

АРТУР СТЕНЛИ ЭДДИНГТОН

Н. Н. ПЕТРОВА

Более чем кому-либо своим бурным развитием, начавшимся непосредственно после работ Планка, Эйнштейна и Бора, астрофизика обязана Артуру Стенли Эддингтону. И, вероятно, самой большой заслугой королевского астронома сэра Уильяма Кристи перед мировой астрономией было то, что в начале 1906 г. он пригласил 23-летнего преподавателя физики из Тринити колледжа в Кембридже, в недавнем прошлом лучшего выпускника этого колледжа, Артура Стенли Эддингтона на должность старшего ассистента Гринвичской обсерватории. (Очевидно, уже и тогда в обсерваториях физикам отдавали предпочтение перед астрономами.)

Опыт Эддингтона в астрономических исследованиях был ограничен: в возрасте 10 лет он рассматривал небесные тела с помощью трехдюймового телескопа, одолженного ему классным руководителем, и выступал с лекциями о Марсе или Юпитере перед старым домашним слугой, используя как трибуну ступеньки лестницы.

Уже будучи известным ученым, Эддингтон однажды признался, что еще в детстве его самой заветной мечтой было стать королевским астрономом.

За короткий срок работы в Гринвиче Эддингтон сумел приобрести серьезный опыт практически во всех видах астрономических исследований: он много наблюдал (это необходимо иметь в виду тем, кто считает его чистым теоретиком), обрабатывал наблюдения, проверял данные каталогов, подготавливал материалы наблюдений для статистической обработки.

В 1906 г. вышла в свет его первая работа «О систематическом движении звезд», где он убедительно подтвердил незадолго перед тем выдвинутую идею Каптейна о существовании двух звездных потоков. Впоследствии, используя материалы новейших звездных каталогов, Эддингтон развил и укрепил двухпотокую теорию.

Исследования в области движений звезд продемонстрировали интуитивную способность молодого ученого видеть ключевые проблемы науки своего времени. Обобщением этих исследований стала первая монография Эддингтона — «Движение звезд и строение Вселенной», опубликованная в 1914 г. [1].

Тем временем Эддингтон продолжает участвовать и в ряде других астрономических исследований.

Совместно с Гарольдом Кристи он производит геодезические измерения на Мальте.

Он публикует свои исследования изменений головы кометы Морхауза, рассчитав силы, сбрасывающие ее оболочку [2].

Им была усовершенствована программа наблюдений на фотографическом зенитном телескопе, позволившая увеличить точность результатов до значений, которых так и не удалось добиться безвременно скончавшемуся создателю этого инструмента Брайану Куксону.

В 1909 г. Эддингтон отклоняет приглашение занять должность профессора теоретической физики в Манчестере, тем самым окончательно избрав астрономию своей основной профессией.

В 1913 г. он становится профессором Кембриджского университета, в марте 1914 года — директором Кембриджской обсерватории.

Все эти годы Эддингтон не оставляет наблюдательной практики, и именно ему поручается в 1912 г. возглавить экспедицию по наблюдению полного солнечного затмения, из-за облачности окончившуюся неудачей. Однако его опыт по подготовке этой экспедиции оказался полезным при следующем наблюдении полного солнечного затмения в 1919 г. — наблюдении, вошедшем в историю как первое блестящее подтверждение выводов теории относительности Эйнштейна!

Позицию Эддингтона по отношению к теории Эйнштейна опять определило его безошибочное чувство ключевого направления в науке. Имя Эддингтона одним из первых стоит в списке ученых, утвердивших теорию относительности в борьбе с гораздо более многочисленной армией скептиков.

Эйнштейн завершил свою общую теорию относительности в 1915 г. Первая мировая война помешала непосредственным контактам между немецкими и английскими

учеными, и только в 1916 и 1917 гг. из нейтральной Голландии де Ситтер переслал Эддингтону как секретарю Королевского астрономического общества экземпляры статей Эйнштейна и своей для публикации в «Monthly Notices».

Блестящая математическая и физическая подготовка, научная интуиция Эддингтона позволили ему не только сразу стать активным сторонником теории, но и внести свой вклад в ее развитие.

В 1918 г. по заказу Лондонского физического общества впервые на английском языке появилось «Сообщение о теории относительности и гравитации» [3], подготовленное Эддингтоном. Через 18 месяцев потребовалось второе издание этого труда; к этому времени Эддингтон уже имел возможность сообщить в предисловии о своем наблюдении на западном побережье Африки (и параллельном наблюдении Дэвидсона в Бразилии) отклонения луча света вблизи Солнца во время полного солнечного затмения 1919 г. Измерения показали, что величина этого отклонения полностью совпадает с предсказанной на основании общей теории относительности.



Артур Стенли Эддингтон

На торжественном обеде по случаю успешного завершения экспедиции Эддингтон с юмором изложил все проблемы и затруднения, связанные с организацией экспедиции и наблюдениями, и все тревожения в ожидании результата в виде пародии на рубайи, заканчивавшейся такими строчками:

«Об измерениях отчет я дам:
Что свет весом — одно лишь ясно нам.
Одно лишь ясно, остальное спорно:
Вблизи от Солнца путь луча не прям».

В дальнейшем Эддингтон продолжал уделять много времени развитию и популяризации теории относительности. Он завершил обобщение работы Германа Вейля по сведению воедино теории электромагнитного и гравитационного полей, ввел усовершенствования в аффинную геометрию Вейля и сформулировал геометрию структуры мира посредством параллельного смещения, что создало новую математическую основу и явилось значительным вкладом в геометрию, независимо от специального вклада в теорию относительности. В связи с разработкой единой теории поля Эддингтон дает свое объяснение закона тяготения: радиус кривизны пространственно-временного участка в любой точке и в любом направлении постоянен. Единица длины в любой точке и в любом направлении есть определенная доля радиуса кривизны для этой точки и направления. Таким образом, закон тяготения есть просто утверждение, что мировой радиус кривизны в любом месте дает стандарт, с которым сравниваются наши измерения длины. Эддингтон пытается теоретически определить константу λ , которая входит в данное им выражение для закона тяготения. Эту константу он выводит из волновых уравнений, определяющих линейные размеры атомных систем, исходя из того принципа, что эти размеры должны быть выражены в долях мирового радиуса.

Теория относительности, естественно, затронула и космологические проблемы. Эддингтон лишь в 1930 г. убедился, что теория расширяющейся Вселенной не противоречит наблюдениям, идентифицировав удаление туманностей с этим расширением. Используя данные наблюдений лаборатории Маунт-Вилсон о степени увеличения скорости удаления, он рассчитал массу Вселенной и ее радиус в момент исходного состояния, от которого, по его мнению, началось расширение. В 1933 г. он опубликовал книгу

«Расширяющаяся Вселенная»¹ [4]. Здесь, в частности, он указывает на красное смещение как на индикатор скорости расширения.

В 1953 г. Вейль писал: «Что касается личного вклада Эддингтона в теорию [относительности], то я бы сказал, что он в основном состоит из двух моментов: первый — идея теории аффинного поля и позднее его попытки объяснить на основе умозрительных рассуждений безразмерные числа, которые, по-видимому, описывают строение Вселенной...» [5].

Расширяющаяся Вселенная стала почвой для дальнейших исследований Эддингтона в направлении от геометрии мира к квантовой теории, свойствам частиц и соотношениям между всеми фундаментальными константами природы. В его статьях и лекциях на эту тему уже намечались исходные философские предпосылки труда, которому Эддингтон посвятил почти полностью несколько последних лет своей жизни, — структурной физики, или «Фундаментальной теории».

«Теория относительности... объединяет великие законы, которые, благодаря точности их формулировки и правильности их применения, завоевали почетное место в сфере человеческого знания, представляемого сегодня физической наукой, — писал Эддингтон в 1920 г. в своей третьей книге «Пространство, время и гравитация» — И все же, если вдуматься в природу вещей, это знание — всего лишь пустая оболочка, форма символов. Это знание структурной формы, а не содержания...»

...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» [6].

Таким образом, философские взгляды Эддингтона превращают сознательный анализ абстрактных физических понятий в представление о физике как о чистом продукте человеческого сознания. Эту разновидность субъективного идеализма Вальтер Холличер в своей книге «Природа в научной картине мира» (М.: Прогресс, 1966) относит к категории конвенционализма.

Уделяя много внимания, сил и труда популяризации теории относительности и дальнейшей разработке ее основ, Эддингтон не остается в стороне от формулировки и решения насущных проблем астрофизики. Уже после смерти Эддингтона в 1953 г., отдавая должное его научным заслугам, А. Эйнштейн писал: «Главное достижение Эддингтона, по моему мнению, — его теория звезд...» [7].

В 1916—1917 гг. появились две статьи Эддингтона о лучистом равновесии звезд. В них он впервые указал на важность учета светового давления во внутреннем равновесии звезды и вывел уравнение для его определения, которое ныне носит имя Эддингтона. Получив уравнение лучистого равновесия, он показал, что с помощью простого допущения оно становится интегрируемым и приводит к политропной сфере с индексом политропы $n=3$.

В то время еще не были открыты ядерные реакции как источники звездной энергии, и в теории внутреннего строения звезд приходилось делать различные предположения относительно величины ϵ — количества энергии, вырабатываемого одним граммом звездного вещества.

Допущения, принятые Эддингтоном, привели его к созданию модели звезды, которая приводится в современных учебниках теоретической астрофизики как стандартная модель, или модель Эддингтона.

Естественно, что обойти молчанием вопрос об источниках энергии звезд Эддингтон не мог. Ранее Кельвин показал, что энергии гравитационного сжатия для звезды типа Солнца может хватить не более чем на 20 миллионов лет. По расчетам Эддингтона,

¹ Основоположителем теории расширяющейся Вселенной является советский ученый А. А. Фридман, который в 1922—1924 гг. теоретически обосновал возможность существования «нестационарного мира»; из уравнений А. А. Фридмана непосредственно следует выражение для линейного закона «разбегания» галактик, экспериментально установленного Э. Хабблом в 1929 г. по результатам измерения «красного смещения» (Ю. Б. Татаринов. Шестьдесят лет теории расширяющейся Вселенной А. А. Фридмана. «Вопросы истории естествознания и техники», 1982, № 3, с. 88—97). — Ред.

звезда-гигант класса М с эффективной поверхностной температурой 3000°K сожмется до состояния гиганта класса G с поверхностной температурой 6000° за абсурдно короткий период — 24 тысячи лет. Необходимость поиска иных источников энергии была очевидной; как возможный источник Эддингтон называет процесс аннигиляции материи.

Позднее в разгаре полемики с Джинсом Эддингтон почти вплотную приблизился к открытию ядерных реакций, указав, что ключ к решению проблемы следует искать в знаменитом соотношении Эйнштейна $E=mc^2$.

Во второй из двух упомянутых выше статей Эддингтон заметил, что ионизация в недрах звезды должна быть настолько высока, что средний молекулярный вес становится малым и как следствие светимость звезды должна быть быстро возрастающей функцией ее массы.

К 1924 г. частично на основе данных наблюдений он приходит к выводу, что вещество в недрах звезд будет вести себя как идеальный газ вплоть до очень высоких плотностей. С учетом этого он сделал следующий значительный шаг и в 1924 г. вывел вошедшее во все последующие учебники соотношение масса-светимость, показав, что только огромные массы материи способны светиться и что фундаментальные свойства атомов вынуждают эти массивные тела становиться светящимися звездами. Год спустя, разработав модель точечного источника и рассчитав ее, он показал, что влияние внутреннего распределения плотности на соотношение масса-светимость незначительно.

И, наконец, в 1932 г. Эддингтон показал, что светимость для данной массы весьма значительно меняется с изменением содержания водорода, что позволяет оценить это содержание. (Стремгрен независимо пришел к тому же выводу, опубликовав его на месяц раньше.)

Результаты этих исследований Эддингтон подытожил в монографии «Внутреннее строение звезд», впервые изданной в 1926 году [8]. Г. Рассел в статье «Артур Стенли Эддингтон» назвал эту книгу «произведением искусства».

Книга представляет собой первое детальное изложение теории лучистого равновесия для звездных недр. Несмотря на пионерские работы Шварцшильда и Эмдена, большинство исследований, выполненных до Эддингтона, базировалось на идеях конвективного равновесия. Работы Эддингтона развились из исследований проблемы пульсации цефеид и того, какие процессы ответственны за равновесие этих звезд.

В этой же книге заложены основы для разработки механизмов образования абсорбционных спектральных линий в звездных атмосферах. Глава «Диффузная материя в космическом пространстве» впервые затрагивает теорию межзвездного вещества. Эддингтон указывает на возможность оценивать расстояние до звезды по интенсивности линий межзвездного поглощения в ее спектре.

Все книги Эддингтона, и в особенности «Внутреннее строение звезд», отличаются мастерским умением свести воедино абстрактные формулы математических уравнений и живое изложение, проливающее свет на самые трудные для восприятия моменты.

В этой книге проявляется философский склад мышления Эддингтона. Отмечая относительную роль строгой математики и физической интуиции, он пишет: «Если для математика интуиция — один из инструментов, а доказательство — конечный продукт, то для физика доказательство — один из инструментов, а интуиция — конечный продукт».

Интересна многолетняя полемика между Джинсом и Эддингтоном по целому ряду аспектов астрофизики. Джинс несколько лет работал профессором прикладной математики сначала в Принстоне, затем в Кембридже. Начиная с 1912 г. он занимался математическими исследованиями в физике и астрономии и неоднократно выступал как научный противник Эддингтона.

Поводом для особенно яростного его нападения послужили две первые статьи Эддингтона 1916 и 1917 гг. о лучистом равновесии.

В одном из своих выступлений о Королевском астрономическом обществе Джинс дал понять, что сомневается в безупречности математических выкладок Эддингтона, чем вызвал негодование последнего. Эддингтон вынужден был в свою очередь заметить: «...В первой части замечаний мистера Джинса... я увидел мои уравнения, использованные мистером Джинсом, тогда как мне запрещено ими пользоваться...».



А. Эддингтон и А. Эйнштейн в саду у Эддингтона, 1930 г.

Здесь же, обращаясь к уравнению Эйнштейна $E=mc^2$, он впервые говорит о радиоактивном распаде элементов как возможном источнике звездной энергии — формулировка еще не вполне правильная, но уже смутно предвосхищающая открытие Бете — ядерных реакций в недрах звезд.

Все это время Джинс упорно отстаивал чистую гравитацию как источник звездной энергии.

Положенный в основу современной теоретической астрофизики закон масса-светимость, выведенный Эддингтоном, также подвергся резкой критике со стороны Джинса, который в этот период разрабатывал свою модель жидкой звезды.

Не менее яростно Джинс нападал и на теорию пульсации цефеид Эддингтона, также вошедшую в фонд классической астрофизики, приводя в противовес этой теории свою гипотезу периодических взрывов или приливных извержений.

Время показало, что во всех указанных случаях истина была на стороне Эддингтона.

На основе своей теории строения звезд Эддингтон рассчитал угловые диаметры нескольких красных гигантов. В 1920 г. с помощью звездного интерферометра Майкельсона на обсерватории Маунт-Вилсон в США была впервые получена величина углового диаметра Бетельгейзе, совпавшая с теоретическим расчетом Эддингтона с точностью до 10%.

Работы Эддингтона как одного из наиболее выдающихся исследователей своего времени получали все более широкое распространение в научном мире. С 1921 по 1923 г. он был президентом Королевского астрономического общества и Математической ассоциации — с 1930 по 1932 г. В 1938 г. он стал президентом Международного астрономического союза.

Эддингтон часто выступал с докладами или лекциями в самых авторитетных научных и учебных заведениях. В августе 1926 г. он получил письмо из Ленинграда от профессора Глазенапа, тогда президента Русского астрономического общества. В письме, в частности, говорилось: «Я имею честь известить Вас, что Русское астрономическое общество на последнем съезде единодушно избрало Вас своим почетным членом в знак признания Вашей замечательной научной работы, одной из наиболее глубоких и прекрасных, какие отмечала история нашей любимой науки...».

Лекции Эддингтона отличались спокойным, размеренным и обстоятельным изложением. Студенты вспоминали, как он приглашал их наблюдать вместе с ним по ночам; в эти часы исчезал барьер, стоявший между профессором и его учениками, вопросы сыпались с большой непринужденностью и получали живые, не формальные ответы.

Эддингтон как директор Кембриджской обсерватории, живший на ее территории, иногда приглашал студентов на чашку чая к себе домой, где их приветливо и гостеприимно встречали его мать и сестра (Эддингтон никогда не был женат).

Большое значение Эддингтон придавал также и школьному обучению. Он охотно посещал собрания Союза учителей.

Когда в 1918 г. в разгаре первой мировой войны встал вопрос о его призыве в действующую армию, Эддингтон выразил свое резкое отрицательное отношение к войне как проявлению варварства, отбрасывающего назад все моральные завоевания человечества.

Эддингтон вел обширную переписку с учеными многих стран, в том числе и с советскими учеными. В 1938 г. он посетил Советский Союз.

Несколько последних лет своей жизни Эддингтон работал над единой теорией, охватывающей все основные явления физики и космологии. Уже в работах по теории относительности и релятивистской космологии намечается его тенденция к поискам связующих звеньев между космическими и атомными явлениями, между космологией, общей теорией относительности и квантовой теорией. Эддингтон пытался получить наблюдаемые физические постоянные, как, например, массы атома водорода, протона и электрона, постоянную Планка, постоянную тонкой структуры, постоянную тяготения, эйнштейновский радиус мира, константу удаления галактик, массу Вселенной, число частиц во Вселенной и т. д. Серьезная болезнь и последовавшая за ней смерть в ноябре 1944 г. прервали работу над этим трудом. Он был подготовлен к печати и опубликован после смерти Эддингтона, в 1946 г., под названием «Фундаментальная теория» [9].

Вся жизнь Эддингтона была в работе, и работа была его жизнью. Все бурные события в его жизни происходили в сфере его научных исследований.

В короткие периоды отдыха Эддингтон любил дальние прогулки, езду на велосипеде, спорт.

Биографы отмечают эпиграммы Эддингтона, отличавшиеся исключительным остроумием. Он изобрел воображаемого шотландского профессора «смехологии», который имел столь обширные познания в этой гипотетической науке юмора, что мог безошибочно классифицировать любой анекдот.

Эддингтону принадлежат слова: «Когда исследователь вывел формулу, которая дает полное представление о явлении в известных пределах, он, может быть, поддается чувству некоторого удовлетворения. Не мудрее было бы сказать: «Опять в тупике! Я не могу ничего больше узнать о Природе, идя этим путем»».

Эддингтон отличался редкой скромностью и отсутствием всякой претензiosности. Современники вспоминают, как во время Стокгольмского съезда МАС в 1938 г. в группе делегатов съезда, направлявшихся на банкет (необходимо было иметь все знаки отличия), Эддингтон стоял в наглухо застегнутом плаще, чтобы спрятать весьма почетный орден «За заслуги».

Юбилейный номер американского журнала «Physics Today» (ноябрь 1981 г.), посвященный последним пятидесяти годам развития физики в Америке, поместил фотографию Альберта Эйнштейна, Хендрика Антона Лоренца и Артура Стенли Эддингтона, сделанную в 1923 г., со следующей подписью: «Эти теоретики в основу своих исследований положили единство и простоту. Подобный подход за последние полвека принес гораздо менее, чем в их дни».

В заключение приведем список наиболее важных книг Эддингтона.

Переводы на русский язык работ А. Эддингтона

Эддингтон А., Джинс А. Ж. Современное развитие космической физики, 1928 г. Пространство, время и тяготение. Пер. Ю. Г. Рабиновича, 1923 г.
Относительность и кванты. Пер. С. П. Шубина под ред. Б. Н. Тессена. 1933 г.
Теория относительности. Пер. Э. Гуревича, ред. Д. Д. Иваненко, 1934 г.

Основные труды А. Эддингтона

Space, Time and Gravitation, Cambridge, 1920.
The Internal Constitution of the Stars, Cambridge, 1926.
The Nature of the Physical World, Cambridge, 1928.
The Expanding Universe, Cambridge, 1933.
Fundamental Theory, Cambridge, 1946.

Литература

1. *Eddington A. S.* Stellar Movements and the Structure of the Univers. Macmillan, 1914.
2. *Eddington A. S.* The Envelopes of Comet Morehouse (1908's), M. N. R. A. S., 70, 442, 1910.
3. *Eddington A. S.* Report on the Relativity Theory of Gravitation, Physical Society of London, 1981.
4. *Eddington A. S.* The Expanding Universe, Cambridge, 1933.
5. *Weil H.*, a private letter of 31 October 1953.
6. *Eddington A. S.* Space, Time and Gravitation. Cambridge, 1920.
7. *Einstein A.*, a private letter of 3 April 1953.
8. *Eddington A. S.* The Internal Constitution of the Stars. Cambridge, 1926.
9. *Eddington A. S.* Fundamental Theory (posthumous). Cambridge, 1946.

Календарь юбилейных дат

375 лет

Со дня рождения *Борелли Джованни Альфонсо* (28.I.1608—31.XII.1679)—итальянского физика, астронома и физиолога, ученика Галилея, лидера знаменитой Флорентийской Академии дель Чименто (Академии опытов, 1657—1667), основополож-



Джованни Альфонсо
Борелли

ника ятромеханики. В физике наиболее значительны его исследования капиллярности, в небесной механике впервые высказал предположение, что круговое движение небесных тел объясняется взаимодействием двух сил—центробежной и центростремительной, в книге «О движении животных» показал, что движение частей тела человека и животных может быть объяснено в полном соответствии с принципами механики. Изобрел гелиостат.

300 лет

Со дня рождения *Реомюра Рене Антуана Фершо* (28.II.1683—17.X.1757)—французского естествоиспытателя, члена Парижской Академии наук, иностранного члена Петербургской Академии, автора работ по физике, химии, ботанике, зоологии и т. д. Известен как создатель спиртового термометра («термометра Реомюра»), у которого впервые шкала градуировалась по точкам кипения и замерзания воды (правда, расстояние между этими точками он делил на

80 частей, а не на 100, как вскоре предложил делать Цельсий). Собрал одну из первых зоологических коллекций во Франции.

250 лет

Со дня рождения *Пристли Джозефа* (13.III.1733—6.II.1804)—английского философа, теолога и химика, члена Лондонского королевского общества, почетного члена Петербургской, Парижской и других академий. В философии развивал традиции



Джозеф Пристли

английского материализма; деист; противник атеизма французских материалистов. Занимаясь пневматической химией, впервые получил ряд газов, считается одним из открывателей кислорода, но сам рассматривал его как «дефлогистированный воздух», оставаясь всю жизнь сторонником теории флогистона.

150 лет

Со дня рождения *Роско Генри Энфилда* (7.I.1833—18.XII.1915)—английского химика, соавтора закона Бузена—Роско (эквивалентность времени и интенсивности облучения при фотохимических процессах), издателя (совместно с А. Гарденом) дневников и истории атомистического учения. Дж. Дальтона.