

МАССЫ ИЗОТОПОВ H, D, He⁴ и C¹²

Р. А. Демирханов, Т. И. Гуткин, В. В. Дорохов, А. Д. Руденко

Приводятся результаты новых измерений масс изотопов H, D, He⁴ и C¹², выполненных на масс-спектрографической установке с разрешающей способностью 70 000—100 000. Полученные данные хорошо согласуются с соответствующими значениями масс, полученными из баланса энергии ядерных реакций.

Введение

Тщательное измерение масс изотопов является одним из наилучших средств для установления такой важной ядерной характеристики, как энергия связи нуклонов в ядре. Массы изотопов средних и тяжелых элементов в большинстве случаев известны недостаточно точно или вообще не измерены. Поэтому их измерение представляет большой интерес в связи с необходимостью экспериментального определения энергии связи нуклонов в ядре, особенно в области «магических чисел» средних и тяжелых ядер.

Масс-спектрографическое определение масс изотопов средних и тяжелых элементов производится путем использования промежуточных дублетов, связывающих измеряемый изотоп с O¹⁶.

В большинстве случаев промежуточные дублеты состояются из ионов различных соединений изотопов H, D, C¹² (C_m¹²H_n или C_m¹²D_n), поэтому точность измерений масс изотопов средних и тяжелых элементов в первую очередь определяется погрешностью измерений масс изотопов H, D, C¹².

За последние годы появилось несколько работ, посвященных прецизионным измерениям масс изотопов легких элементов на масс-спектрографах [1]—[5]. Кроме того, на основании данных о полных энергиях ядерных

реакций вычислены массы изотопов со значительной точностью [6], [7].

Значения масс H и D, полученные разными авторами, хорошо согласуются друг с другом, в то время как значения, полученные для массы C¹², имеют разброс, выходящий далеко за пределы приводимых погрешностей измерений (см. табл. 3).

Отсутствие достоверных данных для массы изотопа C¹² исключает возможность использования ионов группы C_m¹²H_n для точной градуировки масс-спектрографической шкалы в области средних и тяжелых масс.

Это обстоятельство заставило нас провести новые измерения масс изотопов H, D, He⁴ и C¹².

Описание установки

Схема масс-спектрографической установки, на которой производилось измерение масс, представлена на рис. 1. Прибор разработан и сконструирован М. Арденне при участии Г. Егера и авторов настоящей работы. Ионно-оптическая схема аппарата является вариацией системы Бейбриджа—Иордана.

Формирование ионного пучка производится следующим образом: ионы генерируются в плазменном источнике с одинарным контрагированием разряда. Напряжение дуги разряда 50—200 в при токе дуги 0,25—0,75 а. Ионы отсасываются через круглое (диаметр 0,15 мм) эмиссионное отверстие S₀ в аноде. Величина ускоряющего напряжения 35—45 кв. Входная щель S₁ шириной 5—10 м находится на расстоянии 10 мм от эмиссионной щели (S₀). На расстоянии 212 мм от входной щели расположена апертур-

ная щель S_2 размером $30 \times 1000 \mu$. Таким образом, апертура пучка составляла $\sim 7 \cdot 10^{-5}$. Средний радиус кривизны цилиндрического конденсатора равен 300 мм , угол раствора $\Phi_1 = 63^\circ 38'$.

В плоскости изображения цилиндрической линзы находится диафрагма со щелью S_3 размером от 200 до 500μ . Входная щель

сухих анодных батарей БАС-Г-80-Л-2,1, специально отобранных и периодически проверяемых на стабильность. Напряжение порядка $2000\text{--}3000 \text{ в}$ прикладывается симметрично, так что поверхность нулевого потенциала проходит посередине между обкладками конденсатора. Питание обмоток электромагнита производится от аккумуля-

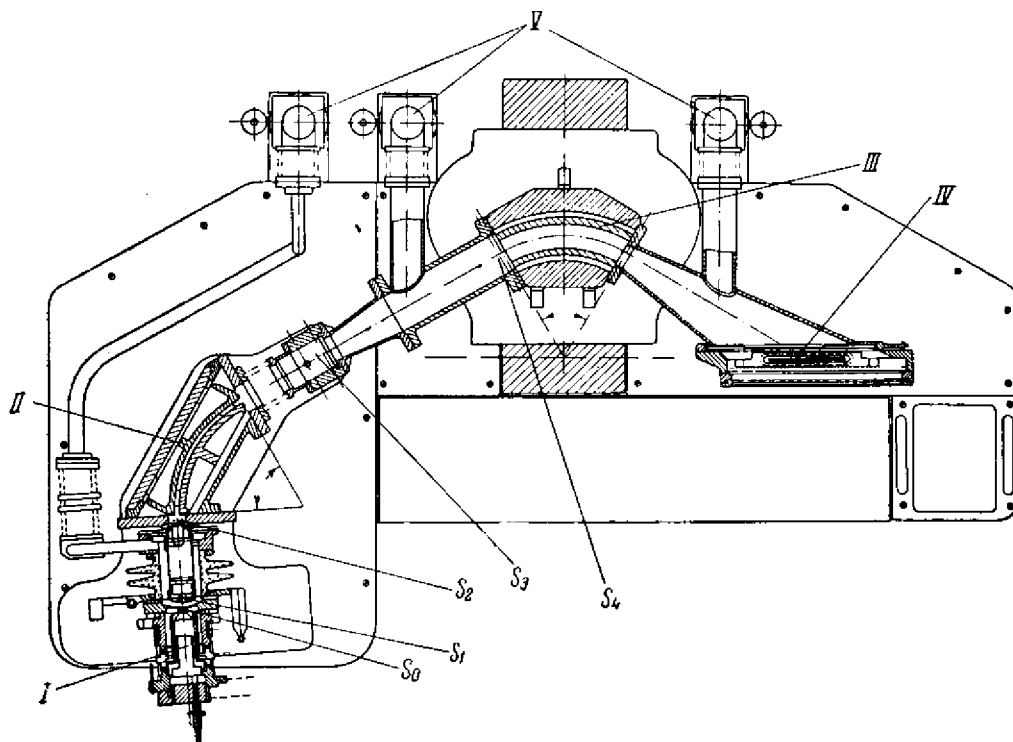


Рис. 1. Схема масс-спектрографа.

I —плазменный источник ионов; II —цилиндрическая электростатическая линза; III —магнитный анализатор; IV —фотокамера с ионно-оптическим преобразователем; V —диффузионные насосы; S_0 —эmissive отверстие; S_1 —главная входная щель; S_2 —апертурная щель; S_3 —промежуточная щель; S_4 —входная щель магнитного анализатора.

ионного пучка магнитного анализатора S_4 имеет размеры $500 \times 1000 \mu$. Зазор между полюсами магнита— 3 мм . Радиус кривизны для основной массы m_0 в магнитном поле равен 300 мм . Угол раствора $\Phi_m = 60^\circ$. Кардинальные точки электрической и магнитной линз расположены симметрично. Плоскость фотопластины находится под углом 30° к оптической оси.

Источник высокого напряжения для ускорения ионов представляет собой однополупериодный выпрямитель с большой постоянной времени. Потенциал на пластины цилиндрического конденсатора подается от

торных батарей емкостью 135 ачас . Рабочее давление в области цилиндрического конденсатора $5\text{--}6 \cdot 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$

Средняя разрешающая способность, определенная по полуширине линии, измеренной на компараторе, составляет $70\,000$. Максимальная разрешающая способность, полученная на дублете $\text{C}^{12}\text{H}_2\text{--N}^{14}$ в результате как компараторных, так и микрофотометрических измерений, составляет по линии C^{12}H_2 — $100\,000$, а по N^{14} — $120\,000$. Съемка производилась на фотопластинах типа «Шуман» с размером $6 \times 18 \text{ см}$. На каждую фотопластину снималось 14 спектров.

Применение плазменного источника с большой плотностью тока ионной эмиссии ($\sim 50 \text{ ма/см}^2$) и малым разбросом ионов по скоростям ($\sim 2 \text{ е}$) позволяет проводить измерения с малой апертурой пучка при сравнительно коротких экспозициях (0,1—5 сек.).



Рис. 2. Внешний вид установки.

При столь малых экспозициях снижаются требования к стабильности питающих устройств магнита и цилиндрического конденсатора, а малая величина апертуры и небольшой разброс ионов по скоростям ($\Delta u/u \sim 5 \cdot 10^{-5}$) обеспечивают малую величину ошибок второго порядка и большую глубину резкости изображения.

Ионно-оптический преобразователь, расположенный в непосредственной близости от плоскости фотопластины, дает возможность визуально наблюдать спектр масс, устанавливая исследуемую группу линий в центре фокальной плоскости и следить за качеством спектра во время экспозиции по крайним линиям. Специальные приспособления для юстировки ионно-оптической системы (кварцевые пластины с флуоресцирующим слоем, смотровые окна, устройства для регулировки ширины и положения щелей в откачанной установке), а также вакуумные затворы для смены фотопластины и отделения источника от вакуумной системы установки позволяют относительно быстро подготавливать масс-спектрограф к съемке.

Дисперсия и шкала масс

В составе масс-спектра всегда имеются линии, ионы которых отличаются друг от друга по массе на величину массы атома водорода $M(\text{H}) = 1,008142 \pm 2 \cdot 10^{-6} \text{ м. ед.}$, например: $\text{N}^{14+} - \text{N}^{14}\text{H}^+ - \text{N}^{14}\text{H}_2^+ - \text{N}^{14}\text{H}_3^+$.

Выбрав некоторые из этих линий в качестве «базисных», можно экспериментально проградуировать шкалу масс, т. е. для заданного участка фотопластины определить $\Delta M(\Delta x, x)$ в виде следующей аппроксимации:

$$\Delta M = A(\Delta x) + B(\Delta x)^2 + \dots \quad (1)$$

При наличии на спектрограмме расположенных на расстоянии x_1 и x_2 «базисных линий» с известным различием масс M_1 и M_2 (рис. 3) константы A и B определяются из следующих соотношений:

$$A = \frac{M_1 x_2^2 - M_2 x_1^2}{x_1 x_2^2 - x_2 x_1^2}, \quad (2)$$

$$B = \frac{M_2 x_1^2 - M_1 x_2^2}{x_1^2 x_2 - x_1 x_2^2}. \quad (3)$$

Практически при фотографировании исследуемого дублета в центре фотопластины отклонения от линейности оказываются настолько малыми, что необходимость в квадратичной интерполяции отпадает, и тогда

$$\Delta M = A(\Delta x), \quad (4)$$

где значение A может быть с удовлетворительной точностью вычислено по формуле

$$A = \frac{2M\text{H}}{x_1 + x_2}. \quad (5)$$

При фотографировании дублетов, образованных ионами малых масс ($M < 13$), «базисные линии» оказываются расположенными вне пределов фотопластины, поэтому для определения связи $\Delta M(\Delta x, x)$ в этом случае приходится пользоваться линиями вспомогательного спектра (например, $\text{C}_4\text{H}_3 - \text{C}_4\text{H}_4 - \text{C}_4\text{H}_5$ или $\text{O} - \text{OH} - \text{OH}_2$), зарегистрированными на одной пластине с исследуемым дублетом при тех же ионно-оптических параметрах установки. В качестве вспомогательного спектра целесообразно пользоваться ионами группы OH_n , так как масса изотопа кислорода O^{16} принимается равной 16, а значения массы атома водорода, полученные различными методами, довольно хорошо согласуются между собой. Линии

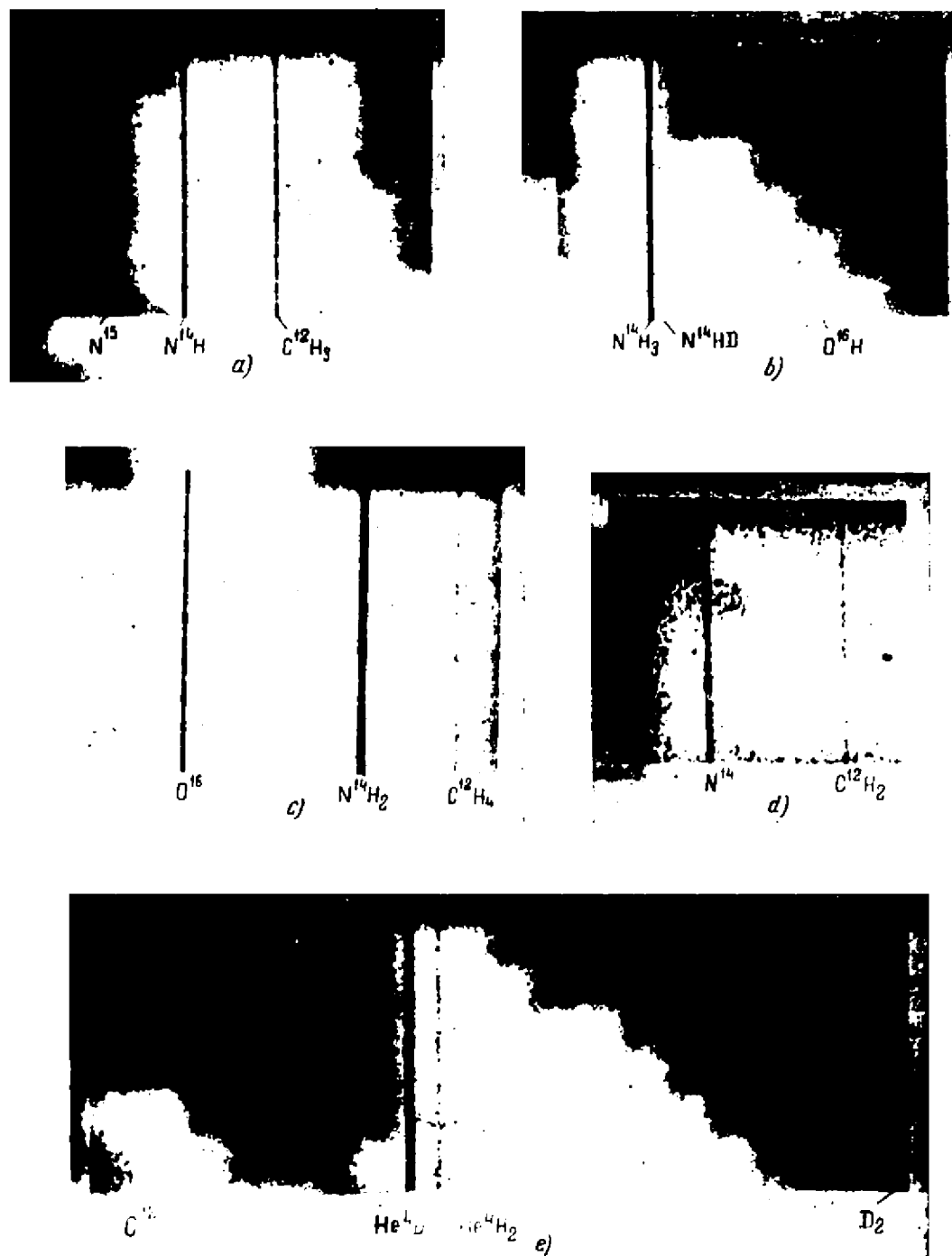


Рис. 3. Фотографии масс-спектрографических дублетов.

a) триплет $N^{15}-N^{14}H-C^{12}H$ ($\times 40$); b) триплет $N^{14}H_3-N^{14}HD-O^{16}H$ ($\times 40$); c) триплет $O^{16}-N^{14}H_2-C^{12}H_4$ ($\times 40$); d) дублет $N^{14}-C^{12}H_2$ ($\times 60$); e) квартет $^{1/2}C^{12}-He^4D-He^4H_2-D_2$ ($\times 40$).

вспомогательного масс-спектра подводится к фотопластине путем изменения напряженности магнитного поля. В наших опытах, ввиду отсутствия строгой линейности в изменении дисперсии вдоль фотопластины, напряженность магнитного поля варьировалась так, чтобы центральная «базисная линия» вспомогательного спектра располагалась непосредственно под исследуемым дублетом в центре пластины. В этом случае связь ΔM с соответствующим расстоянием Δx между линиями дублета определяется выражением

$$\Delta M = \Delta x \frac{M_{\text{ср}}}{D}, \quad (6)$$

где $M_{\text{ср}}$ —среднее значение массы ионов, входящих в исследуемый дублет, и D —дисперсионная постоянная, определяемая из соотношения

$$D = \frac{M_1}{A} \quad (7)$$

по данным вспомогательного спектра (M_1 —масса, соответствующая центральной базисной линии с точностью 10^{-5}).

Для определения ΔM с точностью 10^{-6} м. ед. значение $M_{\text{ср}}$ может быть вычислено по данным для масс изотопов легких элементов. Как легко видеть, для этого достаточно знать величину $M_{\text{ср}}$ с точностью до 10^{-4} . Имеющиеся в настоящее время значения масс для изотопов самых легких элементов в пределах необходимой точности (10^{-4}) совпадают между собой. Для примера в табл. 1 приведены значения $M_{\text{ср}}$, полученные разными авторами для дублета D—He⁴.

Таблица 1

Автор измерения	Значение в м. ед.
Эвальд [1]	$4,01662 \pm 10 \cdot 10^{-6}$
Нир [4]	$4,016674 \pm 14 \cdot 10^{-6}$
Огата и Мацука [3]	$4,016680 \pm 12 \cdot 10^{-6}$
Ли, Валинг и др. [6]	$4,016672 \pm 14 \cdot 10^{-6}$

Влияние полей рассеяния магнитного анализатора учитывалось введением дополнительного коэффициента «магнитной коррекции» в выражение (6).

Во всех случаях расстояние между линиями дублетов определялось путем десятикратного измерения на компараторе с оптическим увеличением изображения в 140 или

280 раз. Для исключения субъективных ошибок измерения Δx одного и того же дублета повторялись тремя или четырьмя операторами

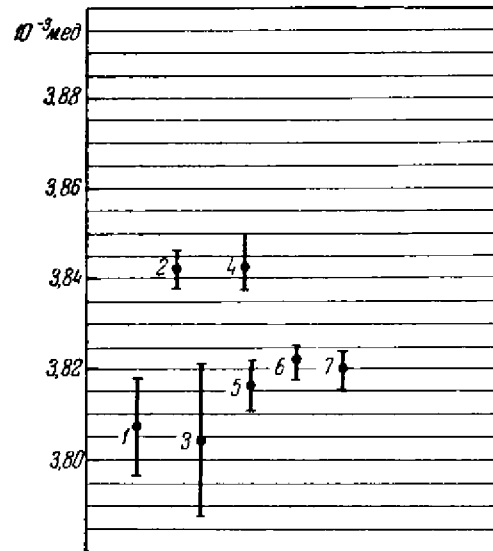


Рис. 4. Масс-дефект $M-A$ изотопа C¹² по данным:

1—Эвальда, 1951 г. [1]; 2—Нира, 1951 г. [4]; 3—Ли, Валинга и др., 1951 г. [6]; 4—Огата и Мацука, 1953 г. [3]; 5—Дикеленкова и Зыриной, 1952 г. [7]; 6—Маттауха и Блери, 1954 г. [2]; 7—настоящей работы.

ми. Окончательное значение Δx определялось как среднее значение из 10—12 дублетов, взятых из 3—4 различных фотографий.

Результаты измерения

Массы изотопов Н, D, He⁴ и C¹² находились из следующих соотношений:

$$H = \frac{1}{16} O + \frac{3}{8} \alpha + \frac{1}{8} \beta + \frac{1}{16} \gamma,$$

$$D = \frac{1}{8} O - \frac{1}{4} \alpha + \frac{1}{4} \beta + \frac{1}{8} \gamma,$$

$$He^4 = \frac{1}{4} O - \frac{1}{2} \alpha + \frac{1}{2} \beta + \frac{1}{4} \gamma - \delta,$$

$$C^{12} = \frac{3}{4} O - \frac{3}{2} \alpha - \frac{1}{2} \beta + \frac{3}{4} \gamma,$$

где

$$\alpha = \Delta M (H_2 - D),$$

$$\beta = \Delta M \left(D_3 - \frac{1}{2} C^{12} \right),$$

$$\gamma = \Delta M (C^{12}H_4 - O),$$

$$\delta = \Delta M (D_2 - He^4),$$

соответственно разности масс дублетов H_2-D , $D_3-^{1/2}C^{12}$, $C^{12}H_4-O$, D_2-He^4 .

Окончательные результаты измерения ΔM этих дублетов приведены в табл. 2. (Значения разности масс ионов указаны в тысячных долях массовых единиц.) Вычисленные значения масс H , D , He^4 и C^{12}

Маттаухом и Биери [2] и Ниром и сотрудниками [4], [5] не превышают возможных ошибок. Измеренная нами величина массы изотопа He^4 совпадает со значением, полученным из ядерных реакций, и в пределах ошибок измерения согласуется с данными Эвальда, Нира, Огата и Мацуда. Значения

Таблица 2

Разность масс дублетов в 10^{-3} м. ед.

Автор измерения	H_2-D	D_2-He^4	$D_3-^{1/2}C^{12}$	$C^{12}H_4-O^{16}$
Данные настоящей работы .	$1,5483 \pm 0,001$	$25,600 \pm 0,002$	$42,298 \pm 0,007$	$36,388 \pm 0,004$
Эвальд (1951) [1]	$1,5503 \pm 0,0015$	$25,604 \pm 0,008$	$42,292 \pm 0,012$	$36,371 \pm 0,012$
Нир (1951) [4], [5]	$1,5519 \pm 0,00172$	$25,612 \pm 0,009$	—	$36,427 \pm 0,008$ *)
Огата и Мацуда (1953) [3] .	$1,5492 \pm 0,0008$	$25,603 \pm 0,006$	$42,301 \pm 0,009$	$36,419 \pm 0,006$
Ли, Валинг и др. (1951) [6]	$1,5494 \pm 0,0024$	$25,596 \pm 0,008$	$42,302 \pm 0,016$	$36,372 \pm 0,019$
Маттаух и Биери (1954) [2]	$1,5473 \pm 0,0076$	$25,6060 \pm 0,0047$	$42,3254 \pm 0,0052$	$36,4086 \pm 0,0038$

*) Collins, Nier and Johnson, Phys. Rev. 84, 717 (1951).

Таблица 3

Массы изотопов *) H , D , He^4 и C^{12}

Автор измерения	$M(H)$	$M(D)$	$M(He^4)$	$M(C^{12})$
Эвальд (1951) [1]	$1,008141 \pm 2$	$2,014732 \pm 4$	$4,003860 \pm 12$	$12,003807 \pm 11$
Ли, Валинг и др. (1951) [6]	$1,008142 \pm 3$	$2,014735 \pm 6$	$4,003873 \pm 15$	$12,003804 \pm 17$
Огата и Мацуда (1953) [3] .	$1,008145 \pm 2$	$2,014741 \pm 3$	$4,003879 \pm 9$	$12,003844 \pm 6$
Нир (1951) [4], [5]	$1,008146 \pm 3$ **)	$2,014778 \pm 8$	$4,003944 \pm 19$	$12,003842 \pm 4$ **)
Маттаух и Биери (1954) [2] .	$1,0081459 \pm 0,5$	$2,01474444 \pm 0,9$	$4,0038797 \pm 1,6$	$12,003823 \pm 3,3$
Данные настоящей работы .	$1,008142 \pm 1$	$2,014736 \pm 2$	$4,003872 \pm 4$	$12,003820 \pm 5$

*) Ошибки измерения приведены в μ м. ед. 10^{-6} .

**) Collins, Nier and Johnson, Phys. Rev. 84, 717 (1951).

представлены в табл. 3. В этих же таблицах приводятся соответствующие данные, полученные за последние годы другими авторами.

Заключение

Приведенные в настоящей работе значения масс изотопов H и D достаточно хорошо соответствуют данным, полученным Ли, Валингом и др. [6] из ядерных реакций и Эвальдом [1] на масс-спектрографе. Расхождения наших значений масс H и D и данных, полученных Огата и Мацуда [3],

для массы изотопа C^{12} , как это видно из табл. 3, можно разбить на две группы (рис. 5). Значения массы для C^{12} , полученные Ниром [4], [5] и Огата и Мацуда [3], отличаются от соответствующих данных Эвальда [1], Маттауха, Биери [2], Ли, Валинга и др. [6] и Дзелепова и Зыряновой [7] примерно на $3 \cdot 10^{-5}$ м. ед. при ошибках измерений менее 10^{-5} м. ед.

Полученная нами величина для массы C^{12} почти совпадает с данными Маттауха и Биери и в пределах ошибок измерения находится в хорошем соответствии со значе-

ниями, полученными Ли, Валингом и др. [6] и Эвальдом [1]. Такое хорошее совпадение

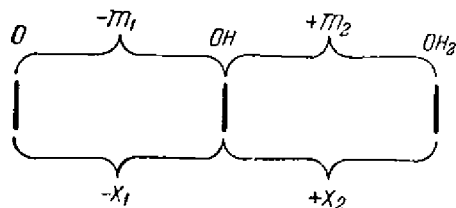


Рис. 5. Спектр для определения дисперсии шкалы.

значений для массы C¹², полученных различными независимыми методами, говорит о том, что данные для массы C¹² этой группы измерений являются более достоверными.

В то же самое время существование такого расхождения между данными этой груп-

пы измерений и данными Нира [4], [5] и Огата и Мацуда [3] указывает на наличие еще не изученных систематических ошибок измерений, обусловленных по всей вероятности ионно-оптическими особенностями масс-спектрографов.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность М. Арденне за ценные советы и внимание к работе, а также Г. Еггеру, И. А. Чухину и В. Роггенбуку за оказанную ими помощь при наладке установки.

Примечание. После того как настоящая статья была написана, появилось сообщение Нира и сотр. [10] о новых предварительных значениях масс, полученных на новом масс-спектрометре с максимальной разрешающей способностью около 100 000: H = 1,0081439 ± 5; D = 2,0147380 ± 10; C¹² = 12,0038174 ± 18.

ЛИТЕРАТУРА

1. H. Ewald, Z. Naturforsch. 6a, 293 (1951).
2. J. Mattau ch und R. Bieri, Z. Naturforsch. 9a, 303 (1954).
3. K. Ogata and H. Matsuda, Phys. Rev. 89, 27(1953).
4. A. Nier and T. Roberts, Phys. Rev. 81, 507 (1951).
5. A. Nier, Phys. Rev. 81, 624 (1951).
6. C. Li, W. Whaling, W. Fowler and C. Lauritsen, Phys. Rev. 83, 512 (1951).
7. Б. С. Желепов и Л. Н. Зырянова, УФН 48, 465(1952).
8. Drummond, Phys. Rev. 97, 1004 (1955).
9. A. H. Wapstra, Physica 21, 367 (1955).
10. A. Nier и др. Bull. Amer. Phys. Soc. № 7, 18 (1955).