

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.

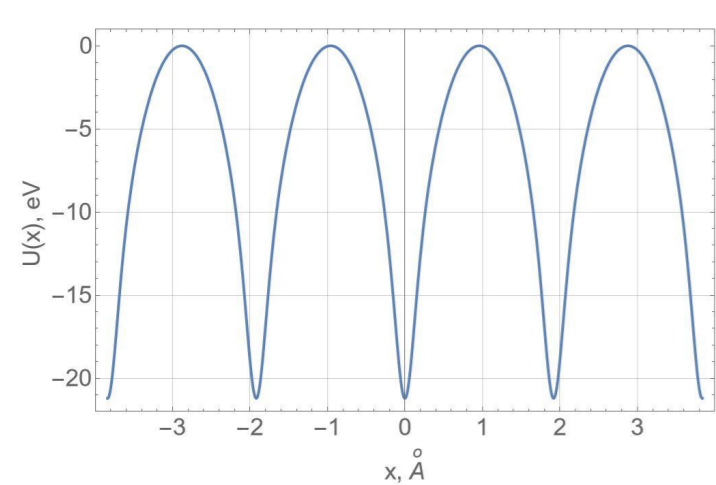
Цель данной работы — исследовать возбуждение ГДР в средних и тяжелых ядрах излучением каналированных электронов в кристалле Si.

Модель

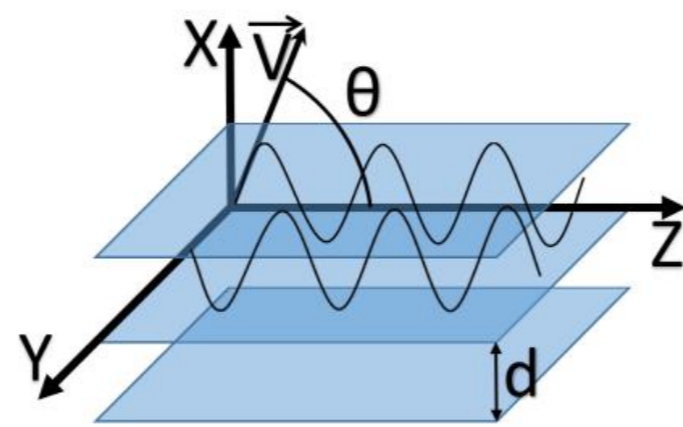
Для построения спектров излучения электронов при (110) каналировании в Si применим классический метод БКС [4]. Уравнения движения, моделирование межплоскостного потенциала и обозначения будем использовать здесь, как в [5].

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. Расходимостью 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 ω – 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

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

Данные ГДР для Au, Pb, U представлены в таблице 1. На рисунке 2 представлены поперечные сечения ГДР на ядрах и . Нетрудно заметить, что основные параметры, такие как положения и ширины пиков для спектра излучения электронов с энергией 1200 МэВ на рис. 2 и сечений ГДР на рис. 2 близки.

Ядро	Максимальная энергия (МэВ)	Максимальное поперечное сечение (мбэрн)	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

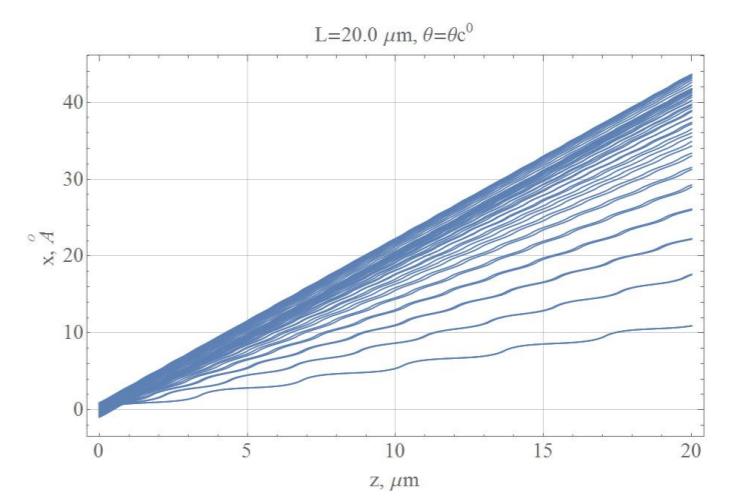
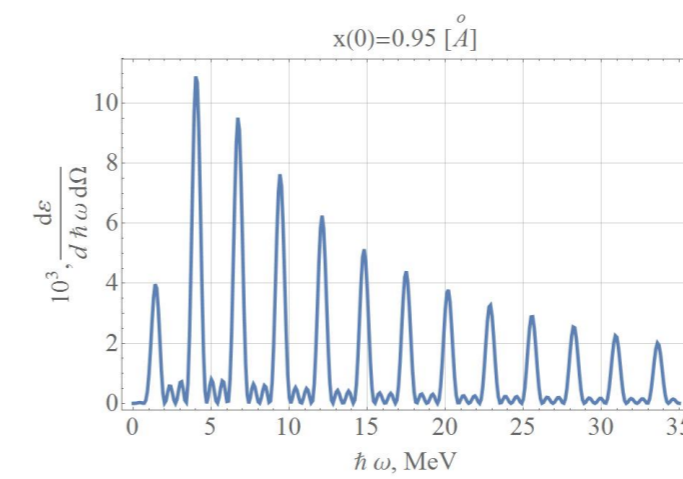
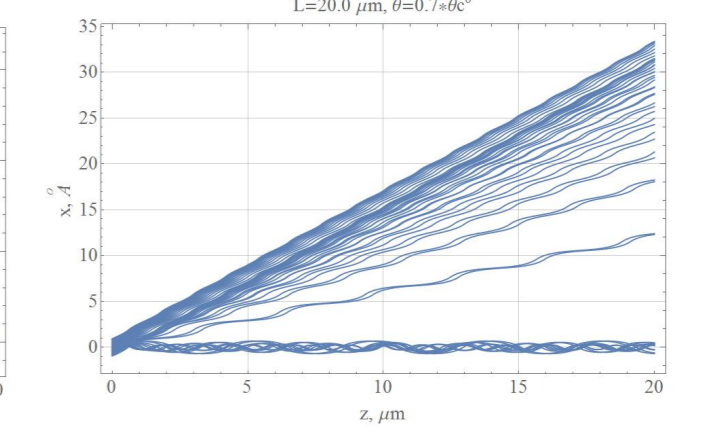
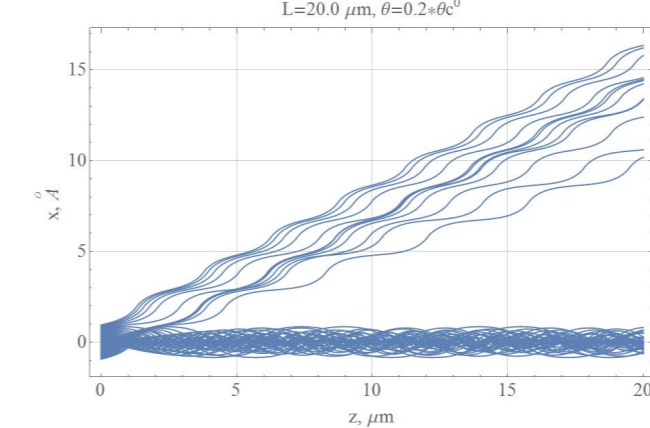
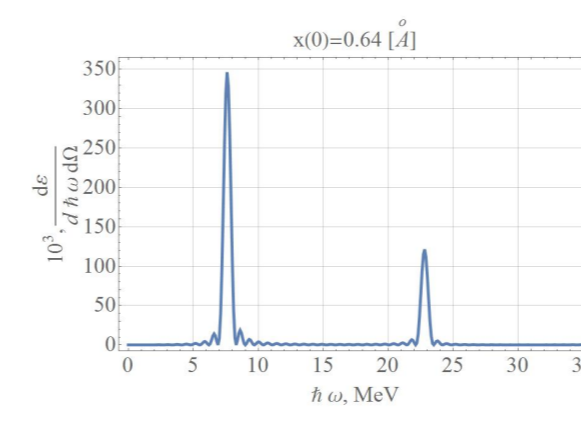
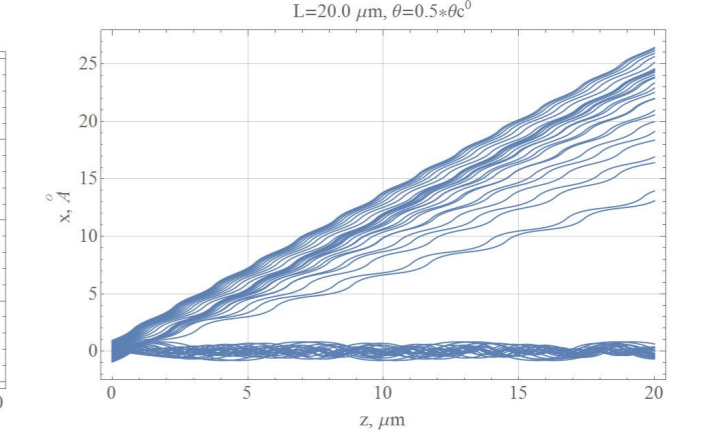
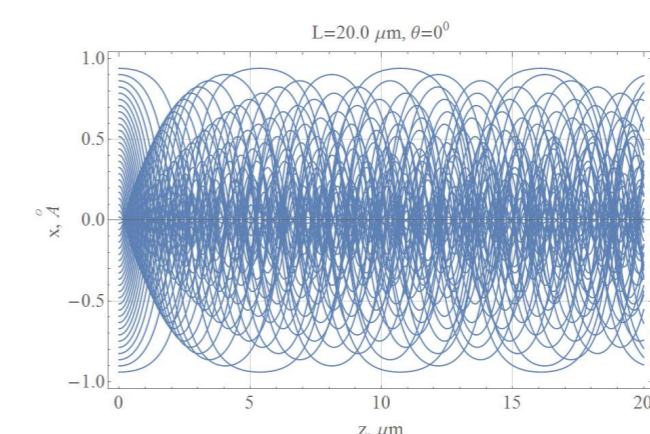
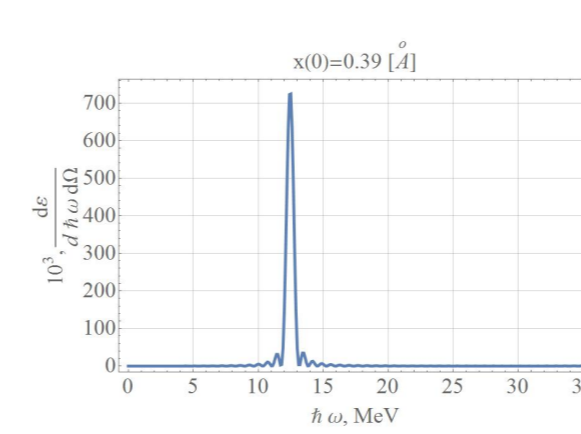
- Траектории были получены путем численного решения уравнений движения с использованием компьютерного кода “Basic Channeling with Mathematica©” BCM-2.0.
- Параметры расчетов: Толщина кристалла L=20 мкм, энергией 1200 МэВ, угол влета равен нулю, где θ_c – критический угол каналирования.

Полный выход реакции ГДР будем рассчитать следующим образом

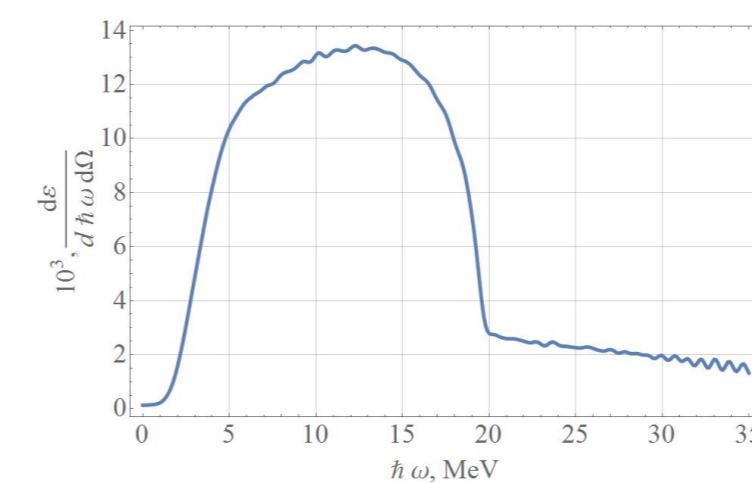
$$Y(\gamma_e) = \int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} d\hbar\omega \cdot N_{CR}(\gamma_e, \hbar\omega) \cdot [\sigma_{GDR}(\hbar\omega)], \quad N_{CR}(\gamma_e, \hbar\omega) = \frac{1}{\hbar\omega} \cdot \frac{dW}{d\hbar\omega dz}$$

где $N_{CR}(\gamma_e, \hbar\omega)$ – число фотонов ИК, ε_1 и ε_2 – характерные энергии ГДР, $\sigma_{GDR}(\hbar\omega)$ – поперечное сечение вблизи ГДР. Значение $Y(\gamma_e)$ зависит от релятивистского фактора γ_e каналированных первичных электронов, которые испускают фотоны ИК в кристалле.

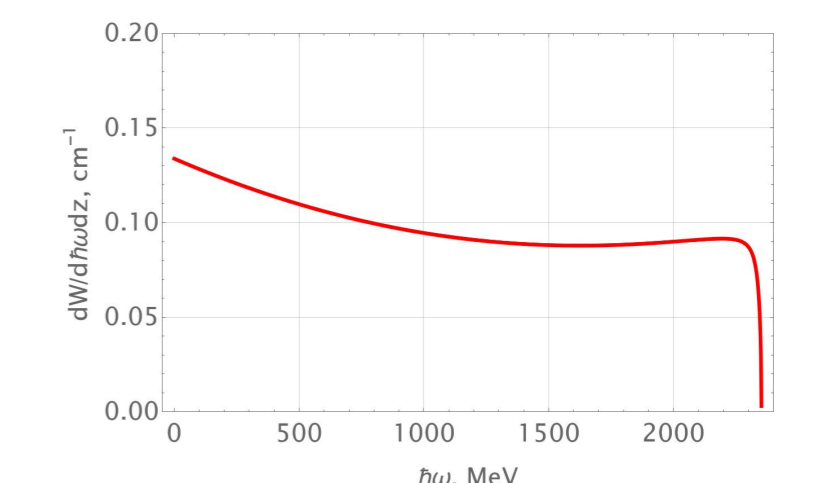
Спектры интенсивности излучения (110) каналированных электронов в кристалле Si



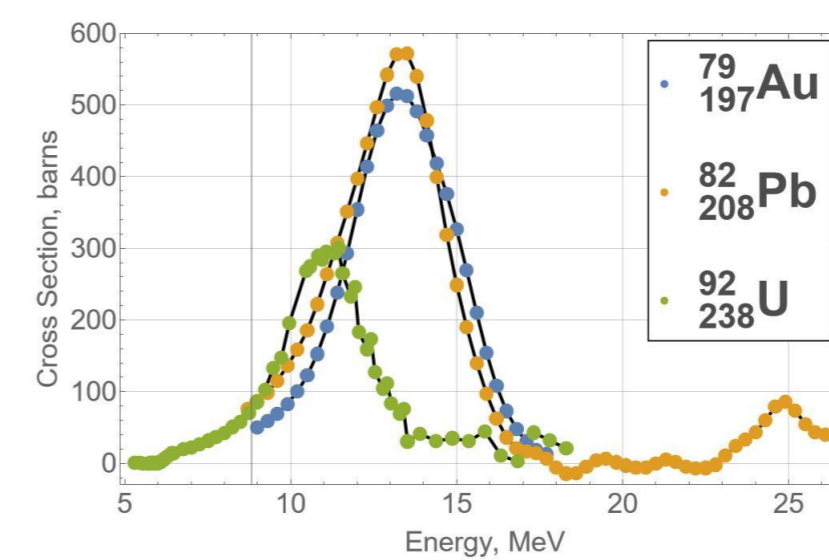
Усреднённый по точкам влета спектр интенсивности излучения (110) каналированных электронов в кристалле Si



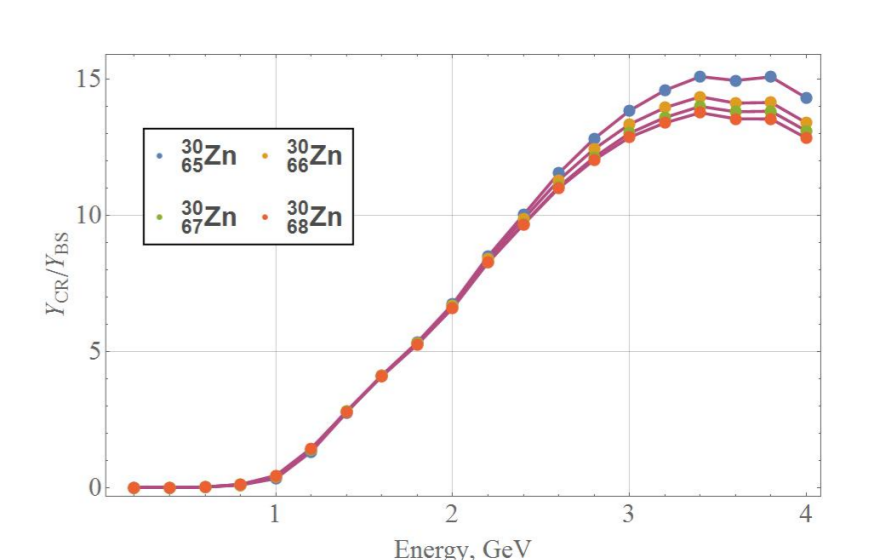
Спектр тормозного излучения электронов в аморфном Si



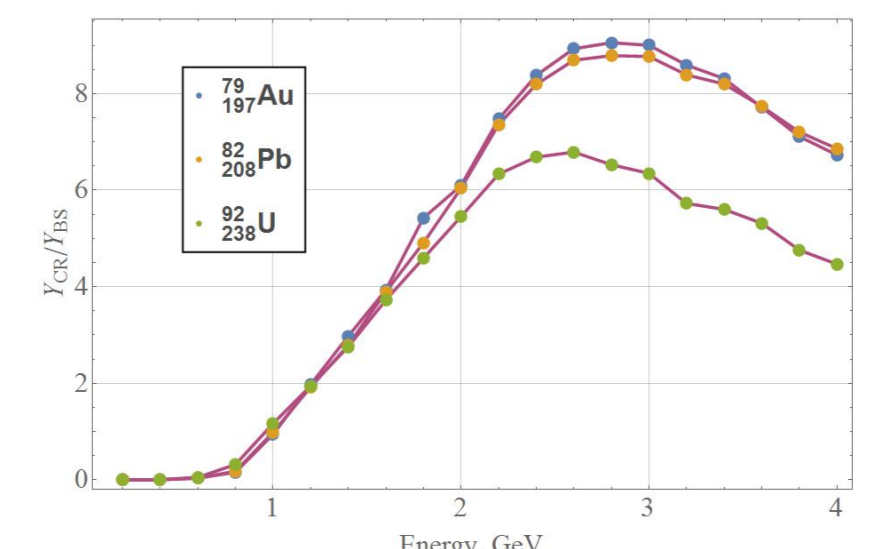
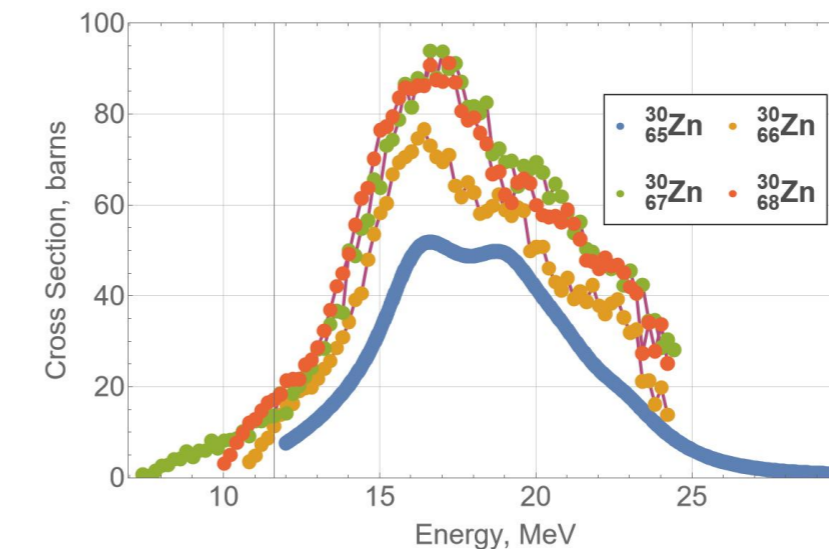
Поперечные сечения ГДР на ядрах Au, Pb и U



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 ³⁰Zn, ⁶⁵Zn, ⁶⁷Zn, ⁶⁸Zn. Показано, что исследования ГДР предлагаемым методом может быть эффективно 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)