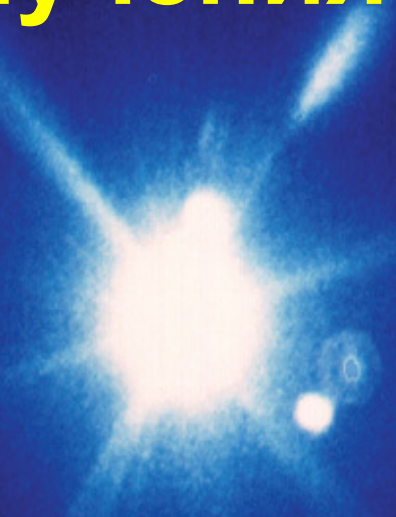



# Синхротронное излучение в исследованиях вещества

Профессор Михайлин Виталий Васильевич

[vvm@srd.sinp.msu.ru](mailto:vvm@srd.sinp.msu.ru)

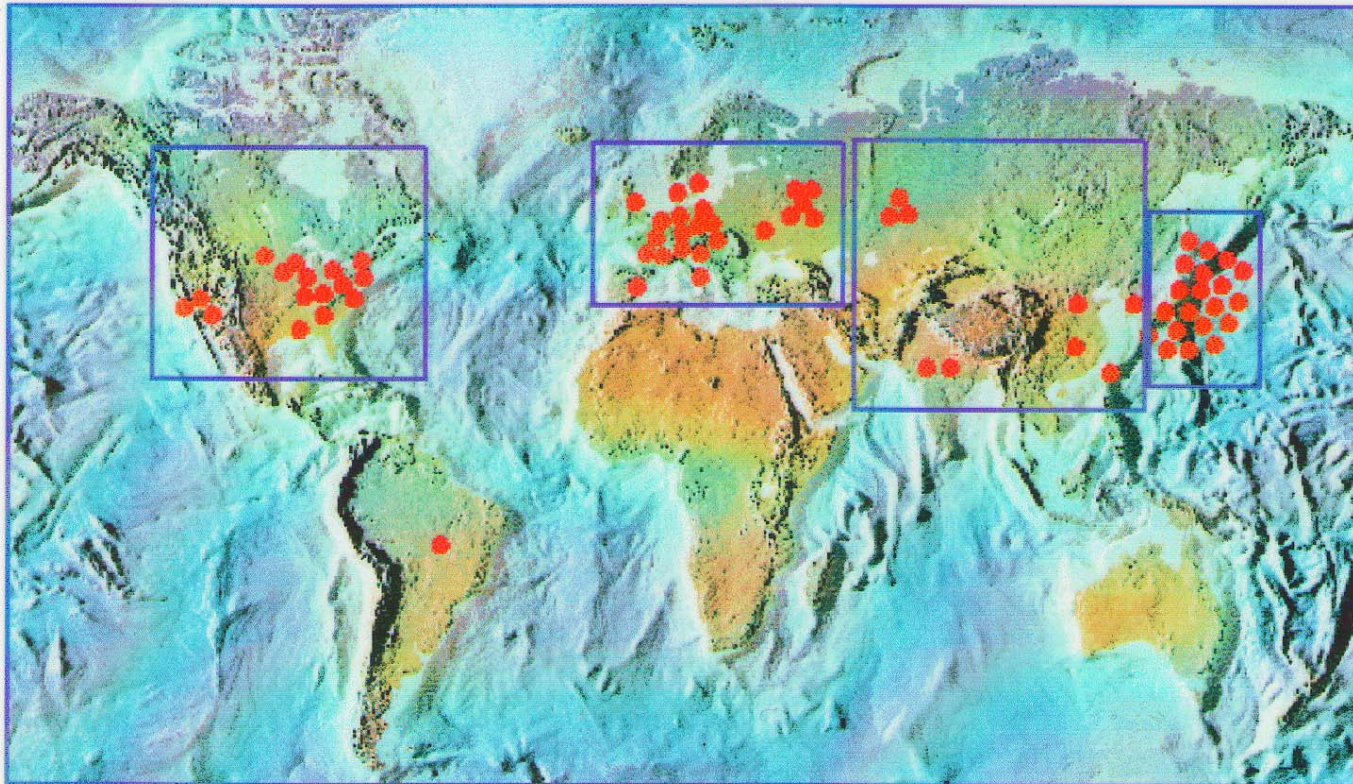
**В свете синхротронного  
излучения...**



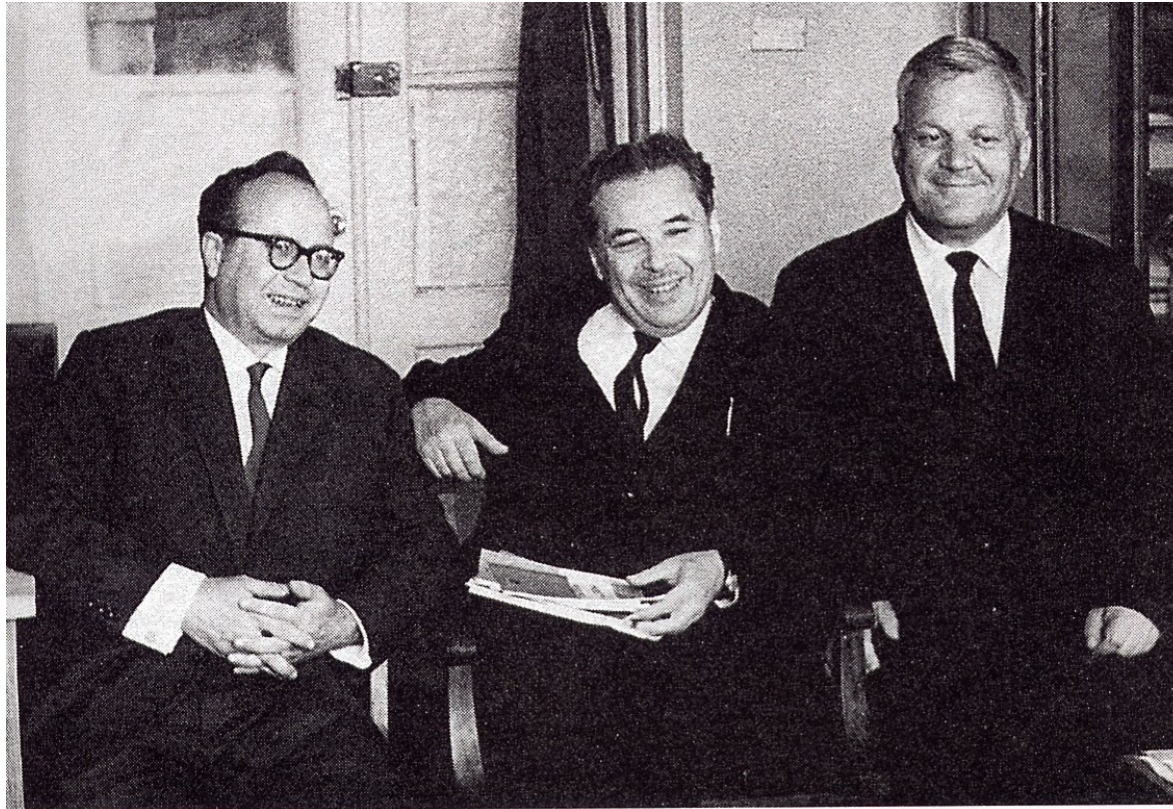


Синхротронное излучение  
используется сегодня во всех  
областях науки, где исследуется  
взаимодействие излучения с  
веществом, а также в медицине и  
технологии. Во всем мире  
действует более 100 источников  
СИ, еще 40 строится.

# The World of Synchrotron Radiation



# Первоначальные теоретические и экспериментальные исследования



Профессора И.М. Тернов, Д.Д. Иваненко,  
А.А. Соколов (1967 г.).



И.Я.Померанчук

ФИЗИКА

Д. ИВАНЕНКО и И. ПОМЕРАНЧУК

О МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ, ДОСТИЖИМОЙ В БЕТАТРОНЕ

(Представлено академиком В. А. Фоком 27 III 1944)

Недавно Керстом (1) был сконструирован новый прибор — бетатрон, с помощью которого уже удалось получить пучок электронов, имеющих энергию 20 MeV. Принцип действия бетатрона заключается в ускорении электронов вихревым электрическим полем, возникающим при изменении во времени магнитного поля, закручивающего электрон. В отличие от циклотрона, пригодность которого ограничена нерелятивистской областью, в бетатроне нет пределов для достижимых энергий из-за зависимости массы от скорости частиц.

Однако следует указать на наличие другого обстоятельства, приводящего к появлению предела энергий, которые могут быть достигнуты в бетатроне. Такой причиной является тормозное излучение электронов в закручивающем их магнитном поле. Действительно, в магнитном поле электрон движется ускоренно и, в соответствии с классической электродинамикой, излучает энергию. Легко видеть, что квантовые эффекты, ввиду больших размеров орбиты, не играют роли. Как указано одним из нас (2), электрон, движущийся в магнитном поле с напряжением  $H$ , излучает на единицу пути энергию, равную

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2}{3} \left( \frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \left( \frac{E}{mc^2} \right)^2 \left( \frac{\vec{v} \cdot \vec{H}}{c} \right)^2 \quad (1)$$

( $e$  — заряд,  $m$  — масса электрона,  $\vec{v}$  — скорость,  $E$  — энергия. При выводе (1) предполагается, что  $E \gg mc^2$ ). В бетатроне Керста на большей части пути  $v \approx c$  и перпендикулярно  $H$ ; поэтому

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{2}{3} r_0^2 \left( \frac{EH}{mc^2} \right)^2 \quad \left( r_0 = \frac{e^2}{mc^2} \right). \quad (2)$$

Предельная энергия  $E_0$  определится из условия, что (2) будет равно энергии, приобретенной электроном в вихревом электрическом поле на единицу пути (3):

$$\frac{2}{3} r_0^2 \left( \frac{E_0 H}{mc^2} \right)^2 = \frac{e}{2\pi R_0 c} \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = e R_0 |\dot{H}| \quad (3)$$

( $R_0$  — радиус равновесной орбиты,  $\Phi$  — поток индукции,  $\dot{H} = dH/dt$ ).  
Отсюда

$$E_0 = mc^2 \sqrt{\frac{3}{2} \frac{e}{c} \frac{R_0 \dot{H}}{r_0^2 H^2}}. \quad (4)$$

ФИЗИКА

Д. ИВАНЕНКО и А. СОКОЛОВ

К ТЕОРИИ „СВЕТАЩЕГОСЯ“ ЭЛЕКТРОНА

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 25 II 1948)

1. Как было указано некоторое время тому назад (1), излучение электромагнитных волн электронами, движущимися в ускорителях типа бетатрона или синхротрона, должно достигать заметной величины при энергиях порядка  $10^8$  eV. Предсказанное Д. Иваненко и И. Померанчуком излучение было недавно обнаружено визуально (2). Новое излучение, обладающее специфическими особенностями, разумно назвать эффектом „светящегося“ электрона ввиду того, что максимум интенсивности при указанных энергиях, реально наиболее важных случаях, приходится на область видимого света.

Несмотря на то, что спектр „светящегося“ электрона исследовался рядом авторов (3-4), до сих пор не были получены замкнутые формулы, пригодные во всей интересующей нас области спектра.

2. Так как при движении электрона по окружности излучение происходит главным образом за счет нормального ускорения, можно ограничиться случаем равномерного вращения. В случае вращения по окружности радиуса  $a$  со скоростью  $v = \beta c$  электрона глобальное излучение энергии равно

$$\dot{w} = \frac{2}{3} \frac{e^{2q} c}{a^2 (1 - \beta^2)^2}. \quad (1)$$

Длина волны при дипольном излучении связана с частотой вращения  $\omega = v/a$  соотношением

$$\lambda = 2\pi c / \omega \quad (2)$$

или

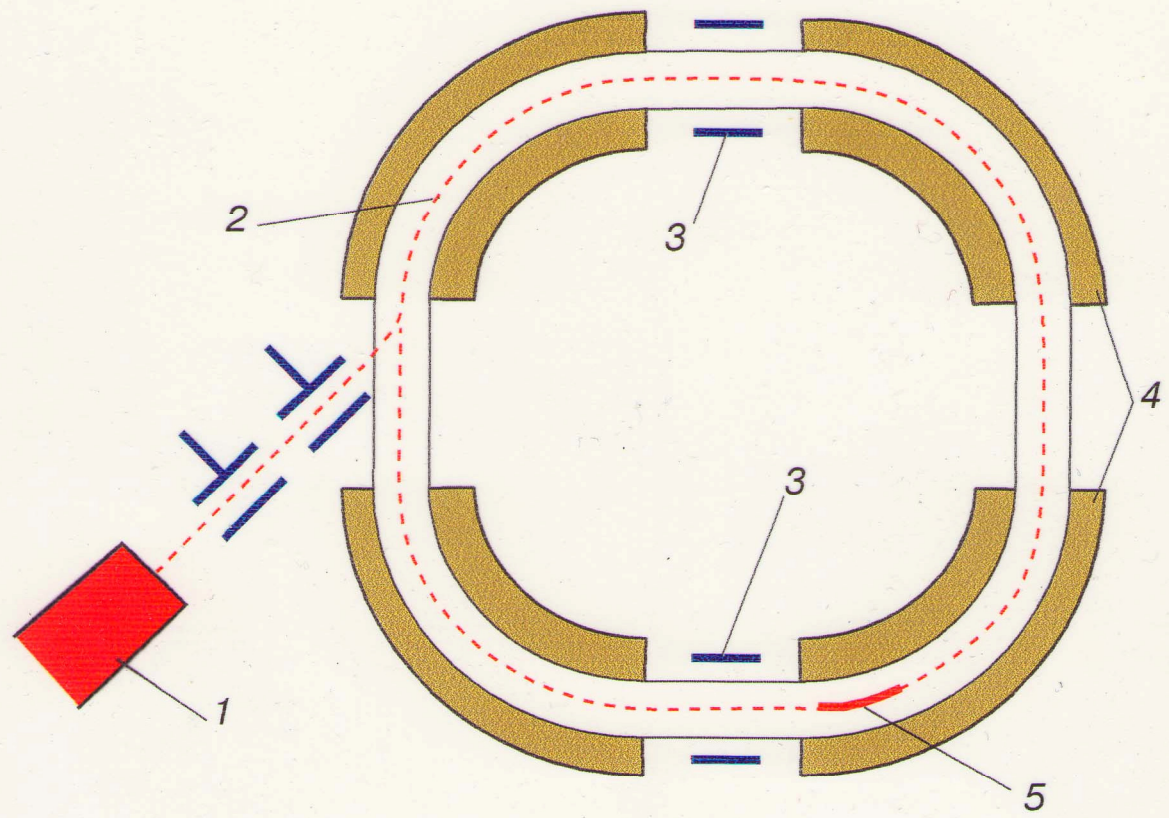
$$2\pi a / \lambda = v / c = \beta.$$

Так как интенсивности высших мультиполей номера  $n$  имеют порядок интенсивности дипольного излучения ( $n=1$ ), умноженной на величину

$$(2\pi a / \lambda)^{n-1} = \beta^{n-1}, \quad (3)$$

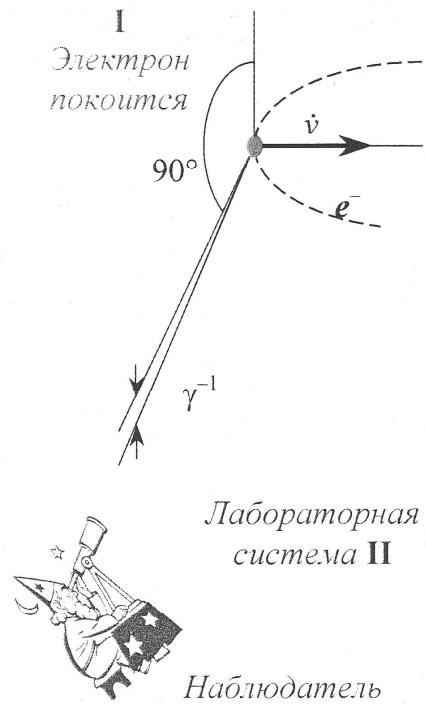
то при нерелятивистских скоростях мы можем ограничиться дипольным излучением.

Однако в ультрарелятивистском случае, когда  $\beta \approx 1$ , распределение интенсивности излучения в зависимости от  $n$  требует дополнительного исследования, так как разложение (3) теряет смысл.



**Схема циклического ускорителя**

- 1 – инжектор
- 2 – вакуумная камера
- 3 – ускоряющие промежутки
- 4 – квадранты магнита
- 5 – сгусток электронов



Источник света движется со

скоростью  $v = \beta c$ ,  $\beta = \frac{v}{c}$

- I. Свет распространяется под углом  $\theta'$  к оси  $z$
- II.  $\theta$  – угол, под которым видит свет наблюдатель.

Из классической электродинамики

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{1}{\gamma} \frac{\sin \theta'}{\beta + \cos \theta'}, \text{ где}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{E}{mc^2}$$

Углам  $\theta' > 90^\circ$  могут соответствовать малые углы  $\theta$  (обратная сторона)

$$\text{Пусть } \theta' = 90^\circ \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{1}{\gamma \beta}$$

$$v \rightarrow c \quad \beta \approx 1 \quad \theta \cong \frac{1}{\gamma} \quad \theta \approx \frac{mc^2}{E}$$

$$\omega_0 = \frac{c}{2\pi R} \quad \text{Поскольку угловая ширина } \sim \frac{1}{\gamma}, \text{ для наблюдателя}$$

$$\Delta t' \sim \frac{2\pi R}{c} \frac{1}{\gamma} \sim \frac{1}{\omega_0 \gamma}$$

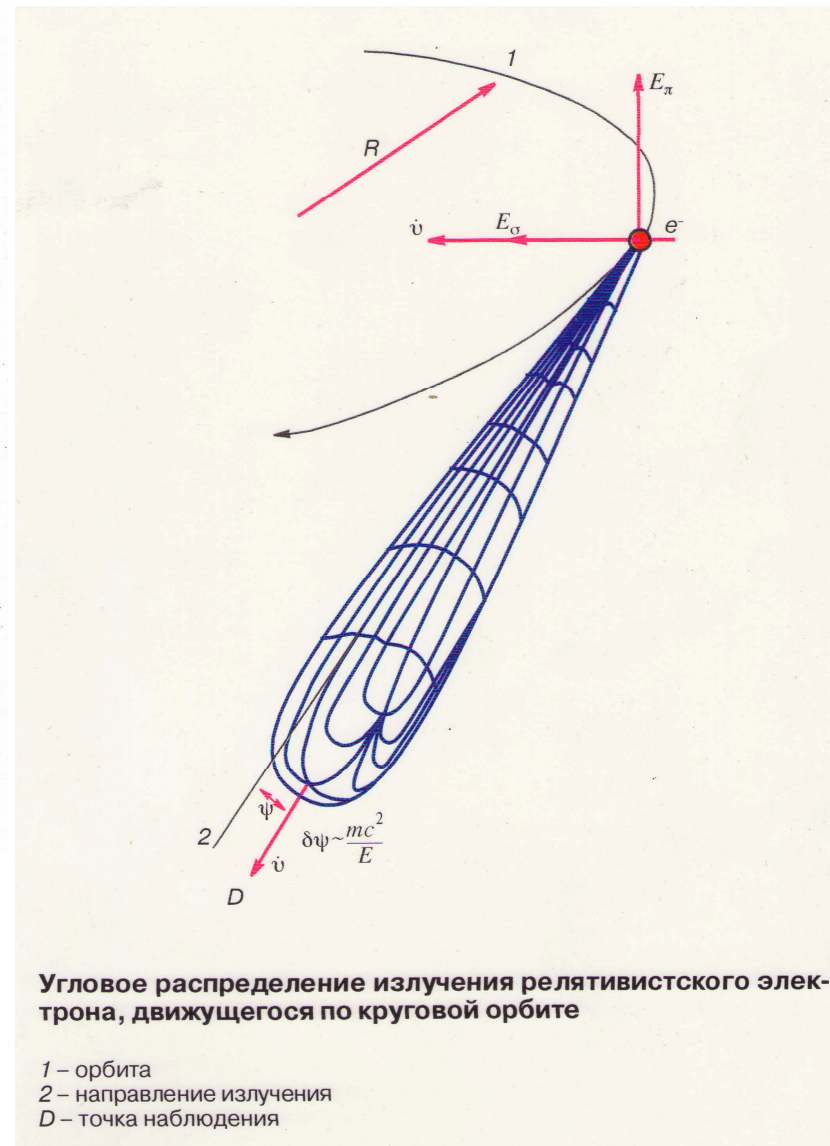
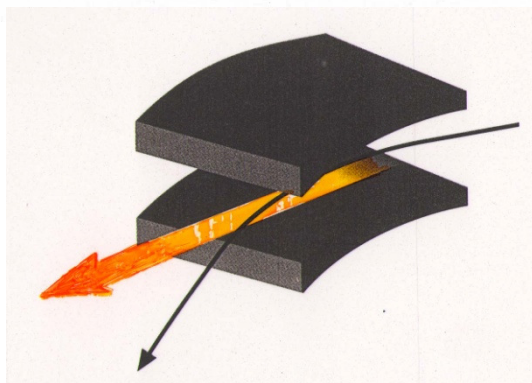
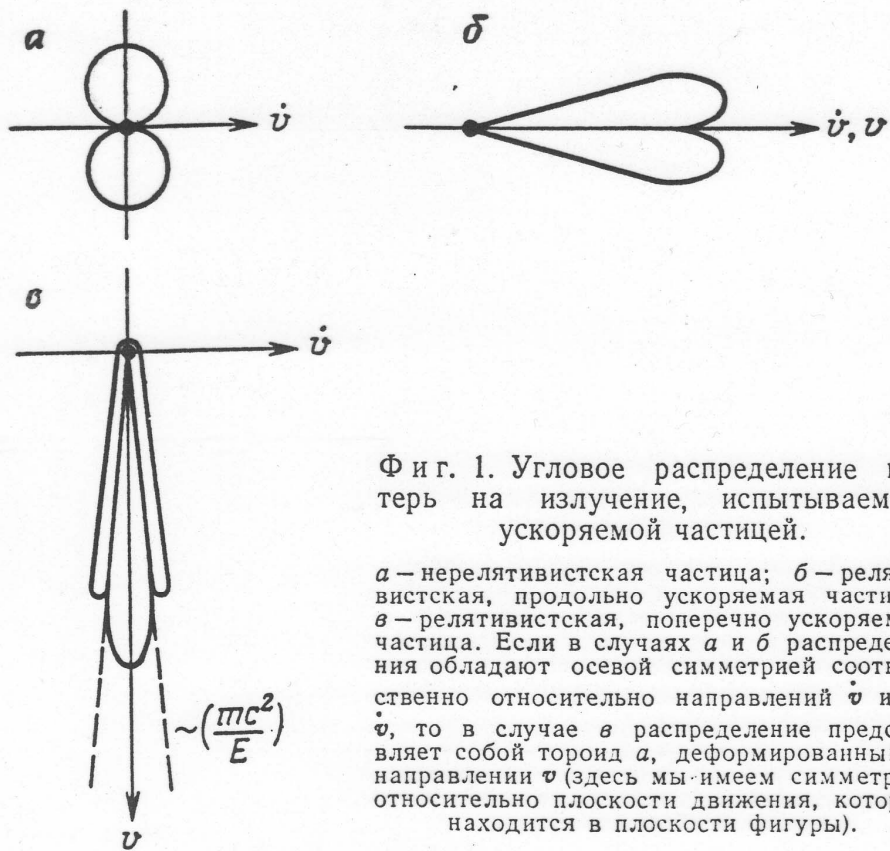
$$\Delta t = (1 - \beta \cos \theta) \Delta t' \approx \frac{1}{\gamma^2} \Delta t' \quad \therefore \Delta t \sim \frac{1}{\omega_0 \gamma^3}$$

$$\omega_c \sim \frac{1}{\Delta t} \sim \omega_0 \gamma^3$$

Пример:  $E = 1 \text{ ГэВ}$ ,  $R = 10 \text{ м}$ ,  $\omega_c \sim 4 \cdot 10^{17} \text{ сек}^{-1}$ ,

$$h\nu = 3 \text{ кэВ}, \quad \lambda = 5 \text{ \AA}$$





# Теоретические исследования свойств СИ в МГУ

- Спектральное распределение мощности излучения

$$W^{cl} = \frac{2}{3} \frac{ce^2}{R^2} \left( \frac{\varepsilon}{m} \right)^4 \quad \frac{dW}{dy} = W^{cl} \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} y \int_y^\infty dx K_{5/3}(x) \quad y = \frac{2}{3} v \left( \frac{m}{\varepsilon} \right)^3 = \frac{2}{3} v (1 - \beta^2)^{3/2}$$

- Квантовые флуктуации траектории (Соколов, Тернов, 1953)

$$(\Delta r)^2 = \frac{55\sqrt{3}}{16} \frac{1}{q(1-q)} \frac{\hbar R}{mc} \left( \frac{\varepsilon}{mc^2} \right)^2$$

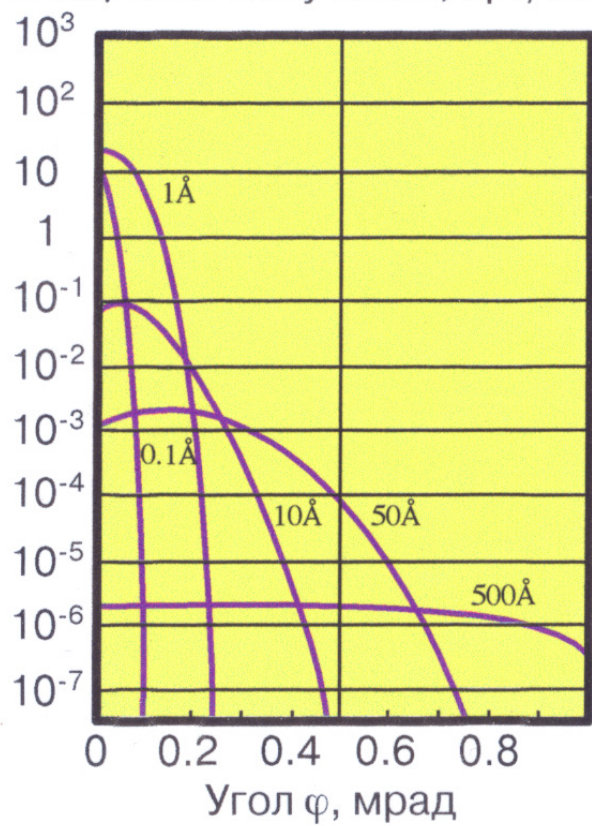
- Ф. А. Королев, О. Ф. Куликов, А. С. Яров наблюдали квантовые возбуждения радиальных колебаний (1966 г.)
- Квантовые эффекты в мощностях СИ (А.А.Соколов, И.М.Тернов, Н.П.Клепиков, 1952; Ю.Швингер, 1954)

$$W = W^{cl} \left( 1 - \frac{55\sqrt{3}}{24} \xi + O(\xi^2) \right)$$

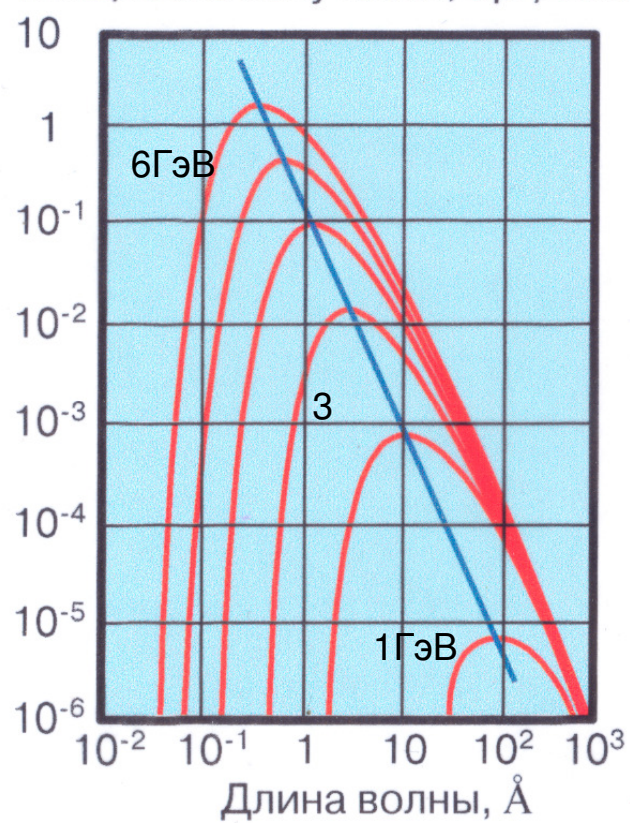
- Эффект радиационной поляризации Соколова-Тернова (1963, Государственная премия, зарегистрированное открытие)

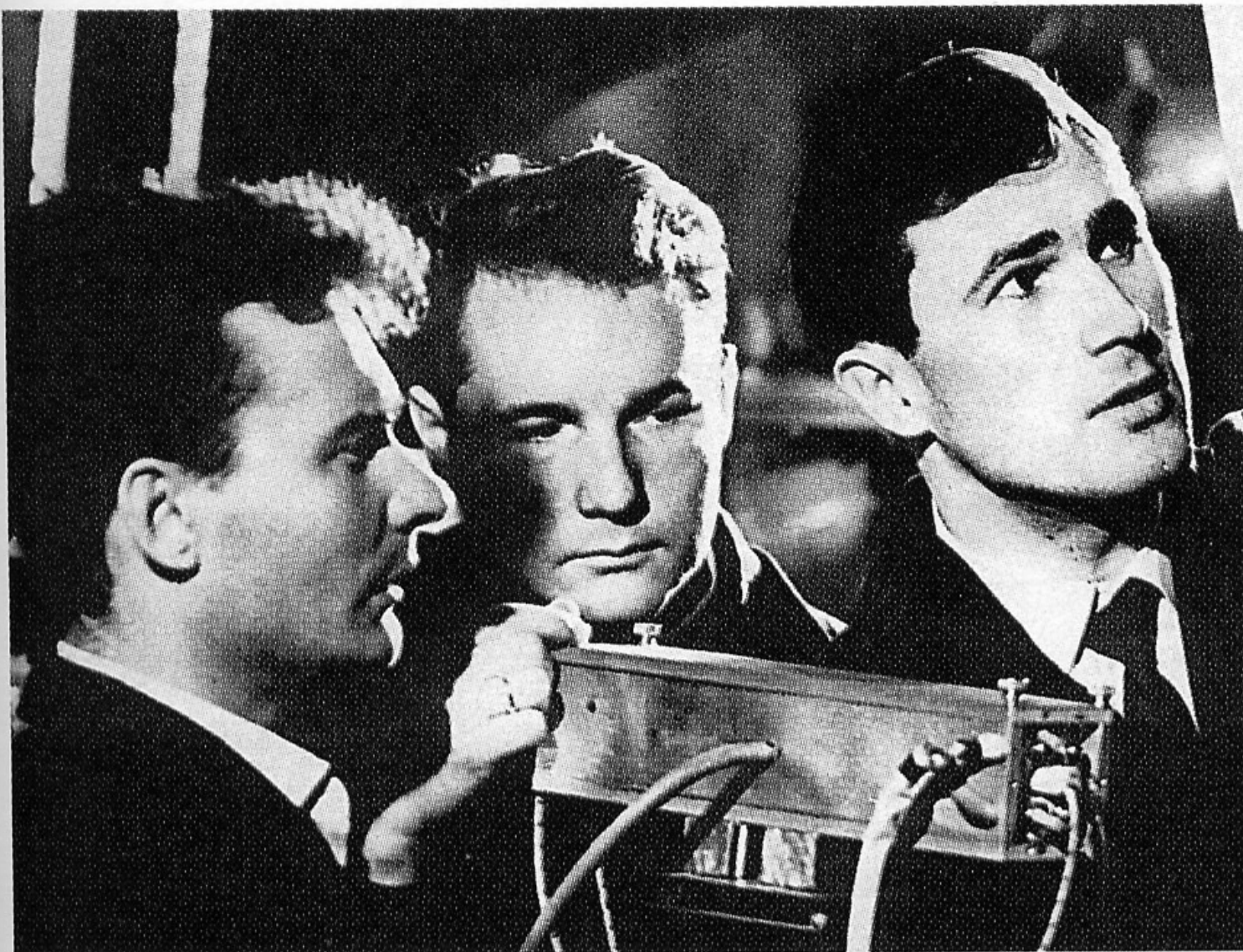
$$\langle \zeta \rangle = -\frac{8\sqrt{3}}{15} + \left( \zeta(0) + \frac{8\sqrt{3}}{15} \right) e^{-t/\tau} \quad \tau = \frac{8}{5\sqrt{3}} \frac{\hbar^2}{mce^2} \left( \frac{mc^2}{\varepsilon} \right) \left( \frac{H_0}{H} \right)^3$$

Мощность излучения, эрг/сек  $\text{\AA}$  мрад электрон

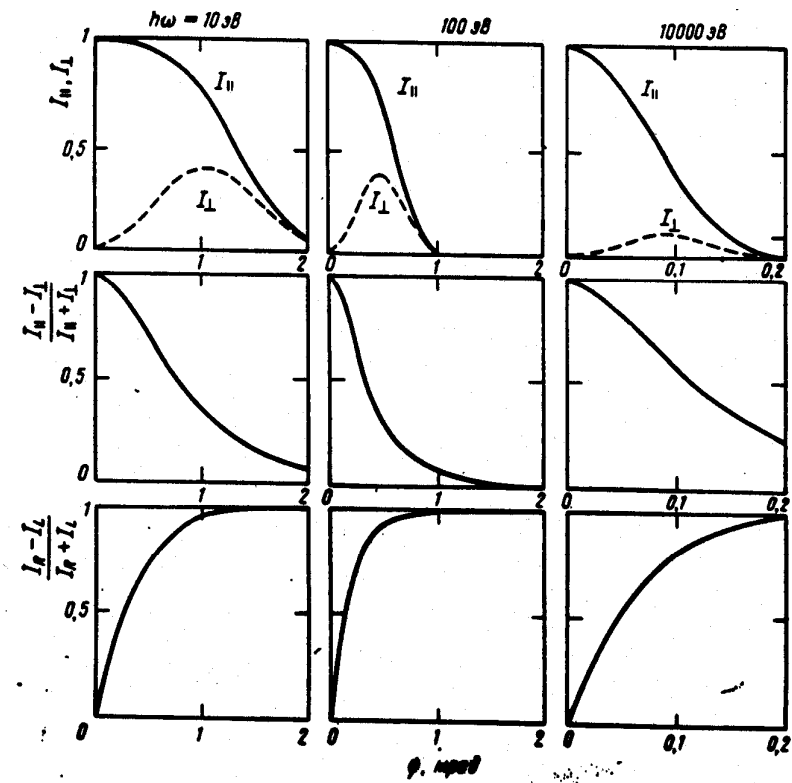
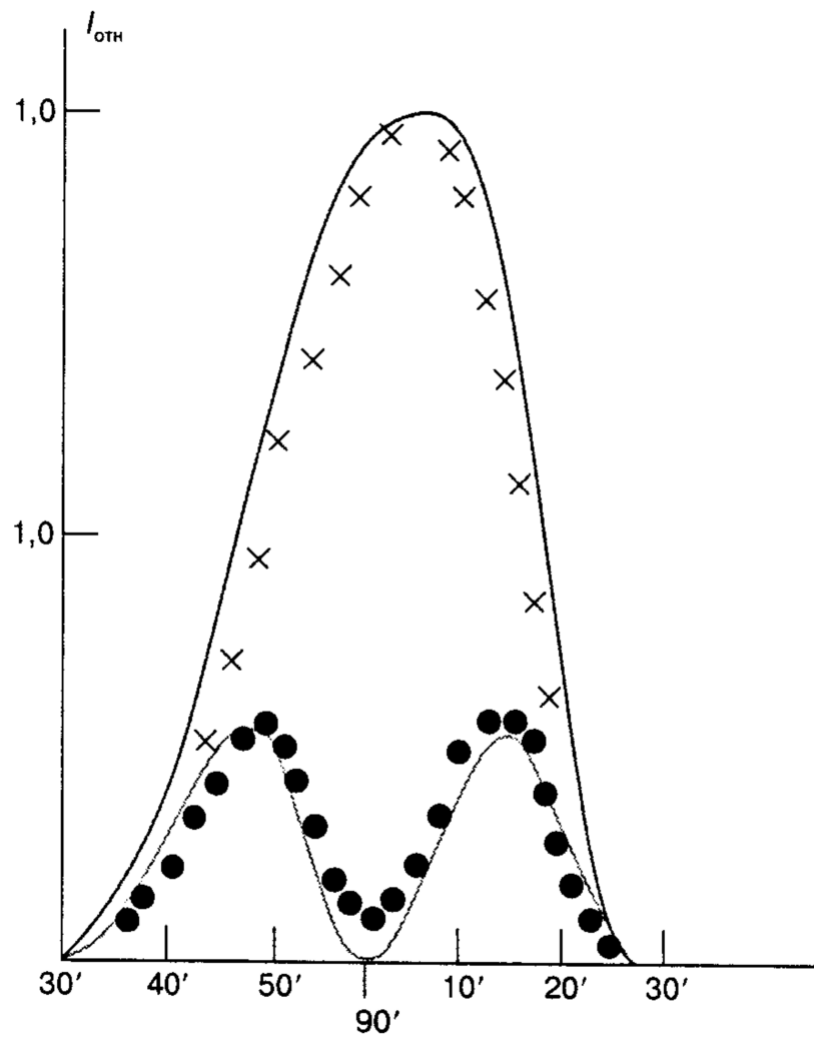


Мощность излучения, эрг/сек  $\text{\AA}$  электрон





О.Ф. Куликов, Е. Филиппов  
и А.С. Яров.



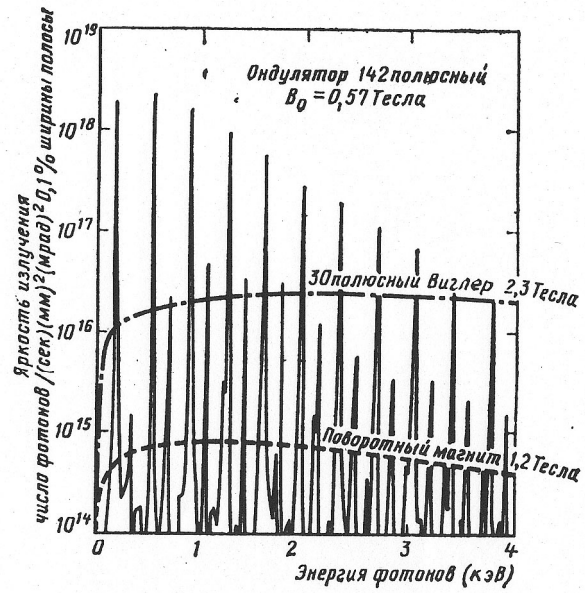


Рис. 11. Сравнительные характеристики яркости источников: 1 — многопериодного ондулятора; 2 — виглера; 3 — поворотного магнита. Энергия электронов — 1,3 ГэВ, ток — 400 мА

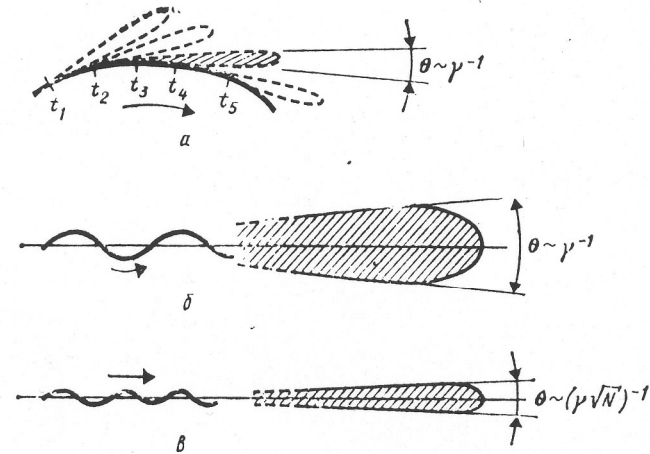
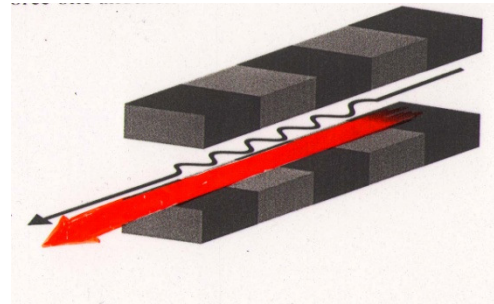
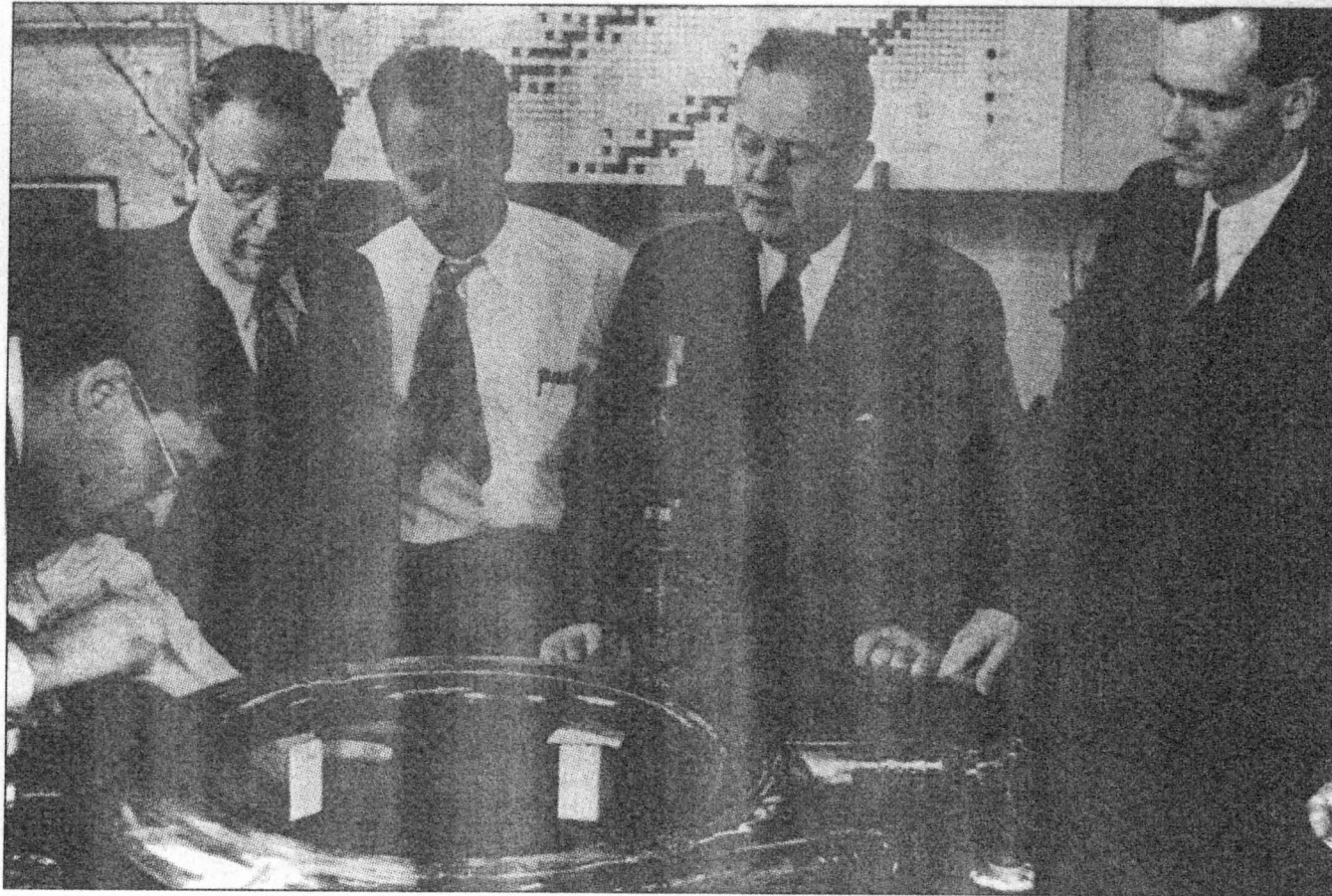


Рис. 10. Сравнение углового распределения мощности излучения: а — синхротронное излучение (поворотный магнит); б — виглер (некогерентная суперпозиция); в — многопериодный ондулятор (когерентная интерференция)



# Вехи истории СИ

- 1944 – Предсказание (открытие) СИ – Д.Д.Иваненко, И.Я Померанчук
- 1947 – Обнаружение СИ на синхротроне Дженирал Электрик – Флойд Хаббард
- 1948 – Теория светящегося электрона (Д.Д.Иваненко, А.А.Соколов) – спектрально-угловое распределение СИ
- 1949-1955 – Квантовая теория СИ (А.А.Соколов, Н.П.Клепиков, И.М.Тернов)
- 1956 – Поляризационные эффекты в СИ (А.А.Соколов, И.М.Тернов)
- 1956 – Экспериментальные исследования углового распределения и поляризации СИ (Ф.А.Королев, Е.М.Акимов, В.С.Марков, О.Ф.Куликов)
- 1961 – Поляризация пучка электронов (И.М.Тернов, Ю.М.Лоскутов, Л.И.Коровина)
- 1962 – Поляризационные свойства СИ (Ф.А.Королев, О.Ф.Куликов, А.С.Яров)
- 1963 – Открытие самополяризации электронов в магнитном поле (А.А.Соколов, И.М.Тернов)
- 1964 – Начало исследования спектрально-угловых и поляризационных свойств СИ совместно с ФИАН на синхротроне С-60, обратный комптон-эффект
- 1966 – Книга «Синхротронное излучение» под ред. А.А.Соколова и И.М.Тернова

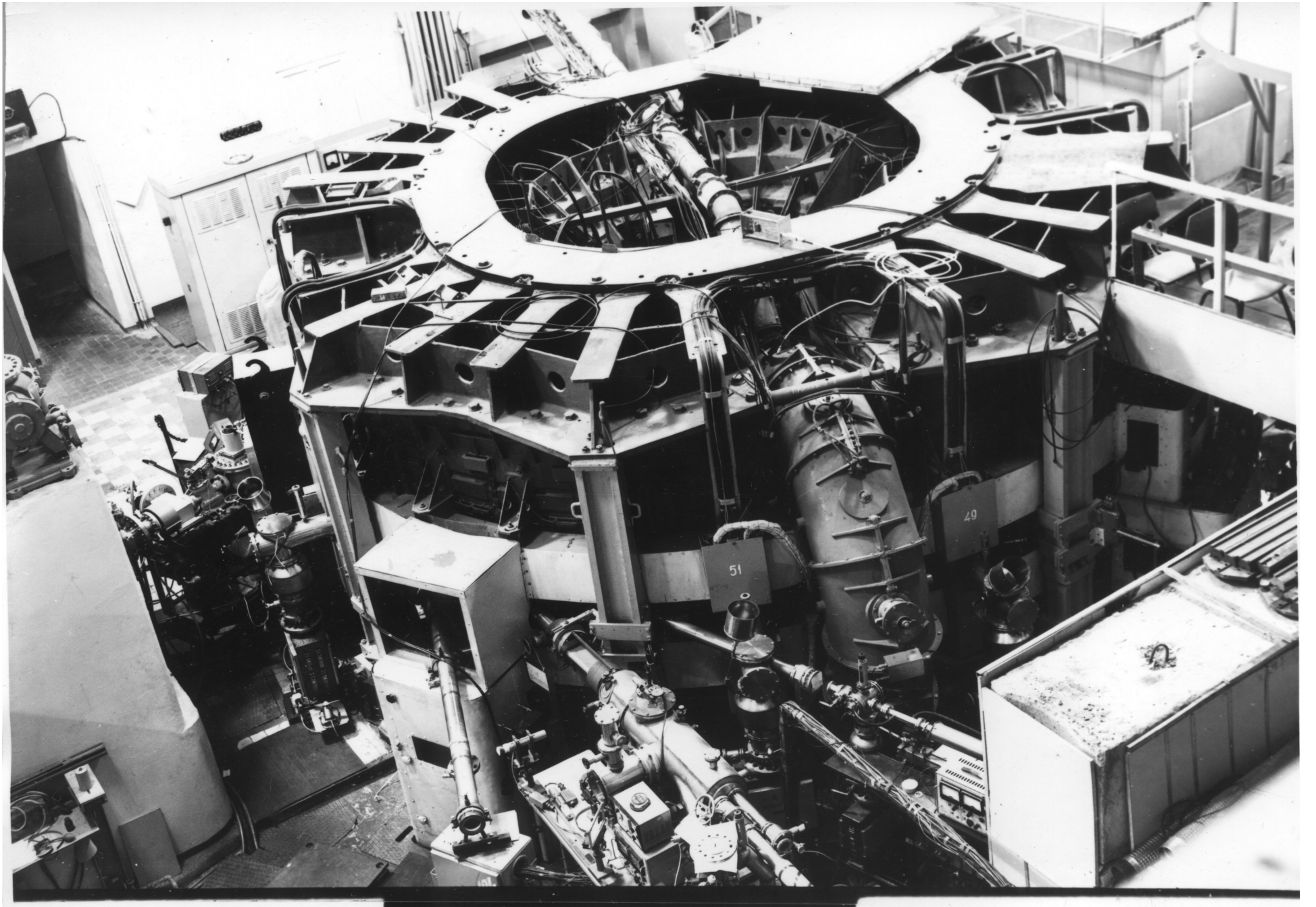


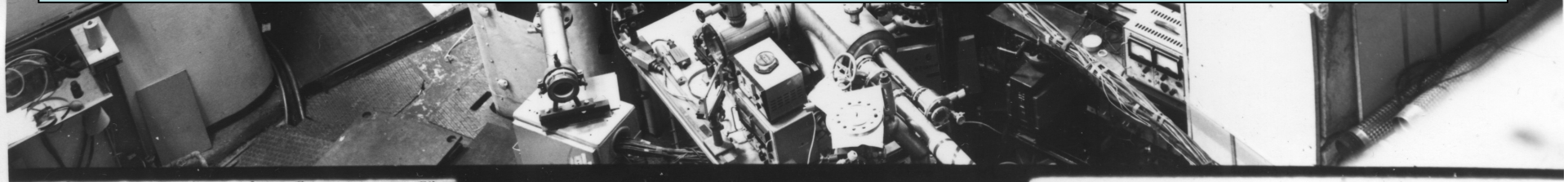
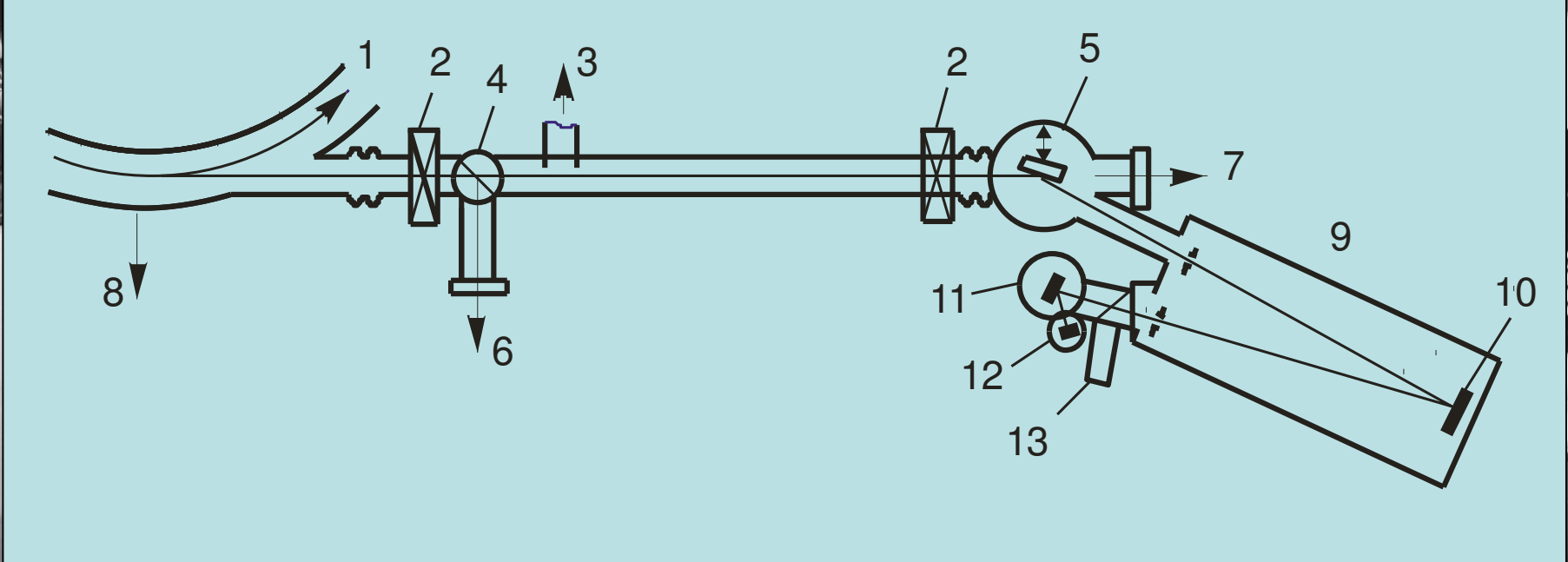
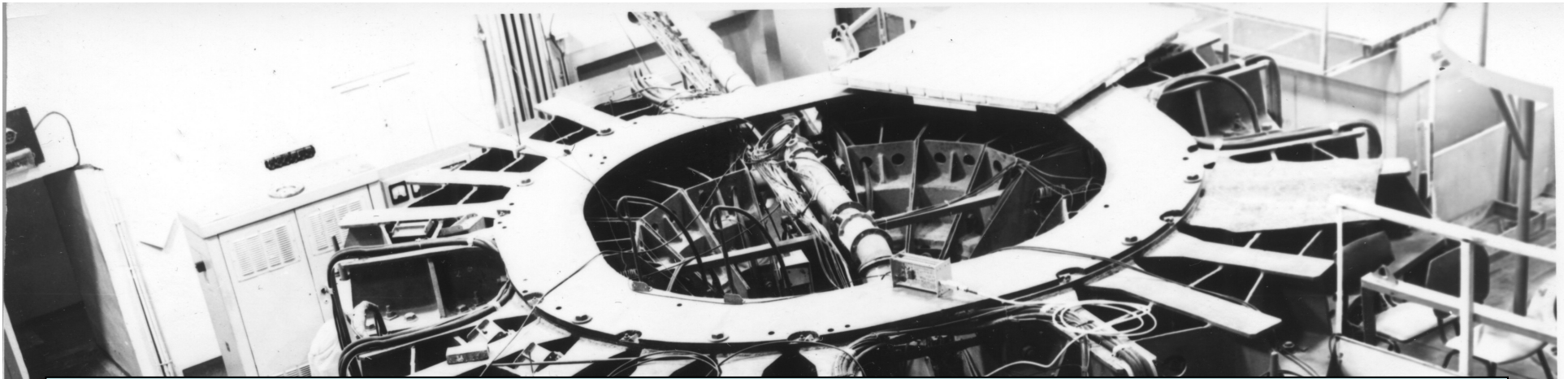
*Small beginnings – around the vacuum chamber of a 1947 General Electric synchrotron. (NSLS, Brookhaven.)*



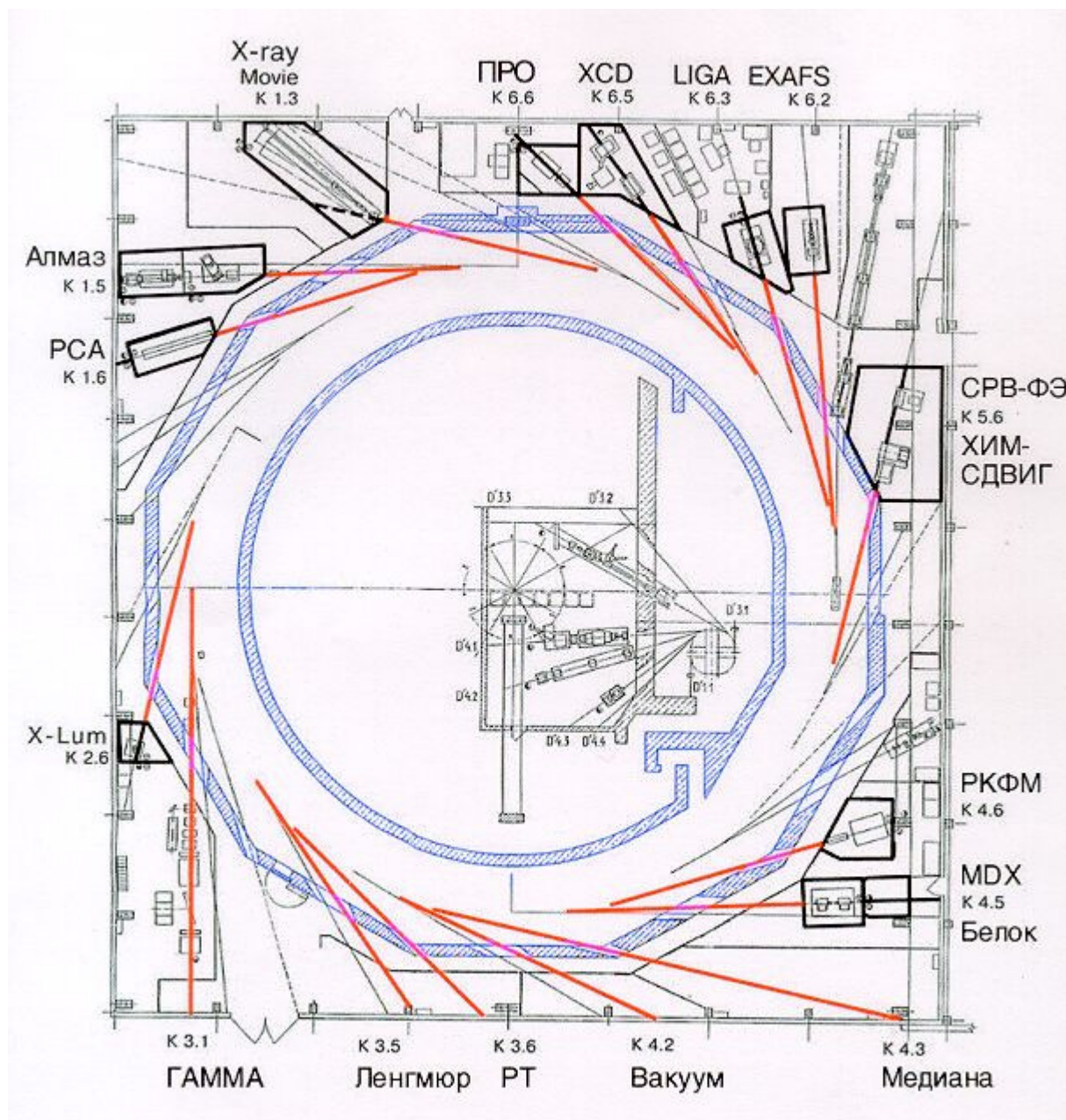
# Вехи истории СИ в МГУ

- 1967 – Первый спектроскопический (ВУФ) канал МГУ на синхротроне С-60 (ФИАН)
- 1968 – Лекции проф. А.А.Соколова по теории СИ на DESY
- 1969 – Начало совместных с DESY экспериментов по спектроскопии твердого тела и люминесценции
- 1971 – ГНТП по синхротронному излучению
- 1974 – Начало сотрудничества с ИЯФ СО АН
- 1976 – Исследование ВУФ-люминесценции и возможности накачки ВУФ-лазеров синхротронным излучением (Р.В.Хохлов, С.П.Чернов и др.)
- 1977 – Первые исследования спектрального и углового распределения ондуляторного излучения (В.В.Михайлин, П.А.Черенков и др.)
- 1983 – Постановление о введении специальности «Синхротронное излучение»
- 1984 – Первые физические результаты на Курчатовском источнике синхротронного излучения (получены физиками МГУ)
- 1982-2001 – Конференции по СИ, ВУФ, SCINT и др.
- 2000 – Ведущая научная школа
- 2000 – Ломоносовская премия МГУ

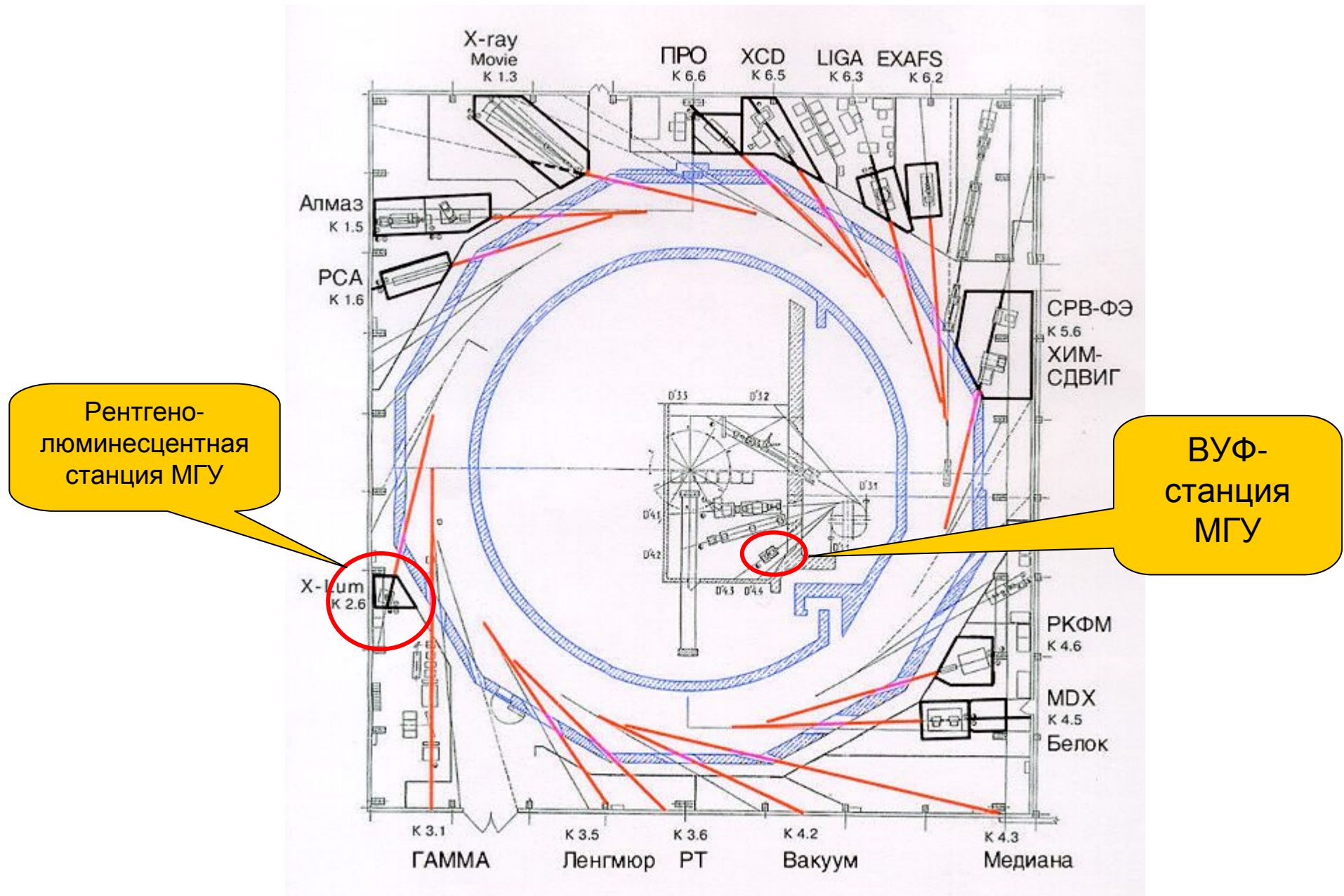


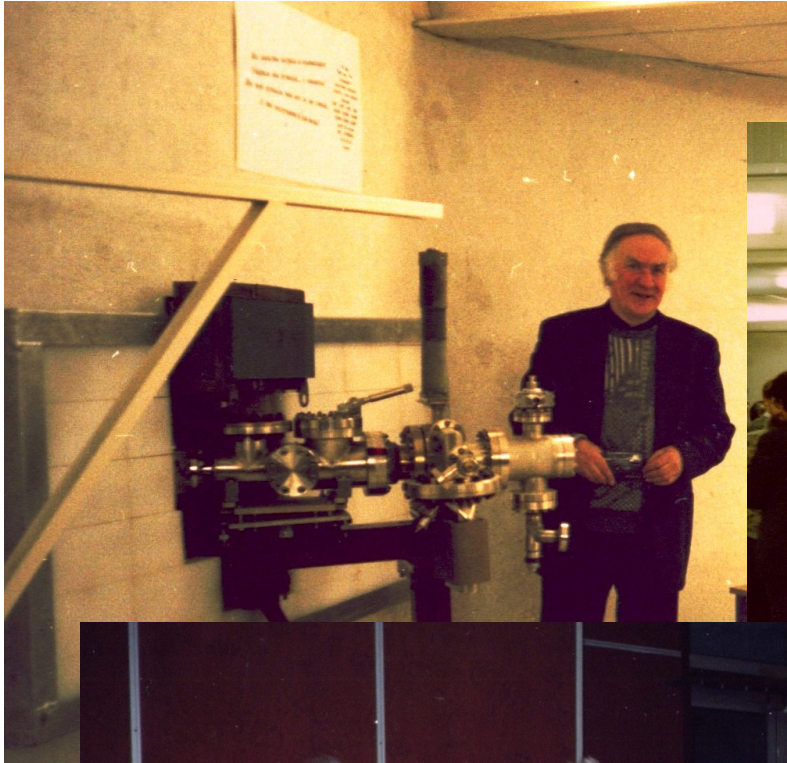


# Сибирь-2 и Сибирь-1 (РНЦ Курчатовский институт)

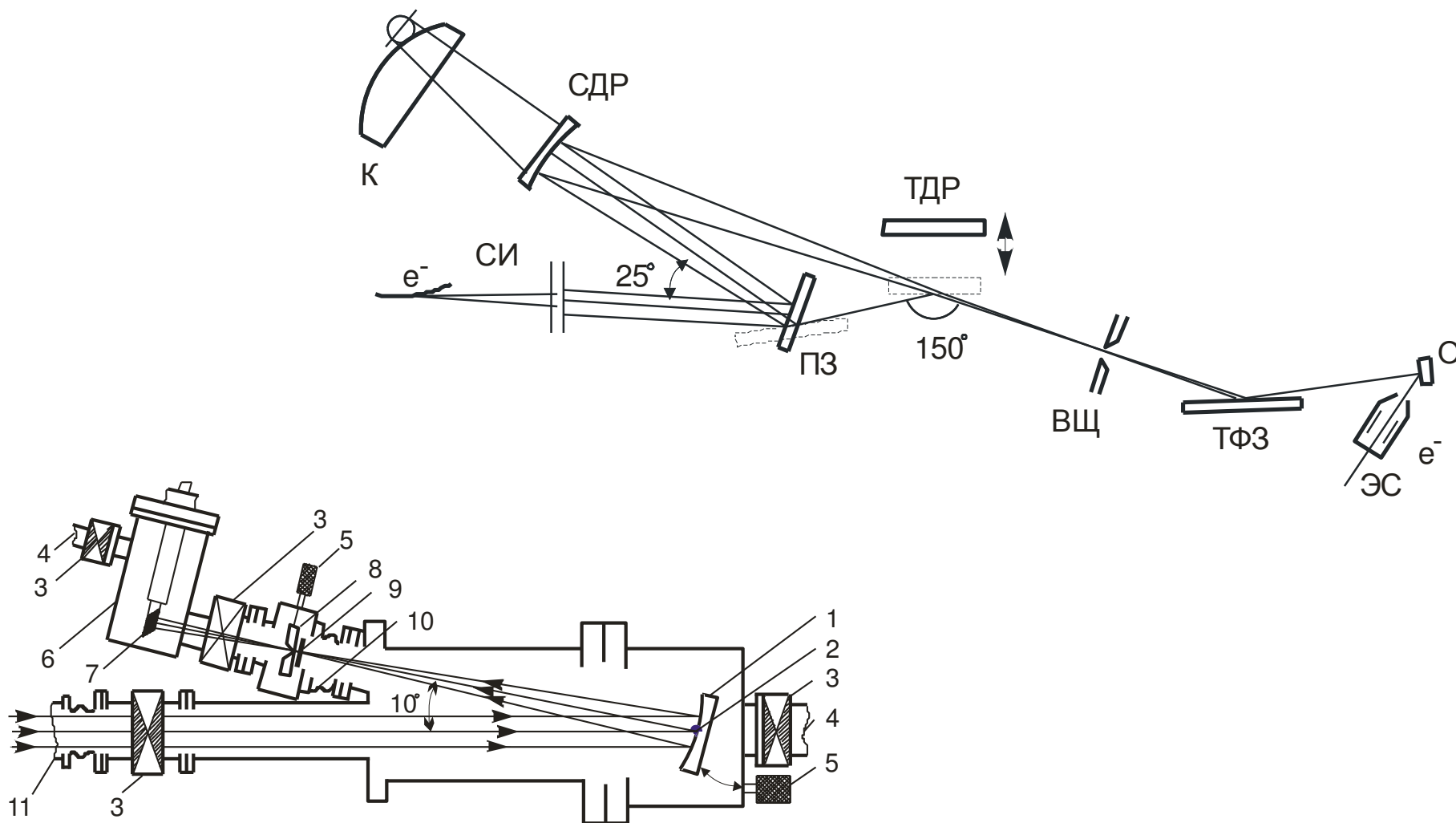


# Сибирь-2 и Сибирь-1 (РНЦ Курчатовский институт)

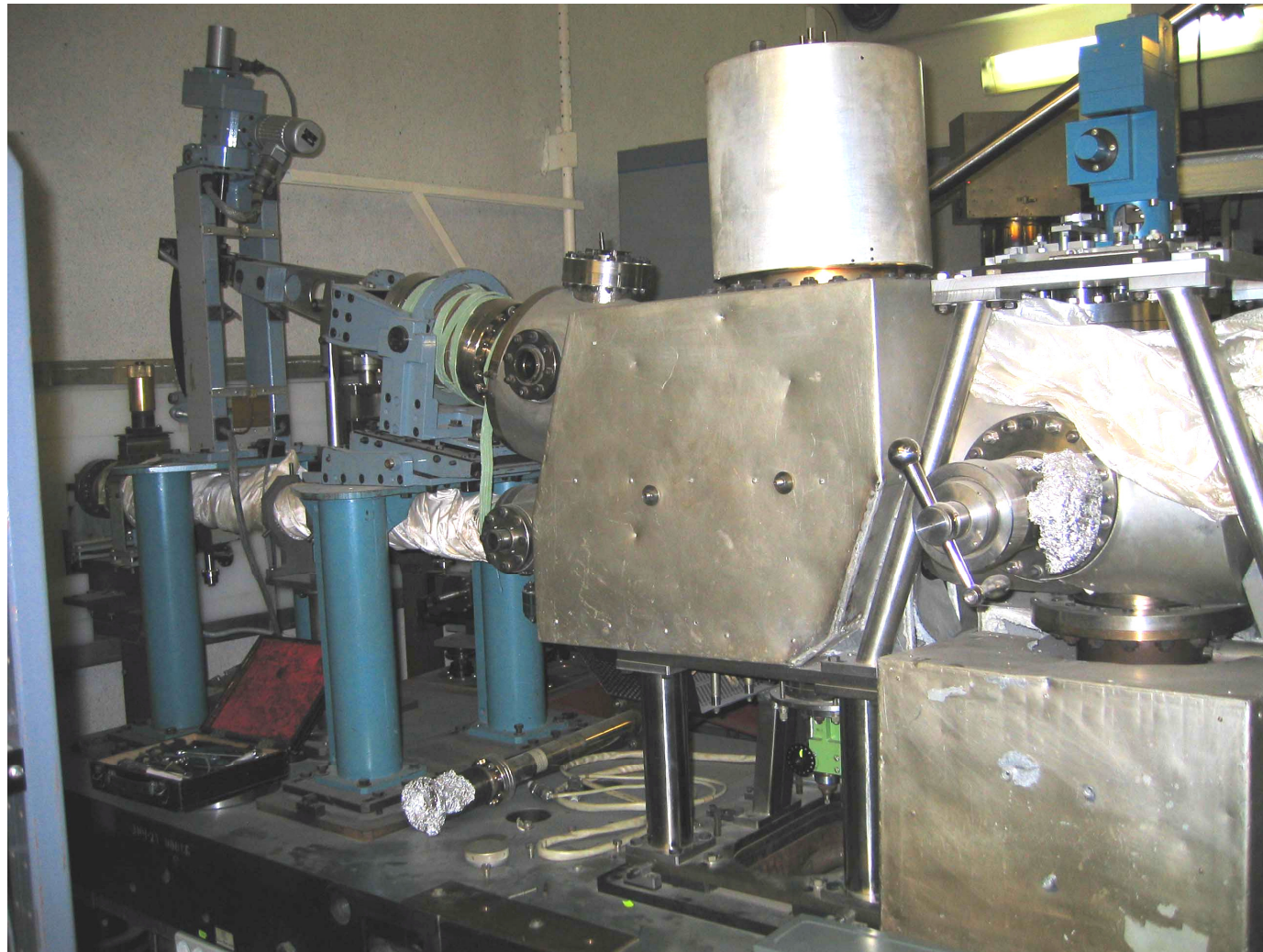




# Оптические схемы установок МГУ на Сибири-1 (1984-1989)

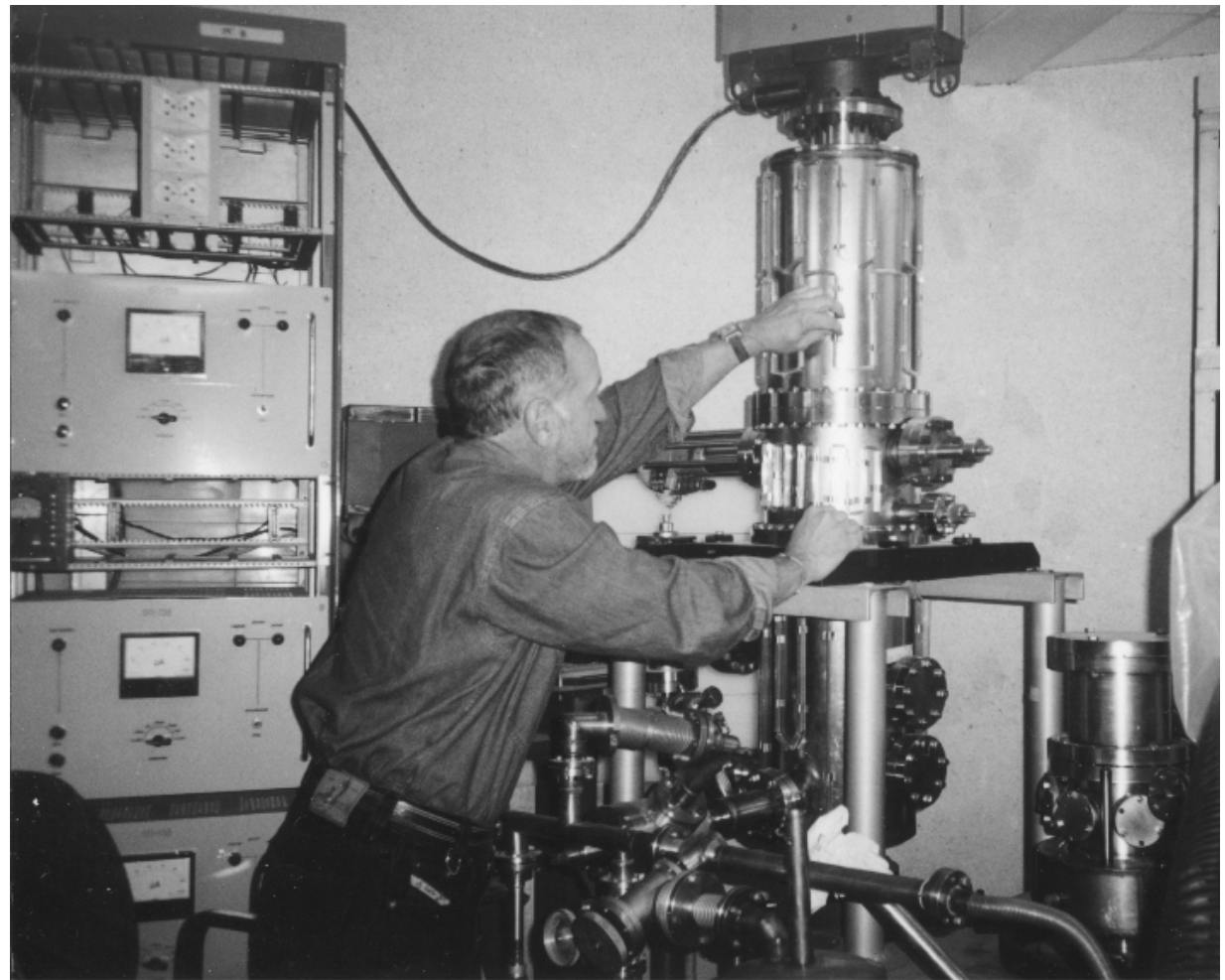
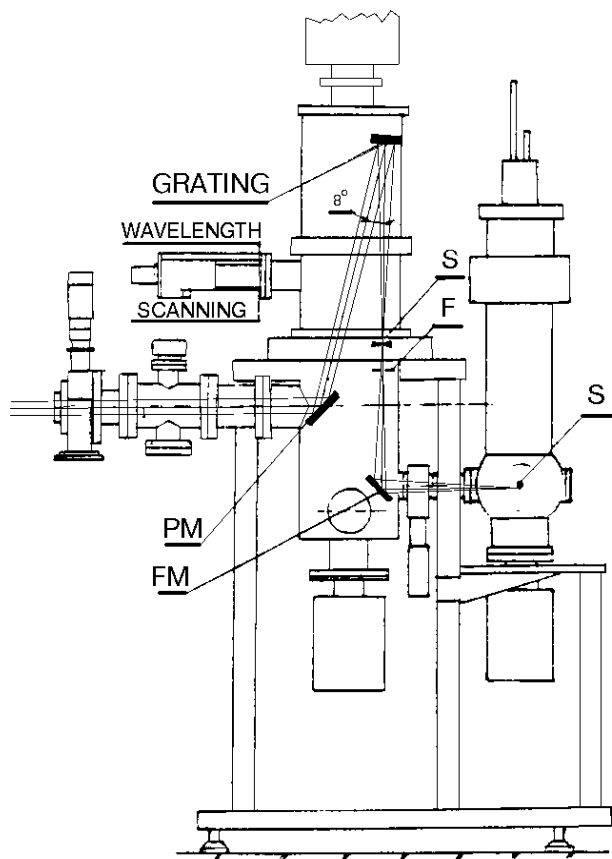


# Оптические схемы установок МГУ на Сибири-1 (1984-1989)

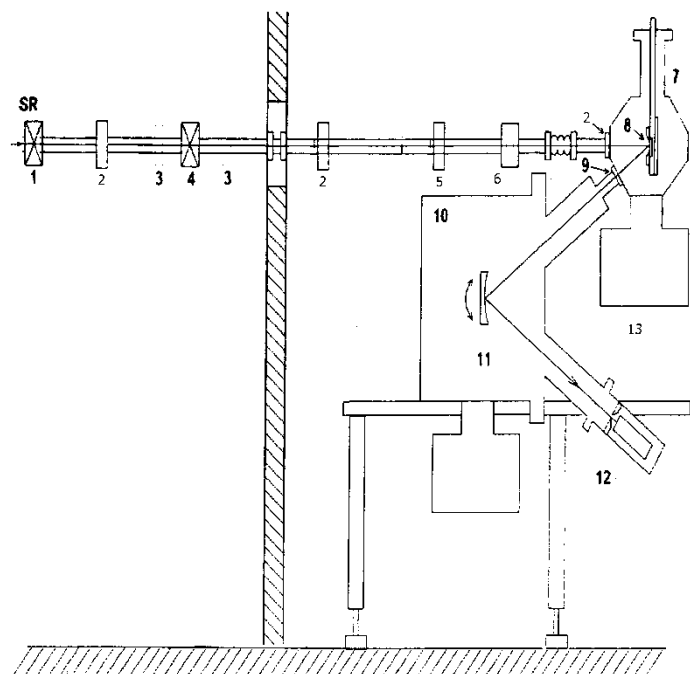




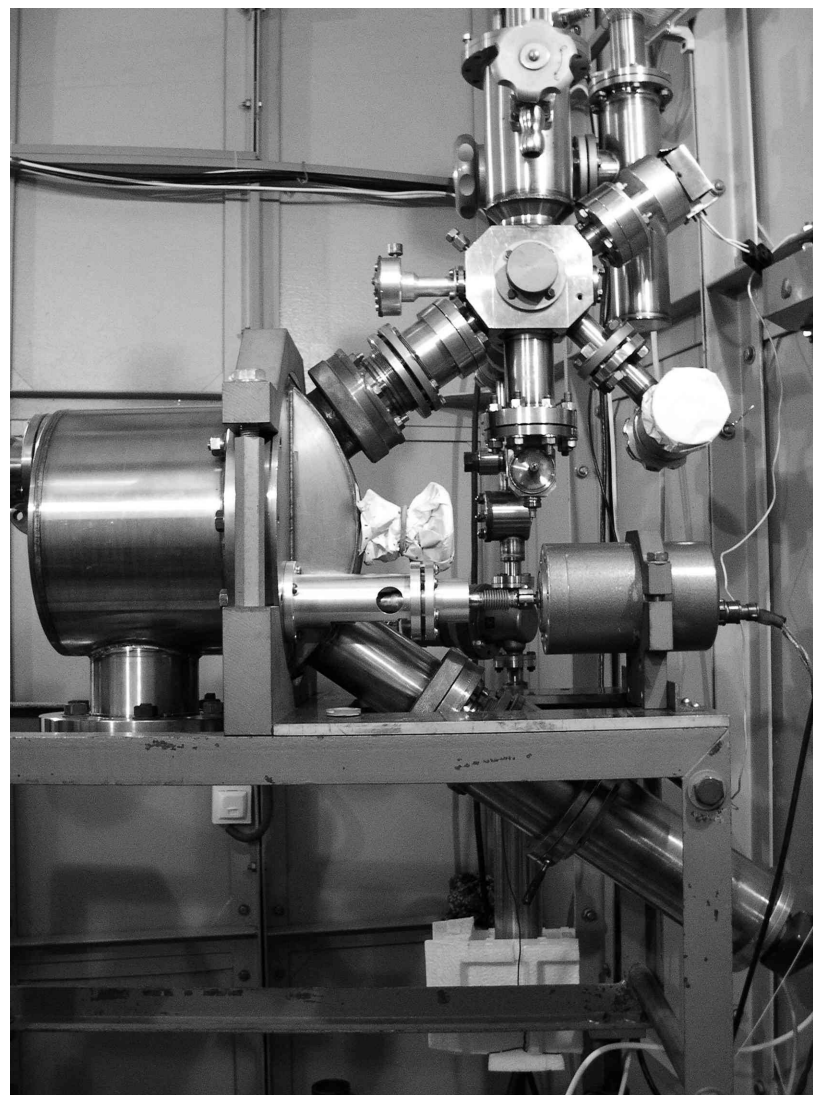
# ВУФ-станция на накопителе «Сибирь-1» (1998)



# Схема и общий вид рентгенолюминесцентной установки на накопителе «Сибирь-2» (2003)



- 1. Шибер; 2. Бериллиевое окно; 3. Коллиматор; 4. Радиационный затвор; 5. Блок диафрагм; 6. Монитор пучка; 7. Криостат; 8. Держатель образца; 9. Входное окно монохроматора; 10. Монохроматор; 11. Дифракционная решетка; 12. ФЭУ; 13 Система вакуумной откачки.

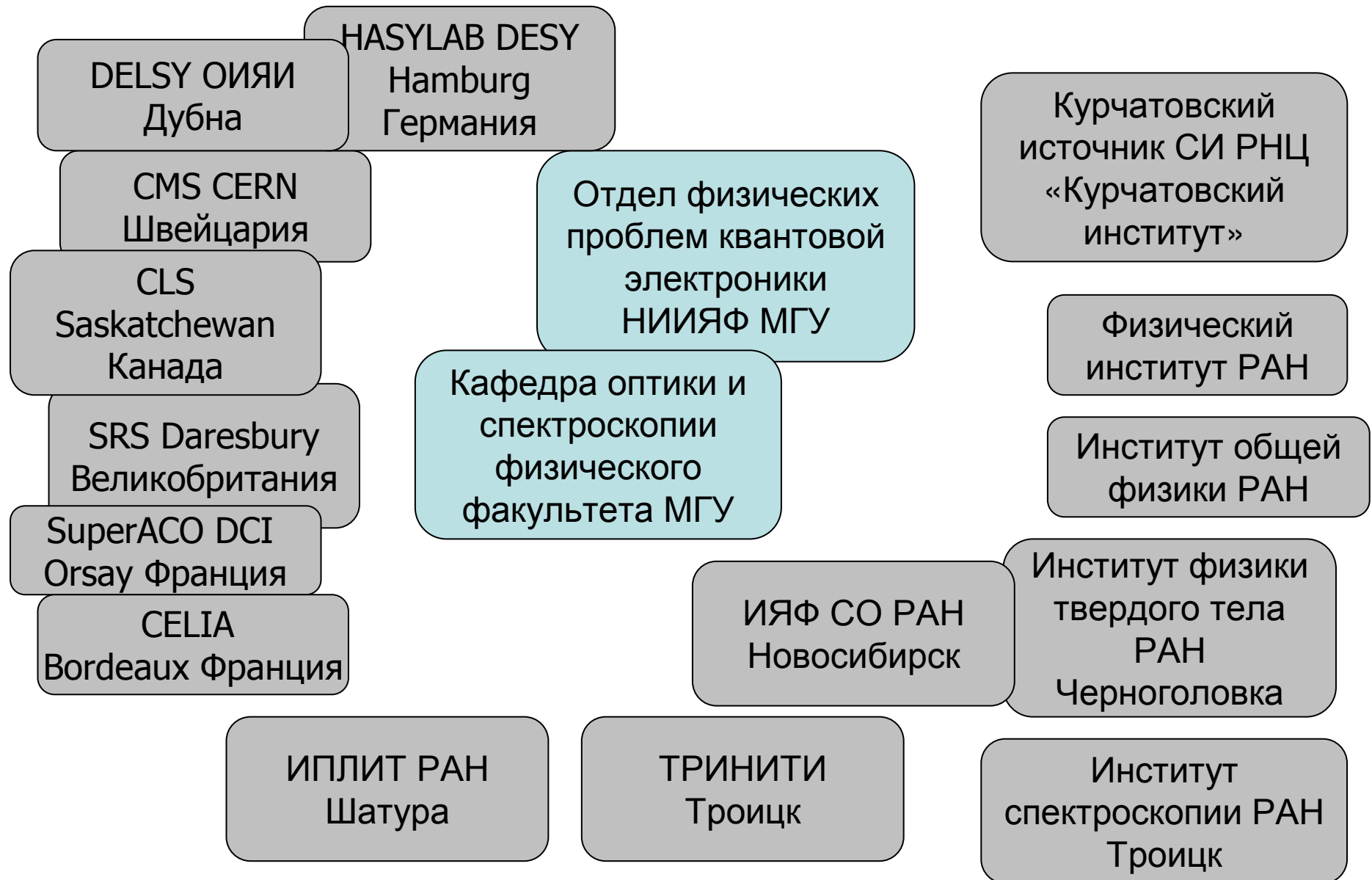


# Основные результаты лаборатории СИ МГУ

- С использованием синхротронного излучения для исследования вторичных процессов, в частности люминесценции, возбуждаемых фотонами различных энергий, обнаружены новые механизмы релаксации энергии в диэлектриках и построена согласованная модель процессов релаксации энергии за счет электрон-электронных и электрон-фононных процессов (за времена от  $10^{-15}$  до  $10^{-8}$  сек).
- Экспериментально обнаружены два типа спектров возбуждения люминесценции в области фундаментального поглощения и построена двухканальная модель рекомбинации скоррелированных электронно-дырочных пар.
- Обнаружена взаимная корреляция квантового выхода люминесценции в областях за порогом фундаментального поглощения и за порогом размножения электронных возбуждений, и этот механизм объяснен образованием низкоэнергетичных скоррелированных возбуждений в процессе электрон-электронного рассеяния.
- Обнаружен эффект непропорциональности квантового выхода и неэкспоненциальной зависимости кинетики быстрой люминесценции от энергии возбуждающих фотонов в ВУФ и УМР областях спектра и дано объяснение этого явления образованием при размножении электронных возбуждений областей с высокой локальной плотностью возбуждений.
- Объяснено температурное тушение кросслюминесценции за счет Оже-распада остовных дырок на состояниях, формирующих урбаховский хвост поглощения.
- Обнаружено сосуществование двух типов электронных возбуждений в кристаллах со сложной зонной структурой, в частности, два типа экситонов в  $\text{CeF}_3$  и  $\text{PbWO}_4$ .
- Обнаружены отклонения от постоянного энергетического выхода при возбуждении в области рентгена за счет изменения локальной плотности возбуждений.
- Обнаружены новые механизмы люминесценции при возбуждении вблизи остовных уровней из-за образования многозарядных ионов и создания комплексных дефектов.
- Объяснен механизм фотостимулированной люминесценции  $\text{BaFBr-Eu}$  — эффективного кристаллофосфора для запоминающих экранов.

**Ломоносовская премия МГУ за 2000 г. (А.Н.Васильев, И.А.Каменских, В.В.Михайлин)**

# Научные связи



# Сотрудничество с DESY



Öffentliche  
**Abendvorträge**

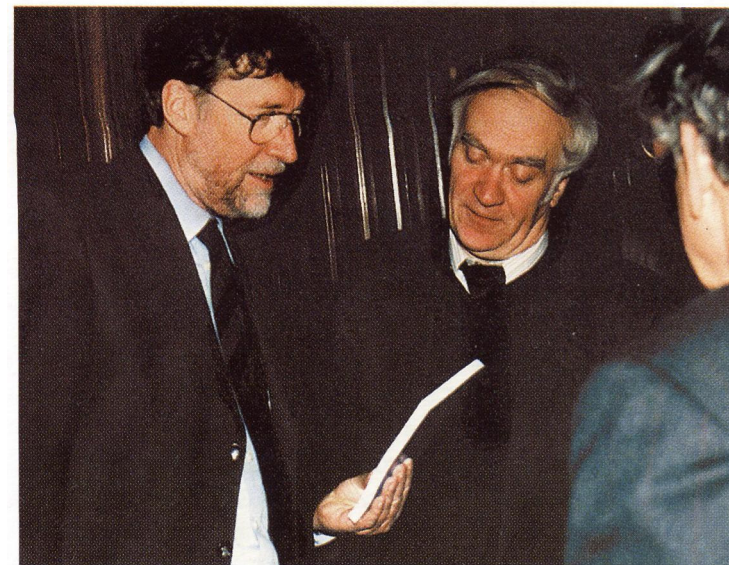


aus Wissenschaft, Technik und Kultur

Dienstag, 9. Dezember 2003, 19.30 Uhr im DESY-Hörsaal

**"Licht mit Zukunft: die Synchrotronstrahlung"**

**Prof. Dr. Ruprecht Haensel**  
Kiel

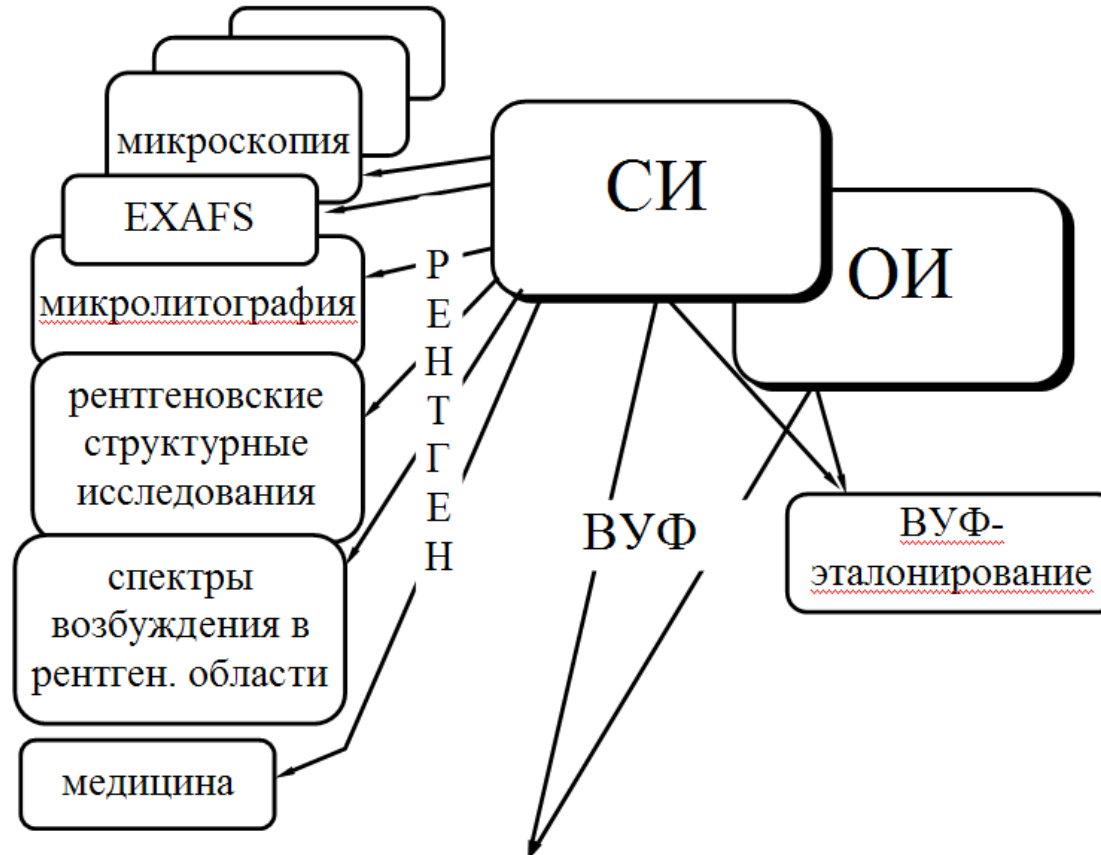
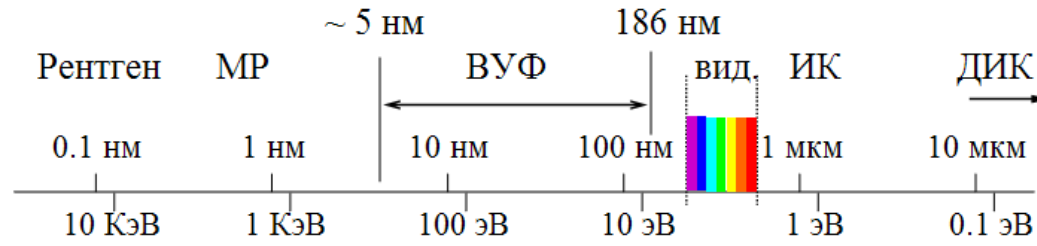


Генеральный директор ДЭЗИ почетный доктор МГУ  
А. Вагнер и профессор В.В. Михайлин.



# Сотрудничество с DESY

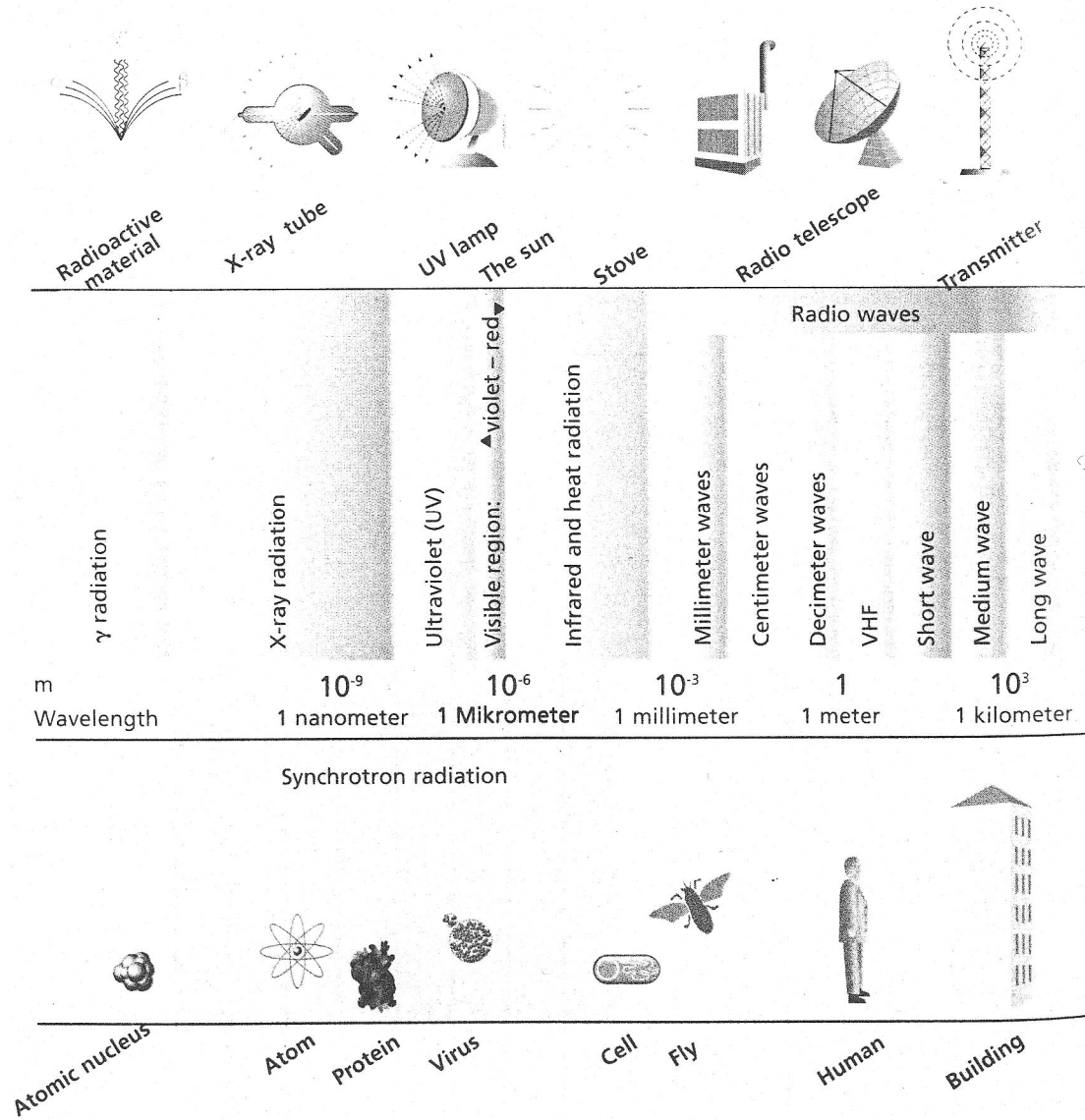




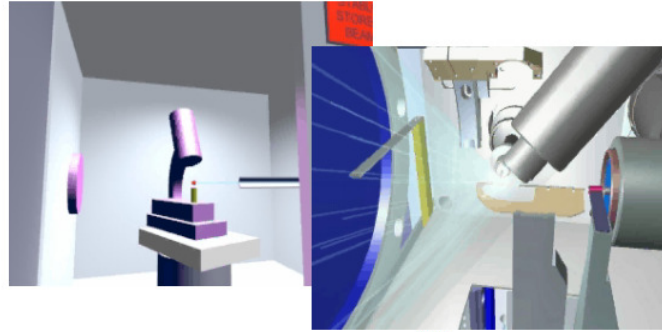
Спектроскопия атомов, молекул и твердого тела			
	$h\nu$	$e$	ИОНЫ
Поглощение	Люминесценция	ЭСХА	масс-спектрометрия
Отражение R	Спектры действия	ФЭС	
Рассеяние $\sigma$	(окрашивание, <u>термовысвечивание</u> и проч.)	ФЭСУР ДЭМЭ .....	

# The Electromagnetic Spectrum

Synchrotron radiation covers a broad region of the electromagnetic spectrum.

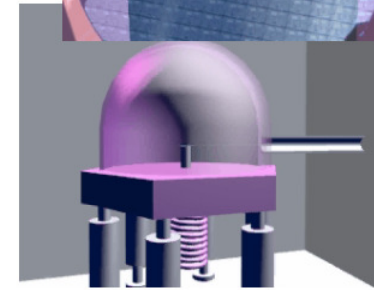
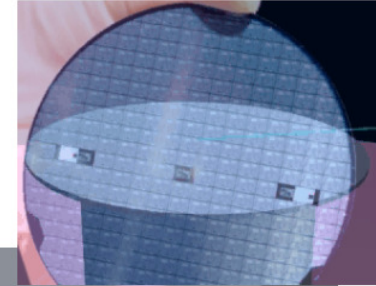




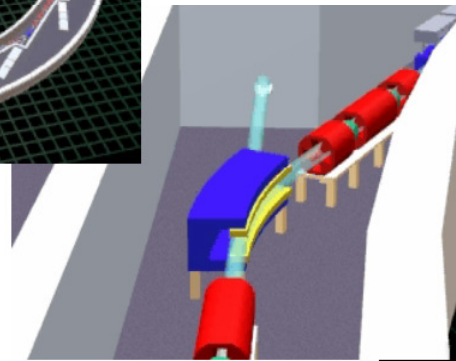
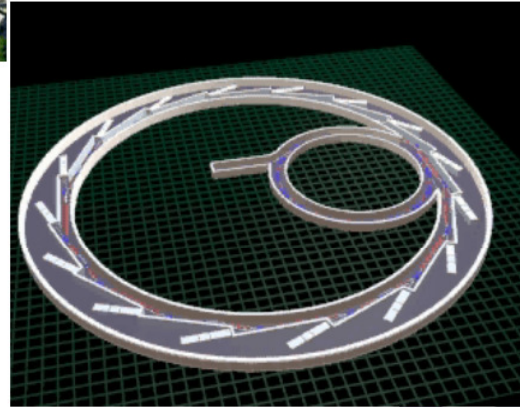
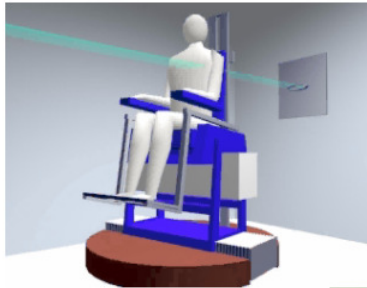


*Биология*

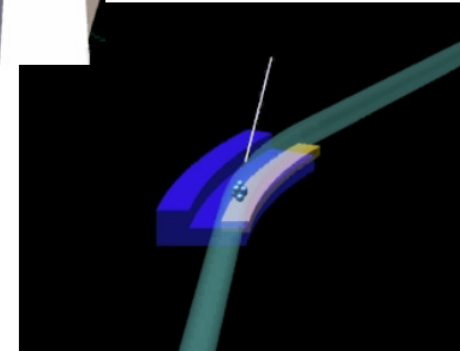
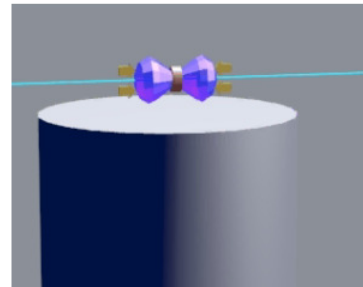
*Литография*

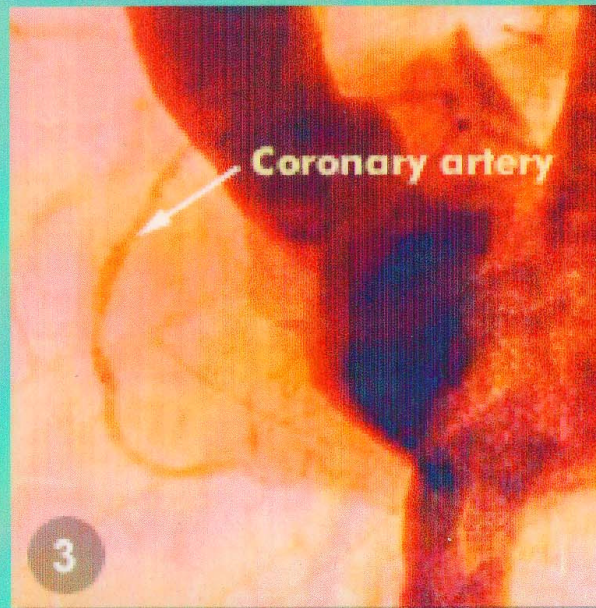
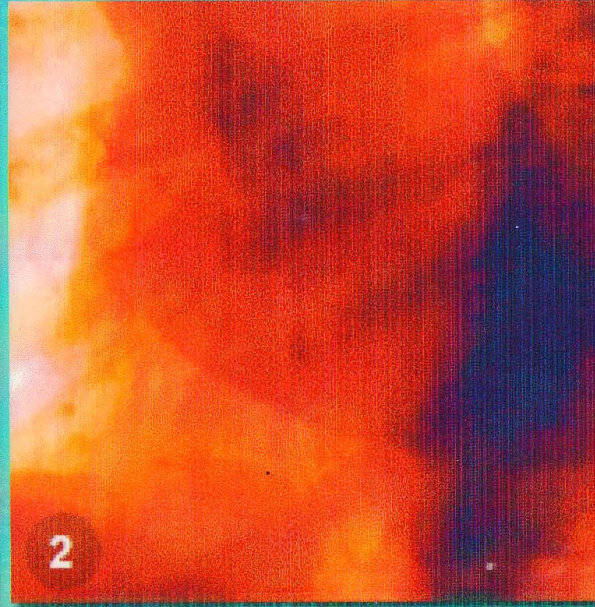
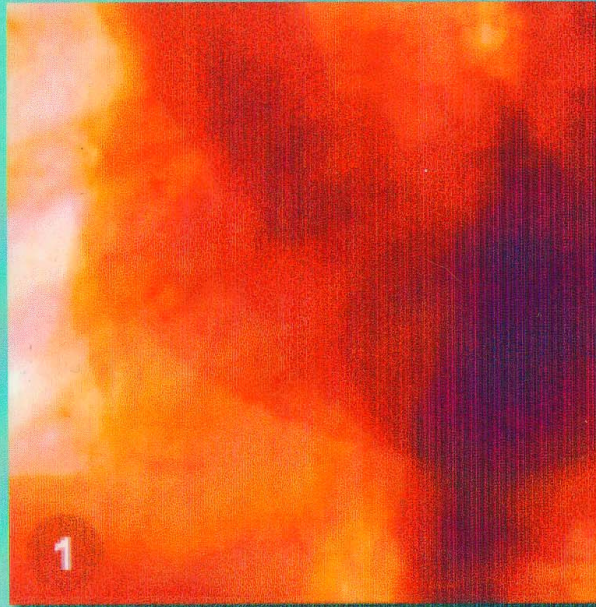


*Медицина*



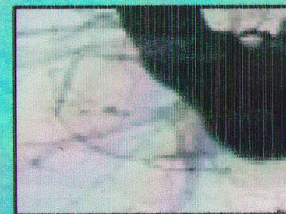
*Физика*

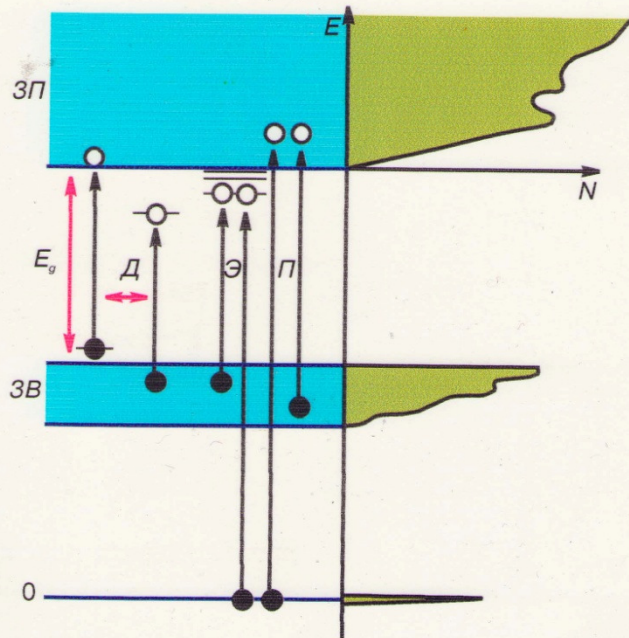




**Synchrotron angiogram**

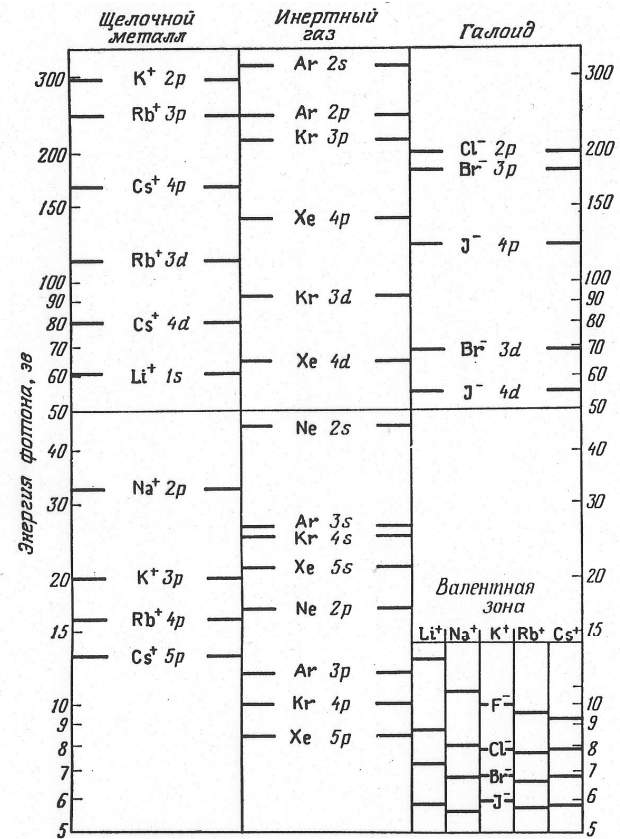
- 1. above absorption edge**
- 2. below absorption edge**
- 3. subtraction**



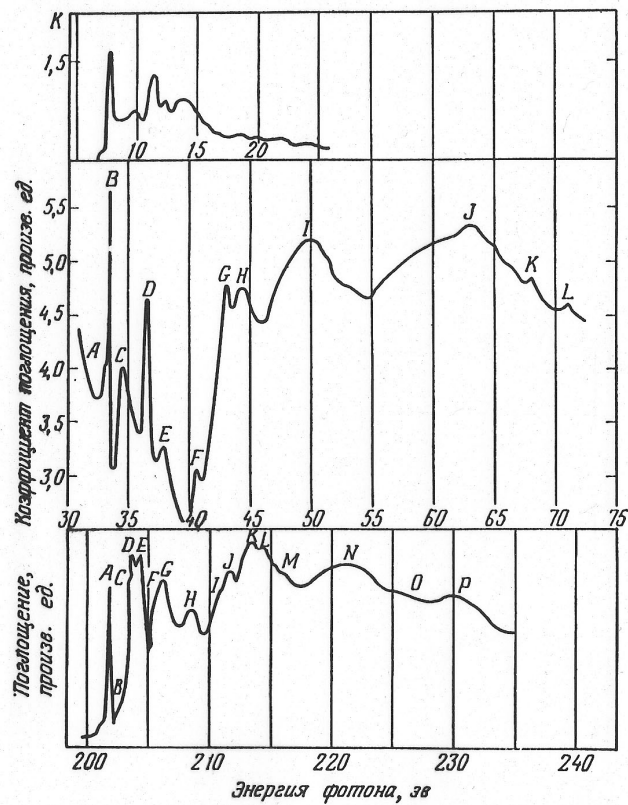


**Схема взаимодействия синхротронного излучения с твердым телом**

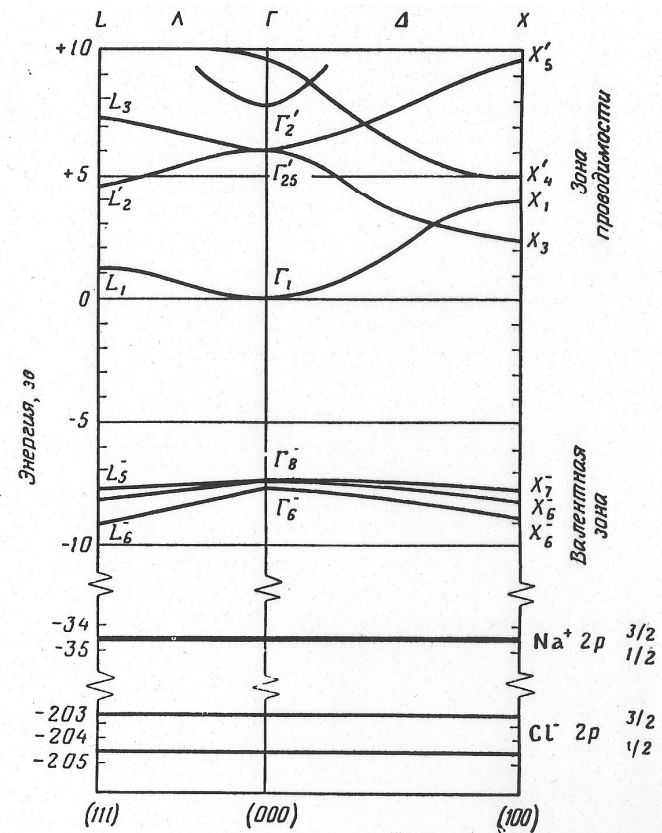
$E$  – ось энергий  
 $E_g$  – ширина запрещенной зоны  
 $Д$  – переходы с уровней дефектов  
 $Э$  – экситоны  
 $П$  – основное поглощение  
 $N$  – приведенная плотность состояний



Фиг. 1. Пороговые энергии переходов из разных заполненных оболочек щелочногаллоидных соединений и инертных газов.  
 Энергии переходов из валентной зоны приведены для всех соединений. Для внутренних уровней зависимость от химического состава пренебрежимо мала.



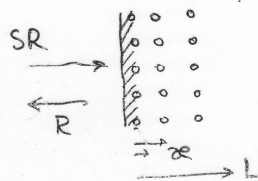
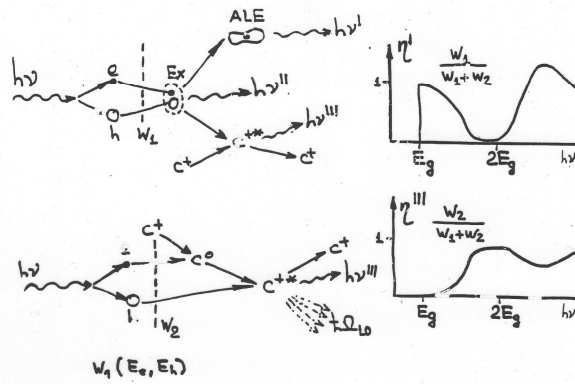
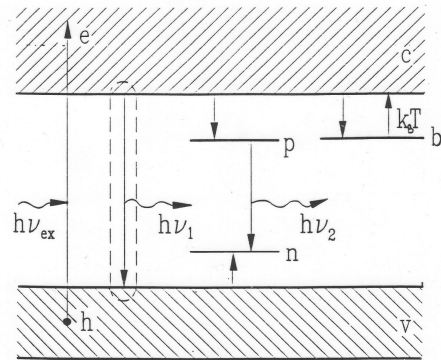
Фиг. 3. Сравнение спектра поглощения NaCl, обусловленного переходами из валентной зоны в зону проводимости (вверху), со спектрами, обусловленными переходами с 2р-уровня Na<sup>+</sup> (в середине) и 2р-уровня Cl<sup>-</sup> (внизу).



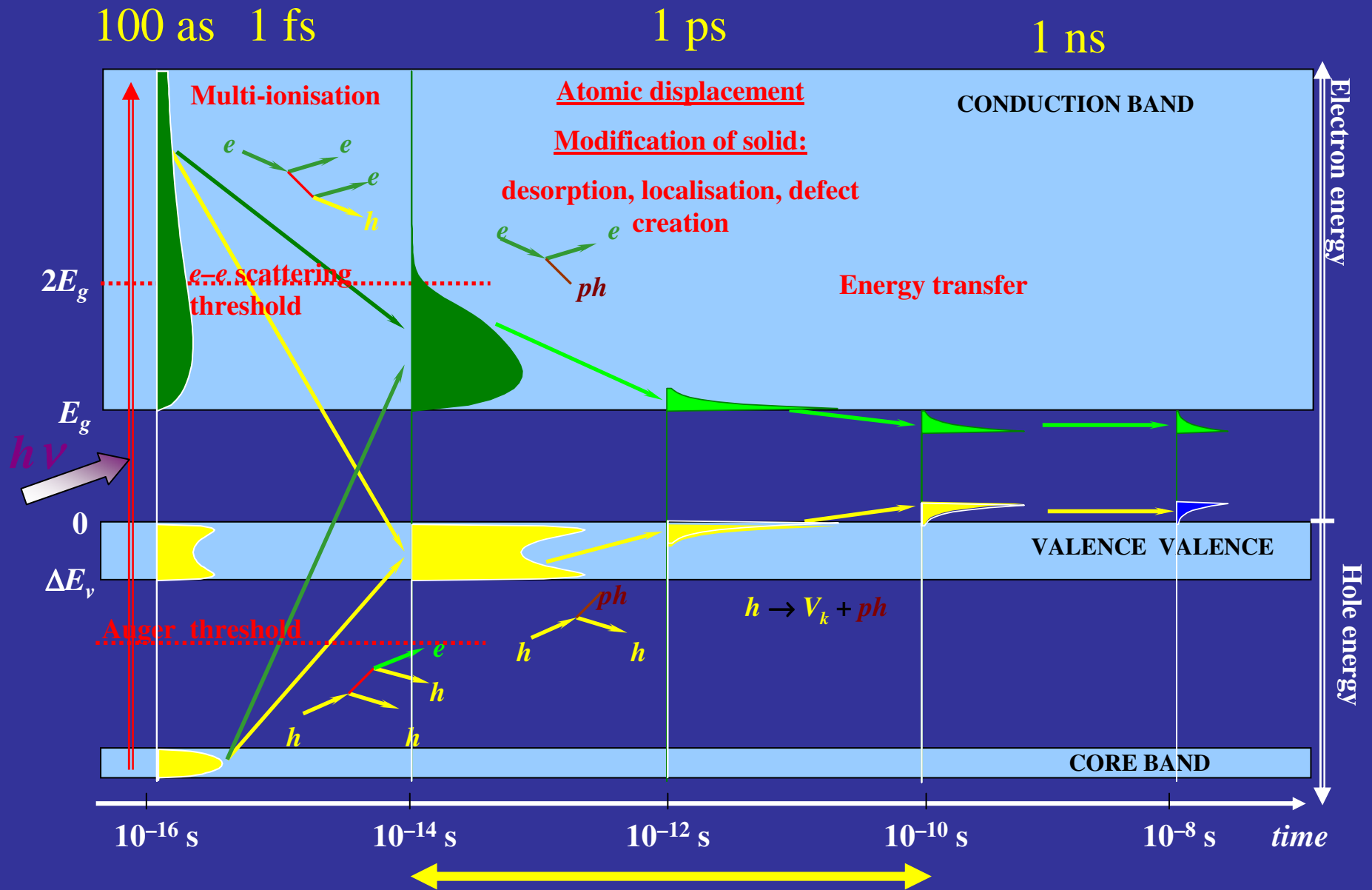
Фиг. 4. Зонная структура NaCl (по Кунцу [6]); показано также положение 2р-уровня Na<sup>+</sup> и 2р-уровня Cl<sup>-</sup>.

Нулевая точка шкалы энергий произвольно выбрана на дне зоны проводимости.

**Genetic recombination  
Excitonic type and  
electron-hole type of recombination**

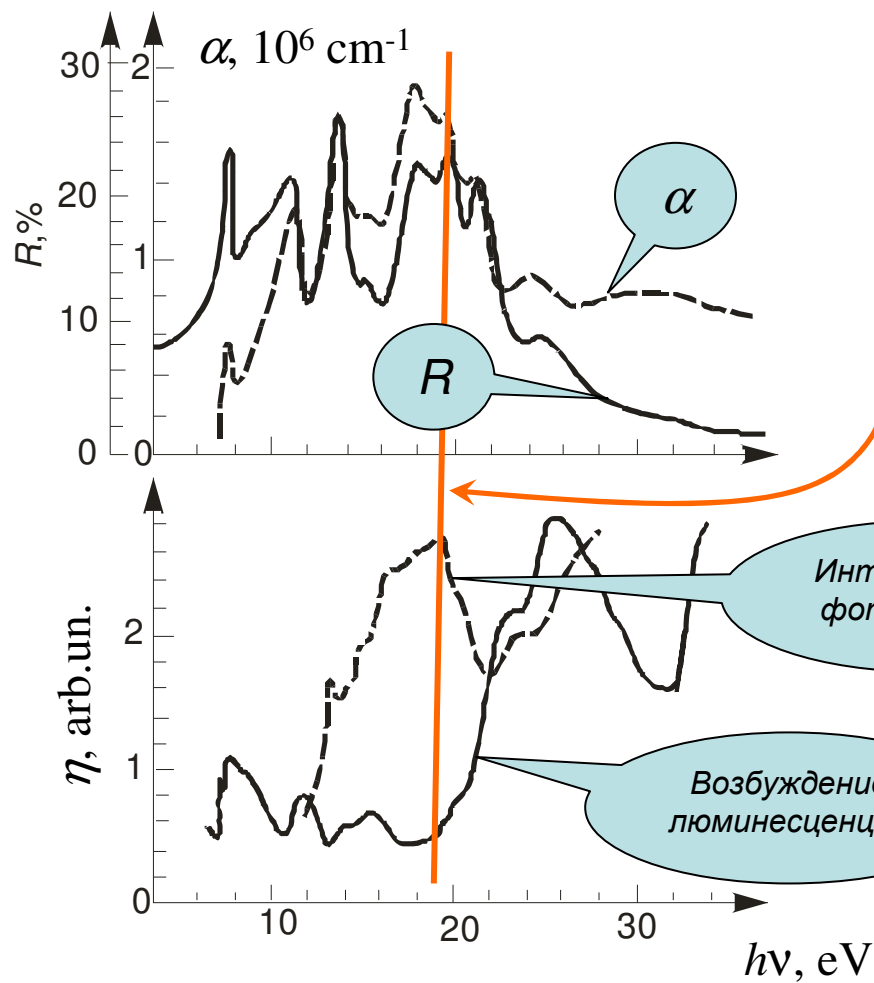


# Динамика релаксации электронных возбуждений в широкозонных диэлектриках после воздействия ионизирующего излучения



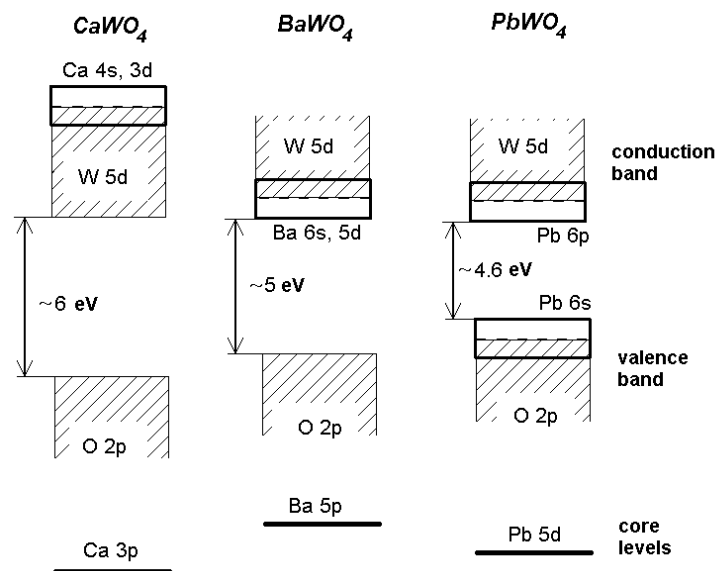
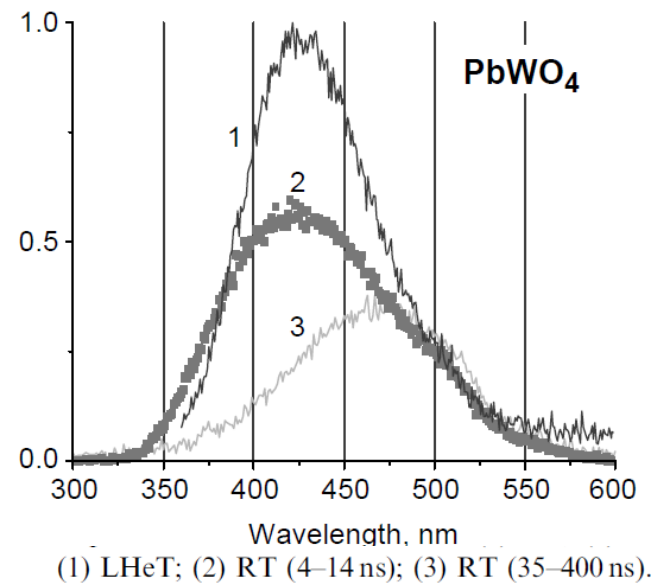
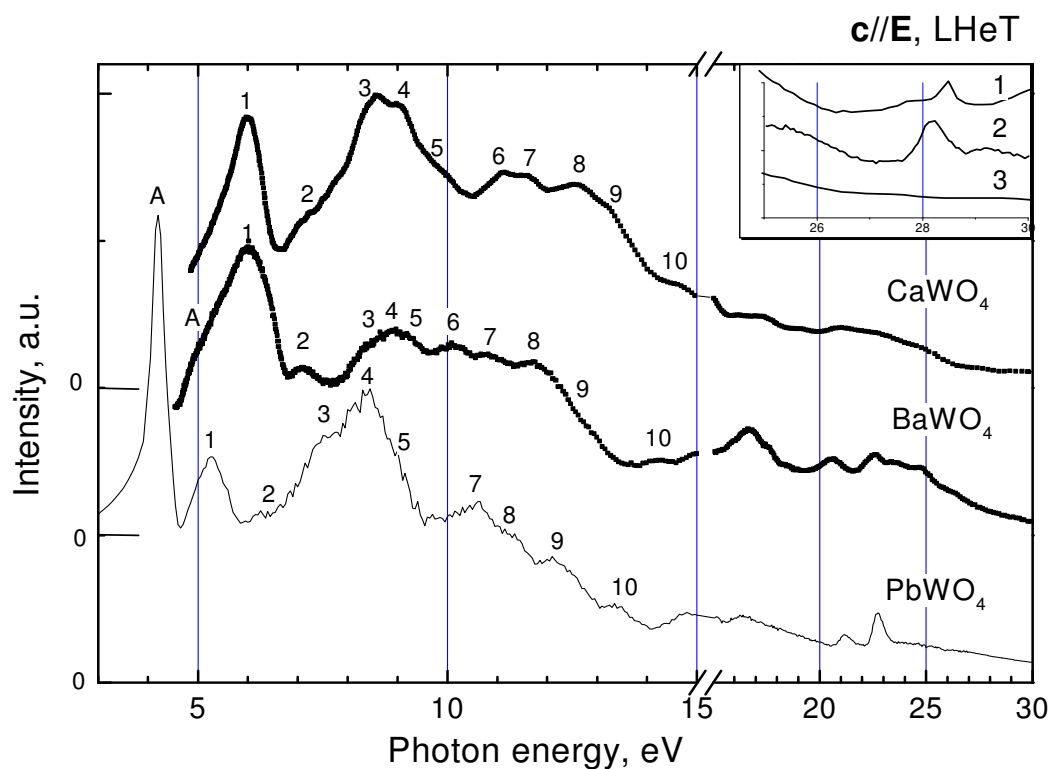
# MgO:Al – Порог размножения электронных возбуждений

(Ч.Б.Лущик, В.В.Михайлин и др.)



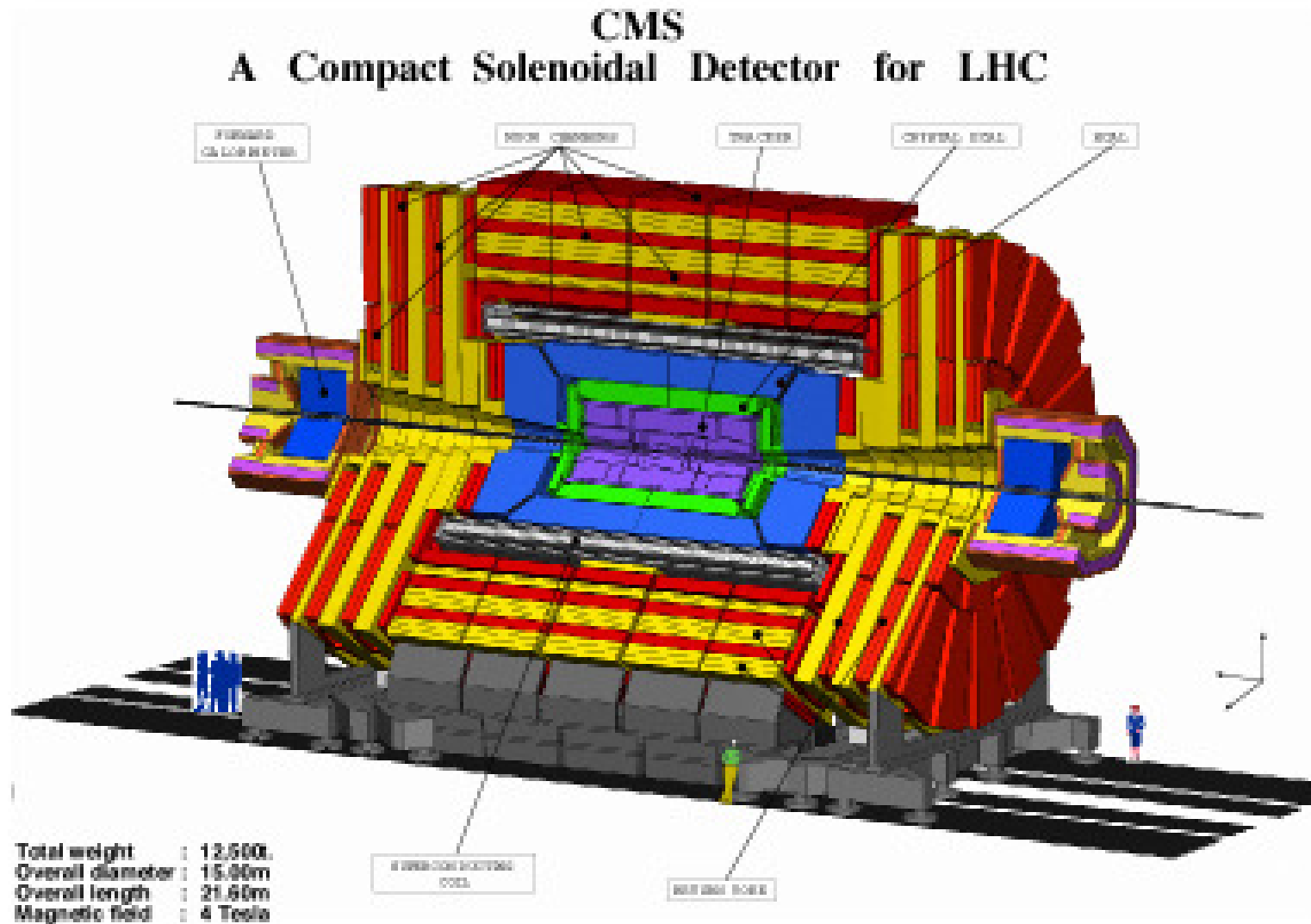
Точное положение порога электрон-электронного рассеяния находится в области сильного падения коэффициентов отражения  $R$  и поглощения  $\alpha$  и может быть оценено при одновременном измерении спектров возбуждения люминесценции и интегральной фотоэмиссии

# Спектры отражения и люминесценции вольфраматов и положение уровней катиона, обнаружение катионного экситона в $\text{PbWO}_4$

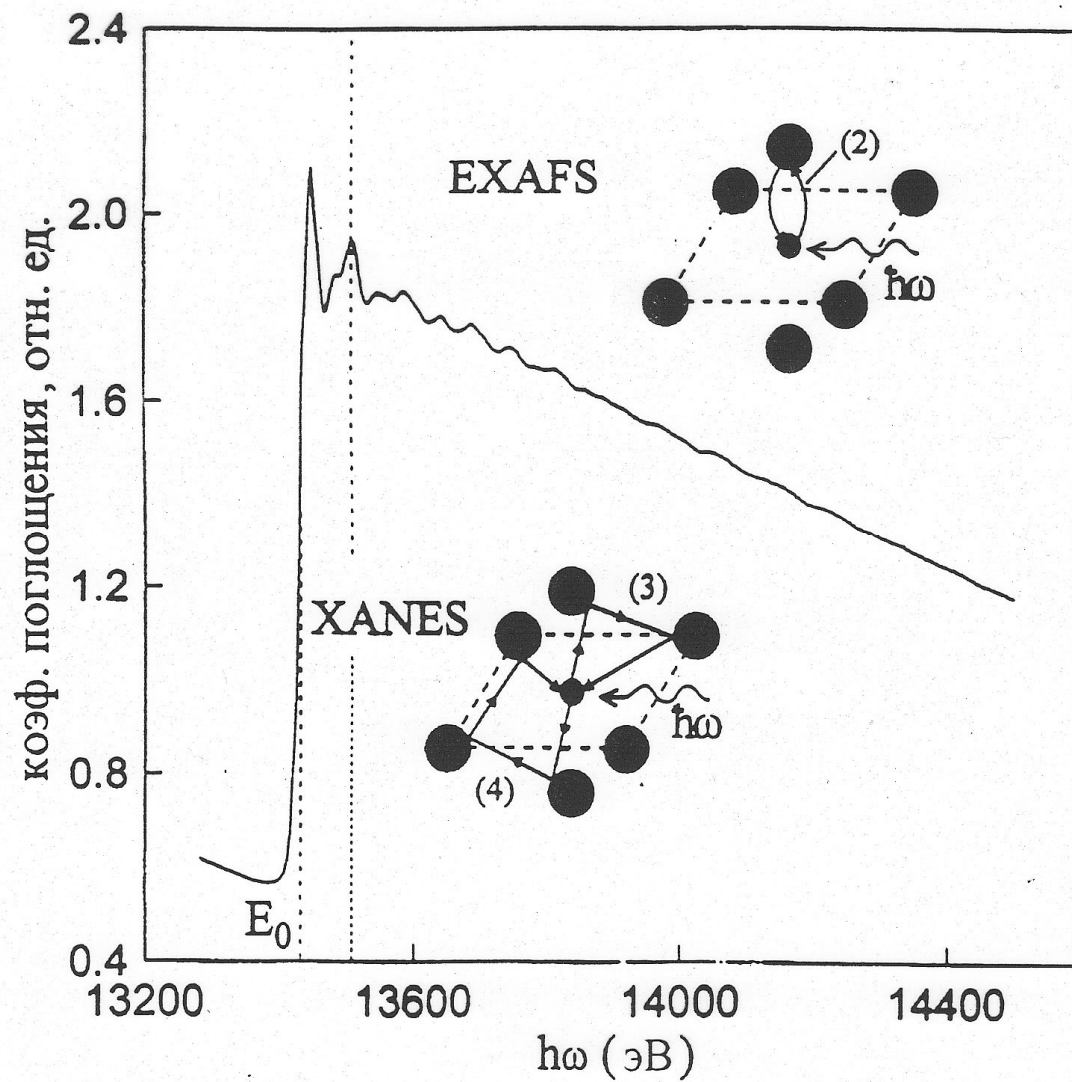




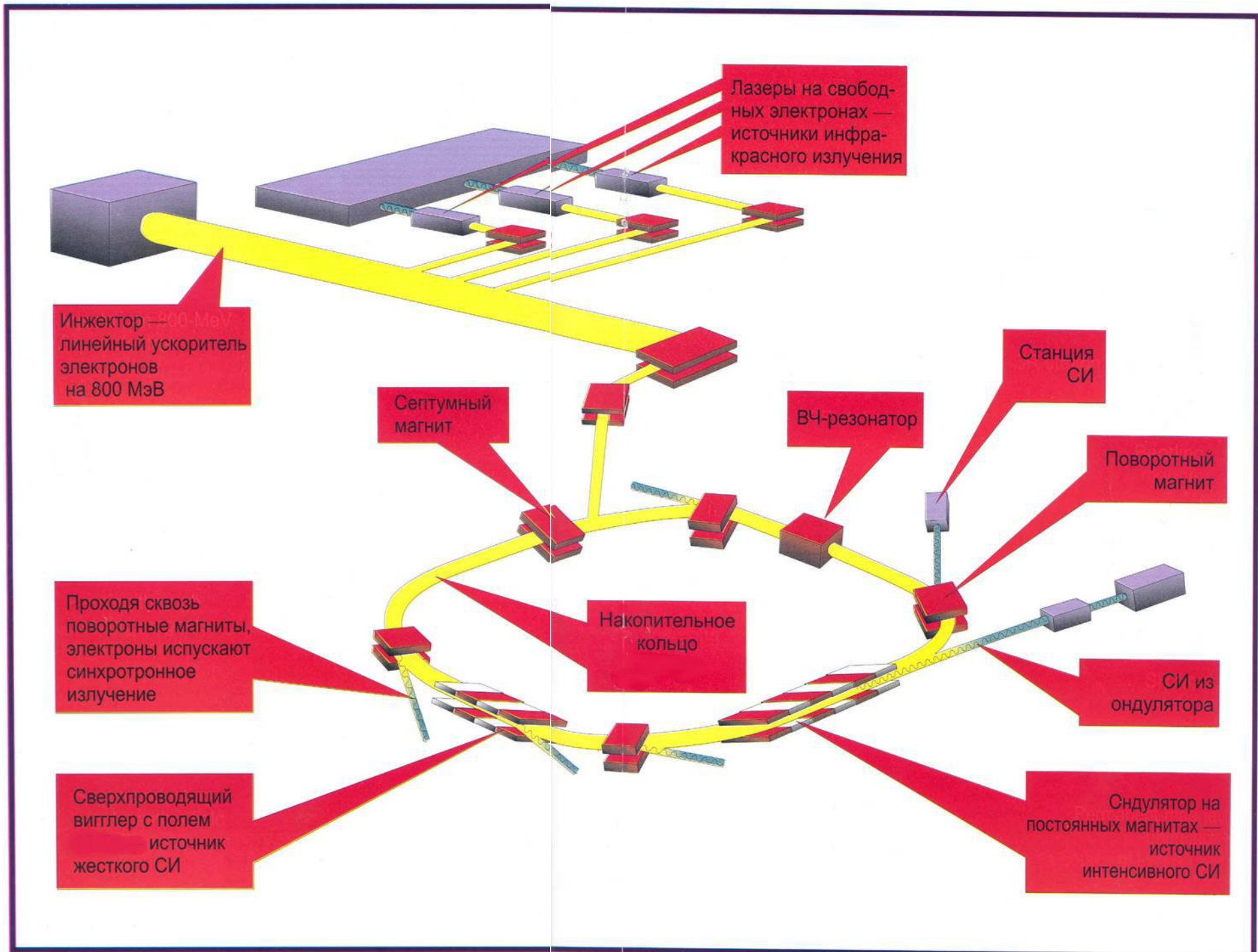
# Сцинтилляторы для детекторов в физике высоких энергий



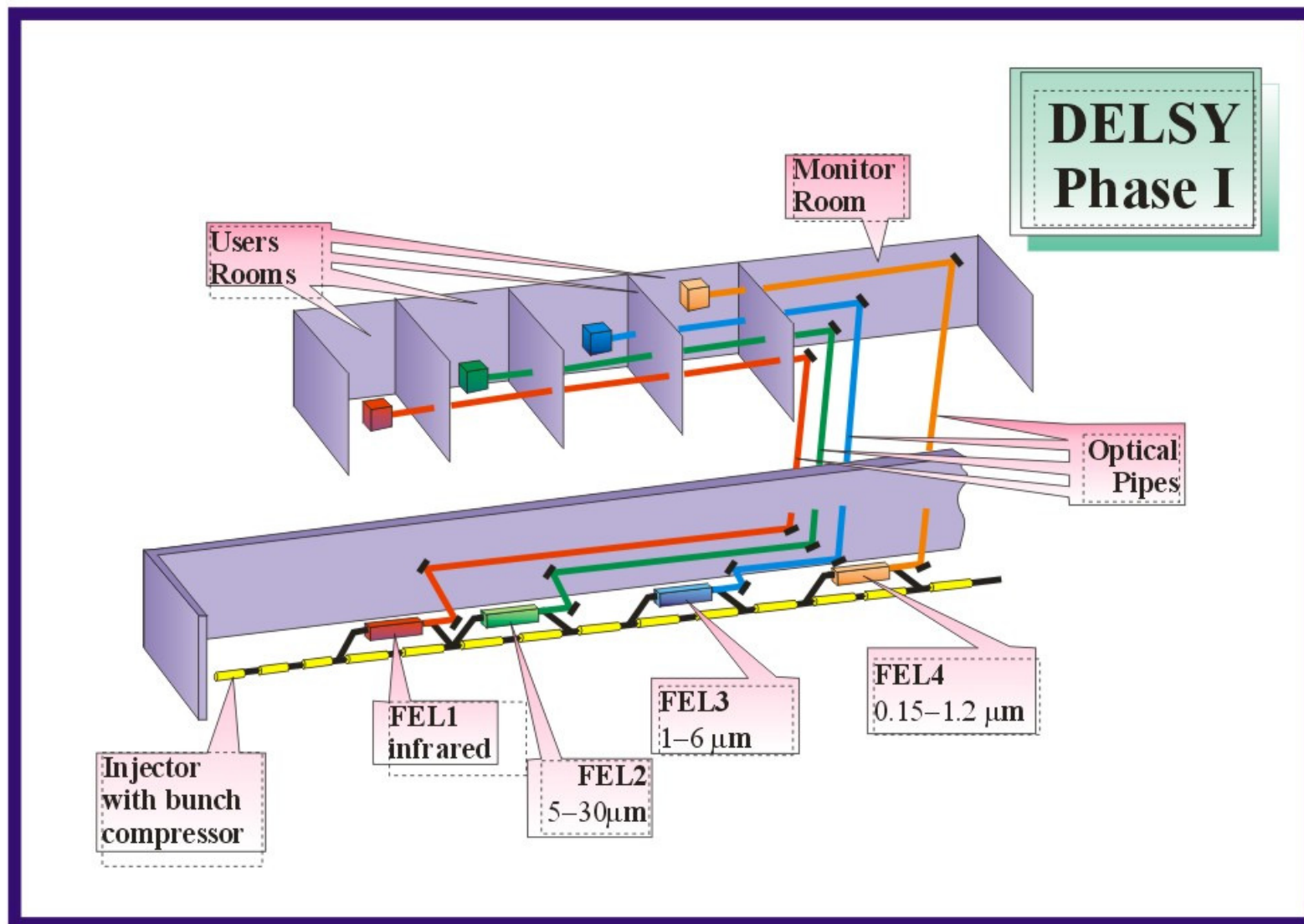
Сверхвысокие энергии, сверхбольшие радиационные нагрузки



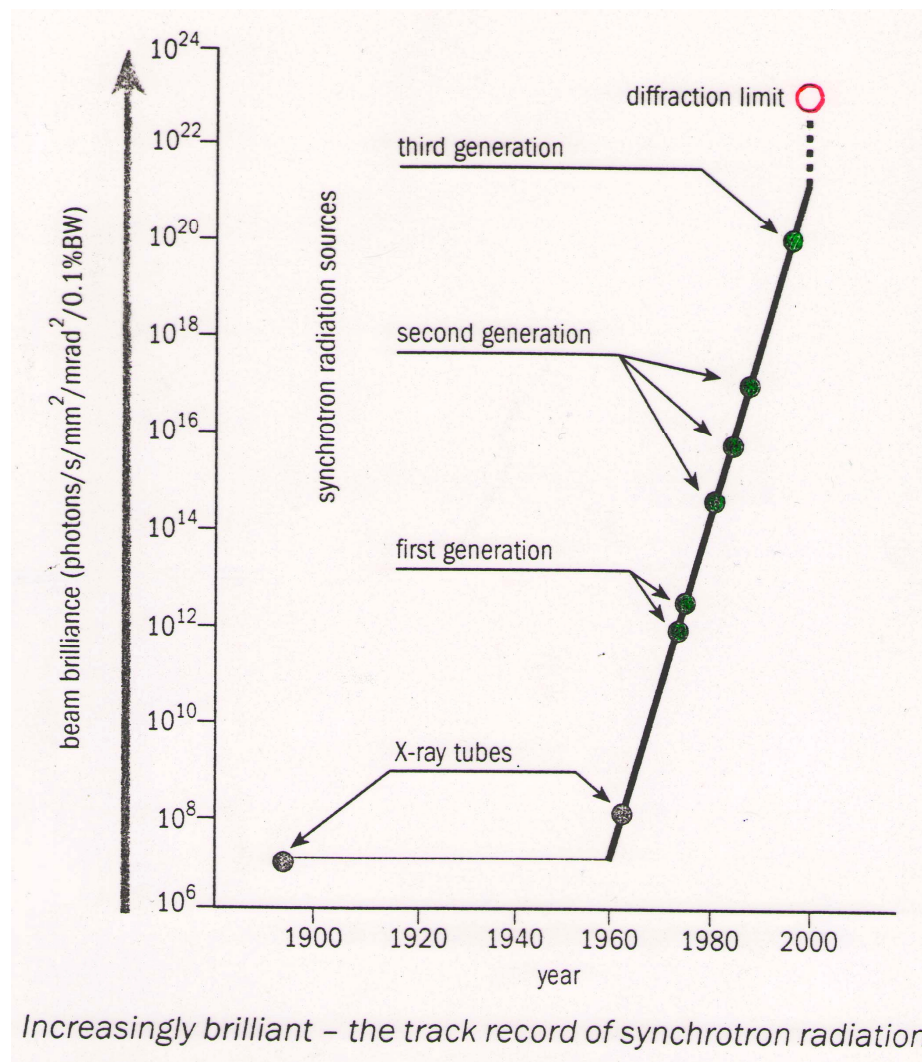




# DELSY



# Увеличение яркости рентгеновских источников по годам



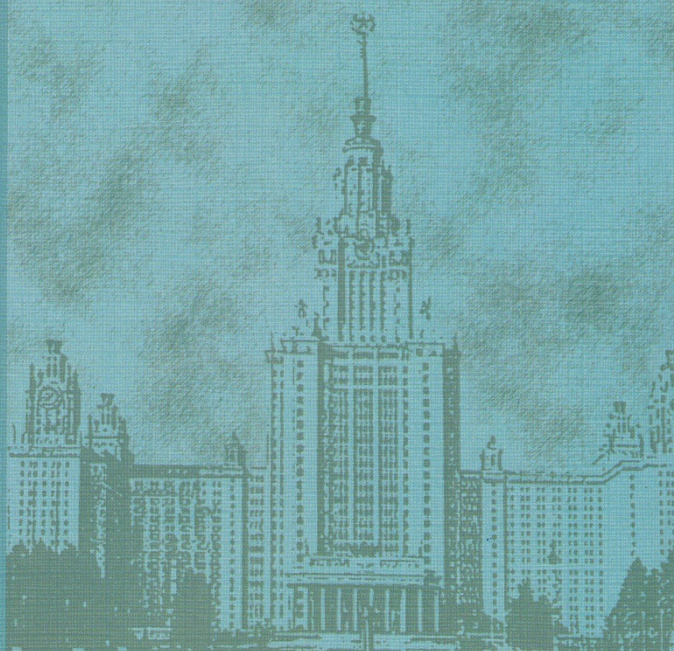
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

Научно-исследовательский институт ядерной физики  
имени Д. В. Скобельцына

В. В. Михайлин



# СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В СПЕКТРОСКОПИИ



# ФИЗИКА

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

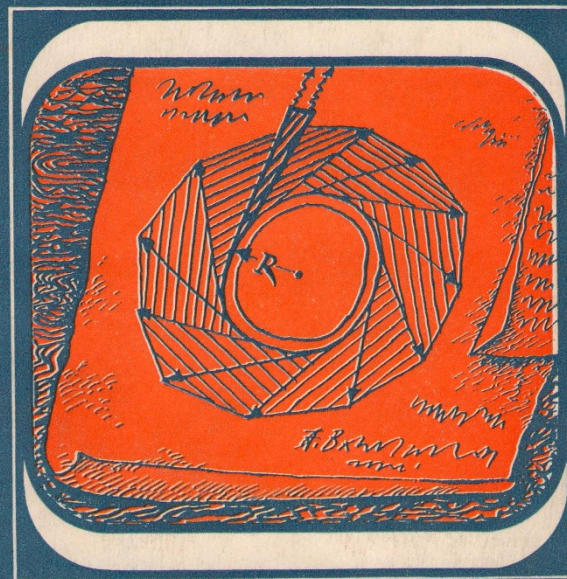


1988/2

В. В. Михайлин

И. М. Тернов

# СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



## ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

