

## Рашид Алиевич Сюняев

(к 80-летию со дня рождения)

PACS number: 01.60.+q

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.02.039331>

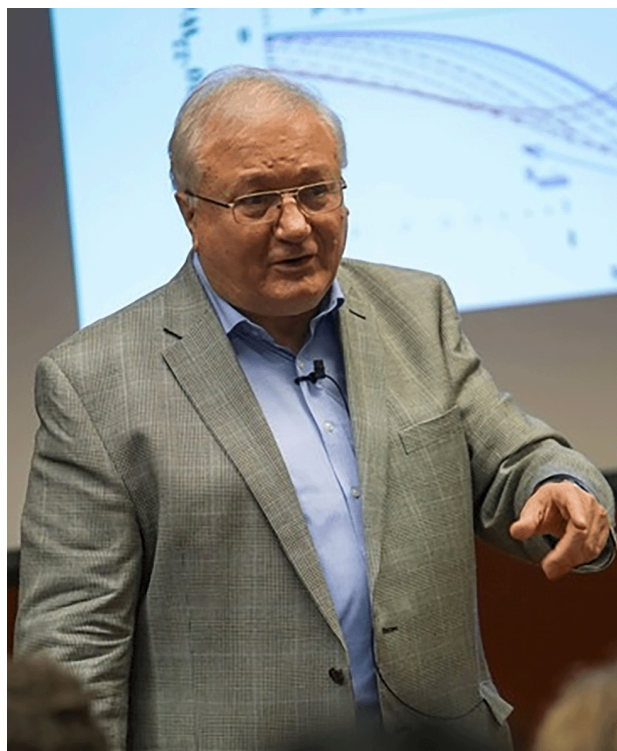
1 марта 2023 г. исполняется 80 лет одному из лидеров мировой астрофизики, академику Российской академии наук (РАН) Рашиду Алиевичу Сюняеву. Работы Р.А. Сюняева охватывают широкий круг астрофизических проблем — от физики элементарных процессов в космических объектах до физической космологии и астрофизики высоких энергий. С его именем связан ряд фундаментальных результатов, вошедших в учебники и университетские курсы по теоретической астрофизике и космологии во всём мире. Среди них тепловой и кинематический эффекты Сюняева–Зельдовича, "акустические пики" в спектре мощности угловых флуктуаций реликтового излучения и "барионные акустические осцилляции", формула Сюняева–Титарчука комптонизационного спектра, стандартная теория дисковой аккреции Шакуры–Сюняева.

Теоретические предсказания, сделанные Я.Б. Зельдовичем и Р.А. Сюняевым в 1970–1980-х гг., заложили основы современной наблюдательной космологии реликтового излучения и способствовали её превращению в точную науку.

Для измерения спектра мощности угловых флуктуаций яркости микроволнового космического фона с целью поиска "акустических пиков" и поиска скоплений галактик по эффекту Сюняева–Зельдовича (СЗ-эффект) были запущены космологические спутники WMAP и Planck, построены уникальные субмиллиметровые телескопы на Южном полюсе Земли и в высокогорной пустыне Атакама в Чили. Диапазоны чувствительности высокочастотного инструмента NFI на спутнике Planck были выбраны так, чтобы оптимизировать поиск скоплений галактик по СЗ-эффекту. Барионные акустические осцилляции детектируются в пространственном распределении галактик в широкоугольных (площадью тысячи квадратных градусов) обзорах неба в оптическом диапазоне, таких как Слоановский обзор неба.

Эффект Сюняева–Зельдовича из красивой теоретической идеи, находившейся далеко за порогом чувствительности радиотелескопов в конце XX века, превратился в один из наиболее продуктивных методов наблюдательной космологии XXI века, открывающий возможность определения основных космологических параметров, в том числе определения роли "тёмной энергии" во Вселенной и прямого измерения постоянной Хаббла. Томсоновские рассеяния фотонов микроволнового фона на горячих электронах межгалактического газа в скоплениях галактик приводят к специфическим искажениям спектра реликтового излучения — для наблюдателя в сантиметровом и миллиметровом диапазонах спектра скопления являются "отрицательными источниками", оставляющими свои "тени" на карте реликтового фона. При помощи СЗ-эффекта спутником Планк, телескопом на Южном полюсе и Атакамским космологическим телескопом были открыты более 7000 скоплений галактик, наиболее далёкое из которых расположено на красном смещении  $z = 1,75$ . Благодаря тому что яркость и спектр СЗ-эффекта не зависят от красного смещения, наблюдения в микроволновом диапазоне эффективны при поиске наиболее далёких скоплений галактик — их уже более тысячи на красных смещениях  $z > 0,5$ . Это открывает уникальную возможность исследовать рост крупномасштабной структуры Вселенной в эпоху доминирования тёмной энергии. Ожидается, что в ближайшие десятилетия новые субмиллиметровые телескопы обнаружат практически все массивные скопления галактик с горячим газом в наблюдаемой части Вселенной, составив конкуренцию рентгеновской астрономии.

Наблюдения реликтового излучения в направлении скоплений галактик позволяют также измерять и их peculiarные скорости движения относительно фонового излучения по кинематическому СЗ-эффекту. В то время как тепловой эффект обусловлен тепловым движением электронов межгалактического газа, кинематический СЗ-эффект описывает спектральное искажение реликтового излучения, вызванное эффектом Доплера за счёт peculiarного движения скопления галактик как целого. Он позволяет измерить peculiarную скорость скопления галактик относительно локальной по отношению к скоплению системы координат, где реликтовое излучение изотропно. В



Рашид Алиевич Сюняев

течение предыдущего десятилетия кинематический СЗ-эффект был открыт как в суммарном сигнале от сотен тысяч галактик Атакамским космологическим телескопом, спутником Planck и Телескопом на Южном полюсе так и в индивидуальных скоплениях галактик инструментами BOLOCAM и NIKA2. Низкие измеренные peculiarные скорости скоплений галактик (или полученные с помощью kSZ верхние пределы) по сравнению со скоростями хаббловского потока для тех же объектов являются прямым экспериментальным подтверждением справедливости принципа Коперника для нашей Вселенной вплоть до красных смещений  $z \sim 1,5$ .

В 1970 г. Сюняев и Зельдович предсказали существование акустических пиков в угловом распределении реликтового излучения. Наряду с СЗ-эффектом, это открытие оказало огромное влияние на развитие современной наблюдательной космологии. Положение и относительная интенсивность первых доплеровских пиков определяется значениями ключевых параметров Вселенной: постоянной Хаббла, барионной плотности и плотности тёмной материи и энергии во Вселенной. В 2000 г. первые акустические пики были обнаружены в баллонных экспериментах, а спутники WMAP и PLANCK детально их исследовали.

Много внимания уделял Сюняев физическим процессам в ранней Вселенной: кинетике рекомбинации водорода, проблеме термализации реликтового излучения и процессам, приводящим к отклонениям его спектра от планковского. Вместе с Зельдовичем они определили положение "чернотельной фотосферы" нашей Вселенной и "поверхности последнего рассеяния" реликтовых фотонов, а совместно с Я.Б. Зельдовичем и В.Г. Куртом рассчитали кинетику рекомбинации водорода в ранней Вселенной, показав, что данный процесс контролируется двухфотонным распадом уровня  $2s$ . В 2000-х гг. эти исследо-

вания были продолжены совместно с Й. Хлубой, Р. Хатри и др. с использованием вычислительных возможностей, предоставляемых современными компьютерами.

Теория аккреционных дисков Шакуры–Сюняева стала общепринятой при описании переноса вещества и энерговыделения в аккреционных дисках тесных двойных систем, включающих чёрные дыры или нейтронные звёзды, при аккреции на сверхмассивные чёрные дыры и в протопланетных дисках. В 2023 году исполняется 50 лет статье Н.И. Шакуры и Р.А. Сюняева "Чёрные дыры в двойных системах. Наблюдательные проявления", самой цитируемой работе мировой теоретической астрофизики, набравшей более 11200 ссылок. Аккрецирующие нейтронные звёзды и чёрные дыры в двойных звёздных системах наблюдаются как мощные рентгеновские источники. Основным механизмом формирования их рентгеновского излучения является комптонизация низкочастотных фотонов при их многократных томсоновских рассеяниях на высокотемпературных электронах. Формула Сюняева–Титарчука впервые позволила описать спектры, формирующиеся при комптонизации излучения в облаках горячей плазмы. Совместно с М.М. Баско, Ю.Н. Гнединым, А.Ф. Илларионовым, Н.А. Иногамовым, Ю.Э. Любарским, В.М. Лютым, Н.Р. Сибгатуллин, А.М. Черепашуком и др. в 1970–1980-е гг. были сформулированы и решены ряд задач физики рентгеновских двойных систем: о поляризации рентгеновского излучения аккрецирующих нейтронных звёзд, формировании гиролиний в их спектрах, возникновении аккреционной колонки и возможности сверхэддингтоновской светимости у аккрецирующих нейтронных звёзд с сильными магнитными полями, об "эффекте пропеллера", о пограничном слое (слое растекания) у поверхности слабозамагниченной нейтронной звезды, о важности отражённого излучения в рентгеновских двойных звёздах и многие другие. Перечисленные работы широко известны в мире астрофизики и не потеряли своей актуальности и сегодня.

С именем Р.А. Сюняева связано становление рентгеновской астрономии в стране и успех советских и российских орбитальных обсерваторий астрофизики высоких энергий с широким международным участием — РЕНТГЕН (на модуле КВАНТ комплекса космической станции "Мир") и ГРАНАТ. Р.А. Сюняев осуществлял научное руководство отбором и разработкой аппаратуры для этих обсерваторий, выбором параметров их орбит и определением их программ наблюдений. Он является научным руководителем от Российской Федерации (РФ) ныне действующих международной орбитальной обсерватории гамма-лучей ИНТЕГРАЛ и рентгеновской орбитальной обсерватории СПЕКТР-РГ (СРГ). Все перечисленные четыре орбитальные обсерватории были запущены ракетами ПРОТОН с космодрома Байконур (ныне Казахстан).

Продолжает успешную работу обсерватория гамма-лучей ИНТЕГРАЛ Европейского космического агентства. За вывод ИНТЕГРАЛа на высокоапогейную орбиту Роскосмосом в 2002 г. российские учёные получили 25 % наблюдательного времени этой обсерватории. Среди её результатов — измерение спектра и карты аннигиляционного излучения орто- и парапозитрония в большой области вокруг Центра нашей Галактики, где аннигилирует более  $10^{43}$  позитронов в секунду. ИНТЕГРАЛ обнаружил гамма-линии радиоактивного распада кобальта-56 от сверхновой SN2014J, ярчайшей и самой близкой к Земле сверхновой типа Ia за последние 42 года. Это было первое экспериментальное обнаружение синтеза железа (0,6 массы Солнца) при термоядерном взрыве аккрецирующего белого карлика или двух сливающихся белых карликов.

13 июля 2019 г. на орбиту вокруг точки Лагранжа L2 системы Солнце–Земля, находящейся на расстоянии 1,5 млн км от Земли, была выведена обсерватория СРГ с двумя рентгеновскими телескопами: российским ART-XC им. М. Павлинского, чувствительным к рентгеновским лучам в диапазоне от 4 до 30 кэВ, и немецким eRosita (диапазон чувствительности от 200 эВ до 8 кэВ). За создание упомянутой обсерватории и работу с ней на орбите отвечало и отвечает НПО имени С.А. Лавочкина. Оба телескопа оснащены рентгеновскими зеркалами с оптикой косоугольного падения и замечательными позиционно чувствительными детекторами рентгеновского излучения. Научным руководителем обсерватории от РФ является Р.А. Сюняев. На сегодняшний день, после более чем двух лет сканирования неба, телескоп СРГ/eRosita построил лучшую в мире карту всего неба в рентгеновских лучах; обнаружил на всём небе более 2 млн активных ядер галактик и квазаров (а это аккрецирующие сверхмассивные чёрные дыры массой от миллиона до миллиардов масс Солнца), полмиллиона звёзд с активными коронами и около 50 тысяч скоплений галактик (около половины таких объектов, ожидаемых в наблюдаемой части нашей Вселенной). Команды учёных-астрофизиков в России и Германии работают с полученными данными, ими уже сделано немало интересных открытий. Телескоп ART-XC сейчас ведёт сканирование плоскости нашей Галактики в рентгеновских лучах.

Рашид Алиевич родился в Ташкенте в семье уроженцев Пензенской губернии — инженера-строителя Али Сюняева и фармацевта Саиды Кильдеевой. По рассказам Р.А. Сюняева, его отец из-за происхождения и ссылки семье не мог получить образование по интересовавшим его специальностям, но всю жизнь занимался самообразованием и был человеком с энциклопедическими знаниями. Тесное общение с отцом сильно влияло на сына-школьника и привило тягу к книгам, а затем и желание заниматься наукой. Весной 1960 г. Рашид Сюняев занял первое место на математической олимпиаде четырёх республик Средней Азии (ныне Узбекистан, Киргизстан, Таджикистан, Туркменистан) и Казахстана. В том же году он окончил школу с медалью и поступил в Московский физико-технический институт (МФТИ). В 1966 г. он окончил с отличием МФТИ. Руководителем его преддипломной практики, дипломной работы, а затем и в аспирантуре МФТИ был один из крупнейших советских физиков-теоретиков, трижды Герой Социалистического Труда академик Я.Б. Зельдович. Встреча с Я.Б. Зельдовичем в марте 1965 г. была громадным везением для студента Сюняева, Яков Борисович был прекрасным научным руководителем. Их тесное научное сотрудничество продолжалось до кончины Я.Б. Зельдовича в 1987 г.

В апреле 1968 г. Сюняев защитил в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга при Московском государственном университете (МГУ) им. М.В. Ломоносова кандидатскую, а в 1973 г. — докторскую диссертации. С 1968 г. Сюняев работал в Институте прикладной математики АН СССР в отделе астрофизики, которым руководил Я.Б. Зельдович. Весной 1974 г. академик Р.З. Сагдеев (ставший директором Института космических исследований (ИКИ) АН СССР) пригласил Я.Б. Зельдовича создать в ИКИ АН СССР отдел теоретической астрофизики. Р.А. Сюняев был приглашён возглавить сектор в новом отделе. С июня 1974 г. (более 48 лет) он работает в ИКИ. В 1982 г. Р.А. Сюняев создал и возглавил в ИКИ отдел Астрофизики высоких энергий, который был ведущим по всем успешным советским и российским проектам в области рентгеновской астрономии. С сентября 1995 г. по март 2018 г. Р.А. Сюняев одновременно был одним из директоров Института астрофизики Общества им. Макса Планка в Гархинге, пригороде Мюнхена в Германии.

В 1984 г. Сюняев был избран членом-корреспондентом АН СССР, а в 1992 г. — действительным членом РАН. Он иностранный член Национальных академий наук США, Индии, Германии "Леопольдина", Лондонского королевского общества, Королевской академии наук и искусств Нидерландов и Европейской академии (Academia Europaea), почётный член Академии наук Республики Татарстан и ряда других академий, иностранный член Американского астрономического, физического и философского обществ, Королевского астрономического общества Великобритании.

Р.А. Сюняев — дважды лауреат Государственных премий РФ, премии РАН им. Александра Фридмана, золотых медалей РАН им. Зельдовича и АН Татарстана; премии Грубера по космологии, премии Крафурда по астрономии и медали им. Клейна Королевской академии наук Швеции; премий Киото (Япония) по астрономии, Хайнемана и Бруно Росси Американского астрономического общества, Короля Фейсала по физике, медалей им. Карла Шварцшильда Германского астрономического общества, им. Дирака Международного центра теоретической физики в Триесте, им. Бенджамина Франклина по физике, золотой и Эддингтоновской медалей Королевского астрономического общества Великобритании, золотых медалей им. Макса Планка — высшей награды Физического общества Германии в области теоретической физики, им. Катерины Брюс Тихоокеанского астрономического общества и им. сэра Мессис КОСПАР и Лондонского королевского общества. В 2014 г. он избран Эйнштейновским профессором Академии наук Китая. В честь Р.А. Сюняева назван астероид 11759 Sunyaev.

Согласно NASA ADS на статьи Р.А. Сюняева сделано более 113800 ссылок, индекс Хирша равен 129. В 2017 г. он вошёл в список двадцати двух наиболее цитируемых исследователей, ежегодно составляемый компанией Clarivate Analytics (ранее Thomson Reuters).

Рашид Алиевич — главный научный сотрудник ИКИ РАН, директор-эмеритус Института астрофизики Общества им. Макса Планка, выдающийся приглашённый профессор Института высших исследований в Принстоне, он почётный профессор Казанского федерального университета и университета Людвиг-Максимилиана в Мюнхене, почётный член Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе.

Коллеги, друзья и ученики поздравляют юбиляра с 80-летием и желают крепкого здоровья и продолжения увлекательнейшего путешествия в мире астрофизики и космологии.

*И.Ф. Бикмаев, А.А. Вихлинин, М.Р. Гильфанов, С.А. Гребенев, Л.М. Зелёный, А.А. Лутовинов, А.А. Петрукович, К.А. Постнов, А.А. Старобинский, А.М. Черепашук, Е.М. Чуразов, Н.И. Шакура*