

## ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

## Академик Я.Б. Зельдович и основания дисковой аккреции

Н.И. Шакура

*В статье, основанной на личных воспоминаниях автора, раскрывается решающая роль, которую сыграл Я.Б. Зельдович в становлении и развитии теории дисковой аккреции на чёрные дыры и нейтронные звёзды в двойных звёздных системах. Теория, созданная Н.И. Шакурой и Р.А. Сюняевым в начале 1970-х годов под руководством Я.Б. Зельдовича, предсказала эти объекты как ярчайшие источники космического рентгеновского излучения и на десятилетия вперёд определила основное направление развития рентгеновской астрономии и современной астрофизики высоких энергий.*

PACS numbers: 04.25.dg, 97.10.Gz, 97.60.Jd

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201404h.0445

Было лето 1963 года. После выпускных экзаменов в средней школе городского посёлка Паричи, что на Гомельщине, по каким-то делам я поехал в город Бобруйск, зашёл в книжный магазин и увидел там книжку Я.Б. Зельдовича *Высшая математика для начинающих*. Естественно, имя автора мне ни о чём не говорило, но содержание книги меня заинтересовало по следующей причине.

В те, теперь уже далёкие, времена среднее образование по математике заканчивалось взятием пределов. Пределам предшествовали элементарные функции, одной из которых была (конечно, как и сейчас) парабола. Нужно было найти положение минимума (парабола "рогами" вверх) или максимума (парабола "рогами" вниз). Объясняя, как это делается, согласно существовавшим тогда методикам, школьный учитель математики (а также физики и астрономии) Альфред Викторович Барановский приговаривал: "А вот методами высшей математики эти мини-максы вычисляются гораздо быстрее и красивее". Он был учителем по призванию (весной 2004 г. Альфреда Викторовича не стало). Конечно же, каждый, хотя бы немного знакомый с высшей математикой, скажет: возьми производную от функции и приравняй её нулю. Для параболы получится линейное относительно  $x$  уравнение. Да, очень просто, но я ещё раз повторю, что среднее математическое образование тогда заканчивалось взятием пределов, а не производных. Сейчас, будучи гораздо старше Альфреда Викторовича тех лет, когда он обучал школьной математике моё поколение, я могу сказать, что в любом мало-мальски важном деле (а обучение к таким относится) прежде всего следует придерживаться проверенных временем методов.

**Н.И. Шакура.** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Университетский просп. 13, 119991 Москва, Российская Федерация  
E-mail: nikolai.shakura@gmail.com

Статья поступила 5 ноября 2013 г.,  
после доработки 5 декабря 2013 г.

Кто-то скажет: ведь всё развивается, многое устаревает буквально на глазах. Но в том и состоит призвание учителя, что он знает, интуитивно чувствует, что уже можно, а что ещё рано для школьного класса в целом. Специальных занятий с передовиками школьного процесса Альфред Викторович не проводил. Но с его разрешения мы имели допуск в физический кабинет школы. Да чего только там не было!

Своё индивидуальное развитие в математике я получил, знакомясь с содержимым почтовых отправок, которые я выписывал из главного университета страны — Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (МГУ). По стилю — как учить других — они — школьный учитель А.В. Барановский и академик, профессор МГУ, Яков Борисович Зельдович — были схожи: знали гораздо больше, чем говорили! Информация должна быть дозированной, а доза — по номиналу. Когда какой-нибудь ученик не выполнял домашнее задание, Альфред Викторович, грозно нахмутив брови, говорил: "Вот я сейчас тебе поставлю точку!" Он немного шепелявил и вместо "точку" говорил "гоцку". Этой "гоцки" все школьники почему-то боялись больше, чем единицы или двойки. Однако "гоцки" в классный журнал он ставил крайне редко.

Яков Борисович после окончания своей очередной лекции спрашивал: "Есть ли вопросы?" Обычно студенты вопросов не задавали. Тогда он говорил (ссылаясь на своего школьного учителя): "Ну, тогда у меня будут к вам вопросы". Однако вопросы он задавал крайне редко.

Большую часть времени студенты и аспиранты ЯБ проводили в те времена в его отделе в Институте прикладной математики (ИПМ), которым тогда руководил Мстислав Всеволодович Келдыш. Ныне это институт им. М.В. Келдыша. Довольно часто ЯБ спорил с молодыми людьми на бутылку минералки. Отложились в памяти подоконники в комнатах отдела, сплошь заставленные бутылками минералки с соответствующими надписями на этикетках — кто кому и за что проспорил. Эти споры несколько сблизжали молодёжь с Яковом Борисовичем — у молодых отсутствовало чувство страха "сказать что-то не то". Вместе с тем в

общении с ним существовала некая незримая черта, переступить которую было нельзя — притяжение превращалось в отталкивание.

Однако вернёмся в город Бобруйск 1963 г. После покупки книжки я зашёл в небольшой уютный скверик на улице Бахарева и начал книжку листать. На первых страницах излагались школьные вещи: что такое путь, скорость, ускорение... Дойти до глав с высшей математикой мне помешала приятная цыганка. Она мне погадала, я ей вручил две монетки по 15 копеек и мы разошлись. Да, молодой читатель, тогда были монеты и такого достоинства, прозванные "пятнашками", и какие монеты! И первый раз, и много раз после я добирался до Москвы из Бобруйска и обратно домой автобусом, так как прямого железнодорожного пути между этими городами нет. Если пересчитать стоимость купленных билетов по этому маршруту на единицу пройденного пути, то в те времена эта величина составляла примерно 2 копейки на 1 км.

Больше я в книжку Я.Б. Зельдовича не заглядывал, так как нужно было ехать в Москву сдавать вступительные экзамены на астрономическое отделение физического факультета МГУ. Астрономическое отделение я выбрал, уже находясь в комнате приёмной комиссии МГУ, — прошло всего два с небольшим года после полёта Ю.А. Гагарина. Но всё-таки решающую роль сыграла книжка *Этюды о Вселенной*, написанная профессором Московского университета Б.А. Воронцовым-Вельяминовым, которая тоже какими-то путями оказалась в белорусской глуши. Уже будучи студентом МГУ, я слушал лекции Бориса Александровича и, естественно, сдавал ему экзамен. В школе мы учили астрономию по его стандартному учебнику для средней школы *Астрономия* и тогда мне даже в голову не приходило, что пройдёт всего два-три года, и он мне будет преподавать курс высшей астрономии.

Первые три года обучения в МГУ прошли без Я.Б. Зельдовича. Более того, я забыл о той, купленной в Бобруйске, книжке — в число стандартных университетских учебников она не вошла. И не потому, что была плоха. Она предназначалась для тех, кто постигал высшую математику путём самообразования. Академик адресовал её начинающим инженерам и техникам. Более того, есть замечательная фотография, на которой он дарит экземпляр своей *Высшей математики* Папе Рим-

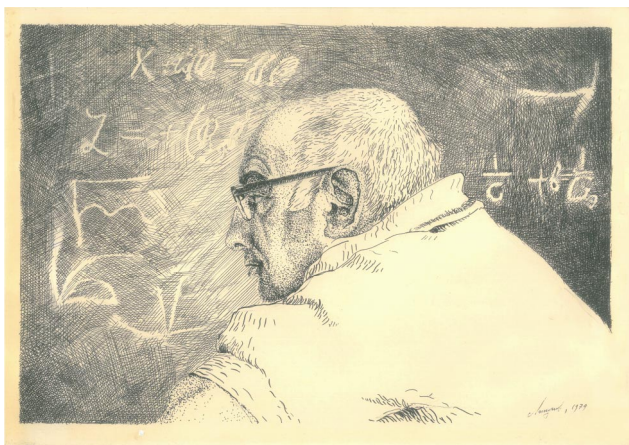
скому Павлу-Иоанну II. Академик Я.Б. Зельдович написал более десяти ценных книг, посвящённых самым различным областям естествознания.

Первая моя встреча с Яковом Борисовичем состоялась следующим образом. Когда я был студентом 3-го курса, деканатом физического факультета была организована в Большой физической аудитории встреча студентов факультета с редколлегией журнала *Успехи физических наук (УФН)*. Конечно же, сильное впечатление произвёл главный редактор, блистательный Эдуард Владимирович Шпольский. Всю встречу Яков Борисович Зельдович просидел молча за столом, уложив подбородок на скрещённые, густо заросшие щетиной руки. Он был, как говорят, весь в себе, и что-то нетривиальное таилось в этом человеке. Позднее, когда я уже работал с ним, я узнал, что он никогда не был студентом дневного отделения какого-либо вуза. После окончания десятилетки в 1930 г. в Ленинграде он поступил на работу лаборантом сначала в Институт механической обработки полезных ископаемых, а несколько месяцев спустя — в Институт химической физики (ИХФ). В возрасте 20 (!) лет Зельдович был принят в аспирантуру ИХФ к Николаю Николаевичу Семёнову и далее в "ускоренном" режиме прошёл с фантастической результативностью все ступени учёной лестницы.

Мой первый личный контакт с Академиком состоялся через год, когда он начал читать свои лекции для студентов моего 4-го курса. Осенью 1966 г. мы, студенты астрономического отделения физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, обнаружили в расписании занятий новый спецкурс "Строение и эволюция звёзд", который должен был читать Я.Б. Зельдович. Лекции читались по пятницам, а по четвергам под руководством ЯБ в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ) проводился Объединённый астрофизический семинар (ОАС). В работе ОАС участвовали как уже сложившиеся учёные, так и молодёжь, получившая высшее образование. Студенты забегали на этот семинар по мере возможности, так как в расписании учебных занятий он не значился. После своей первой лекции ЯБ попросил желающих получить у него тему для курсовой работы задержаться. Несколько студентов, в том числе и я, остались в аудитории. Когда очередь дошла до меня, он спросил, был ли я вчера на заседании ОАС. Я ответил утвердительно. На второй вопрос — прослушал ли я доклад о (таинственных тогда) источниках космического рентгеновского излучения — ответ тоже был утвердительный. Тогда он сказал: "Попытайтесь рассчитать структуру и спектр излучения мощной ударной волны, которая возникает в результате падения газа на нейтронную звезду вблизи её поверхности".

Это было осенью 1966 г. В течение нескольких последующих лет в астрономии будут сделаны величайшие открытия. Группой учёных под руководством английского астронома Энтони Хьюиша в 1967 г. будут открыты нейтронные звёзды-радиопульсары. Наблюдения с борта первой специализированной рентгеновской космической обсерватории "Ухуру" прольют свет на природу источников космического рентгеновского излучения.

Спустя несколько недель после начала занятий ко мне подошла учёный секретарь кафедры астрофизики, научный сотрудник ГАИШ Валентина Яковлевна Алдусева с целью уточнить тему моей курсовой работы. "Коля,



Портрет Я.Б. Зельдовича, написанный тушью В.М. Липуновым в начале 1980-х годов.

перед Вами академик Зельдович поставил задачу аккреции газа нейтронной звездой". — сказала она. Именно в этот момент я впервые услышал это загадочно прозвучавшее слово "аккреция" и был до крайности удивлён. Ведь Академик просил меня рассчитать структуру ударной волны и на первых порах не употреблял в беседах со мной этот термин, а в стандартных астрономических курсах тех времён изучение процессов аккреции вообще отсутствовало. Летом 1966 г. под руководством Валентины Яковлевны я вместе с другими студентами, будущими астрономами, проходил практику в обсерватории ГАИШ, в горах Тянь-Шаня, под Алма-Атой. Именно астрономическая практика несколько сближает студентов и научный персонал. Видя моё замешательство, Валентина Яковлевна предложила мне воспользоваться хранилищем научной библиотеки ГАИШ. Обычно студентам МГУ разрешалось пользоваться только библиотекой учебных пособий (БУП). Порывшись в библиотеке, я выяснил, что слово "аккреция" имеет латинское происхождение (accretio) и означает приращение, прибавление чего-либо. В астрономии под термином аккреция подразумевают процессы падения на тяготеющие центры различной природы окружающего их разрежённого вещества. Тогда, более чем полвека назад, теоретическое изучение процессов аккреции вещества во Вселенной находилось в зачаточном состоянии, и в этом нет ничего удивительного — отсутствовали соответствующие данные наблюдений.

Фантастически большой объём информации (и не только о процессах аккреции, а во всей астрономии в целом) был получен за прошедшее время. Более того, скорость поступления этой информации год от года только увеличивается. В настоящее время существует огромное число различных астрономических инструментов. Решающую роль играет компьютерная обработка данных наблюдений. В те далёкие 1960-е годы у нас под рукой для проведения расчётов были логарифмическая линейка да металлический ручной "Феликс", который сейчас можно увидеть в музеях некоторых научных институтов. Но в конце 1960-х студенты уже выполняли первые лабораторные расчёты на университетской ЭЭСМ.

Итак, аккреция в астрономии. (Есть ещё аккреция в геологии. Но это другая ипостась.)

Существуют три режима аккреции окружающего газа на некоторый тяготеющий центр (рис. 1): а) сферический режим аккреции, при котором тяготеющий центр покоится относительно газового облака или движется с относительной скоростью, существенно меньшей, чем скорость звука в облаке; б) возникающий при движении тяготеющего центра относительно газового облака со сверхзвуковой скоростью конический режим аккреции с образованием перед центром лобовой ударной волны,

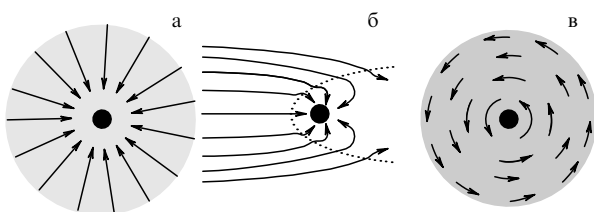


Рис. 1. Типы аккреции на тяготеющие центры: (а) сферический, (б) конический, (в) дисковый.

которая переходит в косую ударную волну позади него; в) режим дисковой аккреции, при котором падающее на тяготеющий центр вещество обладает относительно последнего значительным угловым моментом количества движения, препятствующим прямому падению вещества на тяготеющий центр. В первом приближении вещество в диске вращается по почти кеплеровым круговым орбитам. Только при наличии эффективного механизма (турбулентность и/или магнитные поля) обмена моментом между соседними слоями дифференциально вращающегося диска и начинается дисковая аккреция, т.е. медленное радиальное движение вещества к тяготеющему центру с выделением гравитационной энергии.

Касаясь истории исследований какого-либо вопроса, ЯБ, ссылаясь на Аверченко, любил говорить: "История мидян темна и неизвестна, учёные делят её, тем не менее, на три периода...". Начало исследований конического типа аккреции было положено в ряде публикаций Хойля, Литтлтона [1–3] и Бонди [4] в конце 1930-х – середине 1940-х годов. В начале 1950-х годов Герман Бонди [5] впервые точно решил стационарную задачу газодинамической сферической аккреции на тяготеющий центр. Им было обнаружено, что газ, покоящийся на большом расстоянии, ускоряется с приближением к тяготеющему центру и вблизи последнего падает со сверхзвуковой скоростью, близкой к скорости свободного падения. Начало исследований дисковой аккреции восходит к работам выдающегося немецкого учёного Карла Фридриха фон Вейцекера [6] (1944 г.) и его аспиранта Реймара Люста [7] (1952 г.), которые были опубликованы в немецком издании *Zeitschrift für Naturforschung*. В этих работах изучалась эволюция допланетного газопылевого облака. Прямого отношения к тем аккреционным дискам, которые изучаются в настоящее время, они не имели, но исходные уравнения движения и особенно проблема вязкого трения были и остаются общими.

В любой области науки появляются выдающиеся работы, в которых демонстрируется новый подход к старым проблемам. Именно к таким работам следует отнести публикацию в 1960 г. Фреда Хойля [8], который ввёл магнитные поля в механизм передачи вращательного момента от Солнца к протопланетному облаку. С другой стороны, если погружаться далее в глубину веков, то, несомненно, стоит отметить изыскания в области происхождения Солнечной системы, выполненные выдающимися учёными прошлого Эммануилом Кантом, Пьером-Симоном Лапласом, Рене Декартом, которые впервые поставили эту проблему на научную основу.

В 1950-х годах были открыты звёздные ветры, которые не позволяют межзвёздному веществу падать на поверхность обычных звёзд. Причины генерации звёздных ветров у разных звёзд (в том числе у нашего Солнца) различны, но аккреция как таковая на обычные одиночные звёзды отсутствует. Иное дело — конечные стадии эволюции звёзд: белые карлики, нейтронные звёзды и особенно чёрные дыры. Нейтронные звёзды настолько компактны, что при сферической аккреции энерговыделение в ударной волне, которая возникает вблизи поверхности звезды, в несколько десятков раз превышает выделение энергии в ядерных реакциях. У чёрных дыр какая-либо физическая поверхность отсутствует (но есть горизонт событий!) и чисто сферическая аккреция не сопровождается мощным энерговыделением. Возможно

только объёмное излучение падающего газа, температура которого возрастает вследствие сжатия по мере приближения к чёрной дыре. Однако картина сферической аккреции существенно усложняется, если в падающем ионизованном газе присутствуют магнитные поля. Как впервые показал в конце 1960-х годов аспирант первого набора ЯБ в МГУ Викторий Фавлович Шварцман (ушедший из жизни очень молодым), в результате сжатия магнитная энергия возрастает настолько сильно, что начиная с некоторого расстояния режим строго сферической аккреции под действием силы Лоренца может нарушаться [9]. При этом включаются связанные с переменным магнитным полем мощные механизмы ускорения заряженных частиц и, как следствие, процессы их нетеплового (синхротронного) излучения. Наблюдательные проявления таких чёрных дыр пока ещё мало изучены.

В середине 1960-х годов были опубликованы две небольшие заметки. Автором одной из них был ЯБ [10], а автором другой — знаменитый американский физик Эд Солпитер [11]. Они обратили внимание на энерговыделение в ударной волне, которая возникает при сверхзвуковом движении (конический режим аккреции) чёрной дыры в некотором обширном газовом облаке. Вблизи чёрной дыры газ после прохождения ударной волны разогревается настолько сильно, что начинает излучать энергию в рентгеновском диапазоне и гамма-диапазоне. Ещё до публикации результатов этих теоретических изысканий в начале 1960-х благодаря запуску высотных ракет, оснащённых соответствующими приборами, были открыты первые космические источники рентгеновского излучения [12].

В те же 1960-е годы ЯБ вместе с Октаем Гусейновым [13, 14] в СССР и несколько лет спустя Кип Торн с Вирджинией Тримбл [15] в США опубликовали работы, в которых предлагалось искать чёрные дыры в двойных звёздных системах в парах с обычными звёздами, которые ещё не прошли все этапы звёздной эволюции. Наше Солнце — звезда одиночная. На небе полно двойных звёздных систем. Кроме того, встречаются тройные и более высокой кратности звёздные системы, связанные законом всемирного тяготения. Открывают двойные системы как по затменным эффектам при фотометрических наблюдениях, так и в результате спектральных наблюдений по эффекту Доплера. Обычно более массивная звезда светит ярче, чем её соседка, обладающая меньшей массой. Гравитационное поле чёрной дыры на больших расстояниях практически такое же, как и у обычной звезды, т.е. гравитационный потенциал почти ньютоновский. Но чёрные дыры по определению, которое дал этим объектам замечательный американский учёный Джон Арчибальд Уиллер (при их классическом, не квантовом(!), изучении), абсолютно ничего не излучают. Внимание учёных привлекли двойные звёзды, в спектрах которых отсутствовали следы более массивного компонента. Были даже созданы небольшие каталоги тесных двойных звёздных систем с невидимыми в оптическом диапазоне спутниками — кандидатами в чёрные дыры. ЯБ с Октаем Гусейновым [13] отмечали, что открытие рентгеновского излучения или гамма-излучения от таких двойных систем свидетельствовало бы о наличии в них чёрных дыр, которые аккрецируют вещество, истекающее с поверхности обычной звезды. Однако число известных к тому времени ярких источников космического рентгеновского излучения было не-

большим и координаты кандидатов в чёрные дыры не совпадали с положениями первых рентгеновских источников на небесной сфере [15].

Как сказано выше, моей первой работой у ЯБ был расчёт структуры и спектра ударной волны, которая возникает вблизи поверхности нейтронной звезды. Эта работа оказалась дипломной и позднее была опубликована [16]. И для меня, и для других студентов соответствующих специальностей того времени большую роль в понимании природы тогда ещё гипотетических нейтронных звёзд и чёрных дыр сыграли две фундаментальные работы ЯБ совместно с Игорем Новиковым [17, 18], опубликованные в *УФН*.

Будучи студентом, я слушал курс лекций по общей астрофизике тогдашнего директора ГАИШ Дмитрия Яковлевича Мартынова. Особое место в этом курсе занимали тесные двойные звёздные системы с перетеканием вещества с поверхности одного компонента на другой. Из-за относительного движения по своим орбитам в процессе такого перетекания вокруг другого компонента формируется дискообразная оболочка. Мне казалось естественным в качестве второго компонента в такую двойную систему поставить чёрную дыру или нейтронную звезду.

Итак, представим себе двойную звёздную систему, состоящую из обычной звезды и чёрной дыры. Размеры обычной звезды в такой системе ограничены так называемой критической полостью Роша. В процессе звёздной эволюции размеры обычной звезды могут увеличиваться и после заполнения полости Роша начинается перетекание вещества с её поверхности в зону гравитационного влияния чёрной дыры (рис. 2а). В двойной системе из-за относительного орбитального движения компонентов вещество не падает прямо на чёрную дыру, а формирует вокруг неё дифференциально вращающуюся дискообразную оболочку. Скопившееся в таком диске вещество из-за трения между соседними слоями сильно разогревается и начинает светиться. Вещество в диске, быстро вращаясь, медленно приближается (аккрецирует) в радиальном направлении к чёрной дыре по мере отдачи момента количества движения. Свечение диска обусловлено выделением гравитационной энергии в процессе аккреции. Наиболее близкие к чёрной дыре внутренние части такого диска разогреваются настолько сильно, что начинают излучать энергию в рентгеновском диапазоне электромагнитного спектра.

Образование аккреционного диска возможно и в более сложном случае, когда оптический компаньон, не заполняя свою полость Роша, истекает во все стороны звёздным ветром. В этом случае естественно ожидать формирования головной ударной волны в зоне гравитационного влияния чёрной дыры на течение звёздного ветра. После прохождения ударной волны в области

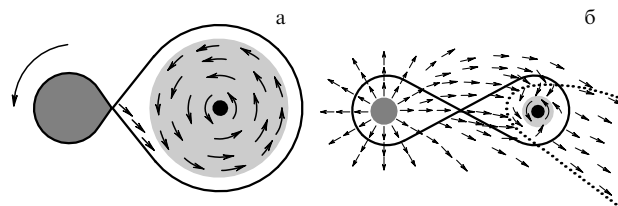


Рис. 2. Два типа формирования аккреционных дисков в тесных двойных системах с релятивистскими звёздами.

"гравитационного" захвата чёрной дыры вещество начинает падать на неё, однако не строго радиально! Из-за орбитального вращения падающее вещество обладает удельным моментом количества движения, который несколько больше, чем орбитальный удельный момент количества движения чёрной дыры. При падении с сохранением момента вещество опережает орбитальное движение чёрной дыры, а затем вблизи чёрной дыры на некотором характерном расстоянии закручивается вокруг неё, формируя диск (рис. 26). Ну а далее опять аккреция в дисковом режиме!

Если в двойной системе на месте чёрной дыры находится сильно замагниченная нейтронная звезда, то её магнитное поле начинает разрушать аккреционный диск на расстоянии примерно 100 радиусов нейтронной звезды. Далее аккрецирующее вещество начинает стремительно падать вдоль магнитных силовых линий, встречаясь с поверхностью нейтронной звезды в окрестности магнитных полюсов. Обычно магнитные полюса не находятся вблизи географических полюсов и нейтронная звезда в результате своего вращения будет наблюдаться как аккреционный пульсар.

Открытие аккрецирующих чёрных дыр и нейтронных звёзд в двойных звёздных системах было сделано в начале 1970-х годов с борта американского специализированного спутника "Ухуру" (Uhuru). Спутник был запущен 12 декабря 1970 г. на почти круговую орбиту высотой около 500 км с плавающей у берегов Кении итальянской платформы "Сан-Марко". День запуска совпал с днём независимости Кении. Именно в честь этого события спутник и был назван "Ухуру", что на языке суахили означает "свобода". Признание в науке не всегда бывает быстрым. Лишь в 2002 г. за эти пионерские изыскания в астрофизике (рис. 3) научному руководителю проекта, американскому учёному итальянского происхождения Риккардо Джааккони, была вручена Нобелевская премия по физике.

Практически одновременно с открытием аккрецирующих чёрных дыр и нейтронных звёзд в двойных системах автором этой публикации под руководством ЯБ была заложена основа теории дисковой аккреции на тяготеющие центры. Научная статья [20] вышла в свет в советском периодическом издании *Астрономический журнал* в 1972 г. Я никогда не забуду доклад всемирно известного учёного Джеффри Бербиджа, который он сделал в Физическом институте им. П.Н. Лебедева Академии наук (ФИАНе) летом 1971 г., о первых результатах, полученных со спутника "Ухуру". Я обсуждал с ним



Н.И. Шакура (слева) и Р.А. Сюняев в начале 1970-х годов.

эти результаты и вручил ему отпечатанный на пишущей машинке вариант своей работы. Когда позднее мои советские коллеги узнали об этом, они мне сказали, что у профессора Бербиджа могут возникнуть проблемы при пересечении советской границы в аэропорту. Но вроде бы ничего страшного не случилось.

Основная работа была выполнена вместе с Рашидом Сюняевым. С ним была создана и детально разработана так называемая стандартная модель дисковой аккреции. Работа была представлена [21] на 55-м симпозиуме Международного астрономического союза, который состоялся в мае 1972 г. в Мадриде. Именно на этом симпозиуме докладывались не только результаты работы спутника "Ухуру", но и первые теоретические разработки по моделированию открытых этим аппаратом компактных рентгеновских источников в двойных звёздных системах, т.е. аккрецирующих чёрных дыр и нейтронных звёзд. Нашу совместную с Рашидом работу докладывал Джим Прингл из Великобритании — и я, и Рашид на тот момент были "невъездными". Доклад представлял собой введение в большую статью, которая вышла из печати в солидном европейском журнале *Astronomy and Astrophysics* [22] в 1973 г. На основании этой работы Игорь Новиков и Кип Торн аккуратно вычислили релятивистские поправки, обусловленные эффектами общей теории относительности вблизи чёрных дыр [23].

Спутник "Ухуру" проработал три года. Для учёных результаты его работы были просто ошеломляющими. Было открыто множество новых рентгеновских источников. В каталоге, составленном в результате трёхлетней работы, их было 339. "Ухуру" проложил дорогу другим космическим обсерваториям. Сейчас число космических рентгеновских источников самой различной природы (необязательно аккрецирующих релятивистских звёзд в двойных системах!) исчисляется несколькими сотнями тысяч.

Наша, выполненная совместно с Рашидом, пионерская работа [22] оказалась весьма популярной. Она не утратила актуальности и сейчас. Число ссылок на неё на конец декабря 2013 г., т.е. спустя 40 лет после публикации, превысило 6400.

Благодаря излучению аккреционных дисков сейчас открыты сверхмассивные (с массой порядка нескольких десятков и даже сотен миллионов солнечных масс) чёр-

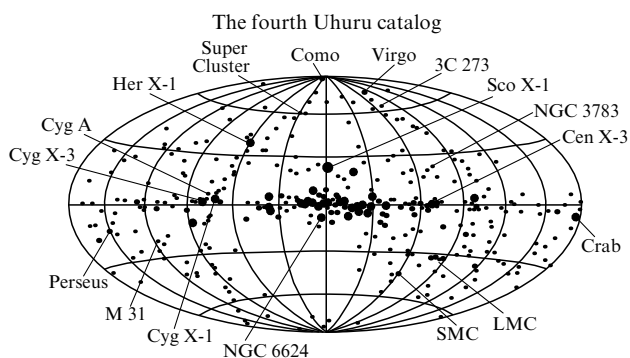


Рис. 3. Первая карта рентгеновского неба, полученная в результате работы спутника "Ухуру" [19].

ные дыры в ядрах активных галактик и квазарах. Первые теоретические изыскания по свечению аккреционных дисков вокруг сверхмассивных чёрных дыр были опубликованы в 1969 г. английским учёным Дэвидом Линденом-Беллом в *Nature* [24]. Современное состояние астрофизики чёрных дыр в двойных звёздных системах, особенно в ядрах галактик и квазарах, описано в этом же номере *УФН* А.М. Черепашуком [25] (см. также [26]). Целью настоящей статьи было рассказать о той выдающейся роли, которую сыграл Я.Б. Зельдович в исследовании наблюдательных проявлений чёрных дыр и становлении теории дисковой аккреции почти полвека назад.

Пока мы были молодыми, контроль со стороны ЯБ за нашей работой был необыкновенно сильным. Однако со временем научные интересы ЯБ сосредоточились на космологии. В копилку мировой космологической науки вошли "блины" Зельдовича, эффект Сюняева–Зельдовича, спектр Зельдовича–Гаррисона и другие результаты его изысканий. Как профессор Московского университета он читал для студентов и аспирантов два годовых курса лекций: один год — по строению и эволюции звёзд, а другой — по космологии. К лекциям он готовился необыкновенно тщательно, записывая их в тонкие школьные тетрадки. Каждый год это были новые тетради. На меня была возложена обязанность оповещения (как сейчас говорят, рекламы) о его курсах посредством развешивания объявлений. Я присутствовал на многих его лекциях. В результате этой деятельности появилось написанное тремя авторами (Зельдович, Блиников и Шакура) учебное пособие *Физические основы строения и эволюции звёзд*, опубликованное издательством МГУ. Тем же издательством было выпущено и другое пособие: *Космология ранней Вселенной* Долгова, Зельдовича, Сагина.

И ещё несколько эпизодов из, так сказать, околонучной жизни. Однажды после окончания очередной лекции Я.Б. Зельдович достал из заднего кармана брюк что-то завернутое в чистый белый платочек. Развернув его, он извлёк скреплённые одной планкой три Звезды Героя Социалистического Труда и попросил меня помочь ему прикрепить эти звёзды на пиджак. Находясь в состоянии лёгкой задумчивости после очередной лекции ЯБ, я машинально выполнил его просьбу, не придав этому особого значения. Академик быстро ушёл из аудитории по своим делам. Позднее я узнал, что он был одним из тех, кто заслужил награды, работая над советским атомным проектом. Сам он никогда не рассказывал о годах, проведённых "там", а я его и не спрашивал об этом по известным причинам. Говорят, что свои наградные звёзды он использовал в тех относительно редких случаях, когда заходил в кабинеты высокого начальства с просьбой посодействовать устройству на работу молодых специалистов.

Как-то я опаздывал на его очередную лекцию и быстро шёл по коридору к аудитории. В дверях аудитории стояли ребята из моей группы и несколько странно смотрели на меня. Буквально на бегу я спросил: "А сам пришёл?" Оглянувшись, я увидел, что "сам" также быстро идёт за мною след в след, прижав палец к губам. С тех пор ЯБ стал для меня ещё и "Сам". Он делал всё сам, соавторы ему ассистировали.

Яков Борисович Зельдович скончался 2 декабря 1987 г. Светлая память о нём сохранится в умах и сердцах тех, кого он учил нелёгкому ремеслу учёного. "Делай, как я! Делай лучше, чем я!" — было жизненным кредо одного из гениальнейших и великих учёных XX в. Он был титаном навсегда ушедшей в реку времени эпохи, эпохи во многом противоречивой и неоднозначной. Впрочем, существуют ли эпохи и их титаны, допускающие однозначное толкование?

## Список литературы

1. Hoyle F, Lyttleton R A *Proc. Camb. Philos. Soc.* **35** 405 (1939)
2. Hoyle F, Lyttleton R A *Proc. Camb. Philos. Soc.* **36** 325 (1940)
3. Hoyle F, Lyttleton R A *Proc. Camb. Philos. Soc.* **36** 424 (1940)
4. Bondi H, Hoyle F *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **104** 273 (1944)
5. Bondi H *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **112** 195 (1952)
6. Weizsäcker C F V *Z. Naturforsch. A* **3** 524 (1948)
7. Lüst R *Z. Naturforsch. A* **7** 87 (1952)
8. Hoyle F *Quart. J. R. Astron. Soc.* **1** 28 (1960)
9. Шварцман В Ф *Астрон. журн.* **48** 479 (1971) [Shvartsman V F *Sov. Astron.* **15** 377 (1971)]
10. Зельдович Я Б *ДАН СССР* **155** 67 (1964) [Zel'dovich Ya B *Sov. Phys. Dokl.* **9** 195 (1964)]
11. Salpeter E E *Astrophys. J.* **140** 796 (1964)
12. Giacconi R et al. *Phys. Rev. Lett.* **9** 439 (1962)
13. Zeldovich Ya B, Guseynov O H *Astrophys. J.* **144** 840 (1966)
14. Гусейнов О Х, Зельдович Я Б *Астрон. журн.* **43** 313 (1966) [Guseynov O Kh, Zel'dovich Ya B *Sov. Astron.* **10** 251 (1966)]
15. Trimble V L, Thorne K S *Astrophys. J.* **156** 1013 (1969)
16. Зельдович Я Б, Шакура Н И *Астрон. журн.* **46** 225 (1969) [Zel'dovich Ya B, Shakura N I *Sov. Astron.* **13** 175 (1969)]
17. Зельдович Я Б, Новиков И Д *УФН* **84** 377 (1964) [Zel'dovich Ya B, Novikov I D *Sov. Phys. Usp.* **7** 763 (1965)]
18. Зельдович Я Б, Новиков И Д *УФН* **86** 447 (1965) [Zel'dovich Ya B, Novikov I D *Sov. Phys. Usp.* **8** 522 (1966)]
19. Giacconi R *The Physics of Non-Thermal Radio Sources. Proc. of the NATO Advanced Study Institute, Urbino, Italy, June 29–July 13, 1975* (NATO Advanced Science Institutes (ASI) Ser. C, Vol. 28, Ed. G Setti) (Dordrecht: Reidel, 1976) p. 229
20. Шакура Н И *Астрон. журн.* **49** 921 (1972) [Shakura N I *Sov. Astron.* **16** 756 (1973)]
21. Shakura N I, Sunyaev R A, in *X- and Gamma-Ray Astronomy. Proc. of IAU Symp., Madrid, 11–13 May 1972* (International Astronomical Union. Symp. No. 55, Eds H Bradt, R Giacconi) (Dordrecht: D. Reidel, 1973) p. 155
22. Shakura N I, Sunyaev R A *Astron. Astrophys.* **24** 337 (1973)
23. Novikov I D, Thorne K S, in *Black Holes* (Eds C DeWitt, B S DeWitt) (New York: Gordon and Breach, 1973) p. 343
24. Lynden-Bell D *Nature* **223** 690 (1969)
25. Черепашук А М *УФН* **184** 387 (2014)
26. Черепашук А М *УФН* **183** 535 (2013) [Cherepashchuk A M *Phys. Usp.* **56** 509 (2013)]

## Academician Zeldovich and the foundations of disc accretion

N.I. Shakura

P.K. Sternberg State Astronomical Institute, M.V. Lomonosov Moscow State University,  
Universitetskii prosp. 13, 119991 Moscow, Russian Federation  
E-mail: nikolai.shakura@gmail.com

The author draws on his memories to review the decisive contributions of Ya. B. Zeldovich to the creation and development of the theory of disc accretion onto black holes and neutron stars in binaries. A theory developed by N. I. Shakura and R. A. Sunyaev in the early 1970s under the guidance of Ya. B. Zeldovich predicted these objects to be the brightest X-ray sources on the sky and defined the prospects for research in X-ray astronomy and high-energy astrophysics for decades ahead.

PACS numbers: 04.25.dg, 97.10.Gz, 97.60.Jd  
Bibliography — 26 references  
*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **184** (4) 445–450 (2014)

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201404h.0445  
Received 5 November 2013, revised 5 December 2013  
*Physics – Uspekhi* **57** (4) (2014)