

РЕНТГЕНОВСКАЯ РАДИОГРАФИЯ ГРУЗОВЫХ КОНТЕЙНЕРОВ

Дж.И. Катц, Г.С. Бланпид, К.Н. Бороздин, и К. Моррис

Проблема обнаружения ядерного оружия, тайно перевозимого в пересекающем океан грузовом контейнере все еще не решена, а взрыв такого устройства в крупном городе может привести к потерям и ущербу для собственности, на порядки величины большим, чем 11 сентября 2001 года. Любые средства обнаружения такого устройства должны работать быстро и быть дешевыми для того, чтобы просматривать миллионы контейнеров, перевозящихся каждый год, и должны быть способными выделить угрожающее количество расщепляющихся материалов на фоне сложной загрузки безопасных материалов, находящихся во многих контейнерах. Здесь мы покажем, что практическим решением может стать радиография рентгеновским излучением высоких энергий, генерируемого посредством электронного ускорителя с энергией 10 МэВ, использующая преимущество высокой плотности и особых атомных свойств расщепляющихся материалов.

Дж.И. Катц работает в Лос-Аламосской Национальной лаборатории, Лос Аламос, штат Нью-Мексико, США, и на физическом факультете и в центре МакДоннелла по космическим наукам Университета Вашингтона, Сент-Луис, штат Миссури, США..

Г.С. Бланпид работает в Лос-Аламосской Национальной лаборатории, Лос Аламос, штат Нью-Мексико, США, и на физическом факультете Университета Южной Каролины, Колумбия, штат Южная Каролина, США.

К.Н. Бороздин работает в Лос-Аламосской Национальной лаборатории, Лос Аламос, штат Нью-Мексико, США.

К. Моррис работает в Лос-Аламосской Национальной лаборатории, Лос Аламос, штат Нью-Мексико, США.

Статья получена редакцией 19 мая 2005 года и принята к опубликованию 1 декабря 2005 года.

Мы благодарим Р.С. Скирато за указание на возможности коллиматоров Бакки по сокращению влияния рассеянного рентгеновского излучения в оптически толстых мишенях. Эта работа была поддержана Министерством энергетики США и была выпущена под номером разрешения ЛАНЛ LA-UR-05-2150.

Почтовый адрес для корреспонденций: J. I. Katz, Department of Physics and McDonnell Center for the Space Sciences, Washington University, 1 Brookings Dr., St. Louis, MO 63130, USA. E-mail: katz@wuphys.wustl.edu.

ВВЕДЕНИЕ

Каждый год в Соединенные Штаты попадают примерно 7 миллионов контейнеров по морю и около 9 миллионов по земле¹. Примерно сравнимые количества перевозятся между другими странами. Эти контейнеры, сравнительно малое количество которых открывается для проверки², предоставляют террористам потенциальное средства для контрабандной перевозки ядерного оружия через международные границы. Известно, что дважды за последние годы через пограничную проверку без обнаружения прошли слитки обедненного урана весом в пятнадцать фунтов (7 кг), безопасные сами по себе, но достаточно массивные, чтобы быть похожими на угрожающие количества урана или плутония оружейного качества^{3,4}. В этой статье мы представим результаты вычислений по методу Монте-Карло, показывающих, что радиограммы, полученные с помощью рентгеновских лучей достаточно больших энергий, способны обнаружить угрожающие количества расщепляющихся материалов, даже в контейнере, загруженном другими массивными поглотителями в сложной геометрии.

Рентгеновская радиография – это традиционный метод изучения внутренних областей непрозрачных объектов⁵. Она очень хорошо пригодна для сравнительно небольших объектов, но размеры (2,6 м × 2,6 м × 12 м) и тяжелая пространственно сложная структура загруз-

ки стандартного 40-футового грузового контейнера представляют серьезные препятствия. При средней плотности в $0,3 \text{ г/см}^3$ (эта загрузка в 24 тонны типична, хотя разрешаются загрузки до 30 тонн) ее массовая толщина вдоль ее короткого размера будет составлять 78 г/см^2 . Рассеяние рентгеновского излучения с энергией менее нескольких сотен кэВ хорошо описывается сечением томсоновского рассеяния⁶, что для большинства материалов соответствует непрозрачности $0,2 \text{ г/см}^3$. Это приводит к ослаблению пучка в $e^{15,6}$ раз (множитель $1,7 \times 10^{-7}$), которое препятствует использованию этих рентгеновских лучей малых энергий.

К счастью, при более высоких энергиях сечение рассеяния описывается формулой Клейна-Нишины⁶, и уменьшается приблизительно обратно пропорционально энергии. Для материалов с большим атомным номером Z , таких, как уран и плутоний, в поглощении в диапазоне более примерно 3 МэВ доминирует другой процесс поглощения, образование электрон-позитронных пар^{6,7}. Образование пар менее важно для материалов с меньшим атомным номером Z , так что их непрозрачность становится примерно постоянной, или продолжает уменьшаться при увеличении энергии, как это показано на рис. 1.

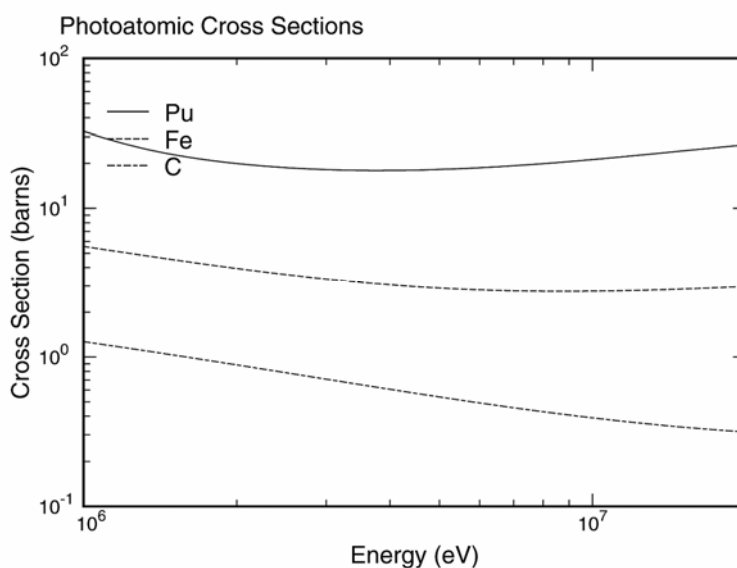


Рис. 1. Взаимодействие фотонов для представительных элементов⁷. При низких энергиях поперечные сечения (показанные в барнах в расчете на атом по оси ординат) уменьшаются с увеличением энергии (в эВ по оси абсцисс) из-за уменьшения сечения комптоновского рассеяния (формула Клейна-Нишины), в то время как при высоких энергиях они возрастают для элементов с большим атомным номером Z (но не для элементов с малым или средним атомным номером Z) из-за роста сечения образования пар.

Поглощение пучка поперек контейнера, заполненного материалом с низким или средним Z с плотностью $0,3 \text{ г/см}^3$ при энергиях в несколько МэВ тогда будет примерно равна e^2 (множитель $0,14$), так что рентгеновская радиография становится возможной. Кроме того, поскольку непрозрачность (в $\text{см}^2/\text{г}$) у материалов с большим Z выше, они будут выделяться на радиограммах еще четче, чем это будет определяться только ее высокой плотностью.

РАСЧЕТЫ

Множественные физические процессы и сложные геометрии, требуемые для моделирования рентгеновской радиографии приводят к тому, что количественные результаты могут быть получены только в расчетах по методу Монте-Карло. Необходимо включить упругое рассеяние электронов и позитронов, тормозное излучение, ионизацию при столкновениях, образование пар в кулоновском поле, аннигиляцию пар, когерентное и комптоновское рассеяние фотонов, фотоионизацию, рождение пар фотонами, и рекомбинацию с излучением фотона. Должно отслеживаться пространственное, угловое, и энергетическое распределение фотонов, электронов и позитронов. Во вспомогательных вычислениях следует также рассчитывать фотонейтронные процессы, перенос и захват нейтронов. Для того, чтобы справиться со всеми этими огромными вычислительными задачами, мы использовали про-

грамму MCNPX⁸⁻¹⁰.

Сначала мы рассмотрим сферу из 5 кг плутония в δ -фазе ($r = 4,22$ см) в центре контейнера, в других местах однородно заполненного железом в эквивалентной средней плотностью $0,3$ г/см³. Рентгеновский источник представляет собой пучок электронов с энергией 10 МэВ, который генерирует тормозное излучение при торможении в вольфрамовом конвертере (пластине толщиной 7 мм) на высоте 5,2 м над верхней стороной контейнера (такая высота позволяет единичному рентгеновскому источнику освещать всю ширину контейнера). Конвертер служит также фильтром высоких энергий для генерируемого излучения.

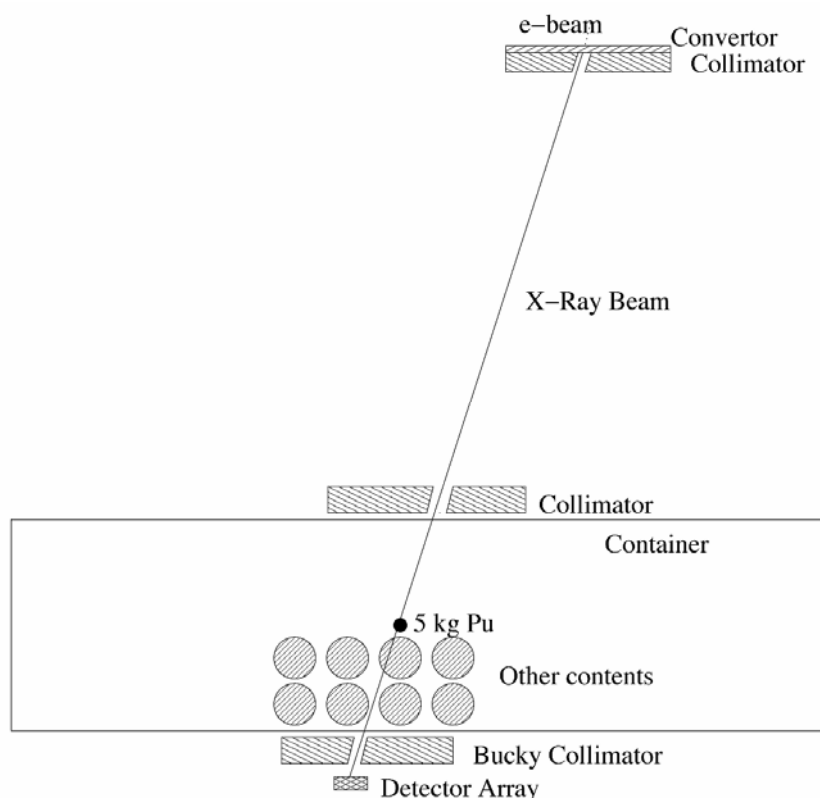


Рис. 2. Радиография грузового контейнера. Схематический рисунок (детали не в масштабе) показывают источник с электронным пучком, конвертер тормозного излучения, направление прямого освещения рентгеновскими лучами, коллиматоры, детекторы, и геометрию мишени, используемую в вычислениях. Распространение энергии по непрямым путям в результате рассеяния и поглощения с последующим переизлучением является важным, и коллиматор Бакки играет существенную роль в фильтрации рассеянного излучения, выявляя глубокое поглощение, обусловленное компактными кусками расщепляющегося материала. Количественные размеры приводятся в тексте.

Для того, чтобы уменьшить рассеяние излучения в глубокий минимум поглощения, возникающий от плутониевой сферы, необходима обширная коллимация. Под конвертером располагается изготовленный из вольфрама щелевой коллиматор толщиной 10 см с шириной щели 1,1 см. аналогичный щелевой коллиматор над контейнером соответствует решетке детекторов шириной в 1 см. детекторы моделируются как поперечный ряд точечных датчиков на 20 см ниже контейнера, расположенных на 1 см друг от друга, которые реагируют на поток рентгеновских лучей, как неплохое приближение к нескольким практическим сцинтилляторам. Последний коллиматор Бакки¹¹ между контейнером и детекторами состоит из вольфрамовой пластины толщиной 16 см с отверстиями диаметром в 0,5 см, просверленными вдоль линий от каждого детектора к источнику излучения. Предполагалось, что электронный пучок падал под углом в 13° к вертикали. Геометрия показана на рис. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Дискриминационные возможности рентгеновской радиографии высоких энергий демонстрируются на рис. 3, на котором плутониевая сфера выявляется ясно и однозначно. Статистическая неопределенность результатов может быть оценена из флуктуаций сигнала от точки к точке, и она не превышает 10 процентов. Вся длина 40-футового (12-метрового) грузового контейнера может быть просканирована за 1 200 экспозиций по мере того, как он будет продвигаться через импульсный пучок рентгеновского излучения. Ускорители электронов с энергией в несколько МэВ могут генерировать микросекундные импульсы с частотой в несколько сотен за секунду, так требуемое время сканирования может составить всего несколько секунд¹².

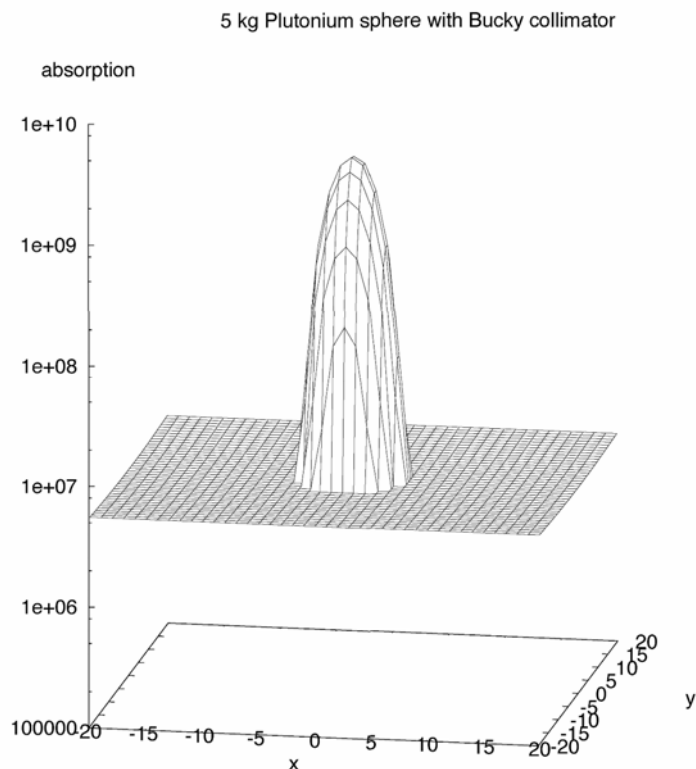


Рис. 3. Радиограмма поглощения в плутониевой сфере весом в 5 кг с коллиматором Бакки. Угрожающий объект расположен помещен в 40-футовом контейнере, наполненном, кроме того, 30 тоннами равномерно распределенного железа. Характерное повышение пространственно локализованного поглощения в плотном расщепляющемся материале очевидно. Поглощение определяется как обратная величина от обнаруженной энергии в Мэв/см² на электрон из источника. Координаты x и y даются в сантиметрах.

Многие контейнеры будут содержать тела из безвредного плотного материала со средним атомным номером Z (большие отливки, такие, как блоки двигателей, слитки, пакеты стержней, и т.п.), и террорист может заполнить пустое пространство в своем контейнере такими объектами для того, чтобы замаскировать плотный кусок расщепляющегося материала. Радиография должна идентифицировать, или исключить присутствие угрозы в таком неоднородном окружении. Поэтому на рис. 4 показана радиограмма такой же сферы из плутония в центре контейнера с весьма неоднородным содержимым (рис. 2). Помимо угрожающего объекта, контейнер содержит 230 сфер из железа половинной плотности (модель блока автомобильного двигателя, допускающая внутренние пустоты), с радиусом каждой в 20 см при общем весе в 30 тонн. Железные сферы располагаются в квадратной решетке с шагом в 50 см, в плоскости на 0,55 и 1,06 м ниже срединной плоскости контейнера.

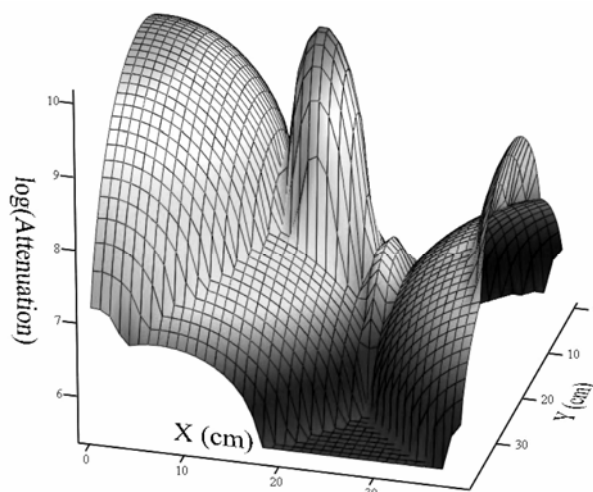


Рис. 4. Радиограмма поглощения плутониевой сферы в 5 кг в контейнере с неоднородной загрузкой. Плутониевая сфера в 5 кг помещена в контейнер с 30 тоннами железа, распределенного в двух плоскостях сфер половинной плотности диаметром в 40 см (соответствующих, например, блокам автомобильных двигателей). Плутоний образует пик поглощения с резким контрастом, легко различаемый по поглощению от прочего содержимого контейнера, и идентифицируемый по его комбинации малого размера и глубокого поглощения.

ОБСУЖДЕНИЕ

Если направление облучения будет вертикальным, то плутониевая сфера не будет обнаружимой из-за того, что луч зрения через нее пройдет через центры двух железных сфер с общей толщиной в 314 г/см^2 железа. По этой причине было выбрано освещение под наклоном. Для того, чтобы еще более уменьшить возможность скрытия угрожающего объекта из расщепляющихся материалов за непрозрачными массами материала с меньшим атомным номером, могут быть использованы несколько углов падения. Плутоний обнаруживается, даже если лучи зрения через него будут проходить также через одну из железных сфер, потому что его характеристическая сигнатура – комбинация сильного поглощения и малых размеров перпендикулярно пучку – имеется только у массивных кусков материала с большим атомным номером Z и для путей вдоль больших осей длинных узких объектов.

В безопасных грузах длинные узкие плотные объекты укладываются таким образом, чтобы их длинные оси были направлены по горизонтали, а плотные объекты укладываются на полу контейнера. Поэтому в безопасных грузах близкое к вертикальному облучению будет очень редко выявлять области интенсивного поглощения. Напротив, горизонтальное облучение будет часто выдавать такие «ложные положительные» результаты, которые потребуют ручной разгрузки и проверки. Другим преимуществом направленного вниз близкого к вертикальному облучения будет то, что земля обеспечит эффективное торможение пучка; в комбинации с тонким свинцовым экраном на поверхности, ее альбеда будет пренебрежимо малым и не потребуются дополнительной защиты.

Террорист может спрятать свои расщепляющиеся материалы в тени очень большого и сильного поглотителя (такого, как сплошной железный куб весом 30 тонн. Такую угрозу можно будет обнаружить, открывая те немногие контейнеры, которые будут показывать очень сильное поглощение, препятствующее просмотру. Невинный перевозчик может избежать ложного положительного обнаружения (и открытия своего контейнера) обеспечив, чтобы его груз не проявлял глубокого и локализованного в пространстве максимума поглощения в известном направлении облучения. Не требуется, чтобы радиография обнаруживала все угрозы или оправдывала все безопасные контейнеры, нужно только, чтобы она определяла все контейнеры, которые *могут* содержать угрозу, число которых было бы достаточно малым для того, чтобы допускать открытие и ручную проверку.

Использование рентгеновских лучей с как можно более высокой энергией (и, с необходимостью, электронов высоких энергий) предоставляет дополнительные преимущества. Возрастает не только общее пропускание, но и улучшается дискриминация между материа-

лами с большими и со средними и малыми атомными номерами Z . Кроме того, сечения комптоновского и когерентного рассеяния уменьшаются, а угловое распределение тормозного излучения и комптоновского рассеяния сужаются в направлении вперед⁶. Рассеянное излучение стремится заполнить глубокие и пространственно локализованные минимумы поглощения кусков материалов с высоким атомным номером Z , которые являются их характерной сигнатурой. Это может быть уменьшено с помощью увеличения энергии электронов (и, соответственно, рентгеновских лучей), и использованием коллиматора Бакки, поглощающего рентгеновское излучение, проходящее по наклонным путям.

Главным препятствием на пути использования рентгеновских лучей более высоких энергий (и электронных ускорителей) является образование фотонейтронов. Для большинства ядер энергетический порог образования фотонейтронов примерно равен 8 МэВ⁷, так что пучки электронов с энергией более 8 МэВ будут производить некоторую часть фотонов с энергией, достаточной для образования нейтронов и наведения низкого уровня нейтронной активации в безопасном грузе. Однако, при требуемой интенсивности облучения это несущественно. Выделение 10 МэВ энергии рентгеновского излучения (обычно около трех фотонов) в детекторе размером 1 см × 1 см на пути через центр плутониевой сферы в контейнере с сильно неоднородной загрузкой (рис. 4) будет указывать на глубину поглощения с фактором порядка двух, достаточно для отображения плотного объекта с высоким атомным номером Z . Из результатов расчетов следует, что потребуется $1,1 \times 10^{11}$ электронов с энергией 10 МэВ на один срез изображения, или около 0,18 джоуля (что не много по сравнению с возможностями промышленных ускорителей для радиографии). Контейнер будет облучен примерно $1,3 \cdot 10^{-7}$ Дж/см² рентгеновских лучей на своей верхней поверхности, или примерно 40 мДж рентгеновских лучей высокой энергии. Даже при энергиях фотонов в 10 – 20 МэВ сечение образования фотонейтронов не превышает 0,01 от полного сечения⁷, так что эти $2,5 \cdot 10^{10}$ рентгеновских фотонов образуют не более $2,5 \cdot 10^8$ фотонейтронов. Это следует сравнить со скоростью образования нейтронов от космических лучей в 0,1/кг/сек¹³, или $3 \cdot 10^3$ нейтронов на груз в 30 тонн. Радиография даже с самыми высокими энергиями образует нейтронный поток и активацию меньше тех, которые возникают за день от космических лучей.

Образование нейтронов в коллиматорах, которые поглощают практически все рентгеновские лучи, также невелико. Требуемые для сканирования 40-футового (12-метрового) контейнера срезами по 1 см 1200 импульсов содержат $1,3 \cdot 10^{14}$ электронов. Мы рассчитали, снова с использованием MCNPX⁸⁻¹⁰, образование фотонейтронов в вольфрамовом конвертере толщиной 7 мм с последующим свинцовым коллиматором толщиной 10 см. отношение нейтронов к электронам равно $7 \cdot 10^{-6}$ при 10 МэВ, $7 \cdot 10^{-4}$ при 15 МэВ, и $2,5 \cdot 10^{-3}$ при 20 МэВ (где спектр тормозного излучения перекрывается со гигантским дипольным ядерным резонансом¹⁴). Для электронов с энергией 10 МэВ доза для незащищенного оператора на расстоянии 20 м, который проверяет один контейнер в минуту, будет равна 500 нанозивертов в час (используя стандартное отношение потока к мощности дозы¹⁵). Этот фактор в 50 раз меньше уровня профессионального облучения в 0,05 зиверта в год (25 микрозиверта в час), и является только небольшой долей от типичного природного фона в 2 миллизиверта в год. Преимущества радиографии при энергиях в 10 МэВ могут быть достигнуты при приемлемой экспозиции персонала.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. U. S. Customs and Border Protection, www.cbp.gov/xp/enforcement/internationalactivities/csi, доступ 12 марта 2004 г.
2. S. E. Koonin, *et al.*, *Radiological Warfare* (Technical Report JSR-02-340, MITRE Corp., McLean, Va., 2002).
3. ABC News, abcnews.go.com/sections/wnt/DailyNews/sept_11uranium020911.html, доступ 12 марта 2004 г.
4. ABC News, abcnews.go.com/sections/wnt/PrimeTime/sept_11uranium030910.html, доступ 12 марта 2004 г.
5. *Nondestructive Testing Handbook*, 3rd Ed., Vol. 4, Bossi, R. H., Iddings, F. A., Wheeler, G. C., and Moore, P. O., eds. (Am. Soc. Nondestructive Testing, Columbus, Ohio, 2002).
6. J. D. Bjorken and S. D. Drell, *Relativistic Quantum Mechanics* (McGraw-Hill, New York, 1964).

7. Los Alamos National Laboratory, t2.lanl.gov/data/nd_viewer.html, доступ 12 января 2004 г.
8. H. G. Hughes, H. W. Egdorf, F. C. Gallmeier, J. S. Hencricks, R. C. Little, G. W. McKinney, R. E. Prael, T. L. Roberts, E. Snow, L. S. Waters, *et al.* (2002). MCNPX User's Manual Version 2.3.0 (Technical Report LA-UR-02-2607, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, N. Mex.).
9. H. G. Hughes, H. W. Egdorf, F. C. Gallmeier, J. S. Hendricks, R. C. Little, G. W. McKinney, R. E. Prael, T. L. Roberts, E. Snow, L. S. Waters, *et al.* (2002). MCNPX User's Manual Version 2.4.0 (Technical Report LA-CP-02-408, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, N. Mex.).
10. J. S. Hendricks, G. W. McKinney, L. S. Waters, T. L. Roberts, H. W. Egdorf, J. P. Finch, H. R. Trellue, E. J. Pitcher, D. R. Mayo, M. T. Swinhoe, *et al.* (2004). MCNPX Extensions Version 2.5.0 (Technical Report LA-UR-04-0570, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, N. Mex.).
11. G. Bucky, "A Grating Diaphragm to Cut Off Secondary Rays from the Object," *Archives of the Roentgen Ray*, 18 (1913):6-9.
12. *BEAMS 2002: 14th International Conference on High Power Particle Beams*, Mehlhorn, T. A., Sweeney, M. A., eds. (AIP, Melville, N.Y. 2002).
13. Y. Pal, in *Handbook of Physics*, Condon, E. U. and Odishaw, H., eds. (McGraw-Hill, New York, 1967), Figure 11.22.
14. A. Bohr and B. R. Mottelson, *Nuclear Structure* (Benjamin, New York, 1969).
15. G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement* (Wiley, New York, 1979).