

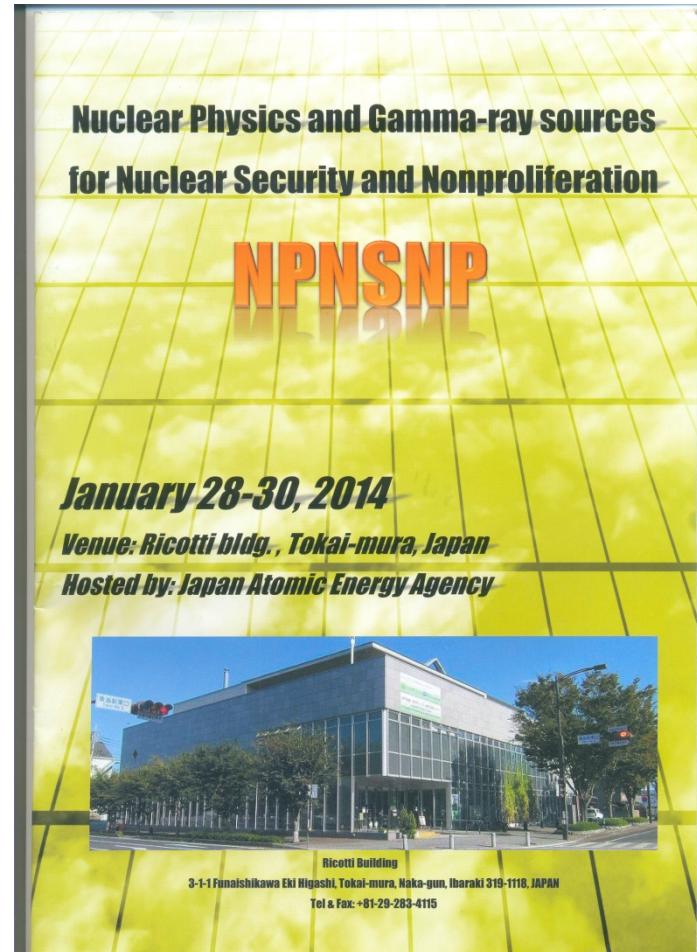
Nuclear photonics

V.G.Nedorezov¹, A.B.Savel'ev²

1- Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Russia
2- Lomonosov Moscow State University

Новые гамма пучки на основе фемтосекундных лазеров

- Обратное комптоновское рассеяние
- Фемтосекундный лазер с импульсной мощностью около 10 Дж обеспечивает следующие параметры γ -пучка :
 - Энергия E_γ до 10 МэВ
 - Разброс $\Delta E_\gamma/E_\gamma$ до 10^{-5}
 - Интенсивность N_γ до 10^6 γ/s
 - Угол излучения до 1 мрад
 - Частота повторения до 100 Гц



Nuclear Photonics:

“This exciting field of study is being enabled by the development of ultra-bright, tunable gamma-ray sources based on laser-Compton scattering and by the establishment of international, laser user facilities with systems capable of reaching highly-relativistic intensities and of enabling photo-nuclear interactions”.

“The investment worldwide in technology and facilities of relevance to nuclear photonics now exceeds several billion US dollars.”

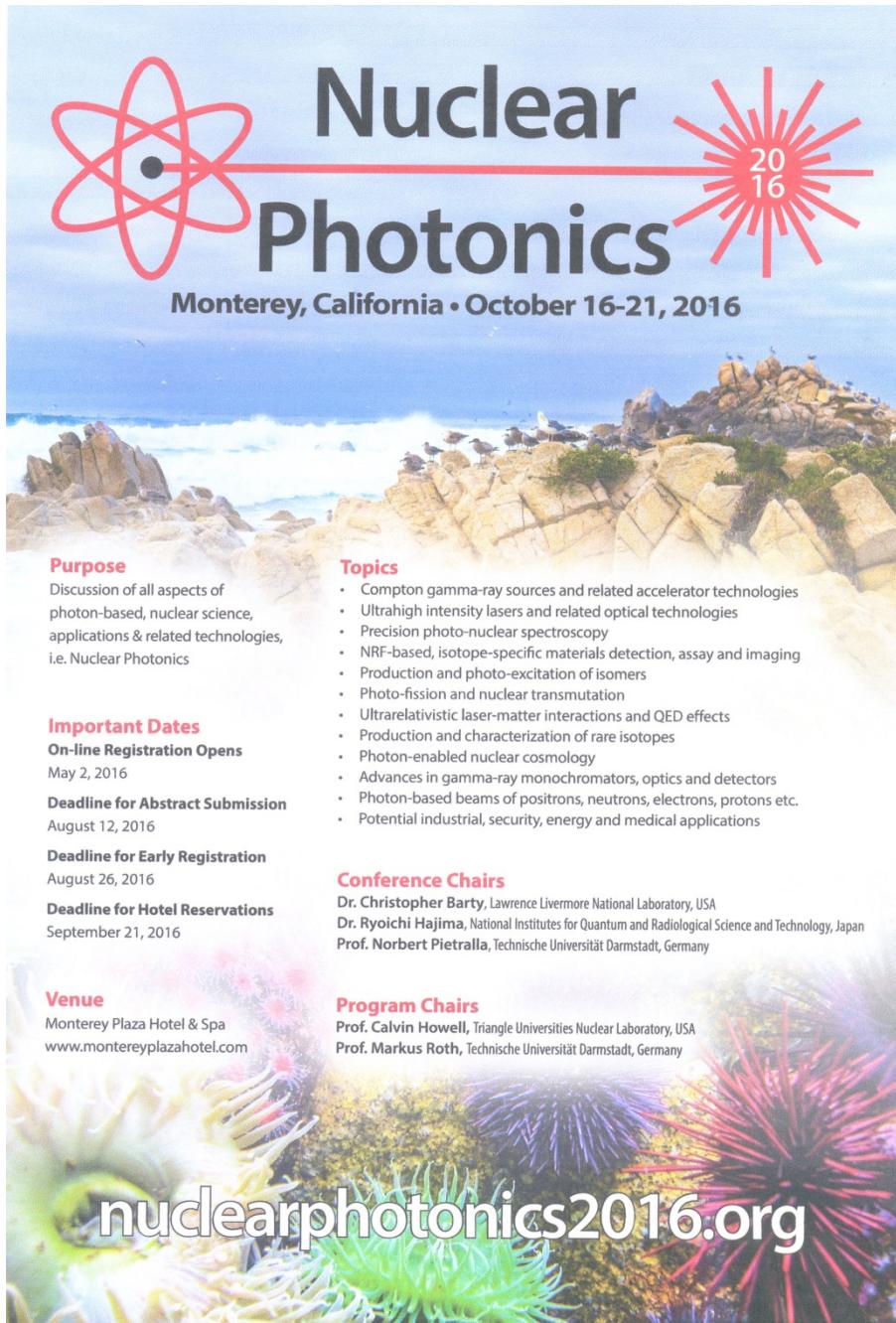
Dr. Chris Barty, Lawrence Livermore National Laboratory, USA

Dr. Ryoichi Hajima, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Japan

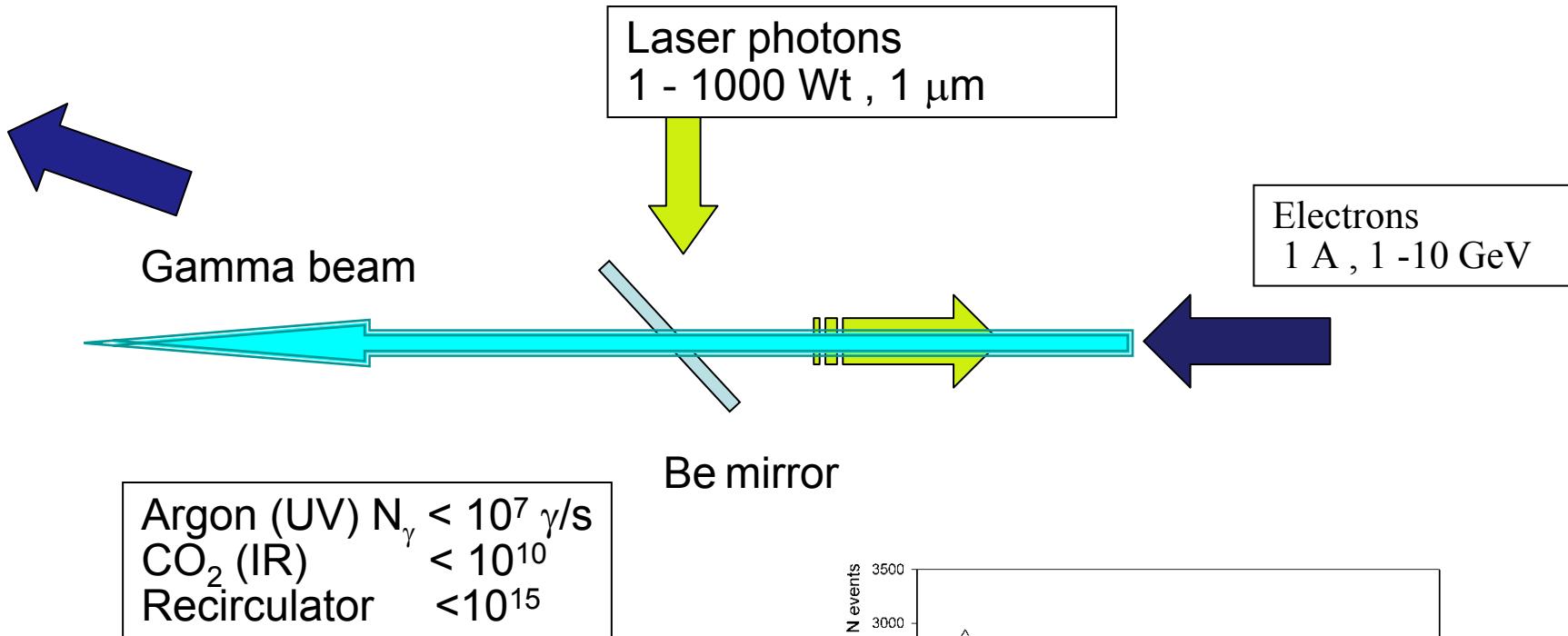
Prof. Norbert Pietralla, Technische Universität Darmstadt

Ядерная фотоника: перспективы (2014)

Установка	Энергия гамма-пучка	Интенсивность (полная)	Ширина спектра (FWHM)	Диаметр пятна - фокус ($\mu\text{м}$)	Частота повторения (1/с)
HI γ S, университет Дьюка, США (работает)	1-160 МэВ	$10^8 \gamma/\text{s}$	$3*10^{-2}$	10^4	$3*10^8$
ELI-NP, Бухарест, Румыния (в стадии запуска)	0,5-19,6 МэВ	$10^{13} \gamma/\text{s}$	10^{-3}	10^2	$1.2*10^4$
MEGa-ray, США (в стадии запуска)	0,5-2,7 МэВ	$10^{13} \gamma/\text{s}$	10^{-3}	10^2	$1.2*10^4$
γ QFEL (США, в стадии запуска)	0,5-10,0	$10^{13} \gamma/\text{s}$	10^{-6}	10	$1.2*10^4$
ESRF (ID15) Франция (работает)	0,1-0,7	$10^9 \gamma/\text{s}$	10^{-3}	10^3	$3*10^8$

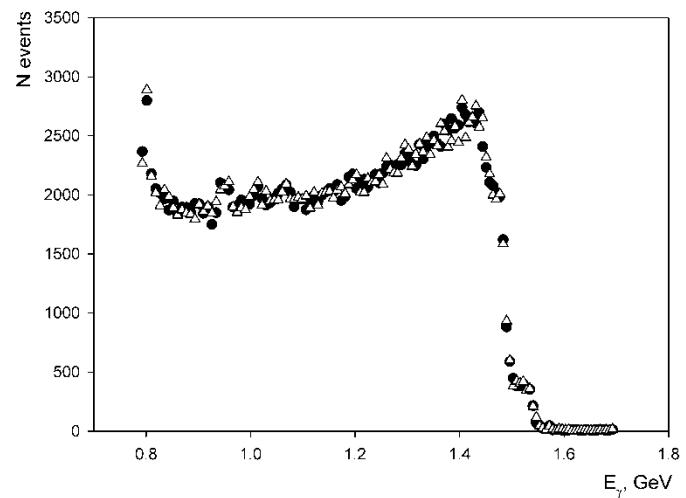


Compton back scattering technique



$$E_\gamma = 4\gamma^2 \frac{\omega}{1 + n^2 + \lambda}$$

$$n = \theta\gamma, \quad \gamma = E_e/m_e$$



Compton back scattering

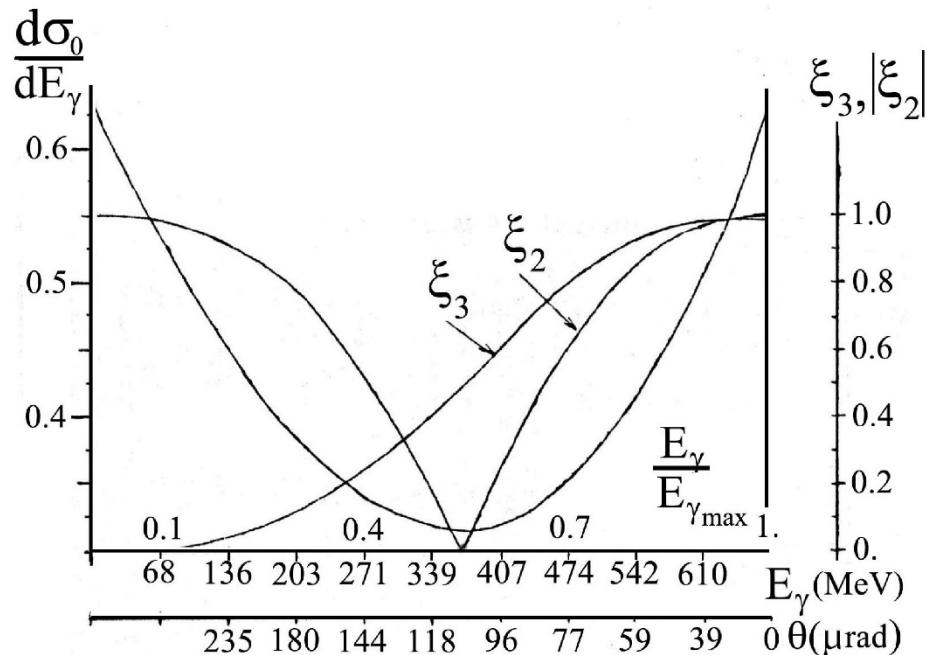
1963 – F.Arutunyan, V.Tumanyan. JETF 44 (1963) 6, 2100.
R.H.Milburn, Phys.Rev.Lett. 10 (1963) 3, 75

- 1964 – Moscow (Lebedev FIAN) – first experimental evidence
- 1976 - Frascati (LADONE - ADONE) – photonuclear physics
- 1984 - Novosibirsk Budker INP (ROKK – 1,2 – VEPP 3,4) nuclear fission
- 1988 – Brookhaven BNL (LEGS - NSLS)- meson photoproduction
- 1995 – Grenoble (GRAAL – ESRF)
- 1998 – Osaka (LEPS - Spring-8)
- 2000 – Duke (HlgS -) low energy nuclear excitations
- New history: FEMTOSECIND LASER DRIVEN GAMMA SOURCES

Спектр и поляризация гамма пучка

РОКК-2:

Спектр (левая шкала) и поляризация (ξ_3 - линейная, ξ_2 – циркулярная (правая шкала)) для обратного комптоновского излучения.



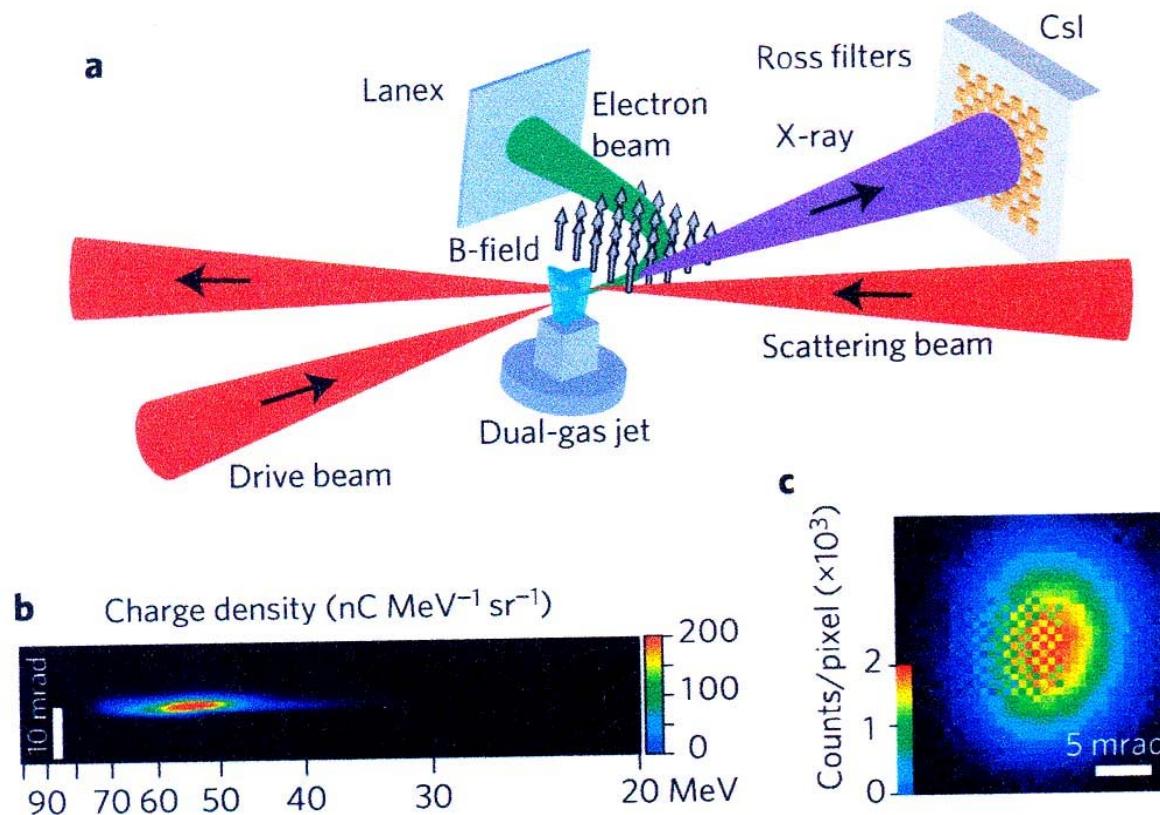
$$E_\gamma = 4\gamma^2 \frac{\alpha}{1 + \pi^2 + \lambda}$$

Relativistic electromagnetic fields produced by femtosecond laser

Mourou G., Tajima T., Bulanov S.V. // Review of Modern Physics. 2006. V.78. P.309-371

- Time duration — to 10^{-15} s (femtosecond)
- Wave packet length — to 10 μm (10 wave lengths)
- Pulse energy - to 100 J, power - to 10^{15} Wt (petawatt).
- Focus on radius of 10 μm provides $W = 10^{20}$ Wt/cm²
- Electric field strength $E = 10^{12}$ V/cm
- (*For comparison: in the hidrogen field $E = 10^9$ V/cm., at mica breakdown - 10^6 V/cm*
- *Uranium field $E = 10^{11}$ V/cm, with relativistic compression – up to 10^{12} v/cm) .*
- At $E \sim 10^{11}$ V/cm, respectively $W \sim 10^{18}$ BT/cm² ($\lambda = 1 \mu\text{m}$) electron is accelerated to relativistic velocity being closed to the light one. Therefore such field is defined as the relativistic one .
- Nevertheless, direct photonuclear reactions (nuclear excitations) are forbidden.

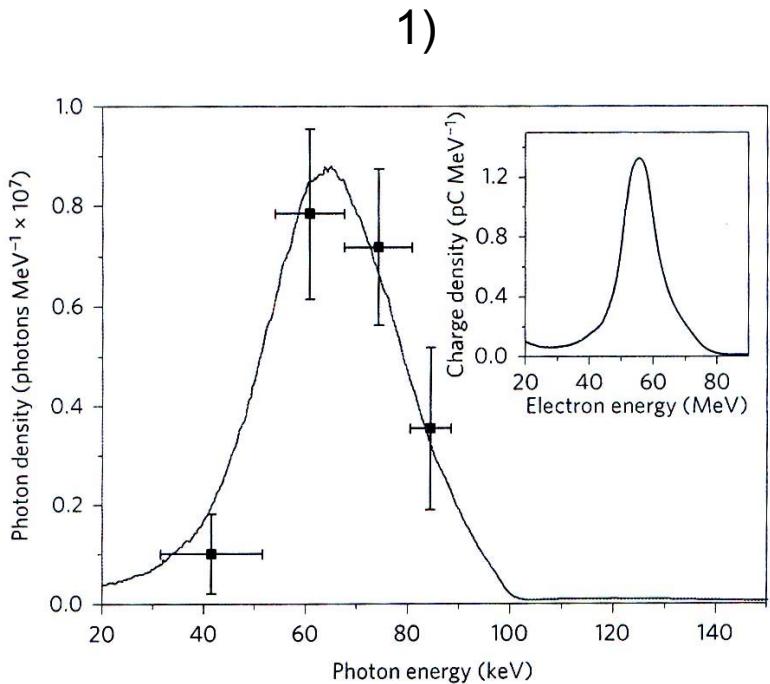
Quasi-monoenergetic and tunable X-rays from a laser-driven Compton light source N. D. Powers, I. Ghebregziabher, G. Golovin, C. Liu, S. Chen, S. Banerjee, J. Zhang and D. P. Umstadter* Nature photonics letters (Nov. 2013) p.1-4.



1) 10^{22} ph/s/mm²/mrad²/0.1% bandwidth, 10 mrad, collimation of 4.5 mrad

X-ray phase contrast imaging of biological specimens with femtosecond pulses of betatron radiation from a compact laser plasma wakefield accelerator . S. Kneip, C. McGuffey, F. Dollar, M. S. Bloom, V. Chvykov et al. Appl. Phys. Lett. 99, 093701 (2011)

2) 3×10^{18} photons s⁻¹ mm⁻² mrad⁻² (per 0.1% bandwidth), 5–15 mrad. Quasi-monoenergetic and tunable X-rays from a laser-driven Compton light source N. D. Powers, I. Ghebregziabher, G. Golovin, C. Liu, S. Chen, S. Banerjee, J. Zhang and D. P. Umstadter* Nature photonics letters (Nov. 2013) p.1-4.



- 2)
- A broad synchrotron like spectrum with average photon energy (critical energy) of E_{crit} ,
 - 10 keV like ESRF.

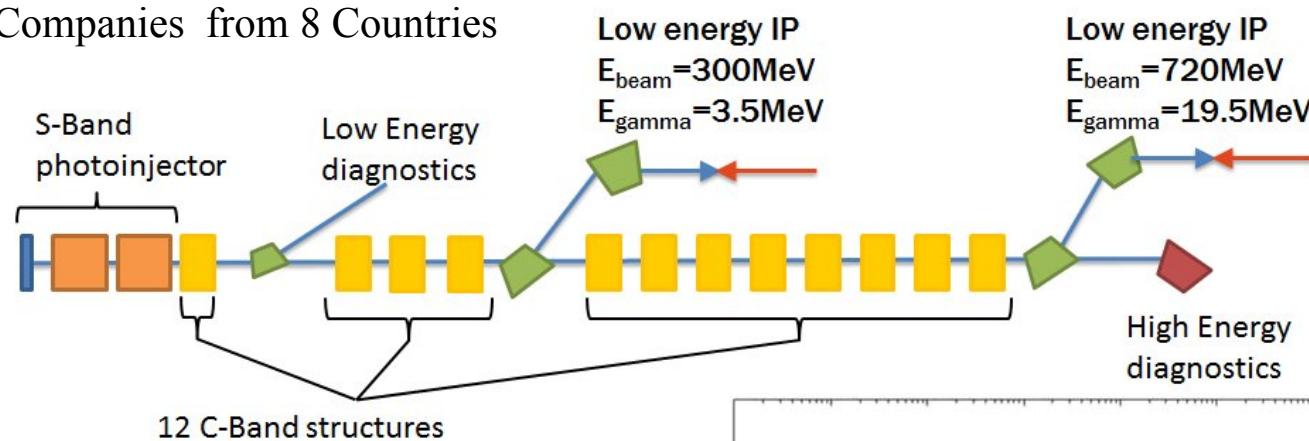
ELI-NP Gamma Beam System

Goal : building of the **most advanced** Gamma Beam System *in the world*

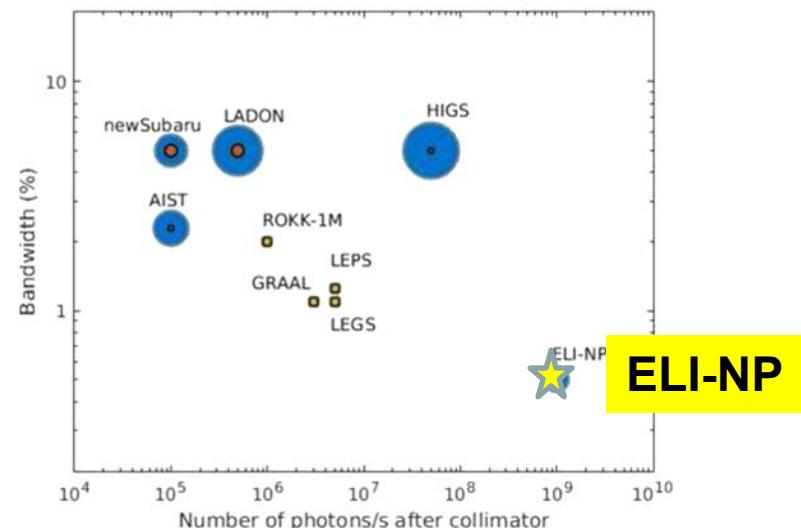
Solution : a collider based on the **most advanced** components: electron accelerator and lasers

EuroGammas Consortium

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, INFN Italy, CNRS France, Research Institutes and HighTech Companies from 8 Countries



Energy (MeV)	0.2 – 19.5
Bandwidth rms (%)	$\leq 0.5\%$
photons/sec within FWHM bdw.	$\leq 8.3 \cdot 10^8$
Source rms size (mm)	10 – 30
Linear polarization (%)	> 99
Macro rep. rate (Hz)	100
# pulses per macro pulse	32
Pulse-to-pulse separation (nsec)	16



ELI-NP Scientific Program and Instruments TDR's for Experiments completed and published

Experiments with High Power Laser System

- *Laser-driven nuclear physics*
- *High-field QED experiments*
- *Materials in extreme environments for energy, accelerators and space applications*
- *Monitoring and control systems for experiments*

Experiments with Gamma Beam System

- *Nuclear resonance fluorescence experiments*
- *Gamma above neutron threshold*
- *Photo-fission experiments*
- *Charged-particle detection*
- *Positron production by gamma beam*
- *Gamma-beam industrial applications*
- *Radioisotopes production for medical applications*
- *Gamma-beam delivery and diagnostics*

Combined laser-gamma experiments

International Working groups
3 international workshops in
2013-2014 and 2015
(more than 150 part)

>30 MoU's and
about 20 research
contracts with major
Laser and NP labs
and Institutions (EU
and Worldwide)

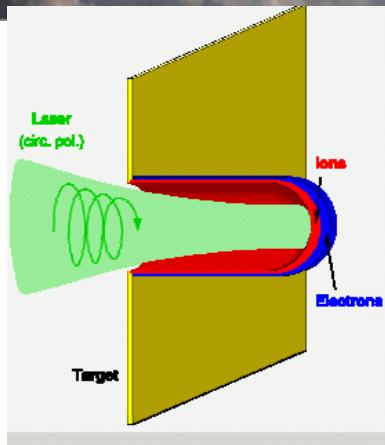
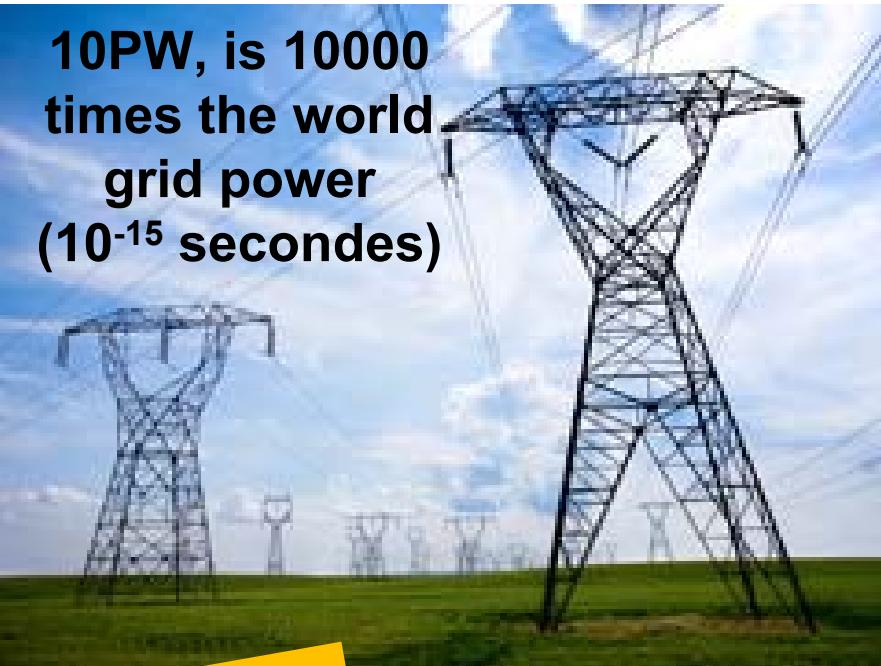


Laser Driven Nuclear Physics

The Pressure of Light?
 $I = 10^{23} \text{ W/cm}^2$
10 millions Eiffel Towers
on the tip of your finger!



10PW, is 10000 times the world grid power (10⁻¹⁵ secondes)



- field ~ TV/m
- E_e ~ Ten's of GeV
- $E_{ion} \leq 150 \text{ MeV/u}$
- charge ~ 10's of pC
- $DE/E \sim 1-2\% \text{ (e^-)}$
~ 10-20% (ion)
- $e \sim 10^{-5} \text{ mm mrad}$

Electrons are expelled from the target due to the shock wave induced by the powerful laser. Heavy ions are accelerated in the field created by the electrons. Bunches of e- and ions at solid state densities 10^{24} e/cm^3

Topics

- Compton gamma-ray sources and related accelerator technologies
- Ultrahigh intensity lasers and related optical technologies
- Precision photo-nuclear spectroscopy
- NRF-based, isotope-specific materials detection, assay and imaging
- Production and photoexcitation of isomers
- Photo-fission and nuclear transmutation
- Ultrarelativistic laser-matter interactions and QED effects
- Production and characterization of rare isotopes
- Photon-enabled nuclear cosmology
- Advances in gamma-ray monochromators, optics and detectors
- Photon-based beams of electrons, positrons, neutrons etc.
- Potential industrial, security, energy and medical applications

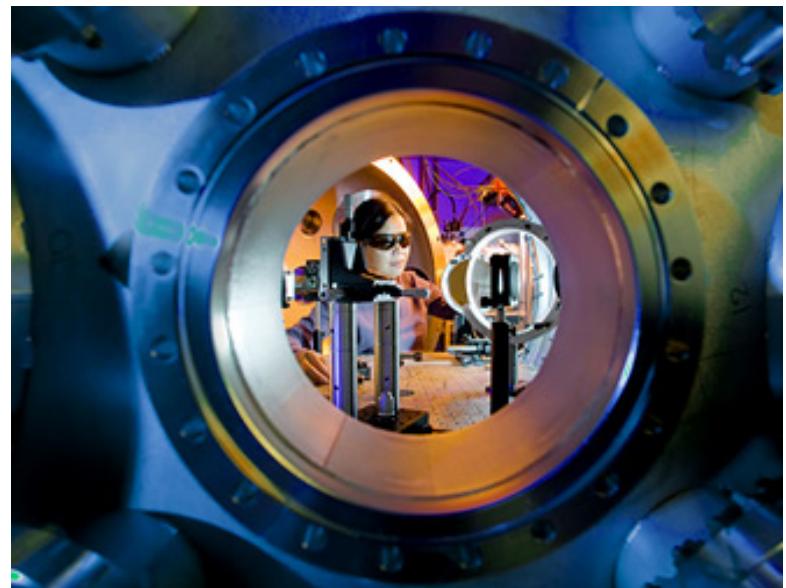


Program sessions:

- ELI-NP Gamma-Ray Facility and Research Program
- Ultrahigh Intensity Lasers & Nuclear Physics
 - A. Sergeev. Institute for Applied Physics Russia High-brilliance gamma ray sources enabled by Exawatt-scale Lasers,
 - SLAC National Accelerator Laboratory, Naval Research Laboratory Rice University.
- Accelerator-based Compton Sources, Triangle Universities Nuclear Laboratory
 - V. itvinenko, Stony Brook University High Flux Compton Gamma-ray Sources above 100 MeV.
- Photo-nuclear Physics,
- TU Universität Darmstadt University, Photonuclear spectroscopy of discrete quantum states: basic principles, opportunities, and limitations .
- GWU Exploring Polarizabilities with the MAMI A2 Tagged Photon Beam
- Triangle Universities , Duke. Nucleon Structure Measurements at HIGS
- University of Cologne , Origin of Dipole Strength in Atomic Nuclei
- Max Planck Institute , Nuclear excitations on the keV and MeV energy scale.

Задачи: Источник антивещества: Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)

- Мы вступили в новую эру, -- пишет физик из LLNL Питер Бейерсдорфер (Peter Beiersdorfer).
– Мы сейчас можем смотреть на антивещество, почти как если бы оно лежало у нас на ладони. Нам кажется, что следствием нашей работы станет строительство целого центра по исследованию антивещества, который будет использовать лазер как фабрику по производству дешёвой антиматерии». Уже сейчас, по мнению исследователей, возможность получения большого количества позитронов в маленьких лабораториях открывает новые возможности для самых разных исследований и открытий.
- Понятия «маленькая» и «дешевая» у физиков, кстати, весьма специфические. В эксперименте использовалась не какая-нибудь лазерная указка, а импульсный петаваттный лазер TITAN (пета – 10^{15} , то есть миллион миллиардов). Лазерный комплекс занимает несколько комнат и стоит более \$10 млн. А мощность его импульса в более чем тысячу раз превосходит мощность электроэнергии, производимой всеми электростанциями США. Однако рядом с традиционными ускорителями, в которых сейчас массово получают позитроны, TITAN действительно выглядит крошкой. Например, длина основного кольца Большого адронного коллайдера, который у всех на слуху, – около 27 км, а общая стоимость этого проекта превышает \$8 млрд.
- $1 \text{ Кулон} = 1.6 * 10^{19} \text{ позитронов}$

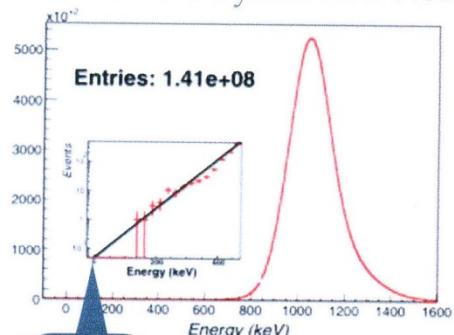


Задачи:

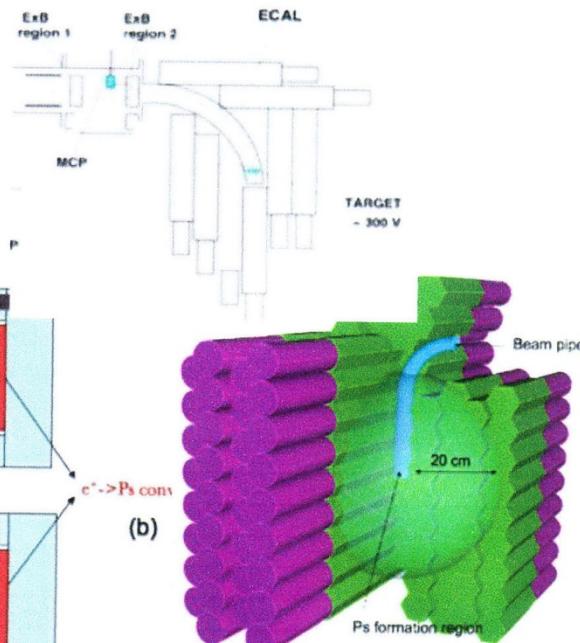
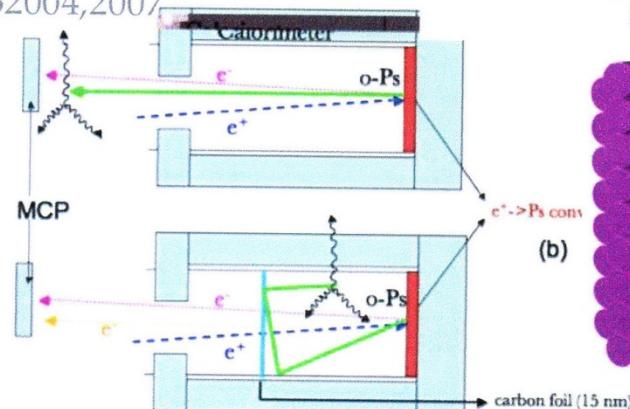
AN EXPERIMENT TO SEARCH FOR MIRROR DARK MATTER

- o-Ps \rightarrow invisible mode P.Crivelli et al. "A new exp. to search for mirror dark matter", arXiv:1005.4802.v4[hep-ex]
- Background level - 10^{-7}
- $10^4 \text{ e}^+/\text{s}$, $T_{\text{exp}} - 10^6 \text{ s}$

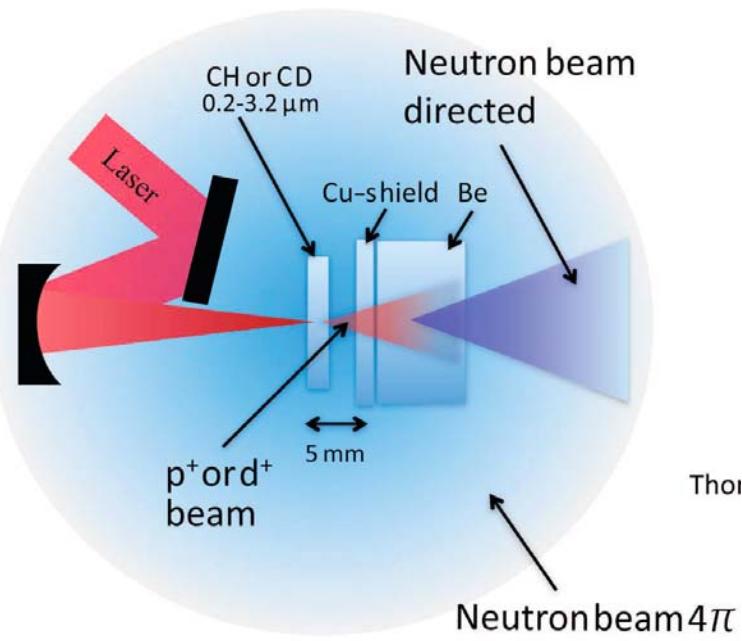
BADERTSCHER *et al.* PhysRevD.75.032004,2007



Signal



Nuclear reactions in Plasma (using Laser)



p and beams
created by LASER

- ❖ interesting for astrophysics of light element nucleosynthesis (bare nuclei reactions as in stars)
- ❖ nucleosynthesis of heavy element
- ❖ lifetime changes (of isomer?) in the plasma and inverse electron capture

*Photonuclear neutron generation
(I. Pomerantz)*

Femtosecond laser facility at ILC MSU

Reaction chamber

- Wave length 800 nm,
- Impulse length 50 fs,
- Frequency 10 Hz,
- Pulse energy 50 mJ,
- Focus diameter 4 μm.

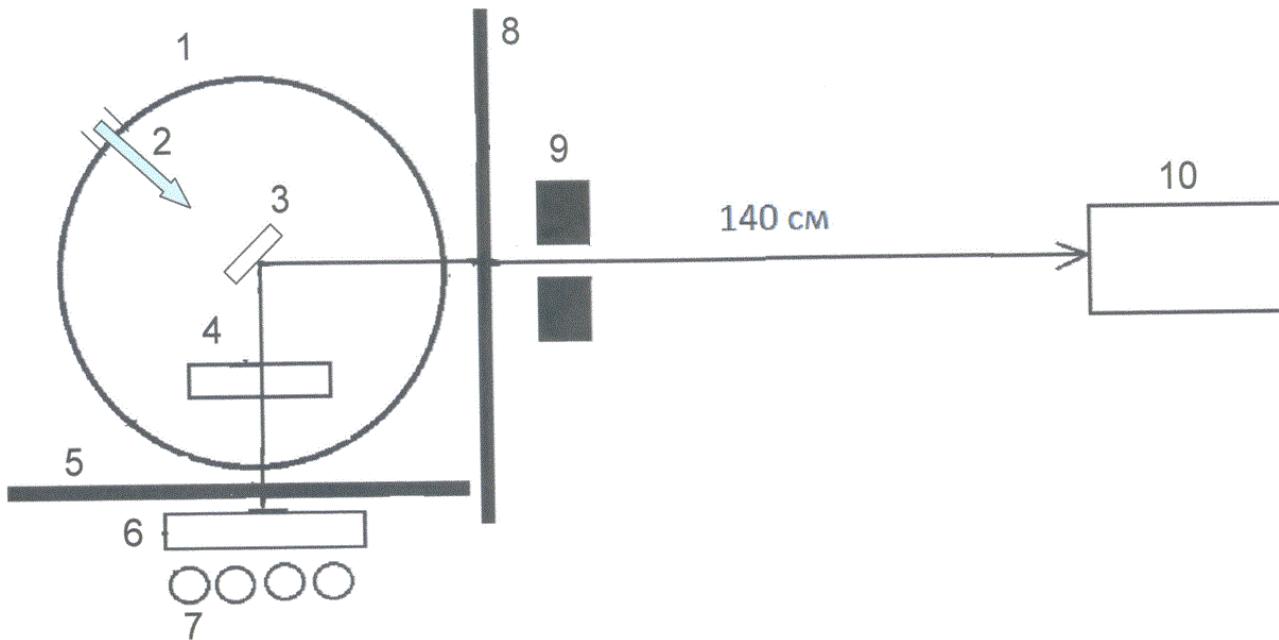
- Beam intensity on the target 10^{19} W/cm²,
- being equivalent to the electron
- quasi-temperature of ~1 MeV.

- **Параллельно на ЛУЭ-8 ИЯИ РАН:**
- Ток электронов - 40 мкА,
- Длительность импульса -
- Частота повторения 50 Гц



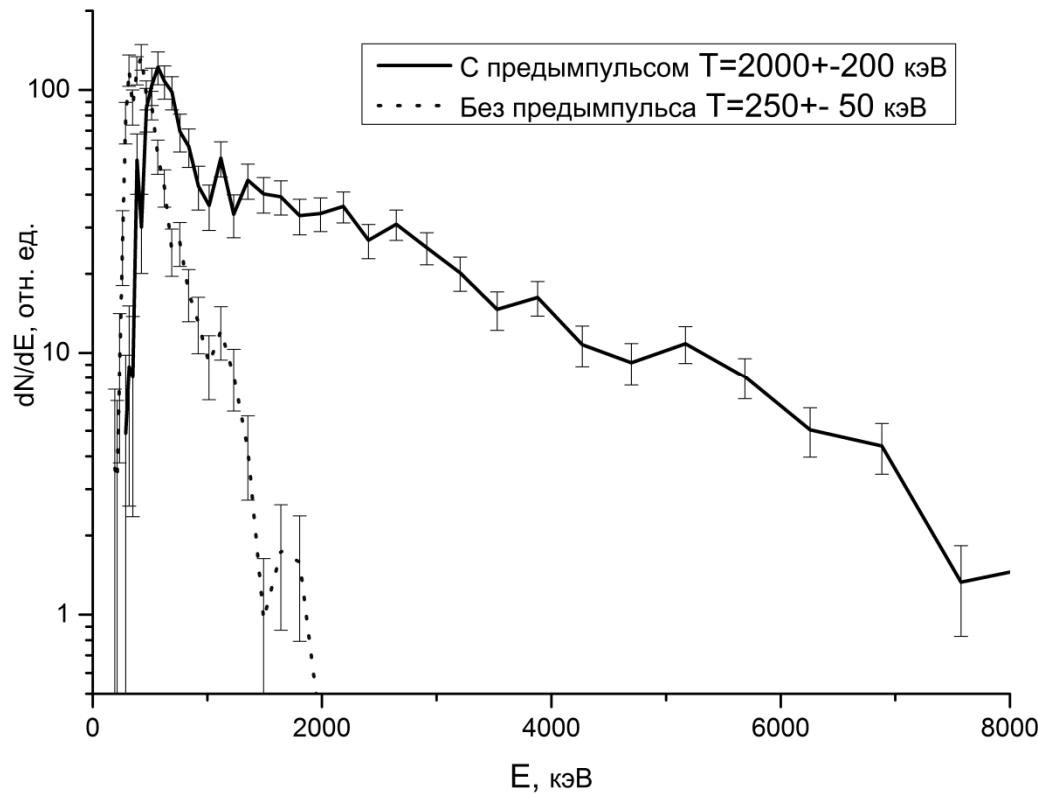
Исследование реакции D(γ , n)H вблизи порога с использованием мощного фемтосекундного лазерного излучения, ЯФ, в печати

И.Н.Цымбалов, Р.В.Волков, Н.В.Еремин, К.А.Иванов, В.Г.Недорезов, А.Пасхалов, А.Л.Полонский, А.Б.Савельев, Н.М.Соболевский , А.А.Туринге, С.А.Шуляпов

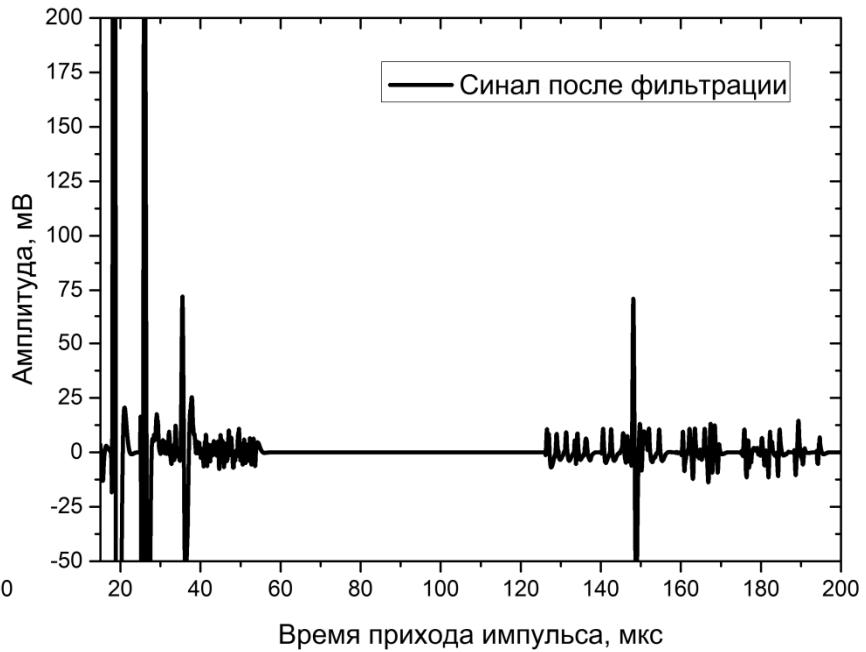
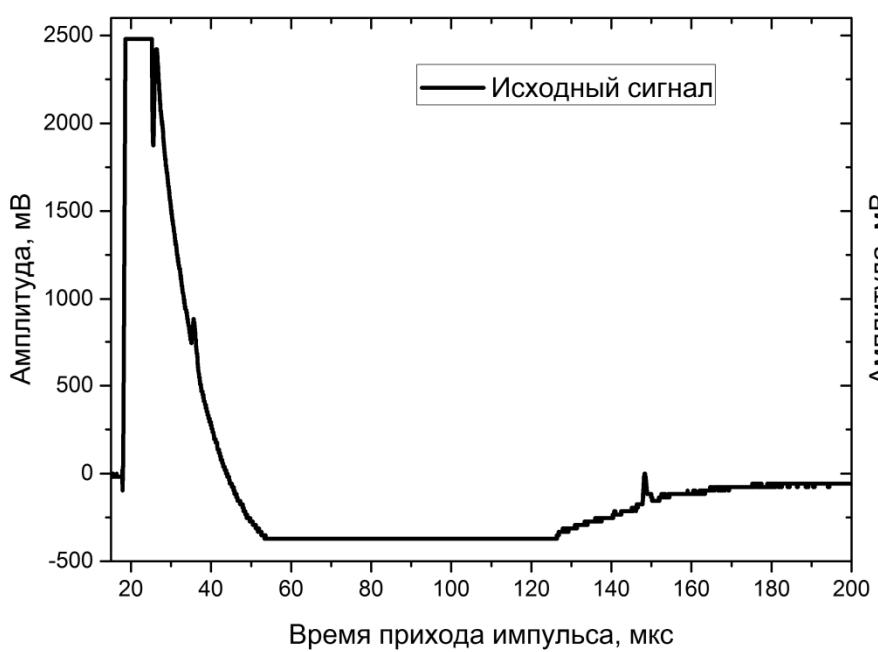


- Схема установки: 1 – вакуумная камера, 2 – пучок от лазера, 3 – мишень (пленка из майлара толщиной 200 мкм на вольфрамовой пластине толщиной 2 мм), 4 – контейнер с тяжелой водой (0,5 л) диаметром 20 мм, 5 – лист из свинца толщиной 8 мм, 6 – замедлитель из полиэтилена толщиной 5 мм, 7 – нейтронные счетчики СНМ-18 (10 шт), 8 – лист из свинца (8 мм) и вольфрама (6 мм), 9 – коллиматор из свинца диаметром 150 мм, толщиной 50 мм с отверстием (диаметр 3 мм), 10 – детектор гамма-квантов

*Спектр гамма-квантов на W мишени с плёнкой из майлара,
сплошная кривая - с использованием Nd:YAG лазера,
пунктир – без него*

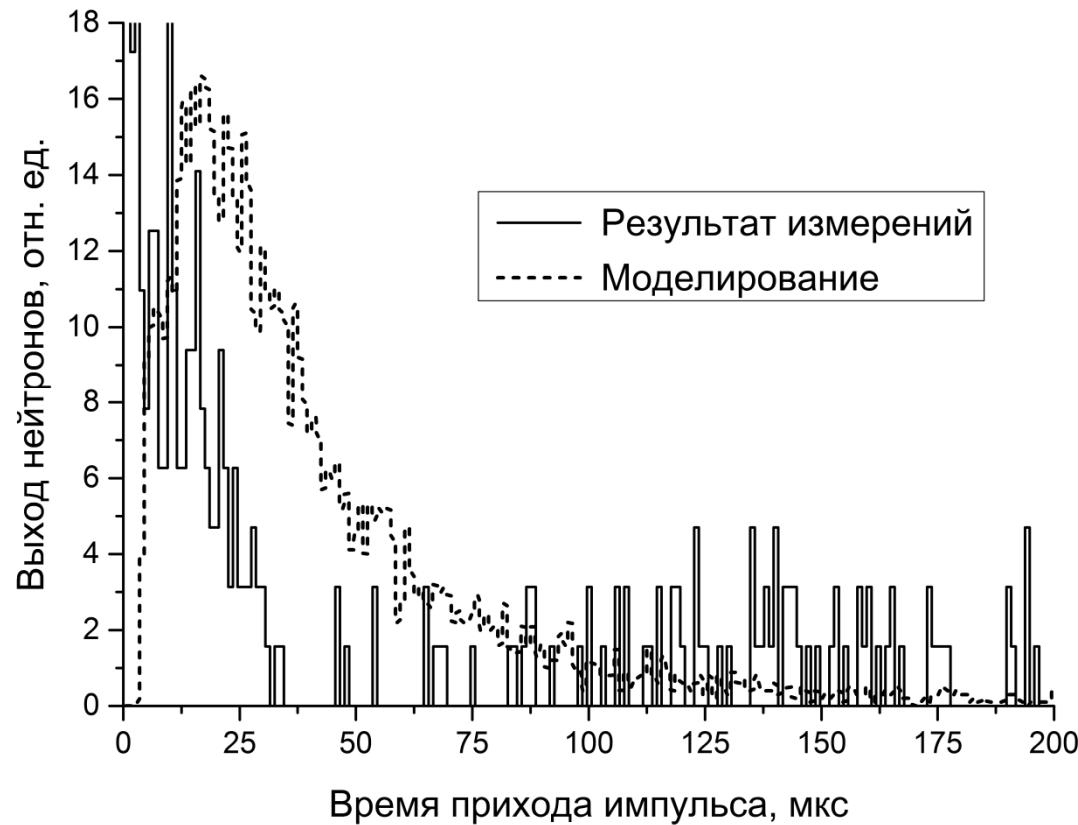


*Слева показан сигнал с нейтронных счетчиков СНМ-18
без обработки, справа – после фильтрации.*

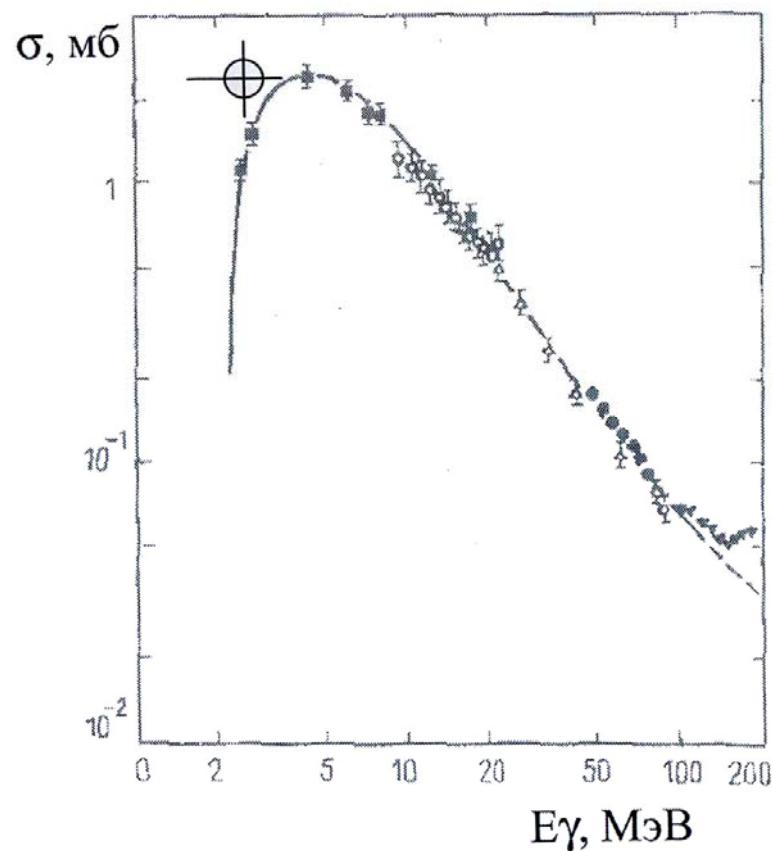


*Временное распределение замедляющихся нейтронов:
результат измерений и моделирования по программе LOENT*

(Low Energy Neutron Transport)



*Сечение фоторасщепления deutrona $\sigma_{\gamma n}$ в сравнении с
литературными данными.* $Y_n(E_e, E_\gamma) = \int \sigma_{\gamma n}(E_\gamma) N_d N_\gamma \epsilon_n$



Генерация нейтронов

Текущие задачи

- Эффективность регистрации тепловых нейтронов в газовых счетчиках в условиях мощного лазерного импульса. Время замедления.
- Сцинтилляционный спектрометр нейтронов. Регистрация нейтронов в момент импульса с большой эффективностью.
- Запаздывающие нейтроны от ядер – актинидов..

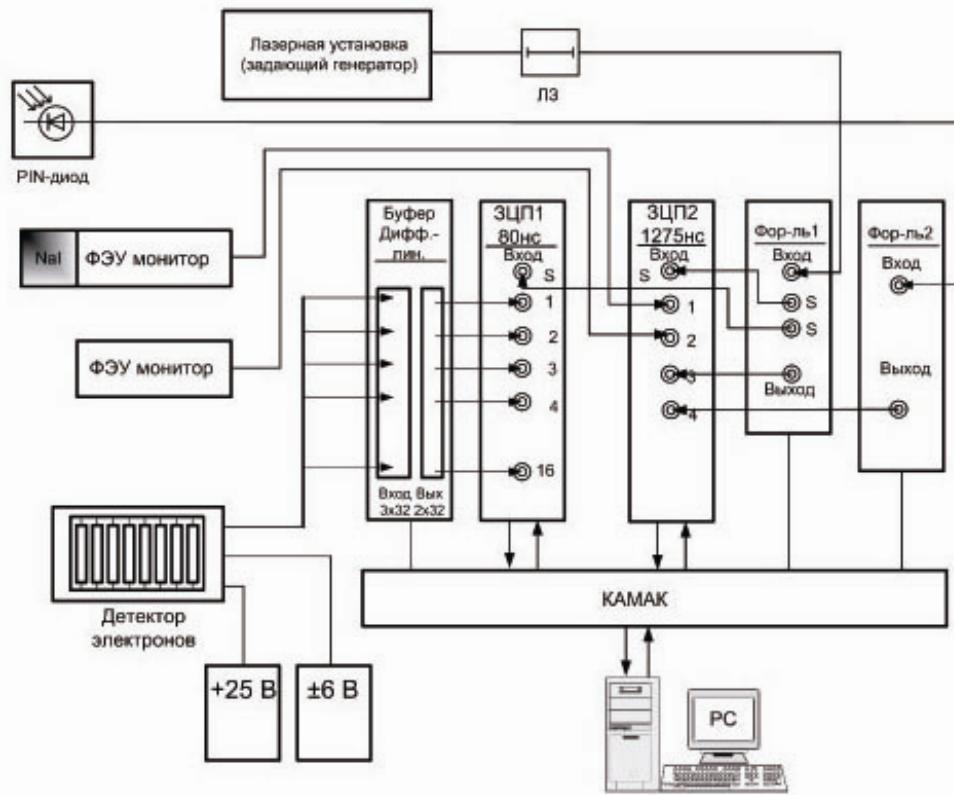


Рис. 3. Предполагаемая блок-схема установки на первом этапе без вакуума, детектор электронов вплотную к окну камеры.

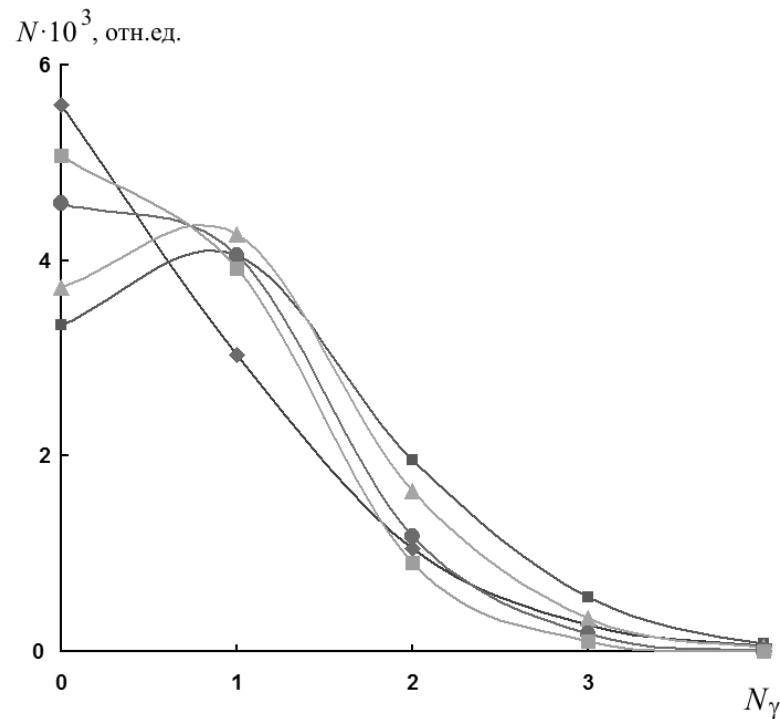
ВОЗБУЖДЕНИЕ ИЗОМЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ ^{111m}Cd , ^{113m}In , ^{115m}In
ФОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ ДО 7.5 МэВ

© 2016 г. В. Г. Недорезов, Е. С. Конобеевский, С. В. Зуев,
А. Л. Полонский, А. А. Туринге, ЯФ , в печати.

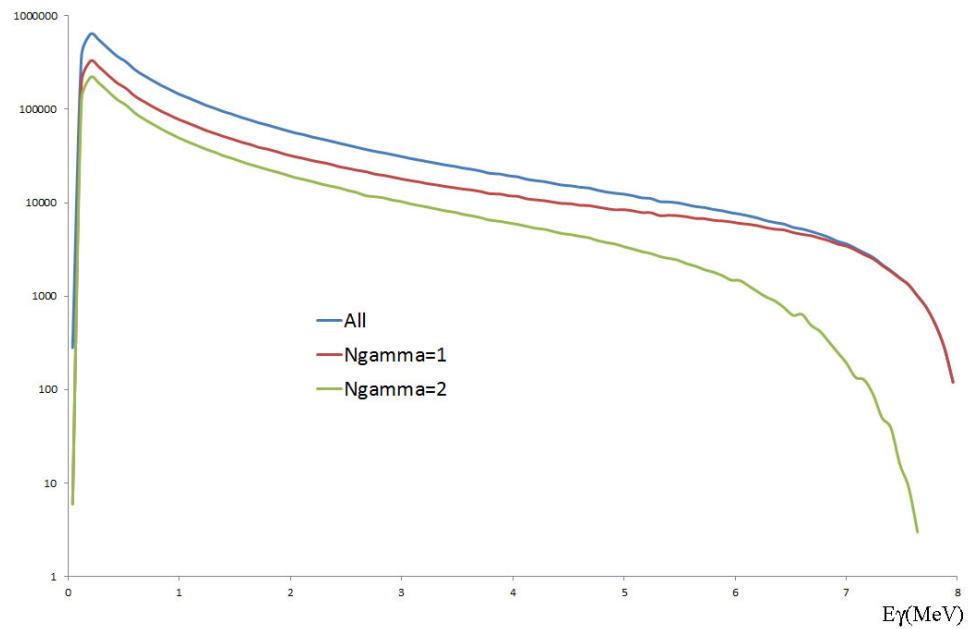
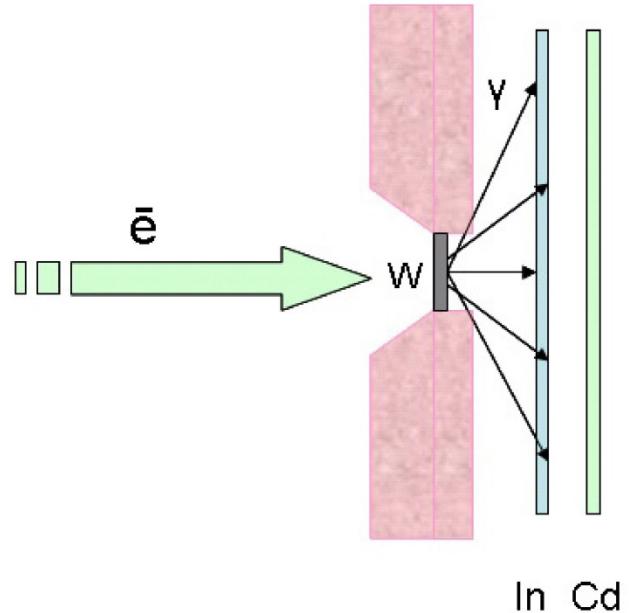
ЛУЭ-8 ИЯИ РАН

Методические проблемы:

Зависимость вклада многократного рассеяния при энергии электронов 8 МэВ от толщины W мишени: \blacklozenge – 0.5 мм, \blacksquare – 1 мм, \blacktriangle – 2 мм, \bullet – 3 мм, \blacksquare – 4 мм. По оси абсцисс – кратность рассеяния. (GEANT-4)



Метод наведенной активности



Cd-111 1/2+ Cd-111^m 11/2 -

In113 9/2+ In113^m 1/2 -

In-115 9/2+ In115^m 1/2-

$$E_{\gamma}^{\text{eff}} = \frac{\sum \Phi_i(E_e, E_{\gamma}^i) \cdot E_{\gamma}^i}{\sum \Phi_i(E_e, E_{\gamma}^i)}$$

Элемент	S, отсчеты	Эффектив- ность реги- страции	E_{γ}^{eff}	$\sigma(E_{\gamma}^{\text{eff}})$, мкб	Y, 10^3	σ_q , 10^{-19}
¹¹¹ Cd	211914	0.099	5.4	12.8 ± 2	4.53	6.5
¹¹³ In	43400	0.116	5.4	26.7 ± 3	2.44	9.3
¹¹⁵ In	593087	0.076	5.4	24.5 ± 3	73.0	12.8

Изомерные отношения для реакций с возбуждением высоко спиновых изомеров (состояний с большой разницей спинов) чувствительны к вносимому в ядро угловому моменту. Переход в фотопоглощении от E1 к E2 должен приводить к возрастанию изомерного отношения для ядер золота примерно ~10 раз. Для легких ядер данные отсутствуют. Теоретических работ практически нет.

Фотоядерные реакции вблизи порога Пигми-резонанс

[С.П.Камерджиев (2014) семинар НИИЯФ МГУ]

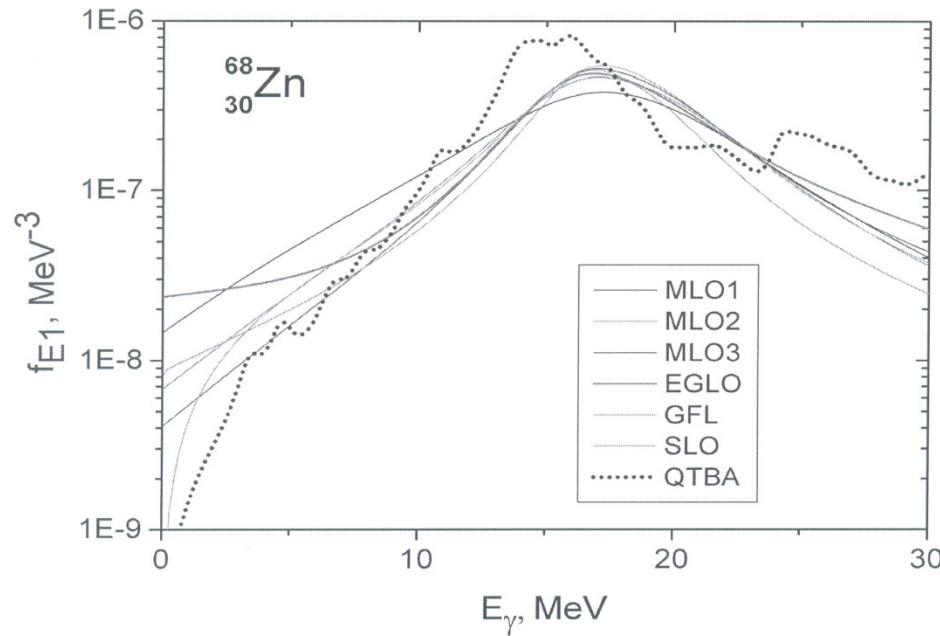
1.Новая (?) физика в области энергий
ПДР:

1.1 Изоскалярная природа ПДР

1.2 M1,E2 (PQR),M2 ,twist,тороидальные
и компрессионные E1моды)

1.3 новые ядра(Мо, деформированные
ядра-”ножничные” моды)

2.Объяснены интегральные хар-ки
ПДР в ^{68}Ni (?)



A.Klimkiewicz et al., Phys.Rev. C76 (2007) 051603

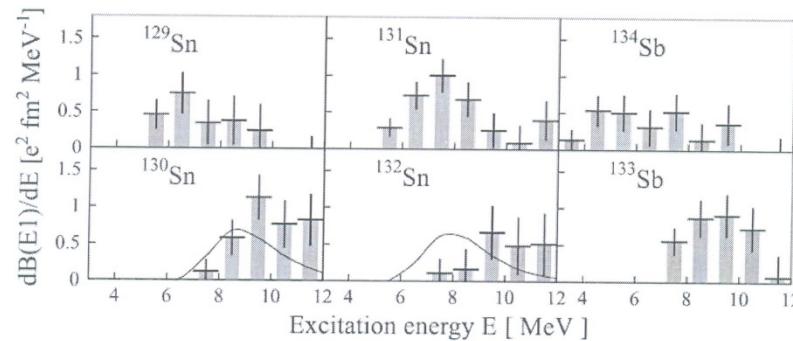


Fig. 18. Pygmy dipole strength distribution $dB(E1)/dE$ obtained for unstable Sn and Sb isotopes [64] with odd-neutron number (upper row) and with even-neutron number (bottom row). The solid lines show results for $^{130,132}\text{Sn}$ from the RQRPA calculation with a particular choice of the DD-ME interaction [151]. Source: Reprinted figure with permission from [64]. © 2007, by the American Physical Society.

Фотоядерные реакции вблизи порога

Текущие задачи

- Сечения возбуждения высокоспиновых изомеров . Вклад переходов с высокой мультипольностью.
- Коллективные возбуждения ядер вблизи порога. Пигми – резонансы в (γ, γ) и (γ, n) реакциях
- Запаздывающие нейтроны от ядер – актинидов..

Исследование генерации позитронов под действием фемтосекундных лазерных импульсов.

- Задачи:
 - **поиск рождения e^+e^- пар в вакууме**
 - **Поиск зеркальной темной материи**
 - **Источник антивещества**
 - **Инжекционный комплекс: «фабрика» позитронов ИЯФ, Новосибирск**
 - **Позитронная спектроскопия и томография**
- Экспериментальные данные по **поиску рождения e^+e^- пар в вакууме** отсутствуют. Теоретические работы предсказывают недостижимые на сегодняшний день напряженности электрического поля, требующие мощности лазера порядка 10^{29} Вт/см² (см., например, Н. Б. Нарожный, А. М. Федотов. Квантово-электродинамические каскады в интенсивном лазерном поле, УФН (2015) , 185. 103)
- На встречных лазерных пучках достаточно мощности лазера порядка 10^{26} Вт/см²

Литературные данные по коэффициентам конверсии

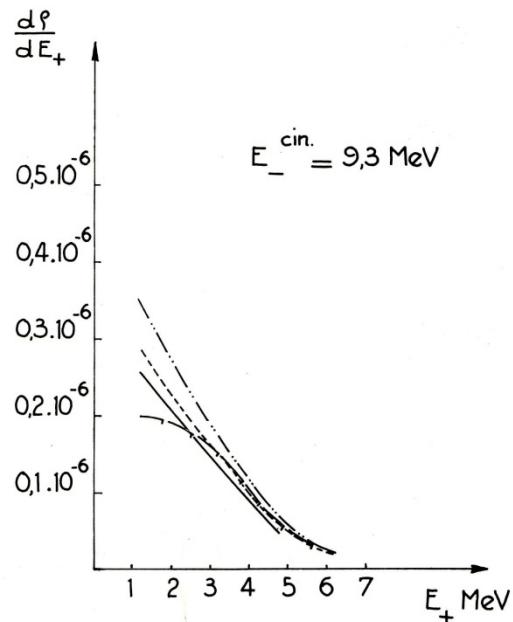
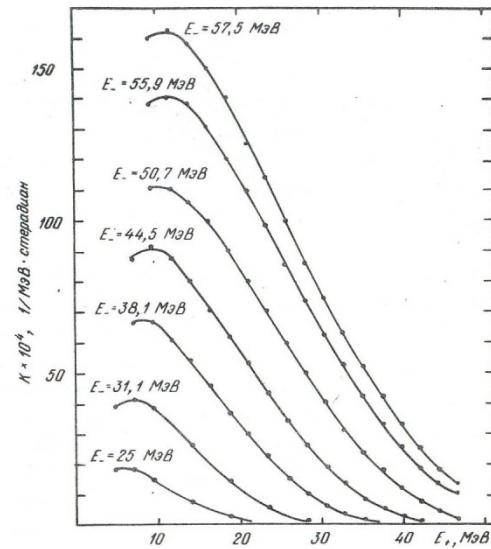


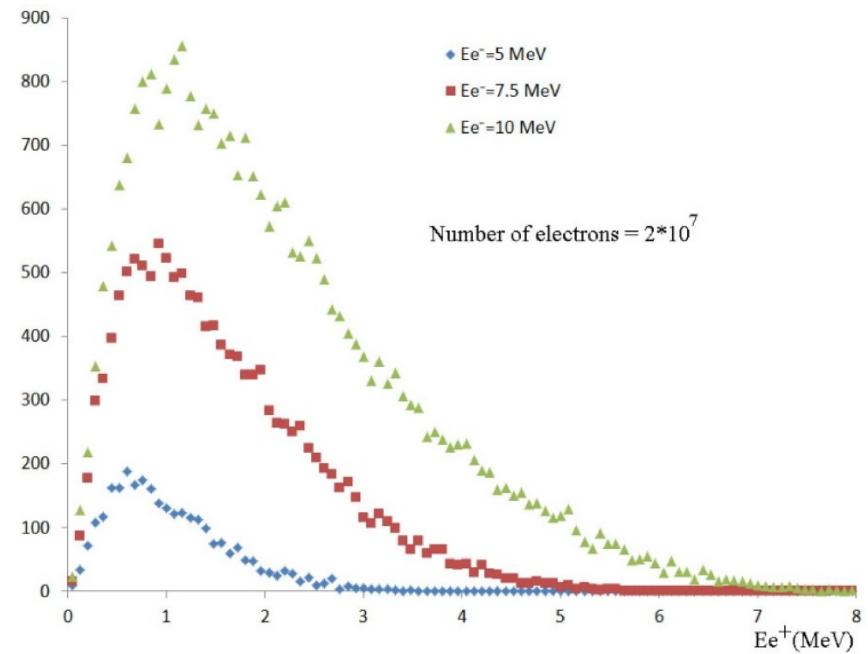
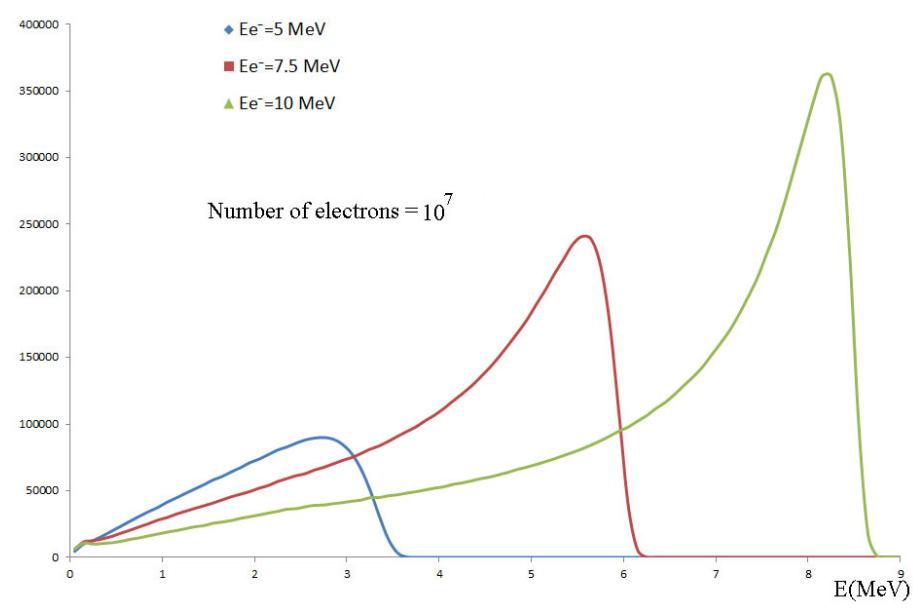
Fig. 4 - RENDEMENT ($e^- \rightarrow e^+$) PAR BANDE DE 1 MeV
DANS $5,4 \times 10^{-3}$ STERADIAN



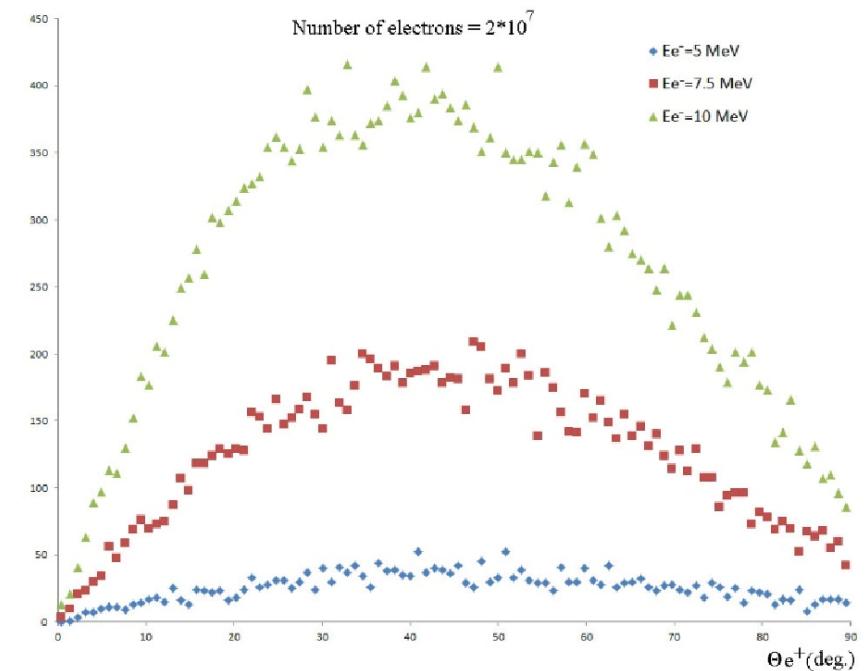
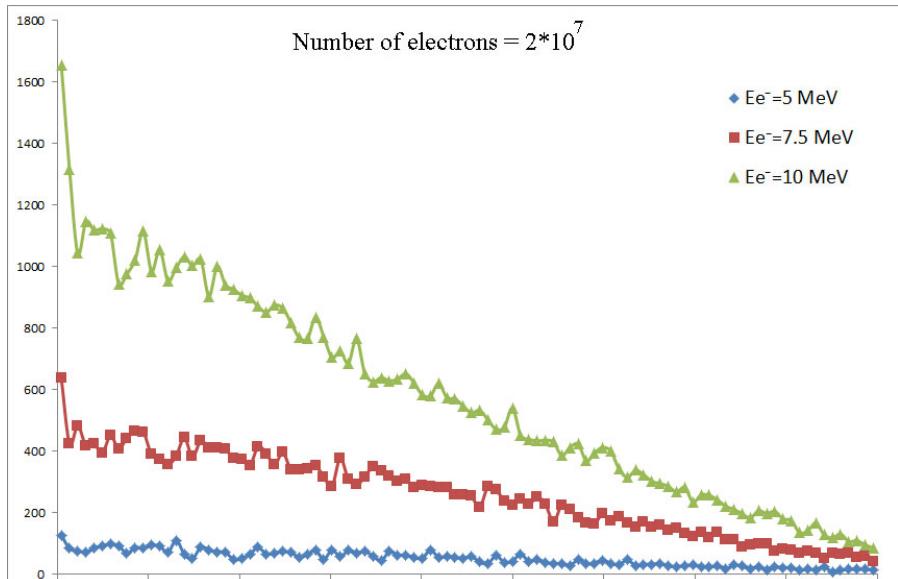
Р и с. I. Зависимости дифференциального коэффициента конверсии К от энергии позитронов при различных энергиях электронов для танталовой мишени толщиной $T \approx 1,3 X_0$

- Работы на ускорителях по изучению конверсии электронов в позитроны были ранее проведены во Франции в Сакле (M.Bernardiny e.a. Rapport CEA 2212 (1964) и ИЯИ РАН (Л.З.Джилавян, Кр.сообщения ФИАН, 8, 37 (1979)) при энергиях электронов выше 10 МэВ. Слева – спектр позитронов, образующихся при конверсии электронов с энергией 9,3 МэВ. Справа – зависимость коэффициента конверсии от энергии электронов. Других данных при более низких энергиях электронов нет.

**Энергетические распределения электронов и позитронов
из вольфрамовой мишени толщиной 0.8 мм.
Моделирование по программе GEANT-4**



*Угловые распределения электронов и позитронов
из вольфрамовой мишени толщиной 0.8 мм.
Моделирование по программе GEANT-4*

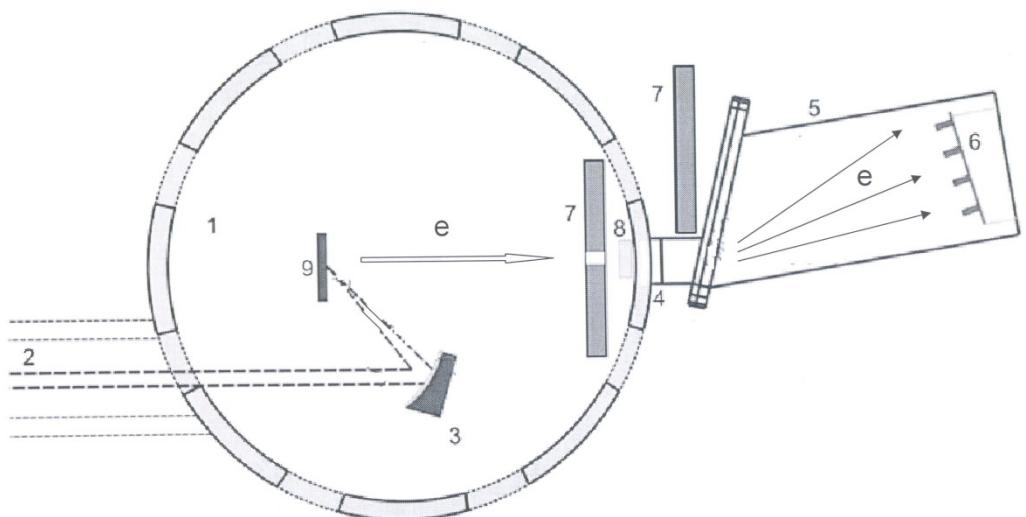


Магнитный спектрометр для детектирования электронов и позитронов в экспериментах на фемтосекундном лазере

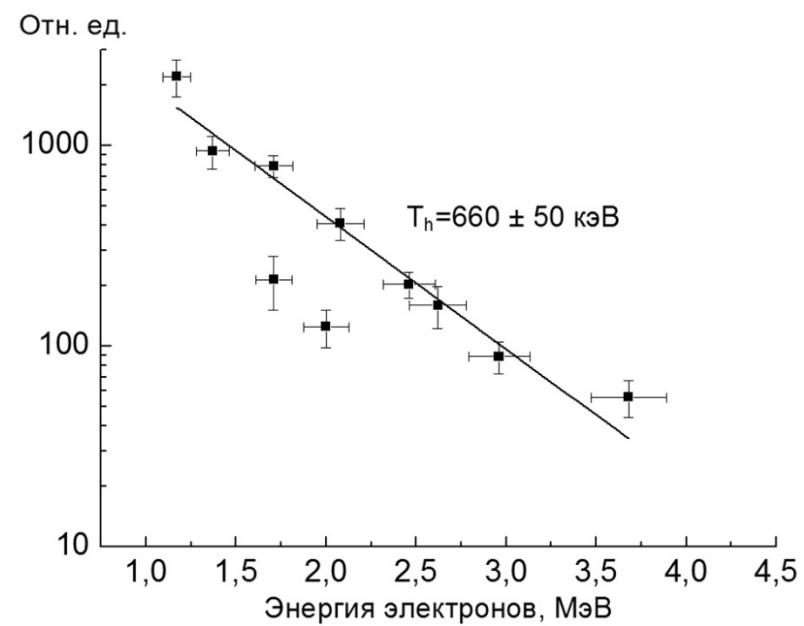
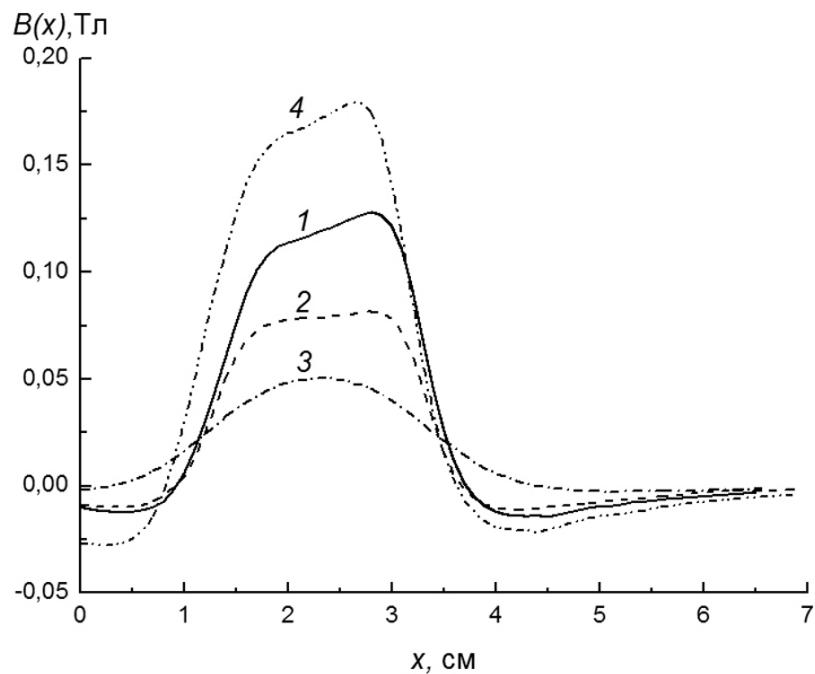
А.В. Русаков, К.А. Иванов, Н.А. Борисов, И.Н. Цымбалов, Д.А. Горлова, А.М. Лапик, А.С. Ларькин,
В.П. Лисин, И.М. Мордвинцев, А.Н. Мушкаренков, В.Г. Недорезов,
А.Л. Полонский, А.Б. Савельев-Трофимов, А.А. Туринге, ПТЭ, в печати.

Схема эксперимента:

- 1 – вакуумная камера,
- 2 – лазерное излучение,
- 3 – параболическое зеркало,
- 4 – магнит,
- 5 – камера спектрометра,
- 6 – **детектирующая линейка**,
- 7 – свинцовая защита от рентгена с коллиматором для электронов,
- 8 – **индукционный датчик тока электронов**,
- 9 – мишень.



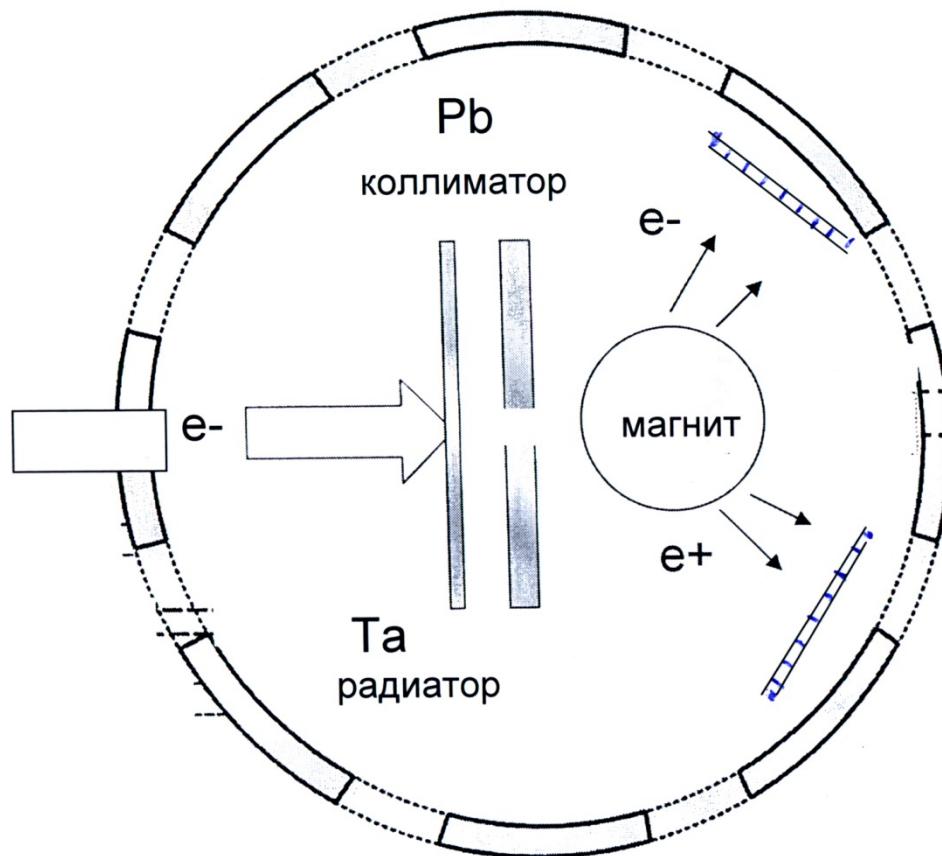
Измеренный спектр электронов



Моделирование магнитной системы:

динамический диапазон: 1 – 10 МэВ

число частиц в импульсе в направлении магнита после коллимации – 10^4 /сек



Детектор для электронно-позитронного магнитного спектрометра

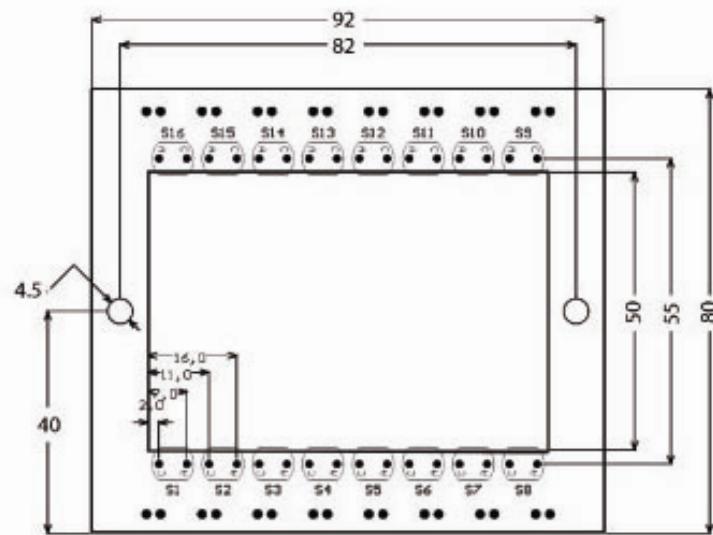
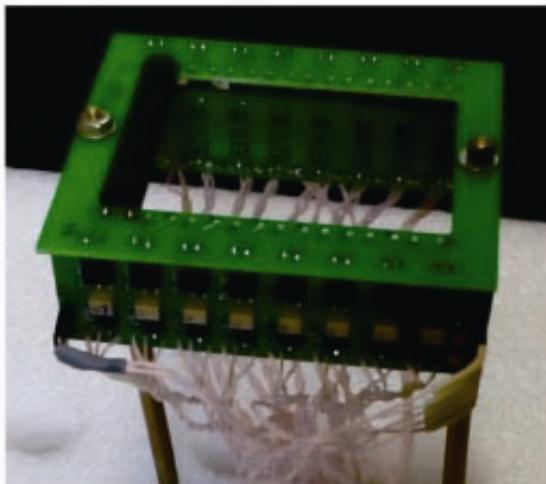


Рис. 1. Детектор на 8 элементов (установлен один) с платами усилителей. Чертёж основной платы с размерами. Детектор располагается в защите из свинца с внешними размерами 100 × 100 × 60 мм

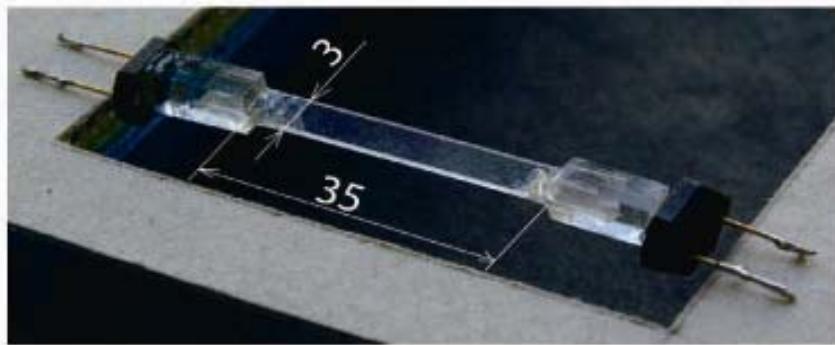


Рис.2. Элемент детектора:

1) кремниевые ФЭУ MicroSC-30035 корпус X13 производства SensL, 2) пластики типа BC-404 производства Bicron Saint Gobain Industrial Ceramics, Inc. 0.5мм

Изготовлено:

- 1) Платы несущие с усилителями по 16 шт. 6 комплектов
- 2) Буферные модули
- 3) Кабели.

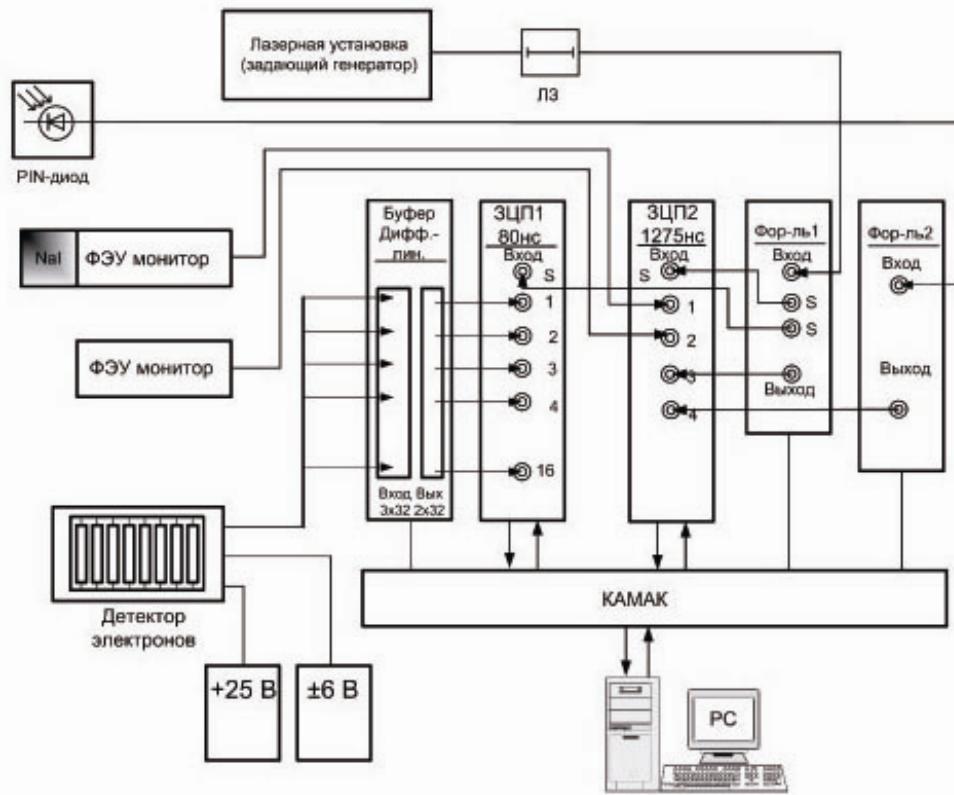
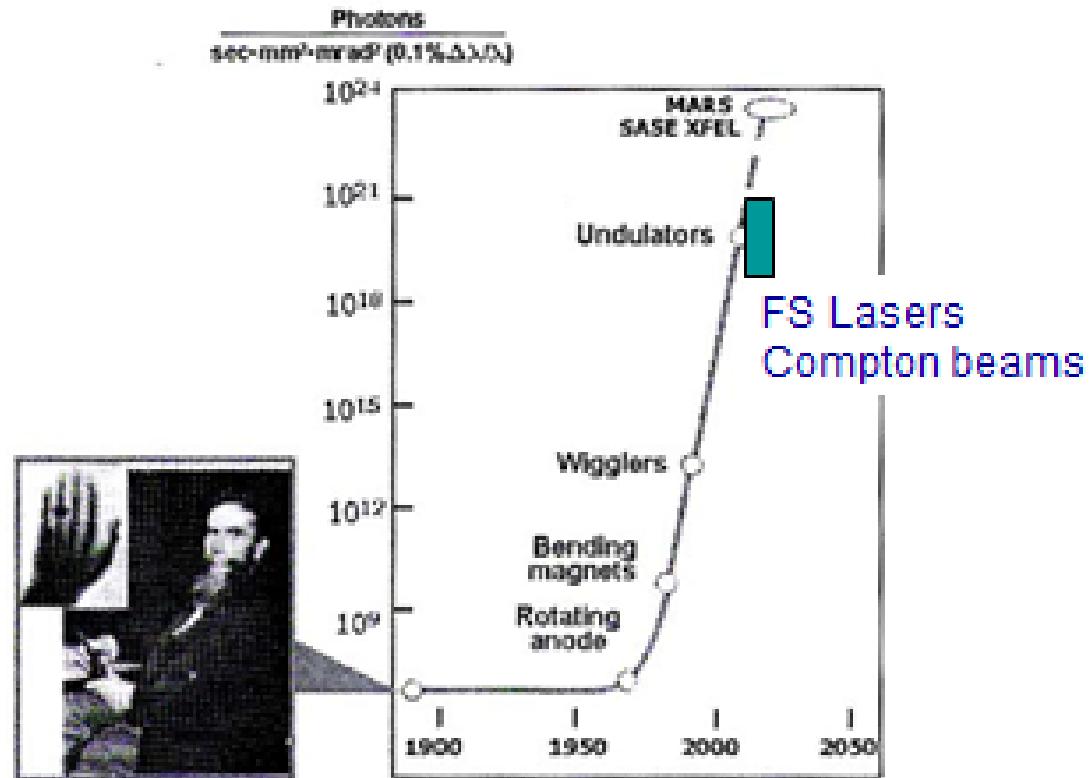


Рис. 3. Предполагаемая блок-схема установки на первом этапе без вакуума, детектор электронов вплотную к окну камеры.

Synchrotron radiation at storage rings

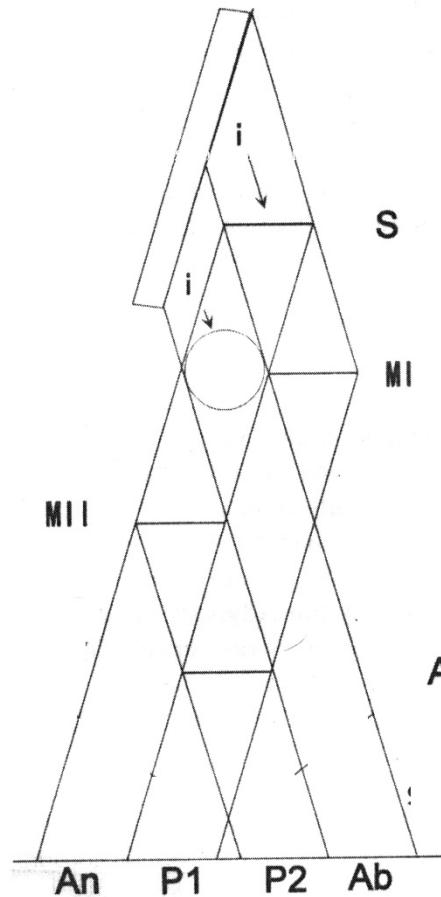
Brightness and total intensity



X-Ray imaging: Three color optics

Medical Applications of Synchrotron Radiation / Eds M. Ando, C. Uyama. Tokyo, 1998

- Simultaneously:
- Absorption (*Ab*)
- Refraction (*An* - “Dark field”)
- Phase contrast (*P1, P2*),
- *S – splitter*
- *MI, MII – mirrors*



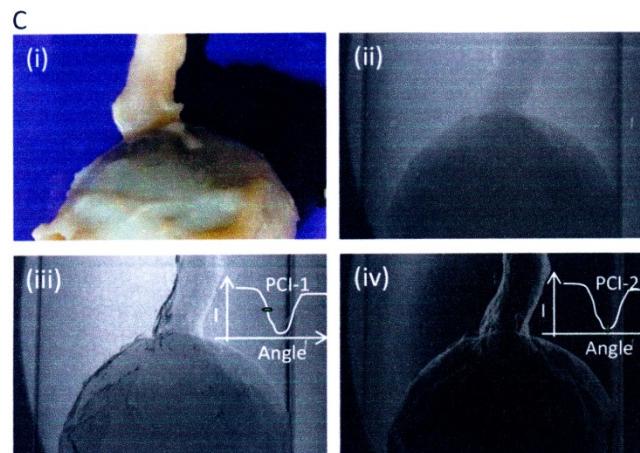
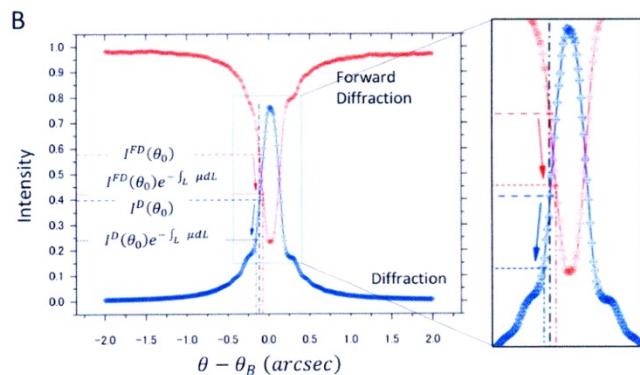
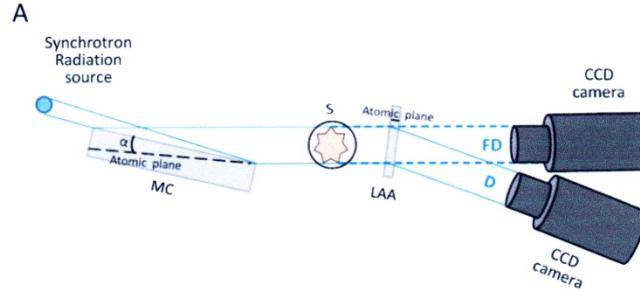
M.Ando e.a. Crystal analyser-based X-ray phase contrast imaging in the dark field:
implementation and evaluation using excised tissue specimens
European Radiology (2013) ISSN 0938-7994

Objectives: the soft tissue discrimination capability of X-ray dark-field imaging (XDFI) using a variety of human tissue specimens.

Methods: The experimental setup for XDFI comprises an X-ray source, an asymmetrically cut Bragg-type monochromator-collimator (MC), a Laue-case angle analyser (LAA) and a CCD camera. The specimen is placed between the MC and the LAA. For the light source, we used the beamline BL14C on a 2.5-GeV storage ring in the KEK Photon Factory, Tsukuba, Japan.

Results: In the eye specimen, phase contrast images from XDFI were able to discriminate soft-tissue structures, such as the iris, separated by aqueous humour on both sides, which have nearly equal absorption. Superiority of XDFI in imaging soft tissue was further demonstrated with a diseased iliac artery containing atherosclerotic plaque and breast samples with benign and malignant tumours. XDFI on breast tumours discriminated between the normal and diseased terminal dictylobular unit and between invasive and in-situ cancer.

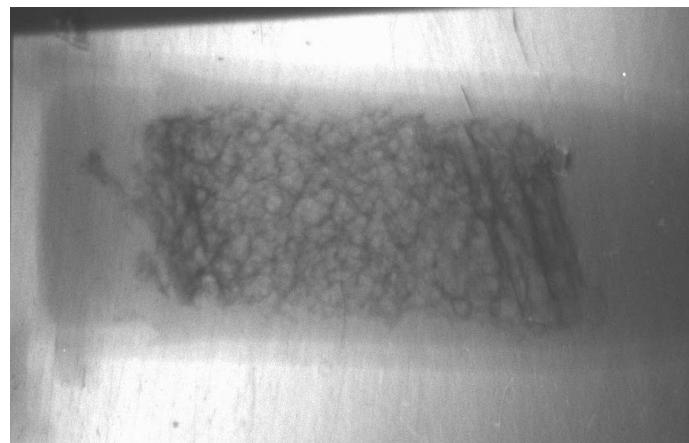
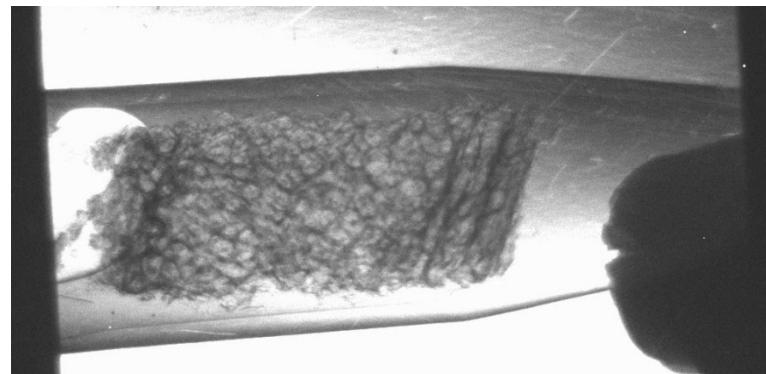
Conclusions: X-ray phase, as detected by XDFI, has superior contrast over absorption for soft tissue processes such as atherosclerotic plaque and breast cancer



K.M.Podurets, D.K.Pogorelyi, A.A.Manushkin, V.G.Nedorezov, V.A.Somenkov, S.A.Shchetinkin,
N.K.Kononov and A.P.Kuvardina, Experiments on Refraction Imaging of Biological Objects at the
Kurchatov Synchrotron Radiation Source,

Crystallography Reports Vol. 49, Suppl. 1, 2004 p.50-54) .

- Угловое отклонение пучка на границе воздух—объект в приближении геометрической оптики :
- $\delta\alpha = (1 - n) \cdot \text{ctg}\alpha$
- Изменение коэффициента преломления на границе органической ткани с воздухом:
- $(1 - n) = 1.5 \cdot 10^{-6} \lambda^2$



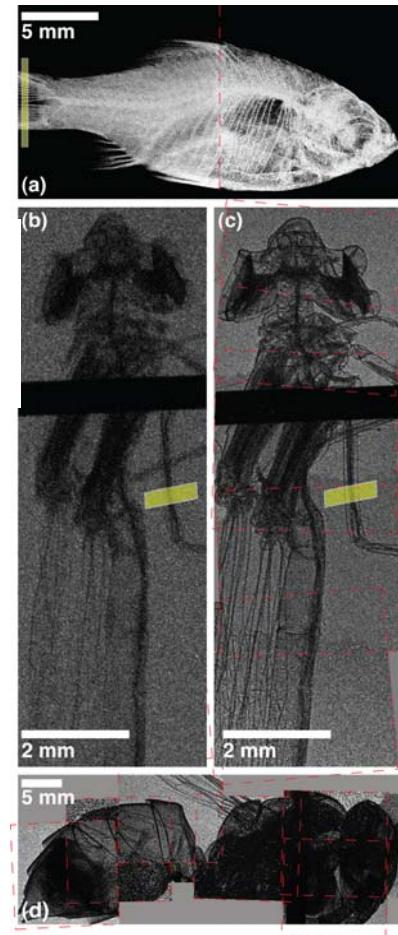
X-ray phase contrast imaging of biological specimens with femtosecond pulses of betatron radiation from a compact laser plasma wakefield (кильватер) accelerator

S. Kneip, C. McGuffey, F. Dollar, M. S. Bloom, V. Chvykov et al.

Appl. Phys. Lett. 99, 093701 (2011)

- X-ray absorption contrast image of
- a - an orange tetra fish
- b- a damselfly
- [u=2,79 m]
- x-ray phase contrast image .
- c- a damselfly
- d - a yellow jacket.
- [u = 0,44 m] L_{trans} - 10 μm
- Images are taken with betatron radiation from a laser wakefield accelerator. The spectrum is synchrotron like with $E_{\text{crit}} \approx 10 \text{ keV}$.
- The phase contrast images are taken in a single shot 30 fs exposure.

$$L_{\text{trans}} = \frac{\lambda u}{2\pi w_{x,y}},$$



Заключение

- Ядерная фотоника – новое научное направление или традиционные фотоядерные исследования при низких энергиях вблизи порога ?
- Есть ли преимущества новых методов, основанных на использовании фемтосекундных лазеров, по сравнению с традиционными ускорительными экспериментами ?
Энергия пучка, монохроматичность, интенсивность, эмиттанс, скважность, стоимость.
Метод обратного комптоновского рассеяния на накопителях электронов с длинноволновыми лазерами.
Фазовый контраст рентгеновских изображений.
- Большинство прикладных задач можно решать традиционными методами на тормозных пучках как на ускорительных, так и на лазерных установках, в том числе проблему ядерной безопасности и нераспространения ядерных материалов.