

**Сессия Ученого совета ПИЯФ РАН**

**Экспериментальное обнаружение и  
исследование объемного отражения  
протонов высокой энергии  
в изогнутых кристаллах**

**Ю.М.Иванов**

**Гатчина, 14 февраля 2008**

# Исследование началось с эксперимента в ИФВЭ по изучению многооборотного вывода протонного пучка из ускорителя У-70 с помощью изогнутого кристалла (1997-2001)

Письма в ЖЭТФ, том 67, вып.10, стр.741 - 745

© 1998г. 25 мая

## ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОМУ ВЫВОДУ ПРОТОНОВ ИЗ У-70 С ПОМОЩЬЮ МОНОКРИСТАЛЛА

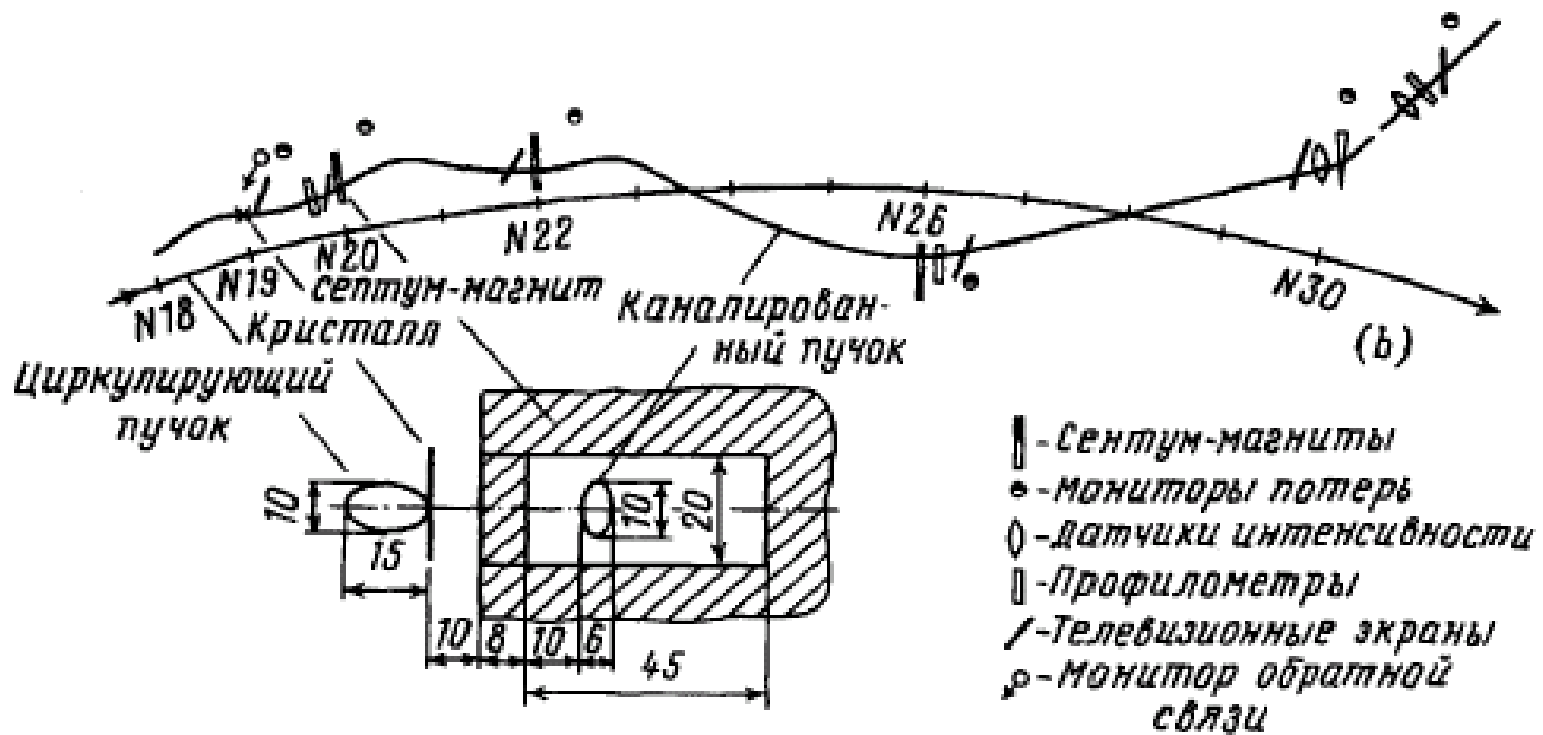
А.Г.Афонин, В.М.Бирюков, В.А.Гаврилушкин, В.Н.Гресь, Б.А.Зеленов,  
В.И.Котов, В.А.Маишеев, А.В.Минченко, В.Н.Терехов, Е.Ф.Троянов,  
Ю.А.Чесноков<sup>1)</sup>, М.Г.Гордеева\*, А.С.Денисов\*, Ю.М.Иванов\*, А.А.Петрунин\*,  
В.В.Скоробогатов\*, Б.А.Чунин\*

Институт физики высоких энергий РАН  
142284 Протвино, Россия

\* Санкт-Петербургский институт ядерной физики РАН  
188350 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 13 апреля 1998 г.

# Схема эксперимента на У-70

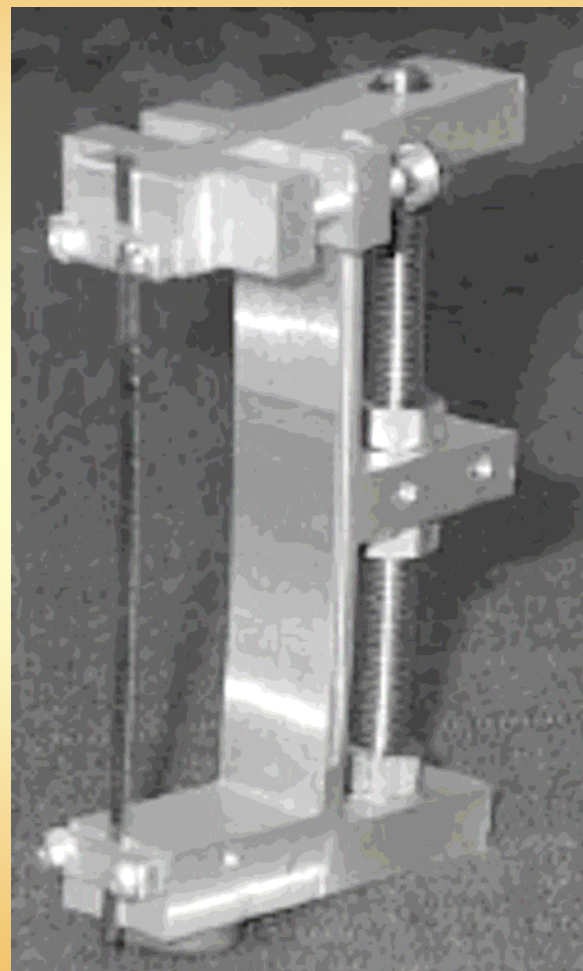
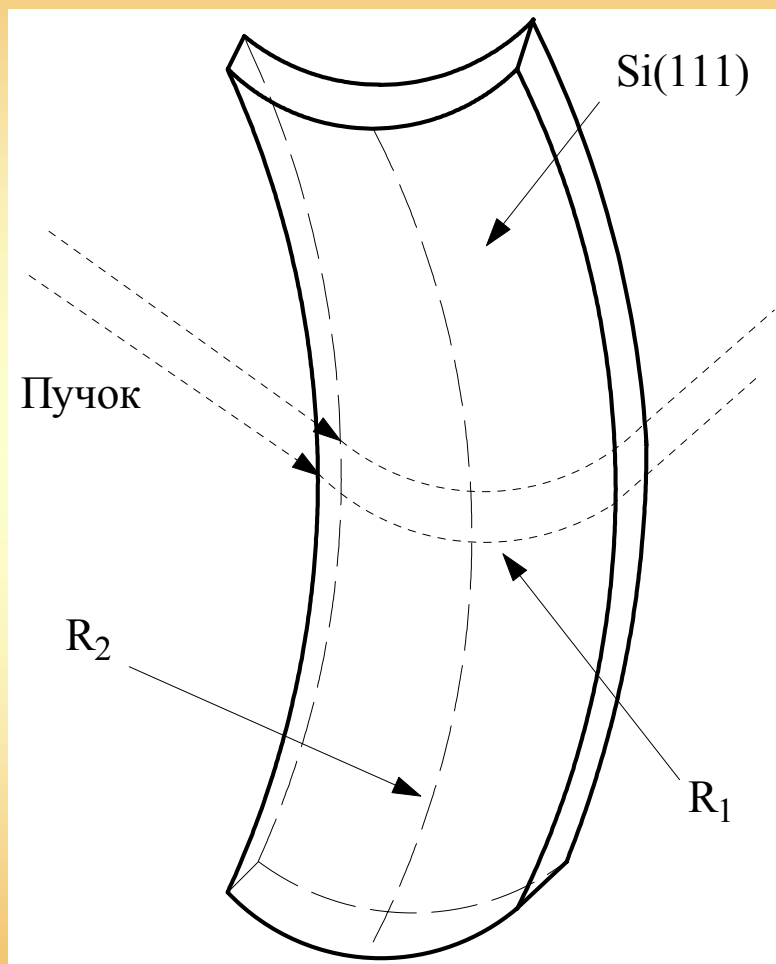


Малый угол изгиба кристалла ( $\sim 0.5 - 1.0$  мрад)

Малая длина кристалла вдоль протонного пучка

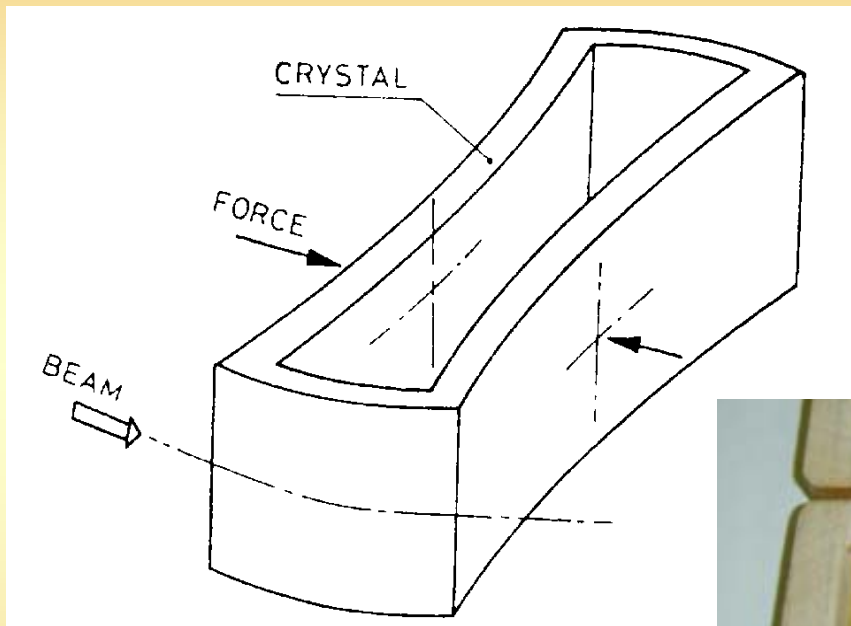
Множественность прохождения протонов через кристалл

# Кристаллы-полоски (ИФВЭ)



Размеры  $\approx 3 \times 1 \times 60 \text{ mm}^3$

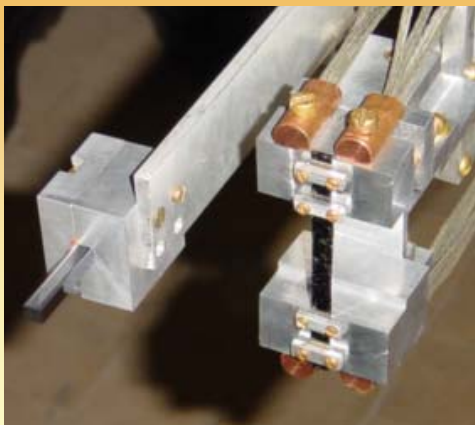
# О-кристаллы (ПИЯФ)



Размеры  $\approx 5 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$



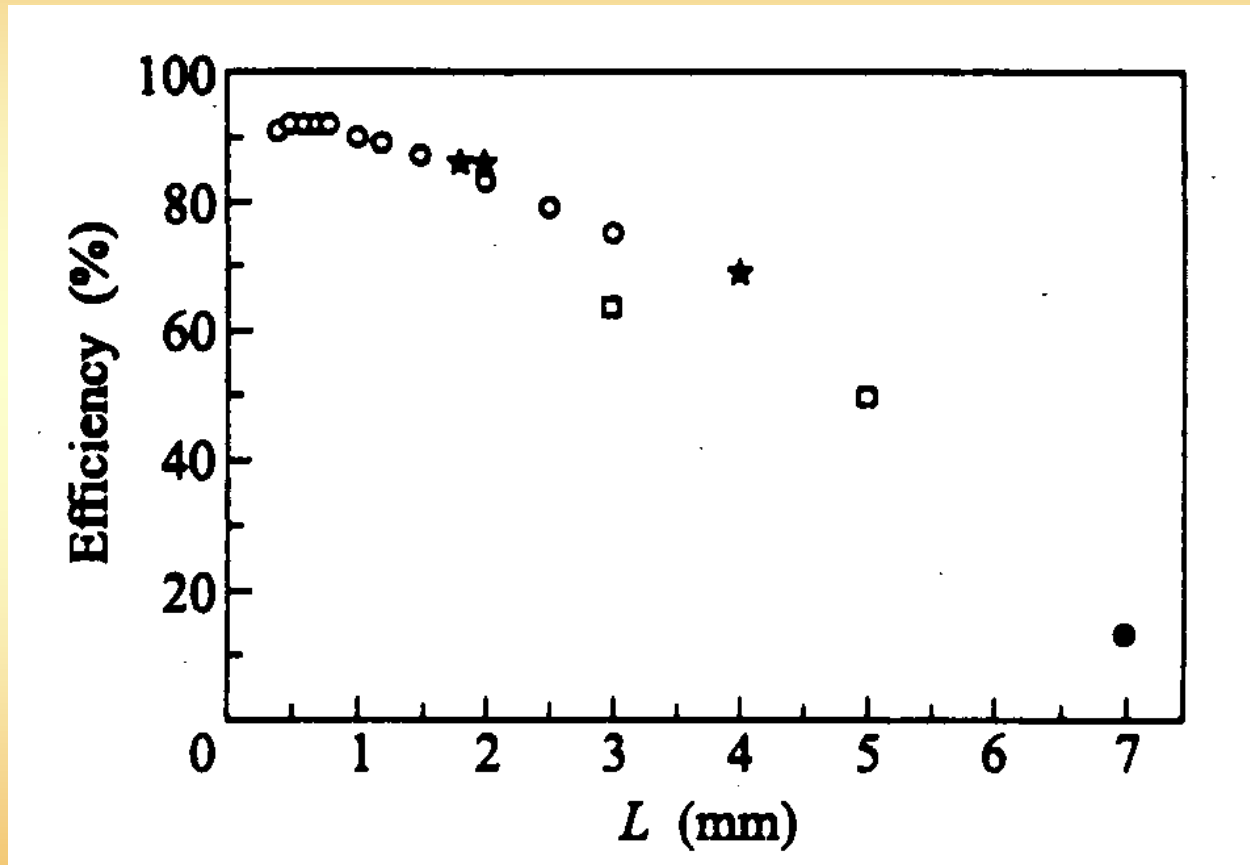
# Установка кристаллов в кольцо У-70



# Полученные результаты

<b>Длина кристаллов по пучку</b>	<b>2-7 mm</b>
<b>Эффективность вывода</b>	<b>20-85%</b>
<b>Интенсивность выведенного пучка</b>	<b><math>\sim 1 \times 10^{12}</math></b>
<b>Радиационная стойкость</b> (продолжает работать с эффективностью $\sim 40\%$ )	<b><math>\sim 10^{20}</math></b>

# Зависимость эффективности вывода от длины кристалла





**Как еще уменьшить длину  
изогнутого кристалла вдоль пучка?**

**Использовать эффект упругой  
квазимозаичности.**

# Reflection of Gamma-Rays From Bent Quartz Plates

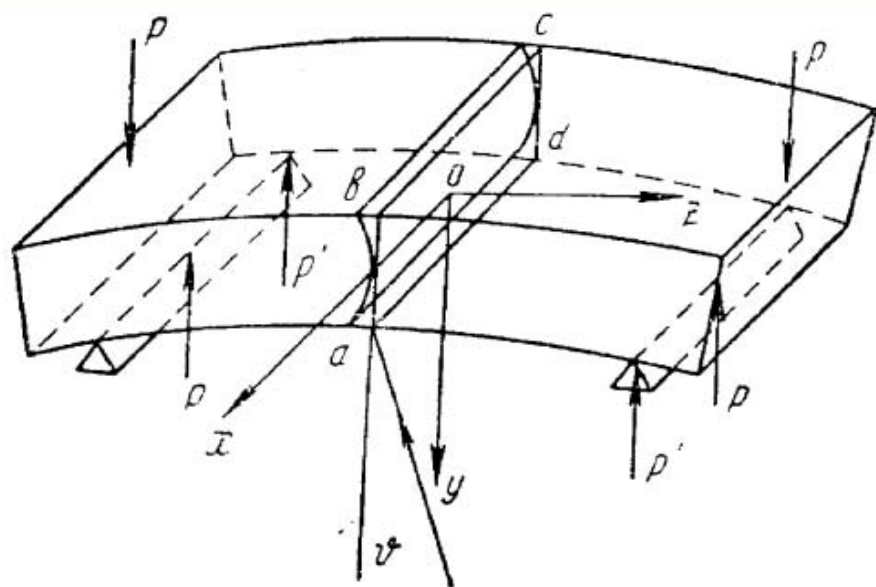
O. I. SUMBAEV

*All-Union Scientific Research Institute of Metrology*

(Submitted to JETP editor October 16, 1956)

*J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.)* 32, 1276-1279 (April, 1957)

**I**N INVESTIGATING the coherent reflection of  $x$ - and  $\gamma$ -rays from the  $1340$  planes of quartz plates cut from an  $\alpha$ -quartz single crystal so that the  $1340$  planes were normal to the plane of the plate and the side edges were parallel to the optical axis of the crystal, Lind, West and DuMond<sup>1</sup> found that the dependence of the integrated reflection coefficient on the wavelength for plates elastically bent to a cylinder of 2 meters radius is close to quadratic. Their measurements of the integrated reflection coefficient for the same plate in the unstressed state led to a dependence close to the linear, *i.e.*, the dependence characteristic of ideal crystals. Lind *et al.* do not attempt to give an explanation of the observed effect noting only that "... the quartz might, however, become mosaic-like in structure in some elastically reversible way not now understood."



We felt it would be of interest to verify the quadratic dependence of the reflection coefficient on the wavelength discovered by Lind, West and DuMond and to find an explanation of the effect. The meas-

# EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE ELASTIC QUASI-MOSAIC EFFECT

O. I. SUMBAEV

A. F. Ioffe Physico-technical Institute, USSR Academy of Sciences

Submitted December 14, 1967

Zh. Eksp. Teor. Fiz. 54, 1352-1360 (May, 1968)

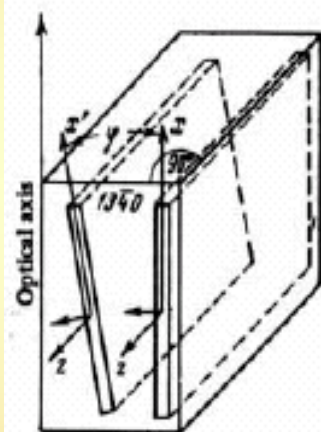


FIG. 4. Position of compared plates in the single-crystal quartz block.

ent orientations (the indices of the planes coinciding with the normal cross sections are indicated on the curves)<sup>[9]</sup>.

The purpose of the present paper is to present a comparison of the experimental and calculated parameters of the diffraction process for different values of the flexure coefficient  $k(\varphi)$ , and particularly a verifica-

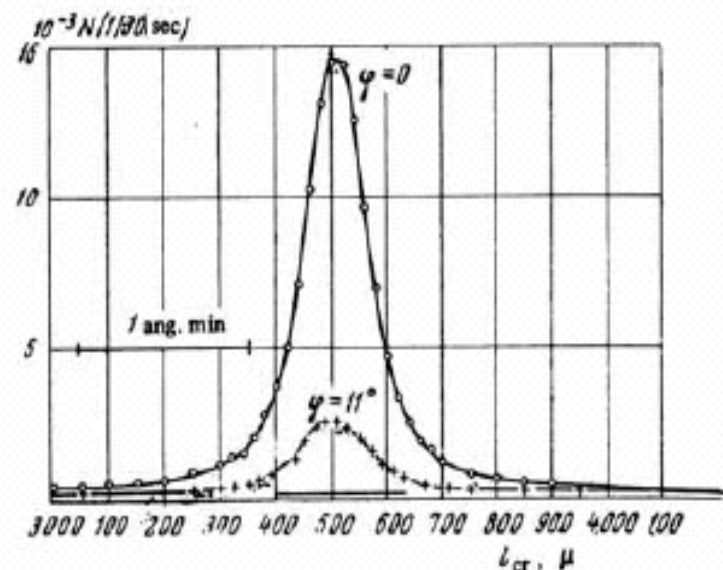


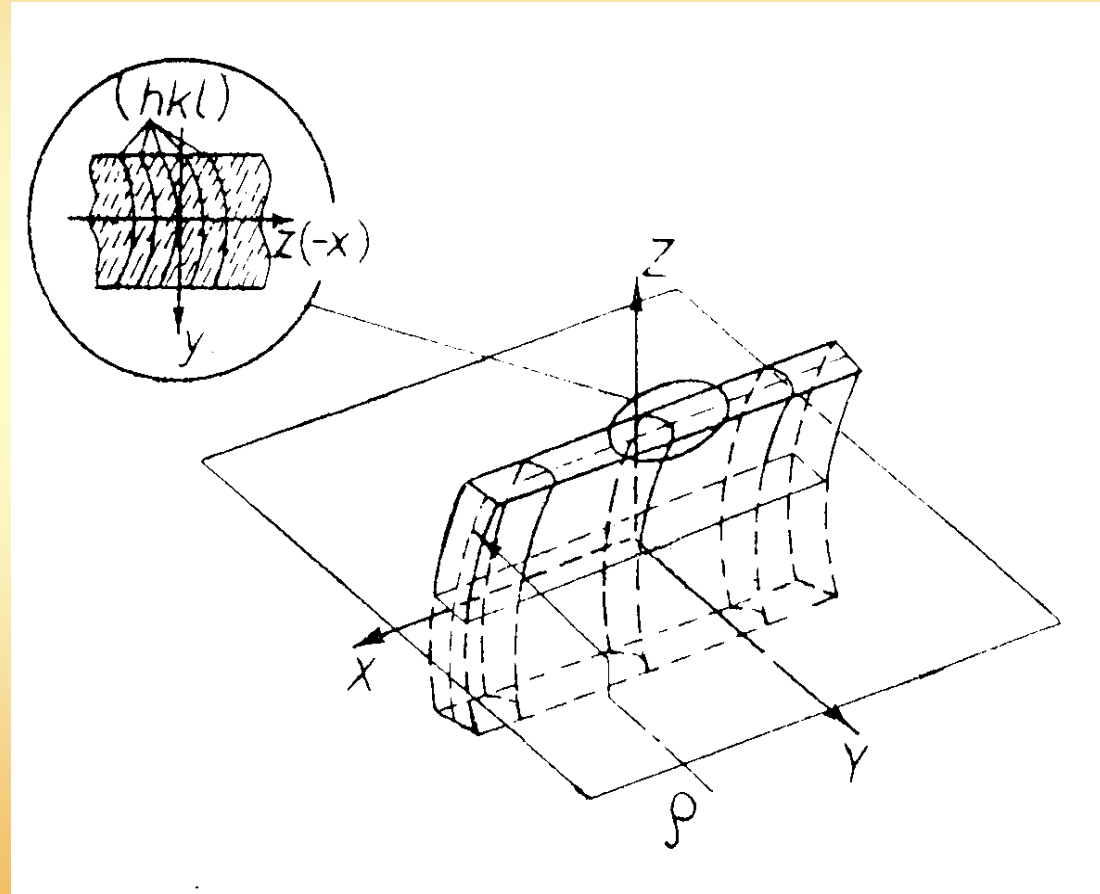
FIG. 5.  $K_{\alpha_1}$  Sn x-ray line obtained with a two-meter Cauchois spectrometer using compared plates of 1 mm thickness. Receiving slit =  $250\mu$ ;  $N$  - number of  $\gamma$  quanta registered in 30 sec;  $l_{cr}$  - linear displacement of the end of the one-meter arm of the crystal drive. The vertical scale is doubled for the  $\varphi = 11^\circ$  line.

**В.М.Самсонов и Е.Г.Лапин, О нескольких  
возможностях и особенностях использования  
изогнутого кристалла в кристалл-дифракционных  
приборах, Препринт ЛИЯФ №587, 1980, Ленинград**

**Изгиб  $\Delta\theta = 2k_g T$**

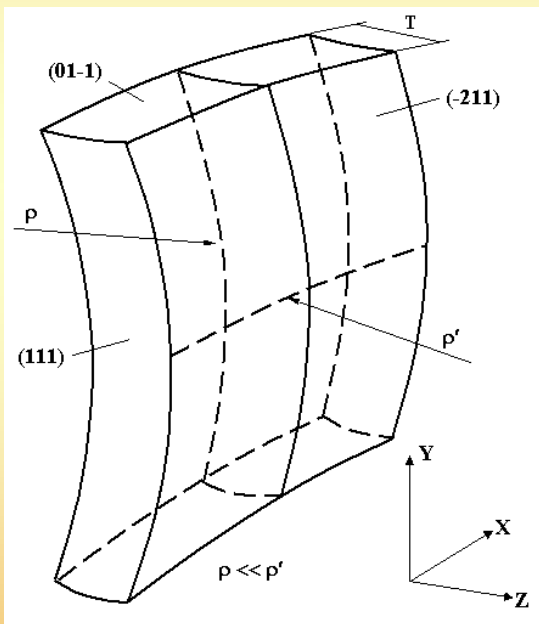
**T – толщина пластины**

**$k_g$  – изгиба коэффициент**

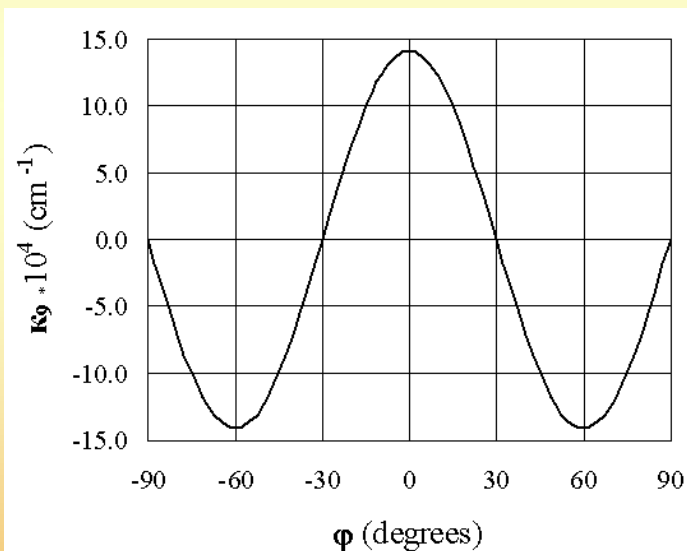


# Эффект упругой квазимозаичности в кремнии: искривление плоскости (111), нормальной большим граням изгибаемой пластины

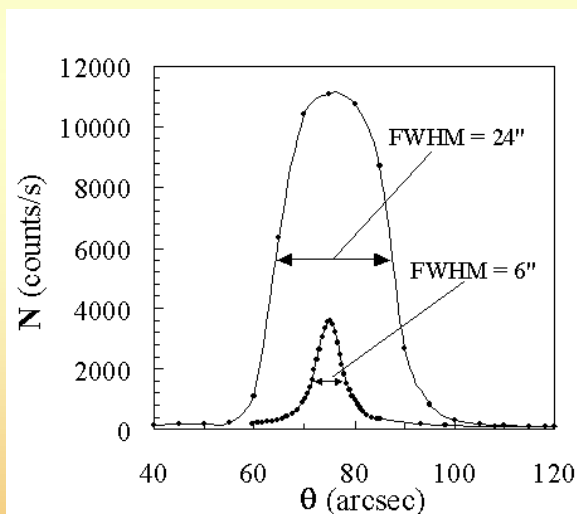
Ориентация пластины относительно атомных плоскостей



Зависимость коэффициента  $k_g$  от угла выреза пластины для радиуса изгиба 1 м

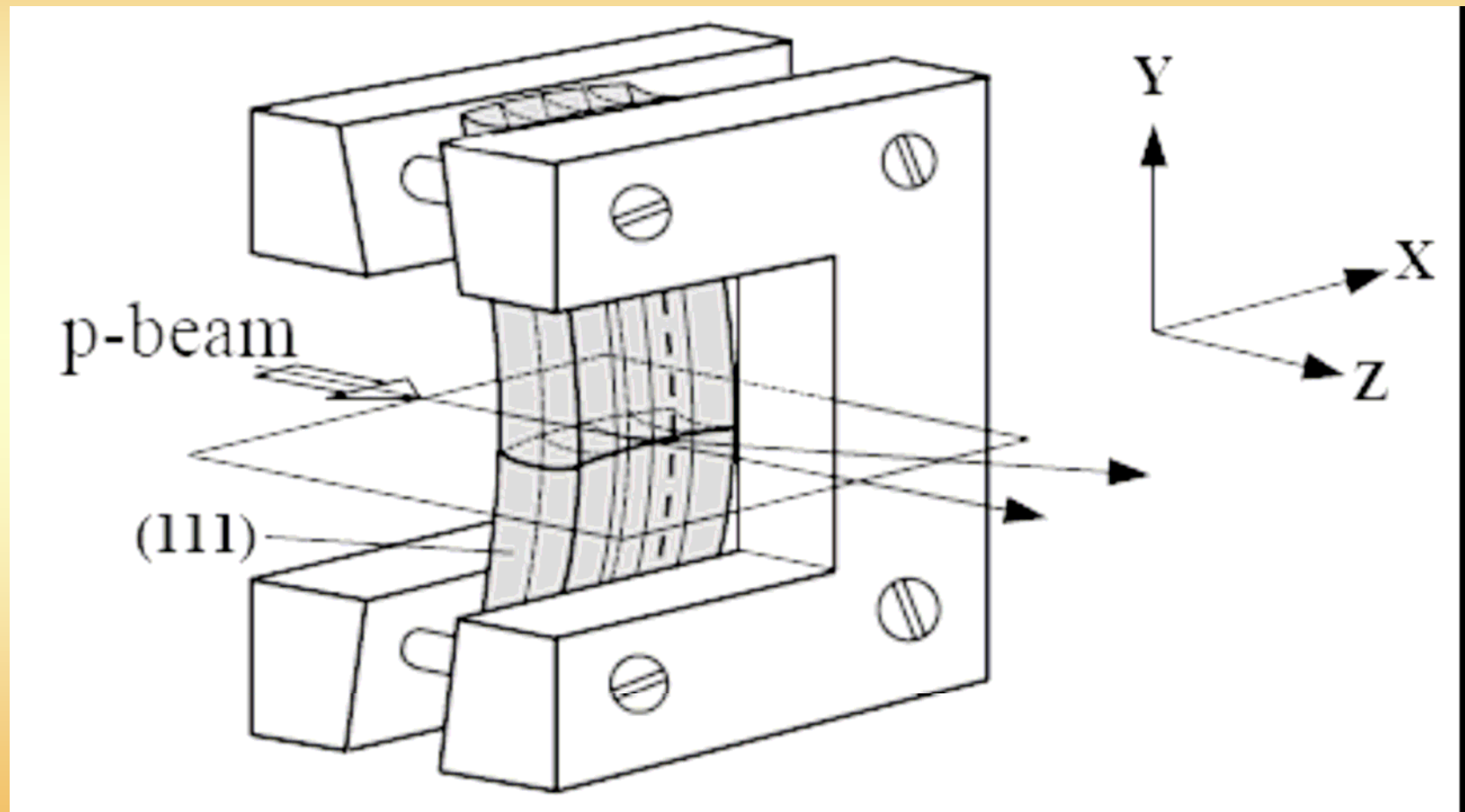


Кривые качания до и после изгиба пластины на  $K_{\alpha 1}$ Mo



Ю.М.Иванов, А.А.Петрунин и В.В.Скоробогатов,  
Письма в ЖЭТФ 81, 129 (2005)

# Изгибающее устройство

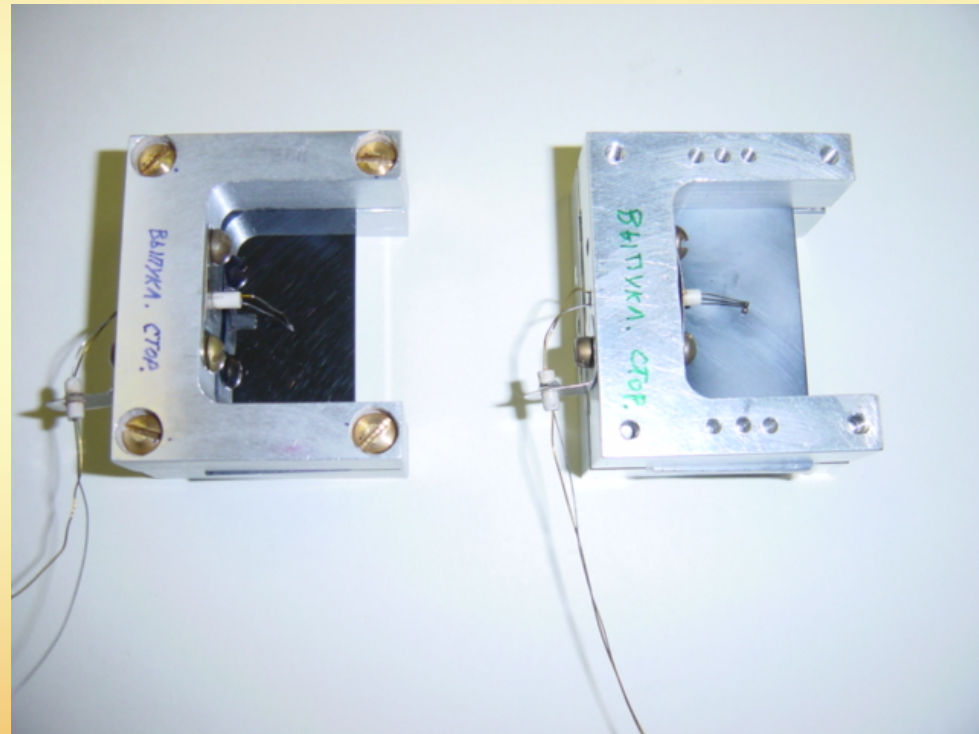


# Кристаллы 0.3 мм и 2.7 мм с изгибом (111) плоскостей на угол $\sim 0.4$ мрад



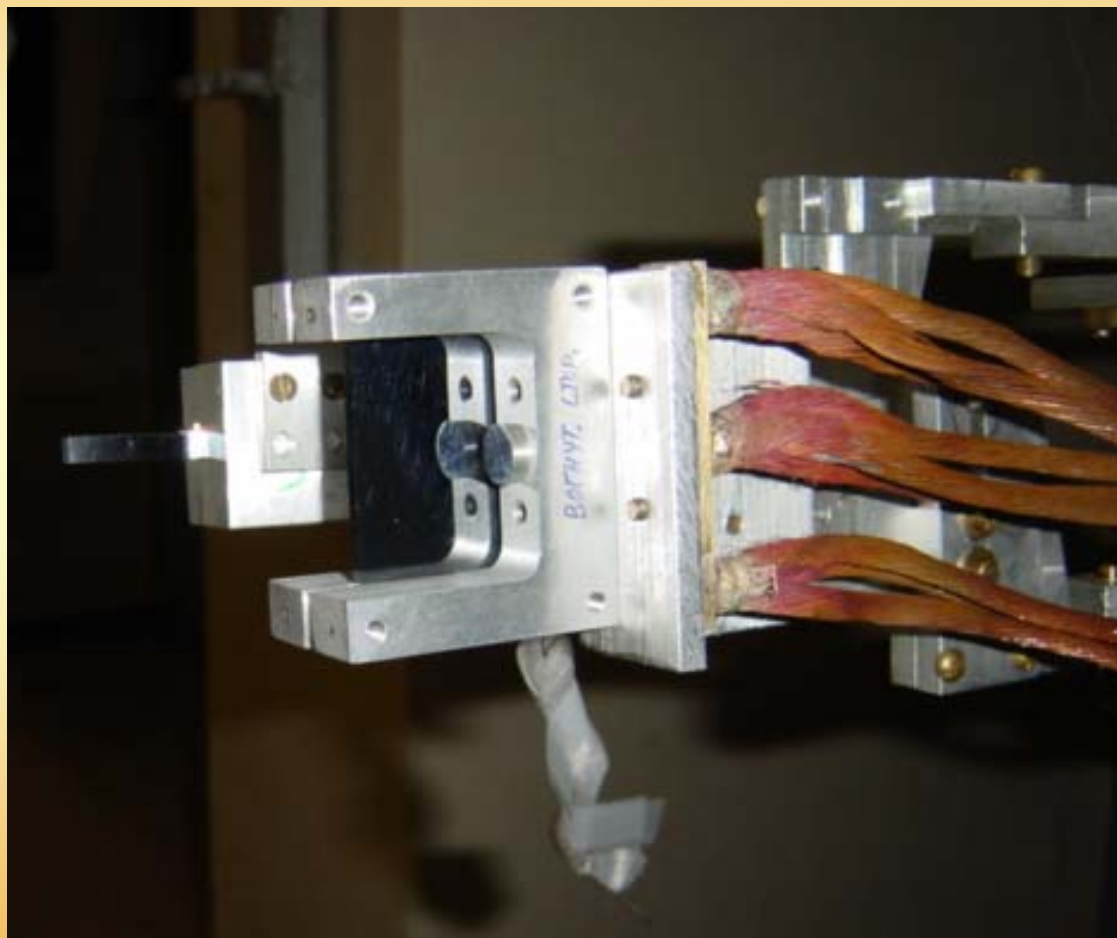
# Кристаллы для эксперимента по выводу высокоинтенсивного протонного пучка из ускорителя У-70 в ИФВЭ

Канализующие пл-ти (111)  
Длина по пучку 2.65 мм  
Угол изгиба  $\sim 0.4$  мрад





# Установленный кристалл



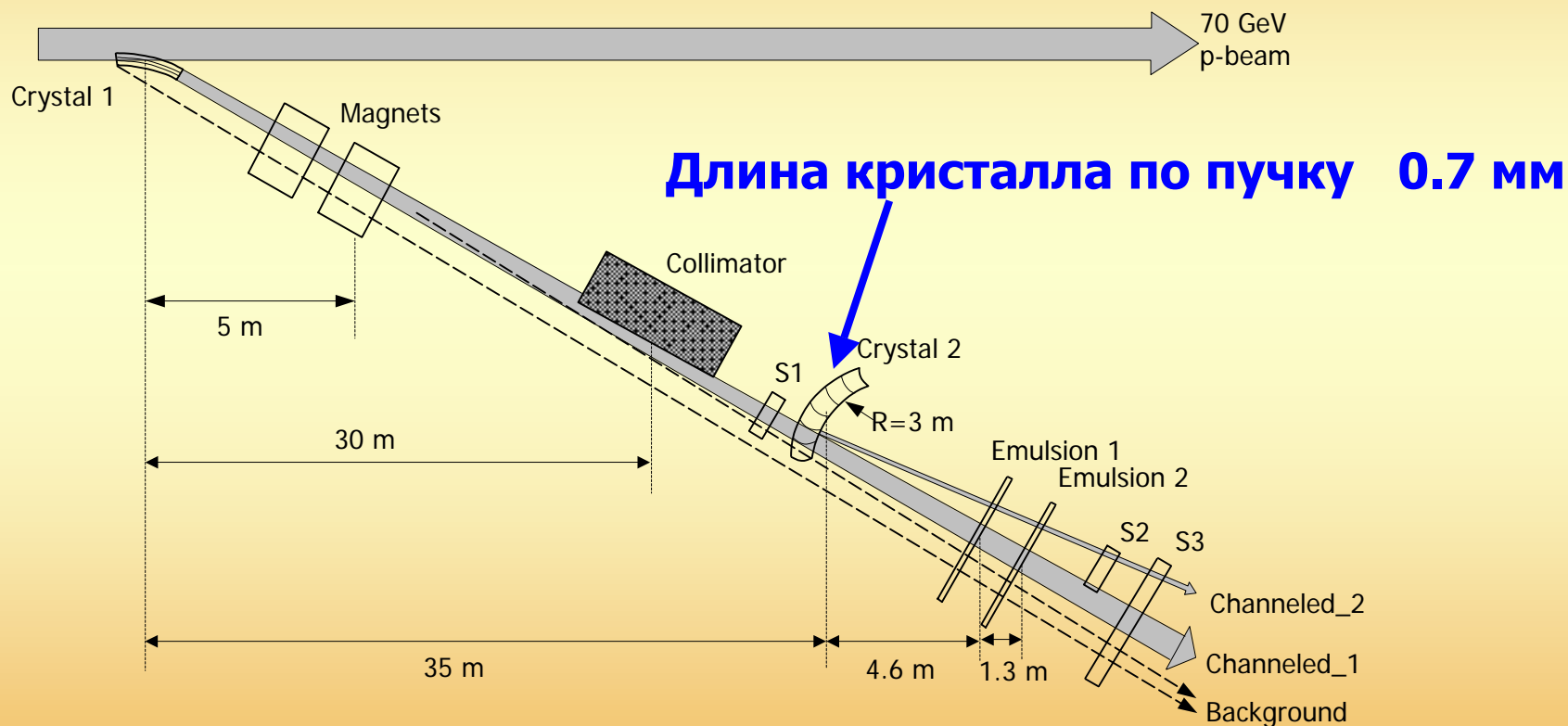
# Вывод протонов из У-70

Протонов в кольце  $5.5 \cdot 10^{12}$  p

Выведено протонов  $4.0 \cdot 10^{12}$  p

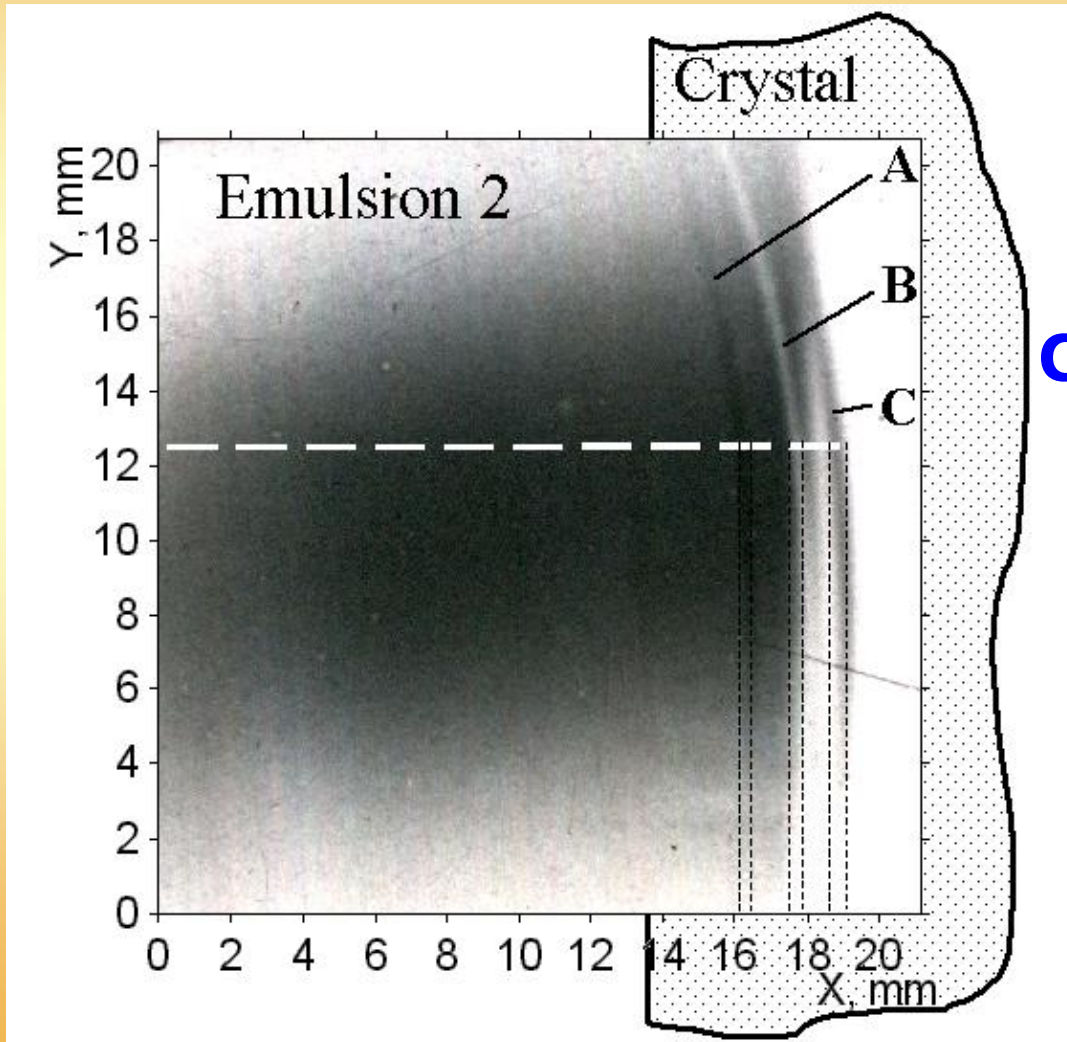
Эффективность вывода  $\sim 70\%$

# Эксперимент на выведенном пучке 70 ГэВ протонов в ИФВЭ (2002)



**угол многократного рассеяния МЕНЬШЕ угла Линдхарда**

# Профиль протонного пучка, прошедшего через кристалл, измеренный с помощью фотоэмульсии



**C – каналирование**

**Почему A и B ?**

# Э.Н.Цыганов и др. (1979)

## Отклонение протонов изогнутым кристаллом

Volume 88B, number 3,4

PHYSICS LETTERS

17 December 1979

### STEERING OF CHARGED PARTICLE TRAJECTORIES BY A BENT CRYSTAL

A.F. ELISHEV, N.A. FILATOVA, V.M. GOLOVATYUK, I.M. IVANCHENKO,  
R.B. KADYROV, N.N. KARPENKO, V.V. KORENKOV, T.S. NIGMANOV,  
V.D. RIABTSOV, M.D. SHAFRANOV, B. SITAR, A.E. SENNER,  
B.M. STARCHENKO, V.A. SUTULIN, I.A. TYAPKIN, E.N. TSYGANOV,  
D.V. URALSKY and A.S. VODOPIANOV

*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, USSR*

A. FORYCKI, Z. GUZIK, J. WOJTKOWSKA and R. ZELAZNY

*Institute for Nuclear Research, Swierk, Poland*

I.A. GRISHAEV, G.D. KOVALENKO and B.I. SHRAMENKO

*Physical-Technical Institute of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Kharkov, USSR*

M.D. BAVIZHEV and N.K. BULGAKOV

*Institute for Nuclear Physics at the Tomsk Polytechnical Institute, Tomsk, USSR*

V.V. AVDEICHIKOV

*Radium Institute, Leningrad, USSR*

R.A. CARRIGAN Jr. and T.E. TOOHEG

*Fermi National Accelerator Laboratory <sup>1</sup>, Batavia, IL, USA*

W.M. GIBSON, Ick-Joh KIM, J. PHELPS and C.R. SUN

*State University of New York at Albany <sup>2</sup>, NY, USA*

Received 30 August 1979

# О.И.Сумбаев, В.М.Самсонов и др. (1982)

## Наблюдение эффекта объемного захвата

Письма в ЖЭТФ, том 36, вып. 9, стр. 340 – 343

5 ноября 1982 г.

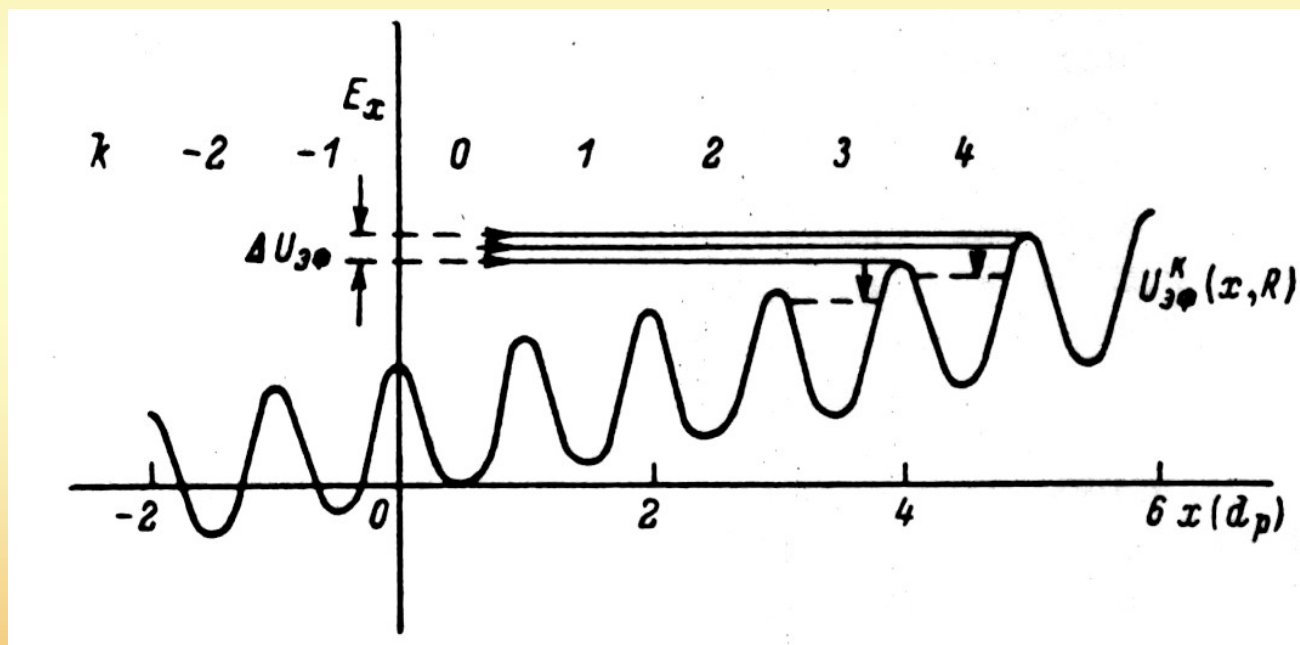
### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ЭФФЕКТА ОБЪЕМНОГО ЗАХВАТА В РЕЖИМ КАНАЛИРОВАНИЯ ИЗОГНУТЫМ МОНОКРИСТАЛЛОМ

*В.А.Андреев, В.В.Баублис, Е.А.Дамаскинский, А.Г.Крившич,  
Л.Г.Кудин, В.В.Марченков, В.Ф.Морозов, В.В.Нелюбин,  
Е.М.Орищин, Г.Е.Петров, Г.А.Рябов, В.М.Самсонов,  
Л.Э.Самсонов, Э.М.Спириденков, В.В.Сулимов,  
О.И.Сумбаев, В.А.Щегельский*

Впервые показано, что изогнутый монокристалл обладает способностью захватывать частицы в режим каналирования в интервале углов много больших, чем угол Линдхарда. Протоны с энергией 1 ГэВ захватывались в процесс каналирования  $(111)$ ,  $(110)$ -плоскостями и  $\langle 110 \rangle$ -осью по всей длине 1 см изогнутого по радиусу 46 см монокристалла кремния в суммарном угловом интервале до 20 мрад.

# А.М.Таратин и С.А.Воробьев (1985)

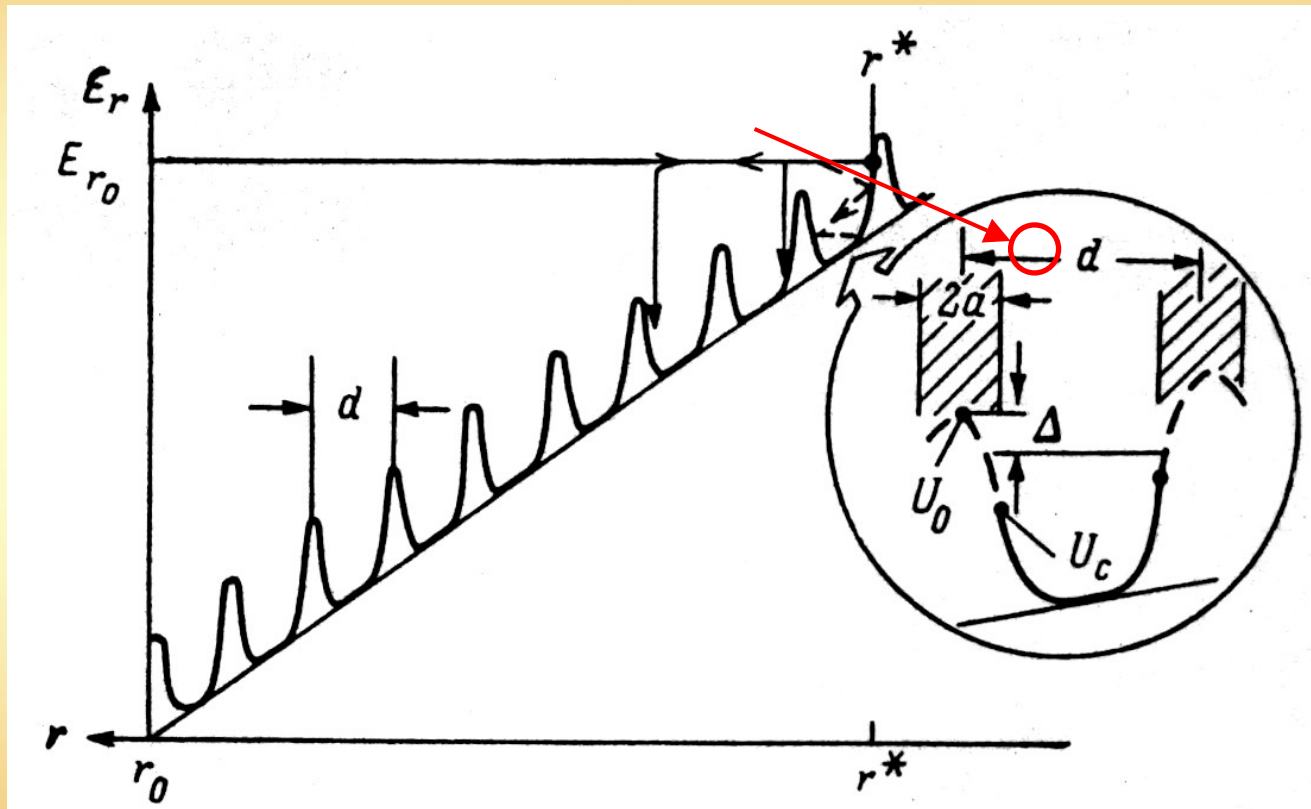
Объяснение эффекта объемного захвата через многократное рассеяние



А.М.Таратин и С.А.Воробьев,  
ЖТФ 55, 1598 (1985)

# О.И.Сумбаев (1986)

Первое упоминание об «отраженных» протонах



О.И.Сумбаев, К теории объемного захвата протонов в режим каналирования изогнутыми кристаллами, препринт ЛИЯФ-1201, Ленинград, 1986



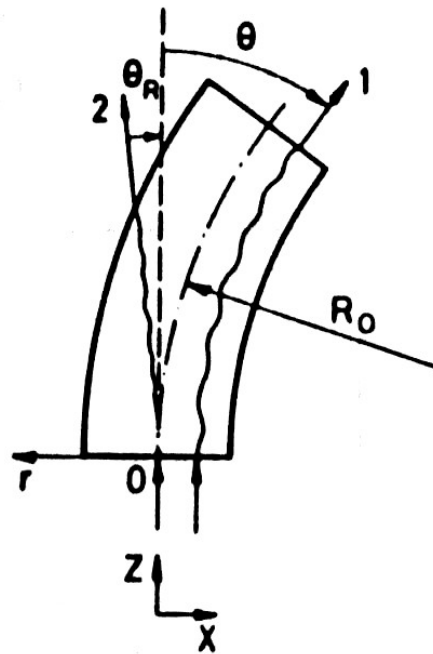
# А.М.Таратин и С.А.Воробьев, 1987

## Предсказание отклонения отраженных частиц

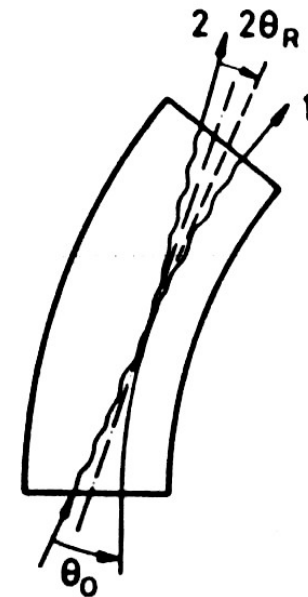
А.М.Таратин and  
С.А.Воробьев,  
Phys.Lett. A119  
(1987) 425

and

А.М.Таратин and  
С.А.Воробьев, NIM in  
PR B26 (1987) 512

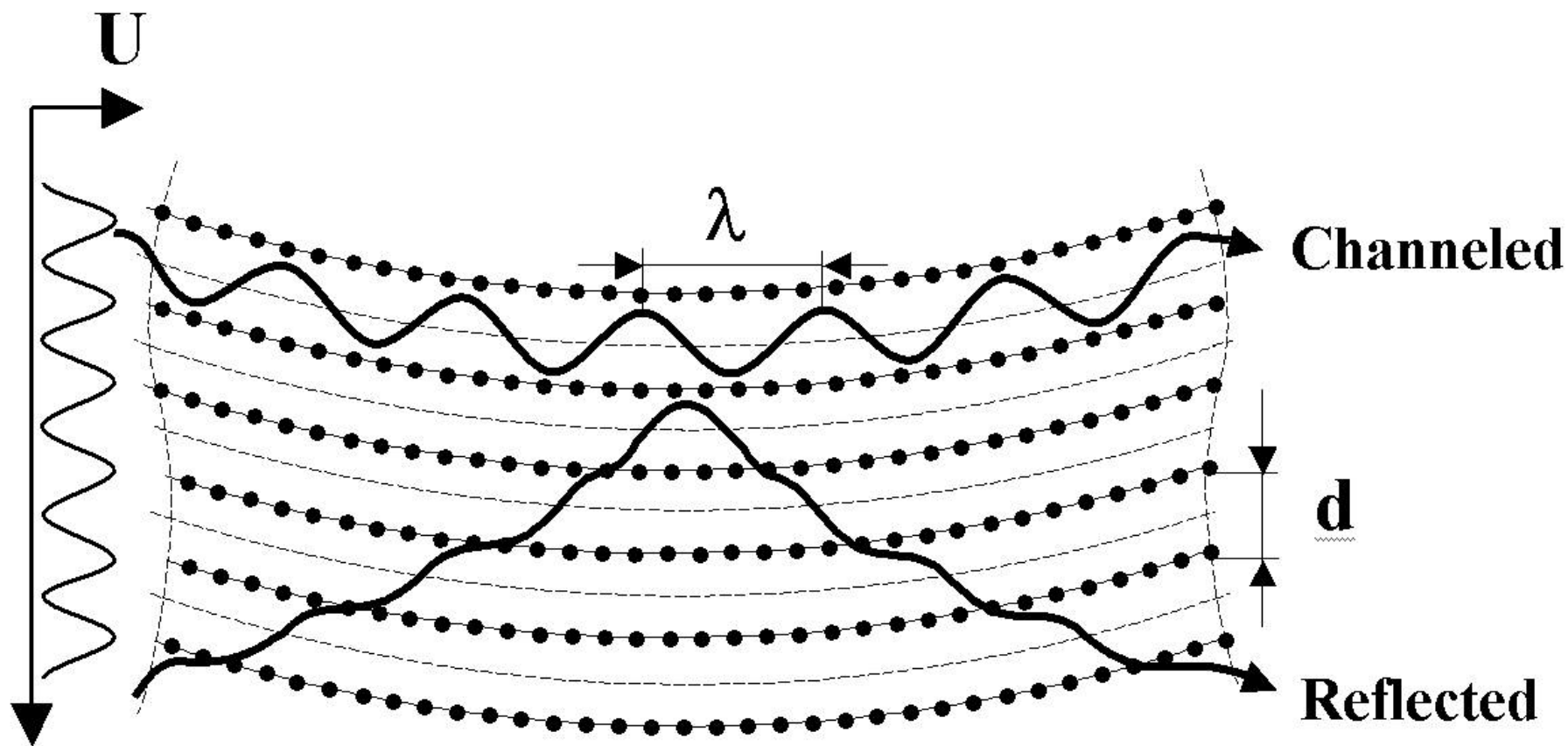


a)

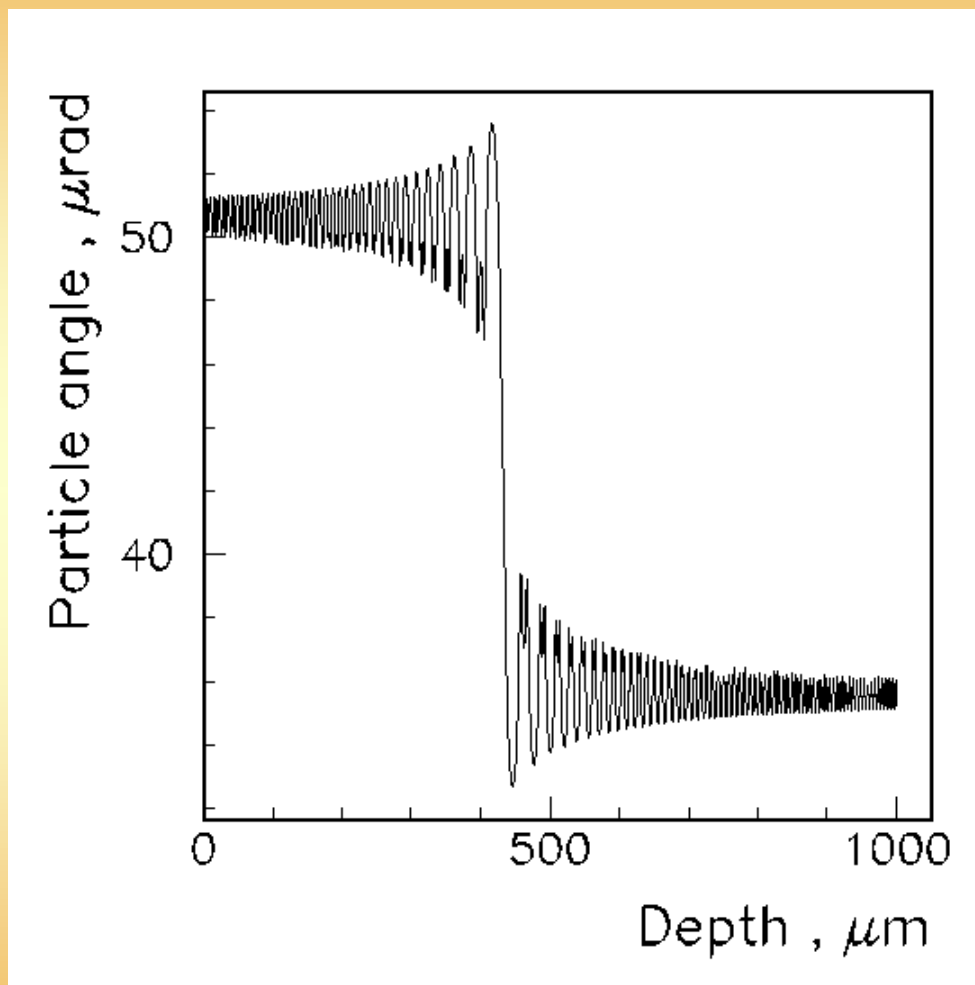


b)

# Каналирование и объемное отражение в изогнутом кристалле



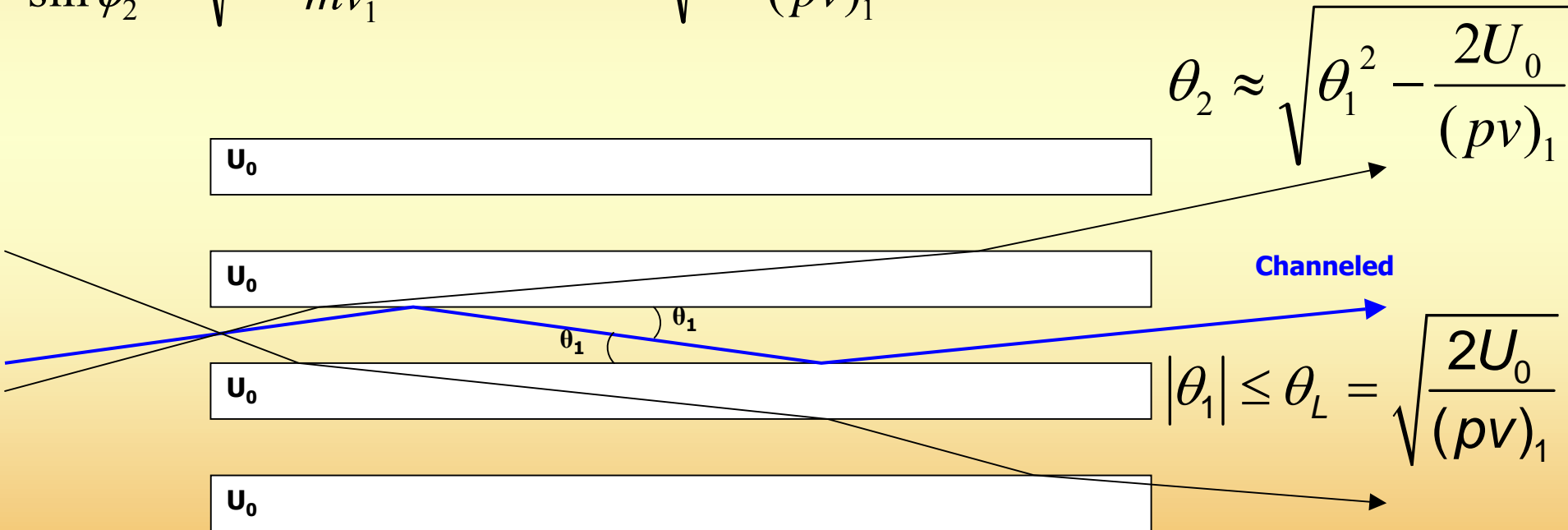
## Зависимость направления движения частицы от глубины проникновения



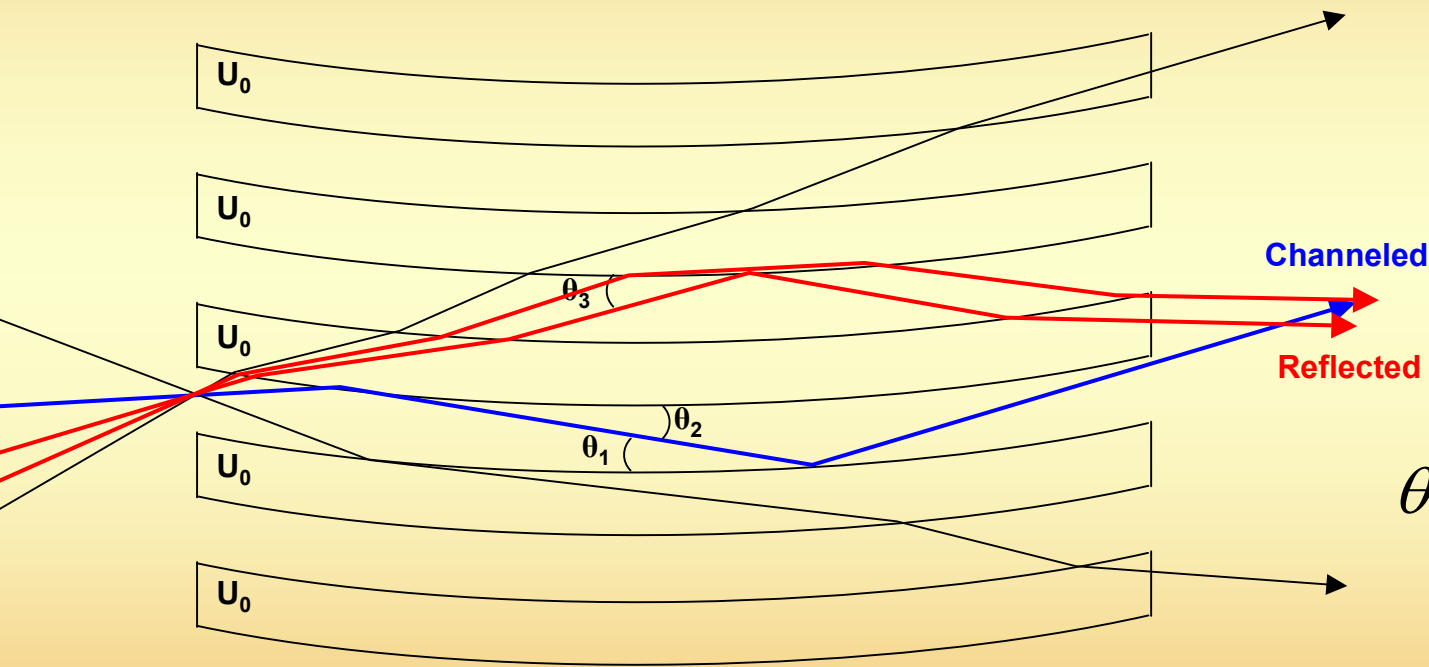
Расчет А.М.Таратина для протонов с энергией 400 ГэВ и толщины кристалла 1 мм. Угол отражения около 14 мкрад.

# Каналирование в плоском кристалле (модель с прямоугольным потенциалом)

$$\frac{\sin \phi_1}{\sin \phi_2} = \sqrt{1 + \frac{2}{mv_1^2} (U_1 - U_2)} = \sqrt{1 - \frac{2U_0}{(pv)_1}} \quad (\text{Ландау и Лифшиц, Механика})$$



# Канализирование и объемное отражение в изогнутом кристалле (модель с прямоугольным потенциалом)



$$\theta_1 < \theta_L$$

$$\theta_2 = \sqrt{\theta_1^2 - \frac{d}{R}}$$

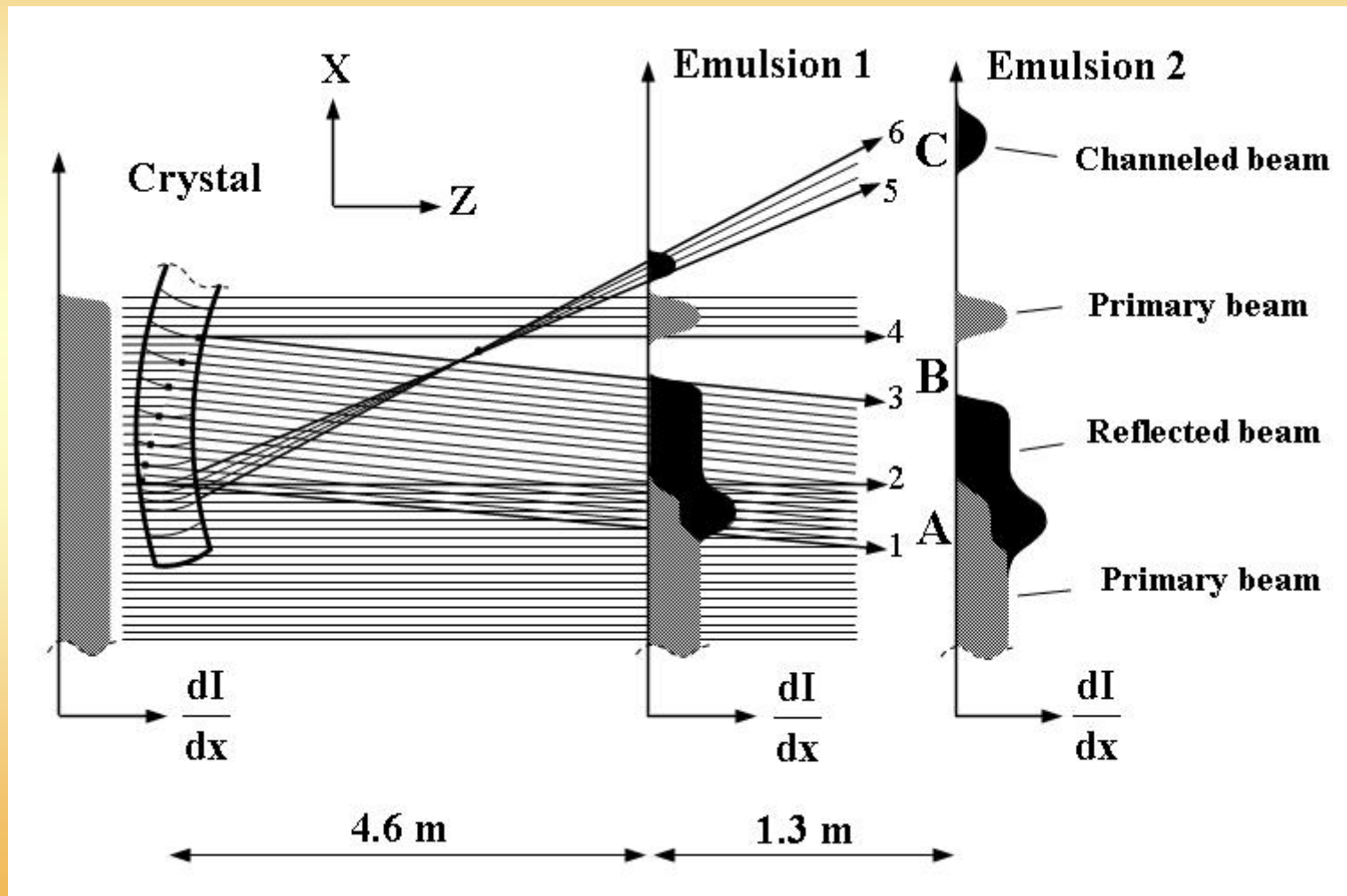
$$\theta_L < \theta_3 < \sqrt{\theta_L^2 + \frac{d}{R}}$$

$$\sqrt{\theta_L^2 - \frac{d}{R}} < \theta_3 < \theta_L$$

# Объяснение профиля пучка на фотоэмульсии

Yu.M.Ivanov et al.PRL 97, 144801 (2006)

Траектории протонов в горизонтальной плоскости



# Volume Reflection of 1-GeV Protons by a Bent Silicon Crystal

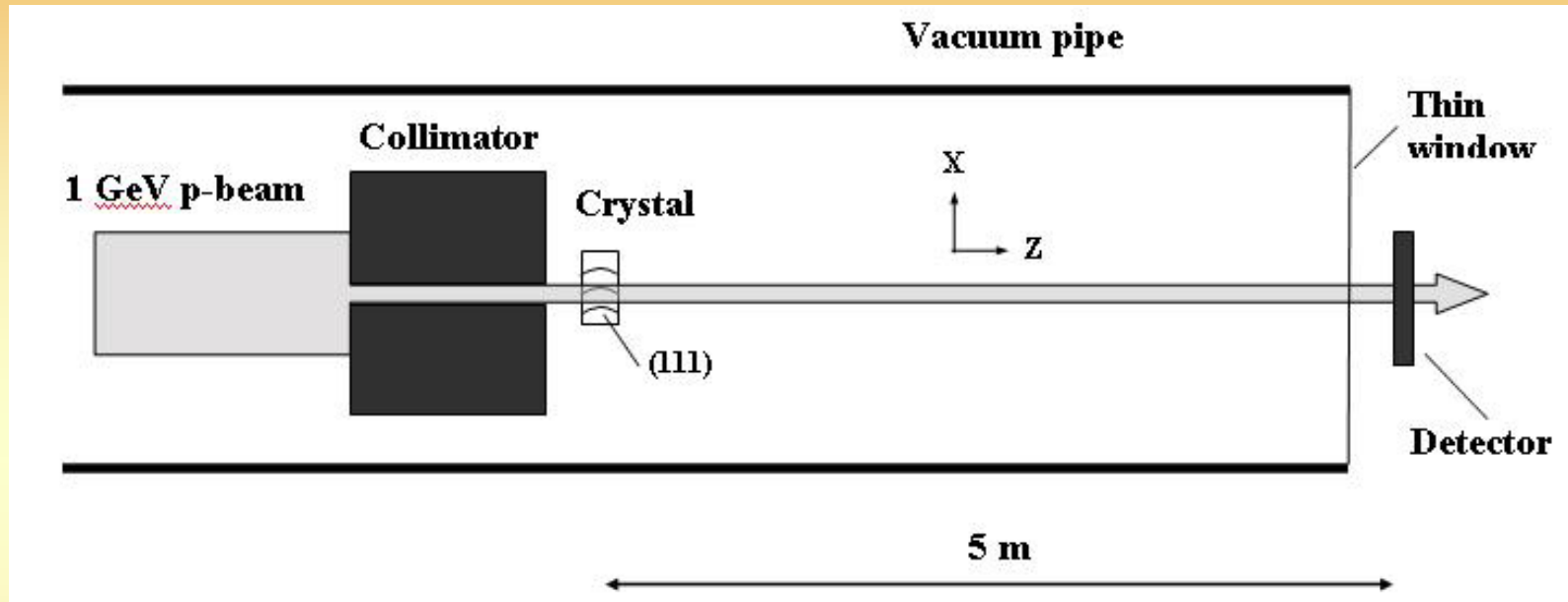
Yu.M.Ivanov, N.F.Bondar, Yu.A.Gavrikov,  
A.S.Denisov, A.V.Zhelamkov, V.G.Ivochkin,  
L.P.Lapina, S.V.Kos'yanenko, A.A.Petrinin,  
V.V.Skorobogatov, V.M.Suvorov,  
A.I.Shchetkovsky (PNPI)

A.M.Taratin (JINR)

W.Scandale (CERN)

Published in JETP Letters, 2006, Vol. 84, No. 7, pp. 372–376.

# Layout of the experiment with 1 GeV protons at PNPI, Gatchina

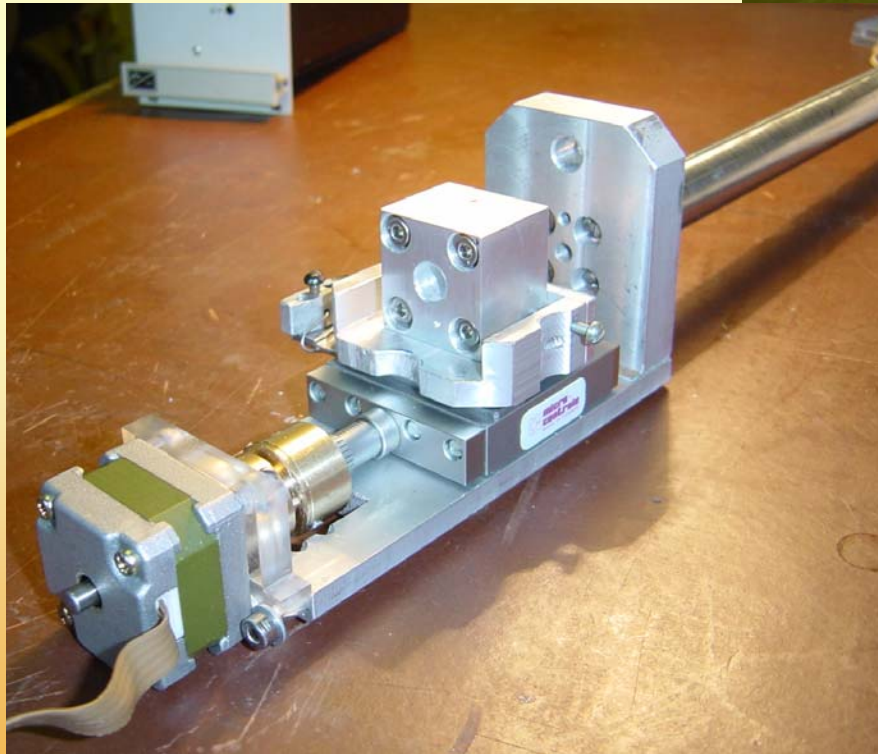


Beam divergence	$\sim 160 \mu\text{rad}$
Beam size	$\sim 0.08 \text{ mm}$
Critical angle for channeling	$\sim 170 \mu\text{rad}$
Crystal length along beam	$\sim 30 \mu\text{m}$
Bend angle of (111) planes	$\sim 380 \mu\text{rad}$

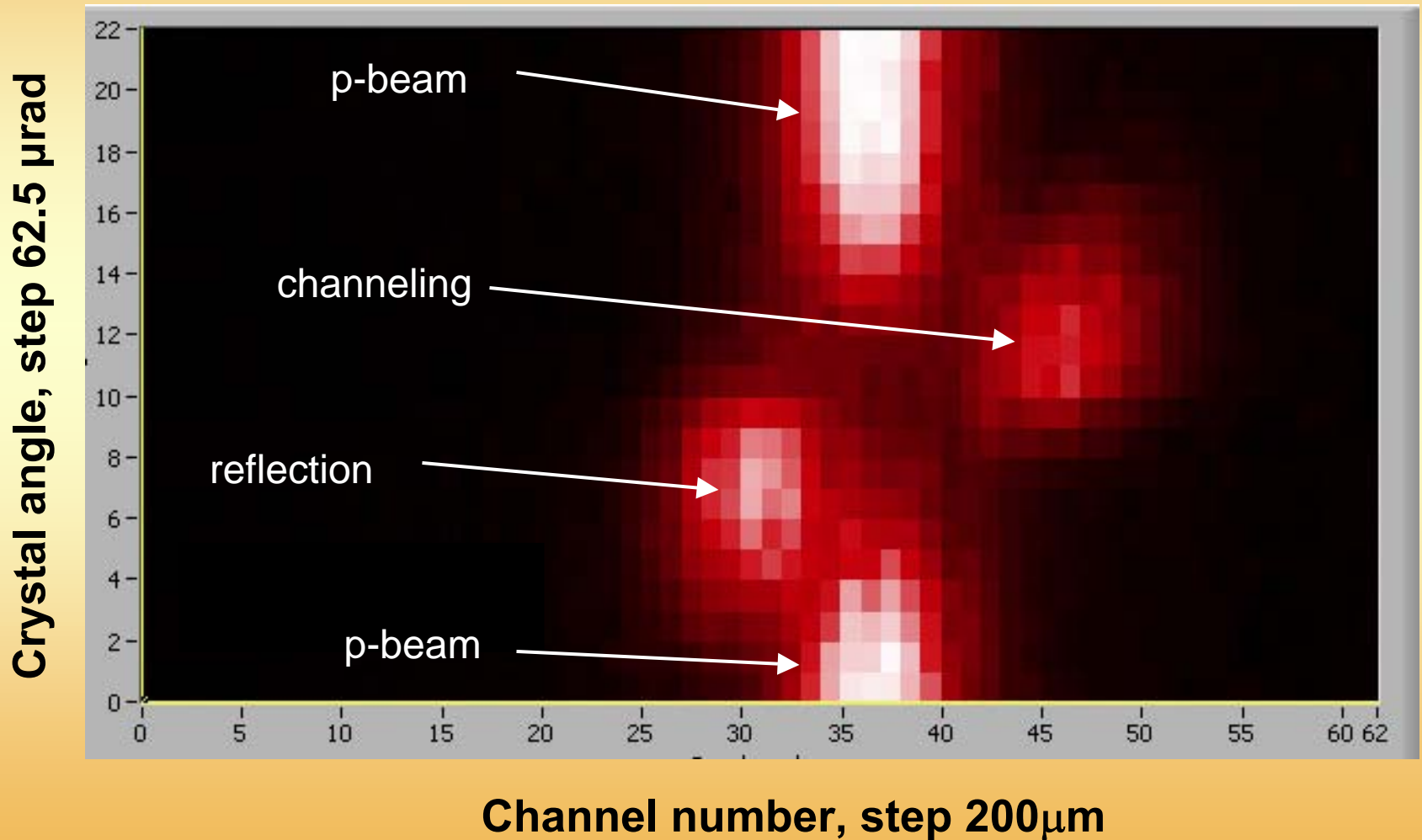


# Collimator

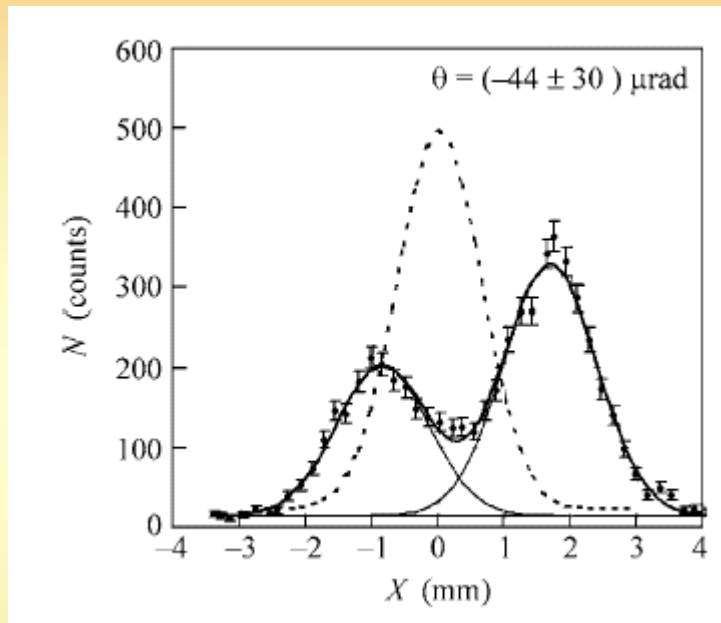
**Crystal mounted  
on goniometer**



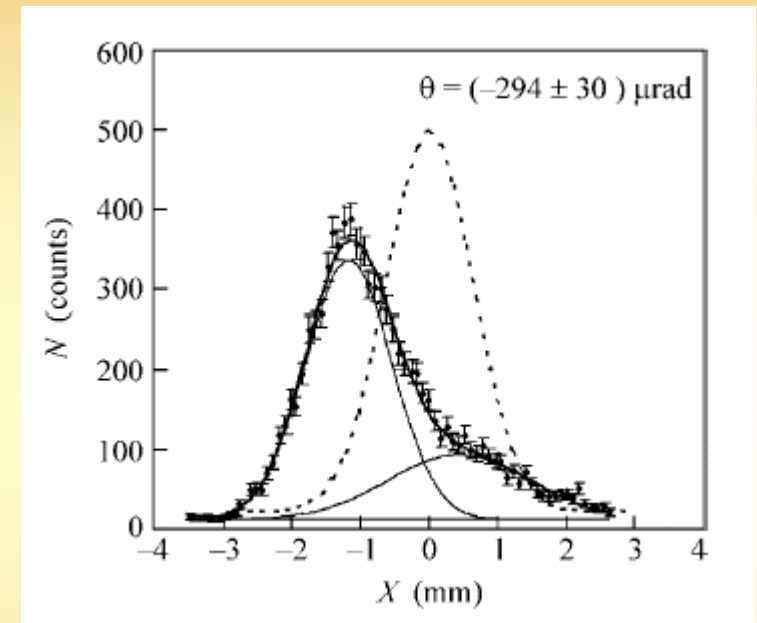
# Horizontal profiles of the p-beam vs. crystal angle measured with PPC



# Beam profiles measured with scintillators



**Beam profile in the angular position of the crystal that corresponds to the maximum channeling.**



**Beam profile in the angular position of the crystal that corresponds to the maximum volume reflection.**

# Results

**Deflection angle of reflected protons:**

$$2\theta_R \sim 240 \mu\text{rad} = 1.4 \cdot \theta_c$$

**Probability of the volume reflection:**

$$P_R \sim 0.7$$

**Probability of the volume capture:**

$$P_{VC} \sim 0.3$$

# **Выполненные и планируемые эксперименты:**

**1997-04 на p-пучке 70 ГэВ ( ИФВЭ)**

**2005-06 на p-пучке 1 ГэВ (ПИЯФ)**

**2006-09 на p-пучке 450 ГэВ (SPS CERN)**

**2007-09 на  $e^+$  и  $e^-$ -пучках 180 ГэВ (SPS CERN)**

**2008-10 на p-пучке 120 ГэВ (кольцо SPS CERN)**

**2008-10 на пучке 980 ГэВ (кольцо Tevatron FNAL)**

**2011- на пучке 7 ТэВ (кольцо LHC CERN)**

# **В исследованиях участвуют:**

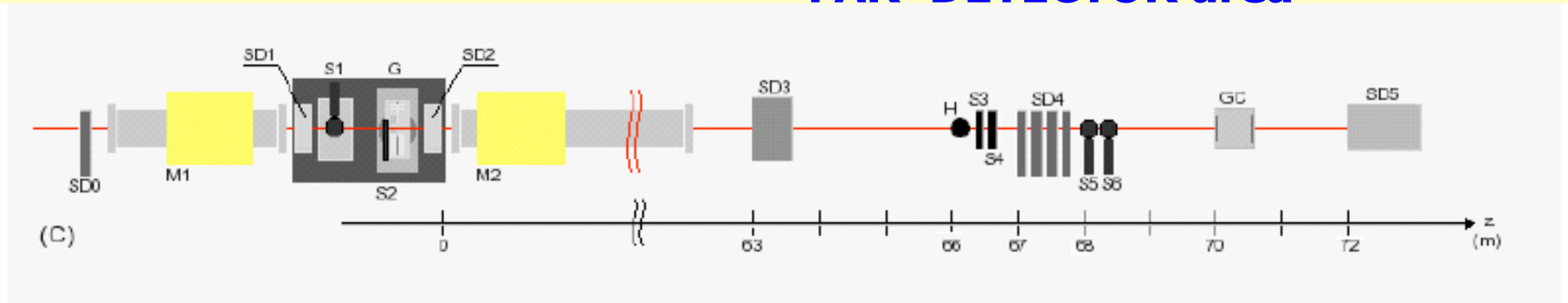
- ПИЯФ РАН (Гатчина);**
- ГНЦ ИФВЭ (Протвино);**
- ОИЯИ (Дубна)**
- INFN (Ferrara, Lehnaro, Rome, Perugia, Trieste, Italy);**
- CERN (Geneva, Switzerland);**
- FNAL (Batavia, USA).**

# Channeling experiment with 400 GeV protons at SPS CERN (H8-RD22 Collaboration, 2006)

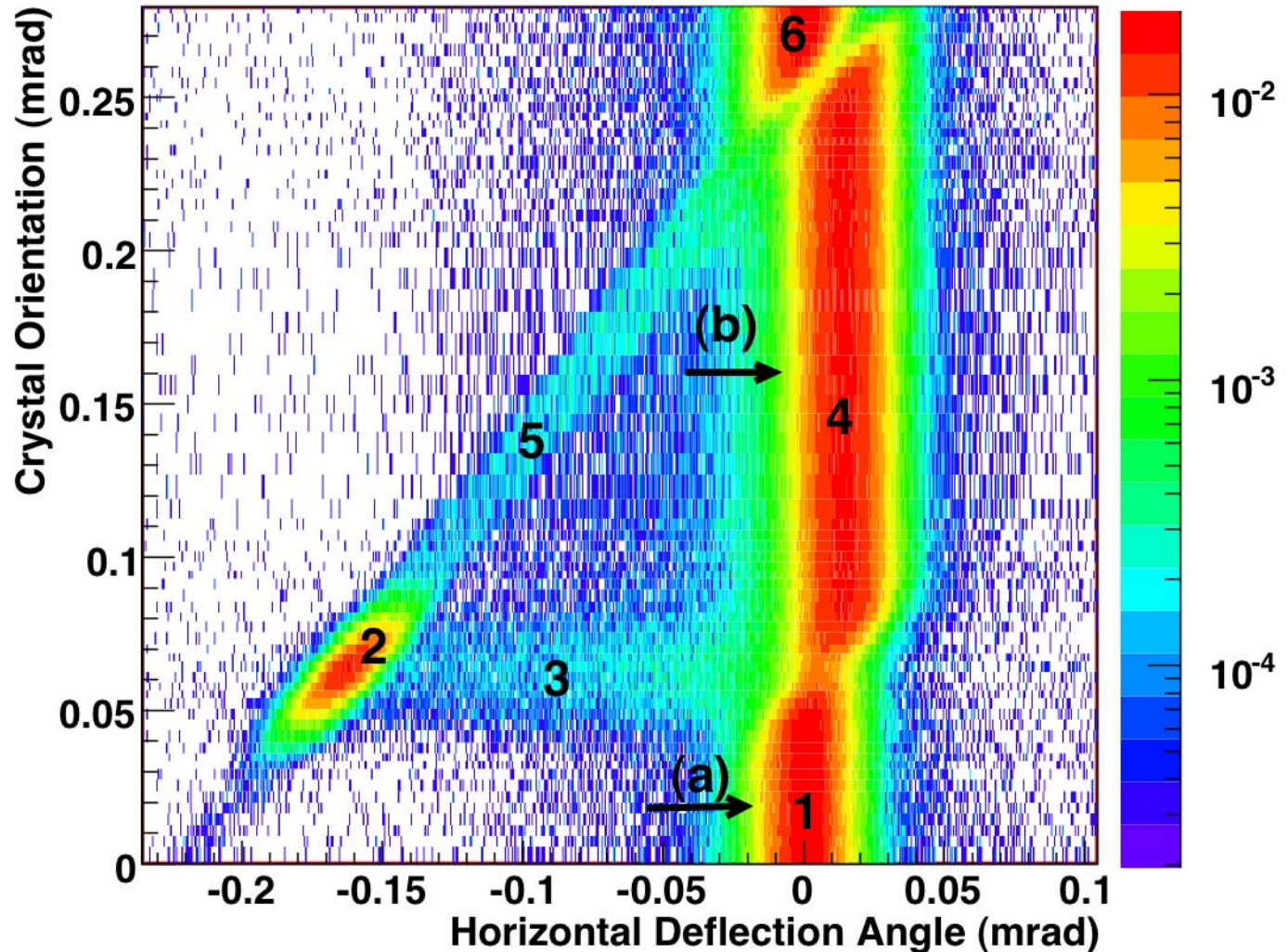
## H8 beam line

CRYSTAL area

FAR DETECTOR area



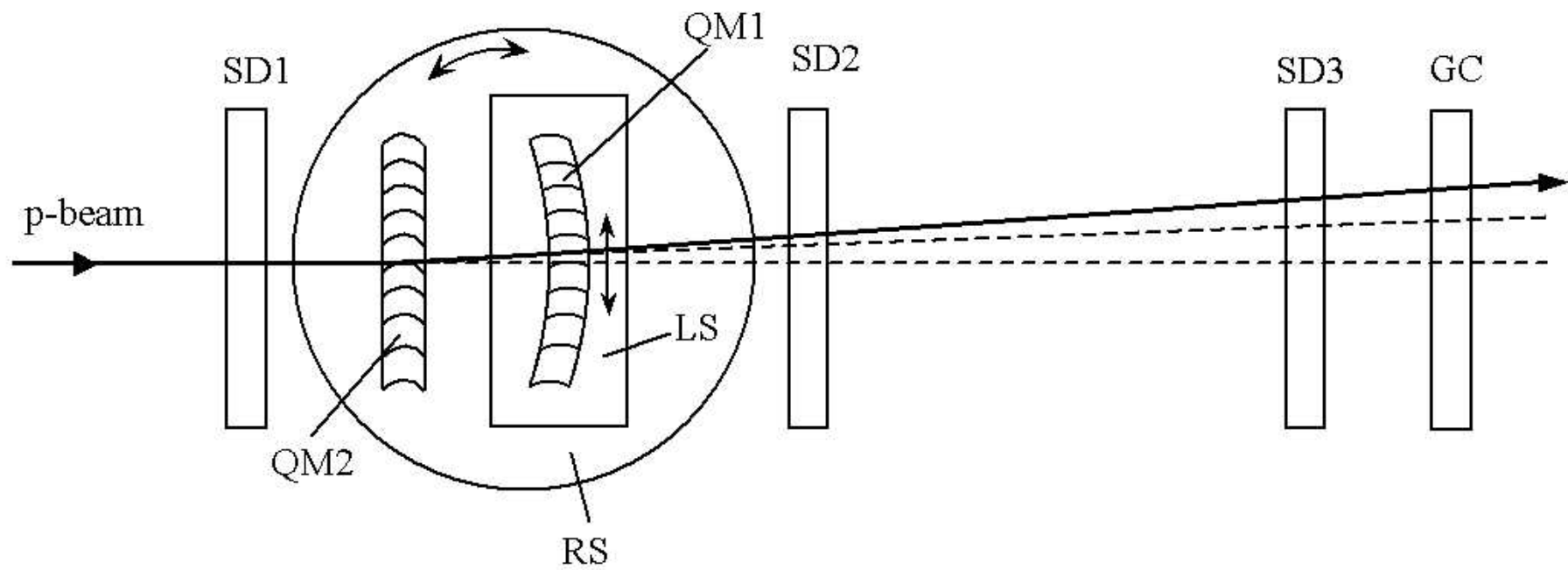
# Result of typical angular scan with one of the crystals



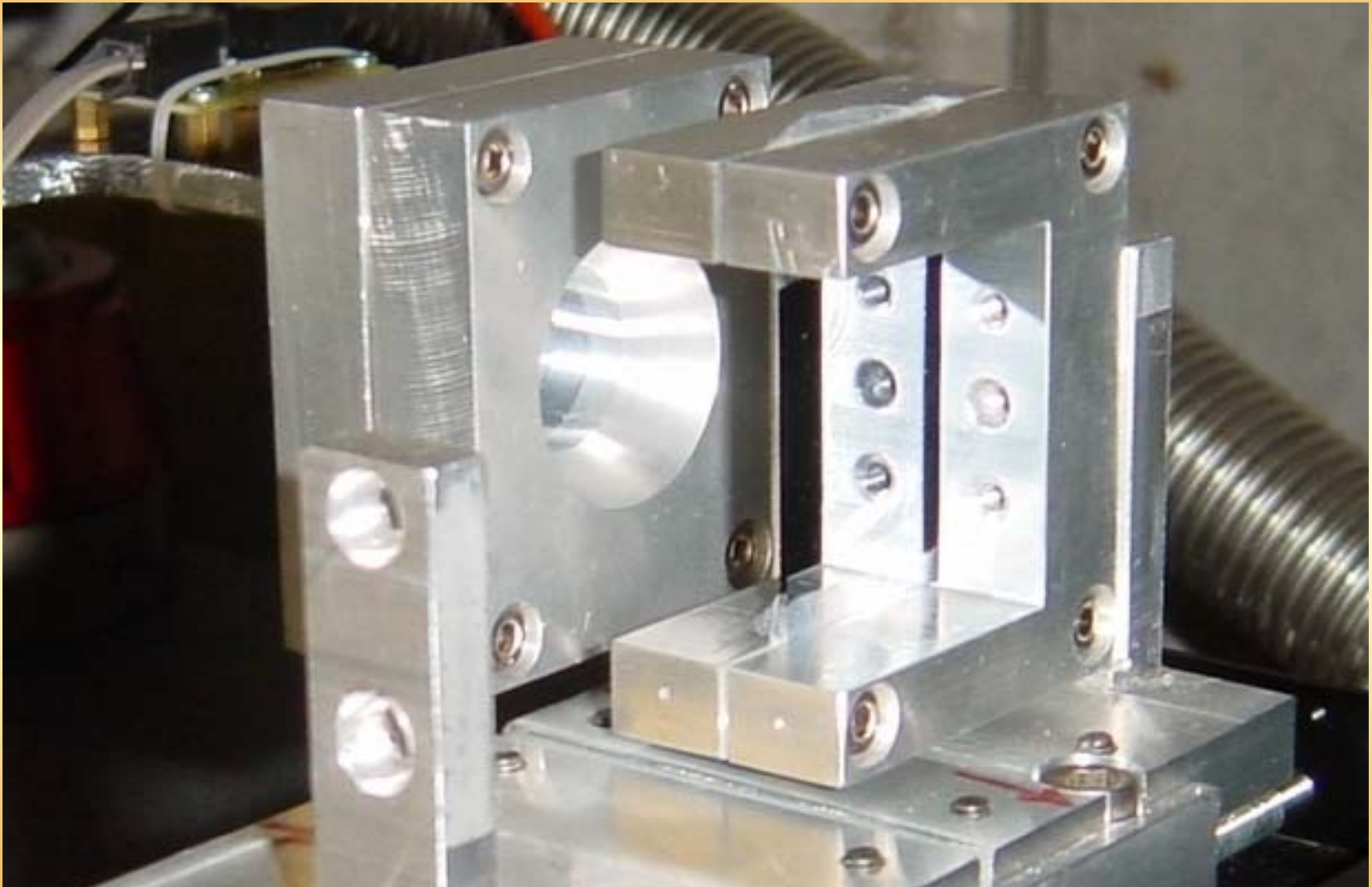


**Наблюдение эффекта  
объемного отражения от двух  
кристаллов (H8-RD22, 2007)**

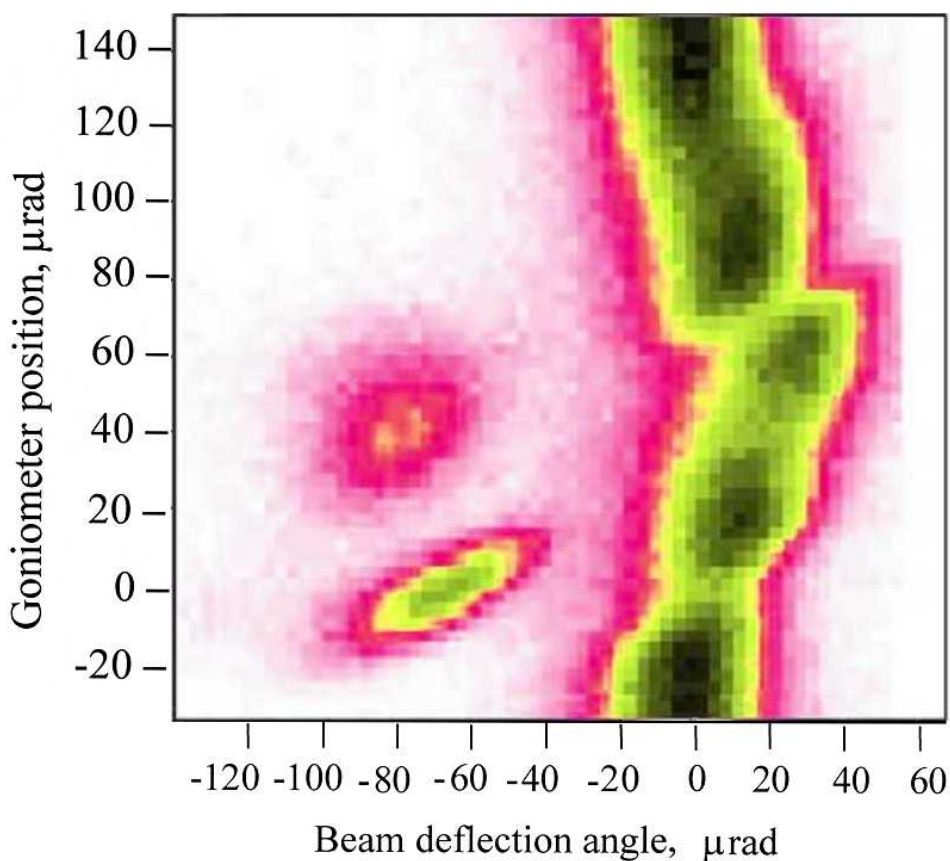
# Goniometer



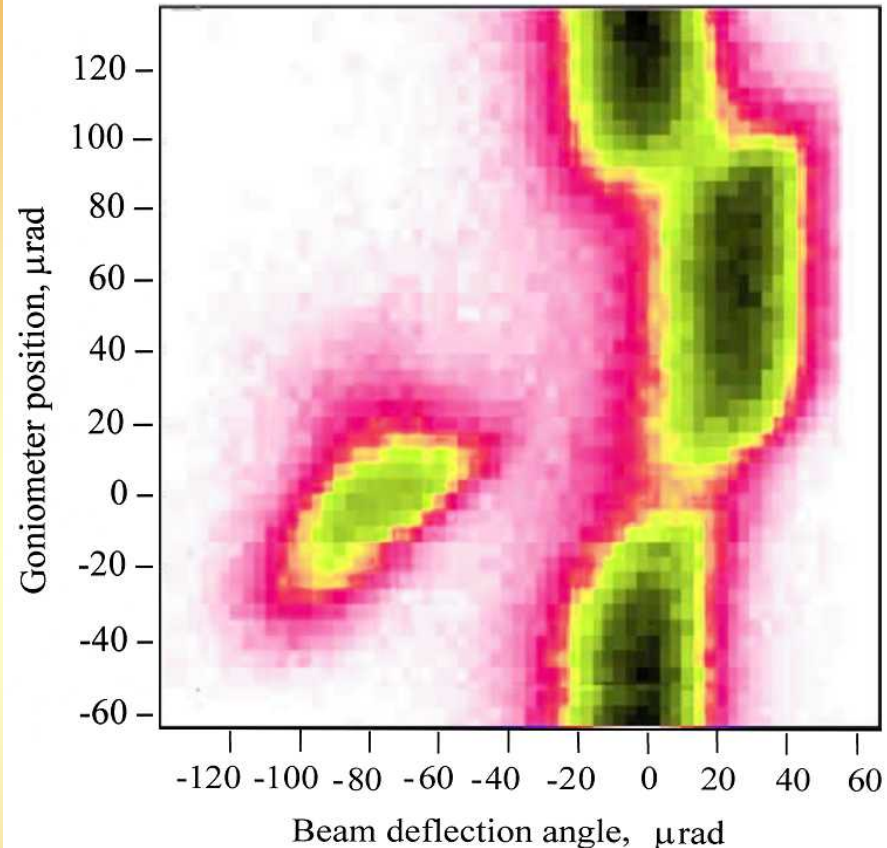
# QM2+QM1 crystals



## Кристаллы не выстроены



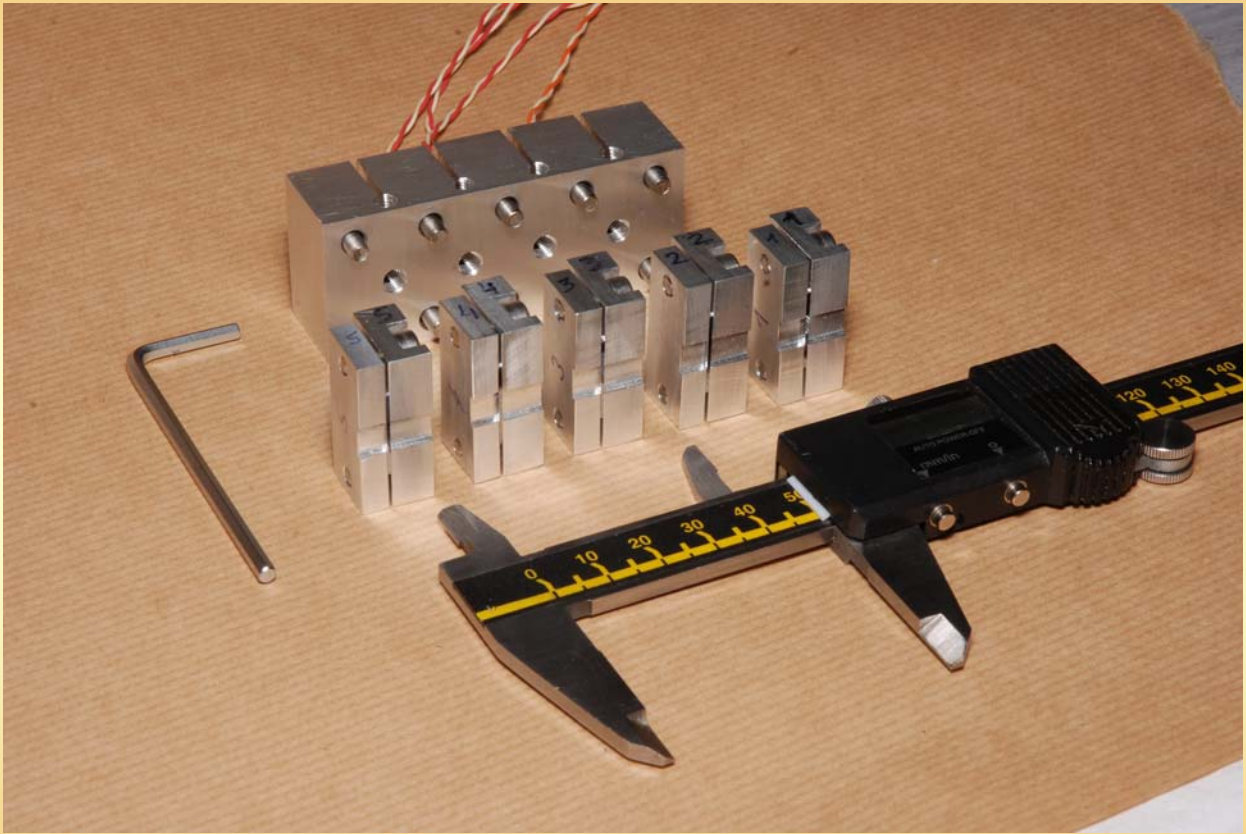
## Кристаллы выстроены

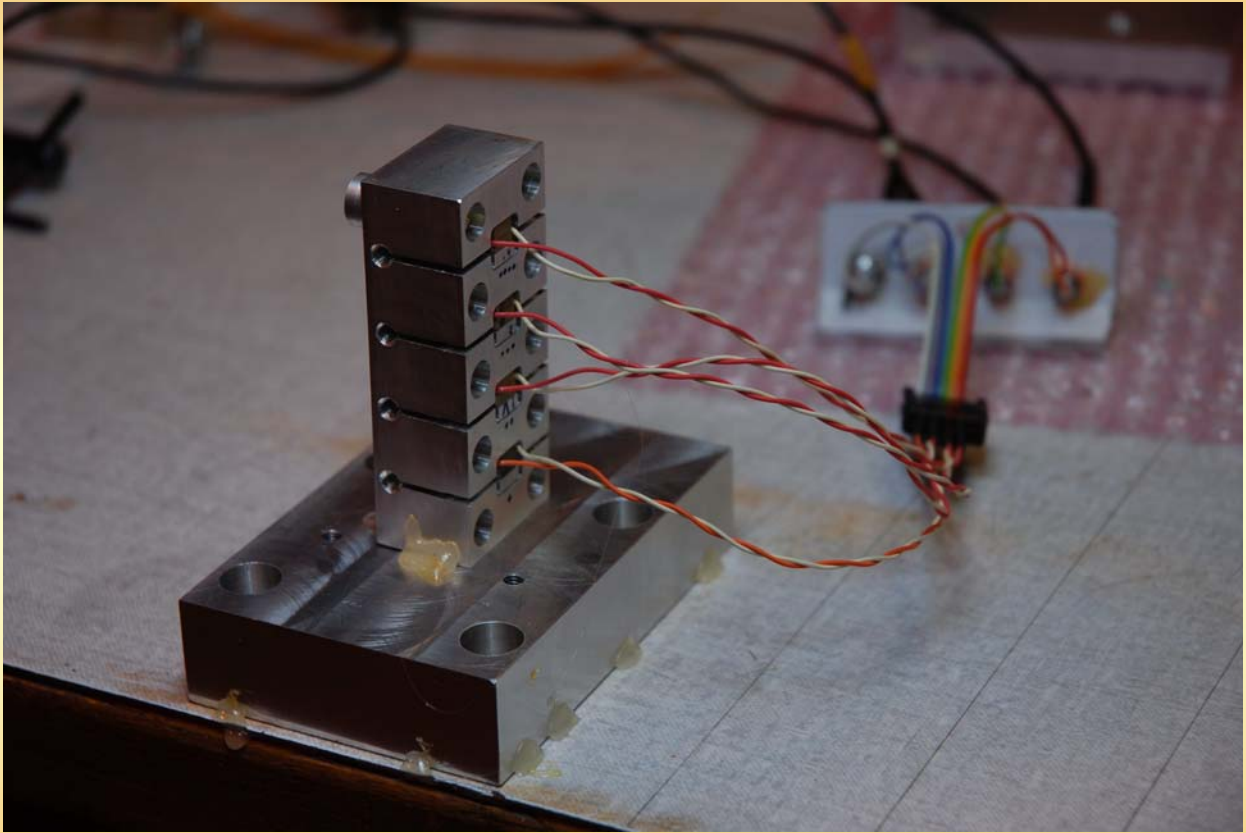


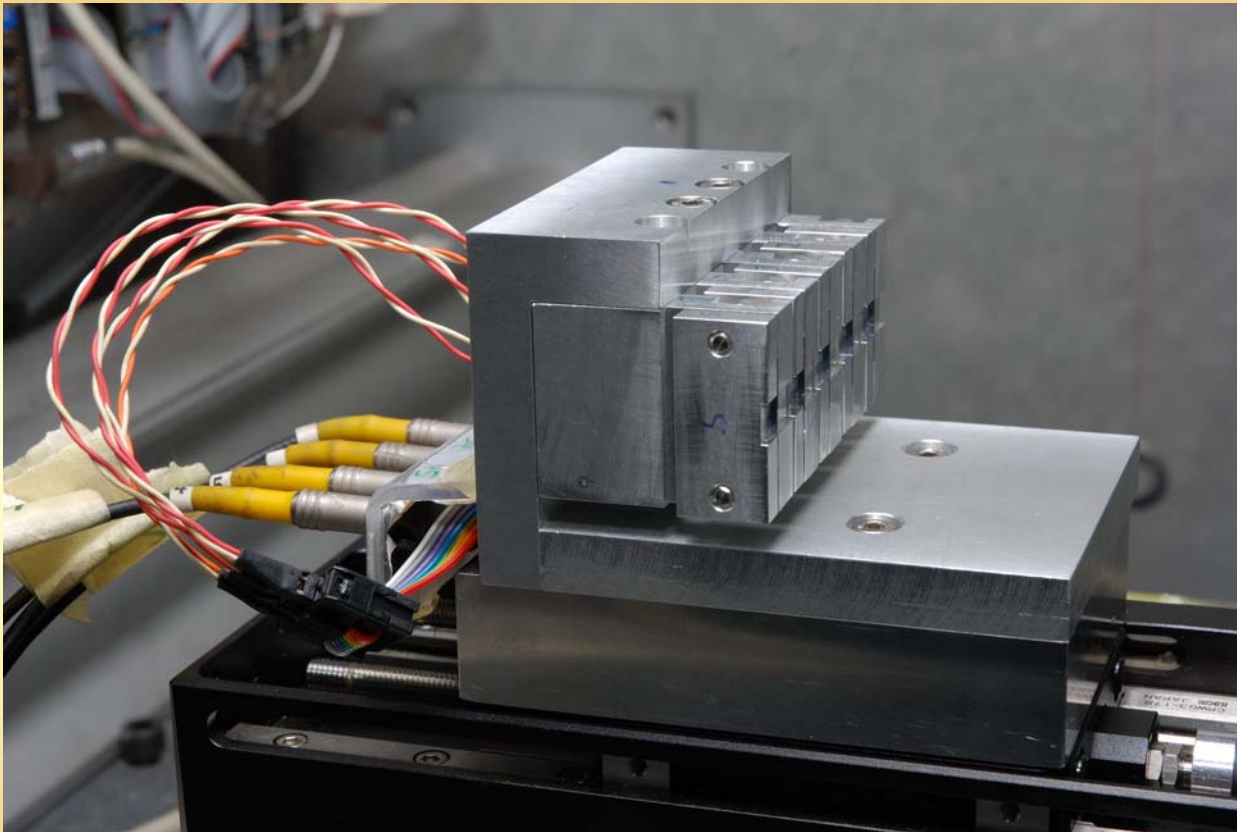
**Deflection angle**      **23.4  $\mu\text{rad}$**

**Deflection efficiency**      **96.7 %**

**Наблюдение эффекта  
объемного отражения от пяти  
кристаллов (H8-RD22, 2007)**

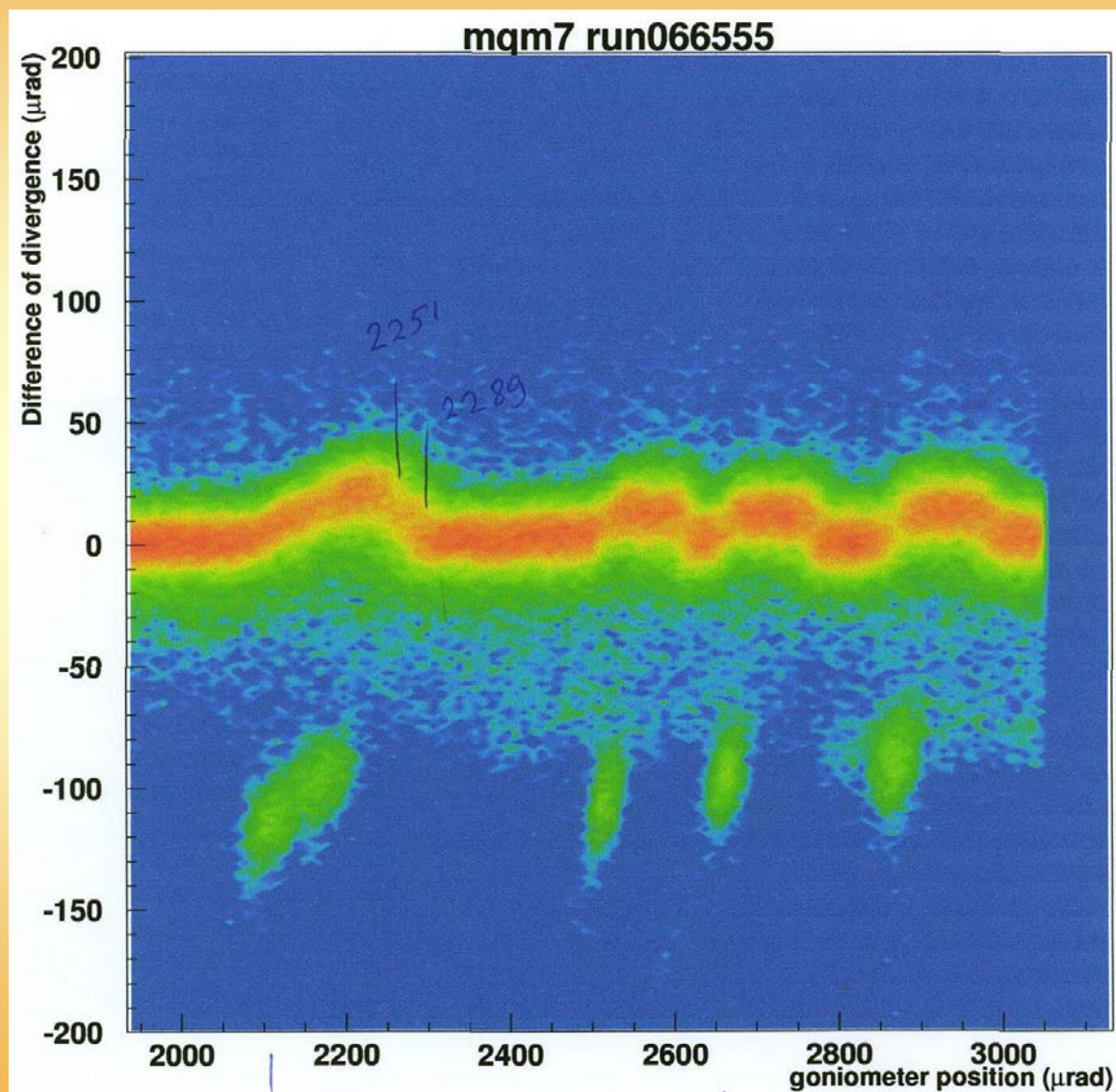




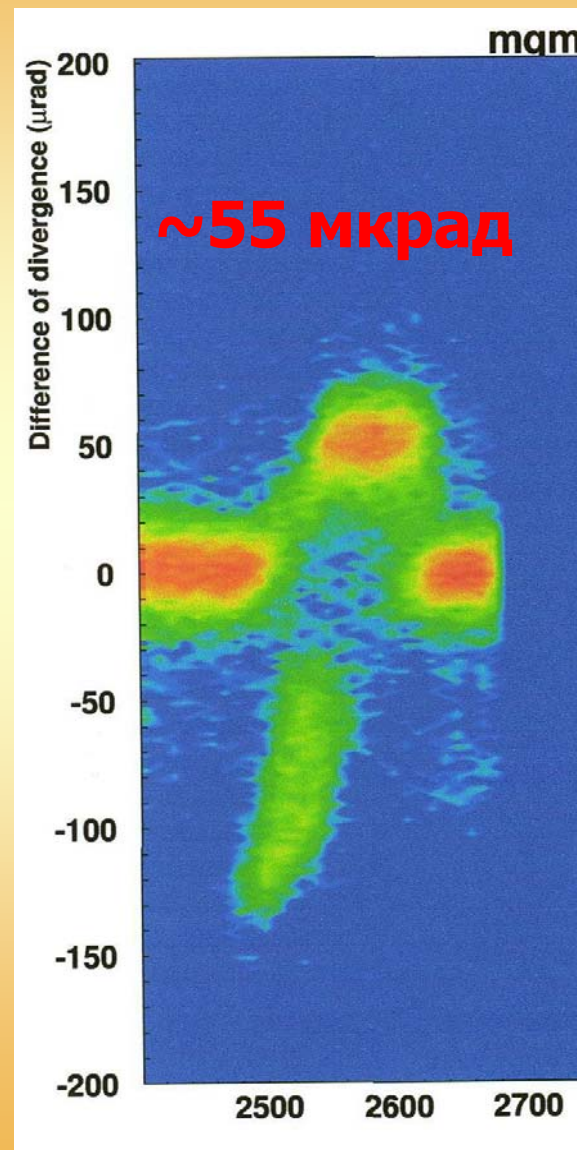




## Кристаллы не выстроены



## Кристаллы выстроены



# Другие результаты в 2007

**Аксиальное каналирование и объемное отражение в изогнутом кристалле**

**Каналирование, объемное отражение и радиация электронов и позитронов с энергией 180 ГэВ**

**Каналирование и объемное отражение в кристаллах с разным  $Z$  (алмаз, германий)**

# Планы в 2008-2010

**Продолжить исследование эффективности каналирования и многократного объемного отражения для применения в системе коллимации пучков LHC**

**Провести эксперименты в кольцах SPS, Tevatron и LHC**