задержки в развитии, тем более, писал он, что "некоторые проблемы нашей науки могут быть решены только при всемирном сотрудничестве".

Когда позже, в 1916 г. пришло известие из Германии о смерти известного астронома, члена Берлинской академии наук К. Шварцшильда после болезни, полученной во время военной службы, Эддингтон писал о нем, отдавая дань его научным заслугам и его чувству долга и патриотизма: "Образ Шварцшильда совсем не похож на тот, который обычно ассоциируется с учеными его национальности..., но мы оказали бы плохую услугу памяти того, кто до конца остался верен своей стране, выискивая черты, отделяющие его от остальных немцев" [218, с. 125].

Шварцшильдowska эллиптическая гипотеза звездных движений была, по мнению Эддингтона, "самой элегантной с математической точки зрения". Он ценил дружбу с этим немецким ученым, которую поддерживал в последние годы, и был глубоко расстроен тем, что война должна была развести ученых по двум противоположным лагерям: "Его живой и привлекательный характер и его готовность к сотрудничеству принесли ему теплые отношения с астрономами во многих странах мира, и его ранняя смерть ощущается как глубокая личная утрата" [218, с. 126].

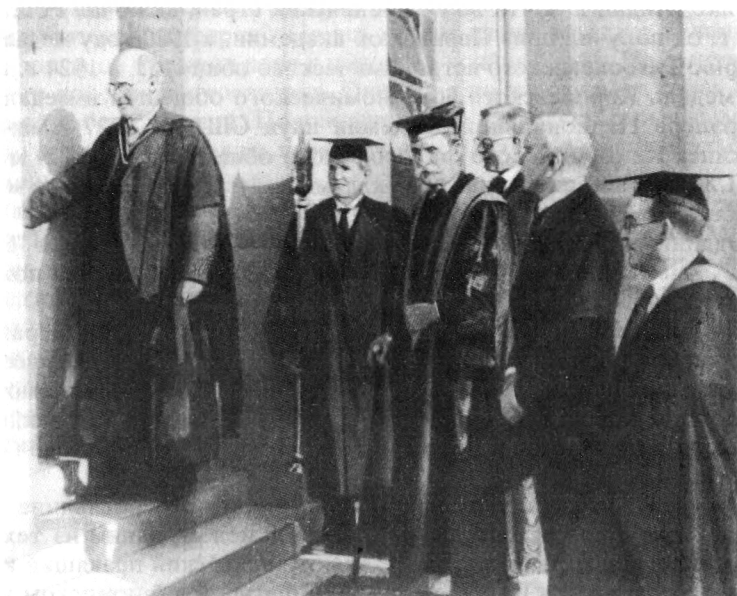
Усиление в 30-е годы в Германии нацистской нетерпимости и возрастание гонений на интеллигенцию вызвало в интеллектуальных кругах свободных стран большое беспокойство. В октябре 1953 г. известный математик Герман Вейль, родившийся в Германии, а с 1933 г. проживавший в США, вспоминал: "В августе 1933 г. в Геттингене прошло собрание ученых и я, после изгнания Куранта, Макса Борна и многих других нацистами, ставший директором Геттингенского математического института, где происходила большая часть собраний, играл



А. Эддингтон. 1931 г.

роль хозяина. В то время я готовился к выезду из Германии, так как я не мог жить при нацистском режиме; оставалось неопределенным, где я найду убежище – в Испании или в Штатах. Эддингтон посетил собрание. На экскурсии к реке Везер мы разошлись, а затем сели в одно и то же купе железнодорожного вагона, где я смог поделиться с ним моими секретными планами. Сразу же после закрытия собрания я оставил Южный Тироль, и затем моя жена с ребенком последовали за мной; я послал свое заявление об отставке уже из Швейцарии. Я никогда не забуду, что в эти тревожные дни, в этот решающий момент моей жизни, я провел несколько недолгих часов в приятном обществе Эддингтона, полностью меня понимавшим и одобрявшим" [218, с. 126].

На родине и за рубежом Эддингтон удостоился многих официальных наград и почестей как академических, так и государственных. Он получил почетные научные степени более чем от десяти университетов Великобритании и других стран. Был избран почетным или иностранным членом научных обществ в Америке, Новой Зеландии, Южной



**А. Эддингтон на официальном открытии
новой Обсерватории в Глазго, 1939 г.**



**С. Робертсон, Дж. Джинс и А. Эддингтон
в Клубе Королевского астрономического общества,
10 мая 1935 г.**

Африке, Индии и почти всех европейских стран, включая Россию. В 1919 г. он получил приз Парижской академии; в 1923 году медаль им. К. Брюс Тихоокеанского астрономического общества, в 1924 г. Золотую медаль Королевского астрономического общества и медаль им. Г. Дрэпера Национальной академии наук США; в 1927 г. премию Хопкинса Кембриджского философского общества; в 1928 г. медаль им. П.Ж.С. Жансена Парижской академии наук и Королевскую медаль Лондонского Королевского общества.

Эддингтон был возведен во дворянство в 1930 г., а орден "За заслуги", высочайшая награда Соединенного Королевства, был пожалован ему в июне 1938 г.⁸

На почтовой открытке из Копенгагена, куда он отбыл сразу же после церемонии награждения в Букингемском дворце, он писал сестре: "Формальности прошли очень быстро и не было возможности осмотреть королевские покои. Более серьезно, я узнал только двух человек, когда мы выстроились: посол в Варшаве сразу за мною и лорд Хэрлеч сразу за ним" [218, с. 127].

Гроувер так характеризовал Эддингтона в его последние годы жизни: "...он стал состоятельным джентельменом, одним из тех разнообразных персон, которые составляют английский правящий класс. Он был выдающейся интеллектуальной фигурой в британском империалистическом обществе, социально принадлежа к классу религиозных неконформистов, который своей простой жизнью, интенсивной работой и привычкой экономить сделал так много для развития капитализма" [219, с. 142].

И далее: "Он был бедным человеком в юности. Когда он умер в сравнительно раннем возрасте, шестидесяти двух лет, он оставил значительное состояние – 47 237 фунтов стерлингов. Он никогда не был женат и написал несколько книг, которые пользовались спросом и продавались большими тиражами. Тем не менее даже с его простыми потребностями такое состояние с трудом могло бы быть собрано без значительного внимания к финансовым делам. Глубокие раздумья Эддингтона, по-видимому, были не всегда посвящены мыслям о звездах" [219, с. 142].

В конце 30-х – начале 40-х годов у Эддингтона открылась неизлечимая болезнь. Гроувер писал: "В последние годы жизни его бледное, как у привидения, лицо было искажено страданием, когда он погружался в свои длительные размышления. Его почерк стал неровным, и он должен был прилагать большие усилия для того, чтобы контролировать себя" [219, с. 143].

С начала 1944 г. здоровье Эддингтона стало стремительно ухудшаться. Это вызвало беспокойство его сестры, но никто из его коллег, даже ближайшие друзья, ничего не замечали.

В начале ноября его врач сказал, что необходима операция. Весь

⁸ В соответствии с волей брата мисс Эддингтон после его смерти, уже в 1946 г., подарила пять золотых медалей и орден "За заслуги" муниципалитету г. Кендал.

год Эддингтон напряженно работал над шестым вариантом монографии "Фундаментальная теория". Но все же две главы остались ненаписанными, когда он отложил перо в ночь на 6 ноября 1944 г. На следующее утро его положили в госпиталь. Операция по поводу рака горла была сложной и безуспешной. Положение было настолько серьезным, что только сестре разрешалось навещать его. Эддингтон медленно умирал. Он скончался через две недели, 22 ноября.

Заупокойная служба состоялась 27 ноября в Соборе Тринити-колледжа. На службе присутствовали глава колледжа профессор Г.М. Три-вильон, вице-канцлер Университета, представители Тринити и других колледжей. Были также его сестра с кузеном Джоном Эддингтоном и ближайший друг сэра Артура на протяжении сорока лет – К. Тримбл. После службы была совершена кремация. Захоронение было произведено на кладбище Сант-Гайлса (за надгробием его матери), недалеко от Обсерватории, где Эддингтон жил и работал в течение трех десятилетий.

ПОСТИГАЯ ПРИРОДУ ЗВЕЗД

Основной вклад Артура Эддингтона в науку состоит в исследовании природы звезд – важнейших объектов во Вселенной на современном этапе ее эволюции. Еще в 1920 г. Эддингтон впервые указал на реакцию синтеза гелия из водорода как на источник энергии звезд [68]. Эддингтону принадлежит основополагающая идея о переносе энергии наружу из внутренних, горячих, областей звезды, где и происходит, как правило, ее выделение, лучеиспусканием, а не конвекцией, как предполагалось ранее. Поэтому на давление излучения стали смотреть как на важнейший фактор равновесного состояния нормальных звезд. И, пожалуй, самое важное из показанного Эддингтоном, так это то, что тепловая устойчивость звезды может быть обеспечена лишь в том случае, если ее смоделировать тепловой машиной с отрицательной теплоемкостью. Он сформулировал это в виде афоризма: "звезде понадобится энергия, чтобы остыть". Эддингтон на основе своих теоретических моделей звезд пришел к установлению соотношения "масса–светимость". А подтверждение этого соотношения, основывающееся на материалах наблюдений, дало Эддингтону уверенность в справедливости его главного предположения, что вещество недр звезд находится в состоянии идеального газа.

По мнению ряда исследователей, А. Эддингтон пришел к своим моделям благодаря участию в двух исследовательских программах по астрономии [214, 310]. Действительно, скорее всего, осознанию роли давления излучения для равновесия в звездных недрах способствовали его работы по радиальным колебаниям переменных звезд, которыми Эддингтон и пытался объяснить вариации блеска цефеид. Но впервые Эддингтон учитывает силу светового давления в своей работе по газовым оболочкам вокруг кометных ядер, которые несут явные следы действия сил отталкивания [10]. Вместе с тем в модели звезд Эддингтон вводил такие физические параметры, как светимости и спектральные характеристики звезд, что несомненно мотивировано также его длительной работой в области звездной астрономии. Эддингтон должен был испытывать определенное влияние эволюционной теории Рассела – одного из авторов знаменитой диаграммы "спектр–светимость" [320, 323, 387, 388].

ИСТОРИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЭДДИНГТОНОВСКОЙ МОДЕЛИ ЗВЕЗДЫ

Гипотеза Рассела об эволюции звезды была хорошо известна в Англии, так как он сам рассказал о ней в Лондоне еще 13 июня 1913 г. на собрании Королевского астрономического общества. Поэтому Эддингтон старался, чтобы его теоретическая модель не противоречила представлениям об эволюции звезд от гигантов к карликам – представлениям, отвергнутым позднее.

Обращение Эддингтона к физике процессов в звезде, ключевое значение в его теории таких параметров, как светимость и спектральный класс, выгодно отличало его подход от традиционного механистического, берущего начало в XIX в. и развиваемого в начале XX в. такими учеными, как Джордж Дарвин и Джеймс Джинс.

В 1924 г. Эддингтон, разрабатывая свою модель, использовал соотношения Крамерса для оценки непрозрачности звездного вещества и получил знаменитое соотношение "масса–светимость". Когда оно было сопоставлено с наблюдательными данными, то с удивлением было отмечено, что обеспечивается соответствие как для карликов, так и для звезд-гигантов. На этом основании Эддингтон заключил, что, несмотря на значительное отличие от гигантов по яркости и положению на диаграмме Герцшпрунга–Рассела, карлики также состоят из идеального газа. Но это заключение противоречило положению теории Рассела, по которому звезда в ходе эволюции, подвергаясь гравитационному сжатию, становится тусклой, так как вследствие сильной конденсации перестает быть газообразной. Соотношение же Эддингтона показывало, что карлики не могут понизить свою яркость без потери массы. Эддингтон использовал свою модель для интерпретации диаграммы Герцшпрунга–Рассела: для того чтобы объяснить горизонтальность последовательности гигантов и для определения точки на диаграмме, в которой возросшая плотность заставляет звезды совершать переход от последовательности гигантов к последовательности карликов. Хотя Эддингтон и получил два соотношения "масса–светимость" – для гигантов и для карликов, но ему не удалось отказаться от эволюционной схемы Герцшпрунга–Рассела.

Между 1924 г., когда он нашел соотношение "масса–светимость", и 1926 – годом публикации фундаментальной монографии, подытожившей десятилетний период его исследований звезд, Эддингтон оказался вовлеченным в дискуссию об источниках их энергии и эволюции, главной целью которой было оправдание эволюционных представлений Герцшпрунга–Рассела. Эддингтон тогда выдвинул идею о субатомном процессе превращения массы в энергию вследствие аннигиляции "электрон–протон", которая бы позволила звездам терять массу и уменьшать яркость, направляя их эволюцию к последовательности карликов.

ПРОБЛЕМА ЦЕФЕИД

Эддингтон писал в монографии "Внутреннее строение звезд": "Мои собственные исследования возникли из попыток обсудить проблему изменения блеска цефеид" [100]. Каким бы удивительным нам сейчас это ни казалось, но именно от попыток понять природу цефеид наука пришла к построению модели звезды. Эддингтон начал исследования в тот период, когда в области теории звезд ожидали своего решения множество проблем: определение условий, ведущих к формированию характерных звездных спектров, природа эволюции звезд, продолжительность жизни звезд, и, наконец, – проблема источников звездной энергии. Уже тогда, очевидно, осознавалось, что эти важнейшие вопросы взаимосвязаны и ни на один из них не может быть дан ответ без ответа и на все другие. Следовательно, необходимо было получить некое общее решение, т.е. построить стандартную модель звезды. Сейчас нам ясно, что для этого требовался новый, принципиально отличный от всех предлагавшихся ранее, подход.

При рассмотрении переменных звезд, в том числе и цефеид, господствовали представления о них как о двойных звездах.

В 1908 г. сотрудница Гарвардской обсерватории Генриетта Ливитт, определяя периоды колебаний блеска и пределы изменения звездных величин переменных в Малом Магеллановом облаке (неправильной карликовой галактике – спутнике нашей Галактики), заметила, что звезды с более длинным периодом имеют и наибольшую яркость. Через четыре года она установила, что периоды цефеид связаны простой степенной зависимостью с их светимостью (максимальной и минимальной). Прийти к этому заключению ей помогло то обстоятельство, что она исследовала звезды в другой, хотя и очень близкой галактике. Тем самым из-за ее большой удаленности можно было принять расстояния до всех звезд одинаковыми и исключить влияние расстояния на видимую яркость отдельной звезды. Надо все же заметить, что хотя Ливитт нашла зависимость, но не отождествила переменные звезды с цефеидами и не оценила их абсолютную светимость. Информация об открытии Ливитт содержалась в работе Э. Пикеринга [357].

На сообщение Пикеринга обратил внимание работавший тогда в Потсдаме датский астроном Эйнар Герцшпрунг. Он отождествил переменные с цефеидами и распространил соотношение Ливитт на цефеиды нашей Галактики. Он также попытался прокалибровать это соотношение в абсолютных величинах и установить его нуль-пункт. Герцшпрунг понимал, что это даст возможность определять расстояния до отдельных цефеид, так как если известны их периоды и светимости, то абсолютные величины светимости могут быть найдены по соотношению "период–светимость". Наиболее широко развил исследования Ливитт и Пикеринга Харлоу Шепли, ставший в 1921 г. директором Гарвардской обсерватории. Он это проделал статистическим методом оценки, основанным на лучевых скоростях и собственных движениях звезд, и существенно уточнил нуль-пункт кривой "период–светимость" [374]. С тех пор эта зависимость стала основным средством опреде-

ления расстояний до других звездных систем, звездных скоплений, особенно шаровых, где много цефеид, и галактик.

В этой связи цефеиды вызвали громадный интерес у Эддингтона, занимавшегося в то время звездной статистикой. Тем более, что проблема определения расстояний до звездных систем тогда была ключевой как в установлении структуры и размеров нашей Галактики, так и в утверждении концепции множественности галактик во Вселенной [383]. Роль Эддингтона в "великом споре" и в установлении современных представлений о крупномасштабной структуре Вселенной будет еще освещена в следующих главах.

В это время Х. Шепли выдвинул пульсационную гипотезу для объяснения изменения блеска цефеид. Он установил, что при светимостях цефеид, которые по Расселу и Герцшпрунгу в $(0.1-20) \cdot 10^3$ раз превосходят светимость Солнца, и учитывая то, что они относятся в основном к спектральным классам *F* и *G*, цефеиды должны иметь радиусы порядка $(10-140)R_{\odot}$. Но "если, – писал Шепли, – интерпретировать их как спектрально-двойные, то эти гигантские звезды должны двигаться по орбитам, видимые средние радиусы которых должны быть меньше $1/10$ радиусов самих звезд" [373, с. 459]. Далее он приходит к заключению:

"Перед лицом таких трудностей, по-видимому, следует совершенно отказаться от попыток интерпретировать цефеиды как двойные звезды... Гипотеза, которая проще других объясняет большинство свойств цефеид (если не все их свойства), основана на довольно неопределенной концепции периодических пульсаций одиночной звезды. Неопределенность этой гипотезы вызвана главным образом недостатком наших знаний о внутреннем строении звезд, а не трудностью объяснения наблюдательных данных, если мы рассматриваем звезду как газовую фигуру равновесия" [373, с. 460].

Таким образом, к тому времени, когда Эддингтон заинтересовался проблемой цефеид, они уже могли служить важными индикаторами расстояний в звездных системах, но их физическая природа оставалась весьма неопределенной. Кроме того, цефеиды, подробно изученные как объекты звездной астрономии, позволили Эддингтону осуществить некую комбинацию этих новых данных с более традиционными в построении моделей звезд. В значительной степени на построения Эддингтона оказала влияние диаграмма Герцшпрунга–Рассела, которой он уделял большое внимание уже в своей первой монографии [24]. Известно, что Эддингтон смотрел на эту диаграмму как представляющую эволюционный путь звезды вследствие процессов, вызываемых ее гравитационным сжатием. В какой-то степени, может быть, также внимание Эддингтона к проблеме цефеид отвлекло его от вопроса об источнике энергии звезд и связанного с ним вопроса о сроках их жизни. В отличие, например от Джеймса Джинса, который активно старался решить эти проблемы [250], Эддингтон практически игнорировал их до начала 20-х годов. Вместе с тем Эддингтон старался последовательно провести феноменологическое моделирование звезды как термодина-

мической системы. Он также старался понять процесс переноса излучения в звезде и ввел некоторые дополнительные характеристики для недр звезды. Новые результаты в наблюдательных и теоретических исследованиях обеспечили тот новый подход, который был необходим для решения старой задачи – построения модели звезды.

Известный американский астроном и историк науки профессор Оуэн Гингерич в беседе с автором этих строк в январе 1991 г. в Москве сообщил, как сам Харлоу Шепли рассказывал ему, что Эддингтон считал его работу 1914 г. "О природе и причине изменения блеска цефеид" [373] стимулировавшей Эддингтона к построению модели звезды на основе политропы с учетом давления излучения.

Методологически статью Шепли можно охарактеризовать как "доведение до абсурда" гипотезы двойных звезд при объяснении переменности цефеид. Кроме уже отмеченных заключений о несоответствии размеров звезд и радиусов их орбит в модели затменно-переменной, Шепли обратил внимание на иррегулярность кривой блеска цефеид и изменения в их спектре, которые также не могут быть объяснены затмениями. Он установил наблюдаемую зависимость между периодом и спектральным классом, справедливую как для длинно-периодических, так и для короткопериодических звезд, что не может иметь никаких объяснений в гипотезе двойных звезд. Подробное рассмотрение этого вопроса привело к выводу, что переменность цефеид зависит от изменений светимости одной звезды. Все гипотезы, включая о пятнах на звездах, переменного поглощения в атмосфере, анизотропного излучения и другие, оказались несостоятельными в объяснении столь резких колебаний яркости, характерных для цефеид.

Таким образом, уже в работах Шепли и Рассела была осуществлена правильная постановка задачи и проведено разделение проблемы на две части: относительно ясную феноменологическую и весьма неопределенную астрофизическую (или, скорее, физическую). Шепли прямо указывает на политропную конфигурацию, которой следует моделировать звезду при рассмотрении ее колебаний. Однако Шепли не построил сколько-нибудь разработанной модели цефеид, ограничившись лишь указанием на наличие в теории Эмдена соотношения, показывающего, что период колебания политропы обратно пропорционален квадратному корню из ее средней плотности [311, с. 451]:

$$p^2 \bar{\rho} = \text{const},$$

где p – период колебаний и $\bar{\rho}$ – средняя плотность.

Справедливости ради следует отметить, что первым, чисто теоретически, колебания газового шара в предположении его однородности рассмотрел еще Риттер в 1879 г. и получил соотношение между периодом и плотностью [362]. Но его работа не получила признания среди астрономов того времени.

Объединив зависимость период–плотность с полученным им самим из наблюдений соотношением период – спектральный класс звезды, Шепли получил соотношение между плотностью и спектральным клас-

сом. Это интерпретировалось им как подтверждение сжатия звезд при их эволюционном перемещении на диаграмме спектр–светимость. Очевидно, Шепли разделял убеждение Эддингтона об эволюции звезд от гигантов к карликам. К середине второй декады XX в. взгляды Эддингтона и Шепли по многим вопросам звездной астрофизики были очень близки. Так, Эддингтон во введении к своей обзорной статье "Пульсационная теория переменности цефеид" подчеркивает несомненную справедливость гипотезы Шепли [44]. Но Эддингтон был не только астроном, но и крупный теоретик в области прикладной математики и физики, и его собственный подход отличала аналитическая глубина.

Эддингтон начал рассмотрение вопроса с предположения, что пульсации цефеид сопровождаются периодическим обменом потенциальной гравитационной и кинетической энергий. Для того чтобы изучить устойчивость колебаний, он исследует диссипацию энергии при переносе тепла и света в звезде. Именно решая эту проблему, Эддингтон впервые осознает важность вопроса о переносе энергии в звезде. Отсюда берет начало его обобщенная модель звезды, находящейся в лучистом равновесии, и, по существу, генеральное направление развития всей физики звездных недр.

Эддингтон, однако, не мог обойти вопроса о поддержании объемных колебаний, которые должны были бы затухать вследствие диссипации энергии. Он предпринял попытку объяснить изменение в наблюдаемых характеристиках звезды – ее светимости и доплеровской скорости звездной поверхности – осцилляциями звезды в предположении справедливости для нее закона идеального газа. Эддингтон ограничился простейшим случаем – сферически-симметричными колебаниями, в отличие от Дарвина и Джинса, пытавшихся построить теорию несферических колебаний. Так как звезда имеет наибольшую яркость не при наибольшем радиусе (т.е. не тогда, когда звезда имеет наибольшую излучающую поверхность), а при среднем радиусе, Эддингтон, как и Шепли, исключил изменение размеров излучающей поверхности как главную причину изменения светимости. Он считал, что яркость обусловлена, скорее всего, вариациями интенсивности эмиссии света вследствие изменений внутренних условий в звезде, главным образом температуры.

Не развивая в деталях модель звезды, Эддингтон пытается понять с позиций термодинамики, как могут поддерживаться пульсации несмотря на диссипацию тепловой энергии. Первым предположением Эддингтона была аналогия с поведением звуковых волн, но сам он не мог не чувствовать бесперспективности подобной попытки. Второе предположение Эддингтона состояло в том, что, говоря его словами, звезда может функционировать "как (паровая) машина в термодинамическом смысле" [44], т.е. поток лучистой энергии, проходящий через внутренние области звезды, может превращаться в механическую работу пульсаций.

Именно из этого предположения Эддингтона и родилась его кон-

цепция звезды, находящейся в лучистом равновесии, а также и другие детали стандартной модели звезды как термодинамически стабильной системы. Но в такой машине, как и в паровом двигателе, необходим клапан. Роль клапана в звезде Эддингтон отвел непрозрачности звездного вещества, которая изменяясь могла регулировать выход лучистой энергии из звезды, а также регулировать действие лучистого давления. Для проверки своего предположения, что изменения в давлении излучения вызывают радиальные пульсации и вариации светимости звезды, Эддингтон предположил два теста. Во-первых, размеры пульсаций ограничены условием, что при максимальном размере радиуса звезды ускорение свободного падения на ее поверхности должно превышать ускорение вещества поверхности, для того чтобы звезда могла перейти в фазу сжатия. Для параметров, рассмотренных Эддингтоном, это условие выполняется в широких пределах. Во-вторых, плотности выведенные из температуры и светимости всегда хорошо согласуются.

Работа Эддингтона по звездным пульсациям сразу обратила на себя внимание. Ее заинтересованное обсуждение состоялось на собрании Королевского астрономического общества в 1918 г. [350]. Основным оппонентом в дискуссии выступил Дж. Джинс. Его возражения касались термодинамических аспектов модели пульсаций, предложенной Эддингтоном. Джинс подверг сомнению механизм, поддерживающий колебания несмотря на диссипацию тепловой энергии. Хотя и было отмечено фазовое соотношение между радиальными колебаниями и вариациями светимости звезды, Джинс полагал, что поверхностный эффект не указывает на действительное сжатие в звезде. Он также утверждал, что при принятом времени жизни звезды она должна совершить столь много колебаний, что диссипация энергии за один цикл должна быть очень мала, и таким образом это противоречит второму закону термодинамики. Теоретическая оценка Джинсом времени жизни цефеид приводила к дополнительным расхождениям во взглядах. Эддингтон считал явление цефеид весьма специфическим явлением. Он предостерегал: "Не каждая звезда является цефеидой" [44]. Джинс, напротив, предполагал, что все звезды проходят через стадию цефеид. Он старался определить длительность этой фазы перемножением части звезд, которые находятся в фазе цефеид, от общего числа звезд на длительность полной жизни звезд.

Ответ Эддингтона был опубликован в октябре 1918 г. в виде письма в журнал [58]. Хотя в письме не содержалось принципиально новых физических утверждений, в нем отстаивались основные соотношения пульсационной гипотезы. Так, Эддингтон утверждал, что соотношение "период–плотность" должно быть справедливым практически для любой теории пульсации, так как оно может быть получено только из одного анализа размерностей. Он также заметил, что несмотря на то, верна ли в деталях теория цефеид или нет, программа наблюдений для измерения скорости изменений периода вариаций блеска цефеид может послужить для установления ограничений на

скорость эволюции звезд. Из этой работы можно заключить следующее: хотя Эддингтон и полагал уже в то время, что источником энергии звезд являются ядерные процессы, но все же считал, что в ходе звездной эволюции плотность звезды увеличивается. В работе он также затронул проблемы эволюции звезд и источников их энергии, чем преимущественно до этого времени занимался Дж. Джинс.

КОНЦЕПЦИЯ ЛУЧИСТОГО РАВНОВЕСИЯ ЗВЕЗДЫ

Поняв роль давления излучения в процессах пульсации цефеид, Эддингтон вскоре осознал, что излучение должно играть важнейшую роль в определении строения практически всех звезд. На собрании Королевского астрономического общества в 1917 г. он сказал об этом со всей определенностью:

"В 1906 г. Шварцшильд выдвинул на передовые рубежи теорию лучистого равновесия, в которой тепло переносится к поверхности излучением. Излучение растет как четвертая степень температуры, поэтому, я думаю, вследствие того, что высокие температуры преобладают в недрах, оно должно быть наиболее важным процессом" [44].

Но еще в ноябре 1916 г. Эддингтоном была написана первая статья в серии его работ, посвященных моделям внутреннего строения звезд, находящихся в лучистом равновесии [41]. В ней вышеприведенный тезис раскрыт более полно. Так, подчеркивалось, что при общепринятых оценках температуры в недрах звезд излучение должно быть гораздо более эффективным в переносе тепла, чем теплопроводность и конвекция. Кратко рассмотрены условия возникновения конвекции в звезде и сделан вывод, что конвективные потоки смогут возникнуть только в том случае, если перенос тепла излучением будет недостаточно эффективным для предотвращения охлаждения внешних областей звезды и их опускания.

Показав роль лучистой энергии в недрах звезды, Эддингтон распространил теорию Шварцшильда [370] на всю звезду, и тем самым он наметил новый подход в теории звезд. Его модель звезды впервые объединила параметры, не связанные ранее в теории звезд: распределение плотности и температуры в недрах звезд, получаемое из общих физических соображений, и наблюдательные данные о светимостях и спектральных классах.

Нужно отметить, что Эддингтон начал с построения моделей звезд-гигантов, так как лишь к газообразным телам применима политропная модель Р. Эмдена¹. Вот что говорил Эддингтон на уже упоминавшемся выше собрании Королевского астрономического общества: "Большое число исследователей обсуждали температурные условия и плотности,

¹ Это модель, в которой звезда представляется в виде газового шара без источников энергии и находится в равновесии под действием силы тяжести и градиента давления. Уравнение состояния вещества в ней описывается уравнением политропы $P = k\rho^{1+1/n}$, где P – давление, ρ – плотность, $k = \text{const}$, n – индекс политропии.

превалирующие в звезде, начиная с Лэйна, затем Риттер, Кельвин, наш президент (Р.А. Сэмпсон – Королевский астроном Шотландии. – А.К.), Эмден, Си и другие. Я думаю, здесь есть одна деталь, которая должна дать сильный импульс этой работе – свидетельство, которое недавно получило веское подтверждение, а именно то, что многие звезды имеют плотность меньше, чем воздух, так что законы, которые справедливы для идеального газа, можно ожидать, применимы и к ним; тогда как к звездам типа нашего Солнца, которые имеют плотность выше, чем у воды, мы можем применять газовые законы только как очень грубую аппроксимацию" [44]. Тогда Эддингтон считал карлики жидкими и предлагал применить к ним приближение Ван-дер-Ваальса, в котором учитываются размеры молекул и силы взаимодействия между ними. Однако впоследствии он отказался от этих своих представлений.

В первой работе по физике звезд Эддингтон рассмотрел звезды-гиганты как газовые образования с молекулярным весом 54?! Такой странный, на наш взгляд, выбор явился прямым следствием предположения Эддингтона, что звезды состоят главным образом из паров железа с электронами в связанном состоянии. Но не надо забывать, что эти предположения были выдвинуты за несколько лет до появления работы Мегнада Саха, в которой разработана последовательная теория ионизации атомов [368]. Для расчета изменений интенсивности потока лучистой энергии в звезде вследствие его поглощения и эмиссии Эддингтон в этой работе пользовался законами Кирхгоффа и Стефана. Пренебрегая в своей первой версии расчетов давлением излучения, он полагал, что гравитационное сжатие звезды сдерживается только силами газового давления. При этом он получил, что давление газа (P) пропорционально четвертой степени температуры (T) [41]:

$$P \sim T^4.$$

Для вещества в состоянии идеального газа давление пропорционально произведению температуры на плотность: $P = (R/\mu)pT$ (т.е. $p \sim T^3$), и поэтому для газообразных звезд давление также пропорционально плотности в степени $4/3$: $P \sim \rho^{4/3}$ [41]. Данное соотношение позволило Эддингтону применить к звезде теорию Эмдена для политропной конфигурации с индексом политропы $n = 3$. Последнее означает предположение, что излучение настолько доминирует над конвекцией как способом переноса энергии, что отношение удельных теплосмостей вещества звезды не имеет существенного значения. И хотя Эддингтон не подчеркивает это в явном виде, но из его модели видно, что излучение – единственный способ переноса энергии в ней.

Данное принципиальное положение не осталось без критики. Так, Джинс считал выбор $n = 3$ не достаточно оправданным [333, 334, 250]. Но Эддингтон аргументировал свой выбор тем, что если бы только газовое давление поддерживало равновесие звезды, то это с необходимостью вело бы к очень высокой температуре недр. В таком случае поверхностная температура была бы слишком высокой и вещество звезды должно было обладать столь большой непро-

зрачностью, что, как считал Эддингтон, "едва ли удастся согласовать с известными свойствами вещества" [41, с. 23].

Однако в модели Эддингтона общее количество лучистой энергии в звезде более чем на четыре порядка по величине превышало ту энергию, которая могла бы генерироваться при гравитационном сжатии. Это возражение, существенное для сторонников концепции эволюции звезды вследствие ее сжатия, для Эддингтона, который склонялся к субатомным источникам энергии звезд, не представлялось принципиальным, и он ограничился замечанием, что в проблеме источников звездной энергии "далее указывается, что что-то неверно" [41, с. 24].

Эддингтон подчеркивает, что он вводит давление излучения не как гипотезу, а руководствуясь следующими соображениями: "Будет ли давление излучения играть важную роль или нет зависит от значения k (непрозрачности). Если мы придем к заключению о низком значении k , наше пренебрежение давлением излучения будет оправданным. С высоким же значением k найденное значение излучения будет в равновесии с гравитационным и наше пренебрежение им будет совершенно неприемлемым" [41, с. 25–26].

Можно поставить и такой вопрос: почему Эддингтон не прямо ввел давление излучения, а следовал, так сказать, окружным путем? Ответ будет двояким. Во-первых, для прямого расчета требуются данные о непрозрачности звездного вещества, которых в то время не было. Во-вторых, не было понимания, что среда не только испытывает давление со стороны излучения, но и является поглощающим экраном для него. Эддингтону пришлось прямо указывать: "Давление [излучения] является просто следствием его поглощения или рассеяния" [11, р. 26]. И хотя концепция Эддингтона опиралась на фундаментальные физические законы и, по его мнению, "эти [законы] обеспечивали солидное основание для дискуссии" [11, с. 17], все же некоторым участникам обсуждения доклада в Королевском астрономическом обществе этого оказалось недостаточно. Даже Л. Зильберштейн, активно обсуждавший и поддерживавший теорию относительности на собрании Общества, потребовал более строгого обоснования лучистого давления [44].

Формальное введение лучистого давления (P_r) в модели Эддингтона было довольно простым – путем введения дополнительного члена давления излучения в соответствующем уравнении. При этом, в сравнении с классической моделью Эмдена, распределение плотности сохраняется, а температуры и давления изменяются на параметр β_c . Параметр β_c представляет собой часть общего давления, обеспечиваемого кинетической энергией газа, а остаток $(1 - \beta_c)$ обеспечивается излучением. Эддингтон пришел к заключению, что β_c не зависит от плотности, а является однозначной функцией массы звезд-гигантов. Вместе с тем параметр β_c может быть использован для оценки непрозрачности звездного вещества и связи последней с наблюдательными характеристиками звезды. Для пробной звезды массой $1,5M_\odot$ Эддингтон получил $\beta = 0,047$. Таким образом он пришел к

заклучению, что бóльшая часть веса звезды поддерживается излучением. Пониженное же газовое давление и температура изменяют непрозрачность в $\sim 10^6$ раз, и она становится близкой к значениям, найденным в лаборатории при измерении поглощения рентгеновских лучей.

Эддингтон также обращал внимание на следующее обстоятельство: "Интересно отметить, что бóльшая часть энергии сосредоточена в эфире. Только небольшая часть запасов тепла (газовой) звезды представлена движением молекул; бóльшая часть ее состоит из эфирных волн, путешествующих во всех направлениях, но не способных улетучиться, за исключением очень медленного выхода сквозь сеть вещества, которое заключает их" [41, с. 28].

На следующей странице этой работы [41, с. 29] Эддингтон теоретически получает свое знаменитое соотношение "масса—светимость":

$$L \sim M(1 - \beta_c).$$

Надо отметить, что это первый вариант соотношения "масса—светимость". Но тогда, в 1916 г., его больше интересовала независимость светимости от плотности, чем зависимость светимости от массы. В 1924 г. Эддингтон уточнил последнюю зависимость, учитывая также изменение непрозрачности с температурой.

Модель Эддингтона постепенно совершенствовалась. После ее первого обсуждения в Королевском астрономическом обществе Джинс и Линдеман (впоследствии лорд Черуэлл) обратили внимание на то, что при температурах, найденных Эддингтоном для звездных недр, вещество их должно быть практически полностью ионизованным [250]. Поэтому в следующей работе [42] Эддингтон существенно пересматривает свою первоначальную оценку среднего молекулярного веса вещества звезд с 54 до 2, как наиболее подходящего значения для всех сильно ионизованных химических элементов за исключением водорода. Так как в то время было мало известно об истинном обилии водорода и других элементов в недрах звезд, подобное предположение Эддингтона позволило ему избежать дискуссий о химическом составе звезд.

Но принятие положения о значительной степени ионизации вещества внесло изменения в соотношения, связывающие между собой давление, температуру и плотность. В этом случае, писал Эддингтон, свободные электроны действуют как независимые "частицы, вызывающие давление, так что для тех же самых температуры и плотности давление станет больше" [42, с. 598]. Надо также сказать, что ионизованное состояние в некоторой степени уменьшает вклад лучистого давления в общее давление, поддерживающее равновесие звезды, но, конечно, это ни в коей мере не разрушает основную идею Эддингтона.

Математический аппарат, развитый Эддингтоном в этой работе, позволял ему рассчитывать параметр β для газовых сфер любых масс: "от пузырей до Вселенных" [42, с. 603]. Расчеты Эддингтона показали, что β изменяется от единицы до значений, близких к нулю, для масс

звезд от $1,8 \cdot 10^{33}$ до $3,7 \cdot 10^{34}$ г. Итак, звезды небольшой массы с низким молекулярным весом поддерживаются в равновесии давлением газа. Только для массивных звезд лучевое давление становится преобладающим. Эддингтон также отметил "поразительное совпадение" [42, с. 603] наблюдаемых значений масс звезд с тем интервалом, что дает теория для β , изменяющегося от 1 до 0. По-видимому, когда давление излучения становится близким к уравнивающему действию силы гравитации, звезда может легко быть разрушена вследствие вращения или каких-либо других причин.

Эддингтон писал по этому поводу: "Я думаю, вероятно, этот результат нечто большее, чем простое совпадение, и, что это как раз та причина, которая определяет почему звезды так близки к одной стандартной величине. Газовая сфера под действием двух противоположных и почти сбалансированных сил будет, скорее всего, на грани неустойчивости; нам необходимо только обратиться к какому-нибудь аналогичному случаю вращающейся массы, в которой центробежная сила уравнивает значительную часть гравитационной. Мы должны ожидать, поэтому, что массы, в которых давление излучения уравнивает большую часть гравитации, будут очень охотно разделяться под влиянием сравнительно небольших возмущений – вращения или, возможно, неполной однородности. Следовательно, первоначальное вещество будет постоянно делиться и подразделяться, пока масса не станет ниже опасного предела; после этого не будет уже каких-либо причин для деления" [42, р. 603].

Новые результаты Эддингтона значительно модифицировали теорию вращающихся жидких конфигураций, развивавшуюся Дарвином и Джинсом, применительно к реальным звездам. Так, в классической теории сфероиды Маклорена и эллипсоиды Якоби становились неустойчивыми, когда центробежная сила достигала 0,36, а гравитационная 0,19–0,55 [44]. Более образно основную идею Эддингтон выразил в своей монографии:

«...относительно соотношения между веществом и эфиром (давление газа и давление излучения) соперничество подавляется всегда одной стороной за исключением интервала (для газовых масс от 10^{33} до 10^{35} г.), где мы ожидаем, может случиться нечто интересное. То, что "случается" – это звезды» [100].

Но в свете вышесказанного очевидно, что существует и верхний предел для светимости (L), которую может поддерживать данная масса (M). Это L_e – эддингтоновский предел светимости. Данное понятие, введенное Эддингтоном, играет важнейшую роль в современной релятивистской астрофизике, особенно в изучении квазаров, рентгеновских источников и аккреционных дисков.

БЕЛЫЕ КАРЛИКИ

Эддингтон писал в своей фундаментальной монографии о внутреннем строении звезд: "К началу 1924 г. теория гигантов и карликов Герцшпрунга и Рассела была почти повсеместно принята. Герцшпрунг и

Рассел выявили замечательное подразделение звезд на две серии высокой и низкой светимости соответственно и установили связь светимости со спектральным классом в простой системе. Их результаты были полностью подтверждены последующими исследованиями и оказали далеко идущее влияние на развитие звездной астрономии" [100, с. 163].

Далее он отмечал, что ранее теория предполагала переход от гигантов или серий высокой светимости к карликам или слабым сериям, когда звезда при сжатии достигает плотности, при которой законы идеального газа становятся неприменимыми. Поэтому применение соотношения "масса–светимость" было ограничено звездами-гигантами. Но сейчас ясно, подчеркнул Эддингтон, что даже в таких плотных звездах, как наше Солнце, вещество ведет себя как идеальный газ. Это связано с сильной ионизацией элементов, и так как размер атомов определяется их электронной системой, то при полной ионизации и в более плотном состоянии газ не теряет свойств идеального.

В феврале 1924 г. Эддингтоном было получено теоретическое соотношение "масса–светимость" для звезд, состоящих из идеального газа, одинаково справедливое как для карликов, так и для гигантов. Придерживаясь расселовской эволюционной теории, Эддингтон для ее сохранения должен был допустить, что звездная энергия генерируется в результате потери массы звезды.

Соотношение "масса–светимость" 1924 г. было не первое, полученное Эддингтоном. Первоначально Эддингтон полагал, что непрозрачность звездного вещества постоянна и β изменяется в пределах изменения самих звездных масс. Поэтому в то время он полагал $L \sim M^2$. Но в работе [92] 1924 г. Эддингтон пересмотрел это соотношение, учтя зависимость непрозрачности от температуры. Вначале он предложил собственную теорию, но она не была удовлетворительной, и вскоре Эддингтон отказался от нее и применил теорию, развитую Крамерсом [342]. В 1926 г. компоненты двойной системы Капелла были единственными звездами-гигантами, у которых были с достаточной точностью известны массы и светимости. Сравнивая свою теоретическую кривую с наблюдательными данными, Эддингтон нашел, что карлики ложатся на ту же самую кривую, что и гиганты. По сути дела, было получено свидетельство, что вещество карликов также подчиняется законам идеального газа.

Эддингтон писал: "Более половины звезд, использованных для сравнения, составляют карлики. Совпадение их абсолютных величин со значениями, предсказанными теорией, противоречит общераспространенной точке зрения, согласно которой их плотность слишком велика и для них не выполняются законы идеального газа, а их низкая светимость объясняется отклонением от газовых законов. Полученные данные говорят о том, что их низкая светимость является результатом сравнительно малой массы и не требует своего объяснения привлечением каких-либо других физических различий.

Широко распространенное мнение, что если плотность звезды заключена в пределах от 0,1 до 1 г/см³, то сжатие газа будет быстро

уменьшаться по сравнению со сжатием идеального газа, основано на неправильной аналогии между звездными ионами и атомами при обычной температуре. Из-за высокой ионизации атомы в звездах занимают примерно только $1/100\,000$ объема обычных атомов, и, естественно, отклонения от законов идеального газа должны начинаться лишь при плотностях в $100\,000$ раз выше обычных" [92, с. 332].

Видно, как Эддингтон естественно подошел к проблеме белых карликов – нового типа звезд, плотность которых как раз и имеет указанное предельное значение.

Первый белый карлик был открыт по отклонениям в движении звезды, спутником которой он является, под действием его притяжения. Это произошло в 1844 г., когда Фридрих Вильгельм Бессель, работавший в Кенигсбергской обсерватории, на основании обработки своих наблюдений за 1834–1840 гг. обнаружил, что собственное движение Сириуса представляет собой волнистую линию на небесной сфере. На основании закона всемирного тяготения Бессель сделал вывод, что это может быть результатом возмущений со стороны невидимого спутника [260]. Его стали называть темной звездой. Эддингтон говорил, что это была первая "невидимая звезда", существование которой было бесспорно доказано. Но эта звезда оказалась не невидимой. В 1862 г. американский оптик А. Кларк, испытывая новый объектив для обсерватории Эванстонского университета, заметил слабый спутник у Сириуса. Наблюдая за ним, Кларк установил, что период обращения системы составляет около 50 лет, как теоретически и предсказал Бессель, а масса спутника порядка массы Солнца. В 1914 г. Уолтер Сидни Адамс на крупнейшем телескопе обсерватории Маунт-Вилсон обнаружил, что спектр спутника похож на спектр Сириуса. Но, учитывая, что светимость спутника составляет $\sim 1/360$ светимости Солнца, а поверхностная яркость даже больше, чем у нашего светила, его площадь поверхности, а следовательно, и радиус получаются неимоверно малы. Это означает огромную плотность спутника Сириуса:

«Сообщение спутника Сириуса после его расшифровки гласило: "Я состою из вещества, плотность которого в 3000 раз выше, чем все, с чем вам когда-либо приходилось иметь дело; тонна моего вещества – это маленький кусочек, который умещается в спичечной коробке". Что можно сказать в ответ на такое послание? В 1914 г. большинство из нас ответило так: "Полно! Не болтайте глупостей!"

Но в 1924 г. была развита теория (Эддингтона. – А.К.), изложенная в первой лекции (о возможности сильного сжатия ионизованного вещества. – А.К.); может быть, вы помните, что в конце нее есть указание на возможность чрезвычайного сжатия материи в звездах и на плотности, намного превосходящие все, что нам известно из земных опытов. Это надо принять во внимание в связи со странным посланием спутника Сириуса. Такое послание уже нельзя считать бессмысленным. Мы не утверждаем сразу, что оно несомненно верно, но его надо обсудить и отнести к нему осторожно, а не как к заведомой бессмыслице» [107, с. 50].

Все же для поддержания такой плотности нужны чудовищные давления – в 10 миллионов раз выше, чем внутри Солнца. Тепловое давление, определяемое по законам идеального газа, оказалось неприемлемым. Это стало ясно после работы Эддингтона 1924 г.

Теоретическое объяснение стало возможным благодаря созданию квантовой механики. В 1925 г. Вольфганг Паули сформулировал свой знаменитый принцип. Этот принцип запрета гласил, что в одном квантовом состоянии (т.е. на одной "орбите" вокруг ядра атома) не могут находиться два (или более) электрона. Этот принцип был обобщен Энрико Ферми для любой системы, в том числе для газа. Те частицы, которые ему подчиняются, получили название фермионов. Ферми установил, что давление в "идеальном газе" фермионов обеспечивается быстрыми частицами, которые даже при абсолютном нуле температуры должны двигаться с огромными скоростями, так как по принципу Паули все нижние состояния энергии в таком газе уже заняты. Такой газ называется "вырожденным идеальным газом".

В 1926 г. Рэлф Хауэрд Фаулер использовал теорию Ферми для объяснения поведения вещества в белых карликах. Он показал, что громадные давления в их недрах могут объясняться давлением вырожденного газа электронов. Новая физика сразу же стала работать в астрофизической проблематике. Начало изучения белых карликов было положено [228, 230].

В чем же суть этих затруднений, которые помогла разрешить теория Фаулера? Сразу после установления высокой средней плотности белых карликов, от 105 до 107 г/см³, и предположения Эддингтона, что вещество в них находится в состоянии идеального газа, ему стало ясно наличие парадокса. Действительно, что произойдет при остывании белого карлика? В этом случае электроны рекомбинируют с протонами и средняя плотность значительно уменьшится – до ~10 г/см³. При этом размеры карлика должны увеличиться в сотни или тысячи раз. Но на такое расширение необходимо затратить огромную энергию для преодоления сил гравитации. Мы уже отмечали, что Эддингтон писал об этом в виде афоризма: "звезде понадобится энергия, чтобы остыть". Он вопрошал: "Я не понимаю, как звезда, которая пришла в сжатое состояние, собирается выходить из него... Казалось бы, звезда окажется в весьма затруднительном положении, когда ей не будет хватать запасов ядерной энергии" [107].

Наиболее ясную формулировку парадоксу дал в своей пионерской работе Фаулер:

"Вещество звезды излучает так много энергии при переходе в состояние белого карлика, что оно уже обладает меньшей энергией, чем то же вещество в виде нормальных отдельных атомов при абсолютном нуле температуры. Что могло бы произойти, если бы часть вещества была удалена из звезды и давление уменьшилось?" [315].

Решение Фаулером парадокса Эддингтона состояло в следующем. При тех температурах и плотностях, которые господствуют внутри белых карликов, электроны должны быть сильно вырождены и под-

чиняться статистике Ферми–Дирака. В этом случае давление не будет зависеть от температуры. А тогда полная кинетическая энергия вещества оказывается в 2–4 раза больше отрицательной энергии и парадокс Эддингтона не возникает.

Независимое подтверждение высокой плотности белого карлика было бы возможно в случае обнаружения у него значительного "гравитационного красного смещения". Это обстоятельство первым понял Эддингтон, который также активно работал в области релятивистской физики. По теории Эйнштейна, гравитационное красное смещение обратно пропорционально радиусу звезды. В 1924 г. Эддингтон предсказал, что гравитационное красное смещение Сириуса *B* (так называли спутник Сириуса в отличие от собственно звезды Сириуса *A*) должно быть ~ 20 км/с (для сравнения аналогичный эффект для Солнца $\sim 0,6$ км/с).

В 1925 г., по просьбе Эддингтона, У.С. Адамс выполнил прецизионное изучение спектра Сириуса *B* с целью измерения предсказанного эффекта. Его результат дал среднее значение 21 км/с. Адамс делает следующий вывод: "Таким образом, звездные спектры дают нам третий способ наблюдательной проверки теорий относительности и свидетельствуют об исключительно высокой плотности карликовых звезд ранних спектральных типов, предсказанной Эддингтоном" [288].

С другой стороны, Эддингтон придавал исключительно важное значение обнаружению гравитационного красного смещения, так как оно являлось бы наблюдательным подтверждением общей теории относительности Эйнштейна, своеобразным проверочным тестом. Поэтому не случайно главу, посвященную белым карликам, Эддингтон заключает: "...проф. Адамс убил двух зайцев одним выстрелом; он осуществил новую проверку эйнштейновской общей теории относительности и подтвердил наше подозрение, что вещество в 2000 раз более плотное, чем платина, не только возможно, но в действительности существует во Вселенной" [100, с. 173].

Несмотря на выдающуюся роль в создании теории белых карликов, которую сыграли работы Эддингтона, последующее ее развитие он воспринимал с трудом.

В 1930 г. для продолжения образования в Тринити-колледже в Кембридж прибыл 20-летний Субрахманьян Чандрасекар. Он только что окончил Президентский колледж в Мадрасе. Там он прослушал курс лекций по статистической физике и строению атомов известного мюнхенского физика-теоретика Арнольда Зоммерфельда, преподававшего в Мадрасе в качестве приглашенного профессора. Есть все основания предполагать, что Зоммерфельд в своих лекциях изложил также недавно им созданную квантовую электронную теорию металлов. Заинтересовавшись проблемами теоретической астрофизики, Чандрасекар обратил внимание на совпадение теории белых карликов Фаулера с зоммерфельдовской электронной теорией металлов. Вскоре Чандрасекару стало ясно, что эта теория в приложении к недрам сверхплотных белых карликов требует модификации, так как элект-

роны с энергиями порядка фермиевской начинают приобретать скорости, сравнимые со скоростью света, по мере того как масса звезды возрастает. Электроны, двигающиеся по "высоким орбитам", имеют релятивистские скорости. В таком случае говорят о "релятивистском вырождении" вещества. Это существенно меняет уравнение состояния вещества и, самое главное, — утверждает существование верхнего предела для массы белых карликов $\sim 1,4M_{\odot}$ [297, 298, 282].

Но в этот смелый вывод Чандрасекара Эддингтон не поверил. Он подверг критике работы Чандрасекара на январском собрании Королевского астрономического общества в 1935 г. Его возражения приведены в "Observatory":

"Чандрасекар, используя релятивистскую формулу, которая применялась последние пять лет, показал, что звезда с массой, превышающей определенный предел M , остается состоящей из идеального газа и никогда не сможет охладиться. Звезда должна продолжать излучать и излучать и сжиматься и сжиматься до тех пор, я полагаю, пока она не достигнет размеров в несколько км радиуса, когда гравитация становится настолько сильной, чтобы удерживать излучение, и звезда сможет наконец найти свой окончательный вид. Д-р Чандрасекар получил этот результат ранее, и он старался убедить в нем в своей последней статье; и, когда мы обсуждали его с ним, я ощущал, что прихожу к заключению, что это почти доведение до абсурда формулы релятивистского вырождения. Различные события могут произойти для спасения звезды, но мне бы хотелось большей защиты, чем эта. Я думаю, должен существовать закон природы, предотвращающий следование звезды таким абсурдным путем!" [162, с. 37].

Из этих утверждений Эддингтона со всей определенностью следует, что уже в 1935 г. он понимал процесс гравитационного коллапса и то, что тела с массой, превышающей предельную, вследствие этого процесса превращаются в нечто, что мы сейчас называем черной дырой². Но процесс представлялся столь поразительным, что Эддингтон отказывался верить в него. И в этом, конечно, не было ничего удивительного, ведь даже Эйнштейн, из теории которого следовала возможность гравитационного коллапса, в то время также не признавал его.

Естественно, что для Чандрасекара критика Эддингтона не прошла бесследно. И хотя его поддерживали такие известные специалисты, как М. Борн и В. Паули, Чандрасекар оставил исследования в этой области³.

Вот как оценил сложившуюся тогда ситуацию выдающийся отечественный астрофизик И.С. Шкловский: "Возможно, резко отрицательная позиция самого авторитетного астронома того времени задержала развитие теоретической релятивистской астрофизики лет на 10–15. И все-таки, думаю, это не имело сколько-нибудь серьезного

² К подобному выводу ранее, в 1932 г., пришел Л.Д. Ландау. Подробнее см. [237].

³ В 1983 г. С. Чандрасекар за исследования по физике звезд получил Нобелевскую премию.

значения для астрономии. Развитие релятивистской астрофизики стало возможным лишь после того, как началась вторая революция в астрономии и появились радиоастрономия и астрофизика высоких энергий – наблюдательные и экспериментальные направления астрономии. Все это случилось уже в пост-эддингтоновское время, и здесь также кипели и кипят страсти и возникают коллизии..." [212, с. 38].

Сам же Эддингтон еще раз вернется к проблеме белых карликов [179, 184]. Он пытается оценить в них содержание водорода и понять состояние вещества и приходит к выводу, что белый карлик представляет собой наихудший объект для синтеза элементов, что, вообще говоря, справедливо.

ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

Значительное внимание в монографии "Внутреннее строение звезд" [100] Эддингтон уделил проблеме источников энергии звезд. Он продолжал настаивать на своей идее внутриатомной природы звездной энергии, хотя в то время в физике еще не было существенного продвижения в понимании этой проблемы. Особо следует подчеркнуть заслугу Эддингтона, состоящую в том, что он наложил определенные ограничения на будущую физическую теорию процесса, исходя из данных астрономических наблюдений.

Эддингтон анализирует разные гипотезы о возможных физических процессах в недрах звезд и склоняется к реакциям синтеза: "Они обеспечивали намного более мощный источник энергии, чем любые известные превращения. Аннигиляция протонов и электронов или распад неизвестных элементов с высокой радиоактивностью – это спекулятивные гипотезы. Эти процессы, может быть, и не способны осуществляться. Но в образовании гелия мы имеем процесс, который должен происходить в некоторое время в некотором месте – и где вероятнее всего, так это в звездах, где атомы первичного вещества с самого начала находятся в близком соседстве." [100, с. 295–296].

Но возникали вопросы и сомнения. Так, необходимо было объяснить резкое различие в светимостях у гигантов и карликов. Это было сложно сделать, рассматривая диаграмму Герцшпрунга–Рассела как эволюционную последовательность. Эддингтон учитывал, конечно, что субатомные запасы звездной энергии должны истощаться с течением времени. Но некоторые обстоятельства в то время не поддавались объяснению. Так, если естественно полагать, что в двойных системах обе компоненты одного и того же возраста, то более массивная компонента, излучающая больше, должна скорее истощить свои запасы энергии. Вместо этого, она продолжает излучать больше энергии на грамм вещества, чем слабая. Эддингтон назвал это "очень опасным парадоксом" [100, с. 297].

Кроме того, как и Рассел, он полагал, что скорость генерации энергии должна зависеть от температуры и плотности таким образом, что она увеличивалась бы со сжатием звезды. Эти и многие другие

вопросы были решены позже, уже в работах по эволюции звезд разных типов после построения конкретных реакций термоядерного синтеза в звездах. Во времена же Эддингтона его концепция источников звездной энергии подвергалась критике со стороны его коллег.

Эддингтоном был сделан основной вывод: светимость звезды однозначно определяется ее массой. В основе этого положения лежит утверждение о переносе энергии из недр звезд наружу излучением и то, что "пропускная способность" вещества недр определяется массой звезды. Источники звездной энергии должны как бы подстраиваться к звездной непрозрачности. Зависимость интенсивности генерации энергии в звезде от физических условий в ней была гениально угадана Эддингтоном при построении теоретической модели звезды. Тем самым, казалось, были отвергнуты попытки поиска субатомных источников энергии для звезд. Наиболее ярко их представлял Джинс, считая, что источником звездной энергии являются сверхтяжелые радиоактивные трансурановые элементы. Источник, предложенный Джинсом, был подобен радиоактивному, т.е. являлся самопроизвольным квантовым эффектом, не зависящим от внешних физических условий.

Выступая с Дарвиновской лекцией в Королевском астрономическом обществе 11 октября 1968 г., известный английский астрофизик Фред Хойл сказал: "Полемика между Эддингтоном и Джинсом, которая удивляла и развлекала астрономов в течение многих лет, недавно приобрела для меня новый смысл. Для моего поколения Эддингтон был человеком, который говорил все правильно, а Джинс – человеком, который говорил все неправильно" [328 – цит. по: 231, с. 45].

Однако разногласия эти были далеко не случайными и, конечно, не допускают подобной упрощенной оценки. В их основе лежали принципиальные методологические установки исследователей. Далее Хойл отметил: "Люди, подобные Эддингтону и Расселу, позволявшие себе руководствоваться наблюдениями, пришли к предвидению многих результатов, достигнутых позднее с использованием ядерной физики. При этом они осмеивались физиками своего времени. По иронии судьбы, главная причина того, что британские физики не могли считать астрономии серьезным разделом физики, заключалась в насмешках, которым подвергли Эддингтона ученые Лаборатории им. Кавендиша, в особенности за его предположение, что энергию звезд доставляет превращение водорода в гелий. Они говорили ему, что звезды недостаточно горячи для этого, и он с некоторым раздражением советовал им пойти поискать место погорячее.

Джинс в то же время сам был физик. Среди специалистов по теоретической физике он был наиболее опытен в проблемах звездной эволюции. Он ограничил себя общепринятой физикой и пытался заставить астрономию уложиться в картину, даваемую наблюдениями, на том основании, что физика лучше известна, чем астрономия" [231]. Надо сказать, что Хойл здесь не совсем прав и Джинс не тогда оказывался прав, когда, по словам Хойла, "оставлял свою общепринятую физику и позволял себе руководствоваться фактами", а как раз тогда, когда не приду-

мывал для интерпретации наблюдательных данных "новой физики" [250].

Джинс и Эддингтон придерживались разных подходов, но Эддингтон оказывался прав, только когда угадывал правильную физику процесса и явления. Так произошло при установлении Эддингтоном источника энергии звезд. Поняв, что энергия в звезде генерируется со скоростью, зависящей от температуры и плотности, он также установил, что процесс должен так саморегулироваться, чтобы выход энергии соответствовал закону "масса–светимость", иначе невозможно устойчивое состояние звезды (т.е. звезды попросту не будет). А возможно устойчивое состояние лишь в случае реакций термоядерного синтеза (так называться они, конечно, стали позднее), которые и предложил Эддингтон еще в начале 20-х годов. Вот что писал он в своей книге "Звезды и атомы": "Превращение элементов, заветная мечта алхимиков, осуществляется в радиоактивных процессах. Уран медленно переходит в смесь свинца и гелия. Но ни при одном известном радиоактивном процессе не освобождается количеств энергии, достаточных для поддержания солнечного тепла. Заслуживающая внимания энергия при превращениях освобождается только в начале эволюционной лестницы элементов.

Начнем с водорода. Атом водорода построен крайне просто, из одного протона с положительным зарядом и одного отрицательного электрона, вращающегося как планета вокруг протона. Будем считать массу водорода равной 1. Из четырех атомов водорода получится атом гелия. Если масса гелия точно равна 4, это будет значить, что вся энергия водородных атомов осталась в гелии. В действительности масса гелия составляет 3.97. Таким образом, энергия с массой 0.03 должна была исчезнуть при образовании гелия из водорода. Из 4 г водорода мы должны были бы получить 4 г энергии (при аннигиляции. – А.К.); превратив водород в гелий, мы освобождаем только 0.03 г энергии. Оба процесса могут служить источниками солнечного тепла, но второй процесс (реакция термоядерного синтеза. – А.К.) дает значительно меньше энергии.

Большое преимущество гипотезы об освобождении энергии звезд при образовании элементов из водорода состоит в несомненной возможности такого процесса; с другой стороны, у нас нет никаких доказательств уничтожения материи в природе. При этом нет надобности ссылаться на якобы осуществленное в лаборатории превращение водорода в гелий; лица, авторитету которых я доверю, не считают эти опыты убедительными. Немецкий химик Ф.А. Панет, описавший превращение водорода в гелий при адсорбции газа палладием в 1926 г., уже в 1928 г. сам отказался от подобного толкования своих опытов. (Как можно видеть, проблема так называемого "холодного синтеза" имеет длинную историю. – А.К.) По моему мнению, существование гелия – лучшее доказательство возможности его образования. Четыре протона и два электрона, составляющие ядро гелия, должны были где-то когда-то собраться воедино; и почему бы не в звездах? Когда

они встретились и соединились, лишняя энергия освободилась, поддерживая внутреннее тепло звезды. Недра звезды уже потому подходящее место для такой встречи, что там существует и действует обильный источник энергии. Я знаю, что многие считают условия в глубинах звезд недостаточными для превращения водорода в гелий – там слишком холодно. Таким критикам предоставляется найти другую, более подходящую реторту, где было бы теплее" [198, с. 118–120].

Между тем критики Эддингтона возражали не только из "духа противоречия". Температура в центре звезды $T \sim GM/R\mathfrak{R} \sim 1$ кэВ, а для преодоления кулоновского отталкивания при столкновении двух протонов необходима энергия ~ 1 МэВ. Но при максвелловском распределении с температурой ~ 1 кэВ энергией 1 МэВ обладает очень малая доля частиц $\approx e^{-1000} \approx 10^{-430}$, тогда как Солнце содержит $\sim 10^{57}$ частиц. Таким образом, классическая вероятность взаимодействия двух протонов ничтожно мала.

Лишь с открытием в квантовой механике "туннельного эффекта" подтвердилась правота Эддингтона⁴.

Ученый, с именем которого связано создание теории ядерных реакций в звездах и который за это свое достижение был удостоен Нобелевской премии по физике 1967 г., – Ханс Альбрехт Бете – в 30-е годы, исследуя взаимодействия между протонами и нейтронами, установил, как при их объединении может образоваться ядро тяжелого водорода (дейтерия). И хотя Бете критически относился к гипотезе Эддингтона, он занялся этой проблемой, так как процесс образования гелия должен был быть сходен с реакцией синтеза дейтерия, которую он уже хорошо понимал. В 1938 г. он независимо от Ч. Критчфилда предложил протон-протонный цикл [291]. В том же году в апреле он принял участие в симпозиуме по источникам энергии звезд, организованном по инициативе Г.А. Гамова Американским астрономическим обществом в Вашингтоне. На симпозиуме обсуждались вопросы, связанные с взаимодействием протонов и протон-протонным циклом синтеза как источником энергии звезд. В результате дискуссий стало ясно, что синтез гелия охватывает лишь часть процессов, протекающих в звездах, так как в них, кроме водорода и гелия, имеются и другие элементы, хотя и в значительно меньших количествах. Присутствовавший на симпозиуме немецкий физик Карл Фридрих фон Вайцзеккер тогда же высказал предположение и о возможности углеродно-азотного цикла. Независимо от К. Вайцзеккера эту проблему детально исследовал Бете и опубликовал в 1939 г. обстоятельную работу [292]. В ней рассмотрен катализ термоядерных реакций, взаимодействие протонов с ядрами углерода-12, который превращается последовательно в азот-13, углерод-13, азот-14, кислород-15, азот-15, который в конечном итоге

⁴ Квантово-механическая теория α -распада, допускающая подбарьерный переход, была разработана Г.А. Гамовым в 1927 г. Первым понял возможность обратного процесса Фриц Хоутерманс. В 1929 г. он совместно с Робертом Аткинсоном, знакомым с работами Эддингтона, предложил идею ядерных реакций синтеза в недрах звезд как источника звездной энергии.

распадается на ядро гелия-4 и углерода-12. Приводятся оценки скоростей реакций и их зависимостей от температуры, показано, что для азотно-углеродного цикла необходима более высокая температура, чем для протон-протонного. Стало ясно, что в принципе термоядерные источники энергии могут обеспечить светимость всех звезд главной последовательности в течение всего времени их эволюции, что блестяще подтверждало гипотезу Эддингтона.

АСТРОМЕТРИЯ, ЗВЕЗДНАЯ СТАТИСТИКА И ДРУГИЕ РАЗДЕЛЫ АСТРОНОМИИ

Научная деятельность Эддингтона началась с практической работы в области астрометрии и звездной астрономии. Эддингтон в совместной работе с Королевским астрономом Кристи и Дэвидсоном в 1907 г. нашли ошибки сетки, наложенной на фотографию звездного неба для определения положения астероида Эрос. Высокая точность измерений положения Эроса была необходима для определения солнечного параллакса [2]. В 1909 г. Эддингтон протестировал предложенный Мак-Магоном метод определения диаметра звезд при покрытии их Луной, заключив, что дифракция будет затруднять измерения для всех случаев, за исключением разве только очень специфических [6].

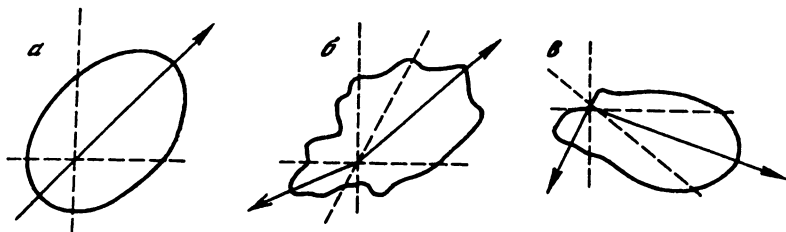
В 1908 г. было обнаружено несколько новых комет. На фотографиях кометы "Морхоус" (1908с) было видно, что газовая оболочка, окружающая голову кометы, непрерывно подвергалась очень быстрым изменениям. Эддингтон изучил это явление в деталях. В 1910 г. он принял участие в обсуждении результатов наблюдений кометы и так называемой "фонтанной теории" оболочек комет. Им были проведены расчеты, учитывающие действие отталкивающей силы. Эта сила удивляла невероятной величиной, будучи в 19 000 раз больше гравитационной. Эддингтон писал: "Я сопротивляюсь принятию указанных очень больших сил отталкивания" [10].

В течение 1906–1909 гг. Эддингтон провел обширную программу наблюдений на зенит-телескопе-рефлекторе в Гринвиче по исследованию широтных вариаций и определению постоянной аберрации.

После 1914 г. Эддингтона стали интересовать в основном проблемы, связанные с астрофизикой и теорией относительности. Но его первая научная работа была в области звездной астрофизики.

Каптейн сообщил о своем открытии двух преимущественных направлений звездных движений незадолго до того, как Эддингтон стал заниматься астрономией, в 1904 г. Когда Каптейн в 1878 г. стал профессором астрономии в Гронингском университете, где не было обсерватории, он основал астрономическую "лабораторию", которая занималась анализом наблюдений, проводимых в других астрономических центрах⁵. С 1885 г. Каптейн стал сотрудничать с Дэвидом Гил-

⁵ Ф. Сиаре писал в некрологе о Каптейне как об "уникальной фигуре – астрономе без телескопа. Более точно, все телескопы в мире были его" [372].



Р и с. 1. Кривые распределения скоростей звезд
 а – ожидаемое распределение скоростей звезд в окрестностях Солнца;
 б – каптейновское распределение скоростей звезд;
 в – “кролик Эддингтона”

лом – директором Кейптаунской обсерватории в Южной Африке. Фотографии южного неба стали также доступны ему. Более подробно исследования Каптейна обсуждены в статьях [363, 364]. Наличие столь обширного наблюдательного материала позволило Каптейну выдвинуть идею двух потоков. Она не могла не заинтриговать астрономов, так как считалось общепризнанным, что после исправления звездных скоростей за движение Солнца (определенное по отношению к звездам из его ближайшей окрестности в 20 км/с в направлении созвездия Геркулеса) они должны быть распределенными случайным образом. По Каптейну, однако, получалось, что существуют два диаметрально противоположных направления преимущественных движений звезд (к созвездиям Ориона и Щита) (рис. 1, а, б).

Вытянутый эллипс на рис. 1, а обусловлен “пекулярной скоростью” Солнца. Два преимущественных направления на рис. 1, б указывают на точки небесной сферы, которые Каптейн назвал “вертексами”. Каптейн интерпретировал свой результат как суперпозицию движений Солнца и двух групп звезд, происходящих в противоположных направлениях, причем считалось, что два звездных потока проникли друг в друга. Так как вертексы лежали на Млечном Пути, причем один из них близок к направлению в центр Галактики, то было заподозрено, что преимущественные движения связаны со структурой нашей Галактики. Однако до окончательного решения этой проблемы было еще далеко.

Первые шаги в решении этой проблемы были сделаны в теоретических работах А. Эддингтона и К. Шварцшильда. Эддингтон построил свою диаграмму распределения скоростей, которая из-за сходства формы получила название “кролика Эддингтона” (рис. 1, в). Теория двух потоков обладала тем преимуществом, что ее можно было, по мере надобности, уточнять, присоединяя третий поток, четвертый и т.д. Так, Эддингтон пользовался также тремя потоками [11]. О громадном впечатлении, произведенном на него открытием Каптейна, Эддингтон вспоминал более чем через 30 лет [175]. Именно Эддингтон первый провел теоретический анализ теории двух потоков в 1906 г. [1].

Эддингтон также показал, что в любом объекте пространства представлены как звезды одного потока, так и звезды другого потока

(гипотеза двойного дрейфа). Но из этого прямо следует, что звезды этих потоков должны быть идеально перемешаны. Последнее обстоятельство сделало гипотезу двух потоков слишком искусственной.

Исследования Эддингтона по данной проблеме были им подытожены в монографии "Движения звезд и строение Вселенной" [24]. Последняя глава книги "К динамике звездных систем" содержала принципиально новые результаты. В ней было, например, показано, что парные взаимодействия звезд не могут эффективно изменять направления движения отдельных звезд. Было также сделано заключение, что функция $f(x, y, z, u, v, w, t)$, описывающая распределение звезд в шестимерном фазовом пространстве, должна определяться динамическими орбитами, описываемыми звездами в сглаженном гравитационном потенциале целой системы, т.е. решением шестимерного уравнения Лиувилля (или, по современной терминологии, бесстолкновительного уравнения Больцмана).

В последующих за монографией статьях Эддингтон нашел решение уравнения Лиувилля, которое согласовалось с шварцшильдовским эллипсоидальным распределением скоростей. В общем случае формы потенциальной функции не допускают самосогласованной системы, однако для сферически симметричных звездных систем Эддингтон получил самосогласованное решение. Он установил, как теорема вириала может быть использована для связи средней кинетической энергии звезды в скоплении с ее средней потенциальной энергией, — метод весьма популярный в современных исследованиях галактик и их скоплений. Если \bar{v}^2 — средняя квадратичная скорость относительно центра скопления, то $\bar{v}^2 = 1/2G(m/\bar{R})$, где G — гравитационная постоянная, m — масса скопления и \bar{R} — эффективный радиус, определяемый соотношением

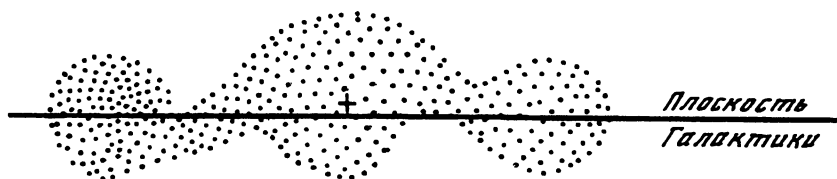
$$\frac{1}{\bar{R}} = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i,k} \frac{1}{r_{i,k}},$$

в котором N — число звезд в скоплении, $r_{i,k}$ — расстояние между i -м и k -м членом скопления. С. Чандрасекар в своей книге [214, с. 11] утверждает, что Эддингтон был первым, кто сделал это заключение. Эддингтон [36] показал также, что уравнение (теорема вириала) $2T + \Omega = 0$, где T — кинетическая энергия поступательных степеней свободы, Ω — потенциальная гравитационная энергия системы, может быть обобщено на случай отсутствия равновесия введением момента инерции $I = \sum mr^2$ и примет вид:

$$\frac{1}{2} \frac{d^2 I}{dt^2} = 2T + \Omega.$$

* * *

На основе своих исследований Эддингтон близко подошел к правильному пониманию проблемы звездных движений и строения нашей Галактики. Ниже мы приводим поперечное сечение спиральной структуры Галактики по рисунку Эддингтона 1914 г. (рис. 2).



Р и с. 2. Поперечное сечение спиральной структуры Галактики.
Рисунок А. Эддингтона

Однако правильное решение этой проблемы нашел шведский астроном Б. Линдблад лишь в 1921 г. Он показал, что закономерности в распределении собственных движений звезд являются проявлением вращения нашей Галактики. Точка зрения Линдблада получила блестящее подтверждение и еще более полное развитие в работах голландского астронома Я. Оорта [277]. Но, конечно, эти достижения были бы невозможны без трудов пионеров исследований в этой области – основателей звездной динамики. И Линдблад в своей классической обзорной работе "Динамика Галактики" отдает им должное: "Можно сказать, что началом работ по галактической динамике послужили фундаментальные работы Эддингтона и Джинса" [277, с. 39].

Занимаясь проблемами галактической динамики, Эддингтон не мог оставаться в стороне от горячо дискутировавшейся в то время проблемы масштабов Галактики и более общих вопросов строения Вселенной.

Традиционным методом исследования нашей Галактики является метод звездных подсчетов, предложенный еще в конце XVIII в. В. Гершелем [278]. Но прямое его использование для оценки размеров Галактики стало возможным после определения Я. Каптейном в 1901 г. средних расстояний до звезд, блеск которых заключен в некоторых фиксированных интервалах звездных величин. Однако эти оценки были в 1917 г. подвергнуты сомнению известным американским астрономом Х. Шепли, который предложил модель Галактики в виде плоской линзообразной системы звезд и туманностей диаметром 300 000 световых (св.) лет и толщиной 30 000 св. лет. Эта модель совершила буквально переворот во взглядах, так как масштабы Галактики были увеличены в 10 раз по сравнению с предыдущими оценками, а Солнце было смещено далеко от центра Галактики (на расстояние в 50 000 св. лет по Шепли). Но признание модели Галактики, предложенной Шепли, пришло далеко не сразу. Большинство исследователей склонялись к оценкам масштабов Галактики, полученным на основе звездных подсчетов. Наиболее активным выразителем точки зрения последних был Гебер Кертис. Между ним и Шепли 26 апреля 1920 г. в Национальной академии наук в Вашингтоне состоялся диспут, вошедший в историю астрономии как "великий спор". И хотя каждый из спорящих остался при своем мнении и решение проблемы структуры Галактики пришло, как мы видели, позднее, при изучении движений звезд, на диспуте был затронут и

вопрос о спиральных туманностях, имеющий принципиальное значение для космологии.

Еще в XVIII в. было высказано предположение, что во Вселенной существует множество звездных систем "островных вселенных", одной из которых является и наша Галактика. А к началу XX в. появилось несколько косвенных свидетельств, подтверждающих точку зрения, что спиральные туманности могут быть внегалактическими. Так, в 1899 г. Ю. Шейнер в Потсдаме нашел сходство между спектрами М31 (туманности Андромеды), и Солнца, указывающее, что туманность может являться гигантской совокупностью звезд. Но он пошел дальше, утверждая наличие сходства М31 и нашей Галактики. Шейнер считал, что ядро М31 могло быть аналогично совокупности звезд около Солнца, а спиральные ветви этой туманности подобны Млечному Пути. С усовершенствованием методов фотографического исследования стало ясно, что спиральных туманностей очень много. В области, достижимой для 36-дюймового рефлектора Ликской обсерватории (США), их число превышало 100 000. Очевидно, что окончательное решение вопроса о природе спиральных туманностей могло дать лишь измерение расстояний до них. Если оно значительно больше масштабов Млечного Пути, то тогда они находятся за пределами нашей Галактики и являются самостоятельными галактиками. В 1918 г. Кертис сделал попытки определить расстояния до галактик путем сравнения видимого максимального блеска новых звезд в Млечном Пути. Первоначальная оценка Кертиса расстояния до М31 составила 10^7 св. лет, и затем, хотя он и уменьшил ее до 500 000 св. лет, все же свидетельствовала, что М31 находится вне пределов Галактики. Кертис всецело встал на сторону гипотезы островных вселенных.

Таким образом, в "великом споре" по вопросу масштабов и структуры Галактики к правде был ближе Шепли, а по вопросу спиральных туманностей – Кертис. Эти два исследователя расходились в интерпретации практически всех результатов наблюдений. К этому времени уже было установлено, что спиральные туманности не наблюдаются вблизи галактической плоскости и их число растет к галактическому полюсам. Другим важнейшим фактом было наличие больших лучевых скоростей у спиральных туманностей. Выдающийся американский спектроскопист Весто Мелвин Слайфер, проведя в 1912 г. спектральные наблюдения в Ловелловской обсерватории, нашел у большинства из них значительные скорости удаления, намного большие, чем у других объектов. Кстати упомянуть, что, когда Слайфер впервые докладывал свои результаты на XVII съезде Американского астрономического общества в августе 1914 г., его мог слышать молодой Эдвин Хаббл, тогда только что избранный в члены Общества. А.С. Шаров и И.Д. Новиков предполагают, что, может быть, открытие Слайфера запомнилось ему уже тогда [283].

На диспуте в 1920 г. Кертис, ссылаясь на наличие темных полос поглощающего свет вещества в центральной плоскости многих спиральных туманностей, отмечал, что и в Млечном Пути вполне воз-

можно наличие темного вещества, вследствие чего в его экваториальной области удаленные туманности наблюдать невозможно. И скорости туманностей Кертис интерпретировал также в пользу их внегалактической природы: "...поскольку такие большие скорости, по-видимому, реальны для отдельных галактик" [375].

Но значительно ранее, в своей знаменитой монографии "Движения звезд и строение Вселенной" Эддингтон с присущей ему необычайной интуицией предвосхитил внегалактическую природу туманностей. Он писал:

«В те дни, когда еще не было спектроскопа, позволяющего различать разные типы туманностей, когда туманности всех классов считались неразрешенными звездными скоплениями, широко бытовало мнение, будто эти туманности представляют собой "островные вселенные", отделенные от нашей собственной звездной системы огромными пустыми пространствами. Теперь известно, что неправильные газовые туманности, вроде туманности Ориона, тесно связаны со звездами и принадлежат к нашей собственной системе, однако в последнее время наблюдается возвращение к этой гипотезе в отношении спиральных туманностей. Хотя термин "туманность" употребляется для обозначения всех трех классов – неправильных, планетарных и спиральных – было бы ошибкой думать, будто между этими объектами существует тесная связь. Все до сих пор обнаруженные факты указывают на значительные различия между ними...

Распределение спиральных туманностей обладает одной совершенно уникальной чертой: они буквально избегают областей близ галактической плоскости и преобладают в окрестностях галактических полюсов, причем они предпочитают область северного галактического полюса, а не южного. Это избегание Млечного Пути носит не абсолютный характер, но имеет очень сильную тенденцию.

Приходится признать, что прямых данных, позволяющих установить, находятся ли эти объекты внутри или вне нашей звездной системы, у нас пока нет. Можно считать, что их распределение, столь непохожее на распределение всех других объектов, свидетельствует о том, что они не представляют единого целого с объектами нашей системы. Однако и среди тел, принадлежащих к Галактике, имеются такие (например, звезды типа М), на распределении которых ее влияние не сказывается. С одной стороны, уже сам факт избегания спиральными туманностями галактической плоскости может указывать на то, что Галактика как-то воздействует на них. Но с другой стороны, если все они находятся вне пределов нашей системы, то те из них, которые случайно оказались в низких галактических широтах, экранируются от нас толстым слоем поглощающего вещества, подобного тому, из которого состоят темные области Млечного Пути.

Если предположить, что спиральные туманности находятся внутри нашей звездной системы, то мы ничего не можем сказать об их природе. Эта гипотеза заводит в тупик. Правда, согласно одной из теорий, солнечная система возникла именно из спиральной туманности, но тер-

мин этот употреблен здесь только в качестве отдаленной аналогии... Спиральные туманности, о которых здесь идет речь, слишком обширны, чтобы породить одну Солнечную систему или чтобы самим возникнуть в результате разрушительного сближения двух звезд. Мы должны признать за ними способность порождать по крайней мере звездные скопления.

Если же допустить, что эти туманности являются внешними по отношению к звездой системе и что они в действительности являются системами, равными нашей собственной, это по меньшей мере открывает путь для новых гипотез, которые могут пролить некоторый свет на стоящие перед нами проблемы. По этой причине в качестве рабочей гипотезы следует предпочесть теорию островных вселенных, следствия же, вытекающие из нее, настолько плодотворны, что ее истинность становится весьма вероятной» [24, с. 242–243].

Поэтому совершенно справедливо сэр Уильям Мак-Крей отметил, что Эддингтон положил начало научной дискуссии о спиральных туманностях, согласился с предположением А. Пуанкаре о вращении Млечного Пути и был "первым, кто систематизировал знания о крупномасштабной структуре Вселенной" [209, с. 60].

Точка зрения Эддингтона была окончательно подтверждена в работах Хаббла, разрешившего внешние части близких спиральных галактик на звезды⁶. А после 1930 г., когда открытие межзвездного поглощения понизило оценку диаметра Галактики втрое и был проведен пересмотр зависимости "период–светимость" для цефеид, был установлен масштаб размеров галактик и межгалактических расстояний, близкий к современному.

Открытие в области наблюдательной космологии, а именно установление Э. Хабблом в 1929 г. для галактик приблизительно линейного соотношения между скоростями и расстояниями [330], явившееся по сути дела свидетельством расширения Вселенной, вновь обратило внимание Эддингтона к релятивистской космологии. О его работах в этой области будет рассказано в следующей главе.

* * *

В 1923 г. Джон Стенли Пласскетт из Астрофизической обсерватории в Виктории (Канада) сообщил о вероятном наличии нейтрального натрия и ионизованного кальция в облаках вне обращающего слоя некоторых горячих удаленных звезд. Об этом свидетельствовали неожиданные стационарные линии поглощения в спектрах этих звезд. Это открытие побудило Эддингтона поддержать ранее распространенное представление о диффузном межзвездном веществе⁷.

На декабрьском собрании Королевского астрономического общест-

⁶ В 1923 г. Хаббл разрешил на звезды ближайшую к нашей спиральную галактику М31 (туманность Андромеды), обнаружив в ней переменную типа цефеид [329].

⁷ Одним из первых писал о космической пыли индийский астрофизик М.Н. Саха, а об облаках кальция – также русский астрофизик Б.П. Герасимович [318].

ва он говорил: "Интересной задачей является определение температуры разреженного рассеянного газа в космическом пространстве. Меня недавно привлекли свидетельства, по которым, я полагаю, она может быть около 5000° , а мой коллега полагает 3° ; я думаю, современное положение такое, что мы можем каждый привлечь на свою сторону другого..."

Эддингтона можно смело считать основоположником теоретических исследований по физике межзвездной среды. Он с юмором говорил, что астрономы много разглагольствуют о межзвездном веществе, хотя мало знают о нем. Ему они напоминают гостей, отказывающихся спать в комнате с привидениями, а на вопрос верят ли они в них, отвечают: "Я не верю в приведения, но я их боюсь". Сам Эддингтон много сделал для превращения межзвездного вещества из "призрака" в научную реальность. В учебнике по астрономии Э. Стремгрена и Б. Стремгрена, вышедшем в Берлине в 1933 г., а затем и в нашей стране в 1941 г. кальциевым облакам в межзвездном пространстве посвящен отдельный параграф [276]. Р. Уатерфильд отмечает рекомендации Эддингтона по определению вращения Галактики, основывающиеся на данных о кальциевых облаках [389]. К этой же проблеме Эддингтон возвращается в одной из своих последних работ 1943 г. указав, что неоднородное распределение межзвездного вещества должно производить возмущение в орбитах звезд [192].

РАЗРАБОТКА РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КОНЦЕПЦИИ

ОБЩАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Мы уже видели, как много сделал Эддингтон для экспериментального подтверждения и, в конечном итоге, признания и распространения теории Эйнштейна. Но нельзя не сказать и о его собственном вкладе в развитие общей теории относительности (ОТО) и релятивистской космологии.

Прежде всего, следует отметить фундаментальную монографию Эддингтона "Математическая теория относительности" [81], содержащую наиболее подробное и полное для своего времени изложение теории, которая, кстати, сохраняет свое большое методическое значение и до наших дней. Разрабатывая проблематику классической ОТО, Эддингтон получил три принципиально новых результата.

Во-первых, в 1922 г. Эддингтон детально рассмотрел проблему гравитационных волн. Хотя до настоящего времени гравитационные волны никому обнаружить не удавалось, их существование непосредственно следует из уравнений поля ОТО. Надо, правда, отметить, что еще до создания теории относительности, в 1900 г. Хендрик Антон Лоренц высказал предположение, что гравитация "...может распространяться со скоростью, не большей скорости света" [349]. А сам термин гравитационная волна впервые введен Анри Пуанкаре в 1905 г. при обобщении лоренц-инвариантности на тяготение [358]. Этим догадкам впервые придал научный характер сам создатель ОТО Альберт Эйнштейн на заседании физико-математической секции Королевской Прусской академии наук, состоявшемся в Берлине 22 июня 1916 г. [285].

Эддингтон первоначально обратился к проблеме в 1922 г., он не сомневался, что гравитационные волны реальны и распространяются со скоростью света [75]. В этой работе он утверждал, что продольные и продольно-поперечные гравитационные волны не имеют определенной скорости и вообще не являются объективными. По его представлениям, они являются лишь волнистостью координатной системы и поэтому единственная скорость распространения, соответствующая им, – это "скорость мысли". Предупреждение Эддингтона о необходимости различать фиктивные координатные волны и реальные поперечно-поперечные гравитационные волны иногда впоследствии неправильно понималось как отрицание их реальности вообще.

Через год Эддингтон получил верные выражения для скорости излучения гравитационной энергии твердого вращающегося стержня

[88]. Рассчитав энергию для максимально возможной скорости вращения (ограниченной пределом прочности на растяжение твердого тела), он нашел, что она настолько мала, что ее обнаружение в принципе невозможно для любой искусственно созданной на Земле механической системы. Эддингтон также оценил энергию, излучаемую двойной звездой, и хотя она получилась много больше, но все же значительно ниже возможного предела наблюдаемости.

Сам Эддингтон для стержня массой 1 кг и длиной 2 м, делающего 50 об/с, получил, что в течение года стержень в результате гравитационного излучения теряет $3 \cdot 10^{-35}$ своей вращательной энергии. Он также утверждал: "Задача становится гораздо сложнее в случае двойной звезды, так как при этом необходимо принять во внимание возмущающее действие поля тяготения на распространение его собственных потенциалов, и мы не можем быть уверены даже в том, что знак нашего результата останется таким же" [202, с. 343].

Современные оценки дают для типичных двойных звездных систем $L \sim 10^{30}$ эрг/с, но поток у Земли $\sim 10^{-11}$ эрг/(с·см) не доступен для регистрации. А для таких объектов, как нейтронная звезда (например, в Крабовидной туманности) мощность излучения (L) может составлять $\sim 10^{38}$ эрг/с в случае, если она деформирована относительно оси симметрии. В этом случае эффект излучения может быть существенным элементом замедления вращения звезды. Короткий, но очень мощный импульс гравитационного излучения может создаваться коллапсом ядра звезды при вспышке сверхновой. При сильных отклонениях от сферичности оценка дает $L \sim 10^{54}$ эрг/с. И хотя Эддингтон не был сторонником возможности существования нейтронных звезд и черных дыр, именно последние объекты – наиболее вероятные кандидаты, от которых в принципе можно надеяться зарегистрировать гравитационные волны, столь детально исследовавшиеся в пионерских работах Эддингтона.

Во-вторых, важное значение имело предложенное Эддингтоном в 1924 г. преобразование, теперь называемое преобразованием Эддингтона–Финкельштейна¹. Следует, правда, оговориться, что оно было введено Эддингтоном не для исследования сингулярности, где сейчас нашло широкое применение.

По своеобразной иронии развития творческого процесса, отрицая гравитационный коллапс, Эддингтон впервые построил систему координат, свободную от сингулярности при $r = 2M$ [93], но сам не осознал значение полученного результата². Первым же его понял ученик Эддингтона Жорж Леметр. Он отметил: "Сингулярность в поле Шварцшильда является такой же фиктивной сингулярностью, как и сингулярность, представленная горизонтом вокруг центра вселенной де Ситтера в ее первоначальной форме" [346]. Эддингтон в качестве основы для своей системы координат использует свободно падающие фотоны.

¹ Впервые приведено в [93] и вновь независимо открыто спустя 34 года [313].

² Подробнее с этим преобразованием и его значением в современной теории черных дыр можно познакомиться в книгах [266] и [269].

Это разновидность "сопутствующих координат"; например, И.Д. Новиков, изучая черные дыры, в качестве таковых брал свободно падающие частицы [268].

В-третьих, в 1938 г. Эддингтон совместно с Кларком обратился к проблеме n -тел в ОТО [173]. Очевидно его стремление разобраться в том, как релятивистские уравнения ОТО определяют движение тел. Рассматриваются гравитационные уравнения для пустого пространства и источники поля как сингулярности. В отличие от независимо выполненной Эйнштейном, Инфельдом и Гоффманом работы [286] Эддингтон получил уравнения движения непосредственно из вариационного принципа³. Им было также получено решение для метрических коэффициентов, которое сейчас носит название первого постньютоновского приближения. Особое значение приобретает параметризованный постньютоновский формализм, развитый Эддингтоном, Робертсоном и другими как теоретическая система для сопоставления величин, измеренных в различных экспериментах по проверке ОТО и других теорий гравитации. Он служит хорошим приближением к ОТО и другим так называемым "метрическим теориям" гравитации повсюду, где, как и в Солнечной системе, источники поля слабогравитирующие и медленно движущиеся.

Эддингтон также указал на ряд новых эффектов в рамках ОТО. Так, он одним из первых, в 1920 г., высказал предположение о возможности существования гравитационных линз в 1920 г. Он писал, что если две звезды не находятся точно на одной прямой с наблюдателем, то можно видеть два точечных изображения далекой звезды [62, с. 134]. В это же время Эддингтон ставит вопрос о проверке так называемых "свернутых тождеств" Бьянки. (Некоторые историки науки, в том числе и автор фундаментальной биографии Эйнштейна А. Пайс, считают, что и сам Эйнштейн не знал в то время этих тождеств [270].) Эддингтон писал: "Сомневаюсь, чтобы кто-нибудь уже выполнил трудоемкую задачу проверки этих тождеств непосредственным применением алгебры" [62, с. 209].

КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Активная научная деятельность Эддингтона протекала в период, который принято называть началом "революции в физике". Однако завершение построения новой, квантовой механики пришлось лишь на 1925–1926 гг., когда Эддингтон уже был полностью сформировавшимся исследователем. Он не был среди ее творцов и не принял активного участия в ее развитии. Скорее всего, она не удовлетворяла его своей кажущейся неполнотой. Однако на некоторые частные вопросы этой теории Эддингтон обращает внимание, среди них – определение Дираком энергетических уровней водорода. Наиболее общие проблемы квантовой теории его практически не занимают, так как Эддингтон

³ В наиболее общем виде проблема рассмотрена в трудах русского исследователя В.А. Фока в 1939 г.

считает, что для их решения требуются принципиально иные подходы. В конце жизни его будут интересовать также вопросы объединения релятивистской и квантовой физики и создания "фундаментальной" теории, о чем речь пойдет в следующем подразделе.

Почти во всех работах Эддингтона по квантовой механике акцент сделан на математические проблемы. Так, в работе "К выводу закона Планка из уравнений Эйнштейна" [97] было показано, что вывод Эйнштейна формулы Планка на основе распределения Вина $F(\nu) = a\nu^3 \exp(-b\nu/T) d\nu$ и формулы Больцмана $n = C \exp(-E/kT)$ в действительности не зависит от последней, так как закон Вина справедлив лишь для систем, для которых выполняется соотношение Больцмана⁴. Здесь a , b и C – некоторые постоянные, ν – частота излучения, T – температура, E – энергия, k – постоянная Больцмана, $F(\nu)$ – удельная интенсивность излучения, n – количество частиц, имеющих энергию E при температуре T . Подобного рода исследования более характерны для чистой математики, но Эддингтон считал их важными и в физике.

Конкретным поводом и причиной обращения Эддингтона к задачам релятивистской квантовой теории послужили две статьи Дирака 1928 г. "Квантовая теория электрона" (части I и II) [305]. В этих работах решалась такая проблема: вновь созданная квантовая механика полагала электроны точечными зарядами при описании структуры атома, а это давало результаты, противоречащие экспериментальным данным. Действительно, наблюдаемое число стационарных состояний электрона в атоме в два раза больше числа, даваемого теорией. Для устранения этого рассогласования Гаудсмит и Уленбек ввели представление об электроне со спином и магнитным моментом, а Паули привел эту модель в соответствие с новой механикой.

В связи с этим Дирак писал: "Остается вопрос, почему Природа должна была выбрать такую модель для электрона, а не удовлетвориться точечным зарядом. Хотелось бы обнаружить некоторую неполноту в прежних способах применения квантовой механики к точечно-заряженному электрону, такую, что после ее восполнения все явление удвоения следовало бы без произвольных предположений. В этой статье будет показано, что так и обстоит дело, причем неполнота прежних теорий состоит в их несогласии с релятивизмом, или же, напротив, с общей теорией преобразований квантовой механики. Оказывается, что простейший гамильтониан точечно-заряженного электрона, удовлетворяющий одновременно требованиям релятивизма и общей теории преобразований, приводит к объяснению всех явлений удвоения без всяких дополнительных предположений" [305, с. 610].

Несимметричное уравнение Дирака было инвариантно, и это толкнуло Эддингтона на разработку собственной теории матриц. В статье "Симметричное обращение волнового уравнения" [114] он приходит к двум заключениям: 1) "простому выводу волнового уравнения первого порядка, эквивалентного уравнению Дирака, но представлен-

⁴ Подробнее см. [250, с. 58–66].

ному в симметричной форме" и 2) "волновому уравнению, которое мы можем идентифицировать как имеющее отношение к системе, которая содержит электроны с противоположным спином". Эддингтон пытается развить новый тензорный анализ, в котором основными векторами являются дираковские волновые символы [138, 141]. При помощи последних определяются тензоры высшего ранга и они называются им волновыми в отличие от тензоров традиционного тензорного анализа. Эддингтон доказывает, что если T есть смешанный волновой тензор второго ранга, то его компоненты t_μ образуют пространственные тензоры (всего 16 компонент в предложенном Эддингтоном варианте)

$$T = \sum_1^{16} t_\mu E_\mu,$$

где E_μ представляют собой матрицы из четырех строк и столбцов, обладающие следующими свойствами:

- 1) они все являются корнями квадратными из -1 ,
- 2) все матрицы попарно коммутируют или антикоммутируют друг с другом согласно специальной схеме.

Далее Эддингтон показывает, что уравнение Дирака является тензорным уравнением в тензорном волновом анализе, что и обеспечивает его инвариантные свойства.

На основе этого Эддингтон делает вывод, что уравнение Дирака "образует мост между теорией относительности и квантовой теорией". Он считает, что сам Дирак развил следствие своего уравнения только в квантовой области, и пытается обобщить выводы на область теории относительности.

Эддингтон пытается также из своей теоретической конструкции получить безразмерную величину, так называемую "постоянную тонкой структуры" [119].

Эти результаты Эддингтона не получили признания и не оказали существенного влияния на развитие теоретической физики. Подход Эддингтона оказался неверным по следующим основным причинам. Во-первых, понимая все различие между релятивистской и квантовой теориями, Эддингтон все же был потрясен, когда осознал, что уравнение Дирака, не будучи тензорным, было инвариантным. У него, по-видимому, было ошибочное мнение, что тензорными представлениями исчерпываются все представления Лоренцевой группы. Во-вторых, имелась и более глубокая причина. Эддингтон, как почти все физики в 20-х годах, считал тензорный анализ всеобъемлющим, так как последний проявил себя универсальным инструментом в ОТО.

Тем не менее математический формализм, предложенный Эддингтоном в этих исследованиях, имеет самостоятельную ценность. Изучая уравнение Дирака, Эддингтон развил исчисление E -матриц, которые представляют алгебраическую группу шестнадцати элементов, удовлетворяющих антикоммутационным соотношениям матриц Дирака. Данное исчисление оказало существенное влияние на возрождение современного интереса к клиффордовым алгебрам. Кратко сущность

вклада Эддингтона в изучение этого вопроса можно осветить следующим образом. Уже упоминавшиеся нами E -матрицы он определяет соотношениями:

$$E_1 = \begin{vmatrix} i\sigma_1 & 0 \\ 0 & i\sigma_1 \end{vmatrix}, \quad E_2 = \begin{vmatrix} i\sigma_3 & 0 \\ 0 & i\sigma_3 \end{vmatrix}, \quad E_3 = \begin{vmatrix} 0 & -\sigma_2 \\ \sigma_2 & 0 \end{vmatrix},$$

$$E_4 = \begin{vmatrix} i\sigma_2 & 0 \\ 0 & -i\sigma_2 \end{vmatrix}, \quad E_5 = \begin{vmatrix} 0 & i\sigma_2 \\ i\sigma_2 & 0 \end{vmatrix},$$

где σ_1 , σ_2 и σ_3 – 2×2 матрицы Паули⁵. Они должны удовлетворять правилам коммутации:

$$E_\mu E_\nu + E_\nu E_\mu = -2\delta_{\mu\nu} \quad (\mu, \nu = 1, \dots, 5)$$

$$E_1 E_2 E_3 E_4 = iE_5.$$

Таким образом эддингтоновская алгебра содержала 16 элементов i , E_μ и $E_\mu E_\nu$ ($\mu, \nu = 1, \dots, 5$; $\mu \neq \nu$). Далее Эддингтон определяет квадрат E -алгебры в виде комплексных 16×16 матриц. Они, как оказалось, соответствуют одной из трех клиффордовых алгебр в девятимерном пространстве [232]. В этой связи Чандрасекар отмечал: "Так как последние работы по суперсимметрии калибровочных полей основываются на восьми- или девятимерных клиффордовых алгебрах, Эддингтон был, в этом отношении, намного впереди своего времени" [214, с. 54].

В своих исследованиях Эддингтон нашел идемпотентные матрицы E , т.е. такие матрицы, которые удовлетворяют условию $E^2 = E$ по определению. Они представляют проекции операторов момента и спина в квантовой электродинамике. Им также было установлено, что вследствие пятимерности E -алгебры, можно ввести понятие "спиральности" в зависимости от выбора знака плюс или минус в правой части соотношения $E_1 E_2 E_3 E_4 = iE_5$. По сути дела, Эддингтоном было впервые выведено одно из квантовых чисел, характеризующее состояние элементарной частицы, определяемое как проекция спина частицы на направление ее движения⁶. Эддингтон был также первым, кто детально развил алгебру вещественных 4×4 матриц и установил ее значение. Эта алгебра позднее была переоткрыта замечательным итальянским теоретиком Этторе Майораной и в современной физической литературе ее называют "спинорами Майораны".

Таким образом, можно видеть, что хотя Эддингтон не входил в число создателей новой, квантовой механики, его работы внесли существенный вклад в развитие ее математического аппарата. И все же дух этой новой науки был чужд Эддингтону. Он писал: "В некотором

⁵ $\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, $\sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$, $\sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$.

⁶ Подробнее см. [249, с. 78].

смысле я нахожу психологию физика-квантиста еще более странной, чем поведение электрона" [202, с. 487].

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ

Эддингтон, особенно в последние годы жизни, стремился построить единую теорию всего сущего, включающую законы развития Вселенной и значения фундаментальных постоянных. Первые свидетельства об интересе к этой проблеме можно найти уже в ранних работах: "Сообщение о теории относительности и гравитации" 1918 г. [49] и "Пространство, время и гравитация" 1920 г. [62].

К концу второго десятилетия XX в. в физике были совершены открытия первостепенного значения: Эйнштейн создал общую теорию относительности, Бор – квантовую теорию атома, Резерфорд открыл атомное ядро. Но тогда еще ничего не было известно о сильных взаимодействиях, связывающих частицы в ядре, и Резерфорд считал последнее состоящим из протонов и электронов, удерживаемых вместе значительными электрическими силами. В то время из фундаментальных взаимодействий были известны лишь электромагнетизм и гравитация. Поэтому неудивительно, что крупнейшие теоретики, считавшие, что все взаимодействия должны быть проявлением единого физического поля, начинали построение единой теории поля с попыток объединения электромагнитного и гравитационного полей. Надо сказать, что независимое существование этих полей не приводило к противоречиям в описании физических явлений или парадоксам, не было и загадочных результатов экспериментов и наблюдений. Тем не менее ряд исследователей, обладавших глубокой научной интуицией, таких, как Эйнштейн, Вейль, Эддингтон и некоторые другие, обратились к единой теории поля.

Исторический анализ первых попыток построения единых теорий поля дан в монографии В.П. Визгина [235]. В ней содержится как исчерпывающий историко-научный анализ генезиса концепции, так и важнейший в методологическом отношении материал – проблема структуры научной теории, функционирование методологических принципов физики, взаимоотношения физического содержания и математического аппарата, аксиоматика и эвристическая роль теоретических построений.

Теории Эйнштейна и Гильберта, Вейля и Эддингтона относятся к так называемым "единым геометризованным теориям поля", представляющим определенную научно-исследовательскую программу [261]. В.П. Визгин дает ей следующую характеристику: "Рождение программы единых геометризованных теорий поля (ЕГТП) на рубеже 10-х и 20-х годов XX в., огромные надежды, которые на нее возлагались в те годы, попытки использования единых теорий в осмыслении загадок квантовой теории, приверженность (порой временная, порой очень длительная) к этой программе многих выдающихся физиков и математиков XX в., таких, как Эйнштейн, Гильберт, Вейль, Эддинг-

тон, Шредингер, Паули, Картан, постепенное уменьшение ее авторитета после создания квантовой механики и особенно после начала эпохи физики элементарных частиц (в начале второго тридцатилетия), большой вклад этого направления в развитие новейшей дифференциальной геометрии, наконец, беспримерное упорство Эйнштейна – все это бесспорно реальности физики XX в., причем фундаментальной теоретической физики" [235, с. 10].

Впервые попытку создать ЕГТП предпринял Герман Вейль на основе обобщения римановой геометрии в обычных четырех пространственно-временных измерениях в 1918 г. [392]. Его работу, скорее, следует назвать не теорией, а "проектом теории" вследствие ее неопосредованности с наблюдательными и экспериментальными данными.

Несомненно под влиянием Вейля Эддингтон в 1921 г. предложил свою теорию поля, изложив ее в работе "Обобщение теории Вейля электромагнитного и гравитационного полей" [69]. Во введении Эддингтон пишет: "Я думаю, что хотя геометрия Вейля является плодотворной, она содержит в себе некоторые излишние и даже вредные ограничения. (...) При выходе за пределы евклидовой геометрии появляется гравитация; при выходе за пределы римановой геометрии – электромагнитные силы, что же мы получим при дальнейшем обобщении? (...) Очевидно, немаксвелловы силы сцепления, обеспечивающие целостность электрона" [69, р. 104]. В последней фразе Эддингтон предугадывает открытие новых видов взаимодействий в физике элементарных частиц и намечает программу построения теории, описывающей их в дополнение к гравитационным и электромагнитным полям.

В.П. Визгин дает следующую характеристику этому периоду: "Примером узлового момента в развитии ЕГТП был 1921 год, когда были выдвинуты теории Эддингтона, Калуцы и когда Эйнштейн явным образом перешел на позиции этой программы" [235, с. 12]. В отличие от Вейля, который в качестве основных понятий ввел симметричную связность и симметричный фундаментальный тензор, Эддингтон вводит только симметричную связность $\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$.

Таким образом, теория Эддингтона представляет собой первую чисто аффинную теорию.

Подход Эддингтона произвел большое впечатление на Эйнштейна, способствуя росту его интереса к построению единой теории поля. И хотя первый его отзыв о теории Эддингтона был как о "красивой форме, не наполненной содержанием" [307], но уже через год в другом письме к Вейлю Эйнштейн пишет, что он "обязательно должен опубликовать что-нибудь свое, так как идею Эддингтона нужно разработать до конца" [308]. Вспоминая развитие теории в те годы, почти через полвека сам Вейль отмечал: "Эддингтон распространил на тензор кривизны R_{ij} мою мысль о том, что радиус кривизны мира задает калибровку, и это привело к тому, что мир следует описывать не посредством метрики, а с помощью 40 величин $\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = \Gamma_{\nu\mu}^{\lambda}$ – коэффициентов аффинной связности" [395].

Но Эддингтону так и не удалось найти полевые уравнения для 40 переменных $\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$. Это сделал Эйнштейн в 1923 г. в работе "Теория аффинного поля" [286]. Он же установил, что невозможно получить уравнения Максвелла для поля без источников и что теория "ничего не говорит о структуре электронов" [286, с. 153]. Таким образом в этих работах объединение полей носило формальный характер и не приводило к частицеподобным решениям.

Эйнштейн в добавлении, написанном им в 1925 г. для немецкого издания книги [81] Эддингтона, приходит к выводу: "К сожалению, полученный результат создает у меня впечатление, что углубление геометрических основ, предпринятое Вейлем и Эддингтоном, не смогло привести к прогрессу физических знаний" [270, с. 330]. Но сам продолжает попытки построения единой теории поля в духе Вейля и Эддингтона. Маргинальный характер научно-исследовательской программы ЕГТП выяснился далеко не сразу. Основную роль здесь сыграла не столько собственно разработка самой концепции, сколько открытия в области физики элементарных частиц, теории квантовых полей и, в конечном итоге, открытия новых взаимодействий – сильных и слабых, которые придали единой теории поля новое качество.

Но что же осталось в науке непреходящего из исследований Эддингтона в области единой теории поля? Эддингтон был последовательным сторонником введенного Эйнштейном в уравнение поля космологического члена Λ , даже после открытия А.А. Фридманом нестационарных моделей Вселенной, когда формальная потребность в нем отпала. Эддингтон считал, что "положить $\Lambda = 0$ – это отрицать пространство" [214, с. 39]. Как сейчас показано, космологическая постоянная связана со значением плотности энергии вакуума [263, с. 257] следующим уравнением:

$$\Lambda = 8\pi V(\varphi_0) / M_P^2,$$

где $V(\varphi_0)$ – современное значение плотности энергии вакуума и $M_P = 1.2 \times 10^{19}$ ГэВ – масса Планка.

По-видимому, в этом вопросе Эддингтон оказался прав.

А вот как оценил вклад Эддингтона Г. Вейль в своем письме из Цюриха 31 октября 1953 г.: "Что касается собственно оригинального вклада, внесенного в теорию Эддингтоном, я должен сказать, что он состоит главным образом из двух частей: во-первых, его идея аффинной теории поля и затем его последние попытки объяснить эпистемологически значения безразмерных констант, которые, как представляется, входят в построение Вселенной..." [цит. по: 218, с. 57].

Чисто аффинная теория поля действительно бесспорное достижение Эддингтона. Вот как оценивает ее значение для развития математики известный теоретик А. Лихнерович: "Помимо пространств Вейля, в которых фундаментальную роль играет конформная группа, появились пространства Эддингтона – первый пример пространств с линейной связностью. Эти первые наброски, еще неуклюжие и изолированные друг от друга, оказались тем не менее очень важными для развития

дифференциальной геометрии. Они нуждались в объединении, и этот синтез был осуществлен Эли Картаном в 1922 г." [264, с. 131]. Не меньшее значение имеют и идеи Эддингтона относительно основных физических констант. Эйнштейн в письме к Розенталь-Шнейдер (впоследствии автор книги "Реальность и научная истина" [366]) замечал в этой связи: «В разумной теории нет безразмерных величин, значения которых определяются лишь эмпирически. Я, конечно, не в состоянии доказать, что... безразмерные константы в законах природы, которые могут с чисто логической точки зрения иметь любые значения, не должны существовать. Мне, при моей "вере в бога", это представляется очевидным, но, возможно, лишь очень немногие придерживаются того же мнения» [309]. В числе этих немногих без сомнения были Эддингтон, Вейль, Дирак и, возможно, Планк и Зоммерфельд.

В 40-е годы Эддингтон упорно продолжает развивать концепцию единой теории поля. На лекции в Дублинском институте высших исследований он сказал: "В течение 14 лет я никогда не имел ни малейших сомнений в том, что направление, которое я выбрал в 1928 году ведет к унификации релятивистской и квантовой теорий" [193].

И хотя исследования Эддингтона, как и попытки Эйнштейна, в то время не могли увенчаться успехом, он последние три-четыре года жизни большую часть времени посвящал работе над монографией "Фундаментальная теория", которая вышла в свет через два года после его смерти, в 1946 г. [196]. Монография была опубликована под названием, выбранным для нее Эдмундом Уиттекером. Впоследствии Уиттекер назвал Эддингтона современным Архимедом и писал в своей книге [397], что он старался все остальные физические постоянные получить из общих теоретических соображений по аналогии с числом π в геометрии. Взгляды Эддингтона как весьма экстравагантные подверглись критике Максом Борном [295], Джеймсом Джинсом [337], Эдвардом Милном [352], Гарольдом Джеффрисом [338].

Сэр Эдмунд Уиттекер в лекции, посвященной памяти Эддингтона [398], высказал следующее предположение: в свете требований современного развития квантовой электродинамики для получения реальных значений параметров элементарных частиц необходимо проведение так называемой операции "перенормировки", что, вероятно, и предчувствовал Эддингтон, указывая на необходимость особого внимания в сравнении наблюдаемых характеристик с теоретически рассчитанными. В этой книге [196] больше поставлено вопросов, чем найдено ответов. Но ведь ответы приходят и уходят, а вопросы остаются. Как-то Эддингтона спросили, есть ли у него успехи в решении этих трудных задач. Он ответил: "Нет, но я научился жить с ними".

С позиций сегодняшнего дня видно, что Эддингтон не только жил, размышляя над ними, но и поставил некоторые новые фундаментальные вопросы, которые должны быть решены в теории суперобъединения.

Эти задачи следующие:

- 1) получить из первых принципов полный набор частиц и полей;
- 2) получить из тех же первых принципов массы частиц (вернее, безразмерные отношения масс частиц) и безразмерные константы, характеризующие фундаментальные взаимодействия.

Вот что писал по этому поводу еще в 1939 г. П.А.М. Дирак: "Являются ли такие вещи, как свойства элементарных частиц в физике, их массы, численные коэффициенты, входящие в закон сил, предмет математической теории? Согласно узко механистическому взгляду они должны рассматриваться как начальные условия и лежать вне математической теории. Однако поскольку все элементарные частицы принадлежат тому или другому из небольшого числа определенных типов, и все частицы одного типа в точности одинаковы, они должны в какой-то мере управляться математическим законом, и большинство физиков считает сейчас, что в весьма большой мере. Например, Эддингтон строил теорию, которая была призвана объяснить массы частиц. Но даже, если мы предположим, что все свойства элементарных частиц определяются теорией, мы все еще не будем знать, где провести черту, потому что мы немедленно окажемся перед следующим вопросом: определяется ли относительное обилие разных химических элементов теорией? И так мы будем шаг за шагом переходить от атомных вопросов к вопросам астрономическим" [240].

На эту взаимосвязь атомной или, как бы мы сейчас точнее определили, физики элементарных частиц и космологии, впервые указал А.Эддингтон. Еще в 1918 г. в [49] он рассматривал планковские естественные единицы как основу для унификации релятивистской теории гравитации. А все началось с подмеченного совпадения больших чисел. Например, отношение гравитационной и электрических сил, действующих между протоном и электроном $Gm_p \frac{m_e}{e^2} \sim 10^{-40}$.

Отношение единицы атомного времени $\frac{e^2}{m_e c^3}$ к времени Хаббла H^{-1}

того же порядка, $\sim 10^{40}$. "Магическое" число 10^{40} появлялось, как мы видели ранее, и при подсчете заряженных частиц в наблюдаемой Вселенной. Оно находится делением массы Вселенной на массу протона m_p и удвоением частного от деления. Получается 10^{80} , или $(10^{40})^2$. (Наблюдаемая Вселенная имеет хаббловский объем $(ct_H)^3$.)

Таким образом, эти числовые соотношения требуют определенной интерпретации. И здесь нам опять должен прийти на помощь методологический принцип, выдвинутый Эддингтоном. На его основе и было, например, сделано предсказание позитрона Дираком. Он же яснее всего и короче говорит о нем: "Наиболее мощный способ продвижения, который можно предложить сейчас, состоит, пожалуй, в том, чтобы использовать все ресурсы чистой математики в попытках завершать и обобщать математический формализм, образующий соответствующую основу теоретической физики, и после каждого

успеха в этом направлении пытаться интерпретировать новые математические явления в терминах физических реальностей (посредством процедуры типа принципа отождествления Эддингтона)" [240, с. 170].

Если во времена Эддингтона (когда он начинал свою работу в области построения единой теории) были известны всего три частицы: электрон, протон и фотон и два фундаментальных взаимодействия – электромагнитное и гравитационное, то сейчас насчитываются сотни частиц и твердо установлено четыре типа фундаментальных взаимодействий. Правда, надо отметить, что имеются веские основания полагать, что электромагнитное и слабое взаимодействия являются проявлениями единого электрослабого взаимодействия. Интенсивно идет процесс разработки теории Великого объединения, включающей электрослабое и сильное взаимодействия. Имеются попытки создания теории Суперобъединения, включающей также гравитационное взаимодействие. Однако для такой теории требуются принципиально новые идеи, далеко выходящие за пределы обычных методов квантовой теории поля.

Кроме того, что Эддингтон первым указал на важность построения единой (фундаментальной) теории, определяющей все свойства наблюдаемого мира, его можно также считать предтечей "антропного принципа", вытекающего из эддингтоновского эпистемологического подхода, или, выражаясь точнее, указанный принцип неявно содержится в данном подходе. В этом нет ничего удивительного, так как Эддингтону было хорошо известно, что свойства окружающего нас мира сильно зависят от согласованности физических постоянных.

Впервые же антропный принцип в современном понимании был высказан в 1958 г. советским астрофизиком, философом и историком науки Г.М. Идлисом. Наиболее полная разработка этой проблемы принадлежит американскому исследователю Б. Картеру, который выступил в 1973 г. в Кракове на Коперниковском симпозиуме МАС с докладом: "Совпадение больших чисел и антропологический принцип в космологии" [256]. В наиболее общей форме принцип сформулирован следующим образом: "...то, что мы ожидаем наблюдать, должно быть ограничено условиями, необходимыми для нашего существования как наблюдателей".

Антропный принцип можно сформулировать в "сильной" и "слабой" формах. Последний утверждает, что наше положение во Вселенной с необходимостью является привилегированным, так как оно должно быть совместимо с нашим существованием в качестве наблюдателей. "Сильная" же формулировка требует, чтобы Вселенная (и, следовательно, фундаментальные параметры) была такой, что на некотором этапе эволюции допускалось существование наблюдателей. Короче говоря, если "слабый" антропный принцип отражает, что самым фактом своего существования наблюдатель ограничивает предмет наблюдения, т.е. осуществляет селективный отбор, то "сильный" антропный принцип, по существу, утверждает, что Вселенная приспособлена для существования жизни и законы физики и начальные

условия подстраиваются, чтобы обеспечить возникновение и развитие жизни и разума. Это очень схоже с традиционным теологическим подходом: Бог сотворил мир, чтобы люди населяли его [239].

Очевидно, что Эддингтон всегда принимал подобное объяснение. В последние годы, однако, произошли значительные изменения в общих представлениях об эволюции Вселенной. Еще десять лет назад не было сомнений в том, что вся Вселенная родилась в момент единого Большого Взрыва 15–20 млрд лет назад и что либо Вселенная замкнута и должна сколлапсировать и исчезнуть, либо Вселенная бесконечная и тогда будет существовать бесконечно долго. Но в любом случае, по прошествии определенного времени ($\sim 10^{32}$ лет) после распада протонов, предсказанного едиными теориями поля, во Вселенной бы не осталось барионной материи, из которой состоят живые существа, и жизнь была бы невозможна.

В настоящее время инфляционные космологические модели указывают на возможность вечного существования Вселенной, нескончаемо порождающей новые экспоненциально большие области с различными свойствами элементарных частиц и эффективными размерностями пространственно-временного континуума. Один из создателей инфляционной космологии А.Д. Линде пишет: "Мы не знаем, может ли жизнь неограниченно долго развиваться в каждой отдельной такой области, но мы знаем наверняка, что жизнь снова и снова будет зарождаться в разных областях Вселенной во всех своих возможных видах" [263]. Таким образом становится весьма вероятной концепция множественности миров, одни из которых будут необитаемы, а другие будут способствовать развитию жизни вплоть до ее высшей – разумной – формы.

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ КОСМОЛОГИЯ

Рождение релятивистской космологии следует датировать 1917-м годом, когда была опубликована статья А. Эйнштейна "Вопросы космологии и общая теория относительности" [285]. Очевидно, она могла появиться после создания ОТО, показавшей возможность искривления пространства–времени.

Постепенно в 20-е годы была понята природа спиральных туманностей как отдельных самостоятельных галактик, лежащих вне нашего Млечного Пути. А в 1929 г. Э. Хаббл установил, что видимые скорости удаления галактик, определенные по смещению спектральных линий и исправленные на пекулярную скорость Солнечной системы, прямо пропорциональны оценкам расстояний до галактик:

$$V = Hl,$$

где V – скорость удаления галактики, l – расстояние до галактики, H – постоянная Хаббла (Хаббл первоначально оценил ее ~ 500 км/(с · Мпс), а современные оценки на порядок меньше).

Надо заметить, что линейная зависимость скорость–расстояние предсказывалась в отдельных работах и до 1929 г. Такое утверждение

сделал в 1923 г. Вейль [394] на основе модели де Ситтера и в 1928 г. независимо от других – Робертсон [365]. Имеются указания на то, что при выводе своего соотношения Хаббл испытывал влияние работы Робертсона [355].

В 1927 г. бельгийский исследователь Ж. Леметр в развитие работ Фридмана предложил эволюционную космологическую модель [345]. Леметр создавал свою теорию, когда идея о разбегании галактик уже носилась в воздухе. Леметр без указания на источники принял коэффициент пропорциональности $H = 600 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпс)}$, что близко к постоянной Хаббла. На этом основании американский космолог П. Пиблс полагает, что Леметр был связан с Хабблом, выполняя свои исследования [272]. Естественно, Леметр гораздо полнее, чем Фридман смог разработать астрономические следствия своей модели. В 1930 г. Эддингтон узнал о работе Леметра [345]. Он сразу понял значение работы, столь созвучной его собственной концепции расширяющегося мира, и перевел ее на английский язык, а также представил в "Ежемесячные записки Королевского астрономического общества" ("MNRAS"), где она и была опубликована в 1931 г. Дело в том, что нестационарная модель разрешала собственные подозрения Эддингтона о неустойчивости модели Эйнштейна. Как мы уже отмечали, в стационарной модели Эйнштейн ввел Λ -член для нейтрализации действия гравитирующей массы, который представляет универсальное космологическое отталкивание, пропорциональное расстоянию: Λr^2 . Но и в этом случае стационарность достигается лишь при постоянной средней плотности вещества во Вселенной р:

$$4\pi G\rho = \Lambda$$

А что же произойдет, задавался вопросом Эддингтон, если вещество перераспределится или если часть его превратится в излучение, например, как это происходит в звездах, приведя к изменению р? Модель Леметра отвечала на этот вопрос. Если в статическую модель ввести возмущение, такое, чтобы ρ стало $< \frac{\Lambda}{4\pi G}$, то Вселенная расширится, плотность уменьшится и расширение продолжится. Если же при возмущении ρ станет $> \frac{\Lambda}{4\pi G}$, то Вселенная сожмется (сколлапсирует). В такой неустойчивой модели возраст Вселенной зависит от степени ее первоначальной симметричности. H^{-1} дает оценку времени, прошедшего от квазистатической фазы.

После работы Леметра Эддингтону также сразу стала ясна возможность сравнения H^{-1} с возрастом, полученным по методу радиогенного датирования горных пород, предложенного Артуром Холмсом [242]. Действительно, у Леметра $H^{-1} \approx 2 \cdot 10^9$ лет, а возраст архейских пород в то время оценивался $\sim 1.5\text{--}2 \cdot 10^9$ лет. Мы уже знаем, что Эддингтон придерживался мнения о короткой шкале времени жизни звезд, поэтому ему было легко принять короткую шкалу и в космологии.

На мартовском 1935 года собрании Королевского астрономического общества Джинс сделал доклад по проблемам шкалы времени, в котором он высказался в пользу длинной шкалы. На это Эддингтон заметил: "...курьезно, что в основном звезды свидетельствуют в пользу длинной шкалы, тогда как галактики свидетельствуют в пользу короткой. В настоящее время я предпочитаю короткую шкалу и мое предпочтение базируется преимущественно на одном аргументе – удалении галактик. Быстрое расширение системы галактик – это факт наблюдений, который никак не зависит от теории" [163, с. 111].

Однако экстраполяция видимого расширения Вселенной назад во времени вплоть до бесконечной плотности (сингулярности) не самоочевидный шаг, и против нее выступал ряд исследователей, и в том числе де Ситтер. Он полагал, солидаризуясь с Джинсом, что звезды могли бы существовать $\sim 10^{13}$ лет и при этом подавляющая часть их жизни падала бы на фазу сжатия Вселенной. По его космологической модели, сжатие сменилось расширением $\sim 2 \cdot 10^9$ лет тому назад вследствие как роста возмущений, так и, возможно, влияния Λ -члена. По де Ситтеру, согласие в оценке H^{-1} и радиогенной датировки могло быть естественным следствием наиболее интенсивного образования планетных систем в эпоху максимального сжатия Вселенной [381]. Действительно, если придерживаться и космогонической концепции Джинса, то в ту эпоху число сближений звезд было бы наибольшим, что способствовало бы повышению числа образующихся планетных систем.

Нужно отметить, что хотя Эддингтон и оказался прав, тем не менее то, что мы понимаем под короткой шкалой времени в настоящее время, несколько отличается от первоначально предполагавшегося. Это связано в первую очередь с тем, что в определениях Хабблом расстояний до галактик имелись существенные ошибки. Во-первых, неверными оказались оценки расстояний до ближайших соседних галактик, в которых были отождествлены цефеиды, так как была пересмотрена зависимость период–светимость. Они стали считаться в два раза большими, что в свою очередь вызвало уменьшение вдвое постоянной Хаббла. Во-вторых, Хаббл, как выяснилось позже, отождествил как ярчайшие звезды некоторые дискретные объекты в более удаленных галактиках, которые таковыми не являются. Хаббл, понимая, что в этих галактиках невозможно отождествить цефеиды и звезды типа RR Лиры, предположил, что ярчайшие объекты, принимаемые им за звезды, имеют абсолютные величины, характерные для сверхгигантов в нашей Галактике. Но эти объекты оказались компактными эмиссионными газовыми туманностями или звездными скоплениями. Расстояния же до этих галактик были увеличены уже не в два, а в три и более раз. Соответственно постоянная Хаббла уменьшилась до ~ 150 км/(с · Мпс). Впоследствии пришлось сделать и ряд других исправлений. Звездные величины были исправлены на поглощение света в межзвездном пространстве нашей Галактики. Кроме использования цефеид в качестве индикатора расстояний до галактик, стали использоваться другие яркие объекты: шаровые скопления, ярчайшие видимые звезды,

новые и сверхновые звезды. Интересно, что для этой цели можно даже использовать оценки видимых размеров районов ионизованного водорода (HII-области), так как их линейные размеры известны и довольно постоянны. Все эти и другие методы привели к настоящему времени к существенному уточнению оценки постоянной Хаббла. Важно также отметить, что монотонное "падение" оценки H от первоначального значения, связанное с пересмотром шкалы внегалактических расстояний, в 50 и 60-е годы прекратилось. Сейчас наиболее распространенной оценкой H является значение ~ 55 км/(с · Мпс). Очень важна в этой связи реплика Я.Б. Зельдовича на Краковском симпозиуме Международного астрономического союза по проблемам сопоставления космологических теорий с наблюдательными данными, посвященном 500-летию со дня рождения Николая Коперника:

"Прослеживая в недавнем прошлом монотонное уменьшение H , интересно экстраполировать этот процесс на будущее. Очень важно установить нижний предел на H . Это сделано С.П. Пикельнером. По концентрации радиоактивных элементов он доказывает, что возраст Галактики приблизительно равен $(10-12) \cdot 10^9$ лет. Если этот возраст типичен для галактик и если мы не должны видеть молодых галактик, то эта величина не может быть много меньше, чем H^{-1} . Не вдаваясь в подробности, мне кажется, что величина 50 км/(с · Мпс) близка к нижнему пределу; $H \geq 50$ км/(с · Мпс)" [256, с. 87].

Мы видим, что победила короткая шкала времени, правда, несколько удлинившаяся.

Эддингтону представлялось, что наблюдательные и экспериментальные данные свидетельствуют в пользу эволюционной космологической модели, и он сам принял участие в ее разработке. И с теоретической точки зрения эта модель не обладала недостатками моделей Эйнштейна и де Ситтера, как выразился сам Эддингтон: "Вселенная Эйнштейна содержит материю, но не имеет движения, Вселенная де Ситтера имеет движение, но не содержит материю" [147].

В 1930 г. Эддингтон предложил модель, являющуюся предельным случаем модели Леметра [127].

Модель Эддингтона–Леметра привлекательна тем, что в ней Вселенная изначально находится в статическом состоянии, а расширение начинается, по мнению Эддингтона, после конденсации галактик. В ней также не возникает проблемы начального момента времени и сверхплотного состояния (сингулярности), но она описывает наблюдаемое разбегание галактик.

В настоящее время, однако, ясно, что образование галактик и конденсация вещества, нарушающие его однородное распределение, хотя и способствуют некоторому уменьшению гравитационного притяжения, не приведут к расширению Вселенной и в модели Эддингтона. Как было показано, образующиеся галактики испускают столь мощное излучение, что сильно возрастает эквивалентная плотность энергии и

это, в конечном итоге, будет способствовать ускорению процесса сжатия. Да и то, что ранее казалось преимуществом модели Эддингтона – отсутствие сингулярности, в настоящее время таковым не является. Открытие реликтового излучения окончательно отвергло иные модели, кроме тех, в которых Вселенная имеет эффективно горячее происхождение по концепции Большого Взрыва⁷ [245].

Очевидно, что модель Эддингтона в настоящее время имеет лишь исторический интерес.

В последней работе, которую Эддингтон представил в Королевском астрономическом обществе в 1944 г., он описывает метод прослеживания истории Вселенной в прошлое до времени, когда ее радиус был такой же, как в стационарной модели Эйнштейна $9.1 \cdot 10^{10}$ лет назад. В этой работе он полагал, что последние $4.68 \cdot 10^9$ лет расширение происходило столь быстро, что уже события, происходящие в различных причинных сферах, не могли влиять одно на другое. Интересно, что в ней были предвосхищены некоторые следствия новой современной теории "раздувающейся Вселенной".

⁷ Модель "горячей Вселенной" предложена американским физиком Г.А. Гамовым в 1946 г.

ФИЛОСОФСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭДДИНГТОНА

Эддингтон был не только крупнейшим ученым – физиком и астрофизиком, но и выдающимся представителем философии науки – создателем оригинальной концепции "новой эпистемологии", оказавшей громадное влияние на развитие философии второй половины XX в. Свою концепцию он назвал "селективный субъективизм" и изложил ее в ряде крупных философских работ [115, 141, 177]. Обращение к философии и теологическим вопросам было для Эддингтона далеко не случайным. Но дело даже не столько в том, что практически все крупнейшие естествоиспытатели, занимавшиеся фундаментальными вопросами, не могли их избежать. В их числе Эйнштейн, Бор, Гейзенберг и Шредингер. Но, прежде всего, в той квакерской традиции его семьи, в которой он воспитывался и которой он остался приверженным до конца своих дней, являясь активным членом Общества друзей.

Путь жизни квакера направлен в сторону развития способности размышлять в "сочувственном одиночестве", где каждый может найти "истинную свободу и покой" и "обладать возможностью углубиться в свои мысли в тишине" [343, с. 65]. И Эддингтон не только погружался в медитацию во время молитвенных собраний, но и, когда он работал, случалось, его внутреннему слуху открывался голос интуиции. Неудивительно поэтому, что его интересовали все аспекты познания и рационального физического мира, который открывается через ощущения и логическое мышление, и религиозного постижения "невидимого мира", в который можно проникнуть только путем мистического опыта. Эддингтон придерживался принципа комплементарности рационально-научного и мистико-религиозного познания. И, как убедительно показал Д. Вильсон, на самом деле всегда существовал конфликт не между наукой и религией, а между различными комбинациями науки и религии [399].

В предисловии, написанном Эддингтоном к книге "Мистицизм и поэзия" Аллена Брокингтона – главы Бринмелианской школы в Вестоне, где Эддингтон учился в детстве, есть такое сравнение: "Того, кто рассматривает мистицизм с точки зрения научной философии, можно сравнить с человеком, смотрящим на город с высоты. Он может охватить положение вещей лучше, чем житель города изнутри, и видеть детали постепенного перехода к сельским окрестностям. Нам кажется, что облака полностью рассеялись и возможно точно определить положение города, или, по метафоре Вейля, мы видим откры-

тый горизонт. Но владения таким образом не открываются изнутри. Для того чтобы получить такие знания, мы должны отказаться от нашей преимущественно научной точки зрения и вступить на путь, на котором человек с древнейших времен проникал мысленно в сущность вещей. Мы должны стать сотоварищами тех, кто говорит с нами со страниц этой книги" [цит. по: 218, с. 131].

Эти размышления Эддингтона созвучны поэзии так любимого им Уильяма Блейка – замечательного представителя поэзии предромантизма, наполненной, особенно в "Пророческих книгах", мистической символикой пантеистической философии:

В одном мгновенье видеть вечность,
Огромный мир – в зерне песка,
В единой горсти – бесконечность
И небо – в чашечке цветка. [265, с. 323]

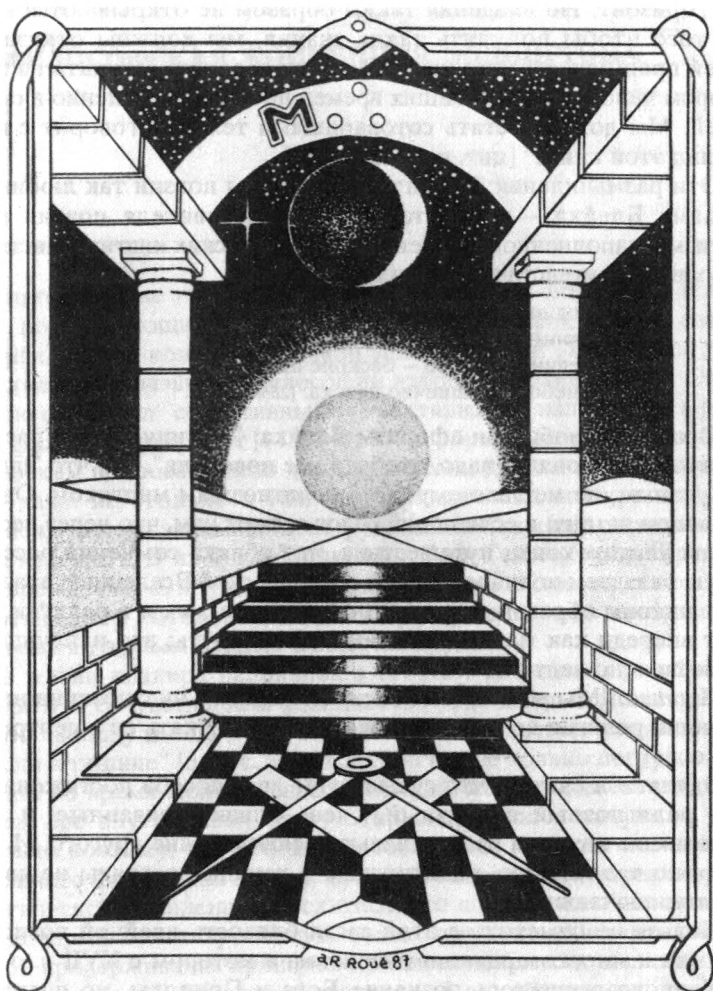
Особенно любил он афоризм Блейка: "Истину нельзя рассказать так, чтобы ее поняли; надо, чтобы в нее поверили". То, что Эддингтон был ученым, не мешало ему быть религиозным мистиком. Он писал: "Мы ищем истину; и если некий голос скажет нам, что через несколько лет мы увидим конец путешествия, что облака сомнений рассеются и что мы овладеем полным знанием о физической Вселенной, эта новость будет никоим образом не радостной. В науке, как и в религии, истина сияет впереди как маяк, указывающий нам путь; это наилучшее, что нам позволено найти" [115, с. 16].

И далее: "Мы не поймем истину спиритизма ни с позиции науки, ни с позиции религии до тех пор, пока не будем искать ее в центре всего" [115, с. 54].

Эддингтон считал, что существуют два способа постижения истины – религиозный и научный, очень близко связанные, и знания, добываемые каждым из них, испытывают влияние другого. И уж, конечно, по его мнению, религиозные и научные взгляды не являются взаимоисключающими.

Нельзя не отметить в этой связи близость идейной позиции Эддингтона к миросозерцанию масонства, в котором с XVII в. одной из целей провозглашалось познание Бога и Природы, но познание не рациональное, а интуитивно-мистическое. Неизвестно, принадлежал ли Эддингтон к масонам или другим инициационно-символическим организациям, например, к основанному в 1887 г. и действовавшему до конца первого десятилетия XX в. (под управлением Великого Магистра – выдающегося поэта-драматурга – Уильяма Батлера Ф. Йитса) ордену герметистов "Золотая заря". Однако отсутствие документальных свидетельств в данном случае не может означать отрицательный ответ.

Дело в том, что хотя масонство, вообще говоря, не является секретным или тайным обществом, но пренебрегает публичностью и очень ценит "умолчание". "Масон может, если он того пожелает, предать гласности факт своей принадлежности к ордену. Но по уставу, он обязан не обнародовать, не получив на это особое разрешение, имена



Масонская символика

других братьев" [267, с. 66]. В случае же Эддингтона положение осложняется еще более тем, что он принадлежал к Обществу друзей, а, как известно, квакеры, следуя евангельскому завету, отказываются приносить присягу или клясться. Поэтому он мог быть, как и другие квакеры, освобожден от принятия масонской присяги по постановлению Великой объединенной ложи Англии 1835 г. [339] во избежание процедурных затруднений.

Огромное значение в своих философских работах Эддингтон придавал символу, впервые поставив вопрос о его роли в познавательном процессе, особенно в естественных науках, тем самым он внес большой

вклад и в идеологию масонства. Ведь язык символов является отличительной особенностью масонства, можно сказать, его главной чертой. Все в нем пронизано символическим рядом: храм, ритуал; и сама символика рассматривается как священнодействие. И Эддингтон принимает традиционно эзотерическое понимание символа, по которому символ является формой, скрывающей непознаваемую реальность, но одновременно и открывающую ее.

Эддингтон писал: "Один из известных законов излучения, сформулированный Кирхгофом, устанавливает, что коэффициент поглощения веществ пропорционален их коэффициенту излучения, так что лучшие абсорбенты являются лучшими излучателями. Неплохая тема для проповеди" [115, с. 33]. Последнюю фразу Микеле Морамарко интерпретирует как интуитивное озарение Эддингтона, порожденное скрытым символизмом закона Кирхгофа, увидевшего в нем аналогию со стихом Евангелия от Луки (17, 33): "Кто станет сберегать душу свою, тот погубит ее; а кто погубит ее, тот оживит ее" [267, с. 83]. В этом изречении скрыто не только этическое содержание – призыв "отдавать самого себя", но и эзотерическое увещание. По нему, для достижения внутреннего освобождения необходимо подняться от индивидуализма до уровня надличностно-духовного. Надо как бы потерять себя, чтобы затем обрести, т.е. выйти из себя (излучить), для того чтобы вобрать в себя (поглотить) как можно больше из универсальной духовной реальности.

Здесь Эддингтон выходит за рамки характерного для физики символично-синтетического описания явлений в область метафизики. Он считает, что и сами физические теории представляют собой "свободное творчество духа". Поясняя это утверждение, Эддингтон пишет: "...обладая селективной мощью, разум включил феномены природы в рамки системы законов, модель которой в значительной мере он избрал для себя сам. Открывая эту систему законов, мы можем полагать, что разум берет от природы то, что он сам в нее поместил" [111]. По Эддингтону, интеллект имеет в себе самом "законы природы" – врожденные модели, которые он накладывает на проявления реальности. Но по масонской терминологии, интеллект является Архитектором Вселенной. И если интеллект – это функция духа, то Эддингтон подразумевает наличие универсальной духовности.

Язык символов, являющийся главной отличительной чертой масонства, находит поддержку и у других выдающихся представителей современной науки. Так, В. Паули считает: "Возможность описывать феномены независимо от того, каким образом они наблюдаются, более не реализуется, тогда как физические объекты имеют поливалентный характер, а посему – символический" [267, с. 84]. Паули развивает взгляды основателя цюрихской школы аналитической психологии Карла Густава Юнга на познавательное значение символа. Сам Юнг рассматривал символы с трех точек зрения: символы как носители архетипов, символы как преобразователи либидо и, наконец, как инструмент терапевтического воздействия. По Юнгу, не каждый знак яв-

ляется символом, а лишь тот, который выражает инвариантные структурные связи неосознанно. Эссенциальным ядром каждого символа должен являться архетип – инстинктивное представление.

Как показано в современной психологии, познание представляет собой длительный процесс, начинающийся в сфере бессознательного еще до рациональной формулировки предмета познания. На первичной ступени вместо четких понятий даже не мыслятся, а наглядно созерцаются образы, обладающие и эмоциональным содержанием. Паули полагает, что в этом мире символических образов архетипы действуют как "упорядочивающие операторы" и формирующие факторы, исполняя роль связующего звена между чувственными восприятиями и идеями [271].

Центральное ядро архетипа, по Юнгу, "метафизично", но вокруг него структурируются образы. Архетипы проявляются в снах, мифах и символике поведения человека. Они соответствуют некоторым структурным коллективным, а не личностным элементам души и передаются по наследству. Юнг предполагает также "автохтонное" воспроизводство архетипов и существование у них психокolleктивной базовой страты. Эту страту он называет коллективным бессознательным. Без сомнения процесс становления символа на базе архетипа осуществляется посредством криптомнезии.

Под функцией преобразования либидо Юнг понимает перенос "психической энергии" "из низшей в высшую форму" с уровня инстинктивного на уровень идей. С появления символического мышления начинается человеческая цивилизация. Символ становится средством упорядочения жизни, протекающей на инстинктивном уровне.

И, наконец, потеря человеком в современном мире религиозно-символического опыта, считает Юнг, создает идеосинкрозию психоневрозам, порождаемым фрустрацией. Поэтому символ – древнейший синтез "духа" и "материи" – может быть инструментом терапевтического воздействия, помогающим восстановлению связи между осознанным и неосознанным.

К этой точке зрения близок и Эддингтон, считающийся приверженцем спиритуалистического взгляда на проблему сознания. Как мы увидим ниже, он определяет реальность, отождествляя ее с содержанием сознания. И мир науки, по нему, – это лишь символ реального мира. Для познания же подлинной сущности мира, считает Эддингтон, необходим мистический опыт. В уже упоминавшемся нами исследовании Микеле Морамарко ставится вопрос, что понимает Эддингтон под мистицизмом? Рассматриваются два типа мистицизма – пассивный, при котором сознание человека оплетено архетипами коллективного бессознательного, и активный, поддерживаемый светом идей, т.е. интеллектуальной интуицией. Можно согласиться с Морамарко, что все творчество Эддингтона свидетельствует в пользу того, что он, "говоря о мистицизме, по всей вероятности, имел в виду мистицизм второго типа" [267, с. 83].

Эддингтон жил и работал в период, когда кризисная ситуация, су-

ществовавшая в физике начала XX в., разрешилась созданием релятивистской и квантовой теорий. Как отмечал Т. Кун, эпистемологический анализ особенно важен в период кризиса в науке. Он писал: "Любой кризис начинается с сомнения в парадигме и последующего расшатывания правил нормального исследования. В этом отношении исследование во время кризиса имеет очень много сходного с исследованием в допарадигмальный период" [257, с. 114]. Естественно, в период коренной ломки традиционных представлений и формирования принципиально новых обострен интерес к методологическим и эпистемологическим проблемам научного исследования. Причем эпистемология, в отличие от методологии, отвечающей на вопрос, каков наш метод приобретения знания, должна указывать критерии, по которым в соответствии с типом знания выбирается сам метод, т.е. изучает природу и основание научного знания в целом.

Интерес к этим вопросам проявился у Эддингтона очень рано, буквально с первых шагов его научной деятельности. В своей книге "Математическая теория относительности" (1923 г.) – одной из первых серьезных монографий, в которой исчерпывающе излагалась теория Эйнштейна, – Эддингтон дает эпистемологический анализ понятия физической величины: "Чистый математик имеет дело с идеальными величинами, обладающими, по определению, теми свойствами, которые он сам произвольно приписывает. Но в экспериментальной науке мы должны не приписывать, а открывать отдельные свойства. Физические величины и определяются прежде всего по тем признакам, по которым мы распознаем их, сталкиваясь с ними при наших наблюдениях окружающего мира" [202, с. 11]. И далее: "Определенная таким образом физическая величина есть прежде всего результат измерений и вычислений, – она будет, так сказать, сфабрикованной вещью, созданной нашими операциями" [202, с. 12]. Здесь Эддингтон близок к операционализму П.У. Бриджмена, но, не удовлетворяясь последним, ищет более глубокие сущности, "ритм существования" которых отражают научные понятия.

С точки зрения Эддингтона, нельзя считать, что сконструированная физиком величина существует в общей картине мира как нечто, что могло бы быть воспринято высшим разумом, без всякой связи с операциями, производимыми с измерительными приборами. В качестве примера Эддингтон приводит такую величину, как расстояние между двумя точками. В релятивистской физике эта величина не является инвариантной относительно преобразования систем координат. Более того, сами понятия пространства и времени оказываются всего лишь искусственными конструкциями, связанными с субъективным восприятием мира человеком, которое обобщается понятием пространственно-временного континуума. Поэтому Эддингтон приходит к выводу, что всякое понятие "сходства" между физическими величинами и соотношениями во внешнем мире, лежащими в их основе, представляется непригодным. Они, по его мнению, могут быть лишь числовыми мерами этих мировых соотношений и представляют собой то косвенное пре-

дельное знание, какое может достигнуть наука в описании "мирового соотношения".

В отличие от ментализма Дж. Джинса, считавшего, что математика и есть сама реальность, у Эддингтона нет онтологизации математики. Скорее, в духе конвенционализма А. Пуанкаре Эддингтон утверждал: "Физическая величина есть числовая мера мирового соотношения, выраженного на каком-то условном языке. Мы не можем утверждать, верен или неверен этот условный язык, или что числовая мера реальна или нет. Мы только требуем, чтобы этот условный язык был общепринятым и чтобы числовые значения были теми, которыми обычно все пользуются" [202, с. 16].

Само научное исследование, по Эддингтону, – это проведение экспериментов – действия с измерительными приборами, при которых проявляются их внутренние свойства как закономерности в измерениях. Эддингтон, в этой связи, замечает: "Нам известны многие подобные закономерности, но обычно мы не считаем их свойствами измерительного прибора, мы называем их законами природы!" [202, с. 18].

Далее следует ясное и весьма категоричное утверждение: "Физические величины, определяемые измерительными процессами, независимы от какой-либо теории и только они и образуют настоящий исходный пункт для всякого нового теоретического построения" [202, с. 19]. Здесь Эддингтон стоит на позитивистских позициях логического эмпиризма. Ведущий представитель этой школы Рудольф Карнап так сформулировал ее основной принцип: "Мы считаем, что существует определенная основа знания, своего рода твердая скала, – неопровержимое знание данного непосредственно. Предполагается, что всякое другое знание прочно опирается на это основание, и поэтому может быть названо достоверным в определенной степени" [384, с. 57].

Но даже в этот ранний период творчества Эддингтона мы не можем отнести его к последователям логического эмпиризма с элементами операционализма и конвенционализма¹. Он указывал, например, на то что пространственно-временная система отсчета есть нечто, налагаемое наблюдателем на внешний мир. И пространство и время в релятивистской теории отличаются от этих же понятий в классической физике. Но это вступает в противоречие с основным положением логического эмпиризма, по которому термины языка наблюдений абсолютны и остаются неизменными в любой теории. Позже Эддингтон не раз повторял, что все наблюдения должны считаться подозрительными до тех пор, пока не будут подтверждены теорией.

Несомненно также, что значительное влияние на Эддингтона оказали философские взгляды А.Н. Уайтхеда, лекции которого он слушал во время обучения в Кембриджском университете. Именно на его лекциях Эддингтон мог узнать, что "пространство–время не существует само по себе. Это абстракция, и ее объяснение требует указания на то,

¹ Подробнее см. [322, 400, 351].

от чего она абстрагирована" [280, с. 123]. Но, пожалуй, более важным является, то, что именно Уайтхед первым отметил, что "наблюдение есть селекция" [280, с. 74]. И новая эпистемология Эддингтона – "селективный субъективизм" базируется на этом фундаментальном утверждении. Уайтхед дал определение и субъективизму: "Под субъективистскими предпосылками я подразумеваю убеждение, что характер нашего непосредственного опыта есть результат перцептивных особенностей субъекта опыта" [280, с. 147]. Хотя, надо отметить, сам Уайтхед не был субъективистом, полагая, что "чувственный опыт дает знание о том, что существует вне и независимо от нашей субъективности, тогда как субъективисты считают, что в этом опыте мы познаем лишь самих себя" [280, с. 148]. Последнее сказано как бы прямо о точке зрения Эддингтона, писавшего: "Мы обнаружили таинственные следы на берегах неведомого. Мы сконструировали солидные теории, одну за другой, чтобы обосновать происхождение следов. Наконец, мы преуспели в воссоздании того существа, которое оставило следы. И что же? Это наши собственные следы" [62].

* * *

Первое систематическое изложение философских взглядов Эддингтона содержалось в Гиффордовских лекциях, прочитанных им в 1927 г. в Эдинбургском университете и изданных впоследствии в расширенном варианте в виде монографии [111]. Гиффордовские лекции, ежегодно читаемые в университетах Шотландии по завещанию учредителя, должны иметь одну тему – естественную теологию. По словам Вернера Гейзенберга, также читавшего эти лекции в 1955/56 г., с естественной теологией связана точка зрения на вопросы бытия, являющаяся "результатом отказа от какой-либо частной религии или мировоззрения".

Сам Эддингтон однозначно определил основную цель своей работы – показать, как развитие науки обеспечивает философов новыми материалами. При рассмотрении основных категорий – субстанции, времени, пространства прослеживается единая тенденция: допускается существование внешнего мира. По мнению Эддингтона, изучаем ли мы вещественный объект, магнитное поле, геометрическую фигуру или продолжительность времени, наша научная информация выражается в измерениях, хотя сами измерения не являются основой для классификации категорий. Поэтому имеется необходимость допустить некоторое основание для измерений – внешний мир. Но атрибуты этого мира за исключением, по крайней мере того, что они отражаются в измерениях, считает Эддингтон, лежат за пределами возможностей науки.

Рассматривая два мира – обыденный и научный – и отвечая на мысленный вопрос читателя о противоречивости этих двух миров и о том, не являются ли они в действительности двумя аспектами или интерпретациями одного и того же мира, Эддингтон пишет: "Да, без сомнения они в конечном итоге будут отождествлены до некоторой степени. Но процесс, посредством которого внешний мир физики транс-

формируется в хорошо знакомый обыденный мир в человеческом сознании, лежит вне пределов физической науки" [111, с. XII].

В целом научное исследование начинается в обыденном мире и, в конечном итоге, должно в него вернуться, но часть пути исследователя лежит вне его территории, считает Эддингтон. Так, исследования атома начинаются с исследования веществ и излучения в обыденном мире и заканчиваются сравнением предсказанных эффектов с наблюдаемыми в этом же мире, хотя атом – это и "не вещь среди вещей". По сути дела, сам язык, созданный человечеством, содержит понятия, пригодные для описания явлений обыденной, повседневной жизни. Для описания понятий в теоретической физике вводятся математические символы, а законы природы выражаются в виде уравнений между ними.

Весьма оригинальную интерпретацию дает Эддингтон абстрактному физическому понятию, которому нет прямой аналогии в обыденном мире. Она состоит в сравнении научного, т.е. символического выражения реального мира с книгой, которая также является символическим отражением реально имевшей место истории или фантазии автора. Но книга написана словами, каждое из которых является символом некоторого обыденного понятия. В свою очередь, слова состоят из букв *A, B, C* и т.д., но вот им-то уже ничего не соответствует в обыденном мире. На требование объяснить, что в действительности представляет собой электрон, можно лишь ответить: "Это часть *A, B, C* физики" [111, с. XIV]. Внешний мир физики становится, таким образом, миром призраков.

"В снятии иллюзий, – замечает Эддингтон, – мы устранили субстанцию; в действительности мы видим, что субстанция – одна из величайших наших иллюзий" [111, с. XIV]. И приходит к выводу, что коль скоро это так, то это обстоятельство мало касается физиков, имеющих вполне определенную мотивацию для своих исследований, и остается проблемой для философских изысканий.

"Открытое осознание, – считает Эддингтон, – того, что физическая наука имеет отношение к миру призраков, является одним из наиболее значительных современных достижений" [111, с. XV]. Подытоживая рассмотрение проблемы двух миров, обыденного и научного, Эддингтон приходит к выводу: "Вообще, нам следует описывать обыденный мир как субъективный, а научный мир как объективный" [111, с. 94]. В этом его позиция близка к утверждениям Дж. Джинса о том, что философы говорят и думают о субъективных понятиях, а физики об объективных [250, с. 101]. Действительно, электромагнитные волны определенной длины – это реальность, а голубой или красный цвет – субъективность, которая не существует вне воспринимающего субъекта. Но, все же, ему не хочется во всем соглашаться с Джинсом, и Эддингтон заключает: "Творение было работой инженера, а не математика, как стало сейчас модным утверждать" [111, с. 104]. Под модными утверждениями Эддингтон, конечно, подразумевает ментализм Джинса, считавшего, что "Великий создатель Вселенной был математиком".

Но не противоречит ли Эддингтон себе, называя мир науки и миром

призраков и объективным, а обыденный мир – миром реальным и субъективным? Нет, здесь нет противоречия; как ни парадоксально это звучит, но Эддингтон считает именно так. На это обстоятельство обратил внимание еще Г. Джеффрис, занявший после Эддингтона должность Плюмианского профессора в Кембриджском университете. "По Эддингтону, – писал он, – существует субъективная наука, которая включает фундаментальные законы физики, и объективная, которая включает психологию" [338].

Вместе с тем, анализируя понятия современной физики, Эддингтон выступает против вульгарной интерпретации релятивистской физики, что все на свете относительно. Так, он обращает внимание на то, что эйнштейновская теория свидетельствует о наличии в мире как раз абсолютных понятий, но для того, чтобы их увидеть, нужен более глубокий анализ. С другой стороны, Эддингтон считает абсурдным предполагать, что Вселенная спланирована таким образом; чтобы скрывать этот план, и приводит в качестве иллюстрации подобного абсурда остроумное четверостишие:

Однажды я задумал план –
Окрасить зеленью усы,
Но веер был такой большой,
Что они не были видны.

Эддингтон пытается анализировать некоторые проблемы науки, на которые в то время не было, да и сейчас не существует однозначных ответов. К таким проблемам относится объяснение направления "стрелы времени". Следует заметить, что само это образное сравнение впервые было введено Эддингтоном. Однонаправленность хода времени он первоначально пытался связать со вторым законом термодинамики – законом возрастания энтропии, а после установления расширения Вселенной выдвинул гипотезу, по которой последнее обуславливало направление течения времени.

В философской монографии Эддингтона гениально предугадана одна из проблем современной науки, такая, как соотношение между макроскопическими или стохастическими и динамическими методами, остающаяся нерешенной до настоящего времени.

По этому поводу создатель термодинамики необратимых процессов И. Пригожин заметил: «Например, в прекрасной книге "Природа физического мира" Эддингтон ввел различие между "первичными законами", управляющими поведением отдельных частиц, и "вторичными законами", например принципом возрастания энтропии, применимыми только к большим скоплениям атомов или молекул.

Эддингтон ясно сознавал важность понятия энтропии. В его книге читаем следующее: "Думаю, что с точки зрения философии науки концепцию, основанную на использовании понятия энтропии, надлежит включить в число наиболее фундаментальных вкладов девятнадцатого столетия в научное мышление. Она явилась своего рода реакцией на мнение, будто все, достойное внимания науки, может быть открыто микроскопическим иссечением объектов".

Каким образом "первичные" законы могут сосуществовать с "вторичными"? "Не следует удивляться, – писал Эддингтон, – если в процессе перестройки всей схемы физики, к которой нас вынуждает квантовая теория, вторичные законы обретут первостепенное значение, а первичные отойдут на задний план" [274, с. 205].

Да, пожалуй, и научный абстрактный мир Эддингтона в настоящее время наиболее полно реализуется в подходе Пригожина, в котором законы природы находят формулировку в обобщенных функциональных пространствах Соболева и Гельфанда. По Пригожину, лишь в них возможна их адекватная формулировка как статистических вероятностных утверждений, в которых проявляются необратимый характер времени и его структурообразующие функции.

Направленность времени проявляется и в таких свойствах материи, как распад радиоактивных элементов и возможный распад нуклонов. Поэтому фундаментальные законы природы должны быть асимметричны относительно обращения времени.

По мнению И. Пригожина, понятие эволюции было введено в физику посредством принципа возрастания энтропии. Он также отмечает, что эволюционистская концепция практически одновременно возникла в физике, биологии и социологии. И Эддингтон также разделял основные положения этой концепции. Он прямо пишет: "Я эволюционист, а не мультипликционист. Представляется весьма глупым продолжать делать одни и те же вещи снова и снова" [111, с. 86]. А саму эволюцию связывает с самоорганизацией и ролью флуктуаций: "Случайные скопления атомов – это пугало теологии – очень безобидны с позиций ортодоксальной физики" [111, с. 77]. Рассматривая эволюционистскую концепцию и связанную с ней категорию времени, Эддингтон констатирует практическую беспомощность науки: "Мы не имеем сейчас концепции, как это все началось" [111, с. 167].

Относительно пространства Эддингтон приходит к более определенным выводам: пространство не является ни евклидовым, ни неевклидовым, а все дело лишь в конвенции, и исследователь свободен применять любую геометрию, какую выберет. Но эмпирик побеждает в Эддингтоне конвенционалиста, и он склоняется все же к экспериментальным основаниям геометрии: "геометрия – это наука измерения окружающего нас пространства и этимологически и традиционно ее основания должны иметь экспериментальные подтверждения" [111, с. 162].

Именно в "Природе физического мира" мы находим истоки "новой эпистемологии" Эддингтона. Так, принцип неопределенности Гейзенберга трактуется Эддингтоном как эпистемологический принцип. Этим еще раз подчеркивается, что мир физики – это мир, наблюдаемый с помощью приборов, которые сами являются его частью и подвержены его законам. С другой стороны, Эддингтон указывает на значение этого принципа для нового понимания проблемы детерминизма. Ведь в конечном итоге он показывает, что неопределенность будущего кроется в неопределенности настоящего.

Следует отметить, что Эддингтон не принимает и подвергает критике берклианскую субъективистскую точку зрения, по которой существовать для вещей означает быть воспринимаемыми. "В любом случае, астрономия – утверждает Эддингтон, – не может основываться на таком спазматическом сорте Луны, которая существует только тогда, когда на нее смотрят. Она появилась задолго до астрономов и отражает свет Солнца даже, когда на нее никто не смотрит, и осуществит солнечное затмение в 1999 году, даже если человеческий род преуспеет в самоубийстве до этой даты" [111, с. 226]. Луна, научное понятие Луны – играет роль каузального элемента в мире. Однако в микромире ситуация сложнее. Смотри на Луну, мы практически не вносим возмущения в ее движение. Но если мы пытаемся увидеть электрон, то осуществляем подобное возмущение. После взаимодействий с квантом света он уже изменяет свое положение и скорость. Более того, до наблюдения и после электрон не представляет собой нечто, чему можно было бы приписать определенную скорость и положение, т.е. саму траекторию движения. Он не может быть однозначно объективирован; он есть не объект. В соответствии с квантовой теорией элементарная частица может быть описана только связью ее возможных объективаций, которую Н. Бор определил отношением дополненности. Поэтому Эддингтон, пытаясь построить физический мир, берет в качестве строительного материала связи и отношения. Он вводит их единицу "relata" как точку пересечения связей. Для выделения "relata" вводятся отметки – отличительные знаки – "monomark", имеющие четыре координаты. И в завершение, проводится численное изучение многообразия на понятии сходства. При этом Эддингтон подчеркивает селективное влияние мысли человека. Так, человек ощущает силу по своим мускульным напряжениям, энергию по ощущению теплоты и т.п. Вследствие этого научный физический мир с неизбежностью строится в некотором отношении подобным обыденному миру. Да и сам язык, на котором мы говорим об экспериментах и наблюдениях, так как физические приборы относятся к макромиру, имеет ту же структуру и использует те же понятия, что и язык, на котором мы говорим о своем обыденном опыте (обобщенный принцип соответствия). Поэтому объектов, которые мы могли бы построить, но не построили, так же много, как и тех, что мы построили. "То, что называли построением, – пишет Эддингтон, – скорее, селекция (отбор) из той схемы узора, которая плетет сама себя" [111, с. 241].

Кроме эпистемологических проблем, в этой монографии затрагиваются вопросы теологии и мистицизма. Эддингтон утверждает, что сущность мира – это духовная субстанция, более того, сама реальность является духовной. В связи с этим он отмечал, что предтеча геометродинамики Уильям К. Клиффорд еще в 1875 г. писал: "Последовательность ощущений, которая составляет человеческое сознание, является реальностью..." [111, с. 278]. Но с другой стороны, Эддингтон указывал, что в мышлении имеются воспоминания, не находящиеся в сознании постоянно во всякий момент времени, но способные быть

вызванными в сознание. "Мы смутно осознаем, — отмечал он, — что вещи, которые мы не можем вспомнить, находятся где-то поблизости и могут прийти в голову в любой момент. Сознание не имеет точного определения..." И далее: "Это (сознание. — А.К.) я принимаю как мировую сущность" [111, с. 280].

Эддингтон, последовательно проводя свои взгляды на атомы и элементарные частицы как на "не вещи", которые не могут быть описаны как *ges*, призывал отказаться от иллюзии субстанции. Конечно же, и мысль он не считает материальной или субстанциональной, а рассматривает ее как одну из основ мироздания, даже как единственную основу: "Трудно для сухого, лишенного фантазии физика принять точку зрения, что субстрат всего имеет ментальный характер. Но ни один не может отрицать, что мысль — это первая и наиболее непосредственная вещь в нашем опыте..." [111, с. 281]. Идя дальше, Эддингтон задается вопросом, не содержится ли в мистических откровениях человека отражение лежащей в глубине реальности? И утвердительно отвечая на него, заключает: "И я думаю, вы согласитесь со мной, что невозможно допустить, чтобы один вид восприятия мог адекватно занять место другого" [111, с. 320].

В развиваемой Эддингтоном системе выделяются символическое и сокровенное знания. Причем последнее принципиально не может быть подвергнуто кодификации и анализу, так как любые попытки подобного рода привели бы к потере сокровенности и замещению ее символизмом. В этой связи Эддингтон отмечает, что теология — это, по его мнению, тоже символическое знание и потому теологические дискуссии не могут вызывать усиление или ослабление религиозной веры, которая держится на сокровенном знании. Эддингтон прибегает к смелому и неожиданному сравнению религиозного чувства и чувства юмора. Ведь есть люди, лишенные как одного, так и другого. И если мы начинаем анализировать причину смеха, то наверняка перестаем смеяться. В основе религиозного чувства лежат интуитивные убеждения.

Но интуиция лежит не только в основе религиозной мысли. Как показал еще Джон Локк, наше познание вообще становится возможным во многом благодаря интуиции. Даже в наиболее абстрактной и строгой науке — математике, утверждал А. Пуанкаре, новые результаты нельзя получить только при помощи логики — нужна еще и интуиция: логика доказывает, а интуиция творит. В полной мере это утверждение относится и к творчеству Эддингтона, озаряемому гениальными интуитивными догадками. Его, как А. Пуанкаре и А. Бергсона, можно рассматривать провозвестником интуитивизма Л. Брауэра.

Интуитивное чувство веры лежит, по Эддингтону, и в основе научного познания: "Отказ от веры не несовместим с обладанием жизненной веры. Мы не имеем верований в науке, но мы не равнодушны к нашим религиозным чувствам. Вера не состоит в уверенности в том, что все знание о Вселенной, которое мы с таким энтузиазмом собрали, будет продолжать жить и в литературе; а в уверенности, что мы находимся на правильном пути. Если наши так называемые факты являются

изменчивыми тенями (в платоновском смысле. – А.К.), то они являются тенями, отбрасываемыми от света постоянно существующей истины. Такая уверенность, надо думать, очень сильно отличается от самоуверенности" [115].

По Эддингтону, проблема научного мира является частью более широкой проблемы – проблемы общего опыта. Опыт рассматривается как взаимодействие субъекта и окружения (внешнего мира. – А.К.) и сама жизнь, религия, знание, истина рассматриваются в этой связи. Эддингтон не сомневается, что спиритуалистический мир отчасти иллюзорен, но в нем также живет человек, как и в том мире, информацию о котором ему доставляют его органы чувств. Веру в этот мир Эддингтон считает даже менее догматичной, чем та, которую требует теология. Он приходит к выводу о взаимообусловленности сознания и мира: "Но нельзя будет получить полного представления о мире до тех пор, пока мы будем отделять наше сознание от мира, частью которого оно является" [111, с. 330]. В этом тезисе Эддингтона как бы в неявном виде выражен антропный принцип: мы видим Вселенную такой, как она есть, потому что, будь она другой, нас бы не было и мы бы не могли ее наблюдать.

Далее Эддингтон более ясно выразил свою позицию: "... мы возвращаем сознание на главное место, вместо представления о нем как о несущественном усложнении, случайно найденном в среде неорганической природы на последней стадии эволюционного развития" [111, с. 332]. Действительно, суть "слабого" антропного принципа в том, что наше положение во Вселенной с необходимостью является привилегированным в том смысле, что оно должно быть совместимо с нашим существованием в качестве наблюдателей. Но при иных значениях фундаментальных физических констант и параметров Вселенной жизнь во Вселенной не могла бы существовать. Наше сознание и жизнь как бы настроены на современные значения этих констант.

"Сильный" антропный принцип прямо утверждает, что Вселенная (и, следовательно, фундаментальные константы) должна быть такой, чтобы в ней на некотором этапе эволюции допускалось существование наблюдателей. Последнее утверждение близко к взглядам Дж. Джинса, полагавшего телеологическое содержание в акте творения, т.е. считавшего, что мир был создан таким, чтобы в нем мог развиваться человеческий разум. Но Эддингтон, признавая существование невидимого трансцендентного мира, не был креационистом. «С философской точки зрения, – писал он, – идея внезапного возникновения современного порядка природы антипатична мне, так как, я думаю, она не должна быть слишком крайней, и каждый из тех, кто приветствовал бы доказательство вмешательства творца, вероятно, согласится, что однократный "завод часов" в некоторую отдаленную эпоху действительно не представляет собой того типа отношений между Богом и его миром, которые приносили бы удовлетворение мысли» [156, с. 71].

И действительно, в настоящее время креационистская концепция подвергается критике даже с точки зрения формальной логики. Ведь,

если Бог сотворил мир, то кто сотворил Бога, и если Бог создал сам себя, то почему мир так же не мог сотворить себя сам? Но может быть Бог существует вне времени и пространства, и что в этом случае может означать понятие существования? Эддингтон склоняется к тому, что: "Мы выстроили спиритуалистический мир и мир символов взятыми из нашей собственной личности, так же как мы выстроили научный мир из метрических символов математики". И продолжает: "Идея всеобщего Духа, или Логоса, могла бы быть, я думаю, весьма убедительно выведена из современного состояния научной теории: по крайней мере она находится в гармонии с ней" [111, с. 337–338]. Но в то же время, Эддингтон понимал, что в его эпоху наука находилась на самых первых ступенях длинной лестницы познания макро- и микромира, поэтому большие изменения в научных представлениях неизбежны. В стремлении к познанию истины, полагал Эддингтон, заключен высший интеллектуальный импульс человечества, и оно реализует его различными способами. Об этой истине, понимаемой им как откровение, Эддингтон сказал пророческие слова: "Чем больше она изменяется, тем больше остается той же самой" [111, с. 353].

* * *

Представления Эддингтона, изложенные в "Природе физического мира", находят свое дальнейшее развитие и логическое завершение в "Философии физической науки" [177]. Уже в первой главе этой монографии – "Научная эпистемология", по определению автора, промежуточной области, лежащей между физикой и философией, – исследуется природа знания о физической Вселенной. Это утверждение перекликается с мыслью В. Гейзенберга, что на стыке физического эксперимента и математического формализма должна выступить подлинная философия (эпистемология). Эддингтон не находит необходимым дать общее определение знания, но "физическое знание" он определяет как форму описания мира. Особо им подчеркивается, что для развития таких физических теорий как релятивистская и квантовая, определенные эпистемологические установки становятся крайне необходимыми, являясь непосредственным источником далеко простирающихся научных концепций. Такими эпистемологическими установками следует считать принцип соответствия, принцип дополнительности, соотношение неопределенностей, космологический принцип, антропный принцип. Совершенно справедливо замечание Эддингтона о том, что реальной помощью в поисках знания является понимание природы знания, которое мы ищем.

Центральная глава – "Селективный субъективизм" – дает наиболее полное и стройное изложение оригинальной концепции автора. Эддингтон начинает ее с принципиального утверждения, что знания, которые не были или не могли быть получены из наблюдений, не могут быть приняты в физической науке. (Этот тезис практически разделяется всеми исследователями и служит, по сути, критерием научности, так что Эддингтон здесь лишь указывает свою позицию. Но далее он

делает интересные заключения.) Физическое знание можно описывать также в виде "гипотетических наблюдений", т.е. мысленных экспериментов, проводимых как бы в идеальных условиях. Но, если мы "кладем" наблюдения в базис физической науки и настаиваем, что ее положения должны проверяться наблюдениями, то мы налагаем селективный тест на знание, которое признается за физику. Короче говоря, что моя сеть не может поймать, то не рыба – резюмирует Эддингтон. Селекция субъективна потому, что она зависит от характера наших ощущений и интеллектуального запаса, определяющего пути приобретения экспериментального знания. Оно есть в этом смысле субъективно отобранное знание, и Вселенная нами так сконструирована, что в ней действуют обобщения физической науки – так называемые законы природы.

Эддингтон утверждает, что обобщения, достигаемые эпистемологическим рассмотрением, могут быть обоснованы лишь в той степени, в какой допускают опровержение на основе эмпирической проверки. Здесь он близок к критико-рационалистической эпистемологии К. Поппера, в которой ни одна теория не может быть верифицирована, а научными считаются лишь те теории, которые могут быть в принципе эмпирически опровержимы, т.е. фальсифицируемы. Но, по сути, и фаллибизм Поппера можно рассматривать как разновидность конвенционализма.

Большое внимание уделяет Эддингтон решению вопроса о соотношении теоретических и эмпирических предпосылок в естественнонаучном исследовании, в выяснении роли творческой активности исследователя в процессе познания. Если астроном наблюдает звезды, то эпистемолог наблюдает за наблюдателем. Оба ищут знания, которые основаны на наблюдениях. Эддингтон называет знания о Вселенной, полученные при исследовании результатов наблюдений, а *posteriori* знаниями, и знания, полученные из эпистемологических исследований процедуры наблюдений, а *priori* знаниями.

Эддингтон критикует один из основных принципов эмпиризма, реализма и позитивизма, гласящий, что мы не можем иметь априорных знаний о Вселенной. Здесь под Вселенной понимается "объективная Вселенная", т.е. существующая вне и независимо от воспринимающего субъекта. Эддингтон приводит логически безупречное возражение: "Если мы не можем иметь априорных знаний о Вселенной, мы не можем априори знать, что она объективна, и поэтому мы не можем априори знать, что мы не можем иметь априорных знаний о ней" [177, с. 25–26].

Эддингтон подчеркивал, что разрабатываемое им направление "селективный субъективизм" не является прямым продолжением ни берклианского субъективизма, отрицающего объективность внешнего мира, ни кантовского априоризма с его абсолютизацией закона причинности. По его концепции, физическая Вселенная как не полностью субъективна, так и не полностью объективна, но главное – она также не является и их простой смесью. В конечном итоге это значит, что о

ней могут существовать осмысленные положения, которые нельзя объективировать.

Нельзя возразить Эддингтону в том, что наши выводы о Вселенной во многом определяются исходными гносеологическими установками. Эддингтон писал, что интеллект, "незнакомый с нашей Вселенной, но знакомый с системой мышления, при помощи которой человеческое сознание интерпретирует содержание своего чувственного опыта, был бы способен достигнуть всего физического знания, которое мы получили экспериментальным путем. Он не вывел бы отдельные события и объекты нашего опыта, но вывел бы те обобщения, которые мы получили, основываясь на них" [164, с. 327]. Поэтому можно считать резонным сравнение исследователя с Прокрустом, так как изучение мира имеет субъективный характер. Эддингтон полагает: "Все-таки я не думаю, что мы допускаем непозволительно вольное обращение со Вселенной, хотя и обходимся с ней по-прокрустовски" [164, с. 329]. Как пример теорий, построенных на основе общих эпистемологических соображений, Эддингтон приводит релятивистскую космологию и собственную "фундаментальную теорию".

Не без влияния эпистемологии Эддингтона развивали свои теории Дирак – объяснение безразмерных констант как функций возраста Вселенной, Иордан – линейной расширяющейся Вселенной с непрерывным возникновением материи, Бонди, Голд и Хойл – теорию стационарной Вселенной. Но наиболее яркое выражение эпистемология Эддингтона нашла в теории Милна. В нее не вводится никакого эмпирического элемента в виде локально проверяемых и выполняющихся "законов природы" вроде уравнений поля.

Точка зрения Эддингтона и Милна была подвергнута резкой критике сторонниками позитивизма. Видный представитель этой философии физик Г. Дингль рассматривал ее как возрождение аристотелевских традиций, в то время как научное позитивное знание является чисто экспериментальным, обосновывая свою критику ссылкой на галилеевский "переворот" [302]. Еще с работы П. Наторна "Галилей как философ" [353] стала распространенной позитивистская интерпретация творчества Галилея, в которой великий ученый объявлялся не только создателем новой методологии науки, но и новоевропейской философии, отказавшейся от всякой метафизики. Но Эддингтон и не отрицал своей особой позиции: «Имеют или нет мои взгляды что-либо общего с Аристотелем, все равно они являют определенный контраст с "галилеевскими" взглядами; и я чувствую огромное удовлетворение от того, что шокировал приверженцев этой последней школы» [171].

Эта точка зрения Эддингтона близка философии позднего периода творчества Э. Гуссерля, как раз в середине 30-х годов приступившего к работе над своей последней монографией "Кризис европейских наук и трансцендентальная феноменология" [332]. По его мнению, естествознание нового времени, начиная с Галилея, отделилось от философии и в конечном итоге превратилось в исследовательскую технику. Ведь с Галилея природа, понятая объективистски, является единственной ис-

тинной реальностью. Но объективизм, по Гуссерлю, элиминирует всякую субъективность, и поэтому математическое естествознание теряет связь с человеческой жизнью, ее смыслом и ценностями. Естествознание нового времени выступает могильщиком философии, полагает Гуссерль. Он писал: "Что может сказать наука о разуме и неразумии, о нас, людях, как субъектах свободы? Само собой разумеется, что простая наука о телах не может сказать об этом ничего, она ведь абстрагируется от всякой соотнесенности с субъектом" [332, с. 5].

Но самое интересное, что для преодоления кризиса естествознания, для установления утраченной связи науки с субъектом, Гуссерль вводит новое понятие "жизненный мир", которое в близком смысле ранее и независимо использовал под сходным названием "обыденный мир" и Эддингтон. И у Гуссерля, и у Эддингтона этот повседневный мир, в отличие от специально сконструированного и идеализированного научного мира, не создается искусственно, а дан непосредственно с полной очевидностью каждому человеку. Во-первых, жизненный мир отнесен к субъекту и, во-вторых, поэтому жизненный мир имеет телеологическую структуру. Очевидно, что Эддингтон также ввел этот обыденный мир субъекта в свою эпистемологию для осмысления научных понятий и принципов, как и Гуссерль в феноменологию. И совершенно ясно, что Эддингтон отчетливо понимал абстрактный, идеальный характер научного мира в отличие от тех, кто недооценивал значение исходной системы знаний, не понимая, что теоретическое знание не сводится к эмпирическому и не выводится посредством индукции. В известном смысле можно сказать, что Эддингтон и Гуссерль ввели "философский принцип дополнительности".

Эддингтон считал, что именно эпистемологический подход революционизировал физику: "это происходит путем непосредственного анализа знаний о системе, вместо анализа самой системы", – писал он [117, с. 53], считая, что именно это изменение метода ответственно за весь последний прогресс в науке. Действительно, копенгагенская интерпретация квантовой теории следует этому подходу, да и при разработке релятивистской концепции не обошлось без него. Но в конечном итоге Эддингтон приходит все же к слишком категоричному выводу: "все законы природы, которые обычно считаются фундаментальными, могут быть выведены из эпистемологических соображений. Они соответствуют априорному знанию и являются поэтому полностью субъективными" [177, с. 57].

Именно в этом пункте позиция Эддингтона подверглась критике не только профессиональными философами, но и многими выдающимися представителями физической науки. А. Эйнштейн в беседе с Мэрфи сказал: "Ни один физик не верит, что внешний мир является производным от сознания, иначе он не был бы физиком. Не верят в это и названные Вами физики (А. Эддингтон и Дж. Джинс. – А.К.)" [287, с. 163].

Зачисленный Эйнштейном в одну компанию с Эддингтоном Джинс

придерживался собственной философии "ментализма" и критиковал Эддингтона за априоризм. Он писал, что, если, как утверждает Эддингтон, из эпистемологических соображений можно показать, что масса протона в 1837 раз больше массы электрона, то тогда из тех же соображений можно было бы показать, что масса яблока в 1837 раз больше массы апельсина [336, с. 91]. Но и подобная критика с современной точки зрения может представляться слишком категоричной, если учесть общее эвристическое значение антропного принципа. С позиций последнего, утверждение Эддингтона о возможности эпистемологического вывода соотношения масс электрона и протона и других параметров для различных элементарных частиц не выглядит абсурдным. Исходя из положений инфляционной космологической модели, само наше существование в экспоненциально большой области Вселенной определяется эффективной размерностью пространства-времени и параметрами, характеризующими взаимодействие элементарных частиц. В других областях они могут быть и другими [263, с. 238].

Выдающийся русский естествоиспытатель и мыслитель В.И. Вернадский в своих "Размышлениях натуралиста" писал: "Время философии в будущем. Оно наступит тогда, когда философия переработает огромный, бурно растущий научный материал научно установленных фактов и научных эмпирических их обобщений, непрерывно увеличивающийся и современной философии уже в значительной мере чуждый. И как раз в переживаемый нами период такого роста научной творческой мысли оригинальная творческая работа в философии XX в. ослабла, несравнима по своей глубине и охвату с научным творчеством. Я понял это только в конце 30-х годов. До тех пор я тщетно пытался найти философский выход. Философия в старом виде едва ли может здесь нам дать что-нибудь. Недавняя попытка А. Эддингтона научной эпистемологии, может быть, даст нам здесь выход" [234, с. 65].

И В.И. Вернадский оказался прав. Все последующее развитие естествознания и философии показало, что как развитие науки испытывает влияние философской проработки проблем науки, так и развитие философии обеспечивается новыми достижениями конкретных наук [301]. Новая эпистемология – философия науки А. Эддингтона заняла в этом историческом процессе свое вполне определенное достойное место.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известный британский историк науки и астроном Герберт Дингль, автор официального некролога об Эддингтоне в журнале Лондонского Королевского общества, писал:

«Великие ученые, как правило, неподходящие персонажи для пространных биографий. Чаще всего причина состоит в том, что вся их жизнь посвящена работе. Они "растворяют" свой личный характер в великих обобщениях законов природы и становятся "подобно ангелам, свободными от всего личного". Блестящим примером этого является великий человек наших дней сэр Артур Эддингтон» [304, с. 117].

Это высказывание справедливо, однако, лишь отчасти. Дело в том, что изучение личности такого ученого, как Эддингтон, необходимо для понимания становления стиля и движущих сил научного прогресса. Душевный склад исследователя оказывает значительное, а подчас и определяющее влияние на его творчество. Особенно ярко это выражается в трудах естествоиспытателя и философа А. Эддингтона, научная биография которого становится историей и драмой идей, заблуждений и откровений.

ОСНОВНЫЕ ДАТЫ ЖИЗНИ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АРТУРА ЭДДИНГТОНА

- 1882, 28 декабря – родился в г. Кендал.
- 1893, сентябрь – поступление в Бринмелианскую школу в Вестоне.
- 1896, сентябрь – поступление в Оуэновский колледж в Манчестере.
- 1902, октябрь – поступление в Тринити-колледж Кембриджского университета.
- 1904 – занял первое место на экзаменах по математике ("математический трайпос") и получил звание "сеньора вранглера".
- 1905, июнь – присуждение степени бакалавра искусств Кембриджского университета.
- 1906, 18 – февраля – назначение на должность главного ассистента в Гринвичской астрономической обсерватории.
Апрель – избрание действительным членом Королевского астрономического общества.
Выход в свет первой научной работы "Систематические движения звезд".
Октябрь – избрание членом Тринити-колледжа.
- 1907, февраль – присуждение Смитсоновской премии. Избрание членом Клуба Королевского астрономического общества.
- 1909, февраль–март – участие в экспедиции на Мальту с целью уточнения координат геодезической станции.
Лето – участие в работе Британской ассоциации в Виннипеге (Канада).
- 1912 – назначение секретарем Королевского астрономического общества.
Сентябрь–октябрь – участие в экспедиции в Бразилию для наблюдения полного солнечного затмения 10 октября.
- 1913 – избрание на должность Плюмианского профессора астрономии Кембриджского университета.
Август – посещение Германии для участия в собрании "Солнечного союза" в Бонне и в собрании Астрономического общества в Гамбурге.
Сентябрь – избрание регистратором секции А на собрании Британской ассоциации в Бирмингеме.
- 1914–1944 – директор Обсерватории Кембриджского университета.
- 1914 – избрание членом Лондонского Королевского общества. Публикация первой монографии "Звездные движения и структура Вселенной".
- 1919, 29 мая – впервые наблюдение во время полного солнечного затмения отклонения звездных световых лучей, проходивших около солнечного диска, которое подтвердило справедливость общей теории относительности Эйнштейна.
Вручение приза Парижской академии.
- 1921–1923 – президент Королевского астрономического общества.
- 1923 – публикация монографии "Математическая теория относительности". Избрание иностранным членом-корреспондентом Российской академии наук.
- 1924 – награждение медалью им. К. Брюс Тихоокеанского астрономического общества, Золотой медалью Королевского астрономического общества, медалью им. Г. Дрэлпера Национальной академии наук США.
- 1925, июль – избрание на II конгрессе Международного астрономического союза его вице-президентом.
Избрание членом Лондонского научного клуба "Атенеум".

- 1926 – выход в свет фундаментальной монографии "Внутреннее строение звезд".
1927 – присуждение премии Хопкинса Кембриджского философского общества.
1928 – награждение медалью им. П.Ж.С. Жансена Парижской академии наук, Королевской медалью Лондонского Королевского общества.
1930 – возведение в рыцарское достоинство. Избрание президентом Физического общества и Математической ассоциации.
1936 – назначение секретарем по международным связям Королевского астрономического общества.
1938, июнь – награждение орденом Соединенного Королевства "За заслуги". Избрание президентом Международного астрономического союза.
1944, 22 ноября – скончался в госпитале в Кембридже.

ЛИТЕРАТУРА

Работы А. Эддингтона

1906

1. The systematic motions of the stars // MNRAS. Vol. 67.

1907

2. (With Sir William Christie and C.R. Davidson). The errors of a photographic reseau // MNRAS. Vol. 67.
3. On the mean distances of the Groombridge stars // Ibid. Vol. 68.

1908

4. On the mathematical theory of two star-drifts, and on the systematic motions of the zodiacal stars // MNRAS. Vol. 68.
5. On the proper motion of the stars (Schwarzschild's theory) // Observatory. Vol. 31.

1909

6. Note on Major MacMahon's paper on the determination of the apparent diameter of fixed star // MNRAS. Vol. 69.
7. Aberration considered in relation to two star-streams // Ibid.
8. Some recent results of astronomical research // Proc. Roy. Inst. Mar. 26.

1910

9. Note on Messrs Hough and Halm's paper on a spectroscopic determination of the stars // MNRAS. Vol. 70.
10. The envelopes of Comet Morehouse (1908c) // Ibid.
11. The systematic motions of the stars of Professor Boss's "Preliminary General Catalogue" // Ibid. Vol. 71.
12. Note on a moving cluster of stars of the Orion type in Perseus // Ibid.
13. Star streams // Scientia. Vol. 8.

1911

14. Discussion of the Greenwich reflex zenith-tube observations 1906–1909 // MNRAS. Vol. 71.
15. Stellar distribution and movements. Portsmouth.

1912

16. A determination of the frequency law of stellar motions // MNRAS. Vol. 72.

1913

17. Jean Henri Poincare (Obituary) // MNRAS. Vol. 73.
18. The distribution in space of the bright stars // Ibid.
19. On a formula for correcting statistics for the effects of a known error of observation // Ibid.
20. (With C.R. Davidson). Total eclipse of the Sun, 10 October 1912: Report on expedition to Passa Quatro, Minas Geraes, Brazil // Ibid.

21. Preliminary results of observations made with the Cookson floating zenith telescope at the Royal Observatory, Greenwich // Ibid.
22. The distribution of cometary orbits // Observatory. Vol. 36.
23. The distribution of the spectral classes of the stars // Ibid.

1914

24. Stellar movements and the structure of the Universe. L.: Macmillan.
25. The dynamics of a globular stellar system // MNRAS. Vol. 74.

1915

26. The dynamics of a globular stellar system: (Second Paper) // MNRAS. Vol. 75.
27. (With W.E. Hartley). A determination of the systematic motion of the stars from the radial velocities // Ibid.
28. Sundmann's researches on the problem of three bodies // Observatory. Vol. 38.
29. Gravitation // Ibid.
30. The relation between the velocities of stars and their brightness // Ibid.
31. The dynamics of a globular stellar system: (Third Paper). Oblate and other distributions // MNRAS. Vol. 76.
32. The movements of the stars // J. Trans. Victoria Inst. Vol. 48.
33. The stellar universe as a dynamical system // Scientia. Vol. 18.
34. Sir David Gill (Obituary) // MNRAS. Vol. 75; Ann. Smith. Rep. Publ. N 2403.

1916

35. C.F.J. Arthur Auwers (Obituary) // MNRAS. Vol. 76.
36. The kinetic energy of a star cluster // Ibid.
37. Introduction to H.W. Unthank's paper on the mean parallax of stars for different magnitudes // Ibid.
38. The distribution of stars in globular clusters // Ibid.
39. The future of international science // Observatory. Vol. 39.
40. Karl Schwarzschild // Ibid.

1917

41. On the radiative equilibrium of the stars // MNRAS. Vol. 77; Vol. 78; Vol. 79.
42. Further notes on the radiative equilibrium // Ibid. Vol. 77.
43. Einstein's theory of gravitation // Observatory. Vol. 40.
44. The pulsation theory of Cepheid variables // Ibid.
45. Karl Schwarzschild: (Obituary) // MNRAS. Vol. 77.
46. Derivation of Dr Cowell's integration formula // Observatory. Vol. 40.
47. Researches on globular clusters: (Review) // Ibid.
48. On astronomical consequences of the electrical theory of matter // Philos. Mag. Ser. VI. Vol. 34.

1918

49. Report on the relativity theory of gravitation. L.: Phys. Soc.
50. On the pulsations of a gaseous star and Cepheid variations // MNRAS. Vol. 79.
51. The conditions in the interior of a star // Astrophys. J. Vol. 48.
52. Gravitation and the principle of relativity: (Mathematical appendix) // Proc. Roy. Inst. Febr. 1.
53. The interior of a star // Scientia. Vol. 23.
54. On electrical theories of matter and their astronomical consequences, with special reference to the principle of relativity // Philos. Mag. Ser. VI. Vol. 35.
55. The dynamical problems of the stellar system // Observatory. Vol. 41.
56. Silberstein's paradox and Einstein's theory // Ibid.
57. Boundary difficulties of Einstein's theory // Ibid.
58. Cepheid variables and the age of stars // Ibid.
59. On the pulsations of a gaseous star, and the problem of the Cepheid variables. Pt I, II // MNRAS. Vol. 79; 1919. Vol. 79.

1919

- 60. (With J.W. Nicholson). Diffraction effects in occultations by planets // MNRAS. Vol. 79.
- 61. The sources of stellar energy // Observatory. Vol. 42.

1920

- 62. Space, time and gravitation, Cambridge. Пер. на фр., нем., исп., рус. яз.
- 63. The meaning of matter and the laws of nature according to the Theory of Relativity // Mind. Vol. 29.
- 64. Philosophical aspect of the Theory of Relativity // Ibid.
- 65. Radiation-pressure in solar phenomena // MNRAS. Vol. 80.
- 66. The internal constitution of the stars: (Presidential address, Section A, British Association, 1920) // Observatory. Vol. 43.
- 67. A determination of the deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of 29 May 1919 (With Sir Frank Dyson and C.R. Davidson) // Philos. Trans. A. Vol. 220; (With C.R. Davidson) // Mem. Roy. Astron. Soc. Vol. 62.
- 68. Report of the 88th Meeting of the British Association for the advancement of science. L.

1921

- 69. A generalization of Weyl's theory of the electromagnetic and gravitational fields // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 99.
- 70. On the relativity of field and matter // Philos. Mag. Ser. VI. Vol. 42.
- 71. On Dr Sheppard's method of reduction of error by linear compounding // Proc. London Math. Soc. A. Vol. 20.
- 72. Das Strahlungsgleichgewicht der Sterne // Ztschr. Phys. Bd. 7.
- 73. Dynamical equilibrium of the stellar system // Astron. Nachr. Jubilee number.

1922

- 74. On the significance of Einstein's gravitational equations in terms of the curvature of the world // Philos. Mag. Ser. VI. Vol. 43.
- 75. The propagation of gravitational waves // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 102.
- 76. The theory of relativity and its influence on scientific thought: (Romanes lecture). Oxford.
- 77. Presidential address on the award of the gold medal to Dr James Hopwood Jeans // MNRAS. Vol. 82.
- 78. Introductory address delivered on the occasion of the Society's centenary celebration // Ibid.
- 79. Majorana's experiments on gravitation // Astrophys. J. Vol. 56.
- 80. On the absorption of radiation inside a star // MNRAS. Vol. 83.

1923

- 81. Mathematical theory of relativity. Cambridge. Пер. на нем. и рус. яз.
- 82. The interior of a star // Proc. Roy. Inst. Febr. 23.
- 83. Can gravitation be explained? // Scientia. Vol. 33.
- 84. Applications of the theory of the stellar absorption-coefficient // MNRAS. Vol. 83.
- 85. (With A. Vibert Douglas). The progression of stellar velocity with absolute magnitude // Ibid.
- 86. Presidential address on the award of the gold medal to Professor Albert Abraham Michelson // Ibid.
- 87. The problem of electron-capture in the stars // Ibid.
- 88. On the spontaneous loss of energy of a spinning rod according to the relativity theory // Philos. Mag. Ser. VI. Vol. 46.
- 89. Rotascion absoluta // Rev. mat. hisp. amer.

1924

- 90. Mathematical theory of relativity. 2nd ed. Cambridge: Univ. press.
- 91. On the absorption of radiation inside a star: (Second Paper) // MNRAS. Vol. 84.
- 92. On the relation between the masses and luminosity of the stars // Ibid.
- 93. A comparison of Whitehead and Einstein's formula // Nature. Vol. 113.

1925

- 94. On the mass-luminosity relation: (A reply to Dr Jeans) // MNRAS. Vol. 85.
- 95. A limiting case in the theory of radiative equilibrium // Ibid.
- 96. Circulation currents in rotating stars // Observatory. Vol. 48.
- 97. On the derivation of Planck's law from Einstein's equation // Philos. Mag. Ser. VI. Vol. 50.
- 98. Electrostatic forces in a star and the deviation from the laws of a perfect gas // MNRAS. Vol. 86.
- 99. The domain of physical science // Science, religion and reality. L.: Macmillan.

1926

- 100. The internal constitution of the stars. Cambridge. Нем. изд. 1927 г. содержит некоторые добавления.
- 101. The reflection effect in eclipsing variables // MNRAS. Vol. 86.
- 102. Diffuse matter in interstellar space: (Bakerian lecture) // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 111.
- 103. The source of stellar energy // Nature. May 1.
- 104. The source of stellar energy // Observatory. May 15, suppl. N 2948.
- 105. Note on Dr Pocrowsky's proposal for determining the angular diameter of a star // MNRAS. Vol. 87.
- 106. On the analysis of the Cambridge proper motions // Ibid.

1927

- 107. Stars and atoms. Oxford. Пер. на фр., нем., ит., исп., дат., гол., фин., чеш., пол., рус., яп. яз.
- 108. Absolute rotation, Isaak Newton, 1642–1727. L.: Math. Assoc.
- 109. Theory of the outer layers of a pulsating star // MNRAS. Vol. 87.
- 110. The condition of emission of forbidden lines // Ibid. Vol. 88.

1928

- 111. The nature of the physical world. Cambridge. Пер. на фр., нем., ит., исп., швед., пол., евр., аргент., яп. яз.
- 112. The deviation of stellar material from a perfect gas // MNRAS. Vol. 88.
- 113. Sub-atomic energy: (Joule memorial lecture) // Proc. Manchester Lit. and Philos. Soc. Vol. 72.
- 114. A symmetrical treatment of the wave equation // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 121.

1929

- 115. Science and the unseen world: (Swarthmore lecture). L.: Allen and Unwin. Пер. на фр., нем., дат., гол. яз.
- 116. Einstein's field-theory // Nature. Vol. 123.
- 117. The new development of quantum mechanics // Ibid.
- 118. Engineering principles in the machinery of the stars: (Thomas Hawksley lecture) // Proc. Inst. Mech. Eng. Febr. 1.
- 119. The charge of an electron // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 122; Nature. Vol. 123.
- 120. The formation of absorption lines // MNRAS. Vol. 89.
- 121. Matter in interstellar space: (Broadcast National lecture, BBC). L.

1930

- 122. Internal circulation in rotating stars // MNRAS. Vol. 90.
- 123. (With S. Plakidis). Irregularities of period of long-period variable stars // Ibid.
- 124. The effect of boundary conditions on the equilibrium of a star // Ibid.
- 125. The effect of boundary conditions on the equilibrium of a star: (A reply) // Ibid.
- 126. On Professor Milne's treatment of the mass-luminosity problem // Ibid.
- 127. On the instability of Einstein's spherical world // Ibid.
- 128. The interaction of electric charges // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 126.

129. The rotation of the Galaxy: Halley lecture. Oxford. Repr. in: Annu. Rep. Smithsonian Inst. Wash., 1931.
130. Note on the masses of the electron, the proton and the Universe // Proc. Cambridge Philos. Soc. Vol. 27.
131. X-ray in the stars // Brit. J. Radiol. Vol. 3.
132. The opacity of extended stellar envelopes // MNRAS. Vol. 91.

1931

133. The expansion of the Universe // MNRAS. Vol. 91.
134. A theorem concerning incomplete polytropes // Ibid.
135. Upper limits to the central temperature and density of a star // Ibid.
136. The end of the world // Math. Gaz. Vol. 15.
137. Ultra-penetrating rays: (Discussion) // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 132.
138. The properties of wave tensors // Ibid. Vol. 133.
139. On the value of the cosmical constant // Ibid.
140. On the mass of the proton // Ibid. Vol. 134.
141. Two sets of anticommuting matrices // J. London Math. Soc. Vol. 7.
142. The recession of the extra-galactic nebulae // MNRAS. Vol. 92.
143. The end of the world: From the standpoint of mathematical physics // Nature. Vol. 127.

1932

144. Science and religion. L.: Macmillan.
145. The decline of determinism // Math. Gaz. Vol. 16. Repr. in // Smithsonian Rep. 1933; Nature. Vol. 129.
146. The expanding Universe // Proc. Roy. Inst. Jan. 22; Nature. Vol. 129.
147. The expanding Universe: (Presidential address) // Proc. Phys. Soc. Vol. 44, pt. 1. N 241.
148. Theory of electric charge // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 138.
149. The "Guillotine factor" in stellar opacity // MNRAS. Vol. 92.
150. The hydrogen content of the stars // Ibid.

1933

151. The expanding Universe. Cambridge. Пер. на фр., нем., гол., ит., пол. яз.
152. Upper limits to the central temperature and density of a star: (Second paper) // MNRAS. Vol. 83.
153. On sets of anticommuting matrices. II. Factorisation of E-numbers // J. London Math. Soc. Vol. 8.
154. Notes of the method of least squares // Proc. Phys. Soc. Vol. 45, pt. 2, N 247.

1934

155. The masses of the proton and electron // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 143.

1935

156. New pathways in science. Cambridge. Пер. на фр., нем., ит., пол., венг. яз.
157. The density of interstellar calcium and sodium // MNRAS. Vol. 95.
158. On "relativistic degeneracy" // Ibid. Vol. 95; Vol. 96.
159. The speed of recession of the galaxies // Ibid. Vol. 95.
160. The pressure of a degenerate electron gas and related problems // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 152.
161. The problem of A, B, C, and D // Math. Gaz. Vol. 19.
162. Meeting of the Royal Astronomical Society, 1935. January 11 // Observatory. Vol. 58.
163. Mem. Roy. Astr. Soc., 1935, March 8 // Observatory. Vol. 58.

1936

164. Relativity theory of protons and electrons. Cambridge.
165. The cosmical constant and the recession of the nebulae // Amer. J. Math. Vol. 59.

1937

- 166. The effect of red-shift on the magnitudes of nebulae // MNRAS. Vol. 97.
- 167. Interstellar matter // Observatory. Vol. 60.
- 168. Theory of scattering of protons by protons // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 162.
- 169. Constitution of the stars: (Harvard Tercentenary) // Smithsonian Rep. Wash. (D.C.).
- 170. The reign of relativity: (Haldane memorial lecture). L.
- 171. Physical science and philosophy // Nature. Vol. 139.
- 172. Deductive and inductive methods in science: A reply by Dr H. Diugle // Ibid.

1938

- 173. (With G.L. Clark). The problem of n bodies in general relativity theory // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 166.
- 174. Cosmological applications of the theory of quanta // New theories in physics: (Conference at Warsaw). Warsaw. Intern. Inst. of Intellectual Cooperation.
- 175. Forty years of astronomy // Background to modern science / Ed. J. Needham and W. Pagel. Cambridge: Univ. press.
- 176. Constitution of the stars // Annu. Rep. Smithsonian Inst. Wash. (D.C.): US gov. print. off.

1939

- 177. The philosophy of physical science. Cambridge. Пер. на ит. и исп.-амер. яз.
- 178. Star models with variable polytropic index // MNRAS. Vol. 99.
- 179. The hydrogen content of white dwarf stars in relation to stellar evolution // Ibid.
- 180. The "failure" of quantum theory at short ranges and high energies // Nature. Vol. 143.
- 181. Lorentz invariance in quantum theory // Proc. Cambridge Philos. Soc. Vol. 35.
- 182. The cosmological controversy // Sic. Progr. Vol. 34.

1940

- 183. The correction of statistics for accidental error // MNRAS. Vol. 100.
- 184. The physics of white dwarf matter // Ibid.
- 185. A new derivation of the quadratic equation for the masses of the proton and electron // Proc. Roy. Soc. London A. Vol. 174.
- 186. The masses of the neutron and mesotron // Ibid.
- 187. (With H.M. Thaxton). On the interaction potential in the scattering of protons by protons // Physica. Vol. 7.

1941

- 188. Group structure in physical science // Mind. Vol. 50.
- 189. Ionization equilibrium in a convective region // MNRAS. Vol. 101.
- 190. On the cause of Cepheid pulsation // Ibid.

1942

- 191. Conditions in the hydrogen convection zone // Ibid. Vol. 102.

1943

- 192. Dynamics of the stellar system // Nature. Vol. 151.
- 193. The combination of relativity theory and quantum theory // Commun. Dublin Inst. Adv. Stud. A. N 2.

1944

- 194. The recession-constant of the galaxies // MNRAS. Vol. 104.
- 195. The evolution of the cosmical number // Proc. Cambridge Philos. Soc. Vol. 40.

1946

- 196. Fundamental theory (posthumous). Cambridge.

Издания работ Э. Эддингтона на русском языке

197. Пространство, время и тяготение / Пер. с англ., примеч. и предисл. Ю.Г. Рабиновича. Одесса: Mathesis, 1923. VIII, 216 с. черт.
198. Звезды и атомы / Пер. с англ. С.И. Вавилова. М.; Л.: Госиздат, 1928. 152 с. (Новейшие течения науч. мысли).
199. Современное развитие космической физики / Пер. с англ. С.И. Вавилова. М.; Л.: Госиздат, 1928. 67 с. (Новейшие течения науч. мысли).
200. Относительность и кванты / Пер. с англ. С.П. Шубина; Под ред. Б.Н. Тессина. М.; Л., 1933.
201. Математическая теория относительности / Пер. с англ. Н.П. Сукачевой; Под ред. Д.Д. Иваненко. Харьков; Киев: ГНТИ Украины, 1933. 358 с.
202. Теория относительности / Пер. с англ. Л.Э. Гуревича, И.Ю. Нелидова и В.В. Соколовникова; Под ред. Д.Д. Иваненко. Л.; М.: ОНТИ, 1934. 508 с.
203. Дискуссия о возрасте Вселенной // Мироздание. 1935. Т. 24, № 5. С. 295–300.

Литература об А. Эддингтоне

204. Амбарцумян В.А. Артур Эддингтон // Творцы науки о звездах. Л.: Красная газ., 1930. С. 75–88.
205. Белопольский А., Иоффе А. Записка об ученых трудах А.С. Эддингтона // Изв. РАН. 1923. Т. 17, № 1/18. С. 319–321.
206. Биографический словарь деятелей естествознания и техники. М., 1959. Т. 2. С. 399.
207. Еремеева А.И. Выдающиеся астрономы мира: Рекомендательный указ. М.: Книга, 1966. С. 316–323.
208. Колчинский И.Г., Корсунь А.А., Родригес М.Г. Астрономы: Биограф. справ. Киев: Наук. думка, 1977. С. 385–387.
209. Мак-Крей У. Артур Стенли Эддингтон // В мире науки. 1991. № 8. С. 60–66.
210. Петрова Н.Н. Артур Стенли Эддингтон // Вопр. истории естествознания и техники. 1982. № 4. С. 140–146.
211. Храмов Ю.А. Физики: Биограф. справ. М.: Наука, 1983. С. 307.
212. Шкловский И.С. Размышления об Эддингтоне // Земля и Вселенная. 1983. № 5. С. 32–39.
213. Chapman S. Dictionary of national biography. 1941–1950. Oxford, 1959.
214. Chandrasekhar S. Eddington: The most distinguished astrophysicist of his time. Cambridge: Univ. press, 1983. 64 p.
215. Dictionary of scientific biography. N.Y., 1971. Vol. IV. P. 277–282.
216. Dingle H. Sir Arthur Eddington, OM, FRS // Obituary Notic. Proc. Phys. Soc. 1945. Vol. 57. P. 244–249.
217. Douglas A.V. Sir Arhur Eddington // Univ. Toronto Quart. 1945. Vol. 14, N 3.
218. Douglas A.V. The life of Arthur Stanley Eddington. L., 1956. 240 p.
219. Growther I.G. British scientists of the twentieth century. L., 1952.
220. Jones H.S., Whittaker E.T. Sir Arthur Eddington (1882–1944) // MNRAS. 1945. Vol. 105.
221. Kilminster C.W. Sir Arthur Eddington. L.: Pergamon press, 1966.
222. McCrea W.H., Temple G. Arthur Stanley Eddington // J. London Math. Soc. 1945. Vol. 20.
223. Plakidoy S., Kotsaki D., Epentai T.M. Eddington. Jeans. Miln. Athens, 1953. На греч. яз.
224. Plummer H.C. Arthur Stanley Eddington (1882–1944) // Obituary Notic. Fellows Roy. Soc. 1945. Vol. 5. N 14. P. 112–125.
225. Russell H.N. Arthur Stanley Eddington // Astrophys. J. 1945. Vol. 101. P. 133.

Использованная литература

226. Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Сб. ст. М.: Мир, 1979.
227. Арп. Х.К., Бербидж Дж. Происхождение и эволюция звезд. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 366 с.
228. Белые карлики. М.: Мир, 1975.

229. *Бисноватый-Коган Г.С.* Физические вопросы теории звездной эволюции. М.: Наука, 1989. 487 с.
230. *Блинные С.И.* Белые карлики. М.: Знание, 1977.
231. *Бронштэн В.А.* Гипотезы о звездах и Вселенной. М.: Наука, 1974.
232. Введение в супергравитацию / Под ред. С. Феррары, Дж. Тейлора. М.: Мир, 1985.
233. *Вейнберг С.* Гравитация и космология. М.: Мир, 1975.
234. *Вернадский В.И.* Размышления натуралиста. М.: Наука, 1975.
235. *Визгин В.П.* Единые теории поля в первой трети XX в. М.: Наука, 1985.
236. *Голсуорси Дж.* Собрание сочинений. М.: Правда, 1962. Т. 16.
237. *Горелик Ф.Е., Френкель В.Я.* Матвей Петрович Бронштейн. М.: Наука, 1990.
238. Гравитация и относительность / Сб. под ред. Х. Цзю, В. Гоффмана. М.: Мир, 1965.
239. *Девис П.* Случайная Вселенная. М.: Мир, 1985.
240. *Дирак П.А.М.* К созданию квантовой теории поля. М.: Наука, 1990.
241. *Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В.* Космология ранней Вселенной. М.: Изд-во МГУ, 1988.
242. *Жарков В.Н., Козенко А.В.* Крупнейший геофизик XX в. // Природа. 1991. № 4. С. 77–84.
243. *Жевакин С.А.* К теории цефеид I // Астрон. журн. 1953. Т. 30. С. 161.
244. *Жевакин С.А.* Теория пульсаций // Пульсирующие звезды. М.: Наука, 1970.
245. *Зельдович Я.Б., Новиков И.Д.* Строение и эволюция Вселенной. М.: Наука, 1975.
246. *Зельдович Я.Б., Блинные С.И., Шакура Н.И.* Физические основы строения и эволюции звезд. М.: Изд-во МГУ, 1981.
247. *Зоммерфельд А.* Пути познания в физике. М.: Наука, 1973.
248. *Каули Ч.* Теория звездных спектров. М.: Мир, 1974.
249. *Клейн Г.* Современная физика элементарных частиц. М.: Мир, 1990.
250. *Козенко А.В.* Джеймс Хопвуд Джинс. М.: Наука, 1985.
251. *Козенко А.В.* Генезис эддингтоновской модели звезды // Тез. конф. "История физики в Европе в XIX и XX вв." Коло, 1992.
252. *Козенко А.В.* О периодизации истории астрофизики // Вопр. истории естествознания и техники. 1993. № 3. С. 100.
253. *Козенко А.В.* Философия науки Артура Эддингтона // Вопр. философии. 1997. № 8.
254. *Козенко А.В., Потапова Л.В.* 250 лет теории фигуры Земли: Периодизация развития теории фигуры сжимаемой гравитирующей медленно вращающейся жидкости // На рубежах познания Вселенной. М.: ТОО "Янус", 1994. С. 13–31. (Ист.-астрон. исслед.; XXIV).
255. *Кокс Дж.* Теория звездных пульсаций. М.: Мир, 1983.
256. Космология: Теория и наблюдения / Под ред. Я.Б. Зельдовича, И.Д. Новикова. М.: Мир, 1978.
257. *Кун Т.* Структура научных революций. М.: Прогресс, 1975.
258. *Курвуазье Т.Ж.-Л., Робсон Я.* Квазар 3C273 // В мире науки. 1991. № 8. С. 14–22.
259. Курс астрофизики и звездной астрономии // Под ред. А.А. Михайлова. М.: Физматгиз, 1962. Т. 2.
260. *Лавринович К.К.* Фридрих Вильгельм Бессель. М.: Наука, 1989.
261. *Лакатос И.* История науки и ее рациональные реконструкции // Структура и развитие науки / Под ред. Б.С. Грязнова, В.Н. Садовского. М.: Прогресс, 1978.
262. *Ленг К.* Астрофизические формулы. М.: Мир, 1978.
263. *Линде А.Д.* Физика элементарных частиц и инфляционная космология. М.: Наука, 1990.
264. *Лихнерович А.* Теория относительности и математическая физика // Астрофизика, кванты и теория относительности. М.: Мир, 1982.
265. *Маршак С.* Собрание сочинений. М.: Правда, 1990. Т. 3.
266. *Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж.* Гравитация. М.: Мир, 1977. Т. 3.
267. *Морамарко М.* Масонство в прошлом и настоящем. М.: Прогресс, 1990.
268. *Новиков И.Д.* Об эволюции полузамкнутого мира // Астрон. журн. 1963. Т. 40. С. 772.
269. *Новиков И.Д., Фролов В.П.* Физика черных дыр. М.: Наука, 1986. 237 с.
270. *Пайс А.* Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. М.: Наука, 1989.

271. Паули В. Влияние архетипических представлений на формирование естественно-научных теорий Кеплера // Паули В. Физические очерки. М.: Наука, 1975.
272. Пиблс П.Дж.Э. Физическая космология. М.: Мир, 1975.
273. Пиблс Ф.Дж.Э. Структура Вселенной в больших масштабах. М.: Мир, 1983.
274. Пригожин И. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985.
275. Реклю Э. Британские острова. СПб., 1899. 424 с.
276. Стремгрен Э., Стремгрен Б. Астрономия. М.: Гостехтеоретиздат, 1941.
277. Строение звездных систем / Пер. под ред. П.Н. Холопова. М.: Изд-во иностр. лит., 1962.
278. Струве О., Зебергс В. Астрономия XX в. М.: Мир, 1968.
279. Тропп Э.А., Френкель В.Я., Чернин А.Д. Александр Александрович Фридман. М.: Наука, 1988.
280. Уайтхед А.Н. Избранные работы по философии. М.: Прогресс, 1990.
281. Унзольд А. Физика звездных атмосфер. М.: Изд-во иностр. лит., 1949.
282. Чандресекар С. О звездах, их эволюции и устойчивости // Успехи физ. наук. 1985. Т. 145, вып. 3. С. 489–506.
283. Шаров А.С., Новиков И.Д. Человек, открывший взрыв Вселенной. М.: Наука, 1989.
284. Шредингер Э. Пространственно-временная структура Вселенной. М.: Наука, 1986.
285. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. М.: Наука, 1965. Т. 1.
286. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. М.: Наука, 1966. Т. 2.
287. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. М.: Наука, 1967. Т. 4.
288. Adams W.S. The relativity displacement of spectral lines in the companion of Sirius // Proc. Nat. Acad. Sci. US. 1925. Vol. 11.
289. Astrophysics and twentieth-century astronomy to 1950 // The general history of astronomy / Ed. O. Gingerich. Cambridge: Univ. press, 1984. Vol. 4a. P. 73–89.
290. Bell E.T. The magic of numbers. N.Y.: McCraw-Hill, 1946.
291. Bethe H.A., Critchfield C.L. The formation of dentrons by proton combination // Phys. Rev. 1938. Vol. 54.
292. Bethe H.A. Energy production in stars // Ibid. 1939. Vol. 55.
293. Blaauw A. History of IAU: The birth and first half-century of the International Astronomical Union. Kluwer: Acad. publ., 1994.
294. Bondi H., Gold T. The steady-state theory of the expanding Universe // MNRAS. 1948. Vol. 108.
295. Born M. Experiment and theory in physics. Cambridge: Univ. press, 1943.
296. Brunt D. Problems of Cepheid variables // Observatory. 1913. Vol. 36.
297. Chandrasekhar S. The density of White Dwarf Stars // Philos. Mag. Ser. VII. 1931. Vol. 11, N 70.
298. Chandrasekhar S. The highly collapsed configurations of a stellar mass // MNRAS. 1935. Vol. 95.
299. Chandrasekhar S. The dynamics of stellar systems. I–VIII // Astrophys. J. 1939. Vol. 90, N 1.
300. Da Costa L.M. Complete catalogue of Eddington listings in the University Library Cambridge. Lisboa: Univ. Nova, 1988.
301. Davidson M. The stars and the mind: A study of the impact of astronomical development of human thought. L., 1947. X, 210 p., 8 pl.
302. Dingle H. Modern aristotelianism // Nature. 1937. Vol. 139, N 3528.
303. Dingle H. The sources of Eddington's philosophy. Cambridge, 1954.
304. Dingle H. Edmond Halley: His times and ours // Observatory. 1956. Vol. 76, N 839.
305. Dirac P.A.M. The quantum theory of the electron // Proc. Roy. Soc. London A. 1928. Vol. 117.
306. Dirac P.A.M. Cosmological constants // Nature. 1937. Vol. 139.
307. Einstein A. Letter to H. Weyl, June 6, 1922. (Princeton Archives Albert Einstein Foundation).
308. Einstein A. Letter to H. Weyl, May 23, 1923. (Princeton Archives Albert Einstein Foundation).
309. Einstein A. Letters to I. Rosenthal-Schneider, October 13, 1945 and March 24, 1950. (Princeton Archives Albert Einstein Foundation).

310. *Eisberg J.* Eddington's stellar models and early twentieth-century astrophysics: Ph.D. Thesis. Cambridge (Mass.): Harvard Univ., 1991.
311. *Emden R.* Gaskugeln. Leipzig: Teubner, 1907.
312. *Evershed J.* Einstein effect and eclipse of 1919 May 29 // *Observatory*. 1917. Vol. 40, N 515.
313. *Finkelstein D.* Past-future asymmetry of the gravitational field of a point particle // *Phys. Rev.* 1958. Vol. 110.
314. *Fowler A.* et al. Discussions of the theory of relativity // *MNRAS*. 1919. Vol. 80.
315. *Fowler R.H.* On dense matter // *Ibid.* 1926. Vol. 87.
316. *Friedmann A.* Über die Krümmung des Raumes // *Ztschr. Phys.* 1922. Bd. 10.
317. *The Friend.* 1930. Oct. 3. Газета.
318. *Gerasimovic B.* Cosmic clouds of calcium and sodium // *Nature*. 1924. Vol. 113.
319. *Gorman G.H.* Introducing quakers. L., 1981.
320. *Gowling T.G.* Development of the theory of stellar structure // *Quart. J. Roy. Astron. Soc.* 1966. Vol. 7.
321. *Graham L.* Between science and values. N.Y., 1981.
322. *Grunbaum A.* Philosophical problems of space and time. L.: Routledge and Kegan, 1964.
323. *Guicciardini N.* Gravitation and the stars // *J. Hist. Astron.* 1985. Vol. 16, N 3.
324. *Hertzsprung E.* Über die räumliche Verteilung der Veränderlichen vom der Cephei-Typus // *Astron. Nachr.* 1913. Bd. 196.
325. *Hessenberg G.* Vektorielle Begründung der Differential-geometrie // *Math. Ann.* 1916. Bd. 78.
326. History of the Royal Astronomical Society. L., 1987. Vol. 1, 2.
327. *Hoyle F.* A new model for the expanding Universe // *MNRAS*. 1948. Vol. 108; Vol. 109.
328. *Hayle F.* Highly condensed objects // *Quart. J. Roy. Astron. Soc.* 1968. Vol. 10.
329. *Hubble E.P.* A spiral nebula as a stellar system Messier 33(I) // *Astrophys. J.* 1926. Vol. 63.
330. *Hubble E.P.* A relation between distance and radial velocity among extra galactic nebula // *Proc. Nat. Acad. Sci. US*. 1929. Vol. 15.
331. *Hufbauer K.* Astronomers take up the stellar energy problem // *Hist. Stud. Phys. Sci.* 1981. Vol. 11.
332. *Husserl E.* Die Krisis der europäischen Wissenschaften und die transzendente Phänomenologie. Hamburg, 1977.
333. *Jeans J.* The evolution and radiation of gaseous stars // *MNRAS*. 1917. Vol. 78.
334. *Jeans J.* Meeting of the RAS, Friday, 1917, June 8 // *Observatory*. 1917. Vol. 40.
335. *Jeans J.* Stellar opacity and the atomic weight of stellar matter // *MNRAS*. 1926. Vol. 86.
336. *Jeans J.* Physics and philosophy. Cambridge, 1942.
337. *Jeans J.* The growth of physical science. Cambridge: Univ. press, 1947.
338. *Jeffreys H.* Epistemology and modern physics // *Philos. Mag. Ser. VII*. 1941. Vol. 32.
339. *Jones B.* Framason's guide and compendium. L., 1973.
340. *Kelvin, Lord (W. Thomson).* On the convective equilibrium of temperature in the atmosphere // *Math. and Phys. Pap.* 1862. Vol. 3.
341. *Kilmister C.W., Topper B.O.J.* Eddington's statistical theory. Oxford, 1962.
342. *Kramers H.A.* On the theory of X-ray absorbtion of the continuous X-ray spectrum // *Philos. Mag.* 1923. Vol. 46.
343. *Lamb C.* A quaker's meeting in the Essays of Elia. L.: Oxford Univ. press, 1946.
344. *Lane J.H.* On the theoretical temperature of the Sun, under the hypothesis of a gaseous mass maintaining its volume by its internal heat and depending on the laws of gases as known to terrestrial experiment // *Amer. J. Sci.* 1870. Vol. 50.
345. *Lemaitre G.* Un univers homogene de masse constante et de rayon croissant, redant compte de la vitesse radiale des nebuleuses extra-galactiques // *Ann. Soc. Sci. Bruxelles*. 1927. Vol. 47A; *MNRAS*. 1931. Vol. 91.
346. *Lemaitre G.* L'Univers en expansion // *Ann. Soc. Sci. Bruxelles*. 1933. Vol. 53A.
347. *Levi-Civita T.* Astronomical consequences of the relativistic two-body problem // *Amer. J. Math.* 1937. Vol. 59.
348. *Lind R.W.* Weyl's geometry and massive vector fields // *Gen. Relativity and Gravitation*. 1976. Vol. 7, N 4.
349. *Lorentz H.A.* Considerations sur la Pesanteur // *Proc. Konink. Acad. Amsterdam*. 1900. Vol. 8.

350. Meeting of the Royal Astronomical Society, 1917, January 11 // Observatory. 1918. Vol. 41.
351. *Merleau-Pouty J.* Philosophie et theorie physique chez Eddington Callimard. P., 1965.
352. *Milne E.A.* Last testament of a physicist // Nature. 1947. Vol. 159, N 4041.
353. *Natorp P.* Galilei as Philosopher // Philos. Monatsh. 1882. Bd. XVIII.
354. *Newman J.R.* Science and sensibility. Vol. 1. L.: Allen and Unwin, 1961.
355. *North J.D.* Measure of the Universe. Oxford, 1965.
356. *Payne-Gaposchkin C.* An autobiography and other recollection / Ed. K. Haramundanis. Cambridge: Univ. press, 1984.
357. *Pickering E.C.* Periods of 25 variable stars in the Small Magellanic Cloud // Harvard College Observatory Circular. Boston, 1912.
358. *Poincare A.* Electricité – sur la dynamique de l'électron // C.r. Acad. sci. 1905. Vol. 140.
359. Proceedings of the Sir Arthur Eddington centenary symposium. Vol. 1. Relativistic astrophysics and cosmology / Ed. V.D. Sabbata and T.M. Karade. Singapore: World Scientific, 1984.
360. Records of R.A.S. club (1925–1953) / Ed. G.J. Whitrow. L. P. XXIV–XXVII.
361. *Ritchie A.D.* Reflections of the philosophy of Sir Arthur Eddington. Cambridge, 1947.
362. *Ritter A. von.* Untersuchungen über die Höhe der Atmosphäre und die Konstitution gasförmiger Weltkörper // Ann. Phys. und Chem. 1880. Bd. 8; 1881. Bd. 13.
363. *Robert P.E.* The death of research programme: Kapteyn and Dutch Astronomical Community. Pt 3 // J. Hist. Astron. 1981. Vol. 12.
364. *Robert P.E. J.C.* Kapteyn and early twentieth-century Universe. Pt 2 // J. Hist. Astron. 1986. Vol. 17.
365. *Robertson H.P.* On relativistic cosmology // Philos. Mag. 1928. Vol. 5.
366. *Rosenthal-Schneider I.* Reality and scientific truth. Wayne: State Univ. press, 1980.
367. *Russell H.N.* On the composition of the Sun's atmosphere // Astrophys. J. 1929. Vol. 70.
368. *Saha M.N.* Ionization in the Solar chromosphere // Philos. Mag. 1920. Vol. 40.
369. *Sampson R.A.* On the rotation and mechanical state of the Sun // Mem. Roy. Astron. Soc. 1894. Vol. 51.
370. *Schwarzschild K. von.* Über das Gleichgewicht der Sonnenatmosphäre // Nachr. Ges. Gott. 1906. Bd. 195.
371. *Schwarzschild K.* Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie // S.-Ber. Akad. Wiss. 1916. Bd. 1.
372. *Seares F.H. J.C.* Kapteyn // Proc. Astron. Soc. Pacif. 1922. Vol. 34.
373. *Sahpley H.* On the nature and cause of Cepheid variation // Astrophys. J. 1914. Vol. 40.
374. *Sahpley H.* On the determination of the distances of globular clusters // Ibid. 1918. Vol. 48.
375. *Sahpley H., Curtis H.D.* The scale of the Universe // Bull. Nat. Res. Council. 1921. Vol. 2.
376. *Silberstein L.* General relativity without the equivalence hypothesis // Philos. Mag. 1918. Vol. 36.
377. *De Sitter W.* Space, time and gravitation // Observatory. 1916. Vol. 39.
378. *De Sitter W.* On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. I // MNRAS. 1916. Vol. 76.
379. *De Sitter W.* On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. II // Ibid. 1917. Vol. 77.
380. *De Sitter W.* On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. III // Ibid. Vol. 78.
381. *De Sitter W.* On the expanding Universe and the time-scale // Ibid. 1933. Vol. 93.
382. *Slater N.B.* The development and meaning of Eddington's fundamental theory. Cambridge: Univ. press, 1957.
383. *Smith R.* The expanding Universe: Astronomy's "Great Debate", 1900–1931. Cambridge: Univ. press, 1982.
384. The philosophy of Rudolf Carnap: Open court. LaSalle, 1963.
385. *Thorne K.* Gravitational radiation: "300 years of gravitation". Cambridge: Univ. press, 1987.
386. *Unno W., Koudo M.* The Eddington approximation generalized for radiative transfer in spherically symmetric systems I and II // Publ. Astron. Soc. Jap. 1976. Vol. 28; 1977. Vol. 29.
387. *De Vorkin D.H. (with Kenat R.).* Quantum physics and the stars (I). The establishment of stellar temperature scale // J. Hist. Astron. 1983. Vol. 14, pt 2.

388. *De Vorkin D.H. (with Kenat R.). Quantum physics and the stars (II). Henry Norris Russell and the abundances of the elements in the atmospheres of the Sun and Stars // J. Hist. Astron. 1983. Vol. 14, pt 3.*
389. *Waterfield R.L. A hundred years of astronomy. L.: Duckworth, 1938.*
390. *Weizsacker C.F. Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne I // Phys. J. 1937. Bd. 38.*
391. *Weizsacker C.F. Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne I // Ibid. 1938. Bd. 39.*
392. *Weyl H. Gravitation und Elektrizität // S.-Ber. Berlin. Akad. 1918.*
393. *Weyl H. Eine neue Erweiterung der Relativitätstheorie // Ann. Phys. 1919. Bd. 59.*
394. *Weyl H. Zur allgemeinen Relativitätstheorie // Phys. Ztschr. 1923. Bd. 24.*
395. *Weyl H. 50 Jahre Relativitätstheorie // Weyl H. Gesammelte Abhandlungen. B. etc.: Springer, 1968. Bd. 4.*
396. *Whittaker E.T. Publications: The relativity theory of protons on electrons // Observatory. 1937. Vol. 60.*
397. *Whittaker E.T. From Euclid to Eddington. Cambridge: Univ. press, 1949.*
398. *Whittaker E.T. Eddington's principle in the philosophy of science: Cambridge Eddington's memorial lecture. Cambridge: Univ. press, 1951.*
399. *Wilson D.B. On the importance of eliminating science and religion from the history of science and religion: The cases of J.H. Jeans and A.S. Eddington // Bull. Amer. Astron. Soc. 1993. Vol. 25, N 3.*
400. *Yolton J.W. The philosophy of science of A.S. Eddington. The Hague: Nijhoff, 1960.*
401. *Zeipel H. von. The radiative equilibrium of a slightly oblate rotating star // MNRAS. 1924. Vol. 84.*

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Адамс У.С. 34, 63, 65
Аристотель 112
Артур, король 9
Архимед 88
Аткинсон 24
Ауверс А.Ю.Г.Ф. 22
Аудленд Дж. 7

Бальфур А.Дж., граф 18
Барнес Е.В. 15, 18
Белобжецкий
Бергсон А. 108
Бессель Ф.В. 63
Бете Х.А. 70
Биван П.В. 14
Биддер А.Н. 39
Блейк У. 97
Блинников С.И. 6
Болл Р., сэр 11, 26
Болл Роус 18–20
Бонди Г., сэр 6, 112
Бор Н. 85, 96, 107
Борн М. 41, 45, 66, 88
Браге Т. 11
Брауэр Л. 108
Бриджмен П.У. 101
Брокингтон А. 96
Бронштейн М.П.
Брэгг У.Г. 41

Вагнер Р. 24
Вайцзеккер К.Ф. фон 70
Вейль Г. 45, 85–88, 92
Вернадский В.И. 114
Визгин В.П. 6, 85, 86
Вильсон Д. 96
Вудхаус П.Г. 36
Вульфсон М. 6

Галилей Г. 112
Гамов Г.А. 70
Гаудсмит С. 82
Гейзенберг В. 96, 103, 110
Генрих VIII, король Англии 7
Георг V, король Англии 43
Герман Р.А. 15
Герцшпрунг Э. 52, 53, 61, пр. 1

Гершель В., сэр 74
Гете И.В. 13
Гилл Д., сэр 20, 21, 22
Гильберт У. 85
Гингерич О. 6, 54
Глазенап С.П. 40
Говард С.Г. 29
Голд Т. 112
Голсуорси Дж. 45
Гомер 13
Гоффман Б. 81
Грехем Дж. 11
Грехем Л. 10
Гроувер И.Дж. 11, 41, 48
Гуно Ш. 14
Гурштейн А.А. 6
Гуссерль Э. 112, 113

Дайсон Ф., сэр 23, 29–31
Данте А. 13
Дарвин Дж.Г., сэр 26, 51, 55, 61
Дарвин Ч. 26
Джеффрис Б., леди 5, 6
Джеффрис Г., сэр 33, 88, 105
Джинс Дж.Х., сэр 5, 14, 15, 18, 26, 33, 36, 38, 42, 47, 51, 53, 55–58, 60, 61, 68, 69, 74, 88, 93, 102, 104, 109, 113, пр. 1

Джинс С., леди 5, 6
Джон А. 40
Джонс Н.С., сэр 22
Дизраэли Б. (лорд Биконсфильд) 16
Дингль Г. 112, 115
Дирак П.А.М. 37, 39, 81–83, 88, 89, 112
Дондер де 36
Дуглас А.В. 6, 24, 35, 36, 45
Дэвидсон К.Р. 24, 71

Жарков В.Н. 6

Зельдович Я.Б. 94
Зильберштейн Л. 32, 33, 59
Зоммерфельд А. 39, 65, 88

Идлис Г.М. 90
Ийтс Р. 24
Ийтс Э. 23, 24
Инфельд Л. 81
Иордан П. 112

Йитс У.Б.Ф. 22, 97

Камерон Дж.Ф. 14

Каптейн Я. 20, 21, 37, 71, 72, 74

Карнап 102

Картан Э. 86, 88

Картер Б. 90

Кельвин лорд (Томсон У.) 58

Кеплер И. 11

Кертис Г. 74–76

Кирхгоф Г. 98

Кларк А. 63, 81

Клиффорд У.К. 107

Ковелл П.Х. 19, 23

Коперник Н. 11, 94

Коттингем Е.Т. 30, 31

Крамерс Г. 62, пр. 1

Крези Э. 36

Кристи Г. 22, 71

Кристи У., сэр 19, 20, 22, 23

Критчфильд Ч. 70

Кромвель О. 8

Кроммелин Э.К. 31

Кун Т. 101

Курант Р. 45

Кэмм Дж. 7

Кэмпбелл-Баннерман Г., сэр 18, 19

Кэрролл Л. 14

Ланжевен П. 18, 41

Леметр Ж. 36, 80, 92

Ливитт Г. 52

Линдبلاد Б. 74

Линде А.Д. 91

Линдеман Ф.А. (лорд Черуэлл) 33, 60

Лион Р.К. де, барон 7

Литлтон Р.А. 6

Лихнерович А. 87

Ллойд Джордж Д., граф 14, 18, 19

Лодж О., сэр 33

Локк Дж. 108

Лоренц Г.А. 31, 32, 79

Лэйн Г. 58, пр. 1

Лэмб Х., сэр 11

Майорана Э. 84

МакКрей У., сэр 77

Мак-Магон 71

Максвелл Дж.К. 11, 17

Милн Э.А. 36, 39, 88, 112

Мильтон Дж. 13

Мольер Ж.-Б. 13

Морамарко М. 98, 100

Мук К. 24

Мэрфи 113

Нансен Ф. 10

Наторн П. 112

Никольсон Дж.У. 13

Новиков И.Д. 75, 81

Ньютон И., сэр 13, 32, 33, 35, 41

Омар Хайям 13

Оорт Я. 74

Пайс А. 30, 31, 81

Панет Ф.А. 69

Паули В. 64, 66, 82, 86, 99, 100

Пейн-Гапошкина С. 35

Пибло П. 92

Пикеринг Э. 52

Пикельнер С.П. 94

Планк М. 88

Пласкетт Дж.С. 77

Пол ван дер 31

Поппер К., сэр 111

Потапова Л.В. 6

Пригожин И. 105, 106

Пуанкаре А. 77, 79, 102, 108

Пэрр К., королева Англии 7

Пэрс Л.А. 39

Рассел Б. 15, 50, 51, 53, 54, 62, 66, 68

Резерфорд Э., лорд 18, 22, 40, 41, 85

Реклю Э. 9

Рис М., сэр 6

Риттер А. фон 54

Робертсон Г.П. 81, 92

Робертсон С. 47

Розенталь-Шнейдер И. 88

Рэлей Дж.У., лорд 11, 17

Саха М.Н. 58

Свисс 34

Сент-Джон Ч. 34

Си 58

Ситтер В. де 30, 32, 44, 93

Слайфер В.М. 75

Смарт 36

Солсбери Р.А.Т., маркиз 16

Стремгрен Б. 78

Стремгрен Э. 78

Стрэттон Ф.М. 13, 23

Сэмпсон Р.А. 58, пр. 1

Тернер Г.Х. 42

Тернер Дж. 29

Тиндалл А.М. 41

Томпсон Б. (граф Рамфорд) 22

Томсон Дж. Дж., сэр 17, 22, 33

Тривильон Г.М. 49

Тримбл К.Дж.А. 13, 24, 25, 49

Уайтхед А.Н. 15, 102, 103

Уатерфильд Р. 78

Уиттекер Э.Т., сэр 15, 20, 88

Уленбек Дж. 82

Фаулер А. 41
Фаулер Р.Х. 64
Ферми Э. 64
Фицджеральд Э. 14
Фишер К. 8, 9
Фокнер У. 11
Фокс Дж. 7
Франклин Дж. 11
Фрейндлих Э.Ф. 42
Франклин-Адамс 21
Фридман А.А. 87, 92

Хаббл Э.П. 75, 77, 91–93
Хогарт У. 25
Хойл Ф., сэр 68, 112
Холмс А. 92
Хопф Э.
Хэрлеч, лорд 48

Чандрасекар С. 14, 33, 65, 66, 73, 4
Чемберлен Дж. 16
Чепмен С. 23
Черчилль У., сэр 18

Шаров А.С. 75

Шварцшильд К. фон 5, 45, 57, 72, 86, пр. 1
Шейнер Ю. 75
Шекспир У. 13, 15
Шепли Х. 37, 52–55, 74, 75
Шеррингтон Ч.С. 40
Шкловский И.С. 6, 66
Шоут С.Э. (Эддингтон) 7, 9, 35
Шредингер Э. 96
Шустер А. 11

Эддингтон А.Г. 7–9
Эддингтон Дж. 49
Эддингтон Р. 9
Эддингтон У. 9, 27, 35, 43
Эдуард III, король Англии 7
Эдуард VII, король Англии 15
Эйнштейн А. 30–35, 42, 43, 66, 79, 81, 85–
88, 91, 92, 96, 113
Элиот Е.Дж. 13
Эмден Р. 57, 58, пр. 1
Эпштейн Дж. 34, 35
Эренфест П. 32
Эсклангон Э. 44

Юнг К.Г. 99, 100

КЛАССИЧЕСКИЕ И ЭДДИНГТОНОВСКИЕ МОДЕЛИ ЗВЕЗДЫ

Вышедшая в 1907 г. монография швейцарского астрофизика Роберта Эмдена называлась "Газовые шары" [311]. В ней подытоживались теоретические исследования по строению звезд к началу XX века. Название книги было выбрано не случайно. Газовый шар в отличие от звезды лишен источников энергии и находится в равновесии под действием силы тяжести и градиента давления. Говоря же о реальной звезде, необходимо учитывать излучение энергии, и ее строение определяется как ее газообразным состоянием, так и распределением в ней источников энергии и переносом энергии в газовой среде.

Уравнение состояния идеального газа:

$$PV = \mathcal{R}T, \quad (1)$$

где: V – удельный объем газа (на один моль), P – давление, T – температура, \mathcal{R} – газовая постоянная.

По первому началу термодинамики изменение тепловой энергии

$$dQ = dU + PdV, \quad (2)$$

и так как внутренняя энергия $U = U(T)$, то

$$dQ = \frac{dU}{dT} dT + PdV. \quad (3)$$

Легко видеть, что теплоемкость при постоянном объеме C_V будет равна

$$C_V = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_{V=\text{const}} = \frac{dU}{dT}, \quad (4)$$

а чтобы получить теплоемкость при постоянном давлении, продифференцируем (1):

$$PdV + VdP = \mathcal{R}dT. \quad (5)$$

Тогда, учитывая (5) и (3), получаем:

$$dQ = \left(\frac{dU}{dT} + \mathcal{R} \right) dT - VdP.$$

И окончательно:

$$C_P = \left(\frac{dQ}{dT} \right)_{P=\text{const}} = \frac{dU}{dT} + \mathcal{R}. \quad (6)$$

и

$$C_P - C_V = \mathcal{R}. \quad (7)$$

Обозначим γ отношение удельных теплоемкостей $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$, и так как из кинетической теории газов известно, что C_V не зависит от T , то $U = C_V T$ и, следовательно:

$$dQ = C_V dT + \frac{\mathcal{R}T}{V} dV. \quad (8)$$

Для адиабатических процессов принимается $dQ = 0$, тогда

$$C_V dT + \frac{\Re T}{V} dV = 0 \quad \text{или} \quad C_V \frac{dT}{T} + (C_P - C_V) \frac{dV}{V} = 0,$$

откуда

$$C_V \ln T + (C_P - C_V) \ln V = \text{const.}$$

Поэтому $TV^{\gamma-1} = \text{const}$, а учитывая (1), имеем

$$PV^{\gamma} = \text{const.} \quad (9)$$

При политропных процессах принимается $dQ \neq 0$. Пусть $\frac{dQ}{dT} = C = \text{const}$, тогда из (2) и (4)

$$(C_V - C)dT + PdV = 0, \text{ откуда } (C_V - C) \frac{dT}{T} + (C_P - C_V) \frac{dV}{V} = 0 \text{ и } T^{C_V - C} \cdot V^{C_P - C_V} = \text{const.}$$

Введя обозначение $\gamma' = \frac{C_P - C}{C_V - C}$, имеем $\gamma' - 1 = \frac{C_P - C_V}{C_V - C}$, и тогда

$$TV^{\gamma'-1} = \text{const} \quad \text{и} \quad PV^{\gamma'} = \text{const.} \quad (10)$$

Такое тело, в котором возможны только политропные изменения, называется политропной конфигурацией или просто политропой. Положим $n = \frac{1}{\gamma' - 1}$, n называется индексом политропии. Сравнивая (1) и (10), получаем для политропы $T \sim \rho^{1/n}$ и $P \sim \rho^{1+1/n}$, т.е.

$$P = K\rho^{1+1/n}. \quad (11)$$

Мы получили уравнение состояния политропы.

Вышеизложенная теория принадлежит крупнейшему английскому физiku XIX столетия Уильяму Томсону (лорду Кельвину), который развил ее в 1862 г. в работе, посвященной термодинамике земной атмосферы [340]. Он предложил называть среду находящейся в конвективном равновесии, если плотность и температура распределены в ней так, что поверхности равной плотности и температуры остаются неизменными в случае действия малых возмущений. Действительно, если выделенный малый объем в газовой среде изолировать так, чтобы не допускать его теплообмена с внешней средой, то при сжатии или расширении, по достижении иной плотности, и температуру он примет ту же, что и газовая среда с той же плотностью в соответствующей точке. Если теплообмен имеет постоянное значение, то изменения состояния газа также описываются простыми соотношениями. Выше они были приведены соответственно как для адиабатического (9), так и для политропного (11) случая. Для земной атмосферы принимался индекс политропы $n = 5/2$.

В 1870 г. американский исследователь Гомер Лейн уравнение политропы использовал для описания строения Солнца в работе под названием "О теоретической температуре Солнца при гипотезе газовой массы, сохраняющей свой объем при помощи внутреннего тепла и зависящей от газовых законов, известных из земных экспериментов" [344]. Справедливо полагая, что в недрах Солнца молекулы раздроблены на отдельные атомы (хотя в то время понятие о молекулах и атомах как их неделимых химически элементарных составляющих еще не были четко оформлены), Лейн определил индекс политропы $n = 3/2$. Им же была решена задача равновесия газового шара с уравнением состояния политропического вида и находящегося под действием собственной силы тяжести.

Для звезды в равновесном состоянии сила гравитационного притяжения, действующая на элемент массы dm , должна быть скомпенсирована равной по величине и противоположной по направлению силой. В рассматриваемом случае этой уравновешивающей силой является градиент давления вещества. Для жидкости, в которой давление однородно $P = \text{const}$, сила, действующая на замкнутую поверхность, $\vec{F} = 0$. Если же давление

неоднородно, то в малой окрестности некоторой точки можно записать разложение в ряд:

$$P = P_0 + \bar{r} \nabla P + \dots \quad (12)$$

Тогда с точностью до величины второго порядка малости на объем ΔV , ограниченный поверхностью dS , действует сила $d\vec{F}_p = -\nabla P dV$, так как $\vec{F} = -\int_S P d\vec{S}$. Но масса объема dV равна $dm = \rho dV$, и сила гравитационного притяжения $d\vec{F}_g = -\nabla \varphi dm$, где φ – потенциал гравитационного поля.

Для невращающейся звезды эти силы должны быть уравновешены

$$\nabla \varphi dm = -\nabla P dV \quad \text{или} \quad \frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla \varphi = 0.$$

Для сферически-симметричных звезд уравнение гидростатического равновесия

$$\frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} + \frac{Gm(r)}{r^2} = 0. \quad (13)$$

По определению

$$m(r) = \int_0^r 4\pi r^2 \rho dr. \quad (14)$$

Уравнение Пуассона

$$\Delta \varphi = 4\pi G \rho. \quad (15)$$

Или

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\varphi}{dr} \right) = 4\pi G \rho \quad (16)$$

и, учитывая (13), имеем

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(\frac{r^2}{\rho} \frac{dP}{dr} \right) = -4\pi G \rho. \quad (17)$$

* * *

Рассмотрим конфигурацию равновесия газового шара, для которого $P = K \rho^{1+\frac{1}{n}}$. Положим

$$\rho = \theta^n, \quad (18)$$

тогда

$$P = K \theta^{n+1}. \quad (19)$$

Подставляя (19) в уравнение Пуассона (17), получаем:

$$\left[\frac{(n+1)K}{4\pi G} \right] \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\theta}{dr} \right) = -\theta^n. \quad (20)$$

Уравнение (20) можно существенно упростить, введя новые переменные:

$$\xi = \frac{r}{\alpha}, \quad \alpha = \left[\frac{(n+1)K}{4\pi G} \right]^{1/2}. \quad (21)$$

Тогда уравнение (20) примет вид:

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left(\xi^2 \frac{d\theta}{d\xi} \right) = -\theta^n, \quad (22)$$

которое называется уравнением Эмдена [311]. Уравнение Эмдена решается при выборе естественных граничных условий: если плотность в центре $\rho_c = 1$, то

$$\theta = 1 \quad (\xi = 0) \quad (23)$$

и согласно (13)

$$\frac{d\theta}{d\xi} = 0 \quad (\xi = 0). \quad (24)$$

Решения уравнения Эмдена, удовлетворяющие вышеприведенным граничным условиям, называются функцией Эмдена индекса $n(\theta_n)$. Эмден получил таблицы $\theta_n(\xi)$ с большой точностью. Эти результаты сохраняют свое значение для качественных исследований до настоящего времени. Аналитические же решения можно получить только для $n = 0$, $n = 1$ и $n = 5$. Они имеют соответственно вид:

$$\theta_0 = 1 - \frac{1}{6} \xi^2, \quad (25)$$

$$\theta_1 = \frac{\sin \xi}{\xi} \quad \text{и} \quad (26)$$

$$\theta_5 = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{3} \xi^2\right)^{1/2}}. \quad (27)$$

Но для любых значений $0 < n < 5$ решение может быть проведено численным путем. Для этого разлагаем θ в степенной ряд вблизи начала координат ($\xi = 0$):

$$\theta = 1 + c\xi^2 + d\xi^4 + \dots \quad (28)$$

Подставляя (28) в (22), находим коэффициенты c и d . Общее решение имеет вид

$$\theta = 1 - \frac{1}{6} \xi^2 + \frac{n}{120} \xi^4 - \dots \quad (29)$$

Решение в случае $n = 0$ представляет решение для несжимаемой жидкости, так как в этом случае малые изменения ρ дают бесконечно большие изменения P . Для $n = 1$, в силу линейности задачи, радиус звезды не зависит от массы. Это свидетельствует о том, что в один объем можно равновесно вложить разное количество вещества. При увеличении массы будет расти только центральная плотность. И при $n = 5$ конечная масса звезды достигается только при ее радиусе, стремящемся к бесконечности, и для $n > 5$ решение уравнения Эмдена теряет физический смысл. А в случае $n = 3$, как мы ниже

увидим, наиболее интересном для физики звезд, $m = -4\pi \left[\frac{K}{\pi G} \right]^{3/2} \left(\xi^2 \frac{d\theta_3}{d\xi} \right)_\xi = \xi_1$, т.е. мас-

са политропного шара не зависит от центральной плотности, вернее, последняя не может быть задана массой конфигурации.

Рассматривая термодинамику звезды, для простоты ограничимся случаем химически однородной звезды. Если удельная тепловая энергия E известна как функция удельного объема $\nu = 1/\rho$ и удельной энтропии $E = E(\nu, S)$, то по первому закону термодинамики

$$dE = -P d\nu + T dS. \quad (30)$$

Нетрудно видеть, что тогда

$$P = - \left. \frac{\partial E}{\partial v} \right|_S; \quad T = - \left. \frac{\partial E}{\partial S} \right|_v. \quad (31)$$

При заданной температуре удобнее использовать свободную энергию системы $F = E - TS$, тогда

$$dF = -Pdv - SdT. \quad (32)$$

Но в проблеме устойчивости равновесной звезды необходимо знать $E(v, S)$, так как процессы в звезде настолько медленные, что пульсации происходят адиабатически, т.е. сохраняется энтропия, а не температура.

Как известно, энтальпия

$$H = E + Pv. \quad (33)$$

Поэтому $dH = TdS + v dP$, и если энтропия постоянна, то

$$dH|_S = v dP = \frac{dP}{\rho}. \quad (34)$$

С учетом (34) условие равновесия звезды (13) $\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla \phi = 0$ запишем в виде

$$\nabla(H + \phi) = 0. \quad (35)$$

Для изэнтропических звезд таким образом условие равновесия $H + \phi = \text{const}$ по всей звезде. На ее внешней границе $P = 0$, $\rho = 0$ и $H = 0$, поэтому $\text{const} = -\frac{GM}{R}$. Полная энергия звезды ϵ складывается из гравитационной энергии U и тепловой энергии Q :

$$Q + U = \epsilon = \int_0^M E(v, S) dm - G \int_0^M \frac{mdm}{r}. \quad (36)$$

С помощью вариационного принципа можно исследовать устойчивость системы [246]. Для этого надо найти условие, при котором вторая вариация энергии $\delta^2 \epsilon > 0$.

Предположим степенное уравнение состояния $P = K\rho^\gamma$. Тогда $E = \frac{K}{\gamma-1} \rho^{\gamma-1} = \frac{K}{\gamma-1} v^{-(\gamma-1)}$. В равновесии $\delta \epsilon = 0$ при произвольной $\delta r(m)$. Пусть $\delta r = \alpha r$, ($|\alpha| \ll 1$).

Такое возмущение описывает гомологическое расширение или сжатие звезды. Тогда $v' = (1 + 3\alpha)v$, $\delta U = -\alpha U$, $dQ = -3(\gamma-1)\alpha Q$. Поэтому $\delta \epsilon = -3(\gamma-1)\alpha Q - \alpha U = 0$. И окончательно

$$Q = -\frac{1}{3(\gamma-1)} U. \quad (37)$$

Выражение (37) и есть теорема вириала. Для одноатомного газа $\gamma = 5/3$ ($n = 3/2$): $Q = -U/2$ и $\epsilon = U/2 = -Q$. Теорему вириала можно получить непосредственно из уравнения равновесия (13). Умножая его на r , получаем $-\frac{r}{\rho} \frac{dP}{dr} = \frac{Gm}{r}$ и, интегрируя по m , имеем:

$$\int \frac{Gmdm}{r} = - \int \frac{r}{\rho} \frac{dP}{dr} dm = - \int \frac{r}{\rho} \frac{dP}{dr} 4\pi r^2 dr = 4\pi P r^3 \Big|_0^R + 3 \int P 4\pi r^2 dr = 3 \int P dV,$$

так как $-4\pi P r^3 \Big|_0^R = 0$ вследствие $P(R) = 0$. При степенном уравнении состояния

$P = (\gamma-1)E\rho$ получаем опять соотношение (37) $U = -3(\gamma-1)Q$. Или так как $\gamma = 1 + \frac{1}{n}$,

то $\frac{Q}{U} = -\frac{n}{3}$.

Интегрируя выражение для полной, гравитационной и тепловой энергий звезд для случая политропных шаров можно получить

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= -\frac{3-n}{5-n} \frac{GM^2}{R}, \\ U &= -\frac{3}{5-n} \frac{GM^2}{R}, \\ Q &= \frac{n}{5-n} \frac{GM^2}{R}. \end{aligned} \right\}. \quad (38)$$

Соотношение для потенциальной энергии в вышеприведенном виде получил еще в 1878 г. немецкий физик Август Риттер, доказавший теорему: "Если газовый шар однородно расширяется или сжимается, проходя через последовательность равновесных конфигураций, то вещество в каждой точке претерпевает политропные изменения, которые определяются показателем $n = 3$ " [362]. Он также установил, что для одноатомного газа при гравитационном сжатии звезды ровно половина освобождающейся энергии идет на разогрев ее недр, а другая половина излучается.

Рассмотрим случай политропной конфигурации с $n = 3$ более детально как наиболее интересный в астрофизических приложениях. Он осуществляется и в белых карликах, и гигантах с горячими недрами, в которых $P = \epsilon/3$ (ϵ – плотность энергии) или $P \sim \rho^{4/3}$. Однако этот случай имеет ряд не совсем удобных особенностей, которые, как мы увидим в дальнейшем, вызвали в свое время ожесточенные споры. Так теория для рассматриваемого уравнения состояния (при фиксированном K) при вполне определенной массе M оставляет не определенным радиус звезды R . Полная же энергия звезды $\epsilon = 0$, т.е. $U = -Q$. Действительно, при $\epsilon > 0$ система при малых возмущениях начнет разлетаться, а при $\epsilon < 0$ будет неограниченно сжиматься (так как ϵ стремится уменьшиться), что сразу видно из рассмотрения зависимости ϵ от r . Равновесие возможно только при $\epsilon = 0$ и для этого случая имеется одно определенное значение массы

$$M = \frac{4\mu^1}{\pi^{1/2}} \left(\frac{K}{G} \right)^{3/2}, \quad (39)$$

$$\text{где } R = \alpha \xi_1 \text{ и } \mu_1 = \int_0^{\xi_1} \theta^n \xi^2 d\xi.$$

Модель с $n = 3$ имеет три особенности: 1) равновесие возможно только при одном определенном значении массы (если K фиксированно); 2) полная энергия равна нулю; 3) радиус звезды может быть любым, т.е. равновесие безразличное.

* * *

Как мы уже отмечали, в большинстве ранних работ (особенно у Лэйна) предполагалось, что перенос энергии в звезде к внешним слоям осуществляется конвекцией. Современный подход к моделям звезд заложил Эддингтон, полагая, что перенос тепла в недрах звезд не может быть объяснен конвекцией, а происходит главным образом посредством излучения. Конвекция лучистого равновесия впервые выдвигалась еще в 1894 г. английским астрономом Р.А. Сэмпсоном [369], но не получила тогда адекватной теоретической разработки. О лучистом переносе энергии писал польский ученый Беломецкий в 1913 г. Эта концепция была детально разработана К. Шварцшильдом [370] для звездных атмосфер в 1906 г. Он показал, что энергия, которая переносится в атмосфере идущими вверх и вниз потоками, пренебрежимо мала по сравнению с энергией, которая переносится излучением.

В своей фундаментальной монографии "Внутреннее строение звезд" А. Эддингтон прямо пишет: "... наша задача состоит в том, чтобы применить тот же принцип к внутренним областям Солнца и звезд" [100, с. 9].

Во вступительной главе он формулирует основную цель исследования: "Мы изучаем внутреннее строение звезды не только из любопытства к необыкновенным условиям, господствующим в ее недрах. Механизм, управляющий недрами звезды, проявляется в ее внешних свойствах, в результате чего теория может быть проверена наблюдениями. По крайней мере именно эту цель мы преследуем..."

Каким образом T (температура) или, что эквивалентно, поток выходящего излучения определяется массой и радиусом звезды? Это центральная проблема всей книги" [100, с. 1].

Итак, рассмотрим построение стандартной модели звезды – первой звездной модели, построенной Эддингтоном. В этом случае в уравнении гидростатического равновесия (13) полное давление $P = P_g + P_r$, где P_g – газовое давление и P_r – давление излучения. Как следует из уравнения переноса излучения

$$\frac{dP_r}{dr} = -\frac{kp_h}{c}, \quad (40)$$

где h – поток излучения, k – коэффициент поглощения, рассчитанный на единицу массы, и c – скорость света. Если $\epsilon(r)$ – количество энергии, выделяемое единицей массы в единицу времени источниками энергии на расстоянии r от центра звезды, то полная энергия, выделяемая внутри сферы радиуса r , будет

$$L(r) = \int_0^r 4\pi r^2 \epsilon(r) \rho dr. \quad (41)$$

Предполагая лучеиспускание основным механизмом переноса энергии внутри звезды, имеем

$$L(r) = 4\pi r^2 h, \quad (42)$$

тогда уравнение (40) можно записать в виде

$$\frac{dP_r}{dr} = -\frac{kpL(r)}{4\pi cr^2}. \quad (43)$$

Тогда уравнение гидростатического равновесия (13) принимает вид

$$\frac{d(P_g + P_r)}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2} \rho. \quad (44)$$

Очевидно также, что

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho \quad (45)$$

и

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho \epsilon, \quad (46)$$

где (46) есть другая форма записи (42). Предполагается также, что в газовой звезде уравнение состояния вещества подчиняется закону Бойля–Мариотта, т.е. газ идеальный.

$$P_g = \frac{\Re}{\mu} \rho T, \quad (47)$$

где \Re – газовая постоянная, μ – молекулярный вес. Давление излучения определяется по соотношению

$$P_r = \frac{1}{3} a T^4, \quad (48)$$

где $a = 4\sigma/c$ и σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Модель газовой звезды с лучистым теплопереносом описывается четырьмя уравнениями: 1) гидростатического равновесия; 2) лучистого равновесия; 3) уравнение переноса энергии; 4) сохранения массы

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dr} \left(\frac{\mathfrak{H}}{\mu} \rho T + \frac{1}{3} a T^4 \right) &= - \frac{GM(r)}{r^2} \\ \frac{d}{dr} \frac{1}{3} a T^4 &= - \frac{kL(r)}{4\pi c r^2} \rho \\ \frac{dL(r)}{dr} &= 4\pi r^2 \rho \epsilon \\ \frac{dM(r)}{dr} &= 4\pi r^2 \rho \end{aligned} \right\}. \quad (49)$$

Решения системы (49) четырех уравнений для четырех неизвестных, T , $M(r)$ и $L(r)$ должны удовлетворять граничным условиям

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho_c, & T &= T_c, & M(r) &= 0, & L(r) &= 0 & \text{при} & r &= 0 \\ \rho &= 0, & T &= 0, & M(r) &= M, & L(r) &= L & \text{при} & r &= r_1 \end{aligned} \right\}, \quad (50)$$

где r_1 – радиус, M – масса, L – светимость звезды, а индекс c характеризует значение соответствующего параметра в центре звезды. Если ввести безразмерные параметры

$$\begin{aligned} T &= T_c \tau, & M(r) &= M \psi, & L(r) &= L \eta, \\ \rho &= \rho_c \sigma, & \epsilon &= \epsilon_c \epsilon', & k &= k_c \chi & \text{и} & r &= r_1 \alpha \xi, \end{aligned}$$

то система (49) сведется к уравнениям

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d\xi} \left(\sigma \tau + \frac{1-\beta_c}{\beta_c} \tau^4 \right) &= - \frac{\sigma \psi}{\xi^2} \\ \frac{d\tau^4}{d\xi} &= - \lambda_1 \frac{\chi \sigma \eta}{\xi^2} \\ \frac{d\psi}{d\xi} &= \lambda_2 \sigma \xi^2 \\ \frac{d\eta}{d\xi} &= \lambda_3 \sigma \epsilon' \xi^2 \end{aligned} \right\}, \quad (51)$$

где безразмерные параметры

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{GM}{\frac{\mathfrak{H}}{\mu} r_1 T_c}, & \lambda_1 &= \frac{k_c L}{4\pi c GM} \frac{\beta_c}{1-\beta_c}, \\ \lambda_2 &= \frac{4\pi G^3 M^2}{\left(\frac{\mathfrak{H}}{\mu}\right)^4} \frac{\beta_c}{1-\beta_c} \frac{1}{3} a, & \lambda_3 &= \frac{M}{L} \mu \epsilon_c \end{aligned} \right\}. \quad (52)$$

и

$$\frac{1-\beta_c}{\beta_c} = \frac{P_r}{P_g}.$$

Для решения уравнений (51) нужно знать зависимость χ и η от расстояния до центра звезды. Зависимость коэффициента поглощения от состава, плотности и температуры в настоящее время изучена достаточно удовлетворительно, а во времена Эддингтона рассчитывалась по теории Г. Крамерса [342], которая в своем первоначальном варианте приводила к резким расхождениям с данными астрономических наблюдений. Теоретическое значение было почти в 10 раз меньше наблюдаемого. Эддингтон в своей монографии называл это затруднение "мрачным облаком" на горизонте теории звезд. Ниже мы обсудим этот вопрос подробно.

Распределение источников энергии Эддингтон предложил считать равномерным так, что

$$k \frac{L(r)}{M(r)} = \text{const.} \quad (53)$$

Условие (53) характеризует стандартную модель Эддингтона. Это условие в безразмерных переменных примет вид $\frac{L}{M} k_c \frac{\chi \eta}{\psi} = \text{const}$, и, так как в центре ($r \rightarrow 0$) $\chi \rightarrow 1$,

а $\frac{\eta}{\psi} \rightarrow \epsilon_c \frac{M}{L}$, то $k_c \epsilon_c = \text{const}$ и условие (53) запишем как

$$\frac{\chi \eta}{\psi} = \text{const} = \epsilon_c / \epsilon_m, \quad (54)$$

где $\epsilon_m = \frac{L}{M}$ – средняя мощность источников энергии внутри звезды. Деля первое уравнение (51) на второе, получим с учетом (54) $d\left(\sigma\tau + \frac{1-\beta_c}{\beta_c}\tau^4\right) = \frac{\epsilon_m}{\epsilon_c} \frac{1}{\lambda_1} d\tau^4$, и, интегрируя

при граничных условиях $\sigma = 0$ и $\tau = 0$, на границе имеем

$$\sigma\epsilon + \frac{1-\beta_c}{\beta_c}\tau^4 = \frac{\epsilon_m}{\lambda_1 \epsilon_c} \tau^4, \quad (55)$$

но в силу граничных условий в центре $\sigma = 1$ и $\tau = 1$, следовательно

$$\lambda_1 = \beta_c \frac{\epsilon_m}{\epsilon_c}, \quad (56)$$

и, учитывая соотношение для λ_1 (52), получим

$$1 - \beta_c = \frac{k_c \epsilon_c}{4\pi c G}, \quad (57)$$

и уравнение (55) принимает вид $\sigma = \tau^3$, а первое уравнение системы (51) – вид

$$\frac{4}{\beta_c} \frac{d\tau}{d\xi} = -\frac{\psi}{\xi^2}. \quad (58)$$

Подставляя ψ из (58) в третье уравнение системы (51), получаем

$$\frac{1}{\xi^2} \frac{d}{d\xi} \left(\xi^2 \frac{d\tau}{d\xi} \right) = -\frac{\lambda_2 \beta_c}{4} \tau^3. \quad (59)$$

Если ввести новую переменную

$$\eta = \sqrt{\frac{\lambda_2 \beta_c}{4}} \xi, \quad (60)$$

то уравнение (59) примет вид

$$\frac{1}{\eta^2} \frac{d}{d\eta} \left(\eta^2 \frac{d\tau}{d\eta} \right) = -\tau^3. \quad (61)$$

Но уравнение (61) есть уравнение Эмдена с индексом политропы $n = 3$. Решения уравнения Эмдена хорошо известны и существуют при любом n в пределах $0 \leq n \leq 5$ и характеризуются строго определенными для данного n значениями η_1 и $\left(\frac{d\tau}{d\eta} \right)_{\eta_1}$.

Для

$$n = 3 \quad \eta_1 = 6.897, \quad \omega_0 \equiv \eta_1^2 \left(\frac{d\tau}{d\eta} \right)_{\eta_1} = -2.018. \quad (62)$$

Эти условия определяют также a и λ_2 . На границе $\psi = 1$, но из (58) и (60) получаем

$$\psi = -\frac{4}{\beta_c} \xi^2 \frac{d\tau}{d\xi} = -\left(\frac{4}{\beta_c} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}} \eta^2 \frac{d\tau}{d\eta},$$

и так как

$$\psi = 1 \quad \text{при} \quad \eta = \eta_1 \quad \lambda_2 = \left(\frac{4}{\beta_c} \right)_{\eta_1}^3 \omega_0^2, \quad (63)$$

или согласно определению λ_2 (52)

$$1 - \beta_c = \frac{1}{4^3 \omega_0^2} \frac{4\pi G^3 a}{3\eta_1^4} \mu^4 \beta_c^4 M^2. \quad (64)$$

Это и есть уравнение Эддингтона 4-й степени, определяющее β_c по массе M и молекулярному весу μ . Условие $\eta = \eta_1$ (62) на границе $\xi = \frac{1}{\alpha}$ позволяет получить из (60)

$$a = \frac{1}{\eta_1} \sqrt{\frac{\lambda_2 \beta_c}{4}} = \frac{\omega_0}{\eta_1} \frac{4}{\beta_c}. \quad (65)$$

И если учесть (63) и граничное условие $\xi = \frac{1}{\alpha}$, то вместо (65) получим

$$T_c = \frac{\eta_1}{4\omega_0} \beta_c \mu \frac{GM}{\Re \eta_1}, \quad (66)$$

соотношение, определяющее температуру в центре звезды в модели Эддингтона. Плотность в центре определяется соотношением

$$\frac{\Re}{\mu} \rho_c = \frac{\beta_c}{1 - \beta_c} \frac{1}{3} a T_c^3. \quad (67)$$

Таким образом, вместо четырех условий получено три (57), (64) и (66). Параметр λ_3 остался неопределенным, так как в теории Эддингтона отсутствует физический механизм выделения энергии. В случае равномерного распределения источников энергии $\epsilon_c = \epsilon_m = \frac{L}{M}$ условие (57) примет вид

$$1 - \beta_c = \frac{k_c L}{4\pi c G M}, \quad (68)$$

и тогда условие (64) становится искомым соотношением между массой и светимостью звезды, если k_c известно. Действительно, из (64) и (68) следует, что $L \sim M^3$. Это теоретическое соотношение масса-светимость было первоначально получено Эддингтоном и потом уже подтверждено наблюдениями. Так, в 1919 г. Э. Герцшпрунг установил $L \sim M^{10/3}$ [324].

Для того, чтобы определить значение неизвестных параметров, Эддингтон поступает следующим образом. Определяется для одной из звезд с хорошо известной массой, например Капеллы, величина $1 - \beta_c$ из уравнения (64), принимая $\mu = 2$. Затем по известной светимости из соотношения (68) находится параметр k_c и это значение принимается одинаковым для всех звезд главной последовательности. По найденным значениям составляется теоретическая зависимость масса-светимость. Эта зависимость хорошо согласуется с наблюдаемой зависимостью для звезд главной последовательности и красных гигантов. Однако, как мы уже выше отмечали, если подсчитать коэффициент поглощения k_c по соотношениям (66) и (67), которые дает теория для T_c и ρ_c и количественной теории непрозрачности Крамерса $k_c \sim \frac{\rho_c}{T_c^2}$, теоретическая величина

оказывается в 10–20 раз меньше наблюдаемого значения.

Подобное расхождение возникло из-за того, что при оценке среднего атомного веса Эддингтон допустил ошибку. Хотя он и справедливо предполагал, что высокая температура стирает различия между атомными весами различного состава смеси химических элементов вследствие ионизации. В своей монографии он даже приводит таблицу среднего атомного веса полностью ионизованного элемента $\mu = \frac{A}{Z+1}$, где A – атомный вес, Z – число электронов в атоме.

Средний атомный вес

Элемент	A	μ	Элемент	A	μ
Водород	1	0.50	Железо	56	2.07
Гелий	4	1.33	Серебро	108	2.25
Литий	7	1.75	Барий	137	2.40
Кислород	16	1.78	Золото	197	2.46
Кальций	40	1.97	Уран	238	2.56

Эддингтон принял для вещества звезд "средний атомный вес" 2.2, но сделал одну оговорку: "там нет слишком больших относительных количеств водорода" [198, с. 29]. Но именно в этом и заключалась "роковая ошибка" Эддингтона. До появления работы Рассела [367] в 1929 г. большинство исследователей, в том числе и Эддингтон, вычисляя непрозрачность и средний вес частиц для каждого слоя звезды, не предполагали, что она почти целиком состоит из водорода. В действительности для водорода $\mu = 0.50$ и гелия $\mu = 1.33$ при полной ионизации вещества. Для определения среднего значения μ необходимо задаться процентным содержанием водорода (X), гелия (Y) и всех других более тяжелых элементов (Z). Как установлено к настоящему времени, z различно у звезд разных населений, но $z \leq 0.04$. Поэтому среднее значение μ зависит главным образом от относительного содержания водорода x и гелия y . (Сейчас мы знаем также, что в процессе эволюции звезды водород в ней превращается в гелий). Молекулярный вес звездного вещества, как правило, меняется в пределах от 0.5 до 1.3. У звезд средней части главной последовательности, к которым принадлежит и Солнце, $\mu \approx 0.6$. Таким образом, в настоящее время получила разрешение проблема, которую Эддингтон назвал в своей фундаментальной монографии "мрачным облаком" на горизонте теории звезд.

Но тогда, в середине 20-х годов, когда еще не был дан ответ на вопрос об источниках энергии звезд, эта проблема была далека от однозначного решения. Так Дж. Джинс видел в большой величине непрозрачности звездного вещества указание на то, что

их недра состоят из сверхтяжелых атомов неизвестных на Земле трансурановых элементов.

Когда Крамерс в 1923 г. получил свои соотношения [342] для коэффициентов поглощения рентгеновских лучей атомами водорода и другими более тяжелыми элементами, Джинс, зная о высоких температурах в недрах звезд и, следовательно, о преобладании там коротковолнового излучения, сразу постарался применить их для астрофизических проблем. По Крамерсу, коэффициент поглощения пропорционален Z^2 / A , где Z – атомный номер и A – атомный вес. Тогда очевидно, что чем тяжелее поглощающий элемент, тем больше это отношение и тем больше величина коэффициента поглощения. Но коэффициент поглощения, как мы видели, можно определить, с другой стороны, по соотношению между светимостью звезды и ее массой, которые определяются по наблюдательным данным. Используя эту возможность, Джинс оценил Z^2 / A звездного вещества [335]. Полученные им значения отношения Z^2 / A соответствовали гипотетическим элементам, более тяжелым, чем уран. Джинс также считал, что для молодых звезд это отношение больше, чем для старых. Эти представления привели Джинса к заключению о генерации энергии в недрах звезд вследствие распада трансурановых элементов на более легкие. Вскоре, однако, выяснилось, что формулы Крамерса не применимы к тяжелым элементам, хотя и дают неплохие результаты для водородоподобных атомов. Для гипотезы Джинса не осталось никаких оснований.

Тем не менее Джинс критиковал оценку "среднего атомного веса" звездного вещества, сделанную Эддингтоном на основании сведений о распространении элементов в атмосфере Солнца и звезд [250]. Эддингтон же считал: "Пока все возможности не исчерпаны, нет основания предполагать что-либо, чего не дает лабораторный опыт. Как видно, Эддингтон был склонен к широкой экстраполяции наблюдательных данных. И блестящая интуиция Эддингтона как астронома не подвела его в решении этого чрезвычайно важного вопроса.

Вместе с тем надо признать, что и Джинс был не во всем неправ. Коэффициент непрозрачности без сомнения зависит от химического состава звездного вещества. Более того, непрозрачность его в основном объясняется наличием атомных остатков тяжелых элементов, которые только и удерживают свои внутренние электроны в условиях высоких температур. А ведь именно эти электроны способны поглощать свет. Правда, и протоны, альфа-частицы и "оголенные" ядра других элементов, случается, захватывают на очень короткий промежуток времени электроны и тогда также приобретают способность поглощения. Причем вероятность захвата оголенным ядром свободных электронов возрастает с увеличением плотности звездного вещества, вследствие более тесного расположения частиц. Таким образом, коэффициент непрозрачности хотя и возрастает с увеличением содержания тяжелых элементов (z), но в основном растет с увеличением плотности и уменьшением температуры.

Так как по мере погружения в звезду увеличивается плотность и температура, то следует предполагать, что непрозрачность меняется медленно (коэффициент изменяется не больше, чем на порядок). Гораздо более значительными могут быть вариации значения коэффициента непрозрачности для различных звезд. Он оказывается пропорционален $1/M$ из-за увеличения температуры в более горячих и массивных звездах. Поэтому закон масса-светимость с учетом этой зависимости и (64) и (68) представляется в виде

$$L \sim M^{3.9}. \quad (69)$$

А если не считать коэффициент непрозрачности постоянным, а использовать результат Крамерса, то

$$L \sim \mu^{7.5} M^{5.5} R^{-0.5}, \quad (70)$$

так как радиус звезды тоже растет с увеличением массы, но и (70) близко соответствует зависимости (69). Зависимость (69) является весьма хорошей аппроксимацией наблюдательного материала для звезд различного типа населений.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ДЕТСТВО И ОТРОЧЕСТВО	7
СТУДЕНЧЕСКИЕ ГОДЫ И НАЧАЛО НАУЧНОЙ РАБОТЫ	13
ПЛЮМИАНСКИЙ ПРОФЕССОР АСТРОНОМИИ	26
ПОСТИГАЯ ПРИРОДУ ЗВЕЗД	50
РАЗРАБОТКА РЕЛЯТИВИСТСКОЙ КОНЦЕПЦИИ	79
ФИЛОСОФСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЭДДИНГТОНА	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
ОСНОВНЫЕ ДАТЫ ЖИЗНИ И ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АРТУРА ЭДДИНГТОНА.....	116
ЛИТЕРАТУРА.....	118
ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ	130
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	133

Научно-биографическое издание

Козенко Александр Васильевич

АРТУР СТЕНЛИ ЭДДИНГТОН

1882–1944

Утверждено к печати Редакцией серии

"Научно-биографическая литература" Российской академии наук

Заведующая редакцией "Наука – биосфера, экология, геология" **А.А. Фролова**

Редактор **Г.Р. Латыпова**

Художественный редактор **Г.М. Коровина**

Технический редактор **Т.В. Жмелькова**

Корректоры **Н.Л. Голубцова, Г.В. Дубовицкая**

Набор и верстка выполнены в издательстве на компьютерной технике

ИБ № 2213

ЛР № 020297 от 27.11.1991

Подписано к печати 21.02.97. Формат 60х90 1/16. Гарнитура Таймс

Печать офсетная. Усл.печ.л. 9,0. Усл.кр.-отт. 9,4. Уч.-изд.л. 10,4

Тираж 360 экз. Тип. зак. 108.

Издательство "Наука" 117864 ГСП-7, Москва В-485, Профсоюзная ул., 90

Санкт-Петербургская типография № 1 РАН

199034, Санкт-Петербург В-34, 9-я линия, 12

Артур Стенли ЭДДИНГТОН

А. В. Козенко



А. В. Козенко

**Артур Стенли
ЭДДИНГТОН**

В издательстве "Наука"
готовится к печати:

В.М. Пасецкий
С.А. Блинов

РУАЛ АМУНДСЕН

1872—1928

18 л.

Для получения книги почтой
заказы просим направлять по адресу:
117393 Москва,
ул. Академика Пилюгина, д. 14, кор. 2,
магазин "Книга—почтой"
Торговой фирмы "Академкнига"

