

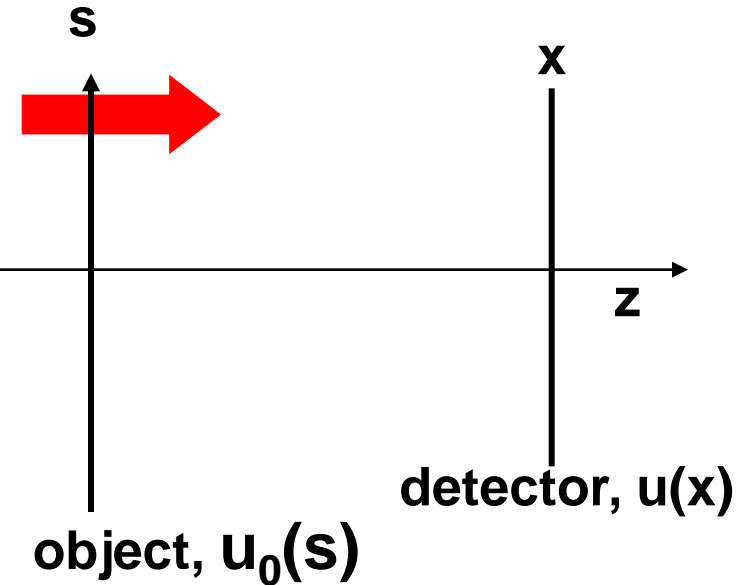
- **Coherent Reflection Imaging at Grazing Angles of Incidence.**
- **Laser–Thomson X-ray Generator meets MP0601 Network Objectives.**

A.V. Vinogradov

Lebedev Physical Institute, Moscow

Coherent reflection *lensless* imaging.

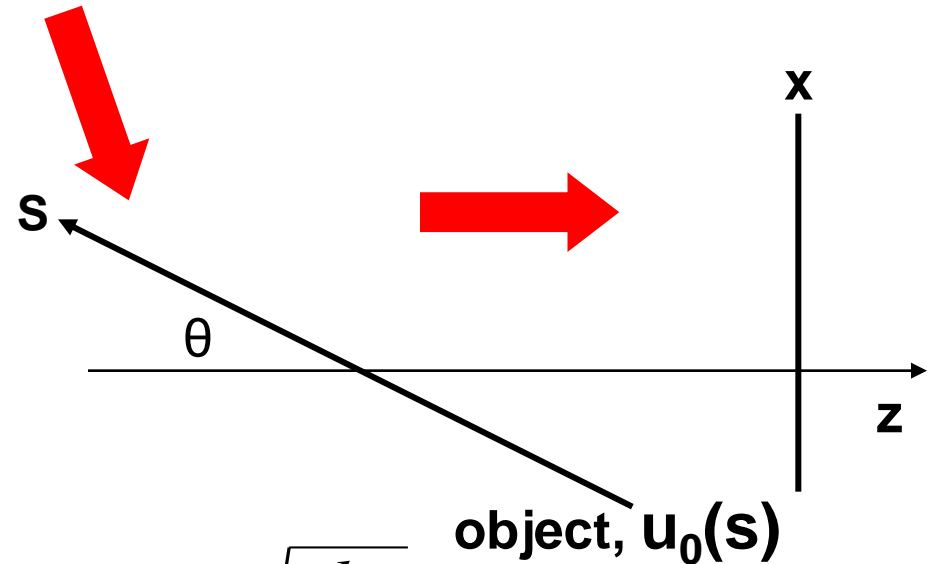
Transmission



$$u(x, z) = \sqrt{\frac{k}{2\pi iz}} \int_{-\infty}^{\infty} u_0(s) ds e^{i \frac{k(x-s)^2}{2z}}$$

Fresnel

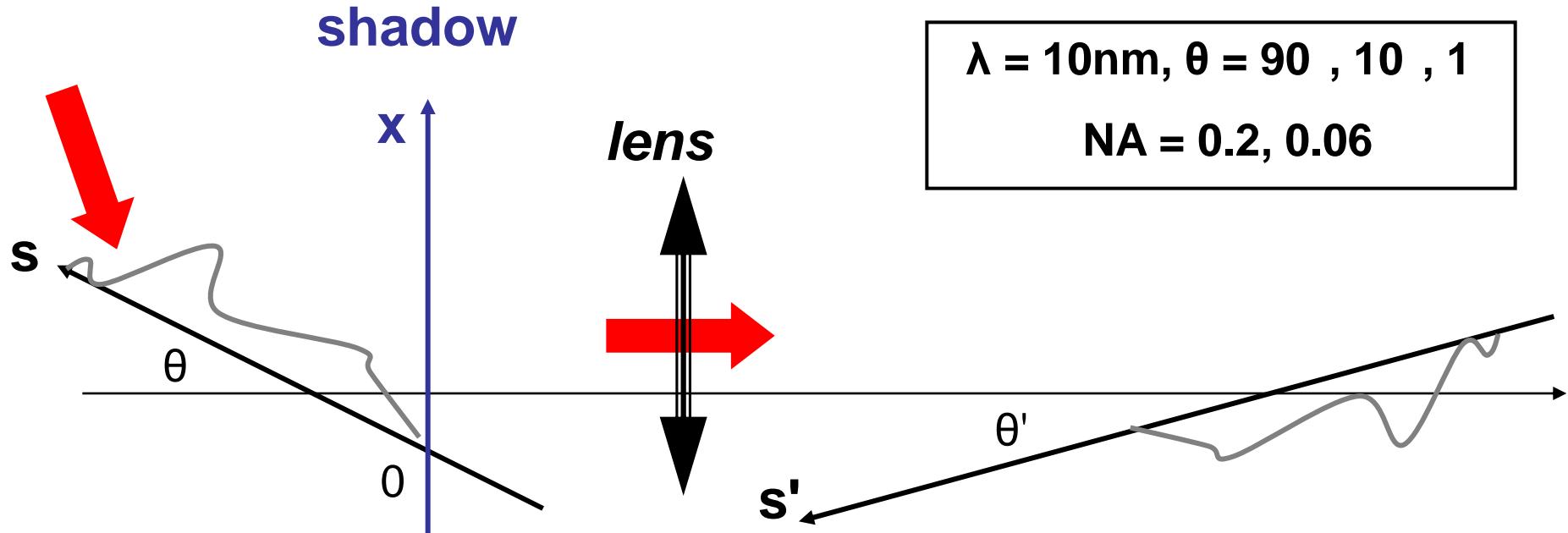
Reflection



$$u(x, z) = \sqrt{\frac{k}{2\pi i}} \int_{-\frac{z}{\cos\theta}}^{\infty} \frac{u_0(s) ds}{(z + s \cos\theta)^{3/2}} e^{i k \left(\frac{x - s \sin\theta}{z + s \cos\theta} \right)^2}$$

Tilt object integral

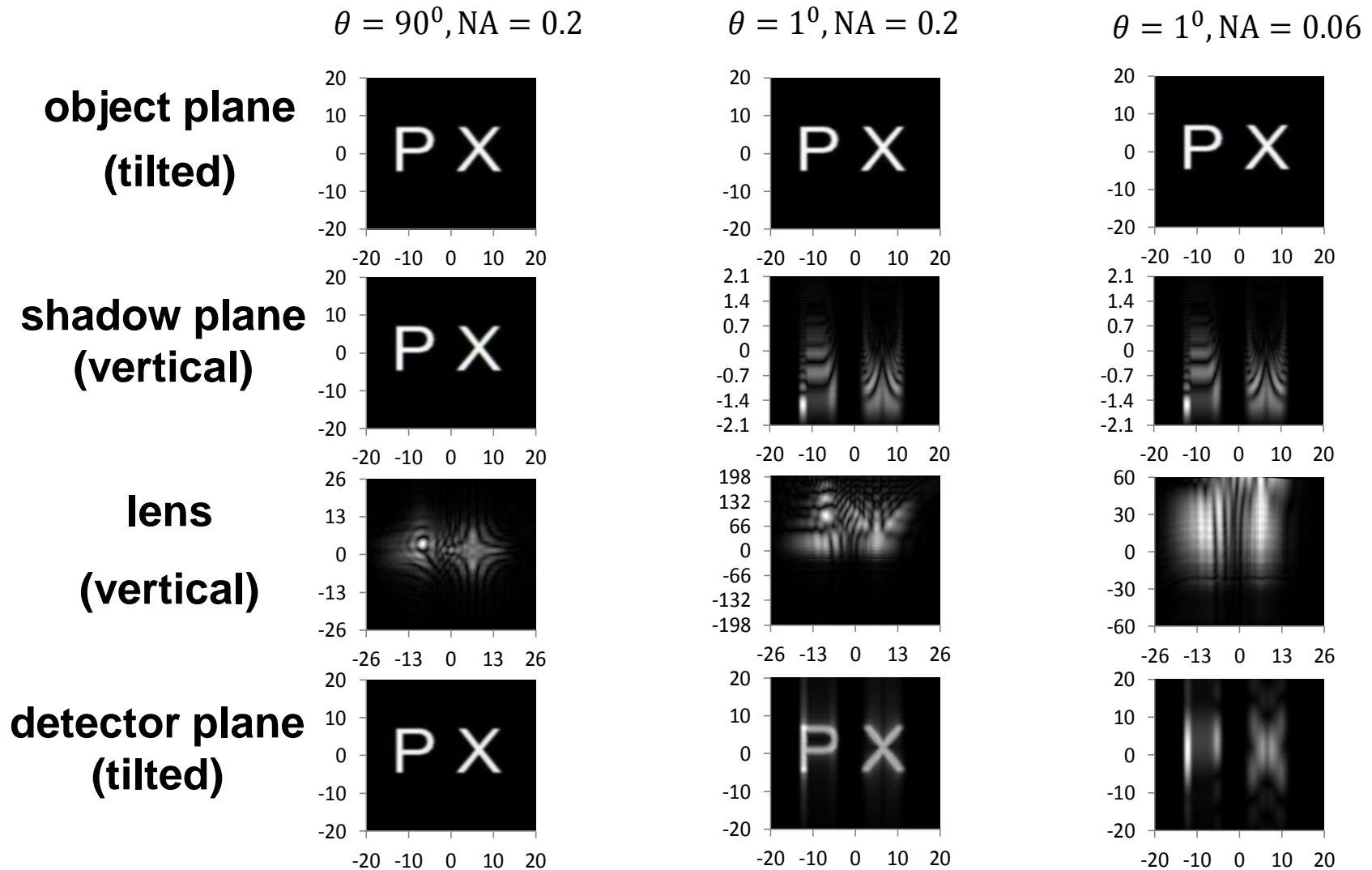
Coherent reflection *lens* imaging.



$$u_0(s) \rightarrow u(x) = \begin{cases} \text{tilt object integral, } x > 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

$u(x) \rightarrow \text{lens} \rightarrow u(s')$ — Fresnel integral.

Lens coherent imaging of tilted reflective objects.



SUMMARY

- The theory and software are developed for 3D simulation of coherent imaging of reflective objects illuminated at grazing angles of incidence
- The applications are:
 - (a) X-ray methods for surface sciences
 - (b) mirror optics for SR and FELs.

Laser-Electron (Thomson) X-Ray Generator.

1. ~ 50 MeV accelerator unit.
2. ps 1.06 μ laser unit, av. power 0.3 – 1 kW.
3. Synchronization system.
4. X-ray optics.

X-ray beam: 10 – 60 keV, tunable, collimated in $\sim 1^\circ$,
 $10^{11} - 10^{13}$ ph/sec.

Estimated cost – 10 M\$, size – 10mX20m.



^aP.N. Lebedev Physical Institute

^b M.V. Lomonosov Moscow
State University



Relativistic Thomson Scattering in Compact Linacs and Storage Rings: a Route to Tunable Laboratory-Scale X-ray Sources.

E.G. Bessonov^a, M.V. Gorbunkov^a, B.S. Ishkhanov^b, P.V.
Kostryukov^b, Yu.Ya. Maslova^a, **V.I. Shvedunov^b**, V.G. Tunkin^b,
A.V. Vinogradov^a

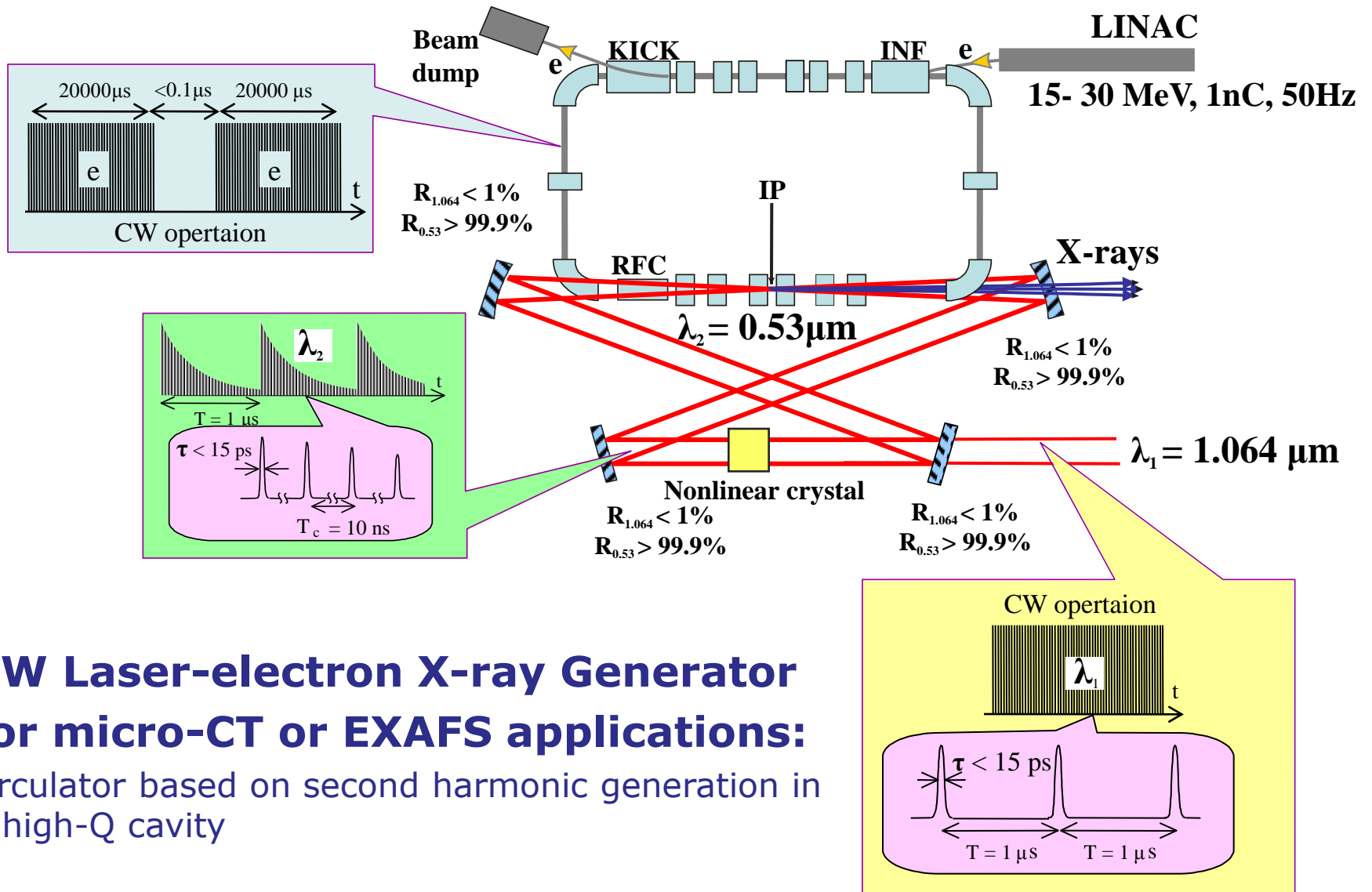
Who Wants a Compact Source?

1. See Objectives of MP0601 Network, started Brussels, 2-3 April 2007.
2. W.S. Graves, F.X. Kaertner, D.E. Moncton
“High Repetition Rate Inverse Compton Scattering Source”, 2010 SLAC:
 - **Academic** - *Harvard, Purdue, Boston U., Niels Bohr Institute, London Center for Nanotechnology, Institute of Biophysics and Nanosystems – Austrian Academy of Sciences*
 - **Medical**
Massachusetts General Hospital
 - **National Labs**
ORNL, National High Magnetic Field Lab, NIST
 - **Industrial**
Novartis, Wyeth, GE, Rigaku Americas Corp, Siemens
 - **Cultural**
Louvre Museum

Compact Thomson X ray sources

	Applications	Flux (@ 10% bandwidth)	Type	Energy [KeV]	Source size (μm)
ThomX, France	<i>Medicine Cultural Heritage</i>	10^{13} (25 MHz)	Storage ring	40-90	70
Thomson source at INFN-LNF, Italy	<i>Mammography Advanced Imaging inside Hospitals</i>	$2 \cdot 10^8$ - $2 \cdot 10^{10}$	Linac	20-500(50-90)	0.5-13
COBALD, Daresbury, UK		$>10^{20}$ photons/mm ² /mrad ² /s/0.1% bandwidth	Linac	30 keV , 15 keV (transverse)	20 35
NESTOR, Kharkov, Ukraine	<i>Angiography, Biology, Hard X-rays</i>	$2.6 \cdot 10^{13}$ (25 MHz)	Storage ring	6-900	35
LEXG, LPI-MSU, Moscow, Russia	<i>XRD, EXAFS for nanoscience</i>	up to 10^{13}	Compact Storage ring	12-45	20
LEXG, LPI-MSU, Moscow, Russia	<i>K-edge subtraction imaging for medicine</i>	$4.5 \cdot 10^{13}$;	Compact Storage ring, 2 interaction lasers	33	20

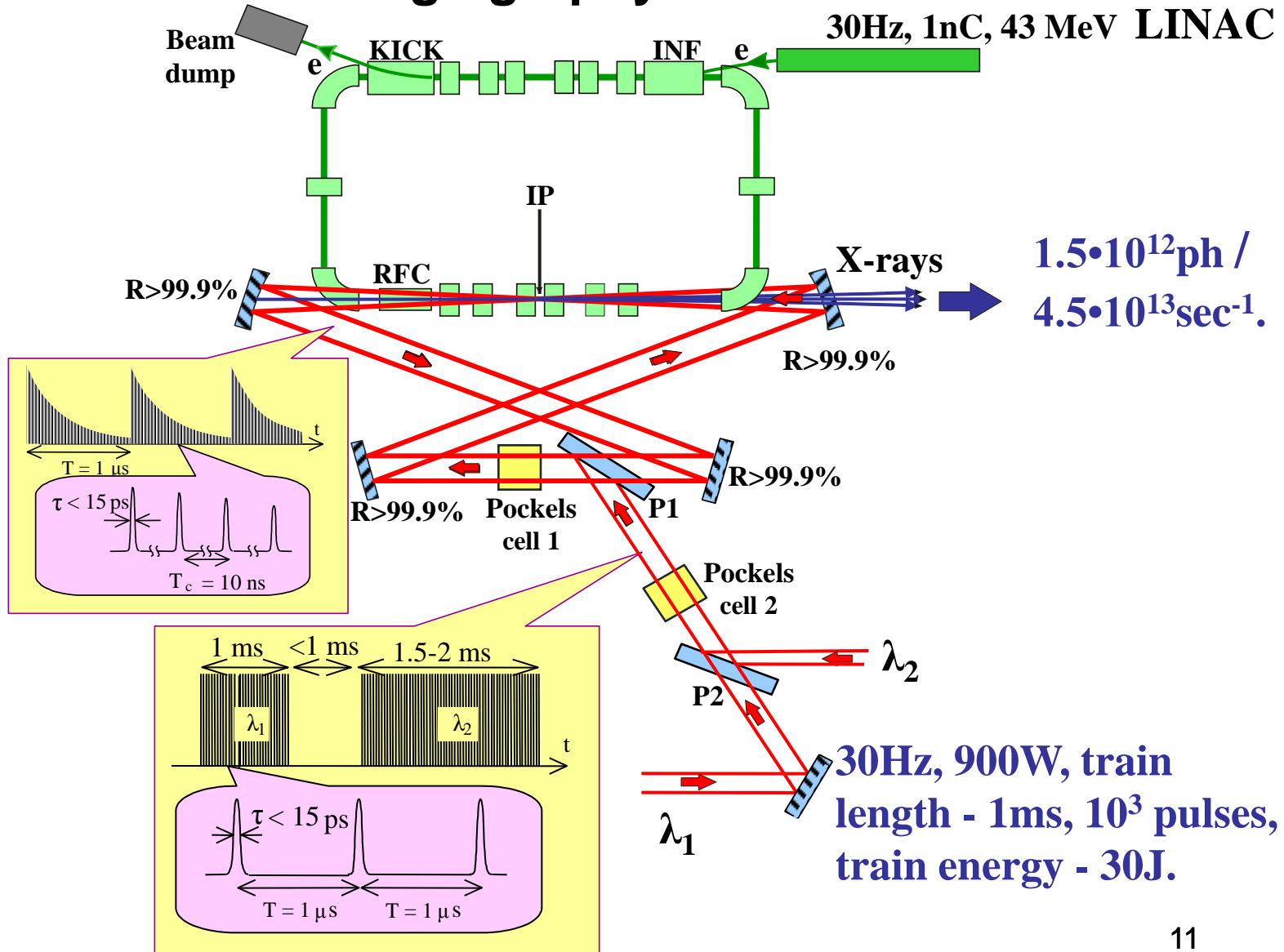
Circulator and storage ring for enlargement of X-ray photon flux up to 10^{13} sec^{-1} .



CW Laser-electron X-ray Generator for micro-CT or EXAFS applications:

circulator based on second harmonic generation in a high-Q cavity

LEXG designed for K-edge subtraction imaging for human angiography



Pulsed operation mode

SUMMARY

1. Laser-Thomson X-ray generator is a feasible source that meets the MP0601 objectives.
2. Several projects exist in Europe and outside. They are mainly based on present technologies.
3. When developed it promises an impact on science, education, public health and security...

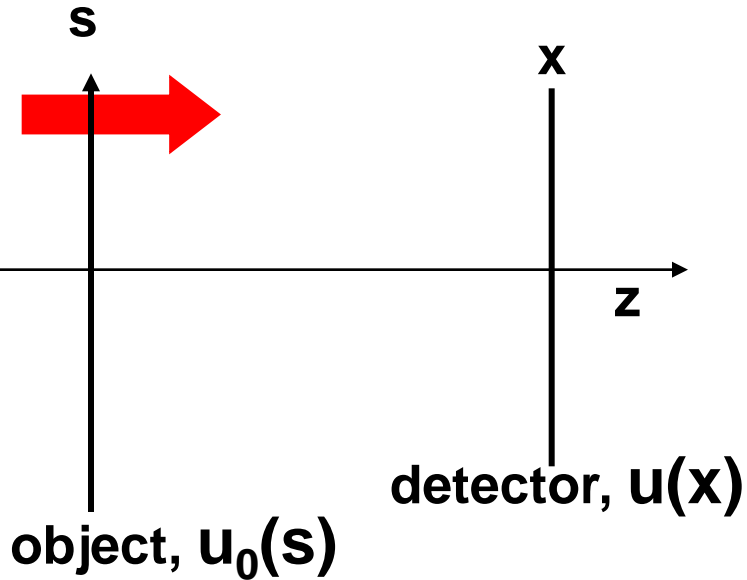
1. Е.Г.Бессонов, А.В.Виноградов, А.Г.Турьянский. Лазерно-электронный источник рентгеновского излучения для медицинских применений, ПТЭ, №5, с.142-148, 2002.
2. Е.Г.Бессонов, А.В.Виноградов, М.В.Горбунков, А.Г.Турьянский, Р.М.Фещенко, Ю.В.Шабалин, Лазерно-электронный источник рентгеновского излучения для медицинских применений, УФН, т.173, №8, 2003, с.899-903, 2003.
3. E.G.Bessonov, R.M.Feshchenko, M.V.Gorbunkov, A.V.Vinogradov, V.I.Shvedunov, Energy losses and efficiency of laser-electron X-ray generator for medical applications, <http://xxx.lanl.gov/abs/physics/0405003> , 2004.
4. Р.М. Фещенко, Е.Г. Бессонов, М.В. Горбунков, А.В. Виноградов, В.И. Шведун, ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ, 6-я Международная научная конференция ЭКОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА И ПРИРОДА, Плс, 5-11 июля 2004, сборник тезисов с. 255, 2005.
5. M.V. Gorbunkov, V.G. Tunkin, E.G. Bessonov, R.M. Feshchenko, I.A. Artyukov, Yu.V. Shabalin, P.V. Kostryukov, Yu.Ya. Maslova, A.V. Poseryaev, V.I. Shvedunov, A.V. Vinogradov, B.S. Ishkhanov, Proposal of a Compact Repetitive Dichromatic X-ray Generator with Millisecond Duty Cycle for Medical Applications, "Soft X-ray Lasers and Applications VI", SPIE Vol. 5919, eds. Fill & Suckewer, 2005.
6. М.В. Горбунков, Ю.Я. Маслова, А.М. Чекмарев, Ю.В. Шабалин. Проявление нелинейной динамики при генерации большого числа микропугов ультракоротких импульсов с помощью лазера, управляемого обратной связью. Конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики» (Демидовские чтения). Тезисы докладов. стр. 149, 2006.
7. Лазерно-электронный генератор рентгеновского излучения. И.А.Артюков, Е.Г.Бессонов, А.В.Виноградов, М.В.Горбунков, Я.В.Зубавичус, Б.С.Ишханов, П.В.Кострюков, Ю.Я.Маслова, Н.Л.Попов, А.В.Посеряев, Ю.Л.Словохотов, В.Г.Тункин, Ю.А.Успенский, Р.М.Фещенко, Ю.В.Шабалин, В.И.Шведун. Препринт НИИЯФ МГУ, 2006-7/806, 2006..
8. E.G.Bessonov, M.V. Gorbunkov, A.A.Mikhailichenko, Enhanced optical cooling of ion beams for LHC, Proc. 2006 European Particle accelerator Conference, June 26-30 2006. Edinburgh, Scotland, Electronic Journal of Instrumentation - 2006 JINST 1 P08005, 2006.
9. Р.М. Фещенко, Е.Г. Бессонов, М.В. Горбунков, А.В. Виноградов, В.И. Шведун, Лазерно-электронный генератор рентгеновского излучения для медицинской диагностики. Конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики» (Демидовские чтения). Тезисы докладов, стр. 51, 2006 г.
10. I.A. Artyukov, E.G. Bessonov, A.V. Vinogradov, M.V. Gorbunkov, Yu.Ya. Maslova, N.L. Popov, A.A. Postnov, Yu.A. Uspenski, R.M. Feshchenko, Yu.V. Shabalin, Yu.L. Slovoxhotov, Ya.V. Zubavichus, B.S. Ishkhanov, A.V. Poseryaev, V.I. Shvedunov, P.V. Kostryukov, V.G. Tunkin. A project of laser electron X-ray generator for scientific applications. Springer Proc. in Physics 115, 10th International Conference, August 20-25, 2006, Berlin, Germany, X-Ray Lasers, p.631, 2006.
11. M.V. Gorbunkov, Yu.Ya. Maslova, Yu.V. Shabalin, A.V. Vinogradov. Laser Physics Research Relevant to Laser-Electron X-Ray Generator. Invited paper, Springer Proc. in Physics 115, 10th International Conference, August 20-25, 2006, Berlin, Germany, X-Ray Lasers, p.619, 2006.
12. M.V. Gorbunkov, Yu.Ya. Maslova, V.A. Petukhov, M.A. Semenov, Yu.V. Shabalin, A.V. Vinogradov. Quasi CW mode, Regular and Chaotic Dynamics in Picosecond Nd:YAG Laser with millisecond Pumping under Optoelectronic Feedback Control. Proceedings SPIE, V. 6731, 67311Z-1—67311Z-6, 2007.
13. И.А. Артюков, Е.Г. Бессонов, А.В. Виноградов, М.В. Горбунков, Я.В.Зубавичус, Б.С.Ишханов, П.В. Кострюков, Ю.Я. Маслова, Н.Л. Попов, А.В.Посеряев, Ю.Л.Словохотов, В.Г.Тункин, Ю.А. Успенский, Р.М.Фещенко, Ю.В.Шабалин, В.И. Шведун Лазерно-электронный генератор рентгеновского излучения. Поверхность, №8, стр. 3-11, 2007.
14. M. V. Gorbunkov, Y. Y. Maslova, and Y. V. Shabalin. Development of a Laser Unit with a Time Structure Required by a Medical Thomson X-Ray Generator in Nuclear Physics Methods and Accelerators in Biology and Medicine-2007, Editors: C. Granja, C. Leroy, I. Stekl, AIP Conference Proceedings, Vol. 958, American Institute of Physics, New York, USA (2007) pp. 246-247, 2007.
15. M.V. Gorbunkov, Yu.Ya. Maslova, Yu.V. Shabalin, A.V. Vinogradov. Simulation of Regular and Chaotic Dynamics of a Picosecond Laser with Optoelectronic Feedback, in *WDS'07 Proceedings of Contributed Papers: Part III – Physics* (eds. J. Safrankova and J. Pavlu), Prague, Matfyzpress, pp. 140–144, 2007.

16. М.В. Горбунков, Е.Г. Бессонов, А.В. Виноградов, Б.С. Ишханов, П.В. Кострюков, Ю.Я. Маслова, В.Г. Тункин, В.И. Шведун. Компактный перестраиваемый генератор рентгеновского излучения для исследования структуры материалов и изделий. Труды РСНЭ-2007, 12-17 ноября, Москва, 2007, стр. 592, 2007.
17. E.G. Bessonov, M.V. Gorbunkov, B.S. Ishkhanov, P.V. Kostryukov, Yu.Ya. Maslova, V.I. Shvedunov, V.G. Tunkin, A.V. Vinogradov. Relativistic Thomson scattering in compact linacs and storage rings: a route to tunable laboratory-scale X-ray sources. Proceedings MWTA-2007. Moscow, 15-19 October 2007. pp. 41, 2007.
18. E.G. Bessonov, M.V. Gorbunkov, Yu.Ya. Maslova, P.V. Kostryukov, V.G. Tunkin, B.S. Ishkhanov, V.I. Shvedunov, A.V. Vinogradov. Relativistic Thomson scattering in compact linacs and storage rings: a route to quasi-monochromatic tunable laboratory-scale X-ray sources. Proceedings SPIE, V. 6702, 6702E-1—6702E-9, 2007.
19. E.G. Bessonov, M.V. Gorbunkov, B.S. Ishkhanov, P.V. Kostryukov, Yu.Ya. Maslova, V.I. Shvedunov, V.G. Tunkin, and A.V. Vinogradov. Laser-electron generator for X-ray applications in science and technology. Laser and Particle Beams, Vol. 26, No. 3, p.p.489-495, 2008.
20. M.V. Gorbunkov, Yu.Ya. Maslova, Yu.V. Shabalin. Period doubling and deterministic chaos in a picosecond laser controlled with a combination of positive and negative optoelectronic feedbacks. Proc. ICQO 2008. September 20-23, 2008, Vilnius, p.p.6-7, 2008.
21. E.G. Bessonov, M.V. Gorbunkov, P.V. Kostryukov, Yu.Ya. Maslova, V.G. Tunkin, A.A. Postnov, A.A. Mikhailichenko, V.I. Shvedunov, B.S. Ishkhanov, A.V. Vinogradov. Design study of compact Thomson X-ray sources for material and life sciences applications. 11th International Conference on X-ray Lasers, Belfast, 17-22 August, 2008.
22. E.G. Bessonov, M.V. Gorbunkov, P.V. Kostryukov, Yu.Ya. Maslova, V.G. Tunkin, and A.V. Vinogradov. Design study of compact Thomson X-ray sources for material and life sciences applications. Compton Sources for X/gamma Rays: Physics and Applications, Sardinia, Italy, 7-12 September 2008.
23. M.V. Gorbunkov, Yu.Ya. Maslova, Yu.V. Shabalin. Period doubling and deterministic chaos in a picosecond laser controlled with a combination of positive and negative optoelectronic feedbacks. XII International Conference on Quantum Optics and Quantum Information, September 20–23, 2008, Vilnius, Lithuania, 2008.
24. M. V. Gorbunkov, Yu. Ya. Maslova, V. A. Petukhov, M. A. Semenov, Yu. V. Shabalin and A. V. Vinogradov. Submicrosecond regular and chaotic nonlinear dynamics in a pulsed picosecond Nd:YAG laser with millisecond pumping. APPLIED OPTICS / Vol. 48, No. 12 / 20 April 2009, p.2267-2274, 2009.
25. M.V. Gorbunkov, Yu.Ya. Maslova, A.V. Vinogradov. Optical unit of Laser-Electron X-ray Generator designed for medical applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 608 (2009) S32–S35, 2009.
26. E.G. Bessonov, M.V. Gorbunkov, P.V. Kostryukov, Yu.Ya. Maslova, V.G. Tunkin, A.A. Postnov, A.A. Mikhailichenko, V.I. Shvedunov, B.S. Ishkhanov and A.V. Vinogradov. Design study of compact Laser-Electron X-ray Generator for material and life sciences applications. JINST 4 P07017, 2009.
27. М.В. Горбунков, Ю.Я. Маслова, Ю.В. Шабалин. Каскад удвоений периода и детерминированный хаос в лазере с самосинхронизацией мод за счет комбинации инерционных отрицательной и положительной обратных связей. Краткие сообщения по физике ФИАН, №5, с. 39-48, 2009.
28. М.В. Горбунков, Ю.Я. Маслова, В.А. Петухов, М.А. Семенов, Ю.В. Шабалин. Генерация регулярной последовательности микропугов коротких импульсов с дискретно варьируемым периодом следования. Краткие сообщения по физике ФИАН, №9, с. 29-39, 2009.
29. E. G. Bessonov, M. V. Gorbunkov, P. V. Kostryukov, Yu. Ya. Maslova, V. G. Tunkin, A. A. Postnov, A. A. Mikhailichenko, V. I. Shvedunov, B. S. Ishkhanov, A. V. Vinogradov, "Design study of compact Thomson X-ray sources for material and life sciences applications", Springer Proceedings in Physics, 130, X-ray Lasers 2008, pp. 521-535, Ciaran L.S.Lewis and Dave Riley, Springer, 2009.
30. A.V. Vinogradov, E.G. Bessonov, M.V. Gorbunkov, B.S. Ishkhanov, P.V. Kostryukov, Yu.Ya. Maslova, V.I. Shvedunov, V.G. Tunkin, "The Project of Laser-Electron X-Ray Generator based on relativistic Thomson Scattering". 2nd SCHOOL AND WORKSHOP ON X-RAY MICRO AND NANOPROBES (XMNP 2009), June 14th to 22nd, 2009, Palinuro (Salerno - Italy), 2009.

31. K.A. Bubnov, M.V. Gorbunkov, S.M. Kutuzov, Yu.Ya. Maslova, V.A. Petukhov, M.A. Semenov, Yu.V. Shabalin. Laser cavity round trip time scale regular and chaotic nonlinear dynamics in a picosecond laser controlled with the combination of positive and negative optoelectronic feedbacks. Proc. of SPIE Vol. 7993, 79930S-1--79930S-10, 2011.
32. A.V. Vinogradov, E.G. Bessonov, M.V. Gorbunkov, B.S. Ishkhanov, P.V. Kostryukov, Yu.Ya. Maslova, V.I. Shvedunov, V.G. Tunkin. The project of laser-electron X-ray generator based on relativistic Thomson scattering. Proceedings of 9th Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interaction with Electromagnetic Radiation, p. 44, April 13-14, 2011, Moscow, Russia.
33. Е.Г. Бессонов, К.А. Бубнов, А.В. Виноградов, М.В. Горбунков, П.В. Кострюков, Ю.Я. Маслова, В.Г. Тункин, Ю.В. Шабалин, Д.В. Яковлев. Прототип оптической системы лазерно-электронного источника рентгеновского излучения для медицинских применений. Сборник трудов Пятой Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям. г. Саров, 26 - 29 апреля 2011 г.
34. Бубнов К.А., Горбунков М.В., Кострюков П.В., Маслова Ю.Я., Тункин В.Г., Шабалин Ю.В., Яковлев Д.В. Регулярная временная структура лазера, управляемого быстрой отрицательной обратной связью с затуханием. Сборник трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов "Оптика-2011". Санкт-Петербург, 17-21 октября 2011 г./ Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: НИУИТМО, 2011. – Т.1., с. 149-151.
35. Бубнов К.А., Горбунков М.В., Кострюков П.В.*, Маслова Ю.Я., Тункин В.Г.*, Шабалин Ю.В., Яковлев Д.В. Генерация наперед заданной регулярной временной структуры излучения в твердотельном лазере, управляемом обратными связями с затуханием. Труды 5-й Всероссийской молодежной конференции «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики». 14-16 ноября 2011 г., с. 59.

Coherent reflection *lensless* imaging.

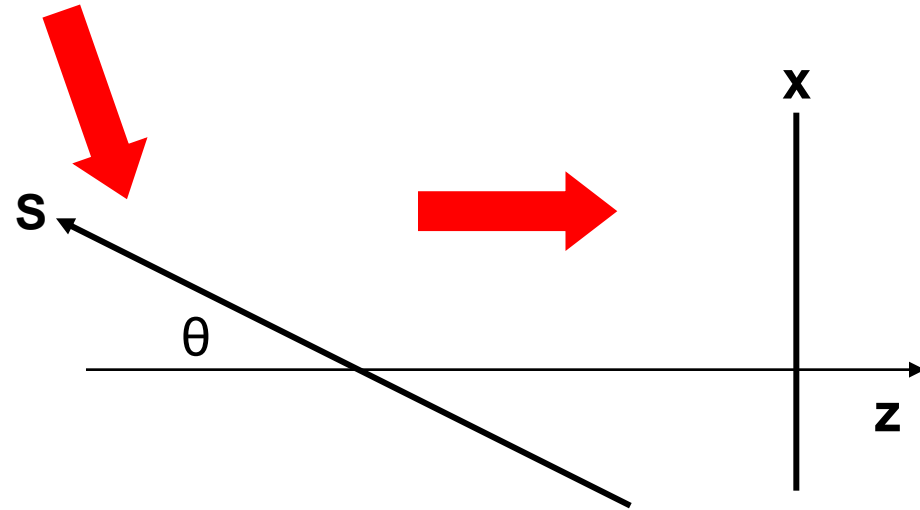
Transmission



$$u(x, z) = \sqrt{\frac{k}{2\pi iz}} \int_{-\infty}^{\infty} u_0(s) ds e^{i \frac{k(x-s)^2}{2z}}$$

Fresnel integral

Reflection



$$u(x, z) = \sqrt{\frac{k}{2\pi i}} \int_{\frac{z}{\cos\theta}}^{\infty} \frac{u_0(s) ds}{(z + s \cos\theta)^{3/2}} e^{i \frac{k(x - s \sin\theta)^2}{2(z + s \cos\theta)}}$$

Tilt object integral