

## Введение

- В полуволновом кристалле частица в условиях каналирования совершает половину колебания при движении вдоль плоскостей каналирования.
- При каналировании в таких кристаллах наблюдается эффект «зеркального отражения».
- Данный эффект экспериментально наблюдался для протонов с энергией 400 ГэВ в CERN-SPS [1] и для электронов с энергией 255 МэВ на ускорителе SAGA-LS [2, 3].
- По сравнению с протонами и электронами в случае релятивистских тяжелых ионов (РНИ) появляются два дополнительных параметра: заряд иона  $Z$  и массовое число  $A$ . Компьютерное моделирование каналирования изотопов с низким  $Z$  в полуволновом кристалле выявило изотопический эффект [4].
- В работе [5] были представлены результаты компьютерного моделирования каналирования РНИ с большими  $Z$  ( $^{129}\text{Xe}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) в кристаллах Si, Ge и W.
- В работе [6] была рассмотрена система из  $N$  веерно-расположенных полуволновых кристаллов, которая позволяет получить угол отклонения пучка ионов равный  $N$  критическим углам каналирования.
- Там же было показано, что эффективность отклонения пучка не зависит от энергии и вида ионов, и от типа кристалла, а зависит только от угловой расходимости ионного пучка.

**Цель данной работы** – провести моделирование угловых распределений релятивистских ионов в веерно-расположенных полуволновых кристаллах с учетом углового разброса вследствие эффекта многократного рассеяния ионов.

## Модель

В приближении каналирования уравнения движения релятивистских ионов в периодическом потенциале кристаллической решетки  $U(x)$  имеют следующий вид

$$\gamma M \ddot{x} = F_x = -Z \frac{\partial U(x)}{\partial x},$$

$$\gamma M \ddot{z} = 0.$$

$M$  – масса иона,  $Z$  – зарядовое число иона,  $\gamma$  – Лоренц фактор,  $F_x$  – сила, действующая на ион в периодическом поле кристалла.

**Начальные условия:**

точка влета в кристалл  $x(t=0) = x_0$

начальная скорость  $v_x(t=0) = v \sin \theta$

**Учет угловой расходимости:** для каждой точки влета  $x_0$  с помощью датчика случайных чисел выбирается несколько углов падения  $\theta$  с заданной угловой расходимостью  $\Delta\theta$ .

**Период колебаний, длина полуволны, критический угол каналирования:**

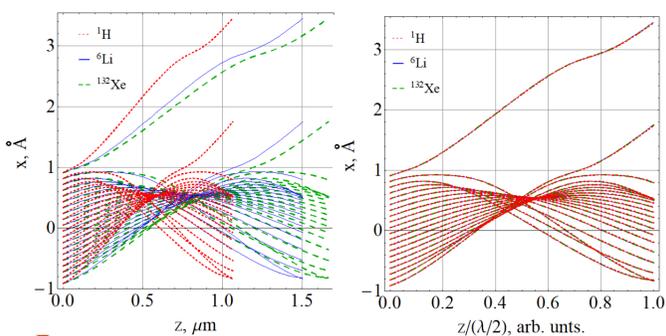
$$\theta_c = \sqrt{\frac{2ZU_0}{\beta^2 E}}, \quad T = \pi d_p \sqrt{\frac{\gamma M}{2ZU_0}}, \quad \frac{\lambda}{2} = \frac{v_z T}{2} = \frac{\beta c}{2} \pi d_p \sqrt{\frac{\gamma M}{2ZU_0}} = \frac{\pi d_p}{2\theta_c}$$

$U_0$  – глубина потенциальной ямы,  $E = \gamma M c^2$  – полная энергия иона,  $\beta = \frac{v}{c}$  (с – скорость света).

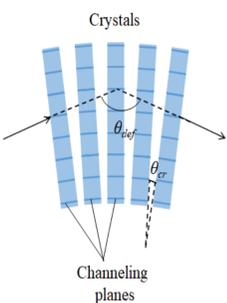
Crystal	Plane	$d_p, \text{\AA}$	$V_0, \text{eV}$
Si	(220)	1.92	21.1
W	(200)	1.58	80.2
$E_k = 300 \text{ MeV/u}$			
$^1\text{H}$	$^6\text{Li}$	$^{132}\text{Xe}$	
$A/Z$	1	2	2.44
$E_k = 1.75 \text{ MeV/u}$			
$^1\text{H}$	$^6\text{Li}$	$^{132}\text{Xe}$	
$A/Z$	1	2	2.44
$\theta_{nc} \text{ (mrad)}$			
Si	0.049	0.036	0.026
W	0.193	0.139	0.100
$\theta_c \text{ (mrad)}$			
Si	0.283	0.200	0.181
W	0.551	0.390	0.352
$\lambda/2 \text{ (\mu m)}$			
Si	1.065	1.506	1.665
W	0.451	0.638	0.705
$E, \text{GeV}$			
	1.238	7.403	162.468
	0.94002	5.61355	123.09893
$\gamma$			
	1.31974	1.32125	1.32230
	1.00187	1.00187	1.00188

## Результаты расчетов

Типичные траектории ионов  $^1\text{H}$ ,  $^6\text{Li}$  и  $^{132}\text{Xe}$  в (220) полуволновом кристалле Si.  $E_k = 300 \text{ MeV/u}$



Система из  $N$  веерно-расположенных полуволновых кристаллов

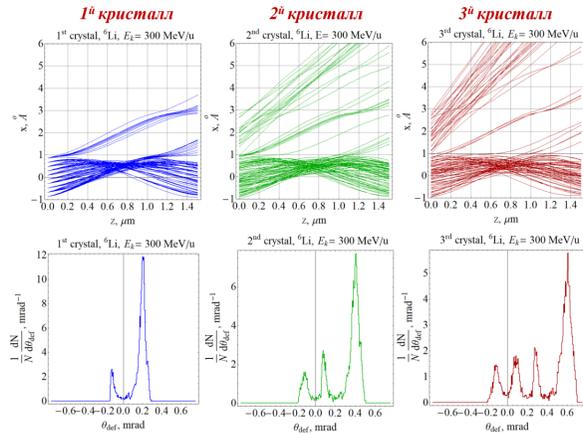


## Литература

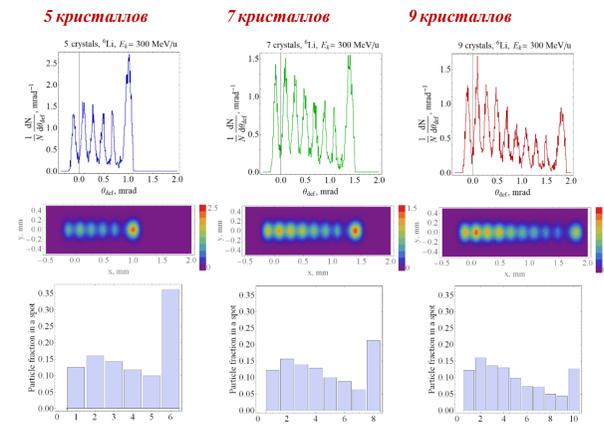
- Scandale W et al 2014 Phys. Lett. B 734, 1
- Takabayashi Y et al 2015 Phys. Lett. B 751, 453
- Takabayashi Y et al 2015 Nucl. Instr. and Meth. B 355, 188
- Bogdanov O V et al 2020 Phys. Lett. B 802 135265
- Bogdanov O V, Pivovarov Yu L, Tukhfatullin T A 2021 Nucl. Instr. and Meth. B 486 22
- Bogdanov O V, Tukhfatullin T A 2024 Nucl. Instr. and Meth. A 1061 169122

## Результаты расчетов без учета многократного рассеяния

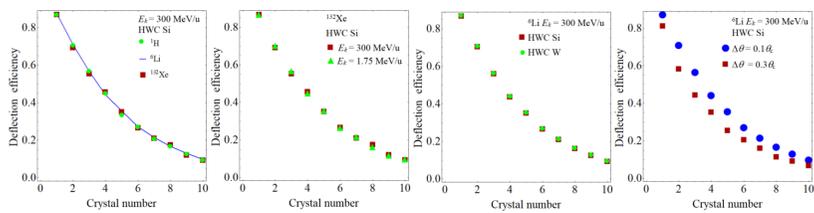
Типичные траектории и угловые распределения ионов  $^6\text{Li}$  в (220) полуволновом кристалле Si  $\Delta\theta = \theta_c/10 = 0.02 \text{ mrad}$ ,  $E_k = 300 \text{ MeV/u}$ ,  $\theta = \theta_c/2 = 0.1 \text{ mrad}$ .



Угловые распределения, пространственные распределения и доля ионов в пятне ионов  $^6\text{Li}$  в (220) полуволновом кристаллах Si  $\Delta\theta = \theta_c/10 = 0.02 \text{ mrad}$ ,  $E_k = 300 \text{ MeV/u}$ ,  $\theta = \theta_c/2 = 0.1 \text{ mrad}$ .

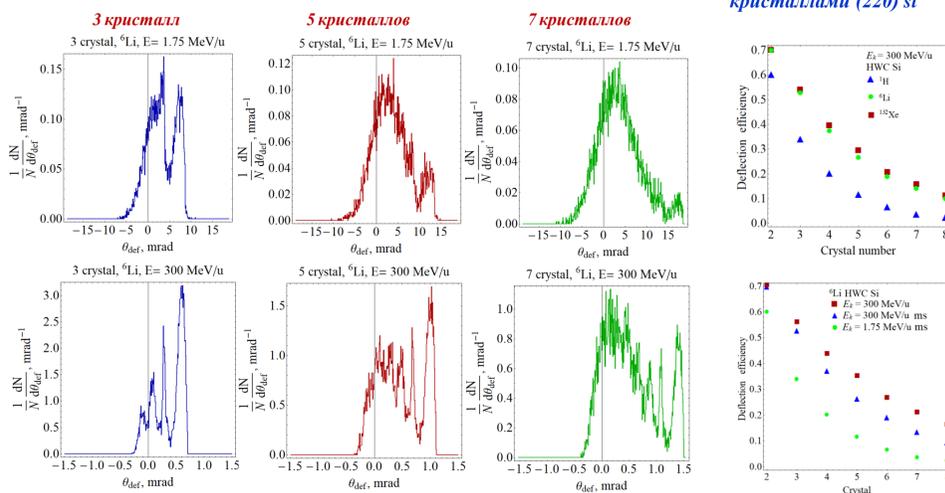


Эффективность отклонения ионов  $^1\text{H}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{132}\text{Xe}$   $E_k = 300 \text{ MeV/u}$  и  $E_k = 1.75 \text{ MeV/u}$  полуволновыми кристаллами (220) Si и (200) W



## Результаты расчетов с учетом многократного рассеяния

Угловые распределения ионов  $^6\text{Li}$  в (220) полуволновых кристаллах Si  $\Delta\theta = \theta_c/10 = 0.02 \text{ mrad}$ ,  $E_k = 300 \text{ MeV/u}$ ,  $E_k = 1.75 \text{ MeV/u}$ ,  $\theta = \theta_c/2 = 0.1 \text{ mrad}$ . Эффективность отклонения ионов  $^1\text{H}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{132}\text{Xe}$ ,  $E_k = 300 \text{ MeV/u}$  и  $E_k = 1.75 \text{ MeV/u}$  полуволновыми кристаллами (220) Si



## Заключение

- Расчитаны угловые распределения и траектории релятивистских ионов  $^1\text{H}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{132}\text{Xe}$  с кинетической энергией 300 и 1,75 МэВ/нуклон, каналированных в системе веерно-ориентированных полуволновых кристаллов Si и W.
- Угловые распределения имеют тонкую структуру при расчетах без учета эффекта многократного рассеяния.
- Эффективность отклонения ионного пучка уменьшается с увеличением числа кристаллов в системе с 86% до 10% (для 2 и 10 кристаллов соответственно).
- Эффективность отклонения ионов системой не зависит от энергии ионов, отношения  $A/Z$  ионов, типа кристаллов и зависит только от угловой расходимости ионного пучка при расчетах без учета эффекта многократного рассеяния.
- При моделировании с учетом вклада эффекта многократного рассеяния ионов в объеме кристаллов появляется зависимость от энергии и  $A/Z$  ионов.
- Учет углового разброса вследствие эффекта многократного рассеяния приводит к снижению эффективности отклонения пучка на 10-30% в зависимости от энергии ионов.
- Система веерно-ориентированных полуволновых кристаллов может быть использована для отклонения пучка ионов на угол до критического угла каналирования  $N\theta_c$ , в дополнение к существующим магнитным системам.