



Объединенный институт ядерных исследований
Лаборатория Ядерных Реакций им. Г.Н. Флёрва

ОТЧЁТ ПО ПРОГРАММЕ УНЦ ОИЯИ“INTEREST”

Криогенная газовая останавливающая ячейка

Руководитель:
Dr. Lubos Krupa

Студент:
Литвак Иван Леонидович,
Украина

Период участия:
24 мая - 9 июля, 2021

Дубна, 2021

Аннотация

Every year the requirements for the accuracy and speed of the equipment are increasing. Modern experiments in nuclear physics are carried out on atoms, whose production cross sections are on the order of 10^{-12} barn. The loss of even a few atoms is undesirable. The efficient transformation of rare ion beams, produced in nuclear reactions at high energy with large emittance, into low-energy beams with small emittance and low energy spread was an important part of experiments. In recent years, so-called ion-catcher devices (gas stopping cells) have been employed to decelerate high-energy ions in a noble-gas atmosphere, from where they are extracted by gas flow and electric fields. The cryogenic gas stopping cell is developed, realized and tested at cyclotron DC280 (“Factory of Superheavy Elements”) to study the properties of heavy and superheavy elements

Оглавление

Аннотация.....	i
1 Введение.....	1
2 Криогенная газовая останавливающая ячейка	2
2.1 Оптимизация эффективности остановки	3
2.2 Программа SRIM.....	4
3 Результаты	5
3.1.1 40 МэВ, 30 мбар	5
3.1.2 40 МэВ, 70 мбар	6
3.1.3 60 МэВ, 30 мбар	8
3.1.4 60 МэВ, 70 мбар	10
3.1.5 50 МэВ, 56 мбар	12
3.1.6 30 МэВ, 30 мбар + 70 мбар.....	13
3.2 Расчет эффективности остановки при различной толщине фольги и давлении газа	14
Заключение	15
Благодарности.....	15
Список используемых источников	16

1 Введение

С каждым годом требования к точности и быстродействию оборудования повышаются. Современные эксперименты в области ядерной физики проводятся на атомах, сечения образования которых составляют порядка 10^{-12} барн. Потеря даже нескольких атомов нежелательна. Эффективное преобразование пучков редких ионов, образующихся в ядерных реакциях при высокой энергии с большим эмиттансом, в низкоэнергетические пучки с малым эмиттансом и низким энергетическим разбросом – важная часть экспериментов. В последние годы так называемые устройства для улавливания ионов (газовые останавливающие ячейки) были использованы для замедления ионов высокой энергии в атмосфере благородных газов, откуда они извлекаются потоком газа и электрическими полями. Криогенная газоулавливающая ячейка разработана, реализована и испытана на циклотроне DC280 («Factory of Superheavy Elements») для изучения свойств тяжелых и сверхтяжелых элементов.

В данной работе проведён расчет эффективности остановки изотопа ^{205}Rn с энергиями 30-60 МэВ (шаг 10 МэВ) титановой фольгой различной толщины (от 2.4 мкм до 4.8 мкм с шагом в 0.2 мкм) при давлении гелия 30-100 мбар (шаг 20 мбар) при помощи программы SRIM-2013

2 Криогенная газовая останавливающая ячейка

CryoCell состоит из двух камер из нержавеющей стали: внешняя вакуумная камера обеспечивает тепловую защиту и содержит многослойную изоляционную фольгу для уменьшения теплопередачи во внутреннюю камеру. Внутренняя камера снаружи покрыта медью толщиной 2 мм и охлаждается до температуры примерно 40 К с помощью криоохладителя (одноступенчатая холодная головка RDK-400B, Sumitomo Heavy Industries, 54 Вт при 40 К). Медный слой обеспечивает однородное распределение температуры по CryoCell во время фаз охлаждения и нагревания (подробнее про охлаждение читайте в [3]). Кроме того, медный слой снижает радиационную нагрузку на внутреннюю камеру благодаря своей высокой отражательной способности. На одном торцевом фланце внутренней камеры установлен так называемый оконный фланец (обозначен (b) на рис. 1).

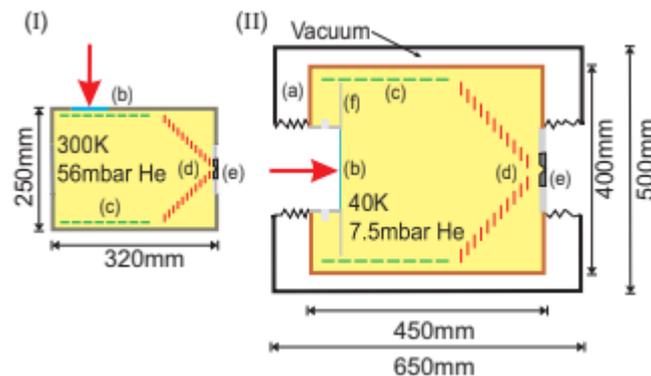


Рис. 1. Схематическое сравнение газостопорной ячейки первого поколения [9] (I) и криогенной газостопорной ячейки (II). Основными компонентами газостопорных ячеек являются: внешняя камера (a, только CryoCell), входное окно (b), электростатическая клетка (c), конструкция радиочастотной воронки (d), экстракционное сопло (e) и (e, только CryoCell) дисковый электрод.

Он содержит входное окно, которое электрически изолировано от внутренней камеры и, таким образом, может использоваться в качестве электрода при соответствующих напряжениях. Толщина входного окна выбирается такой, чтобы частицы энергетического пучка, попадая во внутреннюю камеру через это окно, теряли 90% своей энергии. После прохождения входного окна частицы пучка дополнительно тормозятся за счет взаимодействия с атомами буферного газа гелия (подробнее читайте в [1])

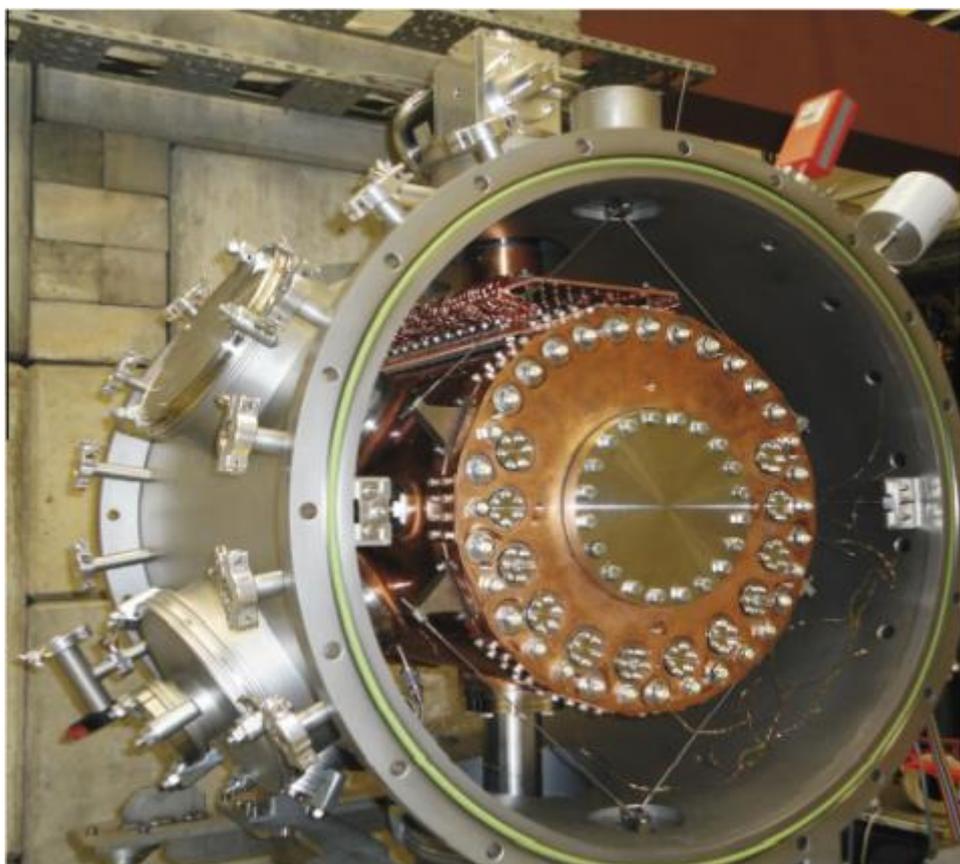


Рис. 2. Фотография CryoCell. Торцевые фланцы на передней части внешней камеры и многослойная изоляционная пленка были удалены для лучшей видимости. Из-за вакуумного испытания перед соплом был установлен глухой фланец.

2.1 Оптимизация эффективности остановки

Современные эксперименты в области ядерной физики проводятся на атомах, сечения образования которых составляют порядка 10^{-12} барн и периодом полураспада в пару секунд. Следует избегать любых потерь, поскольку для измерения PTMS требуется как минимум несколько ионов. Эффективность остановки, определяется как

$$\varepsilon_{stop} = \frac{n_{stopped}}{n_{inc}\varepsilon_{geom}} \quad (1.1)$$

Где n_{inc} - входящие ионы, а $n_{stopped}$ - ионы, остановленные в активном объеме газа CryoCell. И

$$\varepsilon_{geom} = 1 - n_{geom} \quad (1.2)$$

ε_{geom} представляет геометрическую эффективность (долю ионов, которые не попадают во входное окно n_{geom}). Кинетическая энергия ионов, тип и толщина фольги, а также тип и плотность буферного газа CGC - все это влияет на эффективность остановки. Единственные ионы, которые могут быть извлечены - это те, которые задерживаются внутри активного газового объема CGC. Однако потери энергии через фольгу входного окна должны быть достаточно высокими, чтобы плотность буферного газа была достаточной для остановки.

Эффективность остановки для EVR рассчитывается с использованием пакета программ Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM)(Подробнее читайте в [2]).

2.2 Программа SRIM

Остановка и пробег ионов в веществе (SRIM) - это набор компьютерных программ, которые вычисляют взаимодействие ионов с веществом; программа Transport of Ions in Matter (TRIM) является ядром SRIM. Она широко используется в других областях радиационного материаловедения.

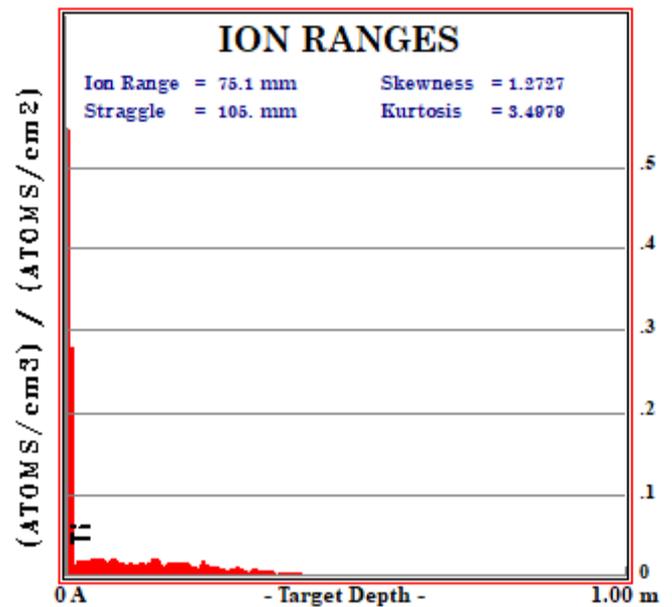
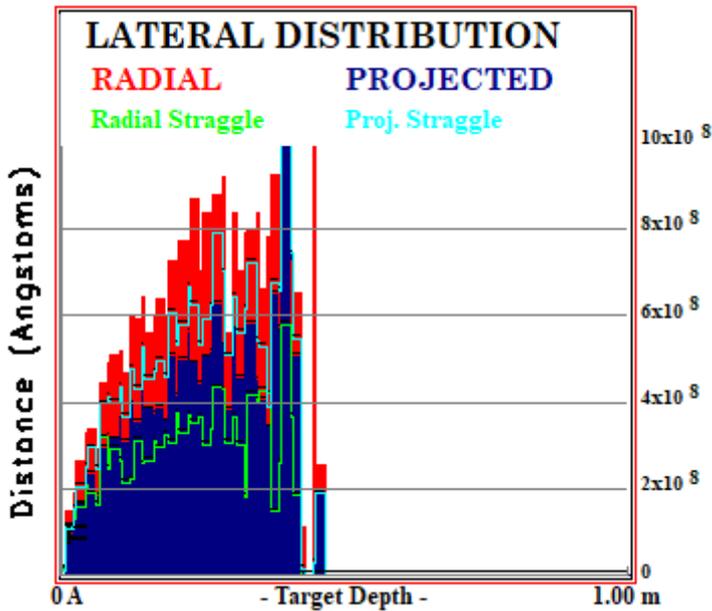
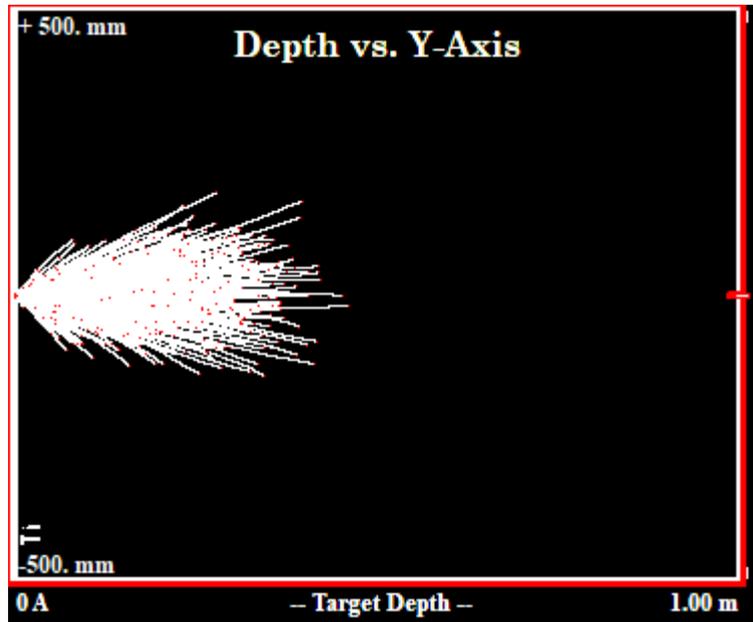
Это полуэмпирический код Монте-Карло, основанный на модели двоичных столкновений и параметризованный с использованием экспериментальных данных. Он использует модель Циглера-Бирсака-Литтмара для вычисления среднего состояния заряда в веществе и использует эффективный заряд для снаряда. Для этого требуются тип иона и энергия (в диапазоне 10 эВ - 2 ГэВ) в качестве входных параметров, а также материал одного или нескольких слоев мишени.

С общей точностью лучше 4% SRIM может воспроизводить тормозные способности примерно 25000 экспериментальных точек данных. Если параметры снаряда настроены так, чтобы отражать остановку более тяжелых ионов, SRIM дает прекрасную возможность оценить и оптимизировать материал фольги входного окна, толщину, а также тип и плотность буферного газа для различных ионов.

3 Результаты

Моделирование проводилось для ионов ^{205}Rn при различных энергиях (30, 40, 50 и 60 МэВ). Частицы радона проходят через титановую фольгу фиксированной толщины 4,5 мкм с буферным газом гелием при различном давлении (30, 50, 70 и 100 мбар) и фиксированной температуры в 300 К

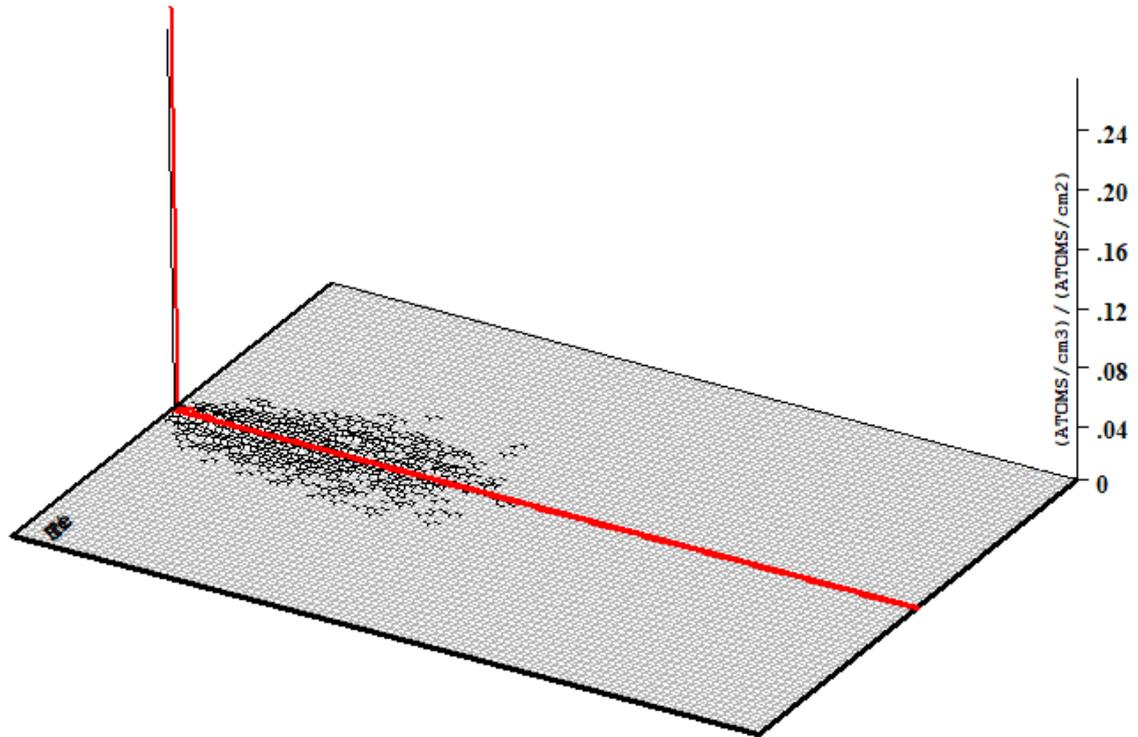
3.1.1 40 МэВ, 30 мбар



Ion Distribution

Ion Range = 75.1 mm Skewness = 1.273

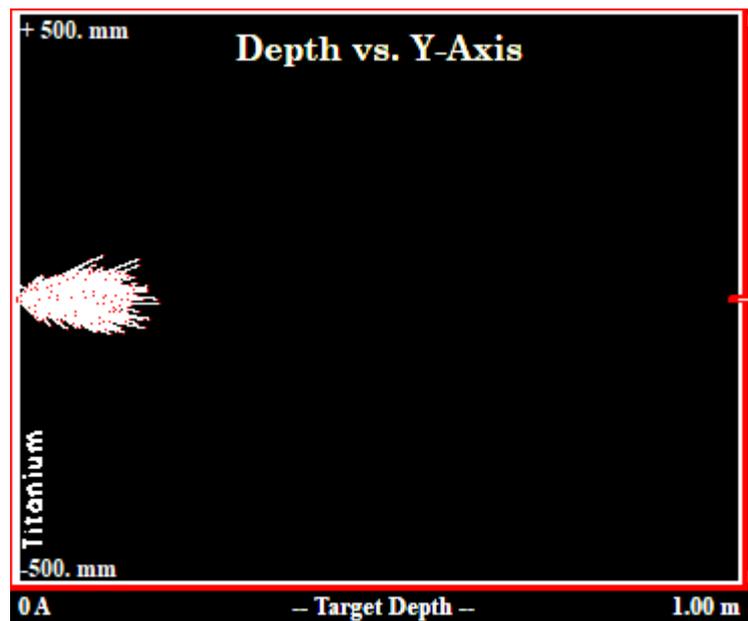
Straggle = 105. mm Kurtosis = 3.498

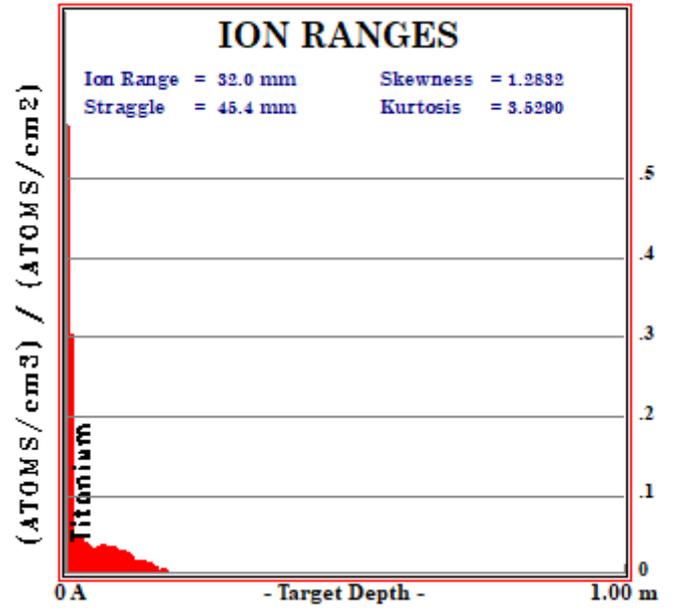
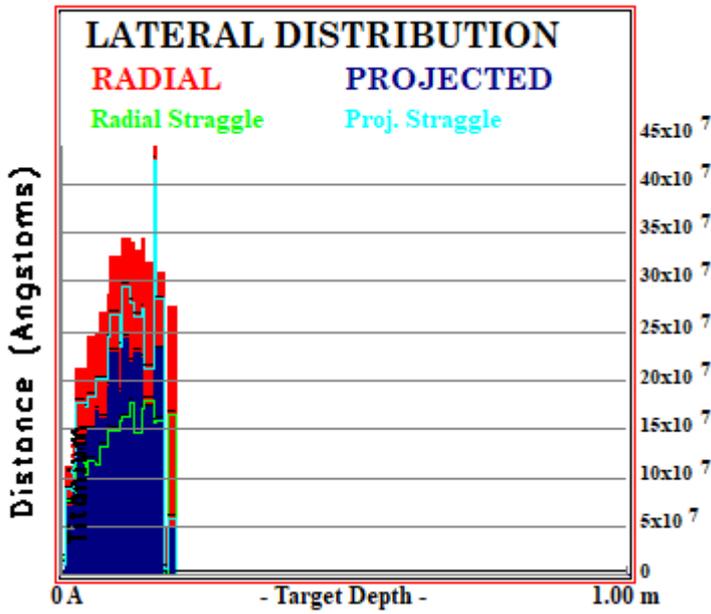


Plot Window goes from 0 A to 1.00 m; cell width = 10.0 mm
Press PAUSE TRIM to speed plots. Rotate plot with Mouse.

Ion = Rn (40. MeV)

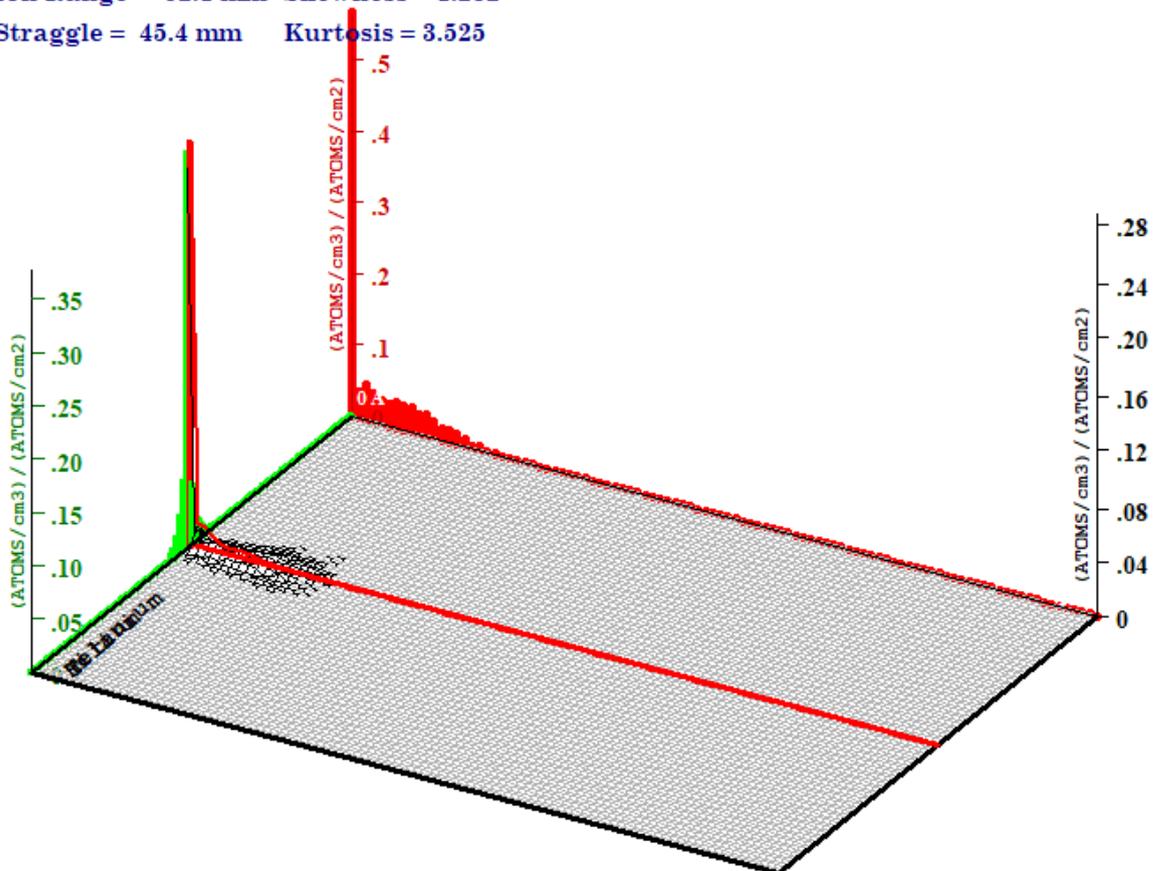
3.1.2 40 МэВ, 70 мбар





Ion Distribution

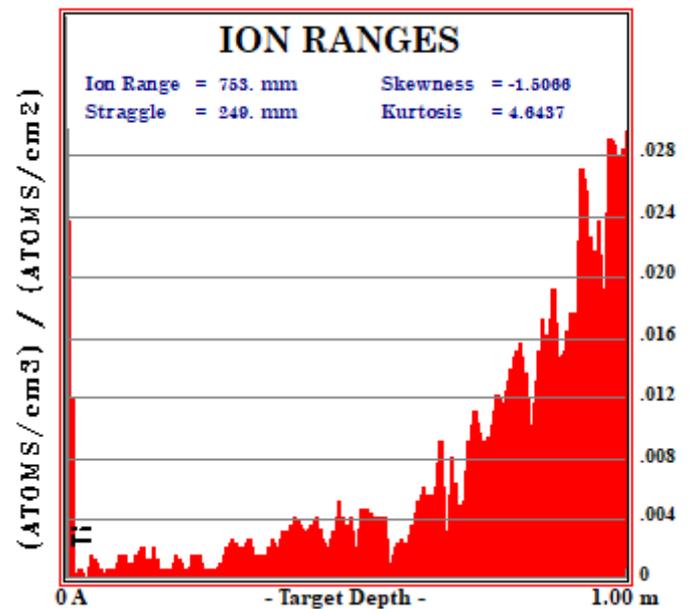
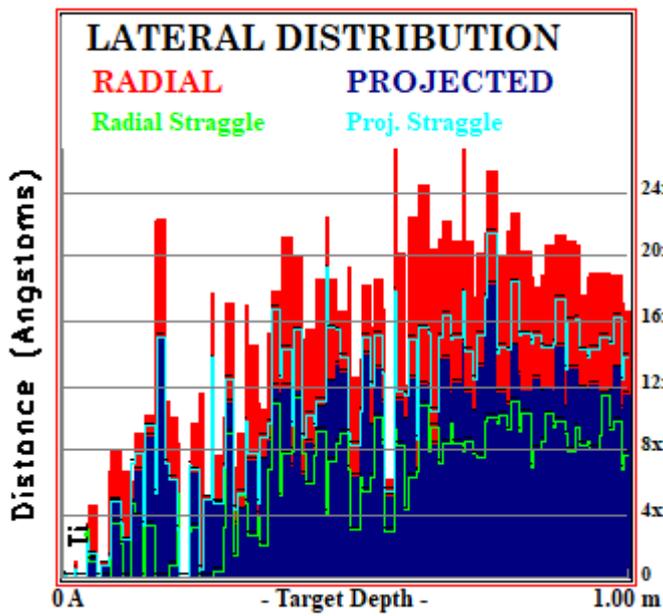
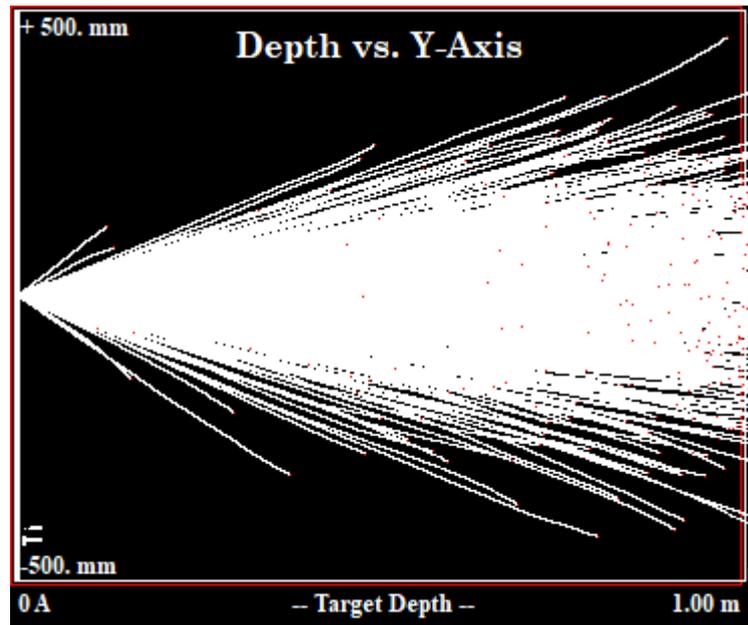
Ion Range = 32.1 mm Skewness = 1.282
 Straggle = 45.4 mm Kurtosis = 3.525



Plot Window goes from 0 A to 1.00 m; cell width = 10.0 mm
 Press PAUSE TRIM to speed plots. Rotate plot with Mouse.

Ion = Rn (40. MeV)

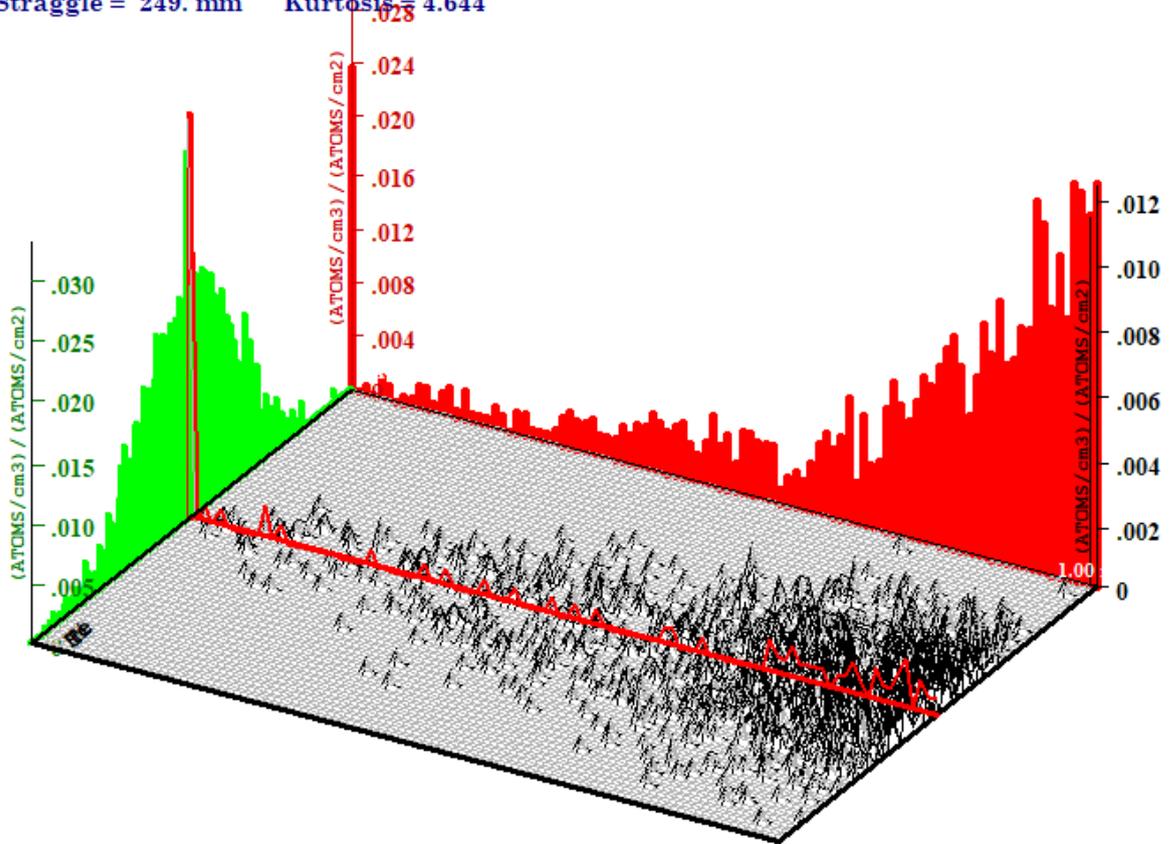
3.1.3 60 МэВ, 30 мбар



Ion Distribution

Ion Range = 753. mm Skewness = -1.507

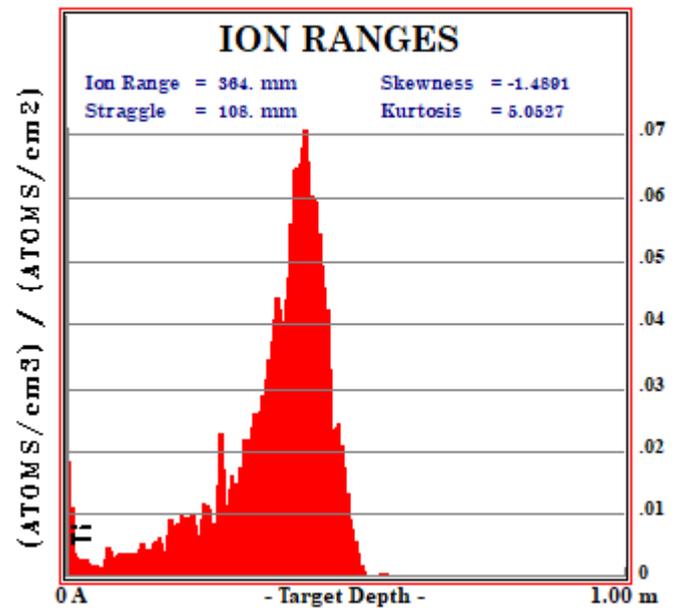
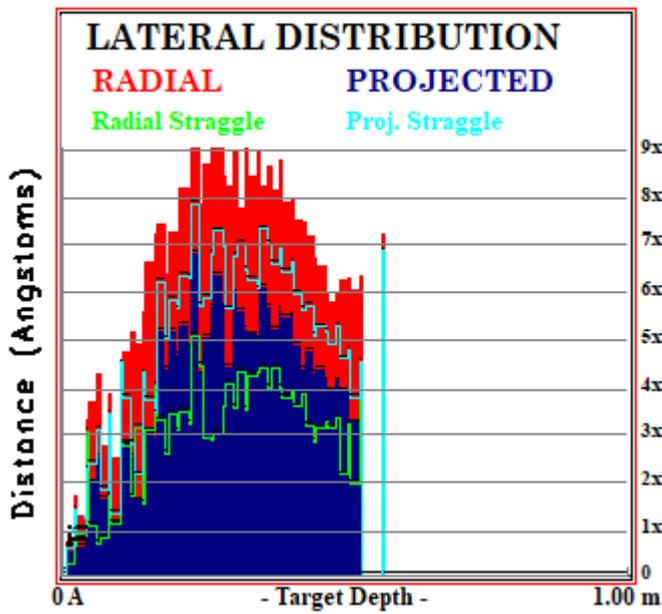
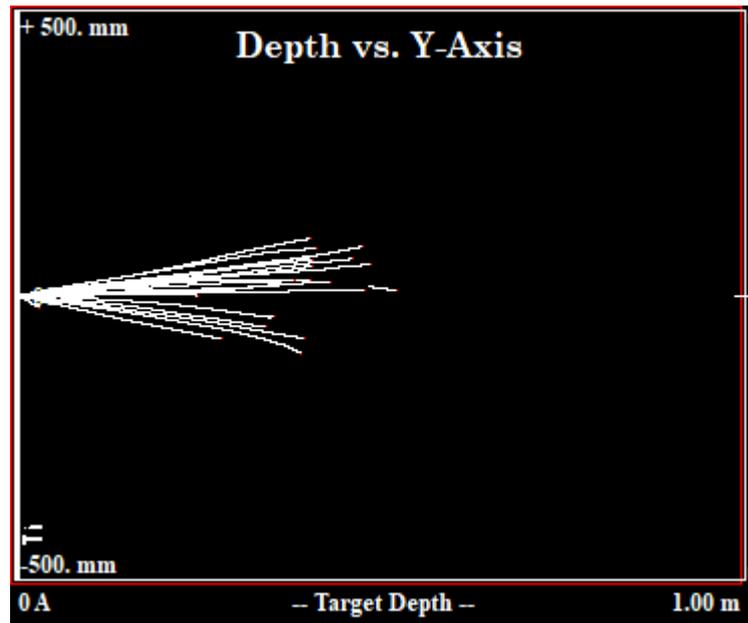
Straggle = 249. mm Kurtosis = 4.644



Plot Window goes from 0 A to 1.00 m; cell width = 10.0 mm
Press PAUSE TRIM to speed plots. Rotate plot with Mouse.

Ion = Rn (60. MeV)

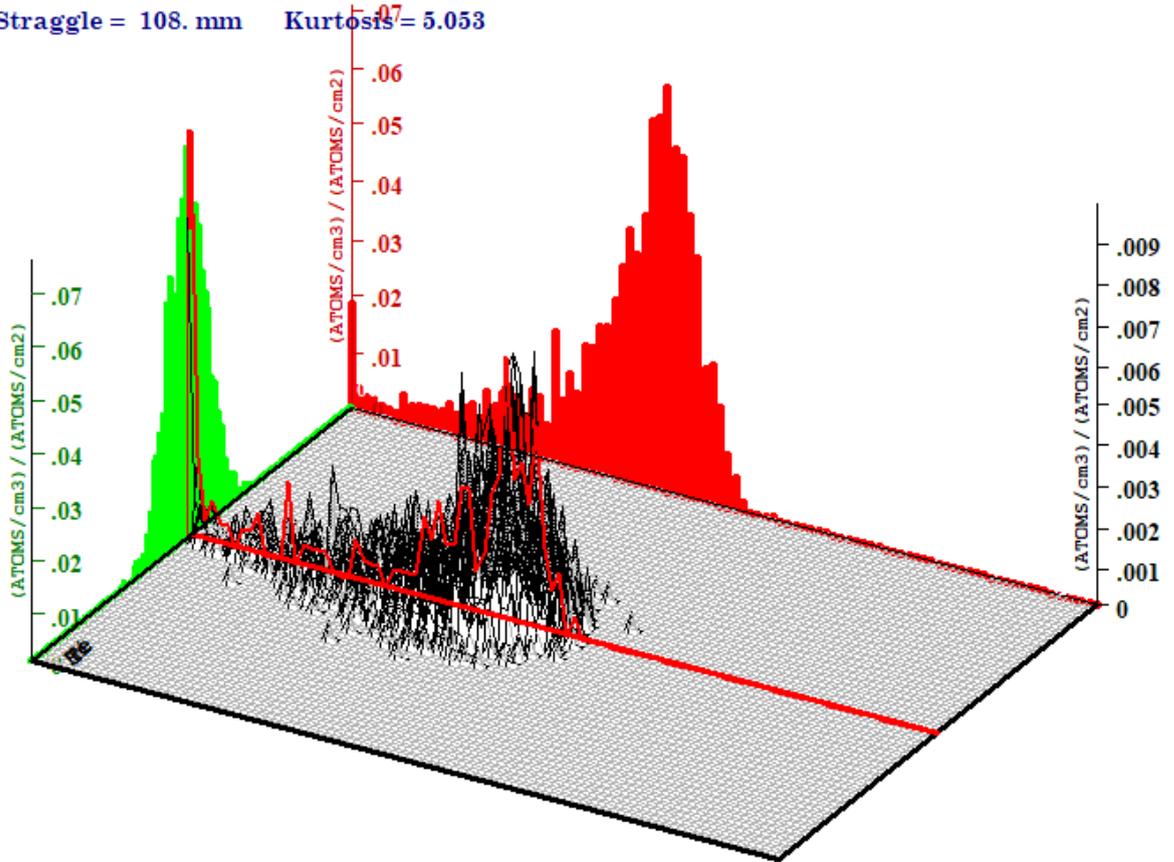
3.1.4 60 МэВ, 70 мбар



Ion Distribution

Ion Range = 364. mm Skewness = -1.489

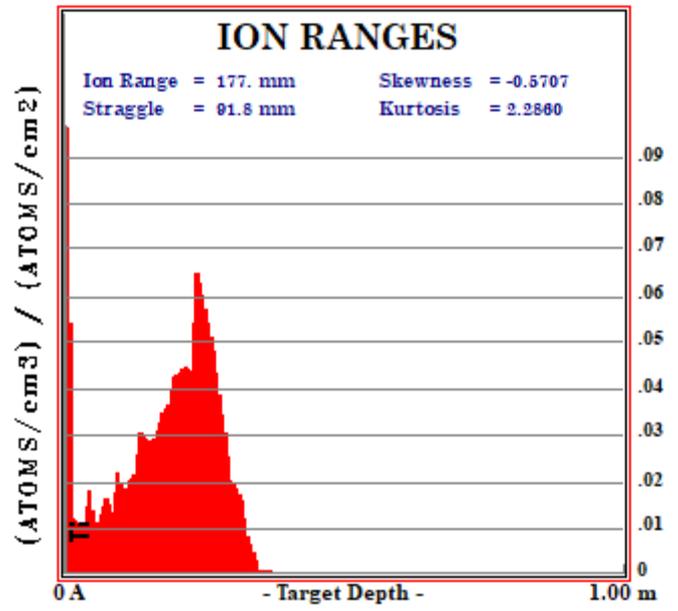
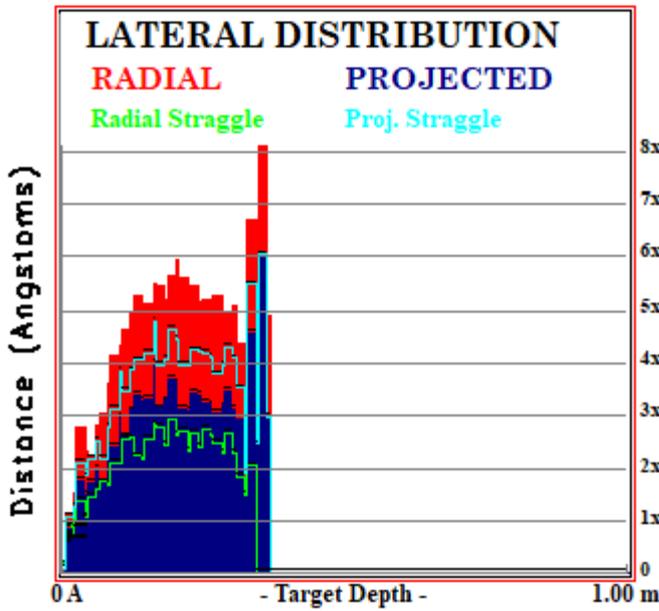
Straggle = 108. mm Kurtosis = 5.053



Plot Window goes from 0 A to 1.00 m; cell width = 10.0 mm
Press PAUSE TRIM to speed plots. Rotate plot with Mouse.

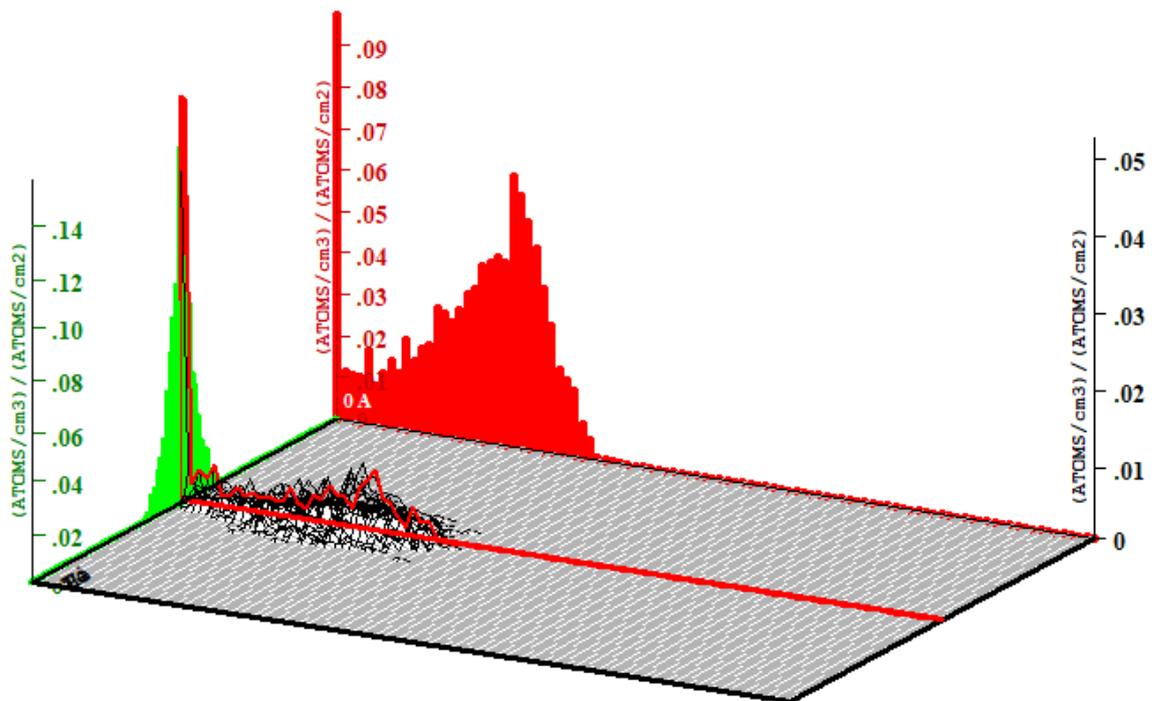
Ion = Rn (60. MeV)

3.1.5 50 МэВ, 56 мбар



Ion Distribution

Ion Range = 177. mm Skewness = -0.571
 Straggle = 91.8 mm Kurtosis = 2.286



Plot Window goes from 0 A to 1.00 m; cell width = 10.0 mm
 Press PAUSE TRIM to speed plots. Rotate plot with Mouse.

Ion = Rn (50. MeV)

3.1.6 30 МэВ, 30 мбар + 70 мбар

30 МэВ недостаточно для того, чтобы изотоп ^{205}Rn прошел титановую фольгу толщиной в 4.5 мкм

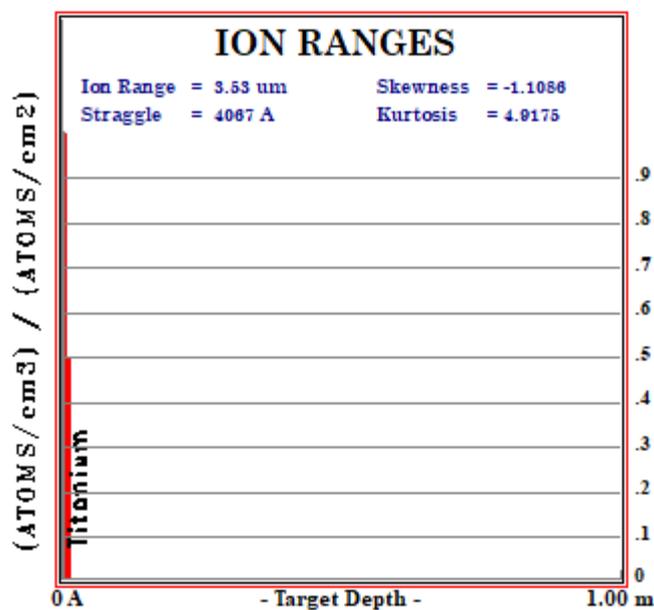
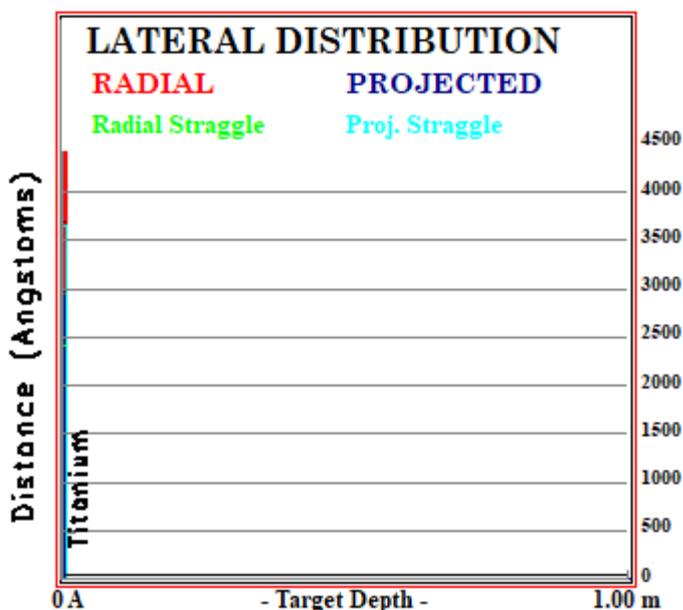
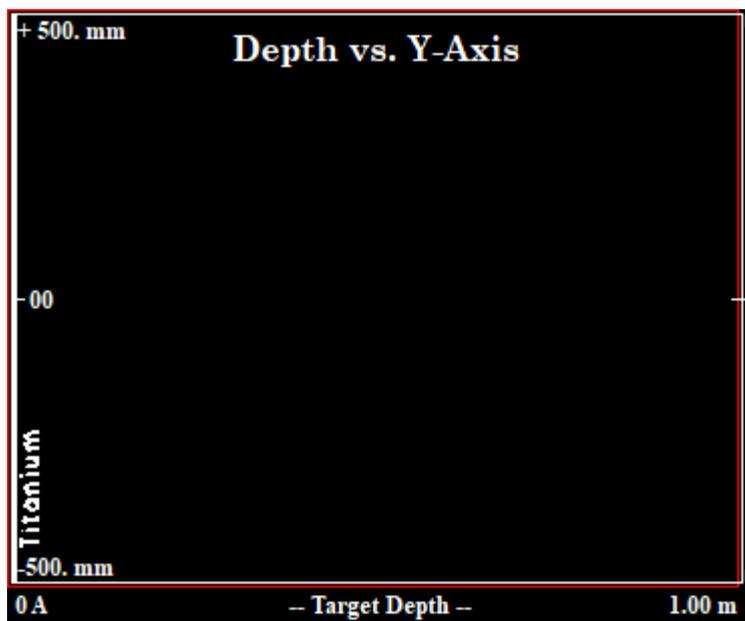


Таблица 1. Полученные характеристики распределения ионов

Кинетическая энергия, МэВ	60		40		50	30	
Давление, мбар	30	70	30	70	56	30	70
Ion Ranges, мм	753	364	75.1	32.1	177	-	-
Коэффициент асимметрии	-1.507	-1.489	1.273	1.282	-0,5707	-	-
Straggle, мм	249	108	105	45.4	91,8	-	-
Коэффициент эксцесса	4.644	5.053	3.498	3.525	2.2860	-	-

3.2 Расчет эффективности остановки при различной толщине фольги и давлении газа

Расчет эффективности остановки изотопа ^{205}Rn ($^{44}\text{Ar} + ^{144}\text{Sm}$) с энергиями 30-45 МэВ (имеет гауссово распределение в диапазоне от 35 МэВ до 45 МэВ.) титановой фольгой различной толщины (от 2.4 мкм до 4.8 мкм с шагом в 0.2 мкм) при давлении гелия 30-100 мбар (шаг 20 мбар).

Входные параметры в программном обеспечении SRIM для вышеуказанного моделирования следующие:

Параметры буферного газа

Давление = 30/50/70/100

Температура = 300

Плотность He = 0.00000481/0.00000802/0.00001122 (г/см³)

Толщина Ti в мкм

ThicknessFrom = 2.4

ThicknessStep = 0.2

ThicknessAmount = 13

Радиус источника

IsotopRadius = 25

R MIN MAX = 0.5

Ион

IonZ = 86

IonAtomicMass = 205

Распределение энергии ионов

IGaussDistrib = 1

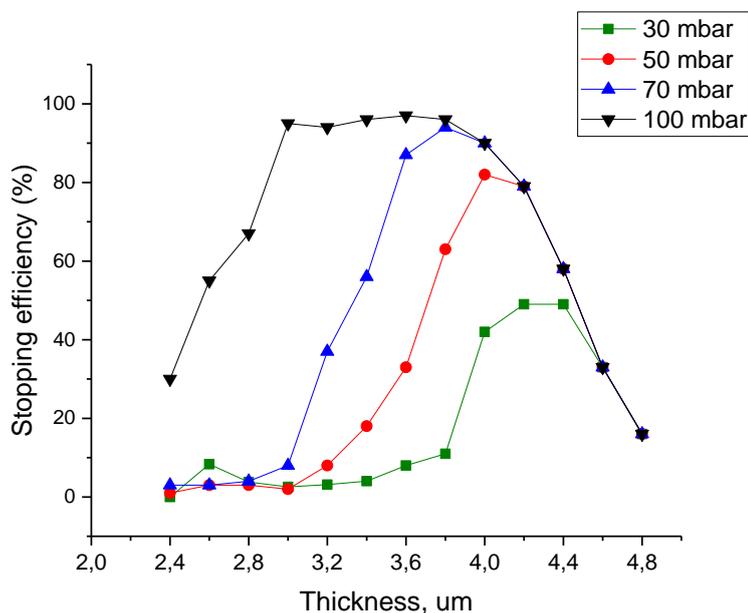
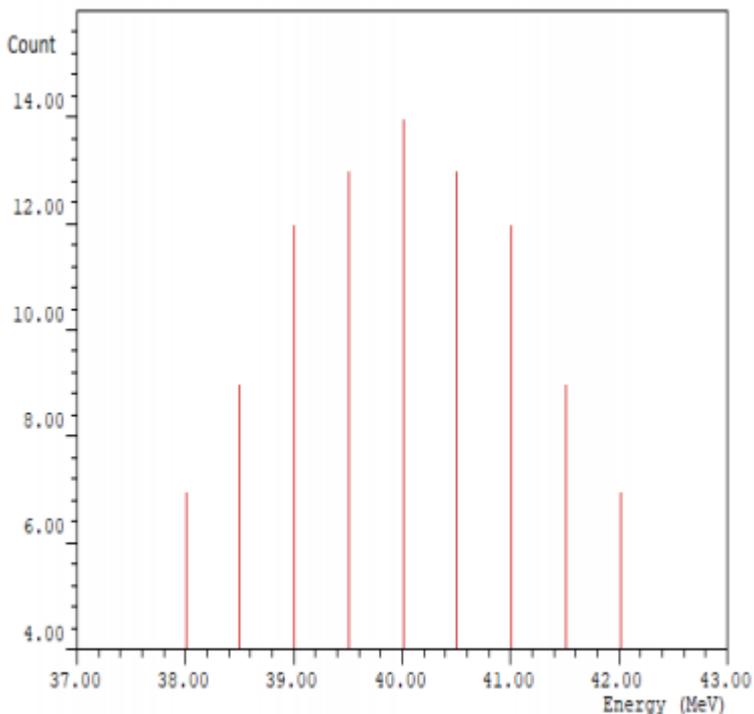
ISumAll = 100

IBins = 10

IEmiddle = 40

IE MIN MAX = 0.3

IEWidth = 5



Заключение

Эффективность остановки для ^{205}Rn рассчитывается при четырех различных давлениях путем изменения толщины титановой фольги и энергии падающего иона. Мы наблюдали, что с увеличением толщины титановой фольги эффективность торможения сначала увеличивается, а после достижения максимума она начинает уменьшаться с увеличением толщины титановой фольги. Оптимальная толщина находится в районе 4 мкм для различных давлений буферного газа. Боковой разброс иона и трехмерное распределение ионов по пробегу также показаны для радона. Это распределение показано при энергии ионов 40 МэВ, 50 МэВ и 60 МэВ и при давлении газообразного гелия 30 мбар, 56 мбар и 70 мбар соответственно. Все моделирование проводилось при комнатной температуре.

Благодарности

Благодарю Университетский центр ОИЯИ, за программу INTEREST и возможность поучаствовать в ней. А также доктора Любоша Крупа за подробные объяснения и помощь в создании данного отчета.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Droese, S. Eliseev, K. Blaum, M. Block, F. Herfurth, M. Laatiaoui, F. Lautenschläger, E. Minaya Ramirez, L. Schweikhard, V.V. Simon, and P.G. Thirolf. The cryogenic gas stopping cell of SHIPTRAP. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section B, 338:126–138, (2014).
2. Kalejaa, B. Anđelić, K. Blauma, M. Block, P. Chhetri, C. Droese, Ch.E. Düllmann, M. Eibach, S. Eliseev, J. Even, S. Götz, F. Giacoppo, N. Kalantar-Nayestanaki, M. Laatiaoui. The performance of the cryogenic buffer-gas stopping cell of SHIPTRAP. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section B, 462:280–285, (2020).
3. M. Ranjan, P.Dendooven, S.Purushothaman, T.Dickel, M.P.Reiter, S.Ayet, E. Haettner, I.D.Moore, N.Kalantar-Nayestanak, H.Geissel, W.R.Plaß, D. Schäfer, C. Scheidenberger, F.Schreuder, H.Timersma , J.VandeWalle, H.Weick. Design, construction and cooling system performance of a prototype Cryogenic stopping cell for the Super-FRS at FAIR. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Section A, 770:87–97, (2015).