

ИСТОЧНИК ПОЗИТРОНОВ ДЛЯ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Р.М. Джилкибаев, ИЯИ РАН

ИСТОЧНИК ПОЗИТРОНОВ ДЛЯ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ И ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ

- Позитроний (e^+e^-) простейший атом и уникальная система для поиска новых явлений вне рамок Стандартной модели (СМ)
- Поиск распадов позитрония в невидимую моду. Модель зеркального мира, расширяющая СМ.
- Точность расчетов QED, времени жизни o- P_s в вакууме в 100 раз точнее, чем точность эксперимента.
- ПАС спектроскопия - уникальный метод исследования вещества в близи поверхности

ПРИМЕНЕНИЕ ПАС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

- В последние время наблюдается интенсивное развитие нового направления в изучении строения вещества - метода позитронной аннигиляционной спектроскопии (ПАС), который существенно дополняет такие широко известные методы, как рентгеноструктурный анализ на основе синхротронного излучения, нейтронное рассеяние, оптическая, электронная и сканирующая туннельная микроскопия.
- Позитронная спектроскопия обладает уникальной чувствительностью при измерении примеси дефектов и их размеров в области нескольких нанометров.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

Figure 4. Defect Resolution Methods

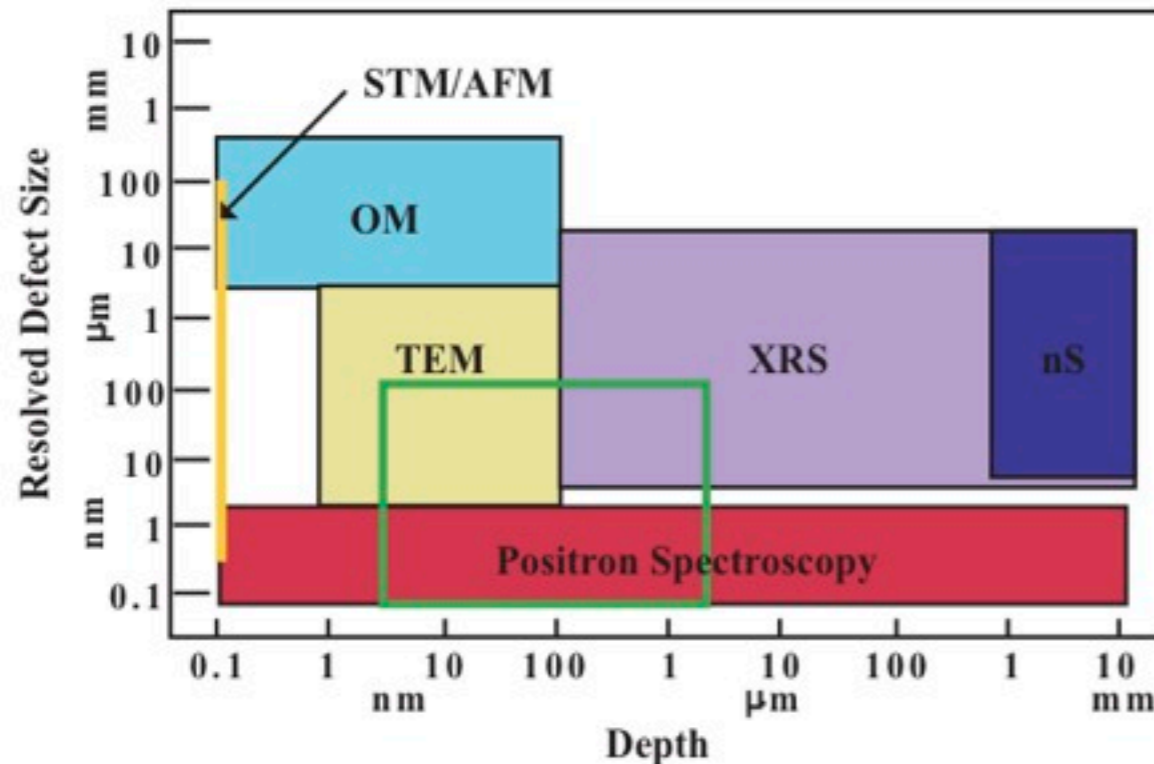
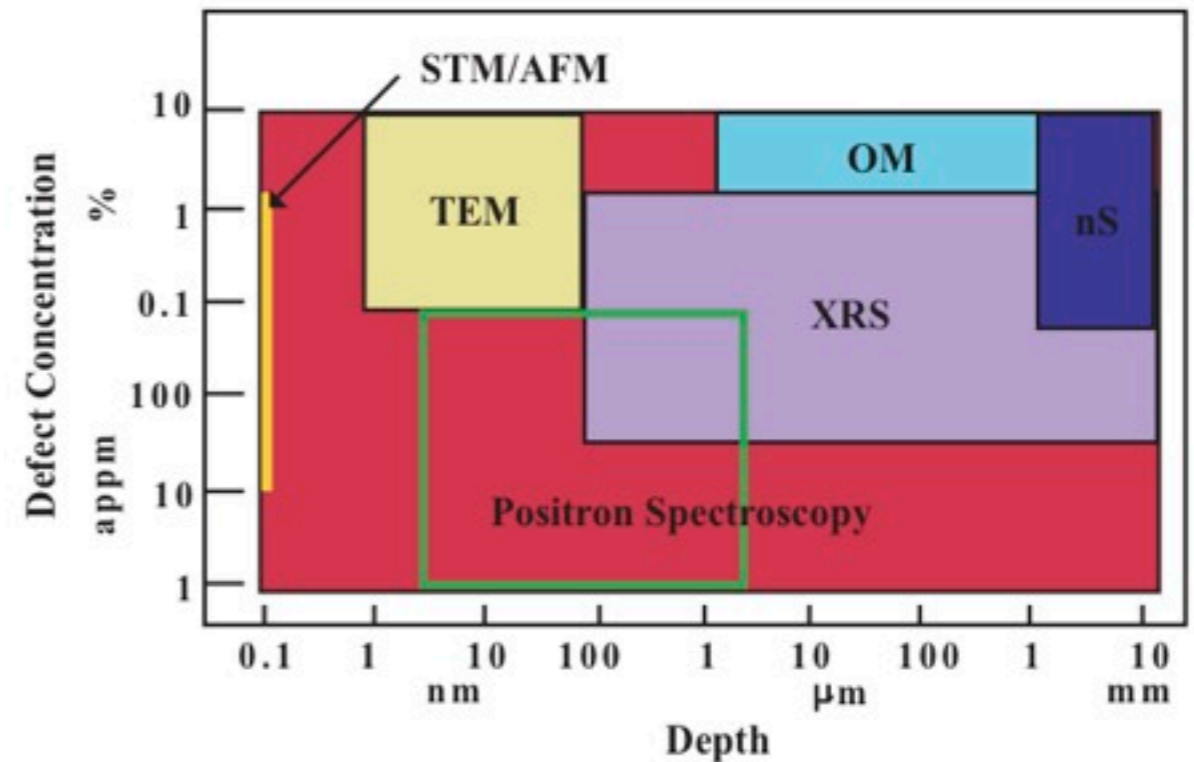


Figure 5. Defect Concentration Methods

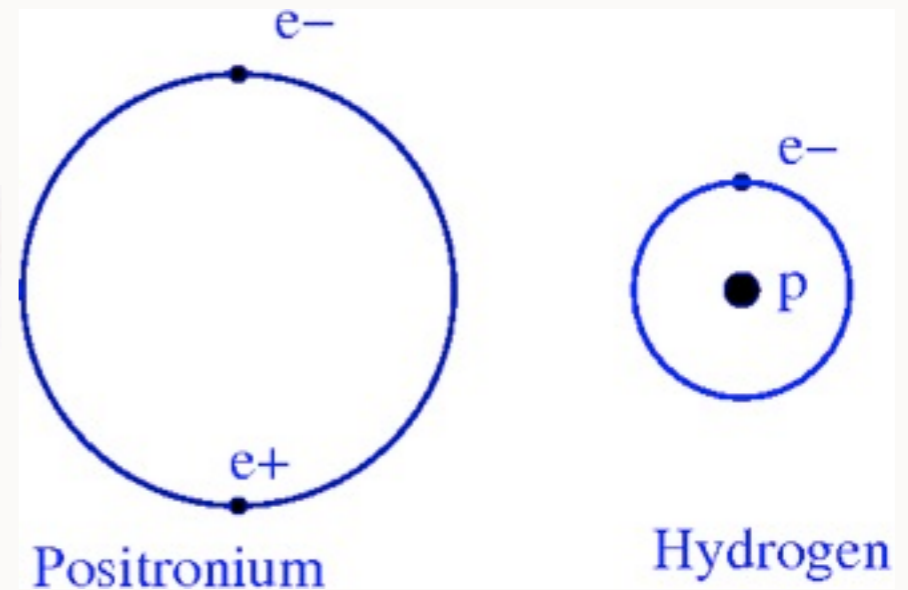


- OM - оптический микроскоп, TEM - просвечивающий электронный микроскоп, nS - нейтронная рассеяние, XRS - рентгеноструктурный анализ с использованием синхротронного излучения, STM - сканирующий тунельный микроскоп, AFM - атомный микроскоп. (Figures from <http://www.llnl.gov/str/Howell.html> Lawrence Livermore National Laboratory)

ПОЗИТРОНИЙ (P_s)

- $E_n = -13.6 / 2n^2, \quad r = 2 r_b = 0.1 \text{ nm}$

$$\psi_1(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi a_{Ps}^3}} \exp\left(-\frac{r}{a_{Ps}}\right) \quad \lambda_s^0 = \frac{1}{\tau_s^0} = 4\pi r_0^2 c |\psi_1(0)|^2$$



- Charge parity $P_c = (-1)^{l+s}$

- Singlet state, $(2\gamma, 4\gamma \dots) \tau_s = 0.125 \text{ ns}$

- 1S_0 para-positronium (p- P_s)

В.И. Гольданский

- Triplet state, $(3\gamma, 5\gamma \dots) = 142 \text{ ns}$

- 3S_1 ortho-positronium (o- P_s)

“Физическая химия
позитрона и позитрония”

POSITRON ANNIHILATION SPECTROSCOPY

- $\sigma_{2\gamma} = \pi r_0^2 c/v, r_0=2.8 \text{ fm}$

- $\lambda = \sigma_{2\gamma} v n_e \text{ [1/s]}$

- $\sin\theta \cong p_t / m_e c$

- $\Delta E_\gamma = p_p c / 2$

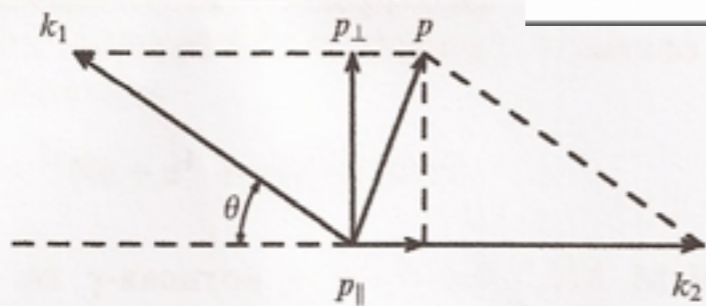


Рис. 1. Схема разлета γ -квантов при двухквантовой аннигиляции электрон-позитронной пары.

- V.I. Grafutin, E.P. Prokopiev, UFN 172,1,2002

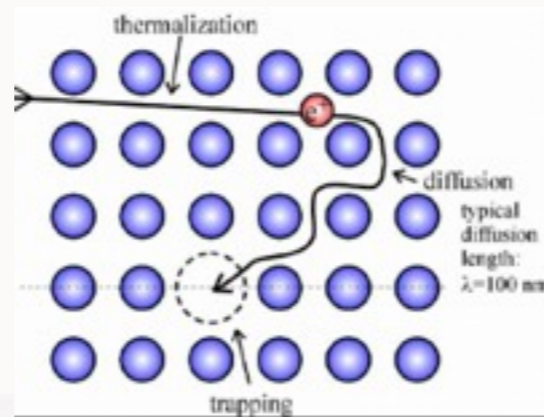


Figure 3. Positron Annihilation Measurement Techniques

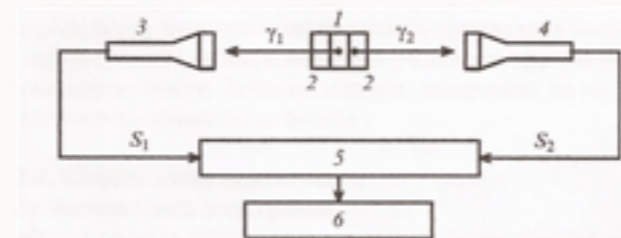
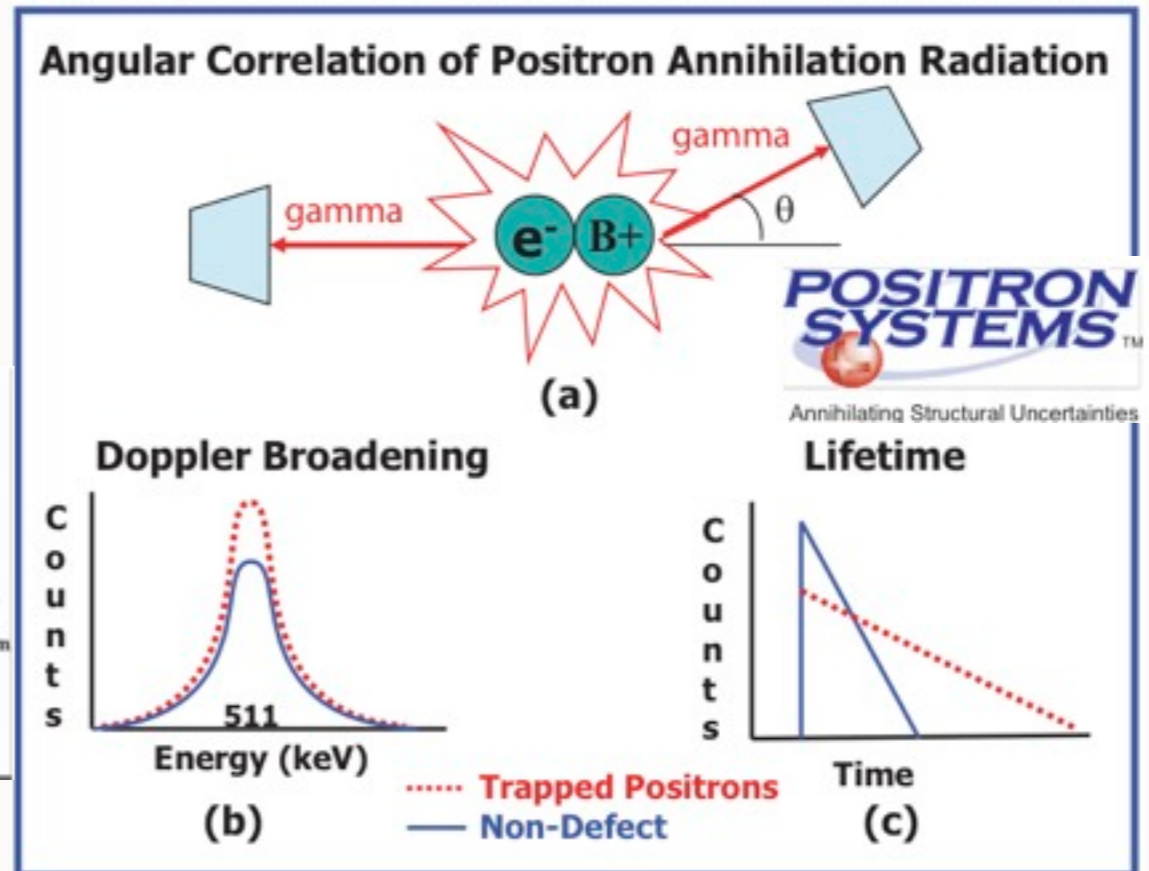


Рис. 2. Схема установки для измерения времени жизни позитронов.

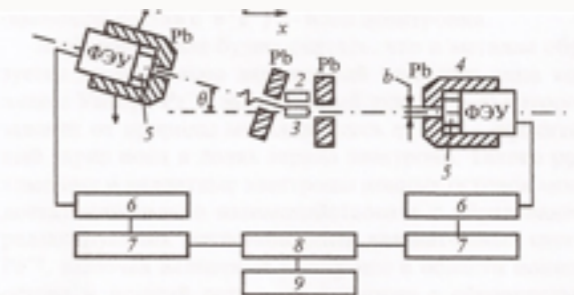


Рис. 5. Схема установки для наблюдения угловой корреляции аннигиляционных γ -квантов: 1 — подвижный детектор, 2 — источник позитронов, 3 — образец, 4 — неподвижный детектор, 5 — сцинтиллятор, 6 — усилитель, 7 — дискриминатор, 8 — схема совпадений, 9 — счетчик.

ИЗМЕРЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК

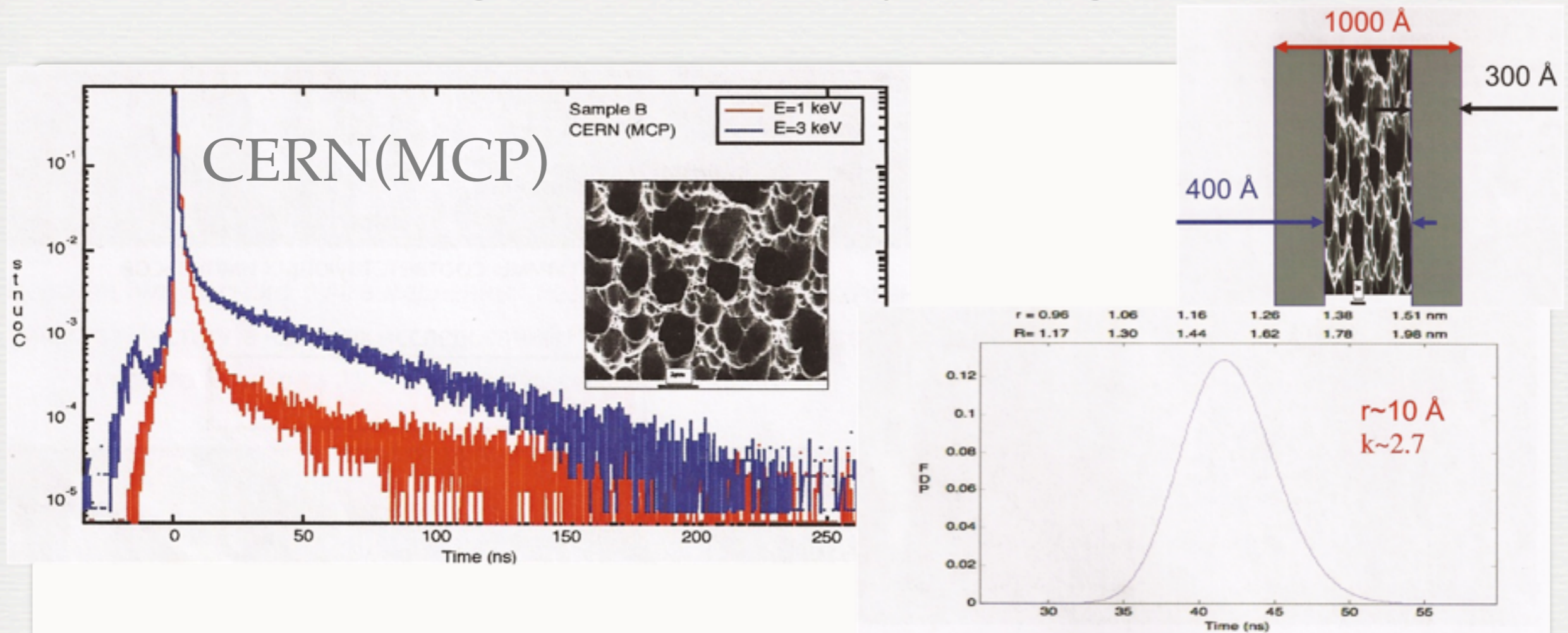


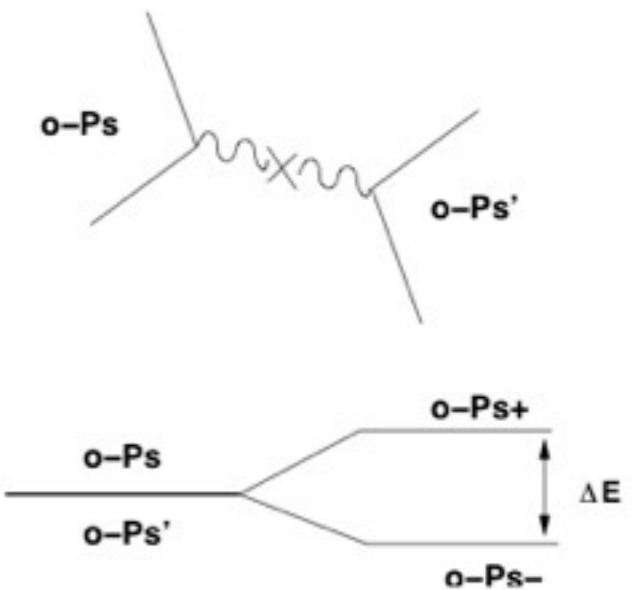
Рис. 20. Верхний рисунок: образец трёхслойной плёнки толщиной 100 нм, наружные слои из непористого кремния толщиной 30 нм, внутренний слой из пористого кремния толщиной 40 нм. Средний рисунок: красным показан спектр для энергии пучка 1 кэВ, соответствующий глубине проникновения только в наружный слой. Синий график — для 3 кэВ, глубина проникновения во внутренний слой. Нижний рисунок: определение среднего размера пор около одного нанометра и эффективное значение диэлектрической постоянной образца, $k \approx 2,7$

- А.С. Белов, А.И. Берлев, С.Н. Гниненко и др. "Технологический комплекс позитронной аннигиляционной спектроскопии для исследования наноструктурных материалов и неразрушающего контроля, диагностики и анализа присутствующих в них примесей", Москва, 2011

FUNDAMENTAL PHYSICS

MIRROR DARK MATTER

- o-Ps go to invisible mode
- Lagrangian $\sim \varepsilon F^{\mu\nu} F'_{\mu\nu}$; $\Delta E = 2h\varepsilon f$
- experimental upper limit for $\varepsilon < 2 \cdot 10^{-7}$

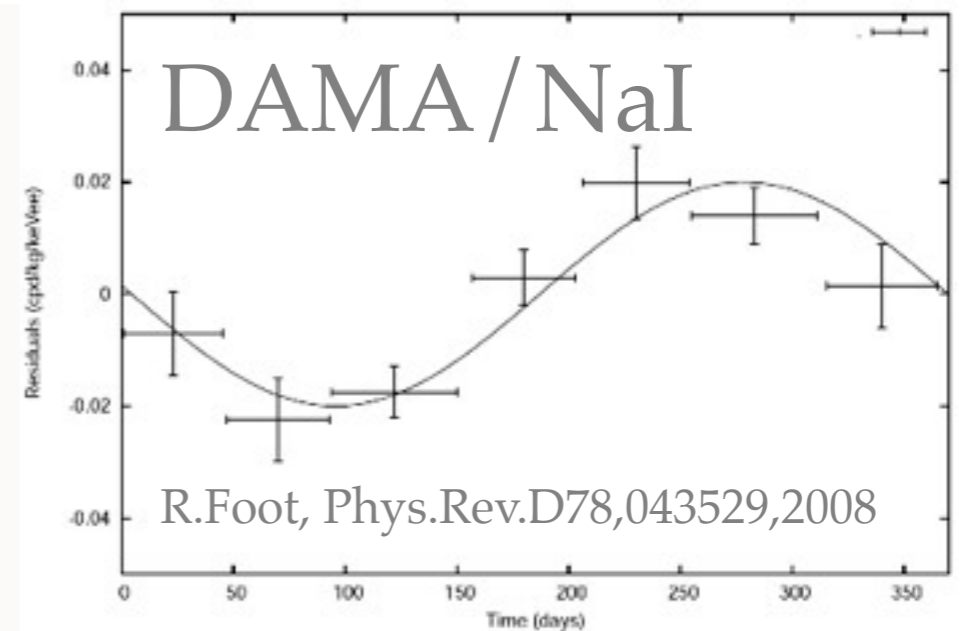


- Oscillation in vacuum $N = \cos^2 \Omega t \cdot e^{-\Gamma_{SM} t} \simeq \exp[-t(\Gamma_{SM} + \Omega^2 t)]$

- $\Gamma_{SM} \rightarrow$ o-Ps decay rate, $\Omega = 2\pi\varepsilon f$

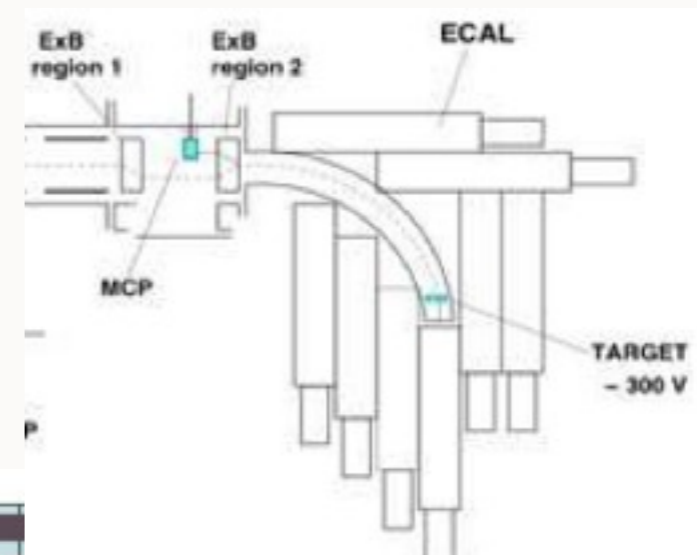
$$Br(o - Ps \rightarrow invisible) = \frac{2(2\pi\varepsilon f)^2}{\Gamma_{SM}^2 + 4(2\pi\varepsilon f)^2}$$

- $Br(o-Ps \rightarrow invis.) = 2 \cdot 10^{-7}$, $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-9}$

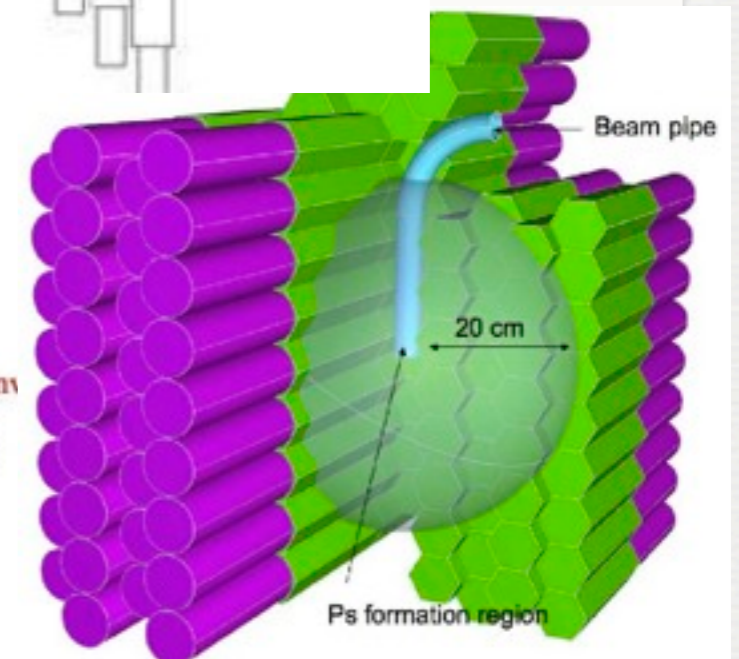
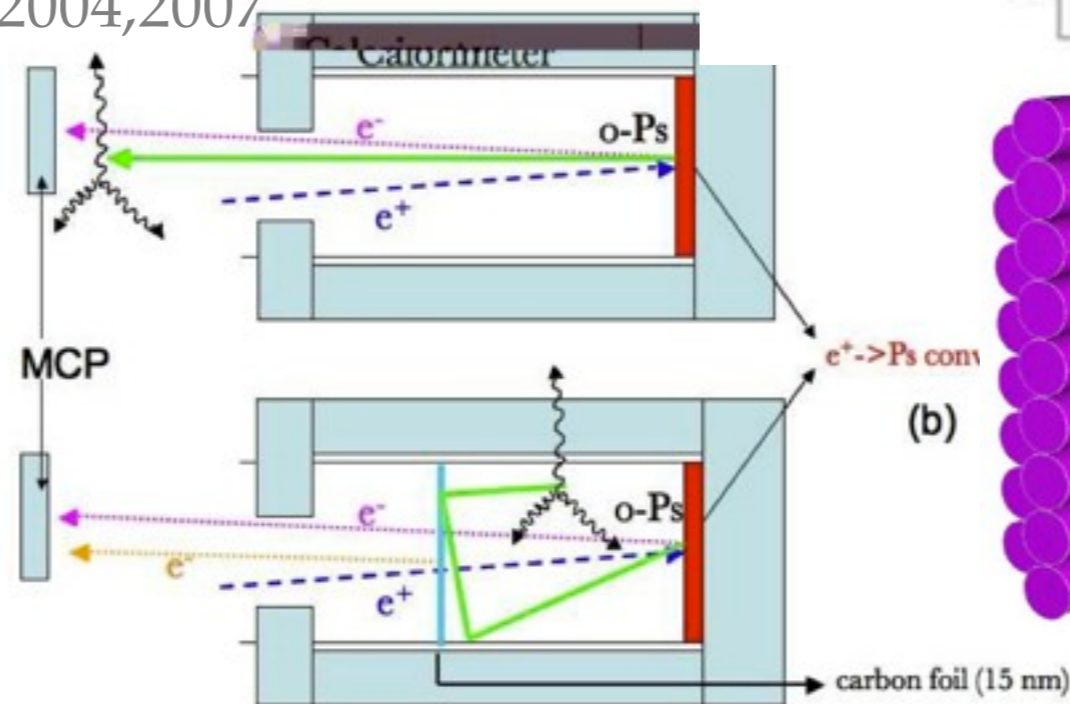
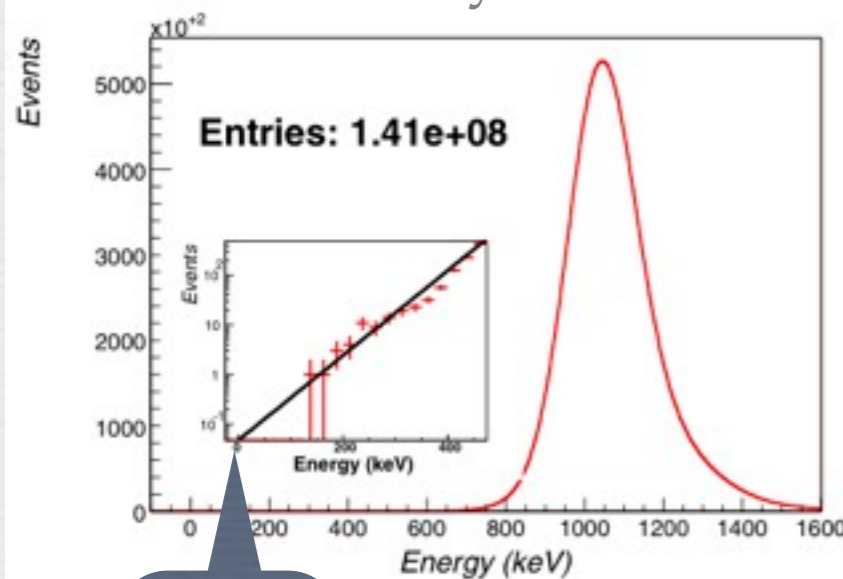


AN EXPERIMENT TO SEARCH FOR MIRROR DARK MATTER

- 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}
- $10^4 e^+ / s$, $T_{exp} - 10^6 s$
- SM $Br [e^+e^- \rightarrow \nu\nu] = 6.6 \cdot 10^{-18}$



A. BADERTSCHER *et al.* PhysRevD.75.032004,2007



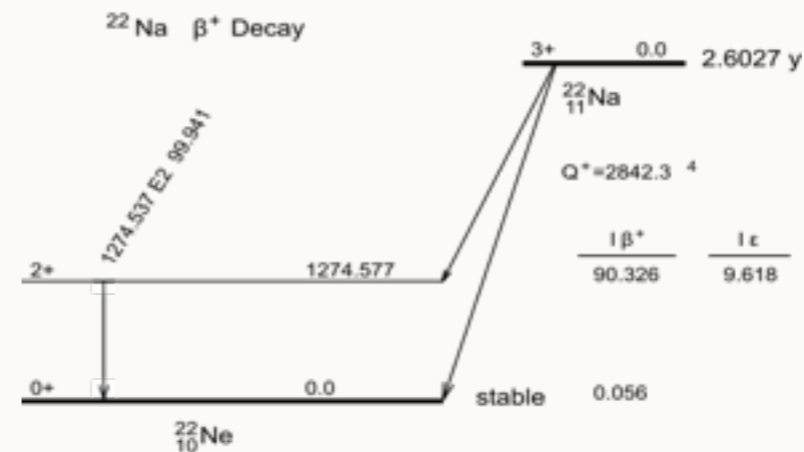
Signal

ИСТОЧНИКИ ПОЗИТРОНОВ

■ Радиоактив. источники $^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne} + e^+ + \gamma(1.27), 2.6\text{y}$

■ ^{44}Ti (60 y), ^{52}Co (72d)

■ ^{64}Cu (13h), ^{18}F (92h)



■ Электронные ускорители с энергией 8 - 260 МэВ

■ Ядерные реакторы ($\gamma, n \rightarrow \gamma$) $\gamma (E_\gamma > 1.02 \text{ MeV}) \rightarrow e^+ + e^-$

■ Ондуляторное излучение с энергией $E_\gamma > 1.02 \text{ MeV}$

■ Фемтосекундные лазеры

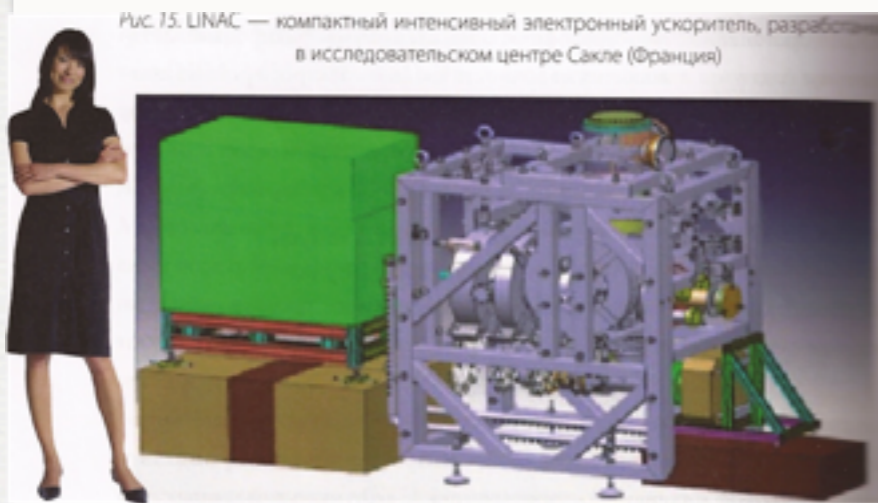
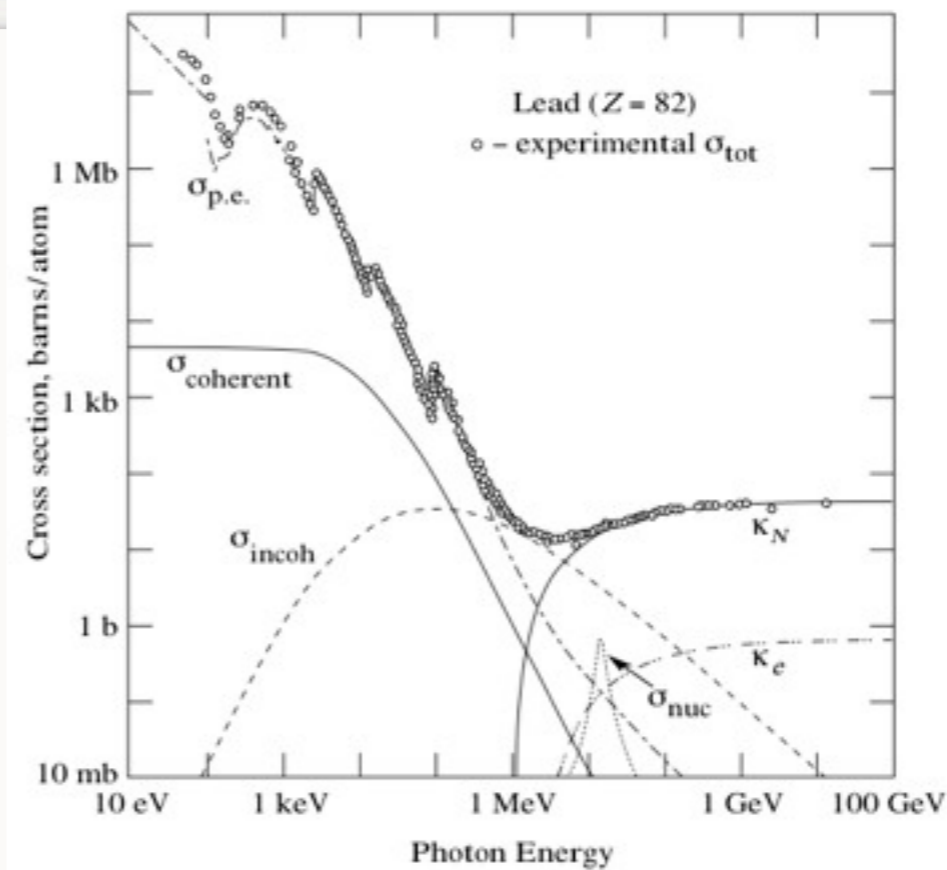
НЕКОТОРЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОЗИТРОНОВ В МИРЕ

- Japan, Tsukuba AIST LINAC 8-70 MeV, 100-10 μA , slow positron beam - 10^8 e^+ / sec
- USA, Argonne Nat. Lab, LINAC 15 MeV, 200 μA , slow positron beam (possible) - 10^9 - 10^{10} e^+ / sec
- USA, North Carolina Univ., PULSTAR Reactor, 1 MW, slow positron beam - 5×10^8 e^+ / sec
- Germany, MAMI microtron, 170 MeV, 75 μA , slow positron beam - 10^8 e^+ / sec ; Giessen LINAC, 35 MeV, 100 μA , slow positron beam - 10^8 e^+ / sec

ELECTRON ENERGY FOR POSITRON SOURCE

- Minimal e^- energy?
- Target - W, Ta

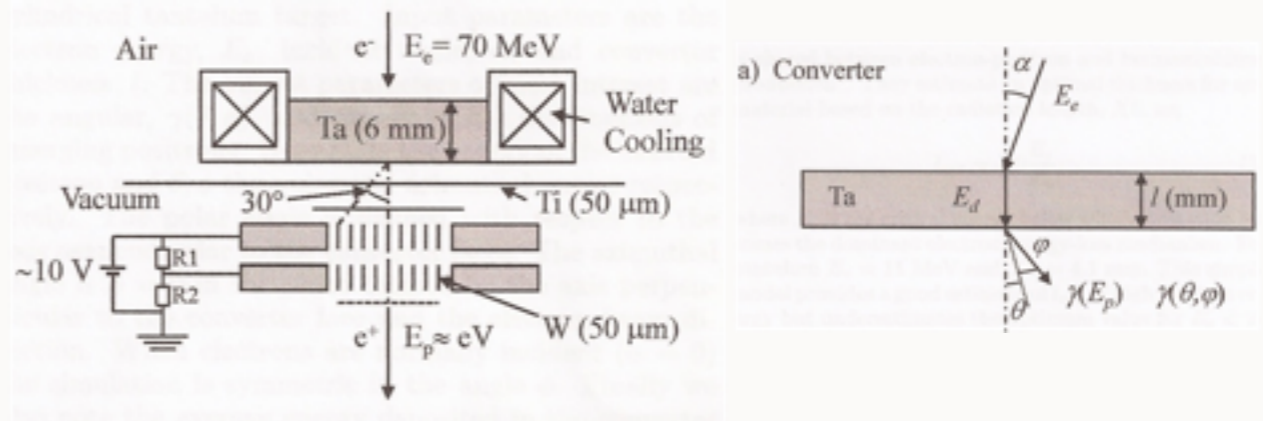
6 MeV e^- , Saclay, France



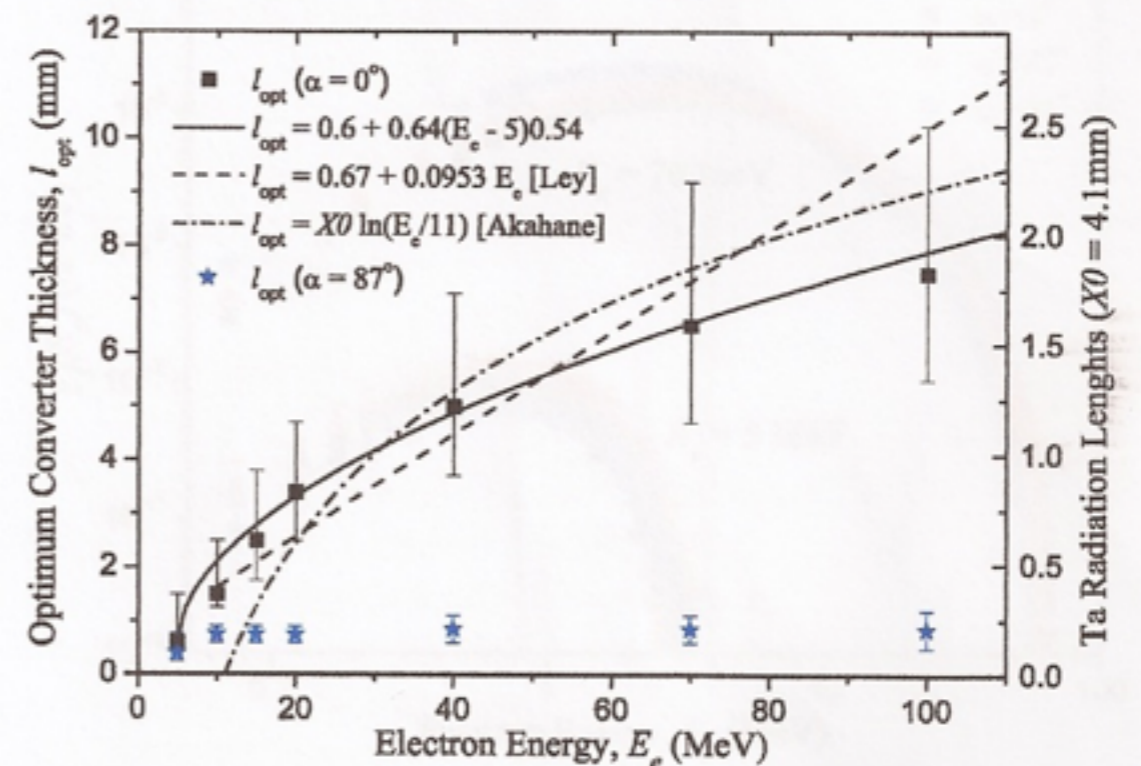
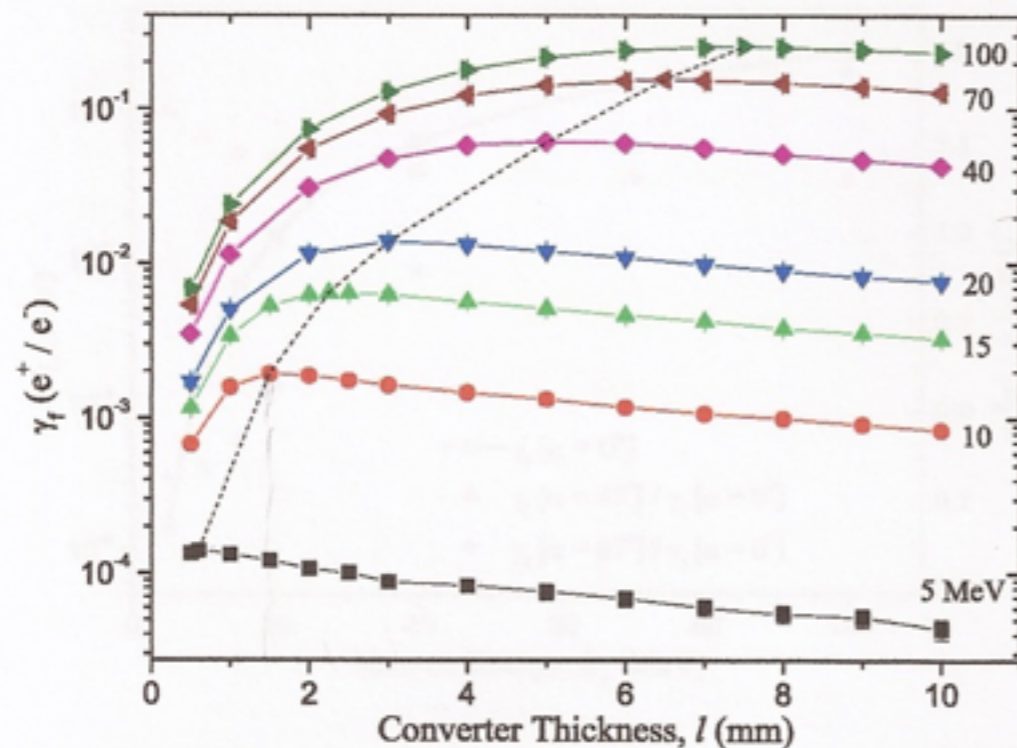
- СЛ-75 НИИЭФА

AIST LINAC SLOW POSITRON SOURCE

- AIST LINAC 70 MeV
- $10\mu\text{A}$, 100 Hz, pulse $1\mu\text{s}$

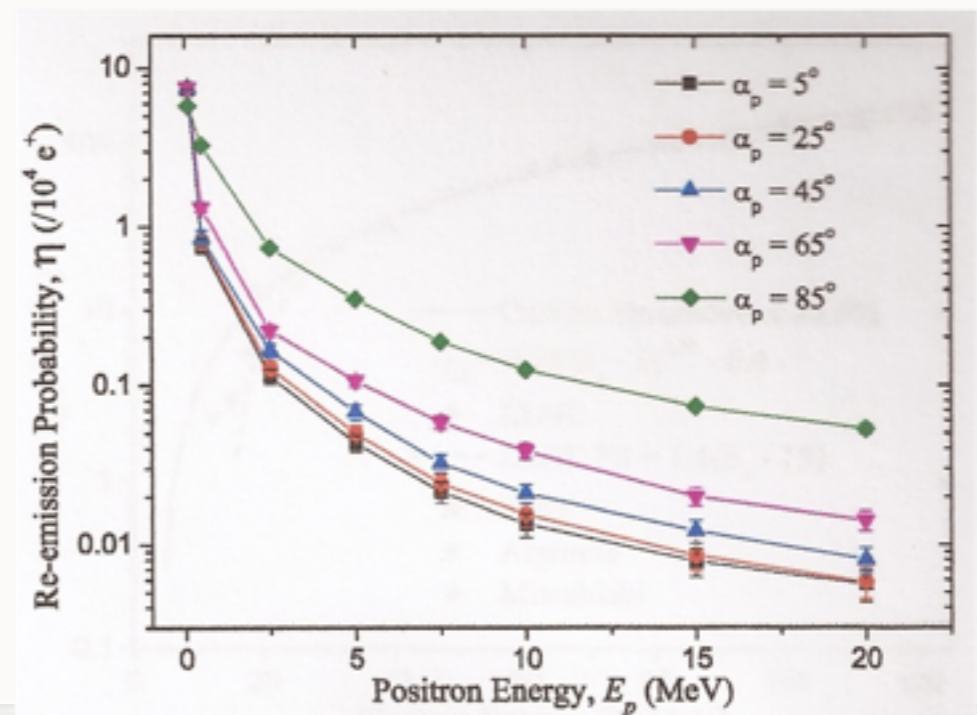
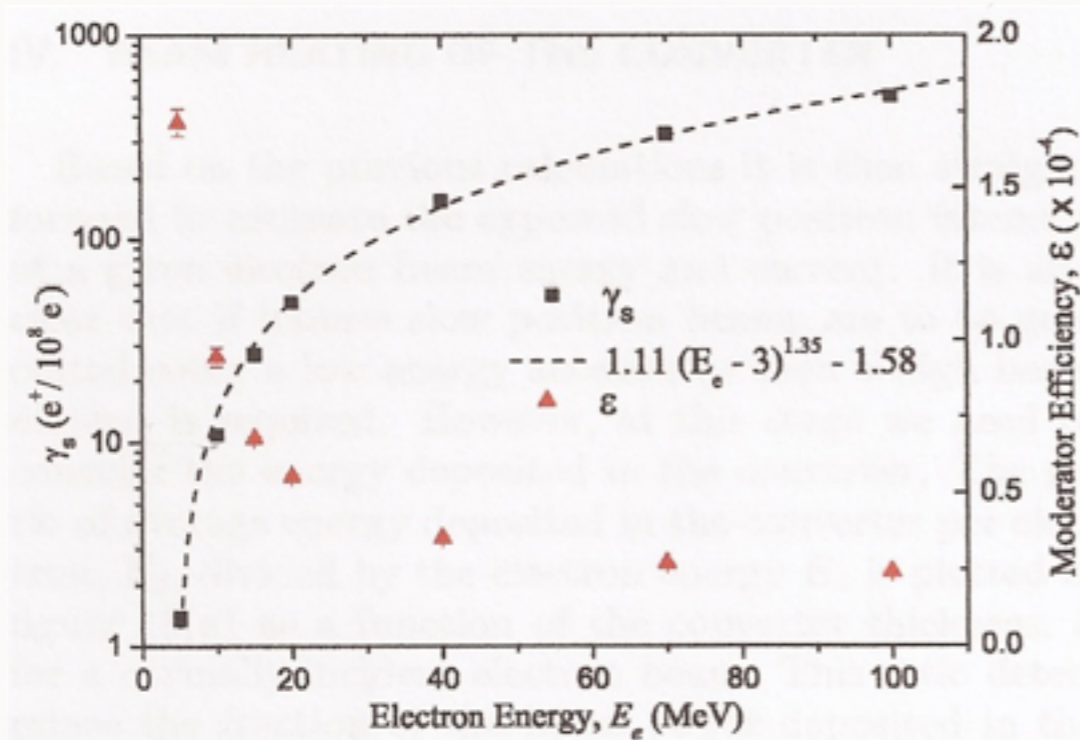
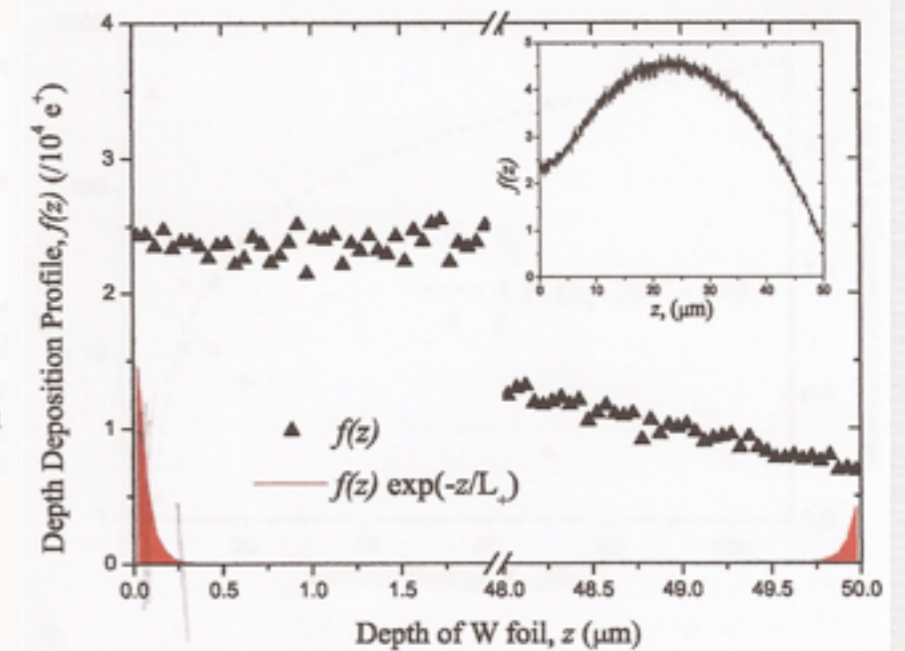
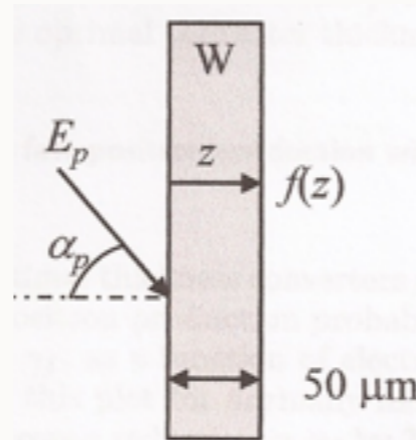


- B.E. O'Rourke et al., 'AIST simulation of slow positron production ...', arXiv: 1102.1220v2, 10 May 2011, Advanced Industrial Science and Technology (AIST)



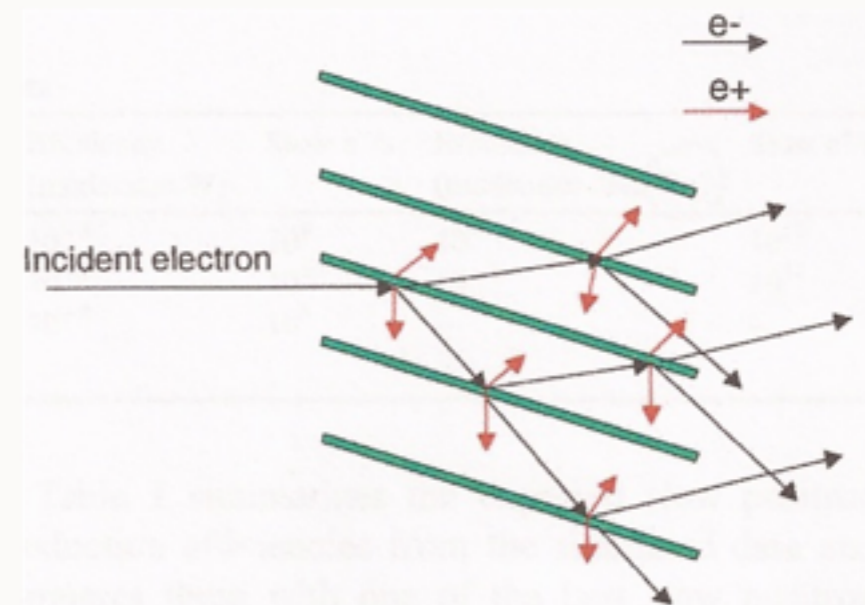
AIST LINAC SLOW POSITRON SOURCE

- Moderator efficiency
- Meas. $L = 55-100$ nm
- W (поликристал - кристал)



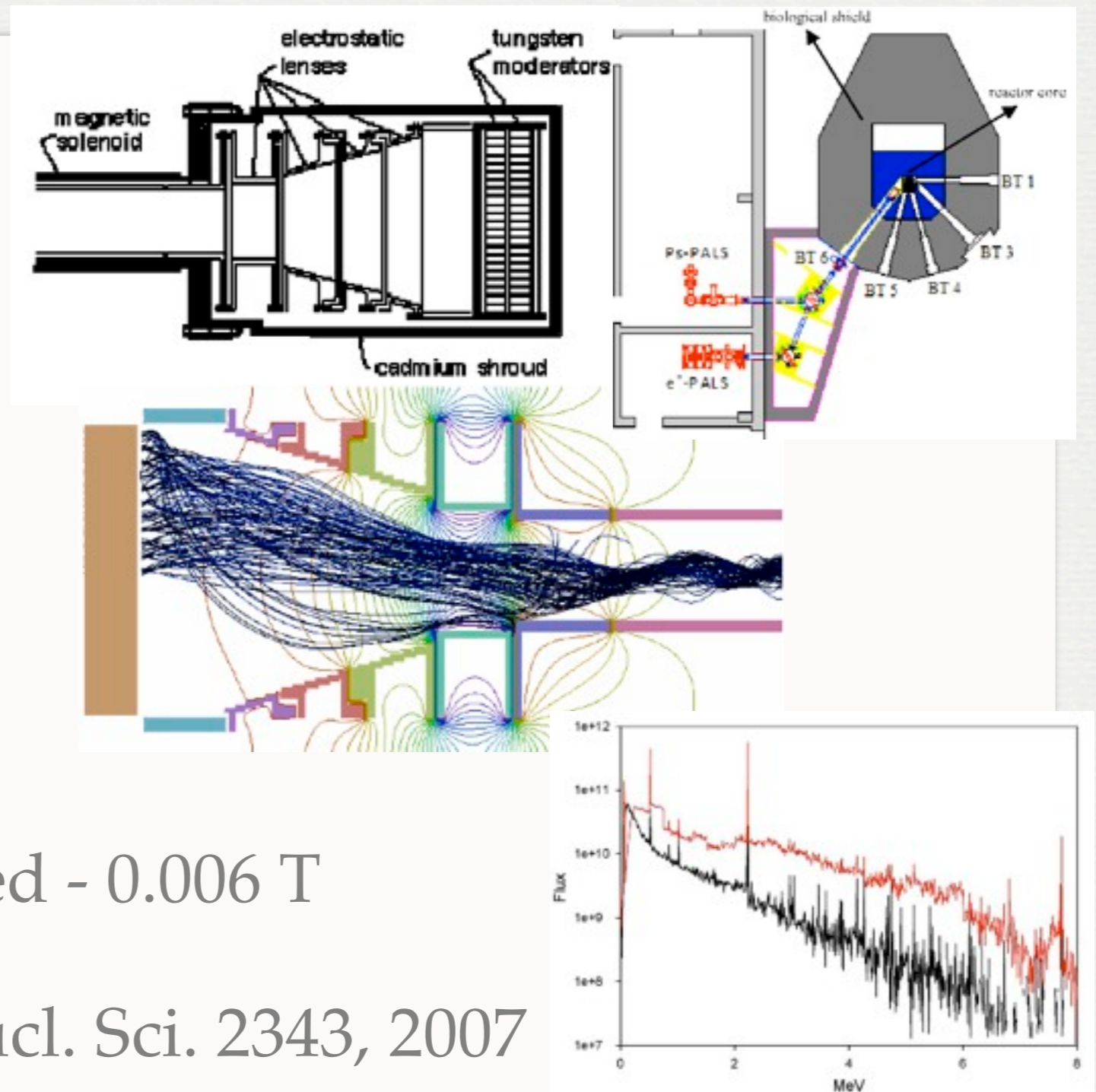
ARGONNE SLOW POSITRON SOURCE

- ANL LINAC 15 MeV, pulse 30ps, apart repeatedly 768 ps, 200 μ A, 35 kW
- Proposed combined target, 10 W plate $d = 0.4$ mm, $L = 10$ mm, gap = 1mm, $\theta = 10^\circ$
- Target eff. - 10^{-3}
- Moderator W eff. - 10^{-3}
- Slow e^+ - $10^9 e^+ / s$
- H.M. Chen et al. Applied Surface Science 252, 3159, 2006



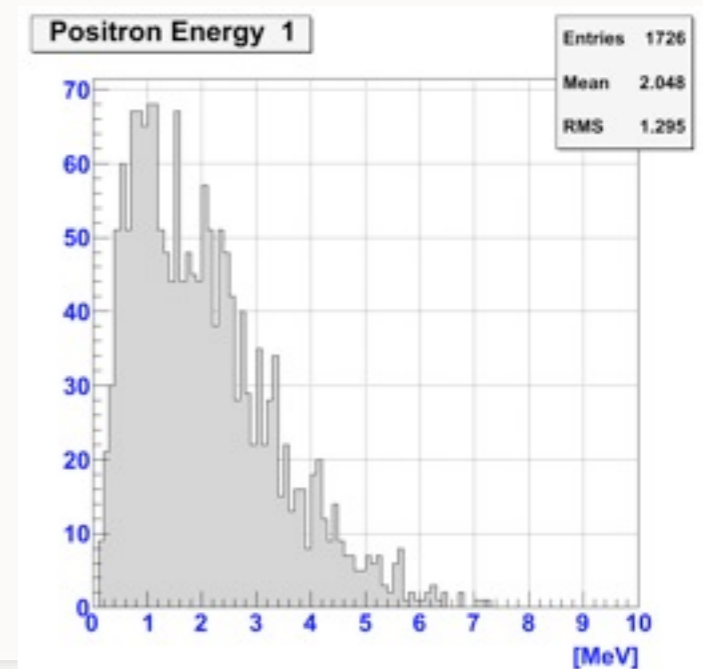
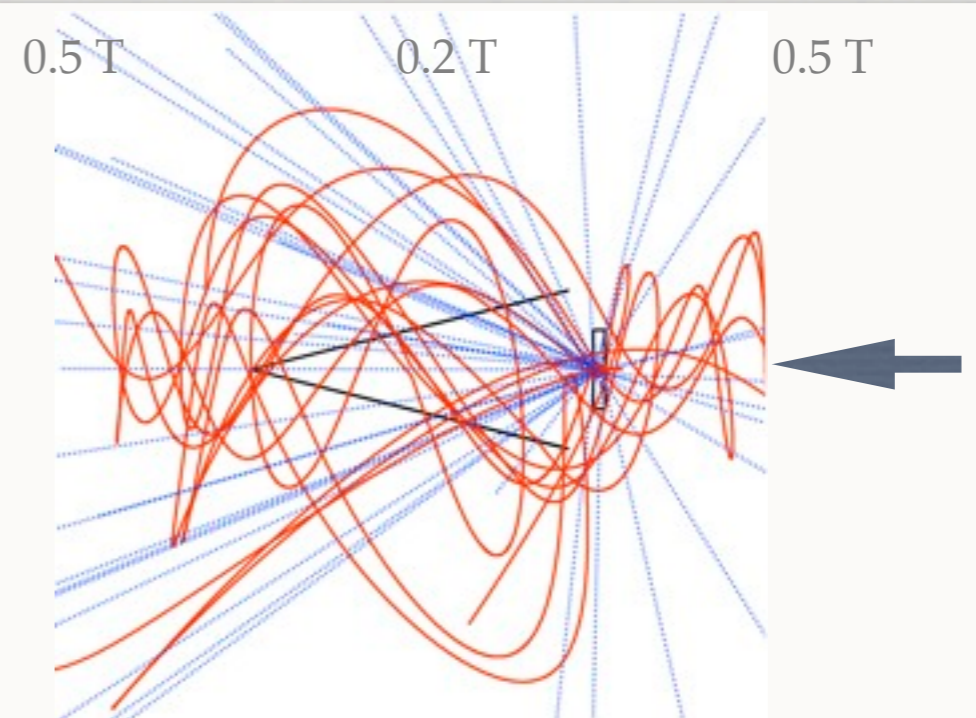
PULSTAR SLOW POSITRON SOURCE

- 1 MW reactor
- $n + \text{Cd} \rightarrow 4 \gamma$ (2 MeV)
- W mod. $22 \times 22 \times 2.5 \text{ cm}^3$
- W plate $1 \times 1 \times 0.025 \text{ cm}^3$
- Beam - $5 \times 10^8 \text{ e}^+ / \text{s}$
- size - diam. 3 cm, B field - 0.006 T
- J.Moxon et al. IEEE Nucl. Sci. 2343, 2007



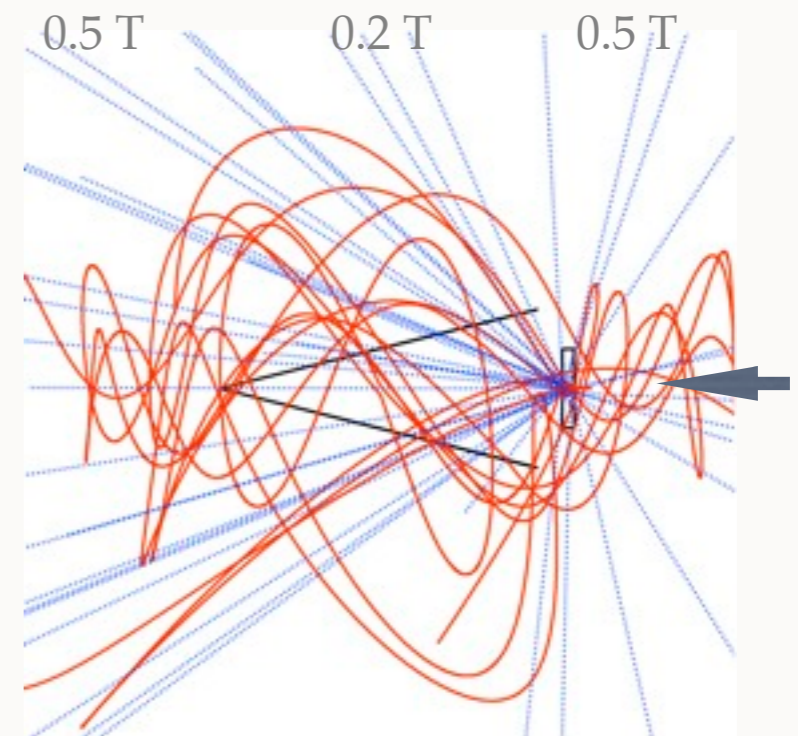
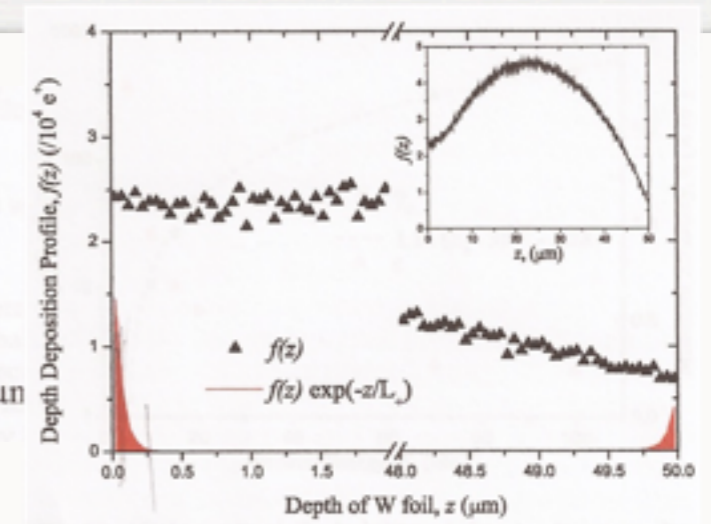
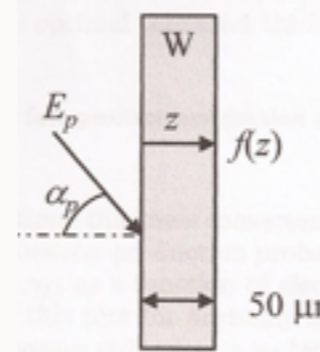
ИСТОЧНИК ПОЗИТРОНОВ С МАГНИТНОЙ ЛОВУШКОЙ

- GEANT3 simulation
- W target - 1.5 mm, d=0.5 cm
- W mod. - 4 μm or 10x4 μm
- up to 10 keV, range (W) - 0.5 μm
- Electron energy - 10 MeV
- Converter e^+ yield - $1.8 \times 10^{-3} e^+ / e$
- e^+ probability to stop in W - 1.5×10^{-4}



ВЫХОД МЕДЛЕННЫХ ПОЗИТРОНОВ ИЗ ТОНКИХ W ПЛЕНОК

- e^+ leave W surface $T_{e^+} = 2.8 \text{ eV}$
- $\varepsilon_W = 0.05 / 4 = 1.25 \times 10^{-2}$
- Setup with B field (0.5 - 0.2 - 0.5) T
- Cone moderator with $4 \mu\text{m}$ W foil
- e^+ probability to stop in W - 10^{-4}
- Slow e^+ yield - $e^+ / e = 1.2 \cdot 10^{-6}$



ИСТОЧНИК ПОЗИТРОНОВ С МАГНИТНОЙ ЛОВУШКОЙ

- Electron beam 10 MeV, 10 μA (6×10^{13} e^-)

- Cone mod. with 4 μm W foil

- Slow positron beam $\text{eff.}\varepsilon \sim 0.8$

- Slow e^+ yield - 10^{-6} e^+ / e

- AIST e^+ yield - 10^{-7} e^+ / e

A NEW SOURCE
 5×10^7 e^+ / s

- Intensity of $e^+ = 5 \cdot 10^7$ e^+ / sec ($0.8 \times 10^{-6} \times 6 \cdot 10^{13}$)

