

С.А. Каплан

**Элементарная
радиоастрономия**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
С11

С11 **С.А. Каплан**
Элементарная радиоастрономия / С.А. Каплан – М.: Книга по Требованию,
2014. – 276 с.

ISBN 978-5-458-41062-5

Автор предлагаемой книги ставил своей целью дать современное изложение основ радиоастрономии на вполне научном уровне, сохранив глубину ее физических идей, но используя при этом элементарный аппарат математики и физики, знакомый каждому, имеющему среднее образование. Как обычно, в таких случаях говорят: «насколько это удалось — пусть судит читатель». Автор надеется, что книга будет интересна школьникам старших классов и студентам, желающим познакомиться не только с результатами радиоастрономии, но и с основными теоретическими методами их получения и анализа. Автор также надеется, что книга будет полезной и для более квалифицированного читателя, поскольку простой вывод формул и их объяснение зачастую помогают лучше понять картину явлений и зависимостей, которые в учебниках иногда получают формальным путем. Формулы выводятся в книге элементарным путем и поэтому часто оказываются приближенными. Во всех случаях, где это было необходимо, мы приводили и точные выражения.

ISBN 978-5-458-41062-5

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2014

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2014

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Автор предлагаемой книги ставил своей целью дать современное изложение основ радиоастрономии на вполне научном уровне, сохранив глубину ее физических идей, но используя при этом элементарный аппарат математики и физики, знакомый каждому, имеющему среднее образование. Как обычно, в таких случаях говорят: «насколько это удалось — пусть судит читатель». Автор надеется, что книга будет интересна школьникам старших классов и студентам, желающим познакомиться не только с результатами радиоастрономии, но и с основными теоретическими методами их получения и анализа.

Автор также надеется, что книга будет полезной и для более квалифицированного читателя, поскольку простой вывод формул и их объяснение зачастую помогают лучше понять картину явлений и зависимостей, которые в учебниках иногда получаются формальным путем. Формулы выводятся в книге элементарным путем и поэтому часто оказываются приближенными. Во всех случаях, где это было необходимо, мы приводили и точные выражения.

Для чтения книги не требуется специальных знаний ни по математике, ни по физике, ни по астрономии. Но было бы неплохо, если бы читатель предварительно познакомился с книгой О. Струве, Б. Линдса, Э. Пилланс «Элементарная астрономия» (Изд-во «Наука», 1964 г.).

В книге использована международная система единиц СИ. Астрономы, как и другие ученые, еще не приняли ее в своей повседневной работе, и поэтому некоторые численные значения величин и формулы могут показаться непривычными. Автор все же решил использовать эту систему хотя бы потому, что она сейчас широко входит

в практику средней и высшей школы. Правда, некоторым читателям покажется несколько неудобным использовать для напряженности магнитного поля единицу «ампервиток на метр» (av/m) вместо привычного «эрстед» (\mathcal{E}). Нужно запомнить, что численное значение напряженности магнитного поля в av/m почти в 80 раз больше численного значения величины этого поля в \mathcal{E} .

Автор искренне благодарен всем оказавшим ему помощь в подготовке книги. В основу книги положен курс лекций, прочитанных автором в средней математической школе г. Горького по предложению директора этой школы В. Я. Векслера.

Много существенных замечаний и советов получил автор от А. А. Андропова, В. В. Железнякова, В. В. Зайцева, Н. С. Кардашева, Ю. Н. Парийского, В. Ю. Трахтенгерца. Помощь в подготовке рукописи оказал Т. С. Подстригач.

Наиболее ценные рекомендации по всей книге были сделаны С. Б. Пикельнером.

С. А. Каплан

Июнь 1965

ГЛАВА 1

ОТ РАДИОВЕЩАНИЯ К РАДИОАСТРОНОМИИ

Многие из читателей этой книги, вероятно, не раз часами сидели за радиоприемником, пытаясь среди шума и треска «выловить» слабые сигналы далекой радиостанции. Но вряд ли при этом задумывались над тем, что работа радиоастронома — об этой новой бурно развивающейся области современной науки знают, конечно, все — очень похожа на подобную «ловлю» слабых радиосигналов. Вскоре читатель убедится в том, что между слушанием радиовещательных передач и приемом космического шума — основной задачей радиоастронома — нет принципиальной разницы. Дело только в технике.

Поэтому сначала коротко напомним, в чем заключается принцип радиовещания. Как работает передающая радиостанция — нам сейчас знать не нужно. Существенно то, что генераторы радиостанции создают в ее антенне быстропеременные электрические токи. Известно, что при этом вокруг нее образуются также быстропеременные электромагнитные поля, которые отрываются от антенны и распространяются в пространстве со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/сек в виде радиоволн.

Достигая приемной антенны, радиоволны возбуждают в ней электрические токи, подобные токам в антенне передатчика. Этот процесс называется электромагнитной индукцией; она подробно изучается в школьном курсе физики. Из антенны токи попадают в приемник и в нем преобразуются в звуковые колебания. Это тоже хорошо известно.

Но сейчас для нас важнее другое. Нашей антенны достигают не только радиоволны от слушаемой нами

радиостанции. К ней приходят радиоволны от десятков и сотен разных радиостанций. Кроме того, на антенну попадают и радиоволны, излучаемые в природных явлениях (молниях) и индустриальные помехи (например, заметное радиоизлучение создают системы зажигания автомобилей, рентгеновские и сварочные установки). Радиостанции, а также искусственные и естественные источники помех возбуждают самые разнообразные токи в антенне, и если бы мы присоединили прямо к ней чувствительные телефоны с детектором, то услышали бы только шум и треск.

С этого шума и началась радиоастрономия. Заметим, кстати, что в английском языке космическое радиоизлучение часто просто называется космическим шумом.

Рассмотрим типичный и, вероятно, хорошо знакомый читателю пример шума: настраиваемый оркестр. Каждый инструмент создает звуковые волны определенной частоты. Если бы играли только одну ноту на одном инструменте, мы бы отчетливо уловили звуки этой частоты и могли бы сразу указать, какая это частота. Но если из всех инструментов оркестра при настройке извлекают звуки самой разнообразной частоты, то соответствующие звуковые волны налагаются друг на друга так, что наше ухо уже не в состоянии различать отдельных звуков. Мы слышим только нестройный шум.

В сущности, примерно то же происходит и в нашей антенне. Колеблющиеся электрические токи, возбуждаемые в ней разными радиоволнами, налагаются друг на друга и создают то, что мы будем называть электрическим шумом. Он складывается как из звуковых частот (от 16 до 20 000 колебаний в секунду), так и из высокочастотных радиоволн с миллионами и миллиардами колебаний в секунду.

Теперь мы подошли к главной задаче радиовещательного приемника — выловить из этого электрического шума передачу интересующей нас радиостанции. Мы знаем, что каждый радиопередатчик характеризуются определенной длиной излучаемых им волн. Это означает, что в его антенне возбуждаются быстропеременные электрические токи, частота которых имеет вполне определенную величину. Частоты мы будем выражать в герцах, сокращенно — *гц* (эта единица соответствует 1 колебанию в секунду), и в более крупных единицах — килогерцах (*кгц* —

тысяча колебаний в секунду), мегагерцах (*Мгц* — миллион колебаний в секунду), гигагерцах (*Ггц* — миллиард колебаний в секунду). В радиоастрономии чаще всего пользуются мегагерцами. Частота f и длина радиоволны λ связаны между собой и со скоростью распространения электромагнитных волн в пустоте $3 \cdot 10^8$ м/сек формулой:

$$f(\text{Мгц}) = \frac{300}{\lambda(\text{м})}. \quad (1)$$

Скорость распространения радиоволн в воздухе немного меньше их скорости в пустоте, но этим различием вполне можем пренебрегать. Например, радиостанция, работающая на волне $\lambda = 30$ м, излучает электромагнитные волны с частотой 10 *Мгц*. Подобную частоту принято называть несущей. Сама несущая волна никакой информации не несет. В самом деле, какие сведения можно извлечь из того факта, что в антенне приемника ток колеблется с постоянной амплитудой и строго определенной частотой? Ровно ничего. Для передачи сообщений в радиовещании излучаемую радиостанцией волну модулируют. Это делают, либо меняя амплитуду несущей волны, т. е. накладывая на нее электрические колебания со звуковыми частотами (так называемая амплитудная модуляция), либо меняя частоту самой излучаемой радиоволны, путем сложения ее с частотой звуковых колебаний (частотная модуляция). Тогда уже несущая частота вполне оправдывает свое название: она как бы «несет» на себе звуковые колебания. Но зато теперь как в случае амплитудной, так и в случае частотной модуляции радиостанция излучает не одну волну со строго определенной частотой, а целый интервал частот, заполненный радиоволнами.

Это можно проиллюстрировать на примере частотной модуляции. Чтобы передать человеческую речь, надо использовать колебания с частотами от 80 *гц* до 1,2 *кгц*. Значит в этом интервале, равном примерно 1,1 *кгц*, должна меняться и несущая частота. В действительности интервал частот следует брать больше: во-первых, для правильной передачи тембра человеческого голоса и особенно для неискаженного звучания музыки необходимы частоты до 16 *кгц*; во-вторых, частоты звуковых колебаний могут не только складываться с несущей, но и вычитаться из нее, поэтому ширину интервала приходится удваивать. Таким образом, интервал частот, в котором должна излучать

радиостанция, оказывается равным 32 кГц. Однако такой интервал слишком широк при огромном количестве современных радиостанций, густо заселивших эфир. Обычно каждой радиовещательной станции отводится интервал всего в 9 кГц. Очень больших частотных интервалов требует телевидение — до 10—20 МГц. Поэтому ему всегда отводится ультракоротковолновый диапазон (λ до 10 м), где, как следует из формулы (1), несущая частота должна быть больше 30 МГц.

Мы, может быть, несколько дольше, чем нужно, задержались на описании этих простых фактов, хорошо известных читателю. Очень важно понять, что основная задача радиовещательного приемника заключается в том, чтобы из общего электрического шума в антенне, возбужденного наложением всевозможных колебаний от попадающих на нее радиоволн, «вырезать» полосу частот, соответствующих данной радиостанции, и извлечь потом из них передаваемую информацию, т. е. звуковые волны.

В сущности, тем же самым занимается и радиоастрономия. Все космические тела в той или иной мере излучают радиоволны. Эти радиоволны доходят до Земли, попадают на антенны и возбуждают в них электрические «шумовые» токи, правда, исключительно слабые. Из этого шума радиоастрономический приемник также «вырезает» полосы частот от нескольких кГц до десятков МГц (а иногда до сотен и тысяч МГц). Анализируя эти полосы частот, радиоастроном тоже пытается извлечь из них некоторую информацию. Но это уже не звуковые колебания, хотя колебания такой частоты и присутствуют в некоторых космических шумах. Радиоастронома прежде всего интересует количество энергии, приносимое радиоволнами в каждом интервале частот.

Пожалуй, радиоастронома можно сравнить с радиолобителем-коротковолновником, которому важнее поймать наиболее далекие и слабые станции и которого мало интересует содержание передач — коротковолновники все равно обмениваются короткими стандартными фразами.

Итак, основная задача радиоастронома — определить поток энергии, приносимой радиоволнами на Землю в разных интервалах частот. Для измерения этого потока радиоастрономы придумали специальную единицу и назвали ее «янский» — в честь американского инженера, впервые в мире услышавшего космический шум.

В системе СИ 1 янский (*ян*) равен энергии 10^{-26} джоуля, приносимой за 1 *сек* на площадку в 1 м^2 волнами, частоты которых находятся в интервале 1 *гц*, т. е.:

$$1 \text{ ян} = 10^{-26} \frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{гц}}. \quad (2)$$

Современные средства позволяют радиоастрономам регистрировать потоки энергии радиоволн порядка 1 *ян* или даже меньше. Конечно, такая величина очень мала. Но надо иметь в виду, что радиоастрономы принимают радиоволны в частотных интервалах до 10^6 *гц* или даже еще более широких и используют антенны площадью в десятки тысяч м^2 . Поэтому полная мощность принимаемого радиотелескопом космического излучения может достигать $10^{-26} \cdot 10^6 \cdot 10^4 = 10^{-16}$ *вт*. Это уже не так мало: известно, что человеческое ухо слышит жужжание комара на расстоянии до 2 *м*, — при этом принимаемая энергия составляет $25 \cdot 10^{-16}$ *вт*.

Интересно, что чувствительность глаза в темноте тоже примерно равна 1 *ян*. Надо только помнить, что глаз воспринимает сразу огромную полосу частот — до $4 \cdot 10^{14}$ *гц*, поэтому попадающая в него мощность света составляет $10^{-26} \cdot 4 \cdot 10^{14} \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^2 = 25 \cdot 10^{-18}$ *вт* ($2,5 \cdot 10^{-3}$ *м* = = 2,5 *мм* — диаметр зрачка).

Чувствительность радиовещательного приемника первого класса со средней антенной и полосой частот 10 *кГц* примерно равна 10^9 *ян*, т. е. почти в миллиард раз хуже, чем у радиотелескопов.

Радиовещательные станции излучают энергию радиоволн только в сравнительно небольшом интервале частот. В ряде случаев и космический шум сосредоточен в небольших частотных интервалах. Но чаще космические тела излучают радиоволны практически всевозможных частот. Например, Солнце излучает миллиметровые, сантиметровые, дециметровые, метровые, декаметровые и т. д. радиоволны, т. е. Солнце испускает радиоизлучение на любой частоте. Правда, количество излучаемой на разных частотах энергии различно: например, Солнце больше излучает энергии на дециметровых волнах, чем на сантиметровых. Поэтому радиоастрономам приходится измерять радиоизлучение Солнца на всех частотах (каждый раз в определенном частотном интервале) и сравнивать затем результаты измерений между собой. Эта операция

называется определением спектра радиоизлучения Солнца. Так же радиоастрономы поступают и с другими источниками космического излучения.

Мы сами часто проделываем подобную операцию, слушая радио. Повертывая ручку настройки по всему диапазону, находим тот участок, где шумы и трески меньше, и там стараемся найти станцию с хорошей музыкой. В сущности, мы при этом определяем спектр электрического шума (т. е. сравниваем, где шум больше, а где меньше).

Итак, в результате измерений радиоастроном определяет спектр радиоизлучения космического объекта, т. е. количество энергии, излучаемое им в виде радиоволн с разными частотами. Спрашивается, что это дает? Позволим себе ответить вопросом на вопрос. Вы слушаете передачу на иностранном языке; что это Вам дает? Ровно ничего, если вы не знаете этого языка. Так и в радиоастрономии. Если мы не знаем «языка», на котором «говорит» небесный объект, т. е. не знаем физических процессов, при которых возникает его радиоизлучение, то мы ничего не извлечем из его спектра. Но если мы знаем этот «язык», можем разбираться в механизмах радиоизлучения, — тогда этот спектр скажет нам очень многое. Изучением радиоастрономического «языка» мы и займемся в следующей главе.

Читателю уже, вероятно, ясно, как радиоастрономия непосредственно «выросла» из радиовещания. Приведем, кстати, еще один пример. Если вы слушаете транзисторный приемник на средних волнах, то вам приходится прежде всего его повертеть в руках, чтобы направить спрятанную в его корпусе антенну на передающую радиостанцию. Так же поступает и радиоастроном, — разве что поворот огромной антенны для того, чтобы направить ее на интересующий источник радиоволн, требует несколько больших усилий.

Как возникла радиоастрономия

Существование радиоволн было предсказано Максвеллом в 1873 г. Радиоволны были впервые открыты Герцем в 1887 г. и в 1895 г. были использованы Поповым для радиосвязи. Еще в те годы у ученых возникло подозрение, что радиоволны, которые ничем, кроме частоты, не отличаются от видимого света, должны излучаться и небесны-

ми телами, в частности Солнцем. В 1890 г. Эдисон в США и в 1894 г. Лодж в Англии независимо друг от друга предложили поставить опыты по обнаружению радиоизлучения Солнца.

Тогда эти опыты не могли удасться; теперь мы знаем, что для приема космического излучения нужны очень чувствительные приемники, о которых в те годы нельзя было и мечтать. Радиоастрономия смогла родиться лишь почти сорок лет спустя.

Несмотря на то, что возможность радиоизлучения из космоса была предсказана давно, открытие его оказалось почти случайным. Так часто бывает с большими открытиями.

В 20-х годах нашего века приобрела большое практическое значение радиотелефонная связь как на длинных, так и, особенно, на коротких волнах. Однако в сравнении с проводной связью у радиотелефона существует большой недостаток — наличие помех. Главным источником помех в длинноволновых и коротковолновых диапазонах (но не для ультракоротковолновых) являются атмосферные электрические разряды при грозах. В наших северных широтах грозы происходят не слишком часто, да и обычно приходятся на определенное время года. Но на Земле есть места, где грозы бывают чуть ли не каждый день, причем круглый год. И хотя «грозовые» области расположены главным образом в тропиках, создаваемые ими помехи настолько интенсивны, что распространяются по всему земному шару.

Грозовые помехи мешали и трансатлантической радиотелефонной связи, которая была налажена известной фирмой «Белл» в США. Поэтому дирекция фирмы поручила только что окончившему университетинженеру Карлу Янскому исследовать эти помехи на тех волнах, где проводилась радиотелефонная связь — на длинной волне ($\lambda = 4000$ м) и на очень короткой, по темвременам, волне ($\lambda = 14,6$ м), т. е. на частоте 20,5 Мгц.

В свое распоряжение Янский получил самый чувствительный радиоприемник того времени, построенный Фирсом в 1928 году. В марте 1929 г. Янский начал конструировать вращающуюся направленную антенну: его первая задача заключалась в том, чтобы определить направление, откуда приходили грозовые помехи. Забегая немного вперед, скажем, что ему действительно удалось

показать, что существуют три группы помех: местные грозовые разряды, попадающие в его антенну со всех сторон, дальние грозовые разряды, шедшие по определенным направлениям вдоль Земли, и внеземные помехи, приходящие по определенным направлениям с неба.

Проводя наблюдения в течение целого года, Янский уже к декабрю 1932 года смог с уверенностью указать место на небе, откуда исходят внеземные помехи. Оказалось, что наибольшая интенсивность этих помех приходилась на ту часть Млечного Пути, в которой расположен центр Галактики, другой источник помех располагался в противоположном направлении. Солнце не создавало заметных помех. Еще не догадываясь, что он открыл новую область науки, Янский дал и первое объяснение наблюдаемого радиоизлучения. Он обратил внимание на то, что устойчивый свистяще-шипящий звук космической помехи, резко отличающийся от тресков грозовых разрядов, больше похож на шум, созданный тепловым движением электронов. Поэтому Янский предположил, что источником космического радиоизлучения является тепловое движение электронов в межзвездной среде. Догадка Янского была верна только наполовину: наблюдавшееся им радиоизлучение было нетеплового происхождения, но межзвездный газ дает и тепловое излучение (оно было обнаружено, однако, позднее).

В сущности, открытие Янского не было совсем случайным. Напомним, что в его распоряжении был самый чувствительный приемник того времени и наиболее остро-направленная антенна (рис. 1). Кроме того, в 1932 г. Солнце было очень спокойным, на нем почти не было пятен и вспышек. Именно это не позволило Янскому обнаружить радиоизлучение Солнца, которое наиболее интенсивно в периоды его повышенной активности; но зато в этот год была спокойна и достаточно прозрачна для радиоволн ионосфера Земли. Поэтому Янский мог регулярно наблюдать интенсивное излучение Млечного Пути на волне $\lambda = 14,6 \text{ м}$, которое часто не пропускается ионосферой.

Янский хотел продолжить исследования обнаруженного им космического излучения, однако он вынужден был заняться другими проблемами. Ему было 27 лет, когда он открыл для астрономии новые блестящие перспективы. К сожалению, Янский не дожил до расцвета радиоастрономии.