



**ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА ИМПУЛЬСНОМ УСКОРИТЕЛЕ  
ЭЛЕКТРОНОВ ВЫХОДОВ РЕАКЦИЙ  $^{13}\text{C}(\gamma, p)$ ;  $^{14}\text{N}(\gamma, 2p)$ ;  $^{14}\text{N}(\gamma, 2n)$   
С РЕГИСТРАЦИЕЙ НАВОДИМОЙ АКТИВНОСТИ  $^{12}\text{B}$  И  $^{12}\text{N}$**

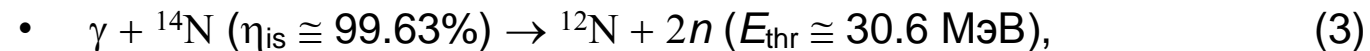
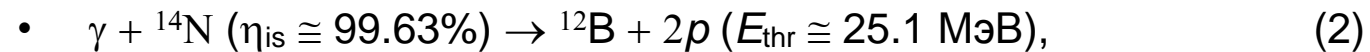
***С.С. Бельшев***

***Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова, Физический факультет,  
119991 Москва, Россия***

***Л.З. Джилавян, А.М. Лапик  
Институт ядерных исследований,  
Российская Академия Наук,  
117312 Москва, Россия***

**E-mail: [dzhil@inr.ru](mailto:dzhil@inr.ru)**

- Исследования сечений и выходов фотоядерных реакций с образованием  $^{12}\text{B}$  ( $\beta^-$ -распад;  $T_{1/2}=20.2$  мс,  $E_{\beta \text{ max}}\cong 13.4$  МэВ) и  $^{12}\text{N}$  ( $\beta^+$ -распад;  $T_{1/2}=11.0$  мс,  $E_{\beta \text{ max}}\cong 16.4$  МэВ) интересны как для фундаментальных задач—развитие представлений и соответствующих моделей ядерных реакций с целью адекватного учета образования экзотических ядер-продуктов вблизи границ устойчивости к испусканию нуклонов, так и для прикладных задач – разработка методов наружного контроля объектов с целью обнаружения скрытых концентраций C и N (в наркотиках и взрывчатых веществах) с регистрацией активности  $^{12}\text{B}$  и  $^{12}\text{N}$ . Речь идет о реакциях:



- где:  $\eta_{\text{is}}$  – естественный изотопный состав;  $E_{\text{thr}}$  – порог реакции.
- К сожалению, для указанных задач информация о выходах реакций (2, 3) весьма неудовлетворительна. Ранее нами был дан анализ известных экспериментальных и модельно-расчетных данных. Было показано, что для этих реакций необходимы новые измерения их выходов, т.к. расхождения доступных данных по таким выходам и сечениям находятся на уровне около одного порядка их величин.
- Изотопы  $^{12}\text{B}$  и  $^{12}\text{N}$  для области, где  $T_{1/2} \approx (3 \div 80)$  мс, а  $E_{\text{thr}} \leq 50$  МэВ, практически уникальны среди радиоизотопов, получаемых в фотоядерных реакциях с удалением до 3 нуклонов из стабильных ядер-мишеней, не являющихся изотопами N или C и имеющих  $\eta_{\text{is}} \geq 1\%$ .

- При активационных исследованиях выходов реакций (1–3) реакцию (1) можно использовать в качестве эталонной, поскольку:
- В ней образуются те же ядра  $^{12}\text{B}$ , как и в реакции (2), и можно ожидать сопоставимые эффективности регистрации распадов  $^{12}\text{B}$ , а различия при этом мишеней, как и добавочные различия из-за перехода к регистрации распадов  $^{12}\text{N}$  для реакции (3), можно надеяться более корректно учитывать расчетным путем).
- Для этой реакции есть хорошо согласующиеся между собой данные о сечениях.
- Различие  $\eta_{\text{is}}$  для  $^{13}\text{C}$  и  $^{14}\text{N}$  в  $\sim 10^2$  раз в пользу последнего приближает все ожидаемые скорости счета регистрируемых распадов  $^{12}\text{B}$  и  $^{12}\text{N}$  друг к другу. Так, значения рассчитанных по программе TALYS сечений реакций (1–3), умноженных на  $\eta_{\text{is}}$ , оказываются близкими между собой.
- Задача данной работы – изучение вопросов измерений выходов  $^{12}\text{B}$ - и  $^{12}\text{N}$ - активностей, образуемых в реакциях (1–3) на импульсном ускорителе  $e^-$  с регистрацией испускаемых из мишени  $\beta$ -частиц и вторичных  $\gamma$ -квантов NaI-спектрометрами.

Измерения выходов реакций (1–3) предполагаются на ускорителе РМ-55 НИИЯФ им. Д.В.Скобельцына при МГУ им. М.В.Ломоносова и ФИАН им. П.Н.Лебедева.

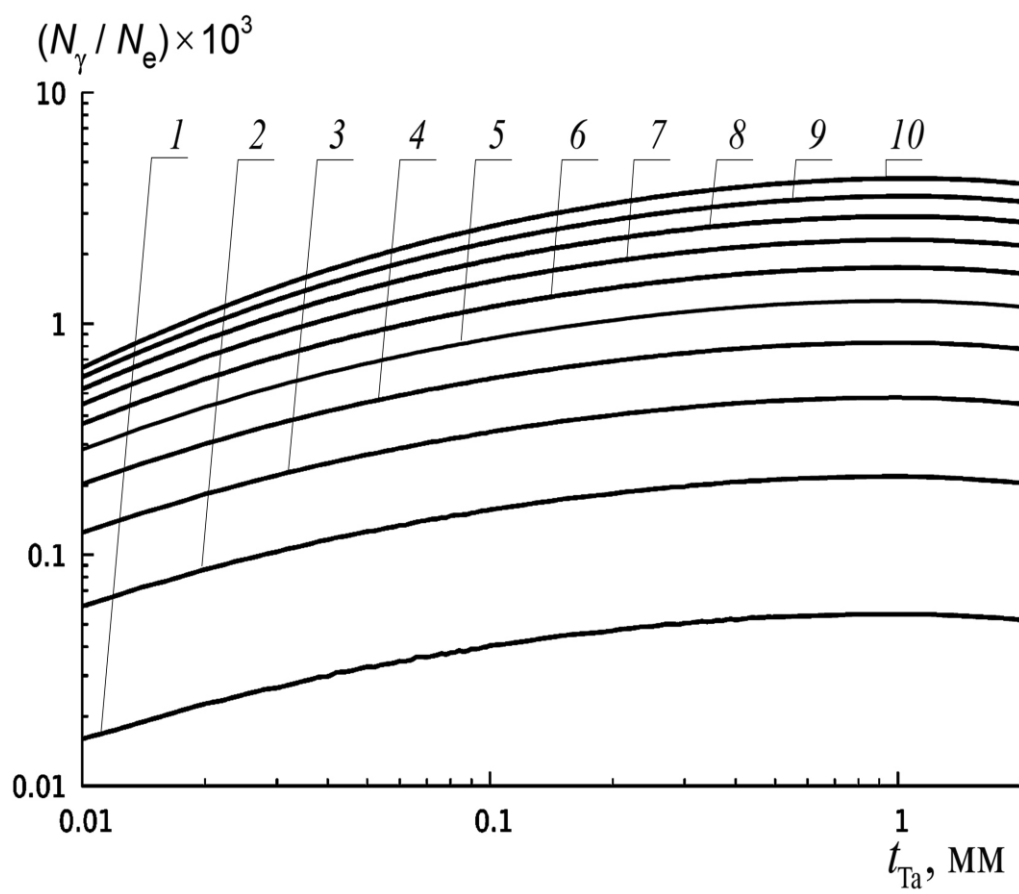
РМ-55 – разрезной импульсный микротрон с фиксированной энергией ускоренных  $e^-$  на своем выходе  $\approx 55$  МэВ. У РМ-55: 11 орбит; прирост энергии за оборот  $\cong 5$  МэВ; на последней орбите установлен специальный отклоняющий магнит для вывода пучка из вакуумной камеры через Ti-фольгу (толщиной 50 мкм); на части орбит установлены прозрачные для пучка  $e^-$  тороидальные магнитно-индукционные датчики, последний из которых (по ходу пучка) может использоваться как один из мониторов тока пучка  $e^-$  из РМ-55, выводимого на некий радиатор с толщиной  $t_{\text{rad}}$ . Собственно РМ-55 весьма компактен (ДхВхШ  $\cong 2700 \times 1750 \times 750$  мм). Такие размеры РМ-55 позволили поместить его внутри компактного бункера дополнительной радиационной защиты из тяжелого бетона. В стене этого бункера по направлению выводимого из РМ-55 пучка  $e^-$  есть амбразура с коллиматорами для вывода пучка первичных тормозных  $\gamma$ -квантов.

Параметры выводимого из РМ-55 пучка  $e^-$ :  $E_{e^-} \cong (55.5 \pm 0.42) \text{ МэВ}$ ;  
 $v_{\text{imp}}$  до  $50 \text{ с}^{-1}$ ;  $I_{\text{imp}}$  до  $\approx 10 \text{ мА}$ ;  $\tau_{\text{imp}} \cong 8 \text{ мкс}$ .

- Предполагается, что пучок  $\gamma$ - квантов из радиатора, выйдя из бункера РМ-55, последовательно проходит следующие соосные с этим пучком элементы:
  - Дополнительный коллиматор, задающий диаметр  $\gamma$ - пучка  $D_{\gamma\text{-beam}}$  (с возможностью варьирования) на входе в Pb-“дом” пассивной защиты.
  - Мониторы падающего на исследуемую мишень  $\gamma$ - пучка.
  - Располагаемую в Pb-“доме” исследуемую мишень в форме цилиндра с различными диаметрами  $D$  и длиной  $t_{\text{arg}} = 100$  мм).
  - Монитор прошедшего мишень  $\gamma$ - пучка.
  - Отверстие для выхода  $\gamma$ - пучка из Pb-“дома” пассивной защиты.
- Через центр цилиндра мишени перпендикулярно продольной его оси, совпадающей с осью падающего  $\gamma$ - пучка (ось  $z$ ), проходит ось  $x$ , на которой расположены оси 2-х “смотрящих” друг на друга сцинтилляционных блоков (каждый из NaI-монокристалла (длина  $t_{\text{NaI}} \cong 100$  мм, диаметр  $D_{\text{NaI}} \cong 150$  мм) и ФЭУ-49Б). Плоскость, образуемая осями  $z$  и  $x$ , – горизонтальная. Оба блока расположены на оси  $x$  так, что их NaI-монокристаллы находятся вплотную к цилиндру мишени. Диаметр мишени  $D$  варьировался в данном моделировании. Оба NaI-спектрометра снабжены управляемыми делителями питания их ФЭУ для ослабления возможного влияния большой загрузки ФЭУ во время пучка ускорителя. При регистрации событий в NaI- монокристаллах надо сохранять амплитудную и временную информацию с выделением совпадений сцинтилляций по времени и построением временных зависимостей между сигналами с 2-х монокристаллов.

- Рассматривалось с использованием GEANT4 оптимальное формирование пучка первичных тормозных  $\gamma$ -квантов, образуемых в радиаторе выведенными из РМ-55  $e^-$ . Кроме того, рассматривалось мониторингирование пучков  $e^-$  и  $\gamma$ -квантов.
- Для снижения радиационной “нагрузки” в зале снаружи бетонного бункера защиты РМ-55, а также для лучшей определенности при этом спектров тормозных  $\gamma$ - квантов желательно обеспечить на выходе из бункера РМ-55 только пучок первичных  $\gamma$ -квантов без примеси первичных  $e^-$ . Эта цель достижима (особенно при желании работать с очень тонкими радиаторами (с толщиной  $t_{\text{rad}} \lesssim 10^{-2}X_0$ , где  $X_0$  – радиационная длина материала радиатора) и характерными для них спектрами тормозных фотонов), при установке внутри бункера РМ-55 после радиатора по ходу пучка, очищающего магнита (в этом случае цилиндр Фарадея на повернутом пучке  $e^-$  – дополнительный монитор их пучка).
- Другой путь (особенно при готовности работать с относительно толстыми радиаторами с соответствующими им увеличенными полными потоками, но “искаженными” спектрами тормозных фотонов) – установить сразу после радиатора с высоким  $Z$  (например, Та, у которого  $Z = 73$  и  $X_0 \approx 4$  мм) поглотитель прошедших радиатор  $e^-$  из материала с низким  $Z$  (например, С, у которого  $Z = 6$ , а соотношение ионизационных и радиационных потерь энергии падающих электронов с  $E_e \approx 55$  МэВ сильно смещено в пользу первых) и с толщиной поглотителя  $>$  пробега  $e^-$ . Во втором случае при размещении на электрически изолированной подставке блока из радиатора и такого поглотителя из графита измерение тока с такого блока, вызываемого падающим пучком  $e^-$ , дает монитор этого пучка.

- В качестве оперативных относительных мониторов пучка первичных тормозных фотонов (особенно внутри Pb-“дома” перед исследуемой мишенью) предполагаем использовать тонкостенные воздушные ионизационные камеры. Перед и после исследуемой мишени при долгих облучениях предполагается установка Си-фольг для активационного мониторинга  $\gamma$ -пучка
- Находились потоки тормозных  $\gamma$ -квантов  $N_\gamma$  с энергиями  $E_\gamma > (20 \text{ или } 30) \text{ МэВ}$ , близкими к  $E_{\text{thr}}$  для реакций (1-3), в расчете на  $10^3 e^-$ , из их общего числа  $N_e$  для Та-радиаторов в зависимости от  $t_{\text{rad}} = t_{\text{Ta}}$  для набора коллиматоров на расстоянии 3 м от радиатора, имеющих диаметры  $D_{\text{coll}}$  от 1 см до 10 см с шагом 1 см.



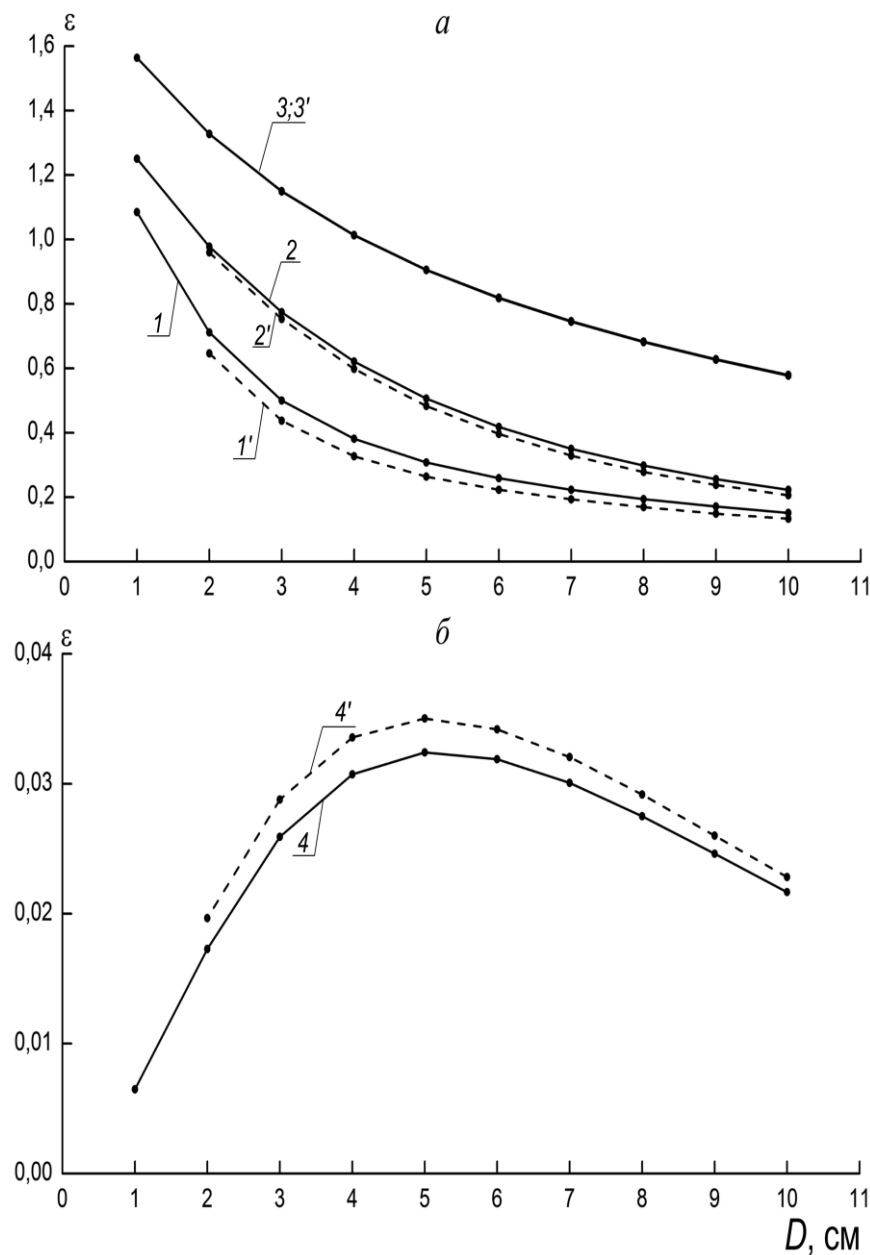
- В качестве примера приведены зависимости  $(N_\gamma / N_e) \times 10^3$  от  $t_{\text{Ta}}$  для  $t_{\text{Ta}}$  от 0.01 мм до 2 мм. Видно, что при  $t_{\text{Ta}} \approx 1$  мм для всех указанных  $D_{\text{coll}}$  у всех этих зависимостей наблюдаются максимумы. Только такие  $t_{\text{Ta}}$  берутся ниже.

При таких условиях рассчитаны суммарные эффективности  $\varepsilon$  (в расчете на акт  $\beta$ -распада) регистрации 2-мя NaI-спектрометрами и  $\beta$ -частиц от распадов  $^{12}\text{B}$  или  $^{12}\text{N}$ , и образуемых этими  $\beta$ -частицами в исследуемых мишенях вторичных  $\gamma$ -квантов. При этом мишени из графита с  $\rho = 2.2 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$  и из жидкого N с  $\rho = 0.8 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ . Использовалось идеализированное представление об эффективности регистрации ( $\varepsilon = 1$  для всех вносимых  $\beta$ -частицами или  $\gamma$ -квантами энергий  $> 16 \text{ кэВ}$  в области NaI-монокристаллов и  $\varepsilon = 0$  при меньших вносимых в эти области энергиях) и о функции отклика NaI-спектрометров ( $\delta$ -функция для всех вносимых энергий  $> 16 \text{ кэВ}$ ).



# Эффективности регистрации распадов в мишени $^{12}\text{B}$ и $^{12}\text{N}$

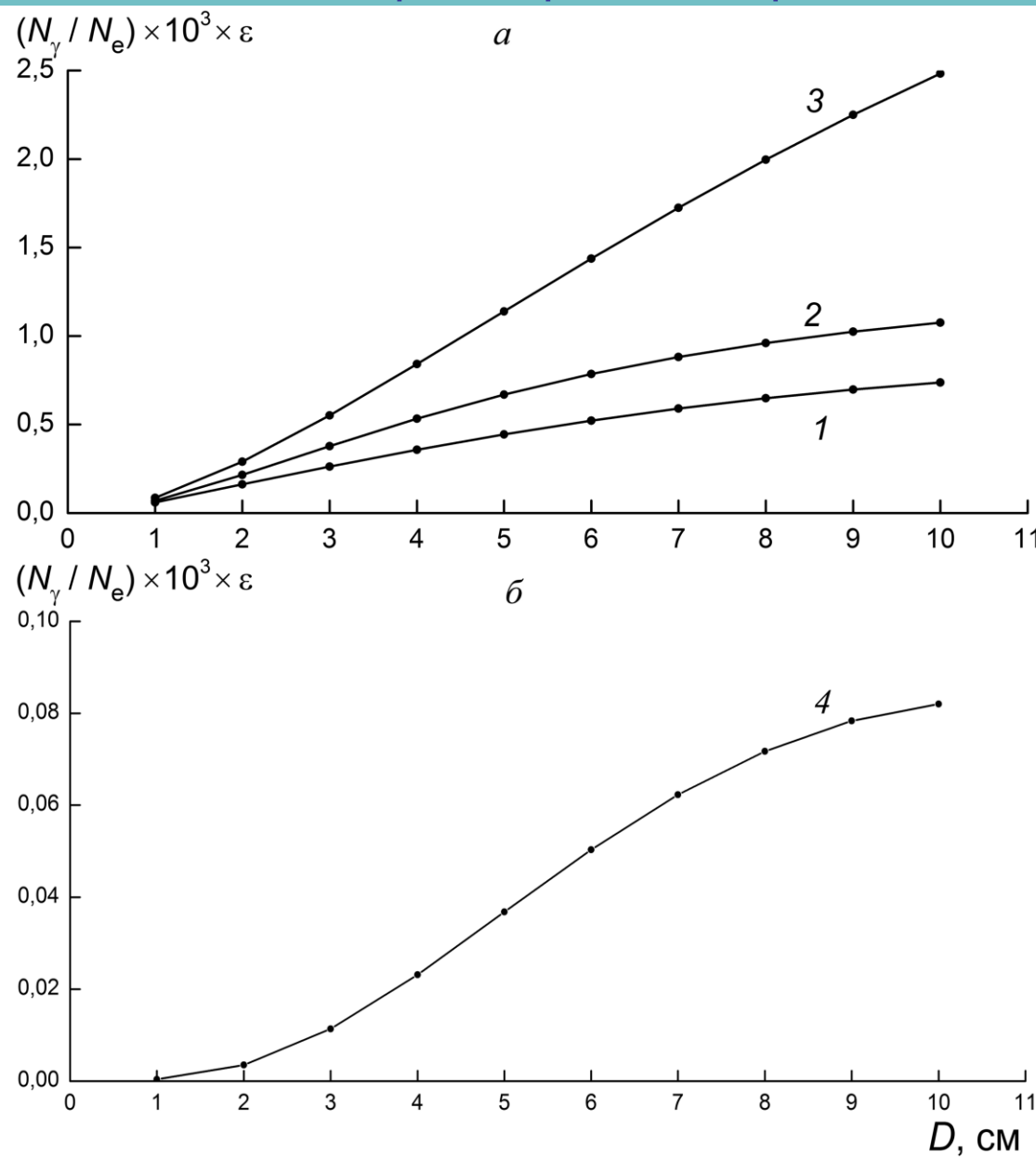
- На рис. даны результаты расчетов  $\varepsilon$  в зависимости от диаметров мишеней  $D$  при  $D_{\gamma\text{-beam}}=D$  (сплошные линии 1–4) и при  $D_{\gamma\text{-beam}}=D-1$  см (штриховые линии 1'–4'). Последнее – из-за желания ослабить влияние первичного  $\gamma$ -пучка на работу NaI-спектрометров. В этих расчетах плотности образуемых в мишенях  $^{12}\text{B}$  или  $^{12}\text{N}$  игнорируется ослабление  $\gamma$ -пучка в мишени вдоль ее толщины  $t_{\text{arg}}$ , а для распределения этих плотностей в мишенях, по диаметру падающего на мишень  $\gamma$ -пучка  $D_{\gamma\text{-beam}}$  учитываются усредненные ослабления плотности этого пучка по зонам по сравнению с центральной зоной.
- На рис.а: линии 1 и 1' – для графитовой мишени и регистрации распадов образуемых в реакции (1) ядер  $^{12}\text{B}$ ; линии 2 и 2' – для жидко-азотной мишени и регистрации распадов образуемых в реакции (2) ядер  $^{12}\text{B}$ ; линии 3 и 3' – для жидко-азотной мишени и регистрации распадов образуемых в реакции (3) ядер  $^{12}\text{N}$ . Во всех случаях наблюдаются спады  $\varepsilon$  при росте  $D$ .
- Положение усложняется для приведенных на рис.б линий 4 и 4' – для жидко-азотной мишени и регистрации распадов образуемых в реакции (3) ядер  $^{12}\text{N}$  путем регистрации на совпадение 2-мя NaI-спектрометрами 2-х разлетающихся в противоположные стороны  $\gamma$ -квантов с энергиями 0.511 МэВ от аннигиляции остановившихся позитронов. Здесь у кривых 4 и 4' максимумы при  $D=5$  см и спад  $\varepsilon$  при уменьшении  $D$  связан с тем, что в расчетах не учитывалось взаимодействие  $\beta$ -частиц с веществом NaI-монокристаллов, так что в этих расчетах при малых  $D$  не хватает вещества, чтобы эффективно тормозить испускаемые  $\beta^+$ -частицы. Учет взаимодействия этих частиц с веществом NaI-монокристаллов должен привести к уменьшению отличий поведения кривых 4 и 4' от поведения соответствующих кривых на рис.а.



- Предполагается, что распады  $^{12}\text{B}$  и/или  $^{12}\text{N}$ , образованных в мишенях, регистрируются во временных интервалах между импульсами пучка ускорителя с последующей декомпозицией измеряемых скоростей счета импульсов, регистрируемых 2-мя NaI-спектрометрами. Чтобы ослабить влияние наведенной активности, образованной во время предпоследнего импульса ускорителя для каждого интервала измерения между импульсами пучка, предполагается работа при частоте повторения импульсов ускорителя  $6.25 \text{ с}^{-1}$ .
- С другой стороны, для оптимизации условий измерений интересно рассмотреть зависимости значений величин  $(N_\gamma / N_e) \times 10^3 \times \varepsilon$  от диаметра мишени  $D = D_{\gamma\text{-beam}}$ , которым пропорциональны количества образуемых и регистрируемых ядер. В этом рассмотрении вводились указанные выше зоны мишени и для вычисления потока первичных падающих на мишень  $\gamma$ -квантов, и для вычисления эффективности регистрации  $\varepsilon$ , а затем брали суммарную величину по всем зонам.

# Факторы, влияющие на образование $^{12}\text{B}$ и $^{12}\text{N}$ и регистрацию их распадов

На рис. представлены такие суммарные величины, найденные при условиях, аналогичных использованным в расчетах для предыдущего рис. Обозначения и смысл приведенных кривых на рис. а и рис. б аналогичны приведенным для предыдущих рис. а и рис. б, в отличие от которых здесь для кривых на рис. а наблюдается рост при росте  $D$ , у кривой 4 на рис. б также наблюдается рост при росте  $D$ , но здесь в свою очередь надо учитывать те замечания, которые выше были приведены в связи с поведением кривых 4 и 4' на предыдущем рис. б в связи с неадекватным учетом в расчетах NaI-монокристаллов.



- Полученные в настоящей работе результаты внушают некоторый оптимизм по поводу реалистичности рассматриваемых экспериментов. Предполагаемые следующие шаги в этом направлении:
  - развитие проводимых расчетов с внесением необходимых поправок для более реалистичного учета процессов в NaI- монокристаллах;
  - оценки для графитовой мишени ожидаемых абсолютных значений количеств образуемых ядер  $^{12}\text{B}$  и скорости счета регистрируемых распадов этих ядер;
  - измерения фоновых условий на макете установки с графитовой мишенью.
- 
- Авторы благодарны В.И.Шведуну за поддержку работы и полезные советы.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**