

Лекция 26. Понятие о дозиметрии и защите. Космические лучи.

Взаимодействие ядерных излучений с веществом. Детектирование различных излучений. Понятие о дозиметрии и защите. Космические лучи, первичное и вторичное излучение. Интенсивность, состав и энергетический спектр. Высотный ход интенсивности космических лучей. Взаимодействие первичного космического излучения с магнитным полем Земли. Широтный эффект. Радиационные пояса. Происхождение космических лучей.

Ионизирующие излучения

Ионизирующие излучения, излучения, взаимодействие которых со средой приводит, в конечном счёте, к ионизации атомов и молекул. К ионизирующим излучениям относятся: электромагнитное излучение, потоки α -частиц, электронов, позитронов, протонов, нейтронов и других заряженных и нейтральных частиц. Заряженные частицы ионизируют атомы вещества непосредственно при столкновениях, если их кинетическая энергия достаточна для ионизации. При прохождении через среду потоков нейтральных частиц (нейтронов) или фотонов (квантов рентгеновского и γ -излучений) ионизация обусловлена *вторичными заряженными* частицами, возникающими в результате взаимодействия первичных частиц со средой.

Ионизирующие излучения играют большую роль в различных физических и химических процессах, в биологии, медицине, сельском хозяйстве и промышленности. Многие химические реакции под влиянием ионизирующего излучения осуществляются с большей лёгкостью или протекают при значительно меньших температурах и давлениях. Ионизирующие излучения применяются для стерилизации, пастеризации и хранения пищевых продуктов, фармацевтических препаратов и т. д. В результате действия ионизирующих излучений можно получить разнообразные мутации у микроорганизмов и растений (так называемое биологическое действие ионизирующих излучений).

Радиационные эффекты в твёрдом теле - это различные явления в твёрдом теле, вызванные воздействием ионизирующих излучений (потоков ядерных частиц, рентгеновского и γ -излучений). Взаимодействуя с кристаллической решёткой, частицы и кванты вызывают образование в ней вакансий и междоузельных атомов, ионизацию, иногда появление примесей за счёт деления атомных ядер, ядерных реакций. Облучение вызывает изменение физических свойств кристаллов (механических, оптических, электрических и др.). В ряде случаев облучение потоком ускоренных ионов применяется для изменения свойств поверхностных слоев твёрдых тел (ионное внедрение). Изменения свойств полимеров при облучении обусловлены радиационно-химическими превращениями.

Детекторы ядерных излучений

Детекторы ядерных излучений - приборы для регистрации α - и β -частиц, рентгеновского и γ -излучения, нейтронов, протонов и т.п. Служат для определения состава излучения и измерения его интенсивности, измерения спектра энергий частиц, изучения процессов взаимодействия быстрых частиц с атомными ядрами и процессов распада нестабильных частиц. Для последней наиболее сложной группы задач особенно полезны детекторы ядерных излучений, позволяющие запечатлевать траектории отдельных частиц - камера Вильсона и её разновидности: диффузионная камера, пузырьковая камера, искровая камера, ядерные фотографические эмульсии. Действие всех детекторов ядерных излучений основано на ионизации или возбуждении заряженными частицами атомов вещества, заполняющего рабочий объём детекторов ядерных излучений. В случае γ -квантов и нейтронов ионизацию и возбуждение производят вторичные заряженные частицы, возникающие в результате взаимодействия γ -квантов или нейтронов с рабочим веществом детектора. Таким образом, прохождение всех ядерных частиц через вещество сопровождается образованием свободных электронов, ионов, возникновением световых вспышек (сцинтилляций), а также химическими и тепловыми эффектами. В результате этого излучения могут быть зарегистрированы по появлению электрических сигналов (тока или импульсов напряжения) на выходе детекторов ядерных излучений, либо по почернению фотоэмульсии и др.

Электрические сигналы обычно невелики и требуют усиления. Мерой интенсивности потока ядерных частиц является сила тока на выходе детекторов ядерных излучений, средняя частота следования электрических импульсов, степень почернения фотоэмульсии и т.д.

Важной характеристикой детекторов ядерных излучений, регистрирующих отдельные частицы, является их эффективность - вероятность регистрации частицы при попадании её в рабочий объём детектора ядерных излучений. Эффективность определяется конструкцией детектора ядерных излучений и свойствами рабочего вещества. Для заряженных частиц (за исключением очень медленных) она близка к единице; эффективность регистрации нейтронов и γ -квантов обычно меньше единицы и зависит от их энергии. Нередко необходимо, чтобы детекторы ядерных излучений был чувствителен только к частицам одного вида (например, нейтронный детектор не должен регистрировать γ -кванты).

Простейшим детектором ядерных излучений является *ионизационная камера*. Она представляет собой помещённый в герметическую камеру заряженный электрический конденсатор, заполненный газом. Если в камеру влетает заряженная частица, то в электрической цепи, связанной с электродами камеры, возникает ток, обусловленный ионизацией атомов газа; сила тока является мерой интенсивности потока частиц. Камеры используются также и в режиме регистрации импульса напряжения, вызываемого отдельной частицей; величина импульса пропорциональна энергии, потерянной частицей в газе камеры. Ионизационные камеры регистрируют все виды ядерных излучений, но их конструкция и состав газа зависят от типа регистрируемого излучения.

При увеличении разности потенциалов между электродами камеры электроны, возникающие в рабочем объёме камеры, при своём движении к электроду приобретают энергию, достаточную для вторичной ионизации нейтральных молекул газа. Благодаря этому импульс напряжения на выходе возрастает и его легче регистрировать. На таком же принципе основана работа пропорционального счётчика, применяемого для измерения интенсивности потока и энергии частиц и квантов.

В *счётчике Гейгера-Мюллера* напряжённость электрического поля между электродами имеет ещё большую величину, что приводит к возрастанию ионизационного тока за счёт вторичной ионизации. Амплитуда импульса на выходе перестаёт быть пропорциональной энергии первичной частицы, однако эта амплитуда становится весьма большой, что облегчает регистрацию импульсов. Счётчики Гейгера-Мюллера благодаря простоте конструкции получили широкое распространение для регистрации α -, β -частиц и γ -квантов.

Действие *сцинтилляционного детектора* основано на явлении флуоресценции (световых вспышках), возникающей при взаимодействии ядерных частиц со *сцинтилляторами* - специальными жидкостями, пластмассами, кристаллами, а также благородными газами. Световая вспышка регистрируется *фотоэлектронным умножителем*, преобразующим её в электрический импульс. Сцинтилляционные детекторы ядерных излучений обладают высокой эффективностью для γ -квантов и быстрым действием. Амплитуды выходного сигнала пропорциональны энергии, переданной сцинтиллятору частицей, что позволяет использовать эти детекторы для измерения энергии ядерных частиц. Высокая эффективность сцинтилляционных детекторов ядерных излучений обусловлена тем, что, в отличие от ионизационных камер, пропорциональных счётчиков и счётчиков Гейгера-Мюллера, рабочее вещество детектора является плотным и поглощающая способность его примерно в тысячу раз превосходит поглощающую способность газа при нормальном давлении.

Высокой эффективностью обладает также *кристаллический счётчик*. Его действие аналогично действию ионизационной камеры. Если в ионизационной камере заряженная частица образует свободные электроны и ионы, то в кристаллическом диэлектрическом (алмаз, сернистый цинк и др.) счётчике возникают электронно-дырочные пары. Кристаллические счётчики применяются сравнительно редко.

Использование в качестве рабочего вещества полупроводниковых кристаллов (обычно кремния или германия с примесью лития) позволяет наряду с высокой эффективностью получать очень хорошее энергетическое разрешение, превышающее разрешающую способность

сцинтилляционных детекторов ядерных излучений и сравнимое с разрешением, достигаемым в гораздо менее светосильных магнитных спектрометрах. Поэтому полупроводниковые детекторы ядерных излучений широко применяются для прецизионных измерений энергетического спектра ядерного излучения. Некоторые типы полупроводниковых детекторов необходимо охлаждать до температур, близких к температуре жидкого азота.

Для измерения энергии очень быстрых частиц находит применение черенковский счётчик, основанный на регистрации излучения Вавилова-Черенкова. Для регистрации быстрых тяжёлых ионов, например осколков деления ядер, иногда используют диэлектрические детекторы.

Дозиметрия

Дозиметрия - область прикладной физики, в которой изучаются физические величины, характеризующие действие ионизирующих излучений на объекты живой и неживой природы, в частности дозы излучения, а также методы и приборы для измерения этих величин.

Развитие дозиметрии первоначально определялось необходимостью защиты человека от ионизирующих излучений. Вскоре после открытия рентгеновских лучей были замечены биологические эффекты, возникающие при облучении человека.

Появилась необходимость в количественной оценке степени радиационной опасности. В качестве основного количественного критерия была принята *экспозиционная доза*, измеряемая в *Рентгенах* и определяемая по величине ионизации воздуха.

С открытием радия было обнаружено, что β - и γ -излучения радиоактивных веществ вызывают биологические эффекты, похожие на те, которые вызываются рентгеновским излучением. При добыче, обработке и применении радиоактивных препаратов возникает опасность попадания радиоактивных веществ внутрь организма. Развились методы измерения активности радиоактивных источников, являющиеся основой *радиометрии*.

Разработка и строительство ядерных реакторов и ускорителей заряженных частиц, развитие ядерной энергетики и массовое производство радиоактивных изотопов привели к большому разнообразию видов ионизирующих излучений и к созданию многообразных дозиметрических приборов (дозиметров).

Исследования биологического действия ионизирующих излучений на клеточном и молекулярном уровнях вызвали развитие микродозиметрии, исследующей передачу энергии излучения микроструктурам вещества.

Доза

Доза ионизирующего излучения - энергия ионизирующего излучения, поглощённая в единице массы облучаемого вещества. В этом смысле доза излучения называется также *поглощённой дозой* ($D_{\text{П}}$). Поглощённая энергия расходуется на нагрев вещества, а также на его химические и физические превращения. Величина дозы зависит от вида излучения (рентгеновское излучение, поток нейтронов и т.п.), энергии его частиц, плотности их потока и состава облучаемого вещества. При прочих равных условиях доза тем больше, чем больше время облучения. Таким образом, доза накапливается со временем. Доза, отнесённая к единице времени, называется *мощностью дозы*.

Зависимость величины дозы от энергии частиц, плотности их потока и состава облучаемого вещества различна для разных видов излучения. Например, для рентгеновского и γ -излучений доза зависит от атомного номера Z элементов, входящих в состав вещества; характер этой зависимости определяется энергией фотонов. Для этих видов излучений доза в тяжёлых веществах больше, чем в лёгких при одинаковых условиях облучения.

Нейтроны также взаимодействуют с ядрами атомов. Характер этого взаимодействия существенно зависит от энергии нейтронов. Если происходят упругие соударения нейтронов с ядрами, то средняя величина энергии, переданной ядру в одном акте взаимодействия, оказывается большей для лёгких ядер. В этом случае (при одинаковых условиях облучения) поглощённая доза в лёгком веществе будет выше, чем в тяжёлом.

Другие виды ионизирующих излучений имеют свои особенности взаимодействия с веществом, которые определяют зависимость дозы от энергии излучения и состава вещества. По-

глощённая доза в системе единиц СИ измеряется в Дж/кг. Широко распространена внесистемная единица *рад*: $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг}$. Мощность дозы измеряется в рад/сек, рад/ч и т.п.

Кроме поглощённой дозы, существуют понятия *экспозиционной* и *эквивалентной* дозы. *Экспозиционная доза* - мера ионизации воздуха под действием рентгеновского и γ -излучений — измеряется количеством образованных зарядов. Единицей экспозиционной доза в системе СИ является Кл/кг. Экспозиционная доза в 1 Кл/кг означает, что суммарный заряд всех ионов одного знака, образованных в 1 кг воздуха, равен одному Кулону.

Широко распространена внесистемная единица экспозиционной дозы – *Рентген*.

: *Рентген* - внесистемная единица экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучений, определяемая по ионизационному действию их на воздух. Названа в честь В. К. Рентгена; обозначения: русское «Р», международное «R». Под действием квантов рентгеновского или γ -излучения происходит ионизация молекул воздуха, приводящая к образованию пар заряженных частиц, в том числе электронов со значительной кинетической энергией. Эти электроны в свою очередь ионизируют воздух. 1 Р есть экспозиционная доза рентгеновского или γ -излучения, при котором соответствующее ему корпускулярное излучение (т. е. электроны) производит в 0,001293 г воздуха (в 1 см³ воздуха при нормальных условиях - при 0°C и 760 мм рт. ст.) такое число ионов, что их суммарный заряд равен 0,1 Кл для каждого знака. При этом имеется в виду, что заряженные частицы, образовавшиеся в 1 см³ воздуха, израсходуют всю полученную энергию на ионизацию. Согласно определению, Рентген может применяться лишь для излучений с энергией квантов не более 3 МэВ. Дозе в 1 Р соответствует образование $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов в 1 см³ воздуха или $1,61 \cdot 10^{12}$ пар в 1 г воздуха. $1 \text{ Р} = 2,57976 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$. При средней энергии ионизации молекул воздуха около 33 эВ 1 Р эквивалентен $85 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/г}$. Эта величина называется *физическим эквивалентом рентгена* (фэр).

По величине экспозиционной дозы можно рассчитать поглощённую дозу рентгеновского и γ -излучений в любом веществе. Для этого необходимо знать состав вещества и энергию фотонов излучения.

При облучении живых организмов, в частности человека, возникают биологические эффекты, величина которых определяет степень радиационной опасности. Для данного вида излучения наблюдаемые радиационные эффекты во многих случаях пропорциональны поглощённой энергии. Однако при одной и той же поглощённой дозе в тканях организма биологический эффект оказывается различным для разных видов излучения. Следовательно, знание величины поглощённой дозы оказывается недостаточным для оценки степени радиационной опасности. Принято сравнивать биологические эффекты, вызываемые любыми ионизирующими излучениями, с биологическими эффектами, вызываемыми рентгеновским и γ -излучениями. Коэффициент, показывающий во сколько раз радиационная опасность для данного вида излучения выше, чем радиационная опасность для рентгеновского излучения при одинаковой поглощённой дозе в тканях организма, называется *коэффициентом качества К*. Для рентгеновского и γ -излучений $K=1$. Для всех других ионизирующих излучений коэффициент качества устанавливается на основании радиобиологических данных. Коэффициент качества может быть разным для различных энергий одного и того же вида излучения. Например, для тепловых нейтронов $K=3$, для нейтронов с энергией 0,5 МэВ $K=10$, а для нейтронов с энергией 5,0 МэВ $K=7$. Эквивалентная доза $D_{\text{Э}}$ определяется как произведение поглощённой $D_{\text{П}}$ на коэффициент качества излучения K :

$$D_{\text{Э}} = D_{\text{П}} \cdot K$$

Т.к. коэффициент K является безразмерной величиной, то эквивалентная доза измеряется в тех же единицах, что и поглощённая.

Однако существует специальная единица эквивалентной дозы – бэр. Бэр (биологический эквивалент рентгена) (англ. REM - roentgen equivalent man) - внесистемная единица измерения эквивалентной дозы. 1 бэр соответствует такому облучению живого организма данным видом излучения, при котором наблюдается тот же биологический эффект, что и при экспозиционной дозе γ -излучения в 1 рентген.

В СИ бэр имеет ту же размерность и значение, что и рад - обе единицы равны 0,01 Дж/кг для излучений с коэффициентом качества, равным единице. 100 бэр равны 1 *зиверту*.

Эквивалентная доза в 1 бэр численно равна поглощённой дозе в 1 рад, умноженной на коэффициент качества К. Поскольку бэр достаточно большая единица измерения, обычно эквивалентную дозу измеряют в миллибэрах (мбэр, 10^{-3} бэр) или микрозивертах (мкЗв, 10^{-6} Зв).

Таким образом, одинаковой величине эквивалентной дозе соответствует одинаковая радиационная опасность, которой подвергается человек при воздействии на него любого вида излучения. Естественные источники ионизирующего излучения (космические лучи, естественная радиоактивность почвы, воды, воздуха, а также радиоактивность, содержащаяся в теле человека) создают в среднем мощность эквивалентной дозе 125 мбэр в год.

Эквивалентная доза в 400-500 бэр, полученная за короткое время при облучении всего организма, может привести к смертельному исходу (без специальных мер лечения). Однако такая же эквивалентная дозе, полученная человеком *равномерно* в течение всей его жизни, не приводит к видимым изменениям его состояния.

Эквивалентная дозе в 5 бэр в год считается предельно допустимой дозой (ПДД) при профессиональном облучении.

Минимальная доза γ -излучения, вызывающая подавление способности к размножению некоторых клеток после однократного облучения, составляет 5 бэр. При длительных ежедневных воздействиях дозе в 0,02-0,05 бэр наблюдаются начальные изменения крови, а доза в 0,11 бэр - образование опухолей. Об отдалённых последствиях облучения судят по увеличению частоты мутаций у потомков. Доза, удваивающая частоту спонтанных мутаций у человека, вероятно, не превышает 100 бэр на поколение. При местном облучении, например с целью лечения злокачественных опухолей, применяют (при соблюдении защиты всего организма) высокие Д. (6000-10000 бэр за 3-4 недели) рентгеновских или γ -лучей (лучевая терапия).

В радиобиологии различают следующие дозы, приводящие к гибели животных в ранние и поздние сроки. Дозы, вызывающая гибель 50% животных за 30 дней (так называемая летальная доза - ЛД_{30/50}), составляет при однократном одностороннем рентгеновском или γ -облучениях для морской свинки 300 бэр, для кролика 1000 бэр. Минимальная абсолютно летальная доза (МАЛД) для человека при общем γ -облучении равна 600 бэр. С увеличением дозы продолжительность жизни животных сокращается, пока она не достигает 2,8 - 3,5 сут, дальнейшее увеличение дозы не меняет этого срока. Лишь дозы выше 10000-20000 бэр сокращают продолжительность жизни до одних суток, а при последующем облучении - до нескольких часов. При дозе в 15000-25000 бэр отмечаются случаи «смерти под лучом». Каждому диапазону дозы соответствует определённая форма лучевого поражения. Ряд беспозвоночных животных, растений и микроорганизмов обладает значительно более низкой чувствительностью.

Лучевое повреждение организма сопровождается одновременно текущим процессом восстановления, который связан с нормализацией обмена веществ и регенерацией клеток. Поэтому облучение дробное или с малой мощностью доз вызывает меньшее повреждение, чем массивное воздействие. Изучение процессов восстановления важно для поисков радиозащитных веществ, а также средств и методов защиты организма от излучений. В небольших дозах все обитатели Земли постоянно подвержены действию ионизирующего излучения - космических лучей и радиоактивных изотопов, входящих в состав самих организмов и окружающей среды. Испытания атомного оружия и мирное применение атомной энергии повышают радиоактивный фон. Это делает изучение биологического действия ионизирующих излучений и поиски защитных средств всё более важными.

Биологическим действием ионизирующих излучений пользуются в биологических исследованиях, в медицинской и сельскохозяйственной практике. На биологическом действии ионизирующих излучений основаны лучевая терапия, рентгенодиагностика, радиоизотопная терапия.

Измерение дозы излучения с целью предсказания радиационного эффекта осуществляют дозиметрами.

Дозиметрические приборы

Дозиметрические приборы (дозиметры) - устройства, предназначенные для измерения доз ионизирующих излучений или величин, связанных с дозами. Дозиметры могут служить для измерения доз одного вида излучения (γ -дозиметры, нейтронные дозиметры и т. д.) или смешанного излучения.

Дозиметры для измерения экспозиционных доз рентгеновского и γ -излучений обычно градуируют в Рентгенах и называются *рентгенметрами*. Дозиметры для измерения эквивалентной дозы, характеризующей степень радиационной опасности, иногда градуируют в Бэрах и их часто называют бэрметрами. Радиометрами измеряют активности или концентрацию радиоактивных веществ.

Типичная блок-схема дозиметра состоит из детектора и измерительных устройств. В детекторе происходит поглощение энергии излучения, приводящее к возникновению радиационных эффектов, величина которых измеряется с помощью измерительных устройств. По отношению к измерительной аппаратуре детектор является датчиком сигналов. Показания дозиметров регистрируются выходным устройством (стрелочные приборы, самописцы, электромеханические счётчики, звуковые или световые сигнализаторы и т. п.).

По способу эксплуатации различают дозиметры стационарные, переносные (можно переносить только в выключенном состоянии) и носимые. Дозиметры для измерения дозы излучения, получаемой каждым человеком, находящимся в зоне облучения, называются индивидуальным дозиметром.

В зависимости от типа детектора различают: ионизационные дозиметры, сцинтилляционные, люминесцентные, полупроводниковые, фотодозиметры и т. д.

В случае ионизационных камер состав газа и вещества стенок выбирают таким, чтобы при тождественных условиях облучения обеспечивалось одинаковое поглощение энергии (в расчёте на единицу массы) в камере и биологической ткани. В дозиметрах для измерения экспозиционных доз камеры наполняют воздухом.

К числу устройств, накапливающих информацию о дозе излучения, относятся дозиметры, в которых детектором служат специальные сорта фоточувствительных плёнок. Оптическая плотность почернения (после химической обработки) является мерой дозы излучения.

Радиационная защита

Радиационная защита - система регламентации воздействия ионизирующих излучений, направленная на защиту населения и профессиональных работников, а также, изыскание способов ослабления поражающего действия ионизирующих излучений; одно из направлений радиобиологии.

Защита включает в себя:

- профессиональную защиту от радиации (защита рабочих)
- медицинскую защиту от радиации (защита пациентов)
- общественную защиту от радиации (защита населения).

Основными способами защиты от ионизирующих излучений являются:

- защита расстоянием;
- защита временем;
- защита экранированием:
 - от α -излучения - лист бумаги, резиновые перчатки, респиратор;
 - от β -излучения - плексиглас, тонкий слой алюминия, стекло, противогаз;
 - от γ -излучения - тяжёлые металлы (вольфрам, свинец, сталь, чугун и пр.);
 - от нейтронов - вода, полиэтилен, другие полимеры;
- химические средства дезактивации.

Химическая защита от ионизирующего излучения - это ослабление результата воздействия излучения на организм при условии введения в него химических веществ, называемых *радиопротекторами*. Биологическая - представляет собой комплекс репарирующих ферментов и др.

Космические лучи

Космические лучи - элементарные частицы и ядра атомов, родившиеся и ускоренные до высоких энергий во Вселенной.

Космические лучи можно классифицировать по их происхождению:

- 1) вне нашей Галактики;
- 2) в нашей Галактике;
- 3) на Солнце;
- 4) в межпланетном пространстве.

Различают *первичные* космические лучи - космические лучи до входа в атмосферу и *вторичные* космические лучи, образовавшиеся в результате процессов взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли.

Космические лучи являются составляющей естественной радиации (фоновой радиации) на поверхности Земли и в атмосфере.

Химический спектр космических лучей в пересчете энергии на нуклон более чем на 94% состоит из протонов, ещё на 4% - из ядер гелия (α -частиц). Есть также ядра других элементов, но их доля значительно меньше. В пересчете энергии на частицу доля протонов составляет около 35%, доля тяжёлых ядер соответственно больше.

Традиционно частицы, наблюдаемые в космических лучах, делят на следующие группы: L, M, H, VH (соответственно, легкие, средние, тяжелые и сверхтяжелые). Особенностью химического состава первичного космического излучения является аномально высокое (в несколько тысяч раз) содержание ядер группы L (литий, бериллий, бор) по сравнению с составом звёзд и межзвёздного газа. Данное явление объясняется тем, что частицы космических лучей под воздействием галактического магнитного поля хаотически блуждали в пространстве около 7 млн лет, прежде чем достигнуть Земли. За это время ядра группы VH могут неупруго провзаимодействовать с протонами межзвёздного газа и расколоться на более легкие фракции. Данное предположение подтверждается тем, что космические лучи обладают очень высокой степенью изотропии.

Космические лучи были открыты в 1912 г. В. Гессом в опытах по изучению проводимости газов. Обнаруженный спонтанный электрический ток в газе не удавалось объяснить ионизацией, возникающей от естественной радиоактивности Земли. Наблюдаемое излучение оказалось настолько проникающим, что в ионизационных камерах, экранированных толстыми слоями свинца, все равно наблюдался остаточный ток. Был проведен ряд экспериментов с ионизационными камерами на воздушных шарах. Гесс обнаружил, что излучение растет с высотой, в то время как ионизация, вызванная радиоактивностью Земли, должна была бы падать с высотой. В дальнейшем было доказано, что это излучение направлено сверху вниз.

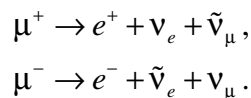
В 1921-1925 годах американский физик Милликен, изучая поглощение космического излучения в атмосфере Земли в зависимости от высоты наблюдения, обнаружил, что в свинце это излучение поглощается так же, как и γ -излучение ядер. Милликен первым и назвал это излучение космическими лучами. В 1925 году советские физики Л.А.Тувим и Л.В. Мысовский провели измерение поглощения космического излучения в воде: оказалось, что это излучение поглощалось в десять раз слабее, чем γ -излучение ядер. Мысовский и Тувим обнаружили также, что интенсивность излучения зависит от барометрического давления - открыли «барометрический эффект». Опыты Д.В. Скобельцына с камерой Вильсона, помещенной в постоянное магнитное поле, дали возможность «увидеть», за счет ионизации, следы (треки) космических частиц. Скобельцын открыл ливни космических частиц. Эксперименты в космических лучах позволили сделать ряд принципиальных для физики микромира открытий. В 1932 году Андерсон открыл в космических лучах позитрон. В 1937 году Андерсоном и Неддермейером были открыты мюоны и указан тип их распада. В 1947 году открыли π -мезоны. В 1955 году в космических лучах установили наличие K-мезонов, а также и тяжелых нейтральных частиц - гиперонов. Квантовая характеристика «странность» появилась именно в опытах с космическими лучами. Эксперименты в космических лучах поставили вопрос о сохранении четности, обнаружили процессы множест-

венной генерации частиц в нуклонных взаимодействиях, позволили определить величину эффективного сечения взаимодействия нуклонов высокой энергии. Появление космических ракет и спутников привело к новым открытиям - обнаружению радиационных поясов Земли (1958 г., С.Н. Вернов и А.Е. Чудаков и, независимо от них в том же году, Ван Аллен), и позволило создать новые методы исследования галактического и межгалактического пространства.

В результате взаимодействия с ядрами атомов атмосферы первичные космические лучи (в основном протоны) создают большое число вторичных частиц - пионов, протонов, нейтронов, мюонов, электронов, позитронов и фотонов. Таким образом, вместо одной первичной частицы возникает большое число вторичных частиц, которые делятся на адронную, мюонную и электронно-фотонную компоненты. Такой каскад покрывает большую территорию и называется *широким атмосферным ливнем*.

В одном акте взаимодействия протон обычно теряет ~50% своей энергии, а в результате взаимодействия возникают в основном пионы. Каждое последующее взаимодействие первичной частицы добавляет в каскад новые адроны, которые летят преимущественно по направлению первичной частицы, образуя *адронный корень ливня*.

Образующиеся пионы могут взаимодействовать с ядрами атмосферы, а могут распадаться, формируя мюонную и электронно-фотонную компоненты ливня. Адронная компонента до поверхности Земли практически не доходит, превращаясь в мюоны, нейтрино и γ -кванты. Мюоны в свою очередь могут распадаться



Образующиеся при распаде нейтральных пионов γ -кванты вызывают каскад электронов и γ -квантов, которые в свою очередь образуют электрон-позитронные пары. Заряженные лептоны теряют энергию на ионизацию и радиационное торможение. Поверхности Земли в основном достигают релятивистские мюоны. Электронно-фотонная компонента поглощается сильнее.

Один протон с энергией $>10^{14}$ эВ может создать 10^6 - 10^9 вторичных частиц. Поток космических лучей на уровне моря примерно в 100 раз меньше потока первичных космических лучей ($\sim 0,01 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$).

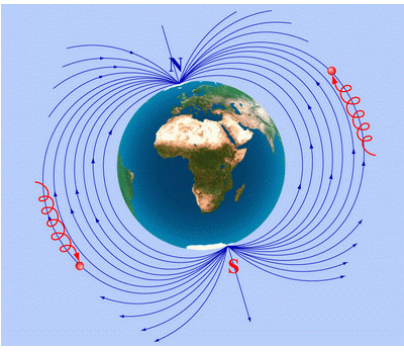
Интенсивность космических лучей на больших интервалах времени была постоянна в течение $\sim 10^9$ лет. Однако появились данные, что 30-40 тыс. лет тому назад интенсивность космических лучей заметно отличалась от современной. Пик интенсивности связывают со взрывом близкой к Солнечной системе (~ 50 парсек) Сверхновой.

Замечание. Парсек (русское сокращение пк, международное сокращение: pc) - распространённая в астрономии внесистемная единица измерения расстояния. Название происходит от *параллакс угловой секунды* и обозначает расстояние до объекта, годичный тригонометрический *параллакс* (изменение видимого положения объекта относительно удалённого фона в зависимости от положения наблюдателя) которого равен одной угловой секунде. Согласно другому эквивалентному определению, парсек - это такое расстояние, с которого *средний радиус земной орбиты* (равный одной астрономической единице), перпендикулярный лучу зрения, виден под углом в одну угловую секунду ($1''$): $1 \text{ пк} \approx 206\,265 \text{ а. е.} \approx 3,08568 \cdot 10^{13} \text{ км} \approx 3,2616 \text{ световых лет}$.

В околоземном космическом пространстве различают несколько типов космических лучей. К стационарным принято относить галактические космические лучи (ГКЛ), частицы альbedo и радиационный пояс. К нестационарным - солнечные космические лучи (СКЛ).

Основными источниками первичных космических лучей являются взрывы сверхновых звезд (галактические космические лучи) и Солнце. Большие энергии (до 10^{16} эВ) галактических космических лучей объясняются ускорением частиц на ударных волнах, образующихся взрывах сверхновых. Природа космических лучей сверхвысоких энергий пока не имеет однозначной интерпретации.

Галактические космические лучи (ГКЛ)



Галактические космические лучи (ГКЛ) состоят из ядер различных химических элементов с кинетической энергией E более нескольких десятков МэВ/нуклон, а также электронов и позитронов с $E > 10$ МэВ. Эти частицы приходят в межпланетное пространство из межзвёздной среды. Источником этих частиц являются сверхновые звезды нашей Галактики. Возможно, однако, что в области $E < 100$ МэВ/нуклон частицы образуются за счет ускорения в межпланетной среде частиц солнечного ветра и межзвездного газа. Дифференциальный энергетический спектр ГКЛ носит степенной характер.

Солнечные космические лучи

Солнечными космическими лучами (СКЛ) называются энергичные заряженные частицы (электроны, протоны и ядра) выброшенные Солнцем в межпланетное пространство. Энергия СКЛ простирается от нескольких кэВ до нескольких ГэВ. В нижней части этого диапазона СКЛ граничат с протонами высокоскоростных потоков солнечного ветра. Частицы СКЛ появляются вследствие солнечных вспышек.

Космические лучи ультравысоких энергий

Энергия некоторых частиц превышает так называемый предел Грайзена-Зацепина-Кузьмина - теоретический предел энергии для космических лучей $6 \cdot 10^{19}$ эВ. Несколько десятков таких частиц за год было зарегистрировано обсерваторией AGASA. Эти наблюдения ещё не имеют достаточно обоснованного научного объяснения.

Длительное воздействие космической радиации способно очень негативно отразиться на здоровье человека. Для дальнейшей экспансии человечества к иным планетам Солнечной системы следует разработать надёжную защиту от подобных опасностей.

Регистрация космических лучей

Долгое время после открытия космических лучей, методы их регистрации не отличались от методов регистрации частиц в ускорителях, чаще всего - газоразрядные счётчики или ядерные фотографические эмульсии, поднимаемые в стратосферу, или в космическое пространство. Но данный метод не позволяет вести систематические наблюдения частиц с высокой энергией, так как они появляются достаточно редко, а пространство, в котором такой счётчик может вести наблюдения, ограничено его размерами.

Современные обсерватории работают на других принципах. Когда высокоэнергетичная частица входит в атмосферу она, взаимодействуя с атомами воздуха на первых 100 г/см^2 , рождает целый шквал частиц, в основном пионов и мюонов, которые в свою очередь рождают другие частицы, и так далее. Образуется конус из частиц, который называют ливнем. Такие частицы движутся со скоростью превышающей скорость света в воздухе, благодаря чему возникает черенковское свечение, регистрируемое телескопами. Такая методика позволяет следить за областями неба площадью в сотни квадратных километров.

Радиационный пояс.

Радиационный пояс - область магнитосфер планет, в которой накапливаются и удерживаются проникшие в магнитосферу высокоэнергичные заряженные частицы (в основном протоны и электроны).

Радиационный пояс Земли (другое название радиационный пояс Ван Аллена - *Van Allen radiation belt*) - был открыт американским учёным Джеймсом ван Алленом после полета первого американского спутника Эксплорер-1 (внутренний пояс) и независимо советскими учёными - С.Н. Верновым и А.Е. Чудаковым после полёта Спутник-3 (внешний пояс) в 1958 году.

Радиационные пояса Земли – это внутренние области земной магнитосферы в которых магнитное поле Земли удерживает заряженные частицы (*протоны, электроны, α -частицы*), обладающие кинетической энергией от десятков кэВ до сотен МэВ - в разных областях радиационного пояса Земли энергия частиц различна. Выходу заряженных частиц из радиационного пояса

Земли мешает особая конфигурация силовых линий геомагнитного поля, создающего для заряженных частиц *магнитную ловушку* (или как принято говорить - *зону захвата*.)

Захваченные в ловушку Земли частицы под действием *Лоренца силы* совершают сложное движение, которое можно представить как колебательное движение по спиральной траектории вдоль силовой линии поля из Северного полушария в Южное и обратно с одновременным более медленным перемещением (долготным дрейфом) вокруг Земли. Когда частица движется по спирали в сторону увеличения поля (приближаясь к Земле), радиус спирали и ее шаг уменьшаются. Вектор скорости частицы, оставаясь неизменным по величине, приближается к плоскости, перпендикулярной направлению поля. Наконец, в некоторой точке (ее называют зеркальной) происходит «отражение» частицы. Она начинает двигаться в обратном направлении - к сопряженной зеркальной точке в др. полушарии. Одно колебание вдоль силовой линии из Северного полушария в Южное протон с энергией ~ 100 Мэв совершает за время $\sim 0,3$ сек. Время нахождения («жизни») такого протона в геомагнитной ловушке может достигать 100 лет ($\sim 3 \cdot 10^9$ сек), за это время он может совершить до 10^{10} колебаний. В среднем захваченные частицы большой энергии совершают до нескольких сотен миллионов колебаний из одного полушария в другое. Долготный дрейф происходит со значительно меньшей скоростью. В зависимости от энергии частицы совершают полный оборот вокруг Земли за время от нескольких минут до суток. Положительные ионы дрейфуют в западном направлении, электроны - в восточном.

Частицы альbedo - это вторичные частицы, отраженные от атмосферы Земли. Нейтроны альbedo обеспечивают радиационный пояс протонами с энергией до 10^3 МэВ и электронами с энергией до нескольких МэВ. Максимум интенсивности протонов низких энергий расположен на расстояниях ~ 3 радиусов Земли от её центра. Малоэнергичные электроны заполняют всю область захвата. Для них нет деления на внутренний и внешний пояса. Поток протонов во внутреннем поясе довольно устойчив во времени.

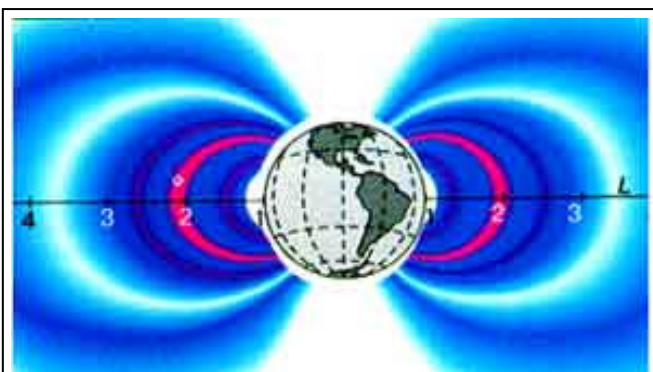
Процесс взаимодействия ядер первичного космического излучения с атмосферой сопровождается возникновением нейтронов. Поток нейтронов, идущий от Земли (нейтроны альbedo), беспрепятственно проходит сквозь магнитное поле Земли. Поскольку нейтроны нестабильны (среднее время распада ~ 900 с), часть из них распадается в зонах, недоступных для заряженных частиц малых энергий. Таким образом, продукты распада нейтронов (протоны и электроны) рождаются прямо в зонах захвата. В зависимости от энергии и направления движения эти протоны и электроны могут либо оказаться захваченными, либо покинуть эту область.

Частицы высоких энергий могут быть удержаны лишь сильным магнитным полем, т. е. во внутренних областях магнитосферы.

В околоземном пространстве можно выделить две торообразные области, расположенные в экваториальной плоскости примерно на расстоянии от 300 км до 6000 и от 12000 км до 40000 км. Обычно выделяют внутренний и внешний радиационные пояса Земли, пояс протонов малых энергий (пояс кольцевого тока) и зону квазизахвата частиц, или *авроральной радиации* (латинское название *полярных сияний*).

Внутренний радиационный пояс характеризуется наличием протонов высоких энергий (от 20 до 800 Мэв). Во внутреннем поясе присутствуют также электроны с энергиями от 20—40 кэв до 1 Мэв.

Внутренний пояс расположен вокруг Земли в экваториальных широтах. С внешней стороны этот пояс ограничен оболочкой с $L \sim 2$ радиуса Земли, которая пересекается с поверхностью Земли на геомагнитных широтах $\sim 45^\circ$. Ближе всего к поверхности Земли (на



Меридиональное сечение радиационного пояса Земли.

$L \sim 1 \div 3$ радиуса Земли - внутренняя часть пояса;

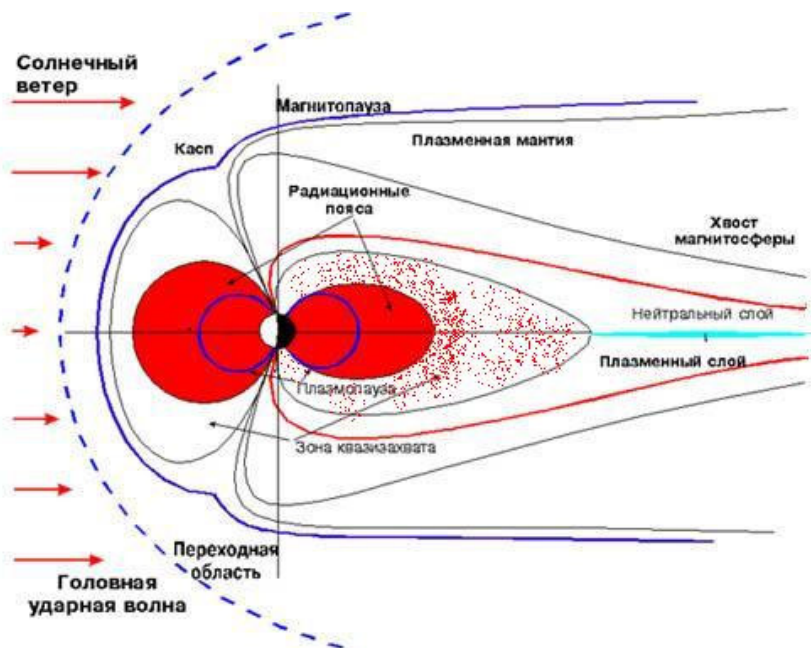
$L \sim 3,5-7$ радиуса Земли - внешняя часть.

высоты до 200-300 км) внутренний пояс подходит вблизи Бразильской магнитной аномалии, где поле сильно ослаблено; над географическим экватором нижняя граница внутреннего пояса отстоит от Земли примерно на 600 км над Америкой и до 1600 км над Австралией. На нижней границе внутреннего пояса частицы, испытывая частые столкновения с и молекулами атмосферных газов, теряют свою энергию, рассеиваются и «поглощаются» атмосферой.

Для внешнего радиационного пояса Земли характерны электроны с энергиями 40-100 кэВ. Среднее время «жизни» частиц внешнего радиационного пояса Земли составляет 10^5 - 10^7 сек. В периоды повышенной солнечной активности во внешнем поясе присутствуют также электроны больших энергий (до 1 МэВ и выше).

Пояс протонов малых энергий ($E_p \sim 0,03$ —10 МэВ) простирается от $L \sim 1,5$ радиуса Земли до $L \sim 7$ —8 радиусов Земли. Зона квазизахвата, или авроральной радиации, расположена за внешним поясом, она имеет сложную пространственную структуру, обусловленную деформацией солнечным ветром (потокотом заряженных частиц от Солнца). Основной составляющей частиц зоны квазизахвата являются электроны и протоны с энергиями $E < 100$ кэВ. Внешний пояс и пояс протонов малых энергий ближе всего (до высоты 200-300 км) подходит к Земле на широтах 50—60°. На широты выше 60° проецируется зона квазизахвата, совпадающая с областью максимальной частоты появления полярных сияний. В некоторые периоды отмечается существование узких поясов электронов высоких энергий ($E_e \sim 5$ МэВ) на оболочках с $L \sim 2,5$ —3,0 радиуса Земли

Радиационные пояса испытывают различные временные вариации: расположенный ближе к Земле и более стабильный внутренний пояс - незначительные, внешний пояс - наиболее частые и сильные. Для внутреннего радиационного пояса Земли характерны небольшие вариации



ции в течение 11-летнего цикла солнечной активности. Внешний пояс заметно меняет свои границы и структуру даже при незначительных возмущениях. Пояс протонов малых энергий занимает в этом смысле промежуточное положение. Особенно сильные вариации радиационных поясов Земли претерпевают во время *магнитных бурь*. Сначала во внешнем поясе резко возрастает плотность потока частиц малых энергий и в то же время теряется заметная доля частиц больших энергий. Затем происходит захват и ускорение новых частиц, в результате которых в поясах появляются потоки частиц на расстояниях обычно более близких к Земле, чем в спокойных условиях. После фазы сжатия происходит медленное, постепенное возвращение радиационных поясов Земли к исходному состоянию. В периоды высокой солнечной активности бури происходят очень часто, так что эффекты от отдельных бурь накладываются друг на друга, и

максимум внешнего пояса в эти периоды располагается ближе к Земле, чем в периоды минимума солнечной активности.

Высыпание частиц из ловушки, в особенности из зоны квазизахвата (авроральной радиации), приводит к усилению ионизации ионосферы, а интенсивное высыпание - к полярным сияниям. Во время бурь происходит как накачка частиц в радиационный пояс Земли, так и сброс их в атмосферу Земли. Полярные сияния длятся все время, пока идут эти процессы, - иногда сутки и более.

Радиационные пояса Земли могут быть созданы также искусственным образом. Например, при взрыве ядерного устройства на больших высотах; при инъекции искусственно ускоренных частиц, например с помощью ускорителя на борту спутника; при распылении в околоземном пространстве радиоактивных веществ, продукты распада которых будут захвачены полем. Создание искусственных поясов при взрыве ядерных устройств было осуществлено в 1958 и в 1962 годах. Так, после американского ядерного взрыва (9 июля 1962) во внутренний пояс было инжестировано около 10^{25} электронов с энергией ~ 1 МэВ, что на два-три порядка превысило интенсивность потока электронов естественного происхождения. Остатки этих электронов наблюдались в поясах в течение почти 10-летнего периода.

Радиационные пояса Земли представляют собой серьезную опасность при длительных полетах в околоземном пространстве. Потоки протонов малых энергий могут вывести из строя *солнечные батареи* и вызвать помутнение тонких оптических покрытий. Длительное пребывание во внутреннем поясе может привести к *лучевому поражению* живых организмов внутри космического корабля под воздействием протонов высоких энергий.

Радиационные пояса планет

Благодаря наличию сильного магнитного поля, планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун) также обладают сильными радиационными поясами, напоминающими внешний радиационный пояс Земли.