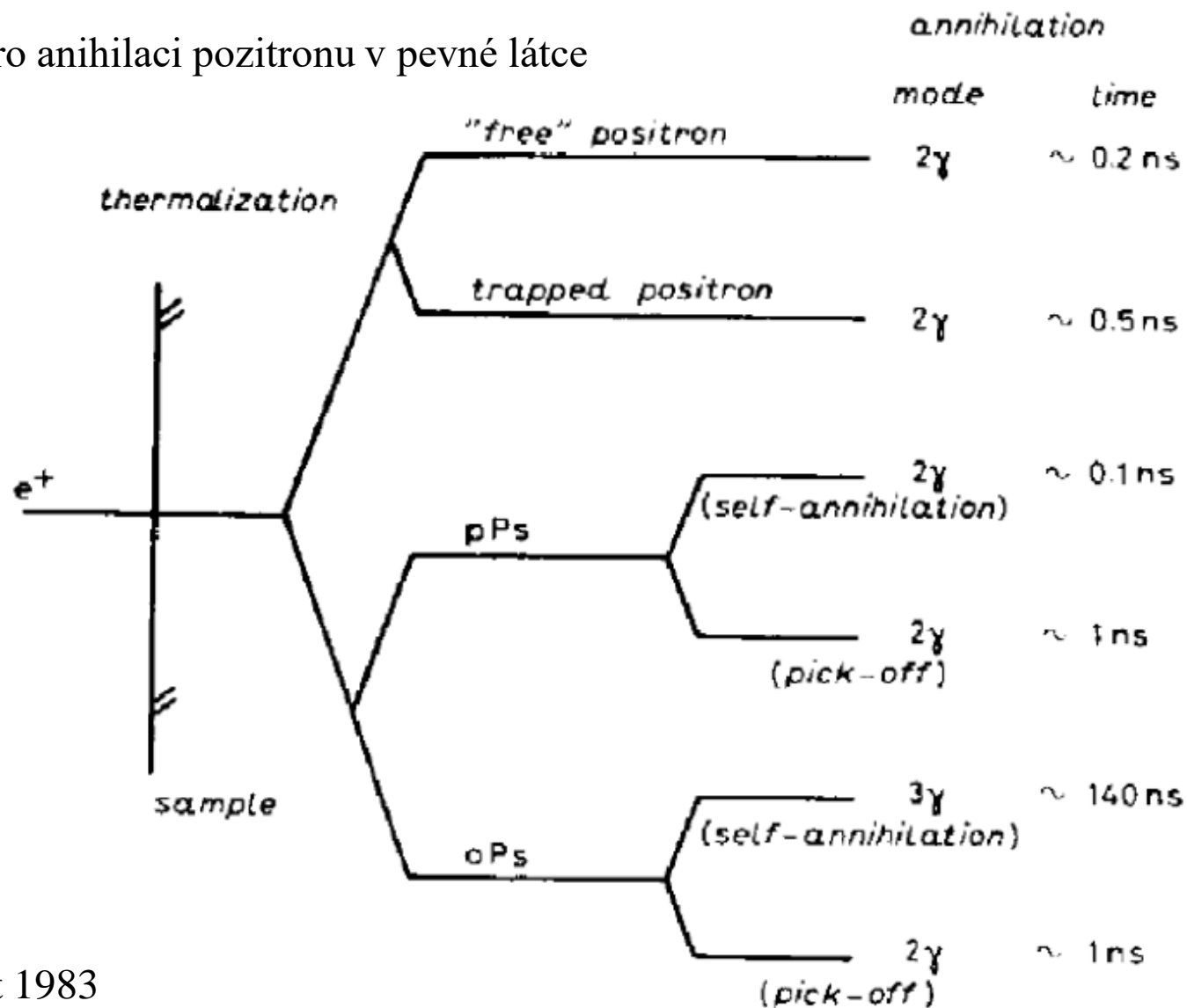


Pozitronium

- schéma kanálů pro anihilaci pozitronu v pevné látce



Pozitronium

- **para-pozitronium (p-Ps)**

singletní stav 1S_0 $\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$

antiparalelní spiny ($S = 0, M_S = 0$)

rozpad na sudý počet fotonů: 2

doba života ve vakuu 125 ps $\frac{2\hbar}{m_0 c^2 \alpha^5}$

- **ortho-pozitronium (o-Ps)**

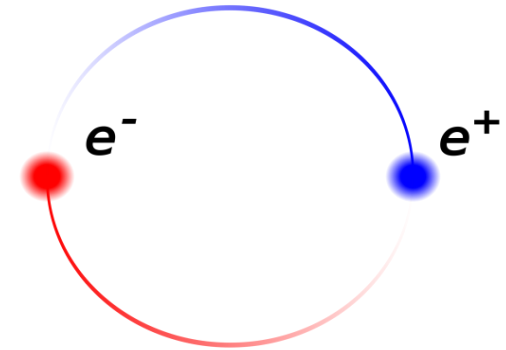
tripletní stav 3S_1 $|\downarrow\downarrow\rangle \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle) \quad |\uparrow\uparrow\rangle$

paralelní spiny ($S = 1, M_S = -1, 0, 1$)

rozpad na lichý počet fotonů: 3

• maximální doba života pozitronu v materiálu $\tau_{\max} = 500$ ps

doba života ve vakuu 142 ns $\frac{\frac{9}{2} \hbar}{2m_0 c^2 \alpha^6 (\pi^2 - 9)}$



Ps vazebná energie

$$E_B \approx -m\alpha^2 / 4 = -6.8 \text{ eV}$$

$$\tau_{\max}^{-1} = \frac{1}{4} \frac{1}{\tau_{p-Ps}} + \frac{3}{4} \frac{1}{\tau_{o-Ps}}$$

Pozitronium

- **Pozitronium (Ps)** – energetické hladiny
- analogicky jako u atomu vodíku, ale redukovaná hmotnost je zhruba poloviční

- redukovaná hmotnost Ps:
$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_{e^-}} + \frac{1}{m_{e^+}} = \frac{2}{m_0}$$

- energetické hladiny Ps:
$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{\mu e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} = -\frac{1}{n^2} \frac{m_0}{4\hbar^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2$$

$$e^2 = 4\pi\hbar\alpha\epsilon_0 c$$

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_0}{4} \alpha^2 c^2 = -\frac{1}{n^2} \frac{511 \times 10^3}{4 \times 137^2} \text{ eV} = -\frac{1}{n^2} 6.8 \text{ eV}$$

- základní stav Ps: $E_1 = -6.8 \text{ eV}$
- 1. excitovaný stav Ps: $E_2 = -1.7 \text{ eV}$
- 'velikost' Ps: $\approx 1 \text{ \AA}$

objev pozitronia

- teoretická předpověď:

Stjepan Mohorovičić 1934

S. Mohorovicic, Astron. Nachr. 253, 93 (1934)



Stjepan Mohorovičić 1890-1980

Möglichkeit neuer Elemente und ihre Bedeutung für die Astrophysik.¹⁾

Von St. Mohorovičić.

Die Experimentalphysik hat neuerdings einen großen Fortschritt erzielt, indem sie die elektrischen Atome mit positiver Ladung entdeckt hat. Diese neuen Elementarteilchen haben in der Literatur den Namen »Positron« erhalten. Es ist nicht uninteressant zu erwähnen, daß bereits der unlängst dahingeschiedene amerikanische Physiker und Philosoph *Arvid Reuterdahl* in seiner Atomtheorie²⁾ die freien elektrischen Atome mit positiver Ladung vorausgesetzt, in seine Rechnungen eingeführt und ihnen den Namen »Positron« erteilt hatte. Die experimentellen Untersuchungen haben also seine prophetischen Vermutungen glänzend bewiesen, besonders, da *Reuterdahl* voraussetzte, daß das Proton eigentlich ein zusammengesetztes Gebilde sei, nämlich Radion + Positon. Das Radion wäre der Träger der schweren Masse, und um ihn herum kreist in unmittelbarer Nähe ein Positon. Es war aber in seiner Theorie nur unverständlich, warum um Radion herum nicht auch ein Elektron kreisen konnte, d. h. warum wären die negativen Protonen nicht möglich. Es ist sehr merkwürdig, daß eine solche Möglichkeit neuerdings von *P. A. M. Dirac* zugelassen wird³⁾, und er schließt seinen Nobelvortrag mit den Worten: »Es ist dann durchaus möglich, daß auf einigen der Sterne gerade der entgegengesetzte Zustand herrscht, daß diese Sterne also im wesentlichen aus Positronen und negativen Protonen aufgebaut sind. In der Tat könnte gerade die Hälfte aller Sterne zur einen und die Hälfte zur anderen Art gehören. Beide Arten von Sternen würden genau dieselben Spektren zeigen, und es gäbe keine Möglichkeit, sie mit den gegenwärtigen astronomischen Verfahren zu unterscheiden.«

1. Es erhebt sich aber jetzt von selbst die Frage, was geschehen wird, wenn sich ein Positron und ein Elektron in großer Nähe begegnen. Es ist nämlich klar, daß sich — wegen der elektrischen Anziehung — die beiden Elementarteilchen um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegen werden und so ein System bilden, das nach außen als ein neutrales System wirken würde. Ein solches System ist nichts anderes als ein Atom, welches alle Ähnlichkeiten mit einem Wasserstoffatom hätte, nur wäre es 920,5mal leichter und ein solches »sabarisches« Element werden wir »Electrums« nennen (Abkürzung: *E_e), da es nur aus zwei polaren elektrischen Elementarteilchen gebaut wäre (Abb. 1). Da Elektron und Positron dieselbe Masse m_e besitzen, so werden sich die beiden auf derselben Bahn bewegen und mit der Kraft

$$F = -e^2/4r_n^2 \quad (1)$$

anziehen. Dagegen wird die zentripetale Kraft

$$F' = -m_e \cdot v^2/r_n \quad (2)$$

und wegen der Gleichheit der beiden Kräfte ($F = F'$) wird

$$v^2 = \frac{1}{4} \cdot e^2/r_n \cdot e/m_e. \quad (3)$$

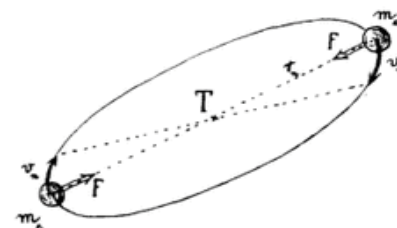


Fig. 1.

Da hier $v < \dots < c$, so ist $m_e \approx m_e^0$, und ich habe schon früher gefunden⁴⁾, daß

$$\frac{e}{m_e^0} = \frac{\rho c^2}{j \mu} = 5.224 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{3/2} \text{ g}^{-1/2} \text{ sec}^{-1} \quad (4)$$

wo ρ eine Konstante ist, d. h.

$$\left. \begin{aligned} \rho &= 1.068 \cdot \frac{10}{j} \\ j &= 1 \left[\frac{\text{El.-st. Einh.}}{\text{cm}} \right] = 1 \text{ cm}^{1/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-1} \\ \mu &= \frac{m_p^0}{m_e^0} = 1840 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

und wo m_p^0 die Ruhemasse des Protons bedeutet. Nehmen wir $e = 4.774 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^{3/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-1}$, so wird die lineare Geschwindigkeit der beiden Elementarteilchen

$$v = \frac{7.895 \cdot 10^3}{\sqrt{r_n}} \text{ cm sec}^{-1}. \quad (6)$$

Ist ω ihre Winkelgeschwindigkeit, so wird der Moment des Impulses gleich

$$p = M v r_n = M r_n^2 \omega \quad (7)$$

wo

$$M = 2m_e \quad (8)$$

ist. Da die Bedingung der Quantentheorie lautet:

$$2\pi p = n \hbar \quad (9)$$

¹⁾ Diese Arbeit wurde anlässlich des 50. Geburtstages des bekannten jugoslawischen Chemikers Herrn Prof. Dr. *Vladimir Njegovan* verfaßt.

²⁾ *A. Reuterdahl*: A Synthesis of Number, Space-Time and Energy and a Physical Basis for Planck's and Rydberg's Constants (The Acad. of Nat. Monographs, Sc. Ser. P. No. 1. Brooklyn 1923); The Physical Basis of the Constant Velocity of Light, with a Prologue by *E. Lee Heidenreich* (The Arya Scientific Monographs, Minneapolis, Minnesota 1929).

³⁾ *P. A. M. Dirac*: Theorie der Elektronen und Positronen (in *W. Heisenberg — E. Schrödinger — P. A. M. Dirac*: Die moderne Atomtheorie. Die bei der Entgegennahme des Nobelpreises 1933 in Stockholm gehaltenen Vorträge, Leipzig 1934).

⁴⁾ *S. Mohorovičić*: Ein Beitrag zur Materiewellen- und Quantentheorie. »Arhiv za hemiju i farm.« III, br. 4, S. 141–168, Zagreb 1929 (S. 151).

Pozitronium

positronium 0 Ps 0.001																		helium 2 He 4.0026																			
hydrogen 1 H 1.0079																																					
lithium 3 Li 6.941		beryllium 4 Be 9.0122																		boron 5 B 10.811		carbon 6 C 12.011		nitrogen 7 N 14.007		oxygen 8 O 15.999		fluorine 9 F 18.998		neon 10 Ne 20.180							
sodium 11 Na 22.990		magnesium 12 Mg 24.305																		aluminium 13 Al 26.982		silicon 14 Si 28.086		phosphorus 15 P 30.974		sulfur 16 S 32.065		chlorine 17 Cl 35.453		argon 18 Ar 39.948							
potassium 19 K 39.098		calcium 20 Ca 40.078		scandium 21 Sc 44.956		titanium 22 Ti 47.867		vanadium 23 V 50.942		chromium 24 Cr 51.996		manganese 25 Mn 54.938		iron 26 Fe 55.845		cobalt 27 Co 58.933		nickel 28 Ni 58.693		copper 29 Cu 63.546		zinc 30 Zn 65.39		gallium 31 Ga 69.723		germanium 32 Ge 72.61		arsenic 33 As 74.922		selenium 34 Se 78.96		bromine 35 Br 79.904		krypton 36 Kr 83.80			
rubidium 37 Rb 85.468		strontium 38 Sr 87.62		yttrium 39 Y 88.906		zirconium 40 Zr 91.224		niobium 41 Nb 92.906		molybdenum 42 Mo 95.94		technetium 43 Tc [98]		ruthenium 44 Ru 101.07		rhodium 45 Rh 102.91		palladium 46 Pd 106.42		silver 47 Ag 107.87		cadmium 48 Cd 112.41		indium 49 In 114.82		tin 50 Sn 118.71		antimony 51 Sb 121.76		tellurium 52 Te 127.60		iodine 53 I 126.90		xenon 54 Xe 131.29			
caesium 55 Cs 132.91		barium 56 Ba 137.33		57-70 *		lutetium 71 Lu 174.97		hafnium 72 Hf 178.49		tantalum 73 Ta 180.95		tungsten 74 W 183.84		rhenium 75 Re 186.21		osmium 76 Os 190.23		iridium 77 Ir 192.22		platinum 78 Pt 195.08		gold 79 Au 196.97		mercury 80 Hg 200.59		thallium 81 Tl 204.38		lead 82 Pb 207.2		bismuth 83 Bi 208.98		polonium 84 Po [209]		astatine 85 At [210]		radon 86 Rn [222]	
francium 87 Fr [223]		radium 88 Ra [226]		89-102 * *		lawrencium 103 Lr [262]		rutherfordium 104 Rf [261]		dubnium 105 Db [262]		seaborgium 106 Sg [266]		bohrium 107 Bh [264]		hassium 108 Hs [269]		meitnerium 109 Mt [268]		ununilium 110 Uun [271]		unununium 111 Uuu [272]		ununbium 112 Uub [277]				ununquadium 114 Uuq [289]									

* Lanthanide series

** Actinide series

lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.91	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.04
actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	einsteinium 99 Es [252]	fermium 100 Fm [257]	mendelevium 101 Md [258]	nobelium 102 No [259]

Pozitronium

objev pozitronia

- experimentální objev:
Martin Deutsch 1951
M. Deutsch, Phys. Rev. 82 455 (1951)



Martin Deutsch 1917-2002

Evidence for the Formation of Positronium in Gases*

MARTIN DEUTSCH

*Laboratory for Nuclear Science and Engineering, and Department of Physics,
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts*

(Received March 13, 1951)

THE distribution of time delays between the emission of a nuclear gamma-ray from the decay of Na^{22} and the appearance of an annihilation quantum has been measured for positrons stopping in a large number of gases and gas mixtures, extending earlier measurements.¹ A complete interpretation of the results appears to be fairly complex and will be attempted in a more extensive communication. At this time we want to report on some definite proof of the abundant formation of positronium, the bound electron-positron system analogous to the hydrogen atom. The ground state of this atom is expected² to have a lifetime against two-quantum annihilation of about 10^{-10} sec if the spins are antiparallel and slightly over 10^{-7} sec if they are parallel,³ decaying by three-quantum annihilation. Ore⁴ has shown that, in general, there is no mechanism for the rapid destruction of the triplet state at low energies. One may expect, however, that in a gas containing molecules with an odd number of electrons, such as nitric oxide, the triplet state would be converted very rapidly to the singlet by an electron exchange. In NO this requires essentially no energy at room temperature, the energy difference for the two spin orientations being only about 13 millivolts. The cross section for this process may be very large, since it is a resonance effect involving the coulomb interaction rather than a magnetic conversion. (The latter is expected to be very slow.⁴) Thus, even a small admixture of NO should cause the very rapid annihilation of those positrons which would otherwise have decayed by three-quantum annihilation with a period of the order of 10^{-7} sec. Figure 1 shows this phenomenon. In nitrogen the number of delayed counts is reduced by a factor of three by the addition of 3 percent NO. These counts then appear instead in the "prompt" channel, not shown in Fig. 1. In freon the effect is even greater, hardly any delayed coincidences remaining upon addition of NO. The residue in N_2 is probably due to free positrons.

Oxygen has a similar but less pronounced action. In pure O_2 the number of delayed coincidences is about half as great as in N_2 (Fig. 1).

Confirmation of the above interpretation comes from the direct observation of the continuous gamma-ray spectrum due to the

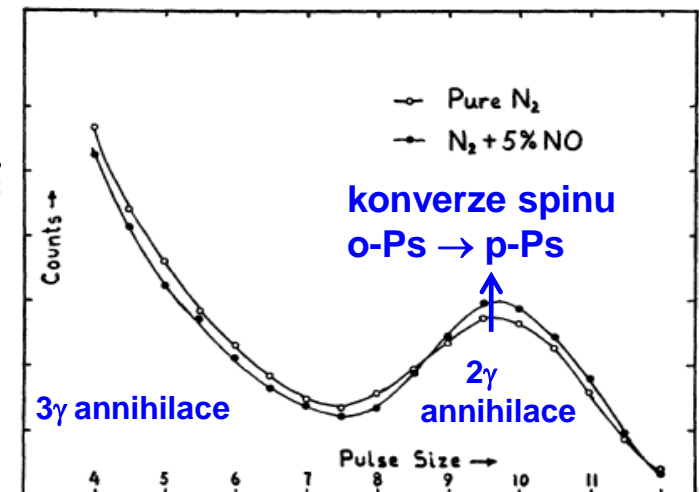
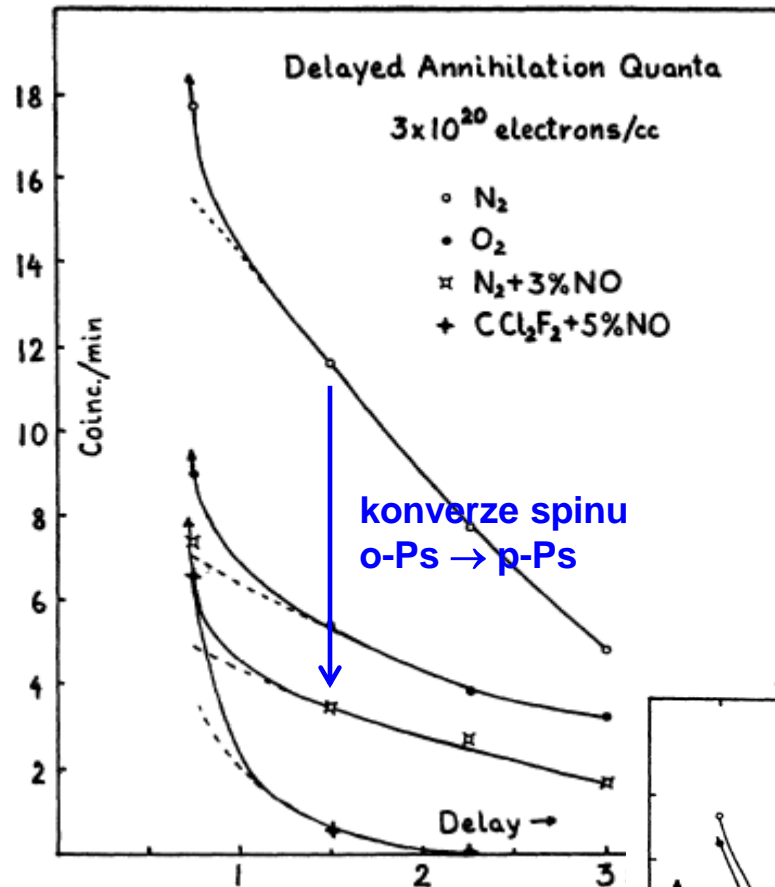
Pozitronium

objev pozitronia

- experimentální objev:
Martin Deutsch 1951
M. Deutsch, Phys. Rev. 82 455 (1951)



Martin Deutsch 1917-2002



Pozitronium

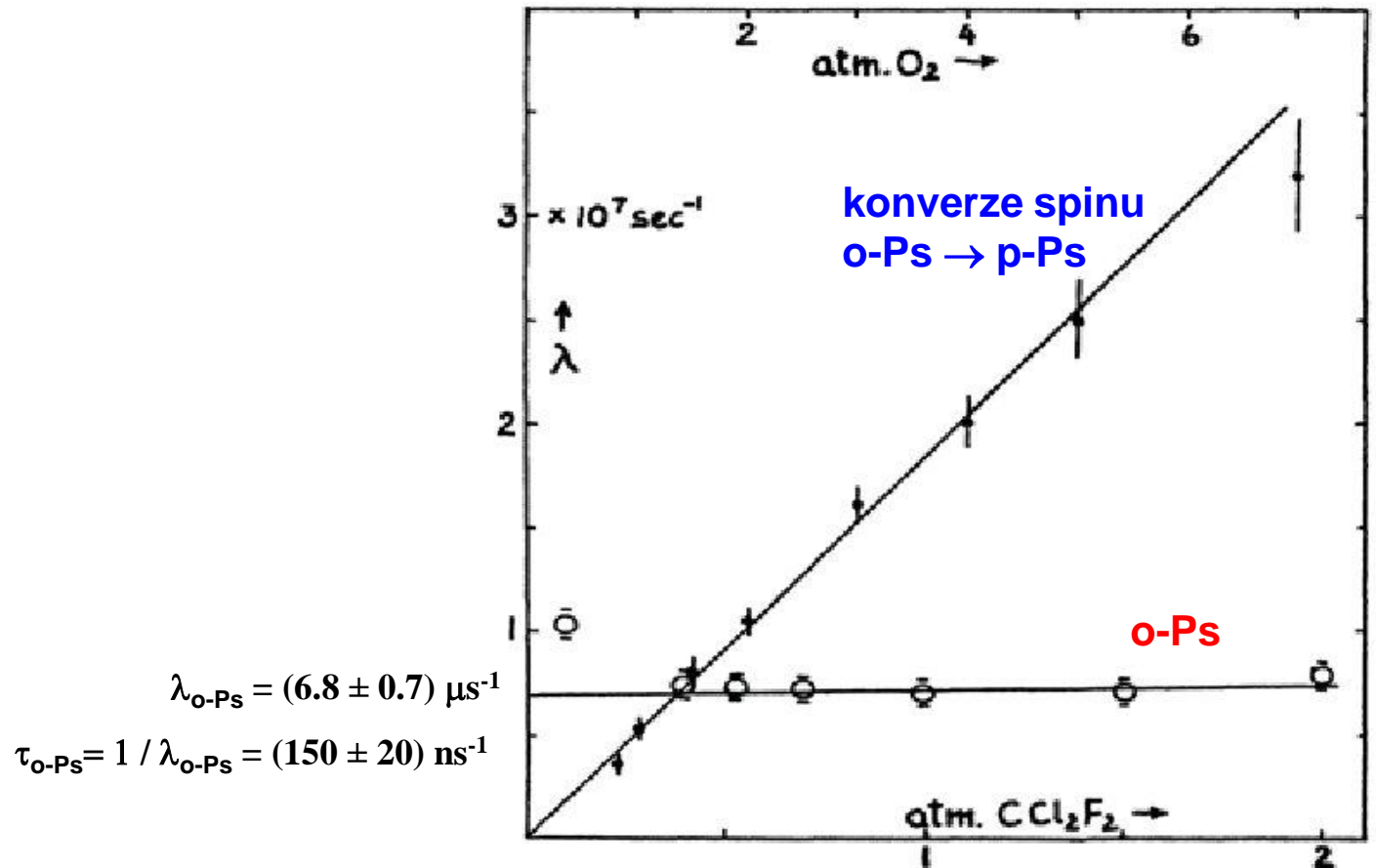
objev pozitronia

- experimentální objev:
Martin Deutsch 1951
M. Deutsch, Phys. Rev. 82 455 (1951)



Martin Deutsch 1917-2002

anihilační rychlost Ps ve freonu



M. Deutsch, Phys. Rev. 83 866 (1951)

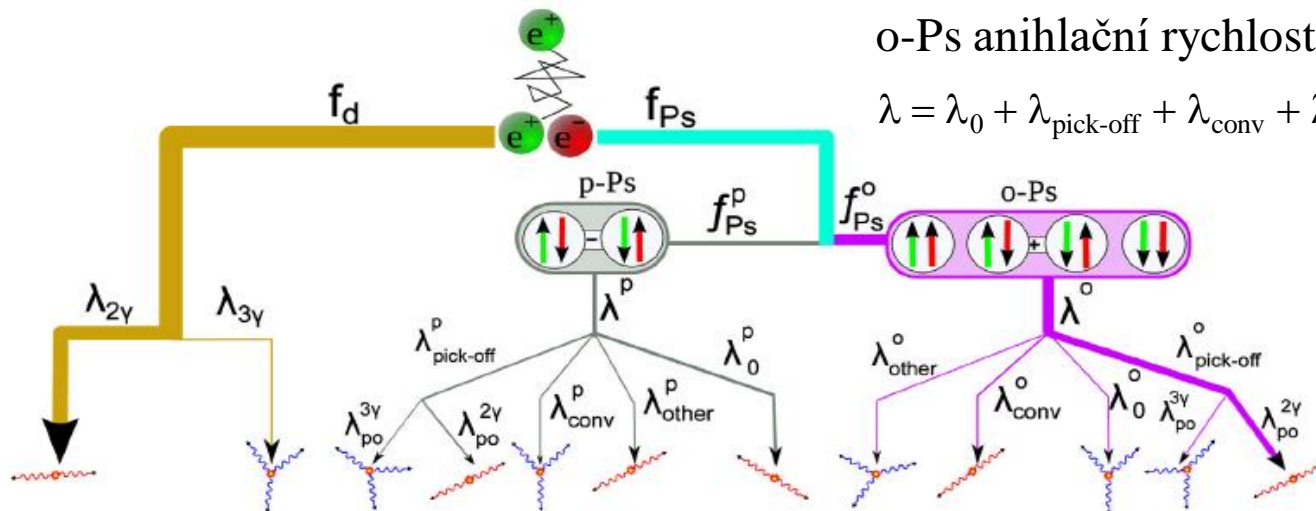
Pozitronium

- Ps je čistě leptonový systém
- čistě elektromagnetické interakce
- dobrý systém pro test QED teorie
- nerelativistická QED předpověď: $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$: $\lambda_0 = 7.039\,979(11) \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
G.S. Adkins, R. N. Fell, P. M. Mitrikov, Phys. Rev. Lett. 79, 3383 (1997)
- experimentální hodnota: $o\text{-Ps} \rightarrow 3\gamma$: $\lambda_0 = 7.0401(7) \times 10^6 \text{ s}^{-1}$
Y. Kataoka, S. Asai, T. Kobayashi, Phys. Lett. B 671, 219 (2009)

$$\tau_{o\text{-Ps,QED}} = 142.0459(2) \text{ ns}$$

$$\tau_{o\text{-Ps,exp}} = 142.04(1) \text{ ns}$$

100–krát vyšší nejistota



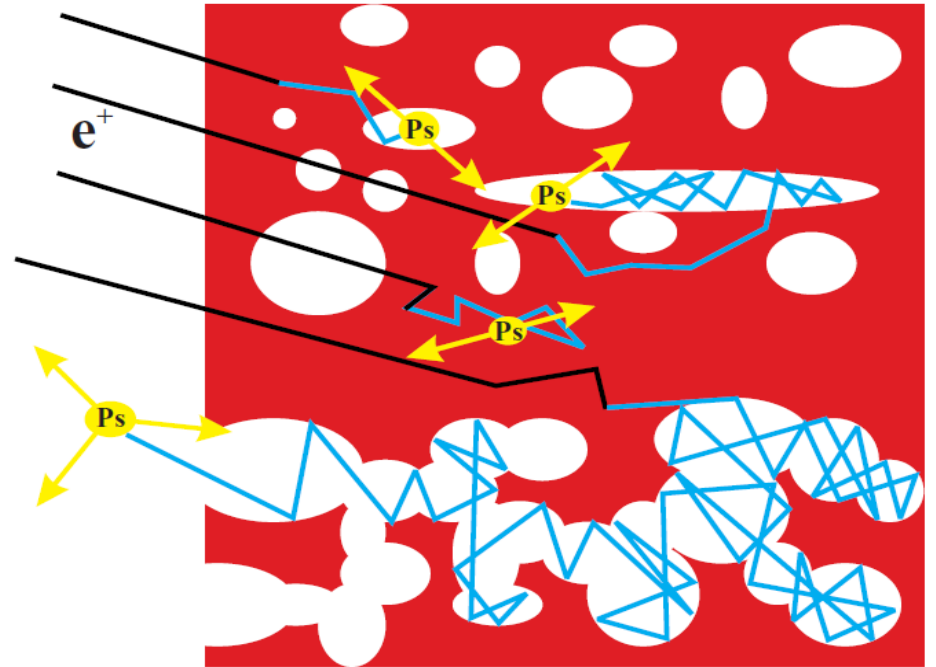
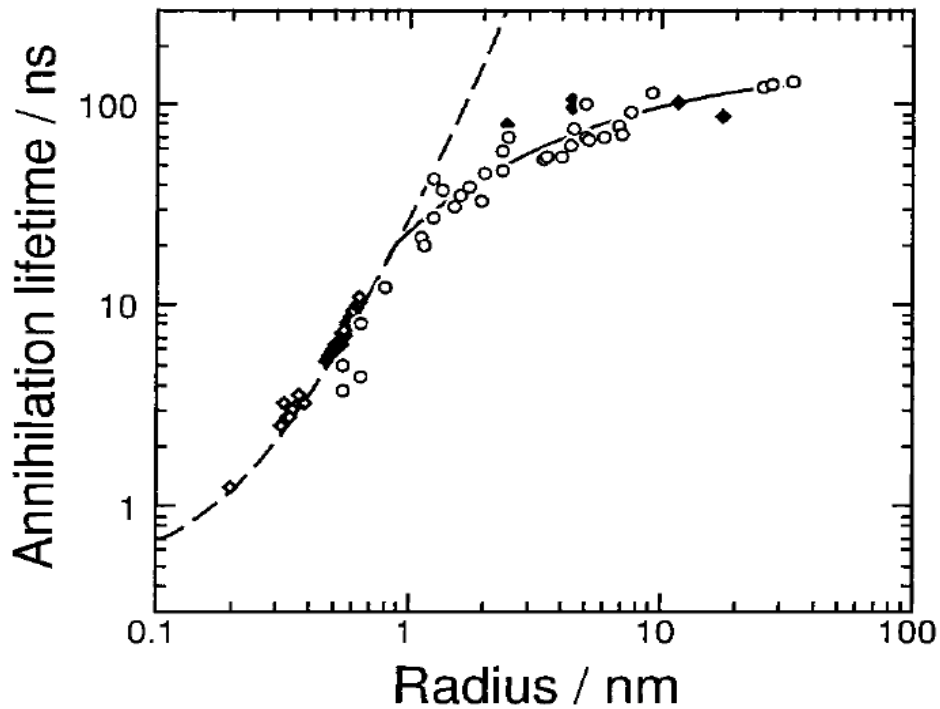
o-Ps anihlační rychlost:

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_{pick-off} + \lambda_{conv} + \lambda_{other}$$

pick-off anihilace:
dominantní kanál
v pevných látkách

Pozitronium

- Pozitroniová porozimetrie
- doba života pick-off anihilace o-Ps přináší informaci o rozdělení velikostí nanoskopických pórů v materiálech
- **Tao-Eldrup-Ito model**



S.J. Tao, J. Chem. Phys. 56, 5499 (1972)

M. Eldrup, D. Lightbody, J.N. Sherwood, Chem. Phys. 63, 51 (1981)

K.Ito, H. Nakanishi, Y. Ujihira, J. Phys. Chem. B 103, 4555 (1999)

Vznik pozitronia

- **Oreho model**

- Ps vzniká v izolantech během termalizace pozitronu
- v oblasti energií $E_i - E_{Ps} < E < E_{ex}$ (Oreho pás)
- E_i – ionizační energie
- $E_{Ps} = 6.8 \text{ eV}$ – vazebná energie Ps
- E_{ex} – nejmenší excitační energie elektronu

- **Spur model**

- pozitron je během termalizace doprovázen oblakem volných elektronů vzniklých ionizací
- Ps vzniká interakcí pozitronu s jedním z těchto elektronů

Volný objem

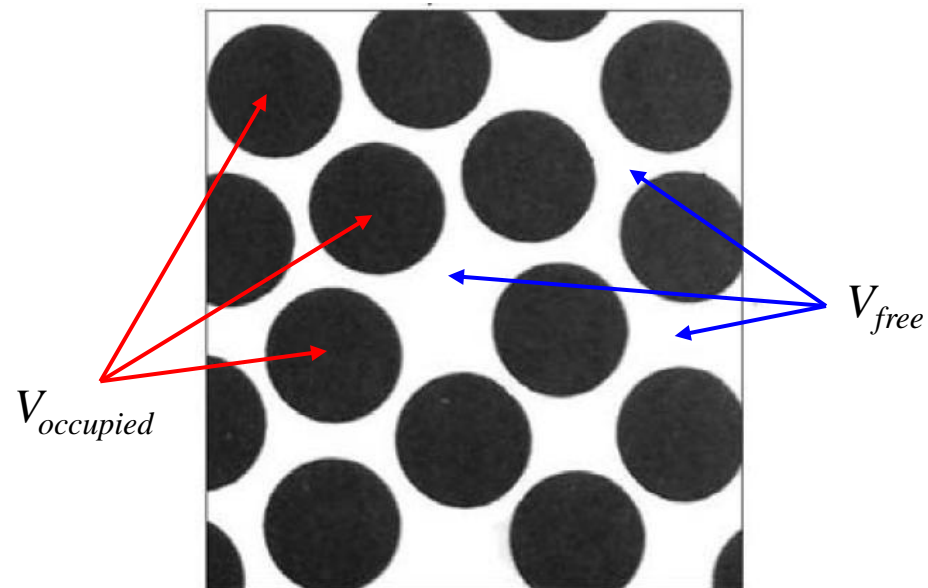
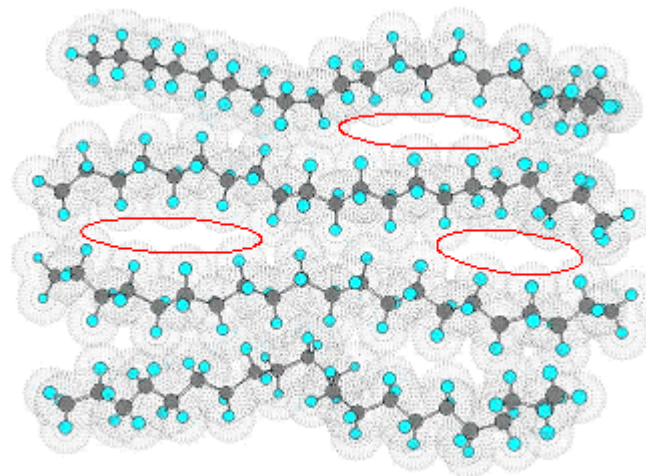
- **polymery**
- nedokonalé (tj. ne nejtěsnější možné) uspořádání polymerních řetězců
- **volný objem**

$$V_{free} = V_{total} - V_{occupied}$$

- **frakční volný objem**

$$f_V = \frac{V_{free}}{V_{total}}$$

- typický rozměr volných objemů $\approx \text{\AA}$
- relaxační doba $\approx 10^{-13}$ s



Volný objem

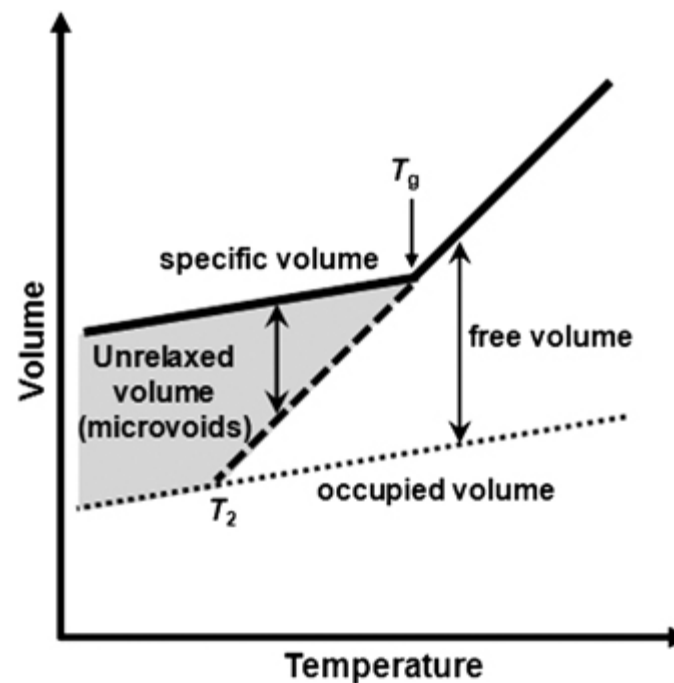
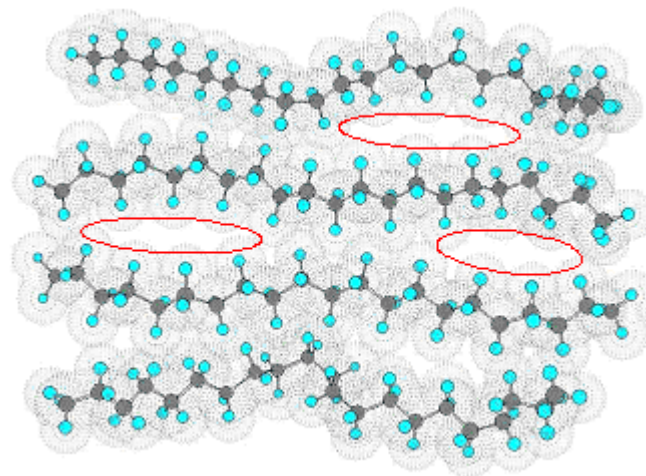
- **polymery**
- nedokonalé (tj. ne nejtěsnější možné) uspořádání polymerních řetězců
- **volný objem**

$$V_{free} = V_{total} - V_{occupied}$$

- **frakční volný objem**

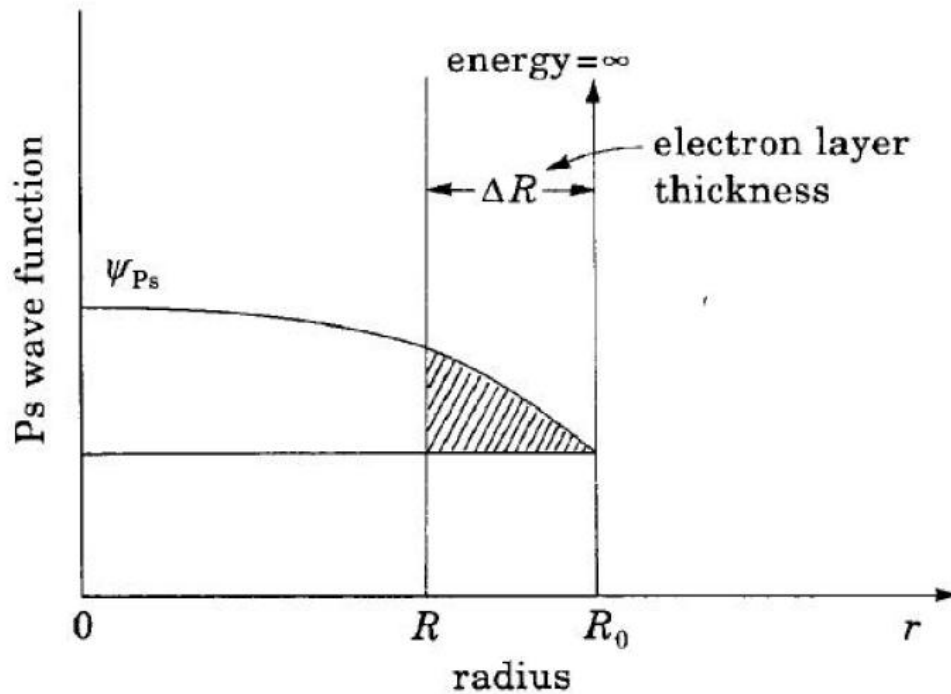
$$f_V = \frac{V_{free}}{V_{total}}$$

- typický rozměr volných objemů $\approx \text{\AA}$
- relaxační doba $\approx 10^{-13}$ s



Pick-off anihilace o-Ps

- Ps je lokalizováno ve volných objemech
- pick-off anihilace výrazně zkracuje dobu života o-Ps



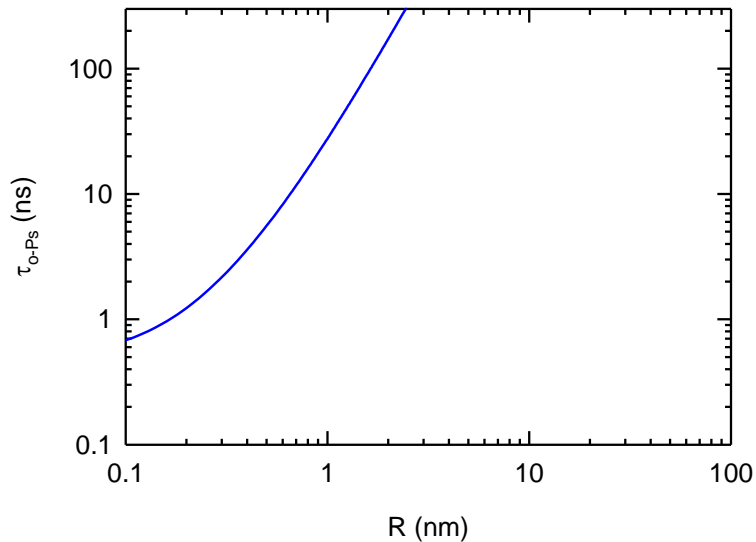
- doba života o-Ps ve volném objemu o poloměru R

$$\tau_{o-Ps} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{R}{R + \Delta R} + \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi R}{R + \Delta R} \right) \right]^{-1}$$

- $\Delta R = 1.656 \text{ \AA}$

Pick-off anihilace o-Ps

- Ps je lokalizováno ve volných objemech
- pick-off anihilace výrazně zkracuje dobu života o-Ps



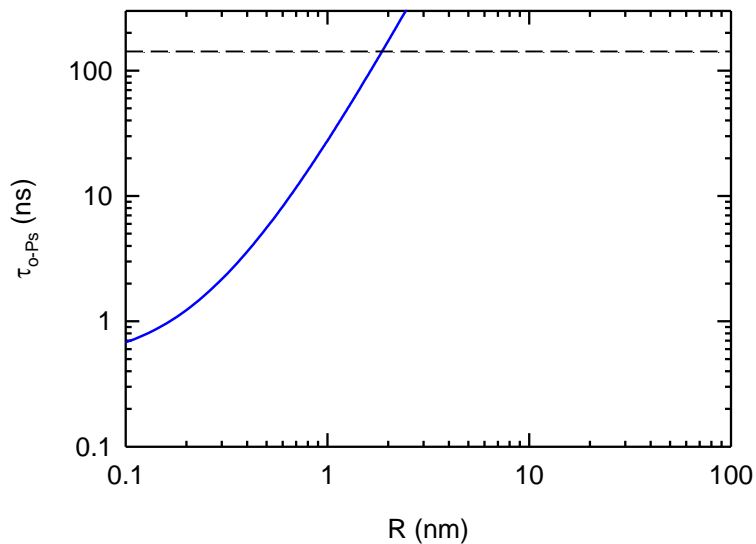
- doba života o-Ps ve volném objemu o poloměru R

$$\tau_{o-Ps} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{R}{R + \Delta R} + \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi R}{R + \Delta R} \right) \right]^{-1}$$

- $\Delta R = 1.656 \text{ \AA}$

Pick-off anihilace o-Ps

- Ps je lokalizováno ve volných objemech
- pick-off anihilace výrazně zkracuje dobu života o-Ps



→ doba života 3γ self-anihilace o-Ps: $\tau_{o-Ps} = 142$ ns

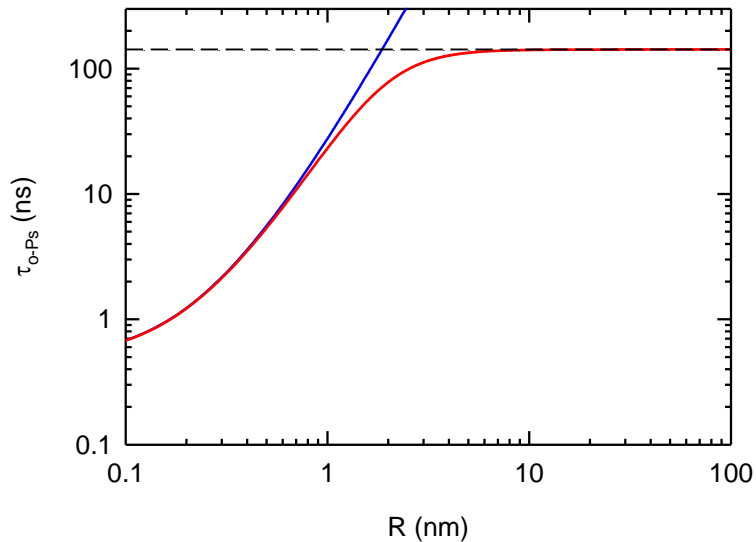
- doba života o-Ps ve volném objemu o poloměru R

$$\tau_{o-Ps} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{R}{R + \Delta R} + \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi R}{R + \Delta R} \right) \right]^{-1}$$

- $\Delta R = 1.656 \text{ \AA}$

Pick-off anihilace o-Ps

- Ps je lokalizováno ve volných objemech
- pick-off anihilace výrazně zkracuje dobu života o-Ps



započtení $3-\gamma$ anihilace

$$\tau_{o-Ps}^{-1} = \lambda = \lambda_{pickoff}(R) + \lambda_{3-\gamma}$$

$$\lambda_{pickoff}(R) = 2 \left[1 - \frac{R}{R + \Delta R} + \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi R}{R + \Delta R} \right) \right]$$

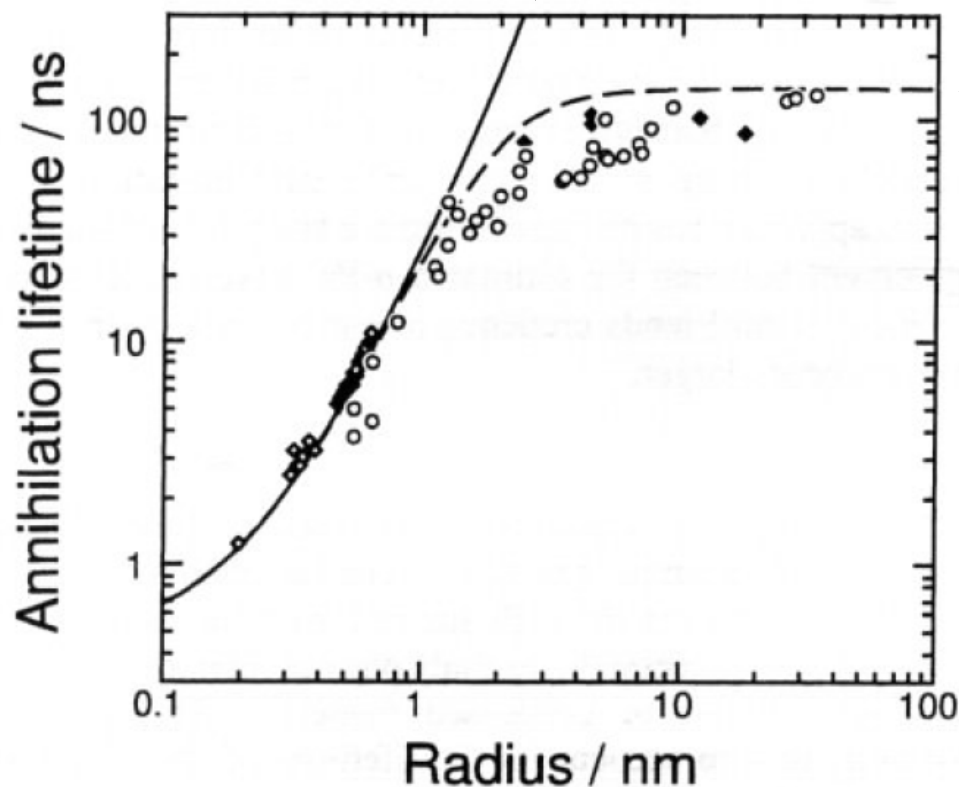
$$\lambda_{3-\gamma} = \frac{1}{142} \text{ ns}^{-1}$$

$$\Delta R = 1.656 \text{ \AA}$$

Pick-off anihilace

- zobecnění Tao-Eldrupova modelu na velké póry (Ito 1999)

Tao-Eldrup
$$\tau_{o-Ps} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{R}{R + \Delta R} + \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi R}{R + \Delta R} \right) \right]^{-1}$$



← započtení 3- γ anihilace

$$\tau_{o-Ps}^{-1} = \lambda = \lambda_{pickoff}(R) + \lambda_{3-\gamma}$$

$$\lambda_{pickoff}(R) = 2 \left[1 - \frac{R}{R + \Delta R} + \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi R}{R + \Delta R} \right) \right]$$

$$\lambda_{3-\gamma} = \frac{1}{142} \text{ ns}^{-1}$$

$$\Delta R = 1.656 \text{ \AA}$$

Pick-off anihilace

- zobecnění Tao-Eldrupova modelu na velké póry (Ito 1999)

- Ps uvnitř póru $r < R - R_a$

- žádná interakce se stěnou póru: $\lambda_{o-Ps} = \lambda_{3-\gamma} = \frac{1}{142} \text{ ns}^{-1}$

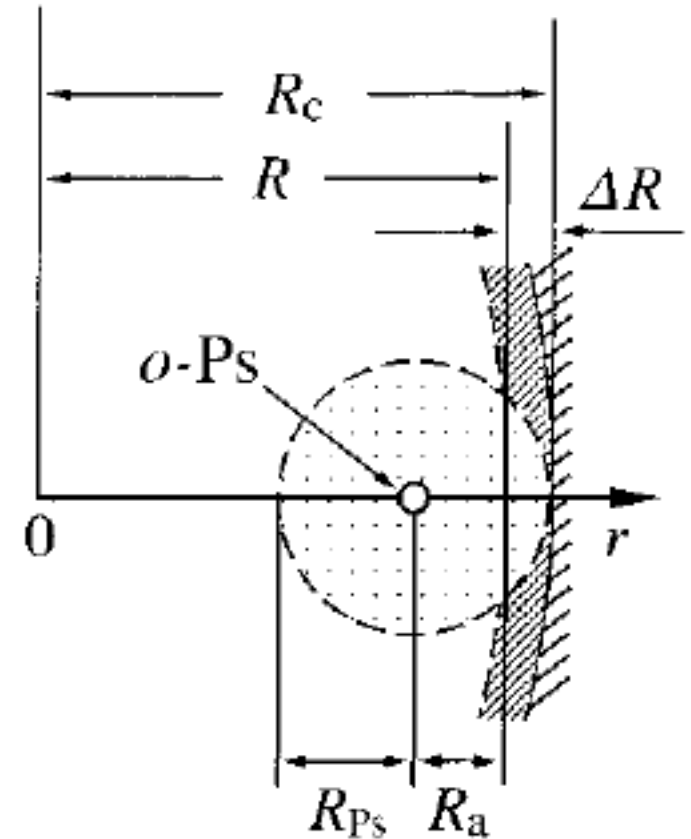
- Ps blízko stěny $R - R_a < r < R + \Delta R$

- interakce Ps se stěnou póru: $\lambda_{o-Ps} = \lambda_{pickoff}(R) + \lambda_{3-\gamma}$

$$\lambda_{pickoff} = 2 \left[1 - \frac{R}{R + \Delta R} + \frac{1}{2\pi} \sin \left(\frac{2\pi R}{R + \Delta R} \right) \right]$$

$$\lambda_{o-Ps} = (1 - f(R)) (\lambda_{pickoff}(R) + \lambda_{3-\gamma}) + f(R) \lambda_{3-\gamma}$$

$$\lambda_{o-Ps} = (1 - f(R)) (\lambda_{pickoff}(R)) + \lambda_{3-\gamma}$$



Pick-off anihilace

- zobecnění Tao-Eldrupova modelu na velké póry (Ito 1999)

$$\lambda_{o-Ps} = (1 - f(R))(\lambda_{pickoff}(R)) + \lambda_{3-\gamma}$$

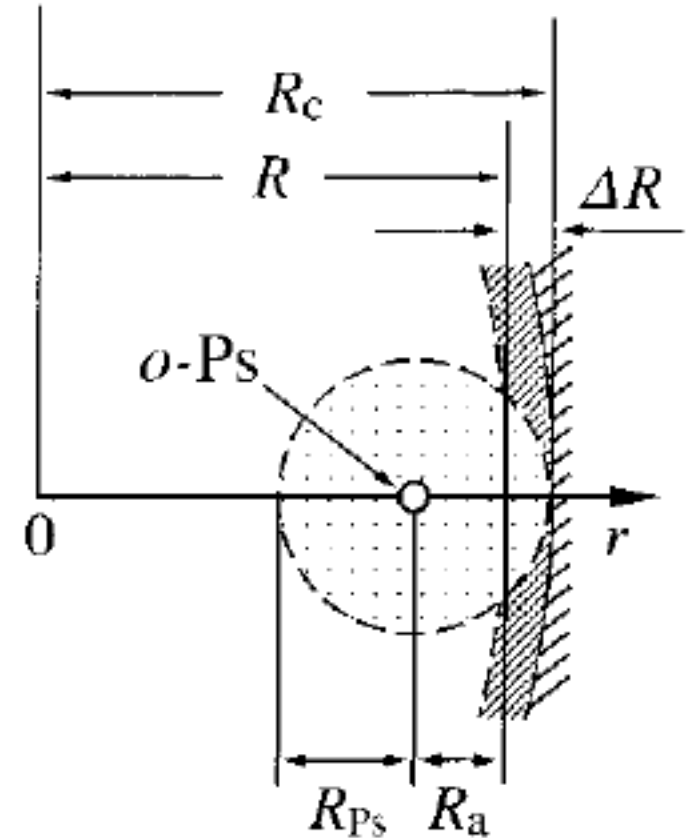
- pravděpodobnost výskytu Ps uvnitř kulové vrstvy o poloměru mezi $R - R_a$ a $R + \Delta R$

$$f(R) = \frac{3}{4\pi} \frac{1}{(R + \Delta R)^3} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{R-R_a} \rho(r) r^2 \sin \theta dr d\theta d\varphi$$

$$\xi = \frac{r}{R + \Delta R} \quad 0 \leq \xi \leq 1$$

$$f(R) = \frac{3}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \int_0^{(R-R_a)/(R+\Delta R)} \rho(\xi) \xi^2 \sin \theta d\xi d\theta d\varphi$$

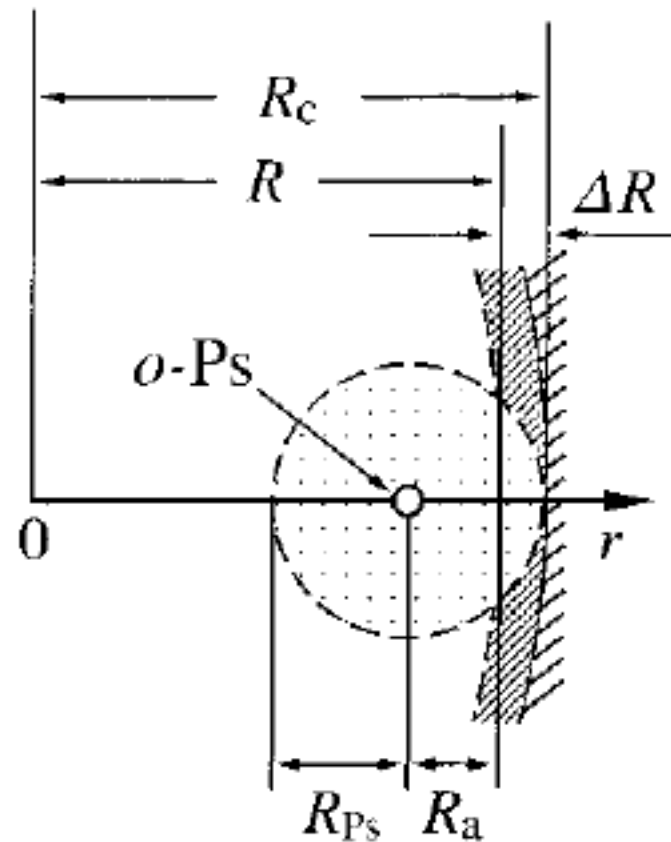
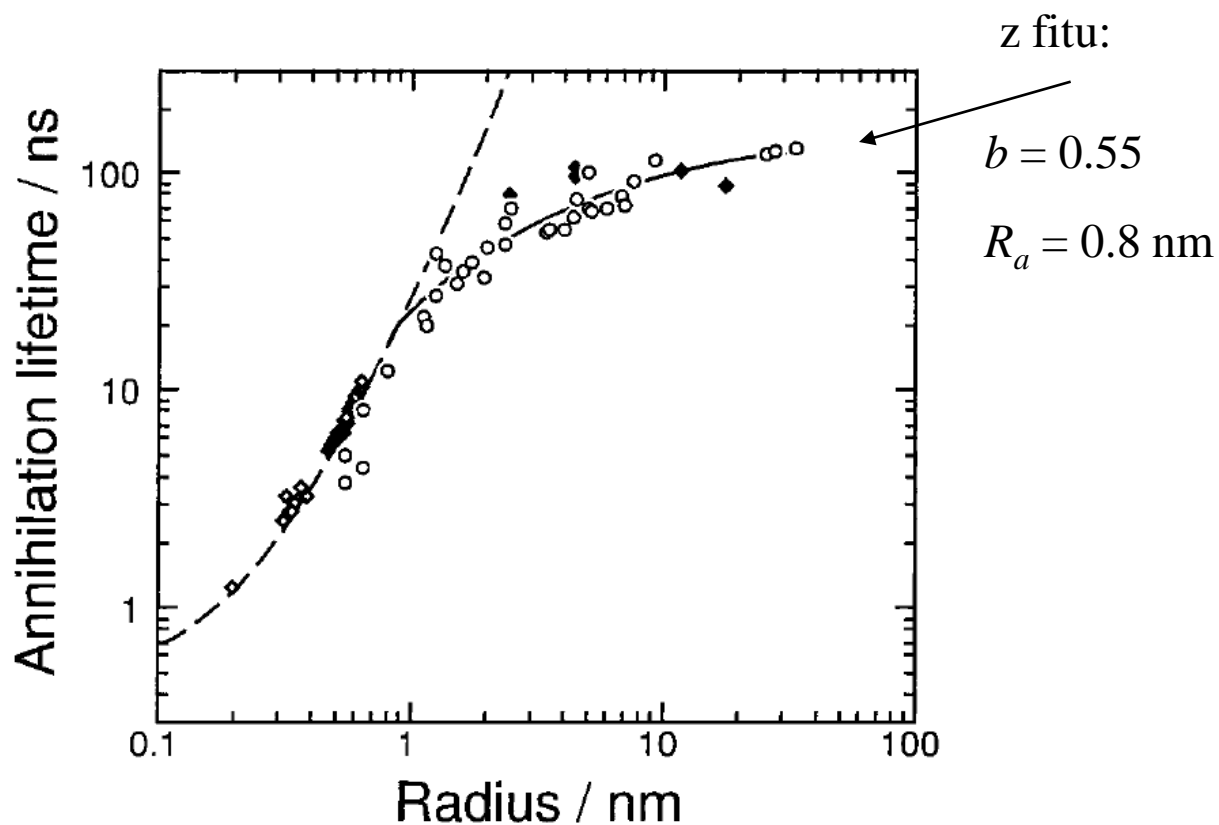
$$f(R) = \left(\frac{R - R_a}{R + \Delta R} \right)^b \quad \text{pokud } \rho(\xi) = 1 \Rightarrow b = 3$$



Pick-off anihilace

- zobecnění Tao-Eldrupova modelu na velké póry (Ito 1999)
- pravděpodobnost výskytu Ps uvnitř kulové vrstvy o poloměru mezi $R - R_a$ a $R + \Delta R$

$$f(R) = \left(\frac{R - R_a}{R + \Delta R} \right)^b \quad \text{fit } b \text{ a } R_a$$

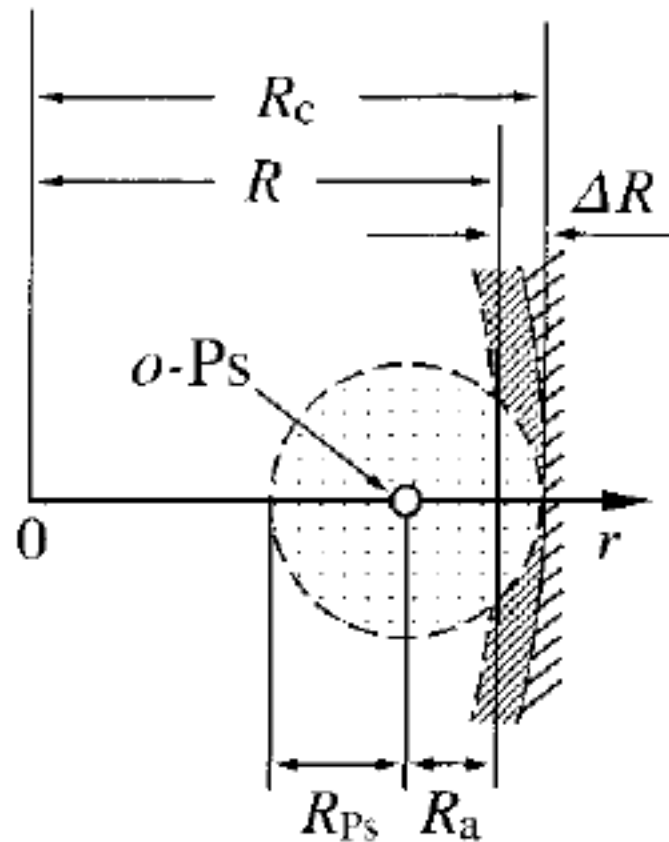


Pick-off anihilace

- zobecnění Tao-Eldrupova modelu na velké póry (Ito 1999)
- anihilační rychlost o-Ps v póru o poloměru R :

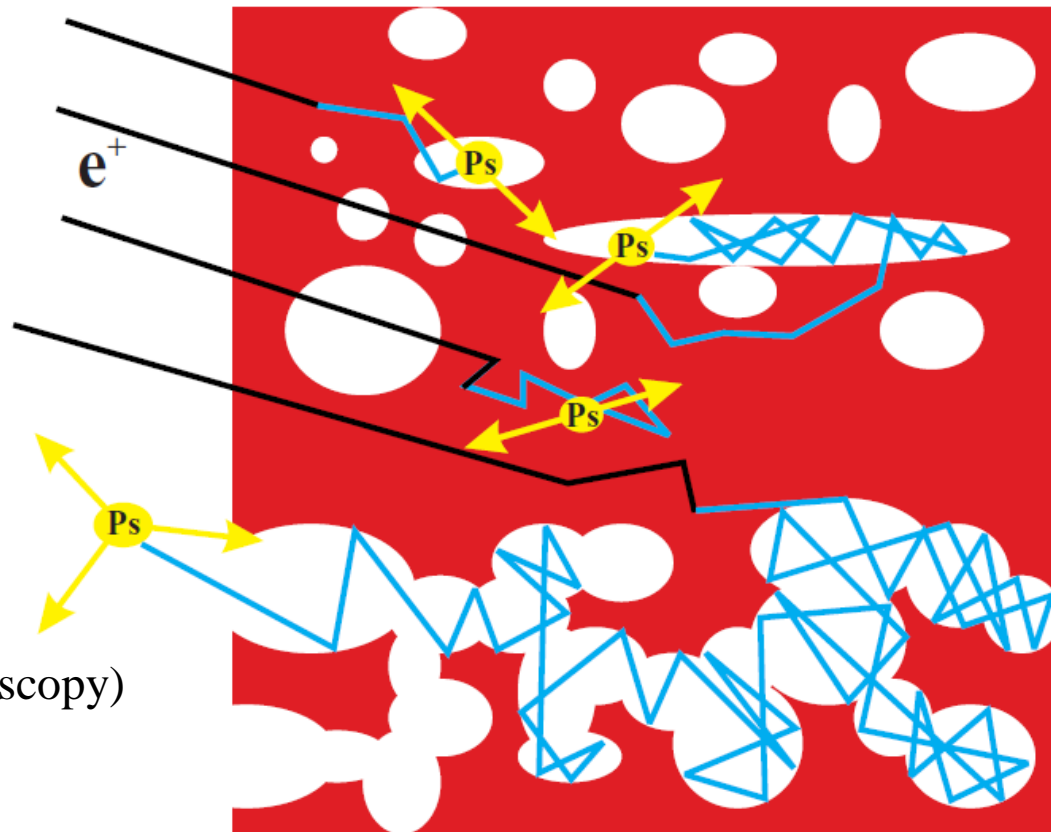
$$\lambda_{o-Ps} = \begin{cases} \lambda_{pickoff}(R) \left(1 - \left(\frac{R - R_a}{R + \Delta R} \right)^b \right) + \lambda_{3-\gamma} & R \geq R_a \\ \lambda_{pickoff}(R) + \lambda_{3-\gamma} & R < R_a \end{cases}$$

- $R_a = 0.8 \text{ nm}$
- $b = 0.55$
- $\Delta R = 0.1656 \text{ nm}$



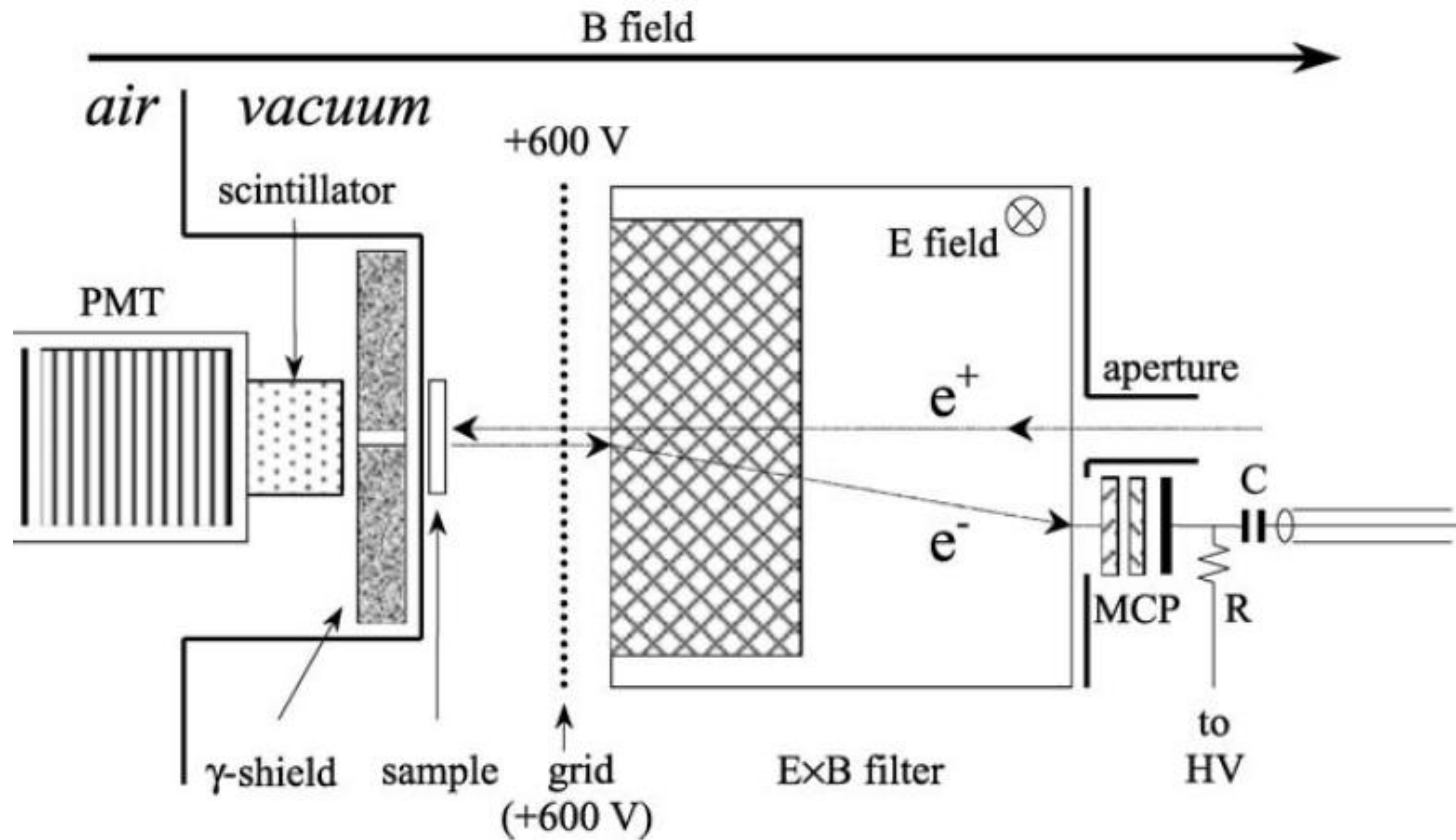
Techniky pro měření Ps v porézních materiálech

- Dopplerovské rozšíření
DB (Doppler broadening)
- Úhlové korelace
ACAR (angular correlation)
- Měření doby letu Ps
Ps-TOF (Ps time of flight)
- Měření doby života Ps
PALS (positron annihilation lifetime spectroscopy)



Měření doby života Ps

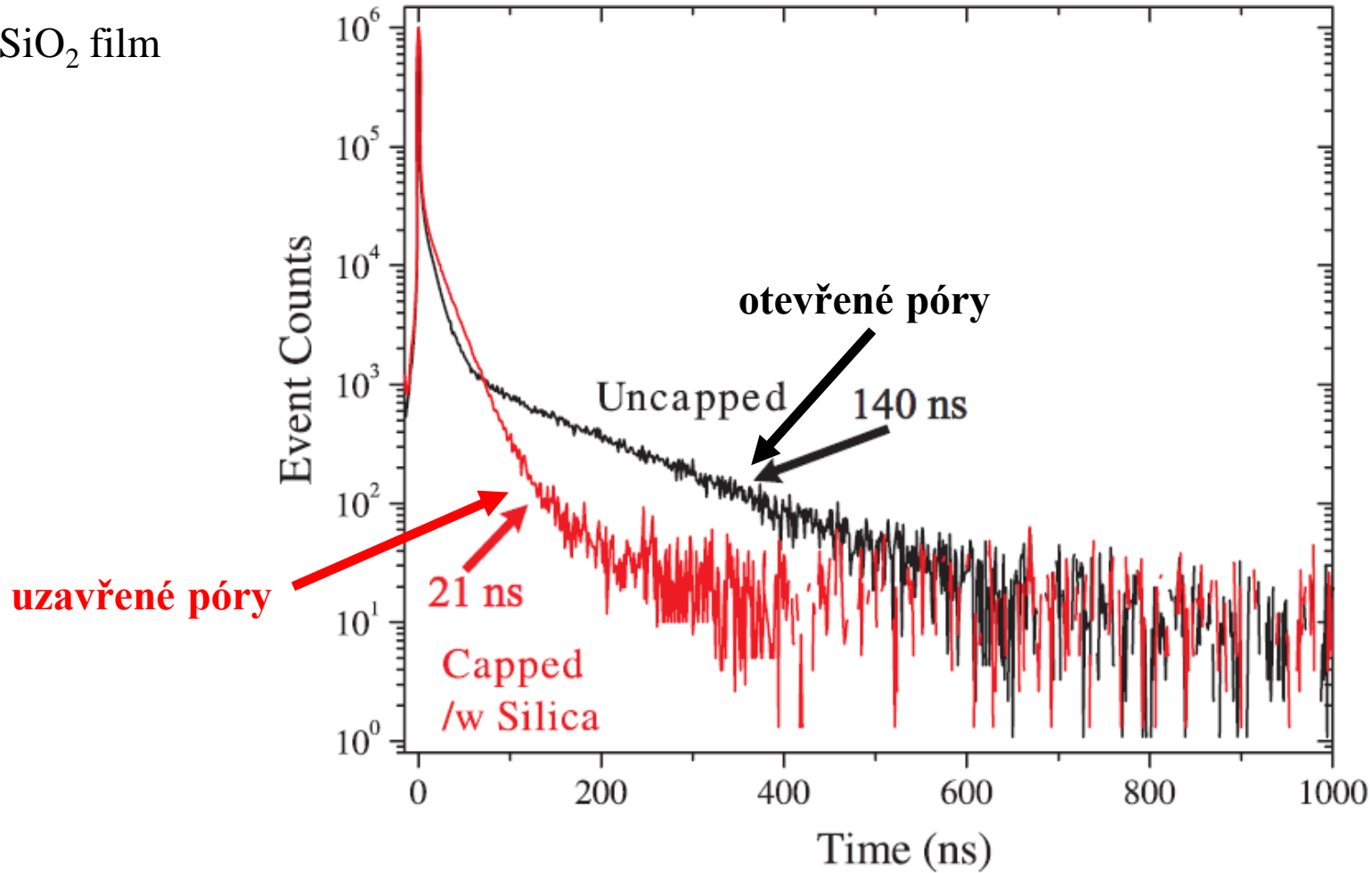
- Měření doby života Ps – svazek pozitronů



Měření doby života Ps

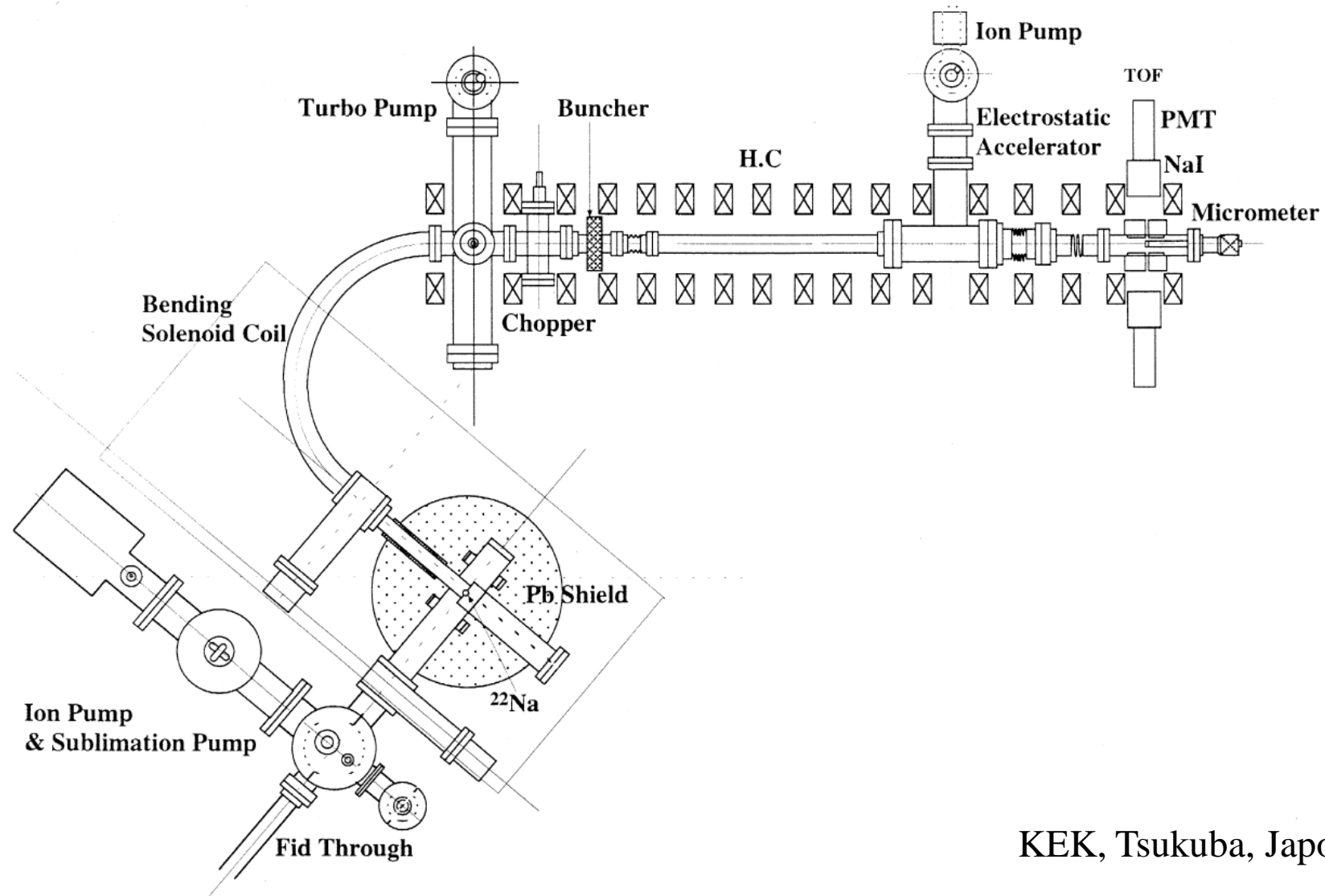
- Měření doby života Ps – svazek pozitronů

- SiO₂ film



Ps - TOF

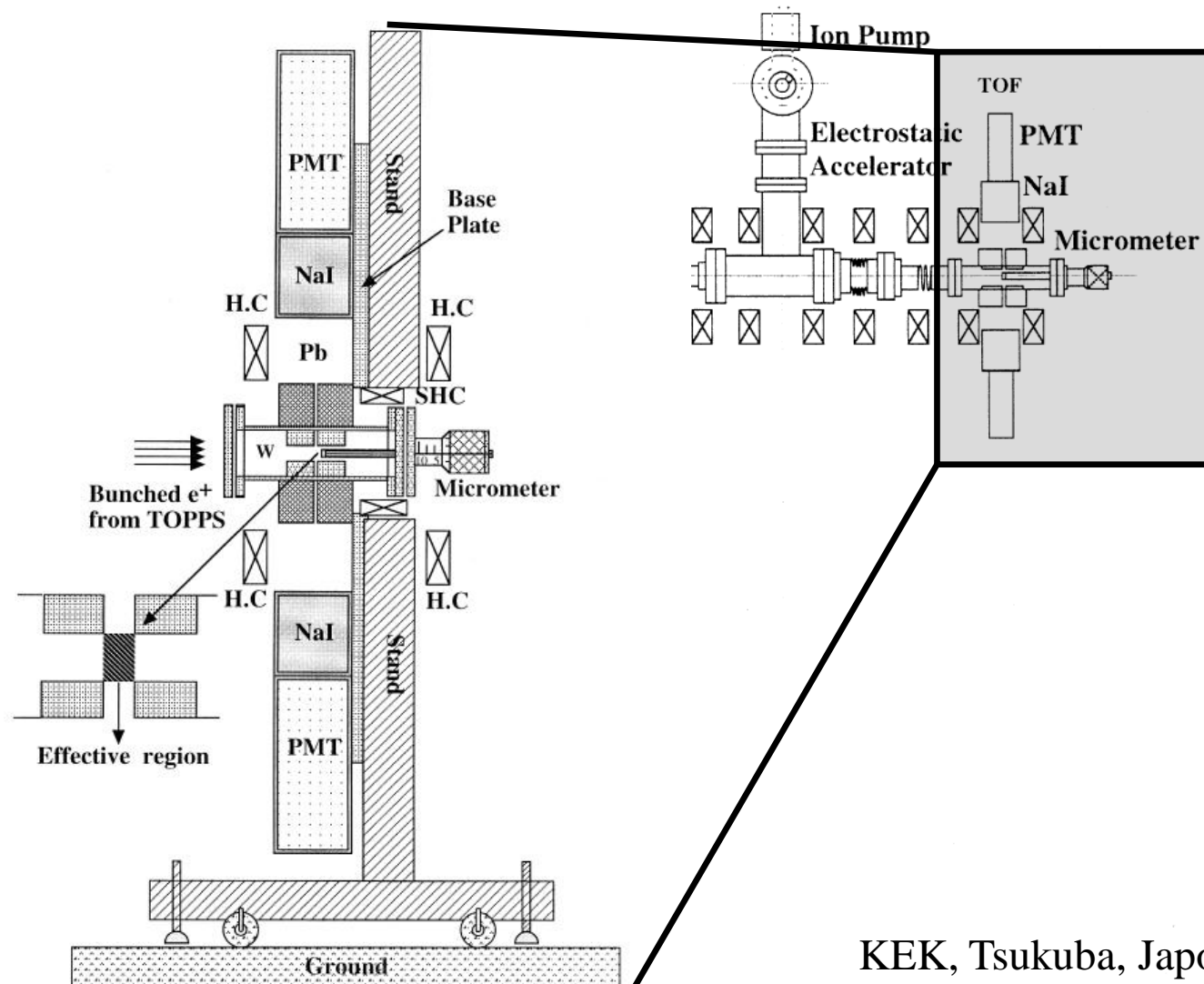
- Měření doby letu pozitronia: Ps-TOF (Ps time of flight)



KEK, Tsukuba, Japonsko

Ps - TOF

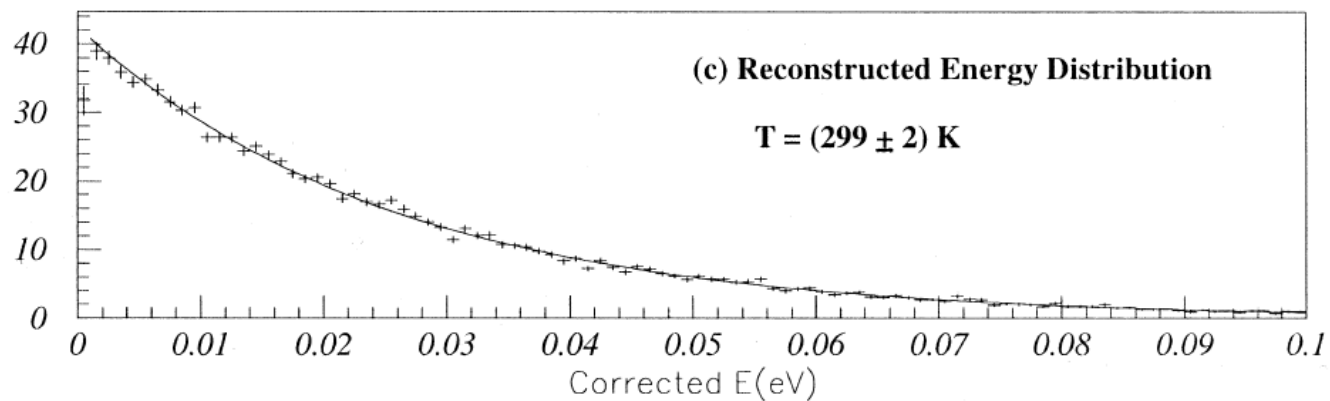
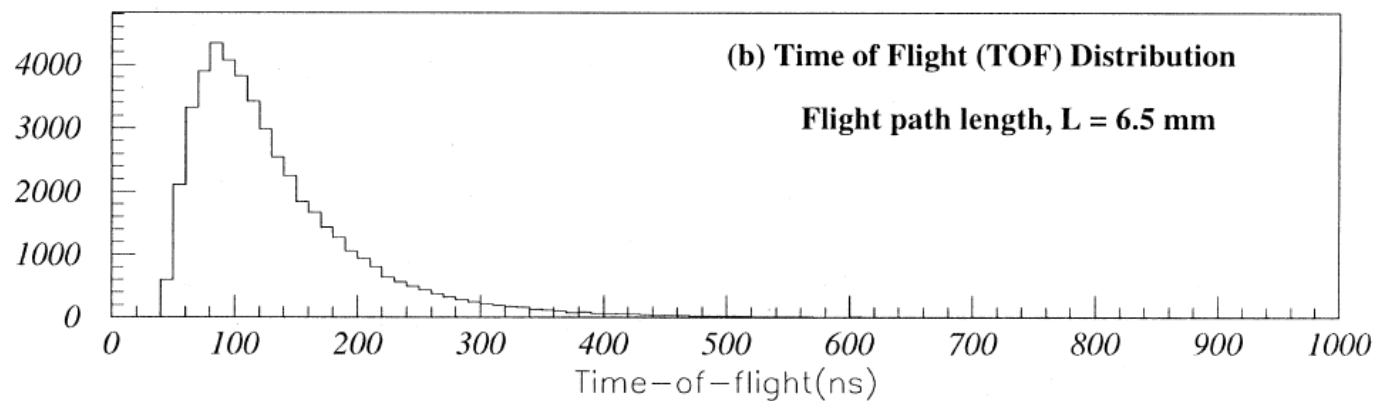
- Měření doby letu pozitronia: Ps-TOF (Ps time of flight)



KEK, Tsukuba, Japonsko

Ps - TOF

- Měření doby letu pozitronia: Ps-TOF (Ps time of flight)



Techniky pro měření Ps v porézních materiálech - DB

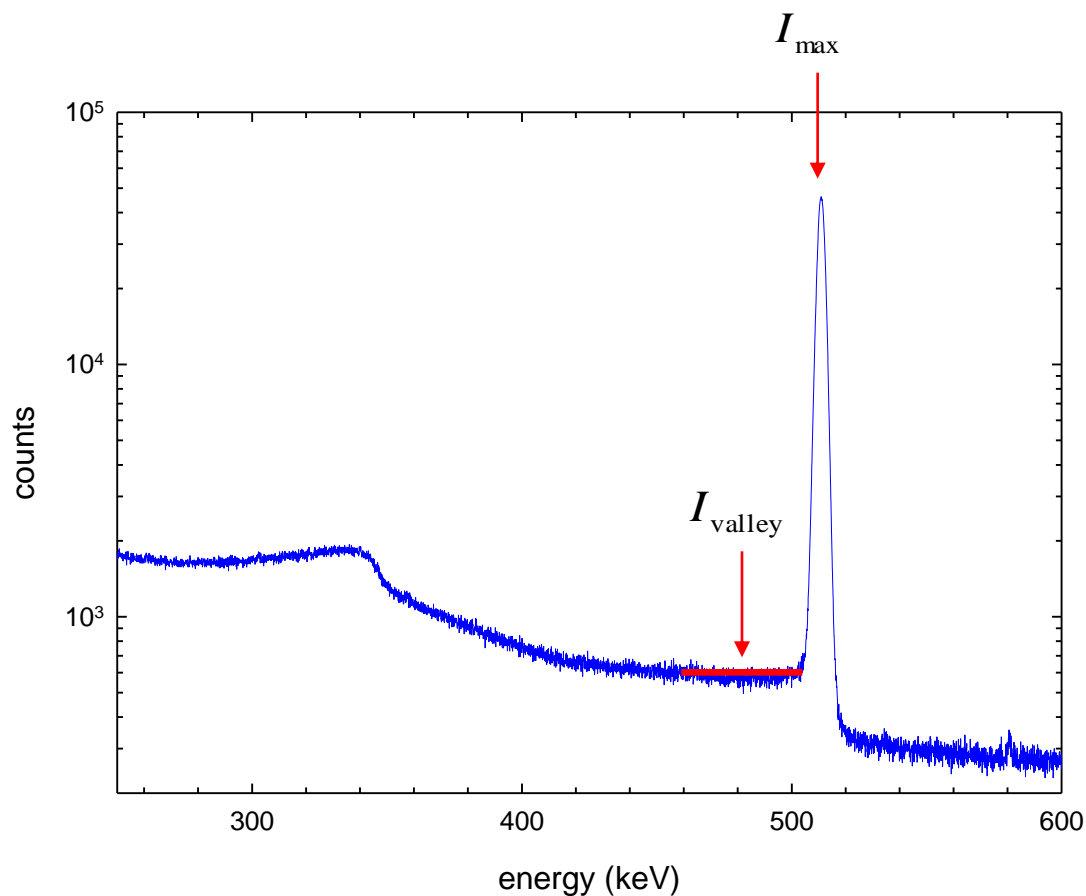
- Dopplerovské rozšíření DB (Doppler broadening)

$$R = \frac{I_{\text{valley}}}{I_{\text{max}}}$$

- F - parametr

$$F = \frac{R - R_0}{R_{\text{max}} - R_0}$$

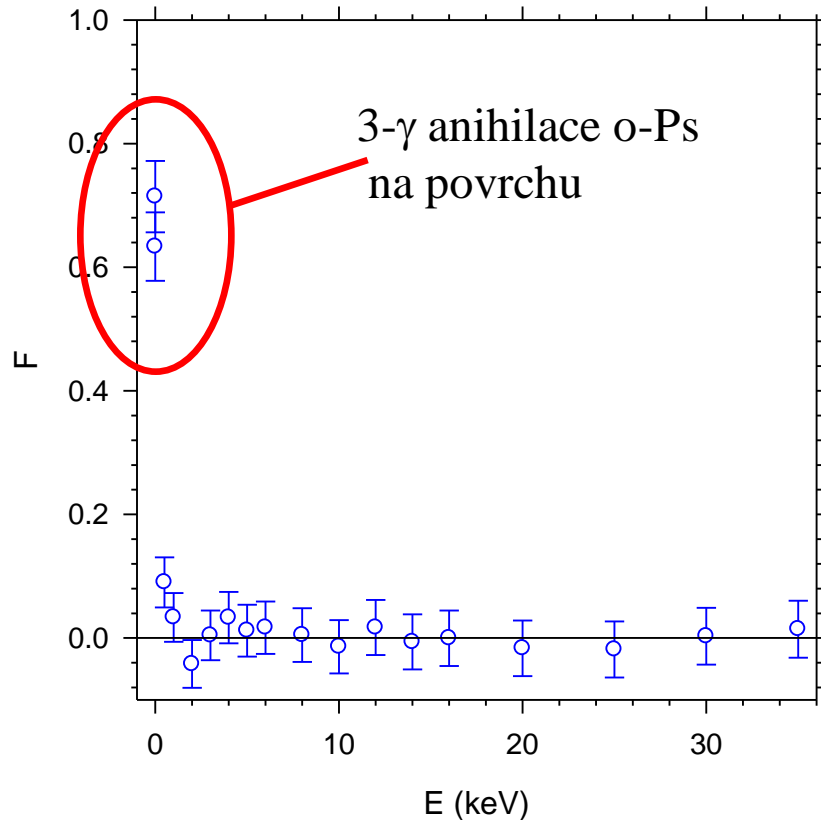
- R_0 – materiál bez Ps
- R_{max} – materiál s maximálním výtěžkem Ps



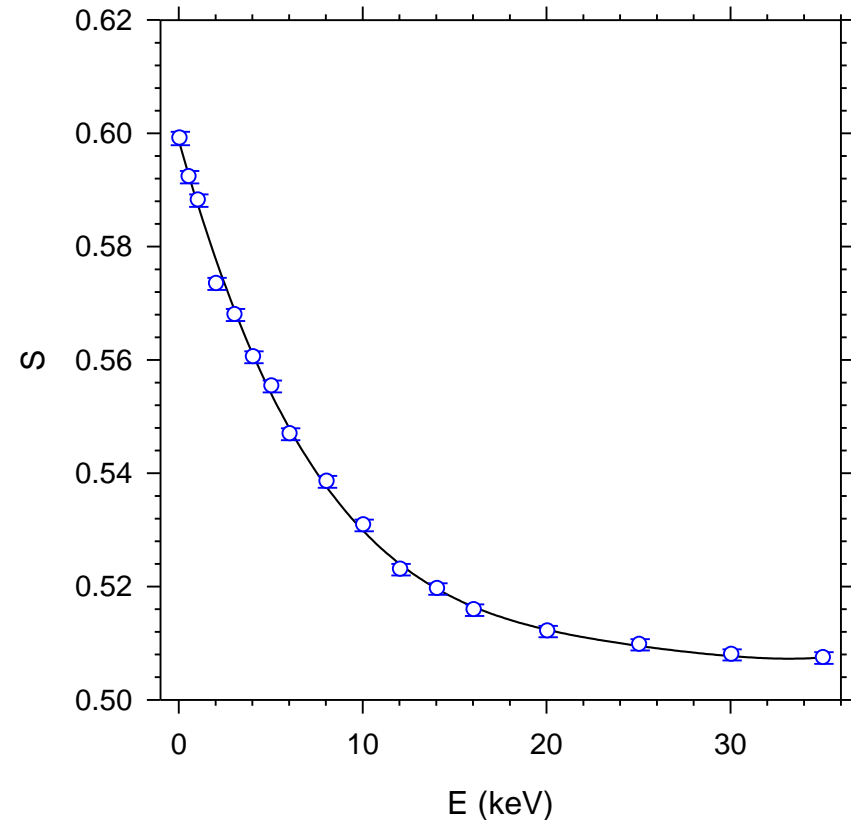
3- γ anihilace o-Ps

- DB měření na svazku pomalých pozitronů s laditelnou energií
- vzorek: čisté Fe

***F* - parametr**

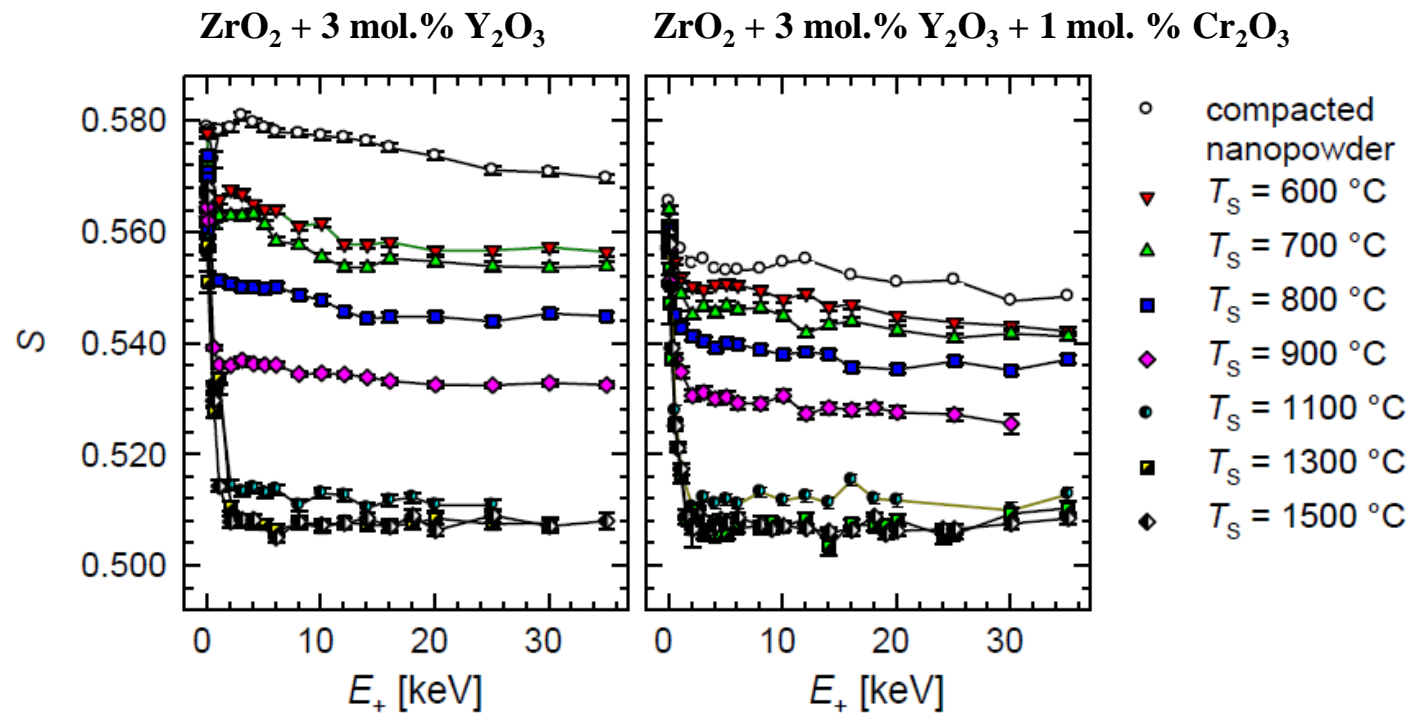
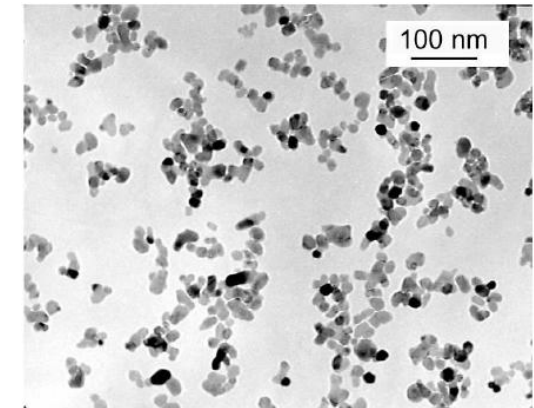


***S* - parametr**



Sintrování nanoprášků na bázi ZrO_2

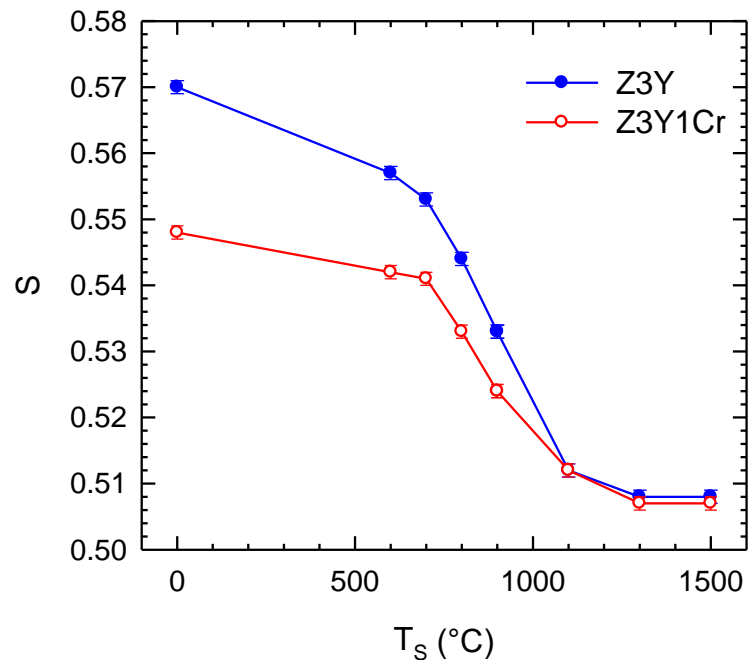
- DB měření na svazku pomalých pozitronů s laditelnou energií
- úbytek porozity během sintrování



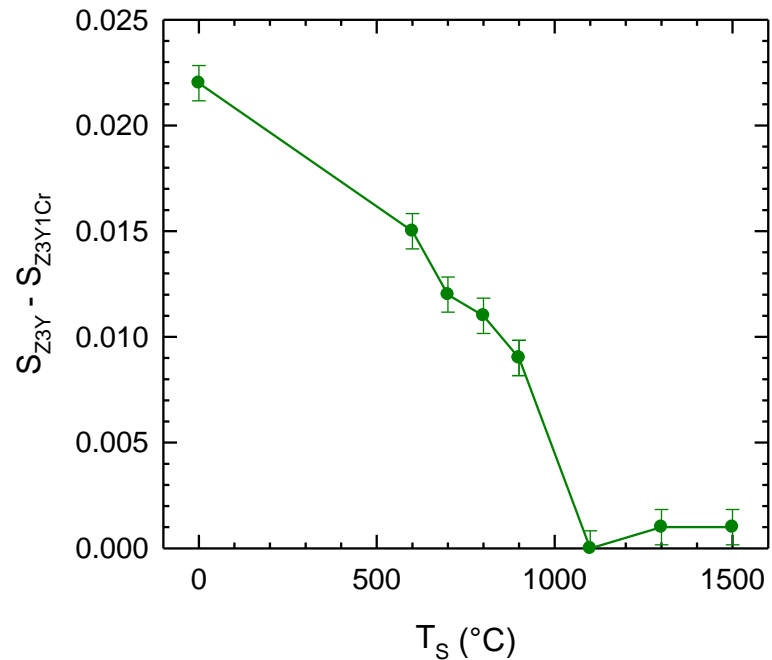
Sintrování nanoprášků na bázi ZrO_2

- $\text{ZrO}_2 + 3 \text{ mol.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3$ (Z3Y)
- $\text{ZrO}_2 + 3 \text{ mol.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3 + 1 \text{ mol.}\% \text{ Cr}_2\text{O}_3$ (Z3Y1C)

objemové hodnoty S -parametru



rozdíl



Sintrování nanoprášků na bázi ZrO_2

• F - parametr

