

*Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»*

# **Моделирование экспериментов с нейтронами и нейтрино в задачах фундаментальной физики на реакторах**

**А.К. Фомин**

Специальность 01.04.01 – "Приборы и методы экспериментальной физики"

Научный консультант –  
член-корреспондент РАН А.П. Серебров

Семинар Отдела Экспериментальной Физики  
Институт ядерных исследований Российской академии наук  
Троицк, 11 февраля 2020 г.

# Содержание

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Среднемировое время жизни нейтрона
2. Эксперимент МАМВО I
3. Эксперимент с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов
4. Источники ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия
5. Эксперимент с большой гравитационной ловушкой
6. Эксперимент по поиску электрического дипольного момента нейтрона
7. Поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций

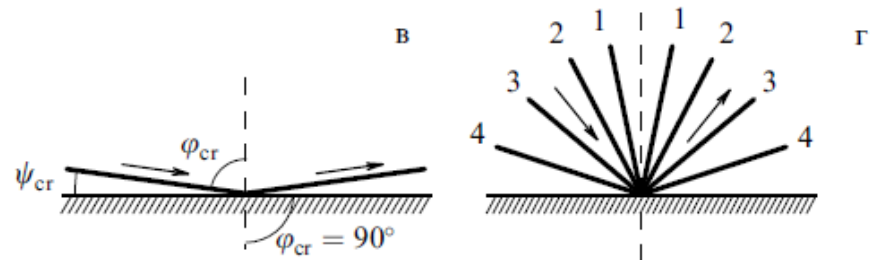
## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРИННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

1. Эксперимент “Нейтрино-4” по поиску стерильного нейтрино

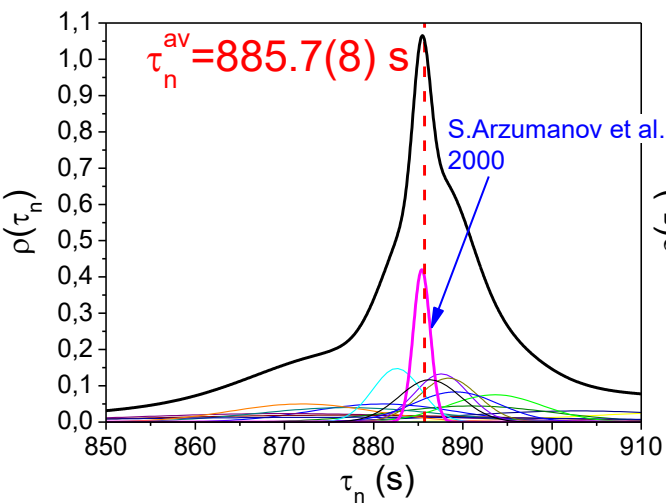
# Ультрахолодные нейтроны

| Нейтроны       | Энергия $E$ , эВ            | Скорость $v$ , см/с | Ср. длина волны $\lambda$ , см | Средняя температура $T_{\text{ср}}$ , К |
|----------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|
| Быстрые        | $> 10^5$                    | $> 1,4 \cdot 10^9$  | $< 10^{-12}$                   | $10^{10}$                               |
| Медленные      |                             |                     |                                |                                         |
| промежуточные  | $10^4 - 10^3$               | $1,4 \cdot 10^3$    | $3 \cdot 10^{-11}$             | $10^8$                                  |
| резонансные    | $0,5 - 10^4$                | $1,4 \cdot 10^7$    | $3 \cdot 10^{-10}$             | $10^6$                                  |
| Тепловые       | $0,5 - 5 \cdot 10^{-3}$     | $2 \cdot 10^5$      | $2 \cdot 10^{-8}$              | 300                                     |
| Холодные       | $5 \cdot 10^{-3} - 10^{-7}$ | $4,4 \cdot 10^4$    | $9 \cdot 10^{-8}$              | 10                                      |
| Ультрахолодные | $10^{-7}$                   | $4,4 \cdot 10^2$    | $9 \cdot 10^{-6}$              | $10^{-3}$                               |

| Материал | $E_b, 10^{-7}$ эВ | $v_b, \text{м с}^{-1}$ |
|----------|-------------------|------------------------|
| Al       | 0,55              | 3,2                    |
| Mg       | 0,605             | 3,36                   |
| Cu       | 1,72              | 5,7                    |
| C        | 1,94              | 6,1                    |
| Be       | 2,40              | 6,8                    |
| Fe       | 3,4 и 0,8         | 7,95 и 4,37            |
| Co       | 1,66 и -0,488     | 5,56 и 0               |
| Ni       | 2,806 и 2,074     | 7,23 и 6,21            |

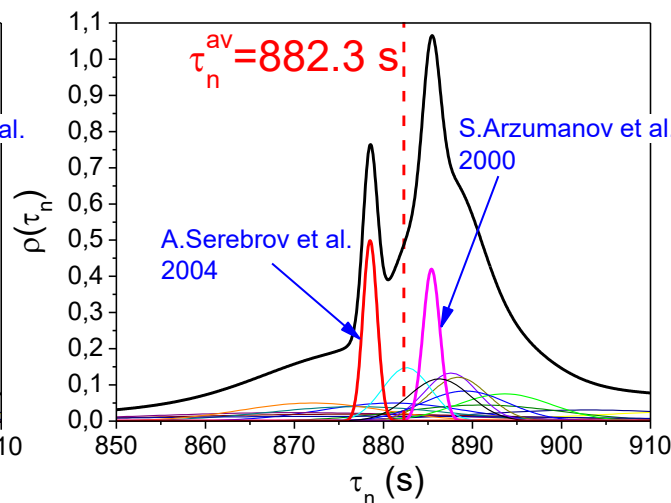


# Измерение времени жизни нейтрона



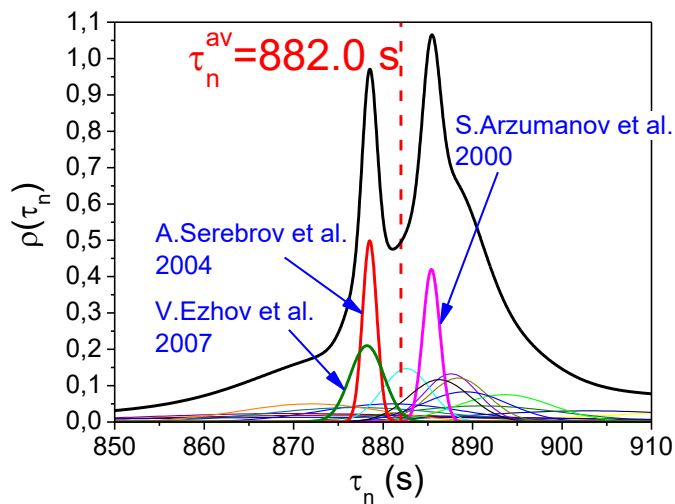
2003

до эксперимента  
с гравитационной ловушкой



2004

после эксперимента  
с гравитационной ловушкой



2007

после эксперимента  
с магнитной ловушкой

| Lifetime $\tau$ [s]     | Ref./Year                    |
|-------------------------|------------------------------|
| $878.2 \pm 1.9$         | V. Ezhov et al. 2007         |
| $878.5 \pm 0.8$         | A. Serebrov et al. 2004      |
| $886.3 \pm 3.42$        | M.S. Dewey et al. 2003       |
| $885.4 \pm 0.95$        | S. Arzumanov et al. 2000     |
| $889.2 \pm 4.8$         | J. Byrne et al. 1996         |
| $882.6 \pm 2.7$         | W. Mampe et al. 1993         |
| $888.4 \pm 3.1 \pm 1.1$ | V. Nesvizhevski et al. 1992  |
| $893.6 \pm 3.8 \pm 3.7$ | J. Byrne et al. 1990         |
| $887.6 \pm 3.0$         | W. Mampe et al. 1989         |
| $872 \pm 8$             | A. Kharitonov et al. 1989    |
| $878 \pm 27 \pm 14$     | R. Kossakowski et al. 1989   |
| $877 \pm 10$            | W. Paul et al. 1989          |
| $891 \pm 9$             | P. Spivac et al. 1988        |
| $876 \pm 10 \pm 19$     | J. Last et al. 1988          |
| $870 \pm 17$            | M. Arnold et al. 1987        |
| $903 \pm 13$            | Y.Y. Kosvintsev et al. 1986  |
| $937 \pm 18$            | J. Byrne et al. 1980         |
| $881 \pm 8$             | L. Bondarenko et al. 1978    |
| $918 \pm 14$            | C.J. Christensen et al. 1972 |

## Neutron Lifetime Measured with Stored Ultracold Neutrons

W. Mampe and P. Ageron

*Institut Laue-Langevin, 156X, 38042 Grenoble CEDEX, France*

C. Bates

*Universities Research Reactor, Risley, Warrington WA3 6AT, United Kingdom*

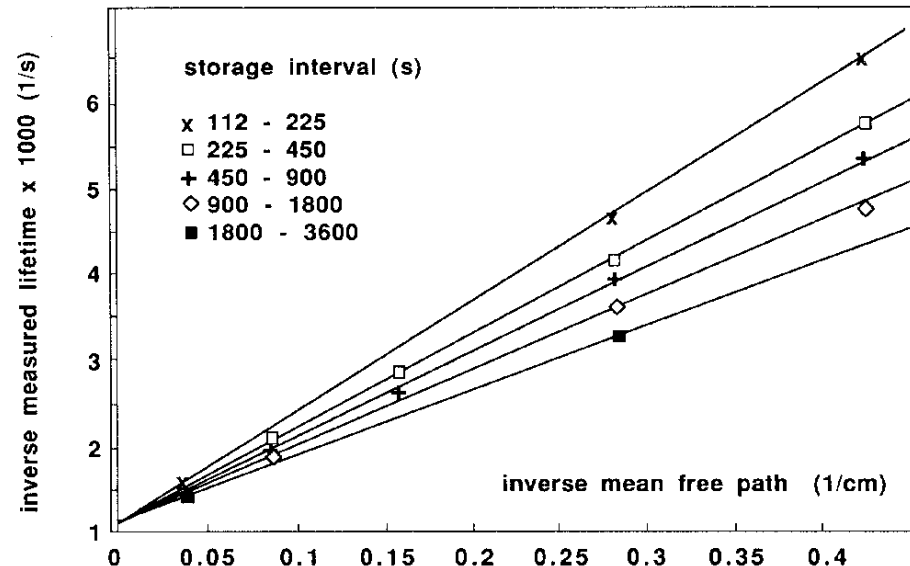
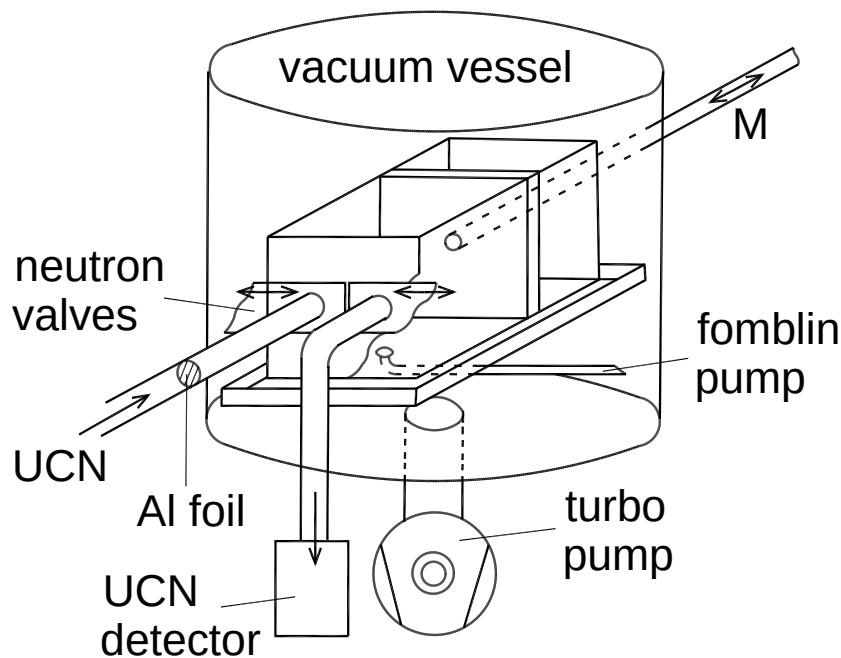
J. M. Pendlebury

*University of Sussex, Brighton BN1 9QH, United Kingdom*

A. Steyerl

*University of Rhode Island, Kingston, Rhode Island 02881*

$$\tau_n = 887.6 \pm 3 \text{ s}$$



А.К. Фомин, программа для ЭВМ №2018617809. Программа для моделирования хранения ультрахолодных нейтронов в ловушке с учетом квазиупругого рассеяния на стенках

# Квазиупругое рассеяние УХН

S.K.Lamoreaux et al., Phys. Rev. C 66, 044309 (2002)

S.K.Lamoreaux et al., nucl-ex/0612004v3

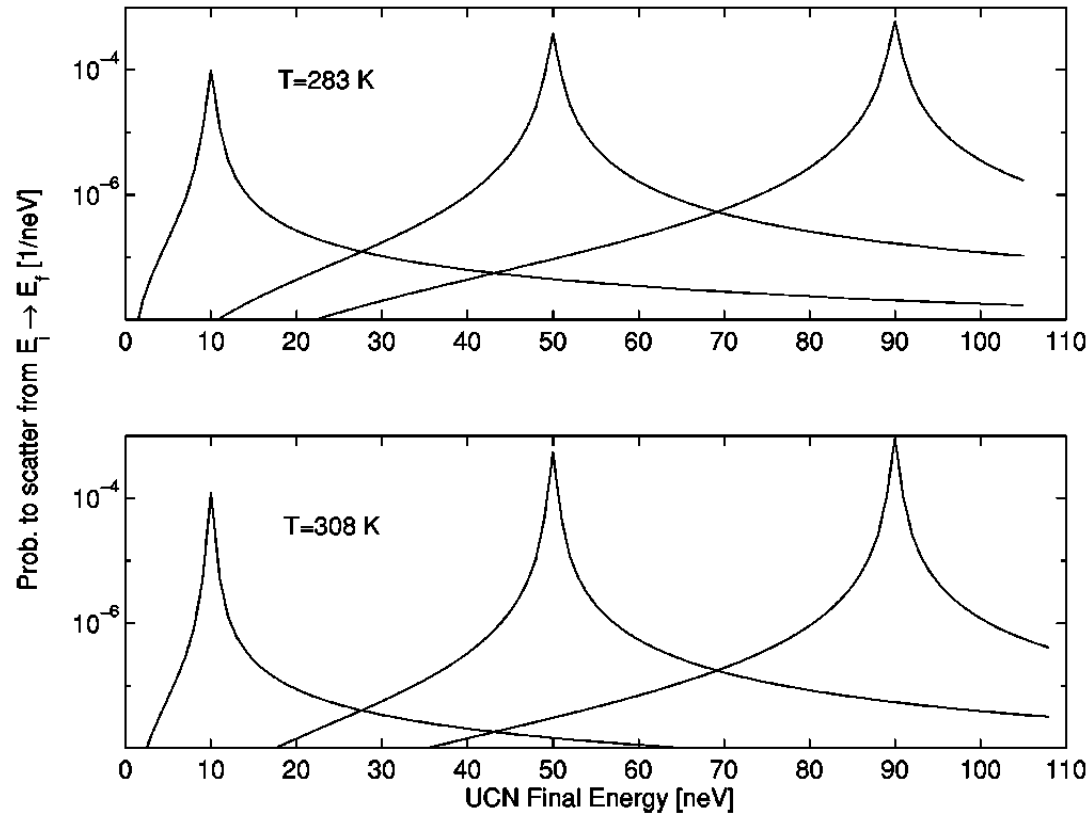


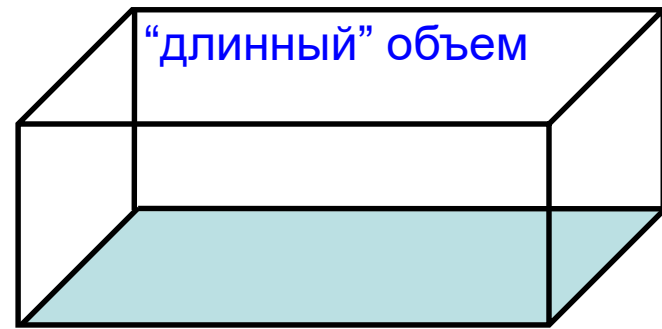
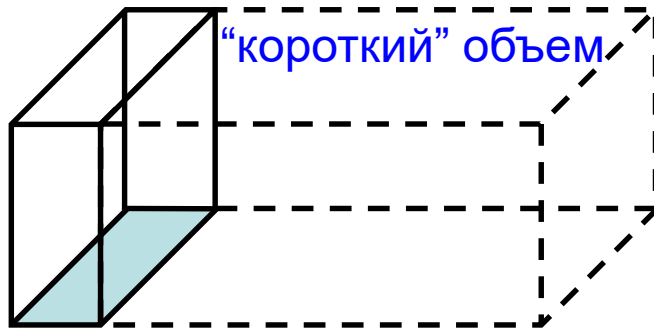
FIG. 13. The probability for UCN to upscatter or downscatter, per neV final energy, for three different UCN initial energies. These results are similar to those presented in [9,10].

$$P(E_i \rightarrow E_f) \delta E_f = E_i (\alpha_1 e^{-\beta_1 |E_i - E_f|} + \alpha_2 e^{-\beta_2 \sqrt{|E_i - E_f|}}) \delta E_f$$

$$\alpha_1 = 10^{-8} \text{ cm}^{-1}, \beta_1 = 0.065 \text{ cm}^{-1}, \alpha_2 = 10^{-5} \text{ cm}^{-5}, \beta_2 = 2 \text{ cm}^{-0.5} \text{ (T=283 K)}$$

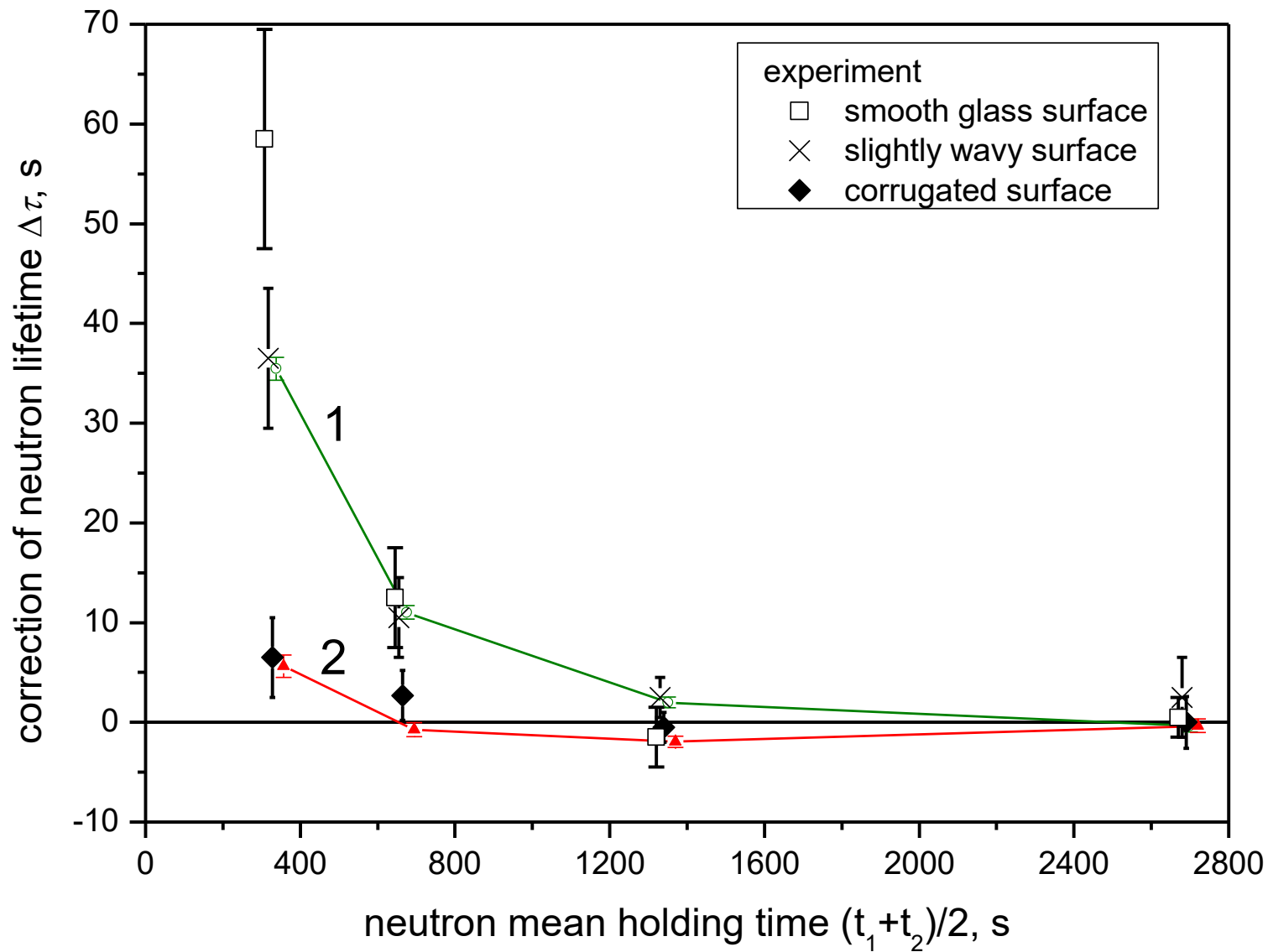
## Особенности хранения нейтронов в ловушках разной длины

scaling:  $\frac{t_2(i)}{t_2(j)} = \frac{t_1(i)}{t_1(j)} = \frac{\lambda(i)}{\lambda(j)} = \frac{t_2(i) - t_1(i)}{t_2(j) - t_1(j)}$



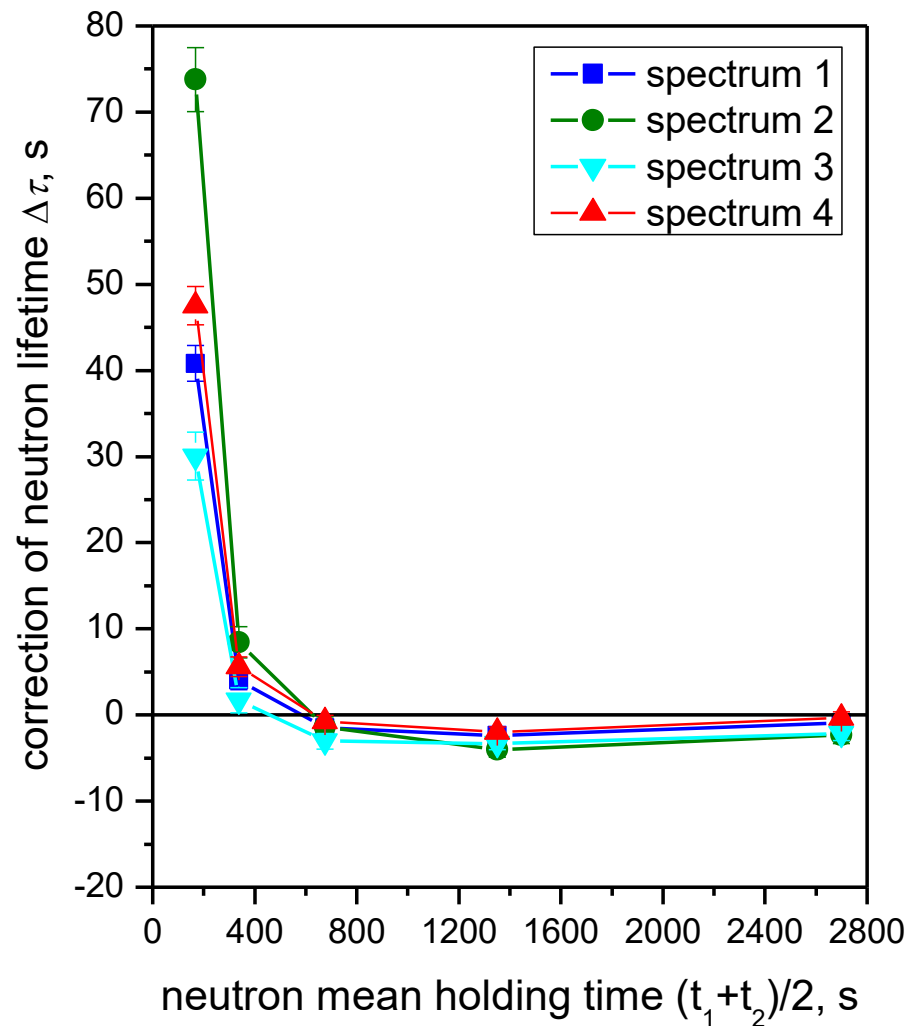
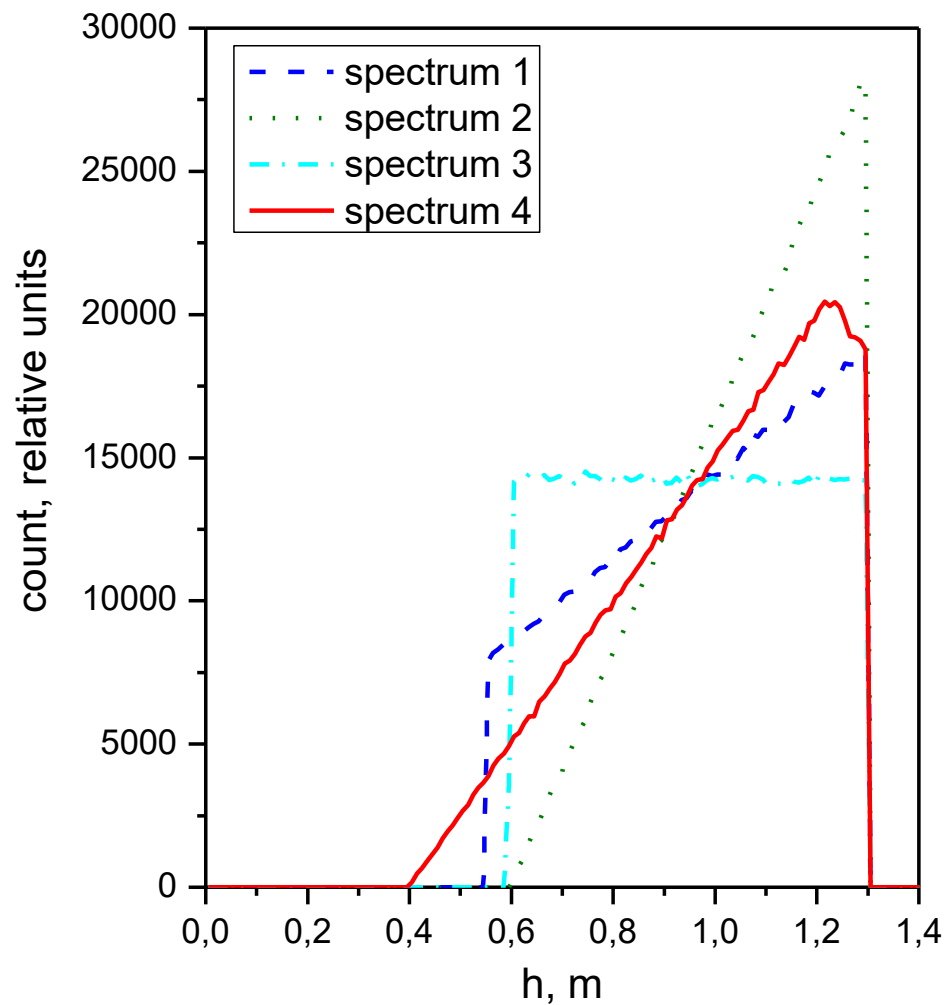
- 1) потери больше в “длинном” объеме
- 2) чистка от надбарьерных нейтронов медленнее в “коротком” объеме

## Сравнение с экспериментом

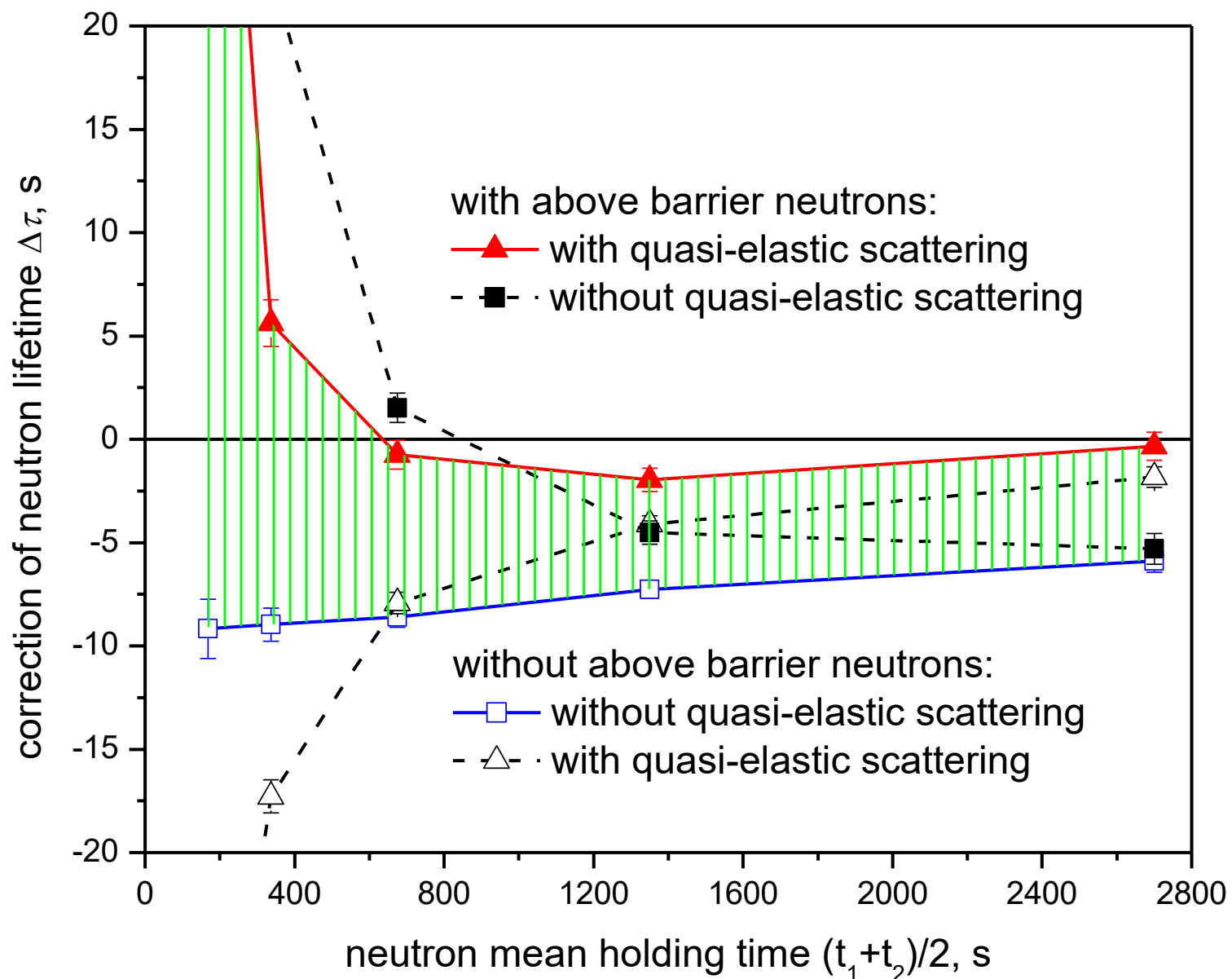




## Результаты моделирования с разными начальными спектрами



# Новая поправка результата эксперимента МАМВО I из-за надбарьерных нейтронов и квазиупругого рассеяния



# Новая поправка результата эксперимента МАМВО I из-за надбарьерных нейтронов и квазиупругого рассеяния

| интервал<br>хранения, с | $\tau_n$ , с | $\Delta\tau_n$ , с | $\tau_n'$ , с |
|-------------------------|--------------|--------------------|---------------|
| 112.5-225               | 891(10)      |                    |               |
| 225-450                 | 888.5(4)     |                    |               |
| 450-900                 | 889.2(2.5)   | -7.84 (0.87)       | 881.36 (2.65) |
| 900-1800                | 887.0(1.5)   | -5.29 (0.70)       | 881.71 (1.65) |
| 1800-3600               | 887.1(2.6)   | -5.54 (0.87)       | 881.56 (2.74) |

887.6(1.1)



881.6(1.2)

$\tau_n = 881.6 \pm 3.0$  с

Поправка результата эксперимента  $-6.0 \pm 1.6$  с

# Эксперимент МАМВО I

При помощи разработанной компьютерной модели проведен анализ эксперимента по измерению времени жизни нейтрона МАМВО I, включающий в себя эффект квазиупругого рассеяния УХН на поверхности жидкого фомблина, который был открыт после проведения эксперимента. Получена поправка к экспериментальному результату, которая составляет  $-6.0 \pm 1.6$  с.

A.P. Serebrov, A.K. Fomin, JETP Lett. 90 (2009) 555

1. 6th International Workshop "Ultra Cold & Cold Neutrons. Physics & Sources", Saint-Petersburg, Russia, 1-7 of July 2007

<http://cns.pnpi.spb.ru/6UCN/proceed.html>

2. 7th International Workshop "Ultra Cold & Cold Neutrons. Physics & Sources", Saint-Petersburg, Russia, 8-14 of June 2009

<http://cns.pnpi.spb.ru/7UCN/proceed.html>

# Эксперимент с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов

Physics Letters B 483 (2000) 15–22

## 1) Neutron life time value measured by storing ultracold neutrons with detection of inelastically scattered neutrons

S. Arzumanov <sup>a</sup>, L. Bondarenko <sup>a</sup>, S. Chernyavsky <sup>a</sup>, W. Drexel <sup>b</sup>, A. Fomin <sup>a</sup>,  
P. Geltenbort <sup>b</sup>, V. Morozov <sup>a</sup>, Yu. Panin <sup>a</sup>, J. Pendlebury <sup>c</sup>, K. Schreckenbach <sup>d</sup>

<sup>a</sup> RRC Kurchatov Institute, 123182, Moscow, Russia

<sup>b</sup> Institute Laue Langevin, BP 156, F-38042 Grenoble Cedex 9, France

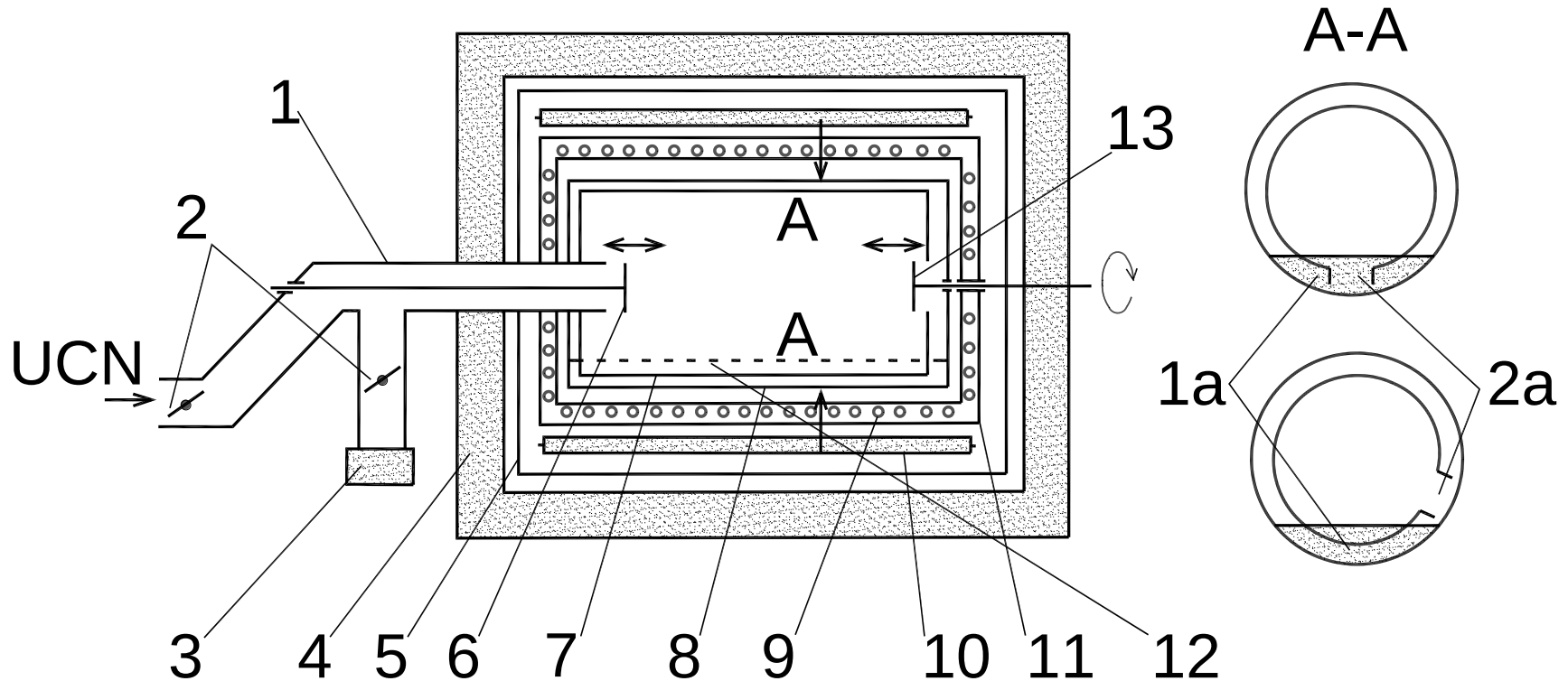
<sup>c</sup> University of Sussex, Brighton BN1 9QJ, Sussex, UK

<sup>d</sup> Technical University of Munich, D-85747 Garching, Germany

## 2) А.И. Фомин, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук “Измерение времени жизни нейтрона методом хранения УХН с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов” Курчатовский Институт, Москва, 2000

$$\tau_n = 885.4 \pm 0.9_{\text{стат}} \pm 0.4_{\text{сист}} \text{ с}$$

# Экспериментальная установка



1 - подводящий нейтроновод, 2 - заслонки УХН, 3 - детектор УХН, 4 - борированный полиэтилен, 5 - кадмиевый чехол, 6 - заслонка внутреннего сосуда, 7 - внутренний сосуд, 8 - внешний сосуд, 9 - змеевик охлаждения, 10 - счетчик тепловых нейтронов, 11 - вакуумный кожух, 12 - уровень масла, 13 - заслонка зазора, 1а - уровень масла, 2а - щель.

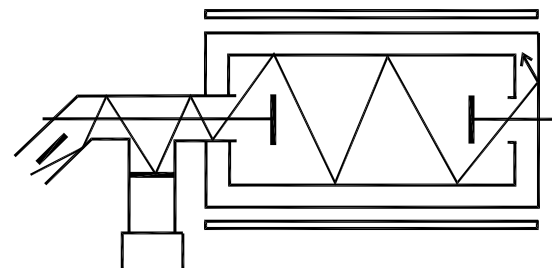
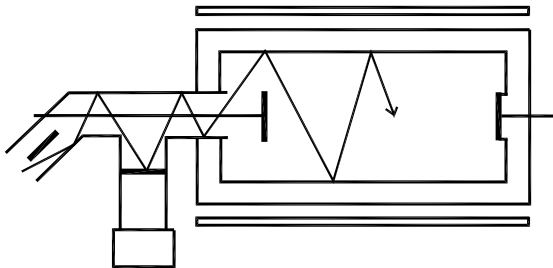
*А.К. Фомин, программа для ЭВМ №2018618893. Программа для моделирования эксперимента с регистрацией ультрахолодных нейтронов неупруго рассеянных при взаимодействии со стенками сосудов*

# Измерительная процедура

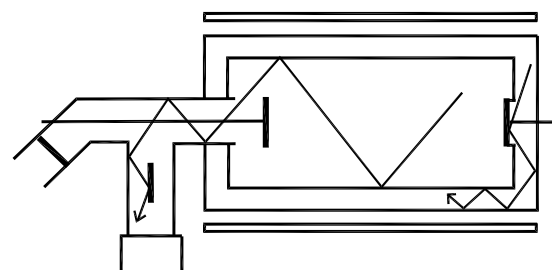
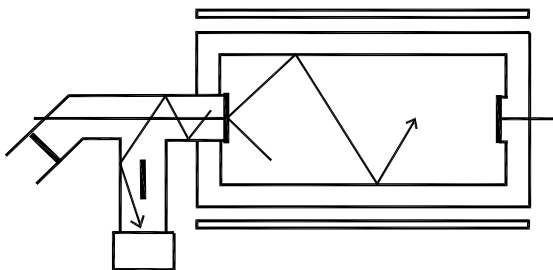
измерение с  
внутренним сосудом

измерение с  
зазором

наполнение

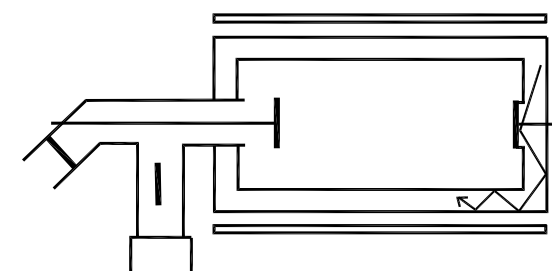
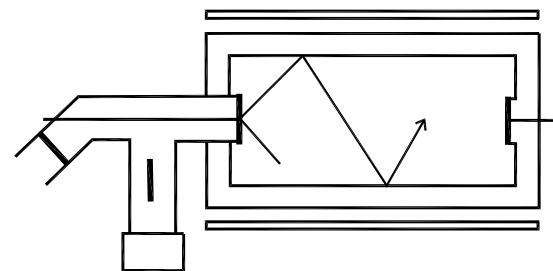


чистка



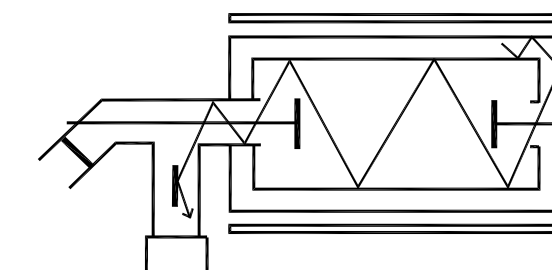
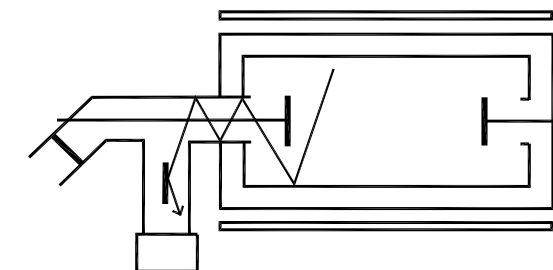
$N_i$

хранение



$J$

регистрация



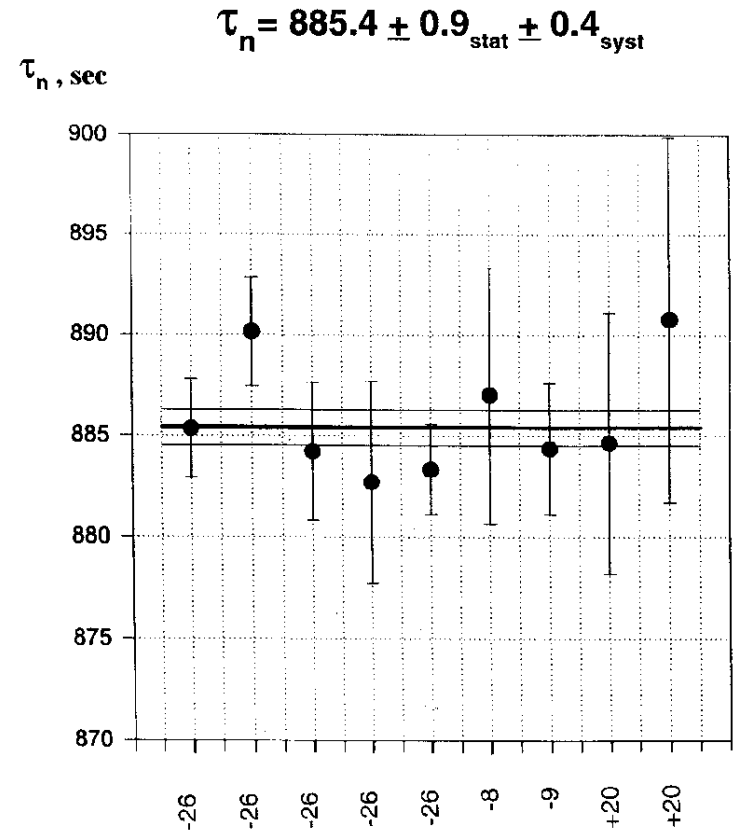
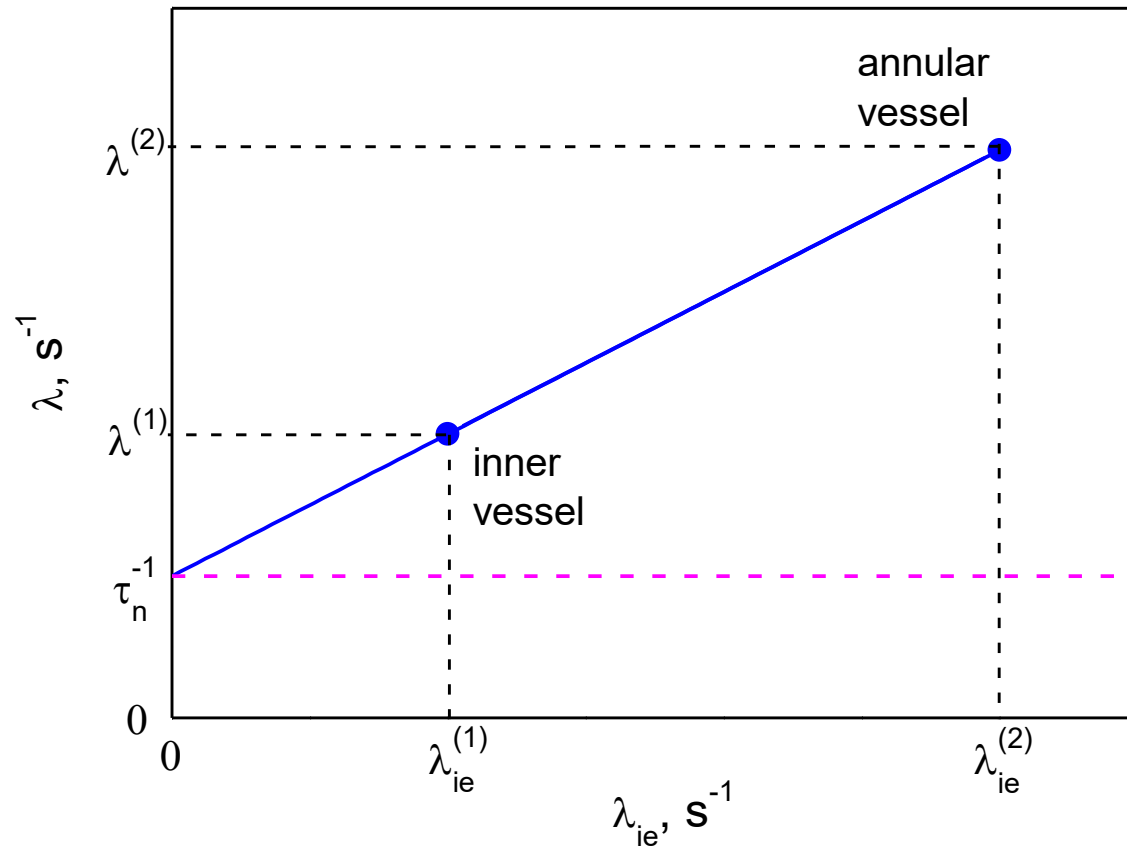
$N_f$

# Метод эксперимента

$$\lambda = \lambda_n + \lambda_{\text{loss}} = \lambda_n + \lambda_{\text{ie}} + \lambda_{\text{cap}} = \lambda_n + a\lambda_{\text{ie}}$$

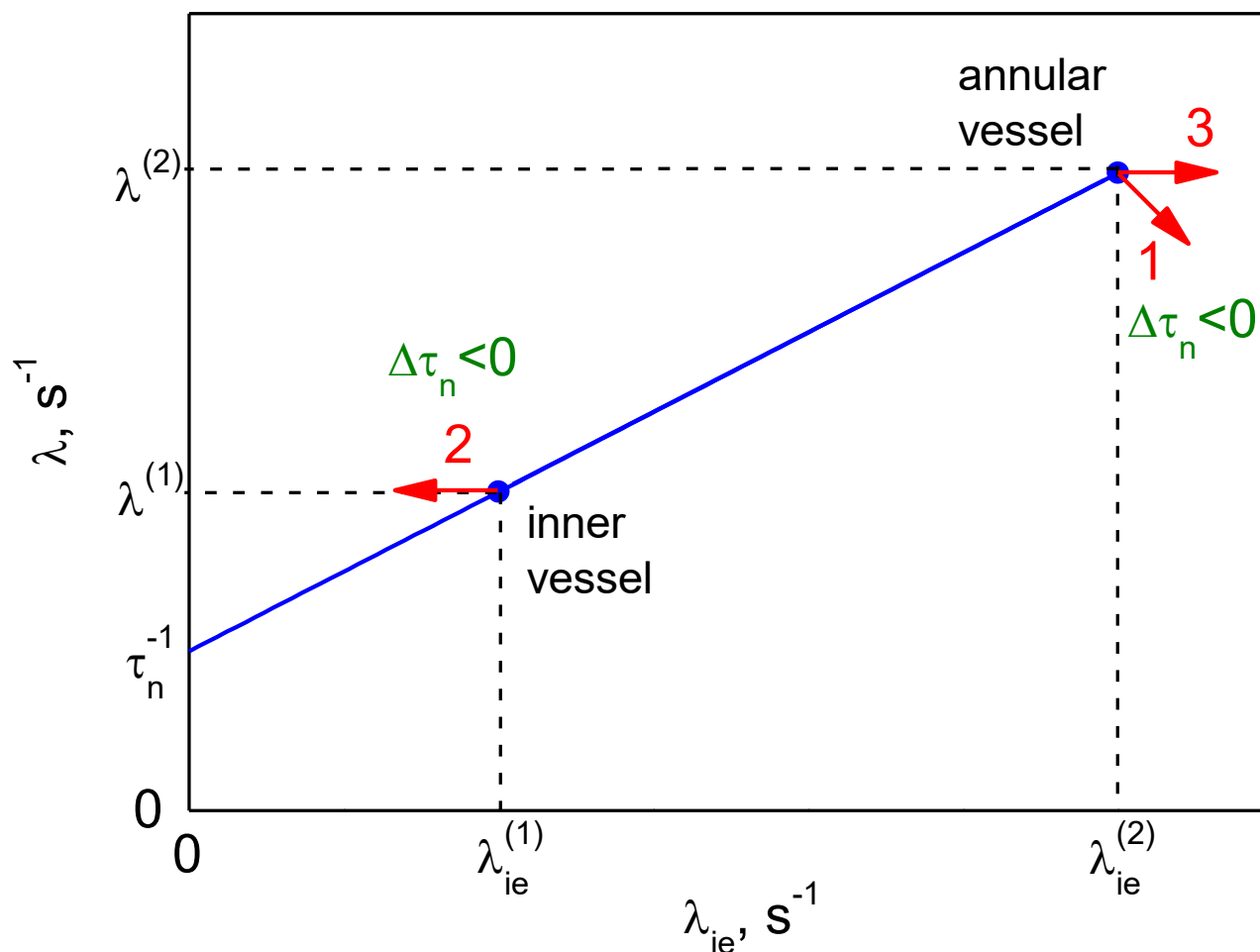
$$a = \lambda_{\text{loss}} / \lambda_{\text{ie}} = 1 + \sigma_{\text{cap}} / \sigma_{\text{ie}}$$

$$\lambda = \frac{1}{T} \ln(N_i / N_f) \quad \lambda_{\text{ie}} = \frac{J\lambda}{N_i - N_f} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{th}}}$$



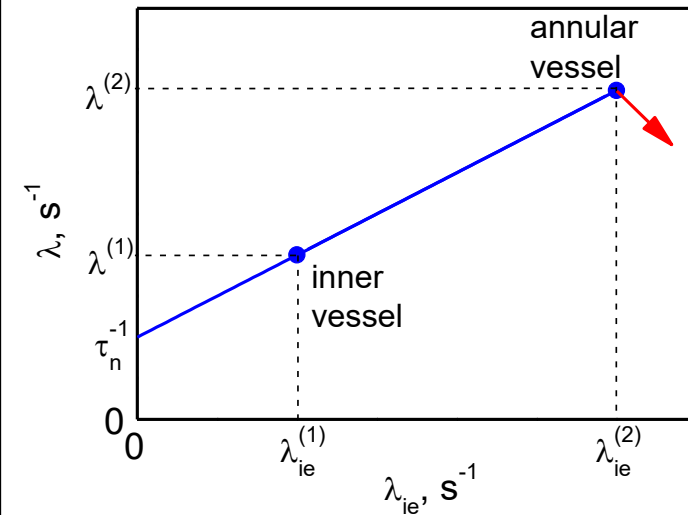
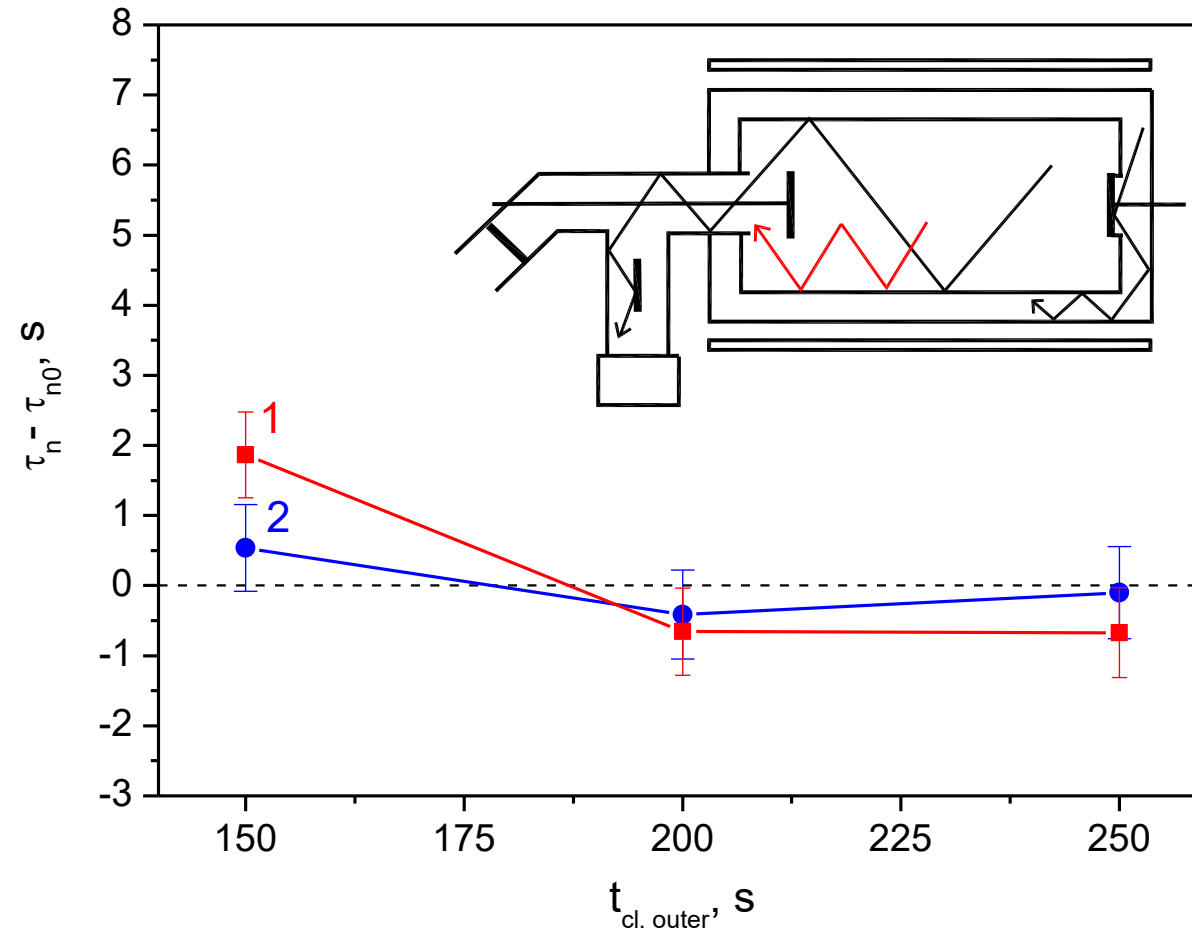


# Влияние изученных эффектов на результат измерения времени жизни нейтрона



- 1 – эффект неполного вытекания из внутреннего сосуда при измерениях с зазором
- 2 – эффект нагрева УХН заслонками
- 3 – эффект различной эффективности детектора тепловых нейтронов для разных сосудов

# Эффект неполного вытекания из внутреннего сосуда при измерениях с зазором



$$\lambda = \frac{1}{T} \ln(N_i / N_f)$$

$$\lambda_{ie} = \frac{J \lambda}{N_i - N_f} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{th}}$$

1 – длина нейтропровода перед детектором УХН 0.8 м

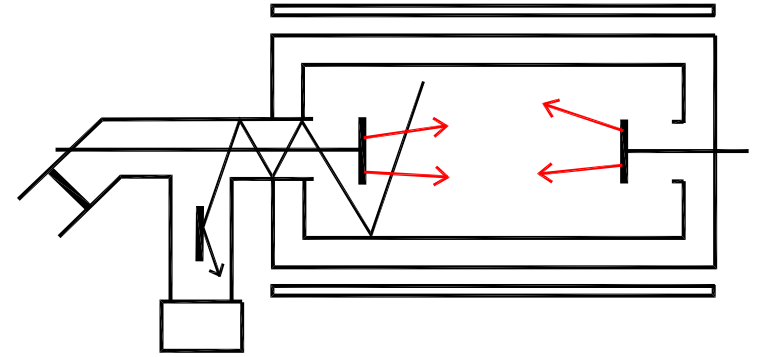
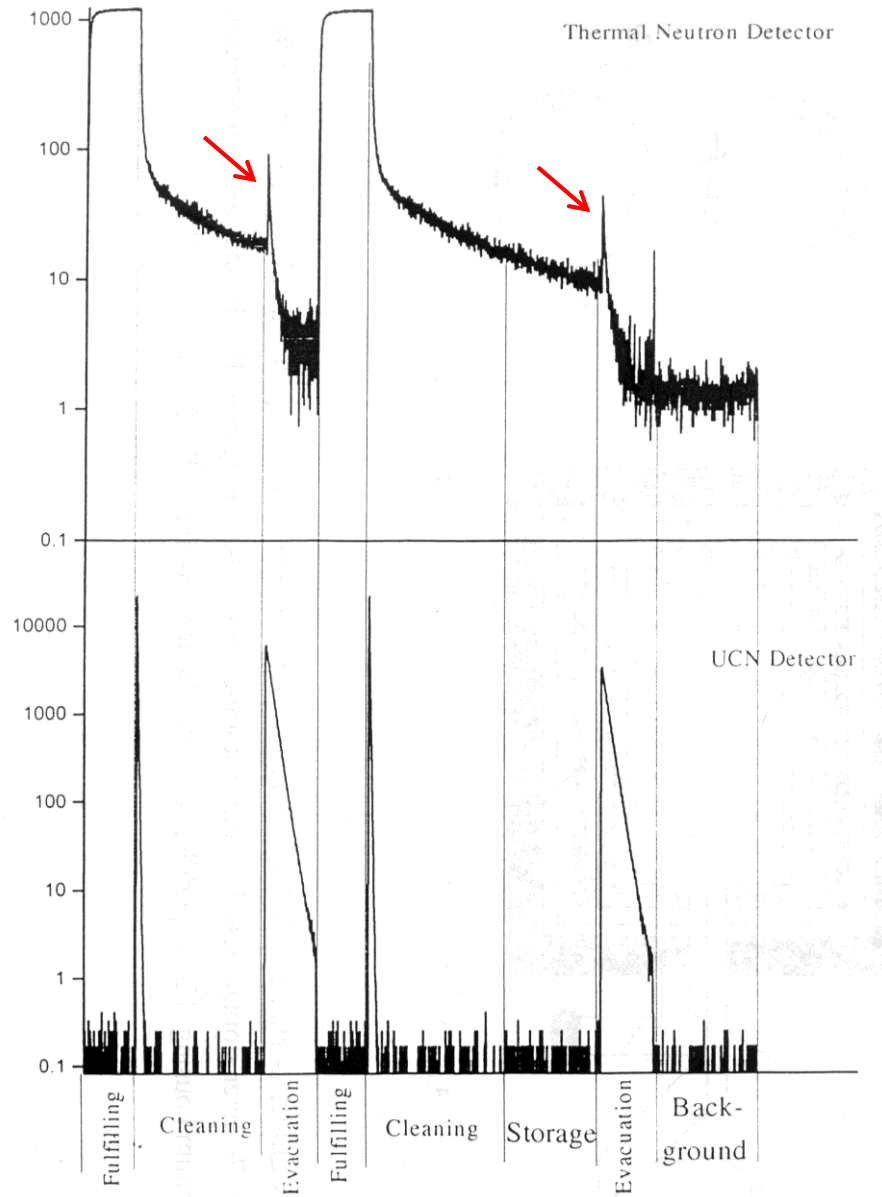
2 – длина нейтропровода перед детектором УХН 1 м

Для времен чистки спектра более 200 с поправки нет.

Ошибка результата эксперимента из-за неопределенности параметров 1 с.

# Эффект нагрева УХН заслонками

The First UCN Workshop, Пушкин, Россия, 1998



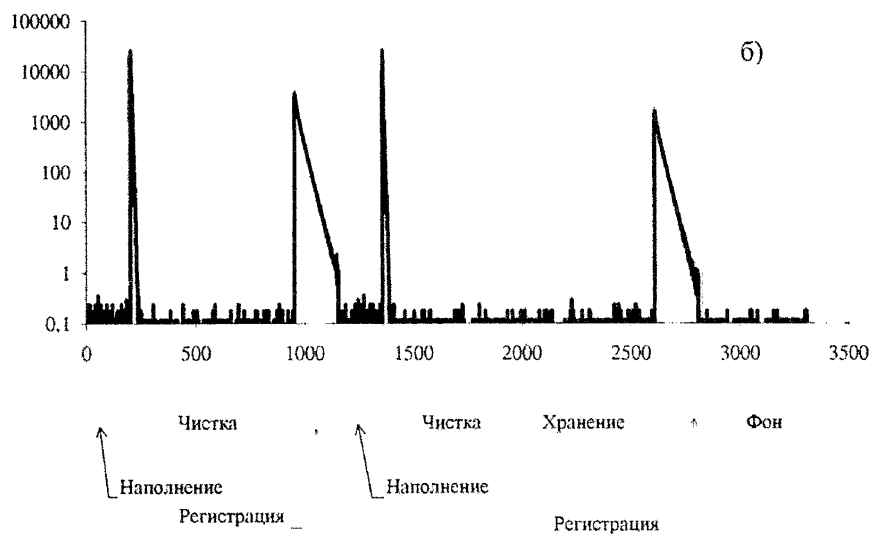
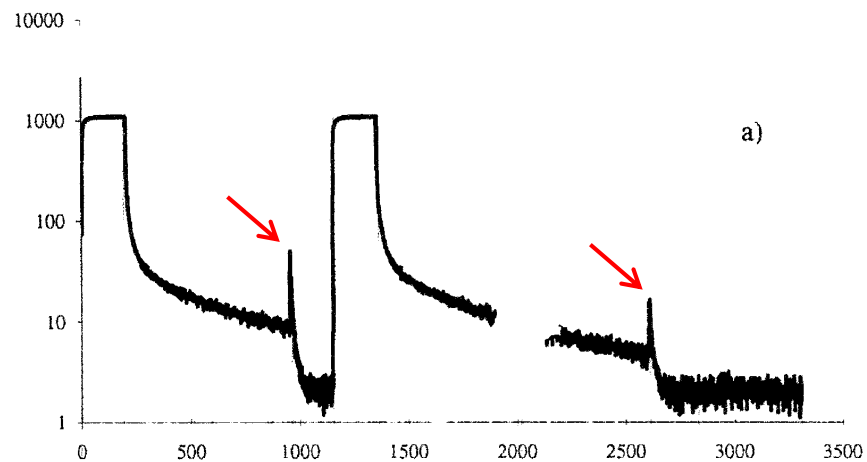


Рисунок 9. Скорости счета детектора нагретых нейтронов (а) и детектора УХН (б) в зависимости от времени при хранении во внутреннем сосуде.

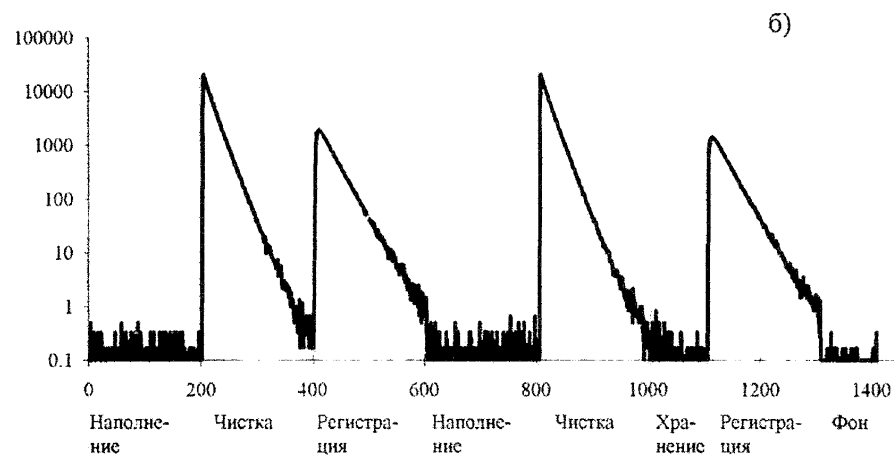
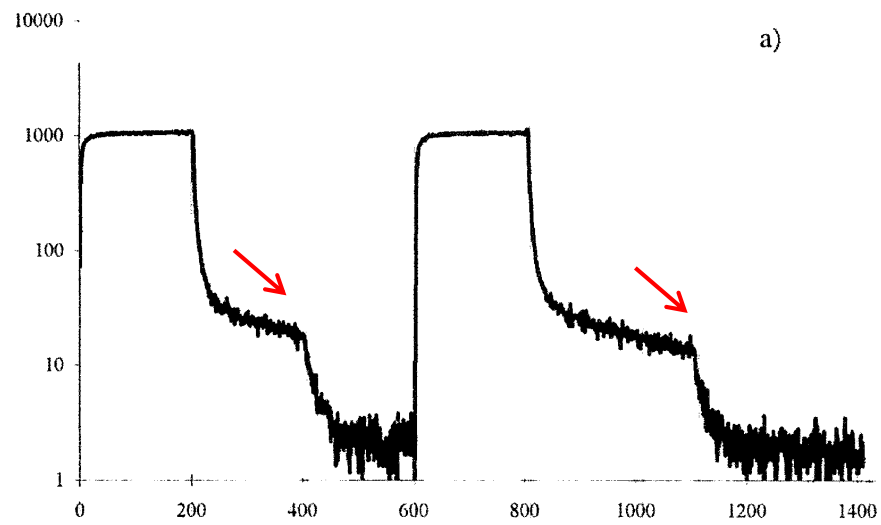
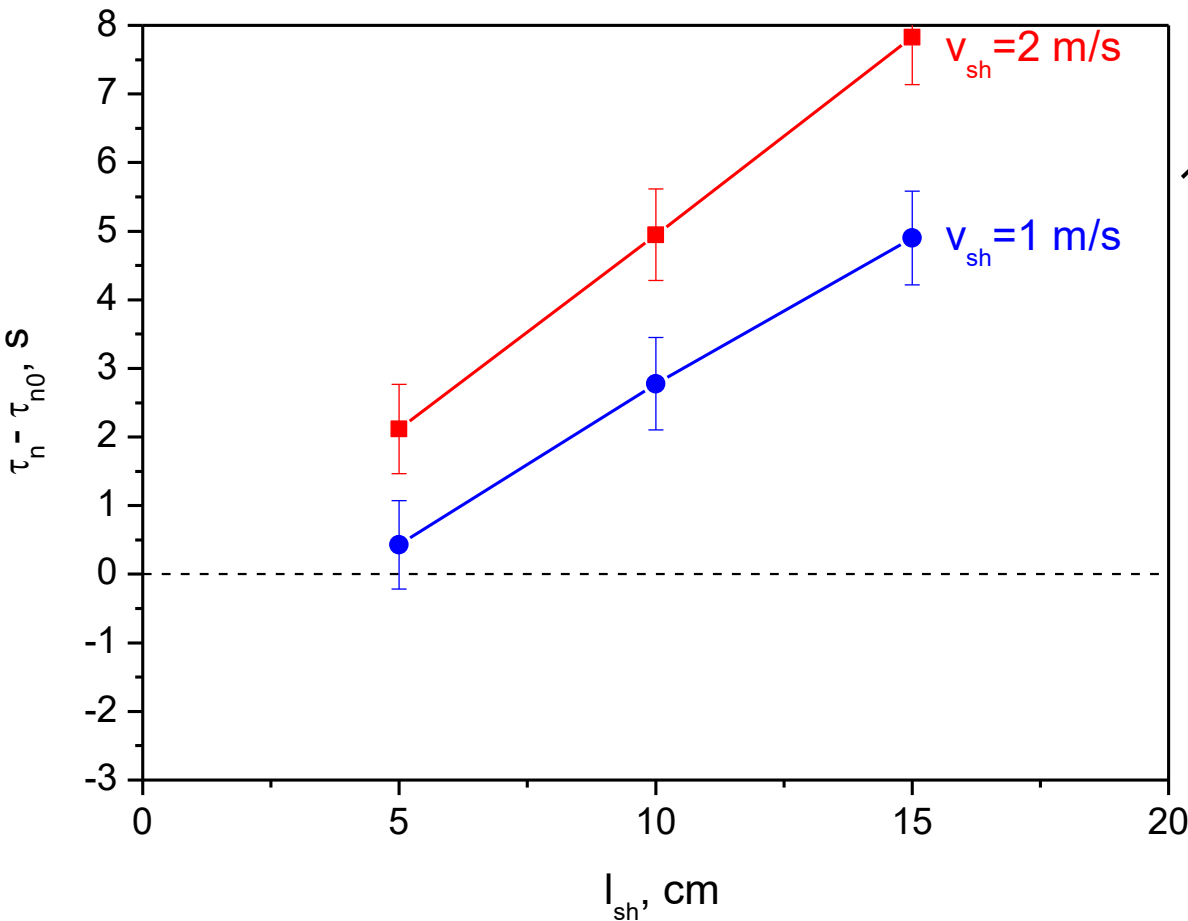


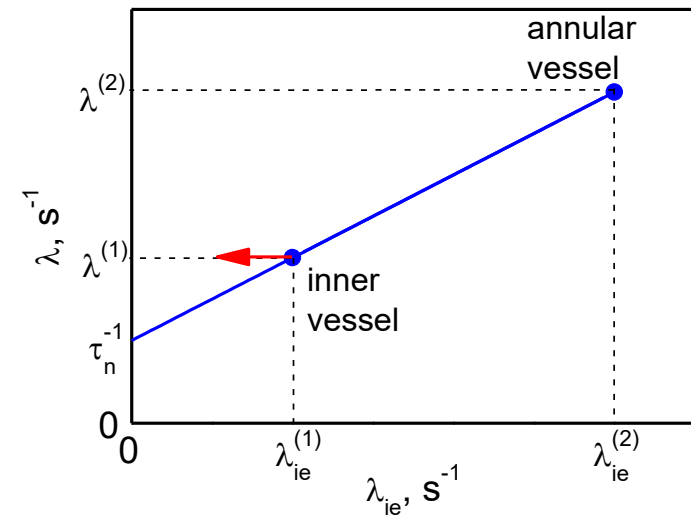
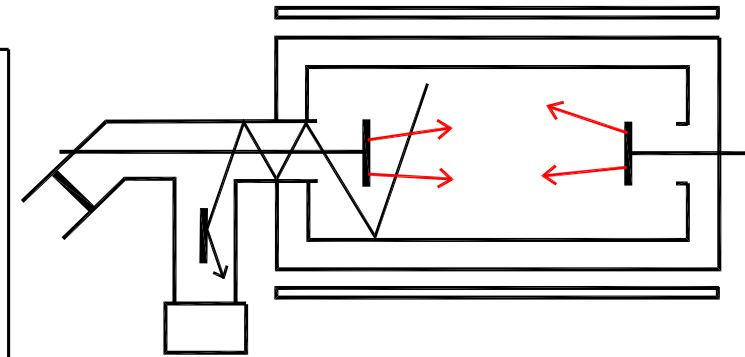
Рис.10. Скорости счета детектора нагретых нейтронов (а) и детектора УХН (б) в зависимости от времени при хранении в зазоре (усреднение по 17 циклам).

А.И. Фомин, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
Курчатовский Институт, Москва, 2000

# Эффект нагрева УХН заслонками



Вычисления для скорости заслонки УХН  
1 и 2 м/с; для хода заслонки 5, 10 и 15 см.

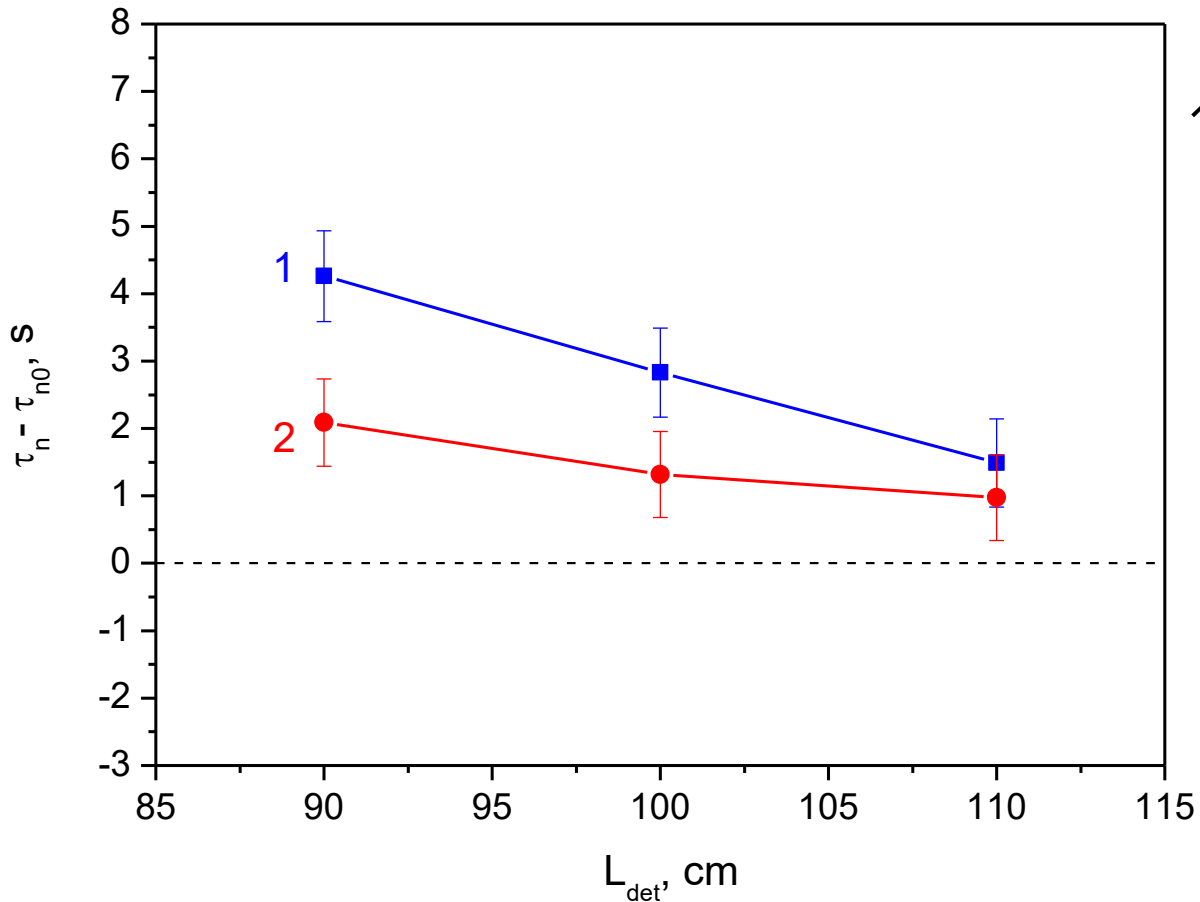


$$\lambda = \frac{1}{T} \ln(N_i / N_f)$$

$$\lambda_{ie} = \frac{J \lambda}{N_i - N_f} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{th}}$$

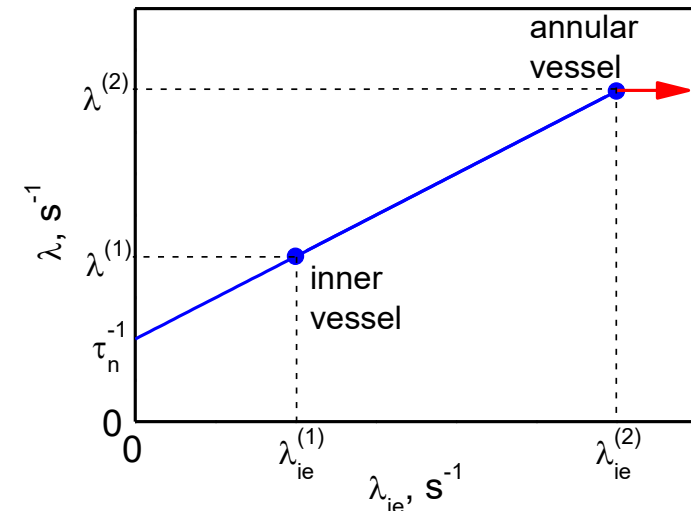
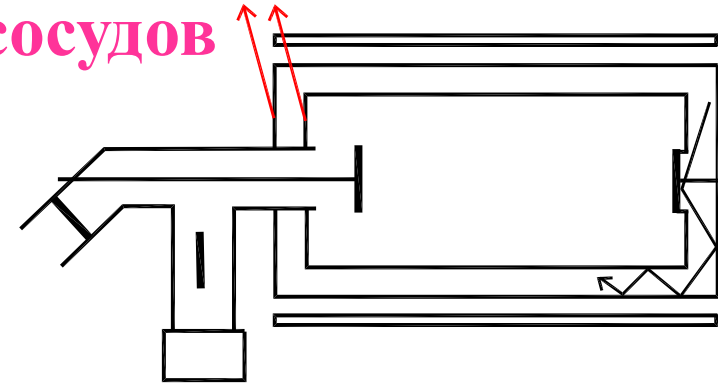
Поправка составляет -2.9 с для скорости заслонки 1 м/с и хода заслонки 10 см.  
Ошибка результата эксперимента из-за неопределенности параметров 2 с.

# Эффект различной эффективности детектора тепловых нейтронов для разных сосудов



- 1 – без поглощения и рассеяния  
2 – с поглощением и рассеянием

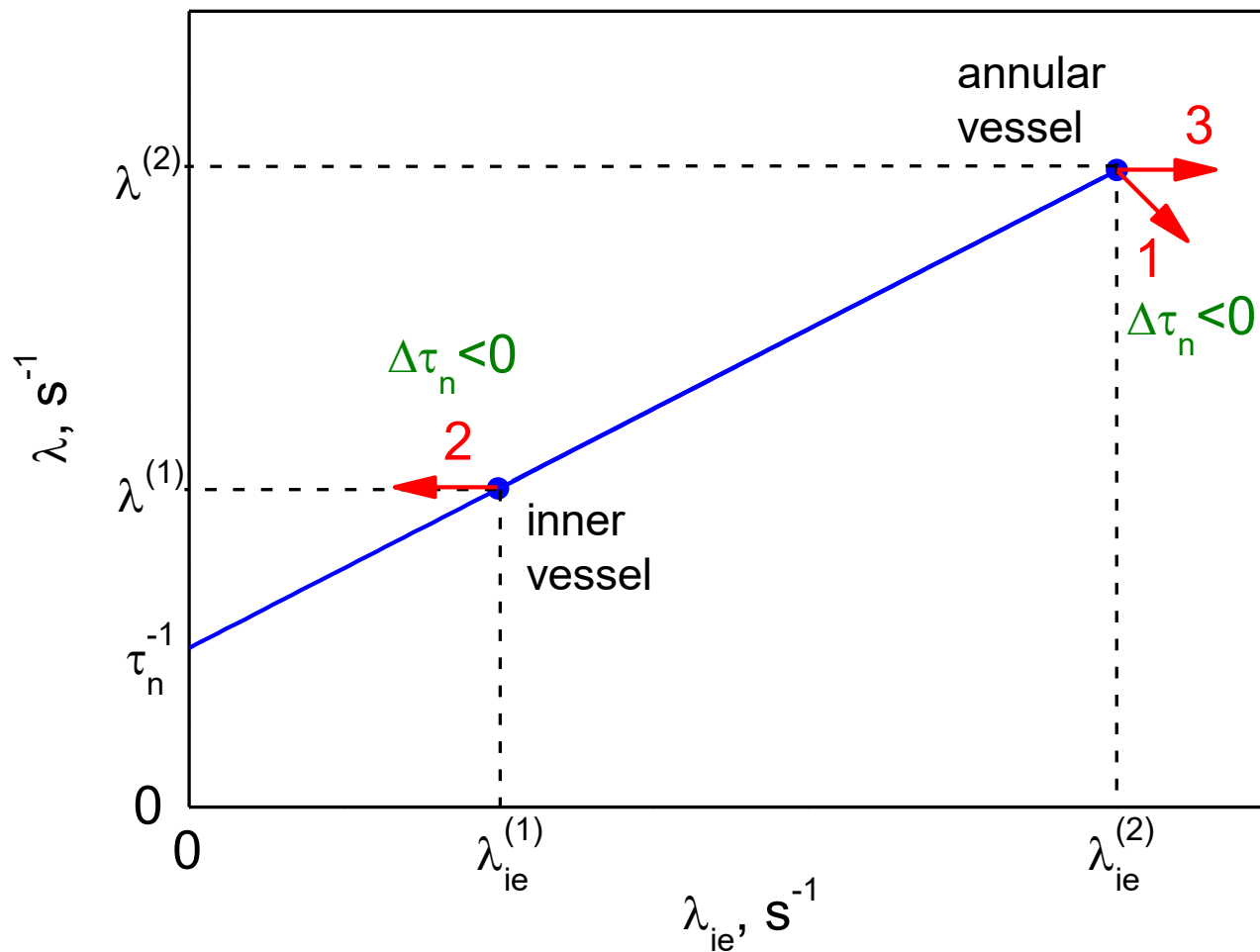
Поправка составляет -2.1 с для длины счетчика тепловых нейтронов 90 см.  
Ошибка результата эксперимента из-за неопределенности параметров 1 с.



$$\lambda = \frac{1}{T} \ln(N_i / N_f)$$

$$\lambda_{ie} = \frac{J \lambda}{N_i - N_f} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{th}}$$

# Влияние изученных эффектов на результат измерения времени жизни нейтрона



Все рассмотренные эффекты дают отрицательную поправку для результата эксперимента.

# Монте Карло поправка к результату измерения времени жизни нейтрона в эксперименте с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов

|                                                                                                                    | поправка, с | ошибка результата из-за неопределенности параметров установки, с |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------------------------------------------------------------|
| эффект неполного вытекания из внутреннего сосуда при измерениях с зазором                                          | 0           | 1                                                                |
| эффект нагрева УХН заслонками                                                                                      | -2.8        | 2                                                                |
| эффект различной эффективности детектора тепловых нейтронов для разных сосудов                                     | -2.1        | 1                                                                |
| эффект различной эффективности детектора тепловых нейтронов для разных сосудов<br>(поправка в эксперименте +0.6 с) | -0.6        |                                                                  |
| <b>всего</b>                                                                                                       | <b>-5.5</b> | <b>2.4</b>                                                       |



# Эксперимент с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов

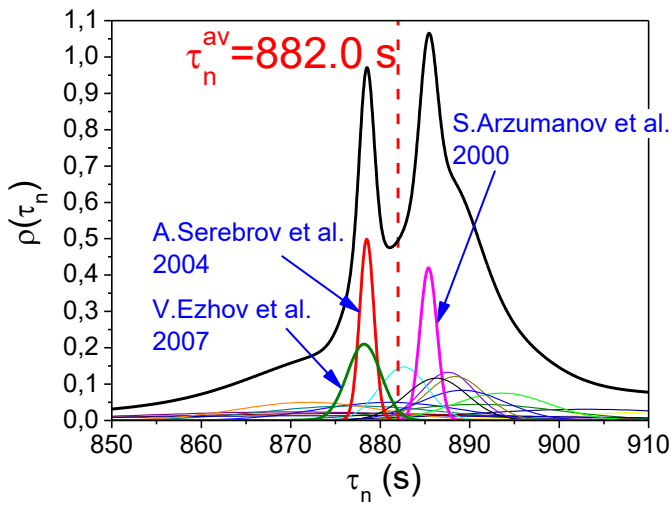
При помощи разработанной компьютерной модели проведен анализ эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов. За счет рассмотрения эффектов неполного вытекания из внутреннего объема во время чистки при работе с внешним объемом, нагрева нейтронов затворами и разной эффективности детектора тепловых нейтронов для разных объемов хранения получена поправка к экспериментальному результату, которая составляет  $-5.5 \pm 2.4$  с.

A.K. Fomin, A.P. Serebrov, JETP Lett. 92 (2010) 40

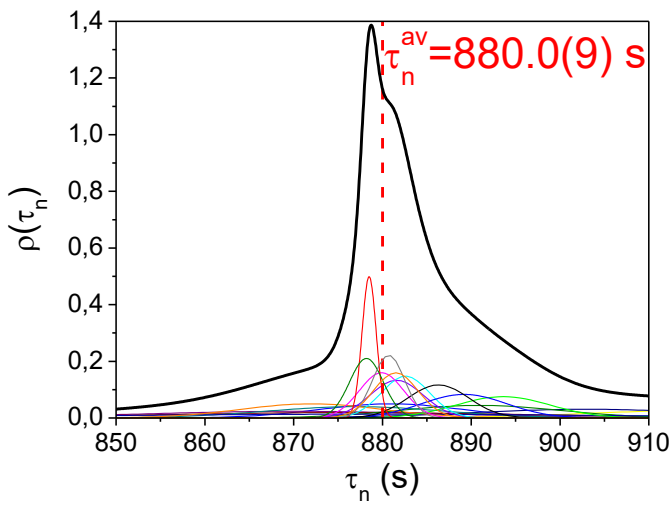
UCN2010, International Workshop on UCN and Fundamental Neutron Physics,  
RCNP, Japan, April 8 - 9, 2010

<http://fnp.kek.jp/workshop/20100408/proceedings/>

# Анализ с новыми экспериментальными данными и МК поправками 2010



2007  
после эксперимента  
с магнитной ловушкой

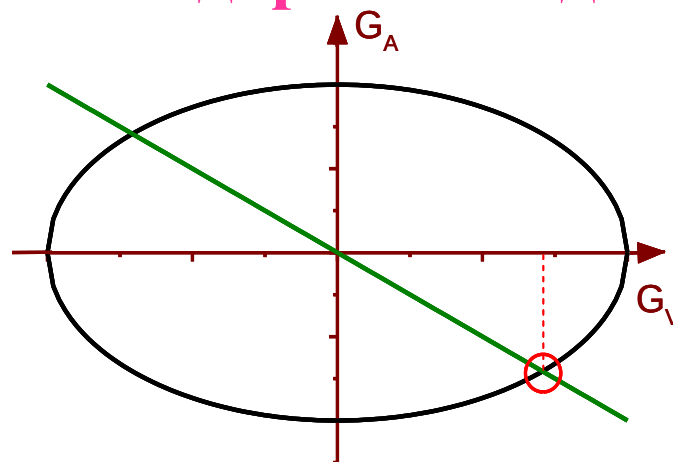
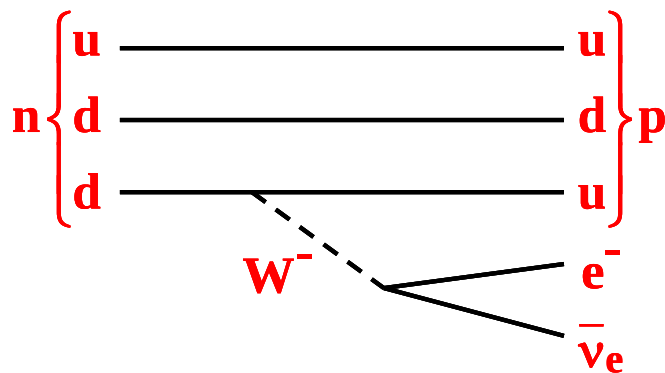


2010  
НОВЫЙ анализ

| Lifetime $\tau$ [s]       | Ref./Year                    |
|---------------------------|------------------------------|
|                           |                              |
| 878.2 $\pm$ 1.9           | V. Ezhov et al. 2007         |
| 878.5 $\pm$ 0.8           | A. Serebrov et al. 2004      |
| 886.3 $\pm$ 3.42          | M.S. Dewey et al. 2003       |
| 885.4 $\pm$ 0.95          | S. Arzumanov et al. 2000     |
|                           |                              |
| 889.2 $\pm$ 4.8           | J. Byrne et al. 1995         |
| 882.6 $\pm$ 2.7           | W. Mampe et al. 1993         |
| 888.4 $\pm$ 3.1 $\pm$ 1.1 | V. Nesvizhevski et al. 1992  |
| 893.6 $\pm$ 3.8 $\pm$ 3.7 | J. Byrne et al. 1990         |
| 887.6 $\pm$ 3.0           | W. Mampe et al. 1989         |
| 872 $\pm$ 8               | A. Kharitonov et al. 1989    |
| 878 $\pm$ 27 $\pm$ 14     | R. Kossakowski et al. 1989   |
| 877 $\pm$ 10              | W. Paul et al. 1989          |
| 891 $\pm$ 9               | P. Spivac et al. 1988        |
| 876 $\pm$ 10 $\pm$ 19     | J. Last et al. 1988          |
| 870 $\pm$ 17              | M. Arnold et al. 1987        |
| 903 $\pm$ 13              | Y.Y. Kosvintsev et al. 1986  |
| 937 $\pm$ 18              | J. Byrne et al. 1980         |
| 881 $\pm$ 8               | L. Bondarenko et al. 1978    |
| 918 $\pm$ 14              | C.J. Christensen et al. 1972 |

| Lifetime $\tau$ [s]       | Ref./Year                    |
|---------------------------|------------------------------|
| 881.5 $\pm$ 2.5           | S. Arzumanov et al. 2009     |
| 878.2 $\pm$ 1.9           | V. Ezhov et al. 2007         |
| 878.5 $\pm$ 0.8           | A. Serebrov et al. 2004      |
| 886.3 $\pm$ 3.42          | M.S. Dewey et al. 2003       |
| 879.9 $\pm$ 2.5           | S. Arzumanov et al. 2000     |
| 880.7 $\pm$ 1.8           | A. Pichlmaier et al. 2010    |
| 889.2 $\pm$ 4.8           | J. Byrne et al. 1995         |
| 882.6 $\pm$ 2.7           | W. Mampe et al. 1993         |
|                           |                              |
| 893.6 $\pm$ 3.8 $\pm$ 3.7 | J. Byrne et al. 1990         |
| 881.6 $\pm$ 3.0           | W. Mampe et al. 1989         |
| 872 $\pm$ 8               | A. Kharitonov et al. 1989    |
| 878 $\pm$ 27 $\pm$ 14     | R. Kossakowski et al. 1989   |
| 877 $\pm$ 10              | W. Paul et al. 1989          |
| 891 $\pm$ 9               | P. Spivac et al. 1988        |
| 876 $\pm$ 10 $\pm$ 19     | J. Last et al. 1988          |
| 870 $\pm$ 17              | M. Arnold et al. 1987        |
| 903 $\pm$ 13              | Y.Y. Kosvintsev et al. 1986  |
| 937 $\pm$ 18              | J. Byrne et al. 1980         |
| 881 $\pm$ 8               | L. Bondarenko et al. 1978    |
| 918 $\pm$ 14              | C.J. Christensen et al. 1972 |

# Распад нейтрона и Стандартная модель



CKM mixing matrix:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

$$G_V = G_F \cdot V_{ud}$$

$$ft(1 + \Delta_R)(1 + \delta_R) = \frac{k}{|V_{ud}|^2 G_F^2 (1 + 3\lambda^2)}$$

$\sim 1.5\%$       $\sim 2.4\%$

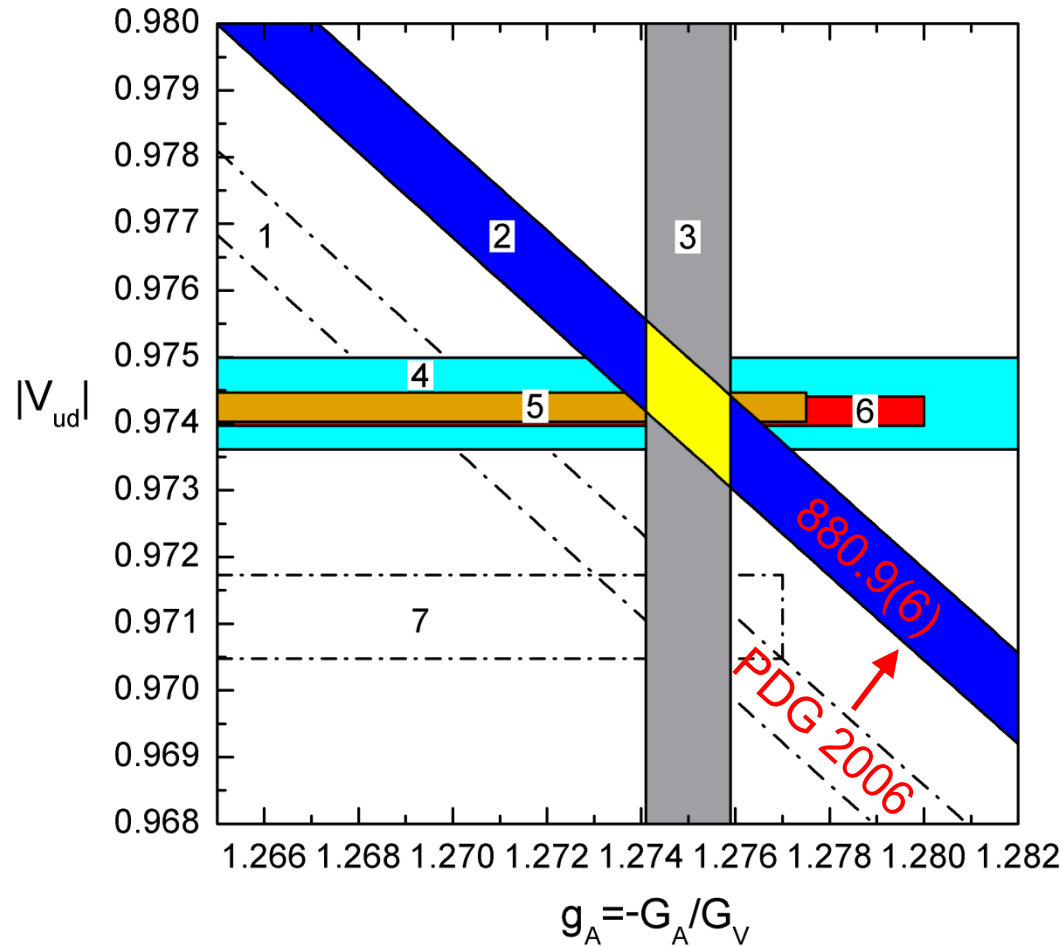
$$\lambda = \frac{G_A}{G_V} \quad A_0 = -2 \frac{\lambda(\lambda + 1)}{1 + 3\lambda^2}$$

$$|V_{ud}|^2 = \frac{4908.7 \pm 1.9 \text{ s}}{\tau_n (1 + 3\lambda^2)}$$

W. Marciano  
A. Sirlin  
PRL 96, 032002  
(2006)

**Required experimental accuracy for  $\tau_n$  and  $A$   
has to be about  $10^{-3}$  and better.**

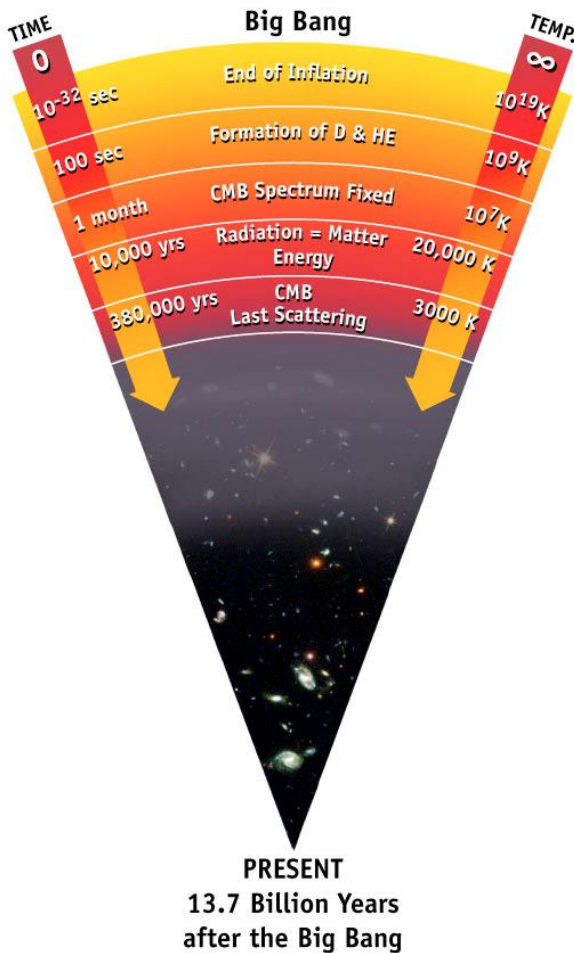
# Новое среднемировое значение времени жизни нейтрона подтверждает справедливость Стандартной модели



Dependence of the CKM matrix element  $|V_{ud}|$  on the values of the neutron lifetime and  $|\lambda|$ .  
 (1) neutron lifetime, PDG 2006; (2) neutron lifetime, 880.0(9) s; (3) neutron  $\beta$ -asymmetry, Perkeo 2007; (4) neutron  $\beta$ -decay, 880.0(9) s + Perkeo 2007; (5) unitarity; (6)  $0^+ \rightarrow 0^+$  nuclear transitions; (7) neutron  $\beta$ -decay, PDG 2006 + Perkeo 2007.

# Новое среднемировое значение времени жизни нейтрона лучше для модели Большого взрыва

G. J. Mathews, T. Kajino, T. Shima, Phys. Rev. D 71, 021302(R) (2005)



$$(f\tau_n)^{-1} = \frac{G_F^2}{2\pi^3} (1 + 3g_A^2) m_e^5$$

$$\Gamma = (7/60)\pi(1 + 3g_A^2)G_F^2 T^5$$

$$H \approx [(8/3)\pi G\rho_\gamma]^{1/2}$$

$$\rho_\gamma = (\pi^2/30)g_*T^4$$

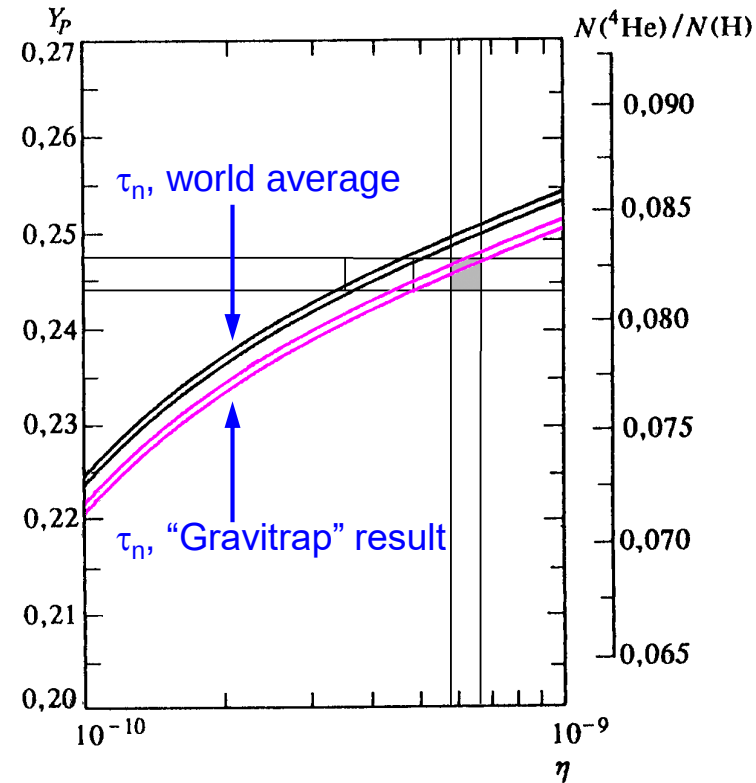
$$T_f \approx 1 \text{ MeV}$$

$$n/p = \exp\{-\Delta m/T_f\}$$

$$Y_p \approx 2n/(n + p) = 2(n/p)/(n/p + 1)$$

$$\Delta\tau_n = 1\% \rightarrow \Delta Y = 0.75\% (\pm 0.61\%)$$

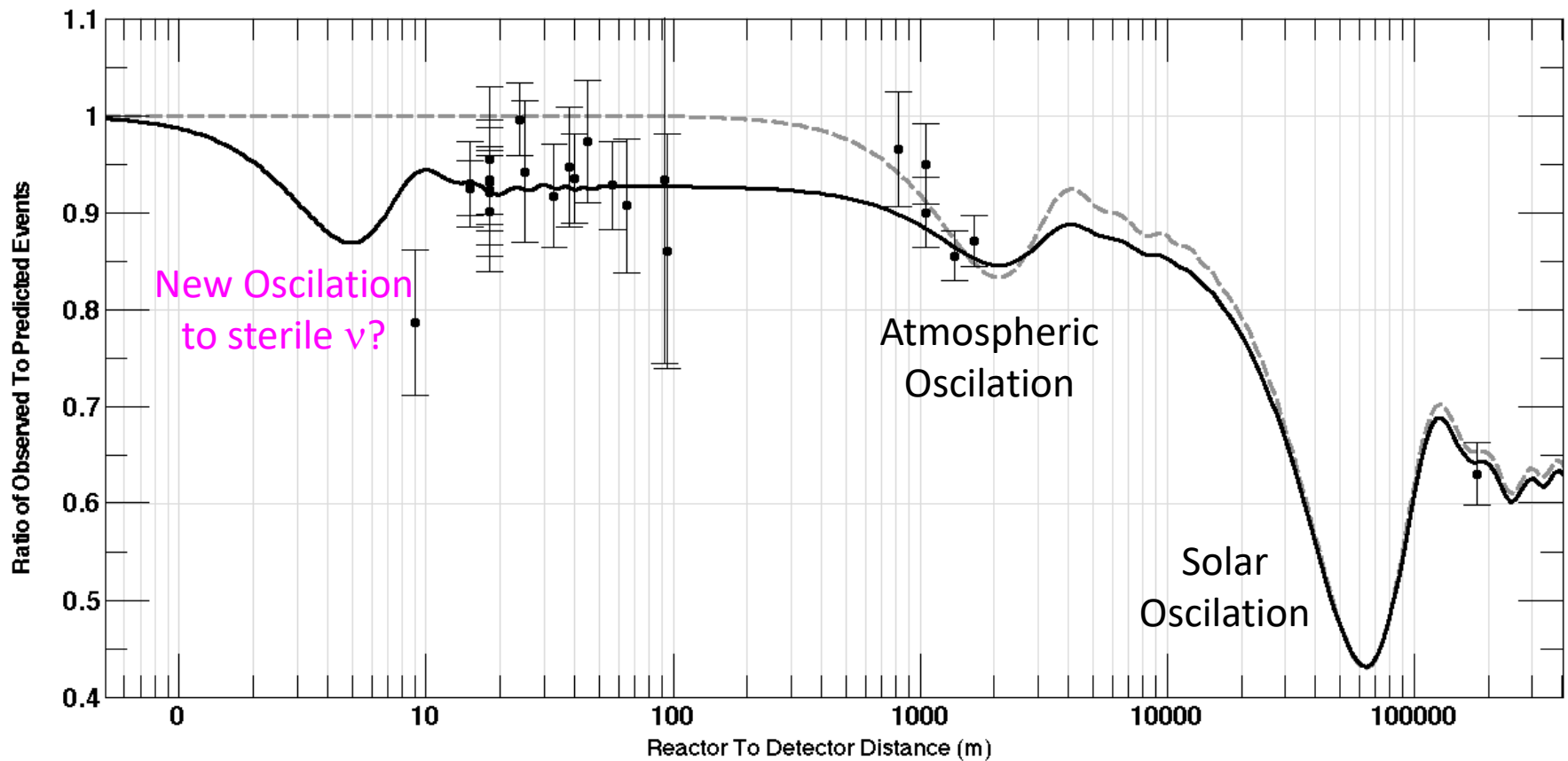
$$\Delta\tau_n = 1\% \rightarrow \Delta\eta = 17\% (\pm 3.3\%)$$



**New  $\tau_n = (878.5 \pm 0.8)$  s confirms  $n_b/n_\gamma$  from CMB.**

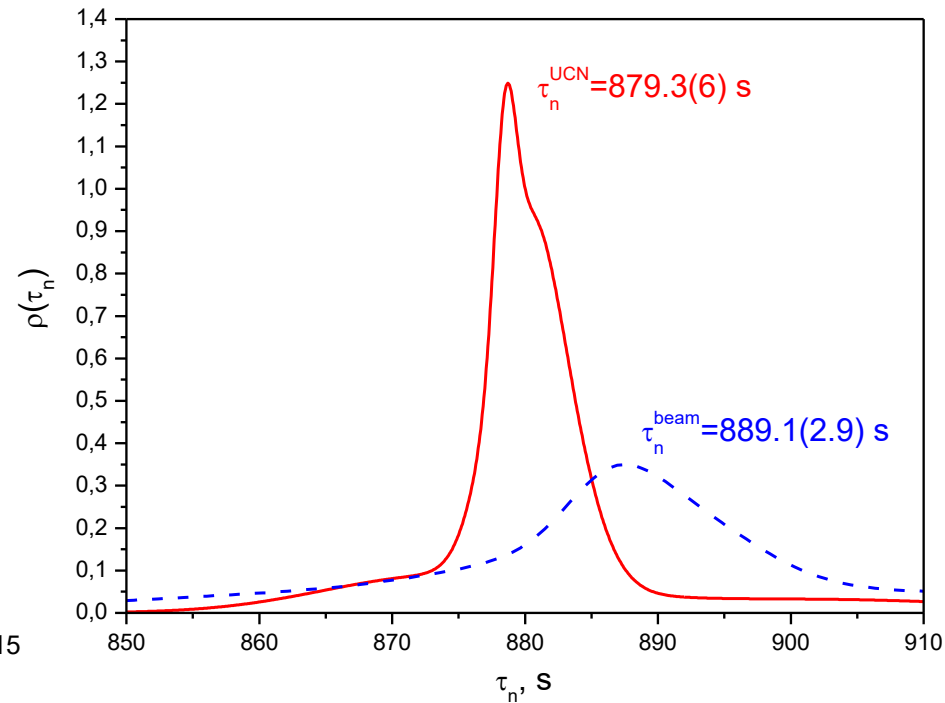
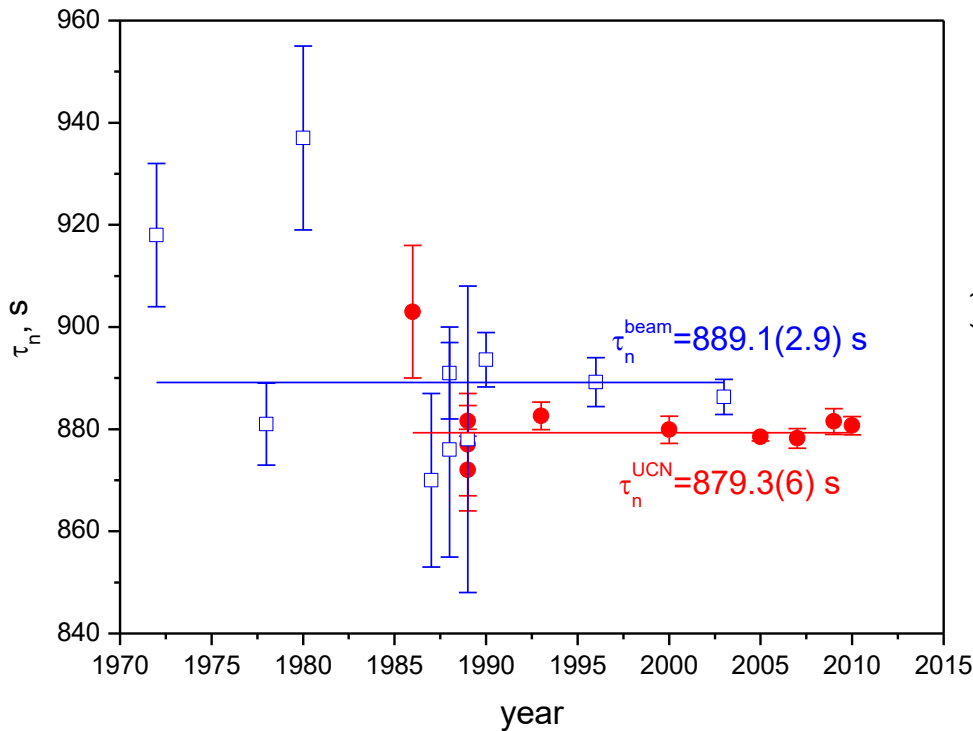
# Реакторная антинейтринная аномалия

*G. Mention et al., Phys. Rev. D83, 073006, 2011*



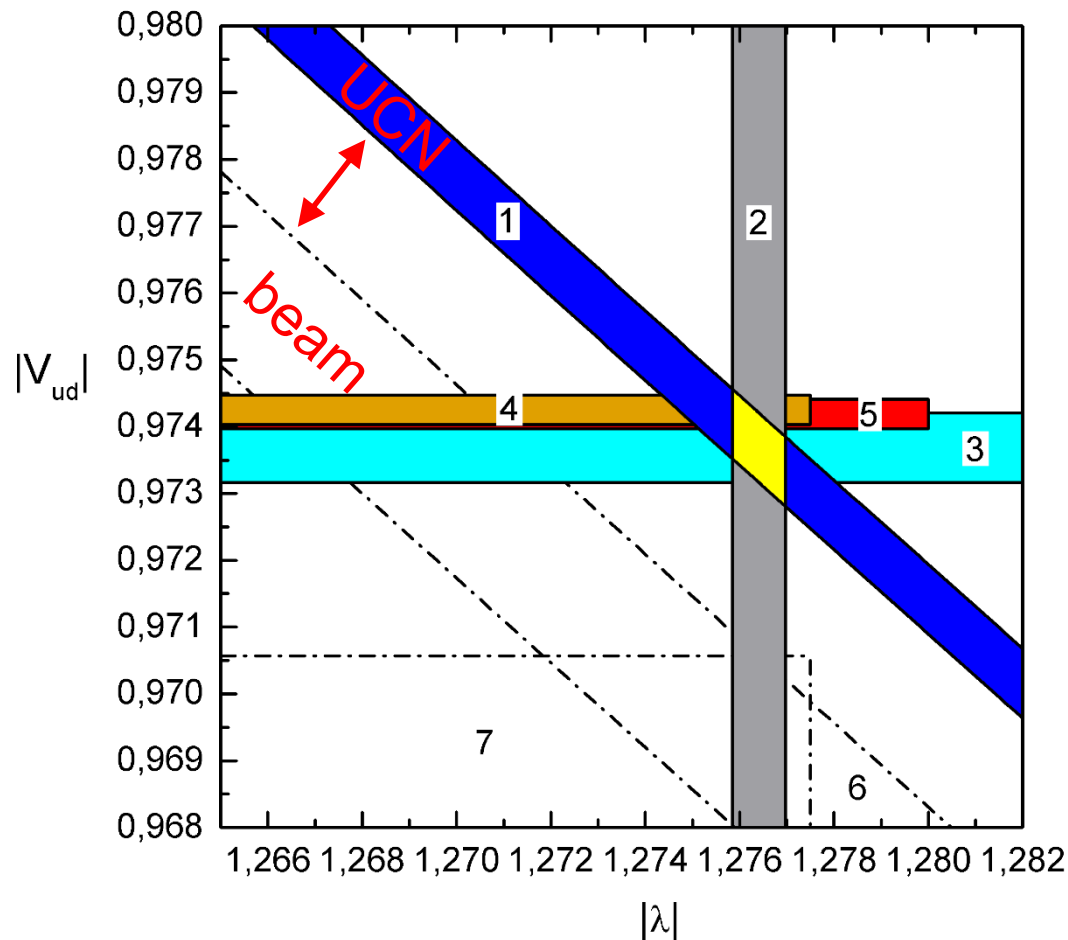
# Расхождение результатов измерения времени жизни нейтрона в пучковых экспериментах и экспериментах с хранением

*A.P. Serebrov and A.K. Fomin, Physics Procedia 17 (2011) 199–205*



$$\Delta\tau_n = 9.8(2.96) \text{ s} \quad (3.3\sigma)$$

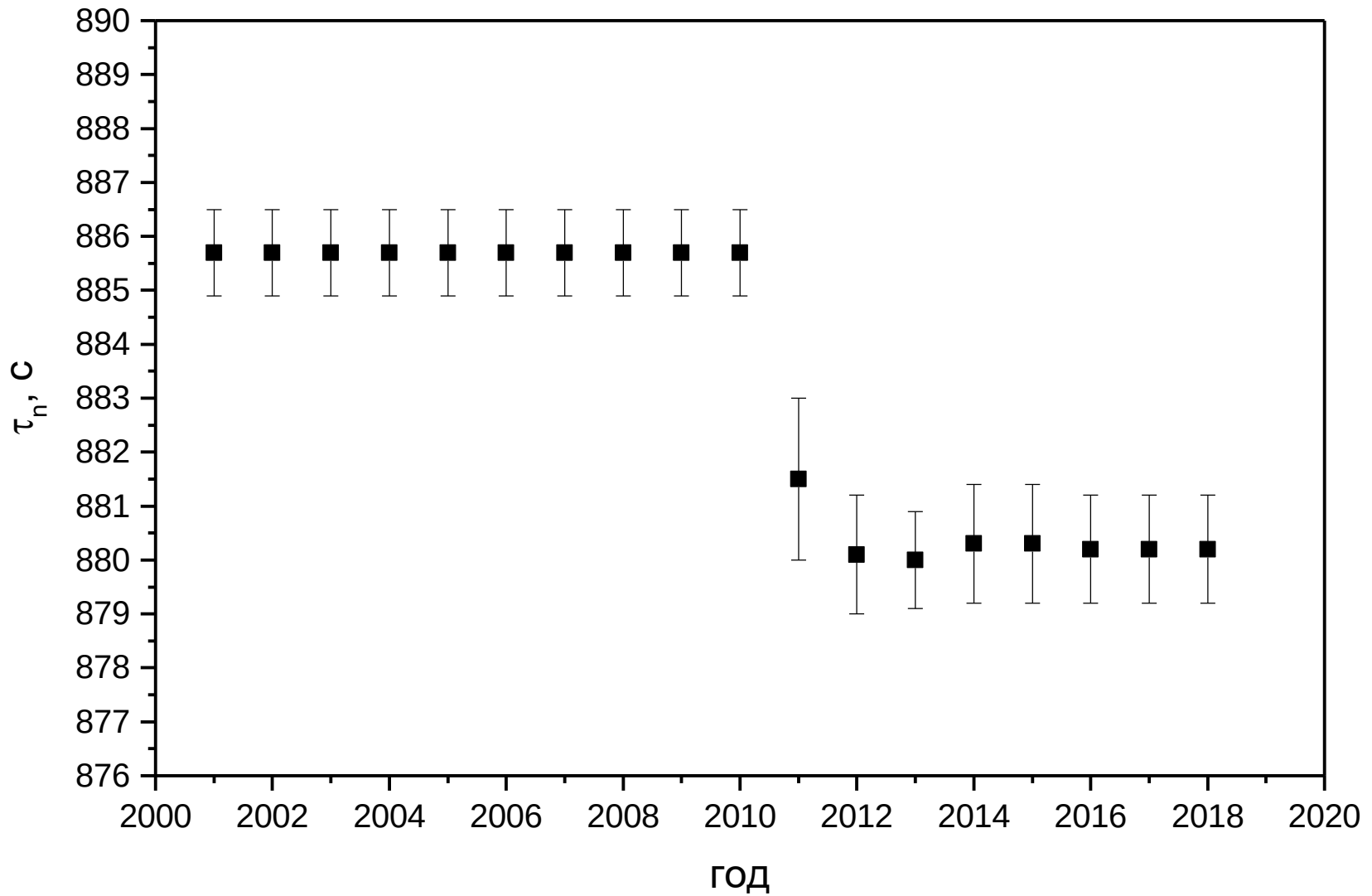
# Стандартная модель с экспериментами на пучках и хранением УХН



Dependence of the CKM matrix element  $|V_{ud}|$  on the values of the neutron lifetime and  $|\lambda|$ . (1) neutron lifetime with UCN 879.4(6) s; (2) neutron  $\beta$ -asymmetry, Perkeo 3; (3) neutron  $\beta$ -decay, 879.4(6) s + Perkeo 3; (4) unitarity; (5)  $0^+ \rightarrow 0^+$  nuclear transitions; (6) neutron lifetime with beam, 887.7(2.2) s; (7) neutron  $\beta$ -decay, 887.7(2.2) s + Perkeo 3.



# Particle Data Group



- [1] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, JETP Lett. 92 (2010) 271  
[2] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, Phys. Rev. C 82 (2010) 035501

# Particle Data Group 2013

| VALUE (s)                                                                     | DOCUMENT ID                                                 | TECN | COMMENT                   |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------|---------------------------|
| <b>880.0 ± 0.9 OUR AVERAGE</b>                                                | Error includes scale factor of 1.4. See the ideogram below. |      |                           |
| 881.6 ± 0.8 ± 1.9                                                             | 11 ARZUMANOV 12                                             | CNTR | UCN double bottle         |
| 882.5 ± 1.4 ± 1.5                                                             | 12 STEYERL 12                                               | CNTR | UCN material bottle       |
| 880.7 ± 1.3 ± 1.2                                                             | PICHLMAIER 10                                               | CNTR | UCN material bottle       |
| 886.3 ± 1.2 ± 3.2                                                             | NICO 05                                                     | CNTR | In-beam $n$ , trapped $p$ |
| 878.5 ± 0.7 ± 0.3                                                             | SEREBROV 05                                                 | CNTR | UCN gravitational trap    |
| 889.2 ± 3.0 ± 3.8                                                             | BYRNE 96                                                    | CNTR | Penning trap              |
| 882.6 ± 2.7                                                                   | 13 MAMPE 93                                                 | CNTR | UCN material bottle       |
| • • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • • |                                                             |      |                           |
| 886.8 ± 1.2 ± 3.2                                                             | DEWEY 03                                                    | CNTR | See NICO 05               |
| 885.4 ± 0.9 ± 0.4                                                             | ARZUMANOV 00                                                | CNTR | See ARZUMANOV 12          |
| 888.4 ± 3.1 ± 1.1                                                             | 14 NESVIZHEV... 92                                          | CNTR | UCN material bottle       |
| 888.4 ± 2.9                                                                   | ALFIMENKOV 90                                               | CNTR | See NESVIZHEVSKII 92      |
| 893.6 ± 3.8 ± 3.7                                                             | BYRNE 90                                                    | CNTR | See BYRNE 96              |
| 878 ± 27 ± 14                                                                 | KOSSAKOW... 89                                              | TPC  | Pulsed beam               |
| 887.6 ± 3.0                                                                   | MAMPE 89                                                    | CNTR | See STEYERL 12            |
| 877 ± 10                                                                      | PAUL 89                                                     | CNTR | Magnetic storage ring     |
| 876 ± 10 ± 19                                                                 | LAST 88                                                     | SPEC | Pulsed beam               |
| 891 ± 9                                                                       | SPIVAK 88                                                   | CNTR | Beam                      |
| 903 ± 13                                                                      | KOSVINTSEV 86                                               | CNTR | UCN material bottle       |
| 937 ± 18                                                                      | 15 BYRNE 80                                                 | CNTR |                           |
| 875 ± 95                                                                      | KOSVINTSEV 80                                               | CNTR |                           |
| 881 ± 8                                                                       | BONDAREN... 78                                              | CNTR | See SPIVAK 88             |
| 918 ± 14                                                                      | CHRISTENSEN72                                               | CNTR |                           |

# Среднемировое время жизни нейтрона

В 2010 году после внесения соответствующих поправок было получено среднемировое время жизни нейтрона  $880.0 \pm 0.9$  с, отличное от установившегося с 2001 года значения PDG  $885.7 \pm 0.8$  с. С новым значением времени жизни нейтрона: (1) устранено наметившееся разногласие со Стандартной моделью, (2) наблюдается лучшее согласие с космологическими данными, (3) обнаружено расхождение в результатах измерения времени жизни нейтрона между пучковым методом и методом хранения, (4) изменилась эффективность нейтринных детекторов, что внесло свой вклад в реакторную антинейтринную аномалию.

[1] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, JETP Lett. 92 (2010) 271

[2] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, Phys. Rev. C 82 (2010) 035501

[3] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, Crystallography Reports 56 (2011) 1248

[4] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, Physics Procedia 17 (2011) 199

1. Physics of fundamental Symmetries and Interactions - PSI2010

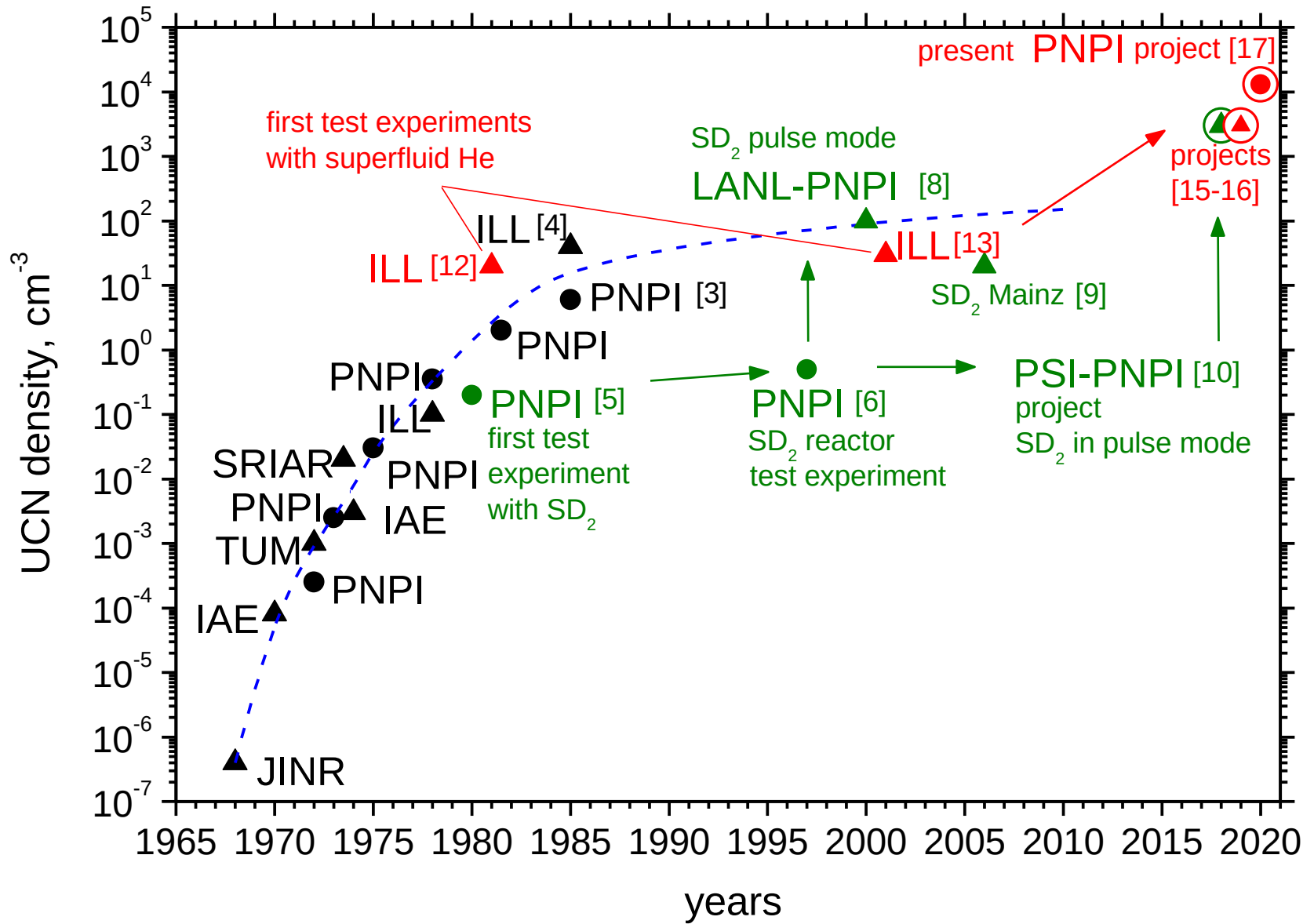
October 11–14, 2010, Paul Scherrer Institut, Switzerland

<https://indico.psi.ch/contributionDisplay.py?contribId=34&confId=2>

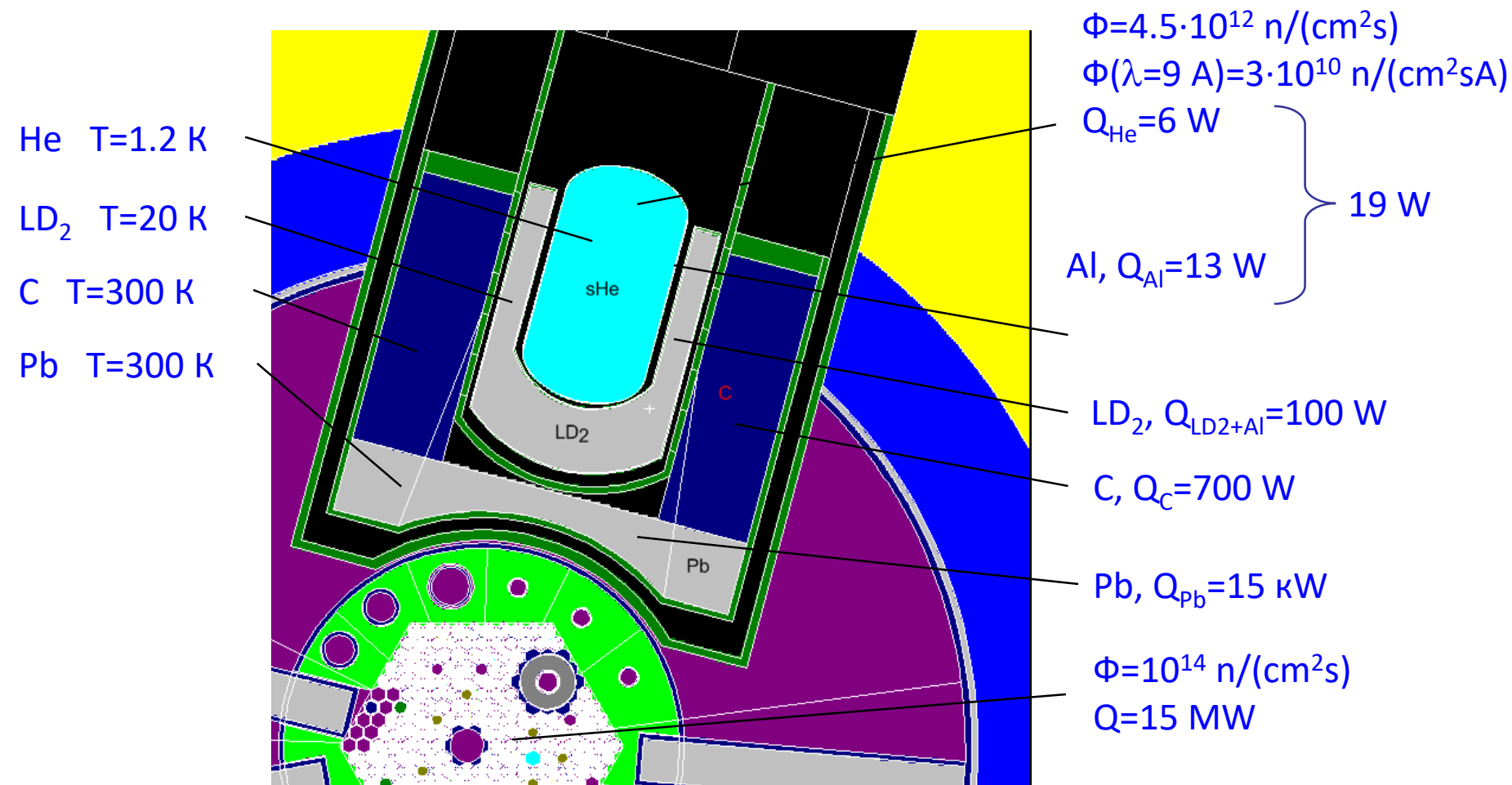
2. 19-я Международная Ломоносовская конференция, Москва, Россия, 22-28 августа 2019 г.

[http://lomcon.ru/?page\\_id=204](http://lomcon.ru/?page_id=204)

# Источники УХН на основе сверхтекучего гелия



# Схема размещения источника УХН вблизи активной зоны реактора ВВР-М



# Проект источника УХН на реакторе ВВР-М



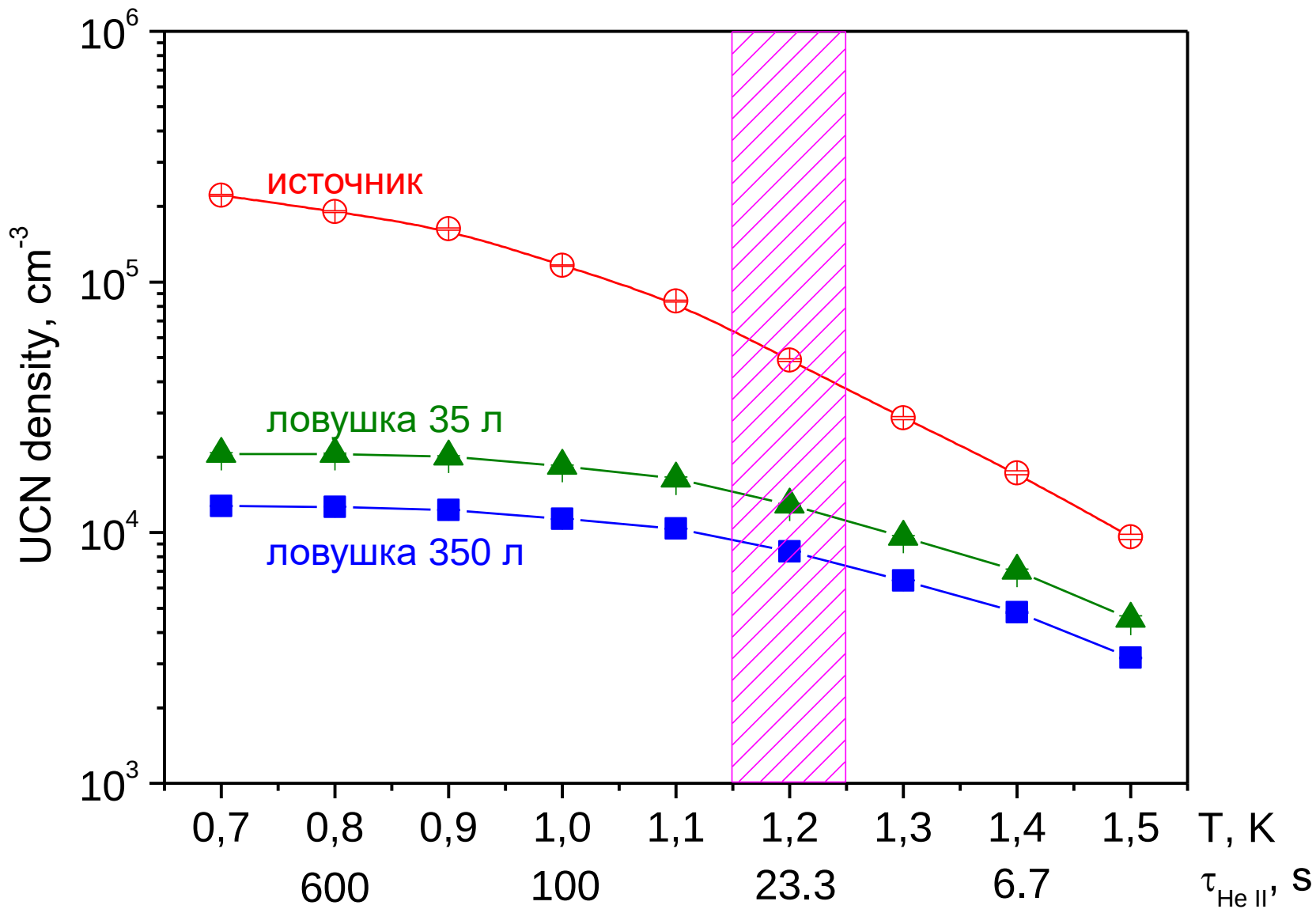
# Монте-Карло модель источника УХН

1 – камера источника, 2 – нейтроновод, 3 – ловушка УХН, 4 – мембрана перед входом в ловушку УХН, 5 – труба заливки камеры, 6 – трубопровод вакуумной откачки камеры (гравитационный затвор УХН)



*А.К. Фомин, программа для ЭВМ №2018660577. Программа для моделирования источника ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия*

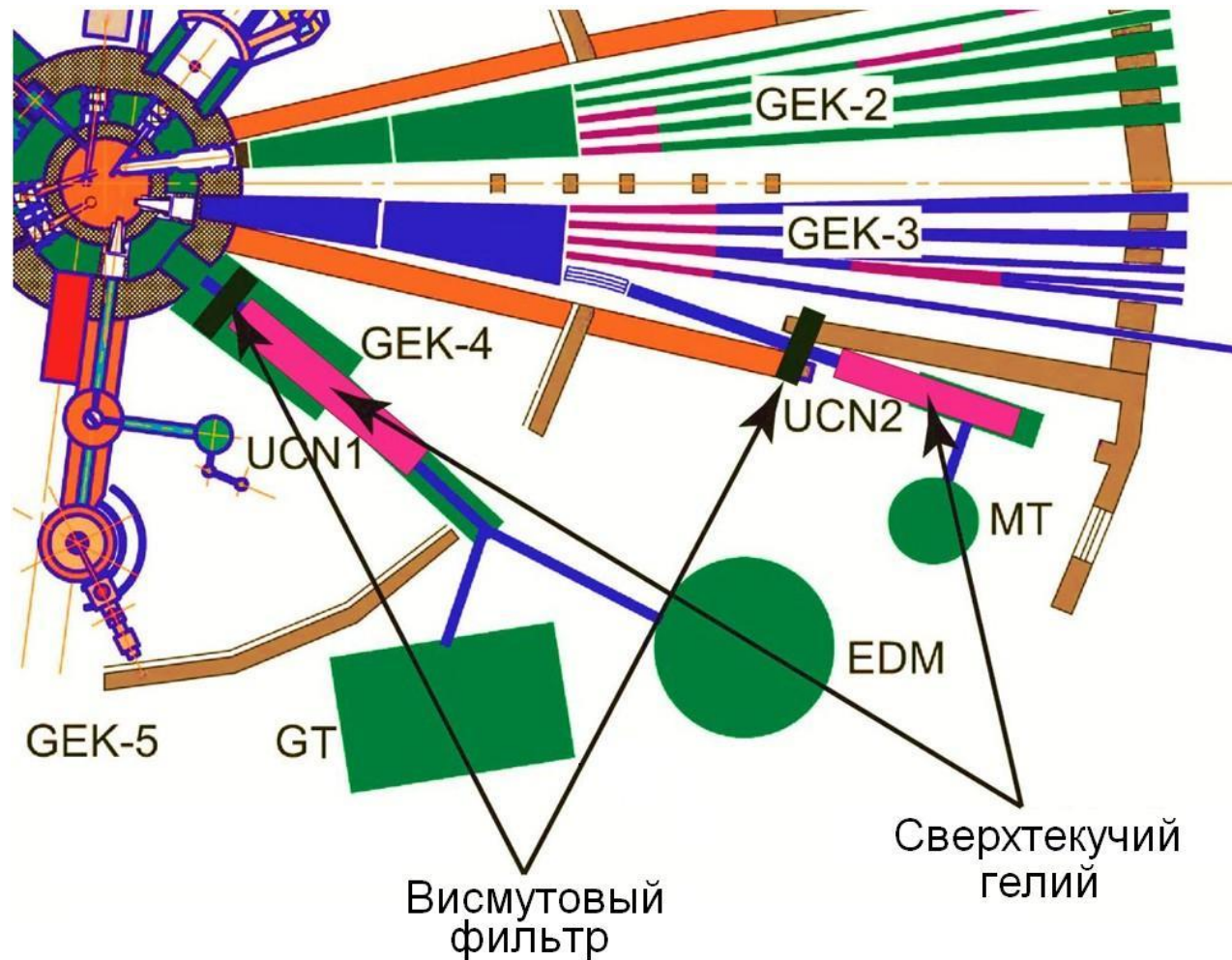
# Плотность УХН



Производительность источника 10<sup>8</sup> УХН/с.



# Источник УХН на реакторе ПИК



План размещения источников УХН со сверхтекучим гелием и экспериментальных установок на каналах ГЭК-3 и ГЭК-4 реактора ПИК: UCN1 – источник УХН на канале ГЭК-4, UCN2 – источник УХН на канале ГЭК-3, EDM – установка для измерения ЭДМ нейтрона, GT – установка для измерения времени жизни нейтрона с гравитационной ловушкой УХН, MT – установка для измерения времени жизни нейтрона с магнитной ловушкой УХН.

## Схемы источников УХН

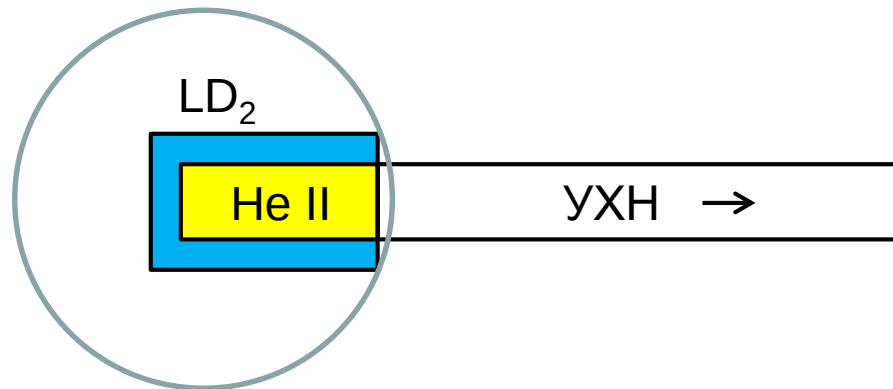
ВВР-М

He II внутри ТК

$$\Phi = 3.2 \cdot 10^{12} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$$

$$d\Phi/d\lambda (9 \text{ A}) =$$

$$3.2 \cdot 10^{10} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{A}^{-1}$$



ПИК

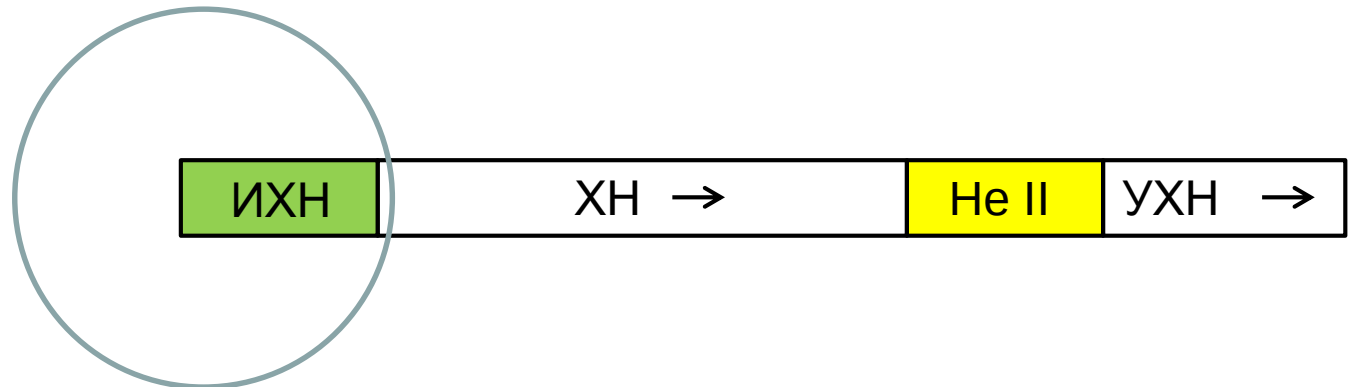
ГЭК 3-4

He II на пучке

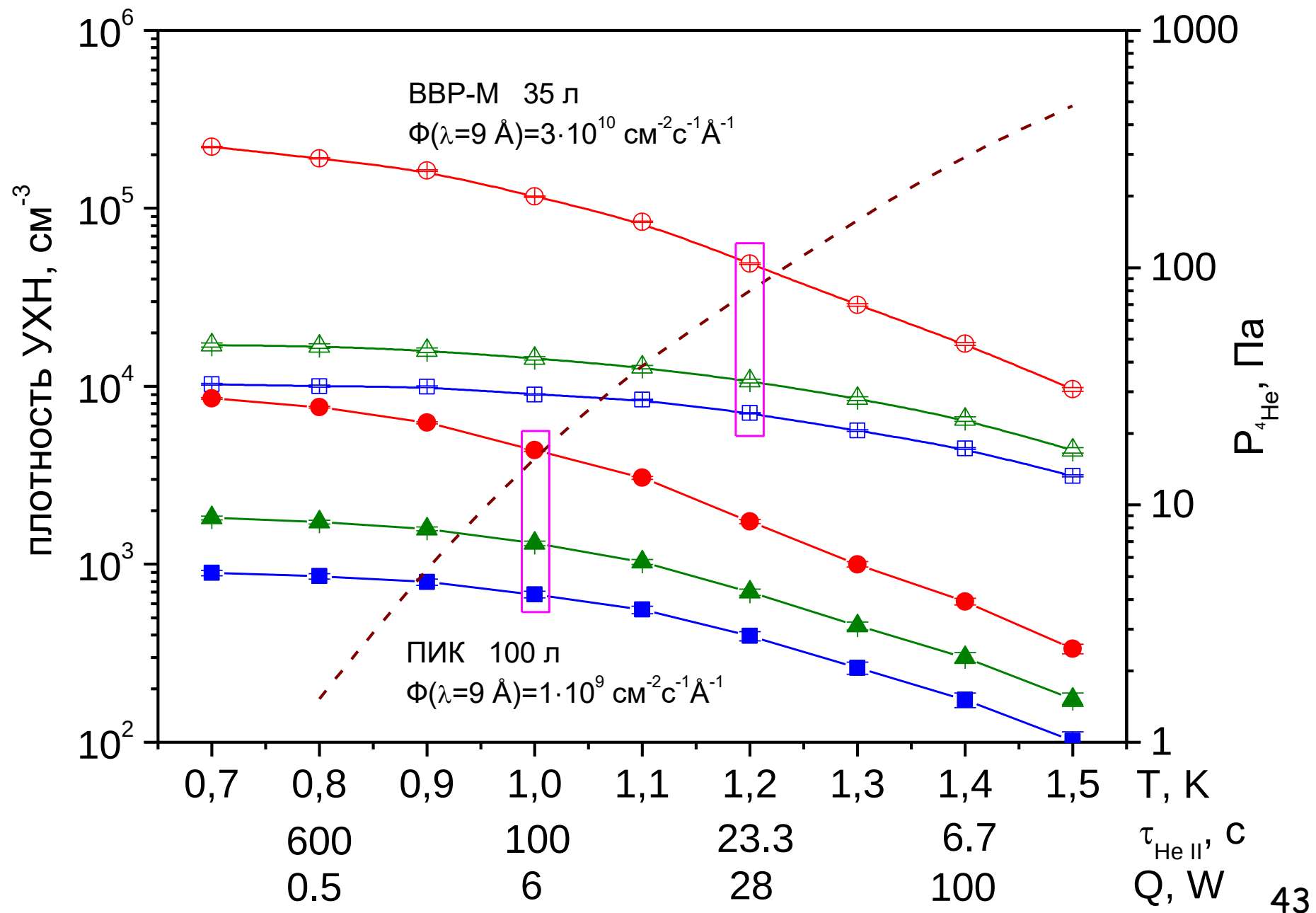
$$\Phi = 2.5 \cdot 10^{14} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$$

$$d\Phi/d\lambda (9 \text{ A}) =$$

$$10^9 \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{A}^{-1}$$



# Плотность УХН



# Источники УХН на основе сверхтекучего гелия

Получены значения плотности УХН достижимой на источниках создаваемых на реакторах ВВР-М и ПИК. С этой целью разработана компьютерная модель источника УХН на основе сверхтекучего гелия. Полученная плотность УХН на реакторе ВВР-М на 2 порядка величины превышает плотность существующих в мире источников. В результате оптимизации параметров источника на реакторе ВВР-М получена расчетная плотность УХН в ловушке ЭДМ спектрометра  $1.3 \cdot 10^4$  н/см<sup>3</sup> и плотность в эксперименте по измерению времени жизни нейтрона  $8.4 \cdot 10^3$  н/см<sup>3</sup>, что позволит на порядок величины улучшить статистическую точность этих экспериментов. Расчетная плотность УХН на реакторе ПИК на порядок величины хуже, чем на реакторе ВВР-М.

[1] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, M.S. Onegin, A.G. Kharitonov, D.V. Prudnikov, V.A. Lyamkin, S.A. Ivanov, Technical Physics Letters 40 (2014) 10

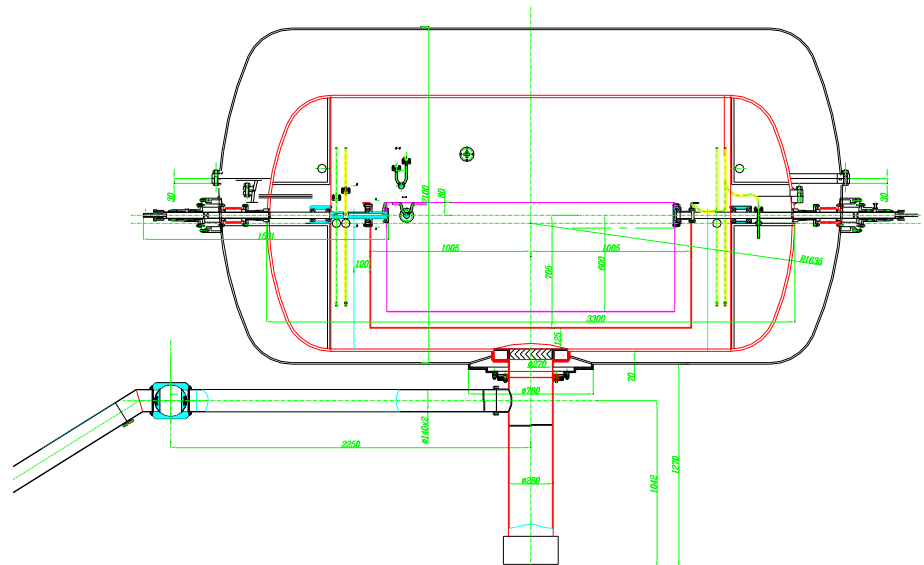
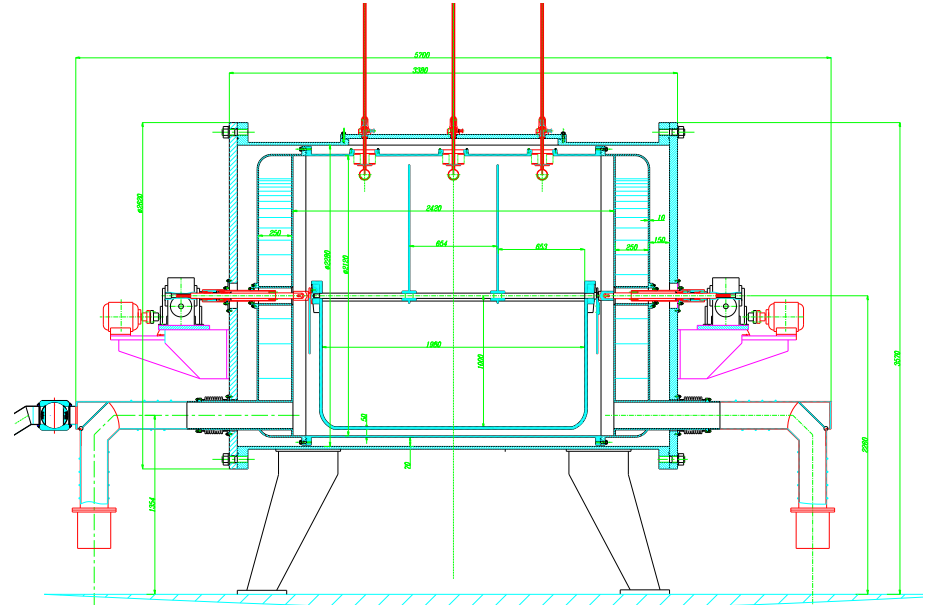
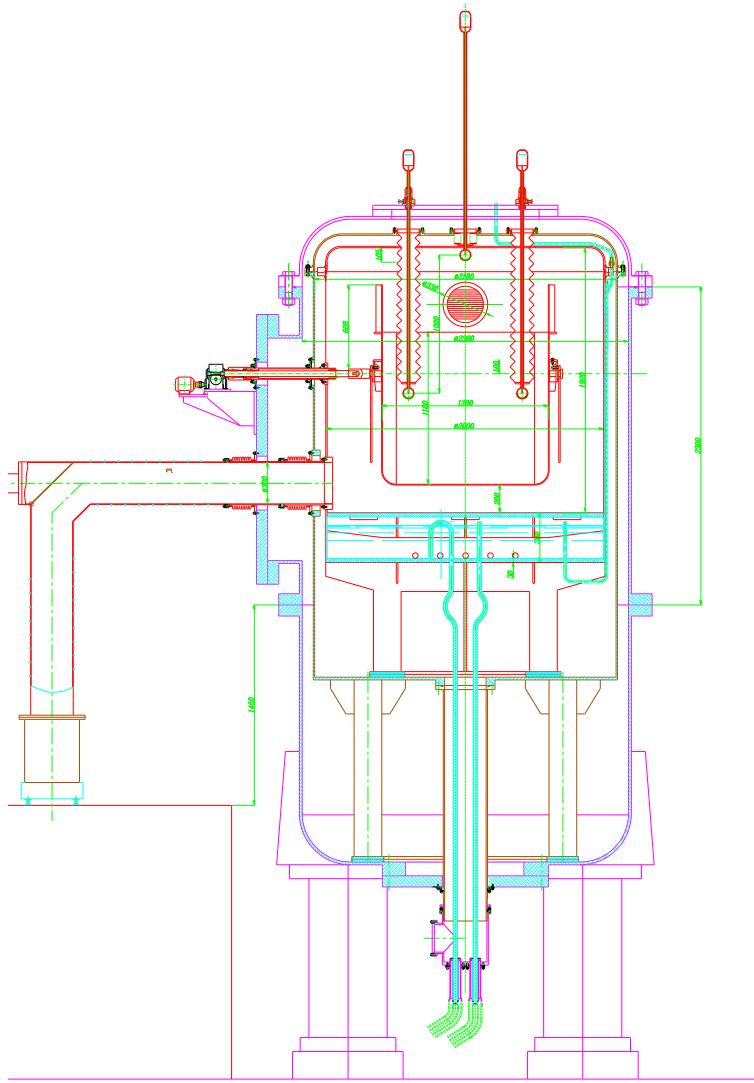
[2] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, Technical Physics 60 (2015) 1238

[3] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, A.G. Kharitonov, V.A. Lyamkin, D.V. Prudnikov, S.A. Ivanov, A.N. Erykalov, M.S. Onegin, K.A. Gridnev, Crystallography Reports 61 (2016) 144

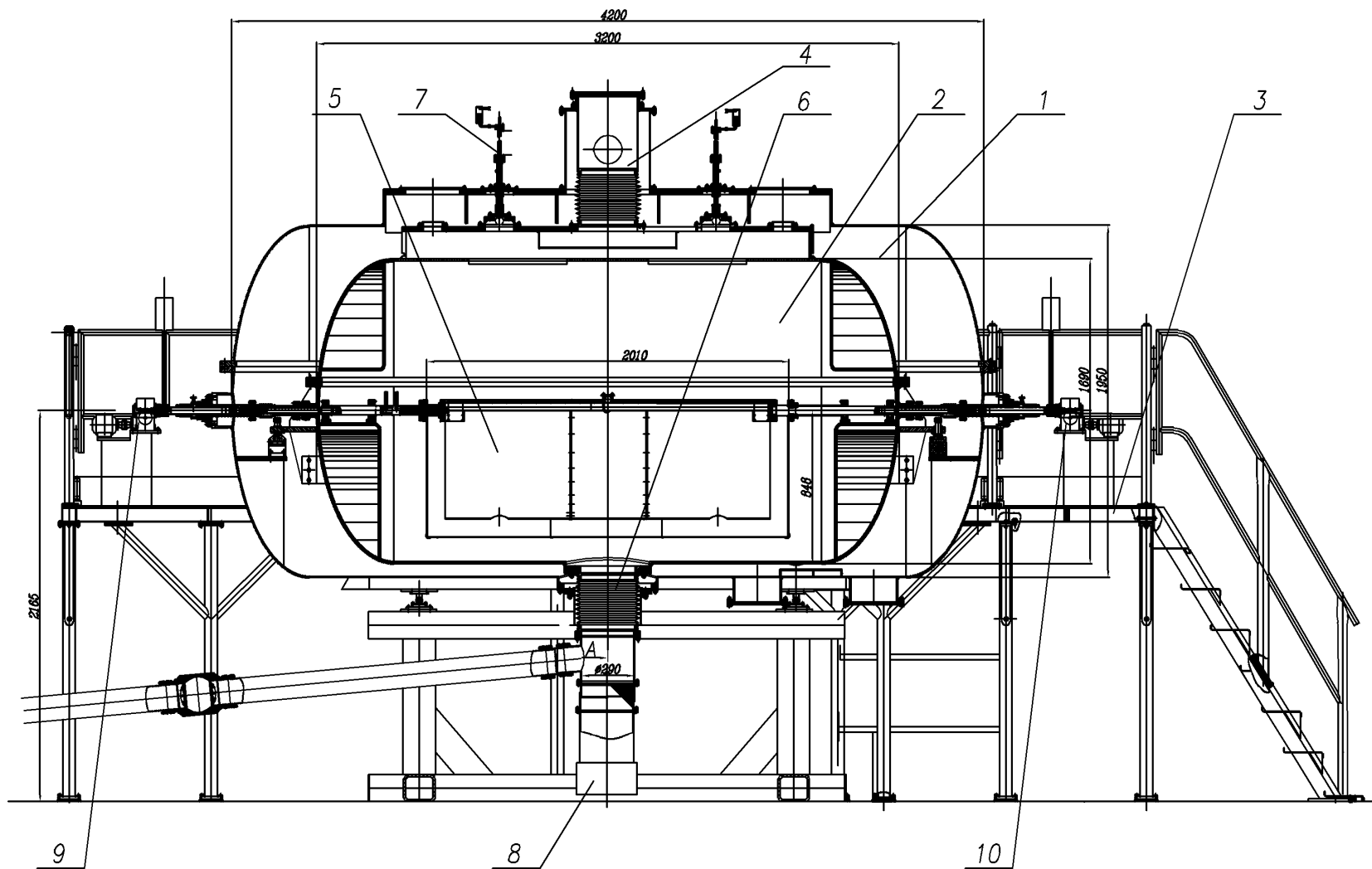
[4] M.S. Onegin, A.P. Serebrov, A.K. Fomin, V.A. Lyamkin, Technical Physics 62 (2017) 633

nEDM 2017, 15-20 October 2017, Harrison Hot Springs, Canada  
<https://meetings.triumf.ca/indico/event/10/session/2/contribution/0>

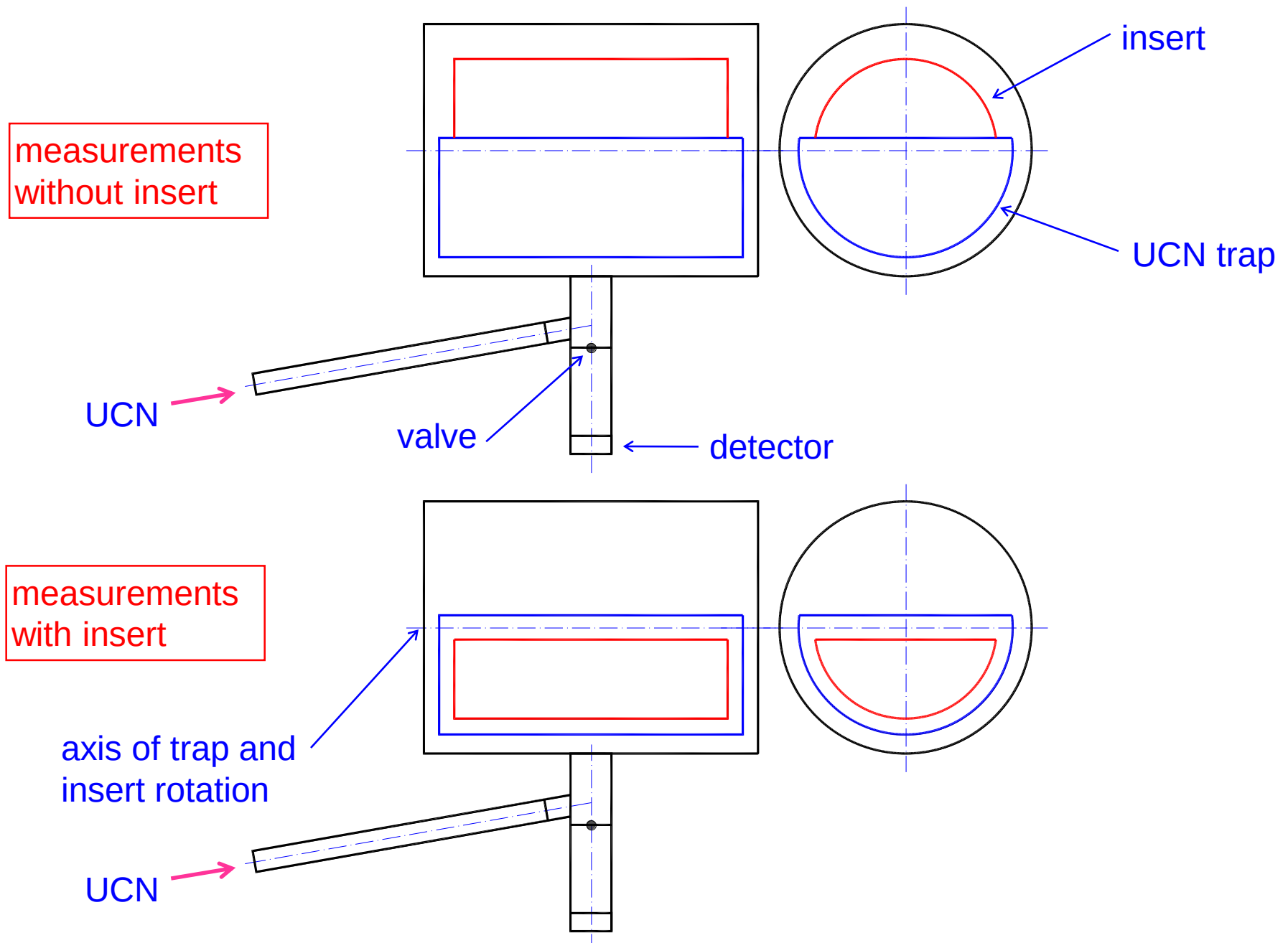
# Эксперимент с большой гравитационной ловушкой



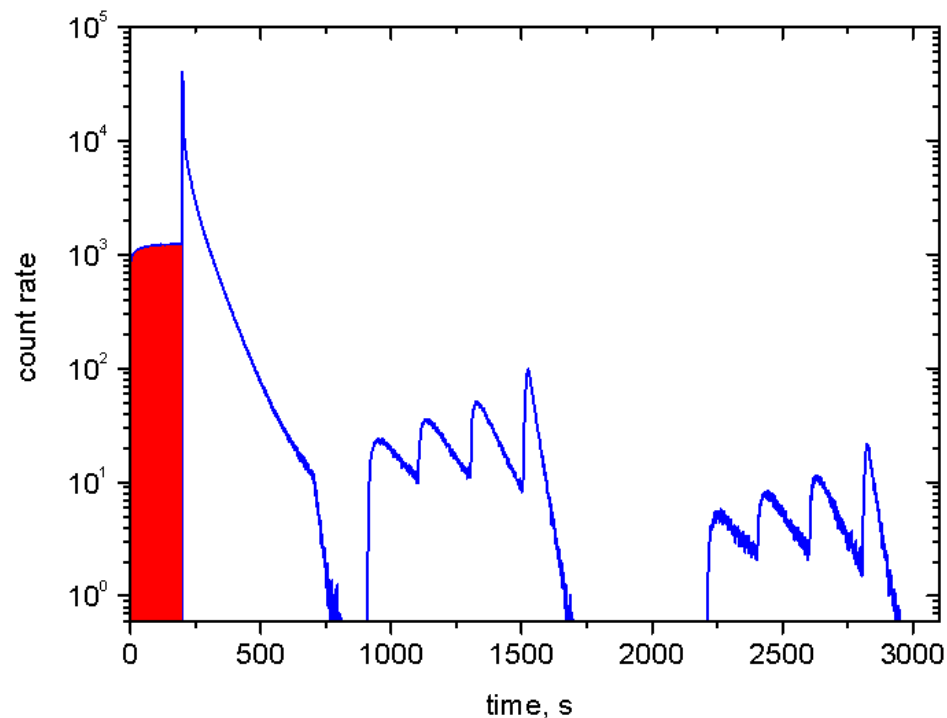
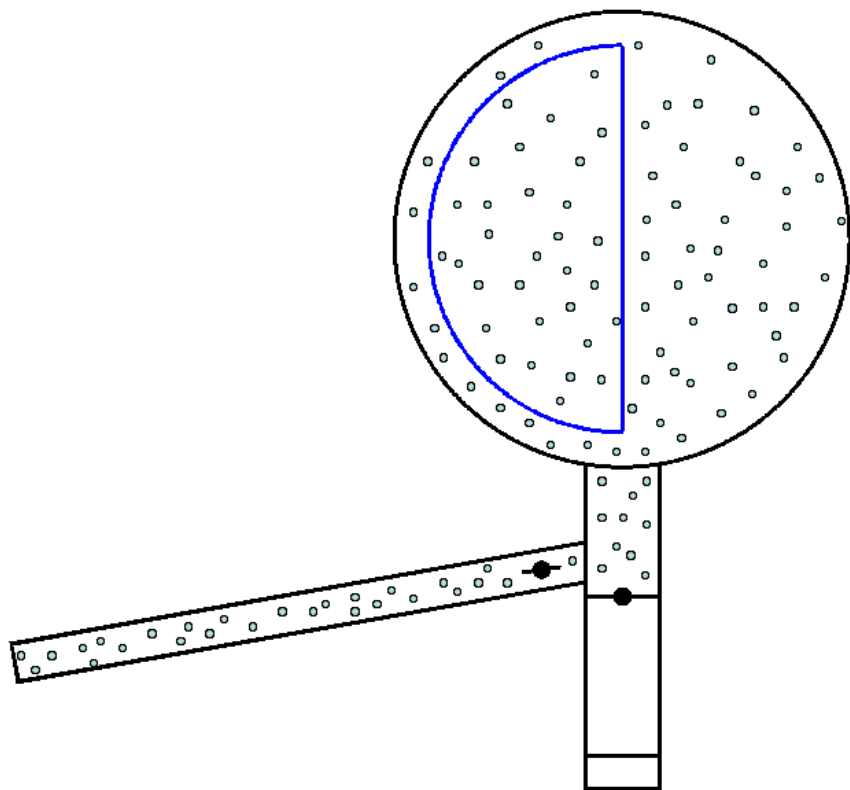
# Эксперимент с большой гравитационной ловушкой



# Расчетная схема



# Процесс измерений



Filling of the trap with UCN:  $\theta=90^\circ$ .

А.К. Фомин, программа для ЭВМ №2018611711. Программа для моделирования эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с хранением ультрахолодных нейтронов в материальной ловушке.



# Прецизионное Монте Карло моделирование

исходное  
значение  $\tau_{n0}$



МК, анализ данных:  
измеренное значение  $\tau_{nm}$



$\tau_{nm} - \tau_{n0} = ?$



Использовались компьютерные кластеры ПИЯФ:

1. кластер ОИТА (фото)
2. PC Farm

# Центр обработки данных реактора ПИК

<http://top50.supercomputers.ru>

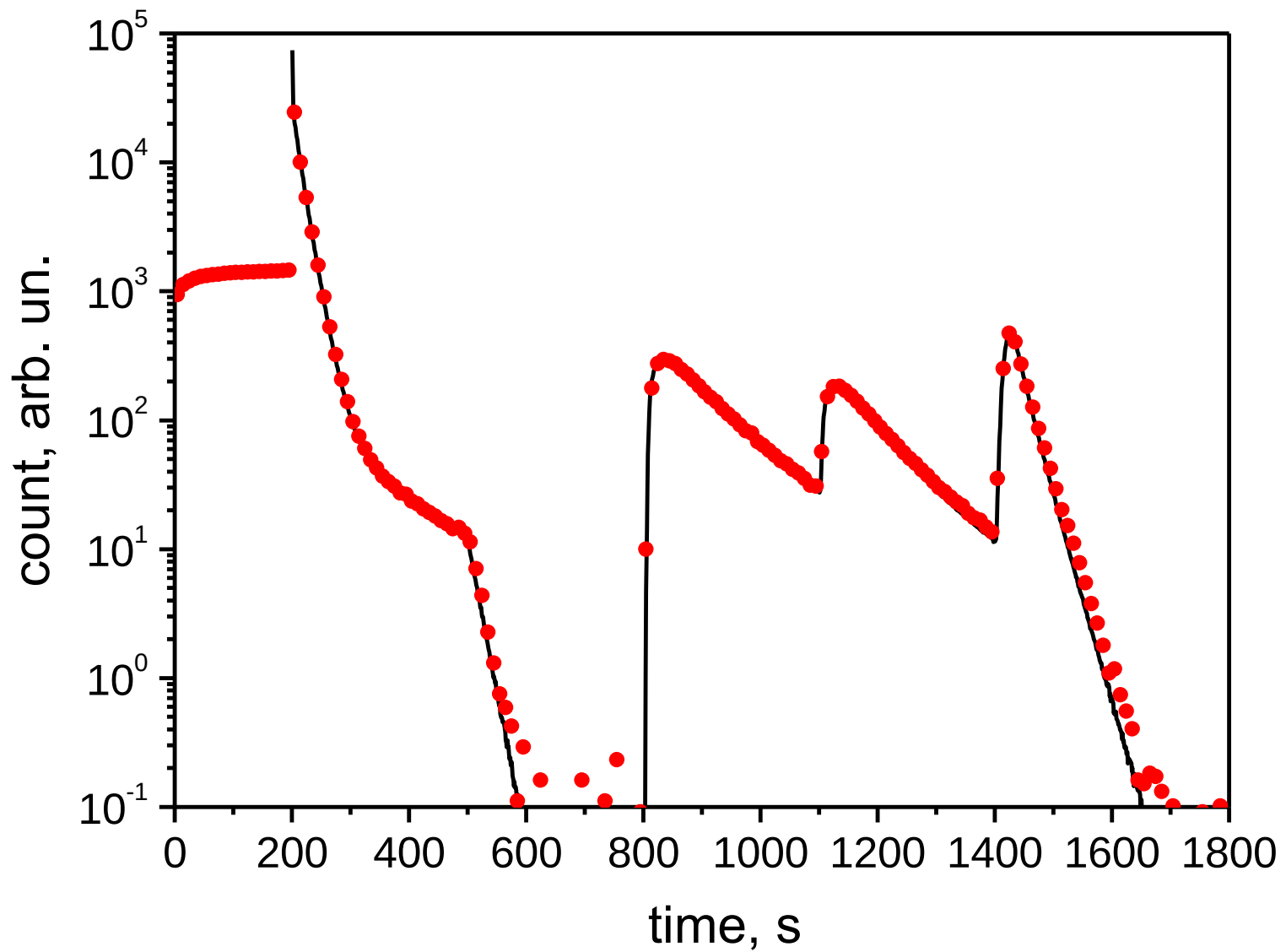
Текущий рейтинг (Редакция №31 от 23.09.2019)

| №    | Название<br>Место установки                                                       | Узлов<br>Проц.<br>Ускор. | Архитектура:<br>кол-во узлов: конфигурация узла<br>сеть: вычислительная / сервисная / транспортная                                                                                                                                                                                                                                                        | Rmax<br>Rpeak<br>(Тфлп/с) | Разработчик<br>Область<br>применения               |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|
| 14 ▼ | «Суперкомпьютер<br>"Константинов"»<br><br>ПИЯФ,<br>НИЦ "Курчатовский<br>институт" | 268<br>496<br>н/д        | 160: CPU: 2x Intel Xeon E5-2680v4, 128 GB RAM<br>40: CPU: 1x Intel Xeon Phi 7250, 112 GB RAM<br>30: CPU: 2x Intel Xeon E5-2680v4, 256 GB RAM<br>20: CPU: 2x Intel Xeon E5-2650v4, 256 GB RAM<br>16: CPU: 2x Intel Xeon E5-2680v4, 1024 GB RAM<br>2: CPU: 2x Intel Xeon E5-2680v4, 1540 GB RAM<br><br>EDR Infiniband / Gigabit Ethernet / Gigabit Ethernet | 200.44<br>362.38          | NP-IT<br>Ниагара<br>Компьютерс<br><br>Исследования |

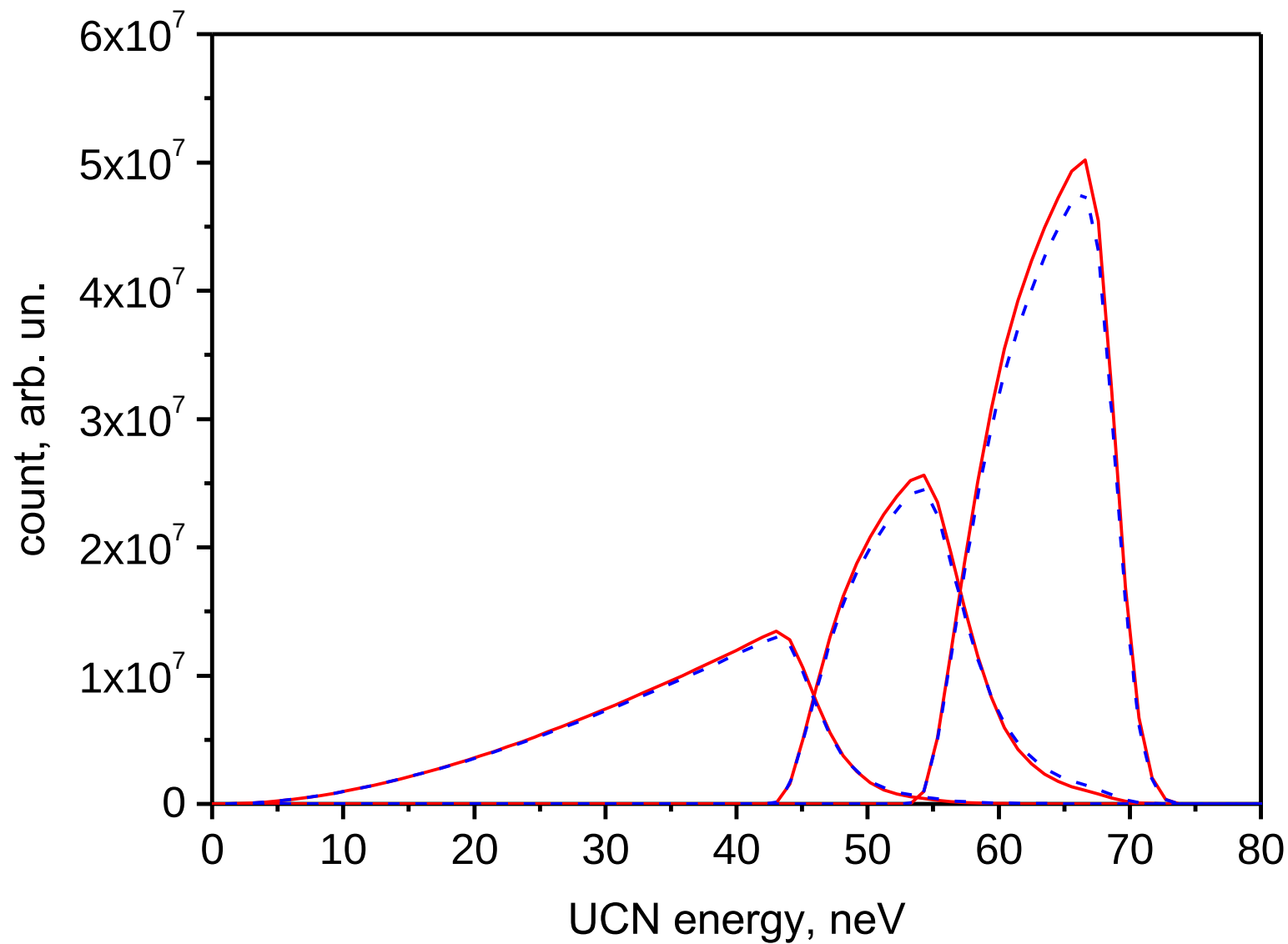


Исследовательская группа:  
npri\_nrd\_nf  
Руководитель:  
А.К.Фомин

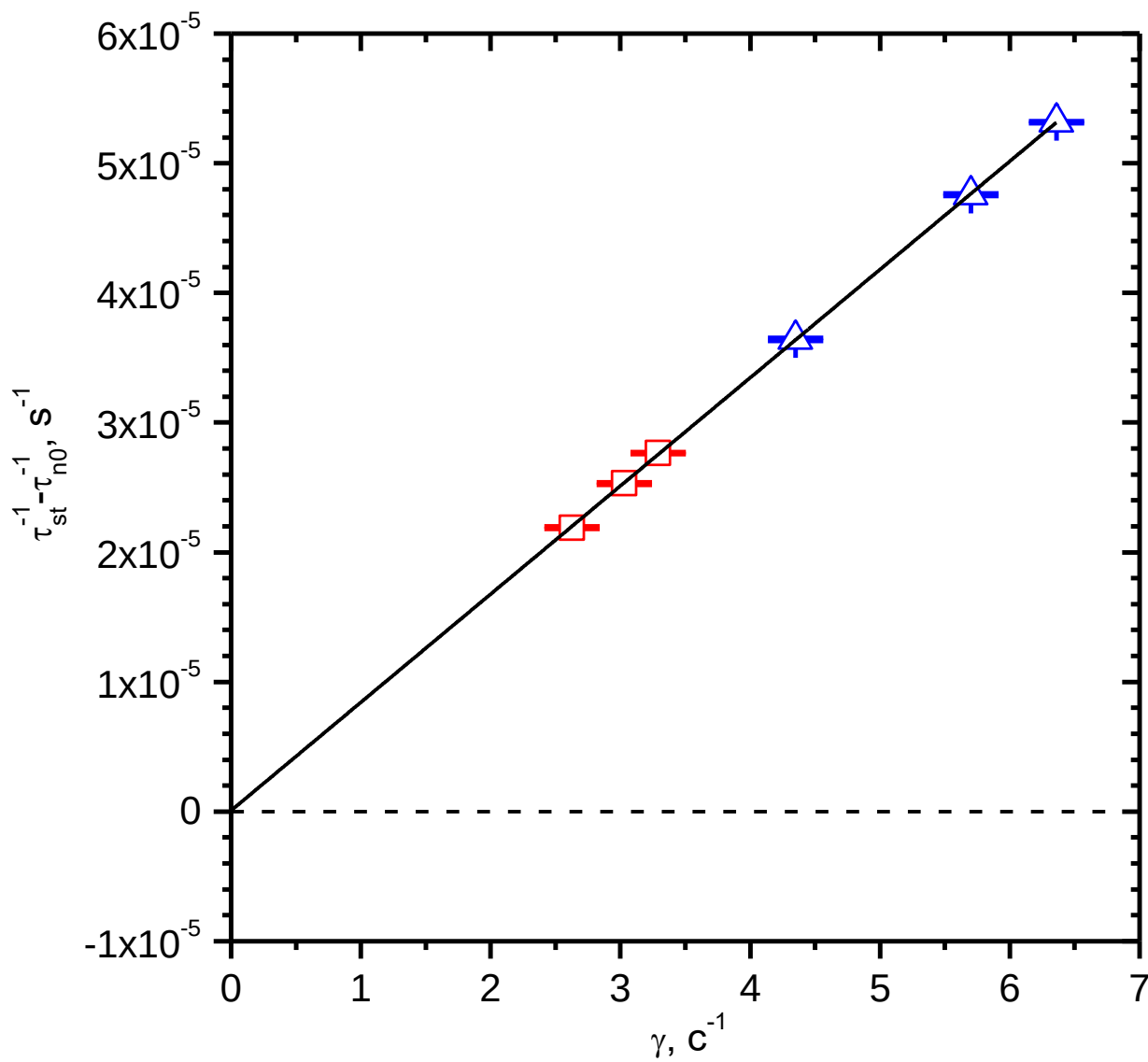
# Временная диаграмма счета детектора



## Спектры УХН при сливах



# Экстраполяция ко времени жизни нейтрона



# Измерение времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой УХН

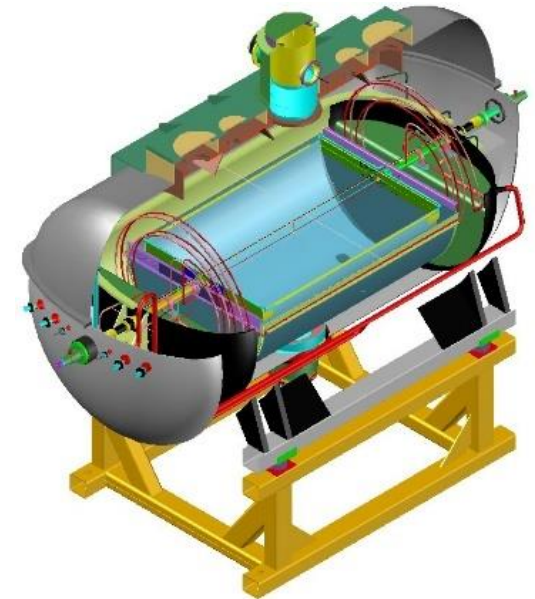
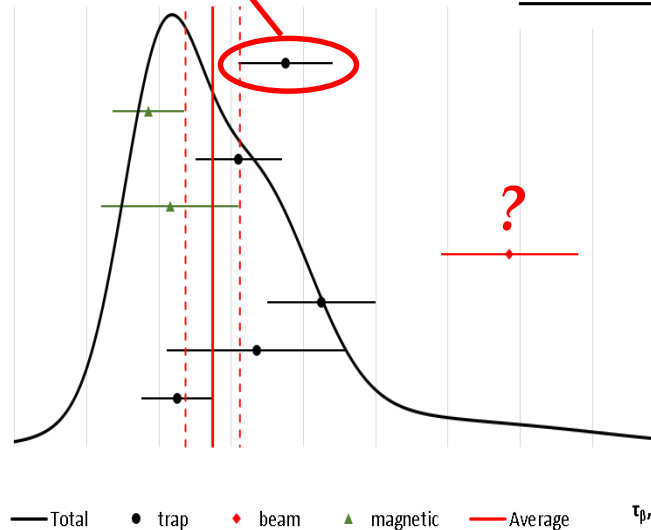
$$\tau_n = 881.5 \pm 0.7_{stat} \pm 0.6_{syst} \text{ c}$$

TABLE IV. List of systematic effects.

| Systematic effect                                              | Value (s)      |
|----------------------------------------------------------------|----------------|
| (a) Uncertainty of shape of function $\mu(E)$                  | $\pm 0.3$      |
| (b) Uncertainty of trap dimensions (3 mm for diameter 1400 mm) | $\pm 0.15$     |
| (c) Uncertainty of extrapolation method                        | $\pm 0.1$      |
| (d) Uncertainty of trap angular position ( $2^\circ$ )         | $\pm 0.1$      |
| (e) Uncertainty of difference for trap and insert coating      | $\pm 0.5$      |
| (f) The influence of the residual gas                          | $0.2 \pm 0.02$ |
| Total                                                          | $0.2 \pm 0.6$  |



Weighted average  
 $879.5 \pm 0.8$  (error scaled by 1.5)



A.P. Serebrov, E.A. Kolomensky, A.K. Fomin, I.A. Krasnoshchekova, A.V. Vassiljev, D.M. Prudnikov, I.V. Shoka, A.V. Chechkin, M.E. Chaikovskiy, V.E. Varlamov, S.N. Ivanov, A.N. Pirozhkov, P. Geltenbort, O. Zimmer, T. Jenke, M. Van der Grinten, and M. Tucker, Phys. Rev. C 97 (2018) 055503

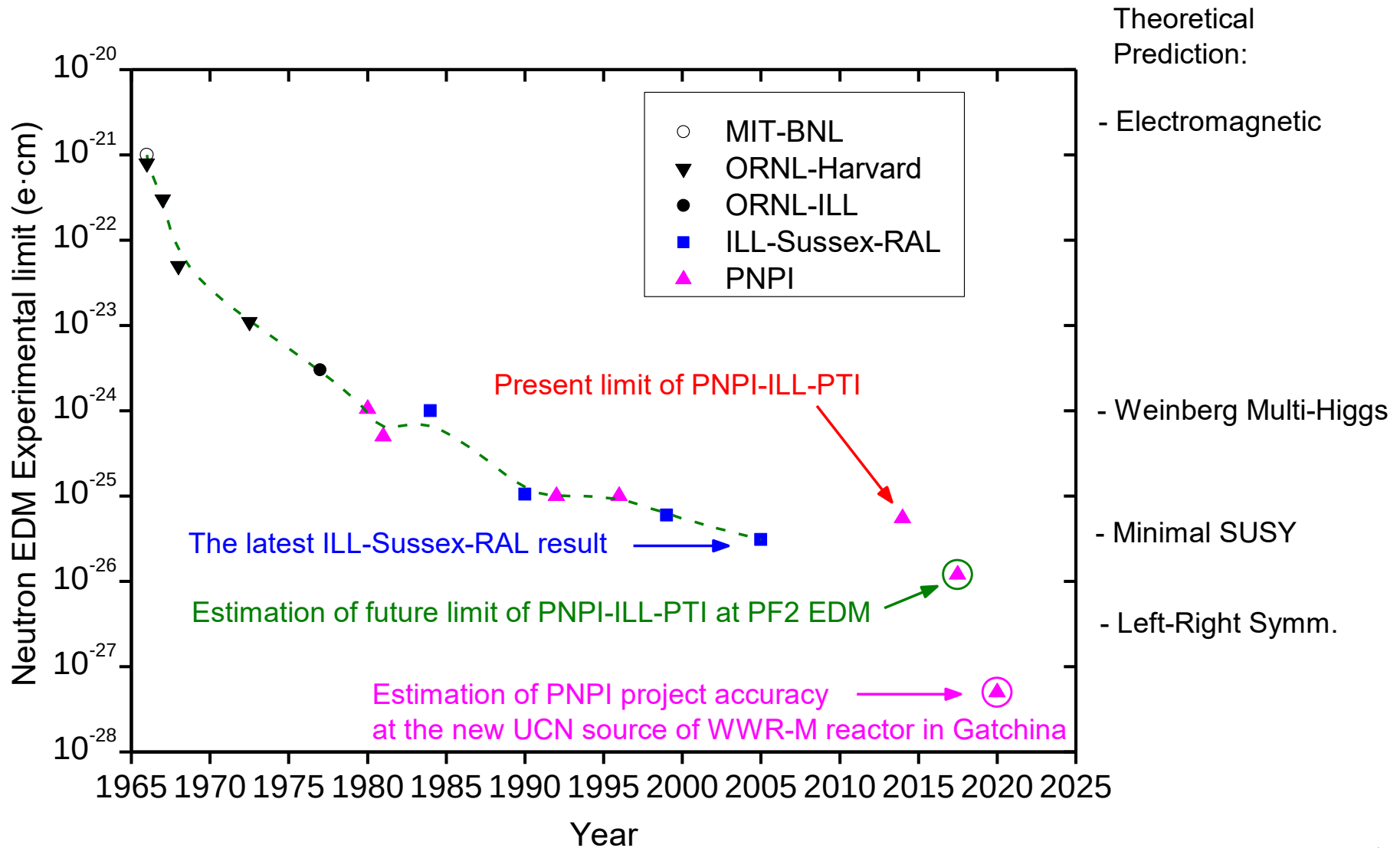
# Эксперимент с большой гравитационной ловушкой

Разработана компьютерная модель эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой. Результаты моделирования внесли свой вклад на всех этапах эксперимента: от конструирования установки до получения результата измерений. Получены систематические неопределенности связанные с неопределенностью функции потерь (0.3 с), неточностью расчета эффективной частоты соударений (0.1 с), неточностью установки угла ловушки УХН (0.1 с). Моделирование позволило заявить результат эксперимента с указанной точностью  $881.5 \pm 0.7_{\text{стат}} \pm 0.6_{\text{сист}}$  с.

- [1] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, A.G. Kharitonov, V.E. Varlamov, A.V. Chechkin, Technical Physics 58 (2013) 1681
- [2] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, A.G. Kharitonov, V.E. Varlamov, E.A. Kolomenskiy, I.A. Krasnoshchekova, A.V. Chechkin, Crystallography Reports 61 (2016) 139
- [3] A.K. Fomin, A.P. Serebrov, Technical Physics 62 (2017) 1903
- [4] A.K. Fomin, A.P. Serebrov, Mathematical Models and Computer Simulations 10 (2018) 741
- [5] A.P. Serebrov, E.A. Kolomenskiy, A.K. Fomin, I.A. Krasnoshchekova, A.V. Vassiljev, D.M. Prudnikov, I.V. Shoka, A.V. Chechkin, M.E. Chaikovskiy, V.E. Varlamov, S.N. Ivanov, A.N. Pirozhkov, P. Geltenbort, O. Zimmer, T. Jenke, M. Van der Grinten, M. Tucker, Phys. Rev. C 97 (2018) 055503

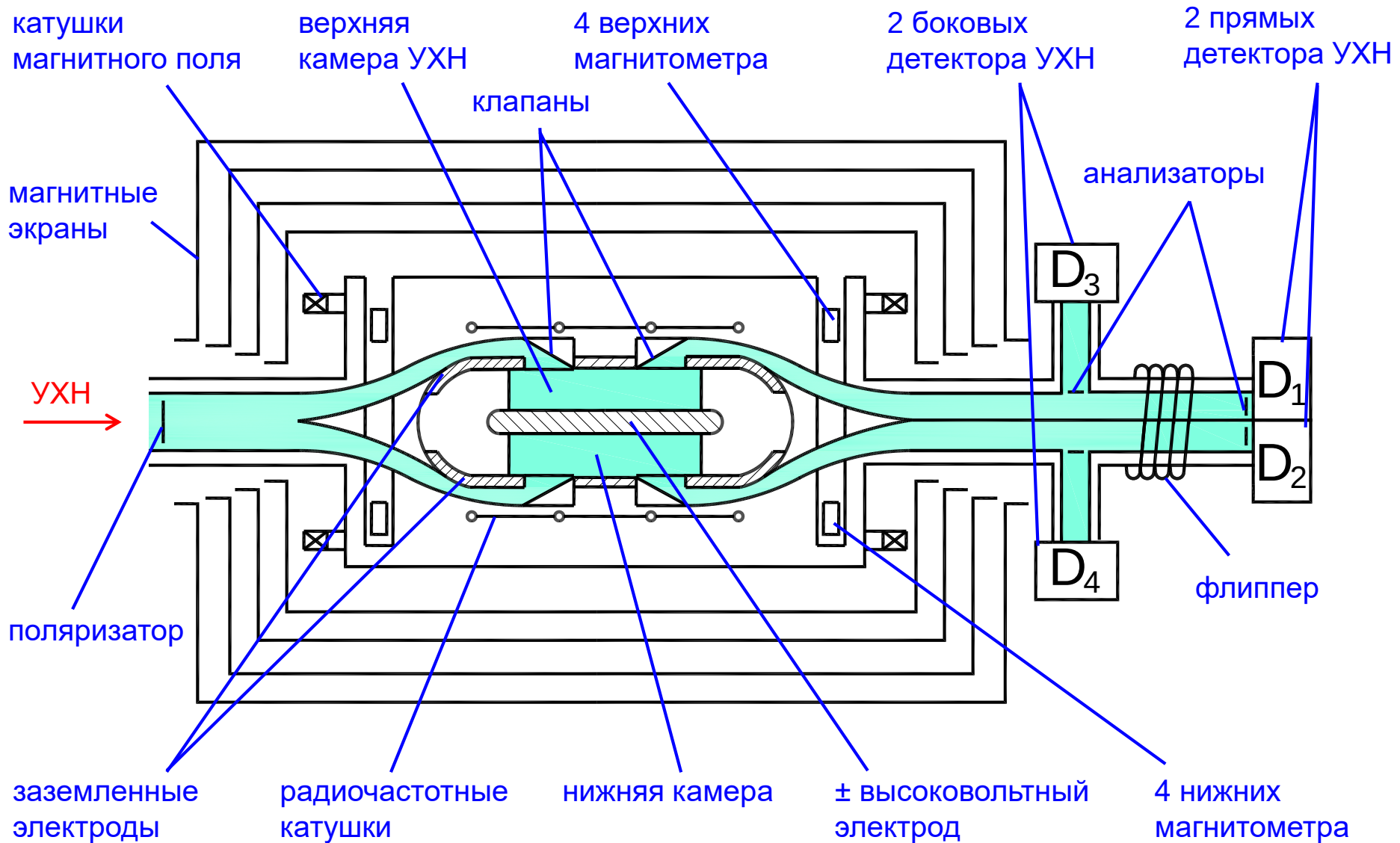
- 1. 8th International Workshop "Ultra Cold & Cold Neutrons. Physics & Sources", 11-21 of June 2011, Saint-Petersburg, Russia  
<http://cns.pnpi.spb.ru/ucn/proceed.html>
- 2. Physics of fundamental Symmetries and Interactions - PSI2013, Paul Scherrer Institut, Switzerland, 8-12 September 2013  
<https://indico.psi.ch/contributionDisplay.py?contribId=12&confId=2036>
- 3. РНСИ-КС-2014, 27-31 октября 2014, Санкт-Петербург, Россия  
<http://rnsiks2014.pnpi.spb.ru/programm.html>
- 4. International Workshop on Particle Physics at Neutron Sources 2018, Grenoble, France, 24-26 May 2018, <https://indico.ill.fr/indico/event/87/session/4/contribution/6>

# История понижения экспериментального предела на ЭДМ нейтрона

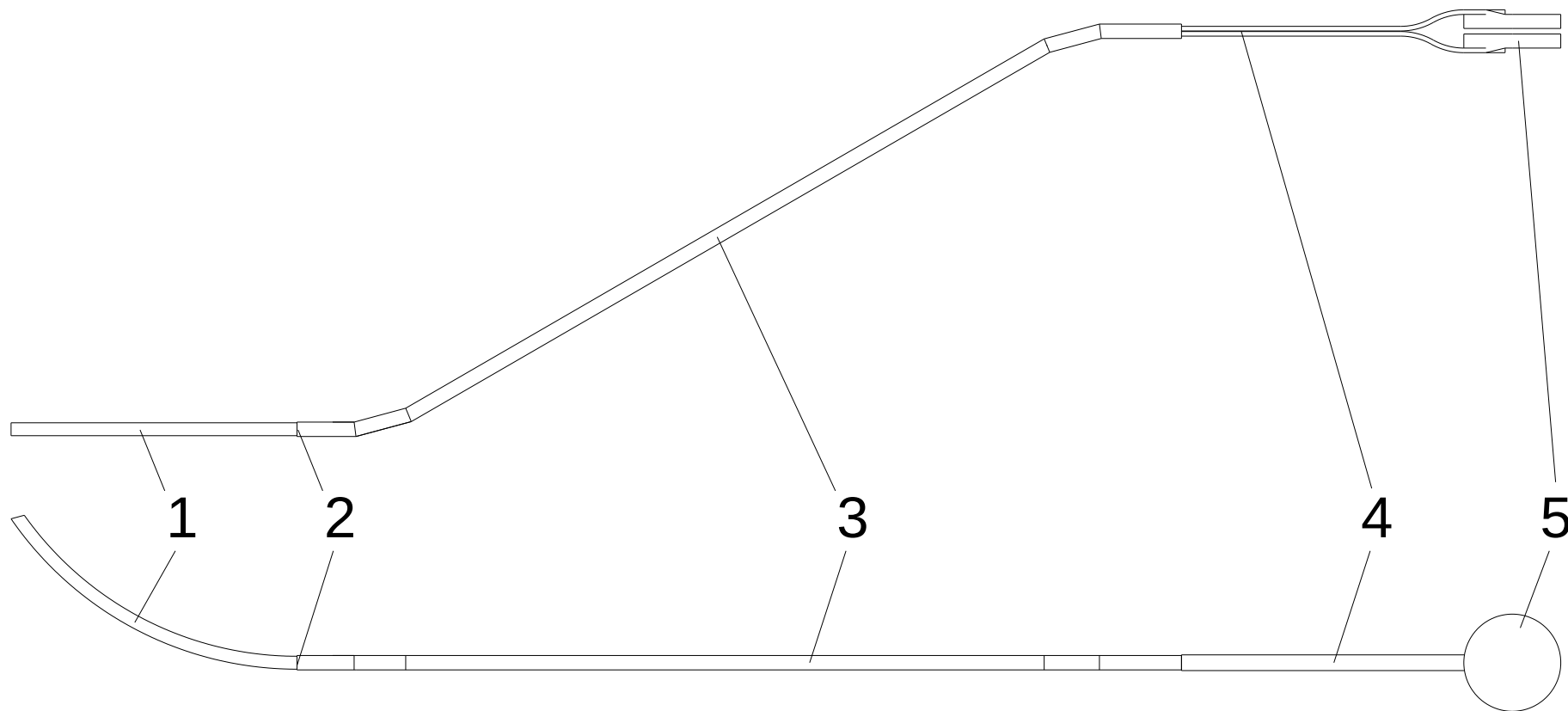




# Эксперимент по поиску ЭДМ нейтрона



# Монте-Карло модель эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона

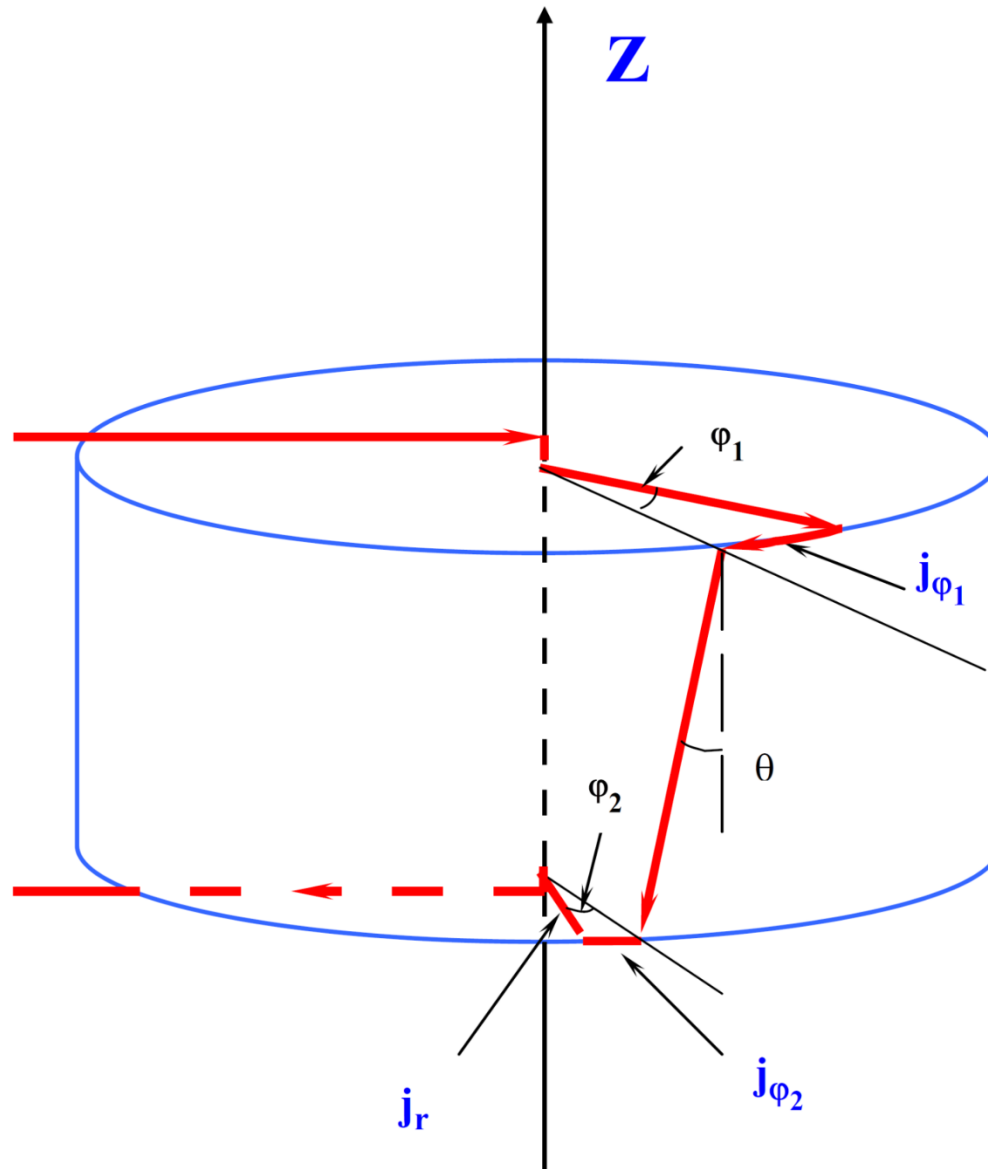


Расчетная схема двухкамерного ЭДМ спектрометра на позиции PF2 EDM:

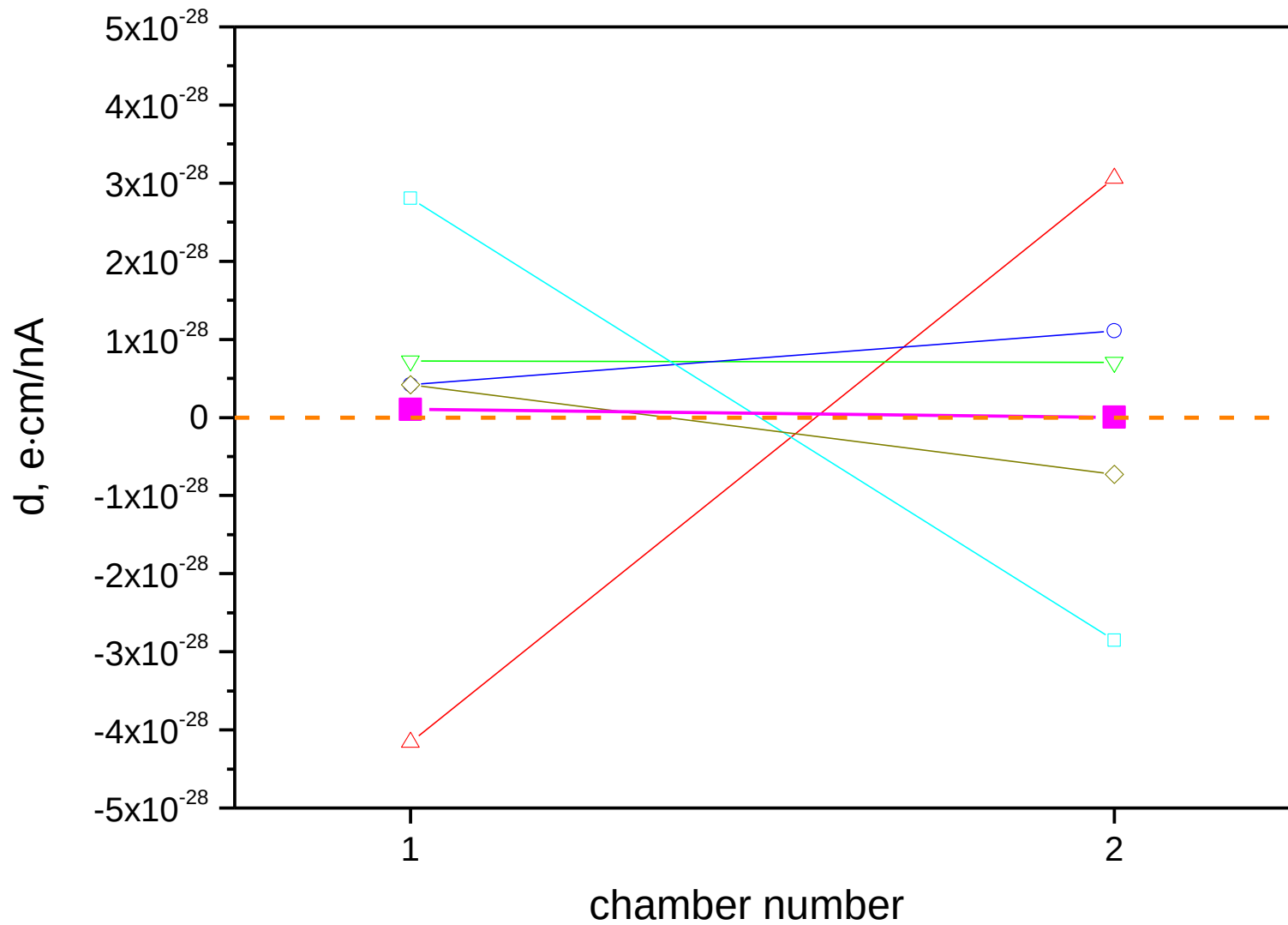
1 – нейтроновод от турбины УХН сечением 70x70 мм, 2 – Al фольга, 3 – нейтроновод диаметром 78 мм, 4 – 2 нейтроновода камер УХН сечением 25x85 мм, 5 – камеры УХН.

*А.К. Фомин, программа для ЭВМ №2018615721. Программа для моделирования эксперимента по поиску электрического дипольного момента нейтрона при помощи двухкамерного магниторезонансного спектрометра*

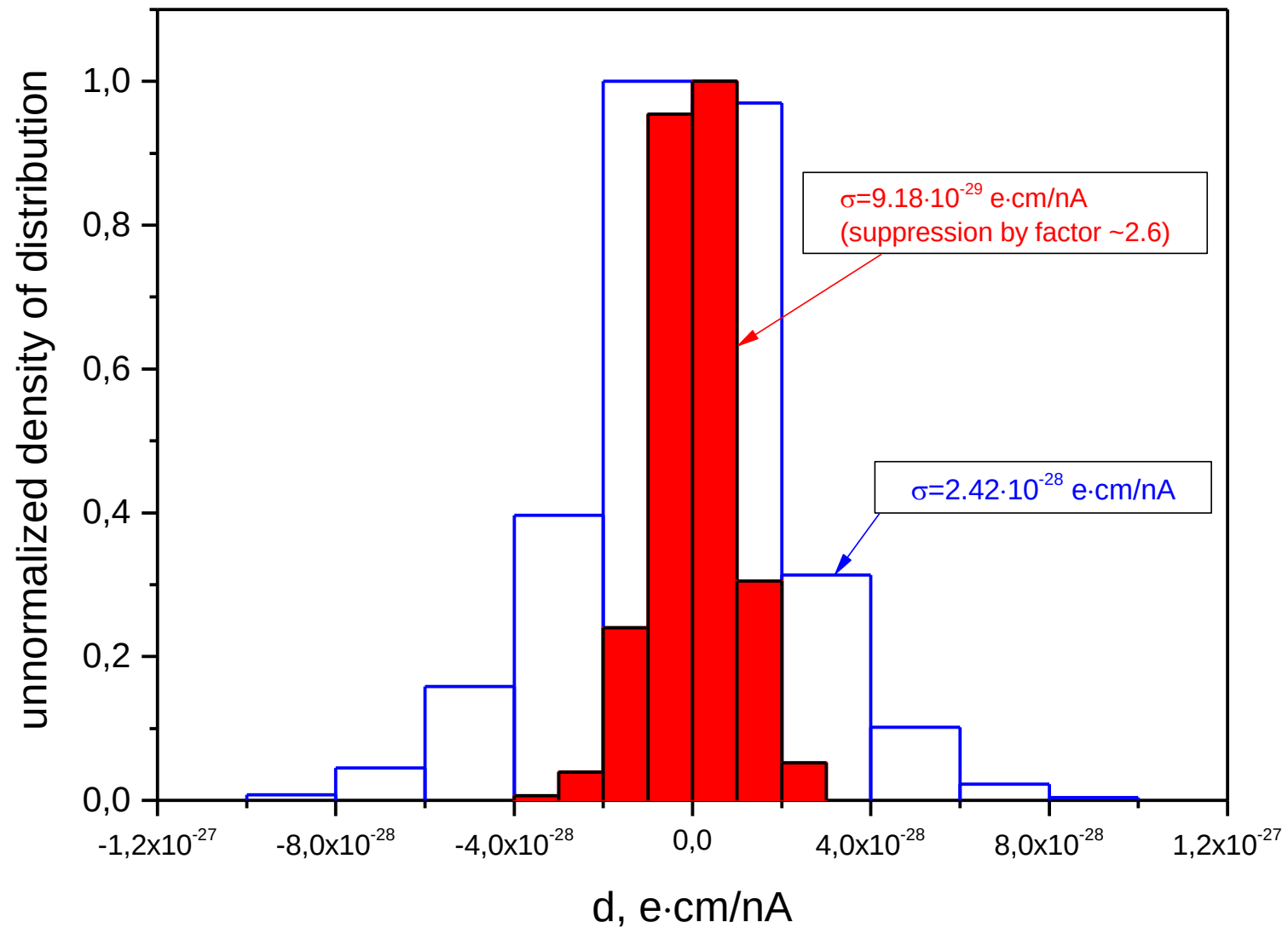
# Систематический эффект от токов утечки



# Систематический эффект от токов утечки



# Систематический эффект от токов утечки



# Измерение ЭДМ нейтрона с двухкамерным спектрометром ПИЯФ

Измерения выполнены на реакторе ILL (Гренобль, Франция) на экспериментальной установке ПИЯФ. Использован двухкамерный магнитно-резонансный спектрометр с длительным удержанием ультрахолодных нейтронов. Полученные результаты на уровне достоверности 90% устанавливают верхний предел на величину ЭДМ нейтрона

$$|d_n| < 5.5 \cdot 10^{-26} \text{ e} \cdot \text{cm}$$

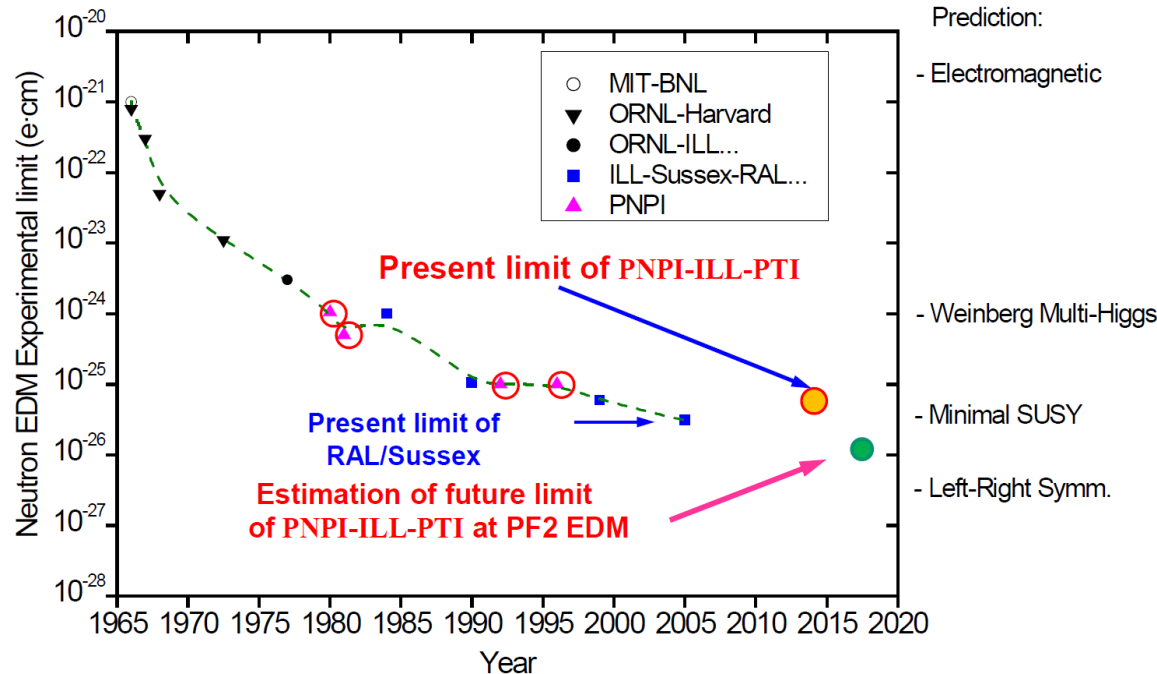


TABLE I. Estimates of false signals.

| False effect                                      | Estimate                            |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Leakage currents (<100 nA)                        | $<10^{-26} \text{ e cm}$            |
| Square effect $\mathbf{v} \times \mathbf{E}$      | $<10^{-28} \text{ e cm}$            |
| Nonparallelity of $\mathbf{B}_0$ and $\mathbf{E}$ | $<2 \times 10^{-28} \text{ e cm}$   |
| Geometric phase                                   | $<7.5 \times 10^{-28} \text{ e cm}$ |



A.P. Serebrov, E.A. Kolomenskiy, A.N. Pirozhkov, I.A. Krasnoschekova, A.V. Vassiljev, A.O. Polyushkin, M.S. Lasakov, A.N. Murashkin, V.A. Solovey, A.K. Fomin, I.V. Shoka, O.M. Zhrebtsov, P. Geltenbort, S.N. Ivanov, O. Zimmer, E.B. Alexandrov, S.P. Dmitriev, N.A. Dovator, Phys. Rev. C 92 (2015) 055501

# Эксперимент по поиску ЭДМ нейтрона

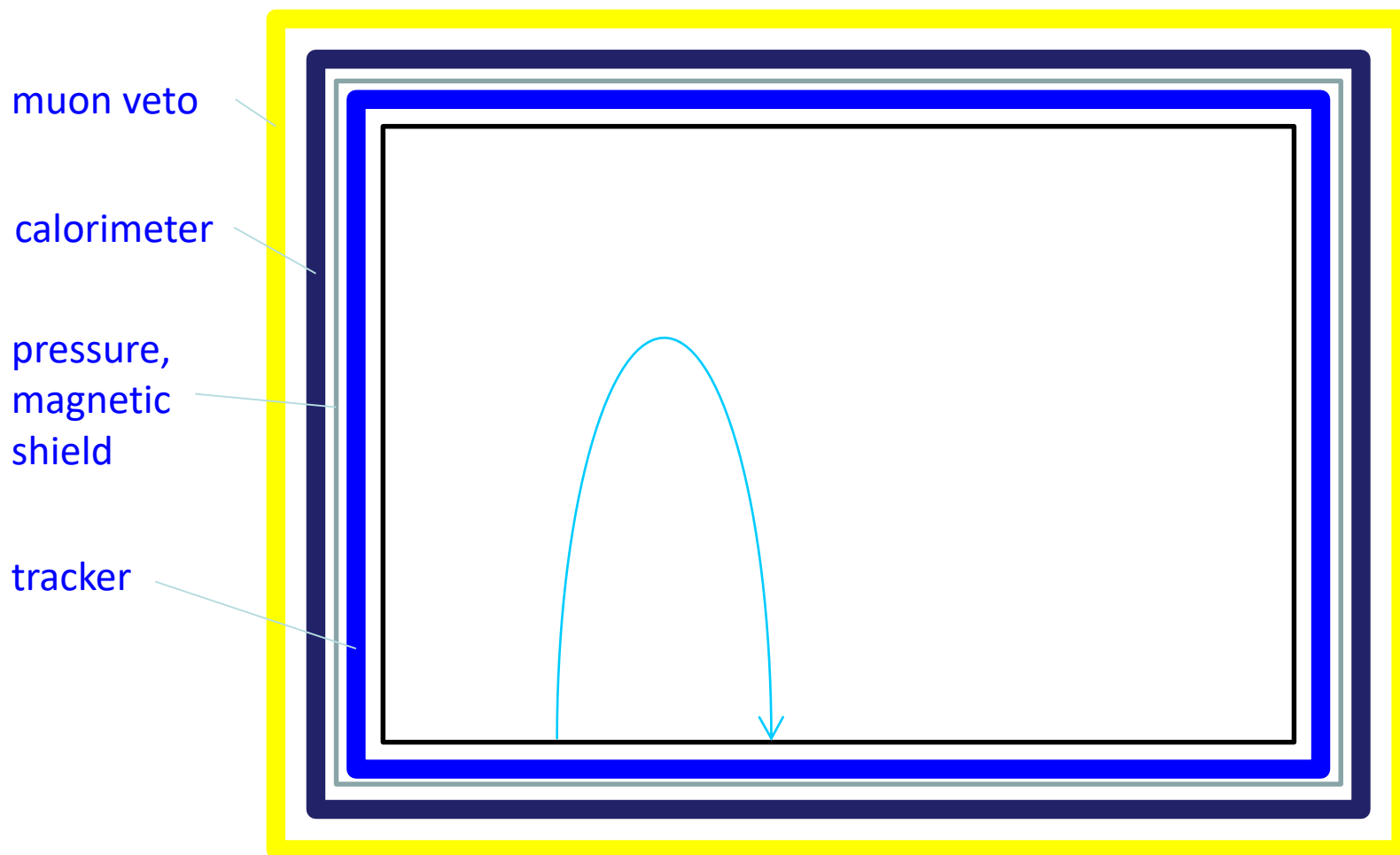
Разработана компьютерная модель эксперимента по поиску электрического дипольного момента нейтрона при помощи двухкамерного магнитно-резонансного спектрометра с длительным удержанием УХН. Получен систематический эффект от токов утечки, который составляет  $<10^{-26}$  е·см. Данный эффект был учтен при получении результата эксперимента, который на уровне достоверности 90% устанавливает верхний предел на величину ЭДМ нейтрона  $|d_n| < 5.5 \cdot 10^{-26}$  е·см.

- [1] A.P. Serebrov, E.A. Kolomenskiy, A.N. Pirozhkov, I.A. Krasnoschekova, A.V. Vassiljev, A.O. Polyushkin, M.S. Lasakov, A.N. Murashkin, V.A. Solovey, A.K. Fomin, I.V. Shoka, O.M. Zherebtsov, P. Geltenbort, S.N. Ivanov, O. Zimmer, E.B. Alexandrov, S.P. Dmitriev, N. A. Dovator, Phys. Rev. C 92 (2015) 055501
- [2] A.P. Serebrov, E.A. Kolomenskiy, A.N. Pirozhkov, I.A. Krasnoschekova, A.V. Vasiliev, A.O. Polyushkin, M.S. Lasakov, A.N. Murashkin, V.A. Solovey, A.K. Fomin, I.V. Shoka, O.M. Zherebtsov, E.B. Aleksandrov, S.P. Dmitriev, N.A. Dovator, P. Geltenbort, S.N. Ivanov, O. Zimmer, Crystallography Reports 61 (2016) 129

nEDM2014, Ascona, Switzerland, 2-6 November 2014

<https://indico.psi.ch/contributionDisplay.py?contribId=35&confId=2973>

# Поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций

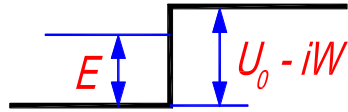


*А.К. Фомин, программа для ЭВМ №2017662103. Программа для моделирования эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с ультрахолодными нейтронами*

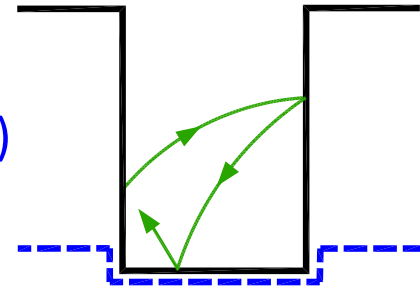


## 2 модели отражения УХН от стенок ловушки

$$\tilde{R} = \left| \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{\tilde{U}_0}{\tilde{E}_\perp} (1 - i\tilde{\eta})}}{1 + \sqrt{1 - \frac{\tilde{U}_0}{\tilde{E}_\perp} (1 - i\tilde{\eta})}} \right|^2$$



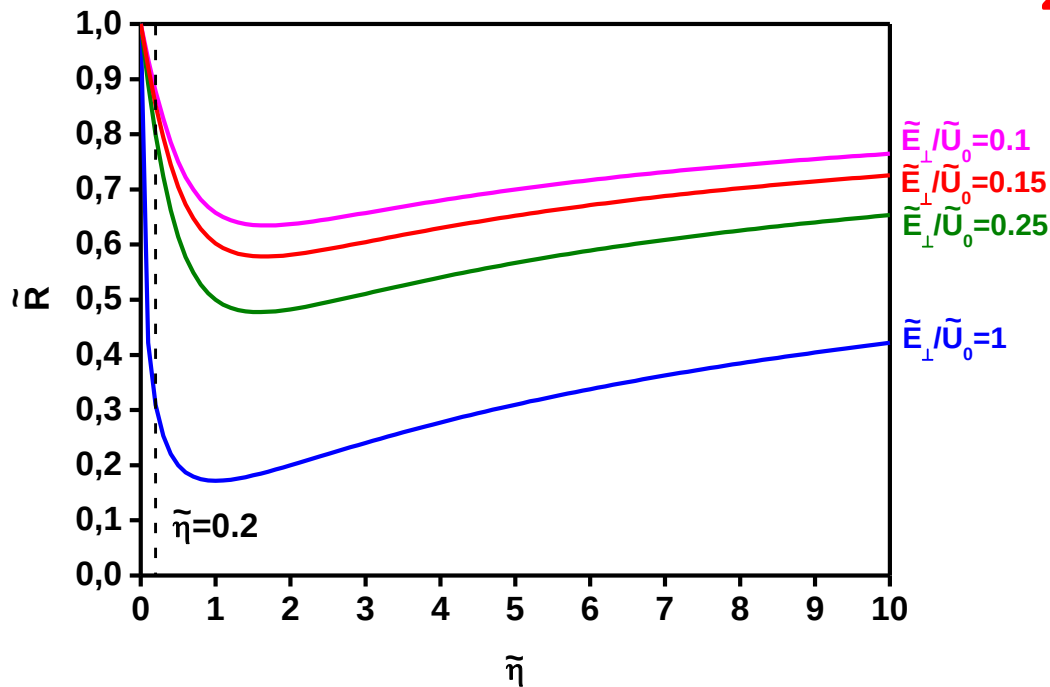
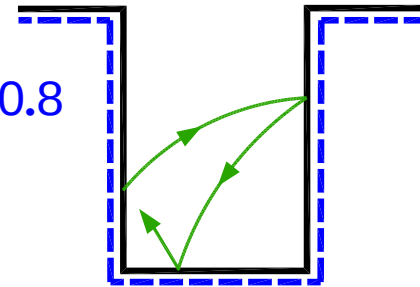
1.  $\tilde{R} = 0$   
(pessimistic case)



$$\tilde{U} = \tilde{U}_0 - i\tilde{W}$$

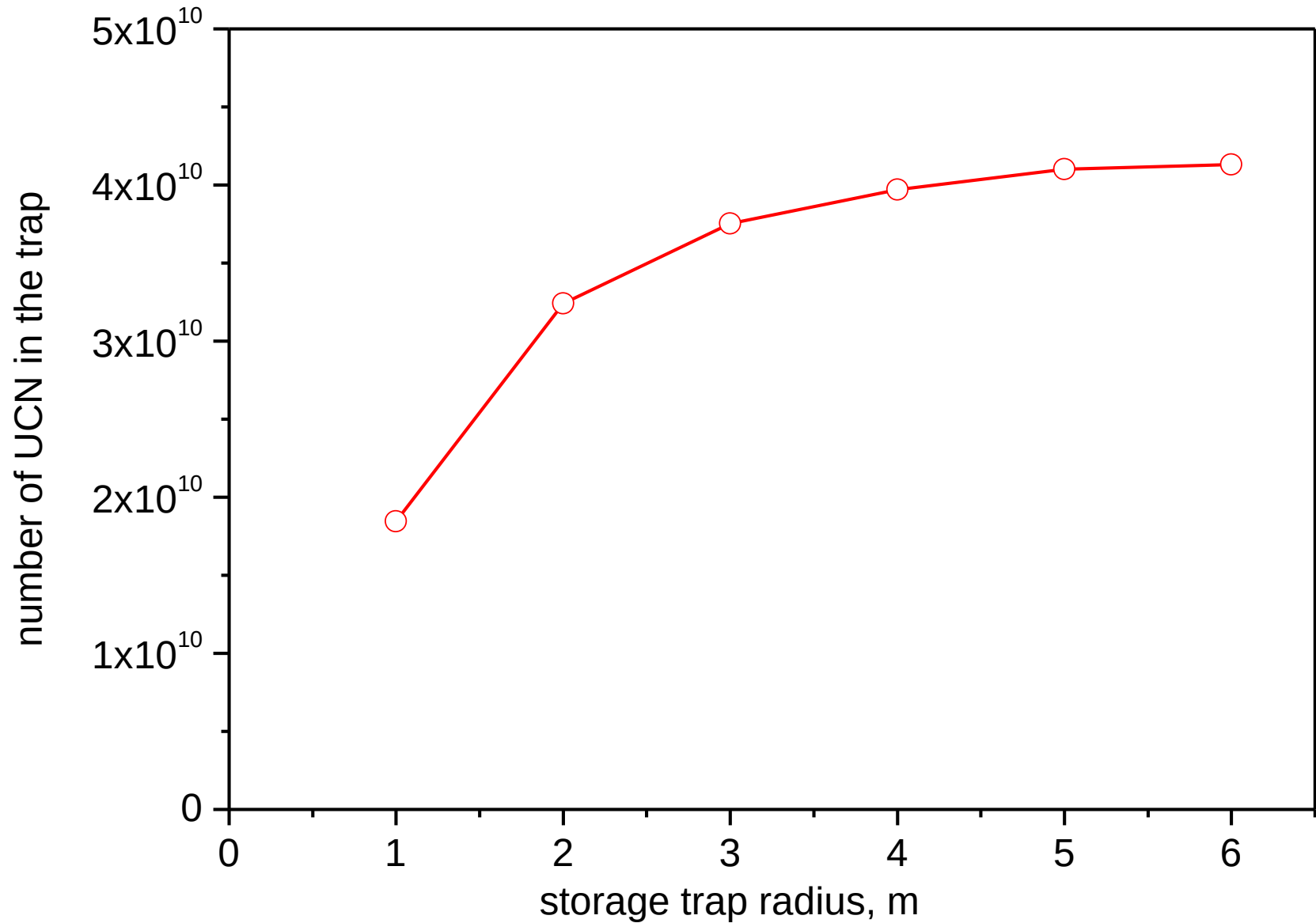
$$\tilde{\eta} = \frac{\tilde{W}}{\tilde{U}_0}$$

2.  $\tilde{R} = \tilde{R} (\eta = 0.2) \approx 0.8$   
(optimistic case)

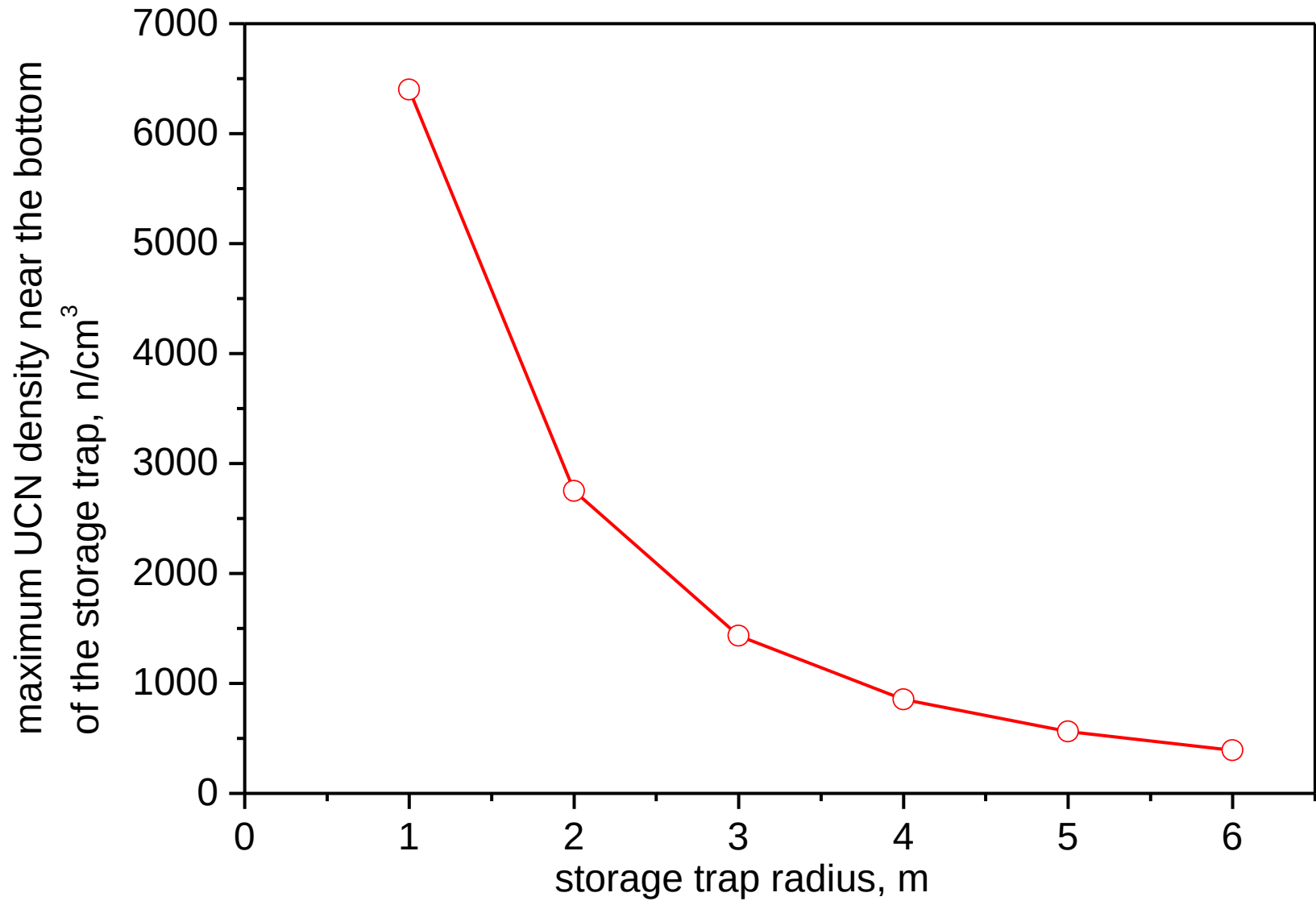


$U_0 - iW$  for  $n$  —  
 $\tilde{U}_0 - i\tilde{W}$  for  $\tilde{n}$  - - -

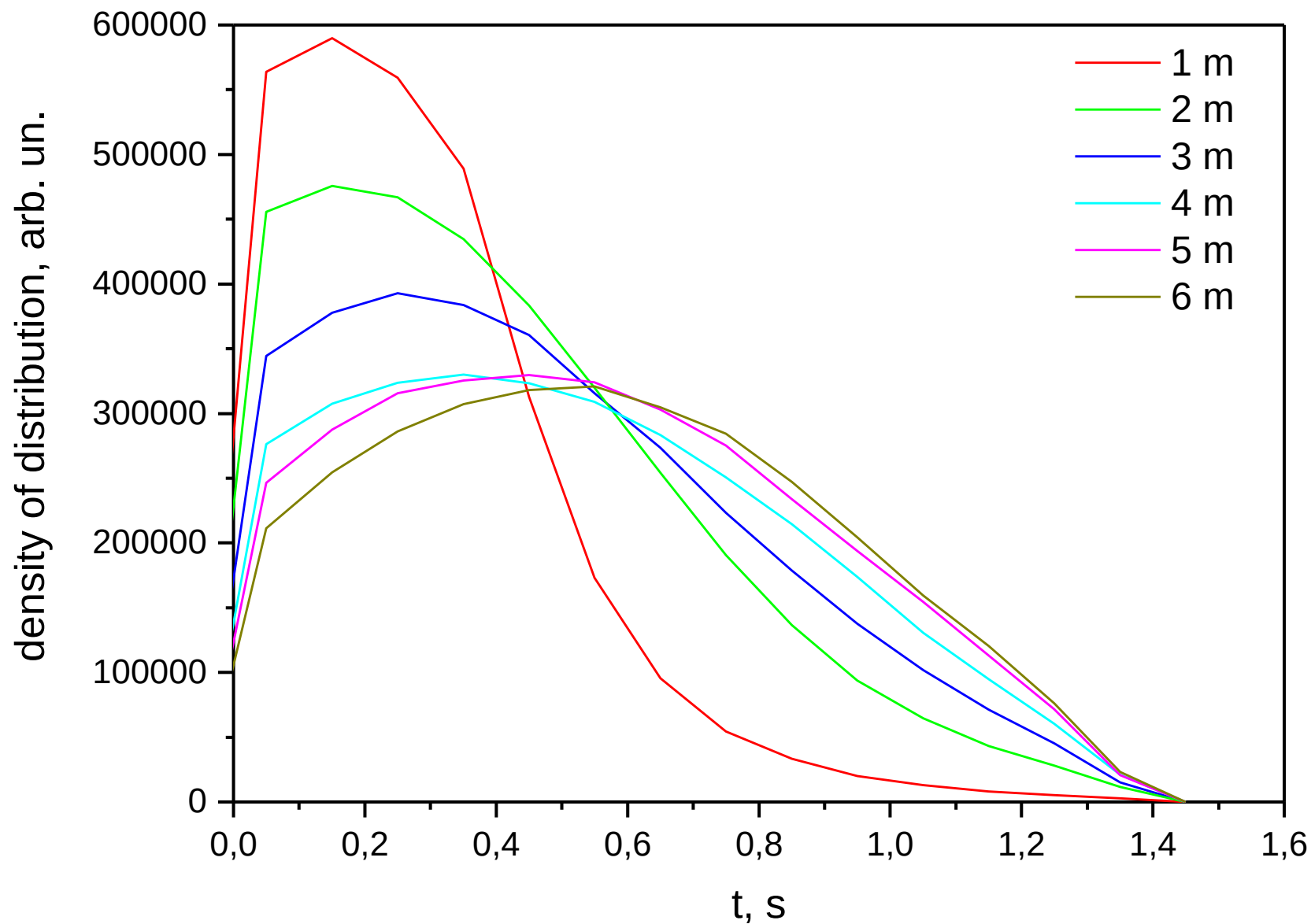
## Количество УХН в ловушке



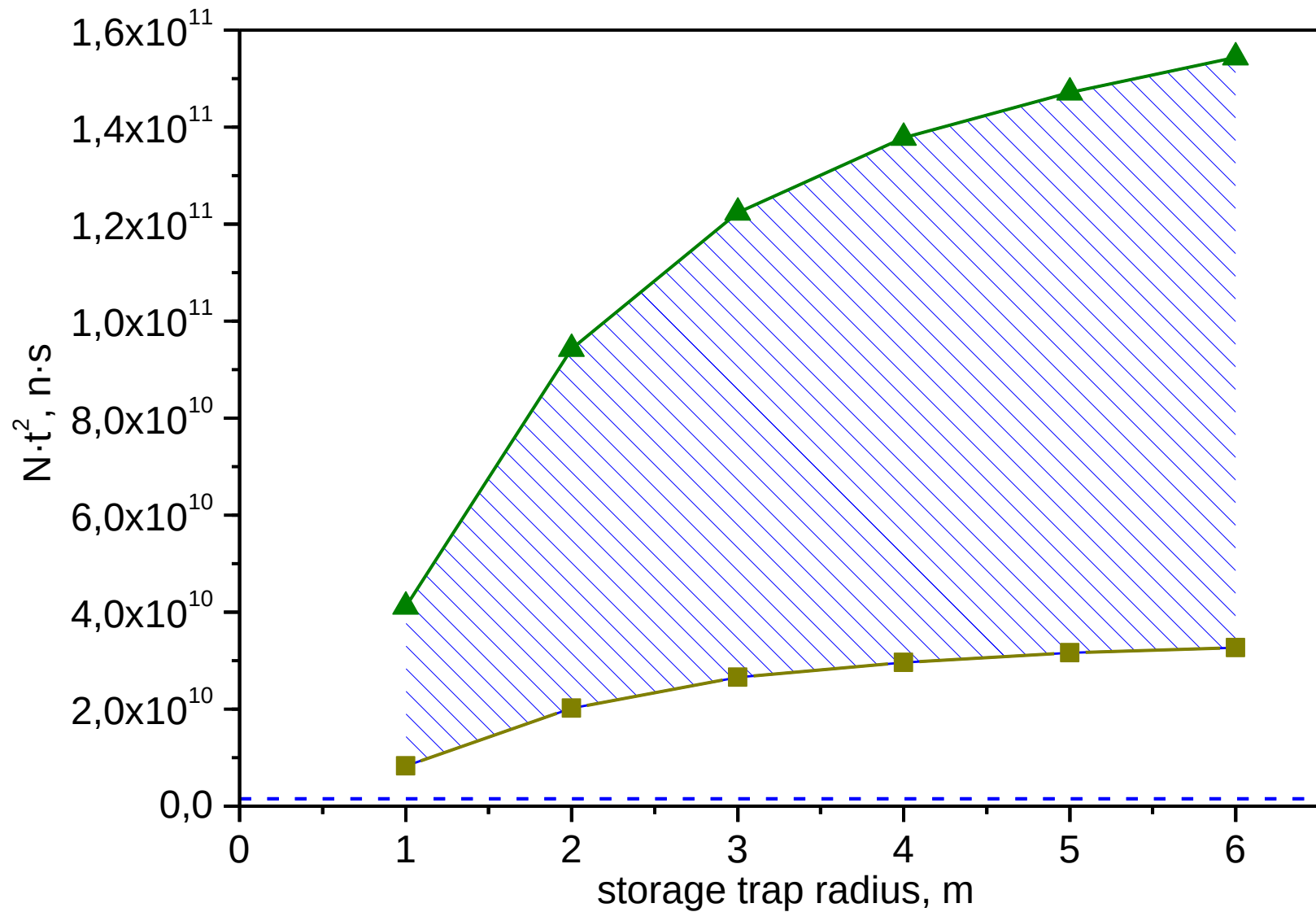
## Плотность УХН в ловушке



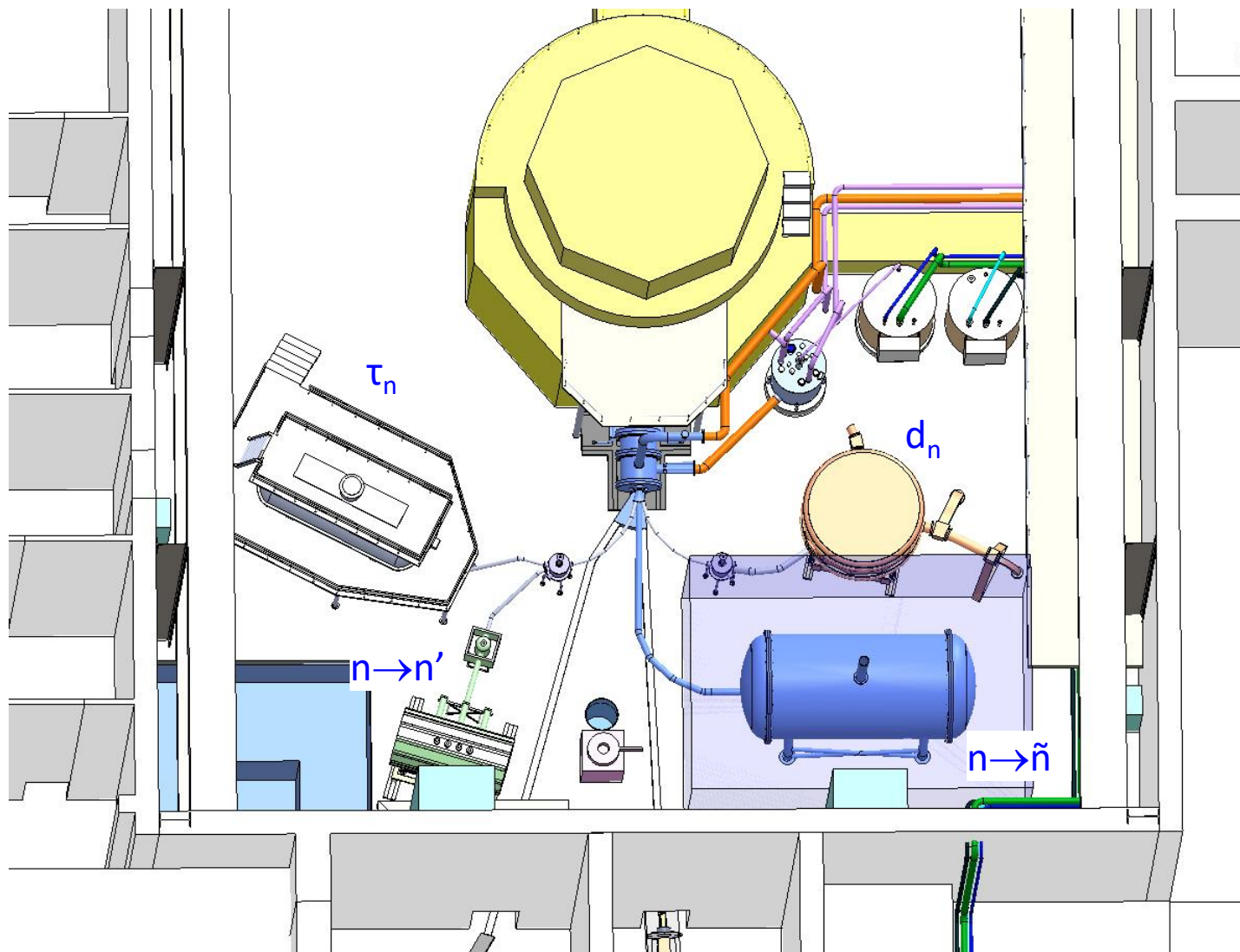
# Время свободного пролета УХН



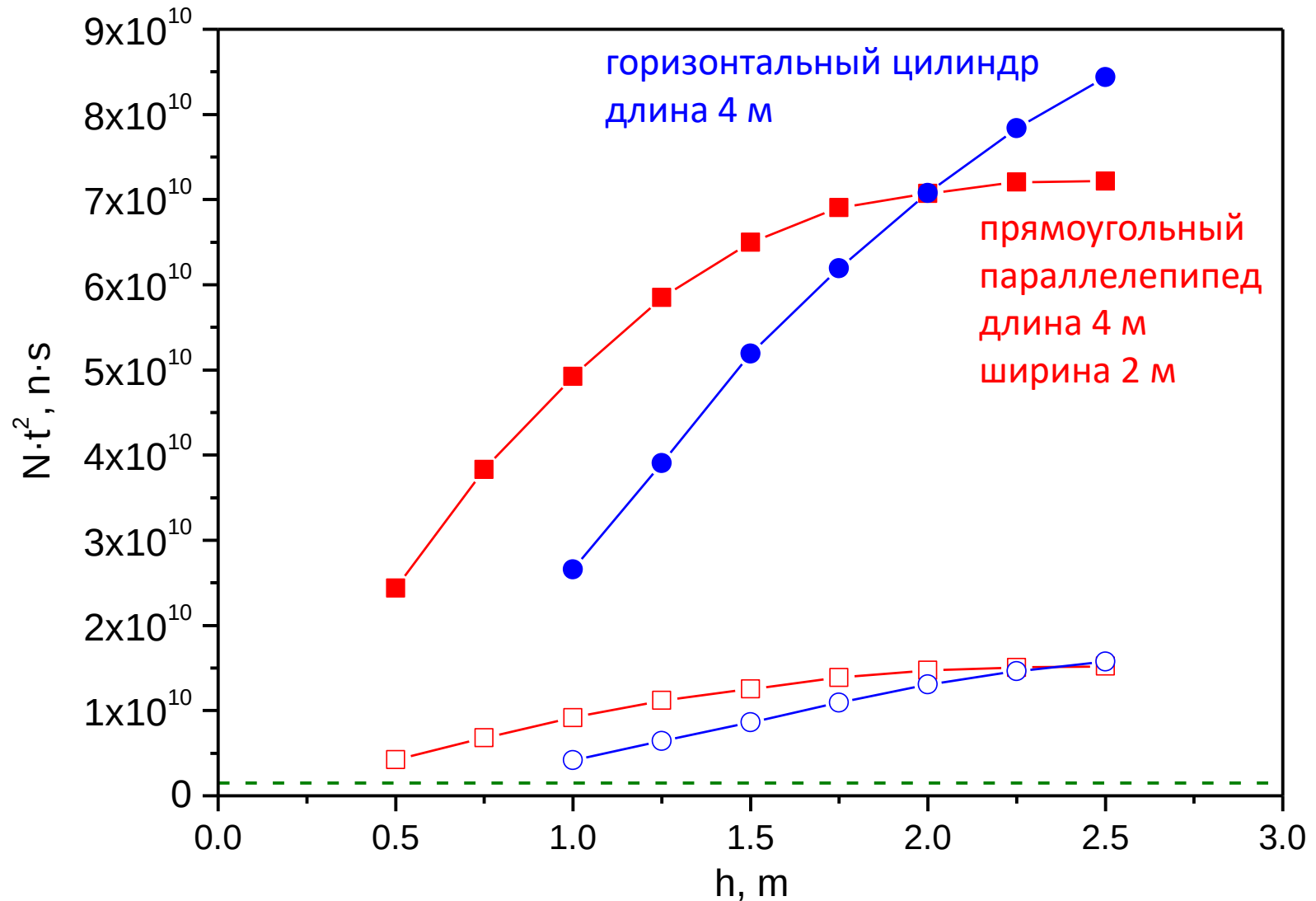
## Чувствительность эксперимента $N \cdot t^2$



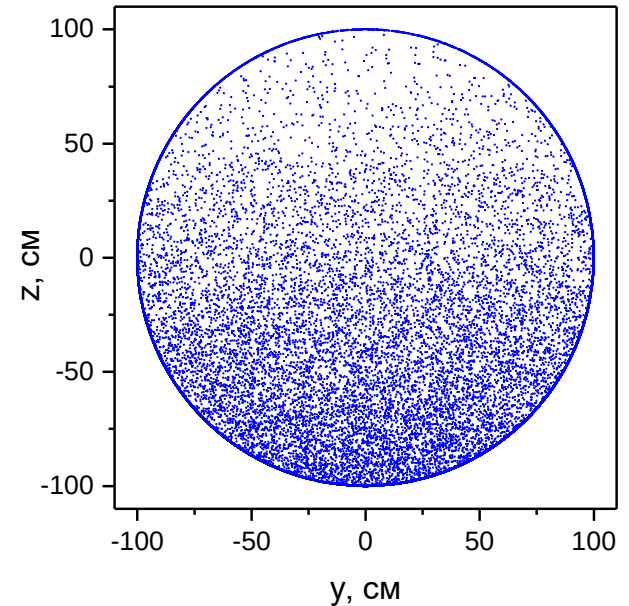
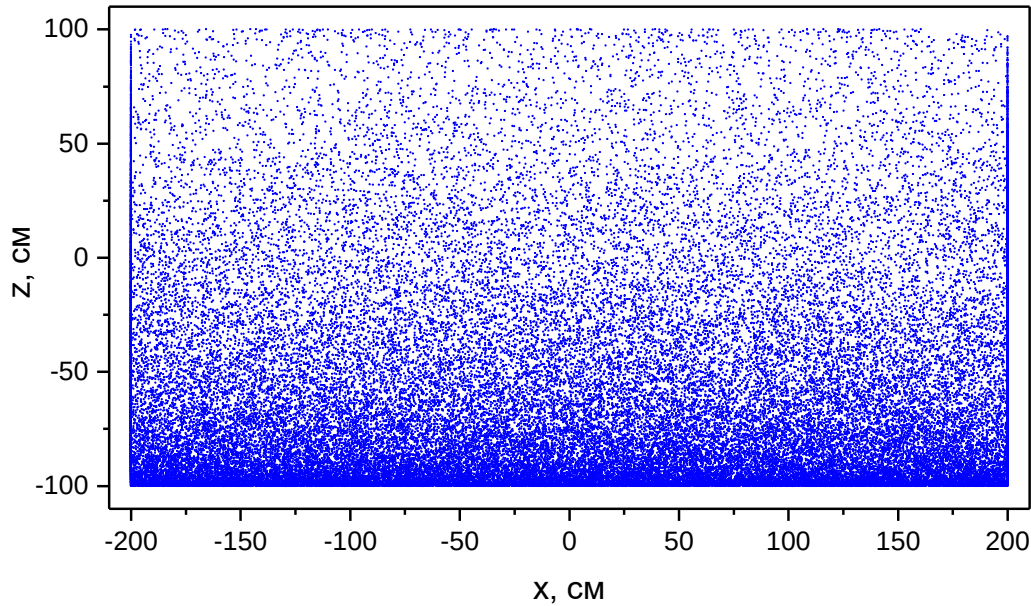
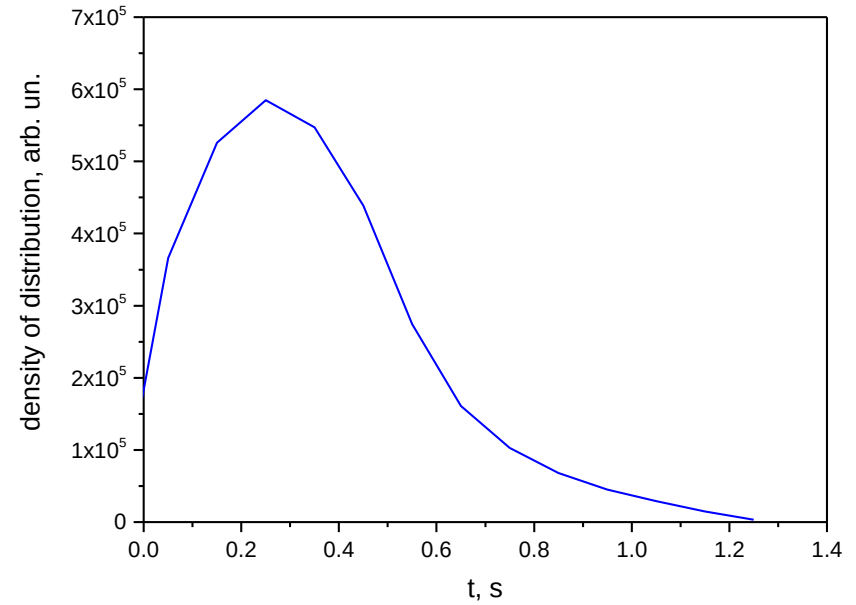
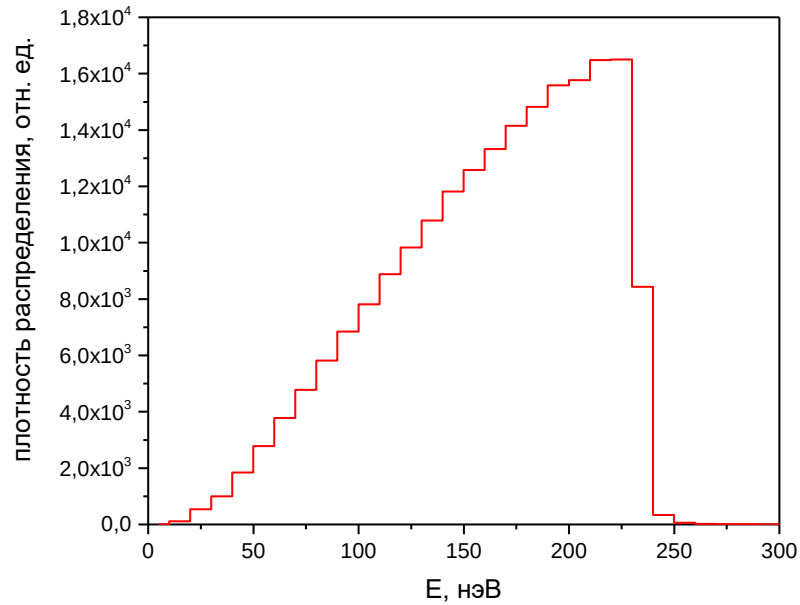
# План главного зала реактора ВВР-М



# Чувствительность эксперимента $N \cdot t^2$



# Моделирование хранения УХН



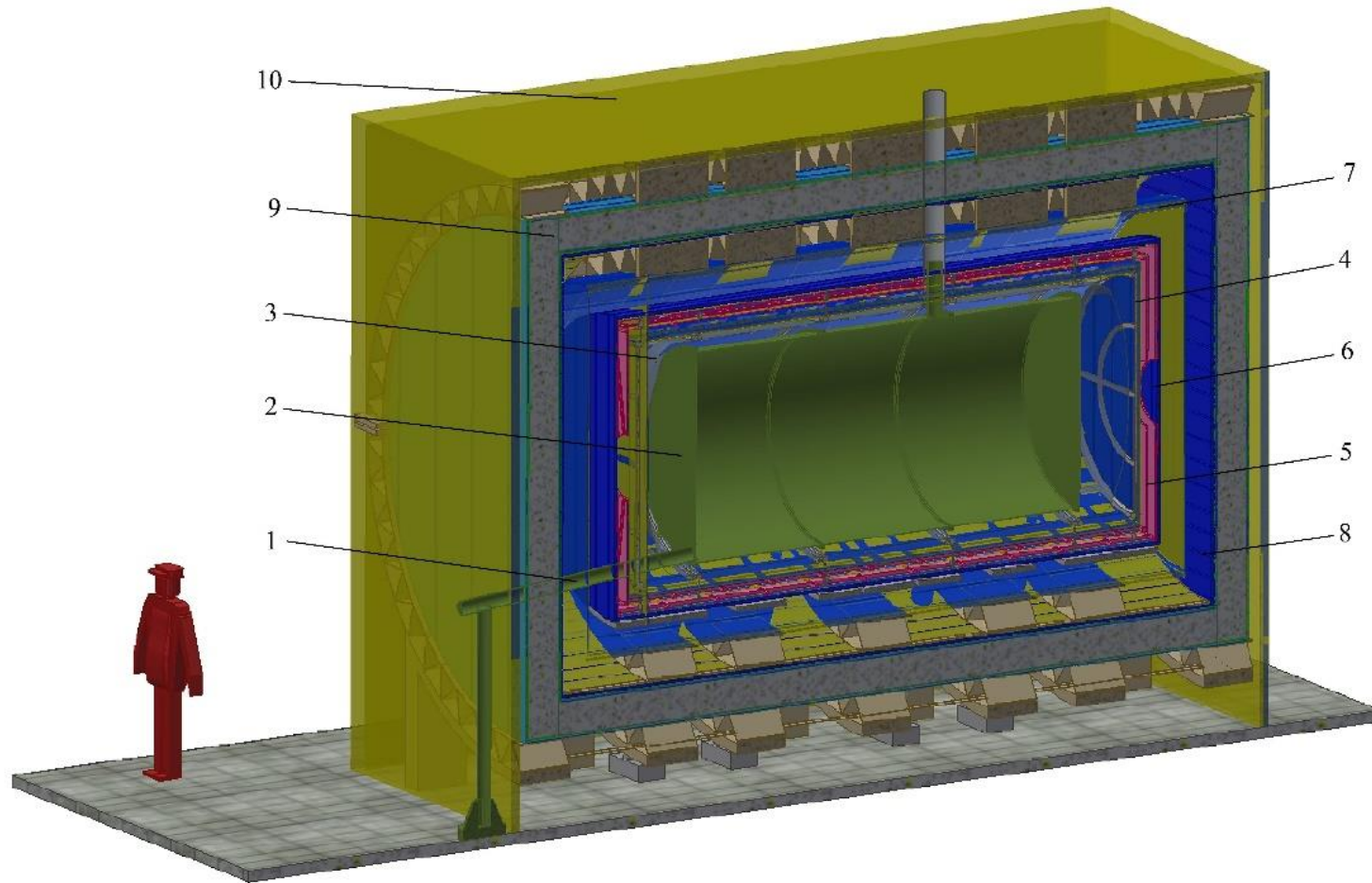


## Поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций

1. Проектируется установка с ловушкой УХН в форме горизонтального цилиндра диаметром 2 м и длиной 4 м
2. Чувствительность эксперимента ИЛЛ может быть увеличена в  $10 \div 40$  раз.
3. Период осцилляций за 3 года:

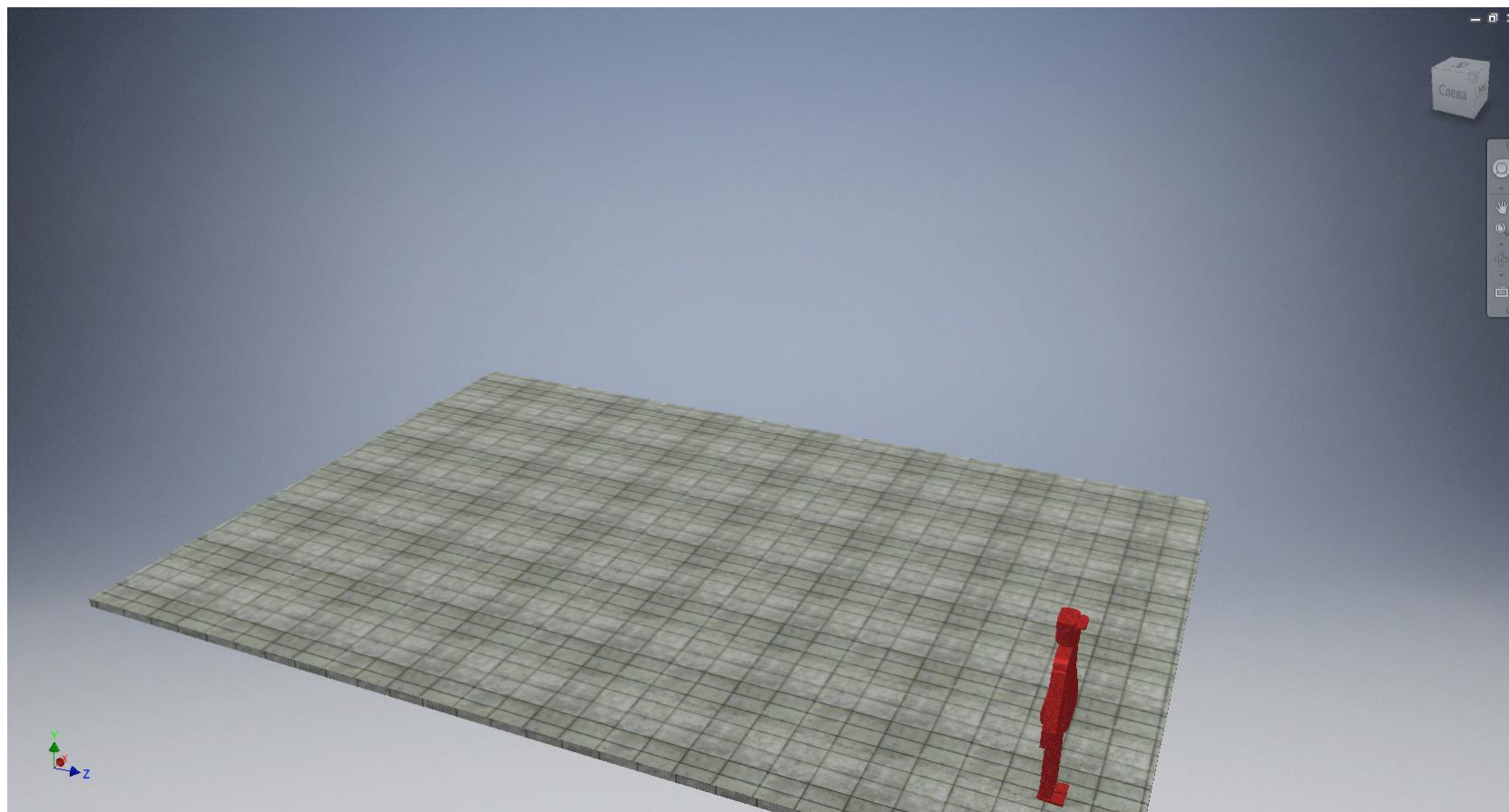
$$\tau_{n\bar{n}} \geq (0.7 \div 1.4) \cdot 10^9 \text{ с (90\% CL)}$$

# Дизайн установки



1 – neutron guide, 2 - UCN trap, 3 - vacuum chamber, 4 – trek detector (inner part), 5 - magnetic shield, 6 - hodoscope (internal part), 7 - trek detector (middle part), 8 - hodoscope (external part), 9 - calorimeter, 10 – active shielding

# Дизайн установки

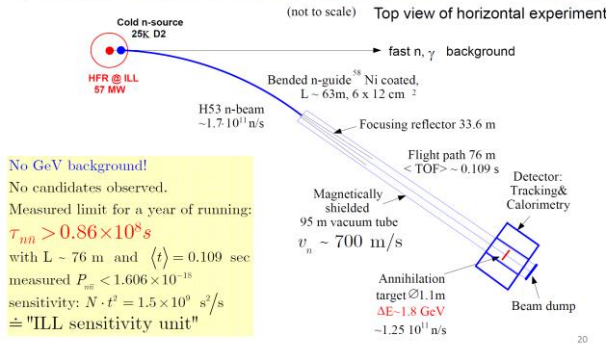


# Size matters

ILL

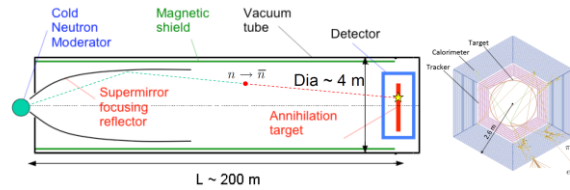
At ILL/Grenoble reactor in 89-91 by Heidelberg-ILL-Padova-Pavia Collaboration

M. Baldo-Ceolin et al., Z. Phys., C63 (1994) 409

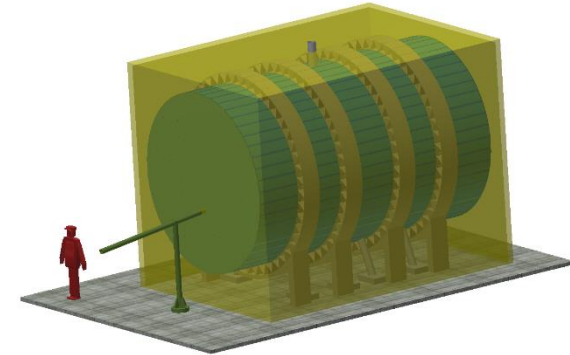


ESS

Scheme of Horizontal N-Nbar experiment for ESS Neutron Source



WWR-M



ESS

ILL

WWR-M

# Поиск нейтрон-антинейтронных осцилляций

Разработан проект эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с использованием УХН. При помощи созданной компьютерной модели получена чувствительность эксперимента на новом источнике УХН создаваемом на реакторе ВВР-М. Чувствительность существующего эксперимента ИПЛ может быть превышена в 10-40 раз в зависимости от модели отражения нейтронов от стенок.

[1] A. P. Serebrov, A.K. Fomin, Yu.A. Kamyshkov, Technical Physics Letters 42 (2016) 99

[2] A.K. Fomin, A.P. Serebrov, O.M. Zhrebtssov, E.N. Leonova, M.E. Chaikovskii, Journal of Physics: Conference Series 798 (2017) 012115

[3] A. Fomin, Proceedings of Science 281 (2016) 189

[4] A. Fomin, A. Serebrov, M. Chaikovskii, O. Zhrebtssov, A. Murashkin, E. Golubeva, Project on searching for neutron-antineutron oscillation at the WWR-M reactor // Journal of Physics: Conference Series 1390 (2019) 012133

1. NNbar at ESS workshop #3, Chalmers, Sweden, 27-28 August 2015

<https://indico.esss.lu.se/event/349/contributions/2632/>

2. International Workshop: Probing Fundamental Symmetries and Interactions with UCN, 11-15 April 2016, Mainz, Germany

<https://indico.mitp.uni-mainz.de/event/59/session/11/contribution/106>

3. Neutron-Antineutron Oscillations: Appearance, Disappearance, and Baryogenesis, October 23 - 27, 2017, Seattle, USA

[http://www.int.washington.edu/talks/WorkShops/int\\_17\\_69W/](http://www.int.washington.edu/talks/WorkShops/int_17_69W/)

4. International Workshop on Particle Physics at Neutron Sources 2018, Grenoble, France, 24-26 May 2018

<https://indico.ill.fr/indico/event/87/session/4/contribution/4>

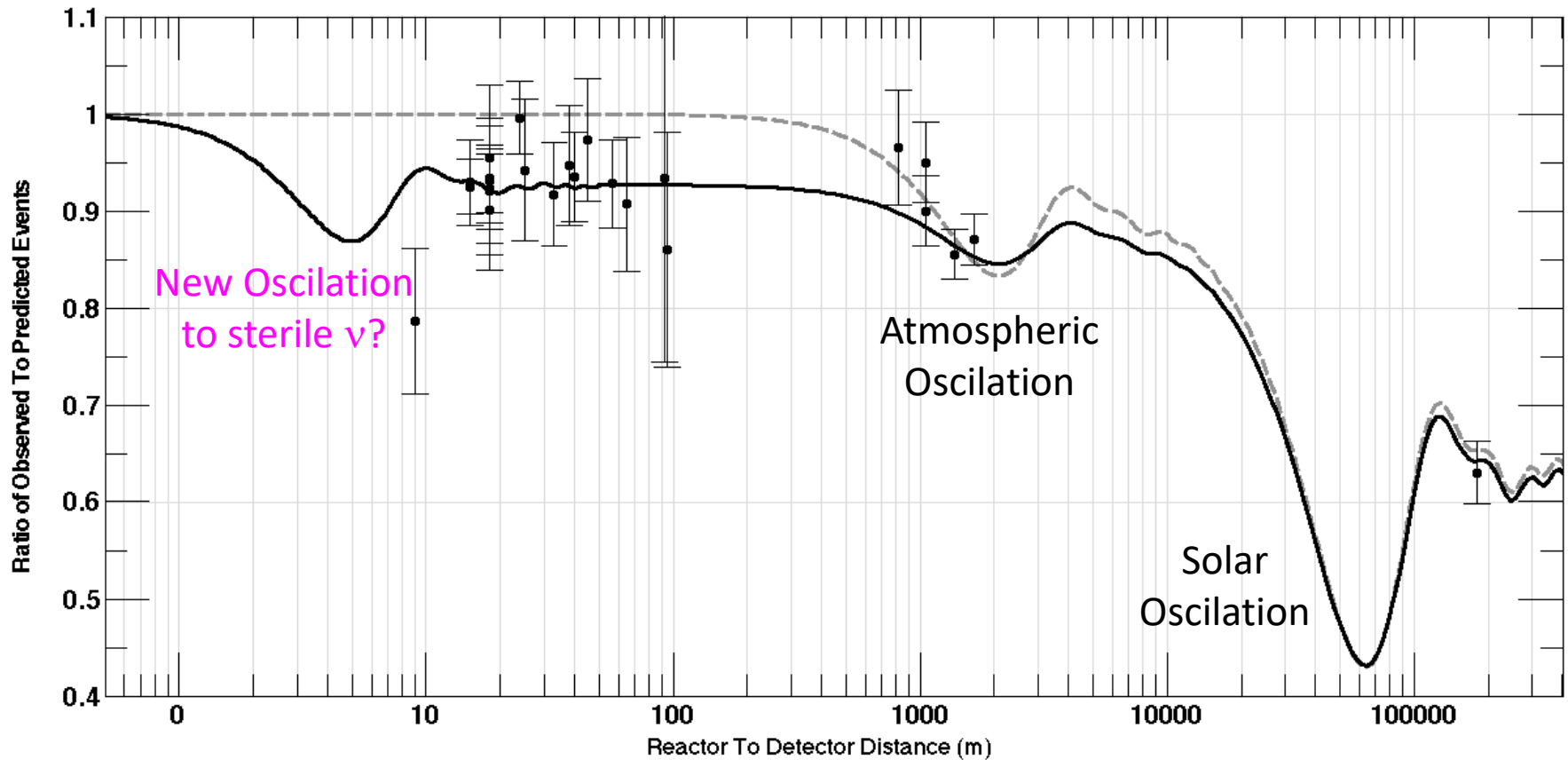
5. Particle Physics with Neutrons at the ESS, Stockholm, Sweden, 10-14 December 2018

<https://agenda.albanova.se/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=6570>

6. Physics of fundamental Symmetries and Interactions - PSI2019, Paul Scherrer Institut, Switzerland, 20-25 October 2019 <https://indico.psi.ch/event/6857/contributions/18996/>

# Реакторная антинейтринная аномалия

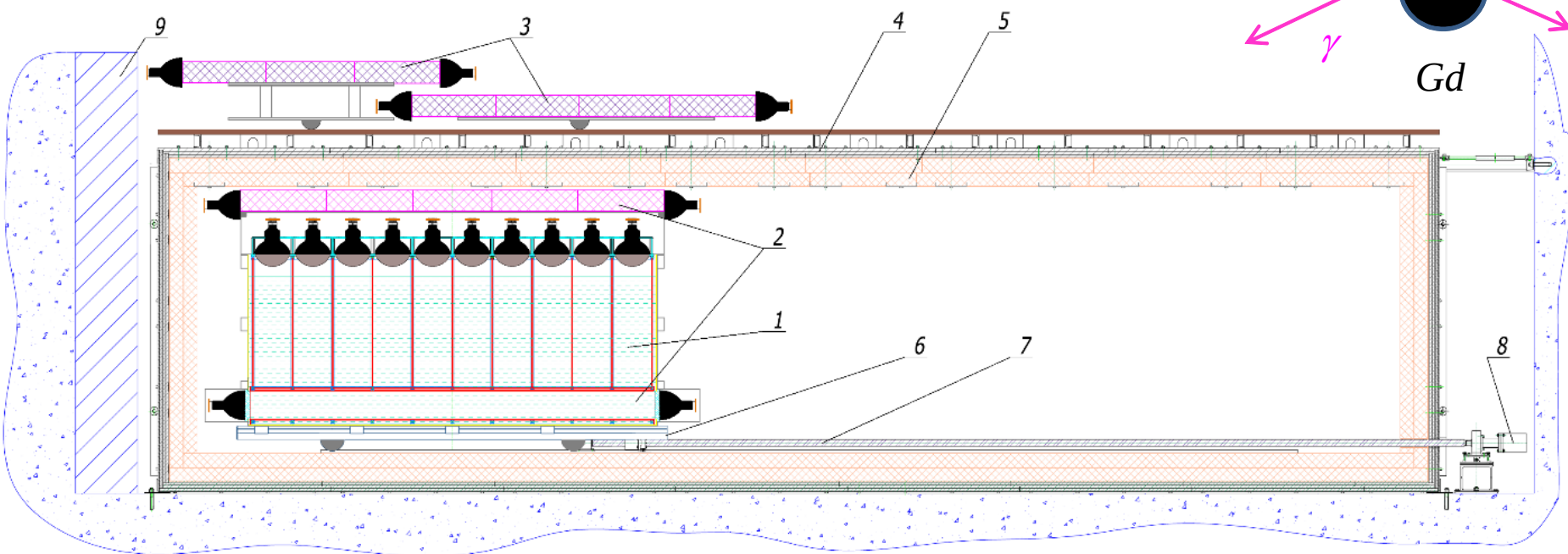
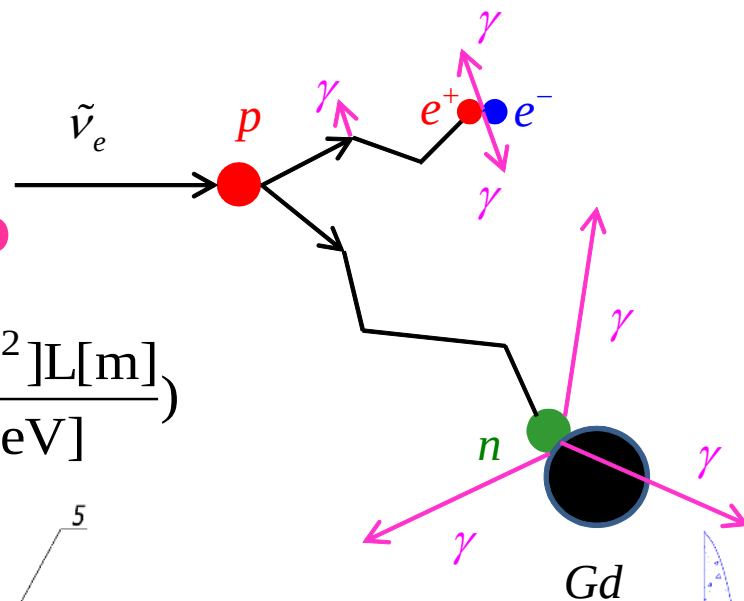
*G. Mention et al., Phys. Rev. D83, 073006, 2011*





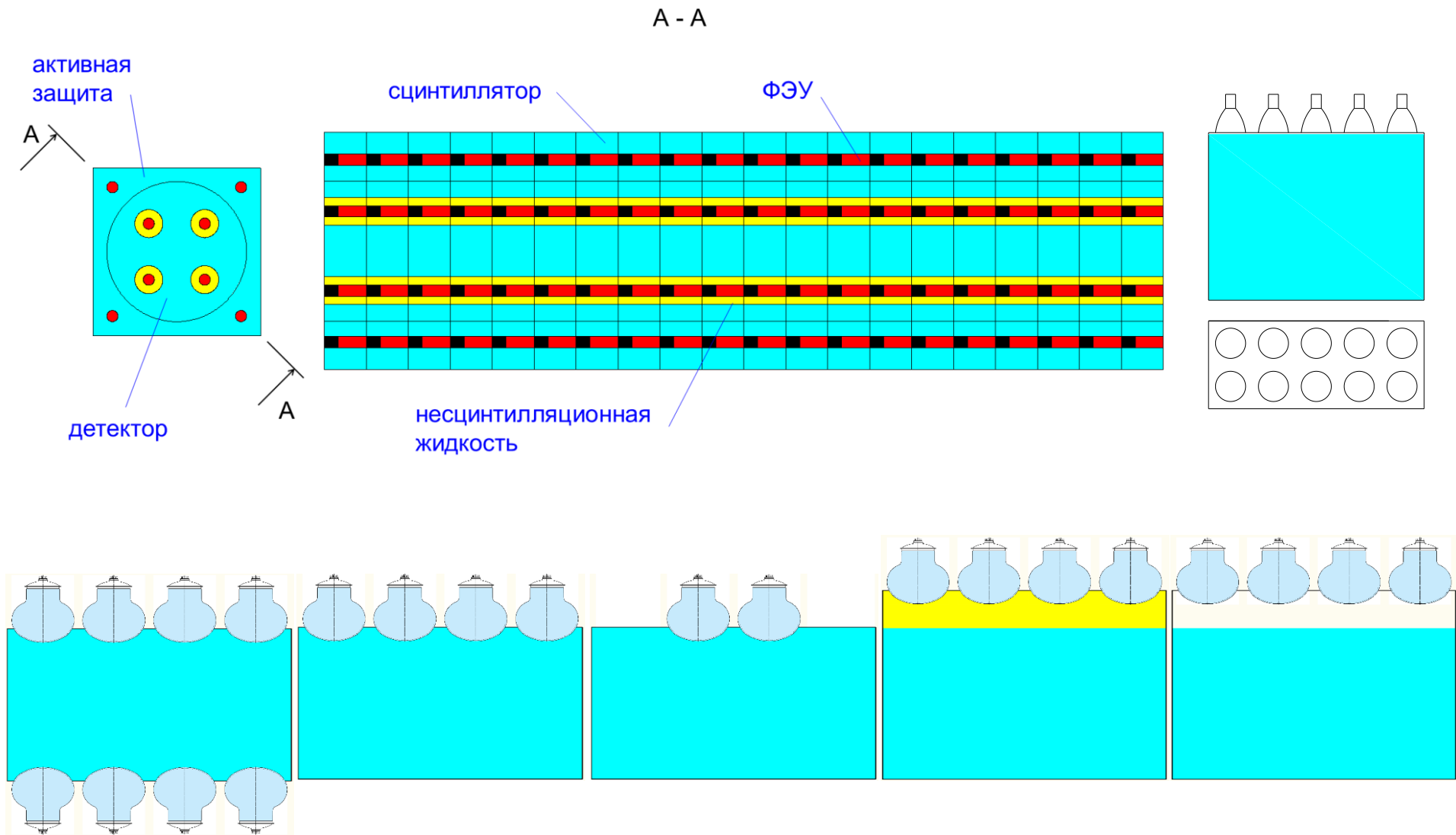
# Эксперимент «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино

$$P(\tilde{\nu}_e \rightarrow \tilde{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{14} \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m_{14}^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_{\tilde{\nu}} [\text{MeV}]} \right)$$



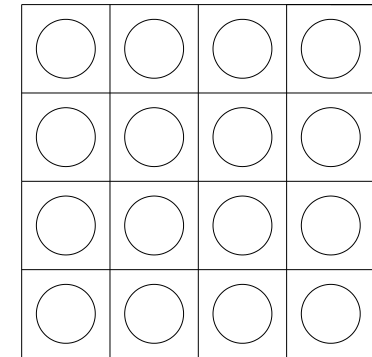
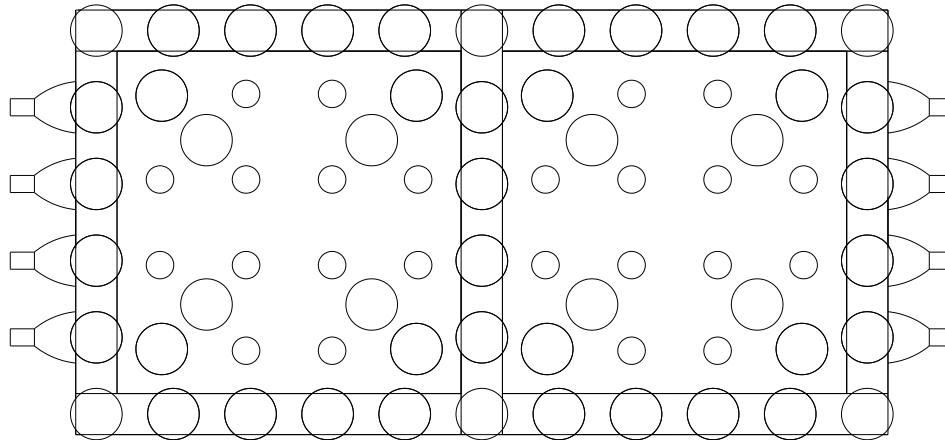
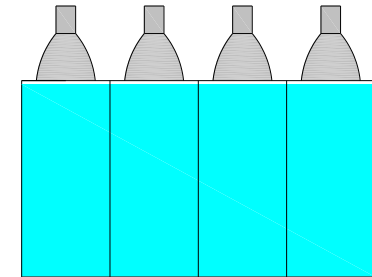
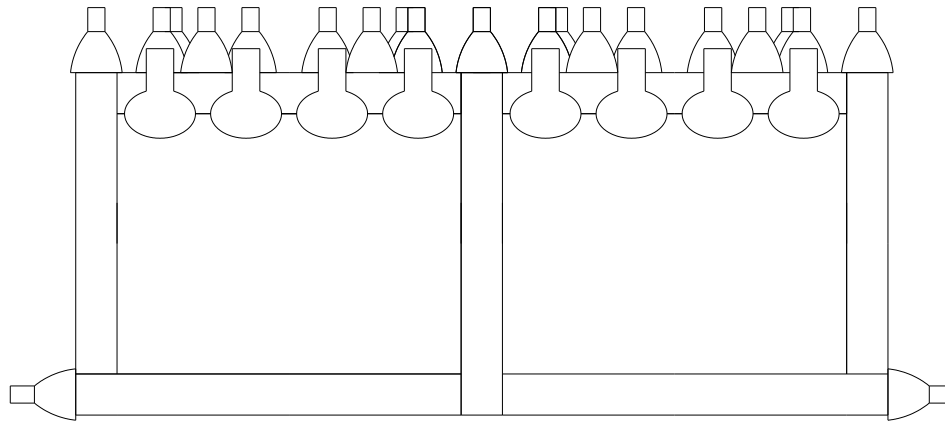
1 - детектор реакторных антинейтрино, 2 - внутренняя активная защита, 3 - внешняя активная защита (зонтик), 4 - борированный полиэтилен пассивной защиты, 5 - стальная и свинцовая пассивная защита, 6 - передвижная платформа, 7 - винт подачи, 8 - шаговый двигатель, 9 - защита от быстрых нейтронов из железной дробы

# Проектирование детектора

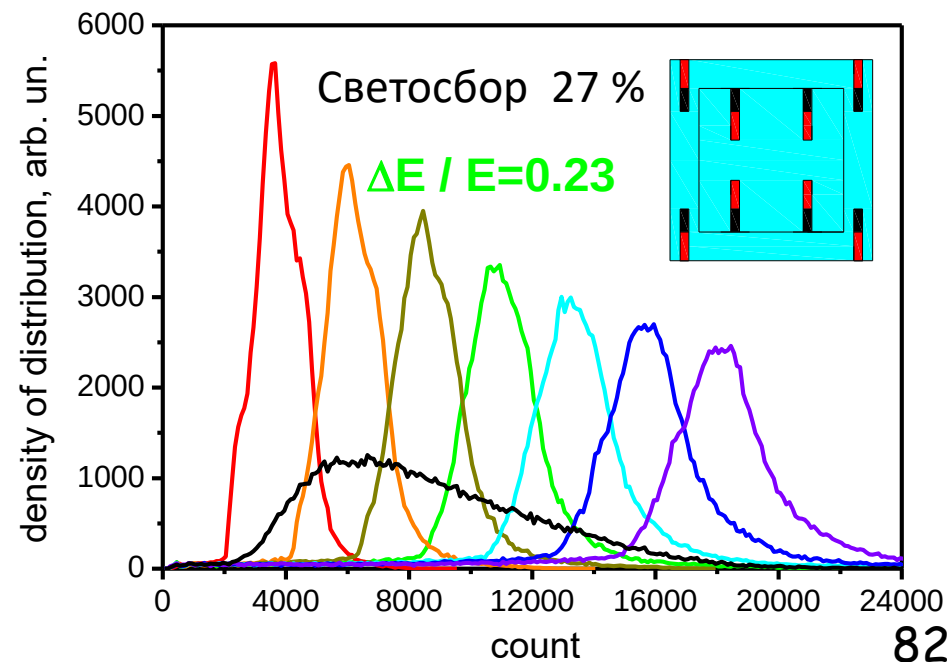
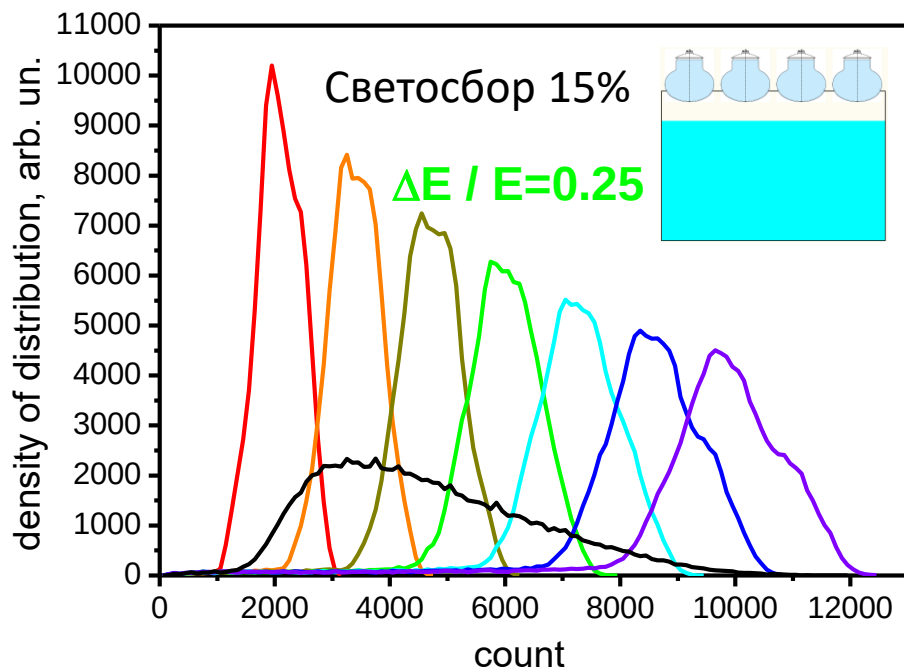
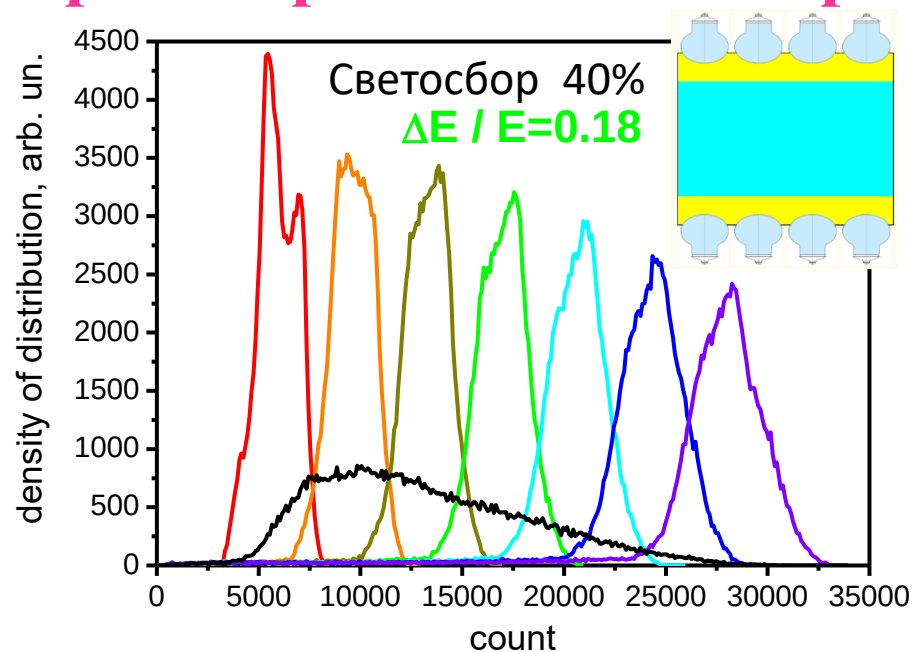




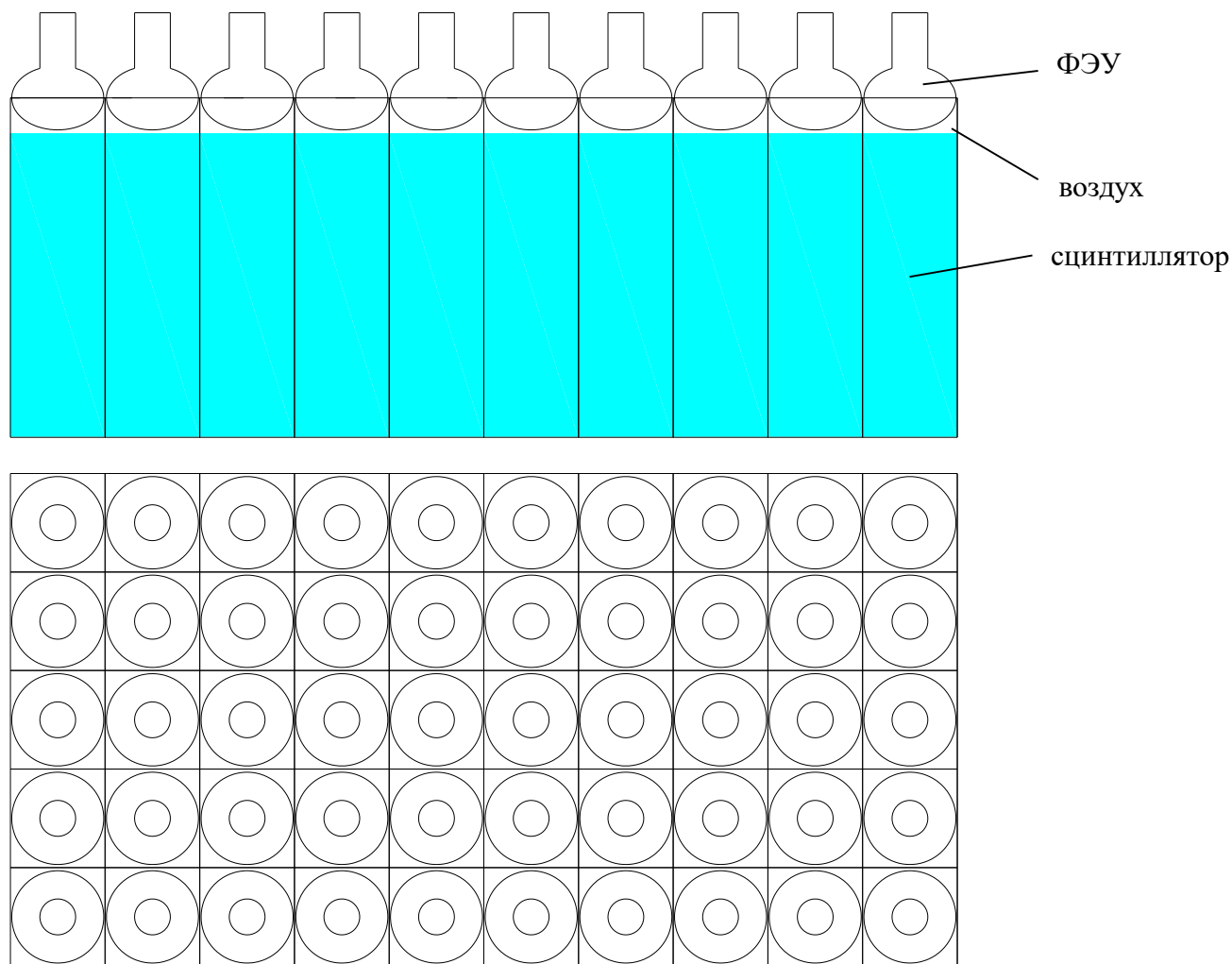
# Проектирование детектора



# Проектирование детектора

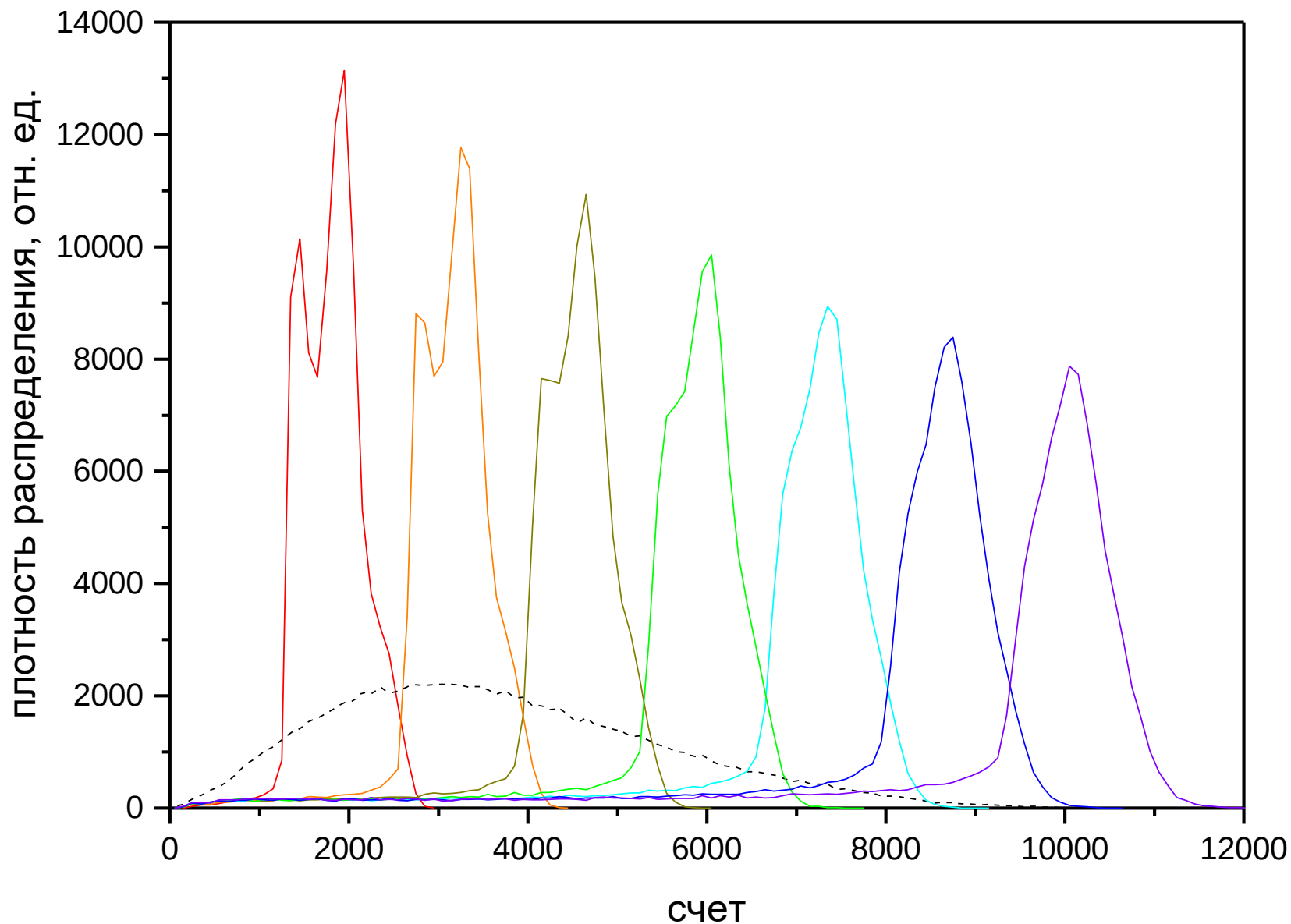


# Расчетная схема детектора реакторных антинейтрино

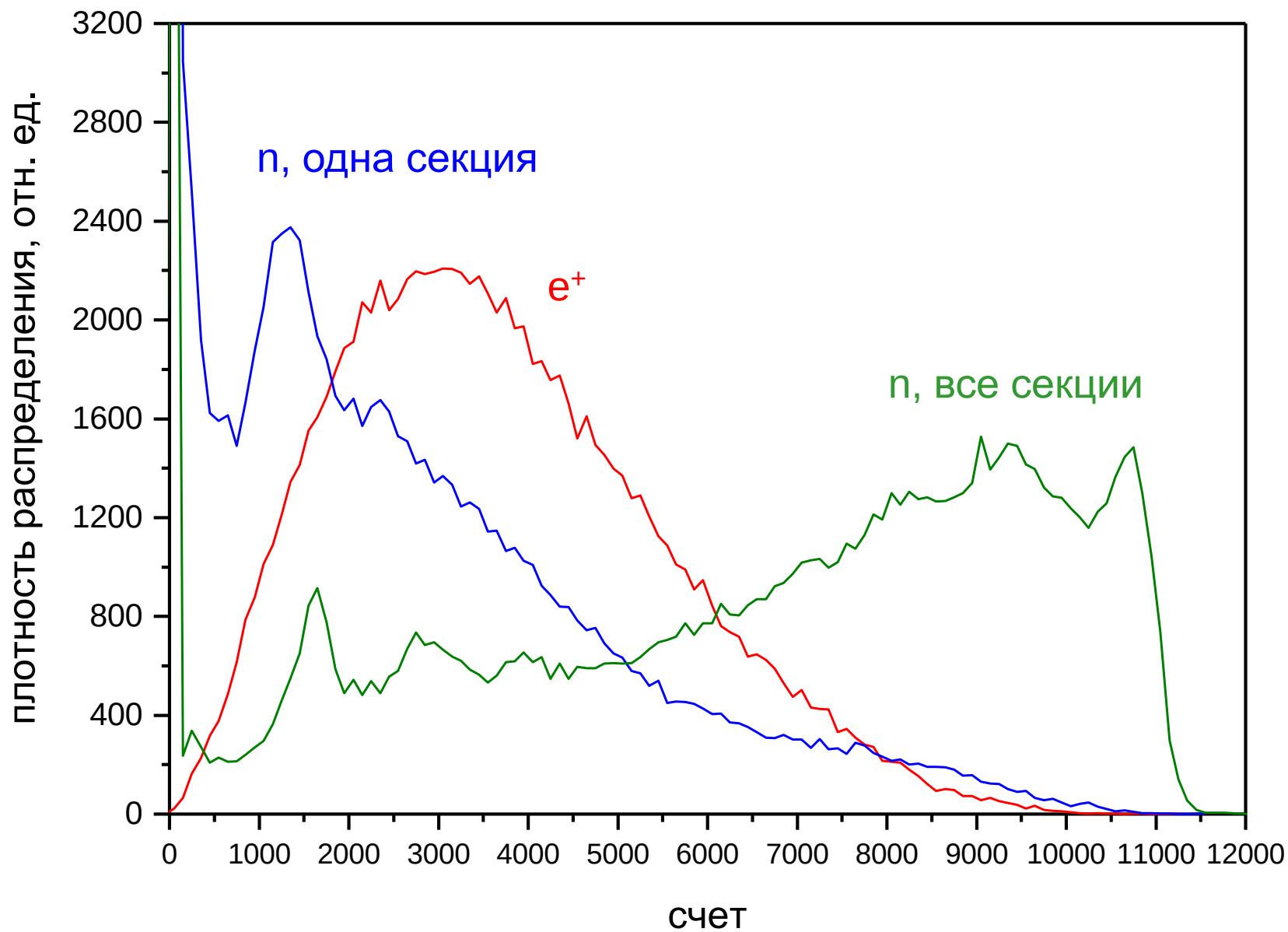


А.К. Фомин, программа для ЭВМ №2017662880. Программа для моделирования детектора реакторных антинейтрино.

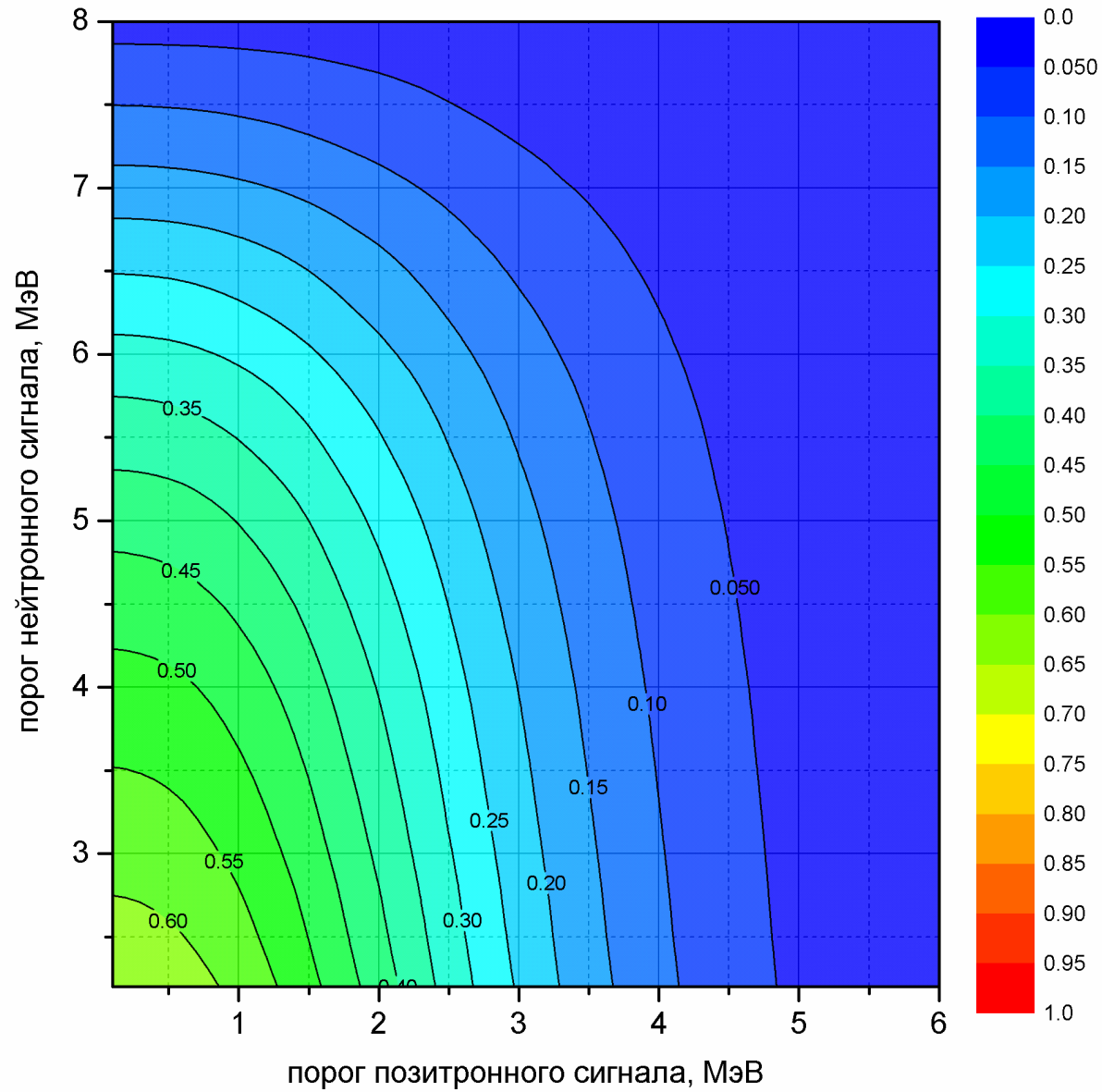
# Распределение счета ФЭУ от позитронного сигнала



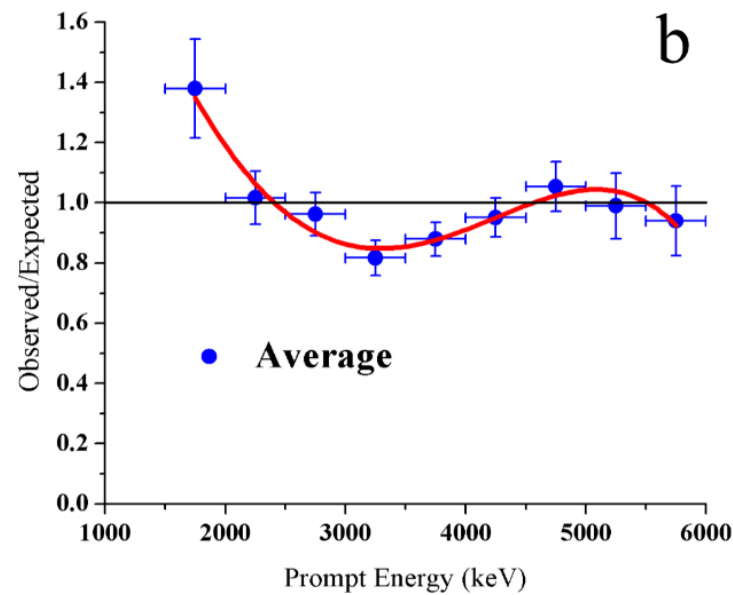
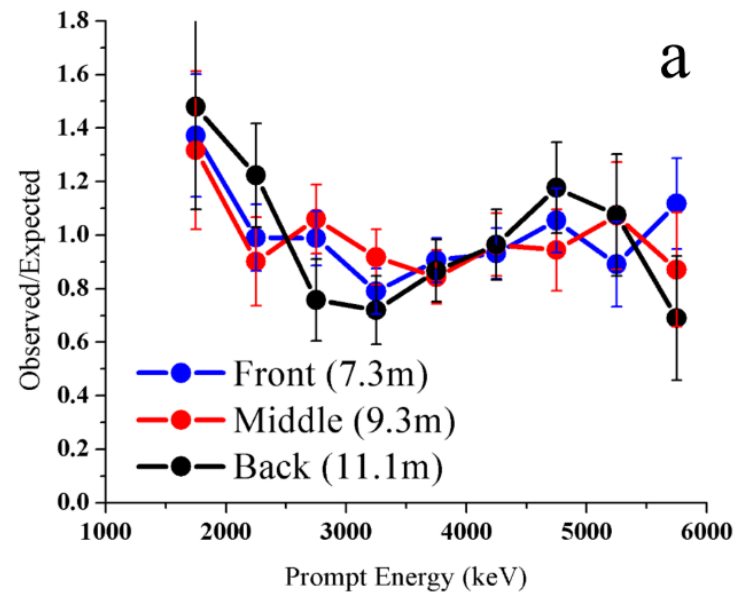
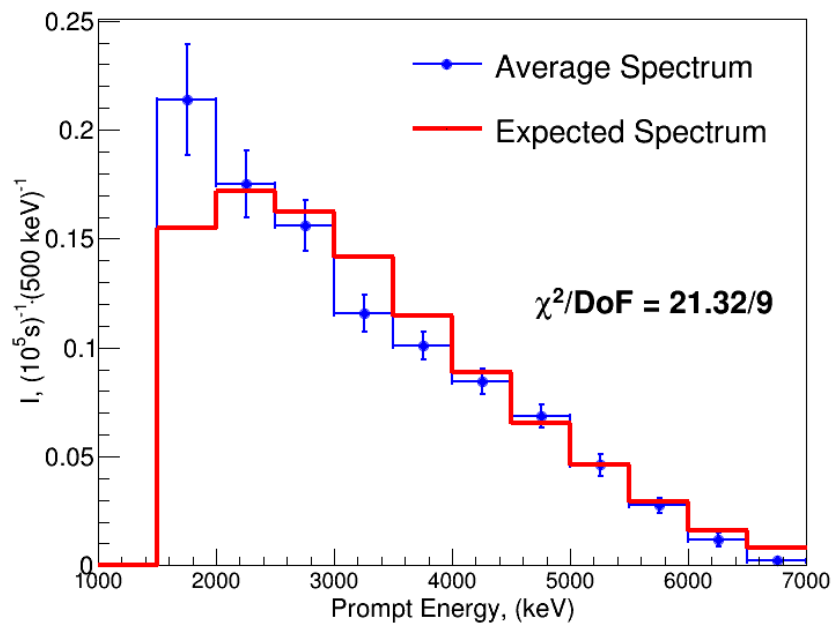
# Сигналы от позитронного и нейтронного события



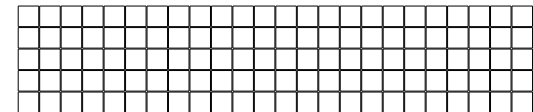
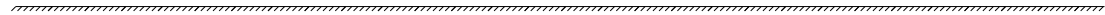
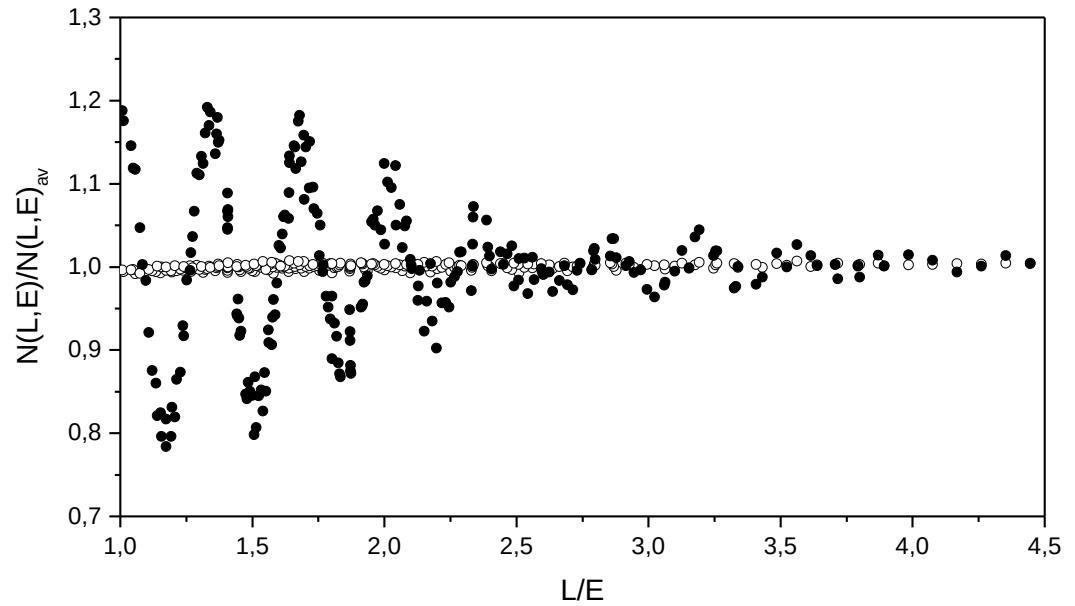
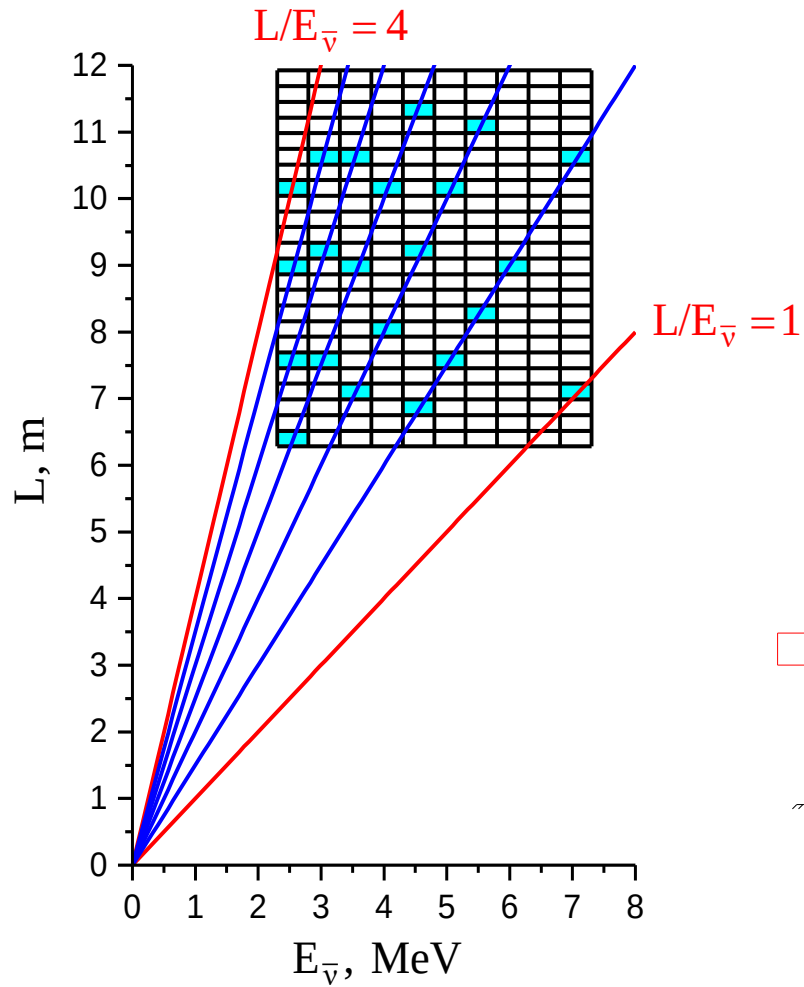
# Эффективность детектора



# Сравнение с экспериментом



# Моделирование потока антинейтрино





# Эксперимент «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино

Разработана компьютерная модель детектора реакторных антинейтрино в эксперименте «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино. Произведены все необходимые расчеты при проектировании установки. Полученный расчетный спектр сравнен с экспериментальным. Между расчётным и экспериментальным спектром наблюдается расхождение в области 3 МэВ.

- [1] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, V.G. Zinov'ev, Yu.E. Loginov, M.S. Onegin, A.M. Gagarskiy, G.A. Petrov, V.A. Solovei, A.V. Chernyi, O.M. Zherebtsov, V.P. Martem'yanov, V.G. Tsinoev, V.G. Tarasenkova, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, S.V. Pavlov, M.N. Svyatkin, A.L. Izhutov, S.A. Sazontov, D.K. Ryazanov, M.O. Gromov, N.S. Khramkov, V.I. Rykalin, Technical Physics Letters 39 (2013) 636
- [2] A.P. Serebrov, A.K. Fomin, M.S. Onegin, V.G. Ivochkin, L.N. Matrosov, Physics of Atomic Nuclei 78 (2015) 1595
- [3] A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoylov, A.K. Fomin, V.G. Zinoviev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, N.V. Gruzinsky, V.A. Solovey, A.V. Chernyi, O.M. Zherebtsov, V.P. Martemyanov, V.G. Tsinoev, V.G. Tarasenkova, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, S.V. Pavlov, A.L. Izhutov, S.A. Sazontov, D.K. Ryazanov, M.O. Gromov, V.V. Afanasiev, L.N. Matrosov, M.Yu. Matrosova, JETP 121 (2015) 578
- [4] A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoylov, A.K. Fomin, V.G. Zinoviev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, N.V. Gruzinsky, V.A. Solovey, A.V. Chernyi, O.M. Zherebtsov, V.P. Martemyanov, V.G. Zinoev, V.G. Tarasenkova, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, S.V. Pavlov, A.L. Izhutov, S.A. Sazontov, D.K. Ryazanov, M.O. Gromov, V.V. Afanasiev, L.N. Matrosov, M.Yu. Matrosova, Physics of Particles and Nuclei 47 (2016) 1014
- [5] A. Serebrov, V. Ivochkin, R. Samoilov, A. Fomin, A. Polyushkin, V. Zinoviev, P. Neustroev, V. Golovtsov, A. Chernyj, O. Zherebtsov, V. Martemyanov, V. Tarasenkova, V. Aleshin, A. Petelin, A. Izhutov, A. Tuzov, S. Sazontov, D. Ryazanov, M. Gromov, V. Afanasiev, M. Zaytsev, M. Chaikovskii, J. Phys.: Conf. Ser. 888 (2017) 012089
- [6] A. Serebrov, V. Ivochkin, R. Samoilov, A. Fomin, A. Polyushkin, V. Zinoviev, P. Neustroev, V. Golovtsov, A. Chernyj, O. Zherebtsov, V. Martemyanov, V. Tarasenkova, V. Aleshin, A. Petelin, A. Izhutov, A. Tuzov, S. Sazontov, D. Ryazanov, M. Gromov, V. Afanasiev, M. Zaytsev, M. Chaikovskii, J. Phys.: Conf. Ser. 934 (2017) 012010
- [7] A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoilov, A.K. Fomin, A.O. Polyushkin, V.G. Zinov'ev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, A.V. Chernyi, O.M. Zherebtsov, V.P. Martem'yanov, V.G. Tarasenkova, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, A.L. Izhutov, A.A. Tuzov, S.A. Sazontov, D.K. Ryazanov, M.O. Gromov, V.V. Afanas'ev, M.E. Zaitsev, M.E. Chaikovskii, JETP Letters 105 (2017) 347
- [8] A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoilov, A.K. Fomin, V.G. Zinov'ev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, A.V. Chernyi, O.M. Zherebtsov, A.O. Polyushkin, V.P. Martem'yanov, V.G. Tarasenkova, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, A.L. Izhutov, A.A. Tuzov, S.A. Sazontov, D.K. Ryazanov, M.O. Gromov, V.V. Afanas'ev, M.E. Zaitsev, M.E. Chaikovskii, Technical Physics 62 (2017) 322
- [9] A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoilov, A.K. Fomin, A.O. Polyushkin, V.G. Zinoviev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, A.V. Chernyj, O.M. Zherebtsov, M.E. Chaikovskii, V.P. Martemyanov, V.G. Tarasenkova, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, A.L. Izhutov, A.A. Tuzov, S.A. Sazontov, M.O. Gromov, V.V. Afanasiev, M.E. Zaytsev, D.K. Ryazanov, Physics of Particles and Nuclei 49 (2018) 701
- [10] A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoilov, A.K. Fomin, A.O. Polyushkin, V.G. Zinoviev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, A.V. Chernyj, O.M. Zherebtsov, M.E. Chaikovskii, V.P. Martemyanov, V.G. Tarasenkova, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, A.L. Izhutov, A.A. Tuzov, S.A. Sazontov, M.O. Gromov, V.V. Afanasiev, M.E. Zaytsev, A.A. Gerasimov, D.K. Ryazanov, First Observation of the Oscillation Effect in the Neutrino-4 Experiment on the Search for the Sterile Neutrino // JETP Letters 109 (2019) 213

1. NANPino-2013, Valday, Russia, June 24-29, 2013

<http://nanpino2013.blogspot.com/p/scientific-program.html>

2. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН, Москва, Россия, 17-21 ноября

2014 г. <http://icssnp.mephi.ru/ru/presentations/section8>

# Гранты

В диссертацию вошли результаты работ, поддержанных грантами под руководством А.К. Фомина:

- 1.РФФИ 10-02-00217-а «Гравитационный спектрометр УХН для измерения времени жизни нейтрона с точностью 0.2 с»
- 2.РФФИ 12-02-12052-офи\_м «Сверхтекучий гелий в ядерных технологиях при производстве ультрахолодных нейтронов»
- 3.Министерство образования и науки Российской Федерации, №8702, Подготовка к эксперименту по поиску стерильного нейтрино на реакторе ВВР-М (ФГБУ "ПИЯФ", Гатчина), 2012-2013
- 4.РФФИ 13-02-00570-а «Измерение времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой ультрахолодных нейтронов»
- 5.РФФИ 16-02-00778-а «Разработка проекта эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций на проектируемом источнике ультрахолодных нейтронов на реакторе ВВР-М»

В диссертацию вошли результаты работ, поддержанных грантами под руководством А.П. Сереброва, в которых А.К. Фомин выступил в роли исполнителя:

- 1.РФФИ 10-02-00224-а «Высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов для фундаментальных исследований по физике элементарных частиц»
- 2.РФФИ 11-02-91000-АНФ\_а «Бета распад нейтрона и поиск отклонений от Стандартной модели»
- 3.РФФИ 12-02-12111-офи\_м «Эксперимент «НЕЙТРИНО-4» по поиску осцилляций реакторных антинейтрино в стерильное состояние»
- 4.РФФИ 14-22-03055-офи\_м «Поиск стерильного нейтрино на реакторе СМ-3»
- 5.РФФИ 14-02-00051-а «Установление нового предела на электрический дипольный момент нейтрона с двухкамерным спектрометром ПИЯФ»
- 6.РНФ 14-22-00105 «Разработка высокоинтенсивных источников ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия и научная программа исследований для реакторов ПИК и ВВР-М»

1. А.К. Фомин, Программа для моделирования хранения ультрахолодных нейтронов в ловушке с учетом квазиупругого рассеяния на стенках // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018617809 от 2 июля 2018 г.
2. А.К. Фомин, Программа для моделирования эксперимента с регистрацией ультрахолодных нейтронов неупруго рассеянных при взаимодействии со стенками сосудов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018618893 от 23 июля 2018 г.
3. А.К. Фомин, Программа для моделирования источника ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018660577 от 24 августа 2018 г.
4. А.К. Фомин, Программа для моделирования эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с хранением ультрахолодных нейтронов в материальной ловушке // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018611711 от 6 февраля 2018 г.
5. А.К. Фомин, Программа для моделирования эксперимента по поиску электрического дипольного момента нейтрона при помощи двухкамерного магниторезонансного спектрометра // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018615721 от 15 мая 2018 г.
6. А.К. Фомин, Программа для моделирования эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с ультрахолодными нейтронами // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662103 от 27 октября 2017 г.
7. А.К. Фомин, Программа для моделирования детектора реакторных антинейтрино // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662880 от 20 ноября 2017 г.

# Публикации

1. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, Monte Carlo simulation of quasi-elastic scattering and above-barrier neutrons in the neutron lifetime experiment MAMBO I // JETP Lett. 90 (2009) 555
2. **A.K. Fomin**, A.P. Serebrov, A Detailed analysis and Monte Carlo simulation of the neutron lifetime experiment // JETP Lett. 92 (2010) 40
3. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, The Problem of the Neutron Lifetime Measurements // JETP Lett. 92 (2010) 271
4. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, Neutron lifetime from a new evaluation of ultracold neutron storage experiments // Physical Review C 82 (2010) 035501
5. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, New evaluation of neutron lifetime from UCN storage experiments and beam experiments // Physics Procedia 17 (2011) 199
6. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, New Analysis of Neutron-Lifetime Experiments // Crystallography Reports 56(7) (2011) 1248
7. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, A.G. Kharitonov, V.E. Varlamov, A.V. Chechkin, New installation for measuring a neutron lifetime with a big gravitational trap of ultra cold neutrons // Technical Physics 58 (2013) 1681
8. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, V.G. Zinov'ev, Yu.E. Loginov, M.S. Onegin, A.M. Gagarskiy, G.A. Petrov, V.A. Solovei, A.V. Chernyi, O.M. Zherebtsov, V.P. Martem'yanov, V.G. Tsinoev, V.G. Tarasenzov, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, S.V. Pavlov, M.N. Svyatkin, A.L. Izhutov, S.A. Sazontov, D.K. Ryazanov, M.O. Gromov, N.S. Khramkov, V.I. Rykalin, On the possibility of experimentally confirming the hypothesis of reactor antineutrino passage into a sterile state // Technical Physics Letters 39 (2013) 636
9. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, M.S. Onegin, A.G. Kharitonov, D.V. Prudnikov, V.A. Lyamkin, S.A. Ivanov, The project of ultracold neutron sources at the PIK reactor with superfluid helium as a moderator // Technical Physics Letters 40 (2014) 10
10. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, Calculation of the ultracold neutron yield from a superfluid helium source in the WWR-M reactor // Technical Physics 60 (2015) 1238
11. A.P. Serebrov, E.A. Kolomenskiy, A.N. Pirozhkov, I.A. Krasnoschekova, A.V. Vassiljev, A.O. Polyushkin, M.S. Lasakov, A.N. Murashkin, V.A. Solovey, **A.K. Fomin**, I.V. Shoka, O.M. Zherebtsov, P. Geltenbort, S.N. Ivanov, O. Zimmer, E.B. Alexandrov, S.P. Dmitriev, N.A. Dovator, New search for the neutron electric dipole moment with ultracold neutrons at ILL // Physical Review C 92 (2015) 055501
12. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, M.S. Onegin, V.G. Ivochkin, L.N. Matrosov, Monte Carlo simulation of the Neutrino-4 experiment // Physics of Atomic Nuclei 78 (2015) 1595
13. A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoylov, **A.K. Fomin**, V.G. Zinoviev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, N.V. Gruzinsky, V.A. Solovey, A.V. Chernyi, O.M. Zherebtsov, V.P. Martemyanov, V.G. Tsinoev, V.G. Tarasenzov, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, S.V. Pavlov, A.L. Izhutov, S.A. Sazontov, D.K. Ryazanov, M.O. Gromov, V.V. Afanasiev, L.N. Matrosov, M.Yu. Matrosova, Neutrino-4 experiment on the search for a sterile neutrino at the SM-3 reactor // JETP 121 (2015) 578

14. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, A.G. Kharitonov, V.A. Lyamkin, D.V. Prudnikov, S.A. Ivanov, A.N. Erykalov, M.S. Onegin, K.A. Gridnev, High-density ultracold neutron sources for the WWR-M and PIK reactors // Crystallography Reports 61 (2016) 144
15. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, A.G. Kharitonov, V.E. Varlamov, E.A. Kolomenskiy, I.A. Krasnoshchekova, A.V. Chechkin, Neutron lifetime measurement on setups with gravitational trap // Crystallography Reports 61 (2016) 139
16. A.P. Serebrov, E.A. Kolomenskiy, A.N. Pirozhkov, I.A. Krasnoshchekova, A.V. Vasiliev, A.O. Polyushkin, M.S. Lasakov, A.N. Murashkin, V.A. Solovey, **A.K. Fomin**, I.V. Shoka, O.M. Zherebtsov, E.B. Aleksandrov, S.P. Dmitriev, N.A. Dovator, P. Geltenbort, S.N. Ivanov, O. Zimmer, Neutron electric dipole moment and possibilities of increasing accuracy of experiments // Crystallography Reports 61 (2016) 129
17. A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, Yu.A. Kamyshev, Sensitivity of experiment on search for neutron–antineutron oscillations on the projected ultracold neutron source at the WWR-M reactor // Technical Physics Letters 42 (2016) 99
18. **A. Fomin**, Experiment on search for N-NBAR oscillations using a projected UCN source at the WWR-M reactor // Proceedings of Science (INPC2016) 189
19. A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoylov, **A.K. Fomin**, V.G. Zinoviev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, N.V. Gruzinsky, V.A. Solovey, A.V. Cherniy, O.M. Zherebtsov, V.P. Martemyanov, V.G. Zinoviev, V.G. Tarasenkova, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, S.V. Pavlov, A.L. Izhutov, S.A. Sazontov, D.K. Ryazanov, M.O. Gromov, V.V. Afanasiev, L.N. Matrosov, M.Yu. Matrosova, Experiment for search for sterile neutrino at SM-3 reactor // Physics of Particles and Nuclei 47 (2016) 1014
20. M.S. Onegin, A.P. Serebrov, **A.K. Fomin**, V.A. Lyamkin, Estimation of the ultracold neutron production by a source designed for the WWR-M reactor // Technical Physics 62 (2017) 633
21. **A.K. Fomin**, A.P. Serebrov, Simulation of Experiment on Measurement of Neutron Lifetime Using the Big Gravitational Trap of Ultracold Neutrons with the Absorber // Technical Physics 62 (2017) 1903
22. **A.K. Fomin**, A.P. Serebrov, O.M. Zherebtsov, E.N. Leonova, M.E. Chaikovskii, Experiment on search for neutron–antineutron oscillations using a projected UCN source at the WWR-M reactor // Journal of Physics: Conference Series 798 (2017) 012115
23. A. Serebrov, V. Ivochkin, R. Samoilov, **A. Fomin**, A. Polyushkin, V. Zinoviev, P. Neustroev, V. Golovtsov, A. Chernyj, O. Zherebtsov, V. Martemyanov, V. Tarasenkova, V. Aleshin, A. Petelin, A. Izhutov, A. Tuzov, S. Sazontov, D. Ryazanov, M. Gromov, V. Afanasiev, M. Zaytsev, M. Chaikovskii, Neutrino-4 experiment on search for sterile neutrino with multi-section model of detector // J. Phys.: Conf. Ser. 888 (2017) 012089
24. A. Serebrov, V. Ivochkin, R. Samoilov, **A. Fomin**, A. Polyushkin, V. Zinoviev, P. Neustroev, V. Golovtsov, A. Chernyj, O. Zherebtsov, V. Martemyanov, V. Tarasenkova, V. Aleshin, A. Petelin, A. Izhutov, A. Tuzov, S. Sazontov, D. Ryazanov, M. Gromov, V. Afanasiev, M. Zaytsev, M. Chaikovskii, Current Results of NEUTRINO-4 Experiment // J. Phys.: Conf. Ser. 934 (2017) 012010

25. A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoilov, **A.K. Fomin**, A.O. Polyushkin, V.G. Zinov'ev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, A.V. Chernyi, O.M. Zherebtsov, V.P. Martem'yanov, V.G. Tarasenkov, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, A.L. Izhutov, A.A. Tuzov, S.A. Sazontov, D.K. Ryazanov, M.O. Gromov, V.V. Afanas'ev, M.E. Zaitsev, M.E. Chaikovskii, Search for sterile neutrinos in the neutrino-4 experiment // JETP Letters 105 (2017) 347
26. A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoilov, **A.K. Fomin**, V.G. Zinov'ev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, A.V. Chernyi, O.M. Zherebtsov, A.O. Polyushkin, V.P. Martem'yanov, V.G. Tarasenkov, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, A.L. Izhutov, A.A. Tuzov, S.A. Sazontov, D.K. Ryazanov, M.O. Gromov, V.V. Afanas'ev, M.E. Zaitsev, M.E. Chaikovskii, Experiment neutrino-4 on searching for a sterile neutrino with multisection detector model // Technical Physics 62 (2017) 322
27. A.P. Serebrov, E.A. Kolomensky, **A.K. Fomin**, I.A. Krasnoshchekova, A.V. Vassiljev, D.M. Prudnikov, I.V. Shoka, A.V. Chechkin, M.E. Chaikovskiy, V.E. Varlamov, S.N. Ivanov, A.N. Pirozhkov, P. Geltenbort, O. Zimmer, T. Jenke, M. Van der Grinten, M. Tucker, Neutron lifetime measurements with a large gravitational trap for ultracold neutrons // Physical Review C 97 (2018) 055503
28. A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoilov, **A.K. Fomin**, A.O. Polyushkin, V.G. Zinov'ev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, A.V. Chernyi, O.M. Zherebtsov, M.E. Chaikovskii, V.P. Martemyanov, V.G. Tarasenkov, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, A.L. Izhutov, A.A. Tuzov, S.A. Sazontov, M.O. Gromov, V.V. Afanasiev, M.E. Zaytsev, D.K. Ryazanov, Sterile Neutrino Search in the Neutrino-4 Experiment at the SM-3 Reactor // Physics of Particles and Nuclei 49 (2018) 701
29. **A.K. Fomin**, A.P. Serebrov, Monte Carlo Model of the Experiment on Measuring the Neutron Lifetime // Mathematical Models and Computer Simulations 10 (2018) 741
30. A.P. Serebrov, V.G. Ivochkin, R.M. Samoilov, **A.K. Fomin**, A.O. Polyushkin, V.G. Zinov'ev, P.V. Neustroev, V.L. Golovtsov, A.V. Chernyi, O.M. Zherebtsov, M.E. Chaikovskii, V.P. Martemyanov, V.G. Tarasenkov, V.I. Aleshin, A.L. Petelin, A.L. Izhutov, A.A. Tuzov, S.A. Sazontov, M.O. Gromov, V.V. Afanasiev, M.E. Zaytsev, A.A. Gerasimov, D.K. Ryazanov, First Observation of the Oscillation Effect in the Neutrino-4 Experiment on the Search for the Sterile Neutrino // JETP Letters 109 (2019) 213
31. A.P. Serebrov, V.A. Lyamkin, V.M. Pusenkov, M.S. Onegin, **A.K. Fomin**, O.Yu. Samodurov, A.T. Oprev, V.A. Ilatovskii, Yu.N. Zhuravlev, A.F. Shchebetov, V.G. Syromyatnikov, G.P. Gordeev, L.A. Aksel'rod, V.N. Zabenkin, I.V. Golosovskii, O.P. Smirnov, V.T. Lebedev, Yu.P. Chernenkov, V.V. Runov, Neutron Guide System for Ultracold and Cold Neutrons at the WWR-M Reactor // Technical Physics 64 (2019) 737
32. A.P. Serebrov, V.A. Lyamkin, **A.K. Fomin**, A.O. Koptuyhov, D.V. Prudnikov, O.Yu. Samodurov, V.A. Ilatovskiy, K.O. Keshishev, S.T. Boldarev, Status of UCN supersource at WWR-M reactor // Journal of Physics: Conference Series 1390 (2019) 012101
33. **A. Fomin**, A. Serebrov, M. Chaikovskii, O. Zherebtsov, A. Murashkin, E. Golubeva, Project on searching for neutron-antineutron oscillation at the WWR-M reactor // Journal of Physics: Conference Series 1390 (2019) 012133



# Основные результаты диссертационной работы

- 1) В 2010 году после внесения соответствующих поправок было получено среднемировое время жизни нейтрона  $880.0 \pm 0.9$  с, отличное от установившегося с 2001 года значения PDG  $885.7 \pm 0.8$  с. С новым значением времени жизни нейтрона: (1) устанено наметившееся разногласие со Стандартной моделью, (2) наблюдается лучшее согласие с космологическими данными, (3) обнаружено расхождение в результатах измерения времени жизни нейтрона между пучковым методом и методом хранения, (4) изменилась эффективность нейтринных детекторов, что внесло свой вклад в реакторную антинейтринную аномалию.
- 2) При помощи разработанной компьютерной модели проведен анализ эксперимента по измерению времени жизни нейтрона MAMBO I, включающий в себя эффект квазиупругого рассеяния УХН на поверхности жидкого фомблина, который был открыт после проведения эксперимента. Получена поправка к экспериментальному результату, которая составляет  $-6.0 \pm 1.6$  с.
- 3) При помощи разработанной компьютерной модели проведен анализ эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с регистрацией неупруго рассеянных нейтронов. За счет рассмотрения эффектов неполного вытекания из внутреннего объема во время чистки при работе с внешним объемом, нагрева нейтронов затворами и разной эффективности детектора тепловых нейтронов для разных объемов хранения получена поправка к экспериментальному результату, которая составляет  $-5.5 \pm 2.4$  с.
- 4) Получены значения плотности УХН достижимой на источниках создаваемых на реакторах ВВР-М и ПИК. С этой целью разработана компьютерная модель источника УХН на основе сверхтекучего гелия. Полученная плотность УХН на реакторе ВВР-М на 2 порядка величины превышает плотность существующих в мире источников. В результате оптимизации параметров источника на реакторе ВВР-М получена расчетная плотность УХН в ловушке ЭДМ спектрометра  $1.3 \cdot 10^4$  н/см<sup>3</sup> и плотность в эксперименте по измерению времени жизни нейтрона  $8.4 \cdot 10^3$  н/см<sup>3</sup>, что позволит на порядок величины улучшить статистическую точность этих экспериментов. Расчетная плотность УХН на реакторе ПИК на порядок величины хуже, чем на реакторе ВВР-М.
- 5) Разработана компьютерная модель эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой. Результаты моделирования внесли свой вклад на всех этапах эксперимента: от конструирования установки до получения результата измерений. Получены систематические неопределенности связанные с неопределенностью функции потерь (0.3 с), неточностью расчета эффективной частоты соударений (0.1 с), неточностью установки угла ловушки УХН (0.1 с). Моделирование позволило заявить результат эксперимента с указанной точностью  $881.5 \pm 0.7_{\text{стат}} \pm 0.6_{\text{сист}}$  с.
- 6) Разработана компьютерная модель эксперимента по поиску электрического дипольного момента нейтрона при помощи двухкамерного магнитно-резонансного спектрометра с длительным удержанием УХН. Получен систематический эффект от токов утечки, который составляет  $< 10^{-26}$  е·см. Данный эффект был учтен при получении результата эксперимента, который на уровне достоверности 90% устанавливает верхний предел на величину ЭДМ нейтрона  $|d_n| < 5.5 \cdot 10^{-26}$  е·см.
- 7) Разработан проект эксперимента по поиску нейтрон-антинейтронных осцилляций с использованием УХН. При помощи созданной компьютерной модели получена чувствительность эксперимента на новом источнике УХН создаваемом на реакторе ВВР-М. Чувствительность существующего эксперимента ИЛЛ может быть превышена в 10-40 раз в зависимости от модели отражения нейтронов от стенок.
- 8) Разработана компьютерная модель детектора реакторных антинейтрино в эксперименте «Нейтрино-4» по поиску стерильного нейтрино. Произведены все необходимые расчеты при проектировании установки. Полученный расчетный спектр сравнен с экспериментальным. Между расчётным и экспериментальным спектром наблюдается расхождение в области 3 МэВ.