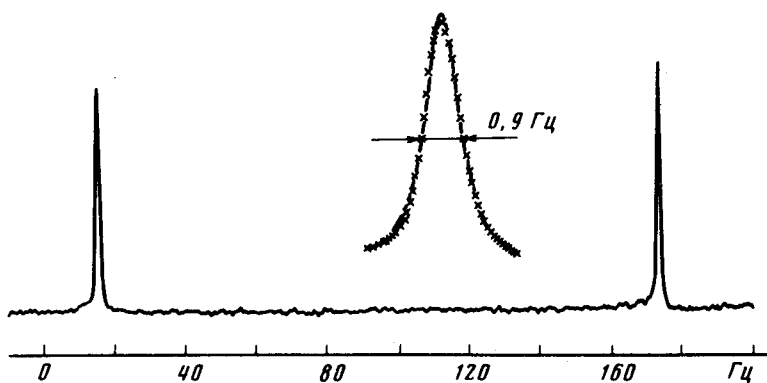


ОБ ИЗМЕРЕНИИ РАЗНОСТИ МАСС ИОНОВ ГЕЛИЯ-3 И ТРИТИЯ МЕТОДОМ ИОН-ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

*Э.Т.Липпмаа, Р.Й.Пиквер, Э.Р.Суурмаа, Я.О.Паст,
Ю.Х.Пускар, И.А.Коппель, А.А.Таммик*

Методом ион-циклотронного резонанса высокого разрешения в сильном поле (4,7Т) показано, что разность масс ионов гелия-3 и трития составляет 18588 ± 3 эВ.

В 1980 г. Любимовым с сотрудниками было показано, что электронное антинейтрино может иметь ненулевую массу покоя порядка $14 \leq M_\nu \leq 46$ эВ^{1, 2}. Возможное существование ненулевой массы нейтрино является одной из важнейших проблем современной физики элементарных частиц и космологии³. Определение массы покоя электронного антинейтрино из граничной энергии β -спектра трития требует очень точного, независимого измерения разности масс исходного и конечного атома β -распада. Эта разность масс отличается от соответствующей разности масс ионов на разницу первых потенциалов ионизации атомов гелия и трития (10,9828 эВ).



Спектр ион-циклотронного резонанса смеси гелия-3 и трития (80 накоплений). Ширина линии на полувысоте 0,9 Гц. Уширение за счет фильтрации сигнала 0,5 Гц. При приближении линии к лоренцевой теоретическая кривая указана сплошной линией, а экспериментальный результат — точками на этой линии

Результаты измерения разности атомных масс ${}^3\text{T} - {}^3\text{He}$ приведены в нескольких статьях ^{4, 5}, но отличаются значительным разбросом полученных значений. Лучшее масс-спектроскопическое разрешение ($4 \cdot 10^5$) получено Смитом ⁶. Разработанный недавно метод ион-циклотронного резонанса с импульсным возбуждением сигнала и последующим фурье-преобразованием открыл путь к значительному улучшению разрешающей способности масс-спектрометрии, до 10^7 и более ⁷. Первый спектрометр ион-циклотронного резонанса, построенный в ИХБФ АН ЭССР в 1980 году ⁸, давал разрешение до 10^5 , а новый вариант на базе ЯМР-спектрометра типа СХР-200 со сверхпроводящим магнитом с высокой однородностью магнитного поля (4,7 Т, диаметр теплового отверстия 89 мм) фирмы Брукер (ФРГ) обладает ион-циклотронным разрешением до $6 \cdot 10^7$ (наименьшая ширина линии 0,3 Гц на частоте 24 МГц), что обеспечивает точность измерения резонансных частот ионов ${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{T}$ до 0,001 Гц с помощью численного приближения измеренных линий к лоренцевым на ЭВМ спектрометре.

Высоковакуумная система спектрометра оборудована магниторазрядными насосами НОРД-100 и VacIon (30 л/с) и обеспечивает вакуум до $2 \cdot 10^{-9}$ торр. Позолоченная измерительная ячейка с размерами $33 \times 33 \times 40$ мм³ находится в центре соленоида в однородном магнитном поле. Ионы генерировались в ячейке электронным ударом (от 22 до 100 В и от 0,5 до 100 мс), после чего все ионы, кроме ${}^3\text{He}^+$ и ${}^3\text{T}^+$, удалялись сканируемым от 10 до 150 кГц радиочастотным импульсом аксиального возбуждения. Исследуемые ионы возбуждались затем радиочастотным импульсом на орбиты с радиусом менее 3 мм. Индуцируемый в боковых пластинах ячейки сигнал свободной прецессии накапливался (10 — 100 накоплений) в памяти ЭВМ Aspect-2000. Частоты пиков определяли после преобразования Фурье при помощи численного приближения лоренцевой кривой. Разность масс ионов вычисляли по формуле

$$m_{{}^3\text{T}^+} - m_{{}^3\text{He}^+} = \frac{m_{{}^3\text{T}^+}}{f_{{}^3\text{He}^+}} (f_{{}^3\text{He}^+} - f_{{}^3\text{T}^+}),$$

где $f_{{}^3\text{He}^+} = 23,935988$ МГц, $f_{{}^3\text{T}^+} = 23,935830$ МГц и $m_{{}^3\text{T}^+} = 2,8089192$ эВ.

Следует отметить, что релятивистская поправка и поправка за счет аксиального движения ионов при напряжении удерживания 2В равна ~ 130 Гц, что ведет к погрешности в разности масс ионов менее 0,1 эВ.

Максимальный разброс измеренных разностей частот $f_{{}^3\text{He}^+} - f_{{}^3\text{T}^+}$ составляет от 158,22 до 158,55 Гц в опытах, где ширина линии равна $1,5 \pm 0,5$ Гц и отношение пиковых значений линий ${}^3\text{He}^+ / {}^3\text{T}^+$ находится в пределах от 0,7 до 2,0. Исходя из статистического гауссового распределения, получим для среднего значения разности частот $f_{{}^3\text{He}^+} - f_{{}^3\text{T}^+} = 158,39 \pm 0,03$ Гц, что дает для разности масс ионов 18588 ± 3 эВ или для разности масс атомов 18599 ± 3 эВ.

Литература

1. Козик В.С., Любимов В.А., Новиков Е.Г., Нозик В.З., Третьяков Е.Ф. ЯФ, 1980, 32, 301.

2. *Lubimov V.A., Novikov E.G., Nozik V.Z., Tretyakov E.F., Kosik V.S.* Phys. Lett., 1980, 94B, 266.
3. *Зельдович Я.Б., Хлопов М.Ю.* УФН, 1981, 135, 45.
4. *Smith L.G., Koets E., Wapstra A.H.* Phys. Lett., 1981, 102B, 114.
5. *Simpson J.J.* Phys. Rev. D, 1981, 23, 649.
6. *Smith L.G., Wapstra A.H.* Phys. Rev. C, 1975, 11, 1392.
7. *Allemann M., Kellerhals H.P., Wanczek K.P.* Chem. Phys. Lett., 1980, 75, 329.
8. *Пиквер Р., Суурмаа Э., Сюгис А., Таммик А., Липпмаа Э.* Изв. АН ЭССР, серия физ-математическая, 1983, 32, 37.

Институт химической и
биологической физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
29 апреля 1984 г.