

ИЗОТОПЫ, ИХ
СВОЙСТВА И
ПРИМЕНЕНИЕ

Применение стабильных изотопов некоторых лёгких элементов

- Бурный технический прогресс требует создания принципиально новых веществ, химических соединений и материалов, обладающих новыми и даже уникальными свойствами. Сегодня такие вещества и материалы широко востребованы во многих сферах науки и техники, атомной промышленности, электронике, медицине.

- Согласно протонно-нейтронной модели, предложенной Д. И. Иваненко и В. Гейзенбергом (1932 г.), атомы всех химических элементов состоят из трёх типов элементарных частиц – положительно заряженных протонов, отрицательно заряженных электронов и не имеющих заряда нейтронов. Число протонов p в ядре определяет порядковый номер Z химического элемента в периодической системе элементов Д. И. Менделеева. Протон и нейтрон, которые объединяются общим наименованием нуклоны, имеют почти тождественную массу.

- Число протонов в ядре атома однозначно определяет положение данного элемента в периодической системе элементов. Кроме того, число протонов определяет количество электронов нейтрального атома и, таким образом, обуславливает химические свойства этого атома. Однако при одном и том же порядковом номере Z (а, следовательно, и числе протонов p) атомы могут иметь различные количества нейтронов n . Таким образом, в одной клетке периодической системы возможно сосуществование атомов с различными массовыми числами. Химические элементы, имеющие один и тот же порядковый номер, но различную атомную массу, называются изотопами.

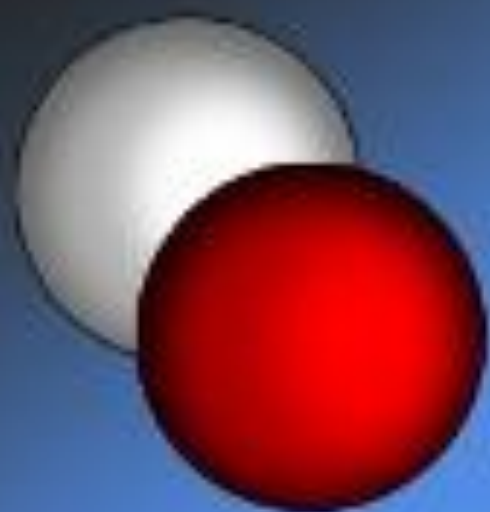
- Принято массовое число изотопа обозначать индексом вверху слева от химического символа элемента. Так, лёгкий изотоп углерода с массовым числом 12 обозначается ^{12}C , с массовым числом 13 – ^{13}C . Изотопы водорода имеют собственные названия и обозначения: лёгкий изотоп водорода с массовым числом один (протий) обозначается H, тяжёлый изотоп водорода с массовым числом два (дейтерий) обозначается D.
- Громадный экспериментальный материал по определению атомных масс различных изотопов, а также по соотношению изотопов одного и того же элемента привёл учёных к выводу о том, что изотопный состав химических элементов всегда постоянен, независимо от местонахождения элемента и того, в какое соединение входит данный элемент. Это положение является настолько общим, что получило наименование закона постоянства изотопного состава.



Proton



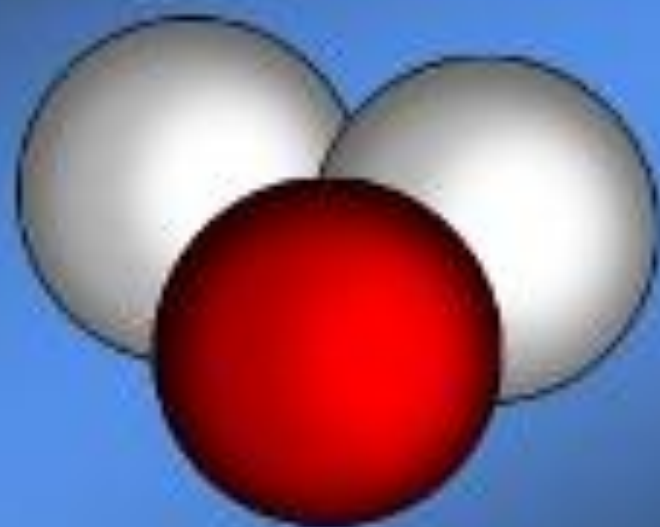
H-1



Deuterium



H-2



Tritium



H-3

Водород

- Изотоп водорода с массовым числом два (дейтерий) занимает особое место среди изотопов других элементов. Прежде всего, играет роль то обстоятельство, что только у водорода существует такое громадное различие между массами изотопов: в 2 раза для протия и дейтерия.
- Пожалуй, ни один из изотопов других химических элементов не играет такой важной самостоятельной роли в области практических приложений. Наиболее важным соединением дейтерия является тяжелая вода D_2O . В настоящее время тяжелая вода имеет исключительно важное значение как замедлитель нейтронов в ядерных реакторах. Развитие работ по атомной энергетике на первом ее этапе во многом обязано разработке способов получения тяжелой воды в больших масштабах. Некоторые свойства тяжелой воды были приведены выше (см. табл. 2).
- Для исследовательских и препаративных целей используется ряд неорганических и органических соединений, в которых весь водород замещен на дейтерий: например, дейтеросерная кислота D_2SO_4 , дейтерогидразин N_2D_4 , дейтероуксусная кислота CD_3COOD и CH_3COOD , дейтеробензол C_6D_6 и др. Соотношения между свойствами дейтерированных и «обычных» соединений приблизительно такие же, как между D_2O и H_2O .

Бор

- Стабильные изотопы бора ^{10}B и ^{11}B , резко отличаясь по ядерно-физическим свойствам, широко используются в атомной науке и технике, а также связанных с ней отраслях.
- Стабильный изотоп ^{10}B используется в реакторостроении в виде карбида бора как составная часть стержней, регулирующих скорость ядерных процессов в реакторе, а также в форме раствора борной кислоты в теплоносителе первого контура. Изотоп ^{10}B при малом удельном весе обеспечивает высоко-эффективную (превосходящую в сотни раз бетон) нейтронную защиту, что используется при создании малогабаритных реакторов, устанавливаемых на транспорте. Он также применяется в качестве антиактивационного покрытия, предотвращающего нейтронную активацию материалов, используемых в реакторостроении и ядерно-физических экспериментах.
- Способность ^{10}B трансформировать поток нейтронов в тяжелые ионизирующие частицы с длиной пробега, соизмеримой с размером живой клетки, используется в специальном приборостроении (при производстве, например, нейтронных счетчиков), а также в нейтронозахватной терапии злокачественных опухолей в медицине.
- Стабильный изотоп ^{11}B используется в ЯМР - спектроскопии, а также в реакторостроении при создании жаростойких, "прозрачных" по отношению к нейтронам конструкционных материалов (боридов циркония, иттрия, титана и их сплавов). В последние годы интерес к изотопночистому ^{11}B возрос со стороны электронной промышленности, где химически чистый бор используется в качестве легирующего компонента при производстве полупроводниковых изделий. Этот интерес обусловлен возможностью использовать нейтроноактивационный метод анализа для определения в таком боре до 28 различных примесей на концентрационном уровне примерно 10 – 8 %.

Углерод

- На сегодняшний день редкий стабильный изотоп углерода ^{13}C (природная концентрация 1,1 %) нашёл достаточно широкое применение. Он используется для изучения механизма химических реакций и биохимических реакций в медицине. Особое значение тяжёлый изотоп углерода ^{13}C имеет для выяснения механизмов процессов, происходящих в живых организмах.
- Перспективной сферой применения изотопа углерода ^{13}C (концентрация более 90 ат. %) является диагностика различных функциональных нарушений в организме: почечной недостаточности, нарушения обменных процессов печени, диабета, кислородного голодания сердечной мышцы, легочной недостаточности, метаболических нарушений, обусловленных дисфункцией эндокринных и других органов [5] и т. д..
- Разработан уникальный метод диагностики заболеваний с применением меченных изотопом ^{13}C соединений. Это так называемые тесты дыхания. Препарат, принимаемый пациентом, претерпевает в организме изменения, связанные с протеканием биохимических реакций в разных органах. Через некоторое время препарат частично или полностью разлагается и выводится из организма. Содержащийся в препарате углерод в процессе реакций обмена окисляется и выводится в виде углекислого газа через легкие в выдыхаемом воздухе. Если изотопный состав содержащегося в препарате углерода отличен от природного, то появление в выдыхаемом воздухе углекислоты, содержащей углерод препарата, может быть зарегистрировано с помощью соответствующей аппаратуры. Имея информацию о путях и скоростях метаболических превращений препарата в исследуемом органе и вводя в него изотопную углеродную метку, можно сделать вывод о состоянии органа. Исследования такого рода, проводимые ранее в основном для решения научных биомедицинских задач, начали с недавнего времени использоваться в повседневной клинической практике.
- Наибольшее распространение получил так называемый уреазный тест, призванный определять наличие в желудочно-кишечном тракте *helicobacterpilory* - бактерии, ответственной за возникновение подавляющего числа наиболее распространенных заболеваний желудочно-кишечного тракта - язвенных болезней и гастритов. Простота, надежность, быстрота проведения и безопасность тестов дыхания для пациентов позволяют делать оптимистический прогноз относительно этой диагностики. Определенным ориентиром здесь могут служить США - ежегодно здесь проводится около 2 млн. тестов с использованием препаратов, меченных изотопами углерода.
- Теплопроводность алмаза на основе лёгкого наиболее распространённого изотопа углерода ^{12}C (конц. ^{12}C – 99,9 ат. %) в 1,5 раза выше теплопроводности алмаза природного изотопного состава (конц. ^{12}C – 98,9 ат. %). Использование в электронике изотопномодифицированных алмазных плёнок на основе ^{12}C позволяет существенно улучшить технические характеристики приборов и оборудования.

АЗОТ

- ▣ Перечень возможных направлений и способов применения соединений, меченых стабильным изотопом азота ^{15}N , весьма велик. Наиболее характерными областями его применения являются агрохимия, сельское хозяйство, пищевая промышленность, экологические и гидрологические исследования, биология, фармакология, медицина, техника (например, металловедение, радиотехника и оптика). Перспективной по масштабу использования ^{15}N может стать атомная энергетика (нитридное топливо).

Кислород

- Лёгкий изотоп кислорода ^{16}O , очищенный от более тяжёлых изотопов кислорода, применяют для получения диоксида плутония. Последний используется в качестве основы радиоактивного источника тока, обеспечивающего длительную работоспособность имплантируемых в тело человека искусственных клапанов, регуляторов ритма или стимуляторов работы сердца. Примесь тяжёлых изотопов кислорода под влиянием α -частиц распада плутония вызывает нежелательное побочное нейтронное излучение.
- Интерес к среднему стабильному изотопу кислорода ^{17}O обусловлен наличием у него ядерного магнитного момента.
- Тяжёлый стабильный изотоп кислорода ^{18}O используется главным образом как меченый атом в виде различных меченых соединений – оксидов, солей, кислот, щелочей, органических препаратов. Увеличившийся в последние годы спрос на изотоп ^{18}O вызван возросшей практикой его применения для диагностики злокачественных опухолей методом позитрон-электронной томографии. В данном методе диагностики, как правило, используется диоксиглюкоза, меченная изотопом ^{18}O .

Кремний

- ▣ Весьма широкие перспективы применения имеют изотопы кремния [6]. Дальнейшее развитие микроэлектроники на данный момент существенно ограничивается проблемой отвода тепла от микросхем с высокой плотностью размещения элементов, работающих на больших частотах. Процессоры бытовых персональных компьютеров требуют принудительного охлаждения. Дальнейшая миниатюризация элементов микросхем, повышение плотности компоновки и повышение рабочей частоты ограничиваются переносом тепла внутри кристалла микросхемы. Увеличение теплопроводности кремния вследствие изменения его изотопного состава может стать одним из возможных путей решения данной проблемы [7]. Исследования показывают, что теплопроводность стабильного изотопа кремния ^{28}Si (99,9 ат. %) до полутора раз выше теплопроводности кремния природного изотопного состава. Задача получения изотопа ^{28}Si существенно облегчается его высоким природным содержанием (92,2 ат. %).
- ▣ Существующие в настоящее время классические цифровые электронные компьютеры, созданные с помощью полупроводниковых технологий, не способны решать такие задачи, как поиск в неструктурированной базе данных, моделирование эволюции квантовых систем (например, ядерные реакции) и факторизация больших чисел. В восьмидесятых годах XX века возникла идея квантовых вычислений или идея квантового компьютера [8], который должен уметь оперировать как минимум тысячами кубит - единиц квантовой информации. Сначала учёными было предложено хранить кубиты в отдельных атомах фосфора на подложке из изотопа ^{28}Si , а затем – в квантовых состояниях массива цепочек атомов изотопа кремния ^{29}Si , выращенных на поверхности изотопа ^{28}Si . В этом случае микроскопические магнитные стержни, уложенные перпендикулярно этим цепочкам, будут контролировать магнитное квантовое состояние атомов ^{29}Si . Квантовый компьютер, обладая существенно большей производительностью по сравнению с классическим, способен решить многие проблемы, связанные с большими объёмами вычислений.