

4. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ

4.1 Электромагнитные методы

Метод электромагнитного разделения основан на различном действии магнитного поля на заряженные частицы различной массы. По сути дела такие установки, называемые калютронами, являются огромными масс-спектрометрами, работающими по принципу масс-спектрометра Деминстера.

Вещество, изотопы которого требуется разделить, помещается в тигель ионного источника, испаряется и ионизируется. В ионном источнике пары рабочего вещества ионизируются в газовом разряде, горящем в продольном магнитном поле. Возникающие ионы извлекаются из разряда сильным электрическим полем и поступают в вакуумную разделительную камеру в виде сформированного ионного пучка. Камера помещена в магнитное поле H , направленное перпендикулярно движению ионов. Под действием магнитного поля ионы движутся по окружностям с радиусами кривизны, пропорциональными корню квадратному из отношения массы иона M к его заряду e . Вследствие этого радиусы траектории тяжёлых и лёгких ионов отличаются друг от друга. Это позволяет собирать ионы различных изотопов в приёмники, расположенные в фокальной плоскости установки, где и накапливаются (Рис.8). В приёмнике ионы пучки изотопов попадают на стенки изотопных «карманов» и оседают на них в виде нейтральных атомов. Накопленное вещество извлекается из приёмника химическими методами. Коэффициент использования вещества в цикле 10-40%.

В однородном магнитном поле с напряжённостью H расстояние d между фокусами соседних изотопом с массами M и $M+\Delta M$ и зарядом Ze (дисперсия) составляет:

$$d = \rho \frac{\Delta M}{M}; \quad \rho = \frac{c}{H} \left(\frac{2MV}{Ze} \right)^{1/2}. \quad (15)$$

Здесь ZeV – энергия иона (все величины выражены в системе единиц СГСЕ), а ширина фокуса каждого изотопа (абберация):

$$\delta = \rho \sin^2 \left(\frac{\varphi}{2} \right) \approx \frac{1}{4} \rho \varphi^2, \quad (16)$$

где φ – угол раствора ионного пучка в плоскости, перпендикулярной H .

Изотопное разделение возможно только при $\delta < d$, т.е. в однородном поле H – при $\varphi < 2 \left(\frac{\Delta M}{M} \right)^{1/2}$. Для

увеличения φ и обеспечения тем самым большей производительности разделительной установки применяют неоднородные (т.н. безабберационные) магнитные поля, с помощью которых удаётся хорошо фокусировать пучки ионов с $\varphi = (25-30)^\circ$ и энергией ионов 25-40 кэВ. Производительность Q разделительной установки связана с силой тока I пучка однозарядных ионов выражением:

$$Q = 0,89 A C_0 I \text{ (г/сутки)}, \quad (17)$$

где A – атомная масса разделяемого элемента, C_0 – относительная концентрация выделяемого изотопа в исходной смеси (I в А).

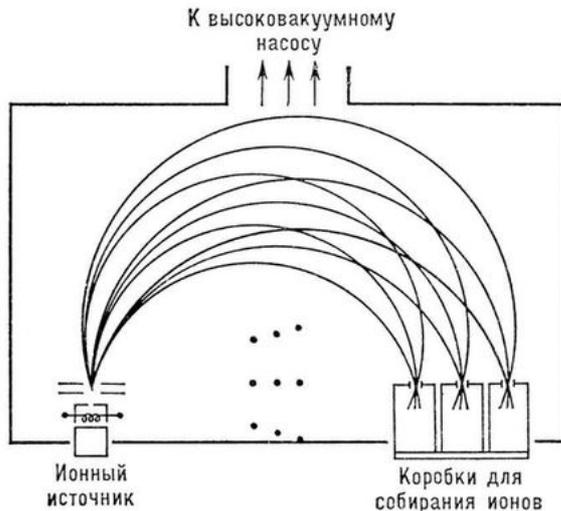


Рис.9. Схематическое изображение электромагнитного разделительного устройства; точки показывают направление магнитного поля, перпендикулярное плоскости рисунка.

Этот метод позволяет разделять любые комбинации изотопов, обладает очень высокой степенью разделения. Обычно достаточно двух проходов для получения степени обогащения выше 80% из бедного вещества (с исходным содержанием желаемого изотопа менее 1%).

Производительность электромагнитных установок определяется значением ионного тока и эффективностью улавливания ионов. На больших установках (типичные размеры вакуумной камеры $3 \times 1,5 \times 0,4$ м³ ионный ток колеблется от десятков до сотен *ма*, что даёт возможность получать до нескольких граммов изотопов в сутки (суммарно по всем изотопам). В лабораторных сепараторах производительность в 10 - 100 раз ниже.

Электромагнитный метод характеризуется высоким α и возможностью одновременного разделения всех изотопов данного элемента. Обычно на больших промышленных установках для одной ступени разделения $\alpha = C/C_0 \sim 10-100$, в лабораторных — в 10—100 раз выше. В большинстве случаев при разделении электромагнитным методом достаточно одной ступени, редко производится повторное разделение предварительно обогащенных изотопных материалов для получения изотопов особо высокой частоты.

Основные преимущества метода: высокий коэффициент обогащения в одном цикле: возможность одновременного разделения всех изотопов; универсальность, позволяющая переключать одну и ту же установку для разделения стабильных и радиоактивных изотопов.

Электромагнитное разделение плохо приспособлено для промышленного производства: большая часть веществ осаждается внутри калютрона, так что его приходится периодически останавливать на обслуживание. Недостатки метода: малые производительность и коэффициенты использования вещества; большие энергетические и эксплуатационные затраты, сложность и дороговизна технического обслуживания, низкая производительность.

Электромагнитным методом осуществляется разделение как стабильных, так и радиоактивных изотопов. Электромагнитным методом осуществлено разделение практически всех стабильных изотопов. В случае короткоживущих изотопов ($T_{1/2} < 20$ мс) первичные ионы, создаваемые в ядерных реакциях, вводятся непосредственно в масс-сепаратор.

Основная сфера применения метода - получение небольших количеств чистых изотопов для лабораторного применения. Они используются для получения радиоактивных изотопов, необходимых для ядерной спектроскопии, для изучения взаимодействия ионов с твёрдым телом (при ионном внедрении и для других целей).

Электромагнитный метод впервые позволил получить килограммовые количества ^{235}U . Электромагнитный завод в Ок-Ридже (США) имел 5184 разделительные камеры — «калютроны». Вследствие высокой универсальности и гибкости электромагнитные установки с мощными источниками ионов используются для разделения изотопов ~ 50 элементов периодической системы в количествах от мг до сотен г и являются основным источником обеспечения изотопами научно-исследовательских работ и некоторых практических применений изотопов.

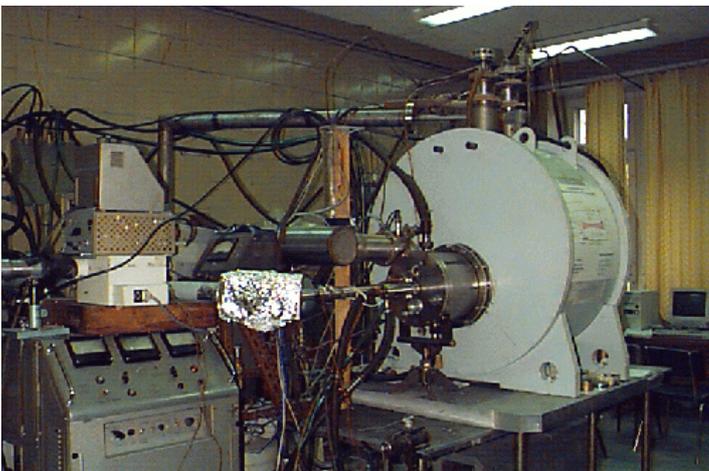
4.2 Ионный и циклотронный резонанс

Метод разделения изотопов, использующий ионно-циклотронный резонанс (ИЦР), является универсальным и в силу своей высокой эффективности одноступенчатым. По энергоэффективности и производительности он уступает методам, использующим центрифуги и газовую диффузию, однако, позволяет работать с малыми количествами веществ и широкой номенклатурой. Этого вполне достаточно для ряда медицинских задач. Суть метода заключается в селективном ИЦР-нагреве резонансных ионов многоизотопной плазмы, получаемой в плазменном источнике и транспортируемой в однородном магнитном поле с последующим разделением горячих и холодных ионов. Диапазон разделяемых масс практически вся таблица элементов, переход с одних масс на другие может происходить как при изменении частот ВЧ-генератора, так и изменении величины магнитного поля.

Для реализации метода последовательно осуществляются операции: ионизация паров элемента, изотопы которого необходимо разделить; создание потока спокойной плазмы с замагниченными ионами в достаточно протяженном однородном магнитном поле; селективное ускорение ионов выделяемого изотопа; разделение и сбор ускоренных ионов.

В однородном магнитном поле H ион с энергией E_H и массой M движется по круговой орбите с циклотронной частотой Ω и радиусом

$$r_H = \frac{\sqrt{2E_H}}{\Omega} \quad (18)$$



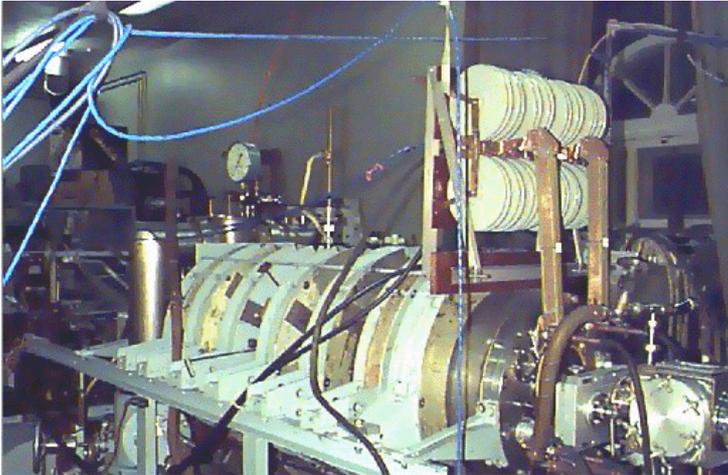
Если при этом на смесь ионов действует переменное электрическое поле с частотой ω , то энергию поглощают ионы, находящиеся в резонансе с полем: $\Omega = \omega$ (циклотронный резонанс). При этом r_H возрастает, что позволяет отделить эти ионы от других. Для реализации метода требуется протяжённый столб плазмы диаметром $2r_{H\max}$. Метод использован для обогащения ^{41}K ($\alpha=10$).

Рис. 10. Источник плазмы для установок электроно-циклотронного резонанса.

Ионно-циклотронный (ИЦР) метод разделения изотопов основан на селективном нагреве ионов выбранного изотопа в высокочастотном электрическом поле. Селективно нагретые ионы затем могут быть выделены на коллекторной системе как геометрически (за счет их большого ларморовского радиуса), так и с

помощью задерживающего потенциала на пластинах коллектора. Этот метод может быть использован для разделения изотопов любых металлов. Он наиболее эффективен для разделения изотопов элементов, которые не имеют удобных газообразных соединений, пригодных для использования в газовой центрифуге. В сравнении с электромагнитным сепаратором, единственным методом, позволяющим разделять изотопы таких элементов, ИЦР-метод позволяет обрабатывать большие потоки разделяемого вещества (сотни ампер по сравнению со 100 мА в электромагнитном сепараторе) при сравнимом коэффициенте разделения (γ ИЦР — несколько десятков, у ЭМ - сепаратора — сотни). Это обещает повышение производительности и снижение себестоимости процесса разделения изотопов.

Для создания потока плазмы с большим поперечным сечением применяется источник плазмы в парах металлов, использующий СВЧ - разряд в условиях электронно - циклотронного резонанса (ЭЦР). Установка имеет сверхпроводящий магнит с магнитным полем до 3 Тл. СВЧ - разряд создается с помощью гиротрона непрерывного действия мощностью до 20 кВт.



В качестве примера можно упомянуть установку «Сирена», предназначенную для разделения изотопов лития. Поток литиевой плазмы создается с помощью продольного дугового разряда в парах лития. Резонансный нагрев целевого изотопа производится с помощью четырехфазной спиральной антенны. Селективно ускоренные ионы собираются на коллекторах различных конструкций.

Рис.11. Установка «Сирена».

Принцип ИЦР-разделения изотопов

Другим примером может служить установка «МЦИРИ» (Магнитный Циклотронный Ионный Резонанс Изотопов). На этой установке можно будет разделять изотопы любых элементов-металлов.

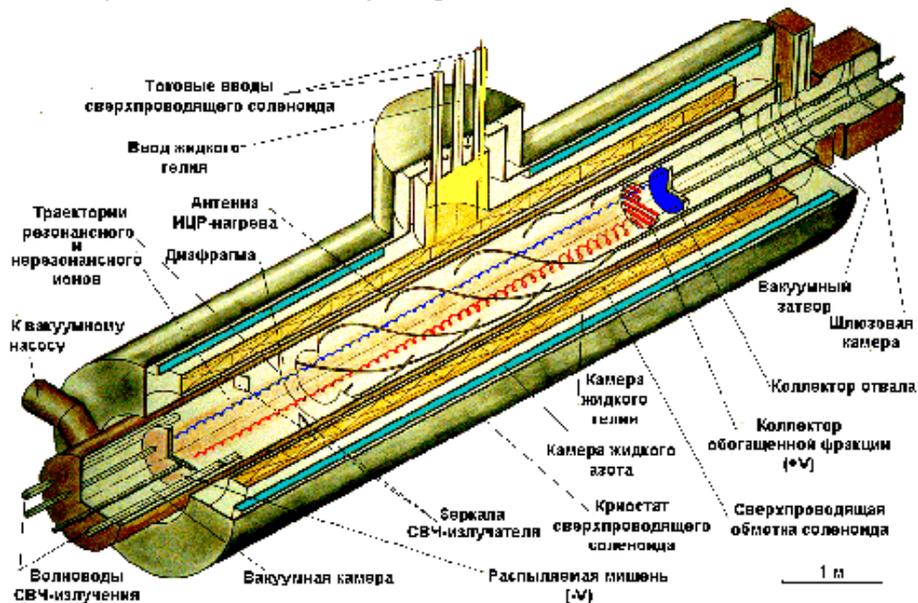


Рис. 12. Разделительная система МЦИРИ.

4.3 Плазменное разделение

В методе используя вращение плазмы под действием силы Лоренца или магнитное сжатие плазмы бегущей высокочастотной волной. В плазменной центрифуге могут быть получены высокие центробежные ускорения (до 10^8 м/с^2), но при очень высокой температуре (например, 50000К). Для изотопов Kr, Ar, Ne, U $\alpha \approx 1,1 - 1,3$.

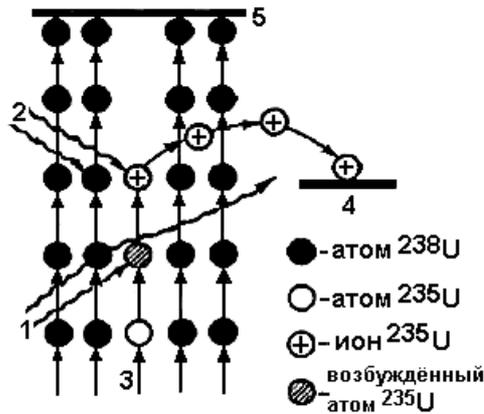
4.4 Оптические методы

Основаны на изотопическом сдвиге спектральных линий поглощения электромагнитного излучения. Если длина волны λ падающего на изотопную смесь атомов или молекул монохроматического света совпадает с линией поглощения одного из изотопов, то свет поглощают только атомы этого изотопа, переходя в возбуждённое состояние. Возбуждённые атомы отделяют от невозбуждённых фотохимическими и физическими методами (фотоионизация, фотолиз). Ввиду избирательности поглощения значение α может

быть высоким. Достигнутая в первичном акте селективность на практике может ухудшаться из-за обмена энергией возбуждения или зарядами при столкновении с другим изотопом, вторичных химических реакций и др. (При фотохимическом окислении, обогащение ^{200}Hg и ^{202}Hg идёт с $\alpha=4$).

Для оптического изотопного разделения используются лазеры. Лазерное излучение можно применять для селективного возбуждения электронных уровней атомов и колебательных уровней молекул. Если электронный уровень выше порога диссоциации, для распада молекулы достаточно одного фотона (одноступенчатый фотолиз); пример – обогащение D и ^{13}C при фотолизе формальдегида. При возбуждении на уровень (электронный или колебательный) ниже порога диссоциации необходим второй фотон с λ , достаточной для диссоциации (двухступенчатый фотолиз); примеры: обогащение ^{14}N , ^{15}N и ^{10}B и ^{11}B при фотолизе NH_3 и BCl_3 под действием ИК-излучения CO_2 -лазера и прошедшего через оптический фильтр УФ-излучения искры или лампы-вспышки; фотолиз UF_6 с помощью ИК-излучения и УФ-лазеров.

Для многоатомных молекул возможна многофотонная диссоциация под действием только ИК-излучения; примеры: обогащение изотопами при воздействии излучения CO_2 -лазера на SF_6 (^{32}S , ^{34}S), BCl_3 (^{10}B , ^{11}B) и др. При возбуждении на электронный или колебательный уровень выше порога химической реакции возможно ускорение реакции; примеры: обогащение ^{14}N , ^{15}N в реакции N_2+O_2 и ^{10}B , ^{11}B в реакции $\text{BCl}_3+\text{H}_2\text{S}$.



Для изотопного разделения с использованием атомарных паров металла необходимы лазер на красителях и УФ-лазер. Первый (излучающий обычно в видимой части спектра) производит селективное возбуждение одного изотопа, второй – ионизацию возбуждённых атомов.

Рис.13. Схема лазерного обогащения ^{235}U фотоионизацией: 1 – излучение возбуждающего лазера; 2 – возбуждение ионизирующего лазера; 3 – поток атомных паров; 4 – коллектор ионов; 5 – конденсатор пара.

Полученные ионы отклоняются электромагнитным полем к коллектору. Нейтральные пары собирают на другом коллекторе. Процесс лазерной фотоионизации атомов применён для изучения

изотопного разделения Rb, Li, Ca, Nd, Sm, Eu, Cd, Dy, Er, Yb, U.

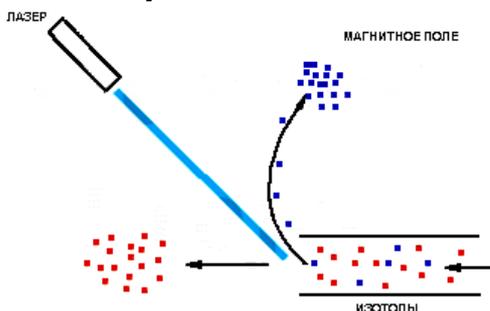
Достоинства лазерного изотопного разделения: универсальность, возможность воздействия только на один изотоп.

Лазерные методы разделения изотопов все шире внедряются в промышленность. Этому способствовала разработка новых типов лазеров, специально приспособленных для этой цели. Одним из важных направлений здесь является фотоионизационное разделение изотопов в атомных парах, основанное на двух и трехступенчатой ионизации и бесстолкновительной изотопоселективной диссоциации многоатомных молекул в поле лазерного излучения. Другое направление основано на лазерном стимулировании изотопоселективных химических реакций, включающее изотопоселективное лазерное воздействие на химический процесс и использование изотопоселективного колебательно-колебательного обмена, инициирующего химическую реакцию.

Некоторые техники разделения изотопов базируются на плазменных методиках. Сюда, в частности, относится разделение изотопов в разрядах постоянного тока с использованием таких эффектов, как «изотопный ветер» и изотопный катафорез.

В последнее время в промышленное разделение изотопов стали внедряться системы с бегущим магнитным полем, плазменные центрифуги и плазменные методы разделения изотопов, основанные на ионном циклотронном резонансном нагреве целевого изотопа.

4.5 Лазерные методы



Различные изотопы поглощают свет с немного различной длиной волны. При помощи точно настроенного лазера можно избирательно ионизировать атомы какого-то определенного изотопа. Получившиеся ионы можно легко отделить, допустим, магнитным полем (Рис.14). Такая технология имеет чрезвычайную эффективность, однако в промышленных масштабах пока не применяется.

Рис.14. Схема метода лазерного испарения

Лазерные методы разделения изотопов все шире внедряются в промышленность. Этому способствовала разработка новых типов лазеров, специально приспособленных для этой цели. Одним из важных направлений здесь является фотоионизационное разделение изотопов в атомных парах, основанное на двух и трехступенчатой ионизации и бесстолкновительной изотопоселективной диссоциации многоатомных молекул в поле лазерного излучения. Другое направление основано на лазерном стимулировании изотопоселективных химических реакций, включающее изотопоселективное лазерное воздействие на химический процесс и использование изотопоселективного колебательно-колебательного обмена, инициирующего химическую реакцию.

Некоторые техники разделения изотопов базируются на плазменных методиках. Сюда, в частности, относится разделение изотопов в разрядах постоянного тока с использованием таких эффектов, как «изотопный ветер» и изотопный катафорез.

В последнее время в промышленное разделение изотопов стали внедряться системы с бегущим магнитным полем, плазменные центрифуги и плазменные методы разделения изотопов, основанные на ионном циклотронном резонансном нагреве целевого изотопа.