



МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. М. В. ЛОМОНОСОВА

И. Н. Бекман

РАДИОХИМИЯ

ТОМ 1

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ РАДИОХИМИЯ

**УЧЕБНИК И ПРАКТИКУМ
ДЛЯ АКАДЕМИЧЕСКОГО БАКАЛАВРИАТА**

*Рекомендовано Учебно-методическим отделом
высшего образования в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по естественно-научным направлениям
и специальностям*

**Книга доступна в электронной библиотечной системе
biblio-online.ru**

Москва ■ Юрайт ■ 2014

УДК 544.58(075.8)

ББК 24.13я73

Б42

Автор:

Бекман Игорь Николаевич — профессор, доктор химических наук, профессор кафедры радиохимии химического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, заслуженный профессор МГУ.

Рецензенты:

Афанасов М. И. — доктор химических наук, профессор кафедры радиохимии химического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова;

Сергиевский Б. В. — доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой общей химии факультета технической физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», заслуженный деятель науки РФ.

Бекман, И. Н.

Б42

Радиохимия. В 2 т. Т. 1. Фундаментальная радиохимия : учебник и практикум для академического бакалавриата / И. Н. Бекман. — М. : Издательство Юрайт, 2014. — 473 с. — Серия : Бакалавр. Академический курс.

ISBN 978-5-9916-4146-3 (т. 1)

ISBN 978-5-9916-4148-7

Учебник содержит систематический материал по физическим основам радиохимии, дозиметрии и технике безопасности, ядерно-физическим, химическим и радиотоксическим свойствам радиоактивных элементов, фундаментальной радиохимии, включая химию ядерных превращений и радиационную химию, промышленной радиохимии (производство радионуклидов для ядерных зарядов и для топлива атомных реакторов), прикладной радиохимии (включая методы использования меченых атомов), экологической (состояние и миграция радионуклидов в природных средах) и медицинской радиохимии (синтез меченых соединений медицинского назначения и создание радиофармпрепаратов для диагностики и терапии).

Соответствует Федеральному государственному образовательному стандарту высшего образования четвертого поколения.

Для студентов и аспирантов химических факультетов университетов, химико-технологических и технических вузов, специализирующихся в области радиохимии и ядерной химии, для аспирантов и преподавателей смежных специальностей, а также для специалистов и исследователей, работающих с радиоактивными веществами, изотопами, ионизирующими излучениями в технических областях, медицине и в области охраны окружающей среды.

УДК 544.58(075.8)

ББК 24.13я73

ISBN 978-5-9916-4146-3 (т. 1)

ISBN 978-5-9916-4148-7

© Бекман И. Н., 2013

© ООО «Издательство Юрайт», 2014

Оглавление

Предисловие к изданию	5
Предисловие к тому 1	8
Принятые сокращения	9
Введение	11
1. Радиохимия и смежные науки	11
2. Краткая история радиохимии	19
Глава 1. Физические основы радиохимии	28
1.1. Атомное ядро	29
1.2. Типы радиоактивного распада	41
1.3. Кинетика радиоактивного распада	51
1.4. Ионизирующие излучения	63
1.5. Ядерные реакции	72
1.6. Измерение ионизирующих излучений	91
1.7. Статистическая обработка результатов радиометрических измерений	106
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	124
<i>Задачи</i>	126
Глава 2. Радиоактивные элементы	135
2.1. Технеций	135
2.2. Прометий	156
2.3. Полоний	159
2.4. Астат	169
2.5. Радон	174
2.6. Франций	181
2.7. Радий	184
2.8. Актиний	194
2.9. Актиниды	199
2.10. Торий	206
2.11. Протактиний	220
2.12. Уран	227
2.13. Нептуний	259
2.14. Плутоний	273
2.15. Америций	311
2.16. Кюрий	317
2.17. Берклий	321
2.18. Калифорний	322
2.19. Эйнштейний	326
2.20. Фермий	328
2.21. Менделевий	329

2.22. Нобелий	331
2.23. Лоуренсий	332
2.24. Трансактинидные элементы	332
2.25. Резерфордий	341
2.26. Дубний	342
2.27. Сиборгий	343
2.28. Борий	344
2.29. Хассий	344
2.30. Мейтнерий	345
2.31. Дармштадтий	346
2.32. Рентгений	346
2.33. Коперниций	347
2.34. Унунтрий	348
2.35. Флеровий	348
2.36. Унунпентий	349
2.37. Ливерморий	350
2.38. Унунсептий	350
2.39. Унуноктий	351
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	351
<i>Задачи</i>	354
Глава 3. Фундаментальная радиохимия	355
3.1. Изотопный обмен	356
3.2. Методы разделения радиоактивных веществ	363
3.2.1. Соосаждение	364
3.2.2. Адсорбция	372
3.2.3. Электрохимия радиоактивных элементов	376
3.2.4. Ионнообменная хроматография	381
3.2.5. Метод экстракции	387
3.2.6. Мембранное разделение	395
3.2.7. Газохимические методы разделения	401
3.3. Состояние радионуклидов в различных средах	407
3.3.1. Коллоидное состояние радиоактивных элементов	407
3.3.2. Состояние радионуклидов в твердой фазе	417
3.3.3. Состояние радиоактивных изотопов в газовой фазе	420
3.4. Радиационная химия в радиохимии	422
3.5. Химические явления, связанные с ядерными превращениями	430
3.5.1. Эффект отдачи	431
3.5.2. Химические последствия радиоактивного распада	441
3.5.3. Эффект Сцилларда – Чалмерса	447
3.5.4. Химия горячих атомов	450
3.5.5. Химические последствия ядерных реакций (n, p), (n, α) и (γ, n)	454
3.6. Изотопные эффекты	458
3.7. Методы анализа изотопного состава	460
<i>Вопросы и задания для самоконтроля</i>	463
<i>Задачи</i>	465
Рекомендуемая литература	468
Предметный указатель к тому 1	469

Предисловие к изданию

Целью учебника «Радиохимия» является предоставление студентам вузов информации, необходимой для освоения раздела химии, имеющего дело с радиоактивными веществами, включая знание законов радиоактивного распада и накопления радионуклидов, знакомство со свойствами ионизирующих излучений и закономерностями их взаимодействия с веществом, владение методами измерения ионизирующих излучений и способами статистической обработки результатов радиометрических измерений, знание ядерно-физических, физических, химических и радиотоксических свойств радиоактивных элементов, знакомство со способами получения изотопов и меченных ими соединений, а также методами меченых атомов, используемыми в решении химических, технических или медицинских проблем.

Курс включает описание физико-химических закономерностей поведения радионуклидов в ультраразбавленных состояниях, изотопных эффектов и методов разделения изотопов, особенностей ионного обмена и соосаждения, химии горячих атомов и радиационной химии, адсорбционных, экстракционных, электрохимических и мембранных методов выделения и очистки радиоактивных веществ.

Учебное пособие содержит сведения по химическим компонентам ядерной индустрии, промышленной радиохимии, методам радиоактивных индикаторов. Существенное внимание уделено использованию радиоактивных веществ и испускаемых ими ионизирующих излучений в радиоэкологии и ядерной медицине.

Цели химического образования студента по курсу «Радиохимия»:

- освоение основ современной радиохимии и практики производства радиоактивных элементов, методов изучения их ядерно-физических и химических свойств;
- выработка навыков использования радионуклидов и связанных с ними ионизирующих излучений в науке, технике, медицине и охране окружающей среды.

Задачи дисциплины:

- выработать у студента радиохимическое мышление, сформировать прочные знания по радиоактивности и способам ее использования в химии;
- научить методам качественного и количественного анализа радионуклидов, способам измерения радиоактивных излучений, расчетам кинетики распада и накопления радионуклидов, статистической обработке результатов;
- ознакомить с особенностями фундаментальной, промышленной и прикладной радиохимии, в том числе с методом меченых атомов и геохронологией.

В результате изучения дисциплины и выполнения необходимого объема самостоятельных работ студент будет:

знать

- физико-химические и биологические основы радиохимии, химию радиоактивных элементов, химию ядерных превращений, основные законы и методы радиохимии, особенности метода радиоактивных индикаторов;

уметь

- проводить качественный и количественный анализ радионуклидов в различных средах, выделять, концентрировать и очищать радиоактивные вещества, синтезировать меченые соединения и применять их в химии и медицине, определять состояние радионуклидов в различных средах, использовать методы радиохимии для решения задач развития ядерного энергетического комплекса;

владеть

- навыками обращения с радиоактивными веществами, расчета дозы, получаемой от ионизирующих излучений, и обеспечения защиты от них, регистрации ядерных излучений, обработки результатов радиометрических и радиохимических экспериментов, соблюдения правил техники безопасности работы в химических лабораториях с учетом соблюдения правил индивидуальной защиты и гигиенических нормативов.

Учебник состоит из двух томов: первый том — «Фундаментальная радиохимия», второй том — «Прикладная радиохимия и радиационная безопасность».

В первой главе тома 1 приведены сведения о физических основах радиохимии (строение ядра, явление радиоактивности, кинетика радиоактивного распада, накопление и распад в рядах «генетически» связанных радионуклидов, ядерные реакции, взаимодействие излучения с веществом, методы ре-

гистрации ионизирующего излучения, статистика распада и способы обработки результатов радиометрических экспериментов). Во второй главе рассмотрены ядерные, физические, химические и токсикологические свойства радиоактивных элементов (их нуклидов). В третьей главе изложены основные идеи фундаментальной радиохимии (изотопные эффекты, изотопный обмен, распределение радиоактивных изотопов между различными фазами, состояние радиоактивных изотопов в ультрамалых концентрациях), методы разделения радиоактивных веществ (адсорбция и сокристаллизация, экстракция, мембранная технология, электролитические методы), радиационная химия и химия горячих атомов.

В первой главе тома 2 описаны способы применения радиохимических идей и методов в ядерной индустрии (уран-плутониевый и уран-ториевый циклы, включая дореакторные, реакторные технологии, а также переработку, трансмутацию и захоронение радиоактивных отходов). Вторая глава посвящена применению радиоактивных изотопов в химии (определение возраста геологических и биологических объектов, различные варианты активационного анализа, эманационно-термический анализа и др.). В третьей главе рассмотрены методы мониторинга состояния и распространения радионуклидов в окружающей среде, а также некоторые аспекты экологической радиохимии и радиоэкологии. В четвертой главе основное внимание уделено перспективам применения методов радиохимии в ядерной медицине (радионуклидная диагностика и терапия, радиоиммунный анализ, методы наработки радионуклидов медицинского назначения и способы синтеза радиофармпрепаратов). Пятая глава посвящена биологическим аспектам радиохимии, в первую очередь биологическому действию ионизирующего излучения, способам оценки радиационных доз при внутреннем и внешнем облучении, а также организации и правилам работы в радиохимической лаборатории, включая дозиметрию и технику безопасности.

Учебник составлен на основе курса лекций, читаемых автором более 20 лет на химическом факультете Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова для студентов 4-го курса, изучающих радиохимию.

Предисловие к тому 1

Первый том учебника «Радиохимия» посвящен фундаментальным проблемам радиохимии. В нем рассмотрены основные особенности этой науки, отличающие ее от других наук, даны определения основных терминов и приведена краткая историческая справка. Первая глава является вводной, в ней рассмотрены явление радиоактивности и некоторые аспекты ядерной физики, необходимые для понимания основного текста, способы регистрации ионизирующих излучений, а также методы математической статистики, используемые в радиометрии. Во второй главе приведены ядерные, физические, химические и токсикологические свойства радиоактивных (т.е. не имеющих стабильных изотопов) элементов. Третья глава посвящена основам радиохимии, включая состояние радиоактивных изотопов в ультраразбавленном состоянии и химию высоких энергий.

В результате изучения материала тома 1 учебника студент будет:

знать

- основные особенности явления радиоактивности, законы радиоактивного распада и накопления, ядерные реакции, используемые для синтеза радиоактивных изотопов, ядерно-физические, физические, химические и токсические свойства всех радиоактивных элементов, основы радиационной химии, химию горячих атомов, методы выделения, разделения и очистки радиоактивных веществ;

уметь

- регистрировать с помощью специальных средств различные виды ионизирующих излучений, проводить химические эксперименты с радиоактивными изотопами, использовать изотопные эффекты для обогащения изотопной смеси требуемым радионуклидом;

- пользоваться технической и справочной литературой при изучении свойств новых радиоактивных элементов;

владеть

- навыками использования методов математической статистики в радиометрии и радиохимии, техникой наработки радионуклидов, способами учета и использования ионного обмена, методами анализа изотопного состава вещества.

Принятые сокращения

- АЭС** – атомная электростанция
БН (БР) – ядерный реактор на быстрых нейтронах (быстрый реактор)
ВАО – высокоактивные отходы
ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор
ВОУ – высокообогащенный уран
ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота
ДК_А – допустимая концентрация радионуклида в воздухе рабочей зоны
ДС_А – допустимое содержание радионуклида в «критическом» органе
ДСА – диффузионно-структурный анализ
ЖКТ – желудочно-кишечный тракт
ЖРО – жидкие радиоактивные отходы
ИЮПАК – IUPAC (англ. International Union of Pure and Applied Chemistry) – Международный союз теоретической и прикладной химии
ЛПЭ – линейная передача энергии
МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии
МА – минорные актиниды (нептуний, америций и кюрий)
МЗА – минимально значимая активность
МКРЗ – Международная комиссия по радиологической защите
МОКС-топливо – смешанное (уран-плутониевое) оксидное топливо (англ. *MOX* – *Mixed-Oxide*)
МОУ – малообогащенный уран
НАО – низкоактивные отходы
НКДАР – Научный комитет по действию атомной радиации
НОУ – низкообогащенный уран
НР – нерастворимое соединение
НРБ – нормы радиационной безопасности
ОИЯИ – Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия
ОСПОРБ – Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности
ОФЭКТ – однофотонная эмиссионная компьютерная томография
ОЯТ – отработавшее ядерное топливо
ПД – продукты деления
ПДК – предельно допустимая концентрация
ПДД – предельно допустимая доза
ПДП – предельно допустимое поступление радионуклида в организм

ПЭТ – позитронно-эмиссионная томография
Р – растворимое соединение
РАО – радиоактивные отходы
РБГ – радиоактивные благородные газы
РБМК – реактор большой мощности канальный
РФП – радиофармпрепарат
РЗЭ – редкоземельные элементы
САО – среднеактивные отходы
СД – самопроизвольное деление
СТЭ – сверхтяжелые элементы
СЭС – санитарно-эпидемиологическая служба
ТБФ – трибутилфосфат
ТВС – тепловыделяющая сборка
ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент
ТПЭ – трансплутониевые элементы
ТУЭ – трансурановые элементы
ФЭУ – фотоэлектронный умножитель
ЭДТА – этилендиаминтетрауксусная кислота
ЭЗ – электронный захват
ЯИ – ядерная индустрия
ЯТЦ – ядерный топливный цикл
ЯЭ – ядерная энергия

Введение

1. Радиохимия и смежные науки

Важнейшие открытия конца XIX в. явлений рентгеновского излучения (В. К. Рентген, 1895) и радиоактивности (А. Беккерель, 1896), новых элементов (М. и П. Кюри, 1898) привели к возникновению целого ряда наук (ядерная физика, радиохимия, ядерная химия, радиационная химия, радиоэкология и др.), а также к созданию ядерной промышленности и появлению ядерной медицины. Одна из самых важных в числе появившихся наук — радиохимия.

Согласно первым определениям: радиохимия — область науки, изучающая химическую природу и свойства радиоэлементов, а также продуктов их распада (Камерон, 1910), радиохимия — область науки, занимающаяся преимущественно свойствами продуктов радиоактивных превращений, их разделением и идентификацией (Ф. Содди «Химия радиоэлементов», 1911).

Очевидно, что признаком, отличающим радиохимию от всех других химических дисциплин, является радиоактивность и связанные с ней особенности как самих объектов исследования, так и применяемых методов. Ф. Панет определил радиохимию как химию веществ, которые исследуются по их ядерным излучениям, а И. Е. Старик изучал не вещества, а составляющие их элементы, определяя радиохимию как область химии, в которой изучаются химические и физико-химические свойства радиоактивных изотопов (И. Е. Старик «Основы радиохимии», 1959). А. Н. Несмеянов расширил это определение: «радиохимия — область химии, изучающая химию радиоактивных изотопов, элементов и веществ, законы их физико-химического поведения, химию ядерных превращений и сопутствующих им физико-химических процессов» (А. Н. Несмеянов «Радиохимия», 1972).

По определению Международного союза теоретической и прикладной химии (ИЮПАК):

радиохимия — *раздел химии, имеющий дело с радиоактивными веществами. Включает получение радионуклидов и их*

соединений путем обработки облученных материалов или природных радиоактивных веществ, применение химических методов к ядерным исследованиям и применение радиоактивности к исследованиям химических, биохимических или медицинских проблем («Номенклатурные правила ИЮПАК по химии». М., 2001).

Важно понимать, что радиохимия — наука о качественных изменениях радиоактивных изотопов под влиянием изменения количественного состава ядра. В ее задачу входит химическое доказательство перехода одного элемента в другой в результате радиоактивного распада или ядерной реакции. Отличие химии от радиохимии состоит в том, что первая изучает свойства тел при изменении числа, содержания и соотношений элементов (атомов) в молекулах вещества, а вторая — изменения состояния элементов вещества под влиянием изменения состава ядра, когда возникают новые элементы (изотопы), новые переходы данного изотопа элемента в другой элемент и т.д.

Основные разделы радиохимии: 1) фундаментальная радиохимия; 2) химия процессов, индуцированных ядерными превращениями; 3) химия радиоактивных элементов; 4) промышленная радиохимия (химия ядерного топливного цикла, производство радиоактивных изотопов и меченых соединений); 5) прикладная радиохимия (радионуклиды в химии, биологии, геологии, сельском хозяйстве, технике и т.п.); 6) экологическая радиохимия; 7) медицинская радиохимия.

Задачи радиохимии в ряде областей пересекаются с задачами ядерной химии. Согласно базовому определению: *ядерная химия* — раздел химии, который изучает ядра и ядерные реакции, используя химические методы. Она изучает взаимосвязь между превращениями атомных ядер и строением электронных оболочек атомов и молекул. Иногда термин «ядерная химия» применяют в том же смысле, что и радиохимия, что неверно. Ядерная химия находится на границе раздела между ядерной физикой, радиохимией и химической физикой, но не сводится к радиохимии.

Радиохимия базируется на явлении радиоактивности.

Согласно принятому в настоящее время определению (ИЮПАК):

радиоактивность — *свойство некоторых нуклидов подвергаться радиоактивному распаду.*

В расширенном варианте под радиоактивностью понимают самопроизвольное изменение состава атомного ядра, про-

исходящее путем испускания элементарных частиц или ядер из основного состояния за время, существенно превышающее время жизни возбужденного составного ядра в ядерных реакциях, или из метастабильного состояния.

Другая важная наука, занимающаяся изучением вещества на уровне ядра, достижения которой используются в радиохимии, — ядерная физика, т.е. раздел физики, охватывающий изучение структуры и свойств атомных ядер и их превращений — процессов радиоактивного распада и ядерных реакций.

Радиохимия учитывает достижения радиационной химии, которая имеет дело с химическими процессами, возбуждаемыми действием ионизирующих излучений. В радиохимии учитывают радиационные эффекты, возникающие как при внешнем облучении, так и от собственного излучения. Еще важнее, что в радиохимии многие радиационные эффекты связаны с «атомами отдачи», а не с радиацией.

При практической работе с радионуклидами радиохимики ориентируются на достижения таких наук, как радиобиология (изучает действие ионизирующих излучений на растительные и животные организмы, а также на биосферу в целом), радиотоксикология (изучает вызываемые радионуклидами патологические изменения в организме животных и человека с целью изыскания средств для ограничения их всасывания, ускорения выведения и лечения радиационных поражений) и радиационная гигиена (изучает последствия воздействия ионизирующих излучений на человека с целью разработки нормативов, мер профилактики и защиты от вредоносного воздействия этих излучений, включает такие направления, как дозиметрическое, радиобиологическое и санитарно-законодательное). В сфере охраны окружающей среды экологическая радиохимия тесно переплетается с радиационной экологией.

В экспериментальных методах радиохимии широко используются методы радиометрии, представляющие совокупность методов измерений активности радионуклидов, энергетического спектра излучений, кинетики распада, а также распределения источников излучения в пространстве и их изменения во времени.

В прикладном плане радиохимия направлена на развитие ядерной индустрии, под которой понимают отрасль промышленности, связанную с использованием ядерной энергии, совокупность технологий, предназначенных для использования внутренней энергии атомного ядра, выделяющейся при

ядерных превращениях. Основные направления: производство компонентов ядерного оружия и ядерного топлива для энергетических, транспортных и исследовательских реакторов, синтез радиоактивных изотопов и меченых молекул, выпуск источников излучения, разработка методов и средств защиты персонала от излучения. Прикладная радиохимия призвана обеспечивать функционирование ядерного топливного цикла, производство конструкционных и функциональных материалов атомной промышленности, переработку и захоронение радиоактивных отходов.

Многие направления прикладной радиохимии — метод радиоактивных индикаторов, активационный анализ, ядерная геохимия, радиоэкология, экологическая радиохимия, медицинская радиохимия и др. — используют идеи и методы фундаментальной радиохимии для решения разнообразных задач в науке, технике, геологии, охране окружающей среды, биологии, сельском хозяйстве и медицине.

Радиохимия зарождалась как раздел неорганической химии, изучающий химию элементов, не имеющих стабильных изотопов, за превращениями которых приходится следить исключительно по испускаемому ими радиационному излучению. Сейчас химия радиоактивных элементов по-прежнему относится к радиохимии, но в отличие от химиков-неоргаников радиохимики помимо химических постоянно отслеживают еще и ядерно-физические и радиотоксические свойства изучаемых радионуклидов.

Важная особенность радиохимического эксперимента — работа с элементами, имеющими крайне ограниченное время существования. Многие радионуклиды невозможно накопить в заметных количествах, поэтому опыты проводятся с ультрамалыми концентрациями в течение весьма малых интервалов времени. Например, при создании радиофармпрепарата, меченного радионуклидом с периодом полураспада 3 мин, нужно за время жизни изотопа наработать его на ускорителе, выделить, очистить, провести многостадийный направленный синтез меченого соединения, приготовить радиофармпрепарат, доставить его в госпиталь, ввести больному, провести диагностику. Такой процесс не позволяет использовать традиционные аналитические методы (перегонка, осаждение и т.п.), а требует применения специальных экспрессных методик синтеза и анализа готового продукта.

Радиохимия — химия ультраразбавленного состояния. Поэтому аналитические методики должны быть существен-

но чувствительнее традиционных. Важно также учитывать, что при низких концентрациях (отдельные атомы) радионуклиды обычно не способны образовывать собственную фазу (атомы радионуклида за время своей жизни не встречаются, не образуют друг с другом химических связей, а постоянно контактируют с атомами чужеродных элементов), поэтому они существуют в виде включений, псевдоколлоидов, аэрозолей и т.п. Этим обстоятельством объясняется различие состояния радионуклида в твердом теле, жидкости или газе от состояния его стабильного изотопа, пребывающего в макроконцентрации. Для радиохимика важно знать состояние радионуклида во вмещающей среде, поскольку именно оно определяет многие его свойства.

Упомянутые выше аспекты радиохимии в той или иной мере встречаются в обычной химии, но в радиохимии есть проблемы, которых нет в других разделах химии.

В сфере радиохимии неприменимо фундаментальное положение классической химии — неизменяемость природы химического элемента в ходе исследования. Радиохимики имеют дело с процессами радиоактивного распада и накопления (и их последствиями). При этом химическая чистота радиоактивного элемента, достигаемая в момент его получения, не остается постоянной. Элементарный и изотопный состав систем, содержащих радиоактивные вещества, — функции времени. Известны случаи, когда в ходе какой-либо операции (экстракции, синтеза и т.п.) успевает возникнуть и исчезнуть множество элементов и изотопов (каждый из которых характеризуется своими собственными ядерно-физическими, физическими и химическими свойствами). Так же важно отметить, что радиоактивные превращения сопровождаются чрезвычайно большими энергетическими эффектами. Эти эффекты на 6—8 порядков превышают изменения при обычных химических реакциях. Большие энергетические изменения являются причиной возникновения частиц (ионов, радикалов) и излучений большой энергии. В результате образуются зоны с высокой локальной энергией и протекают процессы, которые в классической химии не реализуются.

Химик, добавив в раствор барий, рассчитывает, что он там и находится. А радиохимик, добавив в раствор радий, спустя непродолжительное время обнаруживает, что в сосуде наряду с радием находятся инертный газ радон, полоний, висмут, таллий, несколько изотопов свинца, гелий и другие элементы. Концентрации этих элементов непрерывно меняются во

времени: одни исчезают, другие возникают и, в свою очередь, исчезают. Материнский нуклид — α -излучатель — в качестве потомков дает радиоактивные элементы, претерпевающие все известные типы распада и испускающие не только α -, но и жесткое β - и γ -излучение. В результате приходится постоянно совершенствовать систему радиационной защиты, менять методику исследования.

Именно необходимость изучения химического поведения непрерывно распадающихся и образующихся элементов со сложным изотопным составом и заставляет выделить радиохимию в самостоятельную науку, отличную от других разделов химии.

Возникновение новых элементов имеет важные химические последствия. Например, при использовании стабильных изотопов в кристалле K_2SO_4 существует сульфат-ион, т.е. хорошо образованный тетраэдр элементов К и О, в центре которого — шестивалентная сера. Если же сера радиоактивна (^{35}S), то она со временем превратится в пятивалентный фосфор и кристаллическая решетка такого соединения разрушится.

Радиоактивные вещества постоянно находятся под действием собственного ионизирующего излучения, причем и тип этого излучения, и его интенсивность постоянно меняются во времени. Радиационные эффекты здесь намного более разнообразны, чем в традиционной радиационной химии: при распаде или ядерной реакции испускаются не только ионизирующие излучения, но и ядра (атомы) отдачи. Вновь образовавшийся элемент, получив энергию отдачи, теряет электроны, превращаясь в положительно заряженный ион, разрывает химические связи и с большой скоростью движется в окружающей его среде, разрушая все на своем пути, а при стабилизации образует экзотические соединения. Поэтому в радиохимических исследованиях широко используются достижения радиационной химии, но сильно усложненной радиационной химии.

Развитие радиохимических методик позволило расширить периодическую систему элементов. Попытки расширить ее в сторону «доводородных» элементов не удались: замена протона в ядре атома на позитрон (частицу в 1835 раз легче протона), мюон ($m_\mu = 0,06 m_p$) или на гиперон (частица в 1,8 раза тяжелее протона) привела к образованию изотопов известного элемента — водорода. Второе направление модификации атома водорода — замена орбитального электрона

на другую отрицательно заряженную элементарную частицу (более тяжелую, чем электрон), например на мезон или адрон, также привела к образованию изотопов водорода. Поскольку позитроний, мюоний и многочисленные мезоатомы так же, как и еще один изотоп водорода — тритий, являются радиоактивными веществами, то изучение их свойств, в частности термодинамических и кинетических изотопных эффектов, относится к сфере радиохимии.

Расширение периодической таблицы в сторону тяжелых элементов было более успешным: сначала были синтезированы трансурановые элементы, затем все актиниды и наконец трансактинидные элементы, вплоть до 118-го (эка-радона). Все они радиоактивны. Изучение из свойств радиохимическими методами позволило найти им место в периодической системе. В настоящее время эти исследования активно продолжаются. На повестке дня стоят такие вопросы, как: будет ли 119-элемент щелочным, а 120-й щелочноземельным, возможно ли существование третьей обширной группы элементов с похожими свойствами (типа лантанидов и актинидов), возможно ли существование долгоживущих изотопов и др. Ответы на эти вопросы важны для развития учения о периодичности.

В связи с развитием периодической системы возникла проблема нулевой группы периодической таблицы. Как известно, Д. И. Менделеев зарезервировал нулевую группу не для инертных газов (которые в реальности оказались вовсе не инертными), а для элементов эфира. В настоящее время на нулевую группу претендуют элементы нейтронной материи, в первую очередь недавно открытые динейтрон ($2n$), тринейтрон ($3n$) и тетранейтрон ($4n$). Два последних из них нестабильны, в то время как динейтрон оказался «почти стабильен». Радиохимикам еще предстоит изучить их химические свойства (если они у них есть вообще).

Продвижение к синтезу на Земле нейтронной материи (в космосе нейтронные звезды, видимо, достаточно широко распространены) осуществляется сейчас путем наработки сильно нейтроноизбыточных ядер. Примерами являются недавно полученные ядра ^{14}Be , ^{19}B , ^{22}C , ^{23}N , ^{24}O , ^{29}F , $^{29,30,32}\text{Ne}$ и др. Особый интерес представляют легкие нейтроноизбыточные ядра, так как для них получено наибольшее отношение N/Z : для ^9He $N/Z = 3,5$, для ^{34}Na — 2,1, а для ^{252}Cf — 1,6. При исследовании свойств сверхтяжелых изотопов водорода и гелия была обнаружена «гелиевая аномалия», при которой

стабильность ядер с увеличением числа нейтронов при приближении к линии стабильности не уменьшалась, а даже увеличивалась. Изотоп ${}^8\text{He}$ оказался более связанной системой по отношению к эмиссии одного и двух нейтронов, чем ${}^6\text{He}$, т.е. ядро ${}^8\text{He}$ стабильнее ядра ${}^6\text{He}$. Такую же зависимость обнаружили у изотопов гелия: ${}^5\text{He}$, ${}^7\text{He}$, ${}^9\text{He}$, ${}^{10}\text{He}$, а также у тяжелых изотопов водорода (${}^6\text{H}$ оказался более стабильным, чем ${}^4\text{H}$). Успехом в продвижении к нейтронной материи является синтез изотопа водорода ${}^7\text{H}$ (6 нейтронов на 1 протон). Интересным является эффект резкого увеличения радиуса ядра при переходе от ${}^9\text{Li}$ (радиус 2,5 фм) к ${}^{11}\text{Li}$ (радиус 12 фм). Пока не ясно, как такое значительное изменение размеров ядра скажется на химических свойствах этих нуклидов.

Для сильно нейтроннедефицитных (протоноизбыточных) ядер обнаружены «экзотические» типы распада: задержанная эмиссия β -частиц, протонная радиоактивность и эмиссия кластеров (например, ядер ${}^{14}\text{C}$), последствия которых в настоящее время исследуются радиохимиками.

Идеи радиохимии реализуются в методе радиоактивных индикаторов (вариант метода меченых атомов), который широко используется в химии, материаловедении, биологии, медицине, технике, сельском хозяйстве и др. Некоторые методики нельзя осуществить, не прибегая к помощи радиоактивных изотопов. К ним относятся: активационный анализ, методы радиохронологии, эманационно-термический анализ, γ -резонансная спектроскопия, аннигиляция позитронов, химия позитрония (или мюония) и др. Следует подчеркнуть, что преимущество многих ядерно-химических методик базируется на том факте, что волновая функция электронов (в том числе валентных) проходит через ядро. Поэтому химические свойства атома отражаются на энергетическом состоянии составляющих ядро нуклонов. Изучая ядерные свойства (т.е. находясь на другом, «ядерном», а не «химическом» структурном уровне и не вмешиваясь детектором непосредственно в химический процесс), можно получить важнейшие для химика параметры. Разработка методов использования ядерных свойств радионуклидов для химических целей и составляет стержень прикладной радиохимии.

В заключение остановимся на еще одном характерном аспекте работ с радионуклидами — на особенностях статистической обработки результатов радиометрических измерений. В обычной химии ошибка рассчитанных параметров процесса связана с недостаточной надежностью аппаратуры и пло-

хой воспроизводимостью результатов эксперимента. Сам объект исследования при этом остается постоянным, и расчет доверительных пределов для выходного параметра эксперимента проводится в предположении справедливости нормального статистического закона распределения случайных отклонения от среднего. Радиометрия имеет дело с флуктуирующим объектом, причем вариации распада подчиняются дискретному, асимметричному по своей форме закону Пуассона. Необходимость грамотного учета всех участвующих в процессе эксперимента типов распределений случайных величин является постоянной заботой радиохимика.

Таким образом, отличие радиохимии от остальных, традиционных направлений химии базируется на наличии процессов распада и накопления, эффектах отдачи, процессов, индуцированных ядерными превращениями и ядерными излучениями, возможности использования ядерной информации для химических целей. Именно этими вопросами мы и будем заниматься в этой дисциплине.

2. Краткая история радиохимии

История развития радиохимии тесно переплетена с историей радиоактивности.

В 1896 г. А. Беккерель открыл явление радиоактивности. Фотографическим методом сначала была обнаружена радиоактивность соли — сульфат уранил-калия $\text{UO}_2\text{SO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (рис. 1В), а вскоре — более сильная радиоактивность чистого урана.

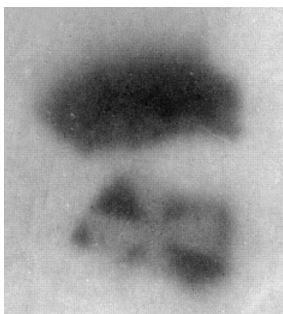


Рис. 1В. Открытие А. Беккерелем явления радиоактивности (1 марта 1896 г.): отпечаток соли урана (калийуранилсульфата), насыпанной в углубления подставки, на фотопластинках, приложенных к разным сторонам подставки

В 1898 г. аспирантка Беккереля М. Склодовская-Кюри и Г. Шмидт (независимо друг от друга) открыли, что торий тоже радиоактивен. В том же году М. и П. Кюри установили, что радиоактивность урановых минералов больше, чем радиоактивность урана в них содержащегося, и высказали предположение, что в урановых минералах находится какой-то значительно более радиоактивный элемент, чем уран. И действительно, переработав несколько тонн урановой руды, они выделили две радиоактивные соли, содержащие новые радиоактивные элементы: полоний и радий. Вскоре было обнаружено, что соли и растворы радия выделяют тяжелый радиоактивный газ радон. В 1899 г. Э. Резерфорд открыл изотоп радона — ^{220}Rn (торон); основной изотоп радона ^{222}Rn был открыт Дорном в 1900 г., а ^{219}Rn (актинон) — А. Дебьерном в 1910 г. В октябре 1899 г. был открыт актиний, а в 1903 г. — радиоторий ^{228}Th (О. Ган).

В 1898—1913 гг. совместные усилия физиков и химиков привели к обнаружению, изучению свойств, установлению местоположения в периодической системе и «генетических» связей естественных радиоактивных элементов и изотопов. В этот период из природных объектов были идентифицированы радиоактивные изотопы: около 40 уже известных элементов, открыты 5 новых радиоактивных элементов (полоний, радий, радон, актиний, протактиний) и изучены их свойства. Удалось сформулировать правила превращения радиоактивных изотопов одних элементов в другие.

Радиоактивный процесс начали рассматривать как явление самопроизвольного распада химических элементов (Э. Резерфорд, Ф. Содди, 1902). Одновременно был доказан статистический характер радиоактивных превращений (Э. Швейдлер, 1903). В 1903 г. Э. Резерфорд, Ф. Содди выдвинули идею радиоактивных рядов — продуктов распада урана и тория — генетически связанных радионуклидов, претерпевающих сложные процессы радиоактивного распада и накопления. В 1906 г. Н. Кэмбеллом и А. Вудом открыта β -радиоактивность калия и рубидия. Химиками было доказано, что различные изотопы свинца являются конечным продуктом трех естественных радиоактивных семейств (Дж. Грэй, 1909), в цепочке превращений один из элементов — радиоактивный инертный газ — радон, а α -частицы представляют собой дважды ионизированные ионы гелия (Э. Резерфорд, Т. Ройдс, 1909). В 1909 г. Э. Резерфорд, Г. Гейгер, Э. Марсден в опытах по рассеянию α -частиц на золотой фольге устано-

вили, что атом состоит из небольшого положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена основная масса атома, а вокруг ядра на значительном расстоянии от него вращаются электроны.

Первая фундаментальная частица — электрон — открыта в 1897 г. Дж. Дж. Томсоном при изучении отклонения катодных лучей в электрических и магнитных полях. Протон открыт Э. Резерфордом в 1919 г. при облучении азота α -частицами радия.

В 1912 г. произошло открытие изотопов — обнаружено существование атомов неона с массой 20 и 22 (Дж. Дж. Томсон). Проводившиеся в период 1905—1912 гг. исследования продуктов распада урана, тория и актиния привели в 1913 г. к обнаружению изотопов и явления изотопии у радиоактивных элементов (Ф. Содди). Тогда же установлено правило смещения при радиоактивном распаде — правило сдвига Содди — Фаянса (Ф. Содди, К. Фаянс, А. С. Рассел, 1913), предсказано существование изотопов высшего порядка — ядерных изомеров (Ф. Содди, 1917) и явления ядерной изомерии (Ст. Мейер, 1918). В 1921 г. О. Хан открыл явления изомерии атомных ядер на примере протактиния-234. Были установлены закономерности изменения химической природы элементов в результате радиоактивного распада и изучено влияние температуры на эманирование твердых тел (А. С. Колловрат-Червинский, 1906), измерен коэффициент диффузии эманиции радия в воздухе (П. Кюри, Ж. Данн, 1903). К этому периоду относится изготовление первого международного радиевого эталона (М. Кюри, А. Дебьерн) и начало работ по разделению изотопов (метод газовой диффузии, Ф. Астон, 1913).

В 1913 г. К. Фаянс и Ф. Панет изучили общие закономерности поведения микроколичеств естественных радиоактивных элементов и их изотопов в процессах соосаждения и адсорбции. В 1914 г. Д. Хевеши диффузионным методом удалось разделить химически неделимые радиоэлементы. В 1915 г. Д. Хевеши и Ф. Панет предложили метод радиоактивных индикаторов (метод меченых атомов), с помощью которого были изучены процессы самодиффузии и изотопного обмена в соединениях свинца. А в 1923 г. Д. Хевеши применил метод меченых атомов к биологическим проблемам. Он исследовал поглощение растениями свинца из раствора. В 1920 г. он же открыл явление изотопного обмена.

Развитие радиохимии в значительной мере стимулировали достижения ядерной физики. Создание разнообразных мето-

дов осуществления ядерных реакций потребовало привлечение радиохимиков и их методик для выделения и химической идентификации продуктов ядерных реакций. Э. Резерфорд еще в 1918 г. провел первую трансмутацию элементов с помощью α -частиц. Но выяснилось, что число ядерных реакций с участием α -частиц от природных радионуклидов ограничено. Более перспективным оказалось использование ускорителей заряженных частиц (в первую очередь — протонов). В 1930 г. состоялся пуск циклотрона (Э. Лоуренс, М. Ливингстон), в 1931 г. — электростатического ускорителя заряженных частиц (генератор Р. Ван де Граафа), 1932 г. — установки для искусственного ускорения протонов — каскадный генератор (ускоритель Дж. Кокрофта — Э. Уолтона). Первое расщепление ядра частицами, ускоренными в циклотроне (Э. Лоуренс, М. Ливингстон, М. Уайт) произошло в 1932 г. В том же году удалось осуществить первую ядерную реакцию с ускоренными протонами — трансмутацию ядер лития (Дж. Кокрофт и Э. Уолтон).

В 1932 г. К. Андерсон при исследовании космических лучей открыл позитрон. В 1930 г. Паули ввел в теорию β -распада гипотетическую частицу нейтрино (название дано Ферми). Экспериментально нейтрино было зарегистрировано лишь в 1956 г.

Важный этап развития радиохимии (с 1933 г.) начался после открытия нейтрона (Дж. Чедвик, 1932) и искусственной радиоактивности (И. Кюри и Ф. Жолио-Кюри, 1934, обнаружили возникновение позитрон-излучающего радионуклида при облучении α -частицами алюминия). Были созданы первые радий-бериллиевые и полоний-бериллиевые источники нейтронов. В 1933 г. была продемонстрирована возможность создания мощных источников быстрых нейтронов при помощи ускорителей и реализованы (d, n)- и (p, n)-реакции (Ч. Лауритсен). Одновременно был открыт ядерный фотоэффект — фоторасщепление дейтрона (Дж. Чэдвик, М. Гольдхабер) и расщепление бериллия γ -квантами (Л. Сцилард, Т. Чалмерс). В 1935 г. Р. Оппенгеймер и М. Филлипс предложили ядерную реакцию срыва, а П. Мун и Дж. Тильман доказали резонансный характер взаимодействия медленных нейтронов с ядрами.

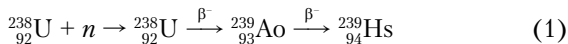
В те же годы продолжалось совершенствование ускорителей заряженных частиц. Сообщая ионам энергию в десятки миллионов электронвольт, эти устройства позволили получить радиоактивные изотопы многих элементов середины

периодической таблицы элементов. Возникла область радиохимии, направленная на химическое изучение ядерных реакций и выделение получаемых радиоактивных продуктов.

Перед Второй мировой войной была доказана возможность искусственного получения радиоактивных изотопов почти всех известных стабильных элементов, открыты ядерные реакции, приводящие к получению радиоактивных изотопов и синтезу новых элементов, в том числе трансурановых. В 1937 г. К. Перрье и Э. Сегре осуществили синтез первого искусственного элемента — технеция (бомбардировкой ядер молибдена дейтронами), Э. Сегре получил астат (1940), М. Перей открыла франций (1939), в 1940 г. Э. Макмиллан, П. Абельсон синтезировали нептуний-239 (β -излучатель), а Г. Сиборг, Э. Макмиллан, А. Валь, Дж. Кеннеди, Э. Сегре — плутоний (в том числе плутоний-239). В 1947 г. в продуктах деления урана был обнаружен прометий.

Начиная с 1932 г. ученые начали осуществлять ядерные реакции с помощью нейтронов. Это направление развилось после того, как Э. Ферми показал, что сечения взаимодействия нейтронов с ядром атома увеличивается по мере уменьшения их энергии. В 1934 г. он обнаружил странное поведение урана под действием тепловых нейтронов, которое объяснил образованием трансуранового элемента (гесперий, от *esperio* — название Италии по-гречески).

Э. Ферми в Римском университете Ла Сапиенца с группой сотрудников облучал различные элементы тепловыми нейтронами. В частности, было обнаружено появление новой β -активности в уране. Ферми предположил, что в облученном нейтронами уране идет реакция:



Сначала образуется аузоний (Ao, эка-рений), а затем — гесперий Hs. Но химически их идентифицировать не удалось. О. Ган, Л. Мейтнер и Ф. Штрассман повторили эти эксперименты и предположили, что в этом процессе образуются еще три трансурановых элемента:



Следует отметить, что Ида Нодак сразу же указала на ошибочность толкования экспериментов Ферми. Она считала, что от возбужденного после поглощения нейтрона ядра урана может отвалиться большой кусок, в результате чего образуется не трансурановый элемент, а элемент середины периодической

таблицы; возможен и развал ядра на несколько кусков, которые будут изотопами уже известных элементов. На эти предположения никто не обратил внимания.

Вскоре И. Жолио-Кюри и П. Савич среди продуктов облученного урана обнаружили следы элемента, похожего на лантан. О. Ган и Ф. В. Штрассман 23 декабря 1938 г. проверили это утверждение и выделили радиоактивный лантан и его материнский нуклид — барий.

Правильную интерпретацию этих опытов О. Гана и Ф. В. Штрассмана дали Л. Мейтнер и О. Фриш в 1939 г., сделав заключение о том, что в результате ядерной реакции образуется радиоактивный изотоп бария. Возникла идея вынужденного под действием нейтронов деления урана на два осколка примерно равной массы. О. Фриш ввел понятие «деление ядра». О. Фриш, Ф. Жолио-Кюри, Г. Андерсон и Дж. Даннинг экспериментально доказали деление ядра урана на два осколка и измерили энергию деления. Н. Бор теоретически показал, что нейтронами любых энергий может делиться только изотоп ^{235}U .

В 1940 г. Г. Флеров и К. Петржак открыли спонтанное деление урана в основном состоянии (деление изотопа ^{238}U).

О. Фриш при помощи ионизационной камеры доказал образование крупных осколков деления урановых ядер. В 1940 г. он (совместно с Р. Пайерлсом) дал первую оценку критической массы ^{235}U для атомной бомбы, которая оказалась не столь велика, как считалось ранее. Этот результат (сильно заниженный по сравнению с реальным) был изложен в секретном «меморандуме Фриша — Пайерлса». Жолио Кюри расчетным путем оценил число нейтронов, образующихся при делении ядра урана (усредненно в количестве 3 — завышенное значение) и предсказал возможность организации цепного деления урана. Несколько более оптимистичная по сравнению с реальностью информация инициировала широкомасштабные исследования, приведшие к созданию атомной бомбы.

В 1939 г. экспериментально была доказана возможность протекания в уране цепной реакции деления. В 1940 г. Ю. Бут, Дж. Даннинг и А. Гросс открывают деление ^{235}U медленными нейтронами. К этому моменту уже открыто явление деления под действием нейтронов $^{236}, ^{238}, ^{239}\text{U}$ и $^{231}, ^{232}, ^{233}\text{Th}$. В 1941 г. Дж. Кеннеди и Г. Сиборг продемонстрировали, что один изотоп плутония ^{239}Pu способен как к самопроизвольному делению, так и к делению под действием нейтронов любых энергий.

Для описания процесса деления ядер была предложена модель заряженной жидкой капли, с помощью которой были рассчитаны энергии связи ядра для широкого диапазона ядер и определен верхний предел существования ядерной материи, который ограничивается элементами с атомными номерами 100–110.

В 1934 г. Л. Сциллард и Т. Чалмерс обнаруживают химические эффекты при процессах захвата атомными ядрами медленных нейтронов. Одновременно были изучены химические последствия при изомерных переходах, β -распаде и K -захвате. Широкое развитие исследований в этой области привело к созданию новых направлений в радиохимии, например химии «горячих» и многократно ионизированных атомов, а также к созданию ядерной химии и химии процессов, индуцированных ядерными превращениями.

Открытия первой трети XX в. в области ядерной физики, радиохимии и материаловедения поставили на повестку дня создание атомного реактора, обеспечивающего проведение контролируемой цепной реакции деления урана.

Для реакторостроения большое значение имело открытие и выделение таких изотопов, как изотопы водорода: дейтерий (Г. Юри, 1932) и тритий (Э. Резерфорд, М. Олифант, П. Хартек, 1934), изотопы урана: ^{238}U (Ф. Астон, 1930), ^{235}U (А. Демпстер, А. Нир, 1935) и ^{233}U (Г. Сиборг, 1941), изотопы плутония (в первую очередь ^{239}Pu), изотопы лития, бора и др. Приобрела актуальность разработка методов разделения изотопов и их очистки. Проведены эксперименты по получению тяжелой воды (электролиз, Г. Льюис, Р. Магдональд, 1933). Важное значение имело и развитие радиационной физики, в частности радиационного материаловедения.

В 1942 г. под трибунами университетского стадиона в г. Чикаго была построена первая экспериментальная система (реактор *CP-1* — *Chicago Pile* — Чикагский котел) с уран-графитовой решеткой и осуществлена управляемая цепная реакция деления ядер урана (Э. Ферми, Л. Сциллард, Г. Андерсон, В. Зинн, 1942). Реактор работал на тепловых нейтронах, топливом служил металлический необогащенный уран, замедлителем — графит, специально очищенный от нежелательных примесей.

Возникла ядерная индустрия, включающая в себя промышленную радиохимию и ядерное материаловедение. Создание ядерных реакторов позволило начать производство различных радионуклидов гражданского и военного (компоненты атомных и водородных бомб) назначения.

После Второй мировой войны происходит развитие химии процессов деления и осколочных продуктов, а также химии и технологии ядерного горючего. Широкое развитие получают исследования ядерных превращений на частицах высокой энергии (реакции глубокого расщепления). Развивается прикладная радиохимия. Она нашла применение в науке, технике, экологии и медицине.

Радиохимики приняли активное участие в открытии новых процессов радиоактивного распада: протонная, нейтронная и кластерная радиоактивность (Г. Розе, Англия, и Д. В. Александров, СССР), спонтанное деление ядерных изомеров (С. М. Поликанов) и др.

Первые трансурановые элементы — ^{93}Np , ^{94}Pu , ^{95}Am и ^{96}Cm были синтезированы в годы Второй мировой войны в США Г. Сиборгом с сотрудниками. Позже (в 1948–1955 гг.) в США получены ^{97}Bk , ^{98}Cf , ^{99}Es , ^{100}Fm и ^{101}Md . Для синтеза элементов с $Z = 93\text{--}98$ использовали слияние ядер урана с легкими ионами (^2H и ^4He) или захват медленных нейтронов в ядерном реакторе с последующим β -распадом, а для синтеза эйнштейния и фермия — захват тяжелыми элементами быстрых нейтронов, образующихся при взрыве атомной или водородной бомбы, с последующим β -распадом.

Радиохимики были созданы ультрабыстрые (быстродействие — несколько миллисекунд) и высокочувствительные (исследование химических свойств одного атома) методики. В результате был открыт ряд актинидов, аналогичный известному к тому времени ряду лантанидов.

Г. Н. Флеров в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна) начал работы по синтезу сверхтяжелых элементов, используя реакции различных элементов с ионами тяжелее гелия, ускоренными до высоких энергий. В 1960-е гг. исследования элементов от 100 до 106 проводились на циклотроне У300 с применением реакций слияния ядер урана с пучками сравнительно легких ионов (от ^{12}C до ^{22}Ne). Попутно было открыто существование делящихся изомеров (С. М. Поликанов и др.), а также обнаружено и объяснено резкое изменение длинных периодов полураспада изотопа элемента 104 с $N = 152$ из-за исчезновения двугорбого барьера деления (Ю. Ц. Оганесян и др.).

Успешное продвижение исследований в область трансактинидов связано с использованием реакций холодного слияния сверхтяжелых элементов СТЭ (Ю. Ц. Оганесян и др.), в которых в качестве мишенного материала используются

«магические» ядра стабильных изотопов ^{208}Pb или ^{209}Bi , которые бомбардируются ионами тяжелее аргона. В Беркли (США) на линейном ускорителе *HILAC* были синтезированы новые изотопы элементов 102, 103 и 104, а также открыт элемент 106. С помощью реакций холодного слияния в Центре по изучению тяжелых ионов имени Гельмгольца (GSI, Дармштадт, Германия) под руководством С. Хофманна были синтезированы шесть новых элементов 107–112. Позже в Институте физико-химических исследований (*RIKEN*, Вако, Япония) были проведены работы по синтезу некоторых изотопов элементов 110–113. В конце XX в. в ОИЯИ были начаты работы по применению реакции горячего синтеза с использованием дважды магического ядра $^{40}_{20}\text{Ca}$. Были синтезированы многие трансактинидные элементы, включая 118-й (эка-радон). Одновременно по числу протонов был достигнут «остров стабильности» ($Z = 114$). Достигнуть «острова стабильности» по числу нейтронов ($N = 172$) пока не удалось, поскольку для его достижения требуются ядра, сильно перегруженные нейтронами, которые являются весьма короткоживущими. Поэтому перспективы получения долгоживущих изотопов сверхтяжелых элементов связаны с пуском ускорителей радиоактивных элементов.

В настоящее время радиохимия занимается такими проблемами, как получение урана из очень разбавленных растворов, создание температуро-, химически и радиационно стойких видов ядерного топлива, изучение свойств сверхтяжелых элементов, выделение ценных компонентов из отработанного топлива, трансмутация радионуклидов с целью уменьшения их экологической опасности, переработка и обезвреживание радиоактивных отходов, синтез радиофармпрепаратов и т.д. Решение этих задач связано с дальнейшим исследованием состояния и диффузии радионуклидов в различных средах, с развитием экспериментальных методов разделения радиоактивных веществ и синтеза меченых соединений, методов радиохимического анализа и ядерно-физических методов диагностики конструкционных и функциональных материалов ядерной индустрии.

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОХИМИИ

В результате изучения данной главы и выполнения необходимого объема самостоятельных работ студент будет:

знать

- строение и основные свойства атомного ядра, типы радиоактивного распада, законы радиоактивного распада, виды ионизирующих излучений и механизмы их взаимодействия с веществом, основные типы ядерных реакций, включая цепные процессы деления под действием нейтронов;

уметь

- измерять интенсивность и энергетические характеристики α -, β -, γ - излучений, испускаемых радионуклидами, осуществлять качественный и количественный анализ радионуклидов в исследуемом веществе;

владеть

- навыками интерпретации схем радиоактивного распада, выбора ядерной реакции для синтеза требуемого радионуклида, статистической обработки результатов радиометрических измерений и данных ядерной спектроскопии.

Наука радиохимия, располагая собственной идеологией и методами, широко использует физическую, химическую и медико-биологическую информацию. Физические основы радиохимии базируются на явлениях радиоактивности, проявляющемся в различных типах распада и в испускании радионуклидами различных видов излучения. Механизмы и типы распадов определяются строением ядер, синтез изотопов — ядерными реакциями, а физические и химические последствия ядерных процессов — интенсивностью взаимодействия ионизирующего излучения и атомов отдачи с веществом. Поэтому физические основы радиохимии тесно переплетаются с ядерной физикой. Поскольку радиохимия часто имеет дело с малыми концентрациями, при которых традиционные методы анализа неприменимы, то информация о процессах может быть получена радиометрическими методами с применением счетчиков ионизирующих излучений,

ядерной спектроскопии и автордиографии. Математическое обеспечение, помимо элементов квантовой механики, использует представления и методы математической статистики.

1.1. Атомное ядро

Начнем с некоторых определений.

Химический элемент — совокупность атомов с одинаковым зарядом ядра и числом протонов, совпадающим с порядковым номером в периодической системе элементов.

Каждый химический элемент имеет свое название и символ.

Атом — мельчайшая частица химического элемента, сохраняющая его свойства.

Нуклид — разновидность атома, характеризующаяся числом протонов и нейтронов, а в некоторых случаях энергетическим состоянием ядра.

Нуклиды могут быть стабильными или нестабильными, т.е. радиоактивными.

Радионуклид — нуклид, испускающий ионизирующее излучение.

Атомное ядро — положительно заряженная центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома.

Состоит из протонов и нейтронов (нуклонов). Число протонов определяет электрический заряд атомного ядра и порядковый номер Z атома в периодической системе элементов. Число нейтронов равно разности массового числа и числа протонов. Объем атомного ядра пропорционален числу нуклонов в ядре. Плотность ядерного вещества соответствует приблизительно значению 10^{14} г/см³.

Фотон — элементарная частица, квант электромагнитного излучения.

Это безмассовая частица, способная существовать только двигаясь со скоростью света. Электрический заряд фотона равен нулю. Фотон может находиться только в двух спиновых состояниях с проекцией спина на направление движения (спиральностью) ± 1 . Фотону свойственен корпускулярно-волновой дуализм, он проявляет одновременно свойства частицы и волны.

Электрон — стабильная отрицательно заряженная частица со спином, $1/2$ с массой, приблизительно равной $9 \cdot 10^{-28}$ г, и магнитным моментом, равным магнетону Бора.

Позитрон e^+ — античастица электрона. Относится к антивеществу, имеет электрический заряд $+1$, спин $1/2$, лептонный заряд -1 и массу, равную массе электрона.

При аннигиляции позитрона с электроном их масса превращается в энергию в форме двух (и гораздо реже — трех и более) γ -квантов.

Нуклон — общее название протона и нейтрона, являющихся составными частями атомных ядер.

Протон — стабильная элементарная частица с плюсовым зарядом, со спином $1/2$, магнитным моментом $\mu = 2,79\mu_B$ и массой $1838,5$ электронных масс (10^{-24} г).

Положительный заряд протона равен элементарному заряду $e = 1,6021773 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса протона равна $m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27}$ кг = $1,00726470$ а.е.м. = $938,27231$ МэВ. Масса легкого изотопа атома водорода (протия) $m_{ат}({}_1H^1) = 1,00814$ а.е.м. = $938,7$ МэВ = $1837m_e$, $m_p = 1,00759$ а.е.м. = $938,7$ МэВ = $1839m_e$.

Нейтрон — электрически нейтральная элементарная частица со спином $1/2$, магнитным моментом $\mu = -1,91\mu_B$ и массой, превышающей массу протона на $2,5$ электронных масс.

$m_n = 1,008986$ а.е.м. = $939,5$ МэВ = $1838,5m_e$. В свободном состоянии нейтрон нестабилен: он распадается с периодом полураспада $T_{1/2} = 10,18$ мин (время жизни нейтрона $\tau = 881,5 \pm 1,5$ с), образуя протон и испуская электрон и антинейтрино, $\bar{\nu}$ (β -распад). Вместе с протонами нейтроны образуют атомные ядра; в ядрах нейтрон стабилен.

Нейтрино (ν) — стабильная незаряженная элементарная частица со спином $1/2$ и нулевой массой.

Нейтрино чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом.

Ядерные силы — силы, связывающие нуклоны (протоны и нейтроны) в ядре.

Ядерные силы — одно из проявлений сильных взаимодействий. Они являются короткодействующими, радиус их действия порядка $1 \cdot 10^{-12} - 1 \cdot 10^{-13}$ см. Ядерные силы не зависят от заряда нуклонов.

Число протонов в ядре Z определяет непосредственно его электрический заряд, у изотопов одинаковое количество протонов, но разное количество нейтронов. Экспериментально заряд ядра определяют по длине волны характеристического рентгеновского излучения, используя закон Г. Мозли.

Закон Мозли — линейная зависимость квадратного корня из частоты характеристического рентгеновского излуче-

ния линейно зависит от атомного номера химического элемента:

$$\sqrt{\frac{1}{\Lambda}} = aZ - b,$$

где Λ — длина волны; a и b — постоянные.

Ферми — единица измерения расстояния, применяющаяся в ядерной физике, названа в честь итальянского физика Э. Ферми.

Обозначение: русское — фм, международное — fm. Единица удобна для применения в ядерной физике, поскольку характерные размеры атомного ядра составляют несколько ферми. 1 ферми = 1 фм = $1 \cdot 10^{-15}$ м = 1 фемтометр.

Радиус атома определяется радиусом электронной оболочки и равен примерно $1 \cdot 10^{-8}$ см. Ядро — центральная, несущая основную массу часть атома, имеет размеры порядка $1 \cdot 10^{-13} - 1 \cdot 10^{-12}$ см = 1–10 фм (ферми).

Атомное ядро с зарядом Z и массовым числом A состоит из A нуклонов: Z протонов и N нейтронов, связанных между собой ядерными силами. Ядро имеет Z положительных элементарных зарядов. Общее число нуклонов в ядре называется массовым числом $A = N + Z$. Эта сумма всегда является целым числом; ее не следует отождествлять с атомной массой.

Число нуклонов A равно сумме числа нейтронов и протонов, но масса ядра не равна весу протонов и нейтронов, из которых он был синтезирован, так как масса нуклона меньше массы свободного протона или нейтрона. Это различие в массах обуславливает связь нуклонов в атомном ядре.

Массовое число атомного ядра A — суммарное количество протонов и нейтронов (называемых общим термином «нуклоны») в ядре.

Массовое число близко к атомной массе изотопа, выраженной в атомных единицах массы, но совпадает с ней только для ^{12}C , так как атомная единица массы (а.е.м.) определяется сейчас как $1/12$ массы атома ^{12}C . Во всех остальных случаях атомная масса не является целым числом, в отличие от массового числа. Так, массовое число изотопа хлора ^{35}Cl равно 35, а его атомная масса составляет 34,96885 а.е.м.

Атомная масса, относительная атомная масса — значение массы атома, выраженное в атомных единицах массы.

Атомная единица массы принята равной $1/12$ массы нейтрального атома изотопа углерода ^{12}C , поэтому атомная мас-

са этого изотопа равна точно 12. Разность между атомной массой изотопа и его массовым числом называется избытком массы (обычно его выражают в МэВ). Он может быть как положительным, так и отрицательным.

Атомная единица массы (дальтон) — внесистемная единица массы, применяемая для масс молекул, атомов, атомных ядер и элементарных частиц. $1 \text{ а.е.м.} = 1,6605402 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 0,931494028 \text{ ГэВ}/c^2$.

Массу атома выражают в атомных единицах (а.е.м.). За 1 а.е.м. принята $1/12$ массы атома углерода с массовым числом 12 (углеродная шкала). Одна (1) а.е.м. $= 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ — величина, обратная числу Авогадро, т.е. $1/N_A$, где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$. Эта единица удобна тем, что ее величина близка к массе нуклона. Такой выбор атомной единицы массы удобен тем, что молярная масса данного элемента, выраженная в граммах на моль, в точности совпадает с массой атома этого элемента, выраженной в а.е.м. За атомную массу элемента, состоящего из смеси изотопов, принимают среднее значение атомной массы изотопов с учетом их процентного содержания.

Пример. Рассчитаем атомную массу природной смеси изотопов неона. Элемент неон в природе находится в виде трех стабильных изотопов: ^{20}Ne (атомная масса 19,9924, содержание 90,48%), ^{21}Ne (20,9938; 0,27%) и ^{22}Ne (21,9913; 9,25%).

Атомный вес природной смеси трех изотопов неона округленно равен:

$$19,9924 \cdot 0,9048 + 20,9938 \cdot 0,0027 + 21,9913 \cdot 0,0925 = 20,18.$$

Атомная масса меньше суммы масс составляющих атом частиц (протонов, нейтронов, электронов) на величину, обусловленную энергией их взаимодействия (дефект массы). Экспериментально масса ядра обычно измеряется масс-спектрометрами.

Стандартная масса, которая обычно приводится для нуклида в справочниках — это масса нейтрального атома. Для определения *массы ядра* нужно из массы атома вычесть сумму масс всех электронов (более точное значение получится, если учесть еще и энергию связи электронов с ядром).

Конкретный изотоп обозначается символом химического элемента, слева внизу указывается число протонов Z (атомный номер в периодической системе), слева сверху — массовое число A , справа внизу — число нейтронов N (обычно не указывается), справа сверху — заряд иона (валентность).



Часто N не указывают, а справа от символа вверху пишут валентность или заряд иона. Например, типичное обозначение нуклида углерода имеет вид: ${}^{12}_6\text{C}^{4+}$.

Изотопы — нуклиды с одинаковым числом протонов, но различным количеством нейтронов ($Z = \text{const}$).

Все изотопы принадлежат одному и тому же химическому элементу.

Изобары — разновидности атомов или атомных ядер (нуклидов), отличающиеся числом протонов, т.е. зарядом ядра (порядковым номером элемента в периодической таблице), при одинаковом массовом числе.

Изотоны — атомы различных химических элементов с одинаковым числом нейтронов в ядрах.

Изомер — нуклид в возбужденном ядерном состоянии с измеримой продолжительностью жизни ($> 10^{-9}$ с).

Изомерные нуклиды различаются не числом протонов или числом нейтронов, а энергией связи ядра. Изомеры находятся в различных энергетических состояниях, причем каждое состояние ядра имеет определенное измеримое время жизни.

Состояние нуклида с минимальным значением энергии является основным состоянием. Высокоэнергетическое состояние называется «возбужденным состоянием».

Для различия отдельных изомеров принято прибавлять к числу нуклонов букву g (для основного состояния) или m (для высокоэнергетического метастабильного состояния), например, ${}^{46g}\text{Sc}$ в отличие от ${}^{46m}\text{Sc}$.

Пример. Рассмотрим следующие ядра: ${}^{99m}\text{Tc}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{N}$. Кто из них изотопы, кто изотоны, кто изобары, а кто изомеры?

Ответ: ${}^{99m}\text{Tc}$ — изомер, ${}^{14}\text{C}$ и ${}^{12}\text{C}$ — изотопы C, ${}^{13}\text{N}$ и ${}^{14}\text{N}$ — изотопы N, ${}^{14}\text{C}$ и ${}^{14}\text{N}$ — изобары ($A = 14$), а ${}^{12}\text{C}$ и ${}^{13}\text{N}$ — изотоны ($N = 6$).

Взаимосвязь между массой любого тела и его полной энергией описывается формулой

$$E = mc^2, \quad (1.1)$$

где $c = 2,998 \cdot 10^{10}$ см/с — скорость света в вакууме; $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$; m — релятивистская масса; v — скорость движе-

ния тела; m_0 — его масса покоя.

Переход от массы к энергии проводят по соотношению:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,66054 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 1,492 \cdot 10^{-10} \text{ Дж} = 931,494 \text{ МэВ}/c^2.$$

Пример. Рассчитаем энергетический эквивалент единицы атомной массы. Согласно формуле Эйнштейна:

$$E = mc^2 = \frac{1 \cdot (2,998 \cdot 10^{10})^2}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}} \approx 9,31 \cdot 10^8 \text{ эВ} = 931 \text{ МэВ}.$$

Масса покоя протона $m_p = 1,0073 \text{ а.е.м.} = 1,6726 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 938,2 \text{ МэВ}$; масса покоя нейтрона $m_n = 1,0087 \text{ а.е.м.} = 1,6749 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 939,5 \text{ МэВ}$; масса покоя электрона $m_e = 5,4859 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.} = 9,1096 \cdot 10^{-28} \text{ г} = 0,511 \text{ МэВ}$.

Отношение $m_p/m_e = 1836$.

Электронвольт (эВ) является внесистемной единицей энергии. 1 эВ равен кинетической энергии, которую приобретает электрон при прохождении между двумя точками с разностью потенциалов 1 В. 1 эВ = $1,602176487 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$; 1 ГэВ (1 гигаэлектронвольт) = $1 \cdot 10^9 \text{ эВ}$. 1 ГэВ/ $c^2 \approx 1,073544 \text{ а.е.м.}$

Ядро представляет систему связанных между собой нуклонов. Возникновение связанного состояния возможно только под действием ядерных сил притяжения, удерживающих нуклоны в ограниченном объеме. Устойчивость связанного состояния обеспечивается тем, что ядро как система из взаимодействующих между собой нуклонов должна иметь минимум полной энергии.

Полная энергия связи ядра составляет:

$$E_{\text{св}} = |\Delta E| = \sum_{i=1}^A m_i - M_{\text{яд}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{яд}}(A, Z)]c^2, \quad (1.2)$$

где m_i — массы нуклонов, из которых образовано ядро; m_p — масса протона; m_n — масса нейтрона; $M_{\text{яд}}$ — масса ядра.

Для устойчивого ядра полная энергия связи положительна и равна той энергии, которую надо затратить, чтобы разделить ядро на все составляющие его нуклоны. Если $E_{\text{св}} > 0$, то ядро устойчиво, если $E_{\text{св}} < 0$ — нуклоны ядра будут разлетаться подобно свободным частицам.

Экспериментально полученные массы всегда меньше значений, вычисленных как сумма масс частиц, составляющих ядро. Эта разность масс (*дефект массы*) равна:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n + Zm_e - m = Zm_{\text{H}} + Nm_n - n \quad (1.3)$$

и эквивалентна энергии связи:

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2. \quad (1.4)$$

Энергия связи — разность между энергией связанной системы частиц и суммарной энергией этих частиц, находящихся в свободном состоянии.

Для устойчивых систем энергия связи отрицательна и тем больше, чем прочнее система. Энергия связи с обратным знаком равна минимальной работе, которую нужно затратить, чтобы разделить систему на ее элементарные составные части.

Энергия связи ядра — мера его прочности:

$$E_{\text{св}} = 931,5m \text{ МэВ.} \quad (1.4a)$$

Энергия связи на один нуклон определяется:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}. \quad (1.5)$$

Дефект массы — разность ΔM между массой M системы взаимодействующих тел (частиц) и суммой их масс Σm в свободном состоянии и определяется полной энергией их взаимодействия, т.е. энергией их связи $E_{\text{св}}$: $\Delta M = E_{\text{св}}/c^2$.

Значение дефекта массы позволяет определить величину энергии, выделяющуюся в ядерных реакциях.

Дефект массы, являясь мерой энергии связи, определяет степень устойчивости системы.

Избыток массы (или дефект массы) для атома — выраженная в единицах энергии разность массы нейтрального атома и произведения числа нуклонов (суммарного числа протонов и нейтронов) в ядре этого атома на атомную единицу массы.

Стандартная формула для расчета энергии связи ядра:

$$E_{\text{св}} = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - M,$$

где Z — заряд ядра (в единицах e); A — массовое число; m_{H} , m_{n} и M — массы атома водорода, нейтрона и атома, соответствующего данному ядру.

Однако в таблицах изотопов обычно приводятся не массы элементарных частиц, а массы атомов (например, не масса протона, а масса атома водорода), что заставляет при расчетах учитывать массы электронов. Более удобной считается формула

$$E_{\text{св}} = Z\Delta_{\text{H}} + (A - Z)\Delta_{\text{n}} - \Delta, \quad (1.6)$$

где Δ_{H} , Δ_{n} и Δ — избыток массы атома водорода, нейтрона и атома, соответствующего данному ядру.

Пример 1. Вычислим энергию связи ядра ${}^8\text{Be}$ ($Z = 4$, $A = 8$). Известно, что избыток массы атома ${}^8\text{Be}$ равен 0,00531.

$$\begin{aligned} E_{\text{св}} &= Z\Delta_{\text{H}} + (A - Z)\Delta_{\text{n}} - \Delta = \\ &= 931,5(4 \cdot 0,00783 + 4 \cdot 0,00867 - 0,00531) \approx 56,53 \text{ МэВ.} \end{aligned}$$

Пример 2. Вычислим в а.е.м. массу атома ${}^8\text{Be}$ ($Z = 4, A = 4$), энергия связи ядра которого 56,53 МэВ.

$$E_{\text{св}} = Z\Delta m_{\text{H}} + (A - Z)\Delta m_{\text{n}} - \Delta; \quad \Delta = Z\Delta m_{\text{H}} + (A - Z)\Delta m_{\text{n}} - E_{\text{св}};$$

$$M = A + \Delta = Z\Delta m_{\text{H}} + (A - Z)\Delta m_{\text{n}} - E_{\text{св}} + A;$$

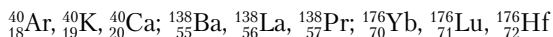
$$M = 4 \cdot 0,00783 + 4 \cdot 0,00867 - \frac{56,53}{931,5} + 4 = 8,005 \text{ а.е.м.}$$

В настоящее время известны нуклиды со всеми значениями Z от 0 (нейтрон) до 118. Для существующих в природе ядер Z меняется от 1 (водород) до 92 (уран). Остальные нуклиды получают искусственно. Не существует стабильных нуклидов с $Z = 0,43$ (технеций), 61 (прометий) и $Z > 84$. Известны нуклиды с числом нуклонов A от 1 до 263 включительно. Не существует стабильных нуклидов с числом нуклонов $A = 5, 8$ и при $A > 210$. В легких ядрах число нейтронов равно числу протонов, т.е. $Z/A \approx 0,5$. Например, для ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$ и так до ${}^{40}_{20}\text{Ca}$. Только в водороде, ядро которого состоит из одного протона, $Z/A = 1$. С ростом Z число нейтронов обгоняет число протонов, величина Z/A немонотонно уменьшается, испытывая от элемента к элементу незначительные колебания вокруг среднего, и достигает значения $Z/A = 0,39$ для урана. Такое соотношение числа нейтронов и протонов соответствует стабильным ядрам. Если соотношение числа нейтронов и протонов отличается от значения, характерного для устойчивого состояния, ядра испытывают радиоактивный распад.

Устойчивость (стабильность) ядер характеризуется параметром Бора Z^2/A . Если он больше 33, то ядро неустойчиво (радиоактивно). Последним в периодической таблице элементом, у которого еще имеется устойчивый изотоп, является висмут ${}^{209}_{83}\text{Bi}$. Элементы с Z от 84 до 92 не имеют ни одного устойчивого изотопа — все они радиоактивны. Радиоактивны также все изотопы элементов с Z от 93 до 104. Нет ни одного устойчивого изотопа у двух относительно легких элементов — технеция ${}_{43}\text{Tc}$ и прометия ${}_{61}\text{Pm}$. У других элементов радиоактивность присуща только некоторым изотопам.

Атомные ядра с четным числом протонов и четным числом нейтронов называют четно-четными ядрами, ядра с нечетным числом протонов и нечетным числом нейтронов — нечетно-нечетными ядрами. Четно-нечетными ядрами называются ядра с нечетным (четным) числом протонов и четным (нечетным) числом нейтронов.

Ядра с четным числом протонов и четным числом нейтронов устойчивы, в то время как комбинация из нечетного числа протонов и нечетного числа нейтронов, наоборот, крайне неустойчива. Здесь действует правило Маттауха: нет двух стабильных изобаров, порядковые номера которых различались бы на единицу. Исключение из этого правила имеет место при числе нуклонов $A = 50, 113$ и 180 . Правило Маттауха важно для обнаружения существующих в природе радионуклидов. Так, например, в триадах природных изобаров:



средний член является радиоактивным нуклидом.

Легкие стабильные нуклиды (до $Z \leq 20$) содержат в составе ядра примерно равное число протонов и нейтронов. При увеличении A относительная доля нейтронов возрастает. Например, у легкого нуклида ${}_{6}^{12}\text{C}$ соотношение $N/Z = 1$; у среднего нуклида ${}_{26}^{56}\text{Fe}$ $N/Z = 1,15$; у тяжелого нуклида ${}_{92}^{238}\text{U}$ $N/Z = 1,59$. Опережающий рост числа нейтронов при больших A вызван действием дальнедействующих кулоновских сил отталкивания протонов в ядре. Большинство химических элементов имеет по несколько стабильных и β -активных нуклидов. Некоторые элементы имеют всего по одному стабильному нуклиду (${}^9\text{Be}$, ${}^{19}\text{F}$, ${}^{23}\text{Na}$), остальные — по 2–3 стабильных нуклида. Олово (Sn) имеет 10 стабильных нуклидов. Выше дорожки стабильности располагаются β^+ -активные нуклиды, ниже — β^- -активные нуклиды. Свойства ядер существенно зависят от четности чисел Z и N . Наибольшее число стабильных нуклидов (155 из 265) имеют четно-четные ядра (Z — четно, N — четно), поровну стабильных нуклидов (по 53) с четно-нечетным и нечетно-четным количеством нуклонов в составе ядер. Имеется всего четыре стабильных нуклида (${}^2\text{H}$, ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$ и ${}^{14}\text{N}$) с нечетно-нечетным составом ядер.

Ход кривой зависимости удельной энергии связи ядра от атомного веса (рис. 1.1):

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A}$$

демонстрирует, что удельная энергия связи ε сначала быстро возрастает при малых A , и уже для ядер с $A > 12$ имеет примерно постоянное значение, близкое к 8 МэВ/нуклон, т.е. $E_{\text{св}} \approx \varepsilon A$. Затем зависимость $\varepsilon(A)$ достигает максимума. Для нуклидов с $A > 11$ ($Z > 5$) среднее значение энергии связи на один нуклон составляет от 7,4 до 8,8 МэВ.