

ДИНАМИКА ЗАРЯДОВЫХ СОСТОЯНИЙ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПУЧКОВ ИОНОВ ЗОЛОТА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ Cu- И Au-ФОЛЬГИ В ПРОЕКТЕ NICA

В. В. Бородич^a, О. И. Мешков^{a,b}, С. В. Снятков^a, И. Ю. Толстихина^c,

А. В. Тузиков^d, В. П. Шевелько^{c}, Н. Уинклер^{c**}*

^a *Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук
630090, Новосибирск, Россия*

^b *Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, Россия*

^c *Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
119991, Москва, Россия*

^d *Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)
141980, Дубна, Московская обл., Россия*

^e *Фирма АТОС БДС Р&Д
38130, Эшироль, Франция*

Поступила в редакцию 1 апреля 2019 г.,
после переработки 19 апреля 2019 г.
Принята к публикации 25 апреля 2019 г.

В Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна, в рамках нового проекта NICA создается ускорительный комплекс с целью изучения свойств плотной барионной материи. В проекте NICA предполагается использование ускоренных ионных пучков от протонов до ионов золота с релятивистскими энергиями до 4.5 ГэВ/н. Для планирования экспериментов необходима информация об эффективности выхода «голых» ядер золота, образующихся при прохождении пучка ионов Au с энергиями порядка несколько сотен МэВ/н через фольгу специализированной обдирочной станции на выходе из бустера ускорителя. В настоящей работе на основе расчетов сечений обдирки и перезарядки, а также динамики зарядовых состояний ионов золота, сталкивающихся с медной и золотой фольгами при энергиях 400 и 600 МэВ/н, определены оптимальные условия (материал и толщина фольги, энергия иона) образования фракций «голых» ядер золота с вероятностью 80–90 %.

DOI: 10.1134/S0044451019090049

1. ВВЕДЕНИЕ

NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) — новый российский проект с международным участием, осуществляемый с 2013 г. в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна [1], для получения интенсивных пучков тяжелых ионов и поляризованных ядер с целью изучения новых форм барионной материи, в том числе

кварк-глюонной плазмы. Источником ионных пучков для коллайдера NICA является инжекционный комплекс, включающий тяжелоионный источник КРИОН электронно-струнного типа, тяжелоионный линейный ускоритель ЛУТИ (физический пуск осуществлен в 2016 г.), сверхпроводящий бустерный синхротрон и модернизированный сверхпроводящий ускоритель Нуклотрон, построенный в 1993 г. Коллайдер NICA позволит ускорять и сталкивать тяжелые ионы, вплоть до ядер золота, в широком диапазоне энергий. Предполагаются также эксперименты с пучками поляризованных ядер. Планируемая кинетическая энергия протонов составляет 12.6 ГэВ, а тяжелых ионов — порядка

* E-mail: shevelkovp@lebedev.ru

** N. Winckler

4.5 ГэВ/н. Значительная часть экспериментальной программы посвящена ускорению и столкновению встречных пучков ядер золота, поскольку они обладают всеми необходимыми для поставленных целей свойствами. После ввода в строй коллайдер NICA станет частью мощного ускорительного сообщества [2–4], но со своей уникальной экспериментальной программой.

В процессе конструирования канала транспортировки ионов из бустера в Нуклотрон возникла необходимость выбора материала и толщины фольги для станции обдирки (см. ниже). Параметры фольги существенно влияют на динамику ионного пучка в канале, и поэтому должны быть известны с хорошей точностью. Для их оптимизации потребовалось провести изложенные ниже расчеты, так как необходимые сечения обдирки и перезарядки ионов Au при релятивистских энергиях для пучка с широким зарядовым составом в литературе отсутствуют.

В работе [5] рассмотрены экспериментальные и теоретические проблемы по обдирке релятивистских ионов золота на коллайдере RHIC, а в работе [6] дан обзор по измерениям характеристик атомных процессов с участием релятивистских тяжелых ионов, проводимых на ускорителе в GSI, Дармштадт, а также приведено описание программ CHARGE и GLOBAL, широко используемых для исследования динамики зарядовых состояний пучков ионов при прохождении через газовые мишени и фольги. Расчет сечений ионизации водородоподобных ионов золота Au^{78+} атомами аргона при энергиях $E = 1–30$ ГэВ/н выполнен в работе [7] в рамках симметричного эйконал-приближения.

Недавно в работе [8] на основе компьютерных программ CAPTURE и RICODE-M, разработанных в ФИАНе, представлены результаты расчетов сечений взаимодействия и времен жизни пучков релятивистских ионов U^{88+} , U^{90+} , U^{92+} , Sn^{49+} и Sn^{50+} в области энергий $E = 400$ МэВ/н–5 ГэВ/н для строящегося накопительного кольца HESR (High-Energy Storage Ring) проекта FAIR (Германия), а в работе [9] — для ионов Xe^{39+} и Pb^{q+} , $q = 59, 64, 71, 79, 80, 81$ при энергиях $E = 1–200$ ГэВ/н для ускорителей LHC и SPS (ЦЕРН) проекта Gamma Factory [10].

В настоящей работе с помощью программ CAPTURE и RICODE-M выполнены расчеты сечений обдирки и перезарядки ионов золота Au^{q+} , $q = 30–79$, сталкивающихся с Cu- и Au-фольгами при релятивистских энергиях 400 и 600 МэВ/н. Полученные сечения использовались в качестве входных данных в программе BREIT [11] для расчета динамики фракций зарядовых состояний $F_q(x)$

ионов золота, т.е. для определения зависимости величин $F_q(x)$ от толщины мишени x , равновесных фракций $F_q(\infty)$, равновесных толщин мишени x_{eq} и других характеристик. На основе полученных результатов определены оптимальные условия для образования «голых» ядер золота Au^{79+} при столкновении с Cu- и Au-фольгами: $F_{79}(\infty) \approx 90\%$, $x_{eq} \approx 160$ мг/см² для Cu-фольги при энергии 600 МэВ/н, и $F_{79}(\infty) \approx 80\%$, $x_{eq} \approx 60$ мг/см² для Au-фольги при той же энергии. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными и результатами расчетов равновесных фракций $F_q(\infty)$ и равновесных толщин x_{eq} по программе GLOBAL, приведенными в работе [6].

2. ОБДИРКА ИОНОВ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA

В проекте NICA предусматривается обдирка ионов золота при промежуточных энергиях до 600 МэВ/н. Станция обдирки располагается на кольце бустерного синхротрона в качестве элемента системы быстрого вывода пучка из бустера, также включающей в себя ударный магнит, две секции септум-магнита и подсистему локального бампа замкнутой орбиты [12]. Начальный пучок ионов Au^{31+} после заброса ударным магнитом в канал транспортировки бустер–Нуклотрон проходит обдирочную фольгу, в результате чего на входе в септум-магнит образуется многокомпонентный (по зарядам ионов) пучок с меньшей магнитной жесткостью (25 Тл·м до обдирки и 9.8 Тл·м после обдирки). Доля ионов Au^{79+} в пучке после обдирочной фольги должна быть не менее 80%. Ионы Au^{78+} , составляющие большинство из нецелевых зарядностей, сепарируются от пучка «голых» ядер золота при дальнейшем пролете в канале и сбрасываются на фундамент здания Нуклотрона, используемый как поглотитель [13]. На рис. 1 приведена трехмерная модель вакуумного узла станции обдирки, содержащего три обдирочных мишени с целью возможности выбора оптимальной толщины фольги; при этом мишени дистанционно вводятся в область пучка.

Точный выбор материала фольги обдирочной мишени и ее толщина играют существенную роль, поскольку определяют скорость накопления ядер золота в коллайдере, а значит, и его среднюю светимость. После прохождения через фольгу пучок приобретает дополнительные угловой и энергетический разбросы, с чем связан разрыв оптических функций канала (см. рис. 2). Вследствие этого для об-



Рис. 1. Трехмерная модель узла станции обдирки

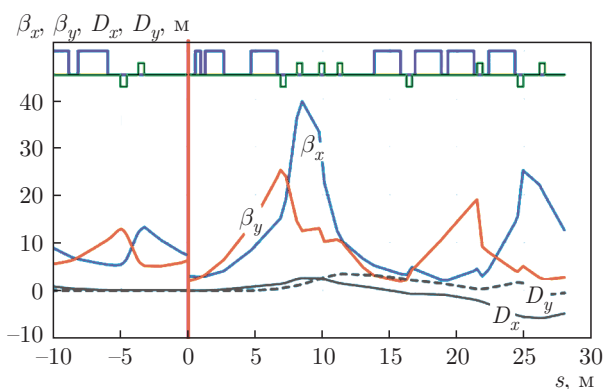


Рис. 2. (В цвете онлайн) Оптические функции [14] и места расположения магнитных элементов в канале транспортировки ионных пучков как функции расстояния s в ускорителе. Большие (синие) прямоугольники в верхней части рисунка — дипольные магниты, маленькие (зеленые) прямоугольники — квадрупольные магниты. Место расположения обдирочной фольги обозначено вертикальной красной линией

дирочной мишени выгоднее использовать вещество с большим атомным номером Z , чтобы уменьшить толщину фольги и угловой разброс, приобретаемый в ней пучком. Фольга размещена вблизи минимума β -функций канала, это позволяет уменьшить возни-

кающее при обдирке ионов приращение эмиттанса пучка:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{\langle \theta \rangle^2}{\varepsilon_0} \beta \right)^{1/2},$$

где ε_0 и ε_1 — эмиттансы пучка соответственно до и после столкновения с фольгой, $\langle \theta \rangle^2$ — среднеквадратичный угловой разброс, набираемый в фольге.

Важным фактором являются также конструкционные свойства материала обдирочной мишени: пластичность и теплопроводность. В итоге выбор был сделан в пользу фольги из меди или золота. Для этих элементов были вычислены сечения обдирки и перезарядки при указанных выше энергиях, а также динамика зарядовых состояний ионов золота.

3. УРАВНЕНИЯ БАЛАНСА ЗАРЯДОВЫХ ФРАКЦИЙ. СРЕДНИЙ И РАВНОВЕСНЫЙ ЗАРЯДЫ ИОННОГО ПУЧКА

Динамика ионного пучка, проходящего через газовую, твердотельную (фольга) или плазменную мишень, определяется зависимостью зарядовых фракций пучка $F_q(x)$ от толщины мишени x (глубины проникновения). Фракция $F_q(x)$ характеризует вероятность иону иметь заряд q на толщине x . С ростом x фракции $F_q(x)$ сильно меняются по величине из-за конкуренции двух основных процессов — ионизации и рекомбинации налетающих ионов при взаимодействии с частицами мишени. При достаточно большой толщине мишени x_{eq} , называемой равновесной толщиной, фракции $F_q(x)$ становятся постоянными величинами, не зависящими от дальнейшего роста толщины, $x > x_{eq}$, и переходят в так называемый равновесный режим, при котором $F_q(x) \equiv F_q(\infty) = \text{const}$.

Расчет зарядовых фракций $F_q(x)$ обычно проводится путем численного решения уравнений баланса (дифференциальные уравнения первого порядка), в которых коэффициентами являются сечения ионизации и рекомбинации налетающих ионов. Для газовых или твердотельных мишеней уравнения баланса имеют вид [15]

$$\frac{dF_q(x)}{dx} = \sum_{q' \neq q} [\sigma_{q'q} F_{q'}(x) - \sigma_{qq'} F_q(x)] \quad (1)$$

с условием нормировки

$$\sum_q F_q(x) = 1 \quad (2)$$

и начальным условием при $x = 0$:

$$F_q(x = 0) = A_q, \quad \sum_q A_q = 1, \quad (3)$$

где σ_{jk} — сечения одно- и многоэлектронной ионизации иона атомом мишени или сечения обдирки (EL, electron loss) при $k > j$ и сечения перезарядки (ЕС, electron capture) при $k < j$. Условие нормировки (2) выполняется для всех значений толщин мишени x .

Равновесные фракции $F_q(\infty)$ находятся при условии $dF_q(x)/dx = 0$ путем численного решения алгебраических уравнений, в которые переходят уравнения баланса (1), (2):

$$0 = \sum_{q' \neq q} [\sigma_{q'q} F_{q'}(\infty) - \sigma_{qq'} F_q(\infty)], \quad (4)$$

$$\sum_q F_q(\infty) = 1.$$

При учете только одноэлектронных сечений обдирки и перезарядки, $|q - q'| = 1$, система уравнений (4) имеет точное аналитическое решение, при котором равновесные фракции $F_q(\infty)$ выражаются через отношение одноэлектронных сечений [6, 15].

В случае модели, учитывающей n фракций, решение системы (4) имеет вид

$$F_1(\infty) = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_{12}}{\sigma_{21}} \left(1 + \frac{\sigma_{23}}{\sigma_{32}} \left(1 + \frac{\sigma_{34}}{\sigma_{43}} \left(1 + \dots \frac{\sigma_{n-2,n-1}}{\sigma_{n-1,n-2}} \left(1 + \frac{\sigma_{n-1,n}}{\sigma_{n,n-1}} \right) \right) \dots \right) \right)},$$

$$F_{i+1}(\infty) = F_i(\infty) \frac{\sigma_{i,i+1}}{\sigma_{i+1,i}}, \quad 1 \leq i \leq n - 2, \quad (5)$$

$$F_n(\infty) = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} F_i(\infty),$$

где σ_{jk} — сечения обдирки при $j < k$ и сечения перезарядки при $j > k$. В равновесном режиме число актов ионизации $q \rightarrow q + 1$ равно числу актов рекомбинации $q + 1 \rightarrow q$ для фиксированной энергии ионов, поэтому величины равновесных фракций $F_q(\infty)$ не зависят от заряда налетающих ионов при $x = 0$ [16]. Это фундаментальное свойство равновесных фракций используется, например, при детектировании тяжелых и сверхтяжелых элементов с помощью газонаполненных сепараторов [17].

Важными характеристиками динамики зарядовых состояний ионного пучка в среде являются средний $q(x)$ и равновесный $\langle q \rangle$ заряды:

$$q(x) = \sum_q q F_q(x), \quad (6)$$

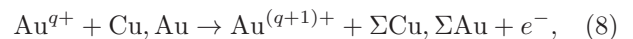
$$\langle q \rangle = \sum_q q F_q(\infty). \quad (7)$$

Функция $q(x)$ характеризует эволюцию среднего заряда ионного пучка в зависимости от толщины мишени, а $\langle q \rangle$ — средний заряд в равновесном режиме. Очевидно, что в общем случае величина $\langle q \rangle$ не является целым числом.

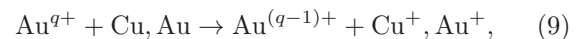
4. ЧИСЛЕННЫЕ РАСЧЕТЫ СЕЧЕНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И ДИНАМИКИ ЗАРЯДОВЫХ СОСТОЯНИЙ ИОНОВ ЗОЛОТА С ЭНЕРГИЯМИ 400 И 600 МэВ/н

В этом разделе рассмотрена задача о динамике зарядовых состояний ионов золота (заряд ядра $Z = 79$) с релятивистскими энергиями 400 и 600 МэВ/н при столкновении с медными и золотыми фольгами. Целью работы является нахождение оптимальных условий взаимодействия пучок-фольга, т. е. энергии ионов, материала и толщины фольги для получения максимального выхода «голых» ядер золота Au^{79+} . Такая информация необходима для решения ряда вопросов на обдирочной станции комплекса NICA.

Расчет сечений взаимодействия ионов золота с атомами меди и золота проводился для следующих атомных процессов: обдирка, сечения EL:



перезарядка, сечения нерадиационной перезарядки NRC (non-radiative capture):



перезарядка, сечения радиационной перезарядки REC (radiative electron capture):

$$\text{Au}^{q+} + \text{Cu}, \text{Au} \rightarrow \text{Au}^{(q-1)+} + \text{Cu}^+, \text{Au}^+ + \hbar\omega. \quad (10)$$

В реакции (8) символ Σ означает, что атом мишени может возбудиться или ионизоваться, а $\hbar\omega$ в реакции (10) — излучаемый фотон. Процесс (10) аналогичен процессу радиационной рекомбинации на свободных электронах, но с тем отличием, что в (10) происходит захват связанных электронов атомов мишени. Полное сечение перезарядки определяется суммой сечений процессов (9) и (10):

$$\sigma_{EC} = \sigma_{NRC} + \sigma_{REC}. \quad (11)$$

В настоящей работе рассматриваются только одноэлектронные процессы (8)–(10), характерные для релятивистских энергий столкновения. При средних и низких энергиях наряду с одноэлектронными необходимо учитывать и многоэлектронные процессы, которые играют важную роль, так как их вклад в полные сечения достигает 50% и более (см., например, [18]).

Результаты расчетов эффективных сечений процессов ионизации и рекомбинации (8)–(11) и динамики зарядовых фракций ионов золота Au^{q+} с энергиями 400 и 600 МэВ/н как функции толщины фольги приведены на рис. 3–6. Сечения как функции заряда $q = 30\text{--}79$ приведены на верхних частях рисунков, а динамика зарядовых состояний как функция толщины фольги — на нижних рисунках. Расчеты сечений обдирки (EL) и перезарядки (NRC) проводились по программам RICODE-M [19] и CAPTURE [20] соответственно, а сечения REC — с помощью полуэмпирической формулы Крамерса и таблиц релятивистских сечений радиационной рекомбинации [21].

Расчет зарядовых фракций ионов золота как функции толщины мишени проводился по программе BREIT (Balance Rate Equations for Ion Transportation), доступной онлайн [22]. Программа основана на численном решении системы уравнений баланса (1) методом диагонализации матрицы взаимодействия ионов с газовыми, твердотельными и плазменными мишенями для числа фракций $3 \leq N_F \leq 200$ и описана в работе [11]. В программе BREIT информация о сечениях процессов (скоростях процессов для плазменных мишеней) задается во входном файле, примеры которого приведены на сайтах [22, 23].

Из результатов, представленных на рис. 3–6, видно, что сечения перезарядки EC много меньше сечений обдирки EL для всех рассмотренных зарядов

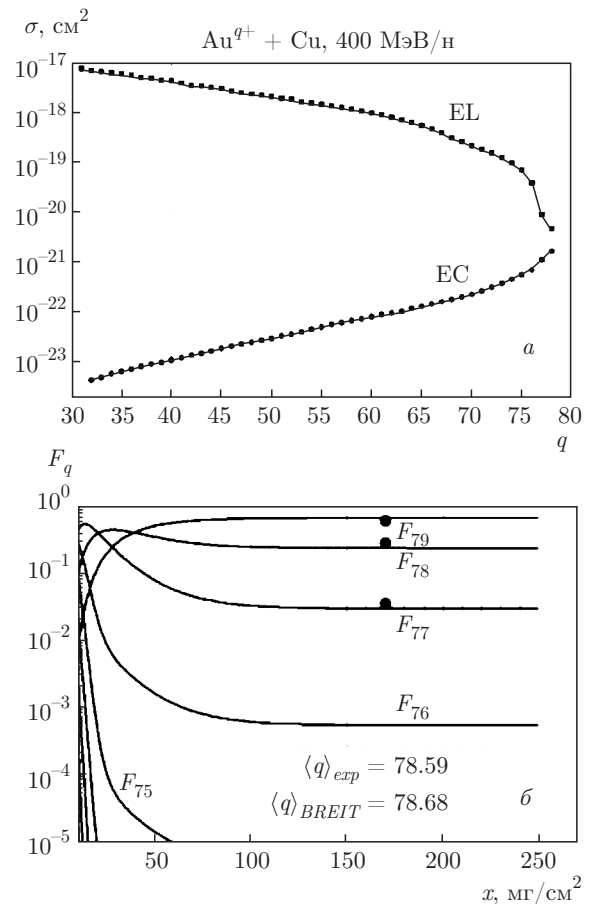


Рис. 3. Динамика взаимодействия ионов золота с медной фольгой при энергии 400 МэВ/н. а) Вычисленные сечения обдирки EL (8) и перезарядки EC (11) как функции заряда q ионов золота (см. текст). б) Зарядовые фракции $F_q(x)$ ионов золота как функции толщины фольги: сплошные кривые — расчет по программе BREIT с сечениями, приведенными на рис. а, кружки — эксперимент [6] для равновесных фракций голых ядер $F_{79}(x)$, H-подобных $F_{78}(x)$ и He-подобных $F_{77}(x)$ ионов золота. Приведены также величины средних равновесных зарядов $\langle q \rangle$ (6), полученные из эксперимента [6] и по программе BREIT

ионов $30 < q \leq 79$, за исключением области зарядов, близких к заряду ядра золота $Z_n = 79$. Три наибольшие равновесные фракции $F_{79}(\infty)$, $F_{78}(\infty)$ и $F_{77}(\infty)$, соответствующие голым ядрам, H- и He-подобным ионам соответственно, хорошо согласуются с экспериментальными данными, а средний равновесный заряд для всех рассмотренных случаев изменяется в небольших пределах $\langle q \rangle = 78.4\text{--}78.9$ и близок к заряду ядра золота $Z_n = 79$.

Более детальное сравнение равновесных фракций золота $F_{79}(\infty)$, $F_{78}(\infty)$ и $F_{77}(\infty)$ при взаимодействии релятивистских ионов золота с Cu-

Таблица 1. Величины равновесных фракций $F_{79}(\infty)$, $F_{78}(\infty)$ и $F_{77}(\infty)$ ионов золота (%), т. е. выход голых ядер, H- и He-подобных ионов, при взаимодействии ионов с Cu- и Au-фольгами при энергиях 400 и 600 МэВ/н. Экспериментальные данные и результаты программы GLOBAL — из работы [6], результаты программы BREIT — настоящая работа

Фольга, энергия иона	Программа, эксперимент	$F_{79}(\infty)$	$F_{78}(\infty)$	$F_{77}(\infty)$
Cu, 400 МэВ/н	GLOBAL	61	28	3.4
	BREIT	72	25	3.1
	Эксперимент	68	26	2.0
Cu, 600 МэВ/н	GLOBAL	85	13	0.50
	BREIT	89	11	0.37
	Эксперимент	85	11	0.38
Au, 400 МэВ/н	GLOBAL	39	39	12
	BREIT	50	40	9.4
	Эксперимент	44	42	8.8
Au, 600 МэВ/н	GLOBAL	68	24	2.3
	BREIT	79	19	1.3
	Эксперимент	80	17	1.1

и Au-фольгами при энергиях 400 и 600 МэВ/н представлено в табл. 1, где кроме экспериментальных данных и результатов расчетов по программе BREIT приведены результаты из работы [6], полученные с помощью программы GLOBAL. Программы GLOBAL и CHARGE [6] используются для расчета динамики зарядовых состояний ионов в газовых и твердотельных мишенях и доступны онлайн [24, 25]. Программа CHARGE основана на решении уравнений баланса в трехкомпонентной модели Аллисона [26] и используется для описания трех наибольших фракций, например, голых ядер, H- и He-подобных ионов, при релятивистских энергиях столкновения. В отличие от CHARGE, программа GLOBAL может считать до 28 фракций и учитывать потери энергий ионов в веществе. В случае только трех фракций результаты, полученные с помощью обеих программ, практически совпадают. Сравнение экспериментальных данных по динамике релятивистских тяжелых ионов с результатами расчетов по программам GLOBAL, CHARGE и BREIT приведено в работе [18].

Из табл. 1 видно, что экспериментальные данные по равновесным фракциям $F_q(\infty)$ находятся в

хорошем согласии с результатами расчетов [6] по программе GLOBAL. Экспериментальные данные и расчеты других авторов по динамике неравновесных фракций $F_q(x)$ ионов золота при энергиях 400 и 600 МэВ/н отсутствуют. Из табл. 1 и рис. 5 видно, что в случае Au-фольги и энергии 400 МэВ/н вычисленные фракции $F_{79}(\infty)$ и $F_{78}(\infty)$ близки друг другу по величине, в отличие от других рассмотренных случаев, что подтверждается экспериментальными данными [6]. Фракции $F_{79}(\infty)$, $F_{78}(\infty)$ и $F_{77}(\infty)$ программы BREIT в табл. 1 практически совпадают с величинами, вычисленными по формулам (5) для равновесных фракций при учете только трех основных фракций (голые ядра, H- и He-подобные ионы).

В табл. 2 приведены равновесные толщины медных и золотых фольг, вычисленные по программам GLOBAL и BREIT, а также параметры пучка ионов золота на выходе, вычисленные по программе ATIMA, доступной онлайн [27]. Видно, что расчеты равновесных ширин по обеим программам согласуются в пределах 30–40 %, а энергетические потери пучка составляют 1–2 % от энергии падающего пучка.

Таблица 2. Параметры взаимодействия пучка ионов золота с Cu- и Au-фольгами при энергиях 400 и 600 МэВ/н. x_{eq} — равновесная толщина фольги. Данные пучка ионов золота на выходе из фольги (последние три столбца) вычислены по программе АТІМА [27]

Фольга	Энергия иона, МэВ/н	x_{eq} , мг/см ² , BREIT, наст. работа	x_{eq} , мг/см ² , GLOBAL [6]	Потери энергии пучка [27], МэВ/н	Ширина пучка ионов на выходе по энергии [27], МэВ/н	Ширина рассеяния пучка ионов на выходе по углу [27], мрад
Cu	400	160	110	7	0.06	0.74
Cu	600	170	120	6	0.07	0.52
Au	400	44	35	3	0.04	0.73
Au	600	60	45	3	0.05	0.57

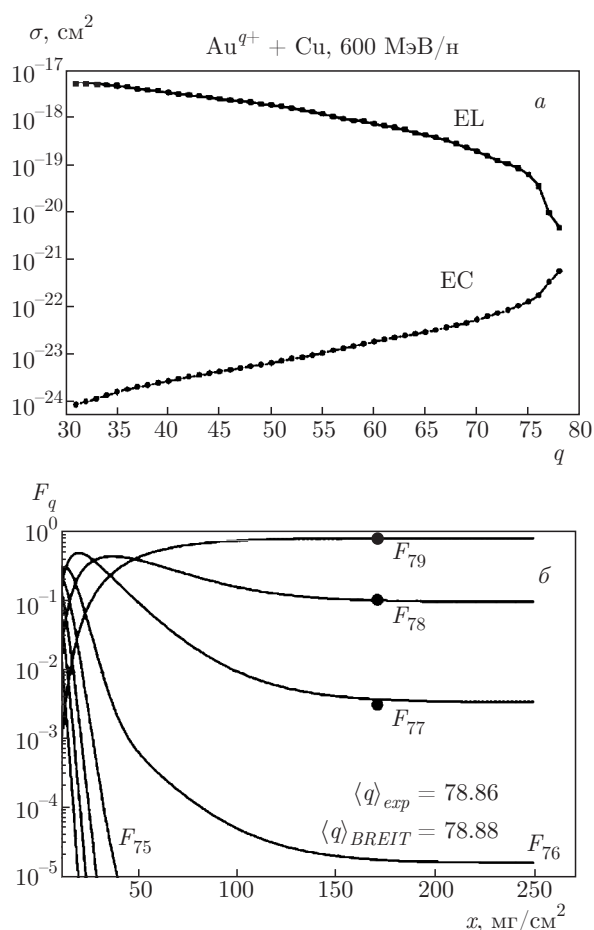


Рис. 4. Характеристики взаимодействия ионов золота с медной фольгой при энергии 600 МэВ/н. Обозначения такие же, как на рис. 3

Из рис. 3–6 и табл. 1, 2 можно определить оптимальные условия для образования голых ядер золота при столкновении с Cu- и Au-фольгами. Для Cu-фольги максимальный выход ядер золота составляет 90 % при толщине фольги $x_{eq} \approx 160$ мг/см² и энергии 600 МэВ/н, а для Au-фольги — соответственно 80 % при толщине фольги $x_{eq} \approx 60$ мг/см² и энергии 600 МэВ/н. Заметим, что вычисленные в настоящей работе величины 90 % и 80 % для максимального выхода фракций голых ядер золота в равновесном режиме согласуются с экспериментальными данными в пределах 5 %.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача об обдирке релятивистских ионов золота при прохождении через медную и золотую фольги для нахождения оптимальных условий максимального выхода голых ядер ионов золота, необходимых для реализации запланированных экспериментов в проекте NICA. Для этой цели по программам, разработанным в ФИАНе, вычислены сечения обдирки и перезарядки ионов золота Au^{q+} с зарядами $q = 30-79$ при столкновении с атомами Cu и Au при заданных энергиях 400 и 600 МэВ/н. Полученные величины сечений использовались в качестве входных данных для программы BREIT, созданной для расчета динамики фракций зарядовых состояний ионов как функции толщины мишени (глубины проникновения).

Расчеты зарядовых фракций ионов золота и сравнение с имеющимися экспериментальными данными и расчетами других авторов показали:

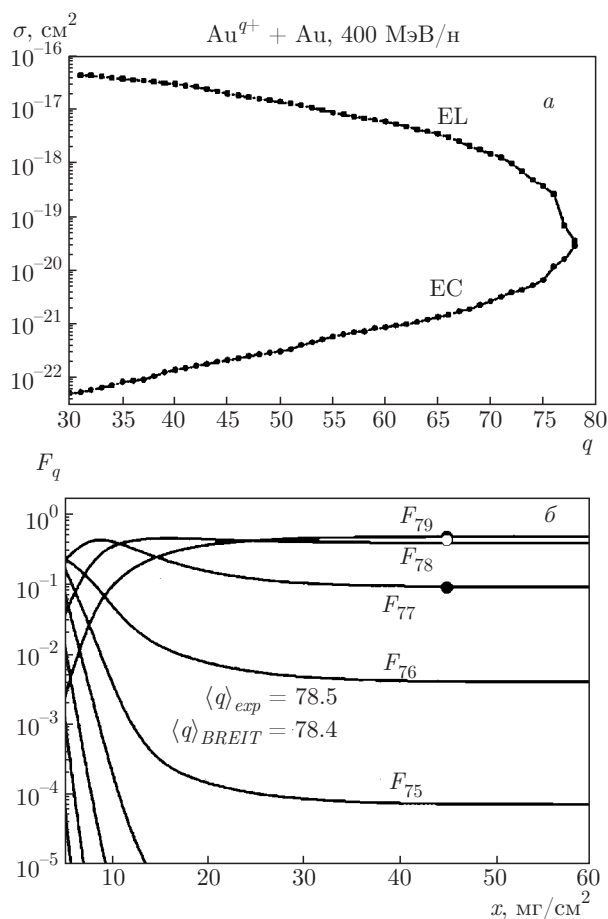


Рис. 5. Характеристики взаимодействия ионов золота с золотой фольгой при энергии 400 МэВ/н. Обозначения такие же, как на рис. 3 за исключением экспериментальных данных: темные кружки — фракции голых ядер $F_{79}(x)$ и He-подобных $F_{77}(x)$, светлый кружок — фракция H-подобных $F_{78}(x)$ ионов золота, эксперимент [6]

1) образование фракций голых ядер возможно только в равновесном режиме с вероятностью 90 % при использовании медной фольги толщиной 160 мг/см² и с вероятностью 80 % для золотой фольги толщиной 60 мг/см², в обоих случаях при энергии 600 МэВ/н;

2) полученные результаты для оптимальных условий образования голых ядер золота в равновесном режиме хорошо согласуются с экспериментальными данными и результатами расчетов других авторов;

3) результаты показали надежность и хорошую точность используемых программ для расчета эффективных сечений и динамики зарядовых состояний тяжелых многозарядных ионов при релятивистских энергиях столкновений.

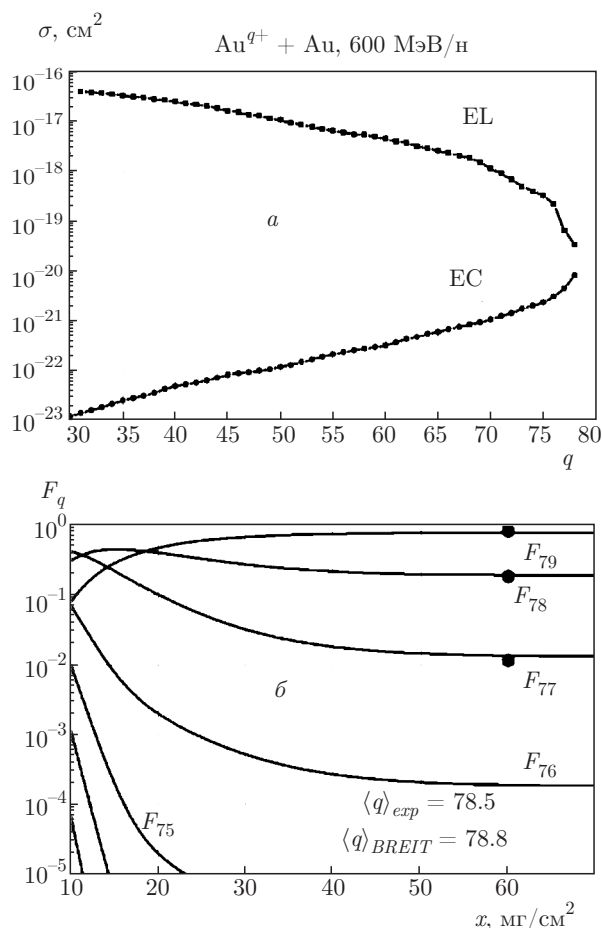


Рис. 6. Характеристики взаимодействия ионов золота с золотой фольгой при энергии 600 МэВ/н. Обозначения такие же, как на рис. 3

Благодарности. Авторы благодарны И. Н. Мешкову и Ю. Литвинову за интерес к работе и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. URL: <http://nica.jinr.ru/>.
2. URL: <https://home.cern/science/accelerators/large-hadron-collider/>.
3. URL: <https://www.bnl.gov/RHIC/>.
4. URL: <https://fair-center.eu/>.
5. P. Thieberger et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **11**, 011001 (2008).
6. C. Scheidenberger et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **142**, 441 (1998).
7. A. B. Voitkiv et al., Phys. Rev. A **82**, 022707 (2010).

8. V. P. Shevelko et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **421**, 45 (2018).
9. I. Yu. Tolstikhina and V. P. Shevelko, in *CERN Yellow Report*, ed. by W. Krasny (2019), Ch. 8.
10. M. W. Krasny, arXiv:1511.07794 [hep-ex].
11. N. Winckler et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B **392**, 67 (2017).
12. A. Tuzikov et al., in *Proc. of RuPAC 2016* (2016), p. 160.
13. A. Tuzikov et al., in *Proc. of RuPAC 2018* (2018), p. 52.
14. П. Т. Пашков, *Физика пучка в кольцевых ускорителях*, Физматлит, Москва (2006).
15. H. D. Betz, Rev. Mod. Phys. **44**, 465 (1972).
16. P. Sigmund, *Particle Penetration and Radiation Effects*, Vol. 2, Springer, Berlin (2014).
17. Yu. Oganessian, Pure Appl. Chem. **76**, 1715 (2004).
18. И. Ю. Толстихина, В. П. Шевелько, УФН **188**, 267 (2018) [I. Yu. Tolstikhina and V. P. Shevelko, Physics — Uspekhi **61**, 247 (2018)].
19. И. Ю. Толстихина и др., ЖЭТФ **146**, 5 (2014) [I. Yu. Tolstikhina et al., JETP **119**, 1 (2014)].
20. V. P. Shevelko et al., J. Phys. B: Atom. Mol. Opt. Phys. **37**, 201 (2004).
21. A. Ichihara and J. Eichler, Atom. Data Nucl. Data Tabl. **74**, 1 (2000).
22. URL: <https://github.com/FAIR-BREIT/BREIT-DOC/blob/master/README.md/>.
23. URL: <https://github.com/FAIR-BREIT/BREIT-CORE/tree/master/data/input/>.
24. URL: https://web-docs.gsi.de/~weick/charge_states/.
25. URL: <http://lise.nslc.msu.edu/lise.html/>.
26. S. K. Allison, Rev. Mod. Phys. **30**, 1137 (1958).
27. URL: <https://web-docs.gsi.de/~weick/atima/atima14.html/>.