

Н.А. Ашурко<sup>1</sup>, О.В. Богданов<sup>1,2</sup>

**TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY**

<sup>1</sup>Tomsk State University, 36 Lenin Ave, 634050 Tomsk, Russia

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Ave, 634050 Tomsk, Russia

## Введение

Исследование гигантского дипольного резонанса (ГДР), как коллективное ядерное возбуждение [1], является актуальной областью теоретических и экспериментальных исследований [2]. Одним из способов возбуждения ГДР является рассеяние гамма фотонов на ядра [3]. Излучение при каналировании (ИК) электронов в кристаллах обладает высокоэнергичным спектром [4] и может представлять интерес в качестве нового метода исследования ГДР в тяжелых ядрах. Существует много теоретических и экспериментальных работ, посвященных проблеме получения максимального выхода этого излучения в тонких и толстых кристаллах. Излучение при плоскостном каналировании имеет ряд преимуществ по сравнению с другими типами излучения (квазимонохроматичность, фокусировка и т.д.). Ранее нами была предложена гибкая схема генерации фотонейтронов легкими ядрами [5], в данной работе мы предлагаем использовать подобную схему для исследования возбуждения ГДР в тяжелых ядрах.

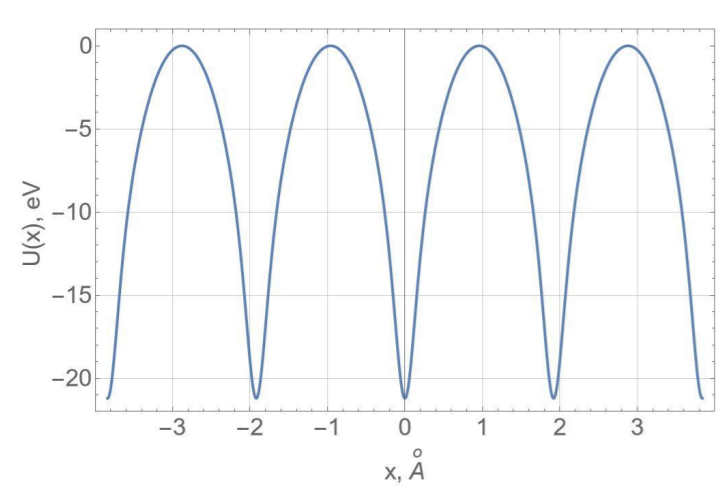
**Цель данной работы** — исследовать возбуждение ГДР в средних и тяжелых ядрах излучением каналированных электронов в кристалле Si.

## Модель

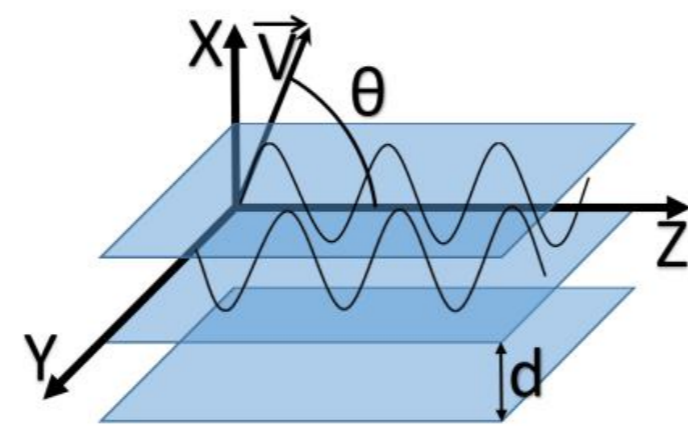
Для построения спектров излучения электронов при (110) каналировании в Si применим классический метод БКС [4]. Уравнения движения, моделирование межплоскостного потенциала и обозначения будем использовать здесь, как в [5].

На рисунке ниже представлены межплоскостной усредненный потенциал взаимодействия каналированных релятивистских электронов и соответствующие траектории равные 50 с энергией 1200 МэВ, толщиной кристалла Si 20 мкм и нулевым углом влета. Толщина кристалла выбрана в пределах длины деканалирования, чтобы избежать процессов многократного рассеяния. Расходимость в пучке электронов так же пренебрегаем.

Потенциал  $U(x)$  плоскостного каналирования электронов в Si (110)



Плоскости каналирования



С учетом, введенного потенциала (110) Si и соответствующих уравнений движения электронов численно рассчитано усредненное по точкам влета спектрально угловое распределение излучения по формуле ниже. Видно, что спектр состоящий из 300 траекторий электронов с энергией 1200 МэВ, шириной кристалла 20 мкм и нулевым углом влета имеет квазимонохроматический вид с максимум при 12 МэВ.

$$\frac{d\varepsilon}{d\Omega d\omega} = \frac{e^2}{4\pi^2 c} \left| \int_0^{\tau} \frac{[n(n-\beta)\beta]}{(1-n\beta)^2} e^{i(\omega t - kr)} dt \right|^2$$

Здесь,  $k = \omega n/c$  и  $\omega$  – волновой вектор и частота испускаемого излучения,  $n$  – единичный вектор, определяющий направление излучения фотона,  $r(t) = \beta_{||} ct + r_{\perp}(t)$  – траектория электрона;  $\beta = \dot{r}(t)/c = \beta_{||} + \beta_{\perp}$  – скорость, причем  $\beta_{||} = \dot{v}_{||}/c$ ,  $\beta_{\perp} = \dot{v}_{\perp}/c$  и  $\beta_{||} = \dot{v}_{||}/c = \text{const}$  – составляющая скорости, параллельная плоскостям кристалла.

Уравнение движения в поперечном направлении

$$\gamma m \ddot{x} = F = -\frac{\partial U(x)}{\partial x}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v_{||}^2/c^2}}$$

- Траектории были получены путем численного решения уравнений движения с использованием компьютерного кода “Basic Channeling with Mathematica©” BCM-2.0.
- Параметры расчетов: Толщина кристалла  $L=20$  мкм, энергией 1200 МэВ, угол влета равен нулю, где  $\theta_c$  – критический угол каналирования.

Данные ГДР для Au, Pb, U представлены в таблице 1. На рисунке представлены поперечные сечения ГДР на ядрах. Нетрудно заметить, что основные параметры, такие как положения и ширины пиков для спектра излучения электронов с энергией 1200 МэВ на и сечений ГДР близки.

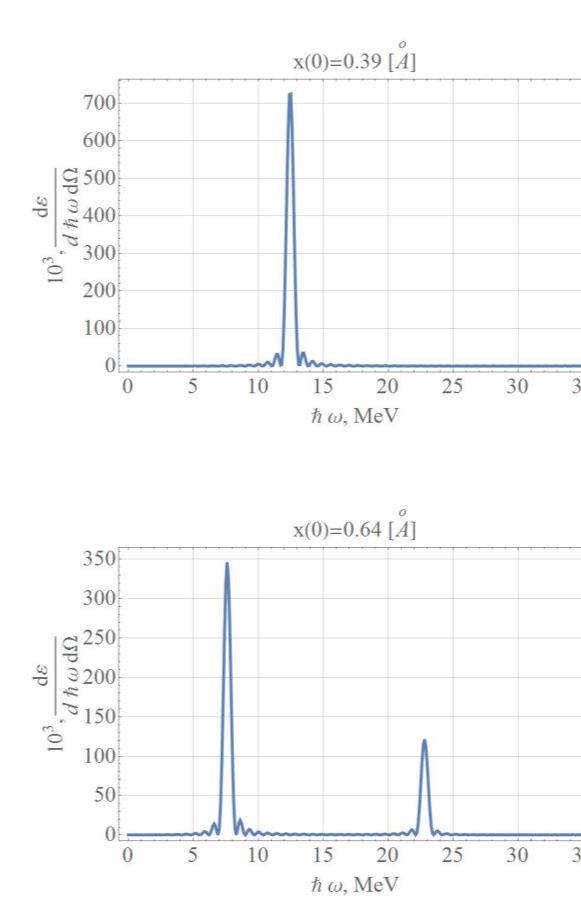
Ядро	Максимальная энергия (МэВ)	Максимальное поперечное сечение (мбэр)	Полная ширина на половине максимума
Au	13.2	515.8	4.2
Pb	13.5	572	4.3
U	11.44	300.3	3.2

Полный выход реакции ГДР будем рассчитать следующим образом

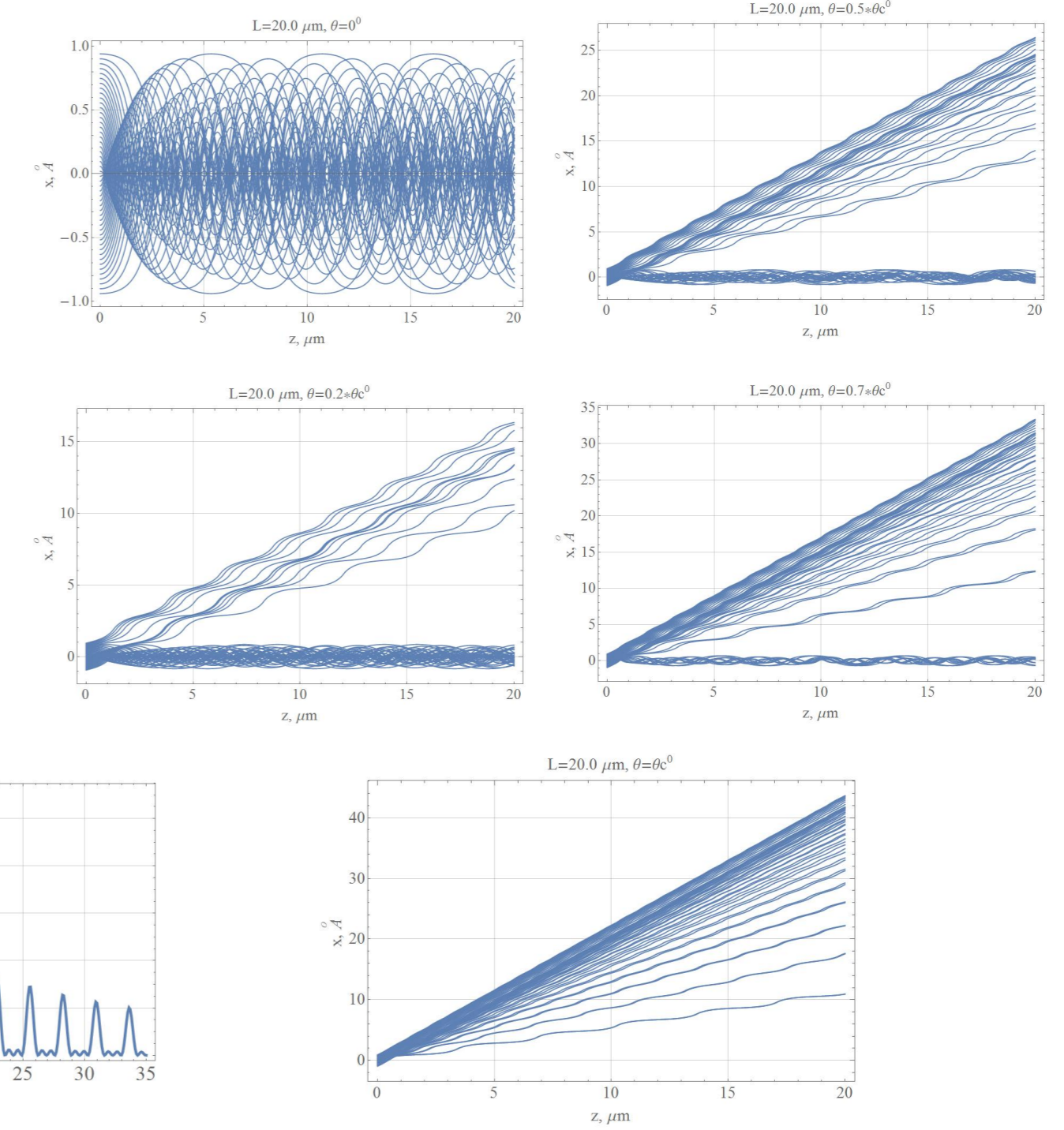
$$Y(\gamma_e) = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} d\hbar\omega \cdot N_{CR}(\gamma_e, \hbar\omega) \cdot [\sigma_{GDR}(\hbar\omega)], \quad N_{CR}(\gamma_e, \hbar\omega) = \frac{1}{\hbar\omega} \cdot \frac{dW}{d\hbar\omega dz}$$

где  $N_{CR}(\gamma_e, \hbar\omega)$  – число фотонов ИК,  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – характерные энергии ГДР,  $\sigma_{GDR}(\hbar\omega)$  – поперечное сечение вблизи ГДР. Значение  $Y(\gamma_e)$  зависит от релятивистского фактора  $\gamma_e$  каналированных первичных электронов, которые испускают фотоны ИК в кристалле.

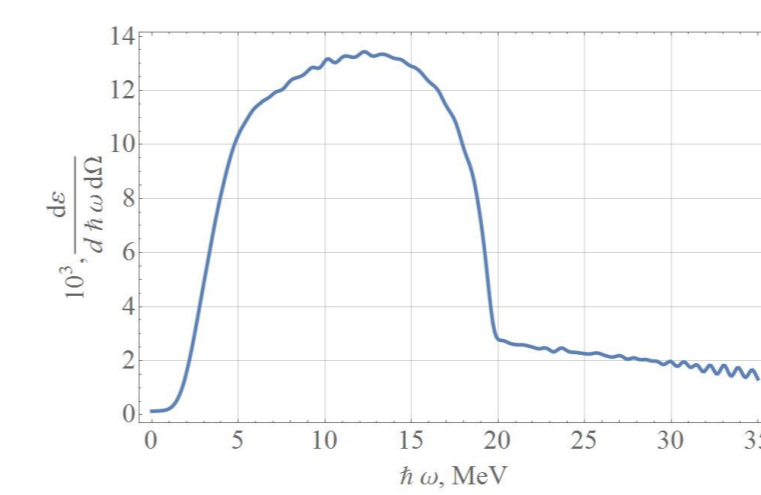
Спектры интенсивности излучения (110) каналированных электронов в кристалле Si



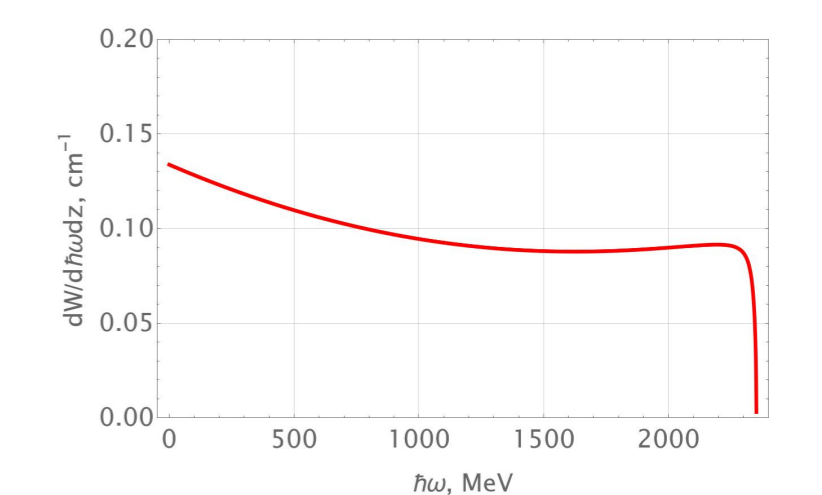
Траектории каналированных электронов с различным углом влета



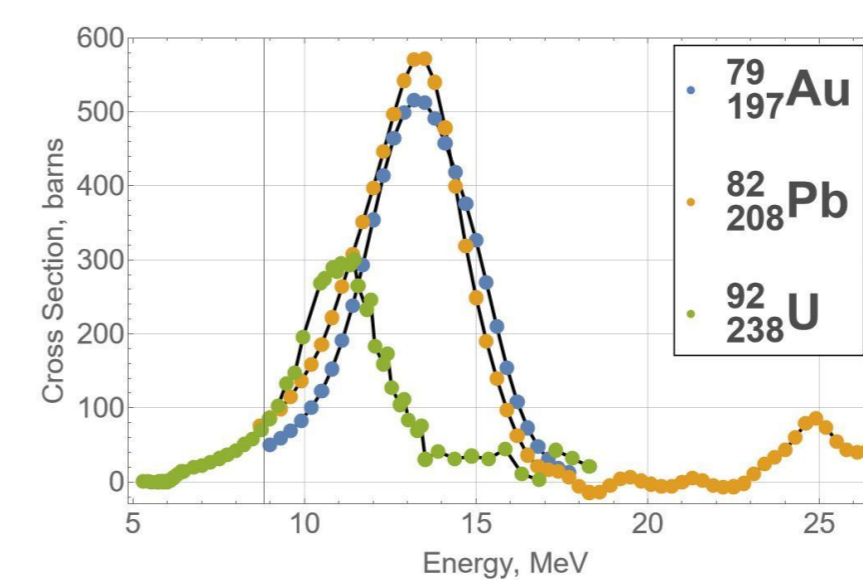
Усреднённый по точкам влета спектр интенсивности излучения (110) каналированных электронов в кристалле Si



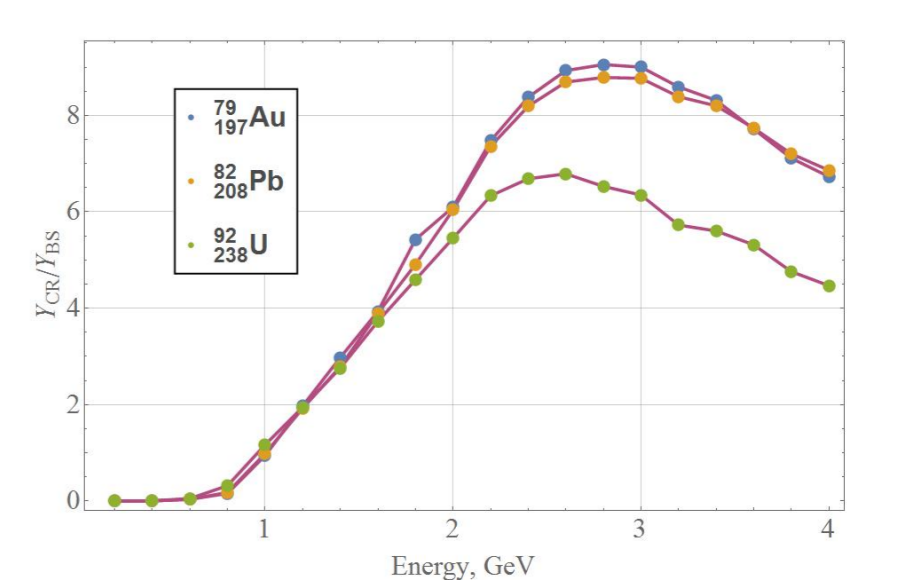
Спектр тормозного излучения электронов в аморфном Si



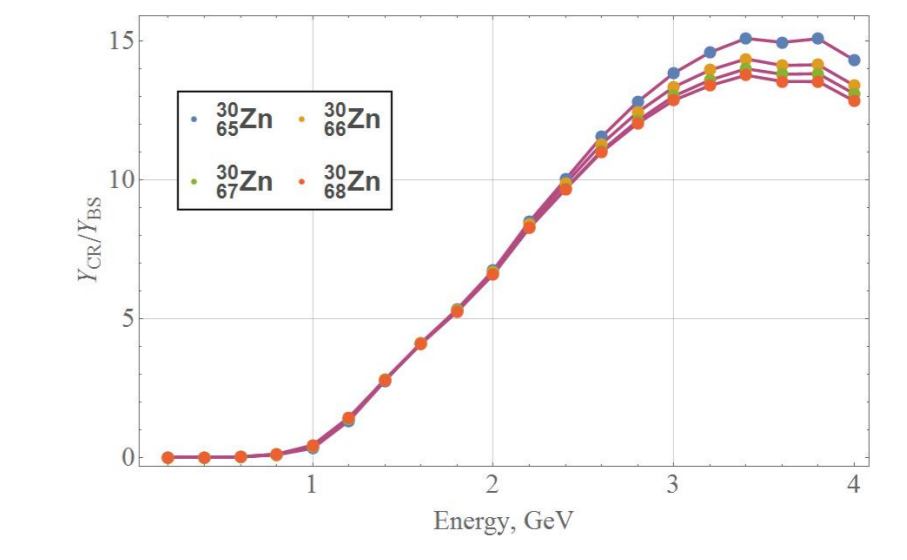
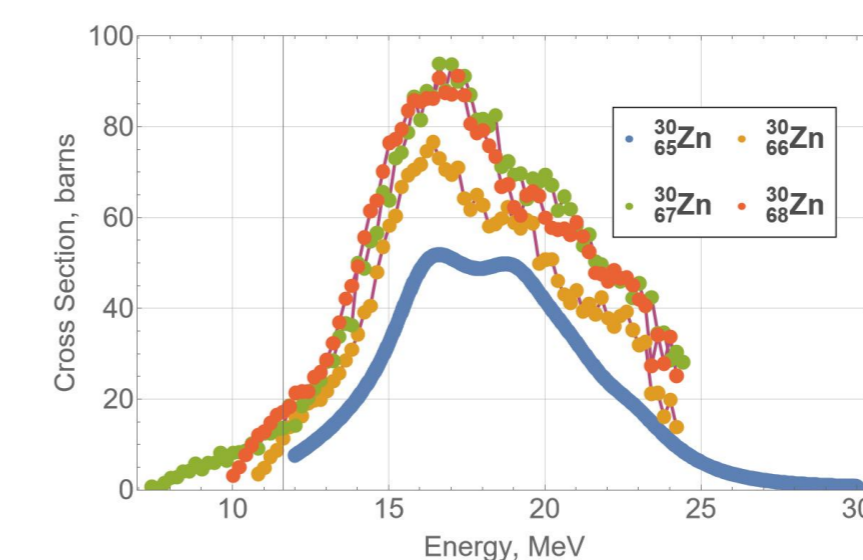
Поперечные сечения ГДР на ядрах Au, Pb и U



Отношения выходов ГДР ИК к тормозному излучению для различных мишеней



Поперечные сечения ГДР на ядрах Zn



## Заключение

- Численными расчетами исследовано возбуждение ГДР в тяжелых ядрах Au излучением каналированных электронов в кристалле Si (110). Представлены результаты моделирования отношения полных выходов ГДР ИК к тормозному излучению (в аморфной мишени Si) для ядра Au с нулевым углом падения электронного пучка относительно (110) кристалла Si плоскости в зависимости от релятивистского фактора электронов. Видно, что это отношение увеличивается в зависимости от энергии электронов и имеет ярко выраженный максимум.
- Аналогичные численные исследования представлены для возбуждения ГДР изотопов <sup>30</sup>Zn, <sup>66</sup>Zn, <sup>30</sup>Zn, <sup>30</sup>Zn. Показано, что исследования ГДР изотопов, предлагаемым методом, могут быть эффективны для ядер умеренной массы.

## Литература

- Migdal A. B. Quadrupole and dipole -radiation of nuclei // Phys. J. Phys (USSR). – 1944.-Vol.8. – P. 331
- Wang R. et al. Constraining the in-medium nucleon-nucleon cross section from the width of nuclear giant dipole resonance // Physics Letters B. – 2020. – Vol. 807. – P. 14-19
- Baldwin G.C., Klaiber G.S. Photo-Fission in heavy elements // Phys. Rev. – 1947. – Vol. 71. – P. 3-10
- Байер В.Н., Катков В.М., Страховенко В.М. Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах. – М.: Наука, 1989. – С. 400
- Bogdanov O.V., Dabagov S.B., Pivovarov Yu. L. Photonuclear reactions by relativistic electron channeling radiation // NIM B.– 2020. – Vol.465. – P. 67-72
- Varlamov V.V. Center for Photonuclear Experiments Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cdf.e.sinp.msu.ru>. (дата обращения: 15.03.2023)