

# ИСТОЧНИК ПОЗИТРОНОВ ДЛЯ АННИГИЛЯЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Р.М. Джилкибаев, ИЯИ РАН

# ПРИМЕНЕНИЕ ПАС ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

- В последние времена 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 тунNELьная 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

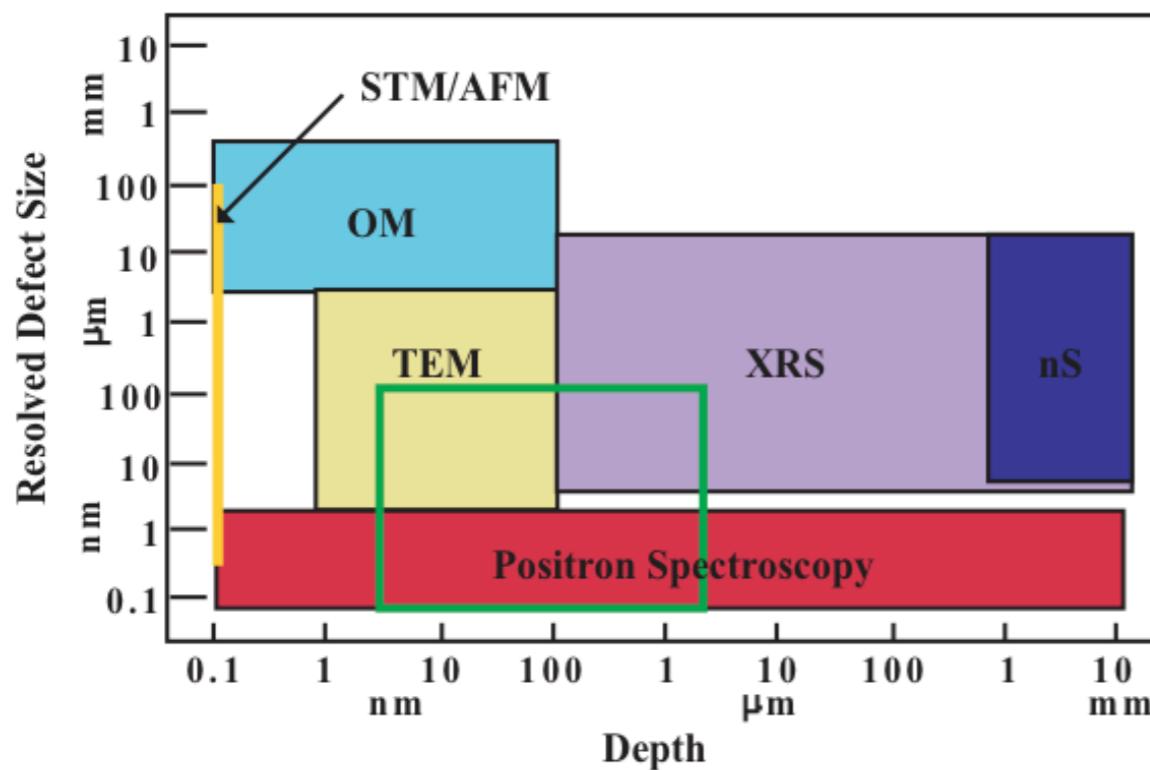
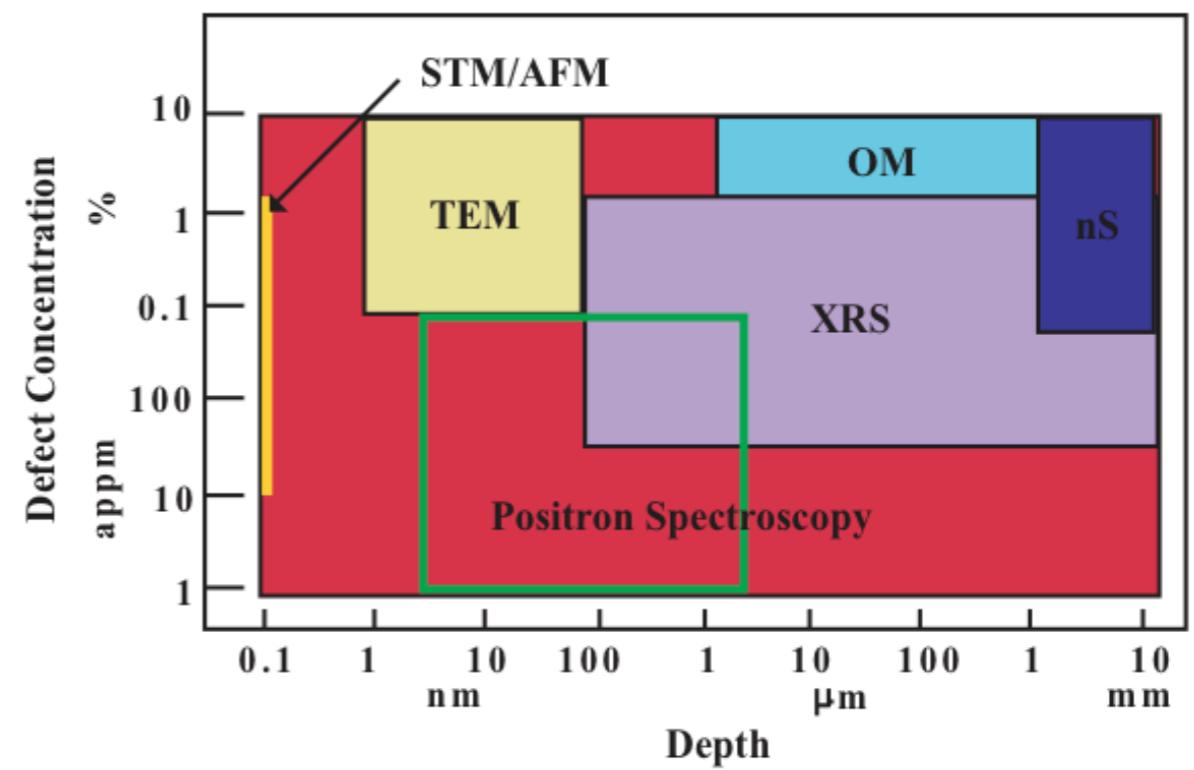


Figure 5. Defect Concentration Methods



- ОМ - оптический микроскоп, ТЕМ - просвечивающий электронный микроскоп, нS - нейтронная рассеяние, XRS - рентгеноструктурный анализ с использованием синхротронного излучения, STM - сканирующий туннельный микроскоп, AFM - атомный микроскоп. (Figures provided by Lawrence Livermore National Laboratory)
- Web site [www.positronsystems.com](http://www.positronsystems.com)



# ПОЗИТРОНИЙ ( $P_s$ )

- E<sub>n</sub> = -13.6/2n<sup>2</sup>, r = 2 r<sub>b</sub> = 0.1 nm

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

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

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

- ## ■ $^1S_0$ para-positronium (p-P<sub>s</sub>)

A diagram of an annulus, which is a region between two concentric circles. The outer boundary is a blue circle. Two points on this circle are marked with black dots and labeled "e−" at the top and "e+" at the bottom.

## Positronium

## Hydrogen

# В.И. Гольданский

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

# ”Физическая химия

## ■ $^3S_1$ ortho-positronium (o-P<sub>s</sub>)

## позитрона и позитрония”

# POSITRON ANNIHILATION SPECTROSCOPY

- $\sigma_{2\gamma} = \pi r_0^2 c/v$ ,  $r_0=2.8$  fm
- $\lambda = \sigma_{2\gamma} v n_e$  [1/s]
- $\sin\theta \approx p_t / m_e c$
- $\Delta E_\gamma = p_p c / 2$

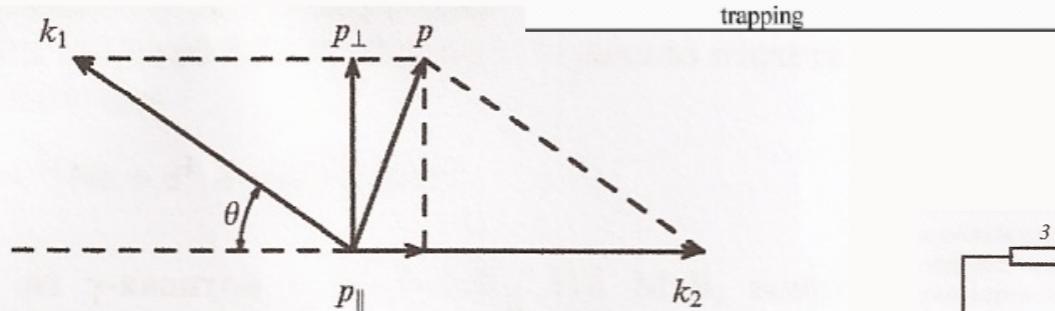


Рис. 1. Схема разлета  $\gamma$ -квантов при двухквантовой аннигиляции электрон-позитронной пары.

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

Figure 3. Positron Annihilation Measurement Techniques

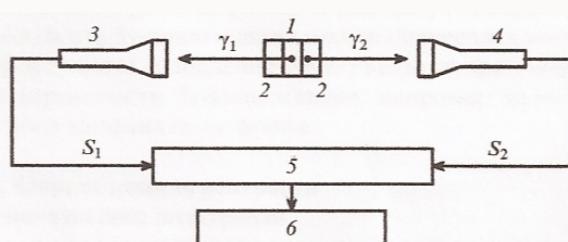
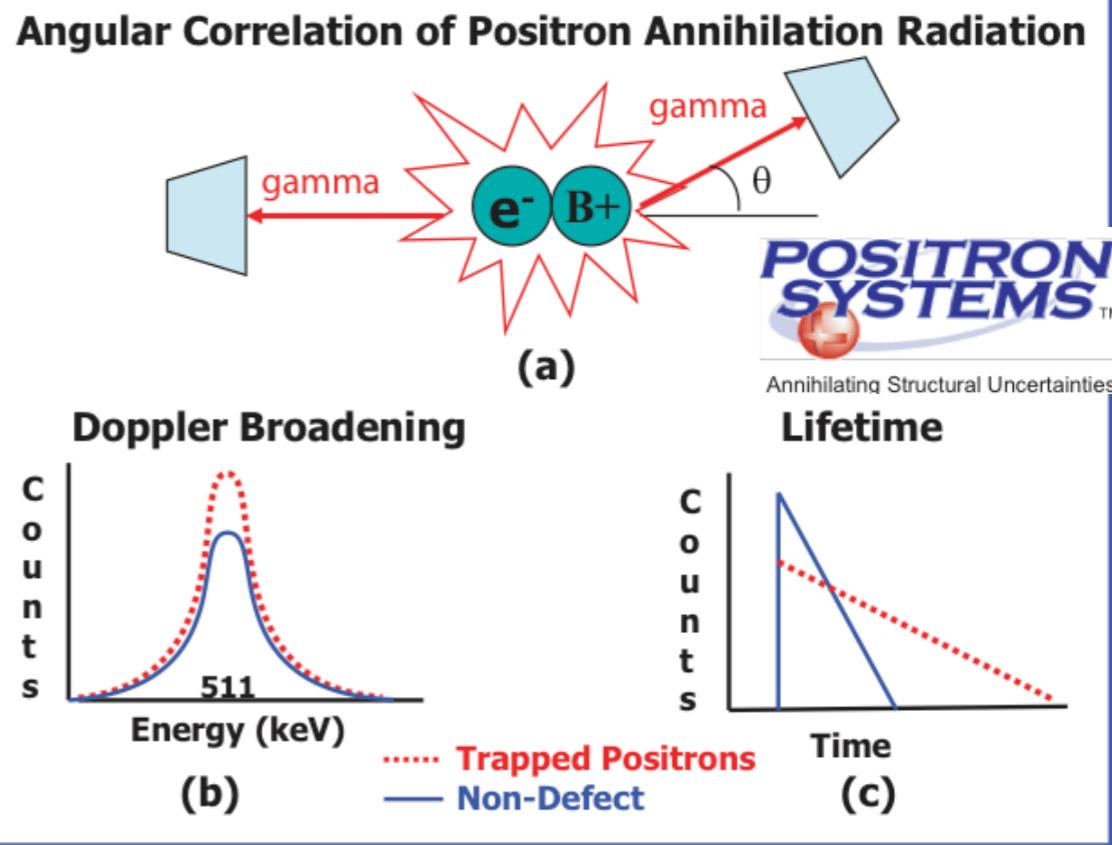


Рис. 2. Схема установки для измерения времени жизни позитронов.

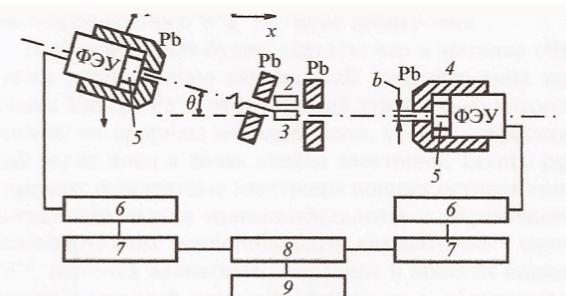


Рис. 5. Схема установки для наблюдения угловой корреляции аннигиляционных  $\gamma$ -квантов: 1 — подвижный детектор, 2 — источник позитронов, 3 — образец, 4 — неподвижный детектор, 5 — сцинтиллятор, 6 — усилитель, 7 — дискриминатор, 8 — схема совпадений, 9 — счетчик.

# ИЗМЕРЕНИЕ СТРУКТУРЫ ТОНКИХ ПЛЕНОК

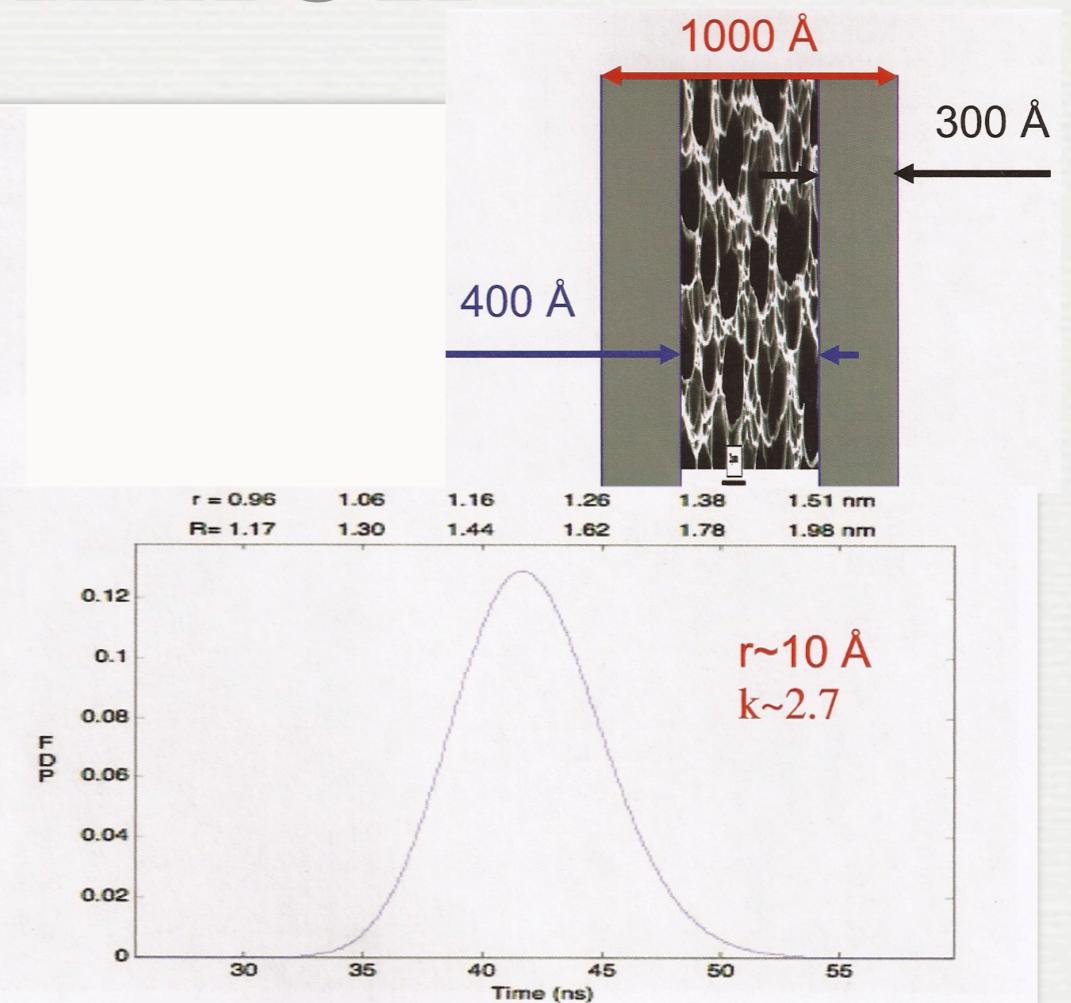
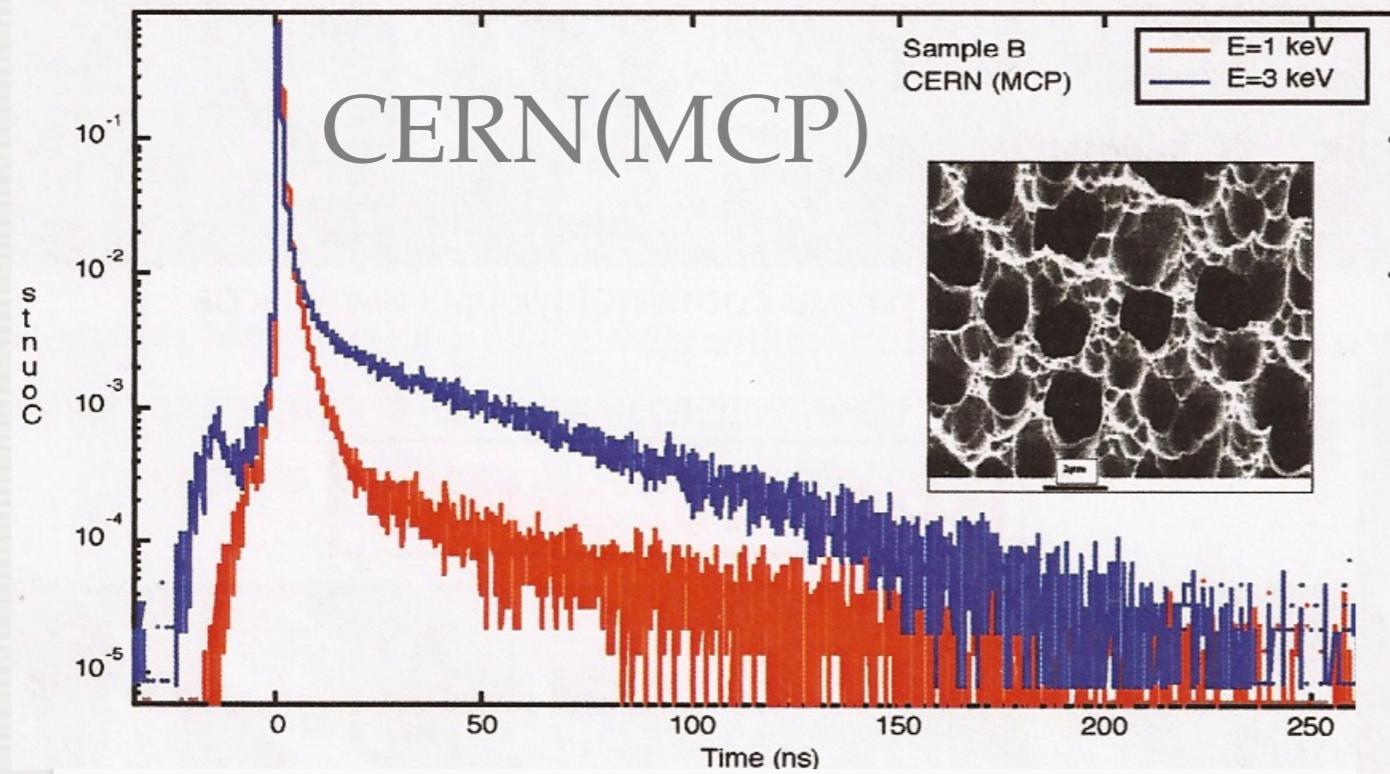
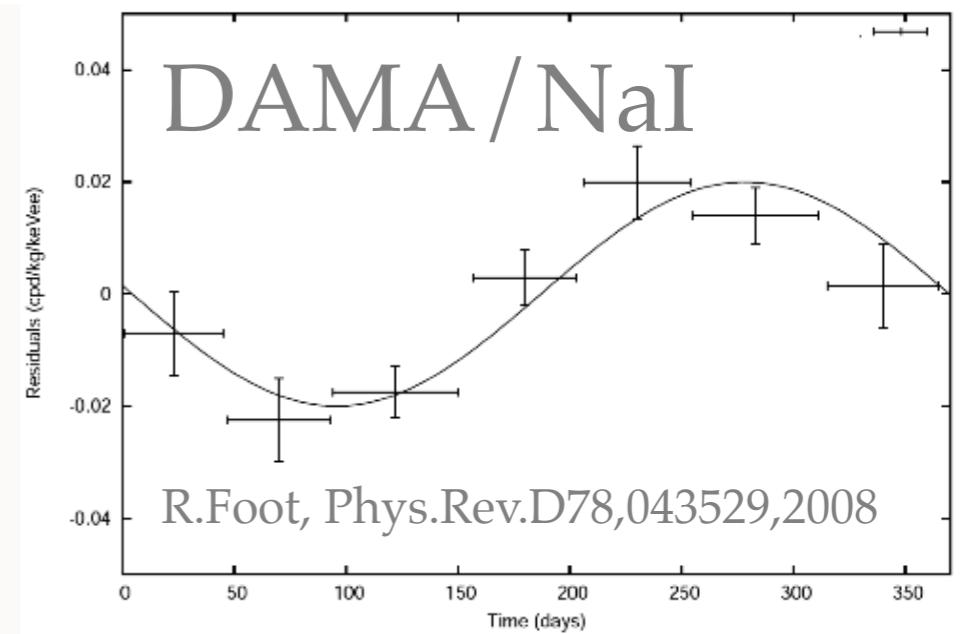
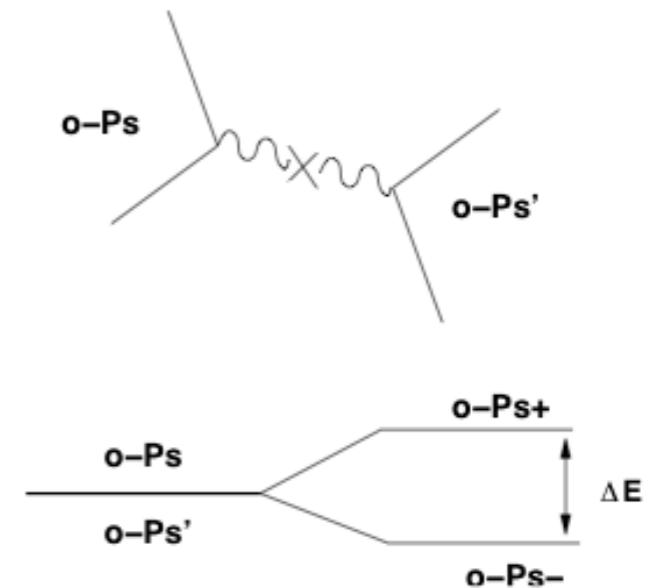


Рис. 20. Верхний рисунок: образец трёхслойной пленки толщиной 100 нм, наружные слои из непористого кремния толщиной 30 нм, внутренний слой из пористого кремния толщиной 40 нм. Средний рисунок: красным показан спектр для энергии пучка 1 кэВ, соответствующий глубине проникновения только в наружный слой. Синий график — для 3 кэВ, глубина проникновения во внутренний слой. Нижний рисунок: определение средний размер 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 исследованияnanoструктурных материалов и неразрушающего контроля, диагностики и анализа присутствующих в них примесях", Москва, 2011

# FUNDAMENTAL PHYSICS MIRROR DARK MATTER

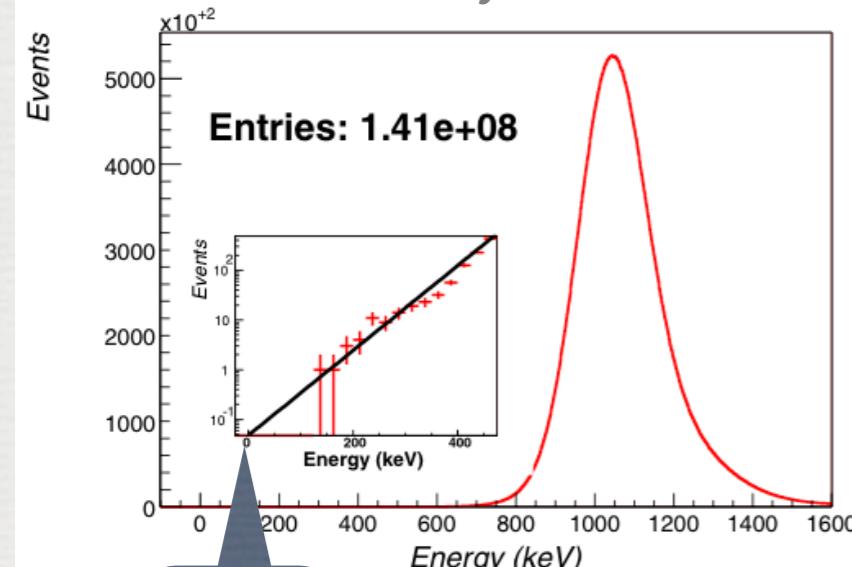
- o-Ps go to invisible mode
  - Lagrangian  $\sim \varepsilon F^{\mu\nu}F'_{\mu\nu}$ ;  $\Delta E = 2\hbar\varepsilon f$
  - experimental upper limit for  $\varepsilon < 2 \cdot 10^{-7}$
  - Oscillation in vacuum  $N = \cos^2 \Omega t \cdot e^{-\Gamma_{SM}t} \simeq \exp[-t(\Gamma_{SM} + \Omega^2 t)]$
  - $\Gamma_{SM} \rightarrow$  o-Ps decay rate,  $\Omega = 2\pi\varepsilon f$
- $$Br(o-Ps \rightarrow invisible) = \frac{2(2\pi\varepsilon f)^2}{\Gamma_{SM}^2 + 4(2\pi\varepsilon f)^2}$$
- $Br(o-Ps \rightarrow invisible) = 2 \cdot 10^{-7}$ ,  $\varepsilon = 4 \cdot 10^{-9}$



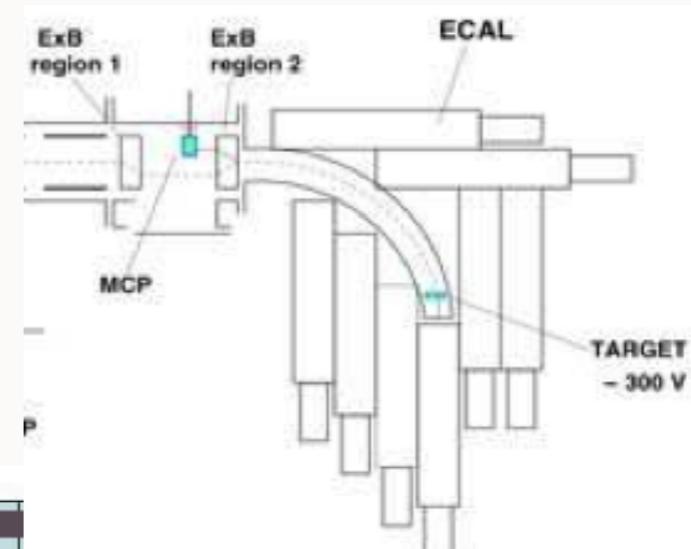
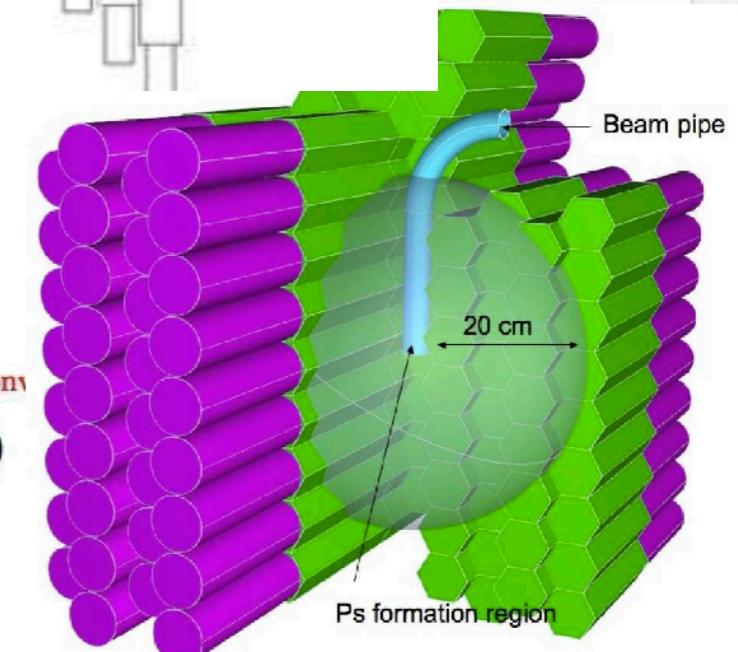
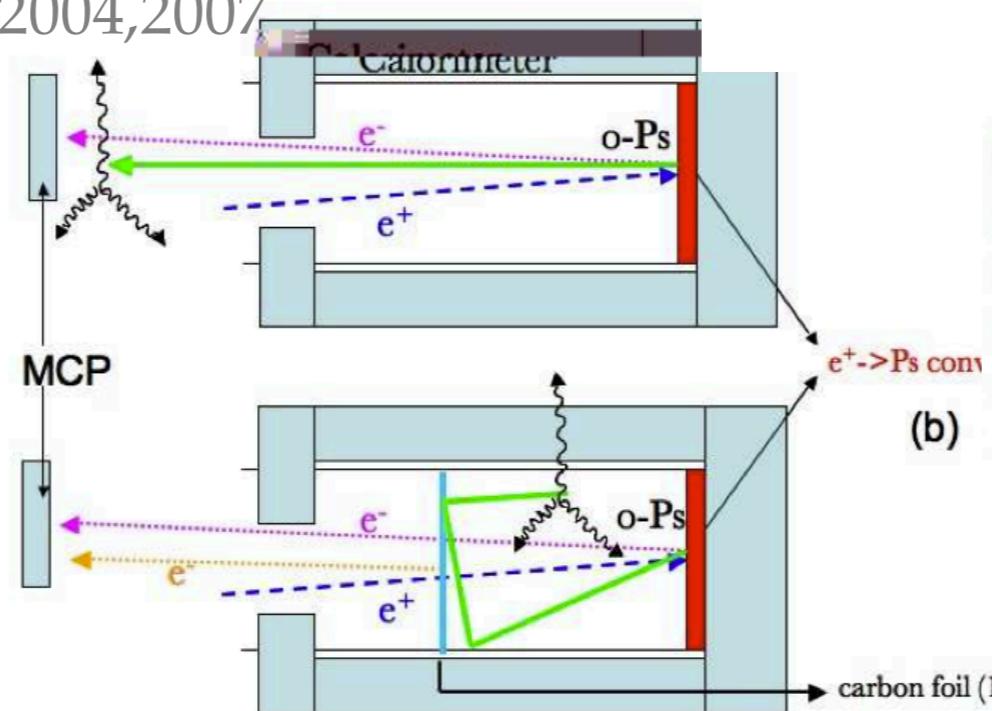
# AN EXPERIMENT TO SEARCH FOR MIRROR DARK MATTER

- 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 -  $10^{-7}$
- $10^4 \text{ e}^+/\text{s}$ ,  $T_{\text{exp}} - 10^6 \text{ s}$
- SM Br [ $e^+e^- \rightarrow \nu\nu$ ] =  $6.6 \cdot 10^{-18}$

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

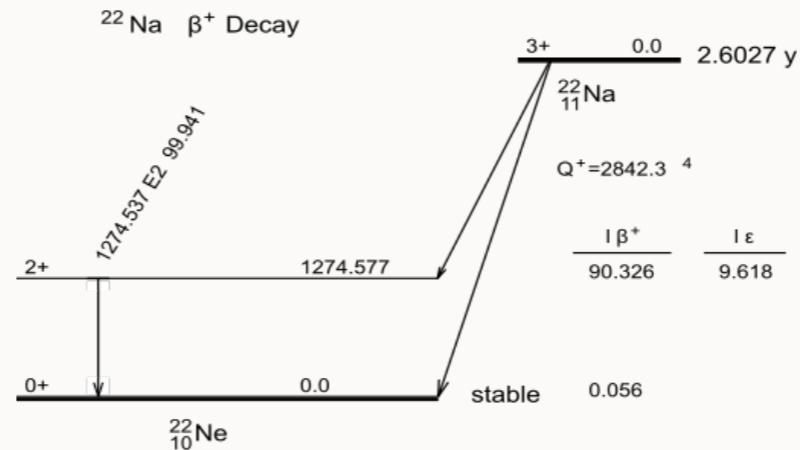


Signal



# ИСТОЧНИКИ ПОЗИТРОНОВ

- Радиоактив. источники  $^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne} + \text{e}^+ + \gamma(1.27), 2.6\text{y}$
- $^{52}\text{Co}$  (72d),  $^{64}\text{Cu}$  (13h)
- $^{18}\text{F}$  (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



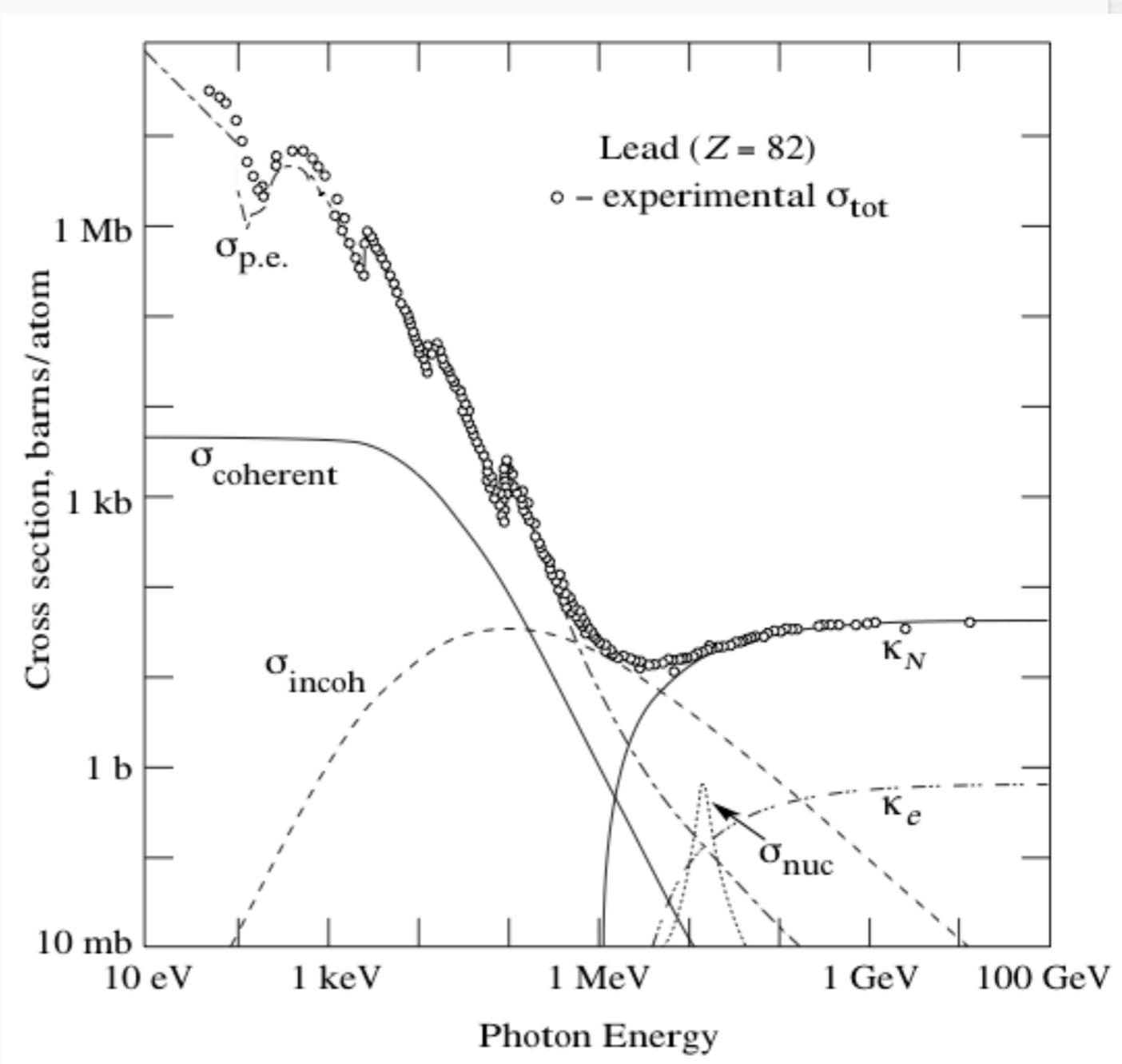
# НЕКОТОРЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОЗИТРОНОВ В МИРЕ

- USA, Argonne Nat. Lab, LINAC 15 MeV, 200  $\mu$ A, slow positron beam -  $10^{10}$  e<sup>+</sup>/sec
- Japan, Tsukuba AIST LINAC 8-70 MeV, 100-10  $\mu$ A, slow positron beam -  $10^8$  e<sup>+</sup>/sec
- USA, North Carolina Univ., PULSTAR Reactor, 1 MW, slow positron beam -  $5 \times 10^8$  e<sup>+</sup>/sec
- Germany, MAMI microtron, 170 MeV, 75  $\mu$ A, slow positron beam -  $10^8$  e<sup>+</sup>/sec ; Giessen LINAC, 35 MeV, 100  $\mu$ A, slow positron beam -  $10^8$  e<sup>+</sup>/sec

# ELECTRON ENERGY FOR POSITRON SOURCE

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

6 Mev  $e^-$ , Saclay, France

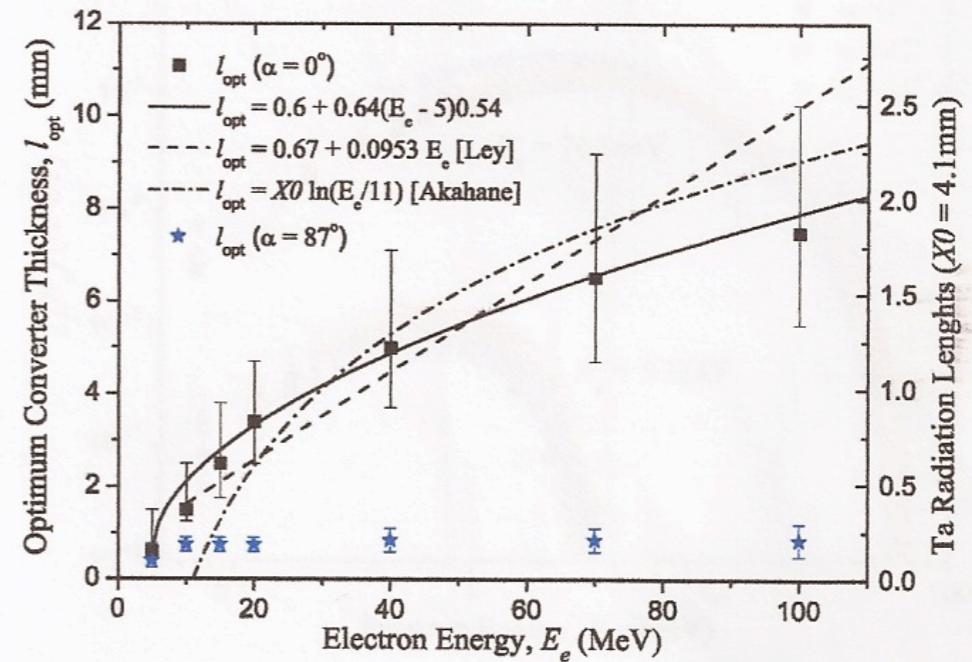
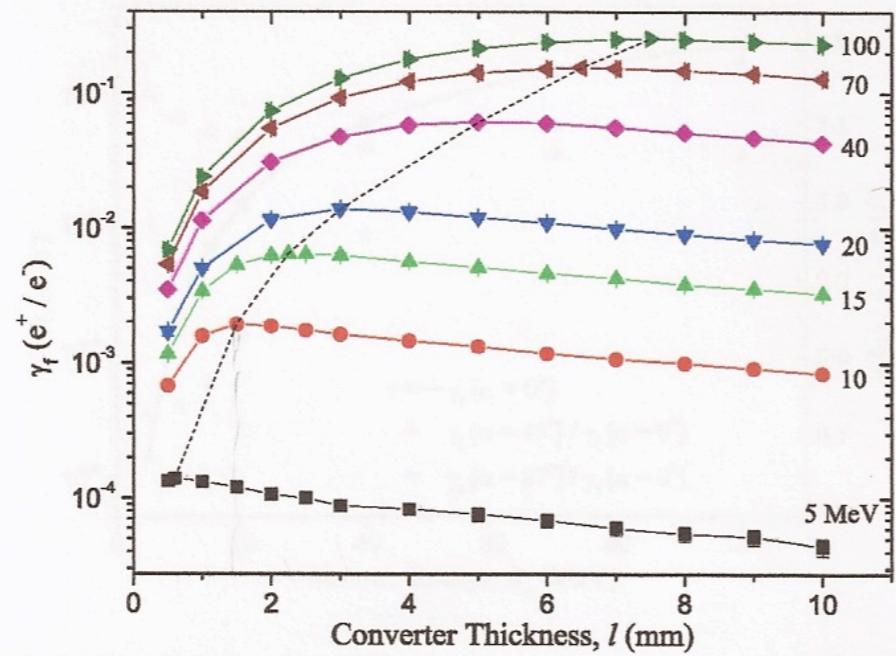
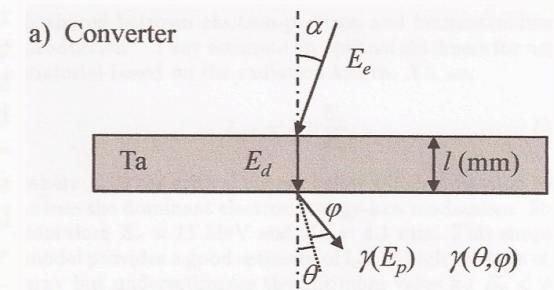
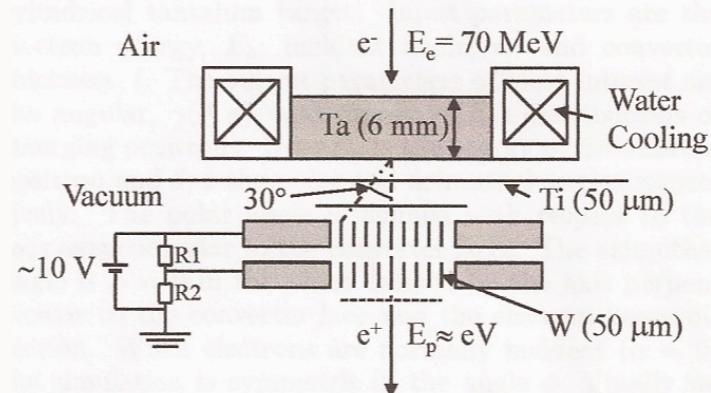


# AIST LINAC SLOW POSITRON SOURCE

- AIST LINAC 70 MeV

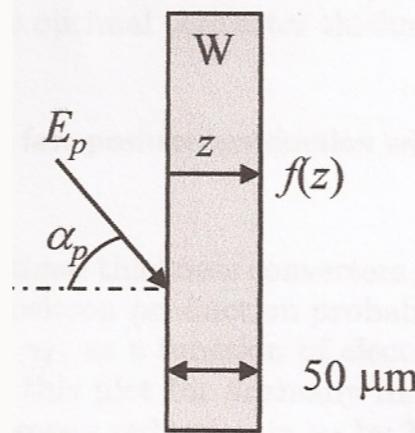
- $10\mu\text{A}$ , 100 Hz, pulse  $1\ \mu\text{s}$

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



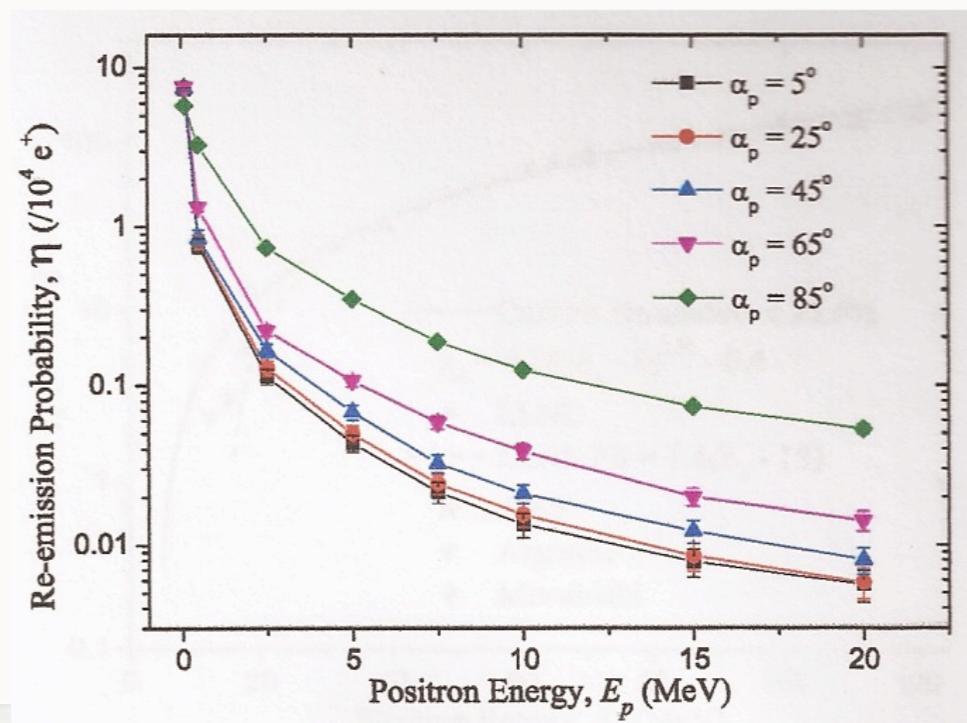
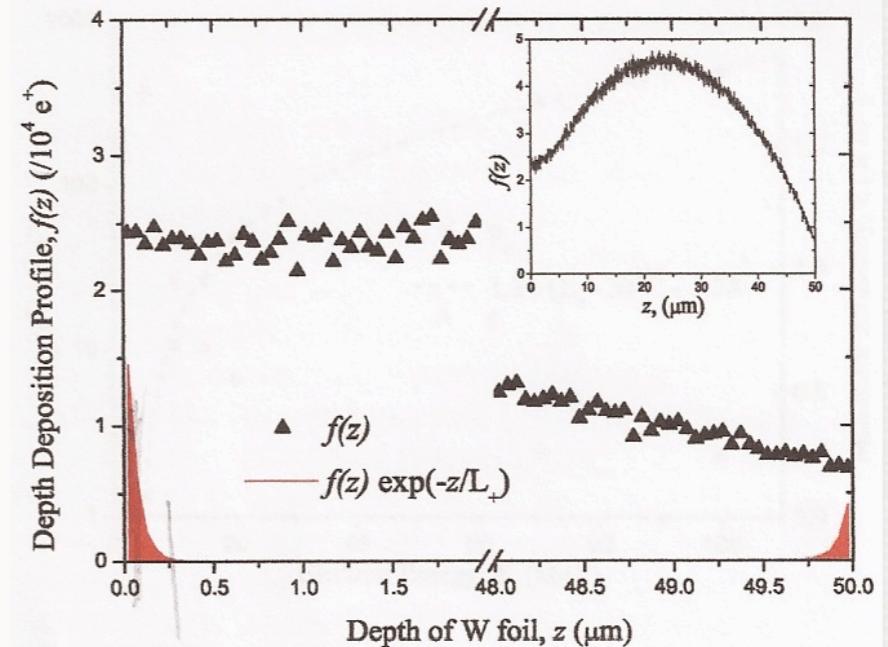
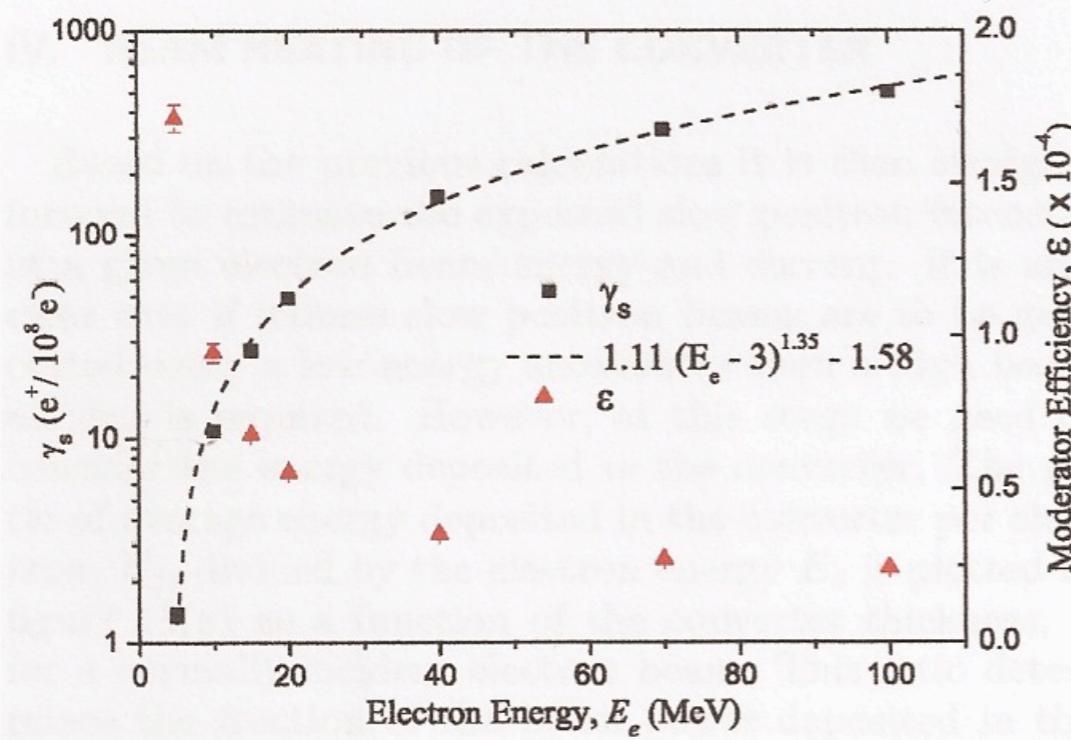
# AIIST LINAC SLOW POSITRON SOURCE

- Moderator efficiency



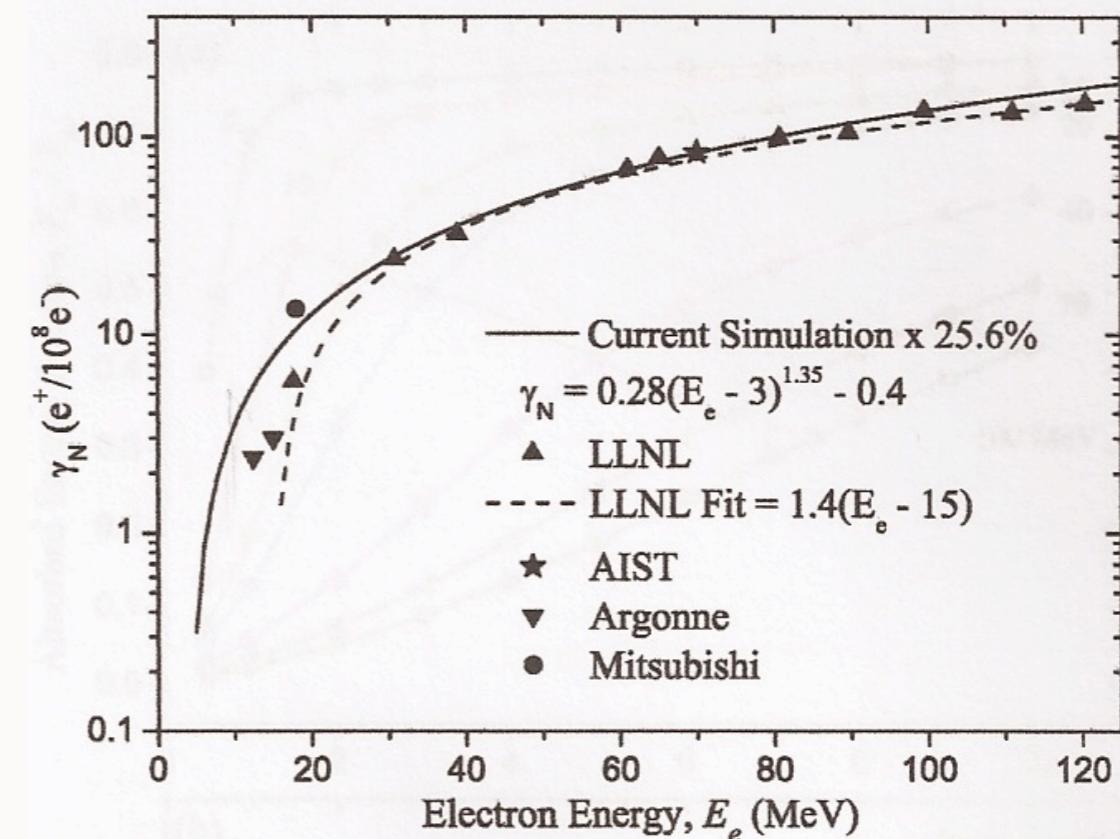
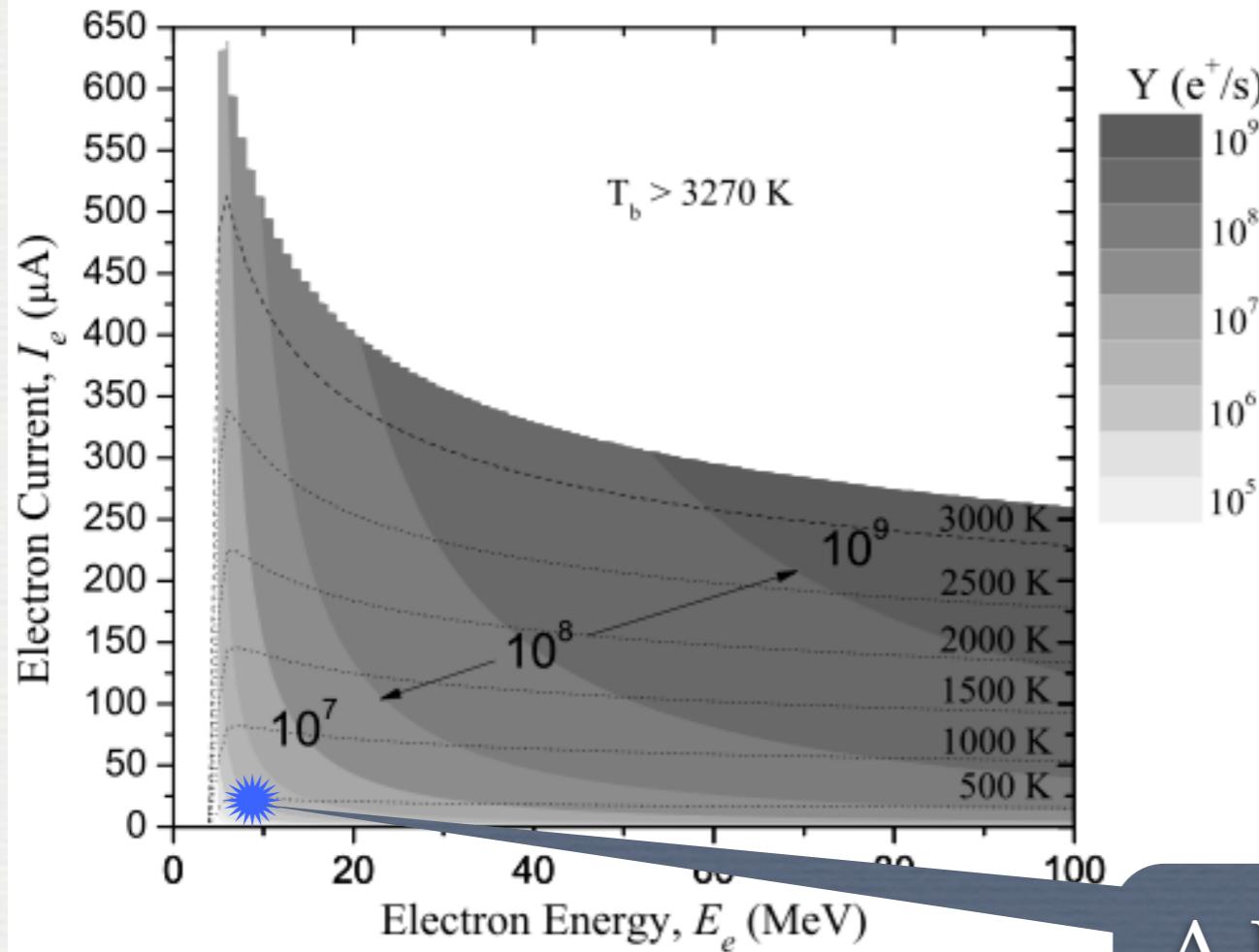
- Meas.  $L = 55\text{-}100 \text{ nm}$

- $W$ (поликристал -кристал)



# AIIST LINAC SLOW POSITRON SOURCE

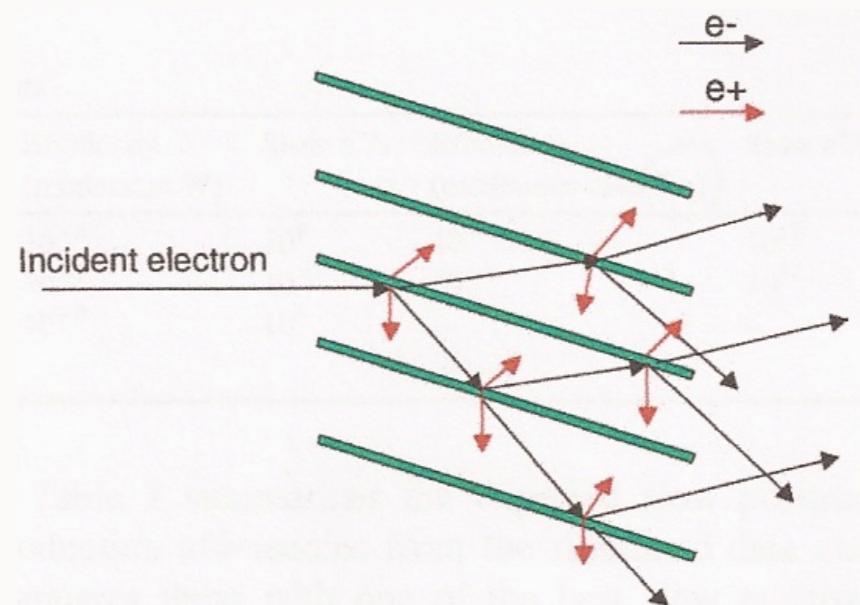
## ■ Expected $e^+$ source intensity



A NEW SOURCE  
 $10^8 e^+ / s$

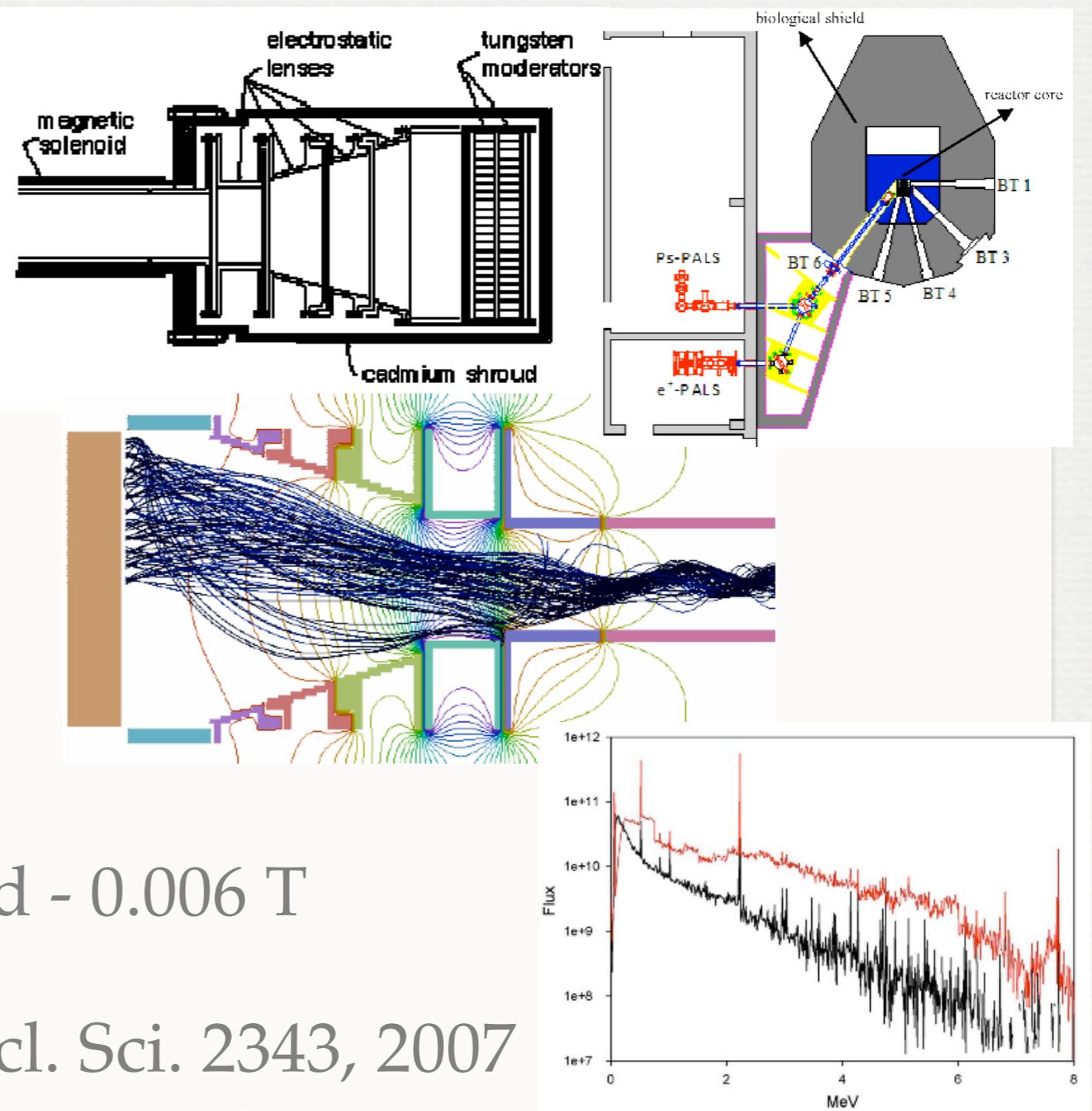
# ARGONNE SLOW POSITRON SOURCE

- ANL LINAC 15 MeV, pulse 30ps, apart repeatedly 768 ps, 200  $\mu$ 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
- $n + Cd \rightarrow 4 \gamma$  (2 Mev)
- W mod. 22x22x2.5 cm<sup>3</sup>
- W plate 1x1x0.025 cm<sup>3</sup>
- Beam -  $5 \times 10^8 e^+ / s$
- size - diam. 3 cm, B filed - 0.006 T
- J.Moxon et al. IEEE Nucl. Sci. 2343, 2007



# MAMI SLOW POSITRON SOURCE

- Linac 380 MeV, 75  $\mu$ A

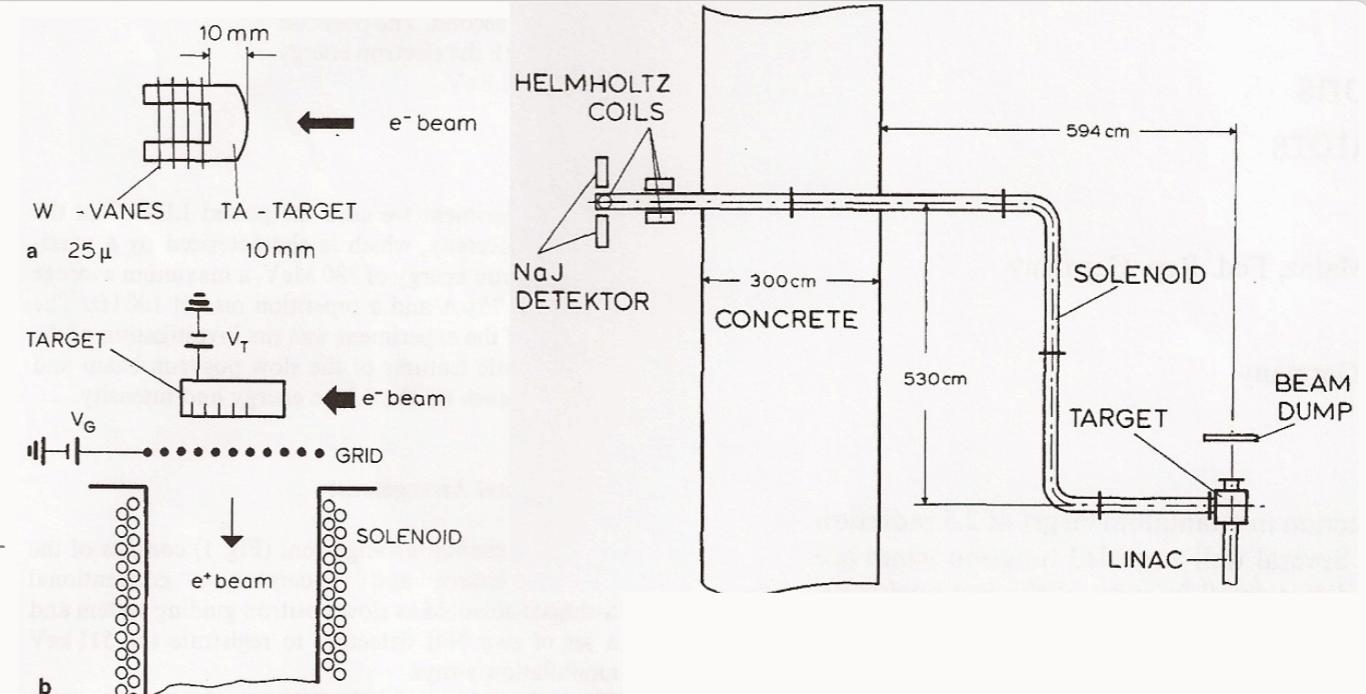


Fig. 2. (a) Tantalum target and tungsten vanes. (b) Arrangement of target and positron converter

- Test - 160MeV, 1  $\mu$ A, 100 Hz
- Beam  $4 \times 10^7$  e<sup>+</sup> / s
- G.Graff et al. Appl. Phys. A33,59, 2007

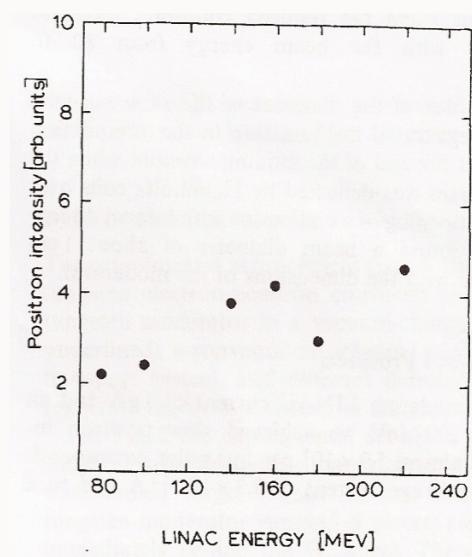
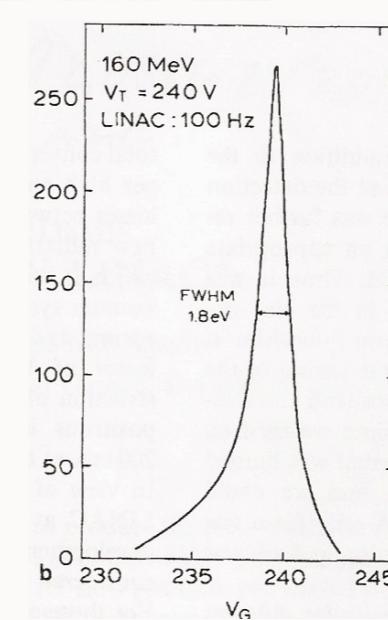


Fig. 5. Number of slow positrons at the detector vs. LINAC energy at a constant average electron beam current of 1  $\mu$ A. 1 unit corresponds approximately to  $10^7$  positrons/s

# ELECTRON ENERGY & SAFETY ISSUE

- Electron energy  $\sim 10$  MeV
- Positron source  $\sim 10^8 e^+ / s$
- Neutron dose  $N(15\text{MeV})/N(9\text{MeV}) \sim 100$
- W.L. Huang et al. NIM B 229, 339, 2005

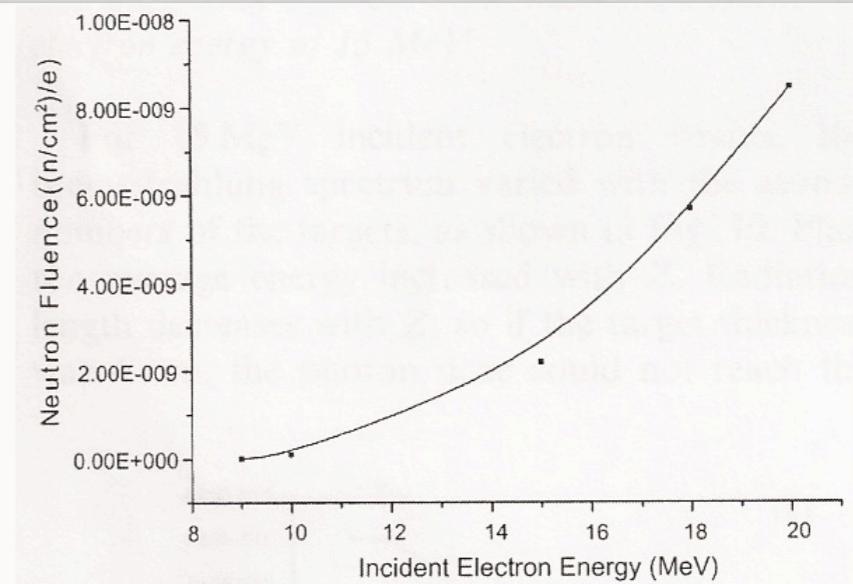
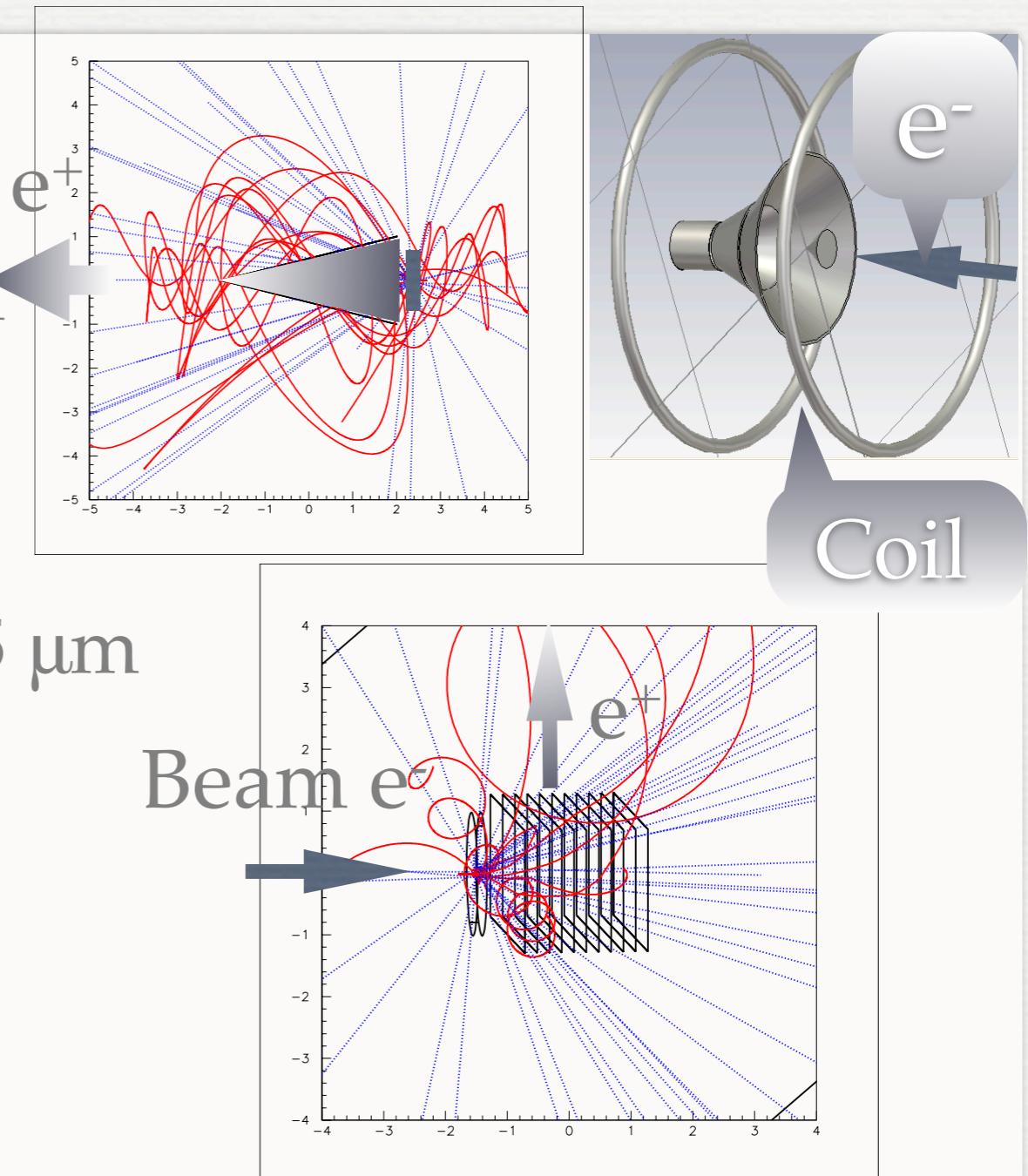


Fig. 5. Neutron fluence (per source electron) at the isocenter from 4 mm tungsten slabs bombarded by electron beams of different energy values.

Electron energy (MeV)	Photon dose (Gy X-ray/e)	Neutron dose (mSv/e)	Dose Equivalent Ratio (mSv/Gy X-ray)
9	$8.5 \times 10^{-16}$	$5.4 \times 10^{-18}$	0.006
10	$1.2 \times 10^{-15}$	$1.8 \times 10^{-17}$	0.016
15	$3.7 \times 10^{-15}$	$5.5 \times 10^{-16}$	0.147

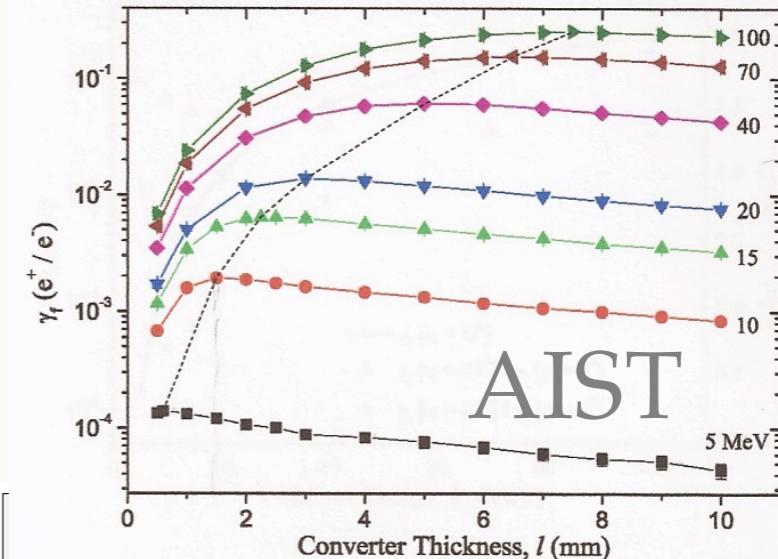
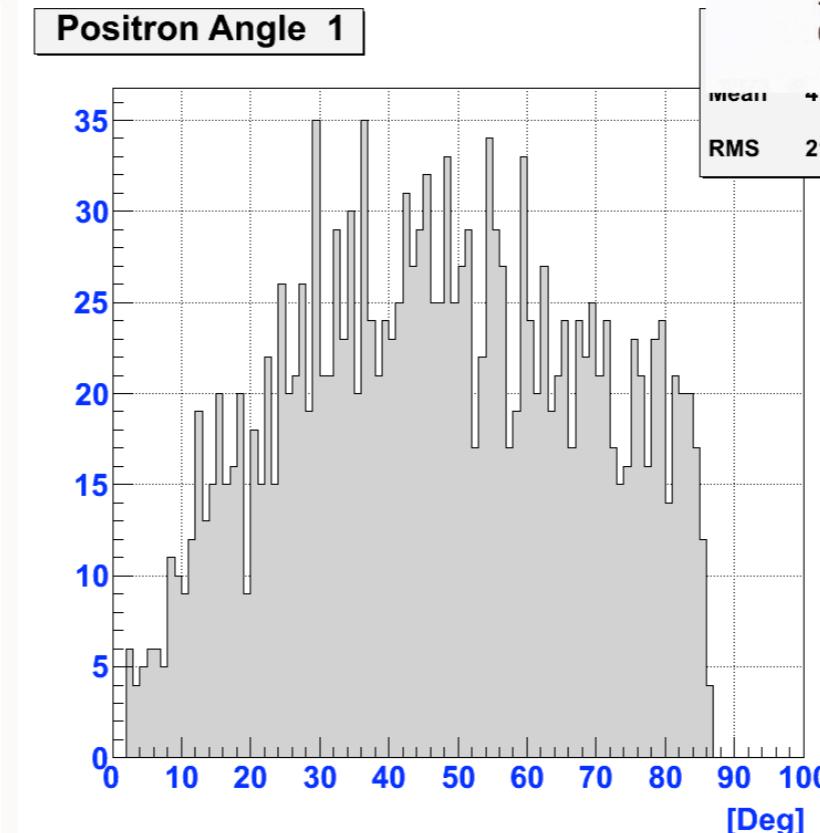
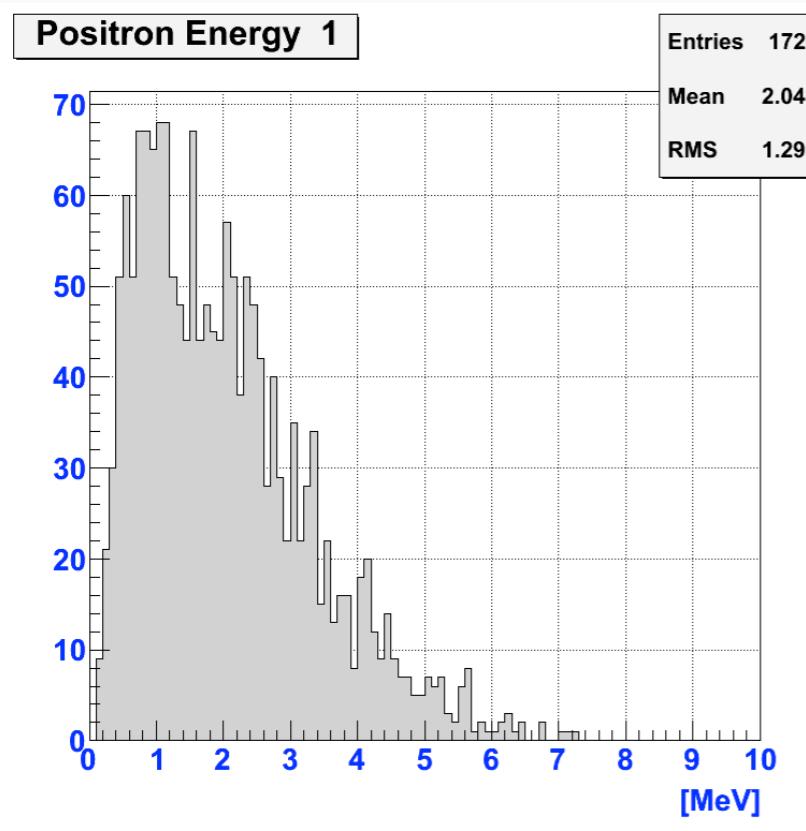
# ИСТОЧНИК ПОЗИТРОНОВ С МАГНИТНОЙ ЛОВУШКОЙ

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



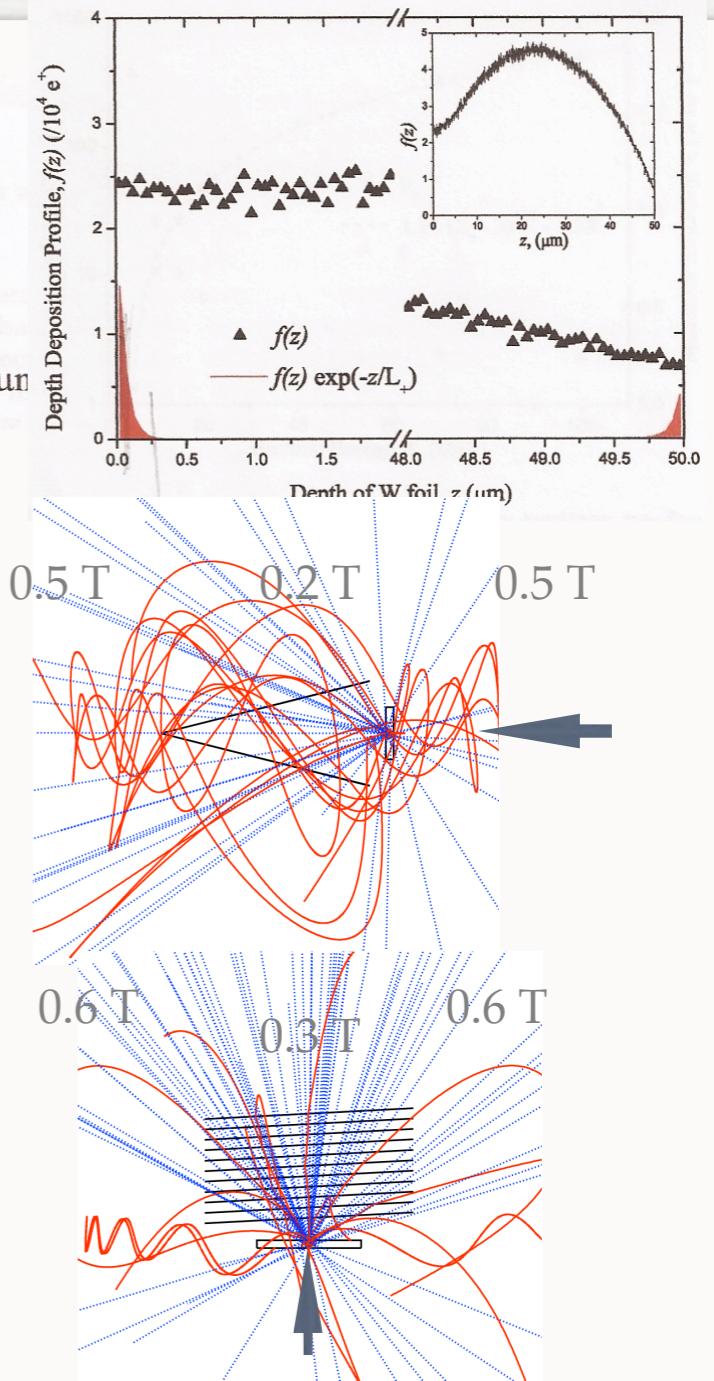
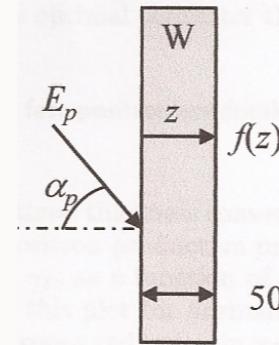
# РОЖДЕНИЕ ПОЗИТРОНОВ В МИШЕНИ (W) ЭЛЕКТРОНАМИ

- Yield of  $e^+$  -  $1.8 \times 10^{-3} e^+ / e^-$
- In a good agreement with AIST sim.



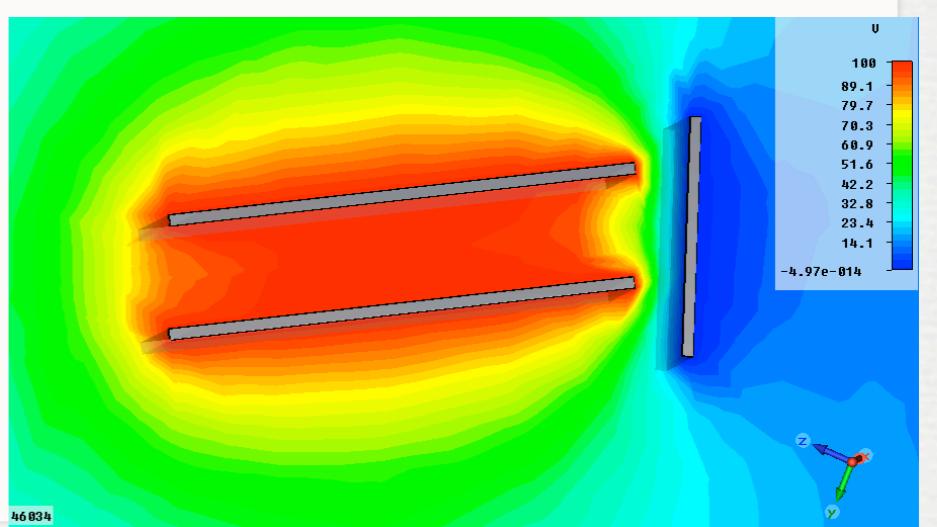
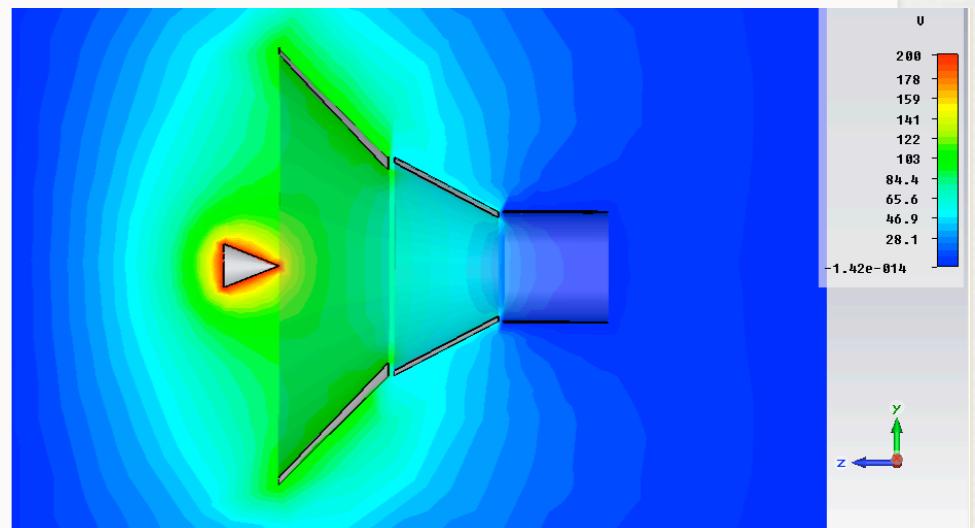
# ВЫХОД ЗАМЕДЛЕННЫХ ПОЗИТРОНОВ ИЗ ТОНКИХ W ПЛЕНОК

- $e^+$  leave W surface  $T_{e^+} = 2.8 \text{ eV}$
- $\epsilon_W = 0.05 / 4 = 1.25 \times 10^{-2}$
- Setup with B field 0.6 - 0.3 T (Eff. = $\times 6$ )
- Cone mod. with 4  $\mu\text{m}$  W foil
- $e^+$  stop. eff. -  $1.5 \times 10^{-4}$ ,  $e^+ / e = 2 \times 10^{-6}$
- Plane mod. with 10x4  $\mu\text{m}$  W foils
- $e^+$  stop. eff. -  $3 \times 10^{-4}$ ,  $e^+ / e = 4 \times 10^{-6}$



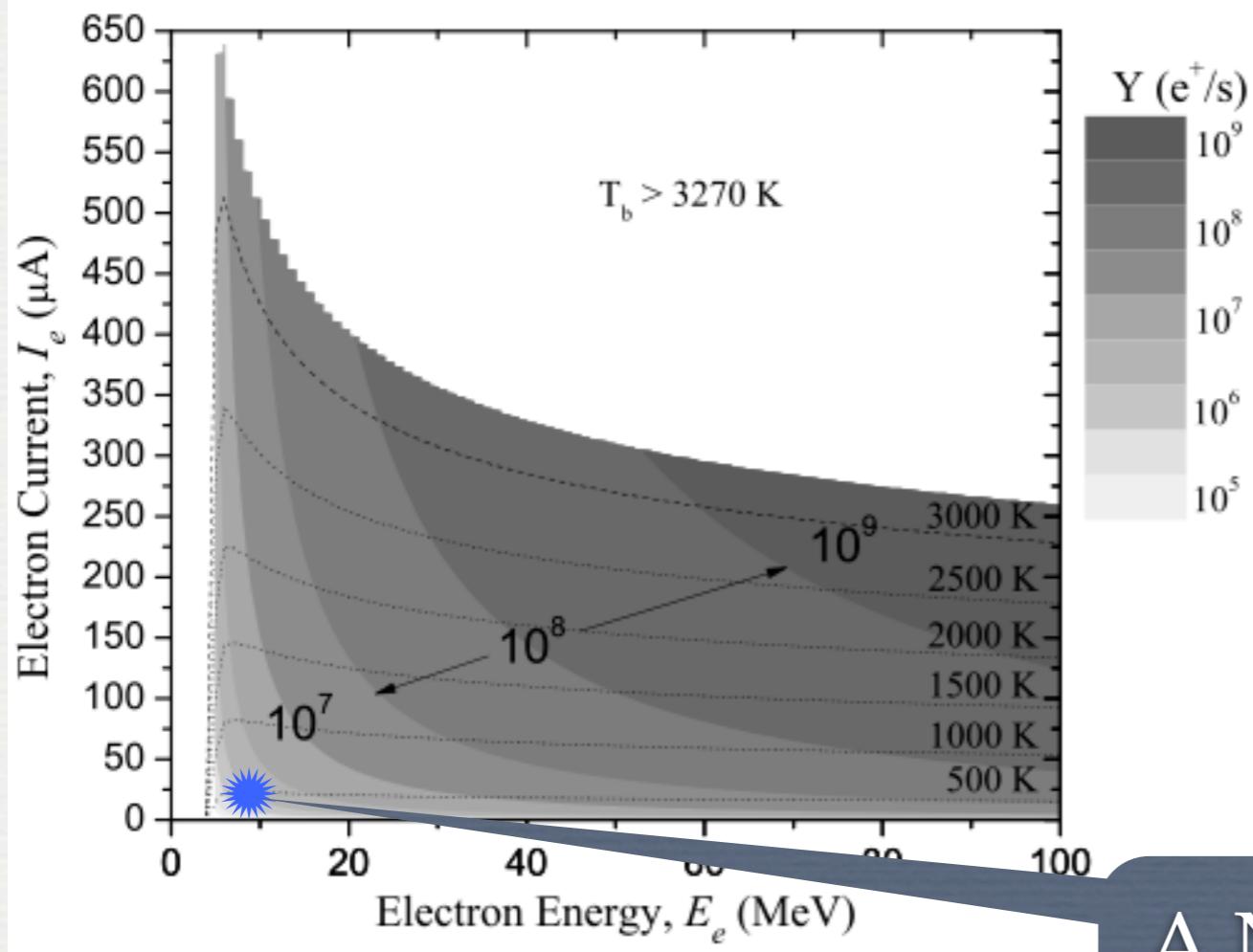
# ФОРМИРОВАНИЕ ПУЧКА МЕДЛЕННЫХ ПОЗИТРОНОВ

- Electron beam 10 MeV, 10  $\mu\text{A}$  ( $6 \times 10^{13} \text{ e}^-$ )
- Cone mod. with 4  $\mu\text{m}$  W foil
- Intensity of  $e^+ = 1.2 \times 10^8$  ( $2 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{13}$ )
- Plane mod. with 10x4  $\mu\text{m}$  W foils
- Intensity of  $e^+ = 2.4 \times 10^8$  ( $4 \times 10^{-6} \times 6 \times 10^{13}$ )
- Positron beam eff. $\epsilon = 0.7 - 0.8$



# AIIST LINAC SLOW POSITRON SOURCE

- Expected  $e^+$  source intensity



A NEW SOURCE  
 $10^8 e^+ / s$