

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАСС АТОМОВ

В. А. Кравцов

ВВЕДЕНИЕ

Массы атомов изотопов имеют большое значение как для развития наших представлений о строении ядер, так и для анализа ядерных реакций и других практических целей. В частности, в последние годы точные измерения масс атомов подтвердили существование ядерных оболочек. Со времени выхода последних русских обзорных работ по массам тяжелых¹, легких² и средних^{3, 4} атомов опубликовано более десятка различных экспериментальных и обзорных работ, результаты которых в некоторых важных случаях противоречивы. К концу 1956 г. был опубликован ряд работ, которые сняли некоторые сомнения и, по-видимому, ликвидировали важнейшие противоречия. Настоящий обзор составлен для того, чтобы помочь разобраться в имеющихся противоречиях между значениями масс атомов, опубликованными до 1 января 1958 г., и в свете последних достижений дать рекомендации наиболее надежных значений. В первой части рассматриваются и оцениваются обзоры значений масс атомов, опубликованные с 1955 до 1958 г., и существовавшие в них противоречия. Вторая часть посвящена описанию масс-спектроскопических измерений повышенной точности, опубликованных в 1955—1957 гг. и позволивших устранить некоторые ошибки и противоречия прежних измерений. В третьей части излагаются способы обнаружения ошибок прежних измерений и получения новых данных более высокой точности. В четвертой приводятся примеры применения новых значений масс атомов для решения некоторых задач ядерной физики. Здесь же приводятся таблицы значений масс атомов и энергий связи ядер, полученных в последнее время.

I. ОБЗОРЫ ПО МАССАМ АТОМОВ

Первой полной серией обзоров по массам атомов всех областей периодической системы были обзоры^{1, 2, 3, 4}. Если в таблицах работы¹ внести поправки, приведенные на стр. 25 работы³, и заменить в таблице VI в работе³ массы и энергии связи в интервале $68 \leq A \leq 104$ данными из работы⁴, то такая таблица масс окажется составленной по единым стандартам.

Вскоре была опубликована работа Драммонда⁵, где приведены вычисленные по способу наименьших квадратов 42 массы легких атомов изотопов от водорода до хлора. При вычислении масс он использовал как ядерные реакции, так и масс-спектрометрические дублеты. Работа менее полна, чем работа Джелепова и Зыряновой², где приведены в этой области 82 массы. Среди использованных Драммондом экспериментальных

данных были, по-видимому, ошибочные, что сделало сообщаемые им результаты очень ненадежными.

В том же году появилась весьма обстоятельная работа Гласса, Томпсона и Сиборга ⁶, в которой приведены массы тяжелых атомов и энергии связи «последних» нуклонов для 181 известного изотопа и для 163 еще неизвестных изотопов. Массы вычислены из массы атома изотопа Pb^{208} с использованием экспериментальных значений энергий альфа-распадов, энергий бета-распадов и энергий ядерных реакций. Массы неизвестных изотопов получены путем применения альфа- и бета-систематики. Кроме масс, в работе содержится также вычисления параметров для полуэмпирической формулы масс и кривые систематики энергий распадов и периода полураспада.

Наиболее ценными и полными обзорными работами являются три статьи Вапстра и Хьюзенга о массах изотопов легких, средних и тяжелых атомов ^{7, 8, 9}. Основными исходными экспериментальными данными всех этих вычислений являются пять фундаментальных таблиц разностей масс; это таблицы энергий бета-распадов ¹⁰, энергий ядерных реакций ¹¹, атомных масс, определенных методами микроволновой спектроскопии ¹², энергий альфа-распадов ¹³ и масс-спектроскопических дублетов ¹⁴. Таблицы масс Вапстра и Хьюзенга являются в настоящее время наиболее полными и лучшими. В первой из работ Вапстра ⁷ содержится вычисление масс легких атомов с массовыми числами $A < 34$. Расчет масс ведется в основном по экспериментальным значениям энергий бета-распадов из ¹⁰ и энергий ядерных реакций из ¹¹, исправленным по перекалиброванным стандартным энергиям альфа-распадов, с которыми сравнивались энергии реакций. Экспериментальные значения энергии реакций суммируются по циклам, и если некоторые циклы не удастся замкнуть, сомнительные данные, как не согласующиеся с другими, отбрасываются. Все оставленные «согласованные» энергии используются для вычисления масс по способу наименьших квадратов. В отличие от работы Джеленова и Зыряновой масс-спектроскопические данные при этом в расчет не принимаются. В конце приводится лишь сравнение измеренных дублетов масс с их значениями, вычисленными из ядерных реакций. При этом констатируется наличие в отдельных случаях значительных расхождений, превышающих погрешности.

Во второй работе Вапстра ⁸ приводятся результаты вычисления масс атомов изотопов с массовыми числами $33 < A < 202$. Как исходные экспериментальные данные используются уже цитированные таблицы ^{10, 11} и ¹⁴ с некоторыми новейшими дополнениями. Насколько возможно, т. е. до массового числа $A=61$, вычисления масс производятся только из энергий распадов и реакций; масс-спектроскопические данные используются только для контроля. Далее, для $A > 61$ вычисление масс производится по масс-спектроскопическим данным с увязкой их с энергиями распадов и реакций. Встречающиеся противоречия разрешаются, причем меньшего доверия, по мнению Вапстра, заслуживают данные масс-спектроскопии. В большинстве случаев противоречия разрешаются почти так же, как и в работах ^{3, 4}. Для вычисления масс из дублетов в качестве стандартных масс легких атомов используются массы из работы ⁷.

Третья работа этой серии—работа Хьюзенга ⁹ посвящена расчетам масс тяжелых атомов изотопов с массовыми числами $201 < A < 267$. Порядок вычислений масс такой же, как и в работе ⁶, но в качестве исходных экспериментальных данных используются более новые таблицы ^{10, 11, 12, 13} и ¹⁴ с новейшими дополнениями. В качестве стандартных масс для вычисления значений масс из дублетов применяются значения масс, заимствованных из ^{7, 8}.

Наряду с энергиями распадов, взятыми из опыта, применялись также энергии, полученные оценкой из систематики. Таким образом таблица содержит также и массы атомов изотопов, которые пока еще не наблюдались. Во всех трех работах наряду с массами вычислены и приводятся значения энергий связи атомов. Как сводка значений масс и энергий связи работа⁹ несколько полнее⁶, но в последней работе содержатся более подробные данные о систематике.

Все три таблицы вместе^{7, 8, 9} образуют наилучшую таблицу масс атомов и энергий связи ядер, составленную на основании экспериментальных данных, опубликованных до 1955 г. Ее недостатком является игнорирование, где это возможно, масс-спектроскопических измерений. Из дальнейших исследований выяснилось, что это приводит к ряду неточностей, в частности в значениях массы и энергии связи изотопа C^{12} , а следовательно, и в вычисленных исходя из этих величин значениях масс для атомов среднего атомного веса (см. раздел III).

В работе Маттауха, Вальдмана, Бнери и Эверлинг¹⁵ вновь проводится уравнивание энергий реакций и распадов по методу наименьших квадратов для легких атомов с массовыми числами в интервале $1 \leq A \leq 36$. Исходные данные в¹⁵ целиком заимствованы из¹⁰ и¹¹ без каких-либо дополнений. Путем решения системы нормальных уравнений получены массы 70 атомов изотопов. Результаты очень мало расходятся со значениями, вычисленными в⁷. При этом следует отметить, что в⁷ вычислено больше масс, именно: для интервала $1 \leq A \leq 33$ дано 84 массы изотопов. Все недостатки, связанные с использованием для вычисления масс только энергий реакции, о которых говорилось в связи с работой⁷, естественно относится и к¹⁵.

В конце 1956 г. опубликована работа Раута¹⁶, в которой приводится таблица масс атомов и энергий связи последних нейтронов и протонов тяжелых ядер от ртути до фермия. Таблица представляет собой перепечатку устаревших значений из книги Э. Сегре⁶⁸ с небольшими дополнениями и совершенно не отражает работ последних лет, будучи менее полной и менее точной, чем⁶ и³.

В работе Ли-Чжен-у¹⁷ еще раз произведено вычисление масс легких атомов от нейтрона до кальция только из энергий ядерных реакций. Ли-Чжен-у использовал в качестве исходных экспериментальных данных не только значения энергий распадов и реакций из¹⁰ и¹¹, но и ряд энергий, измеренных и опубликованных после 1954 г. Это делает значения масс, вычисленных Ли-Чжен-у, более современными, чем приводимые в⁷ и¹⁵. Уравнивание проводилось упрощенным способом наименьших квадратов, предложенным Ли-Чжен-у. В результате вычислены массы 79 атомов, которые сравниваются с данными масс-спектроскопических измерений. Небольшие разногласия обнаружены в значениях массы C^{12} и несколько большие расхождения в значениях масс S^{32} и Ca^{40} . Основным недостатком работы является использование при вычислении только части экспериментальных данных—энергий ядерных реакций.

В работе Эндта, Бьюкнера, Брамса, Париса и Спердута¹⁸ вычислены массы 27 атомов изотопов от серы до титана из энергий ядерных реакций. Исходными экспериментальными данными в этой работе являются энергии ядерных реакций, измеренные с помощью магнитного анализа с погрешностями, не превышающими 20 кэв. При расчете в качестве стандартов взяты массы n , H^1 , D^2 и He^4 из⁷. Масса атома изотопа S^{32} взята из работы Квизенберри с сотрудниками²². Массы вычислены без применения для уравнивания способа наименьших квадратов. Увязка внутри цикла производилась распределением невязки обратно пропорционально весам. Для сравнения были вычислены также массы из масс-

спектроскопических дублетов. Вычисление масс из дублетов произведено по стандартам Квизенберри с сотрудниками ²², приведенным в таблице II (см. также разделы II и III настоящей статьи). Расхождения, превышающие погрешности, имеются только у масс атомов изотопов K^{40} , Ca^{40} , Ca^{42} и Ca^{44} . Никаких систематических отклонений не обнаруживается.

В работе Дакворса ⁹² содержится вычисление масс атомов устойчивых изотопов в интервале $40 \leq A \leq 240$, главным образом по масс-спектроскопическим дублетам с увязкой их с энергиями ядерных реакций. В работе использованы экспериментальные данные, опубликованные до начала 1957 г.

В № 4 Reviews of Modern Physics за 1957 г. напечатаны дополнения к таблицам разностей масс. Среди них особенно важны таблица новых масс-спектроскопических дублетов ⁸⁷, таблица новых значений энергии бета-распадов ⁹⁰ и таблица новых значений энергии ядерных реакций ⁹¹. Эти таблицы суммируют экспериментальные данные, опубликованные с 1954 г. до середины 1957 г., и имеют цель дополнить уже цитированные ¹⁰, ¹¹ и ¹⁴ таблицы 1954 г.

II. НОВЫЕ МАСС-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Основные виды масс-спектрометров описаны, например, в монографии Рика ¹⁰. В последние годы вступили в строй три новые установки, пригодные для измерения масс атомов с высокой точностью: это большой «синхрометр» Смита, советский масс-спектрограф с двойной фокусировкой и новый масс-спектрометр Миннесотского университета (США), построенный Ниром с сотрудниками.

Принцип устройства синхрометра кратко описан в реферате Л. Б. ²⁰. Синхрометр принадлежит к типу динамических масс-спектрометров, в которых производится сравнение времен пролетов ионов по круговой орбите в магнитном поле. Подробное описание прибора приведено в работе Смита и Дамма ⁷⁴. Результаты измерения Смитом еще не опубликованы. Значения дублетов для легких атомов, измеренных Смитом, приведены в таблице I по рукописи ⁸⁹, любезно присланной автору обзора.

Советский масс-спектрограф высокой точности описан в работе Демирханова, Гуткина, Дорохова и Руденко ²¹. Он построен М. Арденне и представляет собой прибор с двойной фокусировкой типа Бейнбриджа—Иордана и обладает разрешающей способностью 70 000—100 000.

На советском масс-спектрографе были измерены разности масс четырех фундаментальных дублетов и по ним вычислены массы изотопов H^1 , D^2 , He^4 и C^{12} . Результаты измерений приводятся в таблицах I и II. На этом же приборе Демирханов, Гуткин и Дорохов ⁷⁶ измерили два дублета с изотопом He^3 . При этом, по-видимому, впервые в масс-спектрометрии применялся гелий, обогащенный изотопом He^3 до 99,5%. Результатом этого измерения является масса атома He^3 , полученная с наибольшей в настоящее время точностью:

$$He^3 + 3,016\,980 \pm 1,2.$$

Дублеты приводятся в таблице I. Те же авторы ⁷⁷ измерили ряд дублетов с изотопами C^{13} , N^{14} и N^{15} . В дальнейшем они ⁷⁸ провели измерения масс тяжелых атомов, в частности изотопов свинца и висмута. Наиболее надежные значения измеренных дублетов приводятся в таблице I. Новые значения масс атомов изотопов свинца и висмута

$$Pb^{207} + 207,041\,550 \pm 29,$$

$$Pb^{208} + 208,042\,629 \pm 38,$$

$$Bi^{209} + 209,046\,840 \pm 64.$$

вычисленные по дублетам Демирханова, Гуткина и Дорохова и по вторичным стандартам из таблицы X, являются лучшими значениями на сегодняшний день.

Высокая точность масс-спектроскопических измерений в настоящее время достигнута на большом масс-спектрометре с 40-сантиметровым радиусом кривизны пути ионного пучка в магнитном анализаторе. Этот прибор, сконструированный и описанный Квизенберри, Скольманом и Ниром ²², построен в Миннесотском университете. Его разрешающая сила достигает 75 000.

На этом большом масс-спектрометре были прежде всего многократно и многими способами измерены массы вторичных стандартов, за которые приняты массы атомов изотопов H^1 , D^2 , C^{12} и S^{32} . Затем были измерены массы всех устойчивых изотопов в интервале массовых чисел $10 \leq A \leq 30$, которые опубликованы в работе Скольмана, Квизенберри и Нира ²³. Наконец, заново с большей точностью измерены массы всех устойчивых изотопов элементов, начиная с железа и кончая цинком. Измерения масс от железа до цинка опубликованы в работе Квизенберри, Скольмана и Нира ²⁴. Все дублеты, опубликованные в ²²⁻²⁴, приводятся в таблице I. Массы, вычисленные по этим дублетам, представлены в таблицах II и X.

В работе Джонсона и Нира ²⁵ описаны измерения масс атомов изотопов элементов от ксенона до европия. Измерения произведены на масс-спектрометре того же типа, что и большой Миннесотский, но меньшего размера (с радиусом кривизны магнитного анализатора 15 см), и с меньшей разрешающей силой (14 000). Дублеты масс, опубликованные в ²⁵, приводятся в таблице I. Массы, вычисленные по этим дублетам и по стандартам из таблицы II, представлены в таблице XI.

В последующей работе Квизенберри, Гизе и Бенсона ⁷⁹ сообщается об измерении новых дублетов на большом 40-сантиметровом Миннесотском масс-спектрометре. Целью этих измерений явилась проверка и уточнение масс вторичных стандартов, т. е. масс атомов изотопов H^1 , C^{12} и S^{32} . Повторные измерения старых дублетов и измерения новых дублетов, выполненные для этой цели, приведены в таблице I. Новые значения масс H^1 , C^{12} и S^{32} приводятся в таблице X. Следует отметить, что новые значения вторичных стандартов расходятся со значениями, приведенными в работе ²², на величину, несколько превышающую погрешность. Несмотря на это, вычисленные по новым значениям стандартов массы атомов от железа до цинка отличаются от масс, вычисленных по стандартам работы ²², всегда на величину, меньшую погрешности. Например, значения массы атома изотопа Fe ⁵⁶, вычисленные по старым и новым стандартам, оказываются равными

$$\text{Fe}^{56} \begin{cases} 55,952\,722 \pm 4 & \text{— по старым стандартам} \\ 55,952\,725 \pm 4 & \text{— по новым стандартам} \end{cases}$$

Разность $0,000\,003 \pm 4$

Поэтому массы атомов тяжелее железа в таблице X и XI, вычисленные по старым стандартам работы ²², не перевычислялись. В таблице X массы атомов до железа включительно вычислены по новым стандартам из работы ⁷⁹. Порядок вычисления масс вторичных стандартов приведен в следующем разделе и, вкратце, в 6-м столбце таблицы X.

Последняя из опубликованных работ, выполненных в лаборатории Нира, это работа Джонсона и Бано ⁸⁰, измерявших не массы атомов, а только их разности для атомов, отличающихся по массовым числам на единицу. Измерения производились на 15-см миннесотском масс-спектрометре. Таким образом получены разности масс изотопов элементов с четными Z от 64 до 82 (т. е. от гадолиния до свинца). Результаты измере-

ний приведены в таблице I (дублеты №№ 118—149). Измерения производились для вычисления энергий связи последних нейтронов в области деформированных ядер редкоземельных элементов. Обозначим через e_n (Z, N) энергию связи нейтрона в ядре с Z протонами и N нейтронами, через

$$D(Z, N) = M(Z, N) - M(Z, N - 1) \quad (1)$$

разность масс атомов с Z протонами и с N и соответственно с $N - 1$ нейтронами, и через m_n — массу нейтрона. Тогда энергия связи нейтрона e_n выразится через разности масс $D(Z, N)$, измеренные Джонсоном и Бано, так:

$$e_n(Z, N) = m_n - D(Z, N). \quad (2)$$

Энергии связи последних нейтронов в устойчивых ядрах элементов с четным порядковым номером от гадолиния до свинца, вычисленные по измерениям Джонсона и Бано, приводятся в таблице XII.

На большом 40-сантиметровом Миннесотском масс-спектрометре Гизе и Бенсоном измерены дублеты масс для атомов изотопов от фосфора до марганца ($15 \leq Z \leq 25$). К 1 января 1958 г. эта работа не была опубликована, но рукопись была любезно прислана Гизе автору обзора. Дублеты Гизе и Бенсона приведены в таблице I настоящего обзора под №№ 150—179.

Как уже указывалось, все наиболее важные дублеты, полученные в результате новых масс-спектроскопических измерений, приведены в таблице I. В таблице I не приводятся те измерения, точность которых существенно ниже наиболее точных из известных. Например, дублеты с Ni^{60} и Ni^{58} , измеренные Истменом, Айзенором, Бейнбриджем и Дакворсом⁸¹, не приводятся, так как их погрешности в десятки раз больше, чем погрешности дублетов Квизенберри, Скольмана и Нира²⁴ для тех же изотопов, приведенные в таблице I под №№ 46 и 47.

III. ПРОТИВОРЕЧИЯ В ЗНАЧЕНИЯХ МАСС АТОМОВ

Масс-спектроскопические измерения, проведенные до 1954 г., как уже указывалось, сведены в обзоре Дакворса с сотрудниками¹⁴. Их анализ и сопоставление, проведенные как в прежних обзорах^{2, 3}, так и в обсужденных выше обзорных работах^{7, 8, 15, 17}, привело к выводу, что существуют противоречия в измерениях масс по ядерным реакциям и по масс-спектроскопическим данным и что эти противоречия особенно велики и значительно превосходят погрешности измерений для атомов изотопов C^{12} , S^{32} , Ni^{64} и др. Это привело к тому, что оба новых масс-спектроскопических прибора в первую очередь были использованы для устранения этих противоречий. Наиболее сильным и наиболее важным расхождением было несоответствие в измерениях массы C^{12} . Так как наиболее удобными ионами для сравнения с массами средних и тяжелых элементов являются ионы молекул типа C_n^+H_m^+ и др. ионы, содержащие атомы C^{12} , то знание точного значения массы атома изотопа C^{12} является залогом успеха для многих других измерений.

В таблице II приведены значения масс атомов изотопов H^1 , D^2 и C^{12} , полученные вычислением из ядерных реакций по работам^{7, 15} и др. и из масс-спектроскопических данных, в том числе и из дублетов таблицы I.

Сравнение цифровых данных разных авторов показывает, что массы атомов изотопов H^1 и D^2 падают в хорошем согласии, независимо от того, из каких экспериментальных данных они вычислены. Иначе дело обстоит с изотопом C^{12} , у которого масса, полученная из ядерных реакций, всегда меньше, чем измеренная спектроскопически. При этом расхождения даже возрастают с уменьшением погрешностей измерений (например, в таблице II строчки 5, 6, 7, 11, 13, 14 и 15). Больше всего отличаются от

масс C^{12} , полученных из ядерных реакций, данные, представленные на строках 2 и 5 таблицы II (взяты в скобки). Как показал Гизе³⁵, это вызвано систематической ошибкой, происходящей при измерении дублета C_4-SO за счет примеси ионов с массой, близкой к массе иона C_4 , вследствие чего линия C_4 расширяется. Эта примесь образуется из метил-меркаптана (CH_3SH), имеющегося в бутadiensовом источнике ионов C_4 . Но если исключить значения массы C^{12} , представленные под номерами 2 и 5, все же останутся две группы значений масс C^{12} : это значения из реакций и значения из масс-спектроскопических данных. Внутри каждой из групп измерения расходятся на величины, не превосходящие погрешностей, но средние для каждой группы различны, и разность превосходит погрешность в несколько раз.

Измерения массы C^{12} в течение последних лет приводили всегда к одним и тем же результатам (если отбросить по указанным выше причинам строки 2 и 5 из таблицы II), несмотря на то, что они проводились на приборах разной конструкции в разных лабораториях различных стран (США, ФРГ, Япония и СССР). Самые точные измерения, сделанные группой Нира на большом приборе, описанном выше, дали возможность вычислить массу C^{12} пятью независимыми путями, причем были использованы 12 измерений дублетов (табл. I). Все эти пять значений массы атома C^{12} имеют небольшие расхождения между собой, и их отличие от среднего, приведенного в таблице II под номером 15, невелико. Таким образом все 7 масс-спектроскопических измерений массы C^{12} (кроме забракованных и взятых в скобки) сходятся очень хорошо.

Для уяснения причин расхождений между масс-спектроскопическими данными и массами по данным о реакциях в работе²³ проведено сравнение масс атомов, полученных обоими способами. Сравнение производилось для атомов с массовыми числами A в промежутке $10 \leq A \leq 32$.

Из дублетов 1—40 (табл. I) с помощью масс вторичных стандартов (приведенных в строке 15 табл. II) были вычислены массы легких атомов, приведенные в таблице X (с их погрешностями). Из масс, вычисленных только на основании данных о ядерных реакциях, наибольшее доверие заслуживают значения масс легких атомов, уравновешенные Вапстра⁷. Поэтому сравнения производятся с ними. Результаты сравнения лучше всего видны на графике рис. 1. По вертикальной оси откладывается разность Δ масс из обзора Вапстра (M_W) и масс, измеренных группой Нира (M_N)

$$\Delta = M_W - M_N.$$

По горизонтальной оси — массовые числа A . Заштрихованная область представляет погрешности последних масс-спектроскопических данных группы Нира^{22, 23}, приведенных в таблице X. Удовлетворительное согласие

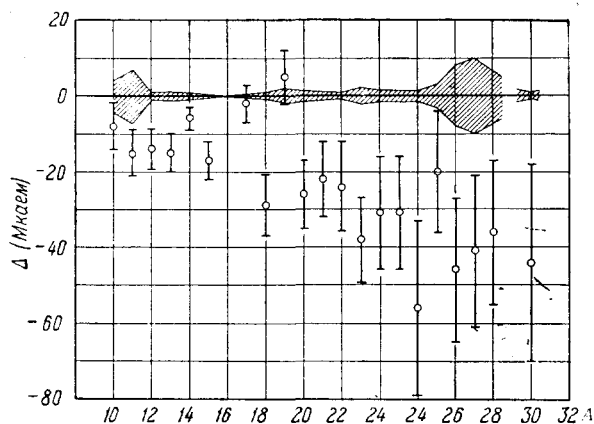


Рис. 1. Разность Δ между новыми масс-спектроскопическими массами M_N и массами Вапстра M_W , вычисленными из энергий реакции, $\Delta = M_W - M_N$ как функции массового числа A . Отрезки представляют погрешности масс Вапстра. Заштрихованная область представляет погрешность масс-спектроскопических масс.

обеих групп масс можно видеть лишь для B^{10} , O^{17} и F^{19} . При этом все остальные массы M_W лежат ниже M_N .

Первая попытка привести массы в согласие заключалась в уменьшении массы вторичного стандарта C^{12} на 14 *мкэв*, что приводит к увеличению расхождения масс O^{18} и Ne^{21} и создает расходящиеся данные для F^{19} и Ne^{20} . Но самое главное то, что это приводит к уничтожению прекрасного согласия масс H^1 и D^2 , которое демонстрировалось в таблице II, и не улучшает больших разногласий для S^{32} .

Вторая попытка согласования данных состояла в пропорциональном уменьшении всех масс-спектрометрических значений на 0,17% с тем, чтобы согласовать массы S^{32} . Подобная попытка частично оправдывается пред-

положением о неточной калибровке сопротивлений. Но это тоже не приводит к удовлетворительному результату, так как тогда возникают расхождения у O^{18} , F^{19} , Ne^{20} и в особенности у H^1 и D^2 ; в значениях же H^1 и D^2 , как мы видели, уверенность очень велика.

Третья попытка увязки данных была предпринята путем новой проверки согласованности значений Q — энергий ядерных реакций. При этом использовались Q , приведенные в работе Ванстра⁷. Из циклов, по которым Ванстра сверял реакции, были выбраны три замкнутых цикла, в которых расхождение хотя и незначи-

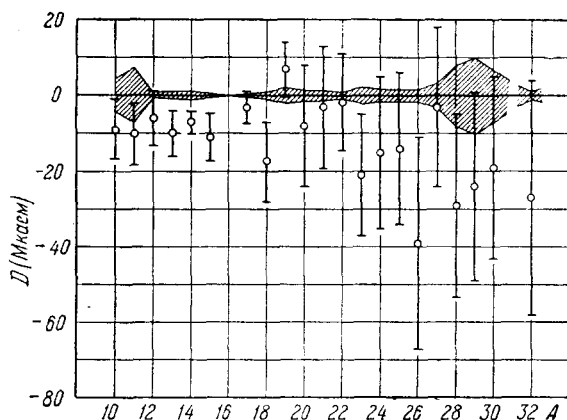


Рис. 2. Разность D между новыми масс-спектрометрическими массами M_N и массами M_Q , перевычисленными из энергий реакций, $D = M_Q - M_N$ как функция массового числа A . Обозначения те же, что и на рис. 1.

тельно, но все же превышало погрешность. Анализ этих циклов с привлечением для сравнения масс-спектрометрических данных показывает, что Q для реакций $O^{18}(p, \alpha) N^{15}$, $F^{19}(d, \alpha) O^{17}$ и $Ne^{21}(d, \alpha) F^{19}$, по-видимому, ошибочны и их не следует включать в расчеты. Это подтверждается и другими более длинными циклами. Дополнительно три более новых значения Q для реакций $O^{17}(d, p) O^{18}$, $F^{19}(\alpha, p) Ne^{22}$ и $Ne^{21}(d, p) Ne^{22}$, не использованные Ванстра, оказались совместными с остальными экспериментальными данными и были включены в расчеты.

В дальнейшем были перевычислены массы атомов в рассматриваемом интервале из Q для ядерных реакций, без применения трех забракованных Q и с добавлением трех новых совместных Q , причем масс-спектрометрические данные не использовались. Расчет велся упрощенно, без решения нормальных уравнений по способу наименьших квадратов. Увязка производилась путем распределения невязки по звеньям обратно пропорционально весам звеньев, по всем возможным замкнутым циклам. В результате были получены новые значения масс атомов в интервале $10 \leq A \leq 32$, вычисленные только из энергий Q ядерных реакций. Значение массы для C^{12} приведено в табл. II под № 16.

Сравнение новых значений масс, вычисленных по Q , представлено на рис. 2. По вертикальной оси отложены разности $D = M_Q - M_N$; по горизонтальной оси — массовые числа A . Погрешности изображены так же, как и на рис. 1. Рассмотрение рис. 2 показывает, что согласие между M_Q

и M_N теперь вполне удовлетворительное. Некоторые величины, например масса O^{18} и др., расходятся все же больше, чем на сумму погрешностей. В отношении O^{18} может быть предпринято сравнение с данными микроволновой спектроскопии. Данные для отношения разностей $(O^{17}-O^{16})/(O^{18}-O^{16})$ из обзора Гешвинда с сотрудниками ¹² лучше соответствуют масс-спектрометрическим измерениям, чем массам, вычисленным из Q , что повышает вес масс-спектрометрических данных.

Следует отметить, что в расчетах Ванстра для массы B^{10} найдена ошибка, что могло бы повести к изменению масс H^1 и D^2 , так как их вычисление проводится через B^{10} . Но это не так, что видно из независимых расчетов по энергиям ядерных реакций Маттауха и Вальдмана с сотрудниками ¹⁵, где масса B^{10} правильная, а вычисленные ими массы H^1 и D^2 в пределах погрешностей сходятся со всеми остальными (см. табл. II, № 12). Следовательно, пересчеты массы C^{12} , проведенные способом, описанным выше, не расстраивают согласия в массах H^1 и D^2 .

Выводы, аналогичные выводам Скольмана, Квизенберри и Нира в ²³, сделаны и Маттаухом в ⁸³. Для сближения значений масс легких атомов, вычисленных из энергий Q ядерных реакций и измеренных масс-спектроскопически, Маттаух сделал попытку исправить некоторое небольшое число энергий Q ядерных реакций. Были исправлены на ΔQ энергии 7 реакций из всех 196 реакций, использованных при расчете масс легких атомов, проделанном Маттаухом с сотрудниками в ¹⁶:

Реакция	Поправка (кэв)	Погрешность (кэв)
1. $D^2(\gamma, n)H^1$	+4	± 2
2. $B^{10}(\alpha, d)C^{12}$	-60	± 10
3. $C^{13}(d, p)C^{14}$	+10	± 4
4. $O^{16}(d, \alpha)N^{14}$	-7,5	$\pm 2,5$
5. $Ne^{21}(d, \alpha)F^{19}$	+50	± 10
6. $Mg^{25}(d, \alpha)Na^{23}$	+30	± 13
7. $Mg^{27}(3^-)Al^{27}$	+40	± 7

Массы легких атомов, вычисленные из всех реакций при изменении энергий этих 7 реакций, в пределах погрешностей прекрасно совпадают с массами, измеренными масс-спектроскопически Квизенберри, Скольманом, Ниром и Смитом (расхождения, незначительно превышающие погрешности, есть лишь у He^4 и O^{18}). Поправки, сделанные Маттаухом, хотя в отдельных случаях и превышают погрешность в 5—6 раз, в среднем все же невелики и нет ничего невозможного, что при измерении энергий реакций могли оказаться неучтенными подобные систематические ошибки. Поэтому этот расчет Маттауха показывает, что причиной расхождения значений масс легких атомов, вычисленных по энергиям реакций, и значений тех же масс, измеренных масс-спектроскопически, могут быть отдельные систематические ошибки в измерениях энергий реакций.

Новые расчеты масс по Q для реакции, проделанные Ли-Чжен-у ¹⁷ и приведенные под номером 17 в таблице II, хотя и расходятся с масс-спектрометрическими массами для C^{12} , но уже меньше, чем предыдущие № 9 и № 12, полученные аналогично из Q .

Новые значения вторичных стандартов, измеренные Квизенберри, Гизе и Бенсоном ⁷⁹ на 40-см масс-спектрометре, после его улучшения получены следующим образом: масса атома изотопа C^{12} вычислена только из дублета 117 (табл. I), так как этот дублет непосредственно связывает C^{12} с O^{16} . Этот дублет был измерен в 32 сериях измерений и в течение целого года результаты измерений не менялись. Среднее из значений массы C^{12} , вычисленное из многочисленных других дублетов, расходится

с этим непосредственным измерением на величину, меньшую погрешности. Масса атома изотопа H^1 вычислена из дублета 114, являющегося средним из дублетов 10, 111, 112 и 113, измеренных при различных значениях A , поэтому надежность значения разности масс дублета 114 очень велика. Значение массы атома изотопа S^{32} получено из дублетов 2, 115 и 4.

Новые средние значения масс вторичных стандартов по Квисенберри, Гизе и Бенсону ⁷⁹ оказываются равными

$$H^1 - 1,0081451 \pm 2,$$

$$C^{12} - 12,0038156 \pm 4,$$

$$S^{32} - 31,9822388 \pm 9.$$

Сравнивая значения, например, массы C^{12} , вычисленной по последним значениям энергий ядерных реакций Ли-Чжен-у ¹⁷ и массы C^{12} по ⁷⁹ (см. табл. II, строки 17 и 19), мы видим, что разность их $-8,6 \pm 5,0$ мкаем стала значительно меньше.

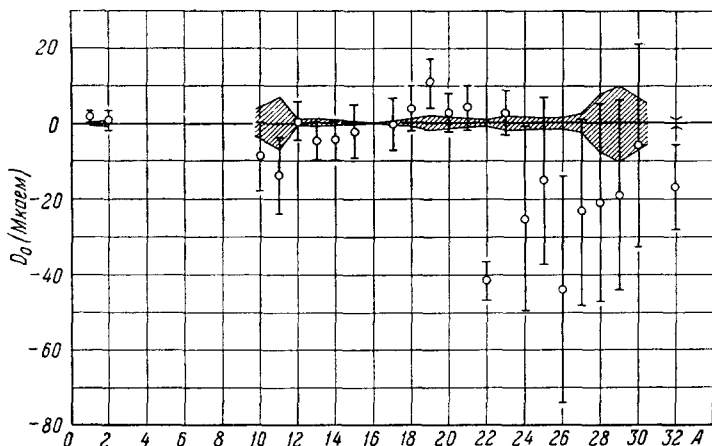


Рис. 3. Разность D_0 между массами M_{D3} , вычисленными в работе Джелепова и Зыряновой², и новыми масс-спектрометрическими массами M_N , $D_0 = M_{D3} - M_N$ как функция массового числа A . Отрезки представляют погрешности масс Джелепова и Зыряновой. Заштрихованная область представляет погрешность масс-спектрометрических масс.

Следовательно, применяя более тщательный отбор энергий ядерных реакций, удалось сблизить массы, вычисленные из Q , и массы, измеренные масс-спектроскопически. Это приводит нас к заключению, что массы легких атомов, вычисленные из Q и из дублетов масс, в своем огромном большинстве находятся в хорошем согласии. Никаких противоречий принципиального характера нет, имеющиеся расхождения находятся в большинстве случаев в пределах погрешностей. Безусловно, дальнейшие тщательные измерения энергий ядерных реакций и дублетов масс будут уменьшать эти расхождения.

Наиболее обоснованным расчетом масс легких ядер является одновременное использование экспериментальных данных как масс-спектроскопических, так и энергий реакции. Такой расчет был проделан Джелеповым и Зыряновой², и результаты его имеет смысл сравнить с новыми более точными значениями масс из табл. X. На рис. 3 по верти-

кальной оси отложены разности масс атомов из таблицы ² ($M_{\text{дз}}$) и масс M_N

$$D_0 = M_{\text{дз}} - M_N.$$

График показывает, что из 23 масс только две массы F^{19} и Ne^{22} расходятся больше, чем на удвоенную погрешность. Сравнение рис. 1 и рис. 3 показывает, что значения масс из ² лучше, чем из ⁷. Таким образом, более старые данные, но использованные полностью при составлении таблиц Джелесова и Зыряновой, дали более надежные результаты, чем таблицы Вапстра ⁷, вычисленные только по энергиям реакций.

В области атомов средних масс (вокруг никеля) существовал ряд больших противоречий. Одна группа расхождений указана в двух работах Кинзи и Бартоломью ^{36, 37} и вызвана несоответствием энергий (n, γ)-реакций разностям масс. Второе существенное несогласие касается разности масс Zn^{64} — Ni^{64} и впервые было обсуждено Джелесовым, Жуковским, Приходцевой и Хольновым ³⁸, а также автором ³. Эти разности, вычисленные из масс-спектроскопических данных и из данных по β^- - и β^+ -распадам Cu^{64} , в лучшем случае расходятся на величину, превышающую погрешность в 10 раз.

Для выяснения причин этих расхождений Квизенберри с сотрудниками ²⁴ провели повторное сравнение энергий γ -лучей, полученных при (n, γ)-реакциях ^{36, 37} и новых масс-спектрометрических измерений (см. табл. III). В столбце 2 табл. III выписаны энергии связи нейтронов, вычисленные из дублетов масс таблицы I. Как показал автор ⁸⁴, энергия β^- -распада Mn^{56} , приведенная в таблице Кинга ¹⁰, неточна и ее следует считать равной $3,710 \pm 0,011 \text{ Мэв}$. Поэтому энергия связи нейтрона e_n в ядре изотопа Fe^{55} в столбце 2 взята не по ²⁴, а перевычислена вновь в соответствии с ⁸⁴. В столбце 3 приводятся энергии гамма-лучей, возникающих при радиационном захвате нейтрона. Эти энергии гамма-лучей взяты из ^{36, 37}. Гамма-лучи испускаются, по-видимому, первым из изотопов, приведенных в столбце 1. Буквы перед энергиями гамма-лучей в столбце 3 соответствуют обозначениям различных гамма-квант ^{36, 37}. Здесь же указаны новые истолкования (n, γ)-реакций, приведенные в работах ^{39, 40} и ⁴² по масс-спектрометрическим данным Джонсона и Нира ²⁵. Разности масс переведены в Мэв , исходя из равенства

$$1 \text{ аеи} = 931,441 \text{ Мэв},$$

что следует из последних таблиц постоянных, вычисленных Когеном с сотрудниками ⁴³. Следует отметить, что в соответствии с новыми масс-спектрометрическими данными, Квизенберри с сотрудниками и Джонсон и Нир предложили изменить значения энергий реакций $\text{Ni}^{60}(n, \gamma)\text{Ni}^{61}$, $\text{Cu}^{65}(n, \gamma)\text{Cu}^{66}$, $\text{Zn}^{67}(n, \gamma)\text{Zn}^{68}$ и $\text{Ba}^{137}(n, \gamma)\text{Ba}^{138}$ и др., предложенные в ^{36, 37, 39}.

При этом были использованы другие группы γ -лучей из тех же работ, а также энергии возбужденных уровней. Согласие масс-спектрометрических данных с данными (n, γ)-реакций получилось значительно лучше, чем было раньше, хотя некоторые неясности и остались (например, в разностях масс Fe^{58} — Fe^{57} и Fe^{59} — Fe^{57} и др.) и чем они вызваны—ошибками ли в измерениях энергий γ -лучей, неясностями ли в схемах уровней ядер, погрешностями ли в измерениях энергий реакций и распадов или ошибками в измерениях дублетов масс—пока установить трудно. Бесспорно лишь одно: число разногласий уменьшилось и согласие масс-спектрометрических измерений с данными (n, γ)-реакций значительно улучшилось.

В таблице IV дано сравнение масс-спектрометрических значений разностей масс с теми же разностями масс, вычисленными из энергий ядерных реакций и из энергий β^- -распадов. Как следует из таблицы IV, в основном расхождения удовлетворительны, и чрезмерно больших раз-

погласий нет. Если обратить внимание на разность масс $Zn^{64}-Ni^{64}$, помещенную в таблице IV, то расхождение этой разности, вычисленной из Q для β -распадов Cu^{64} и масс-спектрометрическим ее значением стало меньше, но превосходит погрешность в 8 раз. Авторы указывают, что чистый ионный пучок никеля, свободный от примеси цинка, получить почти невозможно. Распространенность $Ni^{64}-1,16\%$, а $Zn^{64}-48,89\%$; поэтому малая примесь к никелю естественной смеси изотопов цинка существенно влияет на соотношение изобаров $A=64$. Это особенно ухудшает результаты измерения массы Ni^{64} , так как пик для этой массы мал. По-видимому, примесь цинка расширила пик для Ni^{64} и тем самым уменьшила разность масс $Zn^{64}-Ni^{64}$. Масса Zn^{64} измерена по двум дублетам (см. № 3 в табл. I), причем массы, вычисленные из одного и другого дублетов, различаются всего на 2 *мкэ*. Таким образом, масса Zn^{64} вполне надежна, и, по-видимому, следует отказаться от масс-спектрометрического значения массы Ni^{64} , заменив его вычисленным значением из надежной массы Zn^{64} , с помощью разностей энергий β^+ - и β^- -распадов Cu^{64} . Такое значение массы $Ni^{64}=63,948\,285\pm 4$ значительно лучше согласуется и с другими ядерными реакциями; именно в таблице IV под №№ 8, 9 и 11, в этом случае в последнем столбце для Δ будут стоять соответственно -6 ± 11 ; 0; -30 ± 30 ; -2 ± 110 и 32 ± 30 , т. е. согласие здесь станет очень хорошим. Получить правильное значение массы атома изотопа Ni^{64} , по-видимому, удастся на масс-спектрометре только при использовании никеля, обогащенного изотопом Ni^{64} .

Все это приводит нас к выводу, что новые точные масс-спектрометрические измерения в области от железа до цинка включительно почти полностью ликвидировали существовавшие ранее противоречия в этой области и позволяют считать новые массы верными в пределах их погрешностей.

Аналогичные таблицы сравнения, имеющиеся в ²⁵ и ⁸⁰ и не приводимые здесь, показывают, что новые измерения масс и разностей масс изотопов редкоземельных и тяжелых элементов удовлетворительно согласуются с данными ядерных реакций и распадов.

Для контроля измерений масс атомов изотопов от фосфора до марганца, сделанных Гизе и Бенсоном ⁸⁸, было проделано сравнение разностей масс с энергиями ядерных реакций. Сравнение показало, что согласие данных удовлетворительное.

IV. НОВЫЕ ВЫВОДЫ ИЗ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Квизенберри с сотрудниками ²⁴ и Джонсон с сотрудниками ^{25, 80} провели вычисление энергий связи нуклонов в ядрах и энергий связи последних нейтронов и последних протонов в ядрах атомов от железа до цинка и в ядрах атомов тяжелых элементов. Для этих целей были вычислены из масс атомов устойчивых изотопов массы атомов радиоактивных изотопов. При этих вычислениях были использованы энергии бета-распадов из обзора Кинга ¹⁰ и энергии реакции из обзора ван Паттера и Валинга ¹¹. Кроме этого были использованы новые энергии реакций, не вошедшие в обзор ¹¹ и представленные в таблице V, новые энергии бета-распадов, не вошедшие в обзор ¹⁰ и представленные в таблице VI, а также данные таблицы VII. Энергия связи нуклонов в ядре равна сумме масс протонов и нейтронов, образующих ядро, минус масса ядра. При вычислении было принято, что разность масс нейтрона и атома водорода, в соответствии с Ванстра ⁷,

$$M_n - M_H = 783,0 \pm 0,9 \text{ кэв},$$

что следует из значений Q для ядерных реакций.

Энергия связи последних нейтронов и последних протонов вычислялась по формуле

$$e_n = E(Z, N) - E(Z, N - 1),$$

$$e_p = E(Z, N) - E(Z - 1, N),$$

где $E(Z, N)$ — энергия связи нуклонов в ядре, содержащем Z протонов и N нейтронов.

В таблице VIII приведены удельные энергии связи, т. е. энергия связи на один нуклон E_A/A для всех устойчивых ядер области с массовыми числами A от 54 до 70. На рис. 4 представлен график зависимости E_A/A от числа нуклонов A . Таблица VIII и рис. 4 представляют особый интерес, так как в этой области функция $E_A/A = f(A)$ имеет максимум. Как уже указывалось ранее автором⁶⁶ и другими, этот максимум приходится на $A=62$ и соответствует значению удельной энергии связи у ядра Ni^{62} . Новые данные не изменили положения этого максимума.

Ход изменения энергии связи последних нейтронов и последних протонов в ядре такой же, какой был указан ранее автором⁶⁶. Новые и более точные данные не внесли изменений в закономерности изменения этих энергий.

Ход изменения энергий связи последних нейтронов и последних пар нейтронов в области редких земель из таблицы XI показывает наличие оболочки из 82 нейтронов. Некоторые колебания энергий связи при других числах нейтронов того же порядка, что и величины погрешностей, и поэтому не заслуживают внимания.

Большой интерес представляют изменения энергий образования пар нуклонов или энергия спаривания. Энергия образования пары нейтронов Δ_n есть разность энергии связи последнего четного (N -го) нейтрона $e_n(N)$ и энергии связи предыдущего нечетного нейтрона $e_n(N-1)$.

$$\Delta_n = e_n(N) - e_n(N - 1).$$

Аналогично энергия образования пары протонов Δ_p равна

$$\Delta_p = e_p(Z) - e_p'(Z - 1),$$

где Z — четное число, а e_p — энергия связи последнего протона.

Энергии спаривания нейтронов Δ_n и протонов Δ_p представлены графически как функции числа нейтронов N рис. 5 и рис. 6. Для того, чтобы связать энергию спаривания с моментами количества движения ядер, на рис. 5 сверху даны наименования уровней, которые занимают пары нейтронов в этих ядрах. Эти наименования уровней даны в соответствии с моделью Майер и с экспериментально установленными значениями спинов. По утверждениям Майер и Йенсена⁶⁷, энергия спаривания должна возрастать с увеличением общего момента количества движения

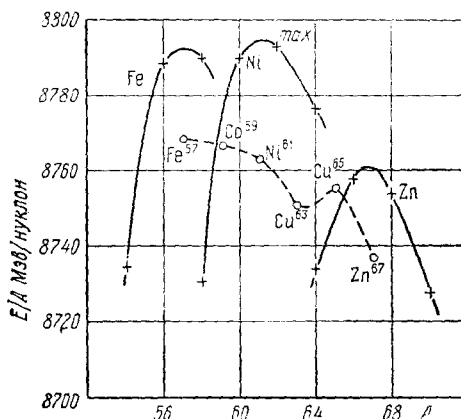


Рис. 4. Средние удельные энергии связи на один нуклон E_A/A как функция от массового числа A в интервале массовых чисел от 54 до 70. Значение средних удельных энергий связи на нуклон взяты из таблицы VIII. Сплошной кривой соединены значения E_A/A для четно-четных ядер изотопов одного элемента. Пунктирная ломаная соединяет значения для изотопов с нечетными массовыми числами A .

спариваемых нуклонов. Автор показал ⁶⁶ из анализа более грубых экспериментальных данных, что это утверждение не всегда соответствует действительности. Как видно из более точных данных (рис. 5), мы имеем

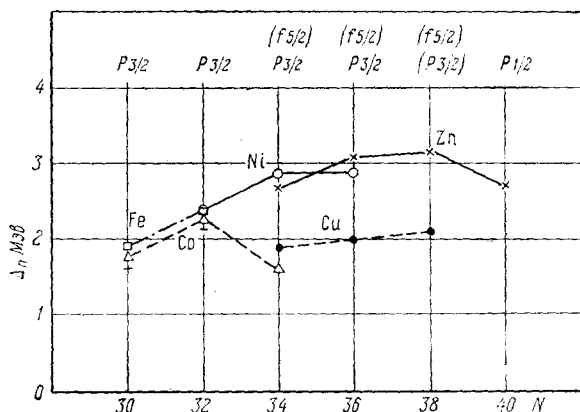


Рис. 5. Энергия спаривания последней пары нейтронов Δ_n в ядрах атомов изотопов от железа до цинка как функция от числа нейтронов N . Сверху приведены характеристики уровней, которые занимают пары нейтронов. Характеристики уровней нейтронов представлены в соответствии с моделью ядерных оболочек с сильной спин-орбитальной связью.

ряда примеров, которые не соответствуют утверждениям Майер и Йенсена. Например, у железа обе пары нейтронов находятся на одинаковых уровнях, а энергия спаривания для $N=32$ больше, чем для $N=30$. В случае цинка первая пара ($N=34$) находится на уровне $p_{3/2}$ или $f_{5/2}$, а последняя пара ($N=40$) занимает уровень $p_{1/2}$. Несмотря на разные спины, энергии спаривания у них практически одинаковые. На рис. 6, где представлены энергии спаривания протонов, мы имеем тоже данные, которые противоречат утверждениям Майер и Йенсена. Именно, для четного числа нейтронов у цинка и никеля энергии спаривания протонов практически одинаковы, хотя протоны никеля находятся на уровне $f_{7/2}$, а протоны цинка — на уровне $p_{3/2}$.

В отдельных случаях есть, как будто бы, изменения Δ_n (рис. 5), показывающие, что Δ_n возрастает с увеличением спина (например, при переходе от пары $N=38$ к паре $N=40$ у цинка), но в большинстве случаев эта зависимость маскируется другими эффектами. Таким образом, утверждение автора ⁶⁶ об отсутствии резко выраженной зависимости энергии образования пар нуклонов от величины спина, в основном, подтверждается более точными данными работы Кви-зенберри, Скольмана и Нира ²⁴.

Большой интерес представляет новый вывод из рис. 5 и рис. 6 относительно энергий спаривания нуклонов. По рис. 5 можно видеть, что энергия спаривания нейтронов Δ_n у Co и Cu меньше, чем энергия спаривания нейтронов Δ_n у Fe и Zn, т. е. энергия спаривания нейтронов меньше в ядрах с нечетным числом протонов. Совершенно аналогичное эмпирическое правило следует для энергии спаривания протонов Δ_p . Из рис. 6 видно, что Δ_p для ядер с нечетным числом нейтронов во всех случаях, кроме одного (Ni^{57}), меньше, чем для ядер с четным числом нейтронов. Объяснение этого нового экспериментального правила довольно просто. Всякий нечетный нейтрон в ядре с нечетным числом протонов взаимодей-

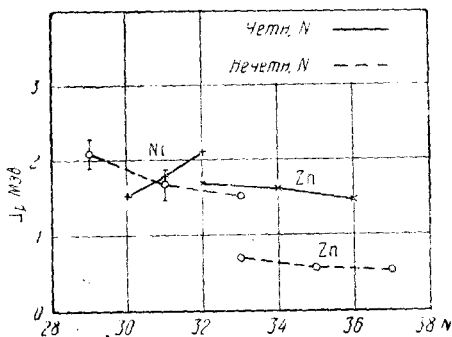


Рис. 6. Энергии спаривания последней пары протонов Δ_p в ядрах изотопов никеля и цинка как функция от числа нейтронов N .

ствуется особенно сильно с непарным протоном, что и уменьшает энергию спаривания. Таким образом это правило указывает на наличие в ядре более сильного взаимодействия между непарными нейтронами и протонами.

На рис. 7 и рис. 8 изображены зависимости энергии спаривания нейтронов Δ_n и энергии спаривания протонов Δ_p от числа нейтронов N для ядер редких земель. Погрешности для Δ_n и Δ_p значительно больше, чем на рис. 5 и рис. 6. Как видно из рис. 7, при переходе через $N=82$

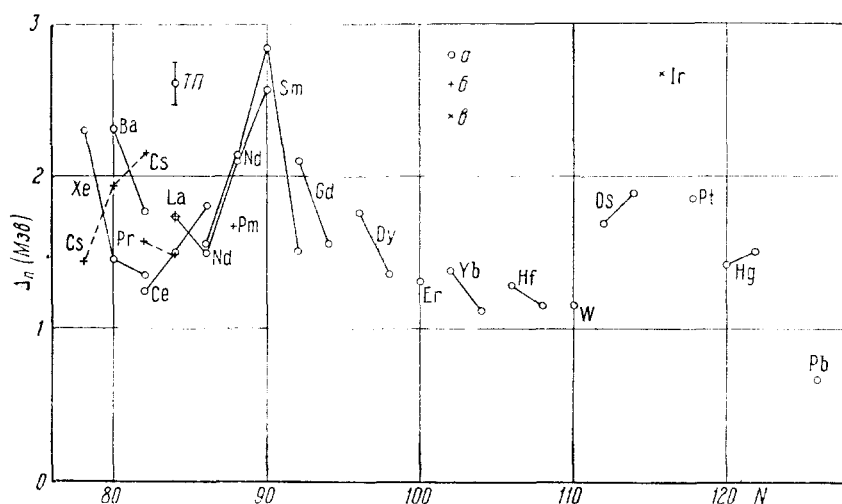


Рис. 7. Энергии спаривания последней пары нейтронов Δ_n в ядрах атомов изотопов от ксенона до свинца как функция от числа нейтронов N . «Тп» — типовая погрешность. а — ядра с четным Z , б — ядра с нечетным Z , в — Δ_n из энергий реакции.

нет заметного увеличения Δ_n , чего следовало ожидать по Майер и Йенсену из-за смены уровня $2d_{3/2}$ (при $N < 82$) на уровень $2f_{7/2}$. Следовательно, утверждение Майер и Йенсена и здесь не подтверждается.

На графиках рис. 7 и рис. 8 видно резкое увеличение энергии спаривания нейтронов и протонов при приближении к числу нейтронов $N=90$. Это следствие резкого увеличения ядерной деформации, которое наблюдается по Моттельсону и Нильсону⁶⁹ у $N=90$. Величина этого повышения энергии спаривания превосходит величины погрешностей и выражена достаточно ясно. С увеличением $N > 90$ наступает снижение энергии спаривания нейтронов, достигающее минимума около $N=110$ у Hf и W. Затем энергия спаривания вновь повышается к $N=116$, где оканчивается область деформированных ядер. Это ясно видимое на рис. 7 уменьшение энергии образования пар в области деформированных ядер теоретически объяснено в работе Бирбраира и Слива⁸⁵.

Масс-спектрометрические измерения высокой точности дают возможность установить новые закономерности взаимодействия нуклонов в ядре. Из этих закономерностей следует, что взаимодействия нуклонов в ядре не могут быть рассмотрены элементарным путем и что, по-видимому, нужны еще дополнительные данные для получения более ясной картины. Наряду с этими общими выводами из масс-спектрометрических данных могут быть сделаны и некоторые частные заключения. Некоторые из них, касающиеся столкновения групп γ -лучей при радиационном захвате нейтронов, рассматривались в разделе III и приведены в таблице III.

В области редких земель на основании масс-спектрометрических данных Джонсон и Нир²⁵ сделали некоторые заключения о энергии радиоактивных распадов. В частности, пользуясь таблицей XI, можно вычислить полную энергию альфа-распада Ce^{142} . Она равна $1,68 \pm 0,10 \text{ Мэв}$, и альфа-распад Ce^{142} , по-видимому, можно обнаружить экспериментально.

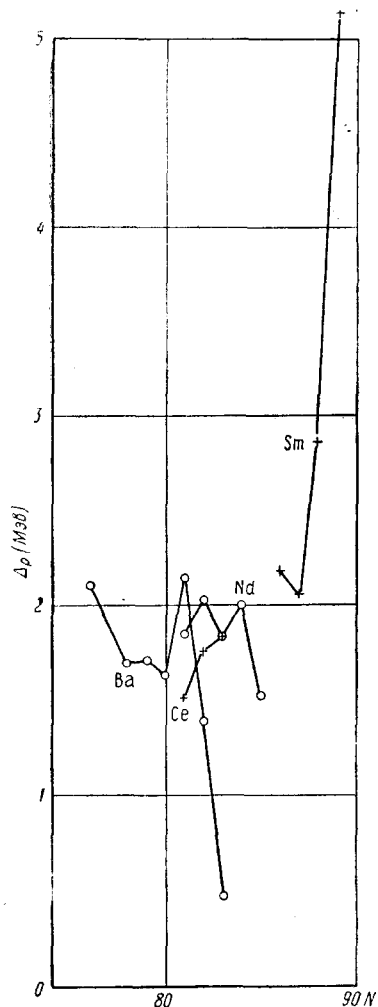


Рис. 8. Энергия спаривания последней пары протонов Δ_p в ядрах атомов изотопов бария, церия, неодима и самария как функция от числа нейтронов N .

Бета-распад и электронный захват естественного изотопа La^{138} подтверждается таблицей XI. Схема распадов La^{138} , найденная Турчинец и Прингль⁷⁰, подтверждается масс-спектрометрическими данными Джонсона и Нира²⁵.

Существовали подозрения в возможности бета-распада Nd^{150} , Джонсон и Нир²⁵ показывают, что из табл. XII разность масс $\text{Nd}^{150} - \text{Pm}^{150}$ отрицательна и равна $-1,65 \pm 0,18 \text{ Мэв}$, и, следовательно, Nd^{150} устойчив по отношению к одиночному бета-распаду. Разность масс $\text{Nd}^{150} - \text{Sm}^{150}$ равна $3,65 \pm 0,10 \text{ Мэв}$, и следовательно, двойной бета-распад Nd^{150} энергетически возможен.

Таблицы масс, прилагаемые к данному обзору, составлены на основании масс-спектроскопических измерений последних лет, результаты которых приведены в таблице I. При вычислении масс легких атомов использовались также дублет 96 Смита⁷⁵, дублеты 105, 106 Демирханова с сотрудниками⁷⁶ и энергии ядерных реакций и распадов. Энергии ядерных реакций взяты из таблиц (с дополнением) Ван-Паттера и Валинга^{11, 91} энергии бета-распадов — из таблиц Кинга¹⁰ и дополнений Лидовского⁹⁰. Энергии, измеренные или исправленные в 1955—1957 гг., были частично взяты из компиляций: «Новые ядерные данные» за 1955, 1956 и 1957 гг.⁸⁶ и в некоторых случаях из оригинальных статей.

Ввиду отсутствия согласия между массой S^{34} , вычисленной по дублету № 152 (таблица I), и массой S^{34} , вычисленной по ядерным реакциям, этот дублет исправлен по массе S^{34} из⁸⁸. Эта масса хорошо согласуется с дублетами №№ 191 и 192 и с энергиями ядерных реакций.

В столбце 6 табл. X и XI указаны номера дублетов, из которых вычислена данная масса. Например, ДМ 114 означает, что данная масса вычислена из дублета масс № 114, приведенного под этим номером в таблице I. Если масса вычислена из реакции, то указан символ изотопа, по массе которого вычислена масса данного изотопа. Например, из таблицы X следует, что масса Li^8 вычислена из массы Li^7 с помощью энергии (d, p)-реакции (в столбце 6 вид реакции не указан). Если данная масса вычислена разными путями и взято среднее, то после перечисления путей вычисления поставлено «ср». Например, в таблице X для изотопа He^4

указано в 6 столбце ДМ 96, H^2 ср. что означает, что масса He^4 есть среднее из массы, вычисленной по дублету массы № 96 и массы, вычисленной по энергии реакции из массы H^2 (дейтерия). Таблица XI содержит массы и энергии связи, полученные Джонсоном и Ниром ²⁵ с добавлением столбца 6, объясняющего порядок расчета масс. В таблице XI в столбце 6, если масса рассчитана по энергии реакции или распада, стоит буква «Р».

Таблица X составлена по стандартам работы Квизенберри, Гизе и Бенсона ⁷⁹ до изотопов железа включительно.

Массы атомов изотопов от железа до цинка взяты по ²⁴ и вычислены по стандартам из ²². Таблица XI составлена по стандартам Квизенберри, Скольмана и Нира ²² и не перевычислялась по новым стандартам, так как это не имело смысла делать, как указано в разделе II.

Таблица I

Наиболее точные дублиеты масс, измеренные в последние годы

№№ п.п.	Дублет	Разность масс в м.е.м.	Ссылка
1	C_4-SO	$33,0269 \pm 13$	22
2	O_2-S (см. 115)	$17,7599 \pm 9$	то же
3а	$O_2 - \frac{1}{2} Zn^{64}$	$25,2633 \pm 26$	
3б	$SO_2 - Zn^{64}$	$17,758 \pm 6$	» »
4	$\frac{1}{2} C_4H_4O - H_2S$	$32,7687 \pm 32$	
5	$\frac{1}{2} C_4H_4O - O^{16}O^{18}$	$25,3926 \pm 9$	» »
6	$H_2O - O^{18}$	$19,0367 \pm 8$	» »
7	$D_2O - H_2O^{18}$	$11,4033 \pm 21$	» »
8	$C_3 - A^{36}$	$8,3102 \pm 4$	» »
9	$H_2O - \frac{1}{2} A^{36}$	$32,4729 \pm 20$	» »
10	$CH_4 - O$ (см. 114)	$26,7937 \pm 6$	» »
11	$H_2 - D$	$36,3933 \pm 5$	» »
12	$C_3H_4 - A^{40}$ (см. 116)	$1,5477 \pm 4$	» »
13	$D_2O - \frac{1}{2} A^{40}$	$68,9344 \pm 13$	» »
14	$B^{10}(F^{19})_2 - SO$	$41,9390 \pm 13$	
15	$C_4H_4O - B^{11}(F^{19})_3$	$42,7730 \pm 17$	23
16	$C^{13}H_4 - OH$	$21,7052 \pm 13$	то же
17	$CH_2 - N^{14}$	$31,9253 \pm 7$	» »
18	$CH_4 - N^{14}H_3$	$12,5803 \pm 4$	» »
19	$C_2H_4 - (N^{14})_2$	$12,5804 \pm 5$	» »
20	$N^{14}H_2 - O$	$25,1585 \pm 6$	» »
21	$N^{14}H_3 - OH$	$23,8164 \pm 5$	» »
22	$(N^{14})_2 - CO$	$23,8159 \pm 6$	» »
23	$N^{15}H_3 - H_2O$	$11,2355 \pm 6$	» »
24	$CH_3 - N^{15}$	$13,0234 \pm 4$	» »
25	$OH - O^{17}$	$23,3652 \pm 9$	» »
26	$D_2O - HF^{19}$	$3,6077 \pm 5$	» »
27	$HDO - F^{19}$	$16,8944 \pm 5$	» »
28	$C_5H_9 - C(F^{19})_3$	$18,4380 \pm 14$	» »
29	$D_2O - Ne^{20}$	$75,2462 \pm 20$	» »
30	$H_2O^{18} - Ne^{20}$	$30,6872 \pm 7$	» »
31	$HDO^{18} - Ne^{21}$	$22,3770 \pm 6$	» »
32	$\frac{1}{2} CO_2 - Ne^{22}$	$27,2482 \pm 7$	» »
		$3,5307 \pm 6$	» »

Продолжение табл. I

№№ п.п.	Дублет	Разность масс в а.е.м.	Ссылка
33	$\frac{1}{2} \text{COO}^{18}-\text{Na}^{23}$	$7,2592 \pm 02$	23
34	$\text{C}_2-\text{Mg}^{24}$	$14,9621 \pm 11$	то же
35	$\text{C}_2\text{H}-\text{Mg}^{25}$	$21,9944 \pm 10$	» »
36	$\text{C}_2\text{H}_2-\text{Mg}^{26}$	$33,0676 \pm 10$	» »
37	$\text{C}_2\text{H}_3-\text{Al}^{26}$	$41,9548 \pm 23$	» »
38	$\text{C}_6\text{H}_{13}-\text{Si}^{28}(\text{F}^{19})_3$	$129,625 \pm 4$	» »
39	$\text{C}_6\text{H}_{14}-\text{Si}^{29}(\text{F}^{19})_3$	$137,889 \pm 7$	» »
40	$\text{C}_4\text{H}_7\text{O}_2-\text{Si}^{39}(\text{F}^{19})_3$	$75,6590 \pm 36$	» »
41	$\text{C}_4\text{H}_6-\text{Fe}^{54}$	$107,374 \pm 4$	24
42	$\text{C}_4\text{H}_8-\text{Fe}^{56}$	$127,698 \pm 4$	то же
43	$\text{C}_4\text{H}_9-\text{Fe}^{57}$	$135,055 \pm 7$	» »
44	$\text{C}_4\text{H}_{10}-\text{Fe}^{58}$	$144,977 \pm 4$	» »
45	$\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2-\text{Co}^{59}$	$80,1466 \pm 23$	» »
46	$\text{C}_4\text{H}_{10}-\text{Ni}^{58}$	$142,941 \pm 7$	» »
47	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2-\text{Ni}^{60}$	$90,387 \pm 6$	» »
48	$\text{C}_2\text{H}_5\text{O}_2-\text{Ni}^{61}$	$97,894 \pm 5$	» »
49	$\text{C}_5\text{H}_2-\text{Ni}^{62}$	$87,339 \pm 6$	» »
50	$\text{O}_2-\text{Ni}^{64}$	$33,901 \pm 5$	» »
51	$\text{C}_5\text{H}_3-\text{Cu}^{63}$	$93,909 \pm 7$	» »
52	$\text{C}_5\text{H}_5-\text{Cu}^{65}$	$111,377 \pm 4$	» »
53	$\text{C}_5\text{H}_6-\text{Zn}^{66}$	$120,935 \pm 6$	» »
54	$\text{C}_5\text{H}_7-\text{Zn}^{67}$	$127,675 \pm 7$	» »
55	$\text{C}_5\text{H}_8-\text{Zn}^{68}$	$137,781 \pm 4$	» »
56	$\text{C}_5\text{H}_{10}-\text{Zn}^{70}$	$152,953 \pm 6$	» »
57	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_3-\text{Xe}^{130}$	$159,53 \pm 3$	25
58	$\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_3-\text{Ba}^{130}$	$156,24 \pm 20$	то же
59	$\text{C}_{10}\text{H}_{11}-\text{Xe}^{131}$	$181,05 \pm 4$	» »
60	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}-\text{Xe}^{132}$	$189,79 \pm 5$	» »
61	$\text{C}_{10}\text{H}_{12}-\text{Ba}^{132}$	$188,84 \pm 12$	» »
62	$\text{C}_{10}\text{H}_{13}-\text{Cs}^{133}$	$196,66 \pm 7$	» »
63	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}-\text{Xe}^{134}$	$204,20 \pm 5$	» »
64	$\text{C}_{10}\text{H}_{14}-\text{Ba}^{134}$	$205,36 \pm 8$	» »
65	$\text{C}^{13}\text{C}_9\text{H}_{14}-\text{Ba}^{135}$	$207,40 \pm 10$	» »
66	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}-\text{Xe}^{136}$	$218,055 \pm 25$	» »
67	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}-\text{Ba}^{136}$	$220,89 \pm 9$	» »
68	$\text{C}_{10}\text{H}_{16}-\text{Ce}^{136}$	$218,19 \pm 20$	» »
69	$\text{C}^{13}\text{C}_9\text{H}_{16}-\text{Ba}^{137}$	$223,08 \pm 6$	» »
70	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}-\text{Ba}^{138}$	$236,03 \pm 8$	» »
71	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}-\text{La}^{138}$	$234,17 \pm 20$	» »
72	$\text{C}_{10}\text{H}_{18}-\text{Ce}^{138}$	$234,89 \pm 20$	» »
73	$\text{C}^{13}\text{C}_9\text{H}_{18}-\text{La}^{139}$	$238,23 \pm 6$	» »
74	$\text{C}_{10}\text{H}_{20}-\text{Ce}^{140}$	$251,29 \pm 6$	» »
75	$\text{C}_{11}\text{H}_9-\text{Pr}^{141}$	$163,00 \pm 3$	» »
76	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}-\text{Ce}^{142}$	$262,93 \pm 7$	» »
77	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}-\text{Nd}^{142}$	$264,74 \pm 3$	» »
78	$\text{C}^{13}\text{C}_{10}\text{H}_{10}-\text{Nd}^{143}$	$172,08 \pm 10$	» »
79	$\text{C}_{10}\text{H}_3\text{F}-\text{Nd}^{144}$	$127,77 \pm 7$	» »
80	$\text{C}_{10}\text{H}_5\text{F}-\text{Sm}^{144}$	$125,92 \pm 9$	» »
81	$\text{C}_{10}\text{H}_6\text{F}-\text{Nd}^{145}$	$133,33 \pm 19$	» »
82	$\text{C}_{10}\text{H}_7\text{F}-\text{Nd}^{146}$	$140,53 \pm 6$	» »
83	$\text{C}^{13}\text{C}_9\text{H}_7\text{F}-\text{Sm}^{147}$	$142,09 \pm 3$	» »
84	$\text{C}^{13}\text{C}_8\text{H}_7\text{F}-\text{Nd}^{148}$	$143,46 \pm 6$	» »
85	$\text{C}_9\text{H}_{10}\text{O}_2-\text{Nd}^{150}$	$147,30 \pm 7$	» »
86	$\text{C}_9\text{H}_{10}\text{O}_2-\text{Sm}^{150}$	$151,23 \pm 7$	» »
87	$\text{C}_{12}\text{H}_7-\text{Eu}^{151}$	$135,26 \pm 17$	» »
88	$\text{C}_{13}\text{H}_{11}-\text{Eu}^{151}\text{O}^{16}$	$171,69 \pm 19$	» »
89	$\text{C}_{12}\text{H}_8-\text{Sm}^{152}$	$143,29 \pm 13$	» »
90	$\text{C}^{13}\text{C}_{12}\text{H}_{12}-\text{Eu}^{153}\text{O}^{16}$	$181,8 \pm 4$	» »
91	$\text{C}_{12}\text{H}_{10}-\text{Sm}^{154}$	$156,37 \pm 15$	» »

Продолжение табл. I

№№ пп.	Дублет	Разность масс в масм	Ссылка
92	Sm ¹⁴⁸ —Sm ¹⁴⁷	1000,25±7	25
93	Sm ¹⁴⁹ —Sm ¹⁴⁸	1002,71±7	то же
94	Sm ¹⁵⁰ —Sm ¹⁴⁹	1000,42±7	» »
95	H ₂ —D	1,548573±35	75
96	D ₂ —He ⁴	25,61227±45	то же
97	CH ₂ —N ¹⁴	12,579959±65	» »
98	CH ₄ —O	36,39733±11	» »
99	N ₂ ¹⁴ —CO	11,23741±11	» »
100	N ¹⁴ H ₂ —O	23,8157±13	» »
101	O ₂ —S	17,76204±50	» »
102	C ₄ —SO	33,02502±66	» »
103	$\frac{1}{2}$ (C ₄ O—S ₂)	25,3962±38	» »
104	O ₂ H ₄ —C ₃	21,126±8	» »
105	H ₃ —He ³	7,454±2	76
106	HD—He ³	5,909±1,3	то же
107	H ₃ —HD	1,546±1	» »
108	Pb ²⁰⁷ —C ₁₄ H ₇ O ₂	68,894±46	78
109	Pb ²⁰⁸ —C ₁₄ H ₈ O ₂	75,950±37	то же
110	Bi ²⁰⁹ —C ₁₄ H ₁₃ N ₂	127,516±63	» »
111	C ₂ H ₄ —CO	36,3960±5	79
112	CH ₂ OH—O ₂	36,3958±12	то же
113	$\frac{1}{2}$ (C ₃ H ₈ —CO ₂)	36,3966±8	» »
114	CH ₄ —O (среднее)	36,3961±5	» »
115	O ₂ —S	17,7623±11	79
116	C ₃ H ₄ —Ar ⁴⁰	68,9346±11	то же
117	$\frac{1}{2}$ (C ₄ H ₄ O—H ₂ O ₂)	7,6312±8	» »
118	Gd ¹⁵⁵ —Gd ¹⁵⁴	1002,15±6	80
119	Gd ¹⁵⁶ —Gd ¹⁵⁵	0999,99±6	то же
120	Gd ¹⁵⁷ —Gd ¹⁵⁶	1002,20±6	» »
121	Gd ¹⁵⁸ —Gd ¹⁵⁷	1000,53±6	» »
122	Dy ¹⁶¹ —Dy ¹⁶⁰	1002,10±6	» »
123	Dy ¹⁶² —Dy ¹⁶¹	1000,21±6	» »
124	Dy ¹⁶³ —Dy ¹⁶²	1002,26±6	» »
125	Dy ¹⁶⁴ —Dy ¹⁶³	1000,80±6	» »
126	Er ¹⁶⁷ —Er ¹⁶⁶	1002,06±6	» »
127	Er ¹⁶⁸ —Er ¹⁶⁷	1000,65±6	» »
128	Yb ¹⁷¹ —Yb ¹⁷⁰	1001,88±6	» »
129	Yb ¹⁷² —Yb ¹⁷¹	1000,40±6	» »
130	Yb ¹⁷³ —Yb ¹⁷²	1002,17±6	» »
131	Yb ¹⁷⁴ —Yb ¹⁷³	1000,97±6	» »
132	Hf ¹⁷⁷ —Hf ¹⁷⁶	1002,25±6	» »
133	Hf ¹⁷⁸ —Hf ¹⁷⁷	1000,88±6	» »
134	Hf ¹⁷⁹ —Hf ¹⁷⁸	1002,36±6	» »
135	Hf ¹⁸⁰ —Hf ¹⁷⁹	1001,13±6	» »
136	W ¹⁸³ —W ¹⁸²	1002,23±6	» »
137	W ¹⁸⁴ —W ¹⁸³	1000,99±6	» »
138	Os ¹⁸⁷ —Os ¹⁸⁶	1002,14±6	» »
139	Os ¹⁸⁸ —Os ¹⁸⁷	1000,33±6	» »
140	Os ¹⁸⁹ —Os ¹⁸⁸	1002,55±6	» »
141	Os ¹⁹⁰ —Os ¹⁸⁹	1000,52±6	» »
142	Pt ¹⁹⁵ —Pt ¹⁹⁴	1002,45±6	» »
143	Pt ¹⁹⁶ —Pt ¹⁹⁵	1000,49±6	» »
144	Hg ¹⁹⁹ —Hg ¹⁹⁸	1001,82±6	» »
145	Hg ²⁰⁰ —Hg ¹⁹⁹	1000,31±6	» »
146	Hg ²⁰¹ —Hg ²⁰⁰	1002,26±6	» »

Продолжение табл. I

№№ пп.	Дублет	Разность масс в <i>маем</i>	Ссылка
147	Hg ²⁰² —Hg ²⁰¹	1000,64±6	80
148	Pb ²⁰⁷ —Pb ²⁰⁶	1001,74±6	то же
149	Pb ²⁰³ —Pb ²⁰⁷	1001,06±6	» »
150	O ₃ —P ³¹ H	8,2423±6	88
151	C ₄ H—S ³³ O	41,4602±15	то же
152	C ₄ H ₂ —S ³⁴ O	52,8891±15	» »
153	C ₄ H ₄ —S ³⁶ O	69,3175±35	» »
154	HCl ³⁵ —Ar ³⁶	9,1346±9	» »
155	C ₅ H ₁₀ —Cl ₂ ³⁵	140,5850±34	» »
156	HCl ³⁷ —Ar ³⁸	11,0001±10	» »
157	C ₂ H ₂ —Cl ₃ ³⁷	83,8692±23	» »
158	C ₃ H ₃ —K ³⁹	59,7819±15	» »
159	C ₃ H ₄ —K ⁴⁰	67,3178±21	» »
160	C ₃ H ₅ —K ⁴¹	77,3167±19	» »
161	C ₃ H ₄ —Ca ⁴⁰	68,7341±15	» »
162	C ₃ H ₆ —Ca ⁴²	88,3500±22	» »
163	C ₃ H ₇ —Ca ⁴³	96,0186±26	» »
164	CO ₂ —Ca ⁴⁴	34,3442±24	» »
165	CSH ₂ —Ca ⁴⁶	34,0462±39	» »
166	C ₄ —Ca ⁴⁸	47,4964±55	» »
167	CSH—Sc ⁴⁵	23,9873±18	» »
168	CSH ₂ —Ti ⁴⁶	35,1026±14	» »
169	CSH ₃ —Ti ⁴⁷	43,8035±30	» »
170	SO—Ti ⁴⁸	19,0476±12	» »
171	C ₄ H—Ti ⁴⁹	59,9781±15	» »
172	C ₄ H ₂ —Ti ⁵⁰	70,8839±18	» »
173	C ₄ H ₂ —V ⁵⁰	68,5076±15	» »
174	C ₄ H ₃ —V ⁵¹	79,5223±18	» »
175	C ₄ H ₂ —Cr ⁵⁰	69,6218±18	» »
176	C ₄ H ₄ —Cr ⁵²	90,8165±17	» »
177	C ₄ H ₅ —Cr ⁵³	98,5062±21	» »
178	C ₄ H ₆ —Cr ⁵⁴	108,1099±23	» »
179	C ₄ H ₇ —Mn ⁵⁵	116,7547±22	» »
180	CD ₄ —D ₂ O	33,300179±82	89
181	ND ₃ —D ₂ O	22,268793±79	то же
182	CD ₄ —ND ₃	11,031386±60	» »
183	CD ₄ —Ne ²⁰	63,98876±15	» »
184	ND ₃ —Ne ²⁰	52,95738±15	» »
185	D ₂ O—Ne ²⁰	30,68858±15	» »
186	C ₃ D ₈ —C ₄ D ₂	84,63755±35	» »
187	D ₂ O— $\frac{1}{2}$ Ar ⁴⁰	41,94037±15	» »
188	CD ₄ — $\frac{1}{2}$ Ar ⁴⁰	75,24055±14	» »
189	ND ₃ — $\frac{1}{2}$ Ar ⁴⁰	64,20916±15	» »
190	Ne ²⁰ — $\frac{1}{2}$ Ar ⁴⁰	11,25179±18	» »
191	H ₂ S—S ³⁴	19,851±10	33
192	C ₃ —H ₂ S ³⁴	16,466±10	то же

1 *маем* = милли атомная единица массы = 10^{-3} *аем*.

1 *аем* = атомная единица массы = $1/16$ массы атома изотона O¹⁶.

Буквы H, C, N, O и S везде обозначают наиболее распространенные изотопы этих элементов, т. е. H¹, C¹², N¹⁴, O¹⁶ и S³².

Таблица II

Массы атомов H^1 , D^2 и C^{12} по данным разных авторов

№№ пп.	Авторы, ссылка, год и методы	Массы атомов в а.е.м.; погрешность в м.к.а.е.м.		
		H^1	D^2	C^{12}
1	Эвальд ²⁶ (1951) МС	1,008141 ± 2	2,014732 ± 4	12,003807 ± 11
2	Нир и Робертс ^{27, 28} (1951) МС	1,008146 ± 3	2,014778 ± 8	(12,003842 ± 4)
3	Ли, Валинг с сотр. ²⁹ (1951) Р	1,008142 ± 3	2,014735 ± 6	12,003804 ± 17
4	Джеленов и Зырянова ² (1952) УЭ	1,0081460 ± 1,3	2,014741 ± 2,4	12,003817 ± 5
5	Огата и Мацуда ³⁰ (1953) МС	1,008145 ± 2	2,014741 ± 3	(12,003847а ± 6)
6	Огата и Мацуда ³⁰ (1953) МС	—	—	12,003827с ± 15
7	Маттаух и Биери ³¹ (1954) МС	1,0081459 ± 0,5	2,0147444 ± 0,9	12,0038231 ± 3,5
8	Драммонд ⁵ (1955) УЭ	1,0081440 ± 0,7	2,0147378 ± 1,2	12,0038275 ± 2,2
9	Вапстра ⁷ (1955) Р	1,0081452 ± 1,5	2,0147403 ± 2,8	12,003803 ± 5
10	Смит ³² (1955) С	1,0081444 ± 0,6	2,0147396 ± 1,3	12,0038212 ± 3,8
11	Демирханов, Гуткин с сотр. ²¹ (1956) МС	1,008142 ± 1	2,014736 ± 2	12,003820 ± 5
12	Маттаух, Вальдман с сотр. ¹⁵ (1956) Р	1,0081451 ± 1,8	2,0147386 ± 2,9	12,0038000 ± 3,9
13	Ширстед, Эвальд с сотр. ³³ (1956) МС	—	—	12,003812 ± 6
14	Кеттнер ³⁴ (1956) МС	—	—	12,003814 ± 6
15	Квизенберри, Скольман с сотр. ²² (1956) МС	1,0081442 ± 0,2	2,0147406 ± 0,6	12,0038167 ± 0,8
16	Скольман с сотр. ²³ (1956) Р	—	—	12,003811 ± 7
17	Ли Чжен-у ¹⁷ (1957) Р	1,0081440 ± 1,7	2,0147381 ± 2,9	12,003807 ± 5
18	Смит ⁸² (1957) С	1,008145395 ± 0,037	2,014742216 ± 0,044	12,00381575 ± 0,11
19	Квизенберри, Гизе, Бенсон ⁷⁹ (1957) МС	1,0081451 ± 0,2	2,0147425 ± 0,6	12,0038156 ± 0,4

Примечания:

а—масса получена из цикла с C_4 —SO; б—масса получена из цикла с Ar^{40} .

МС—массы получены из измерений дублетов на масс-спектроскопическом приборе с двойной фокусировкой.

Р—массы получены уравниванием энергий ядерных реакций.

УЭ—массы получены уравниванием энергий ядерных реакций совместно с масс-спектроскопическими данными.

С—измерения массы проведены на синхротроне.

Таблица III

Сравнение масс-спектрометрических энергий связи нейтрона и энергий гамма-лучей в (n, γ)-реакциях

Ядра	Масс-спектрометрич. энергия связи нейтрона ϵ_n в Мэв	Энергия гамма-лучей в (n, γ)-реакциях ϵ_γ в Мэв	$\Delta = \epsilon_n - \epsilon_\gamma$ в кэв
Fe ⁵⁵ —Fe ⁵⁴	9,286 \pm 14 ⁸⁴ ***)	B : 9,298 \pm 7	-12 \pm 16
Fe ⁵⁷ —Fe ⁵⁶	7,634 \pm 8	E : 7,639 \pm 4	- 5 \pm 9
Fe ⁵⁸ —Fe ⁵⁷	10,022 \pm 8	B' : 9,20 \pm 2 *) на уро- вень Fe ⁵⁸ 0,805 \pm 12	17 \pm 20
Co ⁶⁰ —Co ⁵⁹	7,498 \pm 7	9,20+0,805=10,005 \pm 20	12 \pm 9
Ni ⁵⁹ —Ni ⁵⁸	9,016 \pm 8	A : 7,486 \pm 6	19 \pm 9
Ni ⁶¹ —Ni ⁶⁰	7,773 \pm 8	A : 8,997 \pm 5	-44 \pm 11
Ni ⁶² —Ni ⁶¹	10,626 \pm 9	D : 7,817 \pm 8	
		γ -лучей с энергией более 9 Мэв не най- дено	
Ni ⁶³ —Ni ⁶²	6,825 \pm 10	H : 6,839 \pm 10	-14 \pm 14
Ni ⁶⁵ —Ni ⁶⁴	6,130 \pm 20 **)	K : 6,100 \pm 20	30 \pm 30
Cu ⁶⁴ —Cu ⁶³	7,919 \pm 9	A : 7,914 \pm 6	5 \pm 11
Cu ⁶⁶ —Cu ⁶⁵	7,057 \pm 20	D : 7,010 \pm 20	47 \pm 30
Zn ⁶⁵ —Zn ⁶⁴	7,992 \pm 6	E : 7,876 \pm 7 на уро- вень Zn ⁶⁵ 0,114 \pm 4 ⁴⁶	2 \pm 9
		7,876+0,114=7,990	
Zn ⁶⁷ —Zn ⁶⁶	7,058 \pm 10	G : 6,940 \pm 20 на уро- вень Zn ⁶⁷ 0,092 \pm 20	26 \pm 20
		6,940+0,092=7,032	
Zn ⁶⁸ —Zn ⁶⁷	10,193 \pm 9	B : 9,120 \pm 10 на уро- вень Zn ⁶⁸ 1,100 \pm 20 ⁴⁴	-27 \pm 25
		9,120+1,100=10,220	
Zn ⁶⁹ —Zn ⁶⁸	6,50 \pm 20	H : 6,490 \pm 20	10 \pm 200
Ba ¹³⁵ —Ba ¹³⁴	6,85 \pm 12	6,68 \pm 6 ³⁹	170 \pm 140
Ba ¹³⁶ —Ba ¹³⁵	9,18 \pm 12	9,23 \pm 7 ³⁹	-50 \pm 140
Ba ¹³⁷ —Ba ¹³⁶	6,99 \pm 10	7,18 \pm 6 ³⁹	-190 \pm 120
Ba ¹³⁸ —Ba ¹³⁷	8,67 \pm 10	5,74 \pm 3 на уровень Ba ¹³⁸ 2,88 ⁴¹	
		5,74+2,88=8,62	50 \pm 110
Sm ¹⁵⁰ —Sm ¹⁴⁹	7,98 \pm 20	7,89 \pm 6 ³⁹	90 \pm 200
		8,00 \pm 6 ⁴⁰	20 \pm 200
Sm ¹⁵³ —Sm ¹⁵²	6,1 \pm 4	6,6 \pm 3 ⁴²	500 \pm 500

Энергии гамма-лучей в 3 столбце взяты из работ ³⁶, ³⁷, ³⁹ там, где нет других ссылок. Возбужденные состояния ядер взяты из таблиц ⁴⁴.

*) Эта энергия получена оценкой по рис. 6 из ³⁶.

**) Масса Ni⁶⁴ вычислена из массы Zn⁶⁴ по энергиям распадов Cu⁶⁴ (см. текст).

***) Масса Fe⁵⁵ вычислена на основании исправленной энергии β -распада Mn⁵⁶ по ⁸⁴.

Таблица IV

Сравнение измеренных разностей избытков масс устойчивых изотопов с теми же избытками масс, вычисленными из значений ядерных реакций и энергии бета-распадов

№№ п.п.	Разности масс	Пути вычислений разностей	Разности избытков масс в мкем		Разности разностей в мкем
			измеренные	вычисленные	
1	$\text{Fe}^{58}-\text{Fe}^{57}-1$	$\text{Co}^{59} \text{ Ni}^{58}$	-1778 ± 8	1630 ± 350	-150 ± 350
2	$\text{Co}^{59}-\text{Fe}^{58}-1$	Co^{58}	188 ± 5	446 ± 200	-258 ± 200
		$\text{Ni}^{58}, \text{Ni}^{57}$		740 ± 300	-550 ± 300
3	$\text{Ni}^{58}-\text{Fe}^{57}-1$	$\text{Ni}^{57}, \text{Co}^{57}$	258 ± 10	650 ± 300	-390 ± 300
		$\text{Co}^{59}, \text{Fe}^{58}$		360 ± 200	-100 ± 200
4	$\text{Co}^{59}-\text{Ni}^{58}-1$	Ni^{59}	-1848 ± 7	-1836 ± 6	-12 ± 9
		$\text{Fe}^{58}, \text{Fe}^{57}$		-2120 ± 350	270 ± 350
5	$\text{Ni}^{60}-\text{Co}^{59}-1$	Co^{60}	-2096 ± 7	-2097 ± 12	1 ± 14
6	$\text{Cu}^{63}-\text{Ni}^{62}-1$	Cu^{62}	1574 ± 11	1610 ± 60	-36 ± 60
7	$\text{Cu}^{64}-\text{Cu}^{63}-1$	Cu^{64}	-135 ± 9	-129 ± 6	-6 ± 11
		Zn^{63}		-2 ± 160	-137 ± 160
8	$\text{Ni}^{64}-\text{Cu}^{63}-1$	Cu^{64}	-1268 ± 9	-1316 ± 6	48 ± 11
9	$\text{Zn}^{64}-\text{Ni}^{64}$	Cu^{64}	1133 ± 6	1187 ± 3	-54 ± 7
		$\text{Zn}^{65}-\text{Ni}^{65}$		1217 ± 30	-84 ± 30
10	$\text{Cu}^{65}-\text{Cu}^{63}-2$	Cu^{64}	-1180 ± 9	1180 ± 110	0 ± 110
		$\text{Zn}^{65}-\text{Zn}^{63}$		1043 ± 170	-137 ± 170
11	$\text{Cu}^{65}-\text{Ni}^{64}-1$	Cu^{64}	88 ± 7	144 ± 110	-56 ± 110
		Ni^{65}		174 ± 30	-86 ± 30
12	$\text{Cu}^{65}-\text{Zn}^{64}-1$	Cu^{64}	-1045 ± 6	-1045 ± 110	0 ± 110
13	$\text{Zn}^{66}-\text{Cu}^{65}-1$	Cu^{66}	-1414 ± 9	-1360 ± 30	-54 ± 30
		Zn^{65}		-1540 ± 200	126 ± 200
14	$\text{Zn}^{66}-\text{Zn}^{64}-1$	Zn^{65}	-2459 ± 8	-2530 ± 200	130 ± 200
		$\text{Cu}^{66}-\text{Cu}^{64}$		-2405 ± 110	-55 ± 110
15	$\text{Zn}^{70}-\text{Zn}^{68}-2$	Zn^{69}	1116 ± 8	1120 ± 200	-4 ± 200

Таблица V

Новые и пересмотренные энергии реакций Q ,
использованные для сравнений и для расчета масс

Реакция	Значение Q в Мэв	Ссылки
$\text{Co}^{59}(\text{d}, \text{p})\text{Co}^{60}$	$5,283 \pm 3$	⁴⁵
$\text{Ni}^{60}(\text{n}, \gamma)\text{Ni}^{61}$	$7,817 \pm 8$	Табл. III
$\text{Ni}^{62}(\text{n}, \gamma)\text{Ni}^{63}$	$6,839 \pm 10$	Табл. III
$\text{Ni}^{64}(\text{n}, \gamma)\text{Ni}^{65}$	$6,130 \pm 20$	Табл. III
$\text{Cu}^{63}(\gamma, \text{n})\text{Cu}^{62}$	$-10,800 \pm 50$	⁴⁷
$\text{Cu}^{63}(\text{d}, \text{p})\text{Cu}^{64}$	$5,66 \pm 4$	⁴⁸
$\text{Cu}^{63}(\text{p}, \text{n})\text{Zn}^{63}$	$-4,149 \pm 4$	^{49, 50}
$\text{Cu}^{65}(\gamma, \text{n})\text{Cu}^{64}$	$-9,910 \pm 110$	⁴⁷
$\text{Cu}^{65}(\text{p}, \text{n})\text{Zn}^{65}$	$-2,136 \pm 3$	^{49, 50}
$\text{Cu}^{65}(\text{n}, \gamma)\text{Cu}^{66}$	$7,010 \pm 20$	Табл. III
$\text{Zn}^{64}(\text{n}, \gamma)\text{Zn}^{65}$	$7,990 \pm 8$	Табл. III
$\text{Zn}^{66}(\text{n}, \gamma)\text{Zn}^{67}$	$7,030 \pm 20$	Табл. III
$\text{Zn}^{67}(\text{n}, \gamma)\text{Zn}^{68}$	$10,220 \pm 20$	Табл. III
$\text{Zn}^{68}(\text{n}, \gamma)\text{Zn}^{69}$	$6,490 \pm 20$	Табл. III
$\text{Zn}^{68}(\text{p}, \text{n})\text{Ga}^{68}$	$-3,694 \pm 6$	⁴⁸

Таблица VI

Новые энергии бета-распадов, использованные в расчете
масс атомов неустойчивых изотопов

Изотоп	Энергия распада в кэв	Ссылки	Изотоп	Энергия распада в кэв	Ссылки
Co^{55}	3457 ± 13	⁵¹	Co^{61}	1490 ± 20	⁴⁴
Cu^{60}	6270 ± 30	⁵²	Co^{62}	5000 ± 300	⁵³
Co^{67}	700 ± 200	⁴⁴	Zn^{62}	1697 ± 10	⁵³

Таблица VII

Новые и пересмотренные разности масс, вычисленные из реакций
и энергий распадов

Разность масс	В масс	Ссылки	Разность масс	В масс	Ссылки
$\text{Cs}^{132}-\text{Xe}^{132}$	$1,9 \pm 0,4$	⁵⁴	$\text{Ce}^{143}-\text{Pr}^{143}$	$1,550 \pm 0,004$	⁶⁰
$\text{Cs}^{136}-\text{Ba}^{136}$	$3,066 \pm 0,006$	⁵⁵	$\text{Nd}^{144}-\text{Ce}^{140}-4$	$5,92 \pm 0,07$	⁶¹
$\text{Ba}^{139}-\text{Ba}^{138}-1$	$3,919 \pm 0,011$	⁵⁶	$\text{Sm}^{146}-\text{Nd}^{142}-4$	$6,69 \pm 0,05$	⁶²
$\text{Ba}^{139}-\text{La}^{139}$	$2,556 \pm 0,025$	⁵⁷	$\text{Sm}^{147}-\text{Nd}^{143}-4$	$6,27 \pm 0,02$	⁶³
$\text{Ce}^{141}-\text{Pr}^{141}$	$0,621 \pm 0,002$	⁵⁸	$\text{Pm}^{150}-\text{Sm}^{150}$	$5,7 \pm 0,2$	⁶⁴
$\text{Pr}^{142}-\text{Nd}^{142}$	$2,319 \pm 0,013$	⁵⁹	$\text{Eu}^{152}-\text{Sm}^{152}$	$1,87 \pm 0,11$	⁶⁵

Т а б л и ц а VIII

Средние удельные энергии связи ядер на нуклон $\frac{E_{св}}{A}$
для устойчивых изотопов элементов от железа до цинка

Изотоп	Удельная энергия связи $\frac{E_{св}}{A}$ Мэв нуклон	Изотоп	Удельная энергия связи $\frac{E_{св}}{A}$ Мэв нуклон
Fe ⁵⁴	8,7350	Ni ⁶⁴	8,7763
Fe ⁵⁶	8,7889	Cu ⁶³	8,7508
Fe ⁵⁷	8,7687	Cu ⁶⁵	8,7558
Fe ⁵⁸	8,7904	Zn ⁶⁴	8,7345
Co ⁵⁹	8,7669	Zn ⁶⁶	8,7580
Ni ⁵⁸	8,7307	Zn ⁶⁷	8,7328
Ni ⁶⁰	8,7797	Zn ⁶⁸	8,7541
Ni ⁶¹	8,7632	Zn ⁷⁰	8,7282
Ni ⁶²	8,7932		

Все удельные энергии связи имеют одинаковые погрешности около $\pm 0,5$ кэв, вызванные погрешностью разности масс $n-H^1$.

Т а б л и ц а IX

Массы легких атомов, измеренные Смитом
на масс-синхротре.

Вычислены из дублетов масс №№ 180—190
по способу наименьших квадратов

Изотоп	Масса атома $a_{эм}$	Изотоп	Масса атома $a_{эм}$
D ²	2,014742216 \pm 44	Ne ²⁰	19,99879585 \pm 17
C ¹²	12,00381575 \pm 11	Ar ⁴⁰	39,97508812 \pm 28
N ¹⁴	14,007526577 \pm 85		

Массы атомов, энергии связи ядер и энергии связи последних нуклонов изотопов от водорода до цинка

Порядковый номер и символ элемента	Массовое число A	Число нейтронов N	Вид радиоактив- ности	Масса атома изотопа (aem)	Порядок расчета массы. Масса рассчитана по массе или дублету	Энергия связи ядра (Мэв)	Энергия связи последнего	
							нейтрона e_n (Мэв)	протона e_p (Мэв)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0—n	1	1	β^-	$1,0089860 \pm 10$	H ¹			
1—H	1	0	уст.	$1,0081451 \pm 2$	DM 114			
	2	1	уст.	$2,0147425 \pm 6$	DM 11	$2,2241 \pm 11$	2,2241	2,2241
	3	2	β^-	$3,0170013 \pm 29$	H ² , He ³ cp.	$8,4881 \pm 34$	6,264	
	(5)	4	(β^-)	$5,03460 \pm 20$	H ³	$8,84 \pm 20$		
2—He	3	1	уст.	$3,0169807 \pm 18$	DM 105, 106, H ³ cp.	$7,7243 \pm 20$		5,500
	4	2	уст.	$4,0038761 \pm 13$	DM 96 H ² cp.	$28,2937 \pm 22$	20,569	19,806
	5	3	n	$5,013896 \pm 43$	Li 6	$27,331 \pm 41$	-0,563	
	6	4	β^-	$6,020838 \pm 28$	Li ⁷ , Li ⁶ cp.	$29,234 \pm 27$	1,903	20,39
3—Li	5	2	p	$5,013957 \pm 84$	He ³ , H ² , Li ⁶ cp.	$26,491 \pm 78$		-1,803
	6	3	уст.	$6,0170404 \pm 44$	He ³ , He ⁴ , Be ⁹ cp.	$31,987 \pm 5$	5,496	4,656
	7	4	уст.	$7,0182389 \pm 42$	He ⁴ , Be ⁷ , Be ⁹ cp.	$39,239 \pm 6$	7,251	10,005
	8	5	β^-	$8,0250425 \pm 44$	Li ⁷	$41,271 \pm 6$	2,032	
4—Be	6	2	(β^+)	$6,02178 \pm 21$	Li ⁶	$26,79 \pm 20$		0,30
	7	3	$\beta\beta$	$7,0191625 \pm 33$	B ¹⁰ , Li ⁷ cp.	$37,596 \pm 4$	10,81	5,608
	8	4	α	$8,0078563 \pm 38$	He ⁴ , B ¹⁰ , B ¹¹ cp.	$56,491 \pm 5$	18,895	17,252
	9	5	уст.	$9,0150566 \pm 36$	Be ⁸ , B ¹¹ cp.	$58,153 \pm 6$	1,663	16,882
	10	6	β^-	$10,0167237 \pm 30$	B ¹⁰ , Be ⁹ cp.	$64,968 \pm 6$	6,815	
5—B	8	3	β^+ , α	$8,027159 \pm 9$	Li ⁶	$37,734 \pm 8$		0,138
	9	4	β^+ , p	$9,0162057 \pm 49$	Be ⁹	$56,300 \pm 6$	18,566	-0,190
	10	5	уст.	$10,0161236 \pm 39$	DM 14	$64,744 \pm 6$	8,444	6,591
	11	6	уст.	$11,0128153 \pm 56$	DM 15	$76,192 \pm 8$	11,448	11,224
	12	7	β^-	$12,0181746 \pm 43$	C ¹⁴ , B ¹¹ cp.	$79,569 \pm 8$	3,377	
	13	8	β^-	$13,021921 \pm 54$	Li ⁷	$84,448 \pm 51$	4,879	
6—C	9	3	β^+	$9,03297 \pm 54$	He ⁴	$39,91 \pm 50$		2,18
	10	4	β^+	$10,020033 \pm 54$	Be ¹⁰	$60,321 \pm 50$	20,41	4,021
	11	5	β^+	$11,0149409 \pm 64$	B ¹¹ , C ¹² cp.	$73,430 \pm 8$	13,108	8,686

7—N	12	6	уст.	12,0038156±4	DM 117	92,156±6	18,726	15,964
	13	7	уст.	13,0074900±9	DM 16	97,102±7	4,946	17,533
	14	8	β^-	14,0076946±5	N ¹⁴ , C ¹³ ср.	105,278±8	8,177	20,830
	15	9	β^-	15,0153735±14	C ¹⁴	106,496±9	1,217	
	12	5	β^+	12,022634±67	B ¹⁰ , C ¹² ср.	73,851±64		0,422
8—O	13	6	β^+	13,0098754±22	C ¹³ , C ¹² ср.	94,098±6	20,247	1,942
	14	7	уст.	14,0075256±3	DM 17, 18, 19, 20, 21 и 22 ср.	104,653±7	10,555	7,551
	15	8	уст.	15,0048783±4	DM 23	115,485±8	10,832	10,207
	16	9	β^-	16,011201±10	O ¹⁸	117,965±13	2,480	11,469
	17	10	β^-	17,01414±16	O ¹⁷ , O ¹⁸ , ср.	123,60±15	5,64	
9—F	14	6	β^+	14,0130515±44	C ¹²	98,724±7		4,627
	15	7	β^+	15,0078322±17	N ¹⁵	111,952±7	13,227	7,299
	16	8	уст.	16,0000000	по определению	127,612±8	15,660	12,127
	17	9	уст.	17,0045374±5	DM 25	131,754±9	4,142	13,789
	18	10	уст.	18,0048850±8	DM 5, 6, 7 ср.	139,798±10	8,044	16,20
10—Ne	19	11	β^-	19,0096202±55	O ¹⁸	143,756±12	3,958	
	17	8	β^+	17,0075055±37	O ¹⁶ , O ¹⁷ ср.	128,207±8		0,596
	18	9	β^+	18,0066783±40	O ¹⁸ , Ne ²⁰ ср.	137,345±9	9,138	5,591
	19	10	уст.	19,0044441±17	DM 26, 27 и 28 ср.	147,792±10	10,448	7,995
	20	11	β^-	20,0063538±55	F ¹⁹ , Ne ²⁰ ср.	154,381±12	6,589	10,626
11—Na	21	12	β^-	21,006643±27	F ¹⁹	162,479±28	8,098	
	18	8	β^+	18,01119±22	F ¹⁸	132,36±20		4,15
	19	9	β^+	19,0079312±37	F ¹⁹	143,762±9	11,40	6,418
	20	10	уст.	19,9987980±9	DM 29, 30 ср.	160,634±10	16,872	12,842
	21	11	уст.	21,0005244±12	DM 31	167,394±10	6,760	13,012
12—Mg	22	12	уст.	21,9983771±7	DM 32	177,760±11	10,367	15,281
	23	13	β^-	23,0017892±65	Ne ²²	182,950±14	5,190	
	24	14	β^-	24,001224±39	Na ²⁴	191,844±39	8,894	
	20	9	β^+ , α	20,01525±32	Ne ²⁰	144,53±30		0,77
	21	10	β^+	21,004304±32	Ne ²¹	163,091±32	18,56	2,457
13—Al	22	11	β^+	22,0014287±48	Ne ²² , Mg ²⁴ , F ¹⁹ ср.	174,136±11	11,045	6,742
	23	12	уст.	22,9970911±21	DM 33	186,542±12	12,406	8,782
	24	13	β^-	23,9985939±60	Na ²³ , Mg ²⁴ ср.	193,510±14	6,968	10,560
	25	14	β^-	24,99770±27	Mg ²⁵	202,71±25	9,20	10,87
	23	11	β^+	23,001470±8	Na ²³	181,681±13		7,545
14—Si	24	12	уст.	23,9926691±14	DM 34	198,244±12	16,563	11,702
	25	13	уст.	24,9937819±13	DM 35	205,575±12	7,331	12,065

Порядковый номер и символ элемента	Массовое число A	Число нейтронов N	Вид радиоактивности	Масса атома изотопа (a.e.m.)	Порядок расчета массы. Масса рассчитана по массе или дублету	Энергия связи ядра (Мэв)	Энергия связи последнего	
							нейтрона ϵ_n (Мэв)	протона ϵ_p (Мэв)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
12—Mg	26	14	уст.	25,9908538 \pm 14	DM 36	216,668 \pm 13	11,094	13,96
	27	15	β^-	26,992918 \pm 10	Mg ²⁶ , Al ²⁷ cp.	223,113 \pm 17	6,444	
	28	16	β^-	27,992776 \pm 12	Al ²⁸	231,613 \pm 19	8,500	
13—Al	24	11	β^+	24,00772 \pm 32	Mg ²⁴	183,44 \pm 30		1,76
	25	12	β^+	24,998396 \pm 26	Mg ²⁵ , Mg ²⁶ cp.	200,495 \pm 27	17,06	2,251
	26	13	β^+	25,995148 \pm 34	Mg ²⁶ , Al ²⁷ cp.	211,887 \pm 35	11,392	6,312
	27	14	уст.	26,9901117 \pm 25	DM 37	224,944 \pm 14	13,057	8,275
	28	15	β^-	27,9908035 \pm 50	Al ²⁷ , Si ³⁰ , Si ²⁸ cp.	232,667 \pm 15	7,723	9,554
	29	16	β^-	28,989699 \pm 43	Mg ²⁶	242,062 \pm 43	9,395	10,449
14—Si	27	13	β^+	26,995293 \pm 9	Al ²⁷	219,336 \pm 15		7,449
	28	14	уст.	27,9858226 \pm 74	DM 38	236,522 \pm 15	17,186	11,578
	29	15	уст.	28,9857037 \pm 94	DM 39	245,000 \pm 17	8,478	12,333
	30	16	уст.	29,9832868 \pm 66	DM 40	255,617 \pm 16	10,618	13,555
	31	17	β^-	30,9851972 \pm 60	Si ³⁰ , P ³¹ cp.	262,206 \pm 17	6,588	
	32	18	β^-	31,984184 \pm 54	P ³²	271,516 \pm 53	9,310	
15—P	28	13	β^+	28,00060 \pm 38	Si ²⁸	221,97 \pm 36		2,63
	29	14	β^+	28,991038 \pm 11	Si ²⁹	239,250 \pm 17	17,28	2,728
	30	15	β^+	29,987868 \pm 5	Al ²⁷ , S ³² , Si ³⁰ , Si ²⁹ cp.	250,569 \pm 16	11,319	5,569
	31	16	уст.	30,9836125 \pm 6	DM 150, S ³² , Si ³⁰ cp.	262,898 \pm 15	12,329	7,281
	32	17	β^-	31,9840765 \pm 14	S ³² , P ³¹ cp.	270,833 \pm 16	7,935	8,628
	33	18	β^-	32,9822147 \pm 31	S ³³	280,934 \pm 17	10,101	9,418
	34	19	β^-	33,98416 \pm 22	S ³⁴	287,49 \pm 20	6,56	
16—S	31	15	β^+	30,98948 \pm 7	P ³¹ , S ³² cp.	256,65 \pm 7		6,08
	32	16	уст.	31,9822388 \pm 9	DM 2,5 cp.	271,762 \pm 15	15,113	8,863
	33	17	уст.	32,9819473 \pm 22	DM 151	280,400 \pm 16	8,639	9,567
	34	18	уст.	33,9786635 \pm 22	DM 152	291,810 \pm 18	11,425	10,891
	35	19	β^-	34,9801525 \pm 54	Cl ³⁵ , Cl ³⁷ cp.	298,806 \pm 19	6,981	11,32
	36	20	уст.	35,9785253 \pm 39	DM 153	308,688 \pm 19	9,882	
	37	21	β^-	36,98281 \pm 8	Cl ³⁷ , Ar ⁴⁰ cp.	313,17 \pm 10	4,38	

17—Cl	38	22	β^-	$37,98331 \pm 22$	Cl ³⁸	$320,96 \pm 20$	7,89	
	32	15	β^+	$\geq 31,98599 \pm 43$	S ³²	$\leq 258,18 \pm 40$		$\leq 1,53$
	33	16	β^+	$32,98753 \pm 11$	S ³³	$274,42 \pm 10$	$\geq 16,24$	$\geq 2,66$
	34	17	β^+	$33,984608 \pm 33$	S ³⁴	$285,507 \pm 35$	11,09	5,107
	35	18	уст.	$34,9799713 \pm 20$	DM 155, S ³² cp.	$298,192 \pm 17$	12,685	6,366
	36	19	β^-	$35,9797478 \pm 49$	Cl ³⁵ , Ar ³⁶ cp.	$306,767 \pm 19$	8,575	7,961
	37	20	уст.	$36,9776573 \pm 17$	DM 157	$317,081 \pm 19$	10,314	8,392
	38	21	β^-	$37,980091 \pm 9$	Cl ³⁷	$323,182 \pm 21$	6,101	10,11
	39	22	β^-	$38,980390 \pm 23$	Ar ³⁹	$331,271 \pm 30$	8,089	10,31
	40	23	β^-	$39,98315 \pm 54$	Ar ⁴⁰	$337,06 \pm 50$	5,79	
18—Ar	35	17	β^+	$34,986394 \pm 43$	Cl ³⁵	$291,429 \pm 44$		5,922
	36	18	уст.	$35,9789823 \pm 21$	DM 154, K ³⁹ cp.	$306,697 \pm 17$	15,268	8,505
	37	19	β^-	$36,9785110 \pm 29$	Cl ³⁷ , Ar ³⁶ cp.	$315,503 \pm 18$	8,806	8,736
	38	20	уст.	$37,9748023 \pm 20$	DM 156	$327,324 \pm 19$	11,821	10,243
	39	21	β^-	$38,9767068 \pm 57$	K ³⁹	$333,917 \pm 21$	6,594	10,735
	40	22	уст.	$39,9750925 \pm 16$	DM 116, 13 cp.	$343,788 \pm 21$	9,870	12,517
	41	23	β^-	$40,977531 \pm 11$	K ⁴¹	$349,885 \pm 24$	6,097	12,82
19—K	37	18	β^+	$36,98506 \pm 11$	Ar ³⁷	$308,62 \pm 10$		1,92
	38	19	β^+	$37,981157 \pm 10$	Ca ⁴⁰ , Ar ³⁸ cp.	$320,624 \pm 20$	12,00	5,121
	39	20	уст.	$38,9761000 \pm 20$	DM 158, K ⁴⁰ , Ca ⁴² cp.	$333,699 \pm 19$	13,075	6,376
	40	21	уст. $\beta^- \beta^- \beta^-$	$39,9767119 \pm 25$	DM 159, Ca ⁴⁰ , Ca ⁴³ cp.	$341,497 \pm 20$	7,798	7,580
	41	22	уст.	$40,9748565 \pm 25$	DM 160, Ca ⁴⁴ cp.	$351,592 \pm 21$	10,095	7,804
	42	23	β^-	$41,975824 \pm 10$	Ca ⁴² K ⁴¹ , cp.	$359,058 \pm 24$	7,467	9,213
	43	24	β^-	$42,974394 \pm 16$	Ca ⁴³ , Ar ⁴⁰ cp.	$368,757 \pm 27$	9,699	
	44	25	β^-	$43,97473 \pm 22$	Ca ⁴⁴	$376,81 \pm 20$	8,05	
					Ca ⁴⁰ , K ³⁹ cp.	$326,28 \pm 7$		5,65
20—Ca	39	19	β^+	$38,98323 \pm 8$	DM 161	$342,035 \pm 19$	15,759	8,336
	40	20	уст.	$39,9752931 \pm 21$	Ca ⁴⁰	$350,400 \pm 22$	8,365	8,903
	41	21	β^-	$40,975296 \pm 10$	DM 162, Ca ⁴³ cp.	$361,866 \pm 21$	11,466	10,274
	42	22	уст.	$41,9719681 \pm 28$	DM 163, Ca ⁴² cp.	$369,791 \pm 22$	7,925	10,732
	43	23	уст.	$42,9724429 \pm 32$	DM 164	$380,925 \pm 23$	11,134	12,168
	44	24	уст.	$43,9694714 \pm 25$	Sc ⁴⁵ , Ca ⁴⁴ cp.	$388,350 \pm 24$	7,425	11,54
	45	25	β^-	$44,9704835 \pm 30$	DM 165	$398,751 \pm 25$	10,402	
	46	26	уст.	$45,9682984 \pm 40$	Sc ⁴⁷	$406,015 \pm 48$	7,264	
	47	27	β^-	$46,969484 \pm 44$	DM 166	$415,982 \pm 27$	9,967	
	48	28	уст.	$47,967766 \pm 6$	Ca ⁴⁵	$421,122 \pm 29$	5,140	
21—Sc	49	29	β^-	$48,971232 \pm 9$				
	40	19	β^+	$39,99011 \pm 43$	Ca ⁴⁰	$327,45 \pm 40$		1,17
	41	20	β^+	$40,981695 \pm 47$	Ca ⁴⁰ , Ca ⁴¹ cp.	$343,658 \pm 48$	16,21	1,623

Порядковый номер и символ элемента	Массовое число A	Число нейтронов N	Вид радиоактивности	Масса атома изотопа (a.e.m.)	Порядок расчета массы. Масса рассчитана по массе или дублету	Энергия связи ядра (Мэв)	Энергия связи последнего	
							нейтрона e_n (Мэв)	протона e_p (Мэв)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
21—Sc	42	21	β^+	41,9782 \pm 10	Ca ⁴²	355,2 \pm 10	11,6	4,8
	43	22	β^+	42,974827 \pm 11	Ca ⁴³	366,788 \pm 23	11,6	4,922
	44	23	β^+	43,973391 \pm 11	Ca ⁴⁴	376,492 \pm 24	9,704	6,701
	45	24	уст.	44,9702122 \pm 21	DM 167	387,819 \pm 23	11,327	6,894
	46	25	β^-	45,969781 \pm 6	Ti ⁴⁶ , Sc ⁴⁵ cp.	396,588 \pm 24	8,769	8,238
	47	26	β^-	46,967336 \pm 6	Ti ⁴⁷	407,232 \pm 26	10,644	8,480
	48	27	β^-	47,967476 \pm 32	Ti ⁴⁸	415,469 \pm 39	8,237	9,454
	49	28	β^-	48,96558 \pm 11	Ti ⁴⁹	425,60 \pm 11	10,13	9,62
	50	29	β^-	49,96744 \pm 54	Ti ⁵⁰	432,24 \pm 50	6,64	11,12
22—Ti	44	22	$\beta\beta$	43,973558 \pm 25	Sc ⁴⁴	375,553 \pm 32		8,765
	45	23	β^+	44,9724213 \pm 49	Sc ⁴⁵	384,979 \pm 22	9,426	8,487
	46	24	уст.	45,9672420 \pm 18	DM 168	398,169 \pm 23	13,190	10,350
	47	25	уст.	46,9666862 \pm 32	DM 169	407,054 \pm 24	8,885	10,466
	48	26	уст.	47,9631912 \pm 15	DM 170	418,675 \pm 25	11,622	11,444
	49	27	уст.	48,9634294 \pm 22	DM 171	426,821 \pm 26	8,146	11,352
	50	28	уст.	49,9606687 \pm 25	DM 172	437,759 \pm 27	10,938	12,16
	51	29	β^-	50,962814 \pm 30	V ⁵¹ , Ti ⁵⁰ cp.	444,128 \pm 39	6,369	11,89
23—V	46	23	β^+	45,9748 \pm 11	Ti ⁴⁶	390,3 \pm 1,0		5,3
	47	24	β^+	46,96978 \pm 6	Ti ⁴⁷	403,39 \pm 6	13,1	5,22
	48	25	β^+	47,967508 \pm 22	Ti ⁴⁸	413,873 \pm 32	10,48	6,819
	49	26	$\beta\beta$	48,964082 \pm 6	Ti ⁴⁹	425,430 \pm 25	11,557	6,754
	50	27	уст.	49,9630450 \pm 23	DM 173	434,763 \pm 26	9,333	7,942
	51	28	уст.	50,9601754 \pm 25	DM 174	445,802 \pm 27	11,039	8,044
	52	29	β^-	51,961320 \pm 6	V ⁵¹ , Cr ⁵² cp.	453,104 \pm 28	7,301	8,976
	53	30	β^-	52,96020 \pm 5	Cr ⁵³	462,51 \pm 6	9,41	
24—Cr	48	24	$\beta\beta$	47,96901 \pm 22	V ⁴⁸	411,69 \pm 20		8,30
	49	25	β^+	48,966832 \pm 12	V ⁴⁹	422,086 \pm 26	10,40	8,213
	50	26	уст.	49,9619308 \pm 25	DM 175	435,018 \pm 25	12,932	9,588
	51	27	$\beta\beta$	50,9609830 \pm 28	V ⁵¹ , Cr ⁵⁰ cp.	444,267 \pm 26	9,250	9,504

25—Mn	52	28	уст.	51,9570263±25	DM 176	456,319±27	12,052	10,516
	53	29	уст.	52,9574817±29	DM 177	464,262±28	7,943	11,158
	54	30	уст.	53,9560231±31	DM 178	473,987±29	9,725	11,473
	55	31	β^-	54,95855±16	Mn ⁵⁵	480,00±15	6,01	
	50	25	β^+	49,96977±32	Cr ⁵⁰	426,94±30		4,85
	51	26	β^+	50,96444±9	Cr ⁵¹	440,26±8	13,32	5,246
	52	27	β^+	51,962112±27	Cr ⁵²	450,801±36	10,537	6,534
	53	28	β^+	52,958123±9	Cr ⁵³	462,882±28	12,081	6,563
	54	29	β^+	53,957504±6	Cr ⁵⁴	471,825±28	8,943	7,563
	55	30	уст.	54,9555234±31	DM 179	482,037±29	10,212	8,050
26—Fe	56	31	β^-	55,956706±6	Mn ⁵⁵ , Fe ⁵⁶ cp.	489,303±30	7,266	9,30
	57	32	β^-	56,956413±22	Fe ⁵⁷	497,943±36	8,640	
	52	26	β^+	≥51,964496±35	Mn ⁵²	≤447,798±41		≤7,53
	53	27	β^+	52,96243±6	Fe ⁵⁴	458,086±71	≥10,288	7,285
	54	28	уст.	53,9567590±45	DM 41	471,736±27	13,650	8,854
	55	29	β^+	54,9557686±39	Mn ⁵⁵ , Fe ⁵⁴ cp.	481,026±28	9,290	9,200
	56	30	уст.	55,9527252±46	DM 42	492,227±29	11,201	10,190
	57	31	уст.	56,953513±7	DM 43	499,860±30	7,633	10,557
	58	32	уст.	57,9517364±48	DM 44	509,882±31	10,022	11,939
	59	33	β^-	58,953602±6	Co ⁵⁹ , Fe ⁵⁸ cp.	516,512±32	6,630	
27—Co	55	28	β^+	54,959434±35	Fe ⁵⁶	476,783±0,039	5,091	
	56	29	β^+	55,957694±20	Fe ⁵⁶	486,770±0,029	9,987	5,780
	57	30	β^+	56,954063±140	Ni ⁵⁷ , Fe ⁵⁷ cp.	498,517±0,130	11,747	6,334
	58	31	β^+	57,954200±11	Fe ⁵⁸	506,756±0,024	8,239	6,940
	59	32	уст.	58,951919±3	DM : 45	517,247±0,024	10,491	7,409
	60	33	β^-	59,952852±6	Ni ⁶⁰ , Co ⁵⁹ cp.	524,744±0,025	7,497	8,275
	61	34	β^-	60,952060±20	Ni ⁶¹	533,848±0,032	9,104	
	62	35	β^-	61,953433±30	Ni ⁶²	540,936±0,038	7,088	
	56	28	β^+	≥55,959570±60	Co ⁵⁶	≤484,24±0,05		≤7,457
	57	29	β^+	56,95741±20	Ni ⁵⁸ , Co ⁵⁷ , cp.	494,621±0,190	≥10,38	7,851
28—Ni	58	30	уст.	57,953767±7	DM : 46	506,376±0,023	11,755	7,859
	59	31	β^+	58,953085±9	Ni ⁵⁸ , Co ⁵⁹ cp.	515,378±0,026	9,002	8,622
	60	32	уст.	59,949823±6	DM : 47	526,782±0,024	11,404	9,535
	61	33	уст.	60,950460±5	DM : 48	534,555±0,025	7,773	9,811
	62	34	уст.	61,948033±7	DM : 49	545,181±0,026	10,626	11,333
	63	35	β^-	62,949688±8	Cu ⁶³	552,007±0,028	6,826	11,071
	64	36	уст.	63,948339±5	Cu ⁶⁴	561,679±0,027	9,672	
	65	37	β^-	64,950703±14	Cu ⁶⁵ , Ni ⁶⁴ cp.	567,794±0,031	6,415	
	60	31	β^+	59,956557±30	Ni ⁶⁰	519,728±0,036		4,350
	61	32	β^+	60,952854±8	Ni ⁶¹	531,543±0,027	11,815	4,761
29—Cu								

Порядковый номер и символ элемента	Массовое число А	Число нейтронов N	Вид радиоактивности	Масса атома изотопа (aem)	Порядок расчета массы. Масса рассчитана по массе или дублету	Энергия связи ядра (Мэв)	Энергия связи последнего	
							нейтрона ϵ_n (Мэв)	протона ϵ_p (Мэв)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
29—Cu	62	33	β^+	$61,952249 \pm 18$	Ni ⁶² , Cu ⁶³ ср.	$540,473 \pm 0,031$	8,930	5,918
	63	34	уст.	$62,949607 \pm 8$	ДМ: 51	$551,299 \pm 0,026$	10,826	6,118
	64	35	β^+ , β^-	$63,950088 \pm 4$	Zn ⁶⁴ ; Cu ⁶³ , Cu ⁶⁵ ср.	$559,217 \pm 0,027$	7,918	7,210
	65	36	уст.	$64,948427 \pm 5$	ДМ: 52	$569,131 \pm 0,028$	9,914	7,452
	66	37	β^-	$65,949860 \pm 30$	Cu ⁶⁵ ; Zn ⁶⁶ ср.	$576,163 \pm 0,040$	7,032	8,369
	67	38	β^-	$66,949032 \pm 11$	Zn ⁶⁷	$585,300 \pm 0,031$	9,137	
30—Zn	62	32	β^+	$61,954071 \pm 20$	Cu ⁶²	$537,993 \pm 0,031$		6,450
	63	33	β^+	$62,953209 \pm 9$	Cu ⁶³ , Zn ⁶⁴ ср.	$547,162 \pm 0,027$	9,169	6,689
	64	34	уст.	$63,949472 \pm 3$	ДМ: 3 ^a , 3 ^b ср.	$559,008 \pm 0,026$	11,846	7,709
	65	35	β^+	$64,949874 \pm 5$	Zn ⁶⁴ , Cu ⁶⁵ , Zn ⁶⁶ ср.	$567,000 \pm 0,027$	7,992	7,783
	66	36	уст.	$65,947013 \pm 7$	ДМ: 53	$578,031 \pm 0,027$	11,031	8,900
	67	37	уст.	$66,948418 \pm 7$	ДМ: 54	$585,089 \pm 0,028$	7,058	8,926
	68	38	уст.	$67,946456 \pm 5$	ДМ: 55	$595,282 \pm 0,029$	10,193	9,982
	69	39	β^-	$68,948471 \pm 20$	Zn ⁶⁸ ; Zn ⁷⁰ ср.	$601,772 \pm 0,035$	6,490	
	70	40	уст.	$69,947572 \pm 6$	ДМ: 56	$610,976 \pm 0,031$	9,204	

Примечания: В 6 столбце приводятся указания, из каких масс вычислена данная масса, если это вычисление произведено с помощью энергий реакций или распадов. Если масса вычислена из дублета масс, стоит «ДМ» и номер дублета в таблице I. Если масса получена усреднением из нескольких вычисленных масс, то в том же столбце стоит «ср.». Среднее значение всегда вычислялось с применением весов значений, считая вес обратно пропорциональным квадрату погрешности.

Разность масс $n-H^1=0,7830 \pm 0,0009$ Мэв $=0,8409 \pm 0,0009$ масм по ⁷. Соотношение между атомной единицей массы (aem) и ме-гаэлектрон вольтom считалось по ⁴³: 1 aem = 931,141 Мэв.

Таблица XI

Массы атомов, энергии связи ядер и энергии связи последних нуклонов изотопов от ксенона до европия

Порядковый номер и символ элемента	Массовое число A	Число нейтронов N	Вид радиоактивности	Масса атома изотопа (атом)	Порядок расчета массы	Энергия связи ядра (Мэв) $E_{св}$	Энергия связи последнего	
							нейтрона e_n (Мэв)	протона e_p (Мэв)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
54— e	130	76	уст.	129,94481 \pm 3	ДМ 57	1096,74 \pm 0,03	6,61	
	131	77	уст.	130,94670 \pm 4	ДМ 59	1103,35 \pm 0,04	8,91	
	132	78	уст.	131,946115 \pm 9	ДМ 60	1112,257 \pm 0,008	6,76	
	133	79	β^-	132,94784 \pm 7	P	1119,02 \pm 0,05	8,22	
	134	80	уст.	133,94799 \pm 5	ДМ 63	1127,24 \pm 0,05	6,56	
	135	81	β^-	134,94993 \pm 10	P	1133,80 \pm 0,09	7,91	
	136	82	уст.	135,950419 \pm 25	ДМ 66	1141,714 \pm 0,023	4,4	
	137	83	β^-	136,9546 \pm 11	СР	1146,1 \pm 1,0		
56—Cs	130	75	β^+	129,94802 \pm 4	P из Xe^{130}	1092,96 \pm 0,04		
	131	76	$\beta\beta$	130,94707 \pm 4	P	1102,22 \pm 0,04	9,26	5,48
	132	77	$\beta\beta$	131,94810 \pm 20	P ср. взв.	1109,62 \pm 0,20	7,40	6,27
	133	78	уст.	132,94738 \pm 7	ДМ 62	1118,66 \pm 0,07	9,04	6,40
	134	79	β^-	133,94906 \pm 7	P ср. взв.	1125,46 \pm 0,007	6,80	6,44
	135	80	β^-	134,94867 \pm 10	P	1134,19 \pm 0,09	8,73	6,95
	136	81	β^-	135,95065 \pm 9	P	1140,71 \pm 0,08	6,52	6,91
	137	82	β^-	136,95033 \pm 6	P	1149,38 \pm 0,06	8,67	7,67
56—Ba	138	83	β^-	137,95393 \pm 10	P	1154,39 \pm 0,09	5,01	8,52
	130	74	уст.	129,94810 \pm 20	ДМ 58	1092,11 \pm 0,19		
	132	76	уст.	131,94706 \pm 12	ДМ 61	1109,81 \pm 0,11		7,59
	134	78	уст.	133,94683 \pm 8	ДМ 64	1126,76 \pm 0,07		8,10
	135	79	уст.	134,94845 \pm 10	ДМ 65	1133,62 \pm 0,09	6,86	8,16
	136	80	уст.	135,94758 \pm 9	ДМ 67	1142,79 \pm 0,08	9,17	8,60
	137	81	уст.	136,94906 \pm 6	ДМ 69	1149,78 \pm 0,06	6,99	9,07
	138	82	уст.	137,94873 \pm 8	ДМ 70	1158,45 \pm 0,07	8,66	9,07
56—Ba	139	83	β^-	138,95271 \pm 5	P ср. взв.	1163,12 \pm 0,05	4,67	8,73

Порядковый номер и символ элемента	Массовое число A	Число нейтронов N	Вид радиоактивности	Масса атома изотопа (a.e.m.)	Порядок расчета массы	Энергия связи ядра (Мэв) E _{св}	Энергия связи последнего	
							нейтрона ϵ_n (Мэв)	протона ϵ_p (Мэв)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
57—La	134	77	β^+	133,95083 \pm 25	P	1122,25 \pm 0,23		
	138	81	уст.	137,95059 \pm 20	DM 71	1155,94 \pm 0,19		6,16
	139	82	уст.	138,95020 \pm 6	DM 73	1164,67 \pm 0,06	8,73	6,22
	140	83	β^-	139,95379 \pm 6	P ср. взв.	1169,69 \pm 0,06	5,02	6,57
	141	84	β^-	140,95552 \pm 4	P	1176,45 \pm 0,04	6,76	
58—Ce	136	78	уст.	135,95028 \pm 20	DM 68	1138,71 \pm 0,19		
	138	80	уст.	137,94987 \pm 20	DM 72	1155,83 \pm 0,19		
	139	81	β^-	138,95049 \pm 25	P	1163,62 \pm 0,23	7,79	7,68
	140	82	уст.	139,94976 \pm 6	DM 74	1172,66 \pm 0,06	9,04	7,99
	141	83	β^-	140,95290 \pm 3	P ср. взв.	1178,11 \pm 0,03	5,45	8,42
	142	84	уст.	141,95441 \pm 7	DM 76	1185,06 \pm 0,07	6,95	8,61
	143	85	β^-	142,95772 \pm 14	P ср.	1190,35 \pm 0,13	5,29	
	144	86	β^-	143,95908 \pm 7	P	1197,45 \pm 0,07	7,10	
	146	88	β^-	145,96468 \pm 14	CP	1208,97 \pm 0,13		
59—Pr	138	79	β^+	137,9539 \pm 3	P	1151,29 \pm 0,28		
	139	80	β^+	138,95259 \pm 25	CP	1160,88 \pm 0,23	9,59	5,05
	140	81	β^+	139,95328 \pm 6	P ср. взв.	1168,60 \pm 0,06	7,72	4,98
	141	82	уст.	140,95228 \pm 3	DM 75	1177,90 \pm 0,03	9,30	5,24
	142	83	β^-	141,95495 \pm 3	P ср. взв.	1183,78 \pm 0,03	5,88	5,67
	143	84	β^-	142,95602 \pm 14	P ср.	1191,15 \pm 0,13	7,37	6,09
	144	85	β^-	143,95875 \pm 7	P	1196,97 \pm 0,07	5,82	6,62
	146	87	β^-	145,96358 \pm 12	P	1209,21 \pm 0,11		
60—Nd	139	79	β^+	138,9570 \pm 3	CP	1155,98 \pm 0,03		4,69
	141	81	β^+	140,95408 \pm 11	P	1175,44 \pm 0,10		6,84
	142	82	уст.	141,95260 \pm 3	DM 77	1185,18 \pm 0,03	9,74	7,28
	143	83	уст.	142,95502 \pm 10	DM 78	1191,30 \pm 0,09	6,12	7,52
	144	84	уст.	143,95556 \pm 7	DM 79	1199,16 \pm 0,07	7,86	8,01
	145	85	уст.	144,95814 \pm 19	DM 81	1205,13 \pm 0,18	5,99	8,16

61—Pm	146	86	уст.	145,95908 \pm 6	ДМ 82	1212,62 \pm 0,06	7,49	8,67
	147	87	β^-	146,96242 \pm 3	P	1217,88 \pm 0,03	5,26	
	148	88	уст.	147,96349 \pm 6	ДМ 84	1225,24 \pm 0,06	7,36	
	149	89	β^-	148,96737 \pm 16	P ср. взв.	1230,00 \pm 0,15	4,76	
	150	90	уст.	149,96849 \pm 7	ДМ 85	1237,32 \pm 0,07	7,32	
62—Sm	147	86	β^-	146,96144 \pm 3	P	1218,00 \pm 0,03		5,38
	148	87	β^-	147,9644 \pm 4	CP	1223,61 \pm 0,37	5,61	5,73
	149	88	β^-	148,96559 \pm 20	CP	1230,88 \pm 0,19	7,27	5,64
	150	89	β^-	149,97027 \pm 20	CP	1234,88 \pm 0,19	4,00	4,88
63—Eu	144	82	уст.	143,95741 \pm 9	ДМ 80	1195,87 \pm 0,08		
	146	84	α	145,95929 \pm 6	P	1210,86 \pm 0,06		
	147	85	α	146,96120 \pm 3	ДМ 83	1217,44 \pm 0,03	6,58	
	148	86	уст.	147,96145 \pm 20	ДМ 92	1225,58 \pm 0,19	8,14	7,58
	149	87	уст.	148,96415 \pm 20	ДМ 94	1231,42 \pm 0,19	5,84	7,81
	150	88	уст.	149,96457 \pm 7	ДМ 86	1239,40 \pm 0,07	7,98	8,52
	151	89	β^-	150,96764 \pm 13	P	1244,91 \pm 0,12	5,51	10,03
	152	90	уст.	151,96767 \pm 13	ДМ 89	1253,25 \pm 0,12	8,34	
	153	91	β^-	152,9701 \pm 4	P	1259,37 \pm 0,37	6,12	
	154	92	уст.	153,97087 \pm 15	ДМ 91	1267,00 \pm 0,14	7,63	
	155	93	β^-	154,9738 \pm 4	P	1272,68 \pm 0,37	5,68	
	151	88	уст.	150,96753 \pm 13	ДМ 87, 88 ср.	1244,23 \pm 0,12		4,83
	152	89	β^-	151,96954 \pm 16	P	1250,73 \pm 0,15	6,50	5,82
	153	90	уст.	152,9692 \pm 4	ДМ 90	1259,37 \pm 0,37	8,64	6,12
	155	92	β^-	154,9714 \pm 4	P	1274,08 \pm 0,37		7,08

Примечания: В 6 столбце указаны источники, по которым вычислены массы: ДМ—дублет масс, цифра обозначает номер дублета по таблице I, P—масса вычислена из других масс по энергиям реакций и распадов, CP—масса вычислена из других масс по сомнительным энергиям реакций и распадов, Ср—среднее значение, ср. взв.—взвешенное среднее значение.

Массы вычислены по стандартам из таблицы X. $n-H^1=0,7830\pm0,0009$ $M_{\text{вз}}=0,8409\pm0,0009$ а.е.м. по¹; 1 а.е.м.=931,141 Мэв по⁴³.

Таблица XII

Энергия связи последних нейтронов в ядрах изотопов тяжелых элементов с четным порядковым номером от гадолиния до свинца по Джонсону и Бано ⁸⁰

Поряд- ковый номер Z и символ	Массовое число A	Число нейтро- нов N	Энергия связи по- следнего нейтрона ϵ_n (Мэв)	Поряд- ковый номер Z и символ	Массовое число A	Число нейтро- нов N	Энергия связи по- следнего нейтрона ϵ_n (Мэв)
64—Gd	155	91	$6,37 \pm 0,06$	74—W	183	109	$6,29 \pm 0,06$
	156	92	$8,46 \pm 0,06$		184	110	$7,45 \pm 0,06$
	157	93	$6,32 \pm 0,06$	76—Os	187	111	$6,38 \pm 0,06$
	158	94	$7,88 \pm 0,06$		188	112	$8,06 \pm 0,06$
66—Dy	161	95	$6,42 \pm 0,06$	78—Pt	189	113	$6,00 \pm 0,06$
	162	96	$8,18 \pm 0,06$		190	114	$7,89 \pm 0,06$
	163	97	$6,27 \pm 0,06$		195	117	$6,09 \pm 0,06$
	164	98	$7,63 \pm 0,06$		196	118	$7,91 \pm 0,06$
68—Er	167	99	$6,45 \pm 0,06$	80—Hg	199	119	$6,68 \pm 0,06$
	168	100	$7,77 \pm 0,06$		200	120	$8,08 \pm 0,06$
70—Yb	171	101	$6,62 \pm 0,06$		201	121	$6,27 \pm 0,06$
	172	102	$8,00 \pm 0,06$		202	122	$7,78 \pm 0,06$
	173	103	$6,35 \pm 0,06$	82—Pb	207	125	$6,75 \pm 0,06$
	174	104	$7,47 \pm 0,06$		208	126	$7,38 \pm 0,06$
72—Hf	177	105	$6,28 \pm 0,06$				
	178	106	$7,55 \pm 0,06$				
	179	107	$6,17 \pm 0,06$				
	180	108	$7,32 \pm 0,06$				

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кравцов В., УФН 47, 341 (1952).
2. Желепов В. и Зырянова Л., УФН 48, 465 (1952).
3. Кравцов В., УФН 54, 3 (1954).
4. Кравцов В., Известия АН СССР, сер. физ. 19, 377 (1955).
5. Drummond, J. Phys. Rev. 97, 1004 (1955).
6. Glass R., Thompson S. and Seaborg G., Journ. Inorg. Nucl. Chem. 1, 3 (1955).
7. Wapstra A., Physica 21, 367 (1955).
8. Wapstra A., Physica 21, 385 (1955).
9. Huizenga, J. Physica 21, 410 (1955).
10. King R., Revs. Mod. Phys. 26, 327 (1954).
11. van Patter D. and Whaling W., Revs. Mod. Phys. 26, 402 (1954).
12. Geschwind S., Gunther-Mohr G. and Townes C., Revs. Mod. Phys. 26, 444 (1954).
13. Asaro F. and Perlman I., Revs. Mod. Phys. 26, 456 (1954).
14. Duckworth H., Hogg B. and Pennington E., Revs. Mod. Phys. 26, 463 (1954).
15. Mattauich J., Waldmann L., Bieri R. und Everling F., Zs. Naturforsch. 11a, 525 (1956) или Ann. Rev. Nucl. Science 6, 179 (1956).
16. Raut H., Indian J. Phys. 39, 611 (1956).
17. Li-Cheng-wu, Acta phys. sinica 13, 30 (1957) (китайск.) или Scientia Sinica 6, 51 (1957) (англ.).
18. Endt P., Buechner W., Braams C., Paris C. and Sperduto A., Phys. Rev. 105, 1002 (1957).
19. Рик Г. Р., Масс-спектрокопия, ГИТТЛ, 1953.
20. Л. Б., УФН 47, 482 (1952).
21. Демирханов Р., Гуткин Т., Дорохов В. и Руденко А., Атомная энергия № 2, 21 (1956).

22. Quisenberry K., Scolman T. and Nier A., Phys. Rev. **102**, 1071 (1956).
23. Scolman T., Quisenberry K. and Nier A., Phys. Rev. **102**, 1076 (1956).
24. Quisenberry K., Scolman T. and Nier A., Phys. Rev. **104**, 461 (1956).
25. Johnson W., jr., and Nier A., Phys. Rev. **105**, 1014 (1957).
26. Ewald H., Zs. Naturforsch. **6a**, 293 (1951).
27. Nier A. and Roberts T., Phys. Rev. **81**, 507 (1951).
28. Nier A., Phys. Rev. **81**, 624 (1951).
29. Li C., Whaling W., Fowler W. and Lauritsen, Phys. Rev. **83**, 512 (1951).
30. Ogata K. and Matsuda H., Phys. Rev. **89**, 27 (1953).
31. Mattauich J. and Bieri R., Zs. Naturforsch. **9a**, 303 (1954).
32. Smith L., цитировано по частн. сообщению в (22).
33. Schierstedt G., Ewald H., Liebl H. und Sauermann G., Zs. Naturforsch. **11a**, 216 (1956).
34. Kettner M., Phys. Rev. **102**, 1065 (1956).
35. Giese C., цитировано по частн. сообщению в (22).
36. Kinsey B. and Bartolomew G., Phys. Rev. **89**, 375 (1953).
37. Bartolomew G. and Kinsey B., Phys. Rev. **89**, 386 (1953).
38. Джеленов Б., Жуковский Н., Приходцев В. и Хольнов Ю., Изв. АН СССР, сер. физ. **17**, 511 (1953).
39. Kinsey B. and Bartolomew G., Can. J. Phys. **31**, 1051 (1953).
40. Адыяевич Б., Грошев Л. и Демядов А., Сессия АН СССР по мирн. использо. атомн. энергии, Отд. физ.-мат. наук, стр. 270 (1955).
41. Langer, Duffield and Stanley, Phys. Rev. **89**, 907 (1953).
42. Kubitschek H. and Dankoff M., Phys. Rev. **76**, 531 (1949).
43. Cohen R., Du Mond J., Layton T. and Rollett, J. Revs. Mod. Phys. **27**, 363 (1955).
44. Way K., King R., McGinnis C. and van-Lieshout R., Nuclear Level Schemes (A-40 to A-92), Washington, 1955.
45. Foglesong G. and Foxwell D., Phys. Rev. **96**, 1001 (1954).
46. Crasemann B., Phys. Rev. **93**, 1034 (1954); Marion J. and Chapman R., Phys. Rev. **101**, 283 (1956).
47. Bendel W., McElhinney J. and Tobin R., Bull. Am. Phys. Soc. **I**, 192 (1956).
48. Hoesterey D., Phys. Rev. **87**, 216 (1952) и частн. сообщение в ²⁴.
49. Kington J., Bair J., Cohn H. and Willard H., Phys. Rev. **99**, 1393 (1955).
50. Brugger R., Bonner T. and Marion, J. Phys. Rev. **100**, 84 (1955).
51. Caird R. and Mitchell A., Phys. Rev. **94**, 412 (1954); **93**, 916 (1954).
52. Nussbaum R., van-Lieshout R., Wapstra S., Ferster N., Ten-Haaf F., Nijgh G. and Ornstein L., Physica **20**, 555 (1954).
53. Nussbaum R., Wapstra A., van-Lieshout R., Nijgh G. and Ornstein L., Physica **20**, 571 (1954).
54. Robinson B. and Fink R., Phys. Rev. **98**, 231 (1955) и Wapstra A., Physica **21**, 385 (1955).
55. Olsen J. and O'Kelley G., Phys. Rev. **95**, 1539 (1954).
56. Paris G., Buechner W. and Endt P., Phys. Rev. **100**, 1317 (1955).
57. Mitchell A. and Hebb E., Phys. Rev. **95**, 727 (1954).
58. Jones J. and Jensen E., Phys. Rev. **97**, 1031 (1955) и (10).
59. Pohn A., Lewis W., Talboy, J., jr., and Jensen E., Phys. Rev. **95**, 1523 (1954) и (10).
60. Martin D., Cork J. and Burson S., Phys. Rev. **99**, 670 (1955).
61. Waldron E., Schultz V. and Kohman T., Phys. Rev. **93**, 254 (1954); Porschen W. und Riezler W., Zs. Naturforsch. **9a**, 701 (1954).
62. Dunlavey D. and Seaborg G., Phys. Rev. **92**, 206 (1953).
63. Jesse W. and Sadauskis J., Phys. Rev. **78**, 1 (1950).
64. Fischer V., Phys. Rev. **96**, 1549 (1954).
65. Kendall H. and Grodzins L., Bull. Am. Phys. Soc. **1**, 164 (1956).
66. Кравцов В., Изв. АН СССР, сер. физ. **18**, 5 (1954).
67. Mayer M. and Jensen J., Elementary Theorie of Nuclear Shell Structure, New York, 1955.
68. Серге Э., Экспериментальная ядерная физика, ИЛ, 1955, т. 1.
69. Mottelson B. and Nilsson S., Phys. Rev. **99**, 1615 (1955) или Проблемы современной физики, в. 1 (1956), стр. 186.
70. Turchinetz W. and Pringle R., Phys. Rev. **103**, 1000 (1956).
71. Collins T., Nier A. and Johnson, W., jr., Phys. Rev. **84**, 717 (1951).

72. Johnson, W., jr., Phys. Rev. 88, 1213 (1952).
 73. Liebl H. and. Ewald H., Zs. Naturforsch. 11a, 406 (1956).
 74. Smith L. and Damm C., Rev. Sci. Instr. 27, 638 (1956).
 75. Smith L., частн. сообщения по ¹⁵, исправлено по ⁸⁹.
 76. Демирханов Р., Гуткин Т. и Дорохов В., Атомная энергия 2, 469 (1957).
 77. Демирханов Р., Гуткин Т. и Дорохов В., Атомная энергия 2, 544 (1957).
 78. Демирханов Р., Гуткин Т. и Дорохов В., в печати.
 79. Quisenberry K., Giese S. and Benson., J. Phys. Rev. 107, 1664 (1957).
 80. Johnson W., jr., and Bhanot V., Phys. Rev. 107, 1669 (1957).
 81. Eastman P., Isenor N., Bainbridge G. and Duckworth H., Phys. Rev. 103, 145 (1956).
 82. Smith L., Bull. Amer. Phys. Soc., Ser. II. 2, 223 (1957).
 83. Mattauch, J. Suppl. al. Vol. 6 del Nuovo Cimento, p. 254 (1957).
 84. Кравцов В., ЖЭТФ 33, 1508 (1957).
 85. Бярбраир Б. и Слив Л., Доклад на Всесоюзной конференции по ядерным реакциям. Тезисы стр. 74 (1957).
 86. New Nuclear Data, 1955, 1956, 1957 Cumulation. Nuclear Science Abstracts 9, 10, № 24B, 11, № 12B.
 87. Duckworth H., Rev. Mod. Phys. 29, 767 (1957).
 88. Giese C. and Benson J., частное сообщение; будет опубликовано в Phys. Rev. (1958).
 89. Smith L., частное сообщение; будет опубликовано в Phys. Rev. (1958).
 90. Lidoisky L., Rev. Mod. Phys. 29, 773 (1957).
 91. Van-Patter D. and Whaling W., Rev. Mod. Phys. 29, 757 (1957).
 92. Duckworth H., Progress in Nuclear Physics. 6, 138 (1957).
-