

# САМЫЙ ЭНЕРГИЧНЫЙ СВЕТ

## НЕКОТОРЫЕ ФАКТЫ О ГАММА-ЛУЧАХ

Кандидат физико-математических наук Алексей ПОНЯТОВ.

*Гамма-лучи — высокочастотное электромагнитное излучение, обладающее фотонами с наибольшей энергией, способными «пробить» металлическую или бетонную преграду. Оно рождается на Земле и в космосе, в микромире — при радиоактивном распаде и аннигиляции частиц и в грандиозных астрономических процессах гибели звёзд и формирования галактик. Гамма-излучение используется человеком не только в научных целях, но и в медицине и промышленности.*

### 1. ОТКРЫТИЕ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ НАЗВАНИЯ. ЗАБЫТЫЙ ПОЛЬ ВИЛЛАР

Авторитет Эрнеста Резерфорда настолько велик, что очень часто открытие гамма-излучения приписывается ему, однако это не так. Восстановим хронологию событий. В 1896 году французский физик Анри Беккерель открыл радиоактивность. Он обнаружил, что соединение урана испускает «невидимую радиацию» (*radiatio* переводится с латыни как «излучение»). Это породило настоящий бум исследований. В 1898 году Пьер и Мария Кюри открыли ещё два вещества: полоний и радий, активность которых была выше урана. В 1903 году все трое получили Нобелевскую премию по физике.

В 1899 году Эрнест Резерфорд, работавший тогда в Канаде, выделил две составляющие радиоактивного излучения урана по степени их поглощения в веществе. В своём опыте он пропускал радиацию урана между находящимися под напряжением электродами. Из-за ионизации газ между электродами начал проводить ток, по величине которого Резерфорд оценивал интенсивность радиоактивного излучения. Затем на его пути он поставил алюминиевую пластинку и выяснил, что ток при этом уменьшался, но не прекращался. Отсюда Резерфорд сделал вывод, что одни лучи урана легко поглощаются, а другие обладают большей проникающей способностью. Первые он назвал альфа-излучением ( $\alpha$ ), а вторые

бета-излучением ( $\beta$ ) по первым буквам греческого алфавита, как он написал в своей статье, «для удобства», но названия прижились и дожили до наших дней.

Мог ли Резерфорд открыть тогда же гамма-излучение? Нет. Основным источником гамма-излучения в цепочке распада изотопа урана-238 является радий-226. То количество урана, которое Резерфорд использовал в своём эксперименте, содержало мало радия и соответственно излучало так мало гамма-квантов, что их просто невозможно было обнаружить.

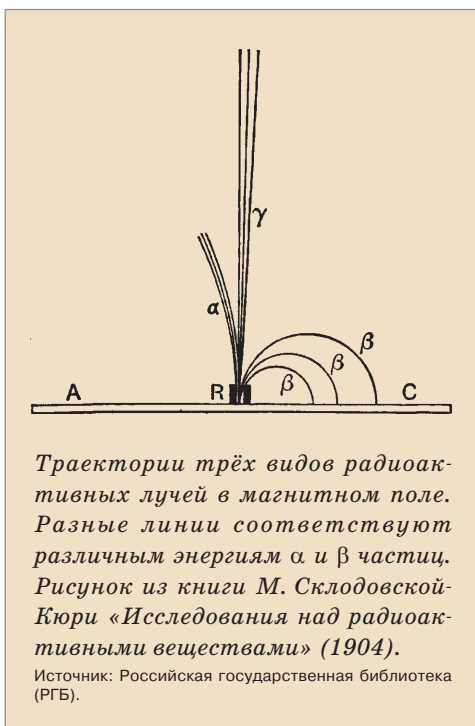
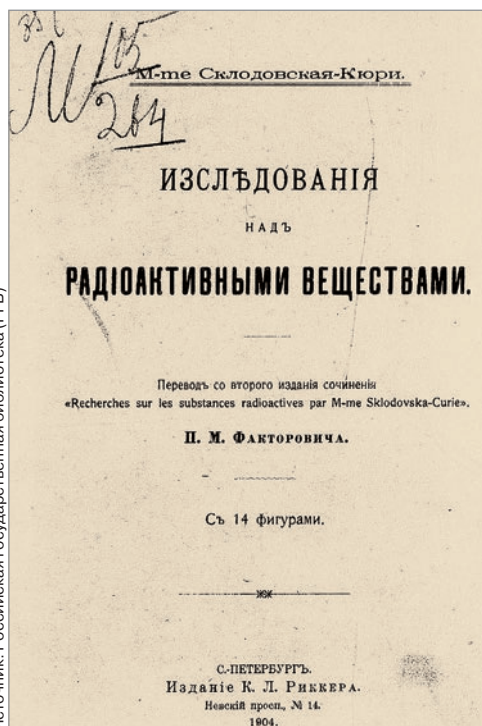
Фактически открыл гамма-лучи в 1900 году французский химик и физик Поль Виллар (в русскоязычной литературе его фамилия Villard чаще всего пишется именно так) при исследовании радиоактивности радия, который ему выделили супруги Кюри. Открытие произошло случайно, когда Виллар изучал бета-лучи, интерес к которым у него возник из-за их похожести на катодные лучи в вакуумных трубках (теперь-то мы уже знаем, что и то и другое — электроны). В отличие от Резерфорда, он фиксировал бета-излучение на фотопластинке, которая была в конверте из плотной бумаги, поглощавшей альфа-лучи. Однако на фотографии он неожиданно увидел следы двух лучей вместо одного. Пятно от одного луча было расплывчатым, другой

луч распространялся строго по прямой линии и давал резкое пятно. Виллар попытался их разделить с помощью магнитного поля, поскольку из опытов Кюри уже было известно, что бета-лучи в нём изгибаются. Но «узкий» луч в магнитном поле не отклонился. Виллар хитроумно проверил проникающую способность нового излучения, поставив друг за другом две фотопластинки из стекла толщиной 1 см. На второй пластинке остался только след неотклонённого луча без заметного ослабления, а бета-лучи первая пластина поглотила. Незначительно его ослабила и свинцовая фольга толщиной 0,3 мм.

Отдадим должное Виллару. Он пришёл, по большому счёту, к совершенно правильному выводу, что радиоактивное излучение радия содержит третий компонент, являющийся разновидностью рентгеновских лучей. Сделав это важное открытие, Виллар тем не менее не претендовал на то, что открыл новый вид излучения, ведь рентгеновские лучи уже были хорошо известны, он сам занимался



их изучением с 1897 года. Любопытно, что Беккерель ревниво наблюдал за экспериментами конкурента и первоначально даже пытался отрицать наличие проникающих лучей на том основании, что их существование не могло быть незамеченным в экспериментах, проведённых им и Кюри. Позднее он признал этот факт и



даже упомянул о нём в своей статье 1901 года в журнале «Nature».

Однако в целом на открытие Виллара никто не обратил особого внимания — физики и химики были заняты исследованием альфа- и бета-лучей. Почему же так произошло? По-видимому, злую шутку здесь сыграло именно сходство с рентгеновскими лучами, получать которые было значительно проще. Достаточно вспомнить, что для выделения 1 грамма радия супруги Кюри за четыре года (1898—1902) вручную переработали 8 тонн урановой руды! И пусть позднее Мария писала, что при наличии средств и оборудования они справились бы за год, трудоёмкость процесса потрясала. Рентгеновские же лучи создавались по уже хорошо отлаженной технологии с помощью электронно-лучевых трубок (сначала трубок Крукса), которые были во всех лабораториях. Да и получать рентгеновские снимки было намного проще и быстрее. Кроме того, они давали более наглядные результаты. Мария Кюри, включившая так называемую гамма-рентгенограмму в свою докторскую диссертацию, отметила слабый

контраст на ней между костью и мягкими тканями и необходимость в длительном времени экспозиции. Сказывалась большая проникающая способность. Так что исследователи предпочитали рентген. Лишь Резерфорд, повторив опыты Виллара, в 1903 году по аналогии дал самому проникающему излучению название гамма-лучи. Его подхватила Мария Кюри, и оно прочно вошло в физику.

Обсуждению гамма-лучей мешало и то, что они, по-видимому, не вписывались в физические представления того времени об атомах. Понять, откуда в атоме берутся частицы, физики могли, но вот с рентгеновскими или гамма-лучами возникали непреодолимые сложности.

А сам Виллар, то ли обидевшись на коллег, то ли разочаровавшись в теме, забросил её, перейдя к решению других проблем. Заметим, вполне успешно, ибо в 1908 году он стал членом Французской академии наук. Так или иначе, всё это привело к тому, что в настоящее время имя первооткрывателя гамма-лучей мало известно, он остался в тени гигантов той эпохи.

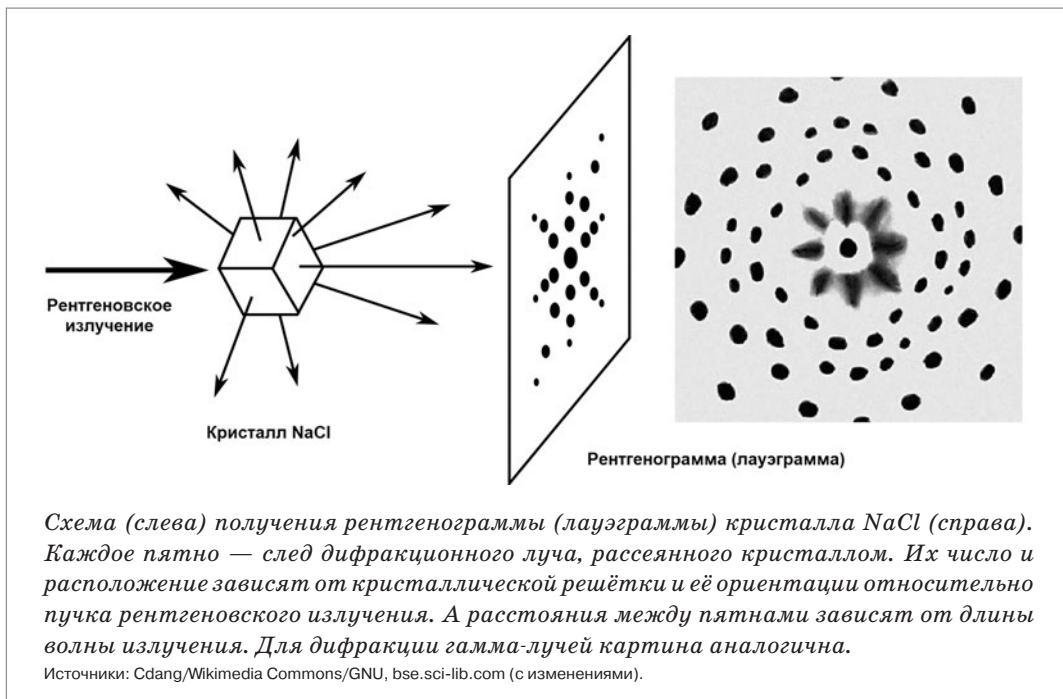
## 2. ПРИРОДА ГАММА-ЛУЧЕЙ. И ВСЁ-ТАКИ ЭТО СВЕТ!

То, что и рентгеновские, и гамма-лучи представляют собой электромагнитные волны, удалось выяснить не сразу. Для доказательства волновой природы требовалось обнаружить у них волновые свойства, такие как дифракция — огибание препятствий и интерференция — сложение волн с образованием так называемой интерференционной картины. Последняя представляет собой чередование в пространстве максимумов и минимумов, то есть участков, где волны усиливают друг друга или ослабляют. Для монохроматического света (одной длины волны) — это набор тёмных и светлых пятен.

У видимого света волновые свойства демонстрируются с помощью дифракционной решётки — набора щелей, проходя через которые свет отклоняется (это и есть дифракция), а волны от разных щелей интерферируют. Проблема в том,

что для заметной дифракции расстояние между щелями должно быть сравнимо с длиной волны, которая для рентгеновского и гамма-диапазонов настолько мала, что изготовить такую дифракционную решётку невозможно.

Тут и пришла на помощь кристаллическая решётка, имеющая «щели» нужного размера. Замечательная идея использовать кристалл в качестве пространственной дифракционной решётки для рентгеновского излучения в 1912 году пришла в голову немецкому физики Макс фон Лауэ. Два его студента — Вальтер Фридрих и Пауль Книппинг эту дифракцию обнаружили, и для рентгеновского излучения задача была решена: волновой характер установлен, длины волн измерены. Стоит отметить, что благодаря двум Уильямам Брэггам, отцу и сыну, этот метод превратился в основу рентгеноструктурного анали-



за — мощнейшего метода исследования структуры кристаллов, а также рентгеновской спектроскопии. За это Лауэ и Брэгги стали лауреатами Нобелевской премии в 1914 и 1915 годах.

А в 1914 году Резерфорд, на этот раз вместе с Эдвардом Андраде, тем же

методом на кристалле каменной соли доказали электромагнитную природу и мягкого (самого длинноволнового) гамма-излучения. А затем придумали, как это сделать и для более жёсткого излучения, используя отражение от кристалла.

### 3. ГДЕ ГРАНИЦЫ ГАММА-ДИАПАЗОНА?

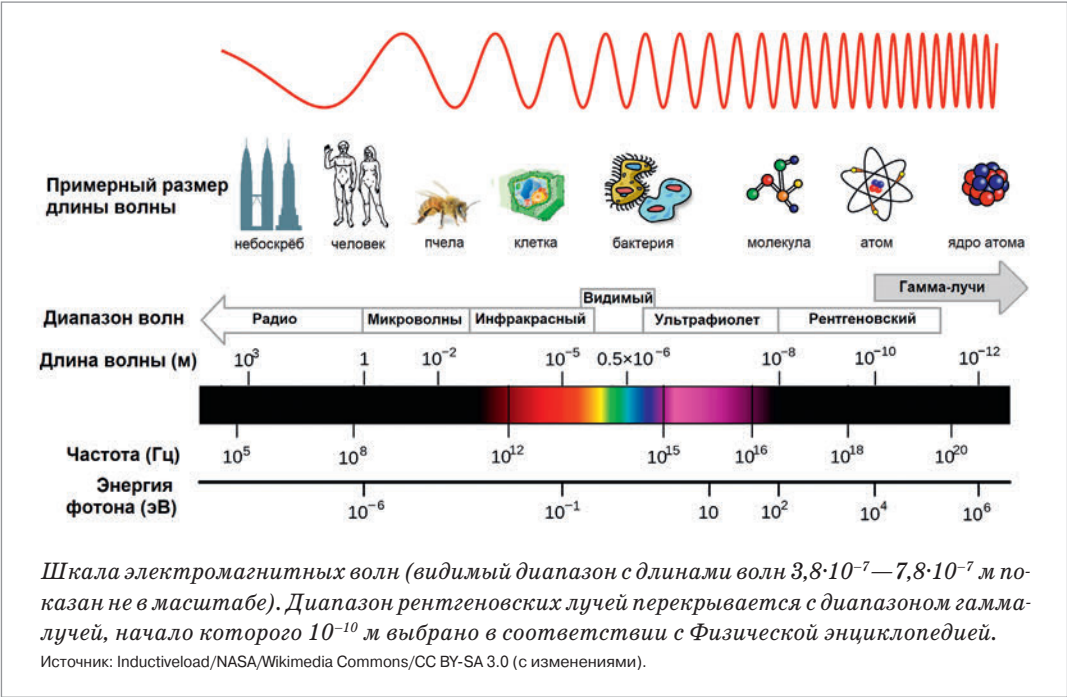
Гамма-излучение при радиоактивном распаде имело большую частоту и меньшую длину волны, чем излучение рентгеновских трубок начала XX века, а потому заняло крайнее место на шкале электромагнитных волн, на котором остаётся и по сей день. И долгое время излучение относили к гамма-диапазону, если оно имело длину волны меньше заданной. Однако не всё так просто!

Открыв разные справочники, мы увидим довольно большой разброс граничных значений. Большинство зарубежных изданий дают для гамма-излучения длину волны менее  $10^{-11}$  м, частоту выше  $3 \cdot 10^{19}$  Гц, а энергию фотона, соответственно, больше 124 кэВ. А вот отечественная физическая энциклопедия

даёт значения, отличающиеся на порядок:  $10^{-10}$  м и  $3 \cdot 10^{18}$  Гц. Приходилось мне встречать и другие значения, например,  $10^{-12}$  м\*. Понятно, что границы диапазонов размыты, но разница в 100 раз для физики, относящейся к точным наукам, всё же многовата! А иногда гамма-излучение вообще не попадает в заданные границы! Почему же так происходит?

Всё дело в том, что рентгеновское и гамма-излучение физики различают также по происхождению: первое рождается

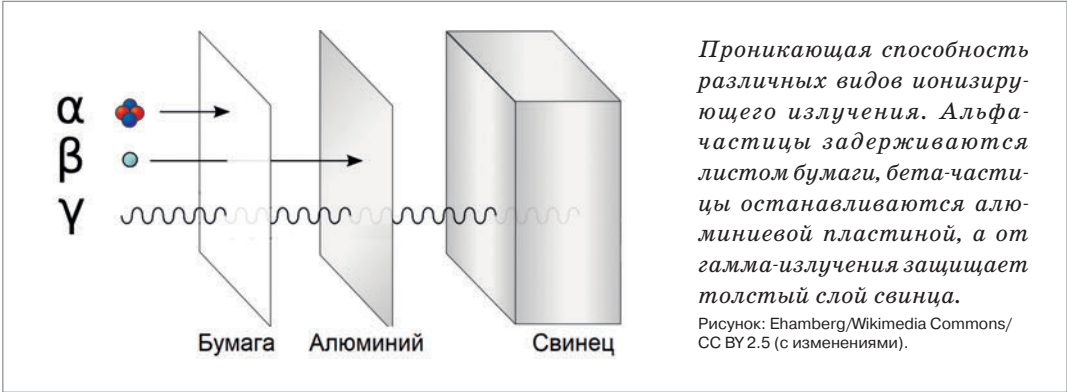
\* См. например: Дедю И. И. Экологический энциклопедический словарь. — Кишинёв: Главная редакция Молдавской советской энциклопедии. 1989.



в процессах, связанных с электронами (либо в атомах, либо в электронах, движущихся с ускорением вне атомов), а второе — в ядрах атомов при радиоактивном распаде. Однако к настоящему времени выяснилось, что эти диапазоны сильно перекрываются.

Классические гамма-лучи, как правило, имеют энергию от нескольких кэВ до примерно 8 МэВ. Фотоны рентгеновского диапазона, испускаемого при переходах в электронных оболочках атомов, — от 10 эВ до 250 кэВ (частоты от  $3 \cdot 10^{16}$  до  $3 \cdot 10^{19}$  Гц, отсюда и приведённая выше международная граница диапазонов),

а вот искусственные и естественные (космические) ускорители способны генерировать электромагнитное излучение с энергией значительно выше 8 МэВ. Например, рентгеновское излучение, производимое современными линейными ускорителями для лечения рака, часто имеет более высокую энергию (от 4 до 25 МэВ), чем классические гамма-лучи. И, наоборот, один из наиболее распространённых изотопов, используемых в диагностической медицине, технеций-99m, производит гамма-излучение той же энергии (140 кэВ), что и обычные диагностические рентгеновские



аппараты. Окончательно запутывает ситуацию рождение в некоторых распадах фотонов, относящихся даже к ультрафиолету. Так торий-229m порождает фотоны с энергией меньше 10 эВ, которые, попадая в ультрафиолетовый диапазон, по происхождению всё равно должны называться гамма-квантами!

Таким образом, гамма-диапазон, выделяемый по происхождению, находится внутри рентгеновского. Поэтому название излучения в области перекрытия диапазонов зависит от раздела науки и техники. Как правило, излучение любой частоты, возникающее в ядре, называют гамма-лучами. А вот для излучения движущихся электронов поступают, как раньше, — устанавливают примерную границу между рентгеном и гамма. Она формальная, физического смысла не имеющая, отсюда и разброс значений в различных справочниках и на-

уках. Исключение составляет астрономия, которая использует свой критерий: излучение с энергией квантов менее 100 кэВ изучается рентгеновской астрономией, а выше — гамма-астрономией.

Гамма-излучение производит ионизирующее действие, для защиты от него требуется достаточно толстый слой плотного материала, лучше всего с большой атомной массой. Конкретное значение зависит от энергии фотонов. Так для гамма-излучения с энергией 1 МэВ свинца, например, потребуется несколько сантиметров, а вот бетона — уже несколько десятков сантиметров. Для создания компактной защиты используют обеднённый уран или торий, которых нужно в 2—3 раза меньше свинца. В то время как альфа-частицы остановит даже лист бумаги, а от бета-излучения защитят несколько миллиметров алюминия.

#### 4. ИСТОЧНИКИ ГАММА-ЛУЧЕЙ. НА ЗЕМЛЕ, В КОСМОСЕ И ДАЖЕ В... ОБЛАКАХ

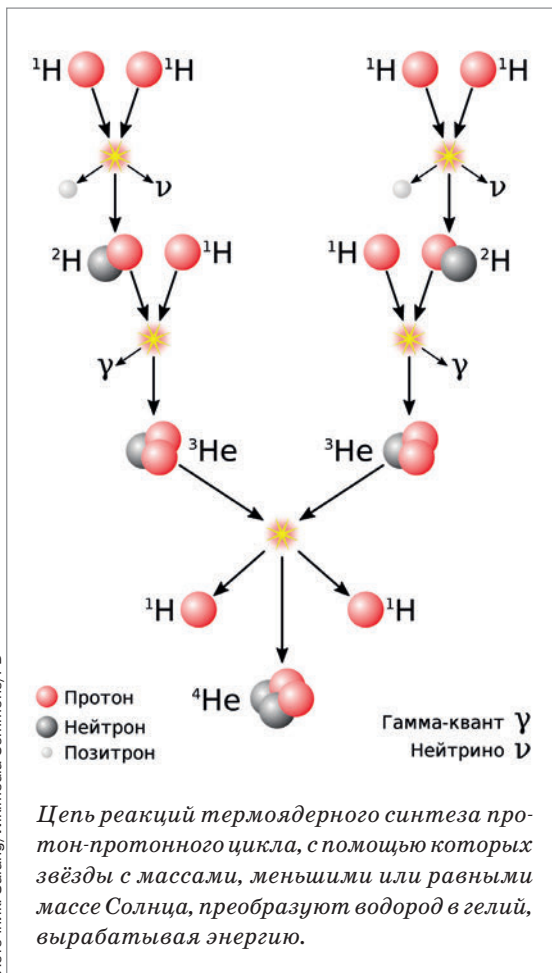
Основной источник гамма-излучения на Земле — радиоактивный альфа- и бета-распад. Образующееся при этом дочернее ядро обычно остаётся в возбуждённом состоянии, которое называют изомером. Для его обозначения в названии изотопа добавляют букву m (от англ. metastable — метастабильный) к массовому числу, например, технеций-99m, или  $^{99m}\text{Tc}$ . Затем оно переходит в состояние с более низкой энергией, испуская гамма-фотон, что получило название гамма-распад. Гамма-кванты возникают также при ядерных реакциях, в частности, делении урана. Это приводит к гамма-излучению в ядерных реакторах, а также при ядерных и термоядерных взрывах.

Гамма-фотоны рождаются во многих процессах с участием элементарных частиц, большинство из которых нестабильны и распадаются на другие частицы почти сразу после возникновения (например, распад нейтрального пиона, многих адронов). К слову, бозон Хиггса, за предсказание которого была вручена Нобелевская премия по физике за 2013

год, тоже может распадаться на множество различных типов частиц, включая гамма-кванты. Несмотря на то, что теория предсказывает такой распад всего в 0,2% случаев, этот тип распада относительно легко идентифицировать, и потому он был среди тех, которые исследователи наблюдали при открытии бозона Хиггса. Гамма-кванты рождаются также при аннигиляции частиц и античастиц, например, электрона и позитрона.

Помимо ускорителей, подобные процессы происходят при столкновении энергичных частиц космических лучей (как правило, это электроны или протоны) с атомами атмосферы, когда они порождают целый ливень вторичных частиц, в том числе и гамма-квантов. Их рекордную энергию  $1,4 \cdot 10^{15}$  эВ зарегистрировала в 2021 году китайская обсерватория LHAASO. Это в 200 раз больше, чем максимальная энергия протонов, полученных на самом большом земном ускорителе — Большом адронном коллайдере.

Ещё одним источником гамма-излучения на Земле служат молнии и грозы. Такие вспышки гамма-излучения получили



название земных (terrestrial gamma-ray flash, TGF). Иногда их называют тёмными молниями. Впервые они были обнаружены в 1994 году на космической Комптоновской гамма-обсерватории (CGRO). TGF действуют от 0,2 до 3,5 миллисекунды и имеют энергию до 20 МэВ. Физики полагают, что они вызваны интенсивными электрическими полями, создаваемыми над или внутри грозы. Эти поля действуют как гигантский ускоритель частиц, создающий релятивистские электронные лавины, а также пары электронов и позитронов, которые порождают гамма-лучи. Кстати, это одна из причин, по которой самолёты должны держаться подальше от гроз. Детали механизма формирования TGF до сих пор неясны, а их связь с молнией остаётся предметом исследований.

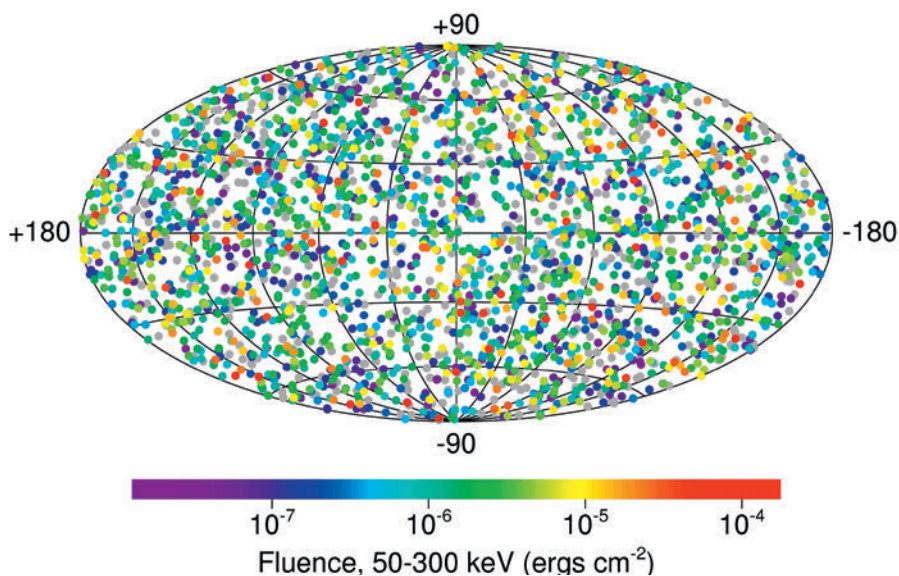
Гамма-излучение возникает и при движении электронов с очень большой скоростью, когда они сталкиваются с веществом (тормозное излучение), или при искривлении их траекторий в магнитном поле (синхротронное излучение). Так что на больших ускорителях вроде Большого адронного коллайдера приходится использовать мощную радиационную защиту.

В 2016 году исследователи из нижегородского Института прикладной физики РАН и Университета им. Н. И. Лобачевского вместе с зарубежными коллегами предложили метод создания лабораторного источника гамма-квантов с энергией порядка нескольких ГэВ путём захвата излучения мощного лазера в электромагнитный каскад.

Гамма-лучи рождаются во многих высокоэнергетических процессах во Вселенной, таких как солнечные вспышки, звездообразование, сверхновые и гиперновые. Ранее астрономы считали, что гамма-лучи в диапазоне гигаэлектронвольт не возникают в Солнечной системе, но в последние годы стало известно, что они могут генерироваться солнечными вспышками.

В пределах Млечного Пути в качестве источников гамма-излучения преобладают пульсары — вращающиеся нейтронные звёзды с сильным магнитным полем, которые порождают пучки релятивистских заряженных частиц — джеты. Эти частицы при столкновении с окружающей средой производят тормозное гамма-излучение. Другим механизмом может быть обратное комптоновское рассеяние, при котором электроны передают свою энергию фотонам. Нейтронные звёзды с очень сильным магнитным полем — магнетары — способны испускать через нерегулярные промежутки времени большие всплески гамма-излучения, поэтому получили название мягких гамма-ретрансляторов (SGR — soft gamma repeaters).

Вне Млечного Пути источниками гамма-лучей служат в основном активные галактики. Их ядра содержат сверхмассивную чёрную дыру, которая стягивает к себе окружающее вещество, формируя аккреционный диск и джеты. Они работают как



Позиции на небе всех 2704 гамма-всплесков, обнаруженных инструментом BATSE космической гамма-обсерватории CGRO (NASA) за девять лет наблюдений (1991—2000). Видно, что они распределены равномерно по небу, без концентрации в плоскости Млечного Пути, которая проходит по горизонтальной линии в середине изображения. Цвет характеризует суммарную энергию всплеска. Длинные яркие всплески отображаются красным цветом, а короткие слабые — фиолетовым. Серый цвет означает недостаточность данных.

Источник: G. Fishman et al., BATSE

гигантские ускорители частиц, порождающие высокоэнергичное тормозное, синхротронное и комптоновское гамма-излучение. Благодаря этому механизму «светят» особо яркие объекты видимой Вселенной — квазары и их разновидность блазары.

Космические ускорители могут иметь и другую природу, например, пульсарный

ветер и ударные волны в остатках сверхновых. Возможно, именно этот механизм ответственен за гамма-излучение Крабовидной туманности.

Некоторые гипотезы предполагают, что с испусканием гамма-лучей может аннигилировать тёмная материя, но подтверждение этому пока не найдено.

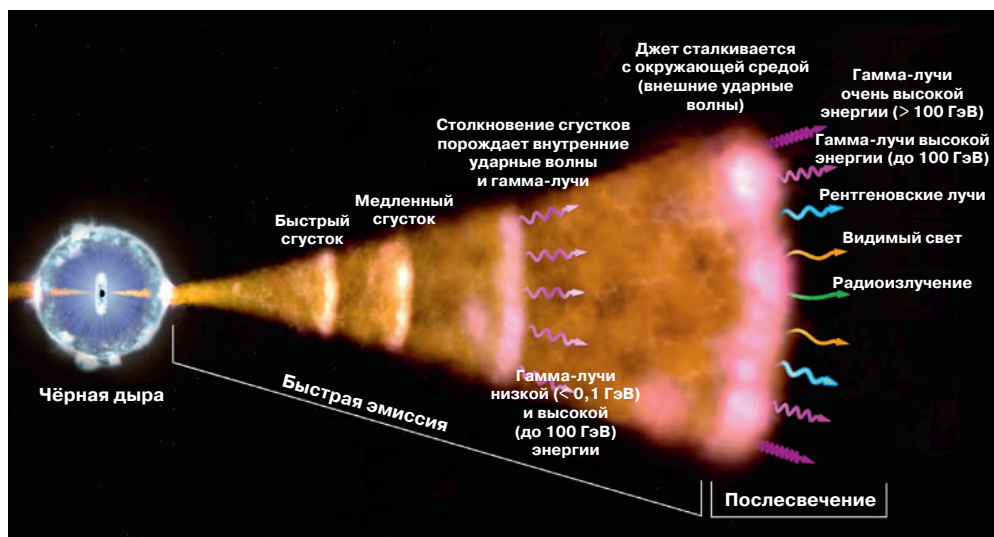
## 5. ГАММА-ВСПЛЕСКИ ВО ВСЕЛЕННОЙ

Гамма-всплески (GRB, gamma-ray bursts) — мощные сигналы гамма-излучения, которые могут длиться от десяти миллисекунд до шести часов. Источники большинства из них находятся на расстоянии миллиардов световых лет от Земли, а это означает, что они чрезвычайно энергичны. Типичный всплеск за несколько секунд высвобождает столько же энергии, сколько Солнце за 10 млрд лет своего существования. Процессы, которые их порождают, пожалуй, самые мощные во

Вселенной со времён Большого взрыва. Если бы всплеск произошёл в пределах 10 св. лет от Земли, он мог бы привести к гибели жизни на Земле. Возможно, именно гамма-всплеск стал причиной ордовикско-силурийского вымирания около 445 млн лет назад, когда, по последним данным, на Земле погибли 85% видов живых организмов.

Впервые гамма-всплески были обнаружены в 1967 году спутником Vela, который США запустили для слежения





*Схема возникновения наиболее распространённого типа гамма-всплеска. Ядро массивной звезды коллапсирует с образованием чёрной дыры. Это приводит в движение струю частиц — джет, скорость которой близка к скорости света. Излучение, обычно длящееся меньше минуты, возникает в результате взаимодействия джета с газом вблизи чёрной дыры и в результате столкновений быстро движущихся сгущений газа внутри джета (внутренние ударные волны).*

за тайными ядерными испытаниями в СССР. Обнаружив гораздо больше взрывов, чем ожидалось, астрономы поняли, что они исходят из глубокого космоса, а не из Советского Союза. Первоначально считалось, что источники всплесков располагаются внутри Млечного Пути. Однако работавшая с 1991 года обсерватория CGRO показала, что они равномерно распределены по всему небу.

Способ, с помощью которого формируются гамма-всплески, до сих пор остаётся до конца не ясным. В настоящее время астрофизики полагают, что они бывают двух типов: длинные, продолжительностью более двух секунд (их примерно 70%), и короткие. Длинные гамма-всплески происходят в основном при гибели чрезвычайно массивных звёзд во взрыве сверхновой с последующим гравитационным коллапсом её ядра в нейтронную звезду или чёрную дыру. А короткие гамма-всплески возникают при слиянии нейтронных звёзд и чёрных дыр в любой комбинации од-

новременно со вспышкой килоновой. Эти объекты очень компактны, что и приводит к малому времени излучения. Подтверждение подобного механизма произошло в 2017 году, когда короткий GRB 170817A был обнаружен всего через 1,7 с после регистрации гравитационной волны GW170817 от слияния двух нейтронных звёзд. Впрочем, в последние годы были получены и свидетельства того, что слияния могут порождать и длинные гамма-всплески: GRB 211211A с длительностью 51 секунда (2021) и GRB 230307A с длительностью 35 секунд (2023).

Рекордная энергия фотонов  $18 \cdot 10^{12}$  эВ зарегистрирована 9 октября 2022 года в гамма-всплеске GRB 221009A. Российская установка «Ковёр-2» в Баксанской нейтринной обсерватории зарегистрировала одиночный фотон с энергией 251 ТэВ, возможно, именно от этого всплеска. Это был самый мощный гамма-всплеск за всю историю наблюдений, его пиковая светимость оказалась порядка  $10^{47}$  Вт. Он

даже вызвал заметное возмущение в ионосфере Земли. Общее количество выделившейся энергии оценивается в  $10^{48}$  Дж. Для сравнения: светимость Солнца —  $3,8 \cdot 10^{26}$  Вт, что за 10 млрд лет даст «всего»  $10^{43}$  Дж — в 100 000 раз меньше! Светимость всей нашей Галактики менее  $10^{36}$  Вт.

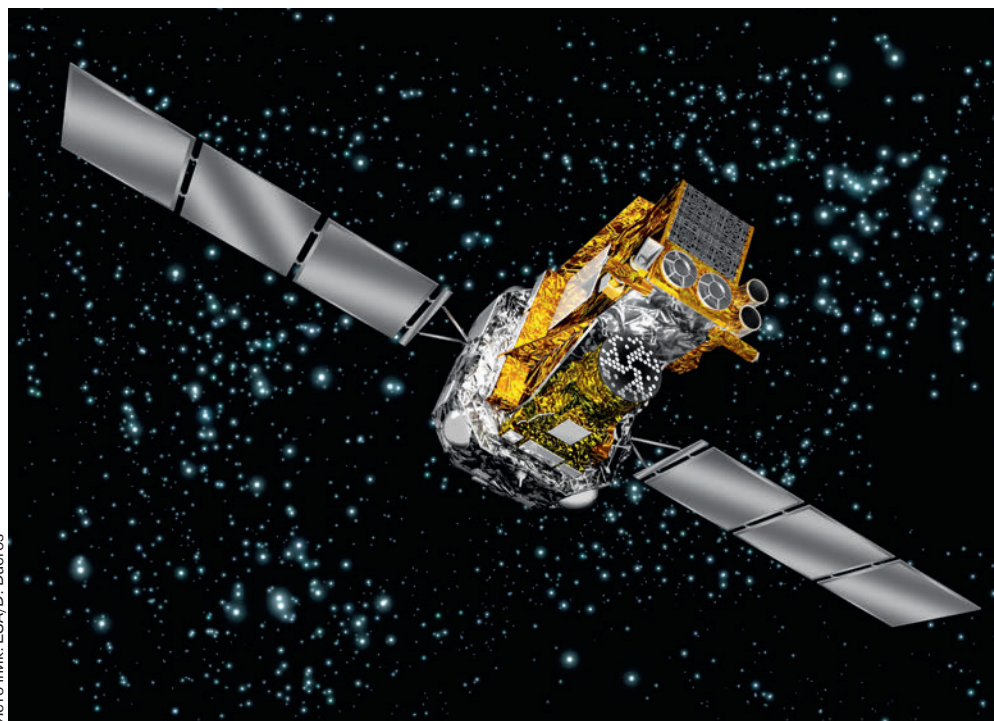
По современным представлениям, гамма-всплески не должны происходить близко друг к другу. Но в 2015 году венгерские и американские астрономы,

при анализе данных различных телескопов за 15 лет, обнаружили 9 гамма-всплесков, сосредоточенных в области неба размером 43 на 30 градусов. Они получили название Гигантского кольца гамма-всплесков. Возможно, оно свидетельствует о существовании одной из крупнейших структур во Вселенной, которая расположена на расстоянии около 9,1 миллиарда св. лет от Земли и имеет поперечник примерно 5,6 миллиарда св. лет.

## 6. КОСМИЧЕСКИЕ ГАММА-ТЕЛЕСКОПЫ

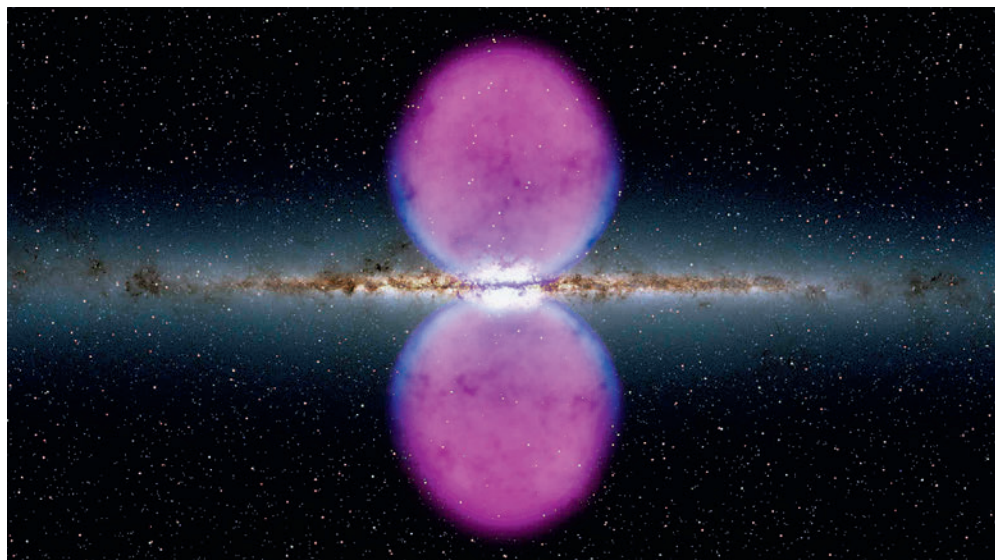
Гамма-лучи, пришедшие из космоса, почти не достигают поверхности планеты из-за взаимодействия с атомами атмосферы. Это хорошо для нашего здоровья, но плохо для астрономов. Чтобы увидеть гамма-лучи, им приходится строить телескопы в космосе. Первый

гамма-детектор был выведен на орбиту на спутнике «Эксплорер-11» в 1961 году. В настоящее время на орбите работает сразу несколько гамма-телескопов разных стран. Среди них можно выделить американские «Fermi» и «Swift», а также европейский INTEGRAL, в работе которого



Источник: ESA/D. Ducros

*Международная лаборатория гамма-астрофизики INTEGRAL (INTERNATIONAL Gamma-Ray Astrophysics Laboratory, ESA), запущенная с Байконура в 2002 году, регистрирует рентгеновское и гамма-излучение с энергиями от 3 кэВ до 10 МэВ. С 2020 года эксплуатируется в безопасном режиме из-за ряда поломок. В её работе принимает участие Россия.*



Источник: NASA's Goddard Space Flight Center

В 2010 году, по данным космического гамма-телескопа Ферми, к северу и югу от ядра Млечного Пути были обнаружены два гигантских сферических пузыря гамма-излучения высокой энергии. Диаметр каждого из пузырей составляет около 25 000 световых лет (около четверти диаметра Галактики). Возможно, несколько миллионов лет назад у сверхмассивной чёрной дыры в центре Галактики был выброс или там произошла вспышка звездообразования.



Источник: МГУ, ИГУ

Черенковские детекторные станции HiSCORE с четырьмя светособирающими сегментами (ФЭУ) и черенковский телескоп TAIGA-IACT (вдали), предназначенные для изучения источников гамма-излучения и космических лучей сверхвысоких энергий. Комплекс занимает площадь более 1 км<sup>2</sup> и является частью обсерватории TAIGA (Tupka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy), развёрнутой в Тункинской долине в Республике Бурятия, приблизительно в 50 км к западу от озера Байкал.

принимает участие и Россия. В будущем наша страна планирует запустить астрофизическую обсерваторию ГАММА-400 (Гамма-Астрономическая Многофункциональная Модульная Аппаратура) для исследования высокоэнергетического гамма-излучения. Ориентировочно её запуск планируется на 2030 год.

Из-за большой проникающей способности регистрировать гамма-излучение достаточно сложно, оно не отражается от зеркал и не фокусируется линзами. Обычно для детектирования используют действие гамма-излучения на вещество: фотоэффект, эффект Комптона и рождение пар электрон-позитрон. В сцинтилляционных детекторах применяют кристаллы, которые излучают свет при взаимодействии гамма-лучей с атомами кристаллов. Полупроводниковые детек-

торы, также называемые твердотельными, основаны на обнаружении носителей заряда (электронов и дырок), генерируемых в полупроводниках фотонами гамма-излучения. Так что гамма-телескопы совсем не похожи на своих собратьев из других диапазонов. Исследования в гамма-диапазоне ближе к физике элементарных частиц.

На протяжении более 100 лет физики считали, что линзу или зеркало, которые могли бы фокусировать гамма-лучи как обычный свет, невозможно создать в принципе. Однако в 2012 году группа физиков из Франции и Германии сделала неожиданное открытие, что преломление гамма-лучей возможно в кремниевых «призмах». Возможно, это означает создание со временем нового раздела оптики — гамма-оптики.

## 7. КАК НАБЛЮДАТЬ ГАММА-ЛУЧИ НА ЗЕМЛЕ?

**Н**едостаток космических телескопов в малом размере их детекторов, из-за чего они не могут зарегистрировать самое высокоэнергетичное гамма-излучение, которое просто проходит сквозь них. Им на помощь приходят наземные телескопы. Гамма-лучи не проникают сквозь атмосферу Земли, но, подобно космическим лучам, взаимодействуя с её атомами, производят ливни частиц (электронов, протонов, мюонов и других), и их можно зарегистрировать. А если некоторые из них движутся со скоростью, превышающей скорость света в атмосфере, они будут создавать вспышки света с пиком между синим и ультрафиолетовым, подобно звуковому удару при движении сверхзвукового самолёта. Этот свет называется черенковским излучением, и его способны обнаружить наземные телескопы.

Современные черенковские телескопы третьего поколения VERITAS в Ари-

зоне (США), HESS в Намибии и MAGIC на Канарском острове Ла-Пальма — это массивы оптических телескопов, камера каждого из которых состоит из сотен или тысяч фотоумножителей, преобразующих поступающие фотоны в электрические сигналы. Сейчас продолжается строительство Массива черенковских телескопов (Cherenkov Telescope Array, CTA), который будет использовать более 60 телескопов, расположенных как в Северном, так и в Южном полушариях, что обеспечит площадь сбора данных, превышающую один миллион квадратных метров. В международный консорциум входят почти 1300 исследователей из 31 страны. В России черенковские телескопы расположены в обсерватории TAIGA в Тункинской долине (Бурятия) и Крымской астрофизической обсерватории (ГТ-48).

## 8. ГДЕ ПРИМЕНЯЮТ ГАММА-ЛУЧИ?

**Г**амма-лучи, возникающие в результате переходов атомного ядра с одного энергетического уровня на дру-

гой, имеют дискретный спектр, то есть излучение происходит на определённых частотах, набор которых характерен для

каждого химического элемента. Это используется в гамма-спектроскопии, где с помощью этих спектров определяют химический состав вещества и количество каждого элемента. Помимо астрофизики данный метод применяют в атомной промышленности и геохимических исследованиях.

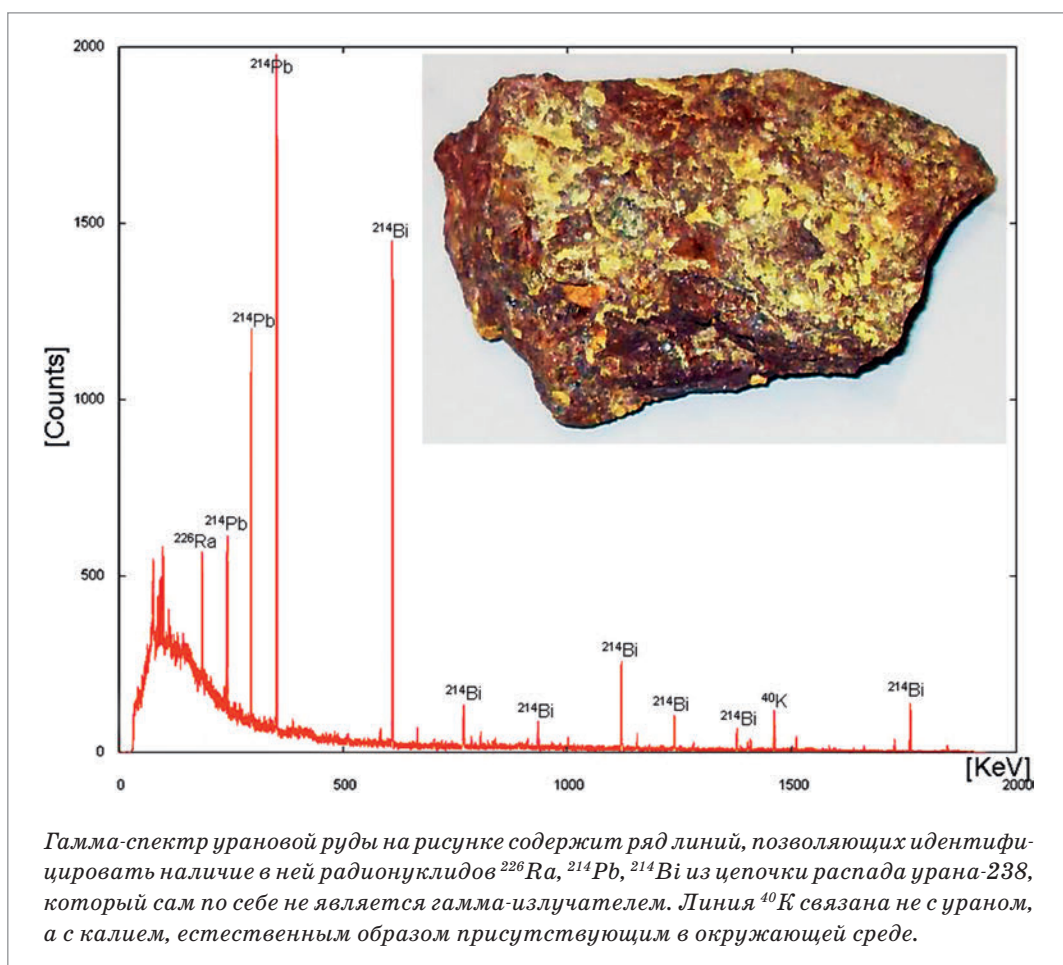
Например, исследование горных пород в скважинах по их естественному гамма-излучению с помощью спускаемого зонда называется гамма-каротаж. Ответное излучение можно вызвать и искусственно, если породу сначала облучить гамма-излучением. Это позволяет более эффективно измерять параметры породы, чем при регистрации естественного излучения, которое без искусственного облучения могло и отсутствовать.

Бесконтактные промышленные датчики гамма-излучения востребованы

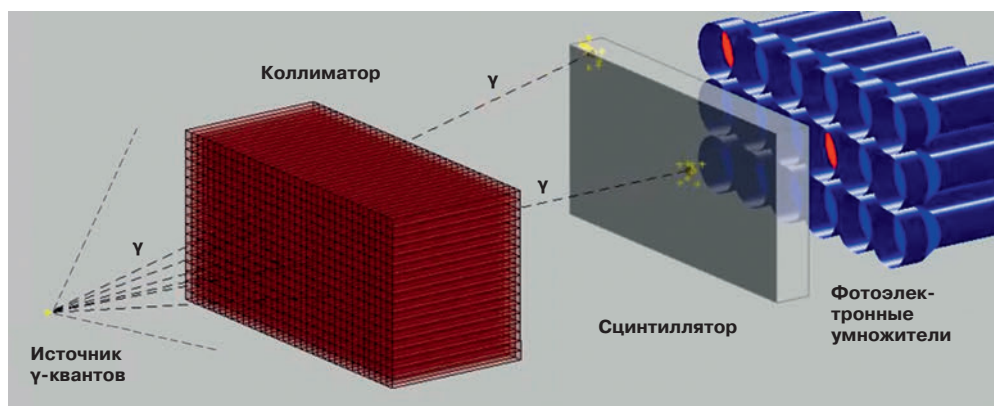
в нефтеперерабатывающей, горнодобывающей, химической, пищевой, целлюлозно-бумажной промышленности для измерения уровней, плотности и толщины продукции. Обычно в качестве источника излучения применяют изотопы Co-60 или Cs-137. В России и США детекторы гамма-излучения начали использовать также для сканирования контейнеров.

Гамма-излучение наряду с рентгеновским применяют для медицинской диагностики различных заболеваний (сердечно-сосудистых, онкологических, урологических и др.), а также для лечения рака.

Диагностика основана на так называемом радионуклидном методе, когда в организм вводятся гамма-излучающие радиоизотопы. Обычно используют препарат на основе технеция-99m. Он



Гамма-спектр урановой руды на рисунке содержит ряд линий, позволяющих идентифицировать наличие в ней радионуклидов  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  из цепочки распада урана-238, который сам по себе не является гамма-излучателем. Линия  $^{40}\text{K}$  связана не с ураном, а с калием, естественным образом присутствующим в окружающей среде.



*Принцип работы гамма-камеры Ангера. Коллиматор из толстого листа свинца, толщиной 25—55 мм с тысячами параллельных отверстий, пропускает только гамма-кванты, идущие вдоль них. Попадая на кристалл сцинтиллятора (обычно это йодид натрия с легированием таллием  $\text{NaI(Tl)}$ ), они порождают вспышки света, улавливаемые матрицей ФЭУ. Сигнал ФЭУ обрабатывается компьютером.*

хорошо подходит для этой роли, поскольку испускает легко обнаруживаемые гамма-лучи с энергией фотонов 140 кэВ и имеет «короткий» физический период полураспада — 6 часов. Основным инструментом регистрации — гамма-камера, в сцинтилляторе которой энергия гамма-квантов преобразуется в фотоны видимого излучения, а фотоумножители превращают световую вспышку в импульс тока. Это позволяет не только отследить места скопления препарата, отмечая опухоль, но и визуализировать работу различных органов. Портативное устройство, содержащее сцинтилляционный детектор, получило название гамма-зонд. Его можно вводить внутрь организма.

При позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ, она же двухфотонная эмиссионная томография) в аналог глюкозы, называемый фтордезоксиглюкозой, внедряется радиоактивный изотоп фтор-18. Он испускает позитроны, которые при аннигиляции с электронами образуют пару гамма-фотонов, разлетающихся в разные стороны. Суть метода основана на том, что опухоль интенсивнее потребляет глюкозу. А при однофотонной эмиссионной компью-

терной томографии (ОФЭКТ или ОЭКТ) применяются препараты, меченные радиоизотопами, ядра которых при распаде испускают только один гамма-квант. Данная технология позволяет формировать трёхмерные изображения.

Для уничтожения рака мозга и других операций медики иногда используют так называемый гамма-нож. При этом несколько пучков гамма-лучей направлены под разными углами на клетки, которые необходимо разрушить. Каждый луч относительно слаб и мало повреждает здоровые ткани. Но там, где они сфокусированы, их интенсивность достаточно велика, чтобы убить раковые клетки. «Гамма-нож» — относительно безопасный способ проведения некоторых видов хирургических операций, которые затруднительны при использовании обычных скальпелей.

Кроме того, гамма-излучение используется для стерилизации медицинских материалов и оборудования, а в пищевой промышленности — для стерилизации пищевых продуктов при консервировании и предотвращения прорастания фруктов и овощей, для сохранения свежести и вкуса и для увеличения срока хранения.