

# О результатах ОФВЭ в 2014 году

Направления ведущихся исследований (из плана и отчета за 2014 г.):

## «Ядерная физика» (часть темы О.Д.Далькарова)

- 1) CMS (CERN, LHC)
- 2) COMPASS (CERN, SPS)
- 3) H1 (DESY, HERA)
- 4) HERMES (DESY, HERA)
- 5) A2 (Mainz, MAMI)
- 6) эта-ядра (Дубна, Нуклотрон)
- 7) Фрагментация релятивистских ядер
- 8) ЭМ ливни в кристаллах
- 9) Теория

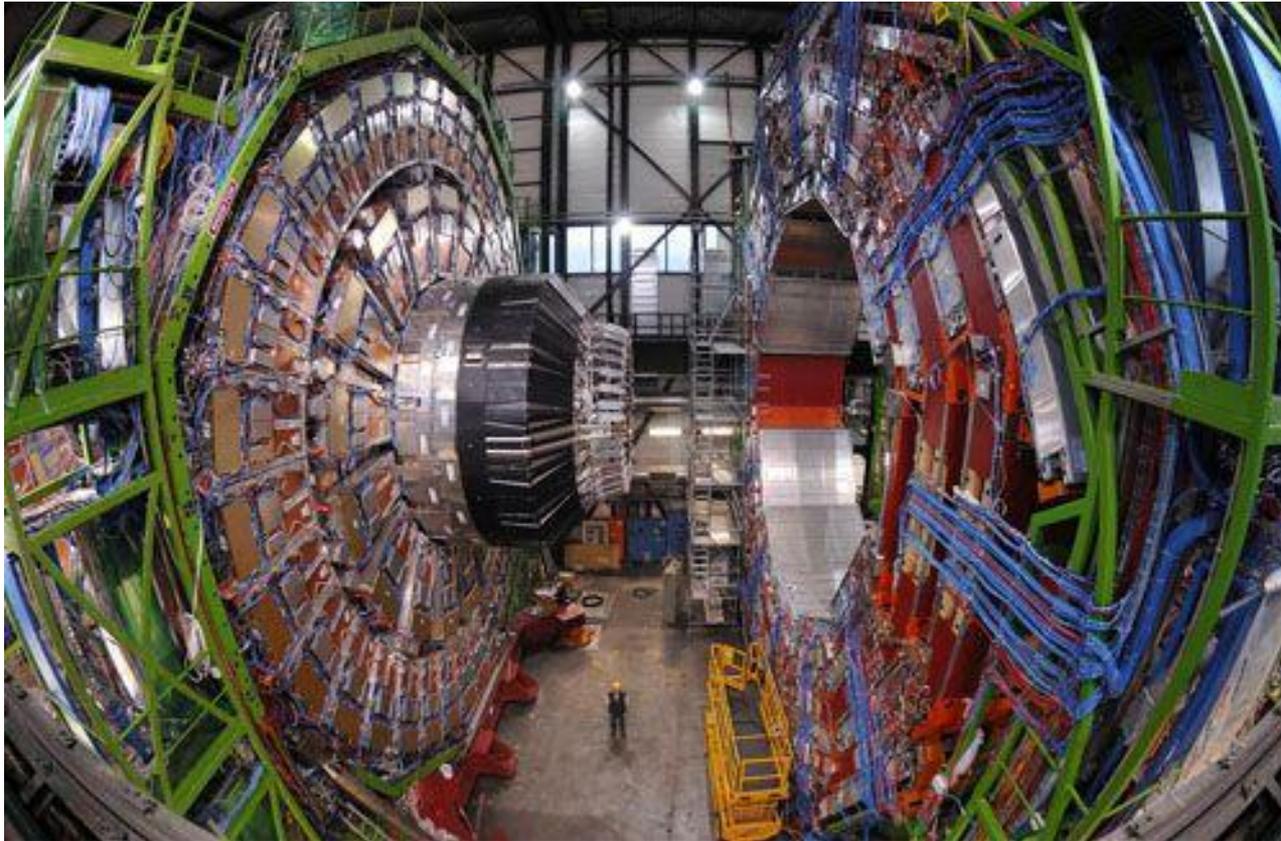
## «Пучки, ускорители» (часть темы А.В.Агафонова)

- 10) ПТИ (Поляризованное  
Тормозное Излучение)
  - 11) Переходное излучение
  - 12) Охлаждение пучков
  - 13) Генерация излучения  
для медицины
  - 14) Генерация излучения-2
- + прикладные работы:**
- 15) Узконаправленные  $\gamma$ -пучки
  - 16) Детектирование ВВ

# 1) CMS (CERN, LHC)

---

## Compact Muon Solenoid



Участники коллаборации от ФИАН:

В.Ф. Андреев, М.Ю. Азаркин, М.Р. Киракосян, С.В. Русаков, А.В. Виноградов  
И.М. Дремин, А.В. Леонидов, Г.А. Месяц [ + А.А.Радовская]

## А. Теория и эксперимент

- ◆ Анализ данных: роль струй в процессах множественного рождения частиц в pp-соударениях. Связь между множественностью вторичных частиц, прицельным параметром соударения и интенсивностью образования струй.
- ◆ Изучение импульсного дисбаланса струй в зависимости от множественности при энергии 8 ТэВ. Цель - понимание значительных разногласий экспериментальных данных с предсказаниями моделей Монте-Карло в области высоких множественностей (ридж-эффект и эффект подавления струй).
- ◆ Выполнено теоретическое исследование состояния вещества в начальный момент столкновения ультрарелятивистских тяжёлых ионов . На примере скалярного поля было найдено условие достижения термодинамического равновесия для последующего этапа эволюции, описываемого гидродинамикой, и вычислены соответствующие квантовые поправки.

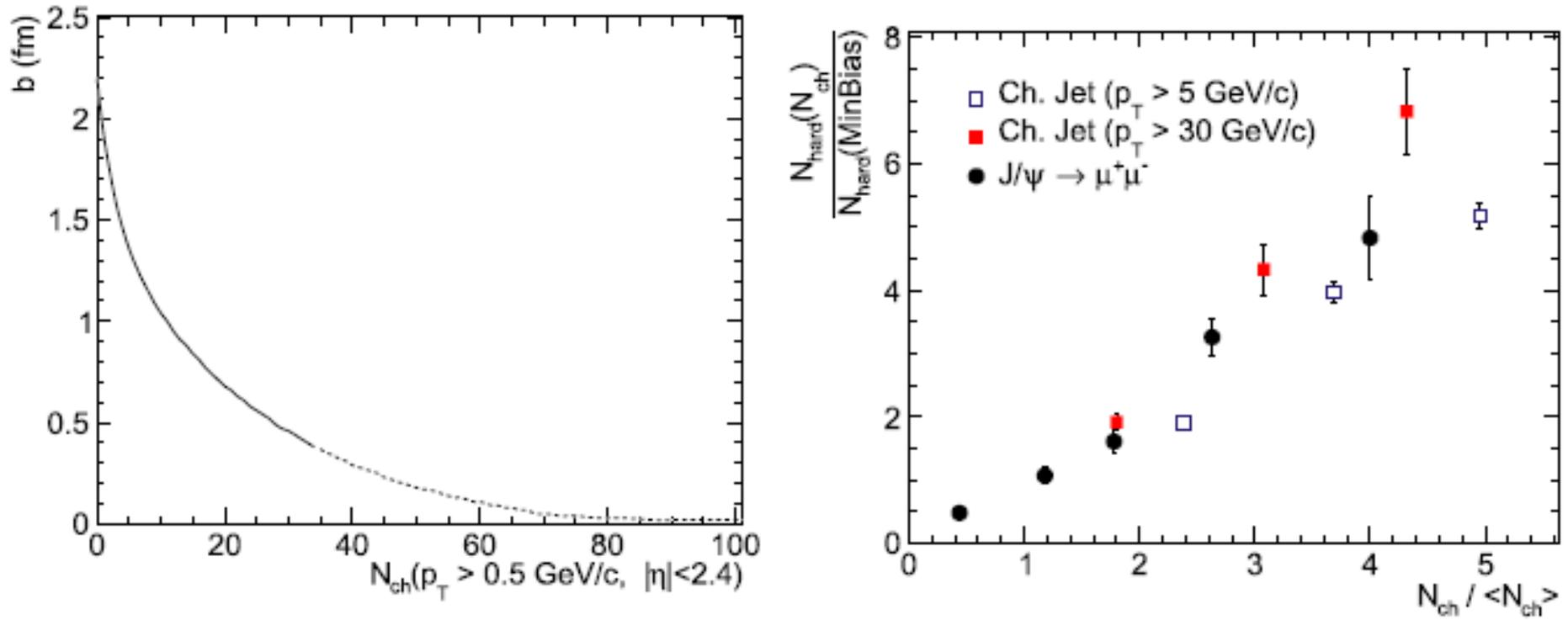
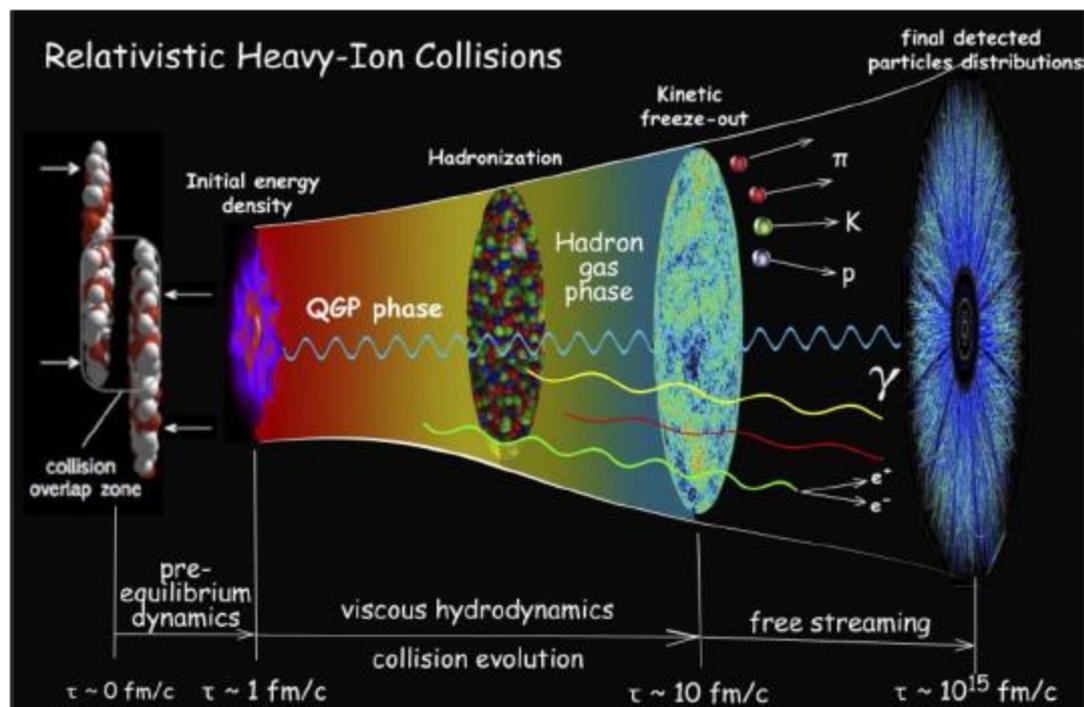


Fig. 4. Fraction of events with  $N_{ch} > N_{ch}^{fixed}$ . The  $N_{ch}$  is defined as a number of stable charged particles with  $p_T > 0.5 \text{ GeV}/c$  and  $|\eta| < 2.4$ . The  $N_{ch}$  distribution is taken from [14].

Fig. 8. Relative yield of hard momentum processes as a function of  $N_{ch}$ , which does not include particles originating from the hard interactions.

## Little Bang



arxiv:1304.3634. Ulrich Heinz "Towards the Little Bang Standard Model"



October 17, 2014

## Formulation of a problem

Nucl.Phys. A850 (2011) 69-109

- Evolution of quantum field  $\varphi$  in the presence of an external time-dependent source  $J$ :

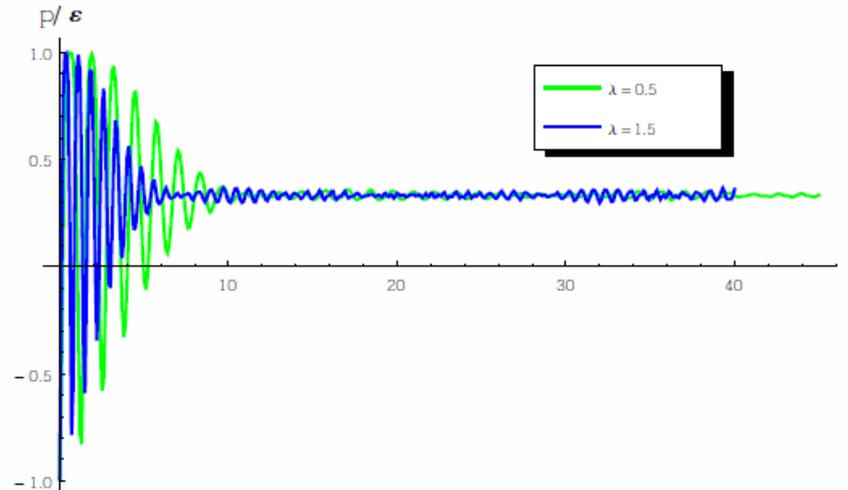
$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(\partial_\mu \varphi)^2 - \frac{1}{2}m^2 \varphi^2 - \frac{\lambda}{4!} \varphi^4 - J\varphi$$

$$J(x) \sim \theta(-x^0) \frac{Q^3}{\sqrt{\lambda}} e^{\epsilon x^0}$$

- Problem under consideration: evolution of energy-momentum tensor  $T^{\mu\nu}$ , in particular of  $\text{tr}T^{\mu\nu} = \epsilon - 3p$  for the simplest case of a spatially homogeneous field

## Quantum evolution at LO: pressure relaxation

Pressure relaxation as a function of coupling:



## Б. Методика эксперимента

◆ Расчёт триггеров первого уровня (L1) и триггеров высокого уровня (HLT) для исследуемых физических процессов при энергии  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ и увеличенной светимостью, проектируемой в 2015 – 2017 годы.

Расчёт содержит определение энергетических порогов, трековой множественности, идентификацию частиц, скорости счёта и коэффициенты подавления. Выполнена оптимизация по времени, необходимого для учёта взаимного влияния триггеров с учётом класса событий. Триггеры снабжались специальными программами контроля качества собираемых данных во время сеансов по набору статистики. Отладка триггеров будет выполнена при получении реальных соударений.

◆ **Участие в модернизации детектора Hcal (моделирование):**

Анализ и коррекция версии FastSim для пучков с новой настройкой 2015 года. Была подготовлена новая опция для учёта радиационного повреждения торцевой части адронного калориметра .

Исследована применимость параметризации типа GFLASH к адронным ливням. Подготовлена специальная программа, позволяющая извлекать параметры адронного ливня из условий полного моделирования и переноса их в программу быстрого моделирования.

Использована новая обция “Shower library”, для модернизации отклика торцевой части адронного калориметра.

Разработка программы быстрого моделирования для изменённых детекторов CMS установки.

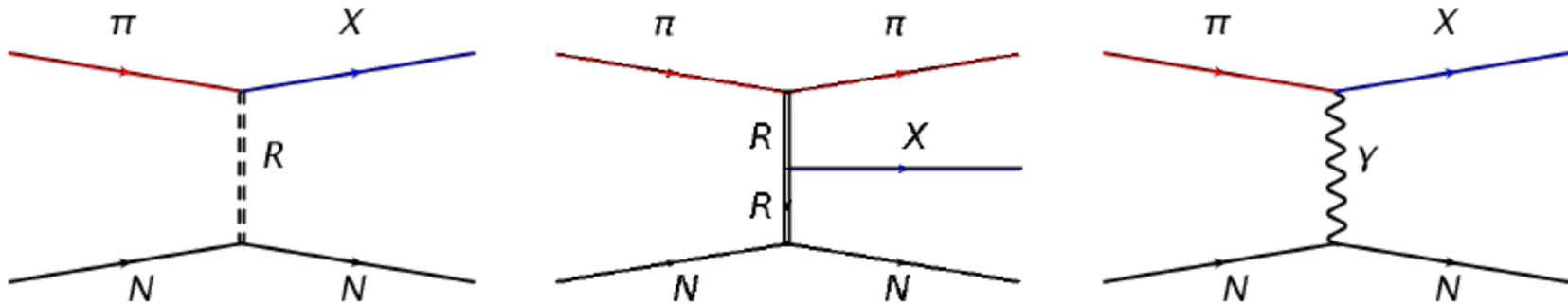
◆ **Участие в группе HCal по развитию моделирования для нового варианта адронного детектора :**

Улучшена реконструкция струй рассмотрено влияние радиационного повреждения и фоновой загрузки на их энергетическое разрешение и эффективность регистрации. Проведена минимизация “pile-up” ( $\approx$  перегрузок).

## 2) COMPASS (CERN, SPS)

### COmmon Muon Proton Apparatus for Structure and

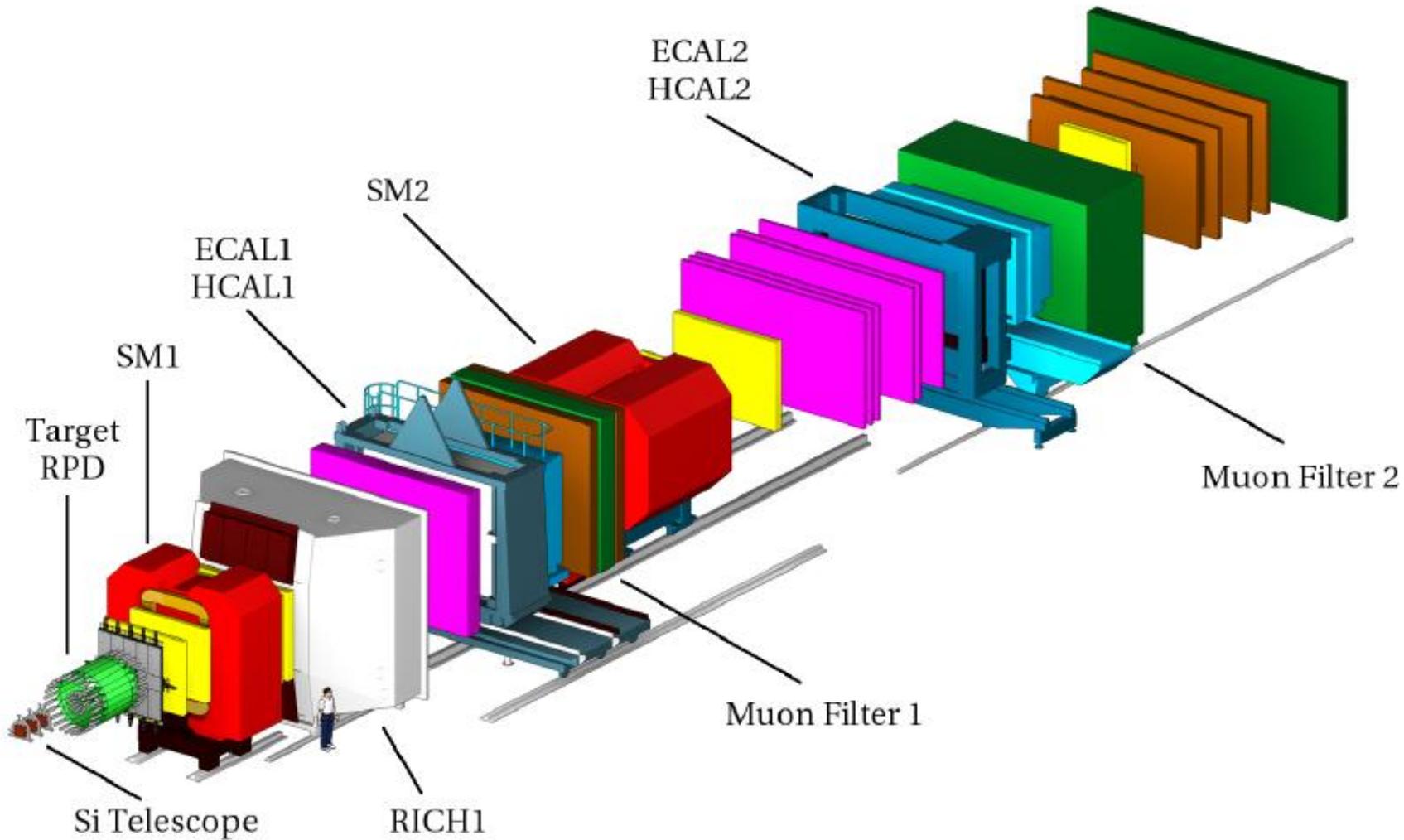
**Spectroscopy** (Study of hadron structure and hadron spectroscopy with high intensity muon and hadron beams)



**Fig. 1:** Production mechanisms employed in COMPASS for (left) diffractive dissociation, (middle) central production, (right) photo-production by quasi-real photons  $\gamma$ , with  $\pi$  denoting the beam particle (can be also  $p$ ,  $K$ ), and  $N$  the target nucleon or nucleus.

Участники коллаборации от ФИАН:

С.Г.Герасимов, И.В.Коноров, М.В.Завертяев



**Fig. 2:** Three-dimensional view of the COMPASS setup for measurements with hadron beams. The beam comes from the left side. The upstream part of the setup (beam line) is not shown here. The different colours indicate different detector types.

Далее - фрагмент проделанной работы:

Измерение поляризуемости заряженного пиона в реакции Примакова  
(arXiv: 1405.6377)

## Measurement of the charged-pion polarisability

The COMPASS Collaboration

### Abstract

The COMPASS collaboration at CERN has investigated pion Compton scattering,  $\pi^- \gamma \rightarrow \pi^- \gamma$ , at centre-of-mass energy below 3.5 pion masses. The process is embedded in the reaction  $\pi^- \text{Ni} \rightarrow \pi^- \gamma \text{Ni}$ , which is initiated by 190 GeV pions impinging on a nickel target. The exchange of quasi-real photons is selected by isolating the sharp Coulomb peak observed at smallest momentum transfers,  $Q^2 < 0.0015 \text{ (GeV}/c)^2$ . From a sample of 63 000 events, the electric pion polarisability is determined to be  $\alpha_\pi = (2.0 \pm 0.6_{\text{stat}} \pm 0.7_{\text{syst}}) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$  under the assumption  $\alpha_\pi = -\beta_\pi$  that relates the electric and magnetic dipole polarisabilities. This result is in tension with previous dedicated measurements, while it is found in agreement with the expectation from chiral perturbation theory. An additional measurement replacing pions by muons, for which the cross-section behavior is unambiguously known, was performed for an independent estimate of the systematic uncertainty.

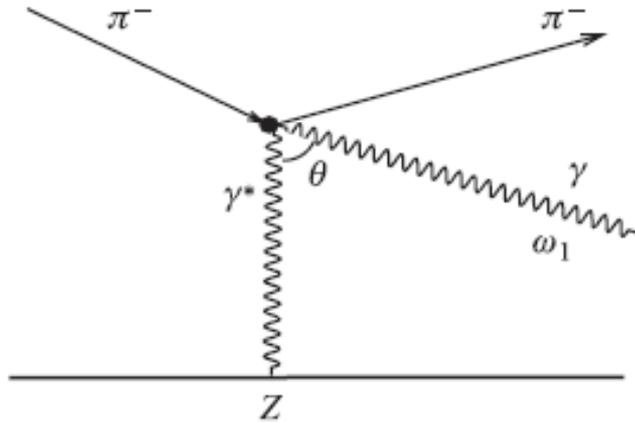


Fig. 1. The diagram of the Compton scattering in inverse kinematics (Primakoff scattering)

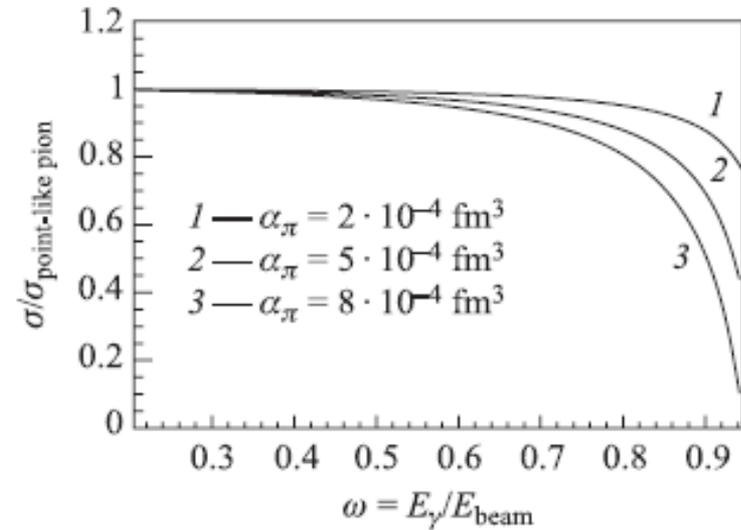


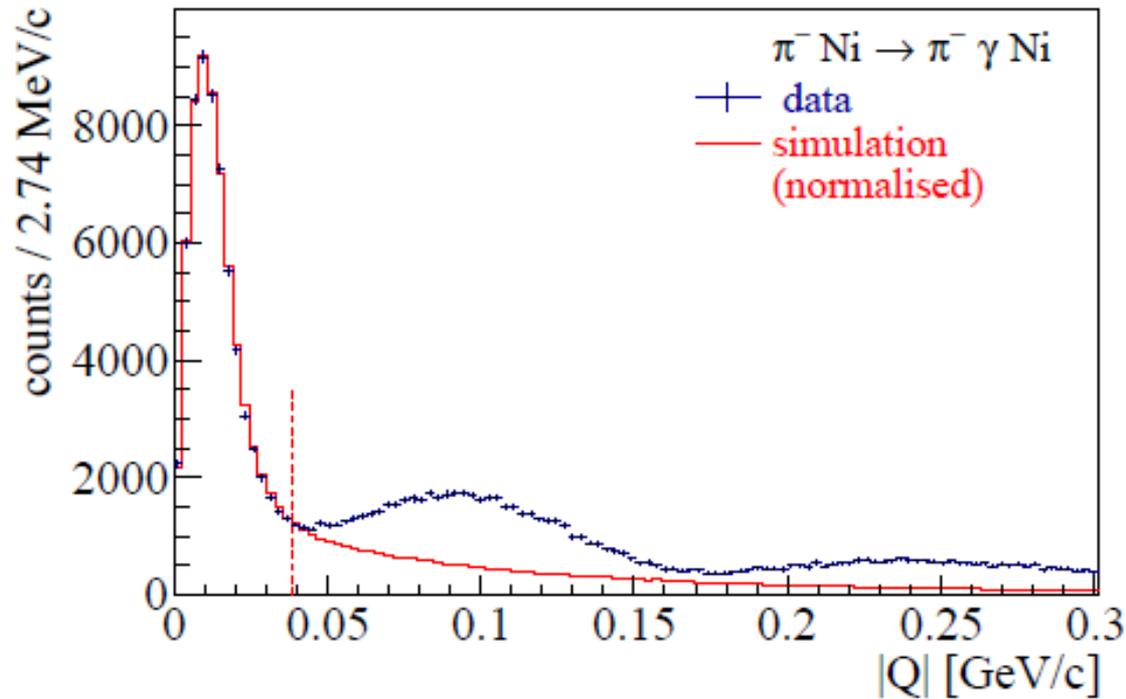
Fig. 2. The Primakoff differential cross section  $d\sigma/d\omega$  for different values of pion polarizability  $\alpha_\pi$

In the anti-laboratory system the differential cross section is described by the formula

$$\frac{d^3\sigma}{dQ d\omega_1 d(\cos \theta)} = \frac{2\alpha^3 Z^2 Q^2 - Q_{\min}^2}{m_\pi^2 \omega_1 Q^4} |F_A(Q^2)|^2 \times \left( F_{\pi\gamma}^{\text{Pt}} + \frac{m_\pi \omega_1^2}{\alpha} \frac{\alpha_\pi (1 + \cos^2 \theta) + 2\beta_\pi \cos \theta}{(1 + (\omega_1/m_\pi)(1 - \cos \theta))^3} \right), \quad (1)$$

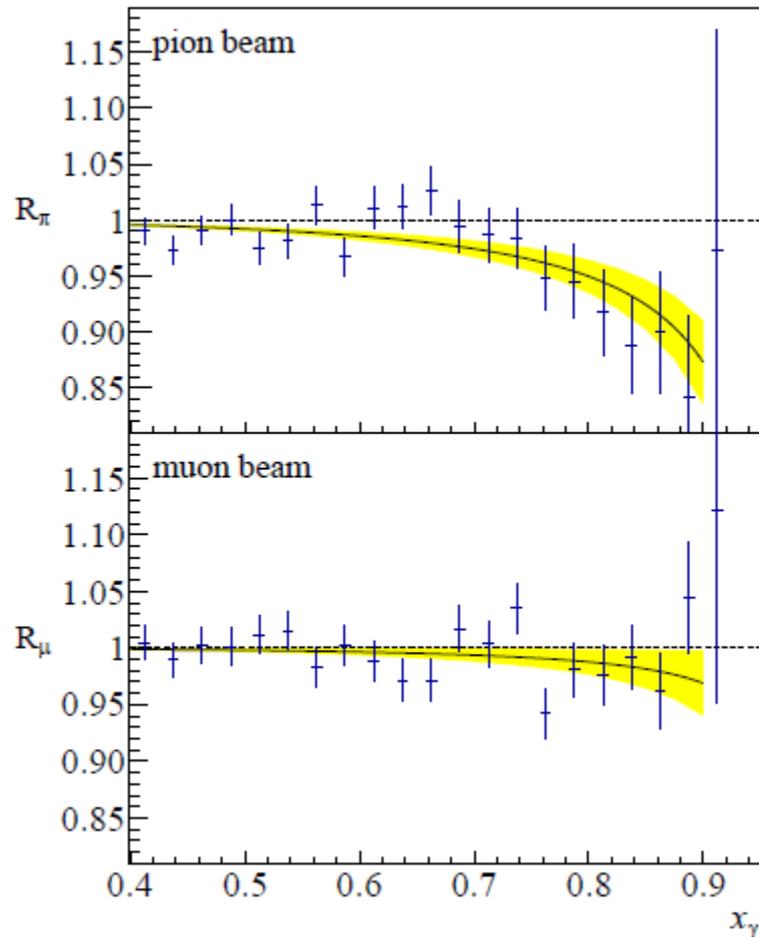
In pion-nucleus reactions, photon exchange becomes important at very low momentum transfer and competes with strong interaction processes. The  $\pi$ -nucleus cross section can be connected to the  $\pi\gamma$  cross section using the equivalent-photon approximation (EPA) [9]:

$$\frac{d\sigma_{(A,Z)}^{\text{EPA}}}{ds dQ^2 d\Phi_n} = \frac{Z^2 \alpha}{\pi(s - m_\pi^2)} F^2(Q^2) \frac{Q^2 - Q_{\text{min}}^2}{Q^4} \frac{d\sigma_{\pi\gamma \rightarrow X}}{d\Phi_n}. \quad (2)$$



$\beta_\pi$ , but with opposite sign. In this analysis we use  $\alpha_\pi = -\beta_\pi$ . The polarisability is determined from the  $x_\gamma$  dependence of the ratio

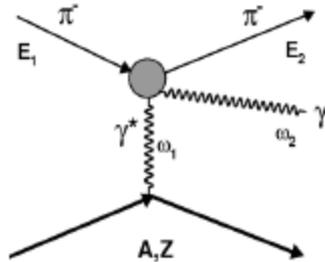
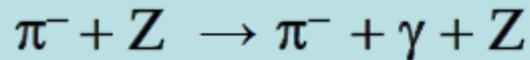
$$R_\pi = \left( \frac{d\sigma_{\pi\gamma}}{dx_\gamma} \right) / \left( \frac{d\sigma_{\pi\gamma}^0}{dx_\gamma} \right) = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{m_\pi^3}{\alpha} \cdot \frac{x_\gamma^2}{1-x_\gamma} \alpha_\pi, \quad (3)$$



$$\alpha_\pi = (2.0 \pm 0.6_{\text{stat}} \pm 0.7_{\text{syst}}) \times 10^{-4} \text{ fm}^3.$$

## Review of experimental data on $(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi^\pm}$

Experiments	$(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi^\pm}$
$\gamma p \rightarrow \gamma \pi^+ n$ MAMI (2005)	$11.6 \pm 1.5_{\text{stat}} \pm 3.0_{\text{syst}} \pm 0.5_{\text{mod}}$
$\gamma p \rightarrow \gamma \pi^+ n$ Lebedev Phys. Inst. (1984)	$40 \pm 20$
$\pi^- Z \rightarrow \gamma \pi^- Z$ Serpukhov (1983)	$13.6 \pm 2.8 \pm 2.4$
$\pi^- Z \rightarrow \gamma \pi^- Z$ COMPASS (2014)	$4.0 \pm 1.2 \pm 1.4$
D. Babusci <i>et al.</i> (1992) PLUTO	$38.2 \pm 9.6 \pm 11.4$
$\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ DM1	$34.4 \pm 9.2$
$E_\gamma < 700$ MeV MARK II	$4.4 \pm 3.2$
J.F. Donoghue, B. Holstein (1993)	5.4
$\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ MARK II	
A. Kaloshin, V. Serebryakov (1994)	$5.25 \pm 0.95$
$\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ MARK II	
L. Fil'kov, V. Kashevarov (2005)	
$\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$ fit of all data from threshold to 2.5 GeV	$13.0+2.6-1.9$
R. Garcia-Martin, B. Moussallam (2010), $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$	4.7

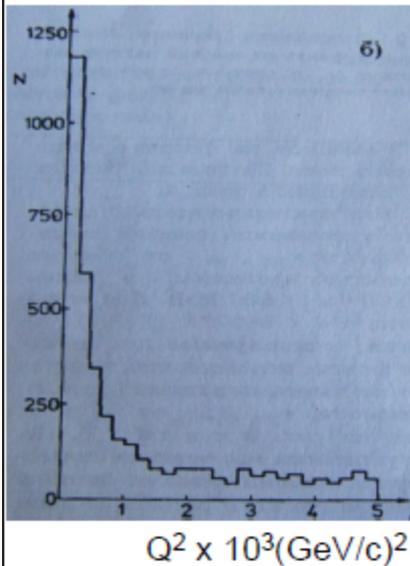


$$\frac{d\sigma_{\pi A}}{ds dQ^2 d\cos\Theta} = \frac{Z^2\alpha}{\pi(s - m_\pi^2)} F_{eff}^2(Q^2) \frac{Q^2 - Q_{min}^2}{Q^4} \frac{d\sigma_{\pi\gamma}}{d\cos\Theta}$$

$$F_{eff} \approx 1 \quad Q_{min}^2 = \frac{m_\pi^2(s - m_\pi^2)^2}{4E_{beam}^2}$$

Maximum of the Coulomb peak at  $Q^2 = 2Q_{min}^2$

Width of the peak:  $Q^2 = 5.6 Q_{min}^2$



Serpukhov (1983)

$$E_{beam} = 40 \text{ GeV}, \quad Q_{min}^2 \simeq 12 \times 10^{-8} (\text{GeV}/c)^2$$

Coulomb amplitude dominates for  $Q^2 \leq 2 \times 10^{-4} (\text{GeV}/c)^2$

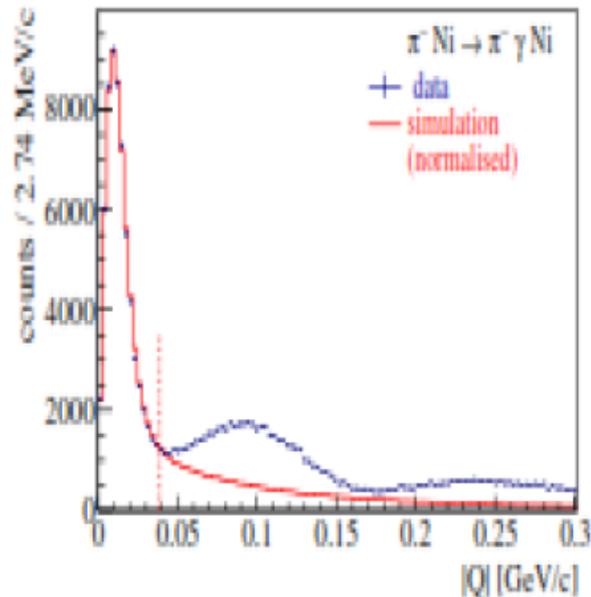
$$Q^2 \leq 6 \times 10^{-4} (\text{GeV}/c)^2$$

$$(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi^\pm} = 13.6 \pm 2.8 \pm 2.4$$

# $\pi^- + Z \rightarrow \pi^- + \gamma + Z$ COMPASS Collaboration

$$E_{\text{beam}} = 190 \text{ GeV}$$

$$(Q_{\text{min}}^2 (\text{Serp})) / (Q_{\text{min}}^2 (\text{COMP})) \approx 22.5 \quad Q^2 \leq 15 \times 10^{-4} (\text{GeV}/c)^2$$



This value of  $Q^2$  is very far from the Coulomb peak and therefore a contribution of an interference between the Coulomb and nuclear amplitudes should be taken into account.

The distribution has maximum at  $Q=10^{-2} \text{ GeV}/c$ .

The maximum of the Coulomb peak at  $Q=10^{-4} \text{ GeV}/c$ .

Much of a contribution from the Coulomb peak was not taken account.

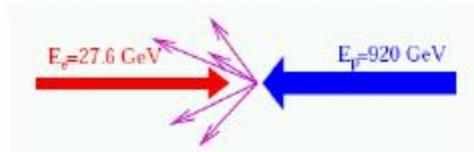
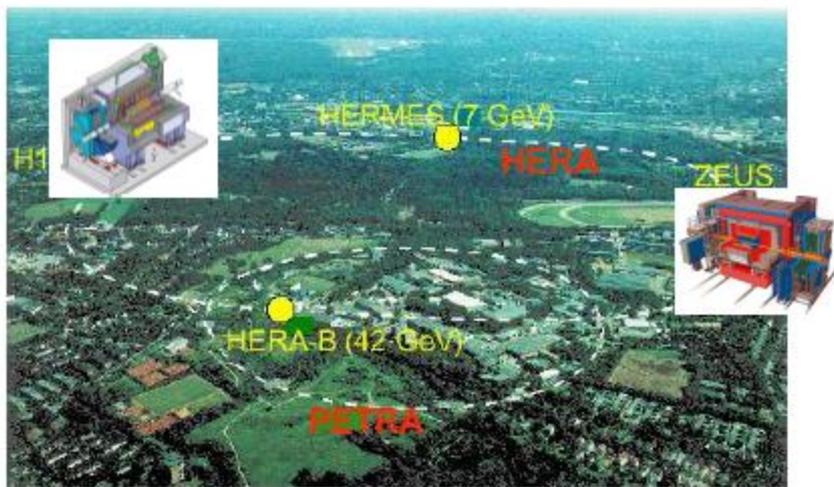
$$(\alpha_1)_{\pi^\pm} = 2.0 \pm 0.6 \pm 0.7$$

Л.В.Фильков: Эксперимент проведен при слишком больших значениях передаваемого импульса  $Q^2$ , где вклад интерференции кулоновской и ядерной амплитуд существенен. Однако авторы не учитывали этот эффект. Поэтому их результат сильно модельно зависимый.

### 3) H1 (DESY, HERA)

(слайды С.В. Левоняна и Я.А. Ваздика)

#### HERA: The World's Only ep Collider



- 1998  $E_p$  upgrade:  $820 \Rightarrow 920 \text{ GeV}$   
( $\sqrt{s}$ :  $301 \Rightarrow 319 \text{ GeV}$ )
- 2001 HERA-2 upgrade:  $\mathcal{L} \times 3$ , Polarised  $e^+/e^-$   
( $\langle P \rangle = 40\%$ )

Участники коллаборации от ФИАН:

В.Ф. Андреев, А.С. Белоусов, А.М. Фоменко, Н.З. Гогитидзе, С.В. Левонян, А.И. Лебедев, Е.И. Малиновский, С.В. Русаков, Ю.В. Соловьев, Я.А. Ваздик 18

## • Multi-jet paper

- ▷ Inclusive jet, 2-jet and 3-jet diff. cross sections are measured in NC DIS at  $150 < Q^2 < 15000 \text{ GeV}^2$
- ▷ The cross sections are compared to pQCD calculations at NLO and are used to determine  $\alpha_s(M_Z)$
- ▷ Most precise  $\alpha_s$  from jet data world-wide



## • Diffractive dijets in DIS and PHP regimes

- ▷ Two analyses using different techniques to select diffraction at HERA: LRG (large rapidity gap) method and VFPS (tagging elastically scattered proton in Roman Pots)
- ▷ Cross sections are compared to NLO QCD predictions
- ▷ QCD factorisation breaking in diffractive PHP is clearly demonstrated



## • Exclusive $\rho^0$ photoproduction with leading neutrons

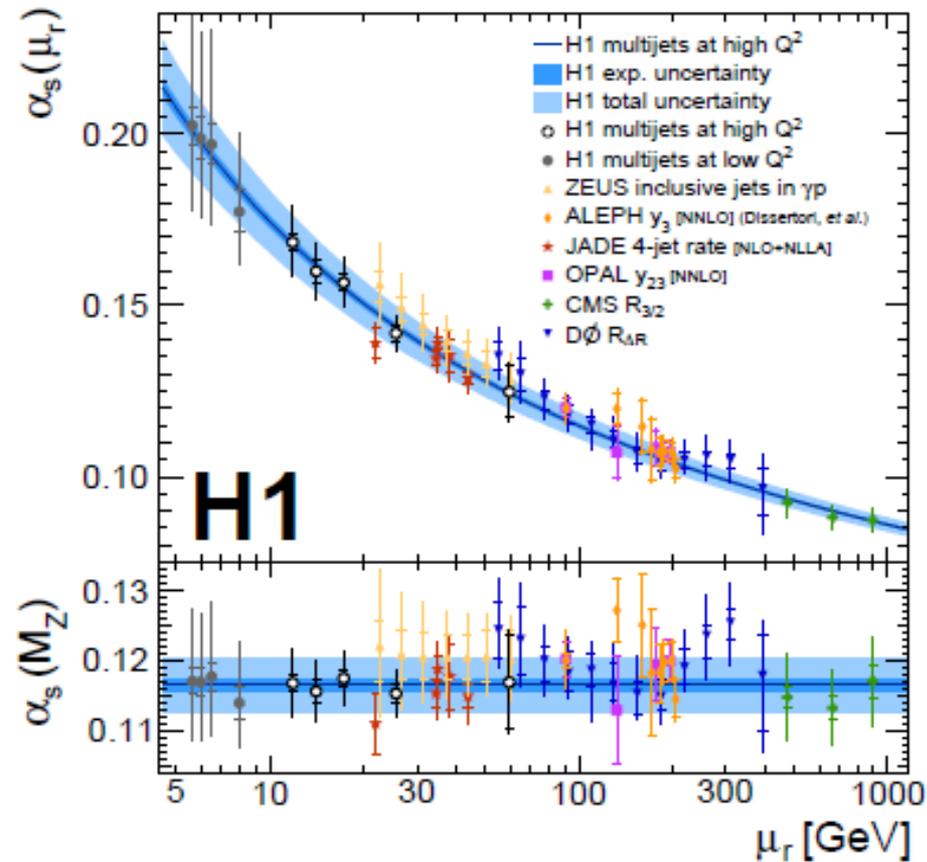
- ▷ Such reaction is studied for the first time at HERA; reported at 3 conferences this year
- ▷ Elastic  $\sigma_{\gamma\pi}$  is extracted (in OPE approximation) for the first time ever



## • Other analyses

- ▷ Search for QCD instanton at HERA – upper limit is set
- ▷ Combined H1+ZEUS publication of the proton structure (HERAPDF 2.0) – draft ready

## Multi-jet paper (arXiv:1406.4709 [hep-ex], EPJ 06/14)



$$\alpha_s(M_Z) = 0.1165 \pm 0.0008_{\text{exp}} \pm 0.0038_{\text{pdf,theo}}$$



*International Conference-Session  
of the Section of Nuclear Physics  
of PSD RAS*

**2014**

## **Exclusive Photoproduction of $\rho^0$ Meson with Forward Neutron at HERA**



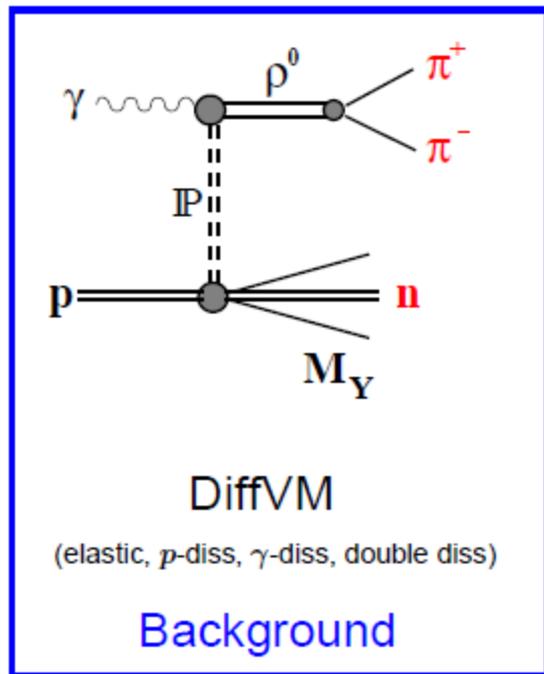
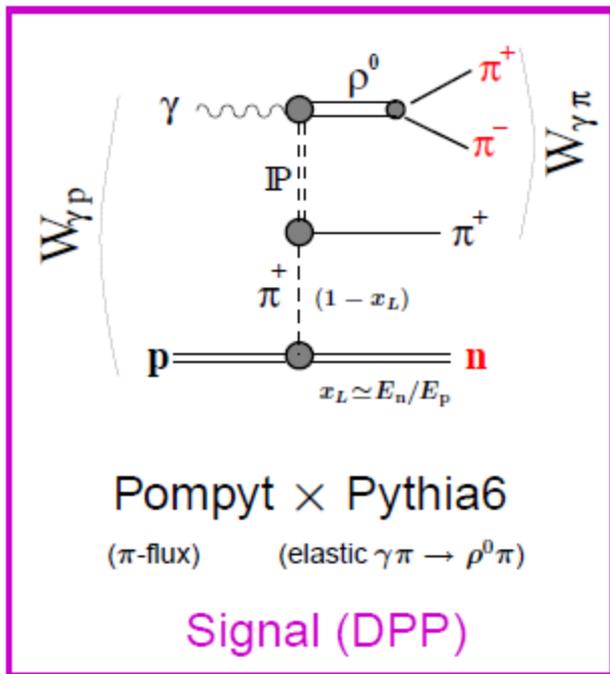
Jakov Vazdik, LPI, Moscow  
*On behalf of H1 Collaboration*



Exclusive  $\rho^0$  with FNC in H1

MEPhi, Moscow, 20-Nov-2014

## Contributing processes and their modelling



$$W_{\gamma p} \simeq \sqrt{2(E - p_z)_\rho E_p}$$

- DPP expectations:  $f_{\pi/p}(x_L, t) \Rightarrow x_L$  shape,  $p_{t,\rho}^2$  slope,  $b = b_{\text{eff}}(M_{\pi N})$

$$W_{\gamma\pi} \simeq W_{\gamma p} \sqrt{1 - x_L}$$

- Diffractive bgr is well known (but has an irreducible part:  $M_Y = N^* \rightarrow n\pi^+$ )

## Analysis Summary

---

- Data sample

- ▷ 2006 – 2007  $e^+$  runs,  $\sqrt{s} = 319$  GeV,  $\mathcal{L} = 1.16$  pb $^{-1} \simeq$  6600 events in final sample
- ▷ Trigger:  $\langle \epsilon_{L1} \rangle \simeq 0.8$ ,  $\langle \epsilon_{L2} \rangle \simeq 1.0$

- Tracking

- ▷ 2 tracks with  $p_t^{\text{tr}} > 0.2$  GeV,  $20^\circ < \theta^{\text{tr}} < 160^\circ$  fitted to event vertex  $|z_{vx}| < 30$  cm, net charge = 0
- ▷ Effective mass range:  $0.6 < M_{\pi\pi} < 1.1$  GeV (analysis);  $\Rightarrow \sigma(\rho^0)$  for  $0.28 < M_{\pi\pi} < 1.5$  GeV

- FNC

- ▷ High energy neutron,  $E_n > 120$  GeV, within good acceptance region:  $\theta_n < 0.75$  mrad
- ▷ Background fraction determined from  $x_L$  shape:  $F_{\text{bg}} = 0.36 \pm 0.06$  (subtracted from the data)

- Exclusivity

- ▷ Nothing above noise level in the detector except two tracks from  $\rho^0$  decay and the leading neutron

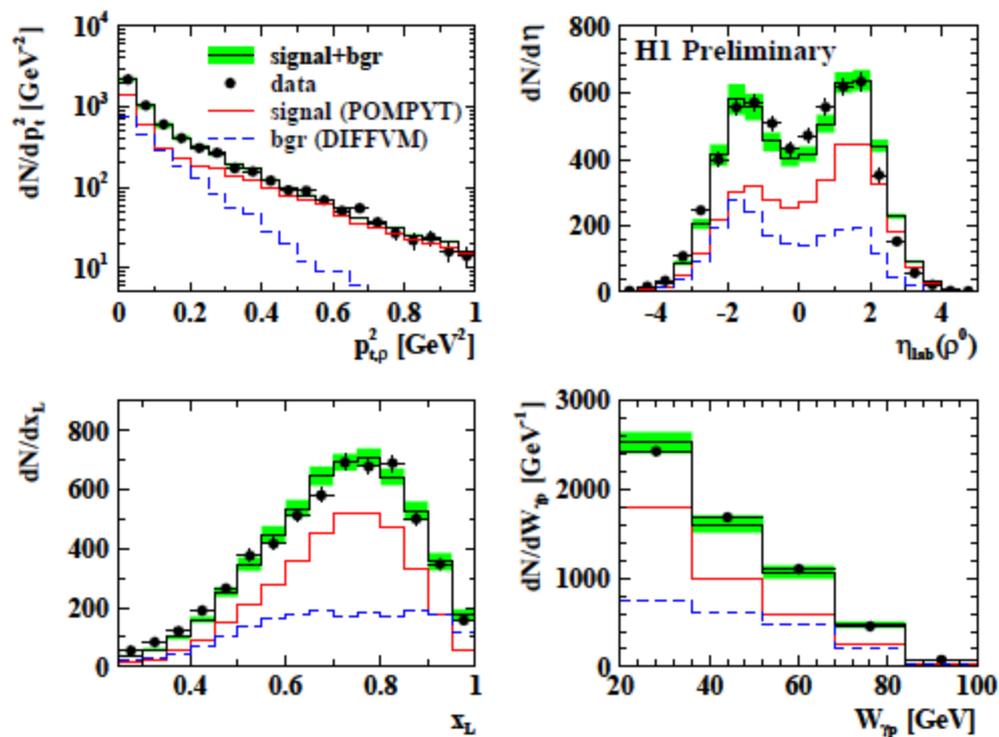
- Cross section measurement phase space and precision

- ▷ Photoproduction:  $Q^2 < 2$  GeV $^2$ ,  $20 < W_{\gamma p} < 100$  GeV
- ▷ Leading neutron:  $0.35 < x_L < 0.95$ ,  $p_{t,n} < x_L \cdot 0.69$  GeV
- ▷  $\rho^0$  meson:  $0.28 < M_{\pi\pi} < 1.5$  GeV,  $p_{t,\rho} < 1$  GeV

$\delta_{\text{stat}} = 2.1\% \oplus \delta_{\text{sys}} = 15.5\% \oplus \delta_{\text{norm}} = 5.9\% \Rightarrow \delta_{\text{tot}} = 16.6\%$

## Control Plots for basic kinematics

Exclusive photoproduction of  $\rho^0$  with Forward Neutrons



Data points are shown with stat. errors only; green band represents estimated bgr fraction uncertainty

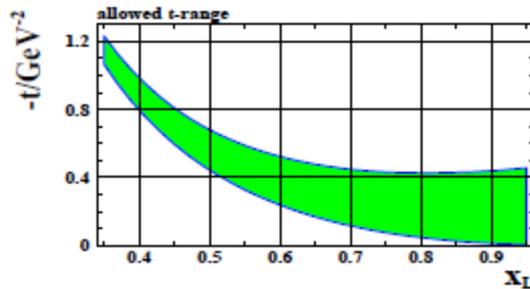
## OPE and pion fluxes

$$\frac{d^2\sigma_{\gamma p}(W^2, x_L, t)}{dx_L dt} = f_{\pi/p}(x_L, t)\sigma_{\gamma\pi}((1-x_L)W^2)$$

$$\frac{d\sigma_{\gamma p}}{dx_L} = \int_{t_0(x_L)}^{t_{\min}(x_L)} f_{\pi/p}(x_L, t) dt \cdot \sigma_{\gamma\pi}(W_{\gamma\pi})$$

$$\text{where } t = -\frac{p_{L,n}^2}{x_L} - \frac{(1-x_L)(m_n^2 - m_p^2 x_L)}{x_L}$$

$$\sigma_{\gamma\pi}(W_{\gamma\pi}) = \frac{1}{\Gamma_{\pi}(x_L)} \frac{d\sigma_{\gamma p}}{dx_L} \quad \text{and} \quad \overline{\sigma_{\gamma\pi}}(\langle W_{\gamma\pi} \rangle) = \frac{\sigma_{\gamma p}}{f\Gamma_{\pi}}$$



Typical examples:

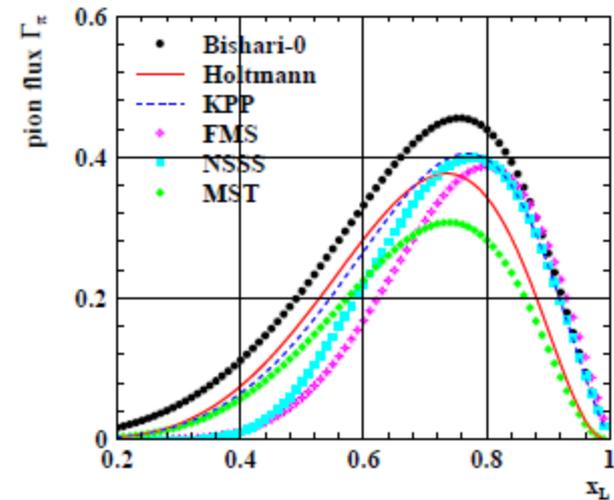
$$f_{\pi^+/p}(x_L, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{g_{\pi NN}^2}{4\pi} (1-x_L) \frac{-t}{(m_\pi^2 - t)^2} \exp[-R_\pi^2 \frac{m_\pi^2 - t}{1-x_L}]$$

— H. Holtmann et al., *Nucl. Phys. A*596 (1996) 631.

$$f_{\pi^+/p}(x_L, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{g_{\pi NN}^2}{4\pi} (1-x_L)^{1-2\alpha'_\pi t} \frac{-t}{(m_\pi^2 - t)^2} \exp[-R_\pi^2 (m_\pi^2 - t)]$$

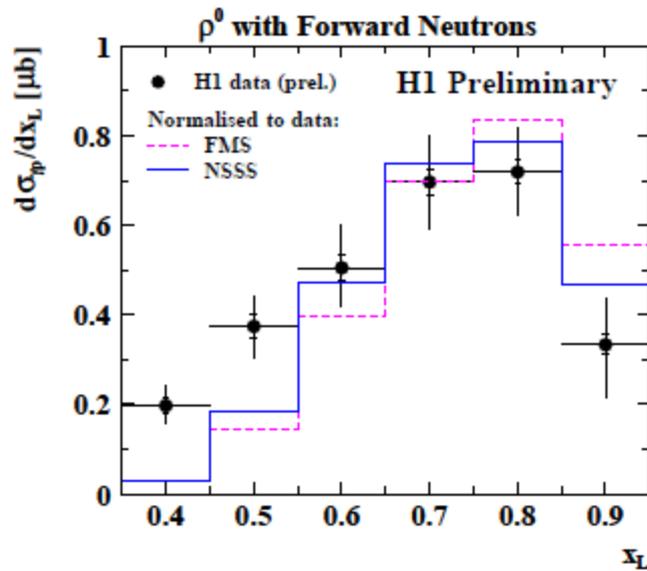
— B. Kopeliovich et al., *Z. Phys. C*73 (1996) 125.

Problem: too many different fluxes on the market

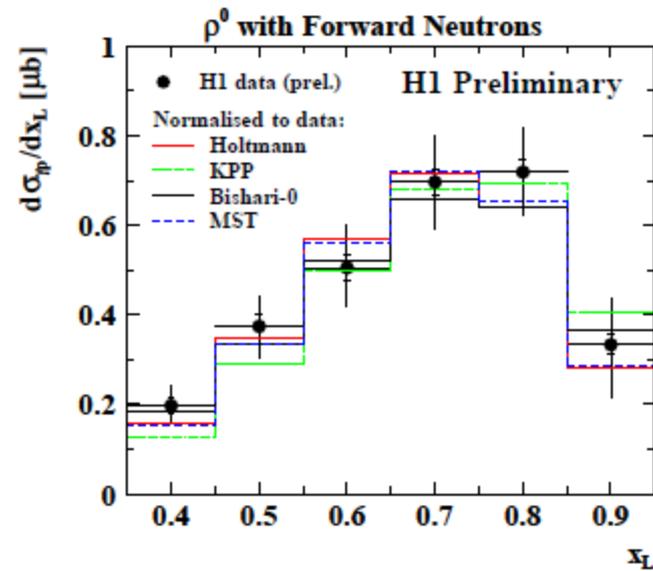


## Pion fluxes confronted with H1 data

Make restricted selection of  $\pi$ -fluxes on the basis of shape comparison only



Example of fluxes **excluded by the data**  
 (too soft pions 'in the proton')



Fluxes **compatible with H1 data**

## Total cross sections



$$\sigma_{\gamma p} = \frac{\sigma_{ep}}{\int f_{\gamma/e}(y, Q^2) dy dQ^2} = \frac{N_{\text{data}} - N_{\text{bgr}}}{\mathcal{L}(A \cdot \epsilon) \mathcal{F}} \cdot C_p$$

Where

$N_{\text{bgr}}$  – diffractive dissociation bgr from MC

$\mathcal{L}$  – integrated luminosity

$A \cdot \epsilon$  – correction for detector acceptance and efficiency

$\mathcal{F}$  – photon flux integrated over kinematic domain  $20 < W < 100$  GeV,  $Q^2 < 2$  GeV<sup>2</sup>

$C_p$  – numerical factor accounting for extrapolation to full  $\rho^0$  mass range

For OPE dominated range,  $0.35 < x_L < 0.95$ , and  $20 < W_{\gamma p} < 100$  GeV,  $\theta_n < 0.75$  mrad

$$\sigma(\gamma p \rightarrow \rho^0 n(\pi^+)) = (280 \pm 6_{\text{stat}} \pm 46_{\text{sys}}) \text{ nb}$$



$$\sigma_{\gamma\pi}(\langle W_{\gamma\pi} \rangle) = \frac{\sigma_{\gamma p}}{\int f_{\pi^+/p}(x_L, t) dx_L dt}$$

and for  $\langle W_{\gamma\pi} \rangle = 22$  GeV

$$\sigma_{\text{el}}(\gamma\pi^+ \rightarrow \rho^0\pi^+) = (2.03 \pm 0.34_{\text{exp}} \pm 0.51_{\text{model}}) \mu\text{b}$$

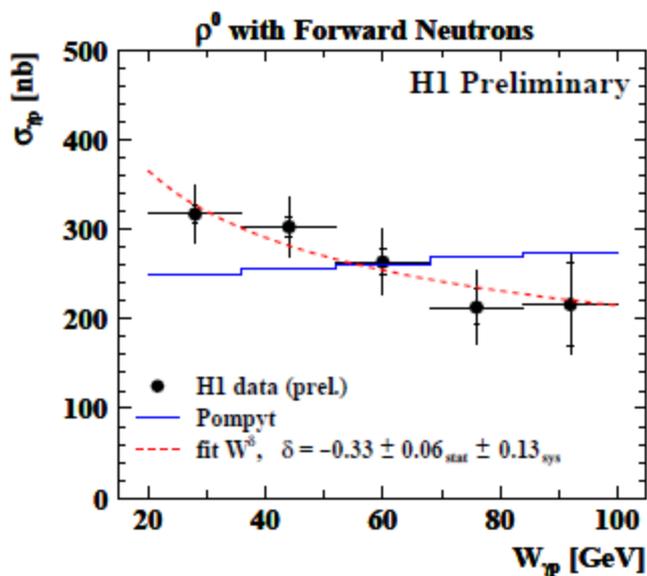
Taking interpolated value of  $\sigma(\gamma p \rightarrow \rho^0 p) = 9.5 \pm 0.5 \mu\text{b}$  at corresponding energy, we obtain

$$r_{\text{el}} = \sigma_{\gamma\pi}^{\text{el}} / \sigma_{\gamma p}^{\text{el}} = 0.21 \pm 0.06 \quad (\text{cf. } r_{\text{tot}} = \sigma_{\gamma\pi}^{\text{tot}} / \sigma_{\gamma p}^{\text{tot}} = 0.32 \pm 0.03 \text{ [ZEUS, 2002]})$$

## Total $\gamma p$ and $\gamma\pi$ cross sections

Inner error bars – statistical uncertainty

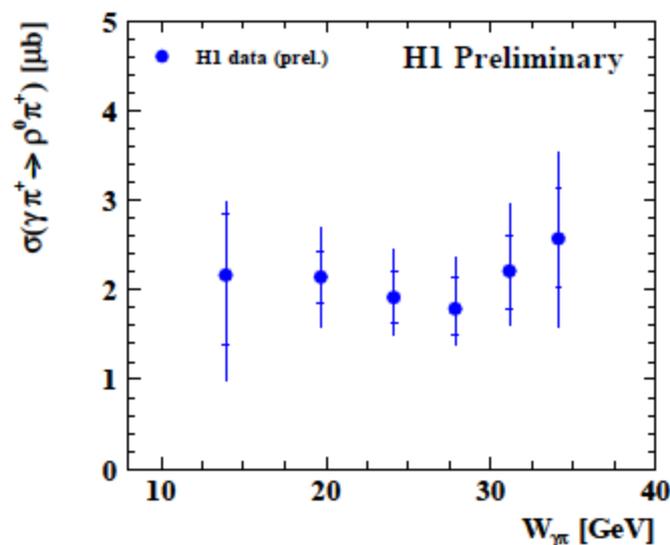
outer error bars –  $\sqrt{\text{stat}^2 + \text{sys}^2}$



Regge motivated power law fit  $W^\delta$  yields  $\delta < 0$

Inner error bars – total experimental uncertainty

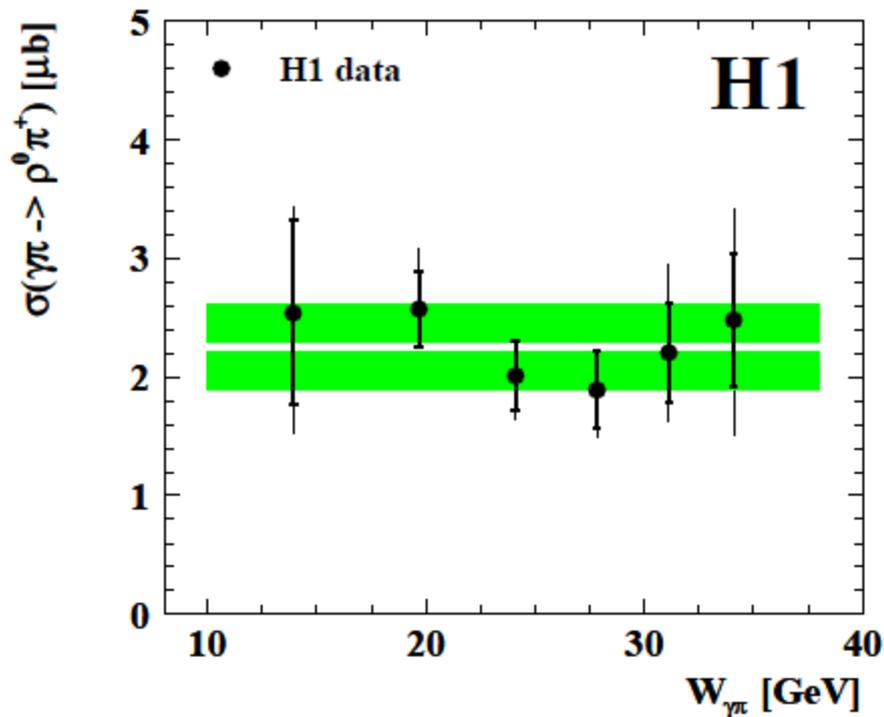
outer error bars –  $\sqrt{\text{exp}^2 + \text{model}^2}$



Holtmann flux is used for the central values.

Model uncertainty  $\sim 25\%$

## Photon-pion elastic cross section, $\sigma_{\gamma\pi \rightarrow \rho^0\pi}$



White line with green band represents the average value with full experimental uncertainty obtained using Holtmann flux ( $\Gamma_\pi = \int_{0.35}^{0.95} dx_L \int_0^{0.04} dp_t^2 f_{\pi/p} = 0.056$ ):  $\sigma_{\gamma\pi} = (2.25 \pm 0.34)\mu\text{b}$

## 4) HERMES (DESY, HERA)

---

Эксперимент HERMES - это эксперимент по изучению глубоко-неупругого рассеяния поляризованных позитронов (электронов) пучка на нуклонах поляризованной газовой мишени с целью извлечения спиновых структурных функций нуклона.

Осуществляется на накопительном кольце HERA в DESY.

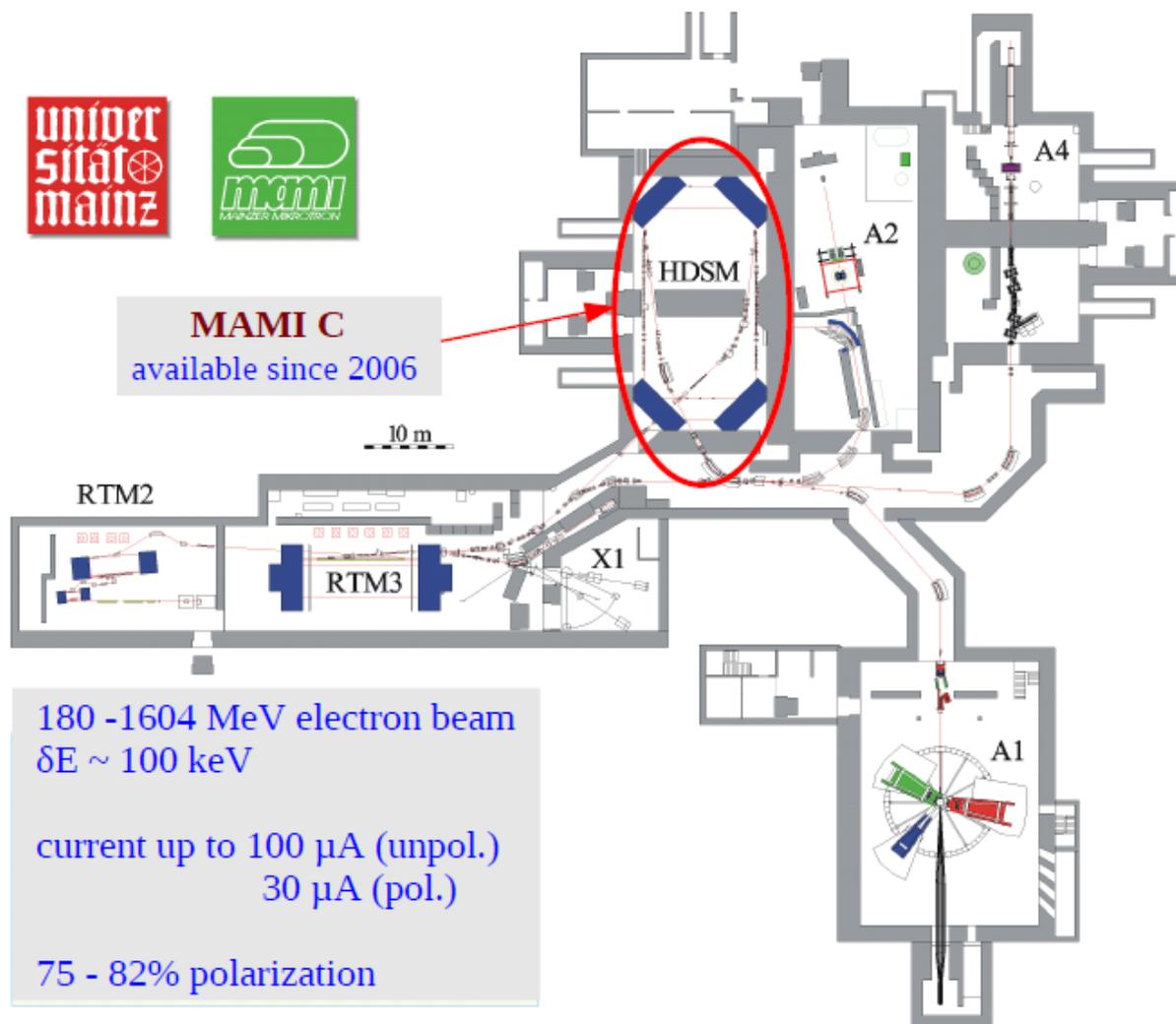
HERMES Collab. Spin density matrix elements in exclusive  $\omega$  electroproduction on  $^1\text{H}$  and  $^2\text{H}$  targets at 27.5 GeV beam energy. DESY-14-116. e-Print arXiv:1407.2119.

HERMES Collab. Transverse polarization of  $\Lambda$  hyperons from quasireal photoproduction on nuclei. Phys.Rev. D90 (2014) 072007.

HERMES Collab. Spin Density Matrix Elements in exclusive production of  $\omega$  mesons at Hermes. EPJ Web Conf . 66 (2014) 06012.

Участники коллаборации от ФИАН: В.А. Козлов, А.Р. Теркулов

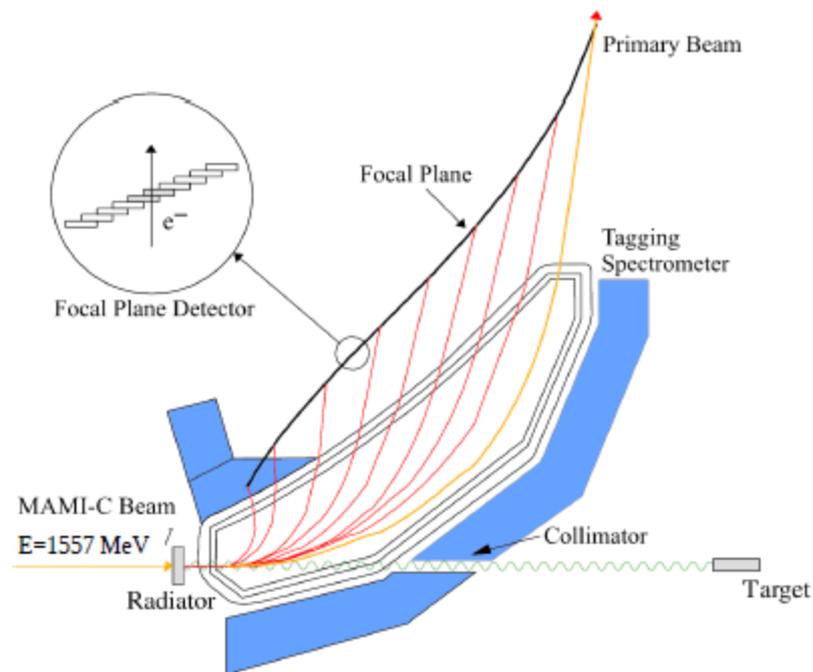
## 5) A2 (Mainz, MAMI)



Участники коллаборации A2 от ФИАН:

В.Л. Кашеваров, Л.В. Фильков, С.Н. Черепня, В.В. Полянский.

## *Experimental apparatus: photon beam*



### Tagged photon beam

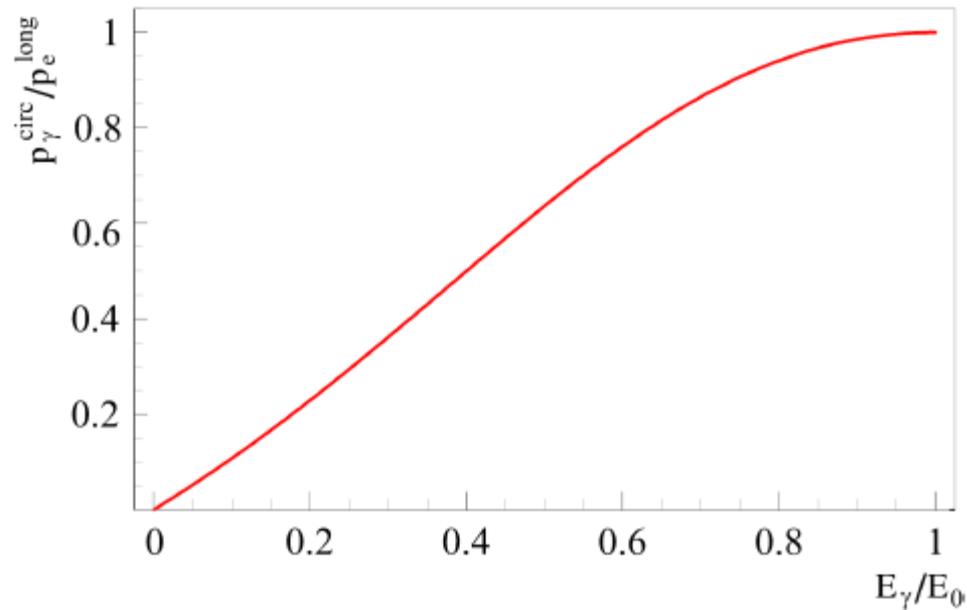
- unpolarized
- circular polarization
- linear polarization

### The Glasgow photon tagging spectrometer

352 channels  
2 – 5 MeV energy resolution

## *Experimental apparatus: photon beam*

Circularly polarized photon beam



Helicity transfer from the electron to the photon beam as function of the energy transfer. The MAMI electron beam polarization is ~80 %.

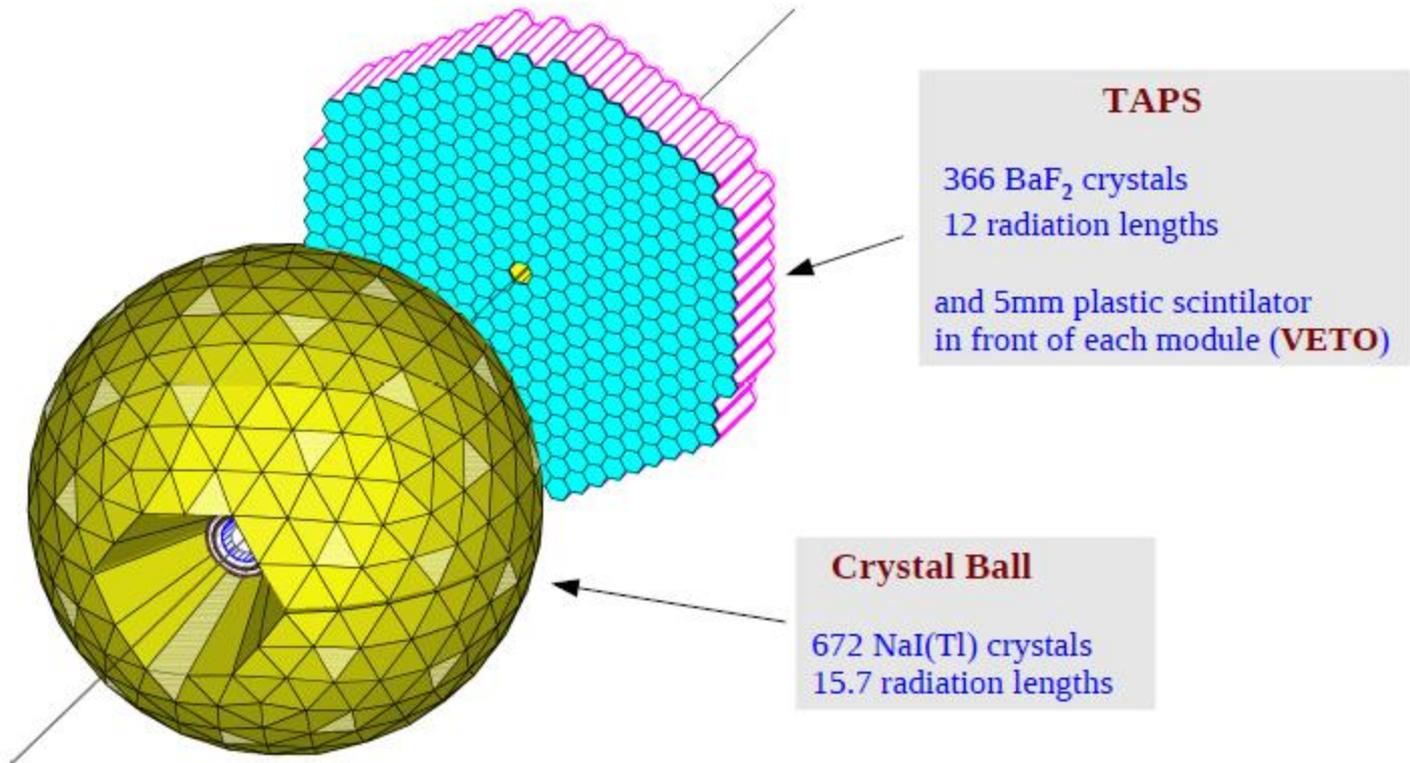
## *Experimental apparatus: detector system*

$4\pi$  photon spectrometer (97% of  $4\pi$ )  
Detection of neutrons and charged particles is also possible  
at restricted energy regions



Crystal Ball:  
 $20^\circ - 160^\circ$  (94%)  
and  
TAPS :  $1^\circ - 20^\circ$  (3%)

## Experimental apparatus: detector system



## *Experimental apparatus: target*



### **Frozen Spin Target**

available since 05.2010

Butanol or D-Butanol;

$^3\text{He}/^4\text{He}$  dilution refrigerator;

Superconducting holding magnet;

Longitudinal or transverse polarizations are possible;

Maximal polarization  
for protons  $\sim 90\%$ ,  
for deuterons  $\sim 75\%$ ;

Relaxation time  $\sim 2000$  hours

*International Conference  
Dark Matter, Hadron Physics and Fusion  
Physics  
Messina (Italy) - September 24-26, 2014*



*Experimental study of  $\gamma p \rightarrow n p$  reaction at MAMI*

V. L. Kashevarov for A2 Collaboration at MAMI



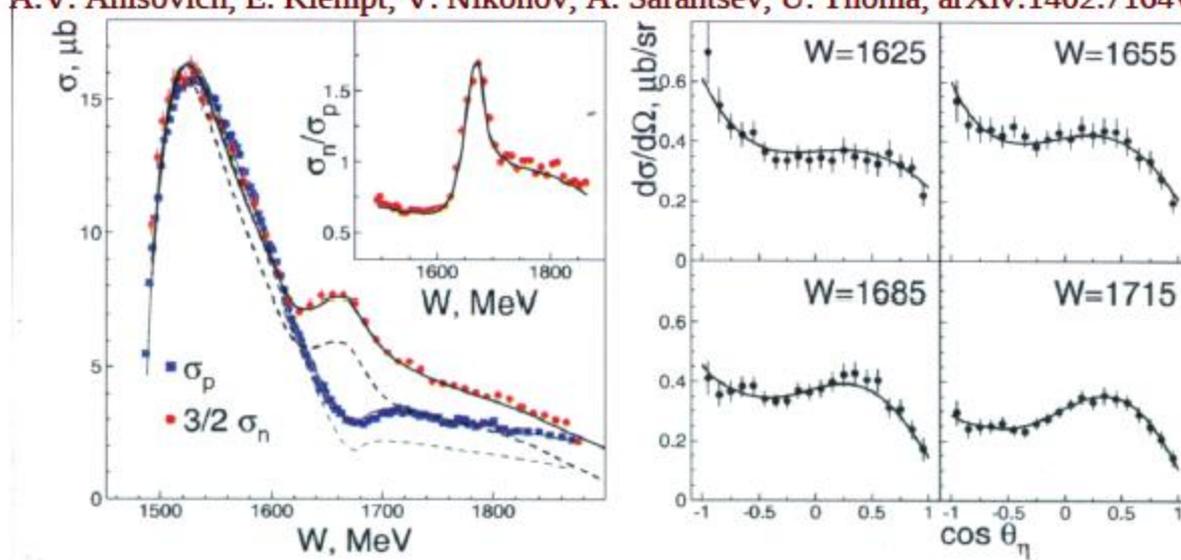
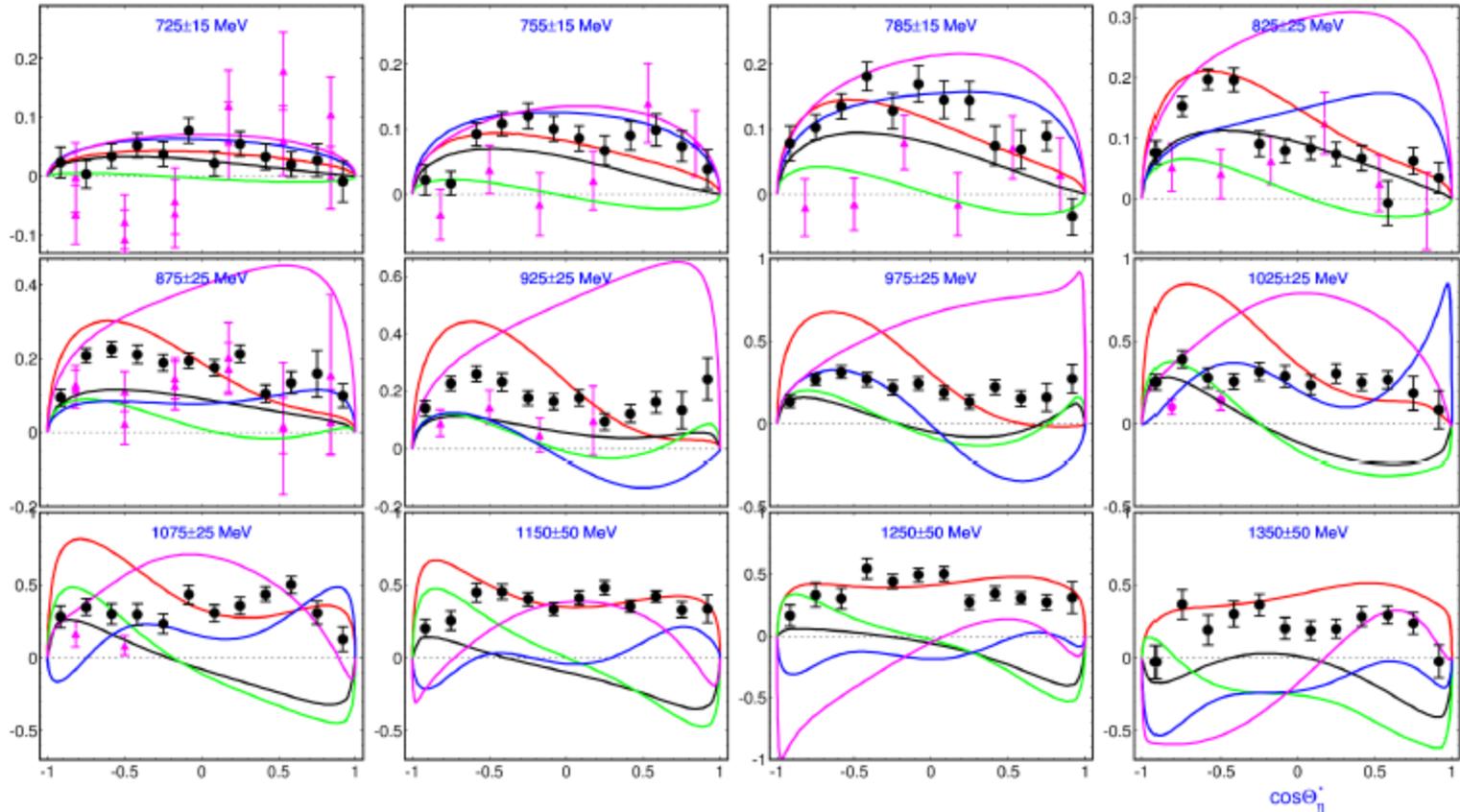


FIG. 1. (Color online) Left: The total cross section for  $\gamma n \rightarrow \eta n$  (multiplied by  $3/2$ ),  $\gamma p \rightarrow \eta p$ , and their ratio (as inset). The solid curves represent our fit folded with the experimental resolution (thick  $\eta n$ , thin  $\eta p$ ), the dashed curves the contributions from the  $S_{11}$  waves. Right: Selected differential cross section for  $\gamma n \rightarrow \eta n$  in the region of the narrow structure

The reason for the peak and dip structures lies in the opposite relative sign of the helicity amplitudes for  $S_{11}(1535)$  and  $S_{11}(1650)$ .

# $\gamma p \rightarrow \eta p$

# Target asymmetry $T$



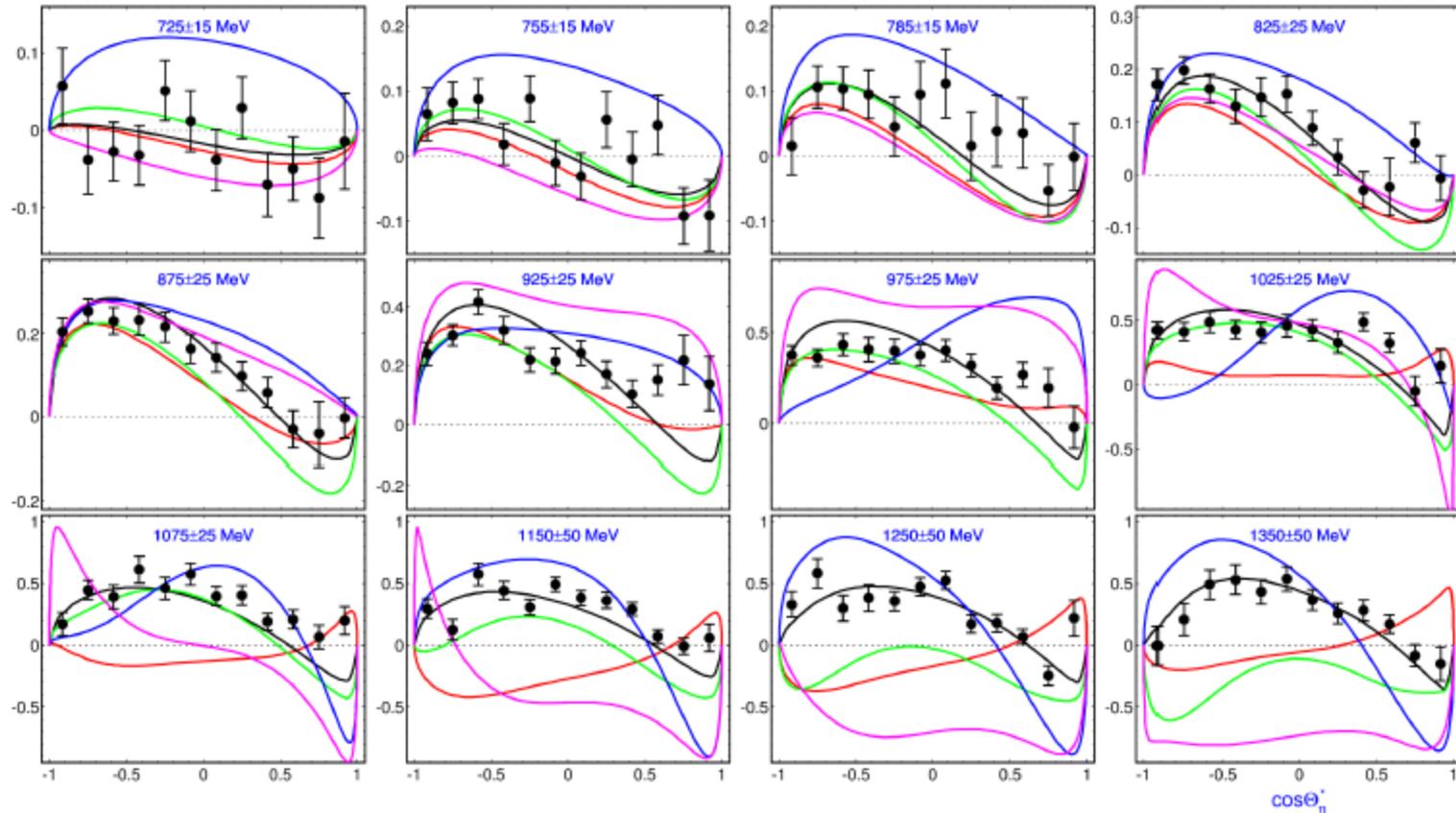
black circles – MAMI-2014  
(PRL 113, 102001, 2014)

magenta triangles: Bonn data  
(PRL 81, 534, 1998)

red line:  $\eta$ MAID-03 (NP A700, 429, 2002)  
 blue: SAID GE09 (PRC 82, 035208, 2010)  
 green: BG2011-02 (EPJA 47, 153, 2011)  
 black: Giessen Model (PRC 87, 015201, (2013))  
 magenta: Tryasuchev (EPJA 50, 120, 2014)

# $\gamma p \rightarrow \eta p$

## Beam-target asymmetry $F$



black circles – MAMI-2014  
(PRL 113, 102001, 2014)

magenta triangles: Bonn data  
(PRL 81, 534, 1998)

red line:  $\eta$ MAID-03 (NP A700, 429, 2002)  
blue: SAID GE09 (PRC 82, 035208, 2010)  
green: BG2011-02 (EPJA 47, 153, 2011)  
black: Giessen Model (PRC 87, 015201, (2013))  
magenta: Tryasuchev (EPJA 50, 120, 2014)

### Studies of eta-mesic nuclei at the LPI electron synchrotron

---

**V.A. Baskov, A.V. Koltsov, A.I. L'vov, A.I. Lebedev, L.N. Pavlyuchenko,  
V.V. Polyanskiy\*, E.V. Rzhанov, S.S. Sidorin, G.A. Sokol**

*P.N. Lebedev Physical Institute, Leninsky prospect 53, Moscow 119991, Russia*

*Email: poly@pluton.lpi.troitsk.ru*

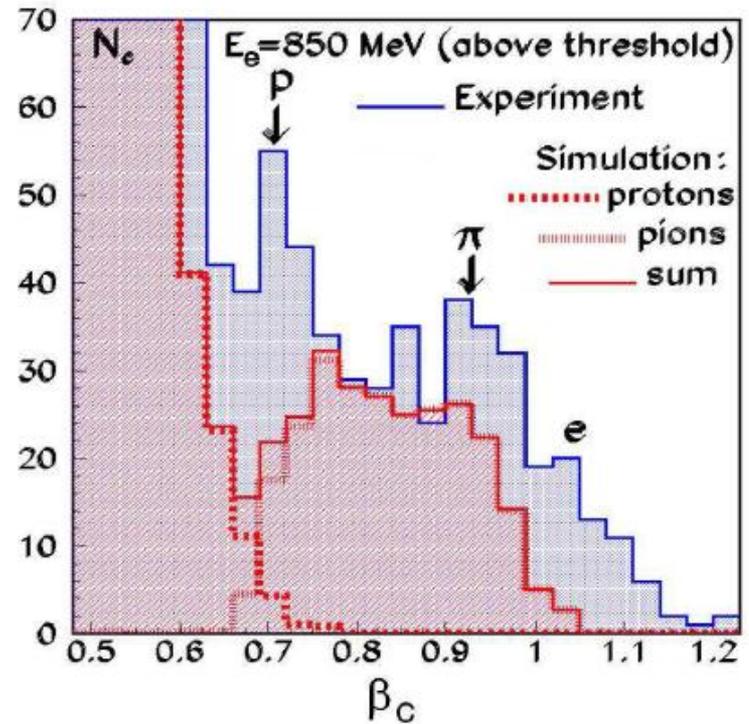
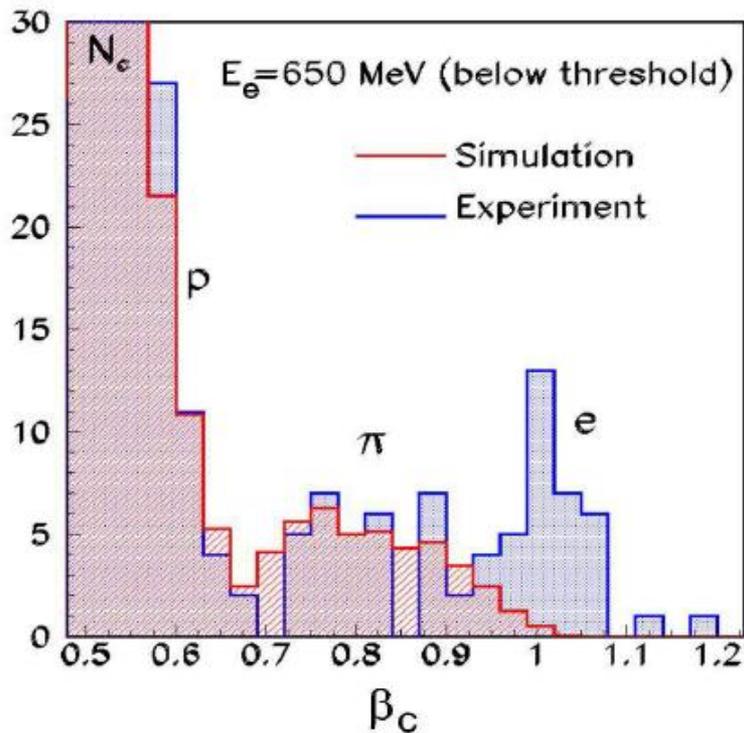
**S.V. Afanasiev, A.I. Malakhov**

*Joint Institute for Nuclear Research, Joliot-Curie 6, Dubna 141980, Moscow region, Russia*

**A.S. Ignatov, V.G. Nedorezov**

*Institute for Nuclear Research, 60-letiya Oktyabrya prospekt 7a, Moscow 117312, Russia*

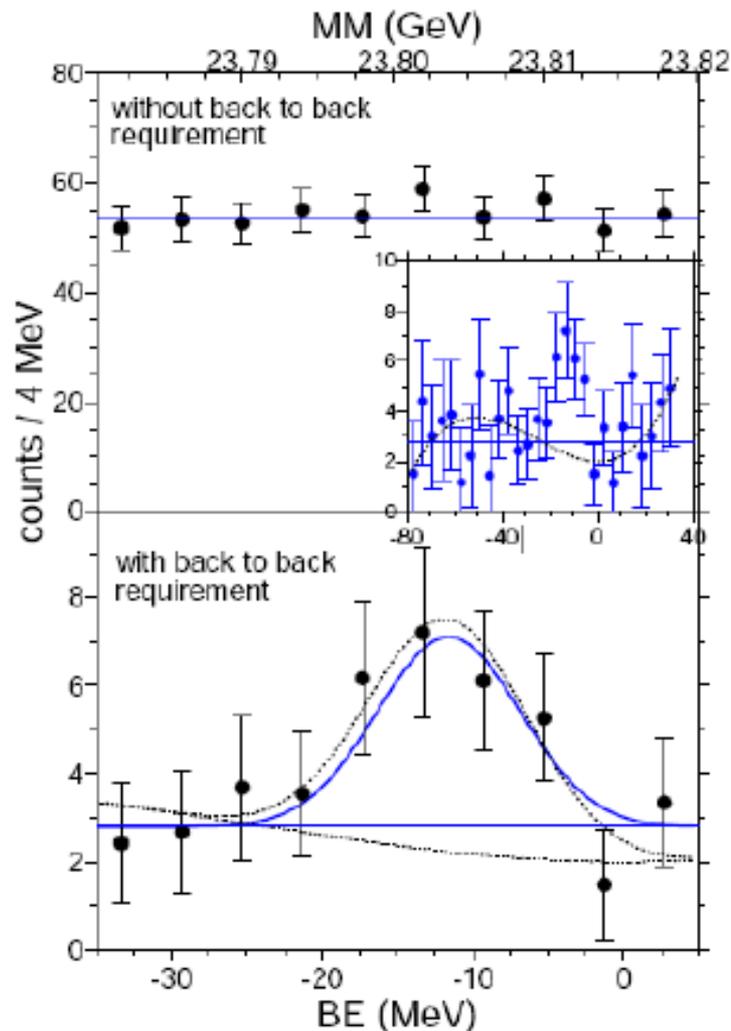




**Figure 13:** Velocity distribution of charged particles selected according to the criterion  $\Delta E_i > 0$  (for all  $i = 1, 2, 3$ ) at  $E_e = 650$  and  $850 \text{ MeV}$ . A well visible excess of events over the INC simulation is seen at the right panel — in the case of the beam energy exceeding the  $\eta$ -photoproduction threshold — in both velocity regions corresponding to the expected velocities of the  $\pi N$  and  $NN$  decay products of  $\eta$ -mesic nuclei.

# Search for the $\eta$ -mesic nuclei in a recoil-free transfer reaction COSY-GEM Collaboration

The other one is a bit more recent measurement from COSY on the  $p + {}^{27}\text{Al} \rightarrow {}^3\text{He} + X$  reaction in a recoil free kinematic setup, where one observes in coincidence with  ${}^3\text{He}$ , the decay of a possible bound  $\eta$ - ${}^{25}\text{Mg}$  state, again, through the  $S_{11}$  resonance.

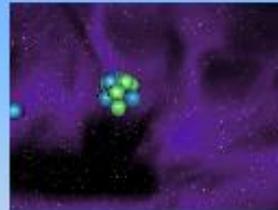
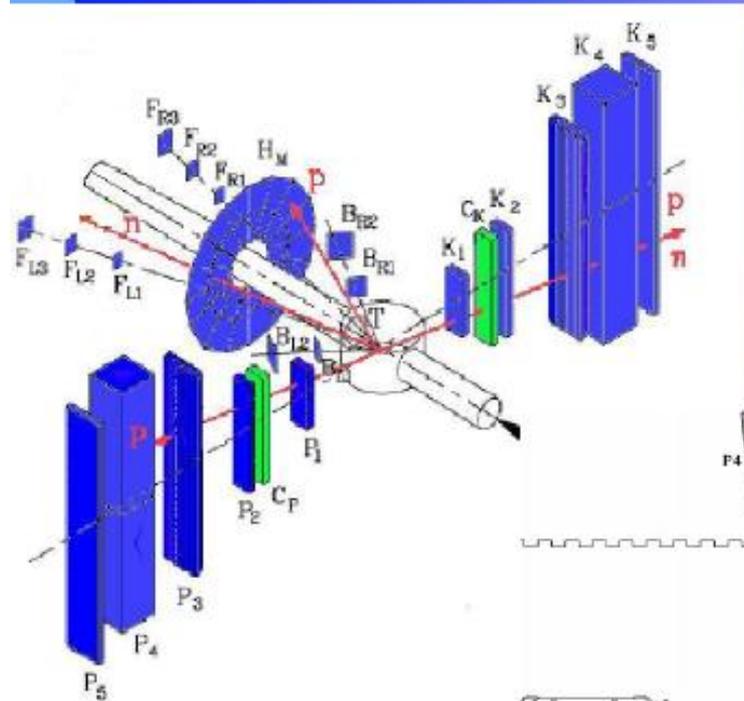


$\eta$ - ${}^{25}\text{Mg}$



A. Budzanowski et al., Phys. Rev. C 79 (2009)

# Experiment at Nuclotron



## Experimental setup

### K-arm

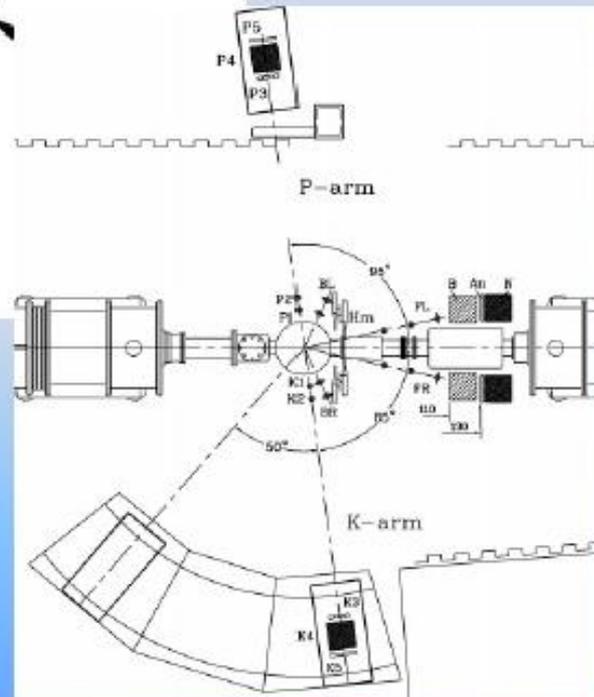
- K1 - Start counter*
- K2 - Trigger & Cherenkov counters*
- K3 - TOF - wall*
- K4 - E-counter*
- K5 - Veto counter*

### P-arm

- P1 - Start counter*
- P2 - Trigger & Cherenkov counters*
- P3 - TOF - wall*
- P4 - E-counter*
- P5 - Veto counter*

- Hm - Ring counter*
- N - Neutron detector*
- An - Neutron-Veto*

*FL,FR,BL,BR - Monitors*



$$S_{11} \rightarrow \pi p$$

$$\Theta_{\pi p} = 180^\circ \pm 10^\circ$$

$$T_p \approx 110 \pm 10 \text{ MeV}$$

$$T_\pi \approx 350 \pm 30 \text{ MeV}$$

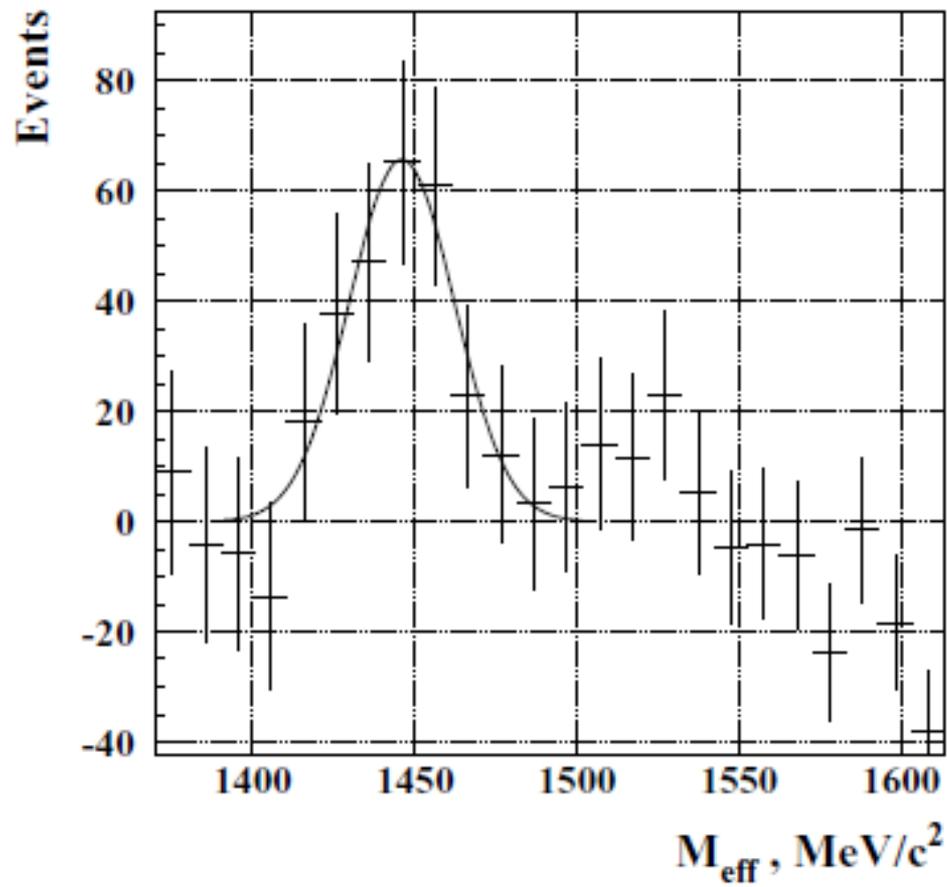


Figure 2: The effective mass of correlated  $\pi p$  pairs after background subtraction for  $T_d = 2.1$  GeV/nucleon.



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

**ScienceDirect**

Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 245 (2013) 173–176

---

---

**NUCLEAR PHYSICS B  
PROCEEDINGS  
SUPPLEMENTS**

---

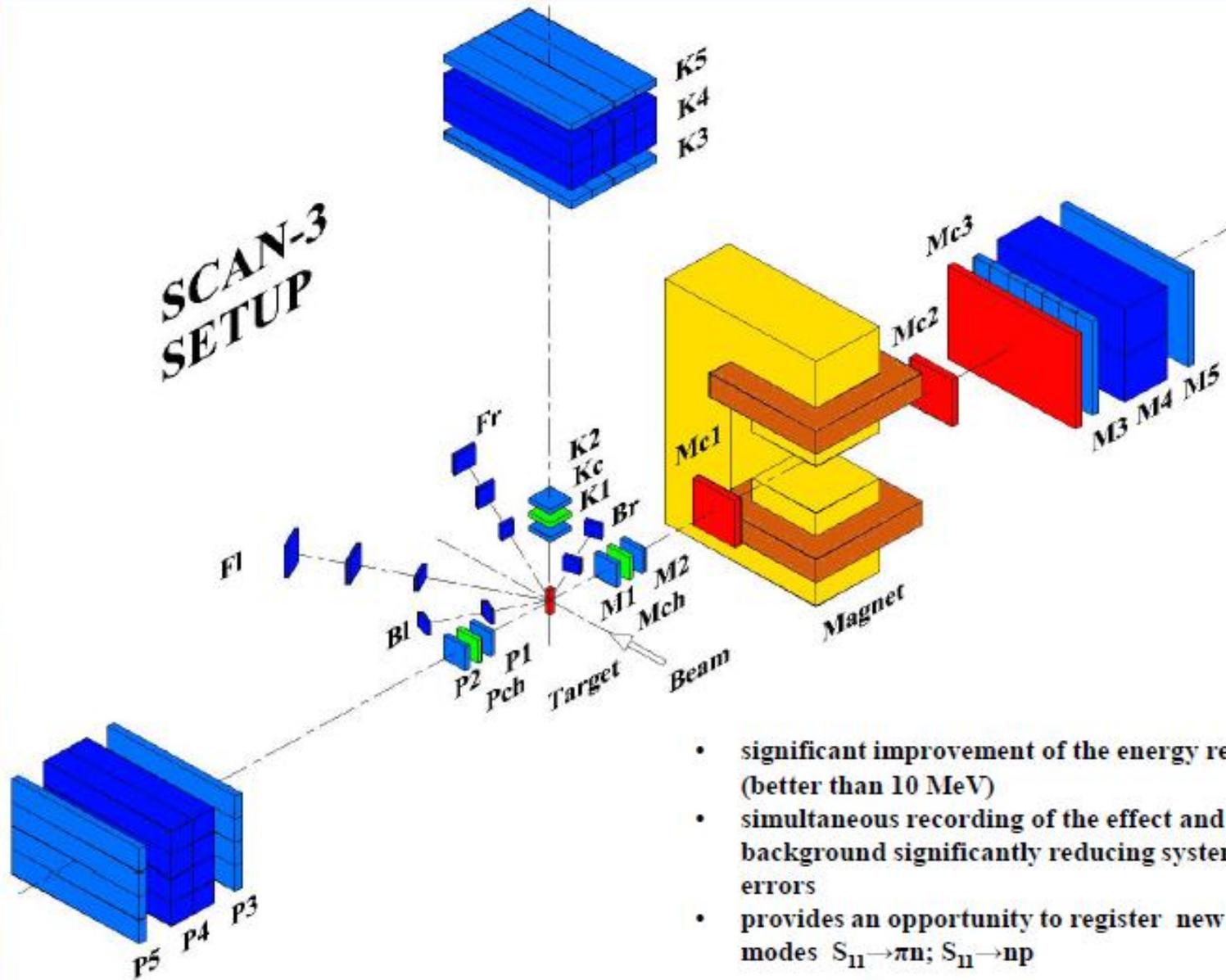
---

[www.elsevier.com/locate/nbps](http://www.elsevier.com/locate/nbps)

## NEW STATUS OF THE PROJECT ” $\eta$ -NUCLEI” AT THE NUCLOTRON

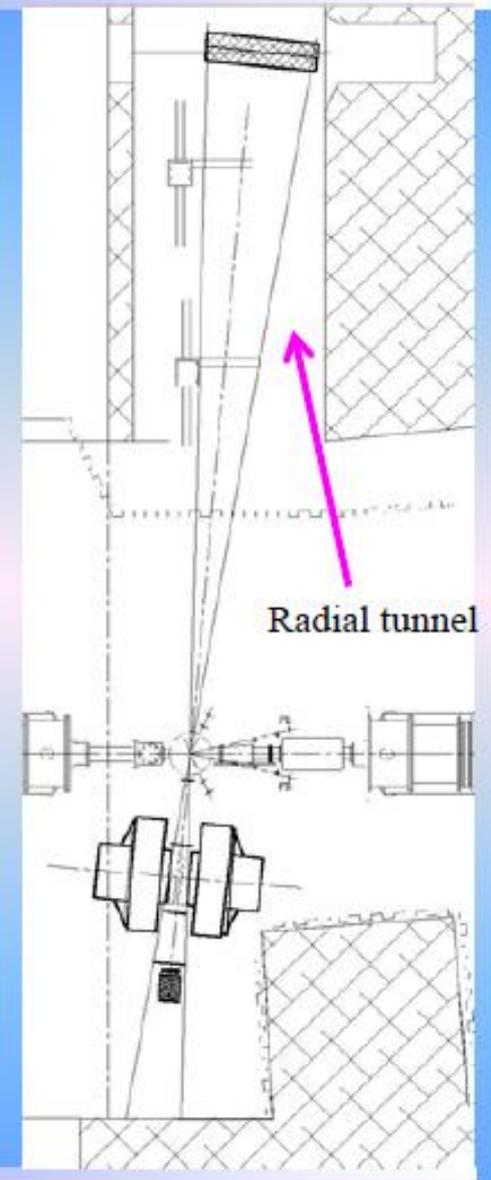
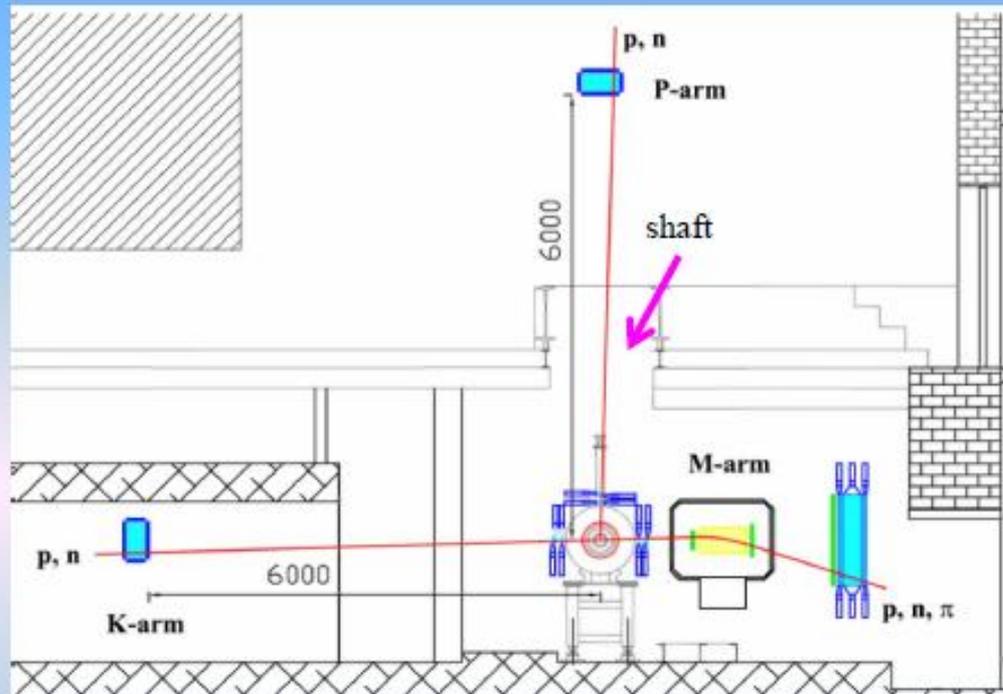
S.V. Afanasiev<sup>a</sup>, R.N. Bekmirzaev<sup>f</sup>, V.A. Baskov<sup>b</sup>, I. Cruceru<sup>c</sup>, F. Constantin<sup>c</sup>, M. Cruceru<sup>c</sup>, L. Ciolacu<sup>c</sup>, A. Dirner<sup>e</sup>, D.K. Dryablov<sup>a</sup>, B.V. Dubinchik<sup>a</sup>, R.M. Ibadov<sup>g</sup>, Z.A. Igamkulov<sup>a</sup>, V.I. Ivanov<sup>a</sup>, A. Yu. Isupov<sup>a</sup>, D.M. Jomurodov<sup>f</sup>, A. Kravčáková<sup>e</sup>, S.N. Kuznecov<sup>a</sup>, A.I. Malakhov<sup>a</sup>, V. Matoušek<sup>d</sup>, G. Niolescu<sup>c</sup>, A.I. Lebedev<sup>b</sup>, A.I. L’vov<sup>b</sup>, L.N. Pavlyuchenko<sup>b</sup>, E.B. Plekhanov<sup>a</sup>, V.V. Polyansky<sup>b</sup>, E.B. Rzhhanov<sup>b</sup>, S.S. Sidorin<sup>b</sup>, V.A. Smirnov<sup>a</sup>, G.A. Sokol<sup>b</sup>, M. Špavorová<sup>e</sup>, M.U. Sultanov<sup>g</sup>, I. Turzo<sup>d</sup>, S. Vokál<sup>e</sup>, J. Vrláková<sup>e</sup>

# SCAN-3 SETUP

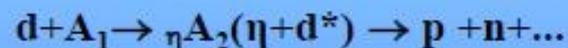
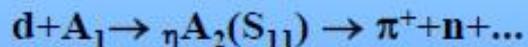


- significant improvement of the energy resolution (better than 10 MeV)
- simultaneous recording of the effect and background significantly reducing systematic errors
- provides an opportunity to register new decay modes  $S_{11} \rightarrow \pi n$ ;  $S_{11} \rightarrow n p$

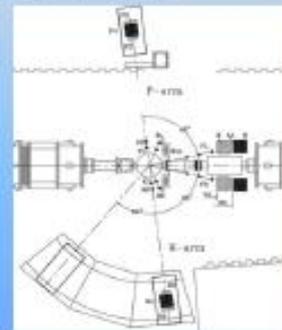
# New proposal for $\eta$ -nuclear study on nuclotron.



$$\delta E = \delta(E_\pi + E_N) < 10 \text{ M}\epsilon\text{B.}$$



$$\eta + d \leftrightarrow p + n$$







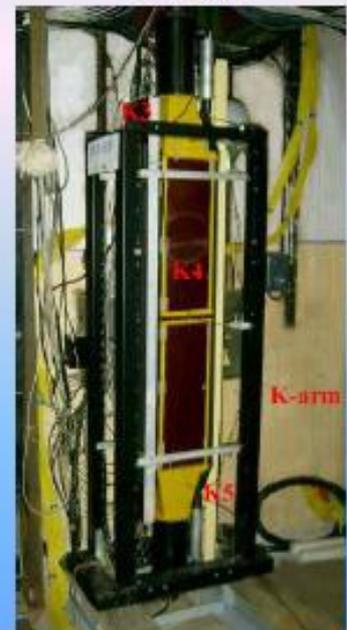
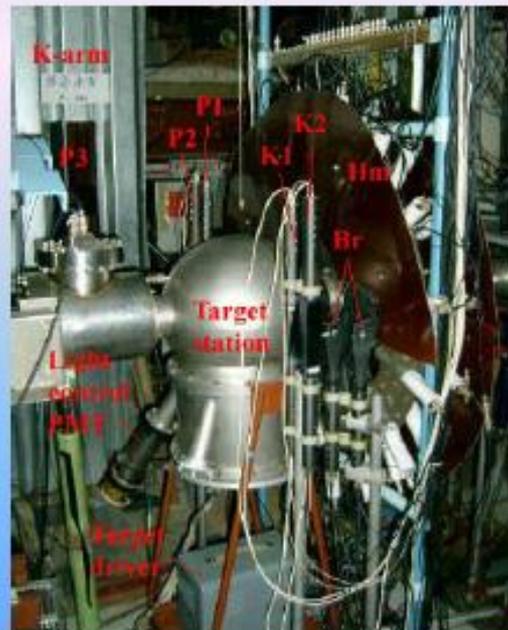
# Existing set of detectors of the SCAN spectrometer



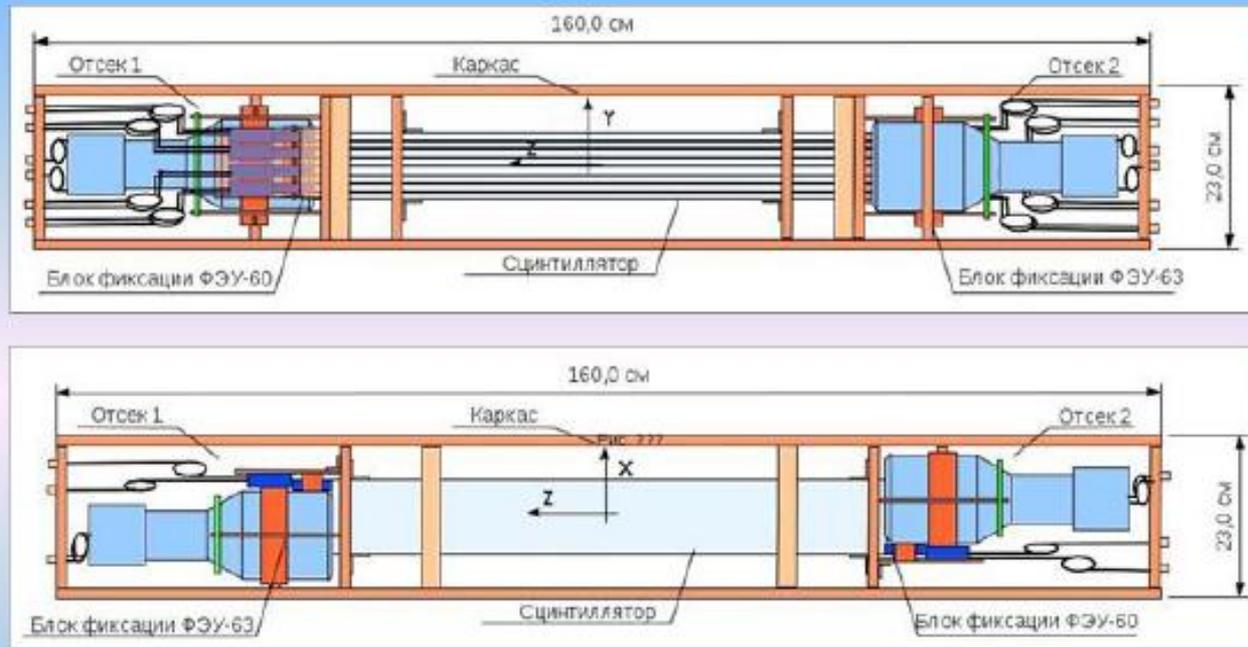
P-arm



K-arm



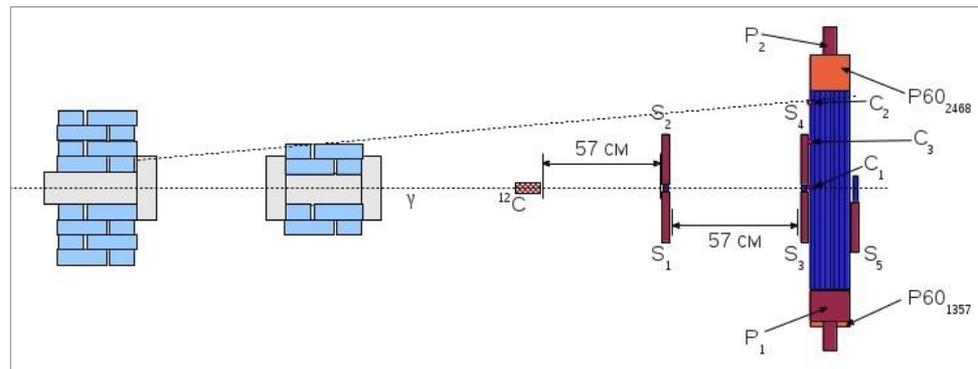
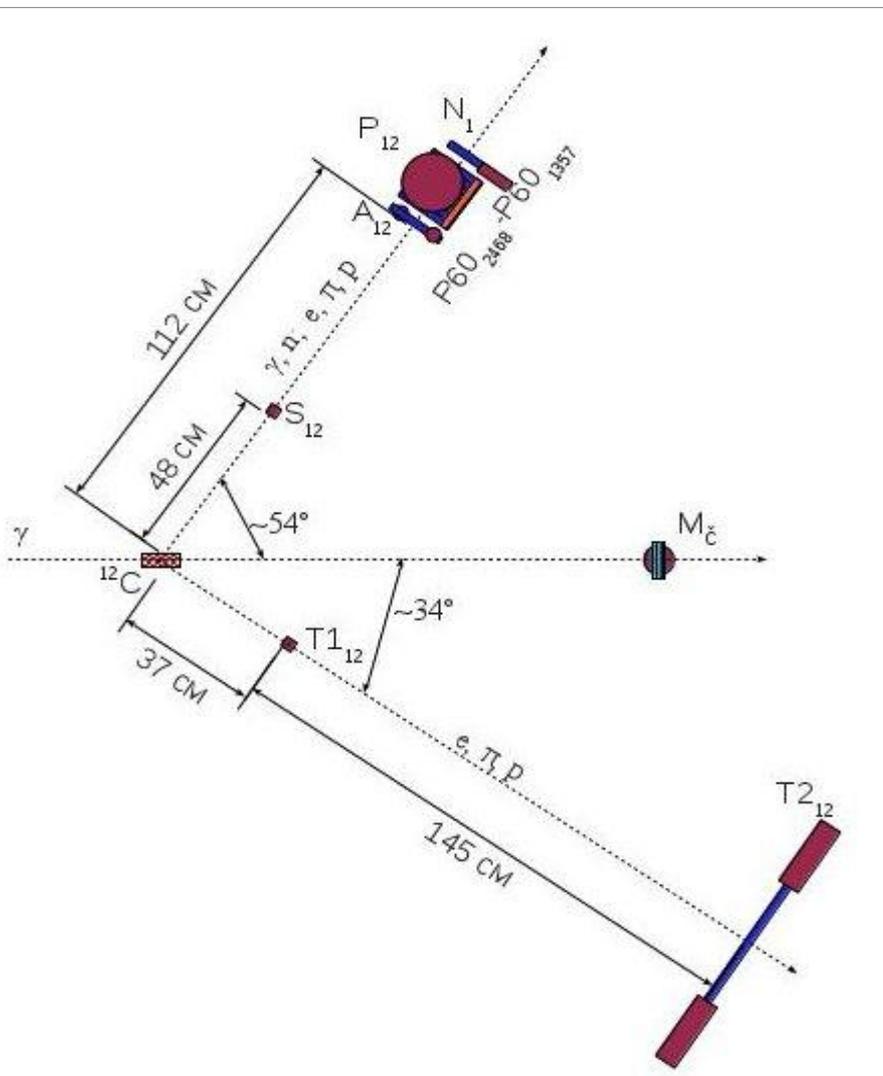
## R&D for neutron counter

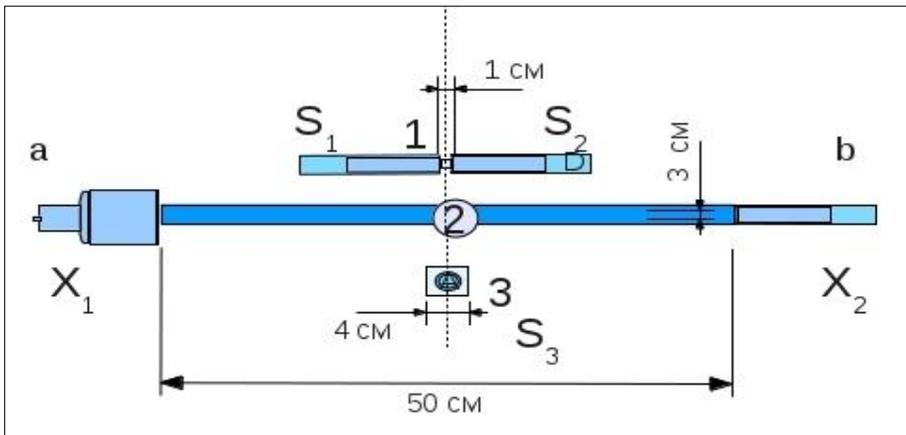


Preliminary data gave a time resolution is better then 200 ps for neutron detection.

# Схема установки для исследований ПНД (прототипа нейтронного детектора) на $\gamma$ -пучке ускорителя ПАХРА:

а – общий вид установки; б - вид сбоку.





**Схема установки для исследований ПНД на космических мюонах.**

Временное разрешение при использовании ФЭУ-63 и отражающей поверхности из белой бумаги оказалось наилучшим и составило  $\delta t$  (FWHM)  $\approx 570$  псек при временном разрешении триггерной системы  $\delta t$  (FWHM)  $\approx 200$  псек.

В дальнейшем, при использовании более “быстрых” ФЭУ-9814В и той же отражающей поверхности из белой бумаги временное разрешение составило  $\delta t$  (FWHM)  $\approx 180$  псек.

## 7) Фрагментация релятивистских ядер

---

(слайды В.Н.Фетисова)

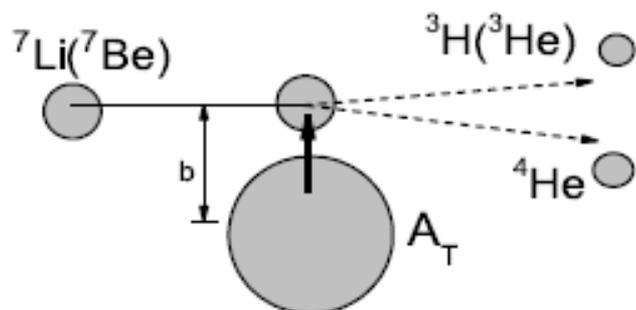
Изучение ядерного и  
кулоновского взаимодействия в  
процессе когерентной  
диссоциации изодублета  
релятивистских ядер  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$   
по каналам  ${}^3\text{H}({}^3\text{He})+{}^4\text{He}$

Ю.А. Александров, Н.Г. Пересадько, С.П. Харламов,  
В.Н. Фетисов, С.Г. Герасимов, В.А. Дронов, А.В.  
Писецкая, Л.Н. Шестеркина

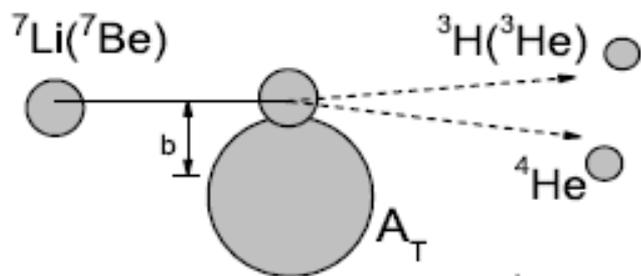
Н. Г. Пересадько, Ю.А. Александров, С.Г. Герасимов,  
В.А. Дронов, А.В. Писецкая, В.Н. Фетисов, С.П. Харламов,  
Л.Н.Шестеркина

${}^7\text{Li}$ (3А ГэВ/с),  ${}^7\text{Be}$ (1.6А ГэВ/с)

### Электромагнитная диссоциация



### Ядерное расщепление



$A_T$  фотозумльсия  
протон, ядра (C, N, O), (Br, Ag)  
2.97                      2.85                      2.03  $\cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$

**Эксперимент** (с помощью микроскопа) включал поиск и идентификацию (без разрушения ядра-мишени) только двух релятивистских фрагментов (масса, заряд), измерения их углов вылета и определение переданного фрагментам поперечного импульса  $Q$ , а также измерения длины свободного пробега ядра-снаряда для определения сечений. Реакции на протонной мишени идентифицировались по протонам отдачи.

**Теоретический анализ** данных включал расчеты ядерных волновых функций в двухтелной модели, вычисления сечений кулоновской диссоциации в формализме Бертулани–Баура, а также профильных функций, определяющих ядерные дифракционные сечения в теории Ахиезера–Глаубера–Ситенко.

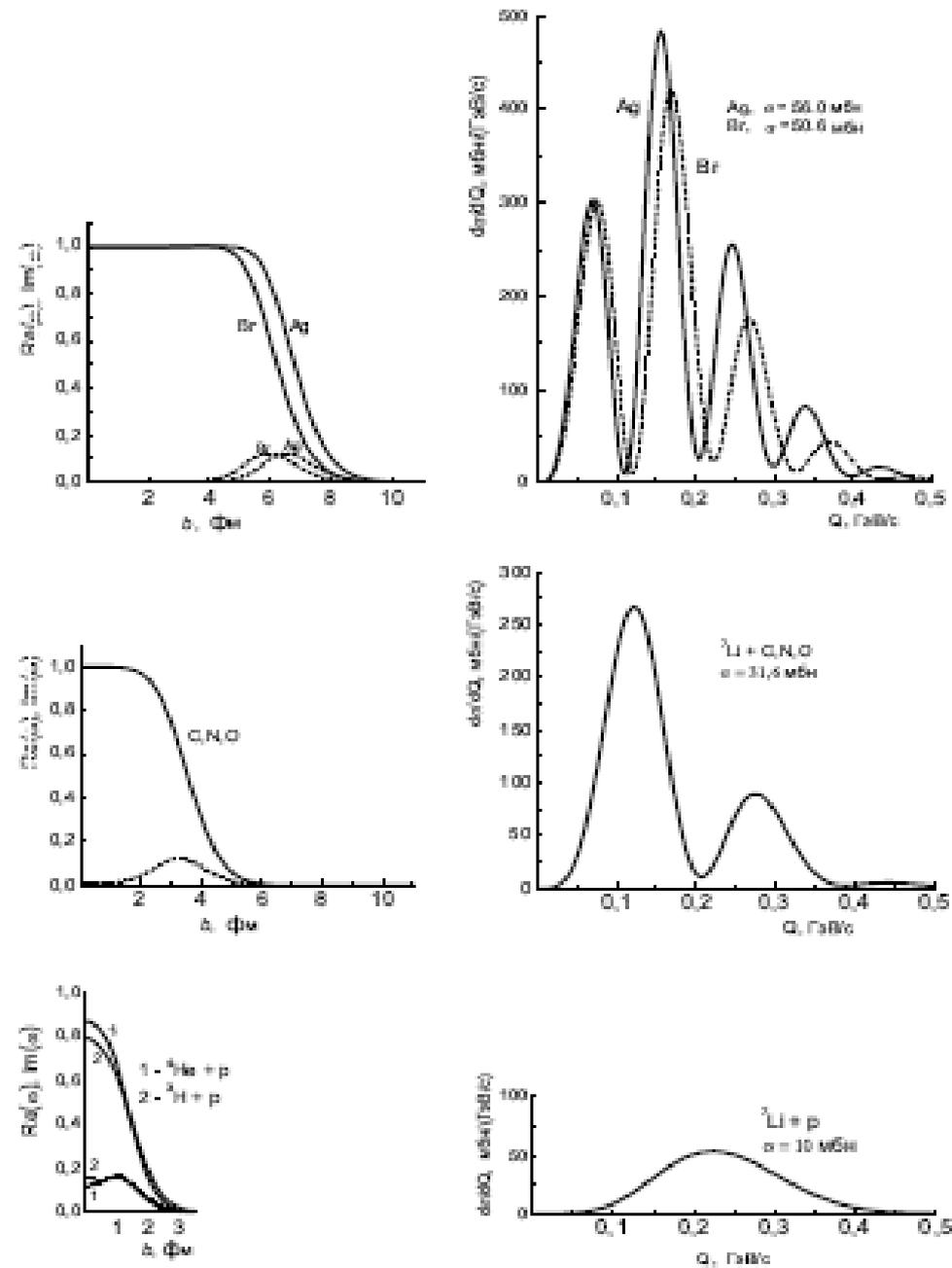


Рис.2. Зависимость ядерных дифракционных сечений фрагментации от протяженности (по прицельному параметру  $b$ ) профильных функций, примерно равной сумме радиусов внутриядерного кластера  $R_C$  и ядра-мишени  $R_T$ . Видно, что сечения реакций на сложных ядрах (AgBr, CNO) имеют форму нескольких осцилляций, сдвигающихся в сторону больших значений  $Q$  и затухающих с уменьшением радиуса мишени  $R_T$ . На точечной протонной мишени ( $R_T=0$ ) осцилляции вырождаются в один максимум, сдвинутый в область больших  $Q$ . Предсказываемые сечения неупругого процесса резко отличаются от привычной формы дифракционного сечения упругого рассеяния, характеризующегося главным максимумом, накрывающим резерфордский пик в области малых значений  $Q$ , и на порядки более слабыми осцилляциями при больших  $Q$ .

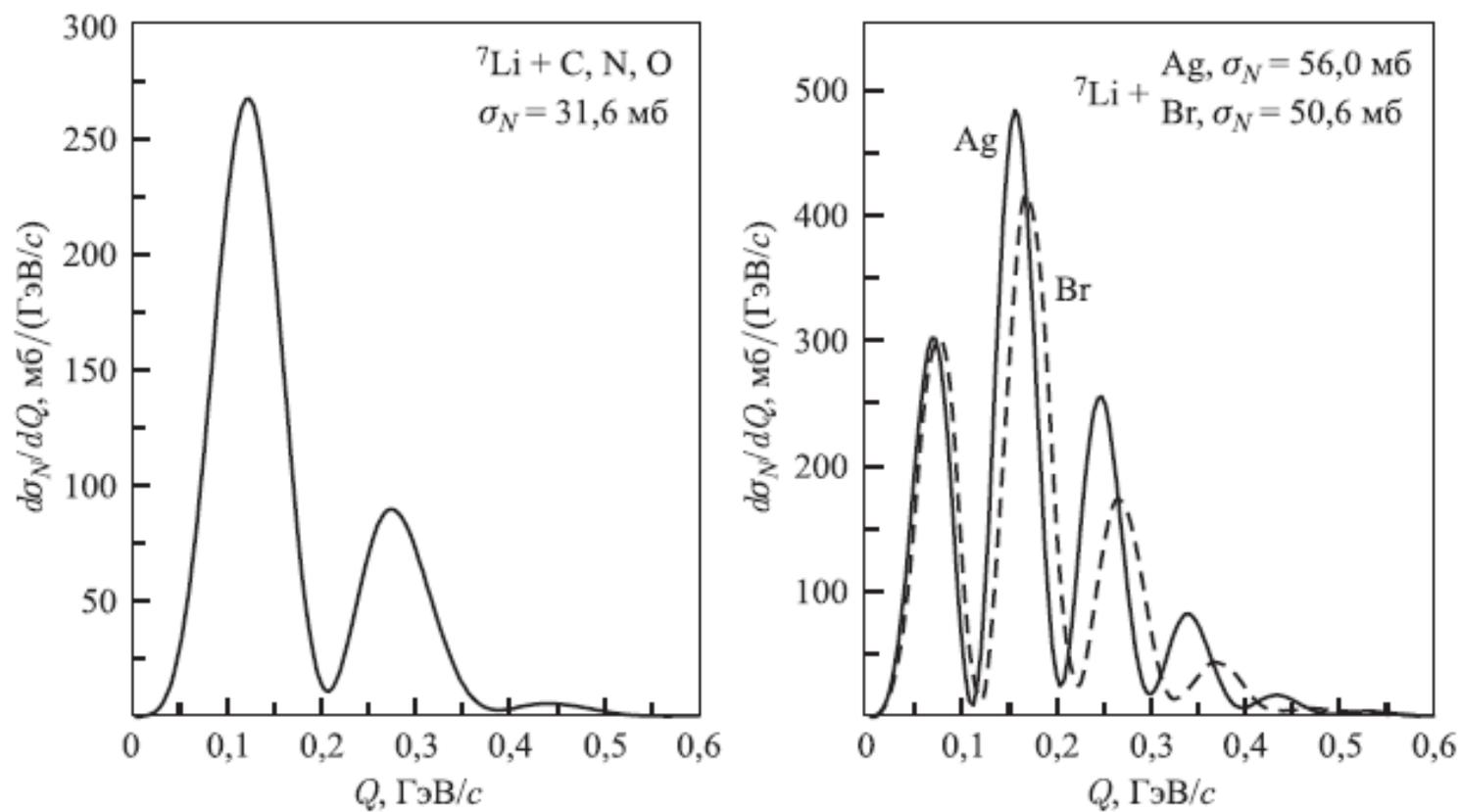


Рис. 6. Дифракционные сечения, вычисленные с реалистическими распределениями плотностей кластера и ядра-мишени

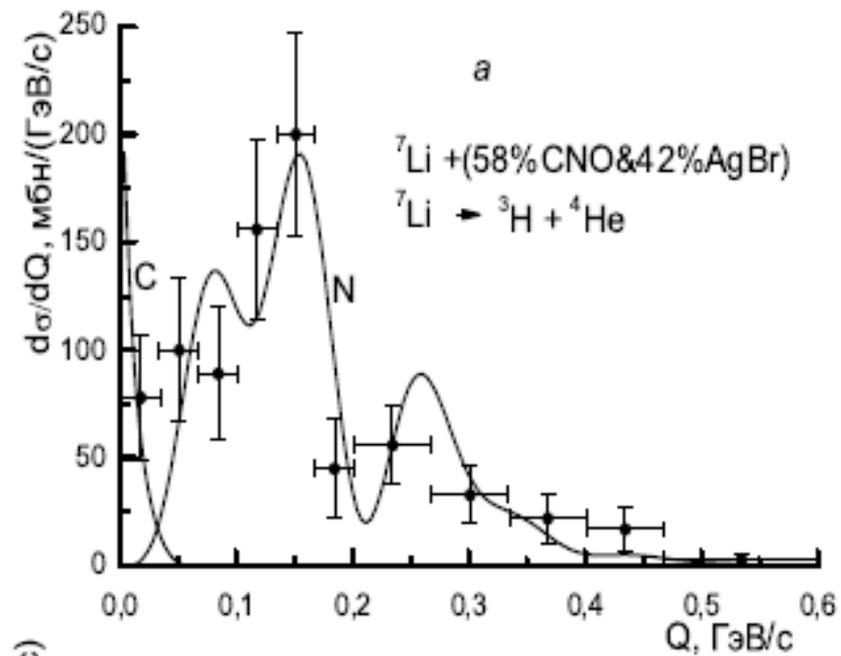


Рис.3(а) Экспериментальные данные и теоретические кривые сечений фрагментации  ${}^7\text{Li}$  на группах ядер фотоэмульсии (C,N,O) и (Br,Ag); С – сечение кулоновской диссоциации, N – сечение ядерной дифракционной фрагментации (суперпозиция осцилляций двух групп дифракционных сечений на легких и тяжелых ядрах эмульсии, показанных на Рис.2).

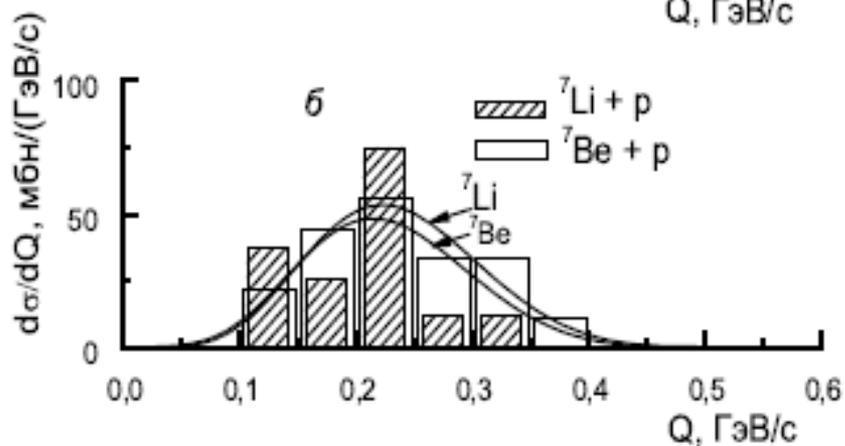


Рис.3(б) Экспериментальные данные и теоретические кривые сечений фрагментации ядер  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$  на протонах.

Выводы.

1. Анализ данных в рамках двухкластерной модели ядер  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$ , показывает, что преобладающим является ядерный дифракционный механизм рассмотренных реакций.

2. Ядерный механизм позволяет одновременно объяснить как наметившиеся нерегулярности в дифференциальном сечении в реакциях на сложных ядрах эмульсии (наложением осцилляций), так и причины формирования и величину сдвига наблюдаемого максимума в реакциях на протоне.

3. Вклад кулоновского механизма диссоциации (порядка 10%) обособлен и сосредоточен в области очень малых  $Q$  (менее 0.05 ГэВ/с).

4. Приемлемое описание абсолютных значений всех наблюдаемых сечений получено с вероятностью двухкластерной структуры в ядрах  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$  порядка 0.7. Планируется выполнение аналогичных исследований фрагментации релятивистских ядер  ${}^6\text{Li}$  и  ${}^3\text{He}$  по каналам  $D+{}^4\text{He}$  и  $p+D$ .

Публикации (2014 – 2015):

1. В.Н. Фетисов, Письма в ЭЧАЯ, 11, No. 1 (185), 66 (2014).

2. Ю.А. Александров, Н.Г. Пересадыко и др., ЯФ 78, (2015).

3. В.Н. Фетисов, ЯФ 78, (2015);

## 8) Электромагнитные ливни в кристаллах

(слайды В.А.Баскова)

### Установка

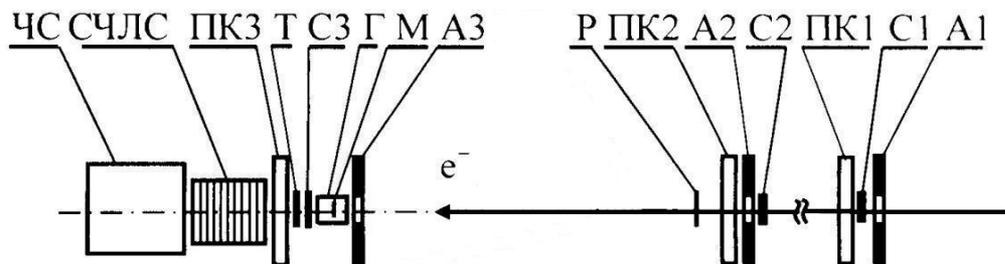


Рис. 4 Экспериментальная установка "Каскад".

$A1 - A3$  и  $C1 - C3$  – сцинтилляционные счетчики формировали триггер;  
 $ПК1 - ПК3$  – пучковые пропорциональные камеры определяли координаты входа каждого электрона в кристалл;  
 $P$  – радиатор системы мечения;  
 $ММ$  – магнит системы мечения фотонов;  
 $Г$  – гониометр;  
 $М$  – кристаллическая конвертор;  
 $Т$  – сцинтилляционный счетчик регистрации заряженных частиц ливня;  
 $СЧЛС$  – составной черенковский ливневый спектрометр;  
 $ЧС$  – черенковский спектрометр;  
 $МСППС$  – многоканальный свинцово-сцинтилляционный спектрометр полного поглощения на сместителях спектра.

Триггер:  $(C1 \times A1) \times (C2 \times A2) \times (C3 \times A3)$

Кристаллы вольфрама ( $X_0 = 3.5$  мм): 0.07, 0.3, 1.0, 2.7, 5.8, 8.4 мм

Ось ориентации:  $\langle 111 \rangle$

Угол разориентации  $\Theta$ :  $20 \div 30$  мрад

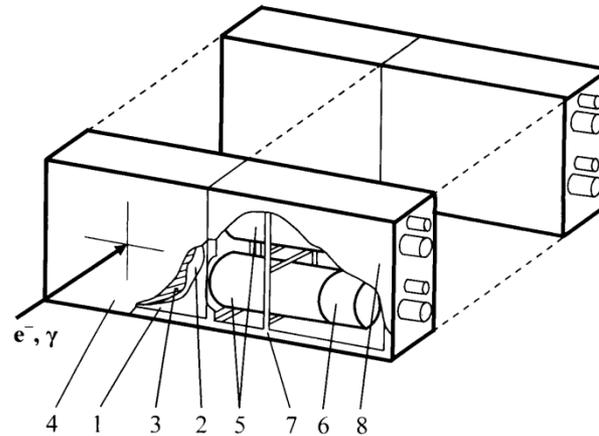
Энергии электронов  $E$ : 26, 28, 31 ГэВ

Спектрометр:

Составной черенковский ливневый спектрометр (СЧЛС) (10 каналов по  $1X_0$ )

Черенковский спектрометр (ЧС) ( $15X_0$ )

# Установка



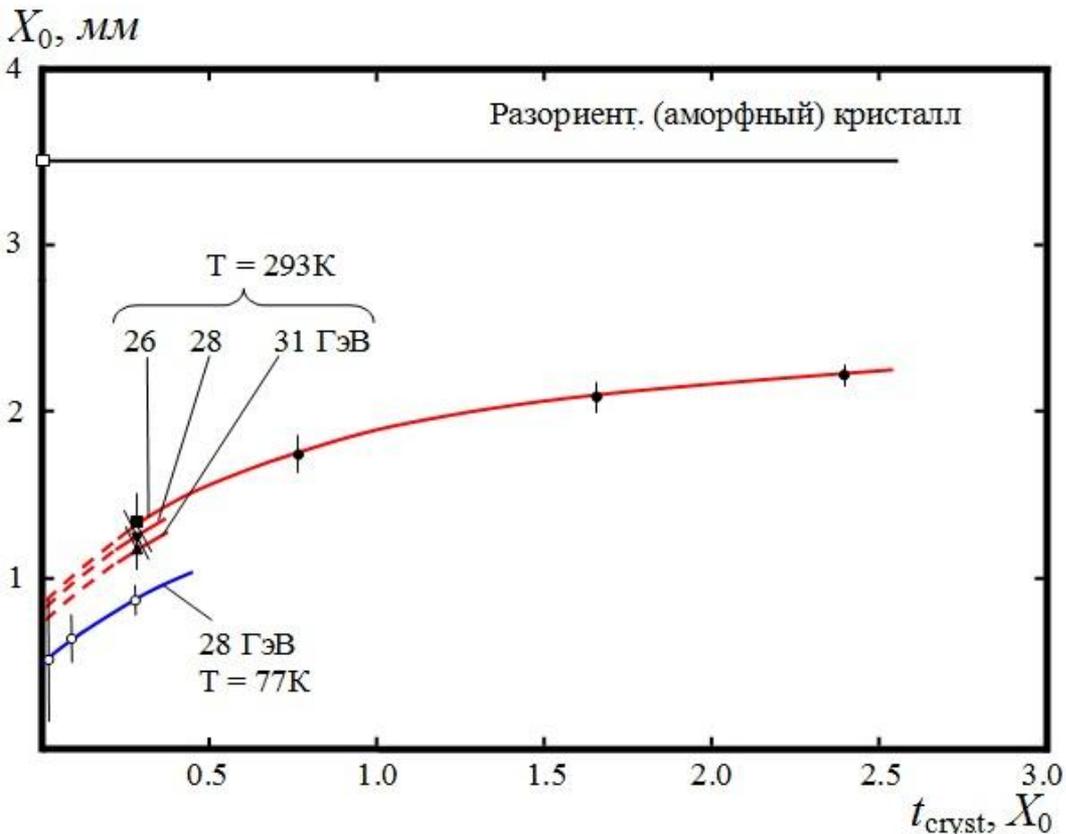
**Рис. 5** Составной черенковский ливневой спектрометр (СЧЛС).

1 – радиатор (свинцовое стекло *ТФ-1*); 2 – алюминированный майлар;  
3 – черная светонепроницаемая бумага; 4 – черная изоляционная лента;  
5 – *ФЭУ-85*; 6 – делитель; 7 – крепления радиатора, ФЭУ и делителей;  
8 – корпус.

Отклик спектрометра, регистрирующего *аномальные* электромагнитные ливни, возникающие при взаимодействии электронов высоких энергий с ориентированным кристаллом перед спектрометром, отличается от отклика спектрометра, регистрирующего *стандартные* ливни.

Отличие распространяются практически на все параметры развития ливня.

## Радиационная длина



$$X'_0 = X_0 \cdot (t_{\text{раз}} / t_{\text{оп}})$$

$t_{\text{раз}}$  – толщина разориентированного кристалла;

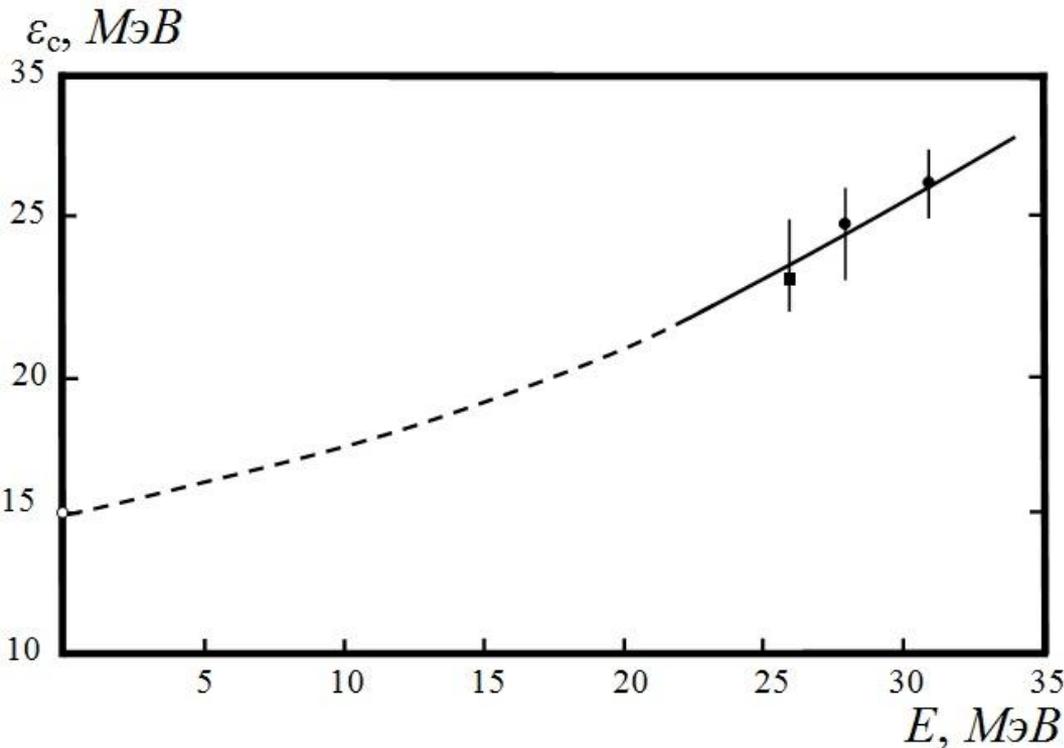
$t_{\text{оп}}$  – эффективная толщина ориентированного кристалла

( $t_{\text{оп}} = t_{\text{раз}} + \Delta t$ ,  $\Delta t = t_{\text{max p}} - t_{\text{max o}}$  – приращение толщины кристалла при ориентации кристалла)

**Рис. 17** Зависимость радиационной длины  $X'_0$  ориентированных вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  кристаллов вольфрама от толщины разориентированных кристаллов  $t_{\text{cryst}}$ .

Обнаружено, что  $\varepsilon'_c$  - критическая энергия, определяющая начало затухания ливня в спектрометре, при развитии аномального ливня, в отличие от постоянной величины  $\varepsilon_c$ , при развитии стандартного ливня, зависит не только от вещества, но и от энергии электронов, ориентации, температуры и толщины кристалла

## Критическая энергия аномальных ливней $\varepsilon$



У модифицированной критической энергии  $\varepsilon'$  к зависимости от типа вещества добавляются зависимости от энергии электронов, ориентации, температуры и толщины кристалла.

$$\varepsilon' = \varepsilon \cdot \exp(\Delta t)$$

В пределах исследуемых толщин кристаллов, экспериментальная зависимость определяется как  $\Delta t = kE$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $E$  – энергия электронов, получаем:

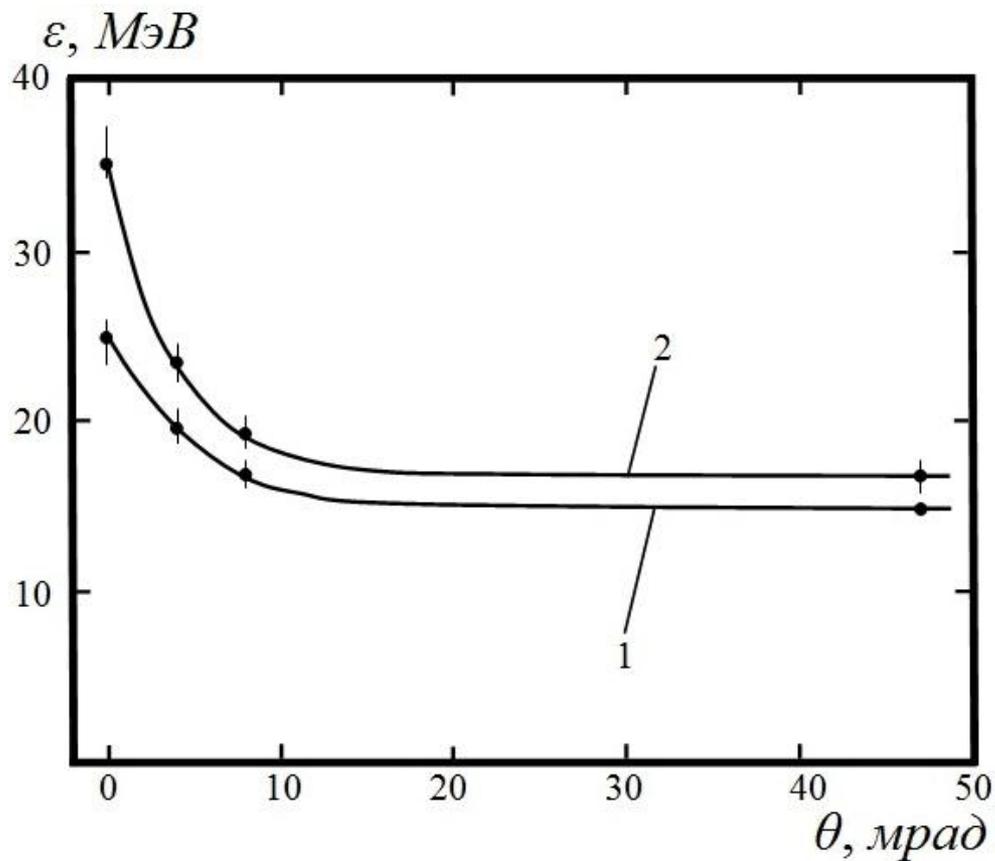
$$\varepsilon' = \varepsilon \cdot \exp(kE).$$

Так как величина  $\exp(k) \approx 1$  (например, при  $E = 28$  ГэВ,  $\Delta t = (0.5 \pm 0.1)X_0$ ),  $k = \Delta t/E = 0.018 \pm 0.003$ , то есть  $\exp(0.018) \approx 1$ )

$$\varepsilon' = \varepsilon \cdot \exp(k) \cdot \exp(E) \approx \varepsilon \cdot \exp(E).$$

**Рис. 28** Зависимость критической энергии  $\varepsilon$  черенковского спектрометра от энергии электронов  $E$  (кристаллический вольфрамовый конвертор толщиной 1 мм, ориентация вдоль оси  $\langle 111 \rangle$ , температура  $T = 293\text{K}$ ; о – табличное значение, ● – эксперимент, ■ – оценка).

# Критическая энергия аномальных ливней $\varepsilon$

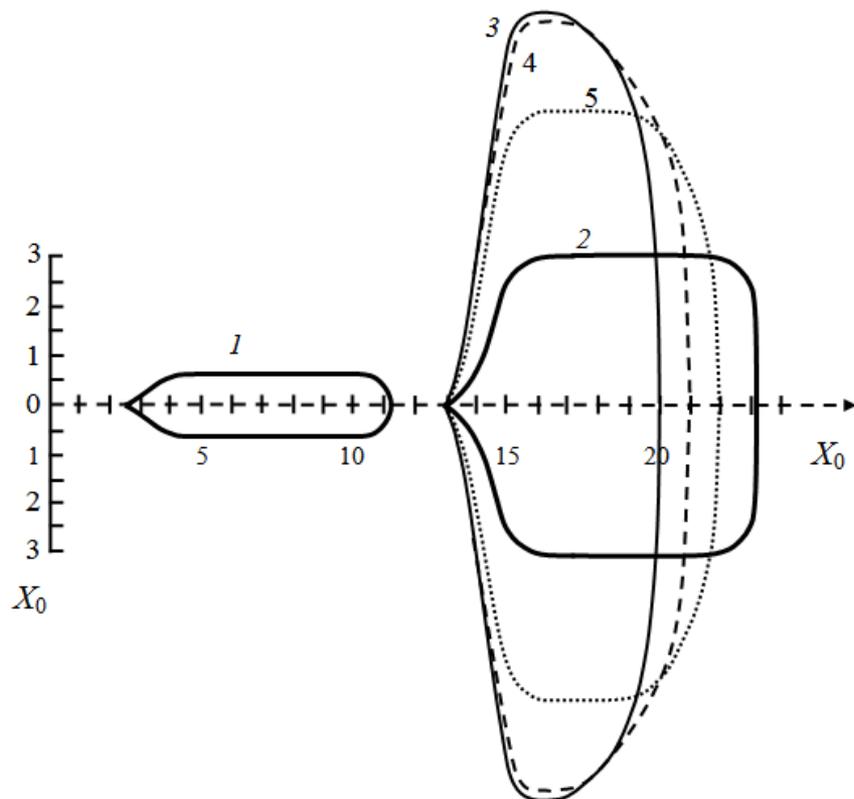


Ширины ориентационных зависимостей:

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_{293\text{K}} = 7.5 \text{ мрад} \text{ и } \Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta_{77\text{K}} = 5 \text{ мрад}.$$

**Рис. 30** Зависимость критической энергии  $\varepsilon$  черенковского спектрометра от угла ориентации  $\vartheta$  кристаллического вольфрамового конвертора толщиной (1 –  $T_1 = 293\text{K}$ ; 2 –  $T_2 = 77\text{K}$ ;  $t_{\text{cryst}} = 0.28X_0$ ; ось ориентации  $\langle 111 \rangle$ ).

# Поперечное развитие электромагнитных ливней



Радиус Мольера ( $r_M$ ):

1.  $Al - 0.5X_0$

2.  $Pb \approx W^{раз} \approx PbWO_4^{раз} \approx G^{раз} - 3X_0$

3.  $W^{оп} - 8X_0$

4.  $PbWO_4^{оп} - 7.5X_0$

5.  $G^{оп} - 6X_0$

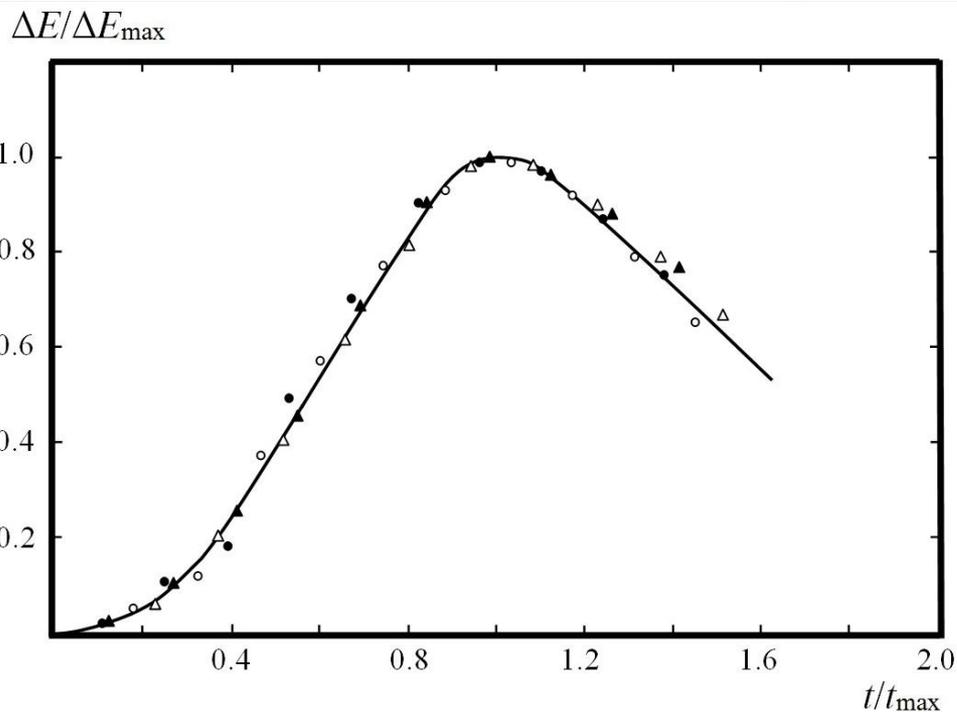
**Рис. 16** Контуры областей, в которых выделяется  $\sim 90\%$  энергии электромагнитного ливня при энергиях электронов в десятки  $\Gamma\text{ЭВ}$ : ливни развиваются в алюминии (1), свинце (2); в ориентированных кристаллах вольфрама (3), вольфрамата (4), граната (5) ( $X_0$  – радиационная длина).

Радиусы Мольера, определяющие поперечное развитие ливней, в ориентированных кристаллах вольфрама (W), вольфрамата ( $PbWO_4$ ) и граната ( $Gd_3Ga_5O_{12}$ ), отличаются от соответствующих радиусов при развитии стандартных ливней в аморфных веществах. Оценки величин радиусов Мольера для ливней, развивающихся в ориентированных кристаллах вольфрама, вольфрамата и граната, составили  $\sim 8X_0$ ,  $\sim 7.5X_0$  и  $\sim 6X_0$  или  $\sim 28$  мм,  $\sim 67$  мм и  $87$  мм, соответственно ( $X_0$  – радиационная длина)

Несмотря на существенные отличия *аномального* ливня от *стандартного*, характеры развития ливней одинаковы – это электромагнитные ливни, развивающиеся в веществе независимо от его природы.

С точки зрения развития ливня, в ориентированном кристалле по отношению к разориентированному изменено только соотношение величин заряженной и незаряженной компонент ливня с соответствующими энергетическими характеристиками на глубине развития.

Басков В.А. Письма в ЖЭТФ, 2014, т. 99, № 12, С. 785-788.



**Рис. 4** Зависимость относительного энерговыделения ливня  $\Delta E / \Delta E_{\max}$  в спектрометре от глубины его проникновения  $t / t_{\max}$  (универсальная каскадная кривая) в присутствии перед ним разориентированного ( $\bullet, \blacktriangle$ ) и ориентированного вдоль оси  $\langle 111 \rangle$  ( $\circ, \triangle$ ) 1 мм кристаллического конвертора и температурах  $T_1 = 293\text{K}$  ( $\bullet, \circ$ ) и  $T_2 = 77\text{K}$  ( $\blacktriangle, \triangle$ ) ( $\Delta E$  и  $\Delta E_{\max}$  – энерговыделения в спектрометре на глубине проникновения  $t$  и в максимуме развития ливня  $t_{\max}$ , соответственно; энергия электронов  $E = 28\text{ ГэВ}$ ).

# Dipole pion polarizabilities

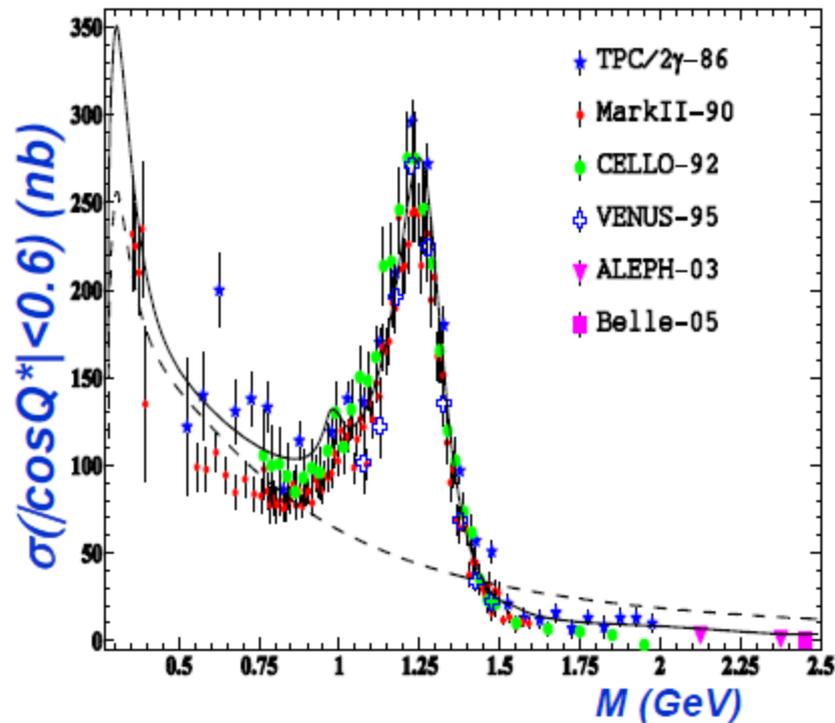
L.V. Fil'kov

Lebedev Physical Institute, Moscow

**25<sup>nd</sup> A2 Collaboration Meeting**

## Total cross section for the reaction $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$

The cross section is particularly sensitive to  $(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi^\pm}$  at  $w \leq 800$  MeV. However, the values of the experimental cross section of the process under consideration in this region are very ambiguous.



$$(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi^\pm} = 13.0 \pm 2.6 \pm 1.9$$

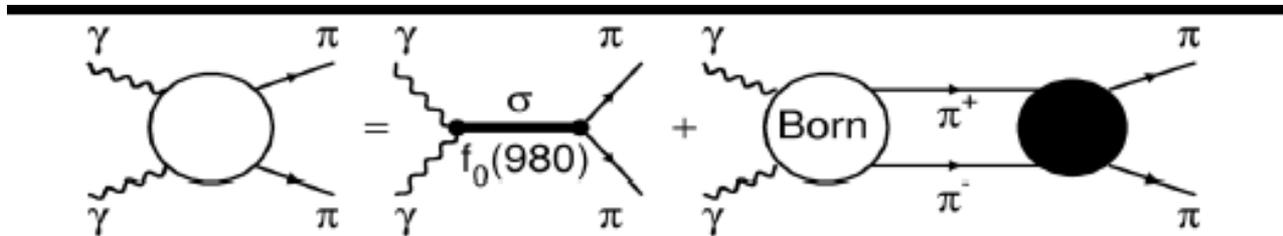
## Sum rules for $\Delta(\alpha_1 - \beta_1) = ((\alpha_1 - \beta_1)_{\pi^\pm} - (\alpha_1 - \beta_1)_{\pi^0})$

$$(\alpha_1 - \beta_1) = \frac{1}{2\pi^2\mu} \left\{ \int_{4\mu^2}^{\infty} \frac{\text{Im}M_{++}(t', u = \mu^2) dt'}{t'} + \int_{4\mu^2}^{\infty} \frac{\text{Im}M_{++}(s', u = \mu^2) ds'}{s' - \mu^2} \right\}$$

$f_0(980)$ ,  $f_0'(1370)$ ,  $\rho$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $b_1(1235)$ ,  $a_1(1260)$ ,  $a_2(1320)$ ,  $h_1(1170)$

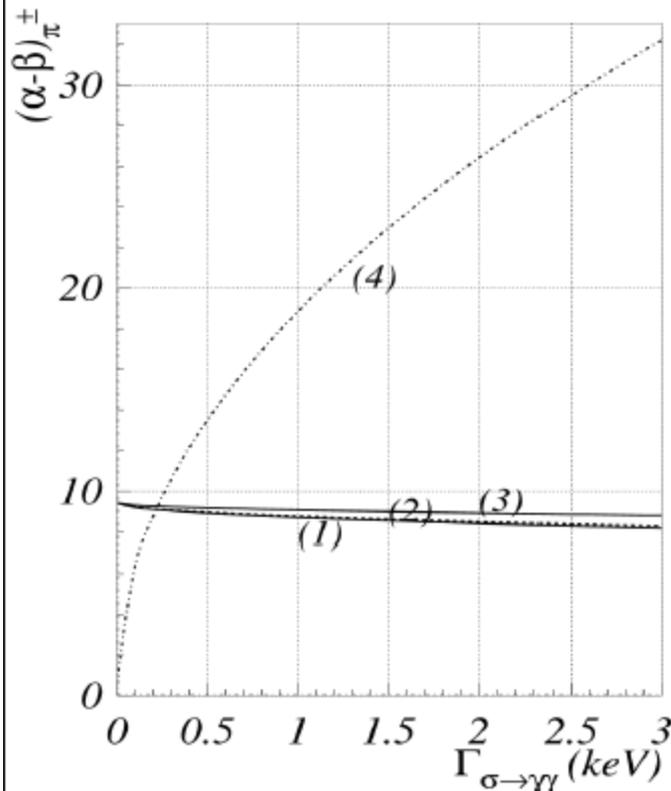
$\Gamma(h_1 \rightarrow \gamma\pi^0) = 1.684 \text{ MeV}$  was estimated using nonet symmetry.

$\sigma$ -meson:  $M_\sigma = 425 \div 550 \text{ MeV}$ ,  $\Gamma_\sigma = 400 \div 600 \text{ MeV}$ ,  $\Gamma_{\sigma \rightarrow \gamma\gamma} = 0 \div 3 \text{ keV}$



$$(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi\pm} = \Delta(\alpha_1 - \beta_1) + ((\alpha_1 - \beta_1)_{\pi 0})_{\text{ChPT}}$$

$$((\alpha_1 - \beta_1)_{\pi 0})_{\text{ChPT}} = -1.9$$



- (1) -  $M_\sigma = 446$  MeV,  $\Gamma_\sigma = 552$  MeV
- (2) -  $M_\sigma = 400$  MeV,  $\Gamma_\sigma = 600$  MeV
- (3) -  $M_\sigma = 550$  MeV,  $\Gamma_\sigma = 400$  MeV

$$(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi\pm} = 9.4 \div 8.2$$

(4) - DSR for  $(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi\pm} \rightarrow \Gamma_{\sigma \rightarrow \gamma\gamma} \leq 0.7$  keV

$\Gamma_{h1 \rightarrow \gamma\pi 0}$  is very sensitive to the value of  $(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi\pm}$ . If  $(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi\pm} = 11.6$  then  $\Gamma_{h1 \rightarrow \gamma\pi 0} = 0.875$  MeV.

## Summary

1. The values of  $(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi^\pm}$  obtained in the Serpukhov, Mainz, and LPI experiments and the  $\Delta(\alpha_1 - \beta_1)$  analysis are at variance with the ChPT predictions.
2. The result of the COMPASS Collaboration is in agreement with the ChPT calculations. However, this result is very model dependent.
3. New, more accurate experimental data on the process  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$  in region  $W \leq 800$  MeV are needed to obtain correct values of  $(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi^\pm}$ .
4. Finding the correct experimental value of  $(\alpha_1 - \beta_1)_{\pi^\pm}$  could give a possibility to determine the decay width of  $h_1$ -meson to  $\gamma\pi^0$  using the  $\Delta(\alpha_1 - \beta_1)$  analysis.

# Determination of neutron polarizabilities from deuteron Compton scattering

M.I. Levchuk (Minsk), A.I. L'vov (LPI)

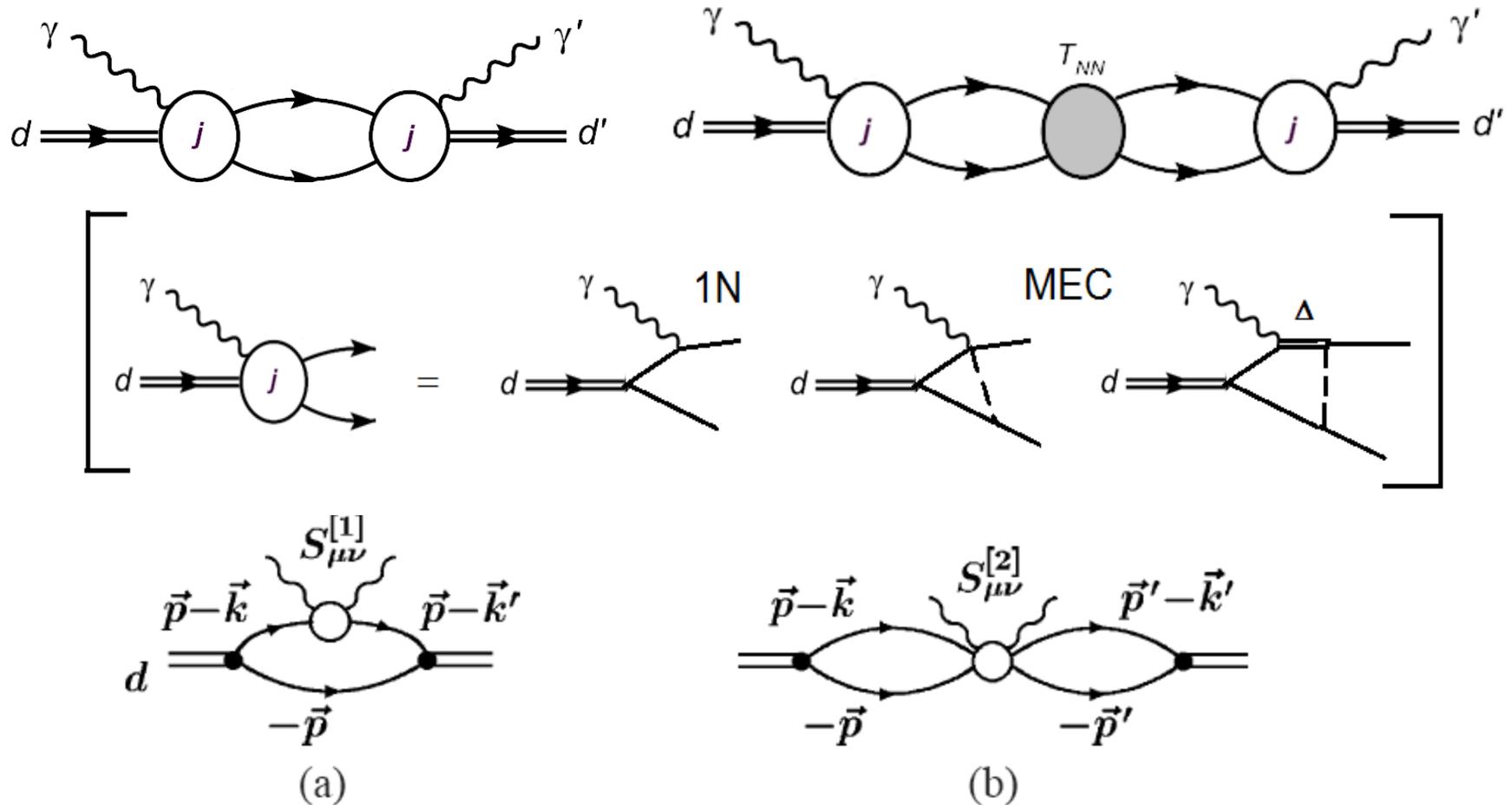
- 1) Polarizabilities of the proton from proton Compton scattering:  
principles and results
- 2) **Elastic deuteron Compton scattering: results**

**Интерпретация новых (2014) данных Лунда**

Myers et al. arXiv:1409.3705

**по упругому  $\gamma d$  рассеянию**

## Structure of the $\gamma d \rightarrow \gamma d$ amplitude (includes up to 4 loops!)

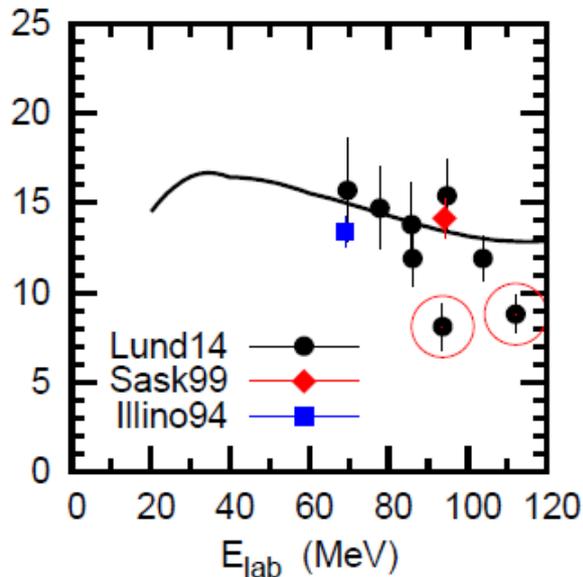


Correspondence with EFT: We have all contributions included into EFT calculations (perhaps, not the same numerically). Plus full consistency of the NN-potential, wave function, NN-rescattering off-shell T-matrix, MEC, mesonic seagulls.

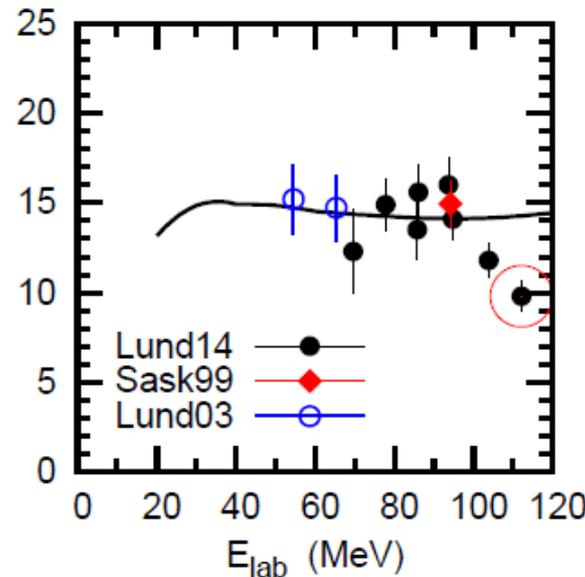
Data vs LL theory (OBEP-R-A) with  $\alpha_s = 12.72$ ,  $\beta_s = 2.11$   
 (= “global fit” with the Baldin sum rule constraint).

3 Lund14 data points (shown encircled) have been excluded from the fit because of their very big contribution to  $\chi^2$ .

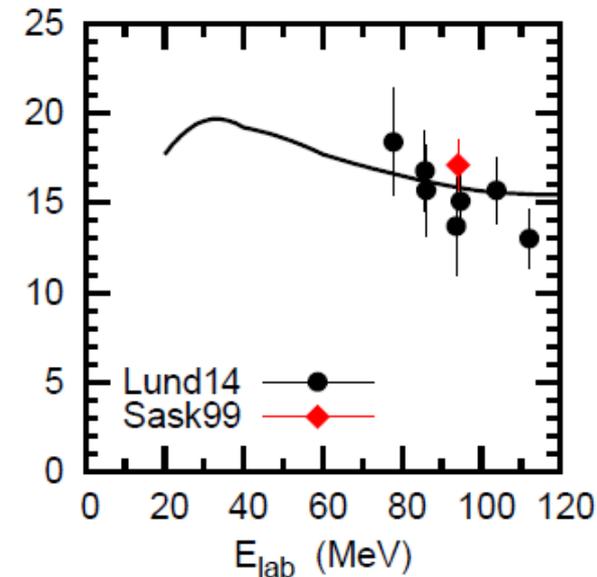
$d\sigma/d\Omega_{\text{lab}}$  (nb/sr) at  $60^\circ$



$d\sigma/d\Omega_{\text{lab}}$  (nb/sr) at  $120^\circ$



$d\sigma/d\Omega_{\text{lab}}$  (nb/sr) at  $150^\circ$



$\alpha_s = 12.72 \pm 0.68$ ,  $\beta_s = 2.11 \mp 0.61$ ,  $\chi^2/N_{\text{d.o.f.}} = 49.4/48$   
 with 3 data points excluded;

Cf.  $\alpha_s = 12.98 \pm 0.67$ ,  $\beta_s = 2.15 \mp 0.60$ ,  $\chi^2/N_{\text{d.o.f.}} = 88.0/51$   
 with no data points excluded (52 points at all).

## Our results for the neutron

Using  $\alpha_s - \beta_s = 11.78 \pm 1.75$  (from Lund 2014 data)

$$\alpha_p - \beta_p = 11.05 \pm 1.24 \text{ (from Mainz 2001 data),}$$

we conclude that

$$\alpha_n - \beta_n = 12.5 \pm 3.7$$

(Note the Baldin sum rule  $\alpha_n + \beta_n = 15.2 \pm 0.5$ ).

Meanwhile EFT fits give

$$\alpha_s - \beta_s = 7.8 \pm 1.5,$$

$$\alpha_p - \beta_p = 7.5 \pm 0.7,$$

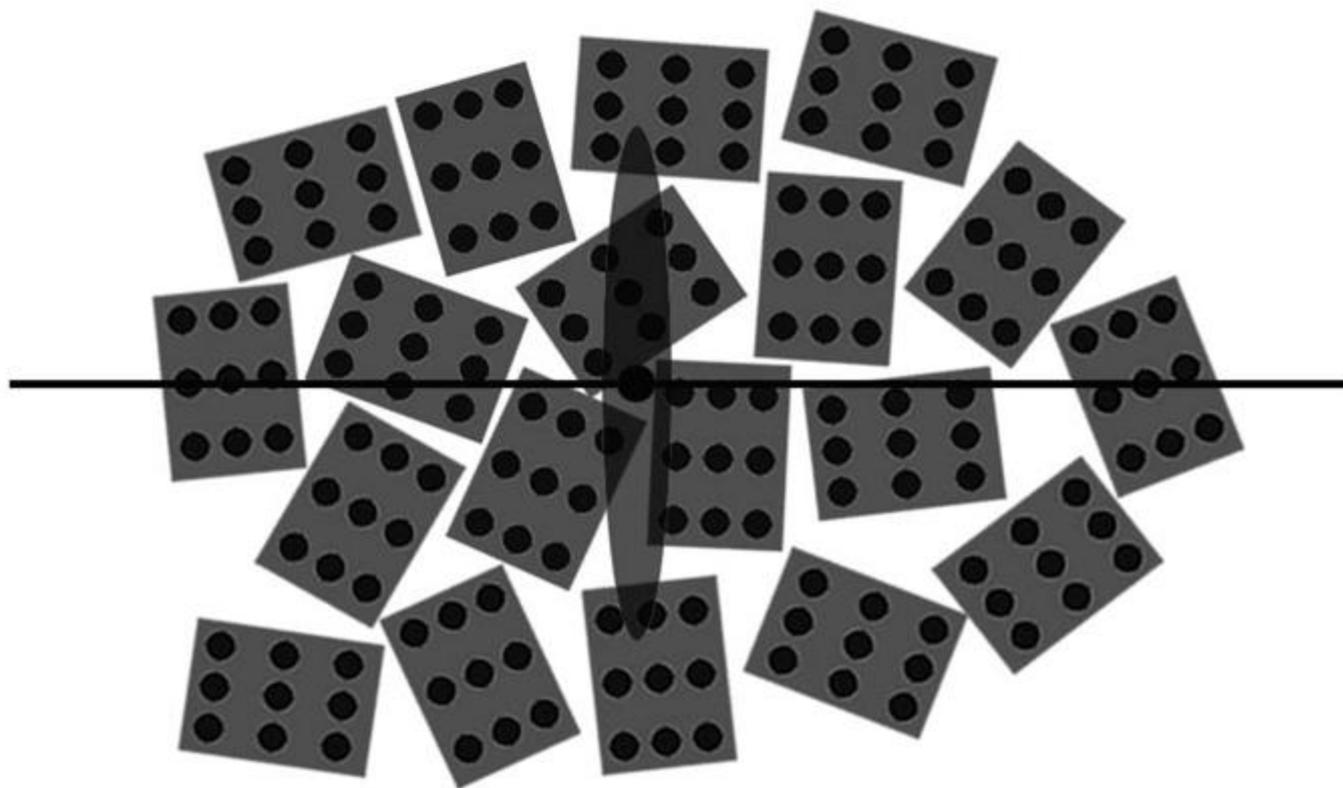
so that

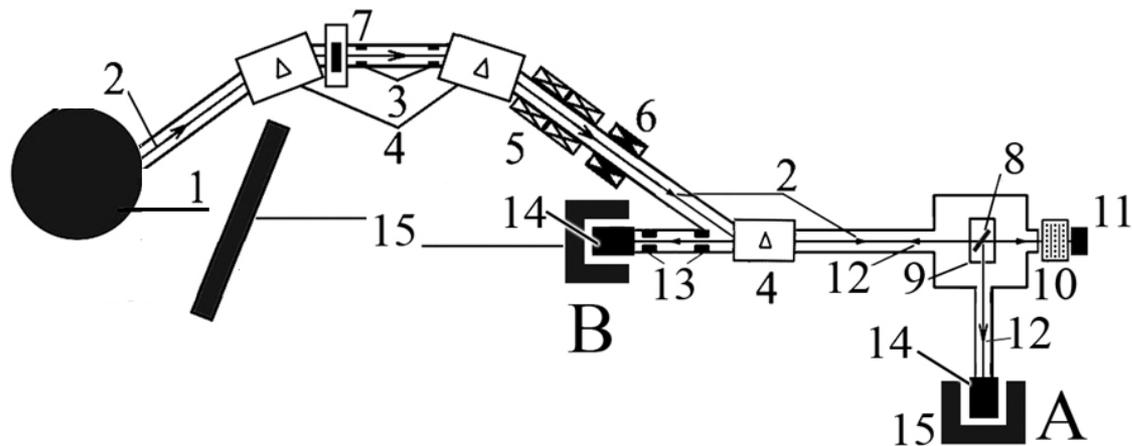
$$\alpha_n - \beta_n = 7.9 \pm 3.0$$

## 10) Рентгеновское поляризационное тормозное излучение релятивистских электронов в поликристаллах

---

(слайды А.С.Кубанкина)

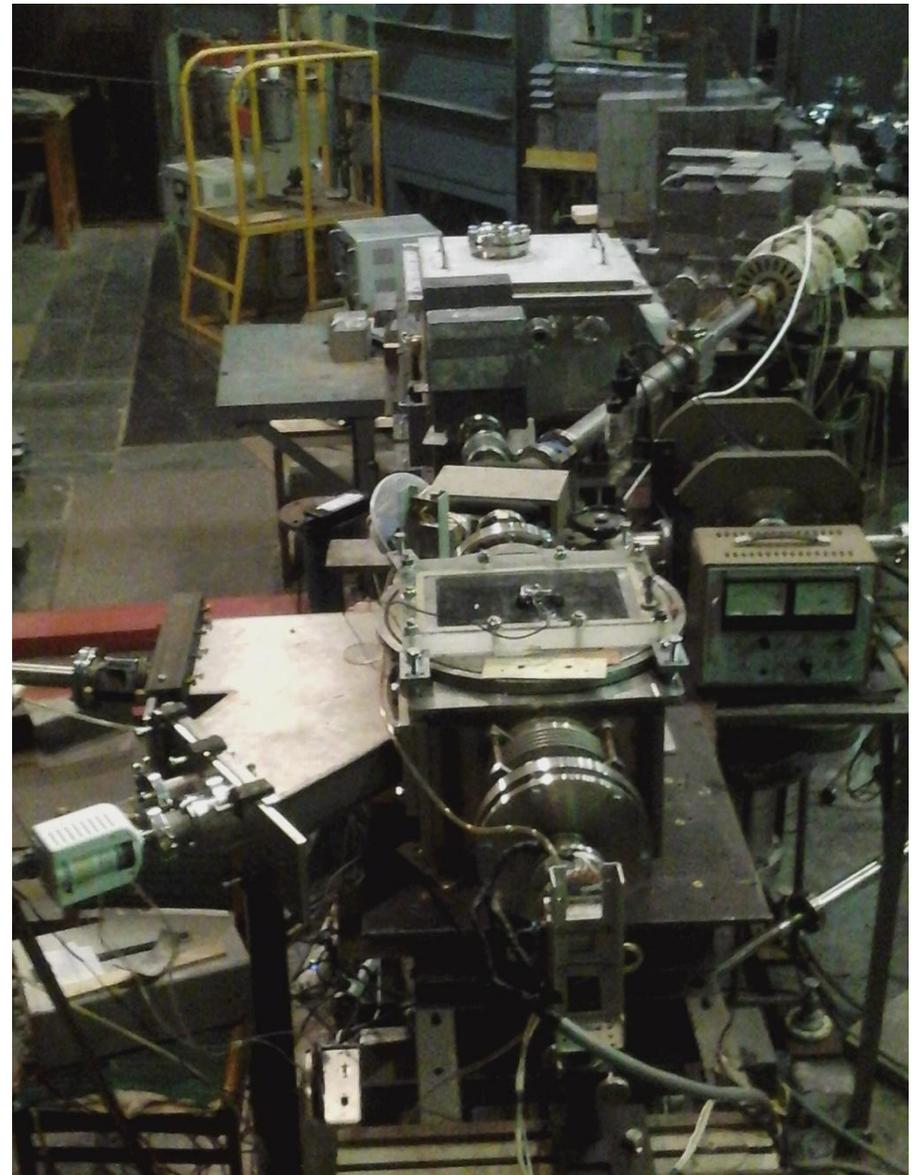
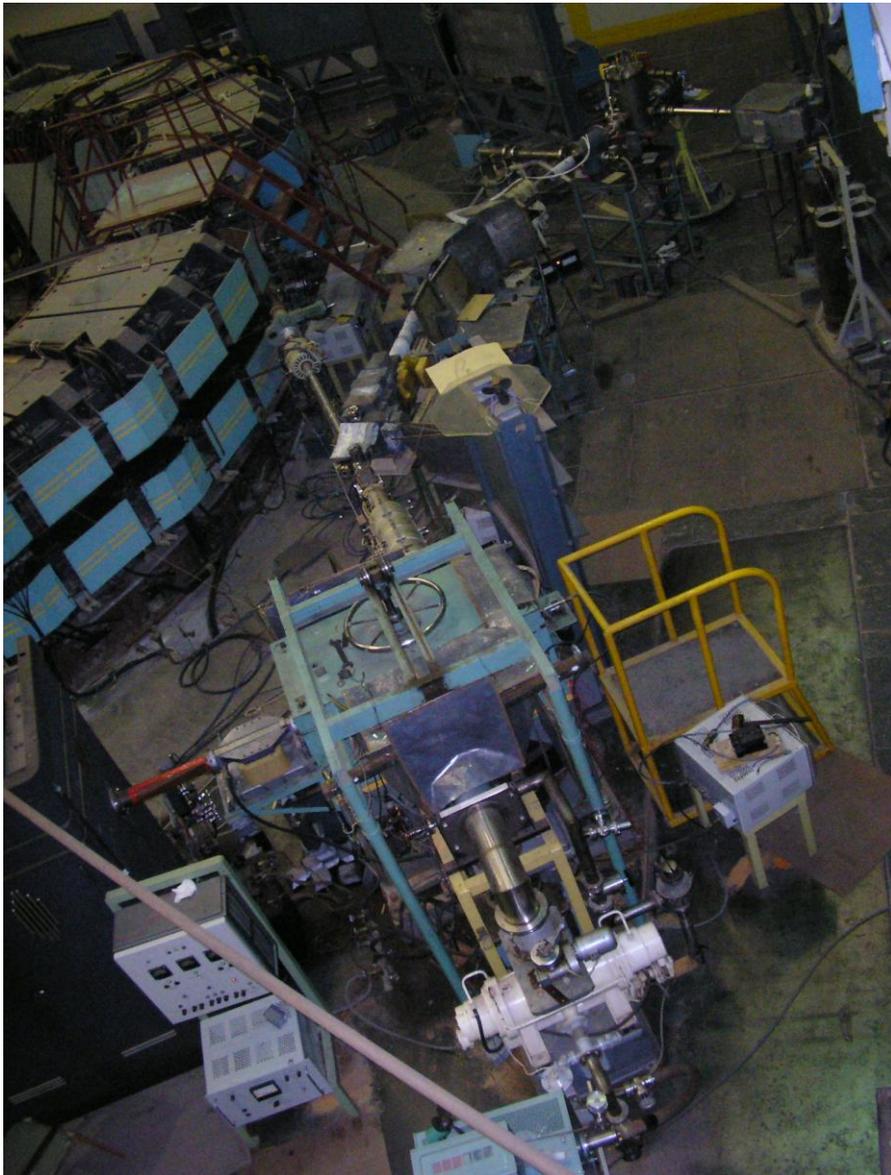




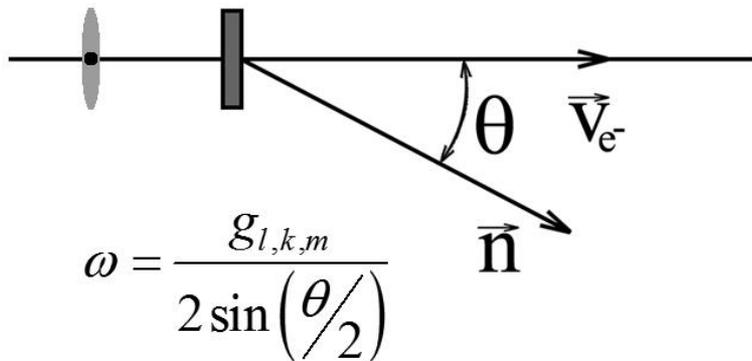
Экспериментальная установка. Микротрон с системой формирования электронного пучка. 1 – микротрон, 2 – электронный пучок, 3 – коллиматоры электронного пучка, 4 – поворотные магниты, 5 – квадрупольные магнитные линзы, 6 – корректор, 7 – вакуумный затвор, 8 – мишень, 9 – гониометр, 10 – пропорциональная камера, 11 – цилиндр Фарадея, 12 – измеряемое излучение, 13 – коллиматоры, 14 – детектор, 15 – свинцовая радиационная защита.

Параметры пучка электронов: энергия – 7 МэВ; ток в импульсе – до 40 мА; длительность импульса – до 4 мкс; рабочая частота – 50 Гц; скважность – 5000.

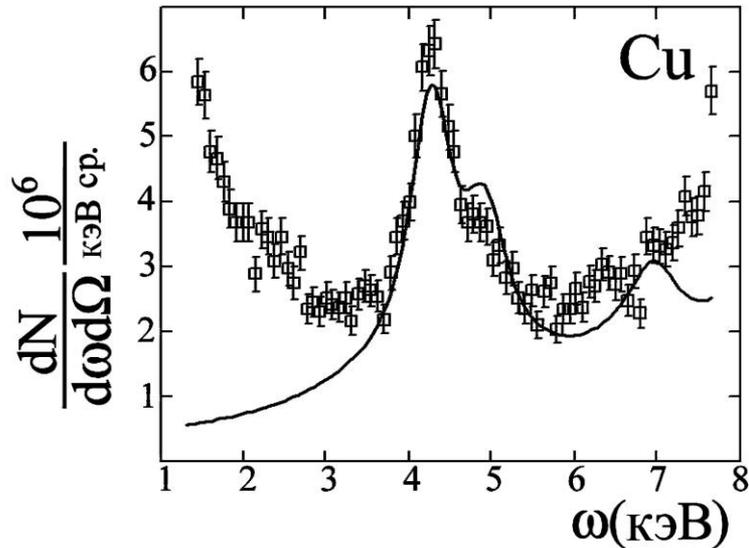
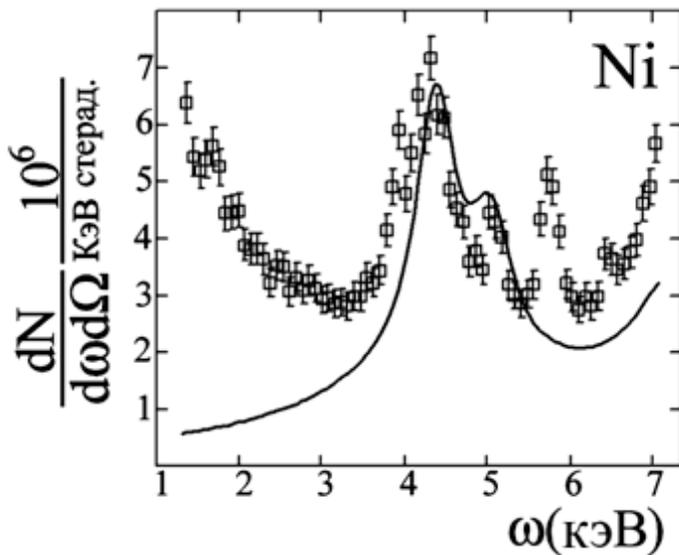
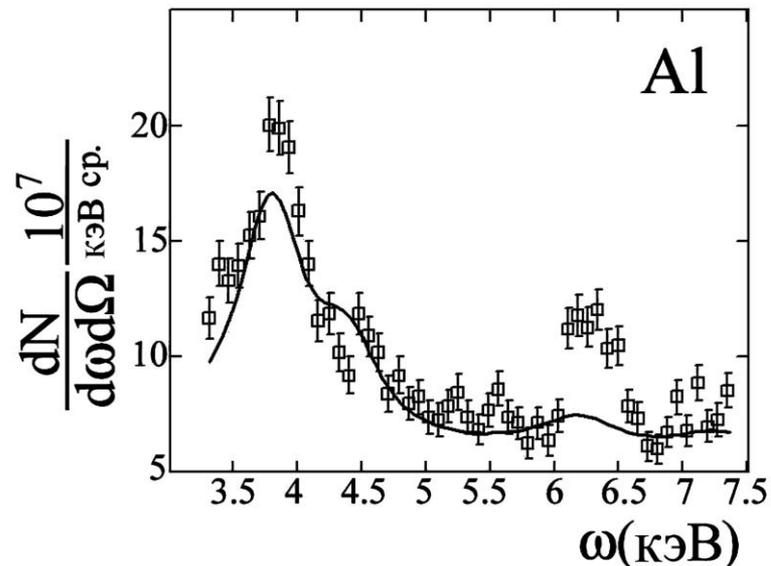
# Экспериментальная установка



# ПТИ релятивистских электронов в поликристаллах

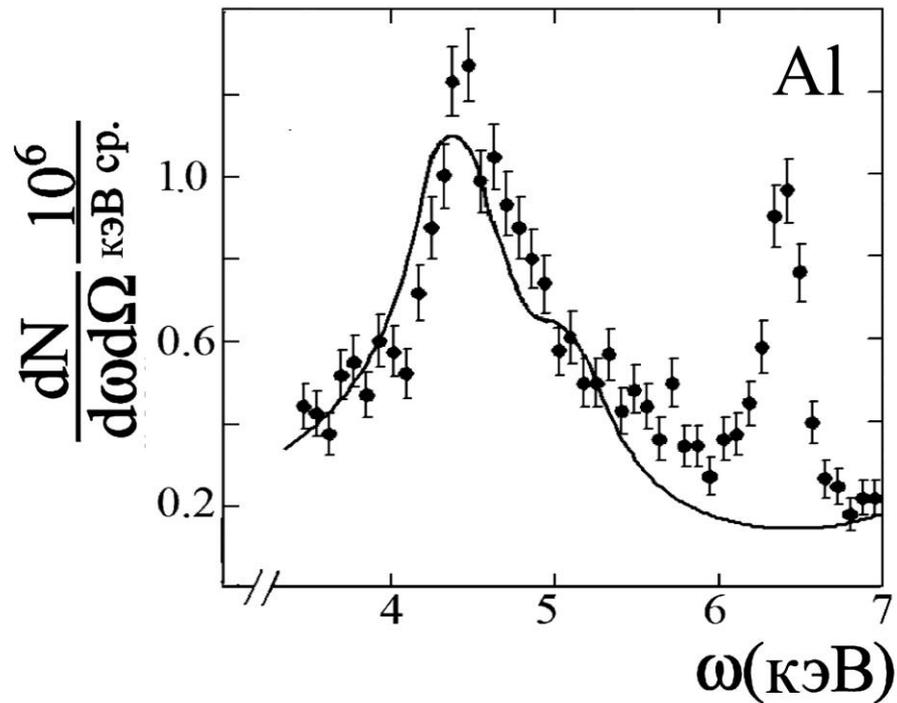
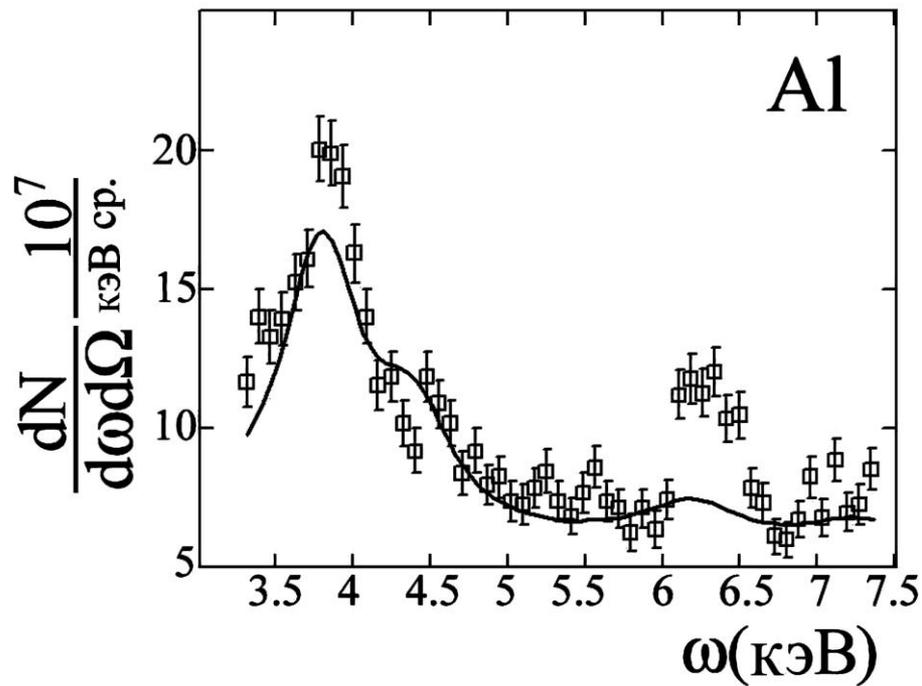


Геометрия процесса излучения.



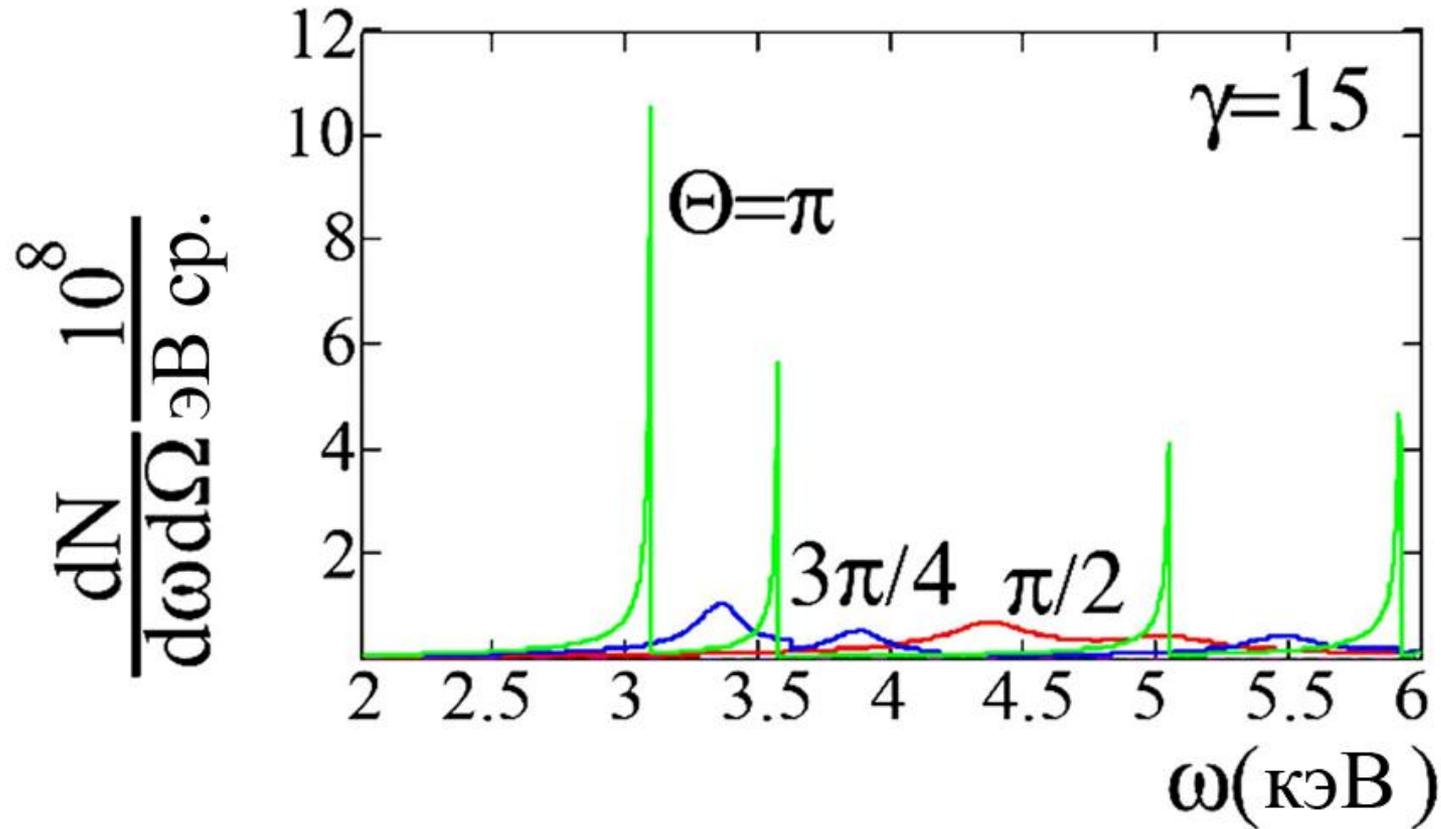
Измерение спектра ПТИ из поликристаллических фольг Al, Ni и Cu.  
Угол наблюдения 90 градусов.

# ПТИ релятивистских электронов в поликристаллах



Измерение спектра ПТИ из поликристаллических фольг Al.  
Углы наблюдения 90 и 75 градусов.

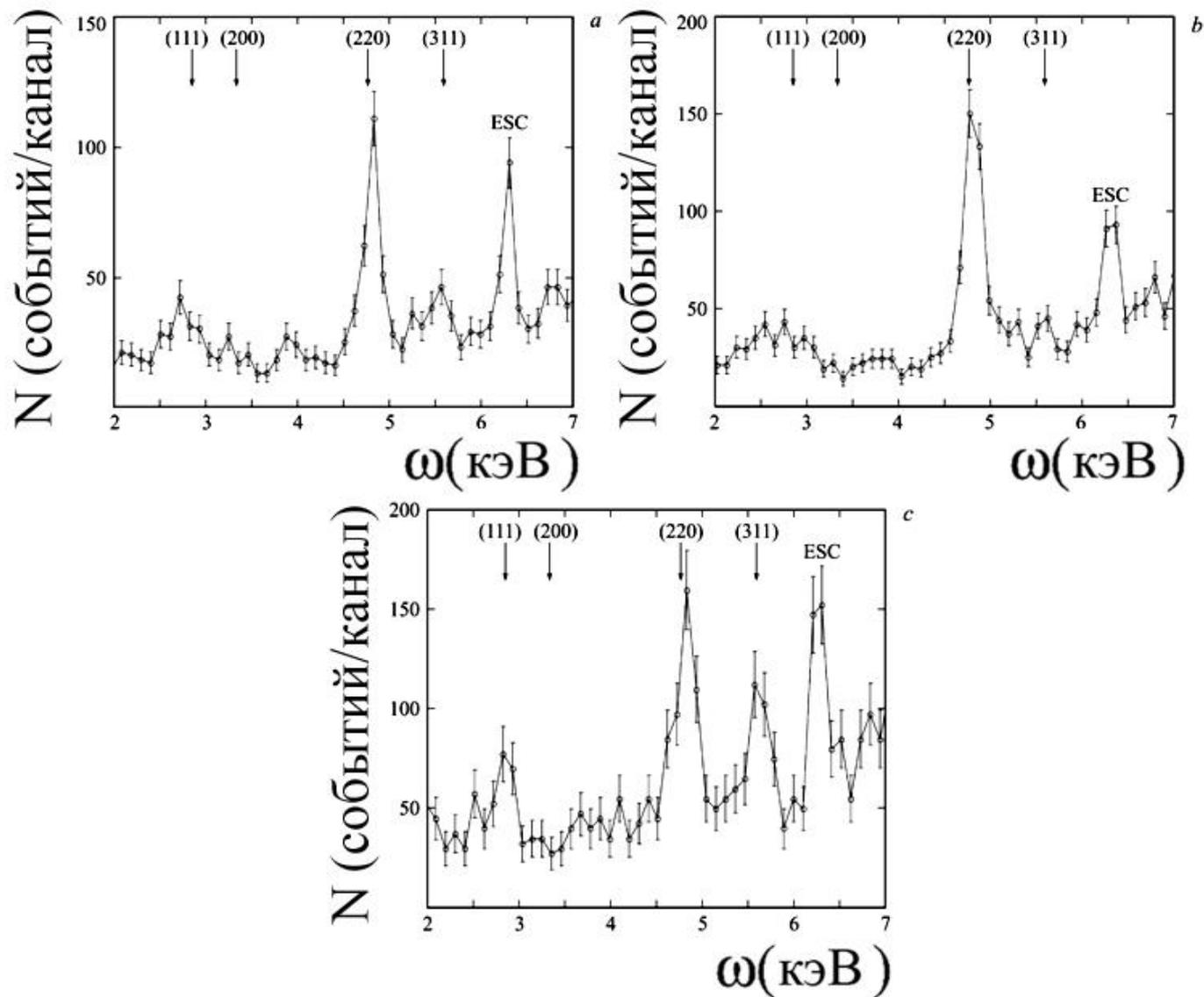
# ПТИ релятивистских электронов в геометрии обратного рассеяния



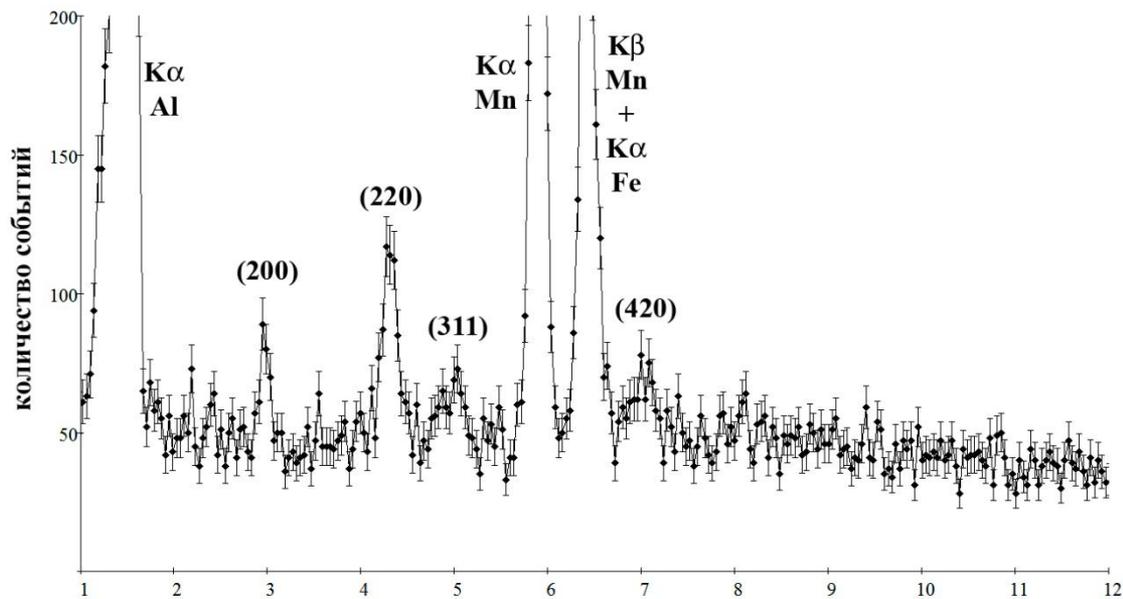
Зависимость спектра ПТИ из поликристалла меди от угла наблюдения.

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} \approx \frac{\sqrt{\cos^2(\theta/2) - \frac{1}{4}\rho^2 \cos(\theta)}}{\rho^{-1} \sin(\theta/2)} \quad \rho^2 = \gamma^{-2} + \omega_0^2 / \omega^2$$

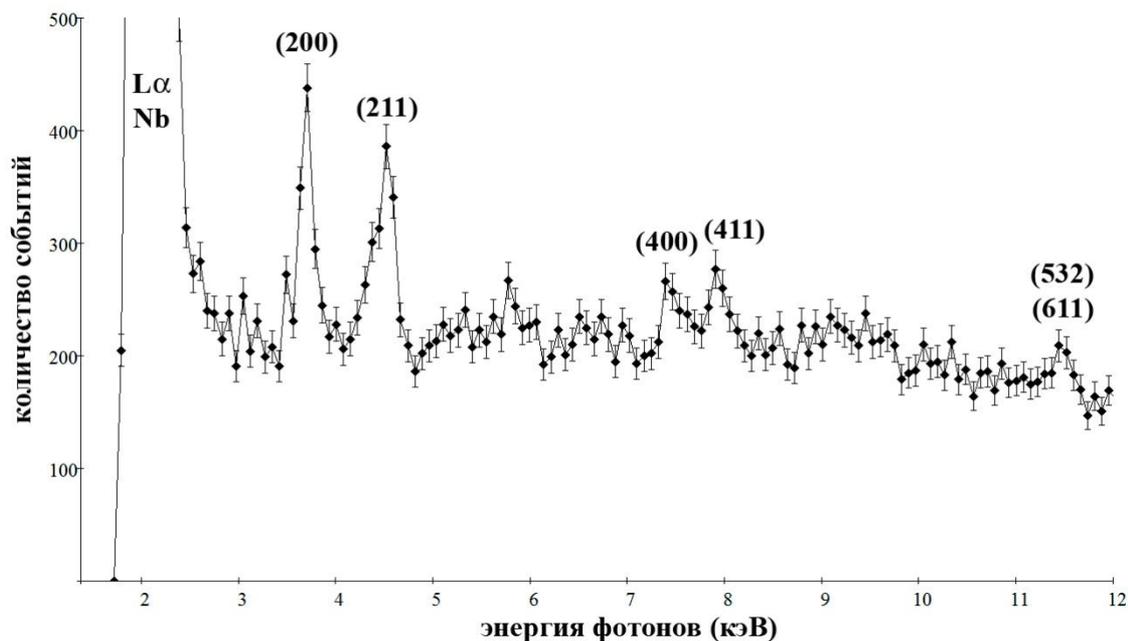
# ПТИ релятивистских электронов в геометрии обратного рассеяния



Спектры ПТИ назад текстурированной поликристаллической меди при различной ориентации мишени относительно пучка электронов. 83



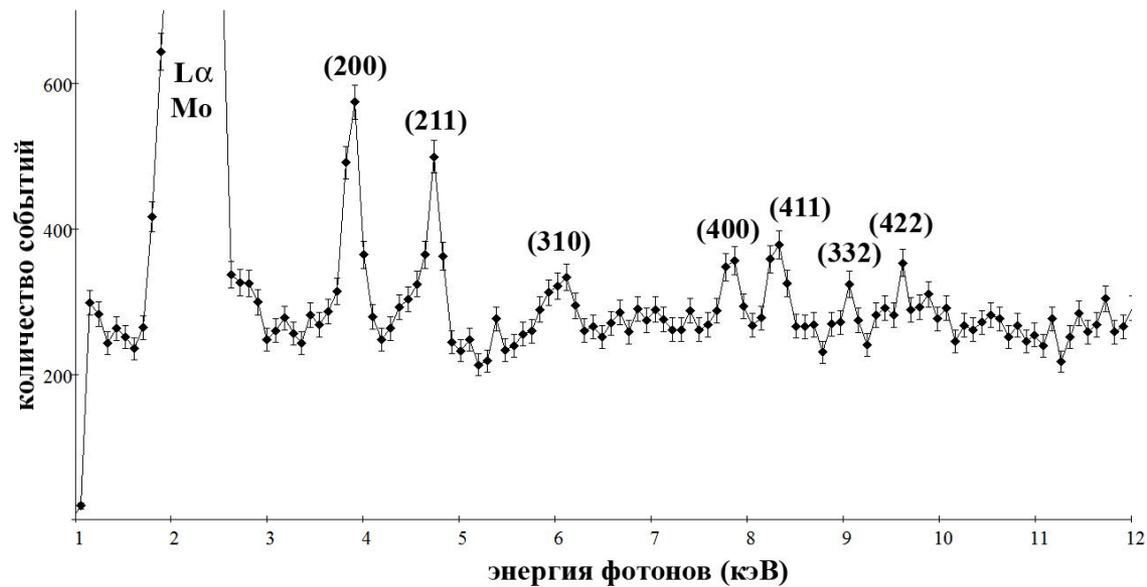
(220)  
4.329 кэВ (теория)  
4.351 +/- 0.006 кэВ  
FWHM (140 +/- 13) эВ



(200)  
3.756 кэВ (теория)  
3.796 +/- 0.009 кэВ  
FWHM (130 +/- 20) эВ

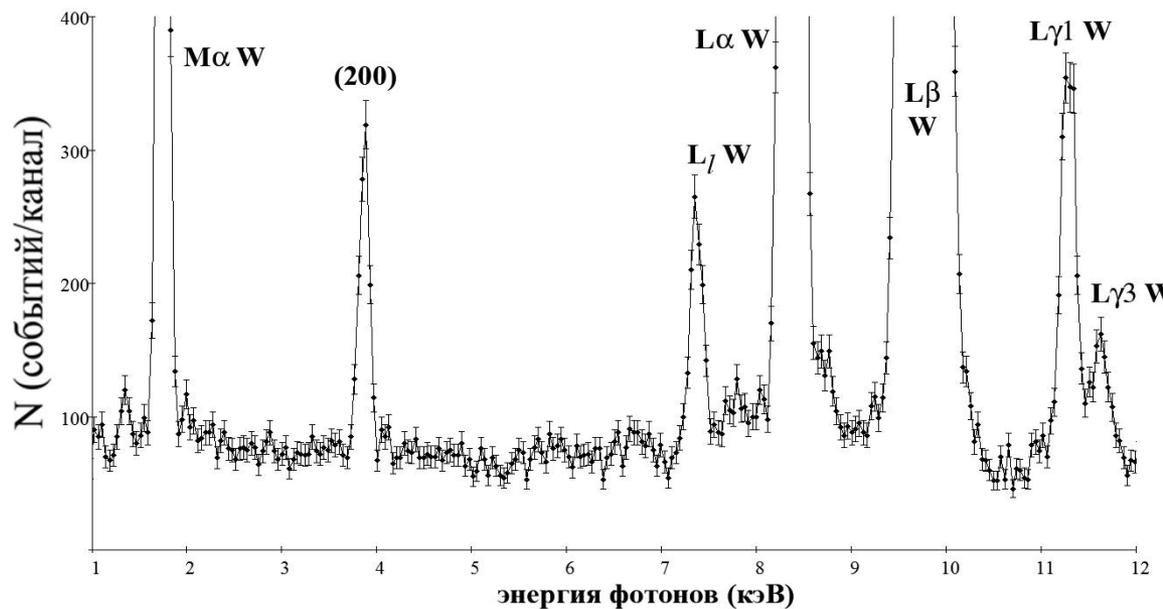
(211)  
4.600 кэВ (теория)  
4.605 +/- 0.013 кэВ  
FWHM (211 +/- 30) эВ

Спектр ПТИ назад из поликристаллических фольг алюминия и ниобия.



(200)  
3.940 кэВ (теория)  
4.002 +/- 0.005 кэВ  
FWHM (150 +/- 10) эВ

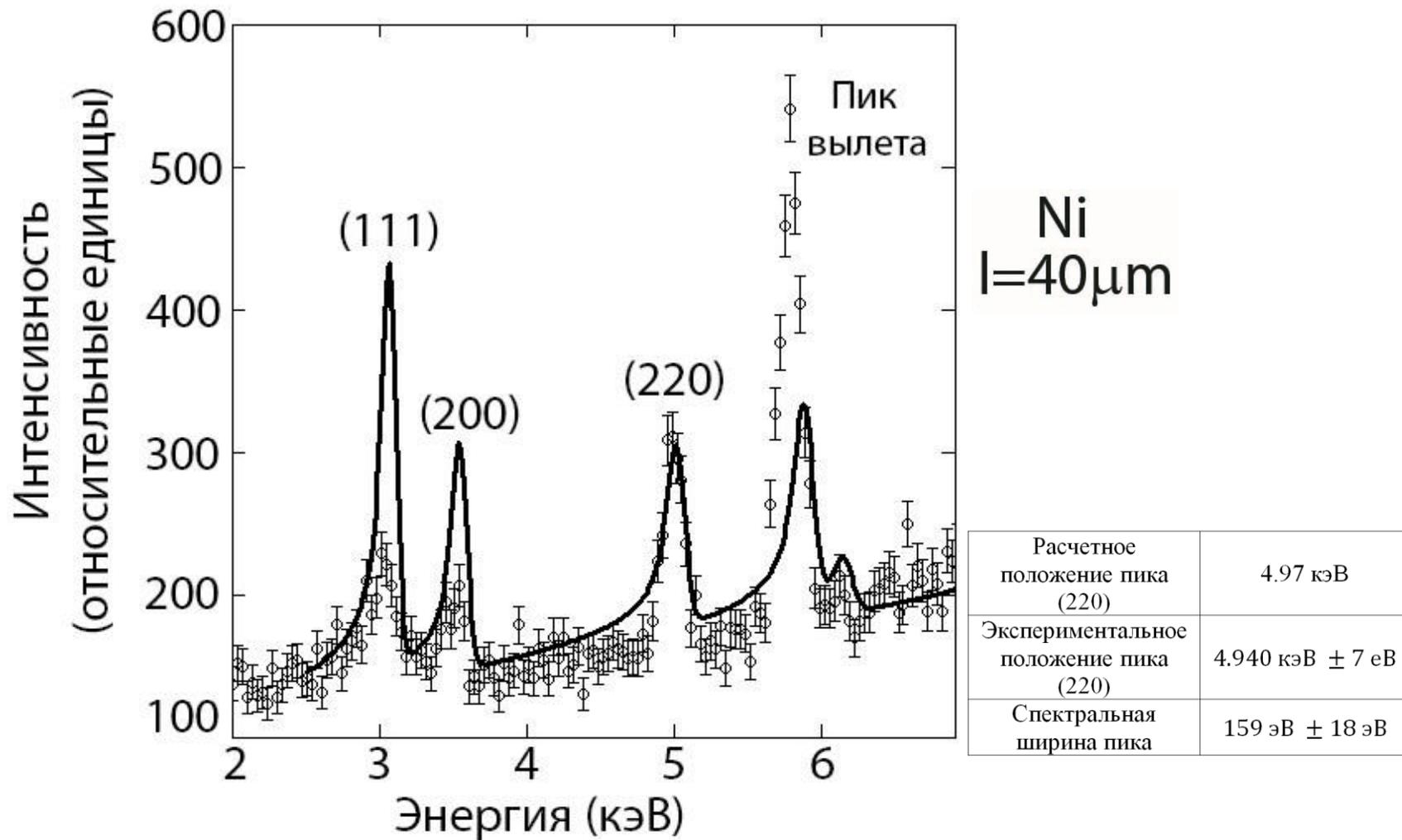
(211)  
4.825 кэВ (теория)  
4.851 +/- 0.008 кэВ  
FWHM (130 +/- 18) эВ



(200)  
3.924 кэВ (теория)  
3.962 +/- 0.003 кэВ  
FWHM (106 +/- 5) эВ

(321)  
7.340 кэВ (теория)  
7.466 +/- 0.007 кэВ  
FWHM (137 +/- 7) эВ

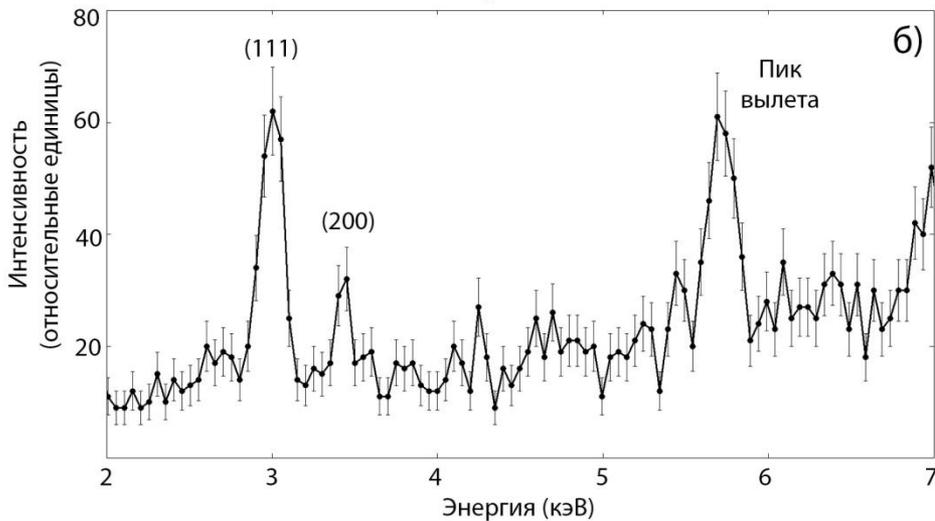
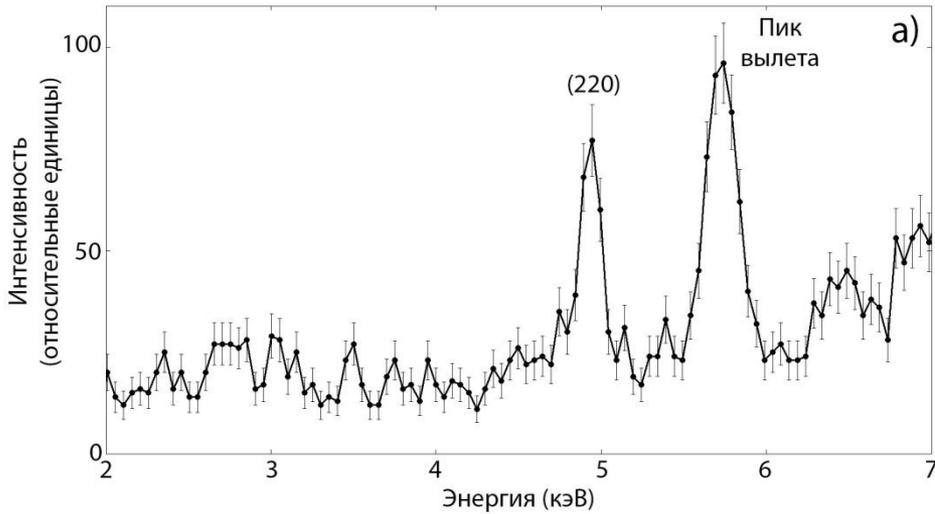
Спектр ПТИ назад из поликристаллических фольг молибдена и вольфрама.



Сравнение экспериментальных данных ПТИ назад, полученных из поликристаллической фольги никеля, с теорией.

(средний размер зерен 300 нм)

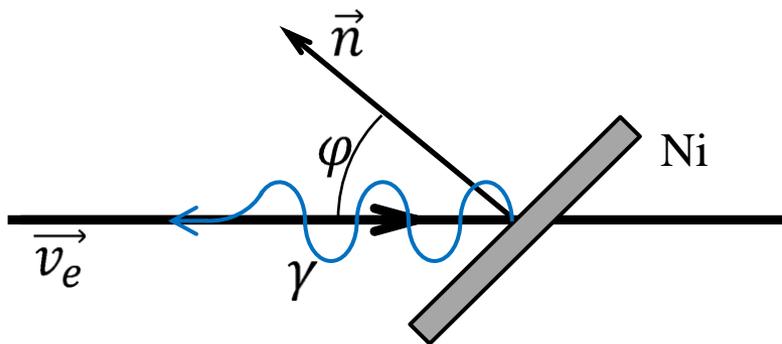
Ni  
 $l=40\mu\text{m}$



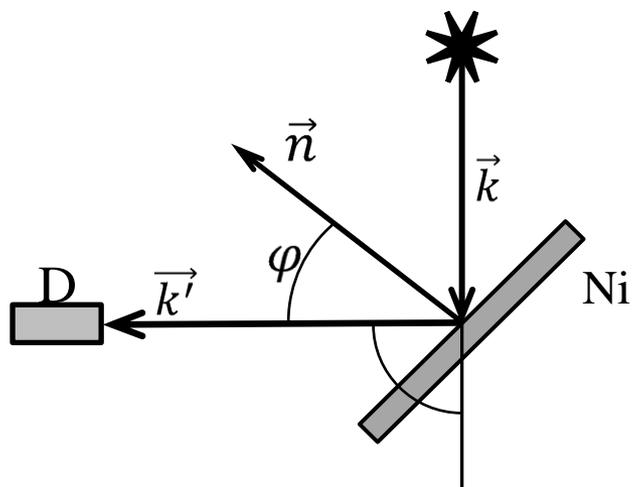
	(220)	(111)
Расчетное положение пика	4.98 кэВ	3.05 кэВ
Экспериментальное положение пика	4.93 кэВ $\pm$ 10 эВ	2.99 кэВ $\pm$ 8 эВ
Спектральная ширина пика	184 эВ $\pm$ 11 эВ	170 эВ $\pm$ 9 эВ

Спектры ПТИ назад от поликристаллической фольги никеля. Средний размер зерен 50 нм. Угол между осью электронного пучка и нормалью мишени составляет а)  $0^\circ$  и б)  $18^\circ$ .  
 (средний размер зерен 50 нм)

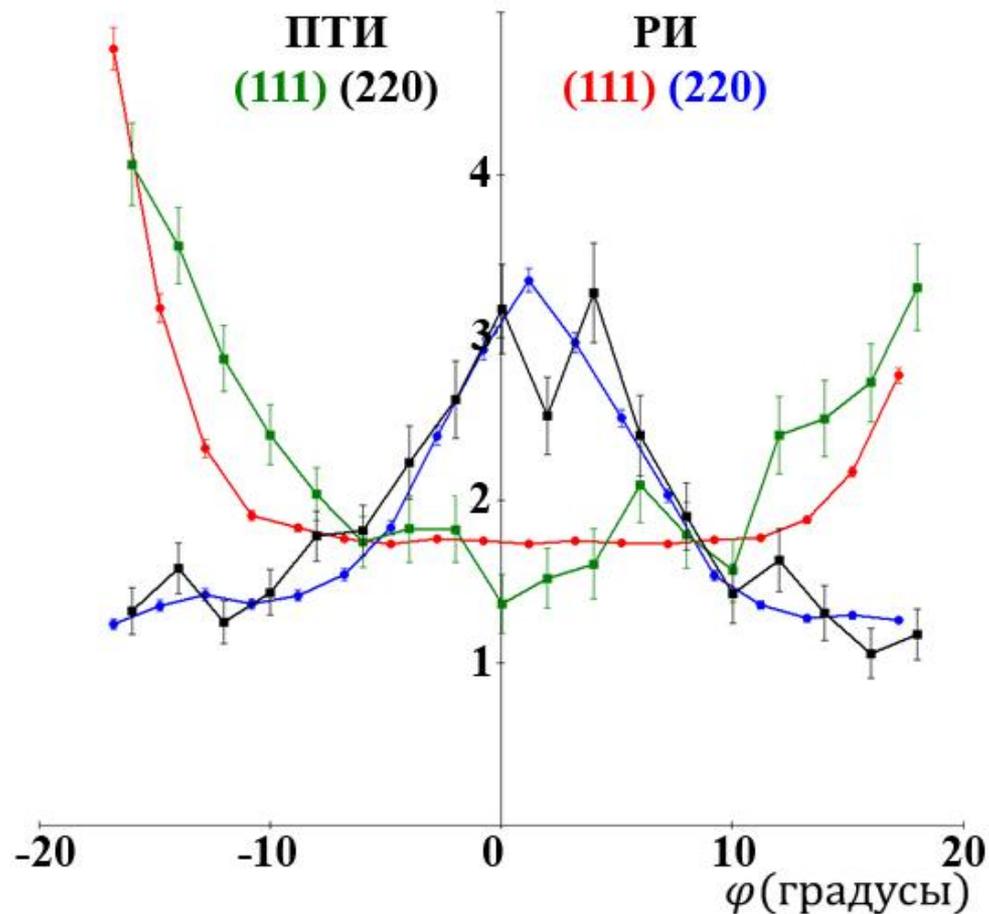
# ПТИ релятивистских электронов в геометрии обратного рассеяния



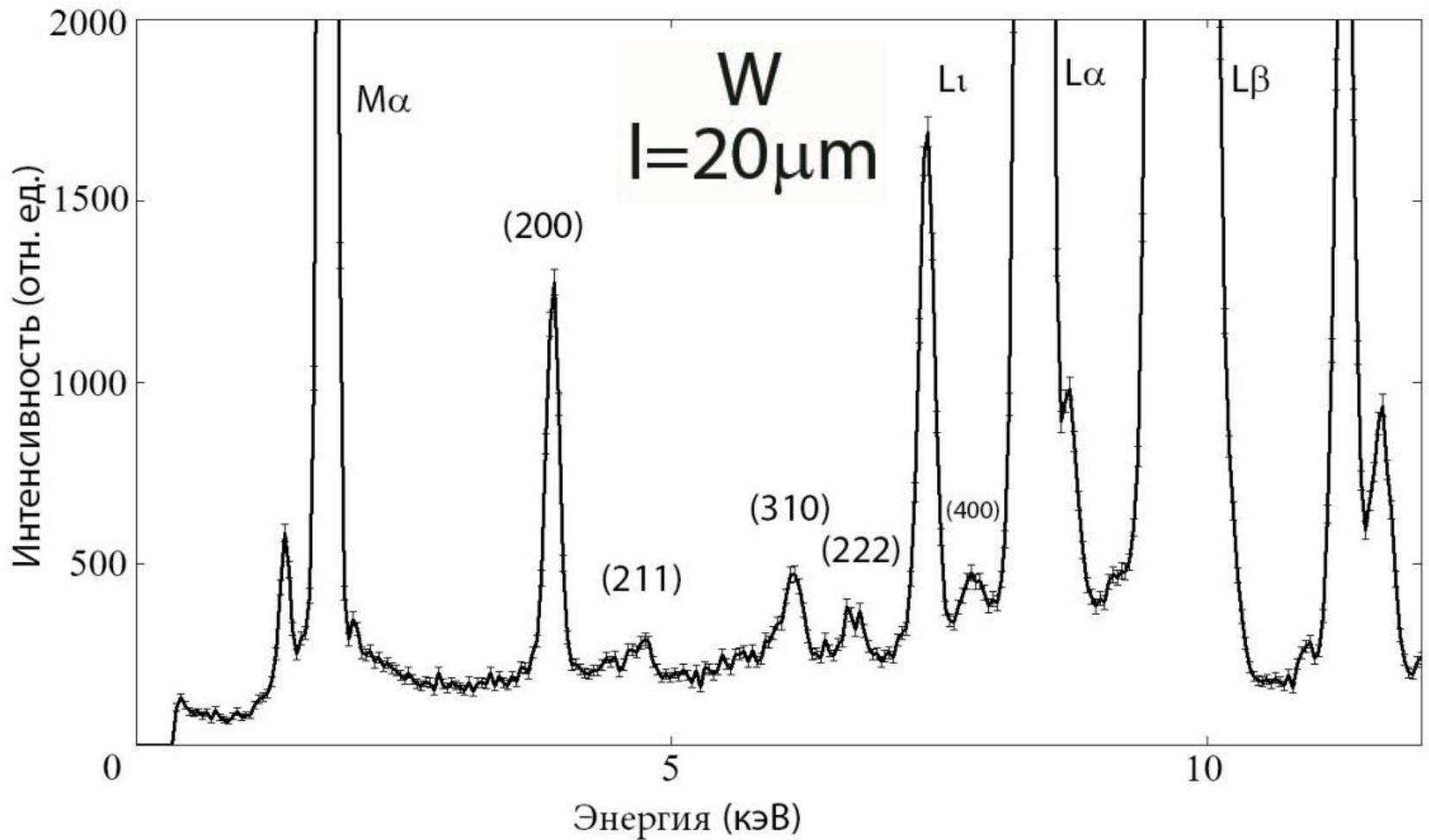
Геометрия измерения ориентационной зависимости выхода ПТИ



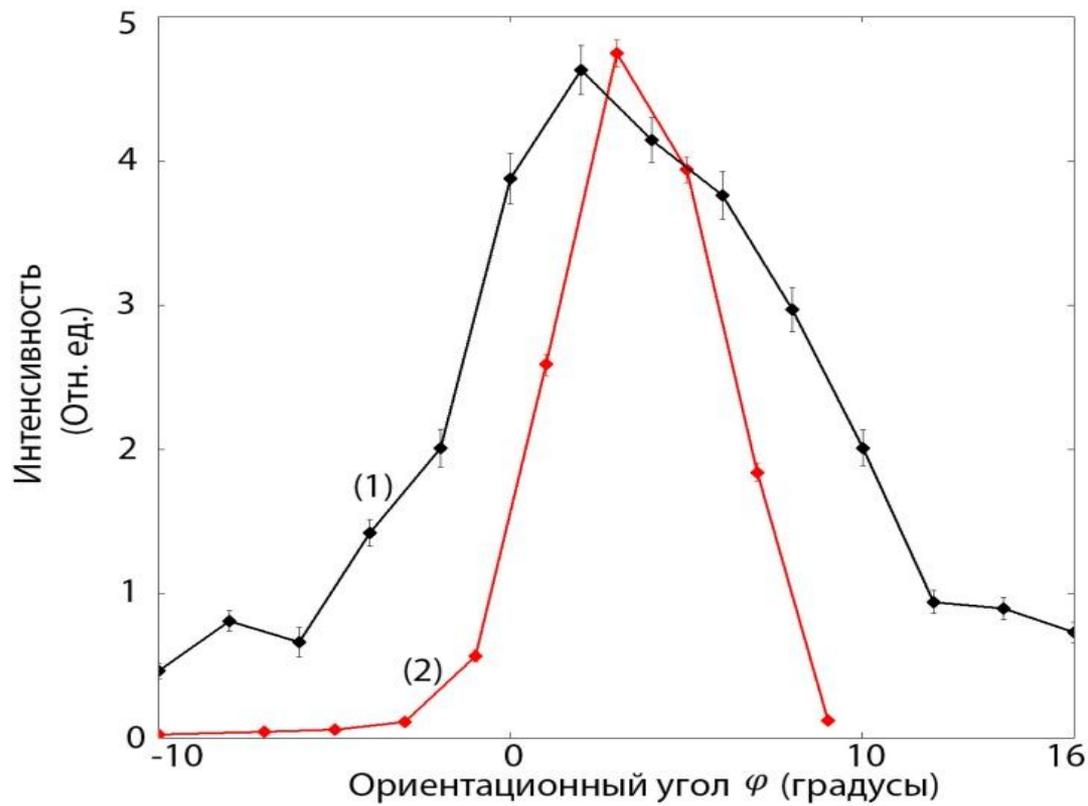
Геометрия измерения выхода дифракции широкополосного рентгеновского излучения



Сравнение ориентационных зависимостей выхода пиков ПТИ из поликристаллического никеля от плоскостей (111) и (220) с аналогичными зависимостями для дифракции рентгеновского излучения.



Суммарный спектр, полученный при разных значениях ориентационного угла.



W  
I=20 $\mu$ m

	ПТИ	Рентгеновское излучение
Положение максимума	$3.41^\circ \pm 0.21^\circ$	$3.61^\circ \pm 0.06^\circ$
Ширина на полувысоте пика	$10.16^\circ \pm 0.77^\circ$	$5.44^\circ \pm 0.18^\circ$

Сравнение ориентационных зависимостей выходов когерентной составляющей ПТИ (1) и дифрагированного рентгеновского излучения (2), полученных из плоскости (200)

# 11) Переходное излучение

Письма в ЖЭТФ, том 99, вып. 1, с. 3–6

© 2014 г. 10 января

## Экспериментальное исследование рассеяния электронов с энергией 7.4 МэВ, пересекающих фольгу под углом 10–45 градусов к ее поверхности

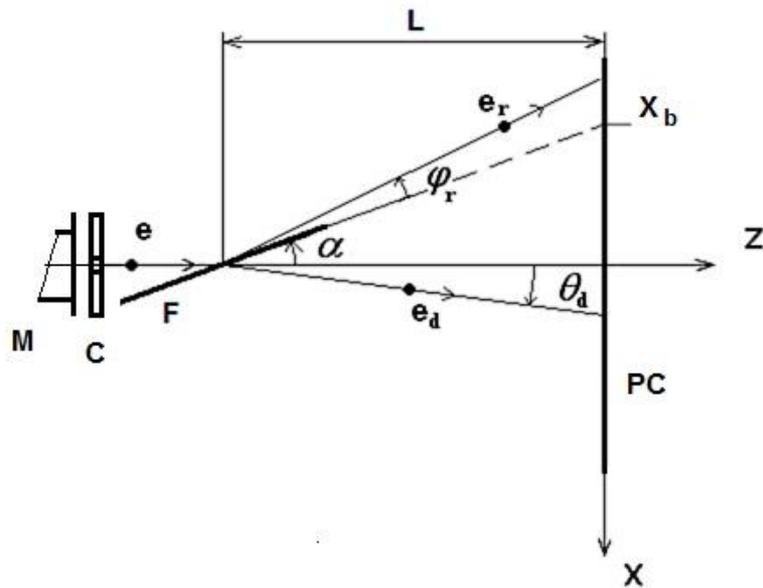
*А. В. Кольцов<sup>1)</sup>, А. В. Серов<sup>1)</sup>*

*Физический институт им. Лебедева РАН, 119991 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 25 октября 2013 г.

После переработки 2 декабря 2013 г.

Измерены угловые распределения электронов, пересекающих фольгу из алюминия толщиной 40 и 120 мкм и из меди толщиной 60 мкм. Источником электронов являлся микротрон с энергией частиц 7.4 МэВ. Изучалось влияние материала и толщины фольги, а также направления инжекции на пространственное распределение прошедших частиц. Измерения показали, что пересечение фольги под малыми углами к ее поверхности не только приводит к увеличению поперечных размеров пучка, но и изменяет направление его движения.



М - фланец микротрона, С - коллиматор, F - фольга, PC - пропорциональная камера, e - инжектируемые электроны,  $e_d$  - преломленные электроны,  $e_r$  - отраженные электроны,  $\alpha$  - угол инжекции,  $\theta_d$  - угол преломления,  $\varphi_r$  - угол отражения.

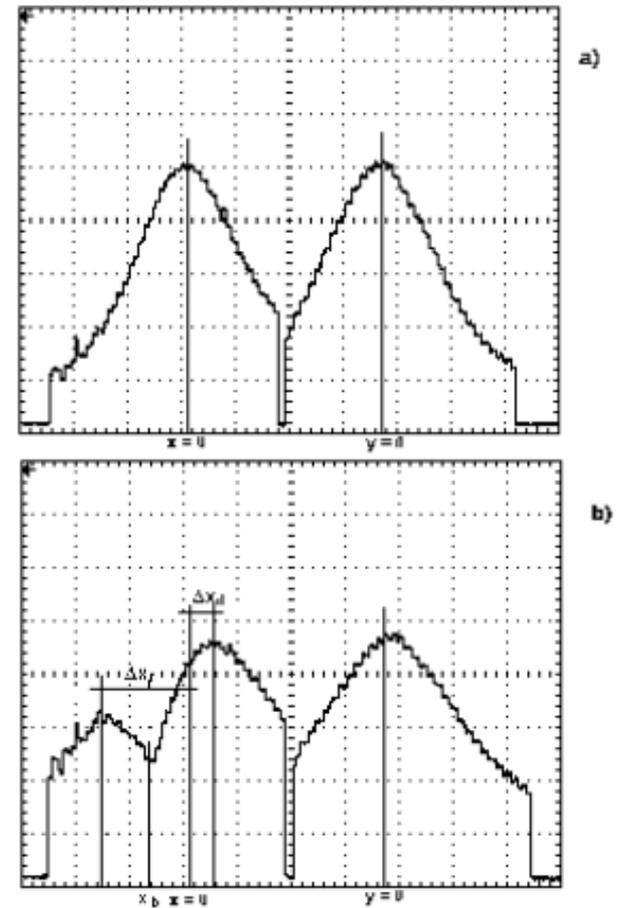


Figure 2: Transverse distributions of electrons intersecting a  $50 \mu\text{m}$  copper foil at an angle of  $\alpha = 90^\circ$  (a),  $10^\circ$  (b) to its surface.  $L = 100 \text{ mm}$ .

# RUPAC-2014

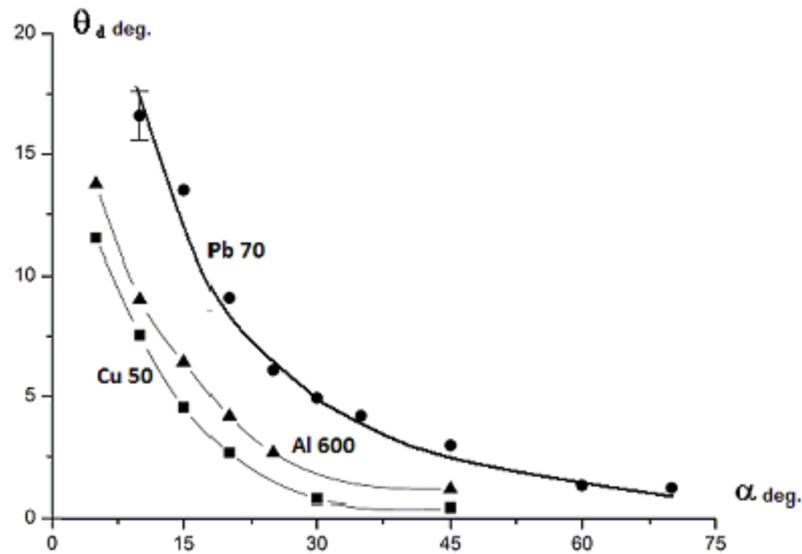


Figure 3: Angle of refraction of the trajectory  $\theta_d$  versus the angle of injection  $\alpha$ . 50  $\mu\text{m}$  copper, 600  $\mu\text{m}$  aluminum and 70  $\mu\text{m}$  lead foils. Notes for curves indicate the foils materials and their thicknesses in microns.

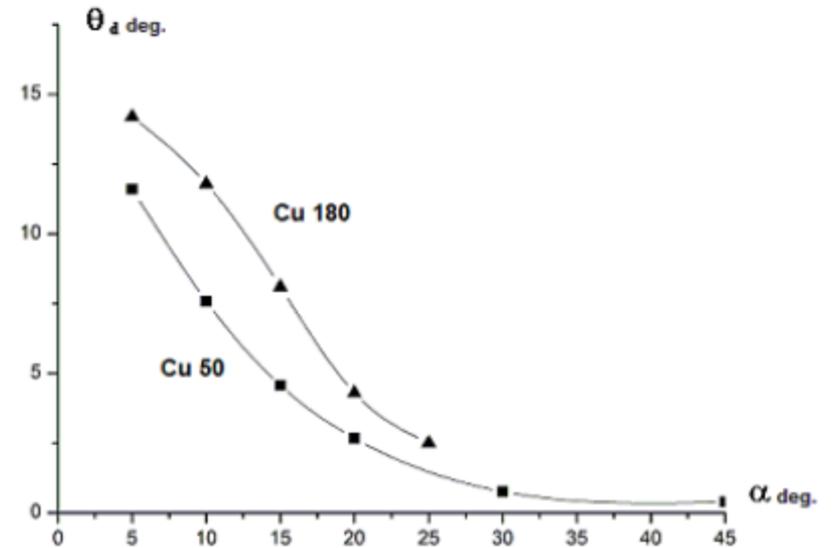


Figure 4: Angle of refraction of the trajectory  $\theta_d$  versus the angle of injection  $\alpha$ . 50  $\mu\text{m}$  and 180  $\mu\text{m}$  copper foils. Notes for curves indicate the foils materials and their thicknesses in microns.

# RUPAC-2014

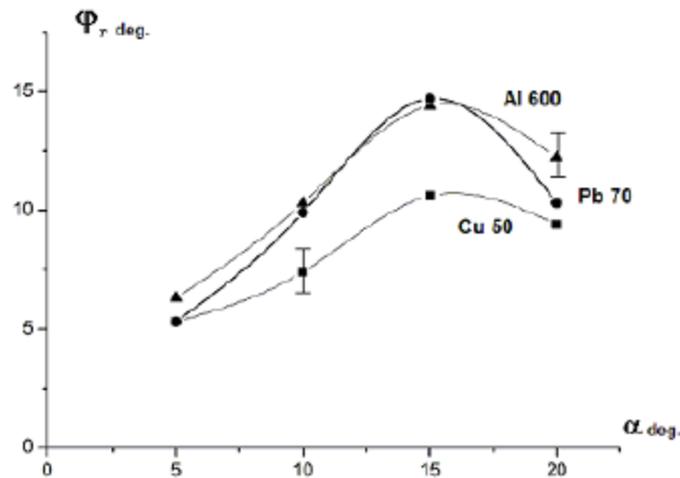


Figure 5: Angle of reflection of the trajectory  $\phi_r$  versus the angle of injection  $\alpha$ . 50  $\mu\text{m}$  copper, 600  $\mu\text{m}$  aluminum and 70  $\mu\text{m}$  lead foils. Notes for curves indicate the foils materials and their thicknesses in microns.

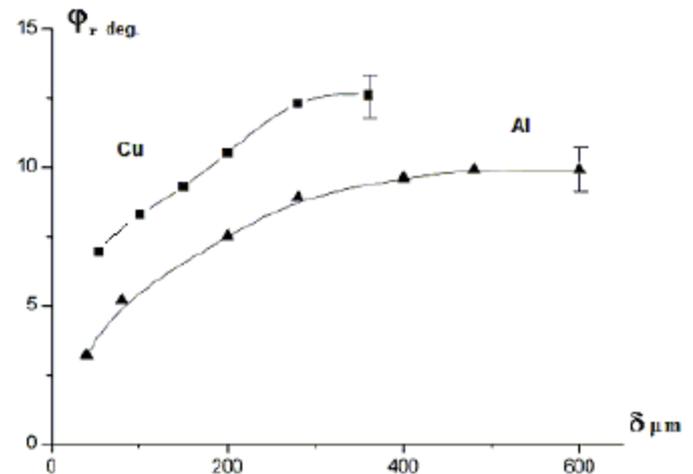


Figure 6: Angle of reflection of the trajectory  $\phi_r$  versus the foil thickness  $\delta$ .  $\alpha = 10^\circ$ . Copper and aluminum foils.

The experimental data indicate that the intensity and direction of motion of the refracted and reflected beams can be changed by modulating the thickness of the target or the angle at which the plane of the target is intersected.

## 12) Охлаждение пучков частиц в накопителях

---

(слайды Е.Г.Бессонова)

To date, five main methods to increase the phase-space density of circulating beams in storage rings are operational:

- 1) cooling of e+e- -beams by synchrotron radiation (1946),
- 2) cooling of proton and ion beams by electron beams (1966),
- 3) stochastic cooling of (anti-)protons and ions (1972),
- 4) cooling of special ions by laser light (1993),
- 5) ionization cooling of muons (1994), is under intense development.

New cooling techniques are developed:

- 1) optical stochastic cooling of (anti-) protons, ions and muons (1993),
- 2) transit time optical stochastic cooling (1994),
- 3) enhanced optical cooling of e-, ion, &  $\mu$  - beams (screen, UK, 1/2)
- 4) broad band laser cooling of ion beams,
- 5) coherent electron cooling of ion beams,
- 6) a method of delivering of a monochromatic electron beam to the LHC interaction point using **broad band laser cooling**,
- 7) fast broad band laser cooling of ion beams,
- 8) fast broad band laser cooling of long lived ion beams.

# Оптические методы охлаждения пучков заряженных частиц

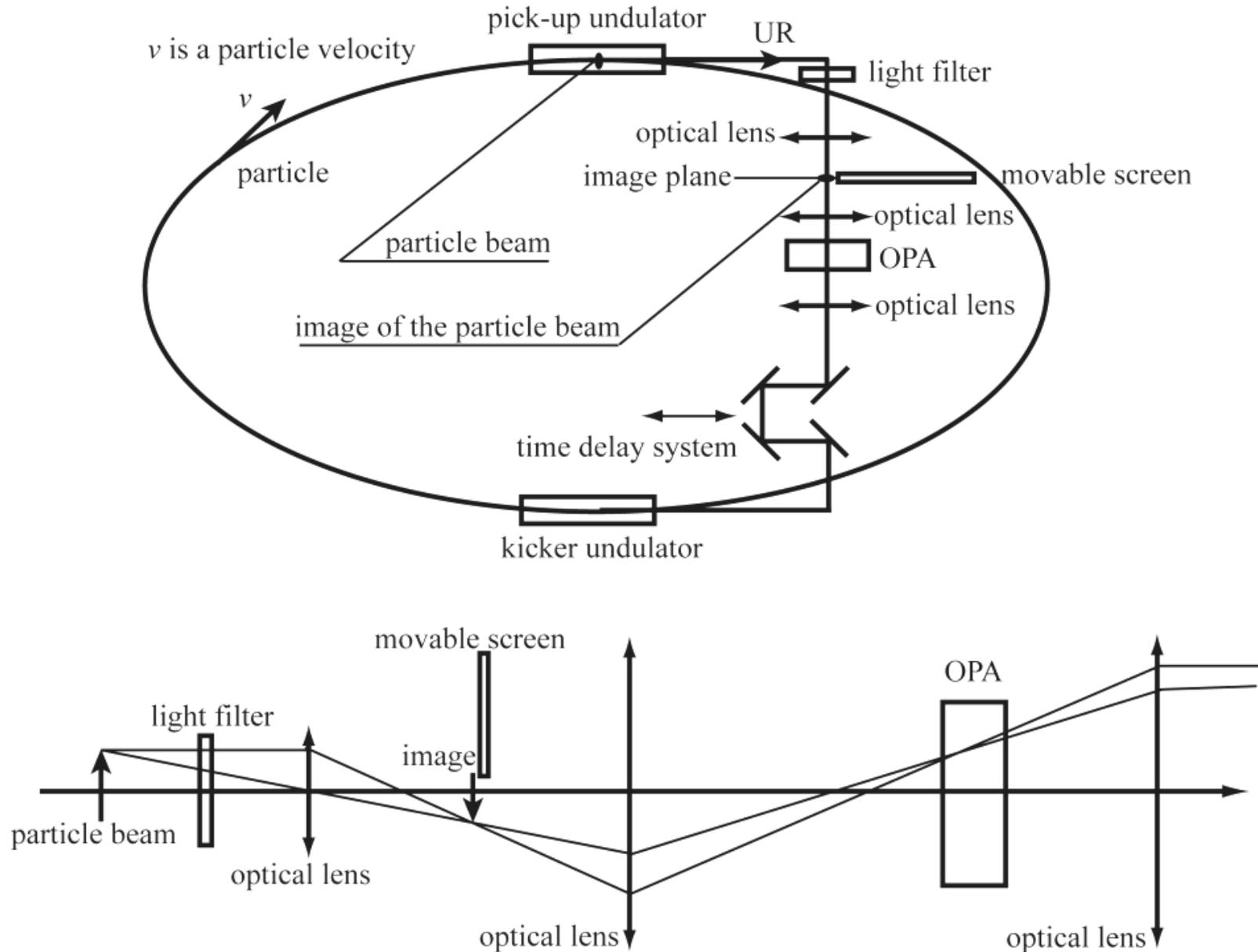


Рис 1: Схема ОО пучка частиц (а) и её развернутая оптическая схема (б)

# **OPTICAL STOCHASTIC COOLING METHOD IN APPLICATION TO BEAMS OF CHARGED PARTICLES**

E.G. Bessonov (FIAN, Moscow, Russian Federation),  
A.A. Mikhailichenko (Cornell University, CLASSE, Ithaca, NY 14853, U.S.A.)

## **ANNOTATION**

We discuss the Optical Stochastic Cooling (OSC) method in applications to the beams of charged particles, circulating in accelerators and storage rings. In this publication we concentrated on various OSC schemes in a diluted beam approximation, when the heating of selected particle by its neighboring ones could be neglected. Even so, this approximation allows us to identify important features in the beam cooling. In the forthcoming publication, on the basis of approach developed here, we will include effects of heating in the dynamics of cooling.

## 13) Генерация излучения для медицины

---

**Источник излучения для медицинской рентгенографии, основанный на использовании излучения электронов при каналировании в кристаллах.**

Слайды С.М. Полозова (Черенковские чтения-2014).

Ю.А.Башмаков и др. Краткие сообщения по физике (2015), в печати.

Рассмотрено одно из возможных применений излучения релятивистских электронов при каналировании в кристаллах – использование излучения для медицинской визуализации. Рассматривается предлагаемая схема установки, приводятся результаты численного моделирования динамики электронов в кристаллах и процесса генерации излучения, а также результаты расчета дозовых нагрузок.

Предлагаемая схема рентгенографической установки на основе излучения релятивистских электронов в кристалле и поликапиллярной рентгеновской оптики позволяет эффективно генерировать узкополосное излучение в требуемом диапазоне энергии фотонов (30-40 кэВ) и позволяет снизить дозу, получаемую пациентом и медицинским персоналом при проведении процедуры ангиографии более, чем на порядок.

Современные технологии медицинской визуализации требуют использования яркого и квазимонохроматического источника рентгеновского излучения.

Монохроматический источник излучения позволяет получать более качественные изображения. При этом доза, получаемая пациентом, снижается. Например, доза, получаемая пациентом при ангиографии, в 180-240 раз больше, чем при рентгенографии грудной клетки. Также существенна доза, получаемая медицинским персоналом.

При проведении процедуры ангиографии пациенту обычно водится контрастное вещество, чаще всего йодсодержащие, то максимум спектра излучения должен приходиться на энергию около 33 кэВ. При этом для получения изображения необходима небольшая (менее 10 кэВ) полоса спектра, а фотоны с энергией ниже 30 кэВ и выше 40 кэВ должны быть отфильтрованы.

Авторами была предложена компоновочная схема установки для генерации узкополосного спектра рентгеновского излучения, основанной на излучении релятивистских электронов при каналировании в кристаллах и поликапиллярной рентгеновской оптики.

Основными компонентами источника являются: линейный ускоритель электронов, кристаллическая мишень с гониометром, система фильтрации рентгеновского излучения и две нагрузки – одна для пучка электронов, вторая для высокоэнергетического рентгеновского излучения. Ускоренный пучок электронов, проходя через кристалл, генерирует в нем КИ и тормозное излучение. Затем пучок отклоняется магнитной системой на нагрузку для того, чтобы не облучать оптическую систему.

Для снижения интенсивности излучения в верхней части спектра могут применяться различные специальные рентгенооптические компоненты: мозаичные фильтры, логарифмические спиральные отражатели, скользящая рентгеновская оптика и многослойные зеркала, однако их эффективность при энергиях фотонов выше 20 кэВ составляет от долей до единиц процентов. Поэтому для медицинского источника излучения предложено использовать поликапиллярную рентгеновскую оптику, эффективность которой в рассматриваемом диапазоне энергий составляет около 40 %.

# ТРЕБОВАНИЯ К ИСТОЧНИКАМ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Требуемая энергия излучения:

- 15 кэВ - маммография,
- 100-120 кэВ – рентгенография грудной клетки,
- 33 кэВ – ангиография (энергия пика поглощения йодного контрастного вещества)
- Требуемый поток фотонов -  $10^4$  фотонов/(мм<sup>2</sup>·кадр) или  $10^9$  фотонов/кадр (поле до 300х300 мм<sup>2</sup>)



Установка для ангиографии



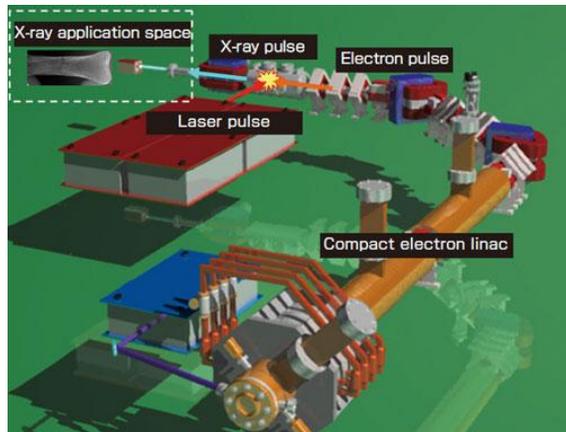
Рентгеновская трубка

# ИСТОЧНИКИ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

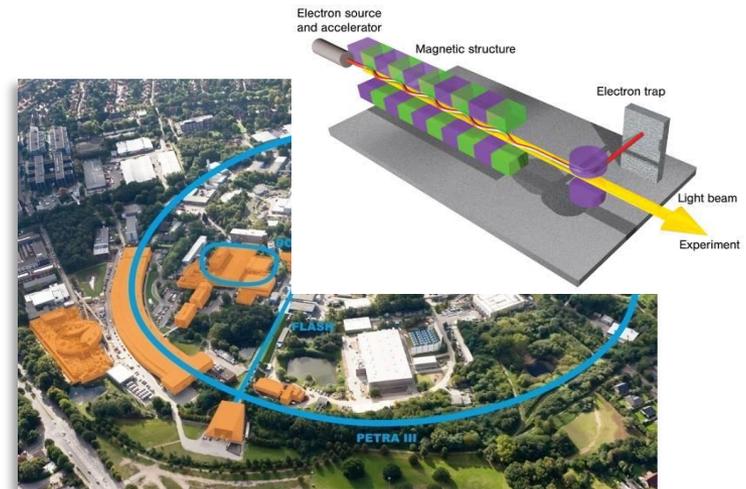
Монохроматическое излучение не может быть получено с использованием обычных рентгеновских трубок

Возможные методы получения монохроматического рентгеновского излучения:

- Синхротронное/ондуляторное излучение
- Комptonовское рассеяние
- Характеристическое излучение
- Излучение электронов в кристаллах

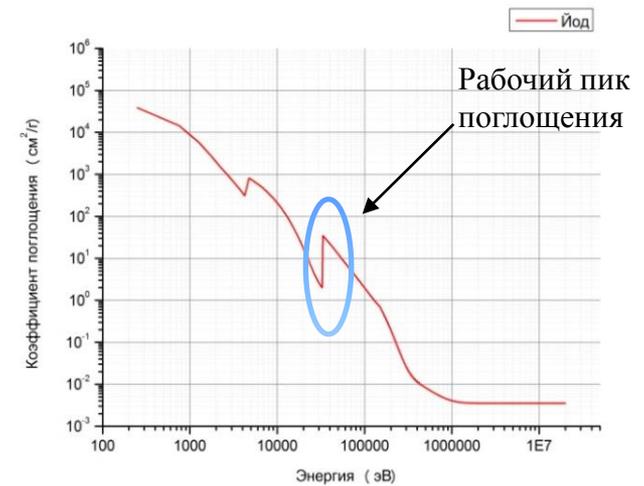
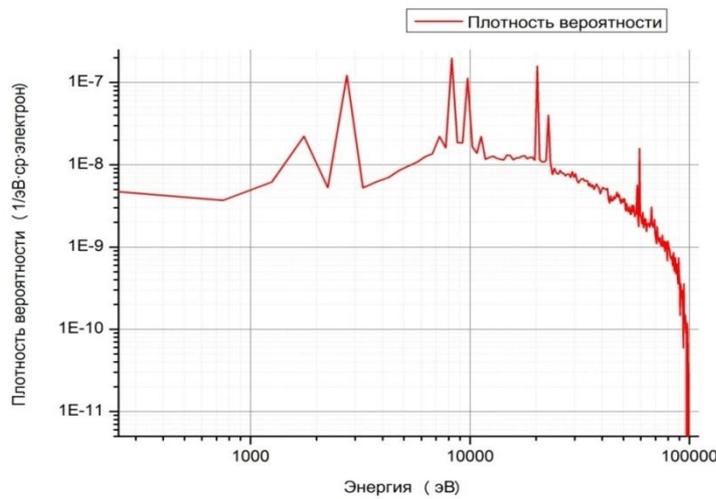


AIST (Комptonовское рассеяние)



X-FEL (ондулятор)

# ИЗЛУЧЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ



Спектр излучения трубки при 100 кэВ  
с анодом из W/Re

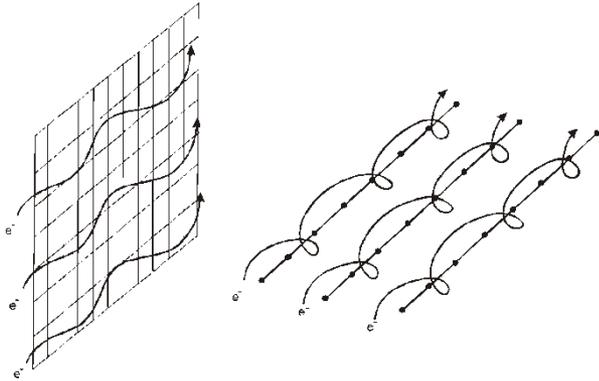
Коэффициент поглощения йода

- Фотоны с энергией  $< 15$  кэВ поглощаются в тканях  $\Rightarrow$  необходима фильтрация (Al/Be фильтры)
- Фотоны с энергиями  $> 40$  кэВ дают основной вклад в дозу и уменьшают контрастность изображения  $\Rightarrow$  необходима специфическая система фильтрации

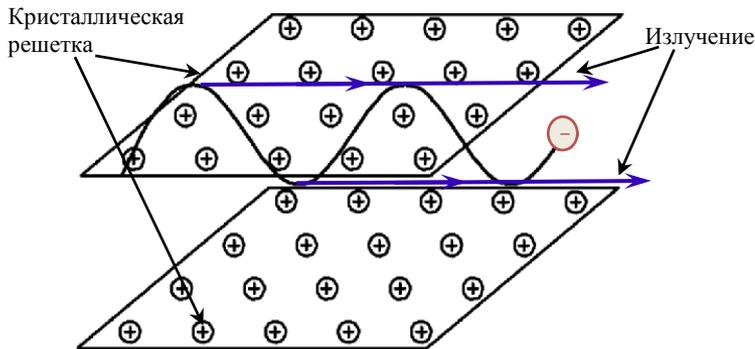
Энергия фотонов, кэВ	Мозаичный кристалл	Спиральный отражатель	Скользкая оптика	Многослойное зеркало	Поликапилляр
17	58	35	10	57	60
33	4,2	0,04	~0	10	40

# КАНАЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ОРИЕНТИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛАХ

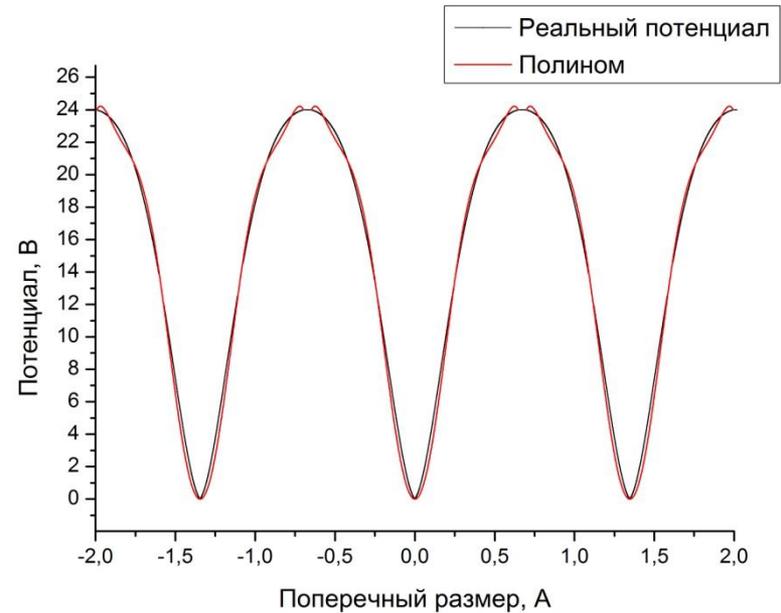
Излучение при каналировании: ЭМИ, возникающее при движении заряженной частицы в кристалле вдоль одной из кристаллографических плоскостей симметрии.



Плоскостное и аксиальное каналирование



Движение электрона между двумя плоскостями



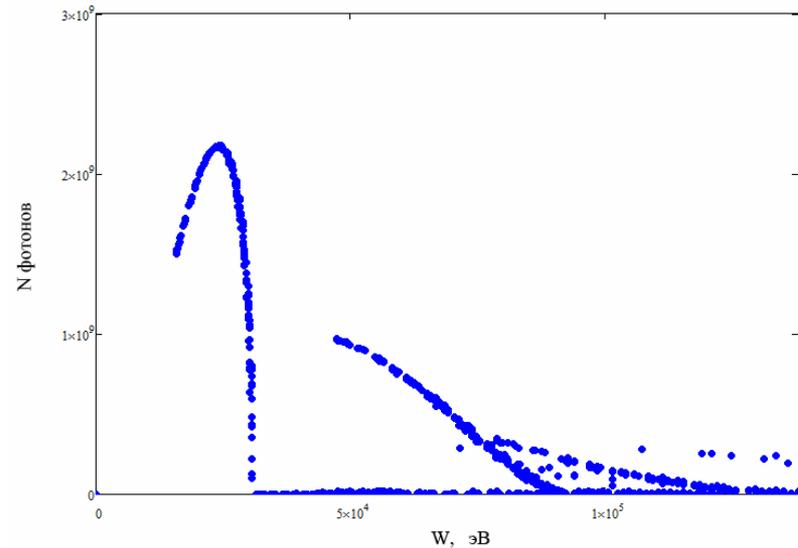
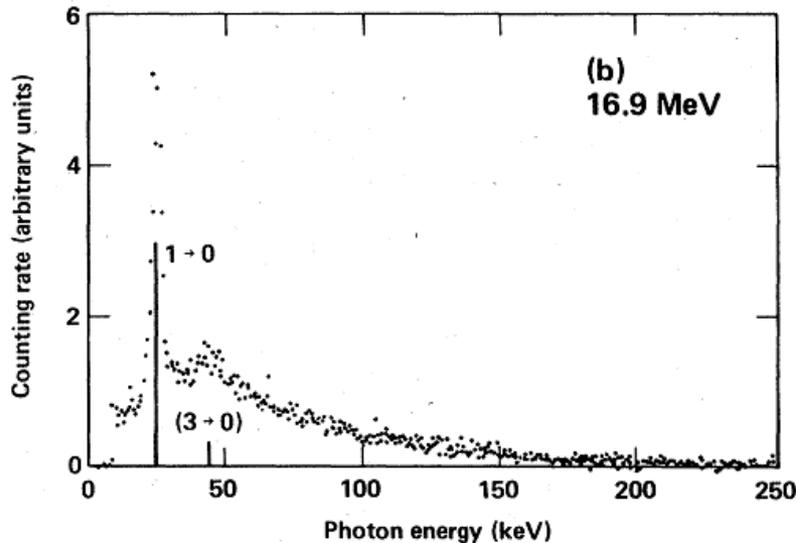
Распределение потенциала вдоль плоскости  $\langle 110 \rangle$  в кристалле алмаза и его полиномиальные аппроксимации

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

## ТЕОРИЯ

- Линдхард Й. Влияние кристаллической решетки на движение быстрых заряженных частиц // УФН 99 с. 249-296 (1969)
- Алферов Д.Ф., Башмаков Ю.А., Черенков П.А. Излучение релятивистских электронов в магнитном ондуляторе // УФН 157 с. 389–436 (1989).
- Bashmakov Yu.A., Bessonov E.G., On certain features of particle radiation in natural undulators-crystals, Rad. Eff. 1982. V. 66, p. 85-94

## ЭКСПЕРИМЕНТ



Экспериментальный спектр КИ\* и спектр BEAMDULAC-CR

\*R.K. Kein, J.O. Kephert, R.H. Pantell, et al. Electron channeling radiation from diamond / Physical review B vol. 31, N 1, 1985, p. 68 – 92

# КАНАЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛЕ АЛМАЗА

$$\Omega_n = \sqrt{2} \cdot \Omega_0 \quad \Omega_0 = \frac{c}{d} \sqrt{\frac{2eU_0}{\varepsilon}}$$

$$\omega_k = \frac{2k\Omega\gamma^2}{1+\theta^2\gamma^2} \quad P = \frac{2e^2 \langle E^2 \rangle \gamma^2}{3mc^2}$$

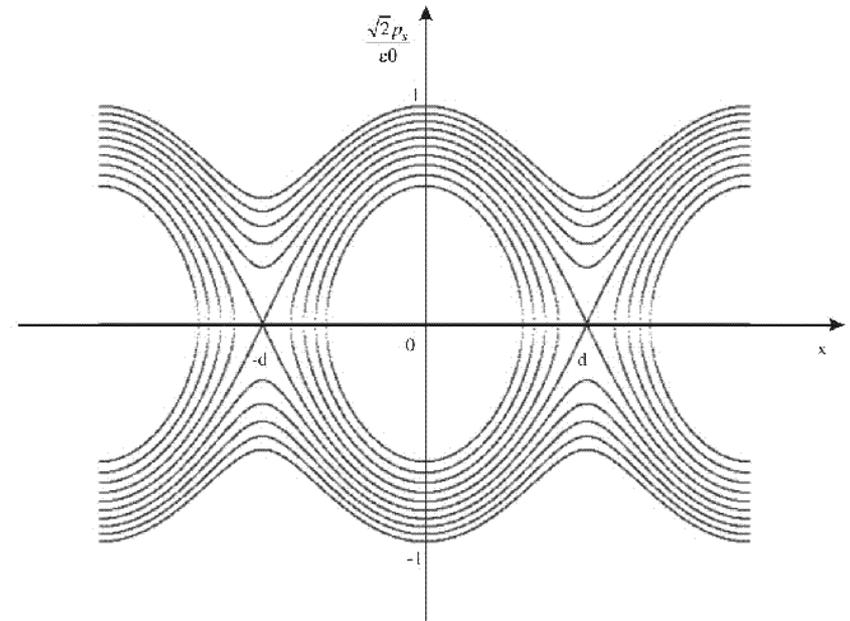
$$\frac{d\gamma}{dt} = 0,$$

$$\frac{dz}{dt} = v_z,$$

$$\frac{dv_x}{dt} = -e \frac{\partial U(x)}{\partial x}, \quad U(x) = U_0 \sum_{n=0}^N a_n \left( \frac{x}{d} \right)^n$$

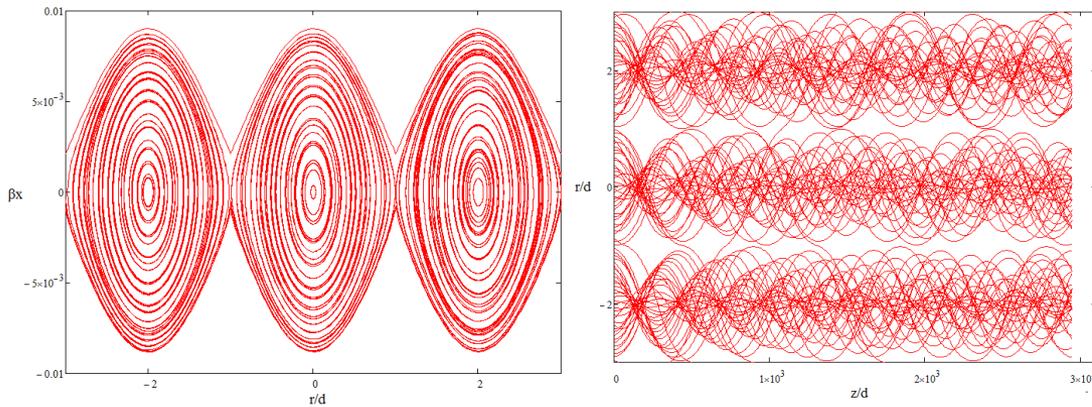
$$\frac{dx}{dt} = v_x.$$

$$|x| < d$$

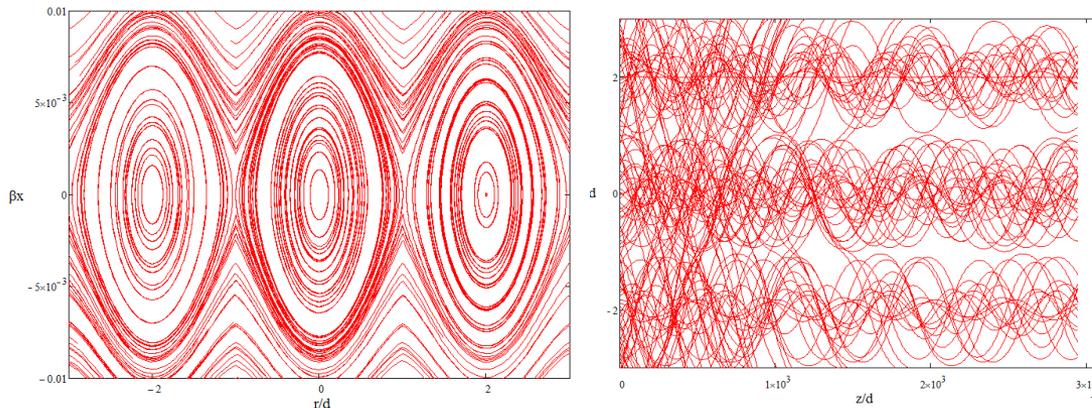


Yu.A. Bashmakov, E.G. Bessonov  
// Rad. Eff. 66. 1982. P. 85.

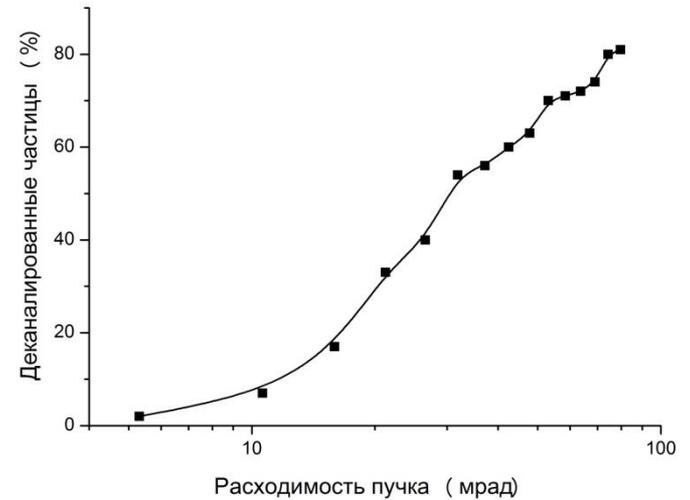
# КАНАЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В КРИСТАЛЛЕ АЛМАЗА



Фазовые траектории и зависимость поперечных координат частиц от продольной координаты (энергия 21 МэВ, расходимость 10 мрад,  $\delta E/E=1\%$ )



Фазовые траектории и зависимость поперечных координат частиц от продольной координаты (энергия 23 МэВ, расходимость 30 мрад,  $\delta E/E=1\%$ )

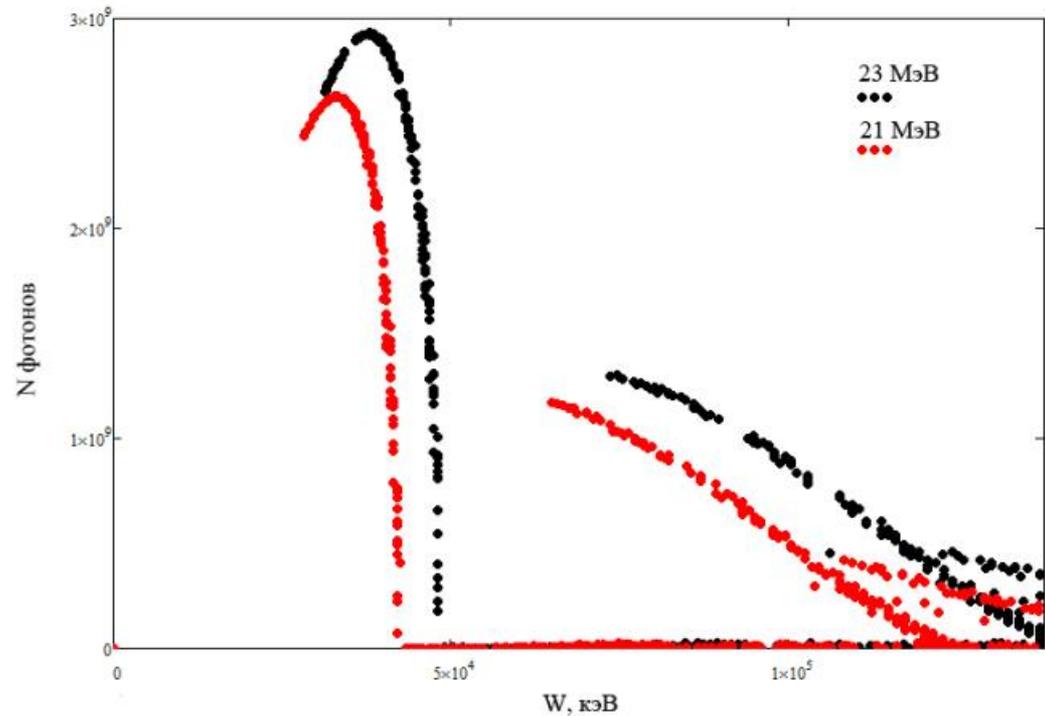


Зависимость деканализованных частиц от расходимости пучка электронов (23 МэВ)

# ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ

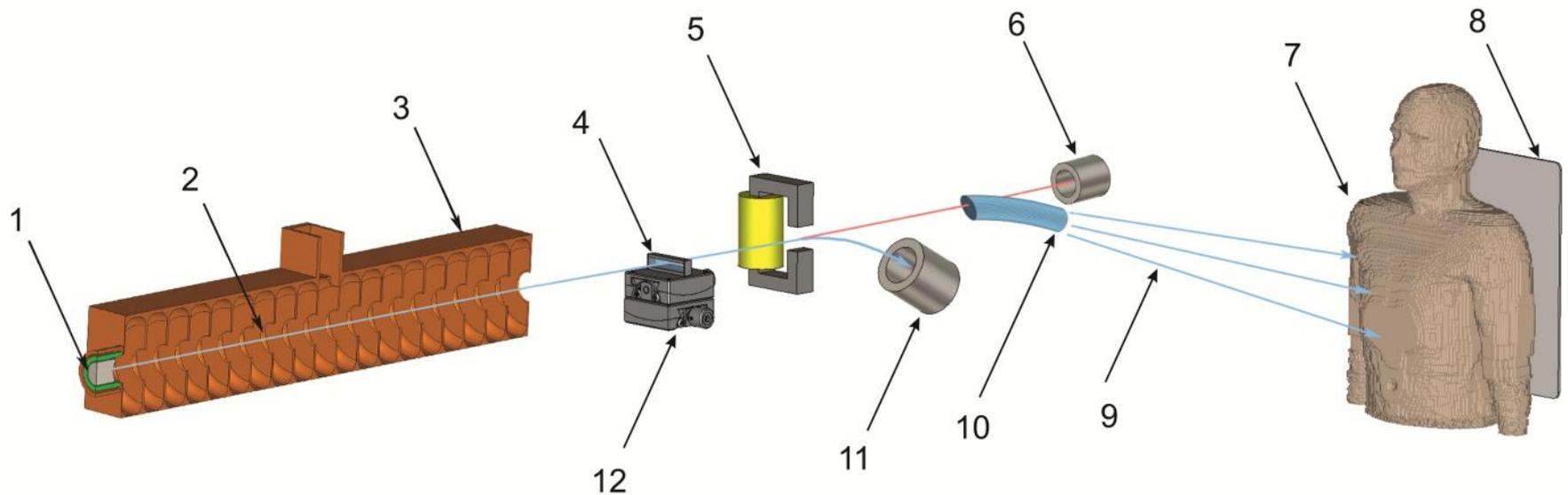
Излучение при каналировании представляет собой конус с углом раствора  $\Theta \sim \gamma^{-1}$

Спектр основной гармоники КИ:  
 $33 \pm 2,4$  кэВ (21 МэВ)  
 $37 \pm 2,9$  кэВ (23 МэВ)



Спектры излучения при каналировании при токе пучка 10 мА, импульс 10 мкс

# ИСТОЧНИК КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕНТГЕНОГРАФИИ



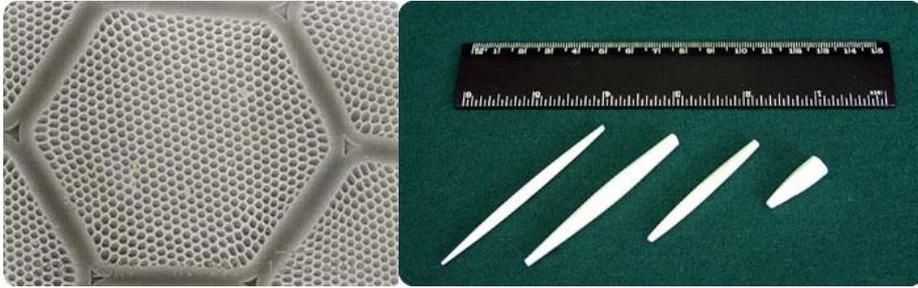
Принципиальная схема установки для генерации рентгеновского излучения

- 1 – источник электронов
- 2 – траектория пучка электронов
- 3 – линейный ускоритель
- 4 – кристаллическая мишень
- 5 – отклоняющий магнит
- 6 – нагрузка для высокоэнергетического излучения
- 7 – пациент

- 8 – детектор
- 9 – квазимонохроматическое рентгеновское излучение
- 10 – рентгеновская оптика
- 11 – нагрузка для пучка электронов
- 12 – гониометр с фиксатором кристаллической мишени

# РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА И ОТКЛОНЯЮЩИЙ МАГНИТ

## РЕНТГЕНОВСКАЯ ОПТИКА

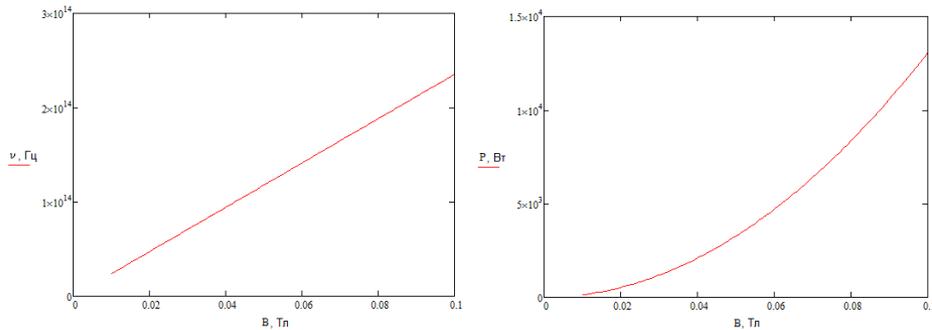


Рентгеновская поликапиллярная линза\*

- Энергия излучения:  $<40$  кэВ
- Угол захвата: 2 градуса
- Длина линзы: 10 см
- Угол поворота излучения: 10-15 градусов
- Радиус капилляра: 1 мкм
- КПД линзы: 40 %

\*Kumakhov M.A., Komarov F.F. Multiple reflection from surface X-ray optics // Physics reports (Review section of physics letters) 1991, No. 5 (1990) 289-350. North Holland

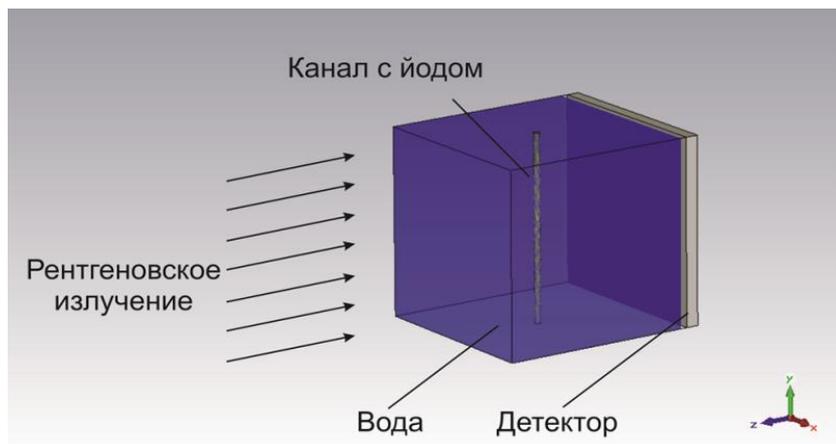
## ОТКЛОНЯЮЩИЙ МАГНИТ



Зависимость частоты (слева) и мощности (справа)  
синхротронного излучения от индукции  
отклоняющего поля

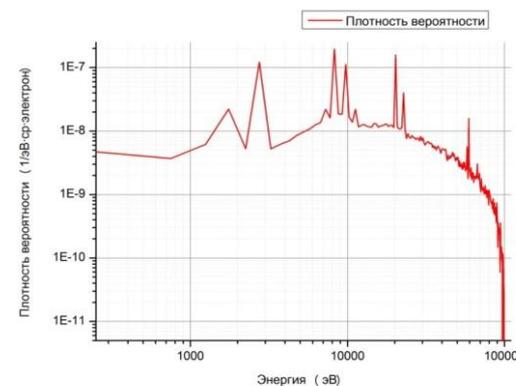
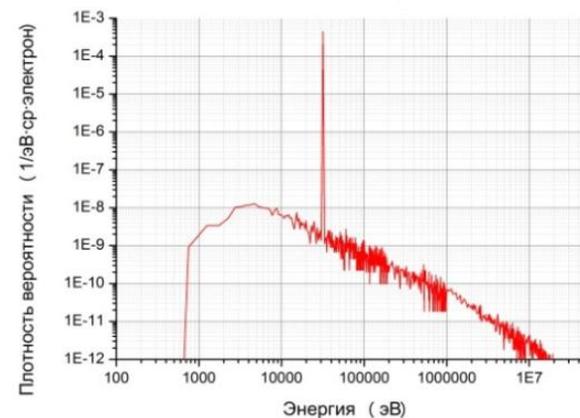
- Размеры полюсов: 5x5 см
- Угол поворота пучка: 45 градусов (23 МэВ)
- Индукция магнитного поля: 24 мТл
- Частота синхротронного излучения:  
 $5,6 \cdot 10^{13}$  Гц
- Мощность излучения: 10,7 Вт (100 мА)

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК



Модель тканеэквивалентного фантома

- Материал – вода
- Размеры – 30x30x30 см
- Контрастное вещество – раствор йода 10%
- Диаметр канала с контрастом – 1 мм



Спектры КИ и рентгеновской трубки с учетом тормозного излучения, рассчитанного в RuPENELoPE

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК

Дозовые нагрузки и контрастность источников при пересчете на  $10^{12}$  электронов в сгустке

Спектр излучения	Число фотонов	Энергия излучения, Дж	Поглощенная доза, Зв	Контрастность
Источник КИ, 21 МэВ				
Полный спектр	$6,40 \cdot 10^{11}$	0,13	$2,30 \cdot 10^{-3}$	-
15 кэВ – 21 МэВ	$6,40 \cdot 10^{11}$	0,13	$2,30 \cdot 10^{-3}$	-
<b>15 – 40 кэВ (оптика)</b>	$2,28 \cdot 10^{11}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$4,29 \cdot 10^{-5}$	1,11
Источник КИ, 23 МэВ				
Полный спектр	$1,01 \cdot 10^{12}$	0,13	$2,40 \cdot 10^{-3}$	-
15 кэВ – 23 МэВ	$1,01 \cdot 10^{12}$	0,13	$2,40 \cdot 10^{-3}$	-
<b>15 – 40 кэВ (оптика)</b>	$3,78 \cdot 10^{11}$	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$8,12 \cdot 10^{-5}$	4,10
Рентгеновская трубка				
Полный спектр	$2,67 \cdot 10^{10}$	$1,58 \cdot 10^{-4}$	$5,84 \cdot 10^{-6}$	-
<b>15 кэВ – 100 кэВ</b>	$2,22 \cdot 10^{10}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$5,60 \cdot 10^{-6}$	1,38

## 14) Генерация излучения-2

---

(слайды В.Г.Куракина)

### **ЛАБОРАТОРИЯ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И РАДИОФИЗИКИ**

Исследована устойчивость режима рекуперации электронного пучка в автогенераторе обратных комптоновских фотонов на основе сверхпроводящего электронного ускорителя-рекуператора.

Предложена концепция комплексного шунтового импеданса для аналитического исследования процессов в системе пучок – резонатор в резонансных ускорителях. (Нестационарная динамика, устойчивость сильноточного пучка). В.Г.Куракин, П.В.Куракин.

Проработана магнитная оптика в низкоэнергетическом тракте электронного пучка микротрона (полный ахроматизм на основе ахроматизма всех поворотов).

# ОПТИКА АВТОГЕНЕРАТОРА ОБРАТНЫХ КОМПТОНОВСКИХ ФОТОНОВ

В.Г.Куракин

20 Международный семинар по оптике пучков и оптимизации,  
Санкт Петербург, 30 июня -4 июля 2014

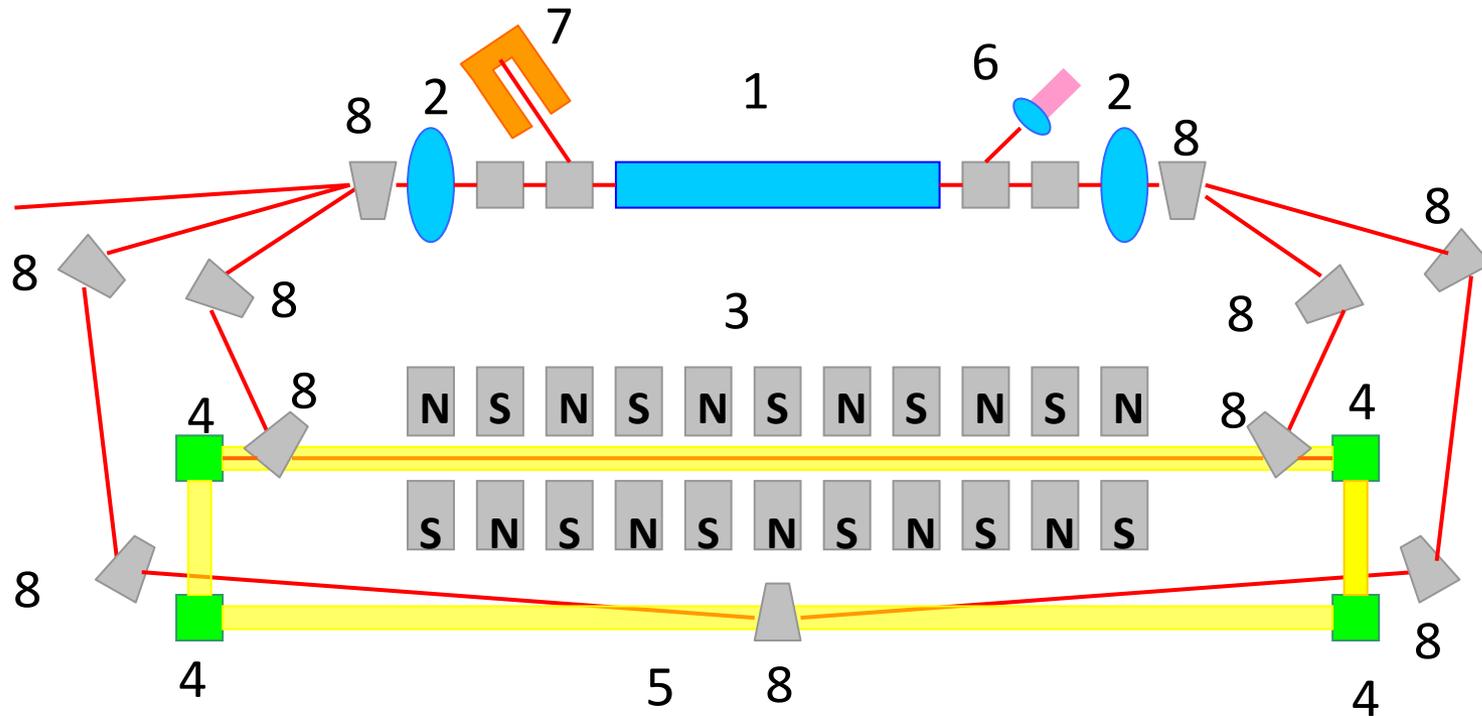


Fig. 1. Back Compton light source on the basis of rf superconducting linac and beam splitting technique. 1- rf linac, 2 – rf cavity, 3- FEL undulator, 4 – traveling wave resonator mirror, 5 – beam-light interaction area, 6 – injector, 7 – beam dump, 8 - bending magnet.

## **Cavity Excitation Equations in Terms of External Parameters**

Vyacheslav G. Kurakin

International Seminar BDO 2014, Saint Petersburg, June 30 – July 4 2014

## **Complex Shunt Impedance and Beam-RF Cavity Interaction**

Vyacheslav G. Kurakin

XXIV Russian Particle Accelerator Conference RuPAC 2014

Obninsk October 4-10/

## **О КОНЦЕПЦИИ КОМПЛЕКСНОГО ШУНТОВОГО ИМПЕДАНСА В ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ УСКОРЯЮЩИХ РЕЗОНАТОРОВ**

Международная сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН  
«Физика фундаментальных взаимодействий».

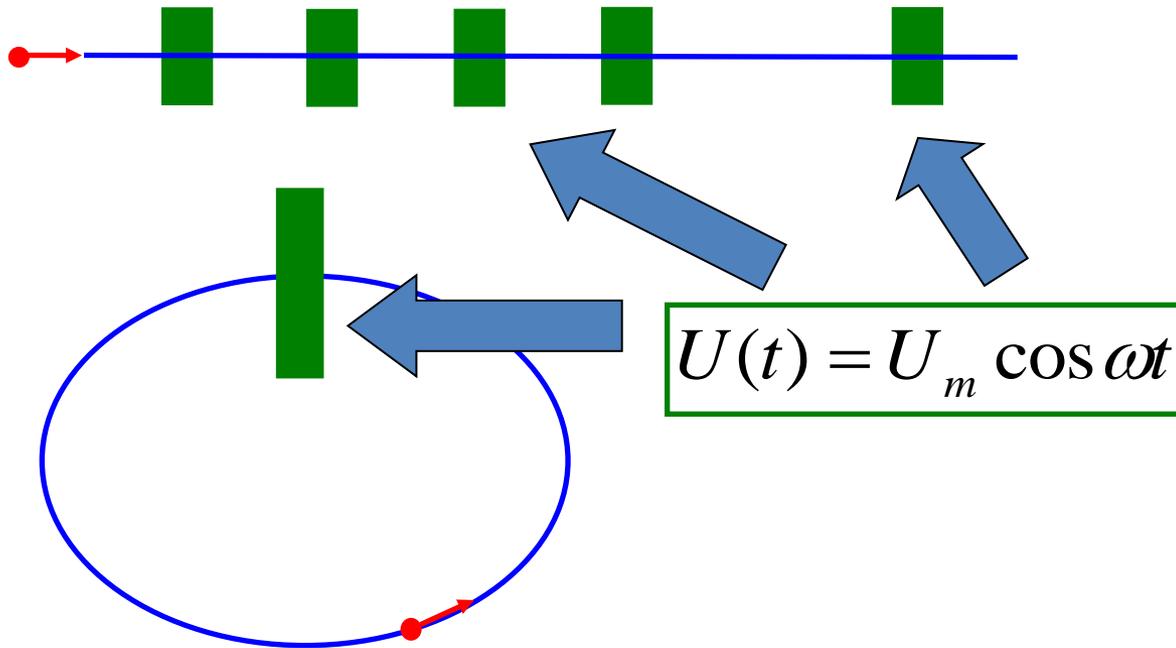
Москва, МИФИ, 17-21 ноября 2014 г.

## **Complex Shunt Impedance Concept in Accelerating Cavities Electrodynamics**

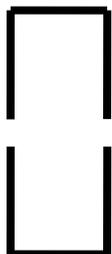
The Talk at the International Symposium “70-th Anniversary of the  
discovery of phase stability principle”

Dubna, November 13, 2014

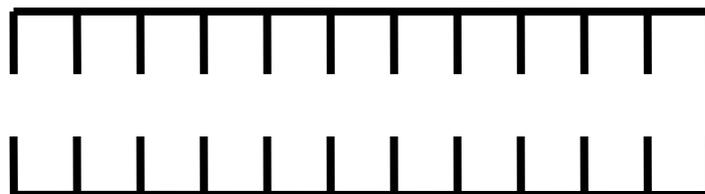




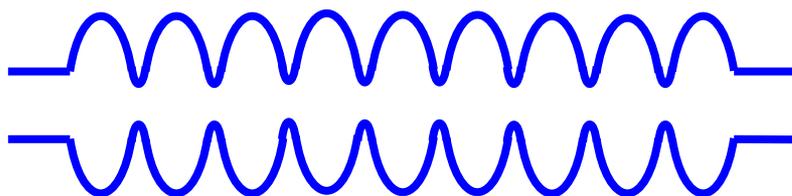
Ускорение зарядов в резонансном ускорителе



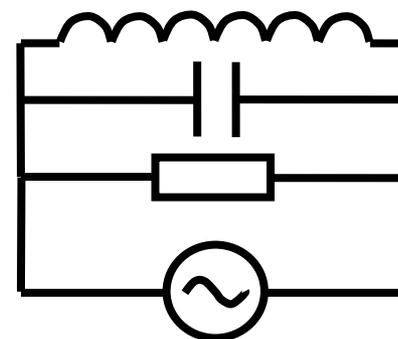
Цилиндрический резонатор



Диафрагмированный волновод



Сверхпроводящий резонатор TESLA



Разложение по собственным функциям резонатора

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \sum_{\lambda=1}^{\infty} g_{\lambda}(t) \vec{A}_{\lambda}(\vec{r}) \quad \Downarrow \quad \vec{A}_{\lambda} |_{\Sigma} = 0$$

$$\Delta \vec{A}_{\lambda}(\vec{r}) + k_{\lambda}^2 \vec{A}_{\lambda}(\vec{r}) = 0 \quad k_{\lambda} = \frac{\omega_{\lambda}}{c}$$

$$\frac{d^2 g_{\lambda}(t)}{dt^2} + \omega_{\lambda}^2 g_{\lambda}(t) = \int_V \vec{j}(\vec{r}, t) \vec{A}_{\lambda}(\vec{r}) dV \quad \int_V A_{\lambda}^2 dV = \mu_0 c^2 = 1/\epsilon_0$$


---

$$g(t) = \frac{1}{\omega} \int_0^{L/v} J(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau = \frac{\sin \omega t}{\omega} J_1 - \frac{\cos \omega t}{\omega} J_2$$

$$J_1 = \int_0^{L/v} J(\tau) \cos \omega \tau d\tau$$

$$J_2 = \int_0^{L/v} J(\tau) \sin \omega \tau d\tau$$

Для сравнения – поле излучения TM<sub>01</sub> заряда в диафрагмированном волноводе. E – продольная компонента электрического поля. Предполагается, что заряд влетает в волновод в момент t=0.

$$E = -\frac{\alpha v_{gr} R}{1 - \frac{v_{gr}}{c}} q \exp i(hz - \omega t) \exp[-\alpha_1(ct - z)][\eta(ct - z) - \eta(v_{gr}t - z)]$$

$$\alpha_1 = \alpha \frac{v_{gr}}{c - v_{gr}} \quad h = \frac{\omega}{c} \quad R = -\frac{E^2}{\frac{dP}{dz}} = \frac{E^2}{2\alpha P}$$


---

Вводя понятие напряжения на эквивалентном ускоряющем зазоре как выраженный в единицах напряжения прирост энергии заряженной частицы при пролёте ускоряющей структуры, можно показать

$$U = -\pi I \frac{R}{Q_0} \exp(-\omega t / 2Q) \cos \omega t$$

$$g(t) = -\frac{D}{\omega} \cos(\omega t + \psi) \quad D = \sqrt{J_1^2 + J_2^2} \quad \sin \psi = \frac{J_1}{D}, \cos \psi = \frac{J_2}{D}$$

$$g(t) = -q \sqrt{\frac{R}{2\omega Q_0}} \cos(\omega t + \psi) \quad Z = R \exp(i2\psi)$$

$$g(t) = -\operatorname{Re} q \sqrt{\frac{Z}{2\omega Q_0}} \exp i\omega t$$

Путём решение уравнений электродинамики показано, что наводимое зарядом напряжение на резонаторе может быть выражено через внешние параметры резонатора – шунтовое сопротивление, добротность, коэффициент связи. Этим самым устанавливается соответствие между электродинамическим и схемным подходом при описании процесса взаимодействия пучка и ускоряющего резонатора. Для детального описание поля в резонаторе этих параметров недостаточно, и предложена концепция комплексного импеданса резонатора. Модуль комплексного шунтового импеданса совпадает с общепринятым шунтовым сопротивлением резонатора.



Многоцелевой излучательный комплекс ФИАН

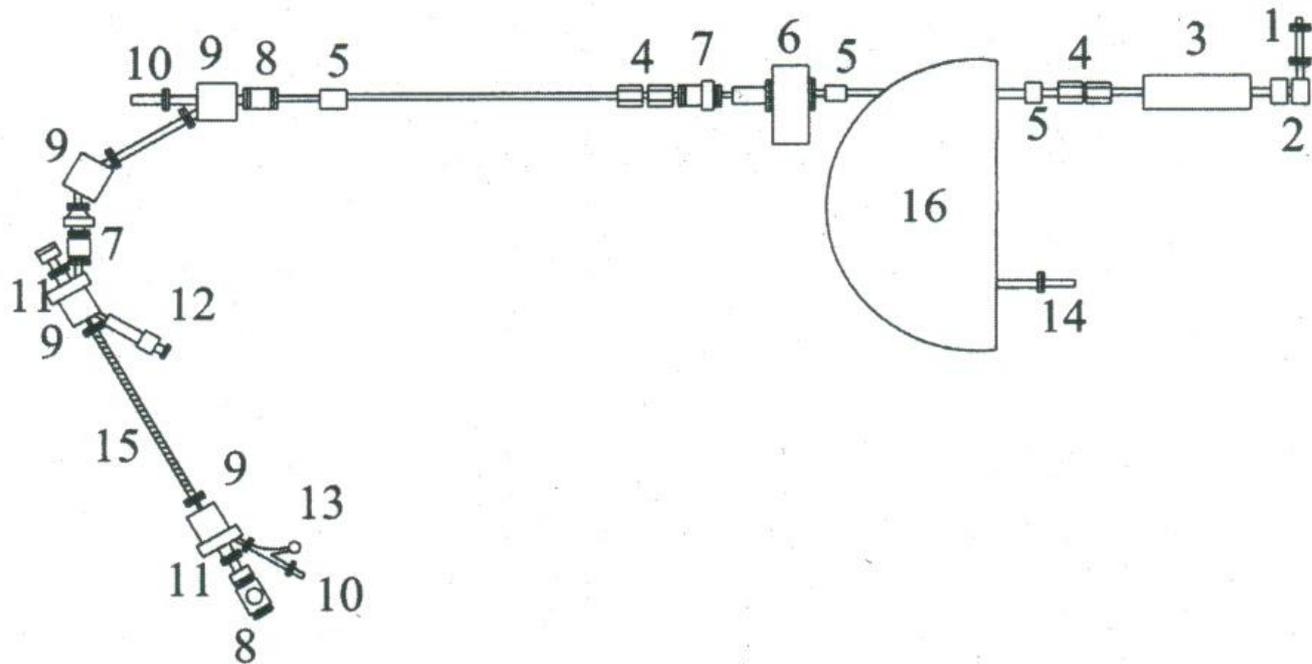


Схема многоцелевого излучательного комплекса ФИАН. 1-Эл. пушка, 2-инфлектор, 3-ЛИНАС, 4-квадр дублет, 5-корректор, 6-вак. затвор, 7-токовый монитор, 8-люм. экран, 9-зеркльный контейнер, 10-ЦФ, 11-окно, 12-привод зеркальной системы наблюдения, 13-привод системы мониторингования электронного пучка в ондуляторе

## 15) Узконаправленные $\gamma$ -пучки

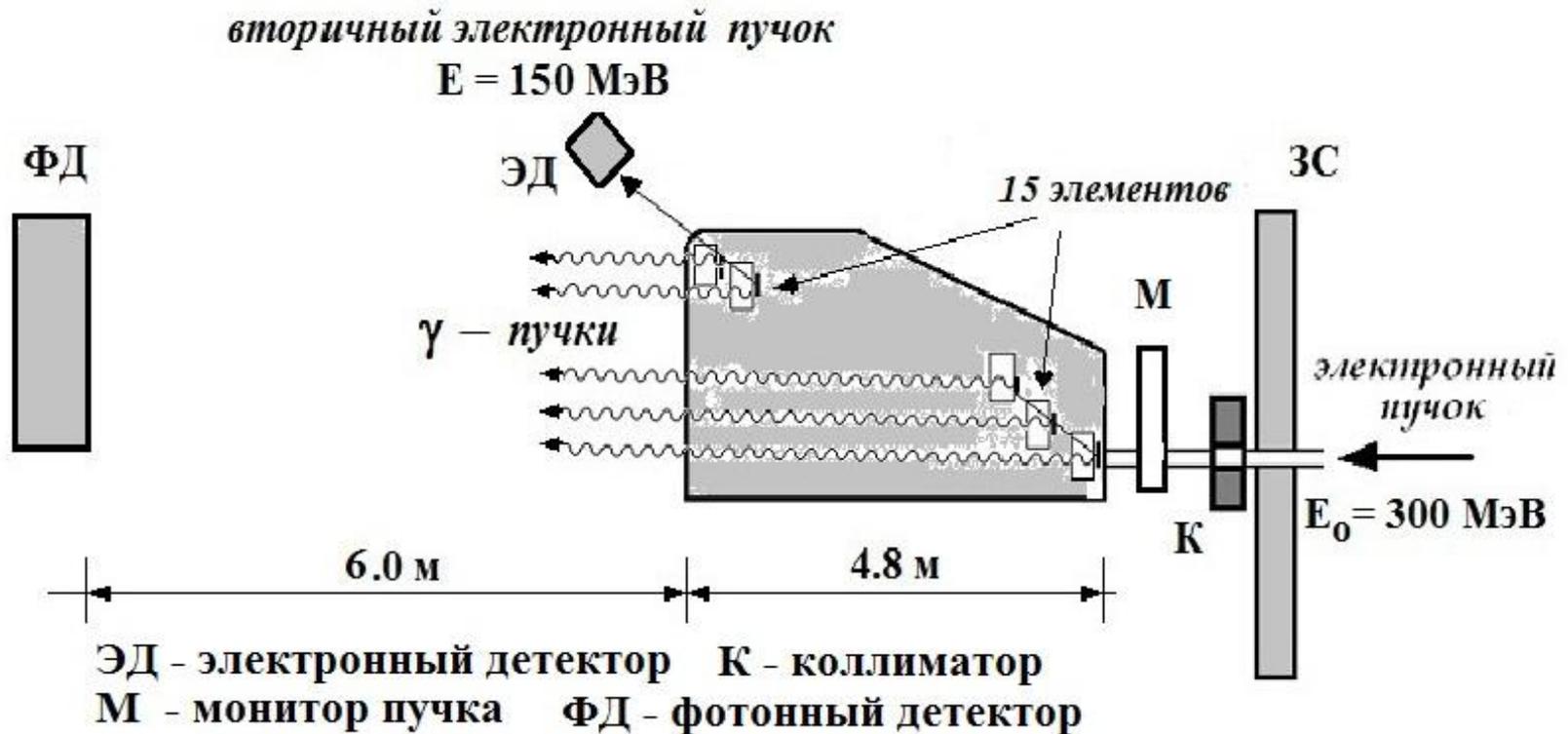


Рисунок 2. Схема расположения оборудования экспериментальной установки на пучке: ЗС – защитная стенка, К – свинцовый коллиматор, М – монитор электронного пучка, ИС – система 15-ти излучателей (радиатор-магнит), ФД – детектор вторичных фотонов, ЭД – детектор вторичного пучка электронов.

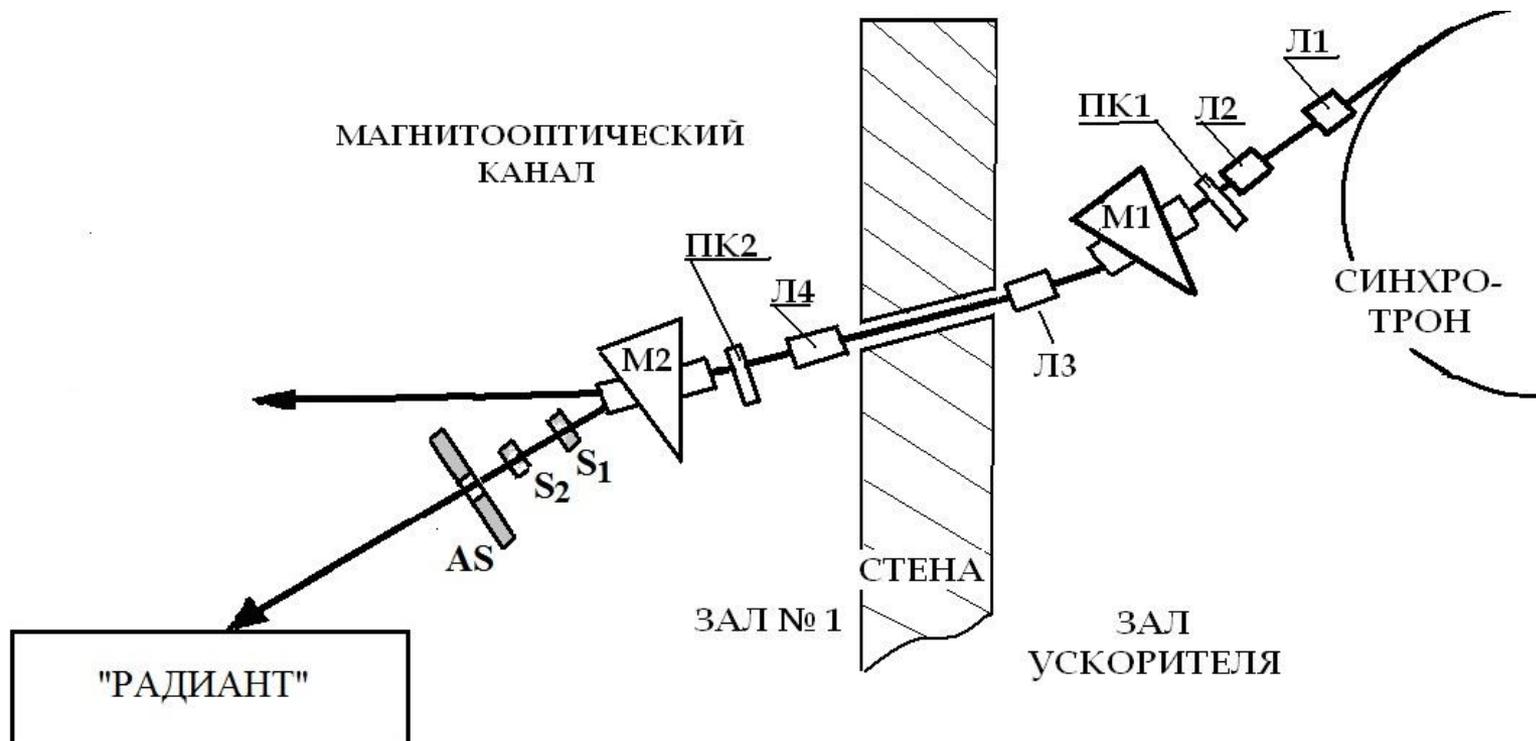


Рисунок 1. Схема магнитооптического канала для вывода электронного пучка. В головной части канала, находящейся в зале ускорителя, устанавливается пропорциональная камера для диагностики пучка. В экспериментальном зале № 1 монтируется электромагнит М2 с вакуумной камерой для разводки пучка на две установки, устанавливаются пучковые пропорциональные камеры.



В период сентябрь 2013 – февраль 2014 (после выхода из строя трансформатора в системе питания синхротрона) работы проводились при энергии 170 МэВ. Параметры пучка, поступающего на вход установки составили следующие величины :

$$N_e = S1 \times S2 \times (AS)_{anti} \leq 10^4 ; \quad \sigma_{e_x} = \sigma_{e_y} = 10 \text{ мм} ; \\ T_e \text{ (растяжка электронного пучка)} \sim 1.5 \text{ мксек}$$

В процессе настройки удалось провести электронный пучок через 3 звена излучательной системы. К сожалению, из-за значительных потерь пучка на каждом этапе не удалось получить большего числа поворотов электронного пучка. Регистрацию пучка вторичных фотонов (спектр без измерения энергии) оказалось возможным провести только после поворота электронов в первом звене излучателя .

## Исследование радиационной стойкости электронных схем

Для исследования радиационной стойкости электронных элементов в радиационных полях, генерируемых фотонами с энергией в десятки МэВ и величиной дозы  $\sim 10$  Грей/час был оборудован стенд на тормозном пучке на расстоянии 400 см от внутренней мишени синхротрона.

Измерения показали, что при сбросе на мишень электронов с энергией  $\sim 100$  МэВ доза составила  $\sim 2$  Грей/час. Это связано с увеличением углового разброса фотонов в тормозном пучке при уменьшении ускоренных электронов на внутренней мишени.

Используя метод принудительного сброса ускоренного пучка на мишень (локальным искривлением орбиты электронов изготовленной дополнительной обмоткой в магните синхротрона) удалось получить при энергии ускоренных электронов 240 МэВ и интенсивности  $5 \cdot 10^{11}$  зону равномерного распределения радиации  $10 \times 10$  см<sup>2</sup> в плоскости расположения облучаемых образцов с величиной  $\sim 10$  Грей/час.

Предполагается продолжение работ, но не в роли поставщика услуг, а в роли полноценного участника НИР.

## 16) Фотоядерное детектирование взрывчатых веществ

(слайды А.И.Карева)

Отдел физики высоких энергий ОЯФА ФИАН

Отдел прикладной ядерной физики ОЯФА ФИАН

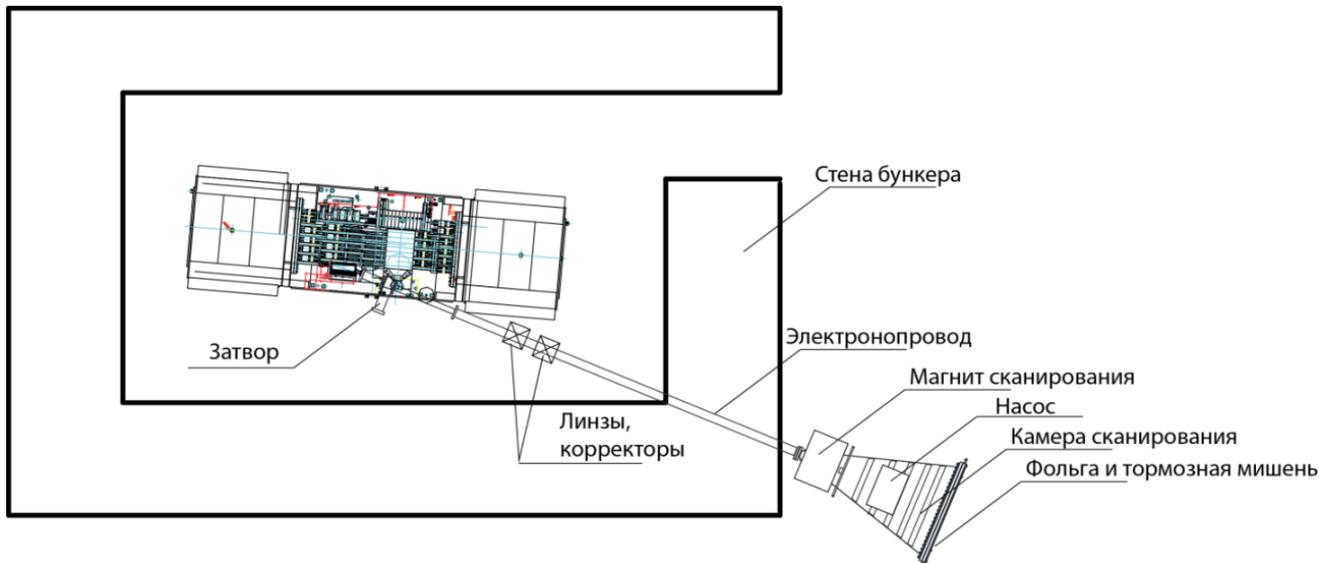
НИИЯФ МГУ

Основные направления работы в 2014 г.

1. Модернизация установки «ДЕМО» для реализации режимов 2D-сканирования и on-line обработки сигналов с черенковских детекторов вторичного излучения.
2. Разработка оборудования для досмотра 20-футовых грузовых контейнеров.

# Модернизация установки «ДЕМО»

## Сканирование электронным пучком



1. Разработана схема сканирования

2. Разработан магнит сканирования, обеспечивающий отклонение электронного пучка на угол  $\pm 15$  градусов.

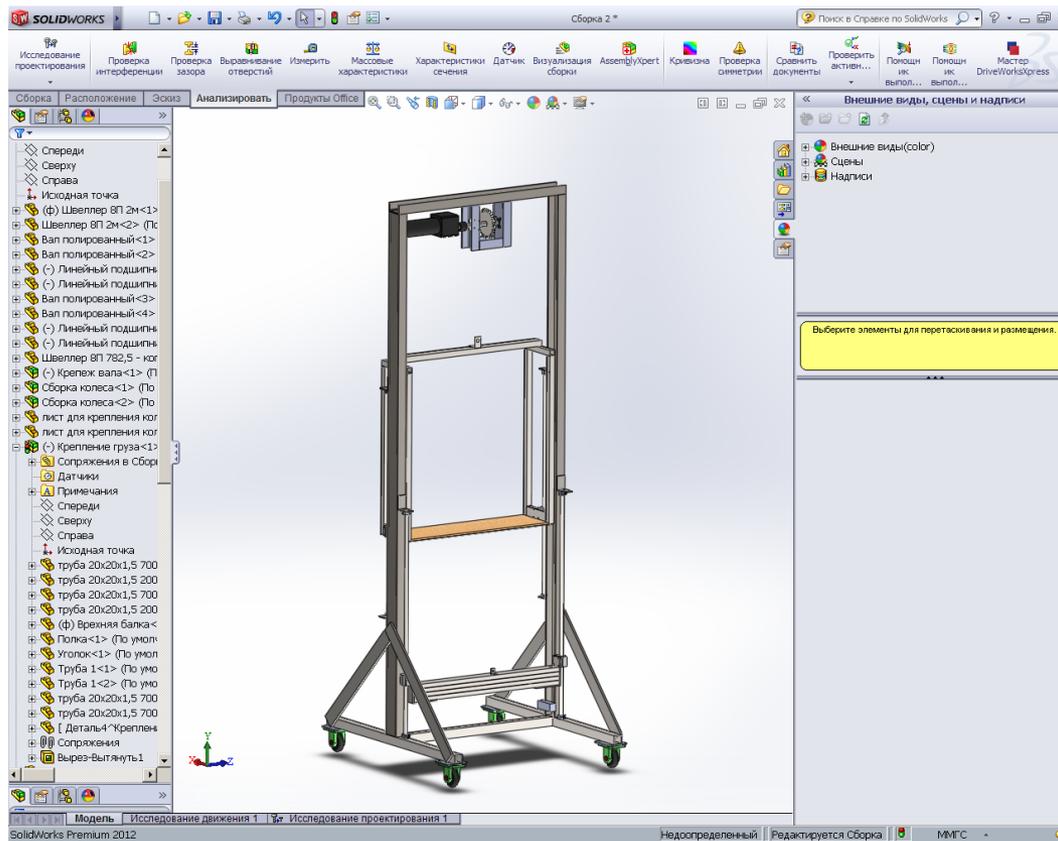


3. Приобретен и испытан программируемый источник питания для магнита сканирования.

На индуктивной нагрузке в 144 мГн ток в 25А нарастает за 200 мс и спадает до 0 за 10мс.

# Модернизация установки «ДЕМО»

## Сканирование за счет механического перемещения объекта



Сконструирована и изготовлена механическая конструкция для перемещения в пучке исследуемых образцов.

# Модернизация установки «ДЕМО»

## Сбор данных и их on-line обработка

### Крейт VME содержит:

**Модули питания ФЭУ**

**Модули формирования сигналов ФЭУ**

**Модули логики отбора**

**Модуль счетчика событий**

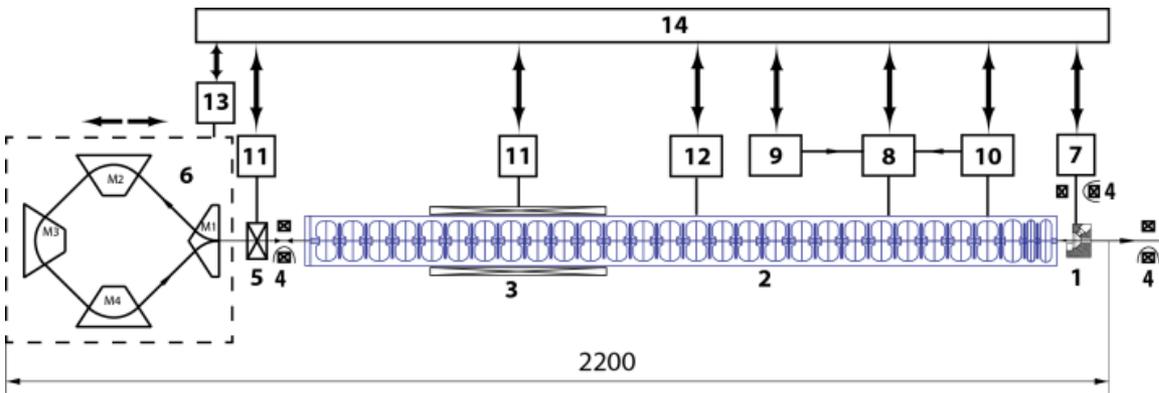
**Модуль регистрации параметров  $\gamma$ -пучка**

Создана установка на основе стандартных блоков наносекундной электроники производства итальянской фирмы CAEN и разработано программное обеспечение для сбора данных с использованием волоконно-оптической связи между установкой и компьютером.

Проведено успешное тестирование установки и программного обеспечения в режиме on line при имитации сигналов от реального пучка сигналами от генератора.

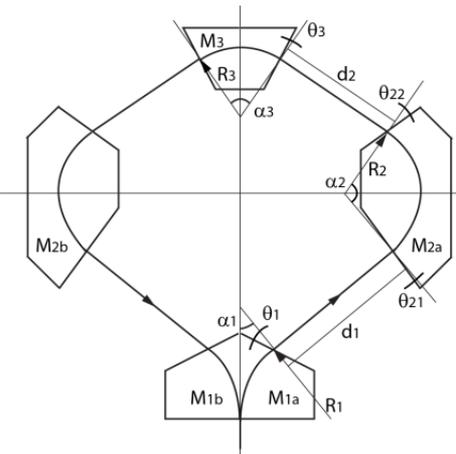
# Разработка оборудования для досмотра 20-футовых контейнеров

## 45 МэВ-ный электронный ускоритель с магнитным зеркалом

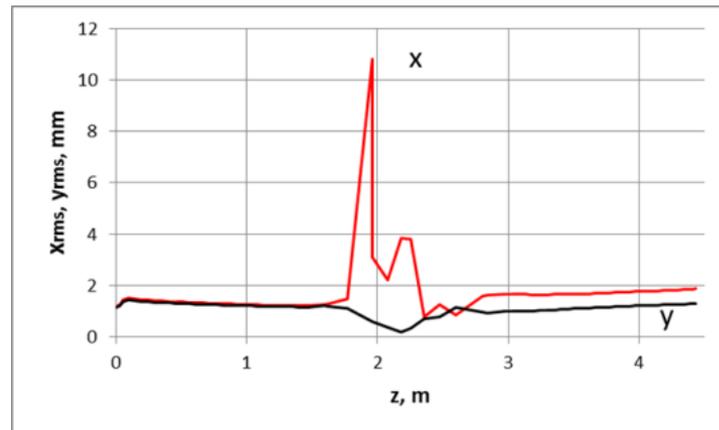


### Accelerator parameters

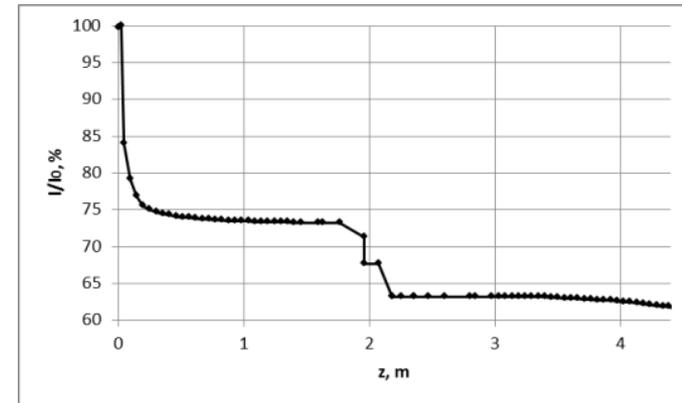
Parameter	Value
Max. beam energy	45 MeV
Max. pulse current	100 mA
Pulse duration	10 $\mu$ s
Max. repetition rate	100 Hz
Operating frequency	2856 MHz
Max. pulsed RF power	10 MW



Notations for magnetic mirror



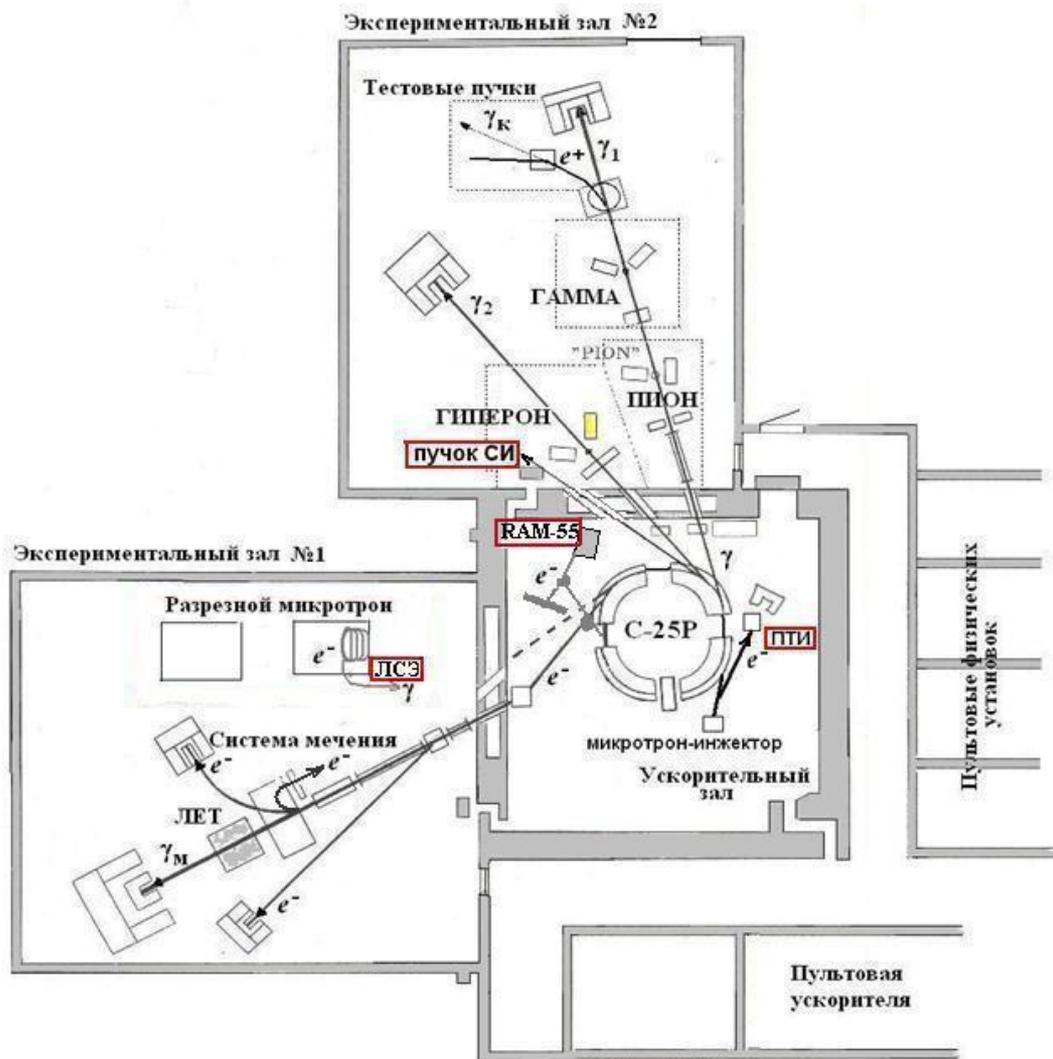
rms beam envelope in x- and y-planes



beam current decrease along the accelerator

# Об Отделе физики высоких энергий

Базовая установка - электронный синхротрон «Пахра»



**Пучки ускорительного комплекса ФИАН «Пахра»**

**синхротрон**

$\gamma$  до  $\sim 850$  МэВ

$e^-$  до  $\sim 650$  МэВ

$\gamma$  СИ (ВУФ, МР)

**микротроны**

$e^-$  7-11 МэВ

$e^-$  7-35 МэВ

$\gamma$  ЛЭС (терагерц)

В процессе покупки /замены  
новый силовой трансформатор.

## Об Отделе физики высоких энергий (статистика)

---

В настоящий момент 93 чел. (вместе с совместителями, рабочими, уборщицами), из них 45 научных сотрудников, 24 инженера, в т.ч. 9 докторов, 19 кандидатов. 7 чел. моложе 35 лет.

Структура:

Лаборатория фотомезонных процессов

Лаборатория электромагнитных взаимодействий

Лаборатория ядерных исследований при высоких энергиях

Лаборатория ускорительных устройств

Лаборатория релятивистской электроники и радиофизики

Сектор теории элементарных частиц и ядер

+ внеструктурная Лаборатория радиационных процессов в конденсированных веществах (ФИАН-БелГУ).

Число публикаций в 2014 г. (из годового отчета – на середину ноября 2014):

118 (в т.ч. CMS 65)

Доклады на конференциях в 2014 г., сделанные сотрудниками отдела:

26

Гранты в 2014 году:

4 гранта РФФИ

1 программа РАН-ЦЕРН

1 программа ОФН

2 госконтракта