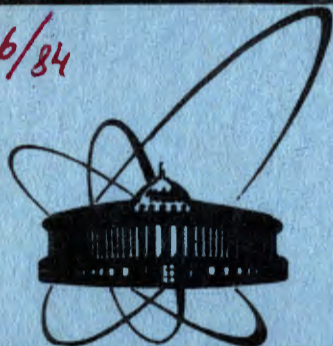


84-294

3526/84



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

P13-84-294

Г.М.Тер-Акопьян, Г.М.Арзуманян, Д.Д.Богданов,
Ю.А.Быковский, З.Козловски, О.А.Орлова,
А.М.Родин, С.М.Сильнов, С.В.Степанцов,
В.А.Тимаков, Г.Н.Флеров

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ
МАСС-СПЕКТРОМЕТР "ЛИДИЯ"

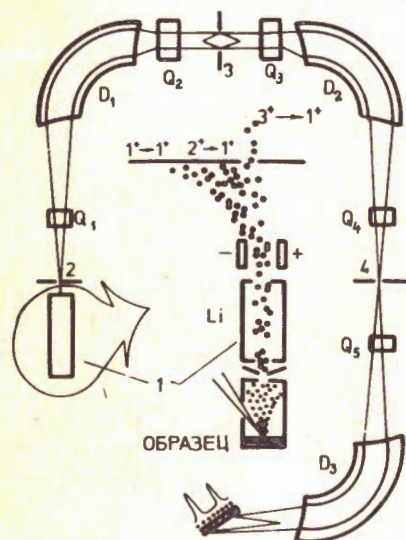
Направлено в журнал "НИМ"

1984

Вопросы о новой области стабильности ядер в диапазоне $Z = 110-114$, $N = 184$, о синтезе этих ядер и о их поисках в природе рассматривались в ряде работ /см.^{1/}/. К настоящему времени можно считать установленным, что содержание сверхтяжелых элементов /СТЭ/ в веществе Солнечной системы не превышает 10^{-14} грамма на грамм. Этот предел следует из экспериментов, в которых с помощью нейтронных детекторов измерялась активность спонтанного деления некоторых каменных метеоритов. Наблюдавшиеся множественные нейтронные события могли быть объяснены как результат спонтанного деления ранее неизвестного долгоживущего природного нуклида, по-видимому, относящегося к области СТЭ^{2/}. Аналогичные события были зарегистрированы для продуктов переработки некоторых гидротермальных рассолов^{3/}. Для идентификации нового, гипотетического нуклида /в первую очередь определения его массового числа/ необходимы поиск земных объектов, более богатых по его содержанию, и проведение химических экспериментов по концентрированию этого нуклида.

Требованиям высокочувствительного и оперативного анализа, который необходим в процессе этой работы, может удовлетворить масс-спектрометрический метод с непосредственной регистрацией ионов.

В качестве ультрачувствительных масс-спектрометров используются ускорители частиц, например, тандем-генераторы /см.^{4/}.



Системы идентификации ядер на основе тандем-генераторов позволили достигнуть чувствительности $10^{-10} - 10^{-11}$ ат./ат. при поисках СТЭ^{5,6/}.

Мы хотели бы обратить внимание на возможности, которые может дать масс-спектрометрия, основанная на подходе, более или менее близком к традиционному. Масс-спектрометр с лазерным источником ионов, паровой или газовой мишенью, с последующим отбором ионов, испытавших перезарядку, например,

Рис. Схема ультрачувствительного масс-спектрометра ЛИДИА /см. текст/.

$3^+ \rightarrow 1^+$, и многоступенчатой системой разделения для снижения фона рассеянных ионов основных массовых линий спектра может обеспечить чувствительность 10^{-14} ат./ат. при весе образца около 100 мг и времени анализа 1 час. Остановимся подробнее на отдельных основных узлах предлагаемого масс-спектрометра и их характеристиках /см. рисунок/.

ЛАЗЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ

Для уточнения некоторых характеристик лазерного источника ионов нами был изготовлен и исследован модельный вариант. Полученные результаты ^{7/} взяты за основу в дальнейших числовых оценках. Число ионов, извлекаемых через щель источника за одну посылку лазера /мы применяли лазер на алюминиево-иттриевом гранате с модулированной добротностью/ при плотности мощности излучения 4×10^9 Вт/см² равно $1-3 \times 10^{11}$, что составляет 5×10^{-4} от полного числа ионов в лазерной плазме и $5-15 \times 10^{-5}$ от полного числа испаренных атомов образца. Эмиттанс ионного пучка при ускоряющем напряжении 40 кВ равен 75 мм·мрад и, по оценкам, может быть уменьшен в 3 раза с 4-электродной вытягивающей оптикой с ускоряющим напряжением 100 кВ.

При плотности потока излучения $\geq 5 \cdot 10^8$ Вт/см² происходит безфракционное испарение вещества образца и ионизация атомов, причем относительный выход ионов зависит только от их массового числа и пропорционален $A^{-1/2}$. Количество ионов с зарядом 1^+ , 2^+ , 3^+ последовательно уменьшается, и $10 \leq I^{+1}/I^{+3} \leq 20$.

Благодаря высокой температуре лазерного факела выход заряженных молекул минимален по сравнению с другими источниками ионов. Мы изучали выход молекул под действием лазерного пучка на металлы и на окислы и наблюдали слабый выход заряженных молекул окислов $1-3 \times 10^{-3}$ от полного ионного тока/, энергия которых составляла менее 2 эВ, в то время как энергия атомных ионов равнялась 50-600 эВ. Используя энергетическую селекцию ионов, мы могли исключить эти заряженные молекулы до уровня $\leq 5 \cdot 10^{-6}$ полного ионного тока, что соответствовало пределу чувствительности метода детектирования. В токе двух- и трехкратно заряженных ионов при достигнутом уровне чувствительности выход заряженных молекул не наблюдался. В планируемой установке мы намерены использовать для анализа только ионы с начальным зарядом 3^+ .

ПЕРЕЗАРЯДНОЕ УСТРОЙСТВО

Основное назначение этого узла состоит в том, чтобы достигнуть перезарядки $3^+ \rightarrow 1^+$. Конструктивно перезарядный узел состоит из газовой или паровой мишени и электростатического деф-

лктора для отбора ионов с заданной энергией. Для перевода 30-40% ионов с зарядом 3^+ в состояние 1^+ достаточно $2 \cdot 10^{15}$ ат./см^{2*}. При такой толщине мишень из атомов с малым атомным весом практически не влияет на угловое и энергетическое распределение частиц в пучке.

Вторым назначением перезарядного устройства является дополнительное уменьшение содержания молекул в перезаряженном пучке ионов за счет их развала в атомных соударениях. В литературе имеются данные /см. /8/ / об изучении процесса диссоциации молекул при прохождении через различные мишени. Можно ожидать, что при прохождении через паровую или газовую мишень названной толщины поток заряженных молекул будет уменьшаться, по крайней мере, в 1000 раз.

Акцептанс перезарядного устройства существенно больше акцептанса ионнооптической системы источника и анализатора. Поэтому ослабление пучка на перезарядном устройстве будет практически полностью определяться вероятностью перезарядки.

ИОННО-ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

Ионно-оптическая система масс-спектрометра должна обеспечивать разделение ионов по массам и снижение до необходимого уровня фона от рассеянных и перезарядившихся на остаточном газе ионов основных массовых линий, а также фона от продуктов диссоциации молекул. Целесообразно разделить эти две задачи, т.е. вначале осуществить выделение ионов исследуемого массового диапазона (М/М ~ 5%) с высоким коэффициентом очистки, а затем провести анализ с необходимым массовым разрешением. Для достижения требуемого уровня предварительной очистки предполагается использование стигматической ахроматической системы. Полученное ахроматическое изображение, в свою очередь, может служить источником для следующего каскада масс-спектрометра. Используя диафрагмы в местах промежуточных изображений, получаем многоступенчатую систему с коэффициентом очистки на один каскад $10^6 - 10^7$.

Рассмотрим подробнее представленный на рисунке вариант ультравысокочувствительного масс-спектрометра, который создается в настоящее время на основе стандартных магнитов и линз.

Пучок ионов извлекается из ионного источника 1 и фокусируется на диафрагму 2. До того как попасть на диафрагму 2 пучок ионов проходит через мишень и электростатический конденсатор. Напряжение на пластинах конденсатора подбирается таким образом,

* Эта толщина мишени получена на основании поперечных сечений, измеренных нами при перезарядке ионов Та с энергией 100 кэВ на азоте: $\sigma_{2^+ \rightarrow 1^+} = 5 \cdot 10^{-16}$ см², $\sigma_{3^+ \rightarrow 2^+} = 1,2 \cdot 10^{-14}$ см².

чтобы на диафрагму 2 могли попасть только те ионы, которые имели при выходе из ионного источника заряд 3^+ и испытали перезарядку $3^+ \rightarrow 1^+$ на мишени. Часть ионно-оптической системы, состоящая из квадрупольных линз Q1 - Q4 и дипольных магнитов D1 и D2, представляет систему, которая дает ахроматическое изображение диафрагмы 2 в плоскости диафрагмы 4. В средней плоскости /3/ эта система создает промежуточное изображение с дисперсией $1,1 \text{ см}/\% \text{ Вр}$. Изображение, полученное на диафрагме 4, служит источником для масс-анализатора, состоящего из дипольного магнита D3 и квадрупольной линзы Q5. Дисперсия в фокальной плоскости этого анализатора составляет $2 \text{ см}/\% \text{ Вр}$. Разрешение по массе - 500.

Радиус кривизны центральной траектории в дипольных магнитах равен 1 м, угол поворота - 90° , ширина магнитной дорожки - 15 см, межполюсное расстояние - 8 см. Апертура квадрупольных линз Q1 - Q5 - около 15 см и максимальный градиент - 6Т/м. Для сведения к минимуму основных aberrаций системы использованы корректирующие элементы в виде искривленных границ дипольных магнитов. Коэффициент трансмиссии системы близок к 100% для пучка с эмиттансом около 20 мм·мрад в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Все расчеты ионно-оптических свойств проведены с использованием стандартной программы TRANSPORT^{/9/}.

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Для достижения максимальной степени очистки слабых массовых линий от ионов основы система вакуумной откачки должна обеспечивать во всем объеме после диафрагмы 2 средний вакуум не хуже 10^{-6} Па, по всей /около 15 м/ длине установки, при относительно малом / $\leq 15 \text{ см}$ / диаметре камеры. В качестве откачного агрегата выбрана комбинация пространственно совмещенных магниторазрядного насоса и титанового геттерного насоса. Камера - цельнометаллическая /нержавеющая сталь/, прогреваемая до 400°C - снабжена нужным набором клапанов и вакуумных датчиков.

В объеме ионного источника и перезарядного устройства не планируется получение сверхвысокого вакуума. Как показали эксперименты на макете, газовыделение из облучаемого лазером образца сложного состава может достигать 10^{-4} Па·м³ на импульс. Поэтому ионный источник и перезарядное устройство будут отделены от остальной части камеры системой дифференциальной откачки. В модельных экспериментах в камере объемом 150 л был получен вакуум $6 \cdot 10^{-9}$ Па.

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ

Планируется использование детекторов на основе микроканальных пластин. Предусматривается использование детекторных модулей

в двух режимах: а/ работа в токовом режиме с однокоординатным и многокоординатным съемом информации при анализе образцов на содержание элементов основы и примесей с содержанием более 10^{-8} ат./ат.; б/ работа в режиме счета одиночных ионов с многокоординатным съемом информации и временной селекцией при поисках СТЭ и анализе образцов на содержание микропримесей на уровне ниже 10^{-8} ат./ат..

Так как лазерный источник работает в импульсном режиме с длительностью токовой посылки 10^{-5} с и частотой до 100 Гц, временная селекция обеспечивает за счет сокращения времени регистрации снижения фона, обусловленного собственным фоном детектора и рассеянными ионами. Например, при длительности экспозиции 10^6 импульсов лазера время регистрации составит всего 10 с и фон детектора составит около 2 имп. на массовую линию. Микроканальные пластины позволяют регистрировать в фокальной плоскости масс-анализатора за одну лазерную посылку до 10^4 ионов на массовую линию. Это дает в режиме счета одиночных ионов динамический диапазон регистрируемых ионных токов до $5 \cdot 10^9$.

ВЫВОДЫ

В заключение мы приведем оценку чувствительности, которая может быть достигнута на таком приборе. С учетом выхода трехзарядных ионов и потерь при перезарядке получаем 10^{10} ионов на один импульс лазера. При частоте посылок, равной 30 Гц, может быть извлечено через диафрагму 2 около 10^{15} ионов за 1 час. Расход вещества при этом составит $2 \cdot 10^{20}$ атомов или 70 мг в пересчете на Рb. В течение этого времени на детектирующее устройство поступит 10 ионов искомого нуклида, если его концентрация в образце равна 10^{-14} ат./ат.. Реальная чувствительность может оказаться несколько хуже приведенной оценки из-за остаточных заряженных молекул, фона и не 100%-эффективности детектора. Даже если чувствительность составит 10^{-12} ат./ат., масс-спектрометр будет полезен при поисках СТЭ. Его преимуществом в этой задаче также является то, что он допускает как проведение поиска в диапазоне масс $\Delta/\Delta A = 20$, так и точную идентификацию по массе с разрешением около 500.

ЛИТЕРАТУРА

1. Flerov G.N., Ter-Akopian G.M. Rep.Prog.Phys., 1983, 46, p. 817.
2. Флеров Г.Н. и др. ЯФ, 1977, 26, с. 449.
3. Flerov G.N. et al. Z.Phys., 1978, A292, p. 43.
4. Litherland A.E. et al. Nucl.Instr.and Meth., 1981, 186, p. 463.

5. Stephens W., Klein J., Zurmuhle E. Phys.Rev., 1980, C21, p. 1664.
6. Schwarzschild A.Z., Thieberger P., Cumming J.B. Bull.An. Phys.Soc., 1978, 22, p. 94.
7. Арзуманян Г.М. и др. ОИЯИ, P7-82-749, Дубна, 1982.
8. Gemmel D.S. Nucl.Instr. and Meth., 1980, 170, p.41.
9. Brown K.L. et al. CERN Report 80-04, 1980.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D2,4-83-179	Труды XV Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Дубна, 1982.	4 р. 80 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1984 года.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Тер-Акопьян Г.М. и др.

13-84-294

Высокочувствительный масс-спектрометр "ЛИДИЯ"

Описан проект сооружаемого в Объединенном институте ядерных исследований ультрачувствительного масс-спектрометра с лазерным источником ионов и многоступенчатой системой сепарации, предназначенного для поиска сверхтяжелых элементов / $A > 250$ /. Показано, что можно создать прибор с относительной и абсолютной чувствительностью 10^{-14} атомов на атом и $2 \cdot 10^6$ атомов соответственно, получаемой при времени анализа около одного часа.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод авторов

Ter-Akopian G.M. et al.

13-84-294

The Ultrasensitive Mass-Spectrometer "LIDIA"

An ultrasensitive mass-spectrometer, under construction at the Joint Institute for Nuclear Research, using a laser ion source and a multi-stage separation system has been designed to search for superheavy elements ($A > 250$). It has been shown that it is possible to build a device with relative and absolute sensitivities of respectively $\sim 10^{-5}$ ppb and $2 \cdot 10^6$ atoms for an analysis duration of about 1 hour.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1984