

# Detection of neutrons based on scintillation method.

**N.Z. Galunov**

*Institute for Scintillation Materials NAS of Ukraine,  
Nauki ave. 60, Kharkiv, Ukraine*

1. Introduction
2. Neutrons
3. Spectrometry and detection of neutrons based on scintillation method:
  - 3.1. Fast neutrons
  - 3.2. Thermal neutrons
4. Conclusions

# Introduction

## Neutron sources

1. Radionuclide ( $\alpha$ , n) sources
2. Radionuclide ( $\gamma$ , n) sources
3. Fission materials { (f, n) sources }
4. Particle accelerators
5. Research reactors

# Introduction

## 1. Fission chamber.

Fission fragments of a heavy nucleus have a total kinetic energy  $\sim 160$  MeV. It allows designing the chambers those are the gamma-insensitive detectors of neutrons. They are good to measure neutron fields inside nuclear reactors, cross-section of fission and as threshold detector. Often it is argon-filled detector that works as ionization chamber. The layer of fissionable material more than 1 mg/cm in depth overlay the electrodes. It results in absorption efficiency reduction that is the main drawback of this technique.

## 2. $^3\text{He}$ detectors.

$^3\text{He}$  -filled proportional counter that during a neutron irradiation with energy  $E_n$  generate the pulses, with amplitude that proportional to  $E_n + Q$ , where  $Q = 764$  keV is the energy of reaction  $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ . Such the counter is used to study neutron spectra in the range  $0.2 \leq E_n \leq 2$  MeV. When  $E_n > 2$  MeV recoil  $^3\text{He}$  nuclei appear. Their yield encumbers the detection of neutrons with  $E_n > 2$  MeV.

## 3. Boric counter

Generally it is  $^{10}\text{BF}_3$  gas -filled proportional counter. Enrichment by  $^{10}\text{B}$  is about 96%. Trimethylboric  $\text{B}(\text{CH}_3)_3$  is used as filled gas. Rarely the counters with boric on their walls are used. Such a counter is filled by gas. If  $p$  is the pressure in boric counter (atm),  $l$  is the length counter displacement (cm) then the efficiency of detection of a neutron with energy  $E_n$  (eV) that longitudinally incents on counter is equal to

$$\varepsilon = 1 - \exp\left( -1.710^{-2} \frac{pl}{\sqrt{E_n}} \right).$$

E.g. for  $p = 1$  atm,  $l = 20$  cm,  $\varepsilon = 0.90$  or 0.03 when  $E_n = 0.025$  or 100 eV, correspondently. So, boric counter is useful only for detection of very slow neutrons.

## 4. Spectrometry and detection of neutrons based on scintillation method.

# 2. Neutrons

# Neutrons of different energies

## Classification of neutrons by energy:

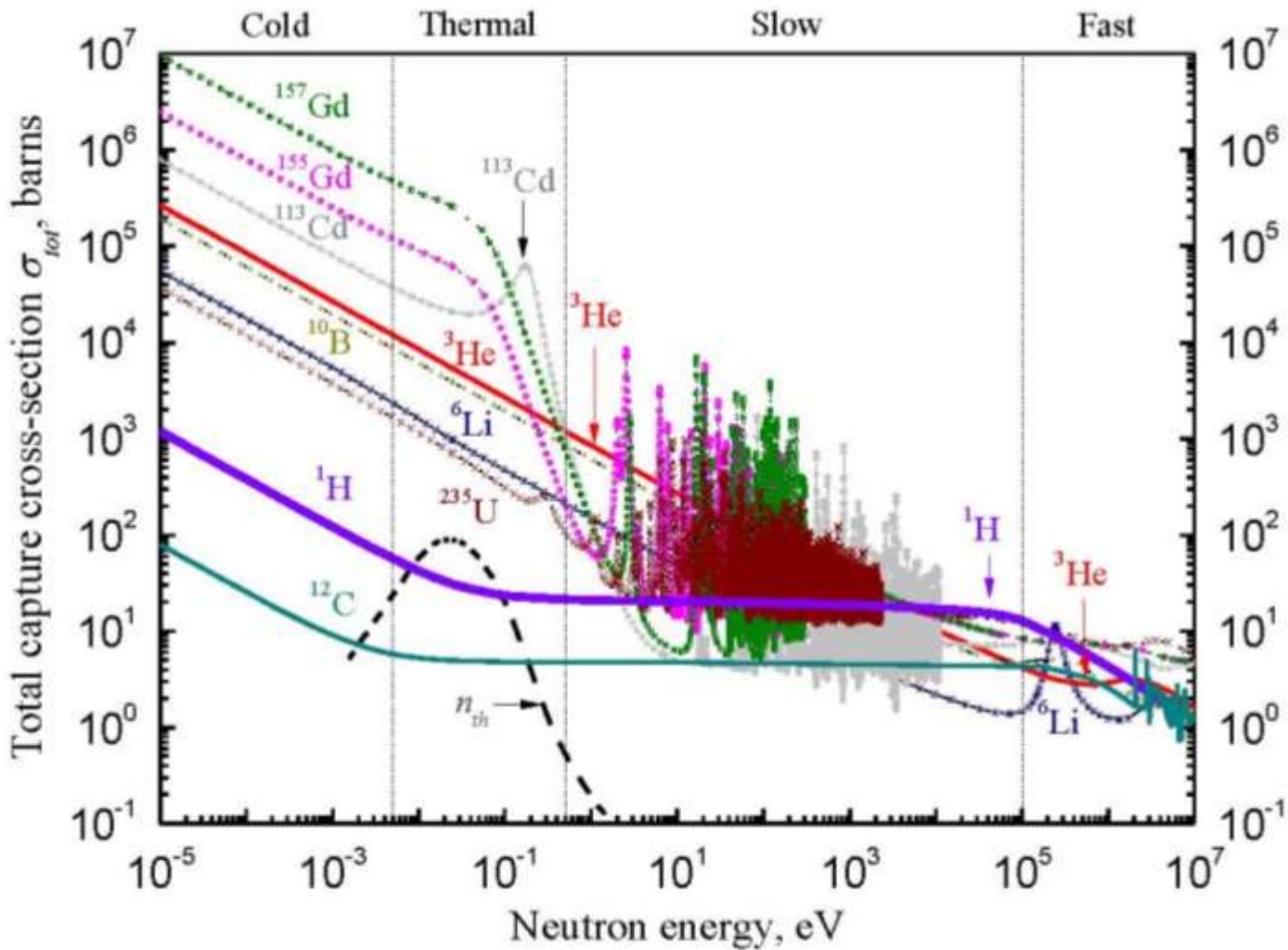
Neutrons	Energy $E_n$ , eV	Velocity, cm/s	Average wavelength*, cm	Average temperature, K
Fast	$> 10^5 (\geq 5 \cdot 10^5)$	$> 1.4 \cdot 10^9$	$< 10^{-12}$	$10^{10}$
Slow intermediate resonance	$10^4 - 10^5$	$1.4 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{-11}$	$10^8$
	$0,5 - 10^4$	$1.4 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^{-10}$	$10^6$
	$5 \cdot 10^{-3} - 0,5$	$2.2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-8}$	300
Cold	$5 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-3}$	$4,4 \cdot 10^4$	$9 \cdot 10^{-8}$	10
Ultracold	$< 5 \cdot 10^{-7}$	$4,4 \cdot 10^2$	$9 \cdot 10^{-6}$	$10^{-2}$

$$* \lambda = h / \sqrt{2mE}$$

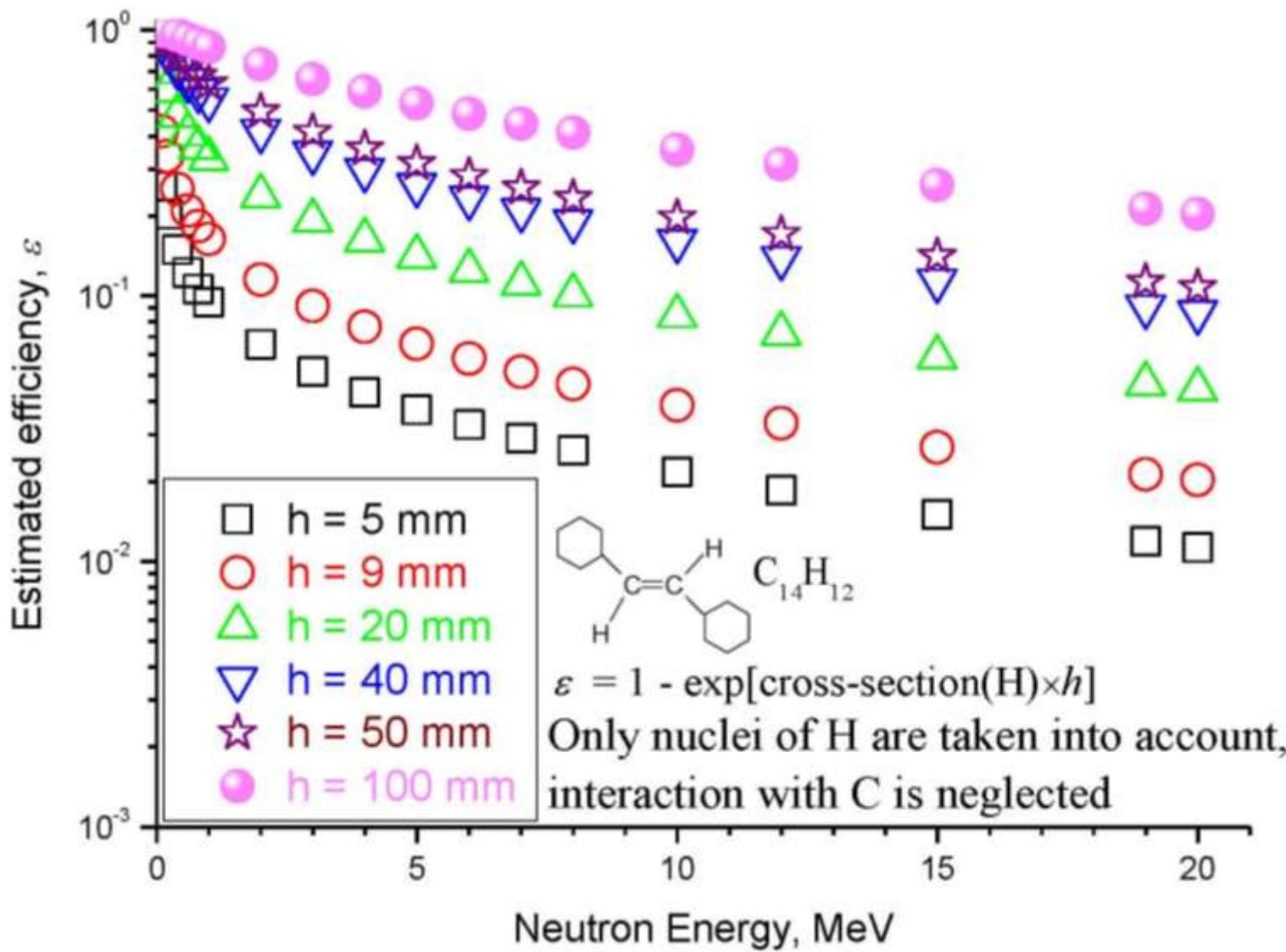
Neutrons with energies  $E_n = 0.1 - 2$  MeV are one of the most dangerous radiations for man health. The radiation-weighting factor  $w_R$  for them and alpha-particles has the highest value 20. The radiation-weighting factor for neutrons with  $E_n = 2 - 10$  MeV is  $w_R = 10$ , and when  $E_n > 20$  MeV or  $E_n < 10$  keV  $w_R = 5$  i.e. the same as for protons. For photons of gamma-radiation  $w_R = 1$ .

$$E = w_R D$$

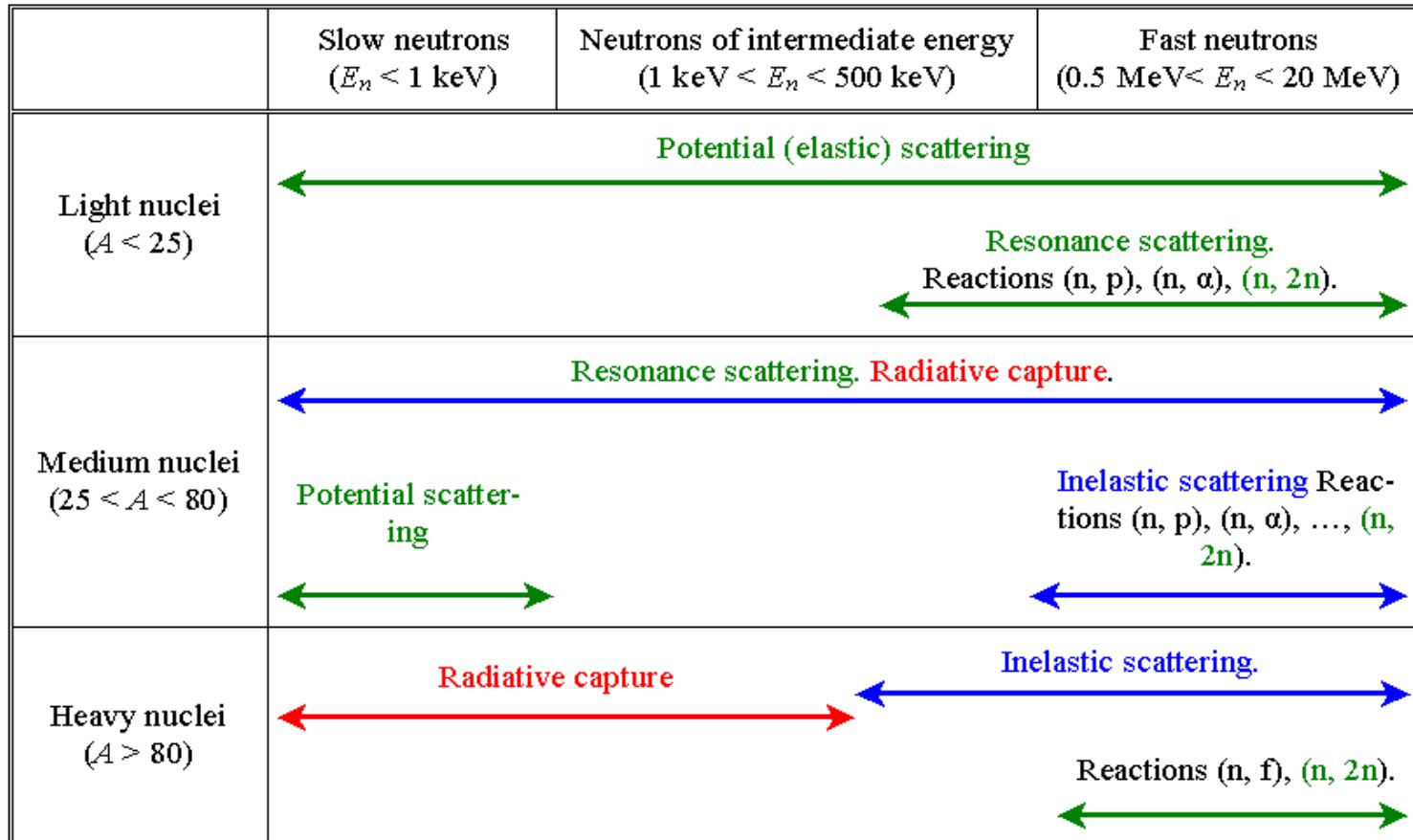
# Total capture cross-section versus neutron energy



# Estimated efficiency of stilbene scintillator of different thickness $h$

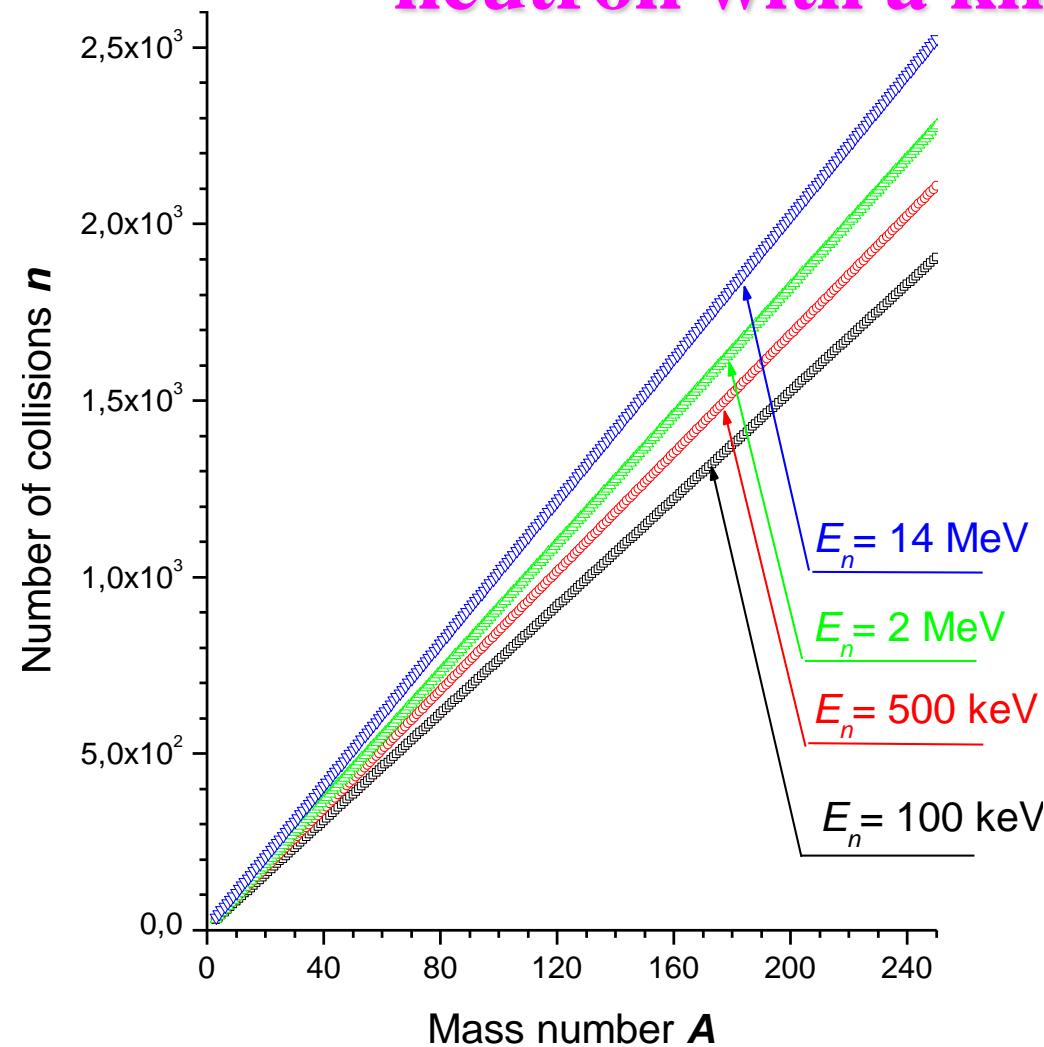


# Classification of main nuclear reactions which involve neutrons



The processes, which mainly result in **neutron moderation**, are marked by **green colour**, those, which mainly result in the generation of **photons of gamma radiation**, are marked by **red colour**, and those, which can result in the generation both neutrons and photons of gamma radiation are marked by **blue colour**.

# The average number of collisions $n$ , which is necessary to thermalize fast neutron with a kinetic energy $E_n$ .



The average number of collisions  $n$  defines the time, which is necessary to thermalize a fast neutron and to scatter it back to the detector. In other words, the time distribution of thermal neutrons detection can give information about  $n$ - values and therefore about mass number  $A$ .

# 3. Spectrometry and detection of neutrons based on scintillation method

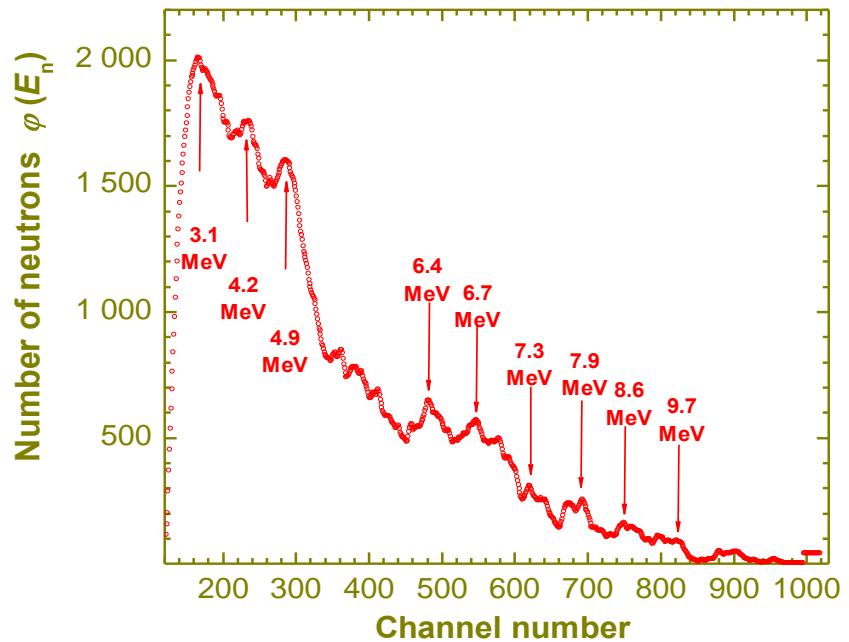
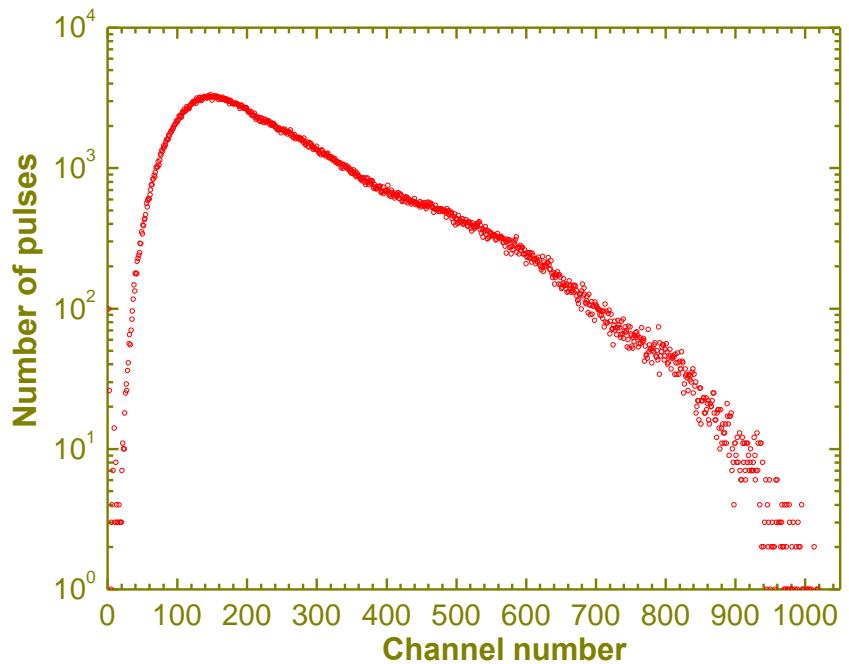
1. Fast neutron spectrometry works on the principle of measuring the recoil proton spectra
2. Thermal neutron detection by  $(n, \alpha)$ ,  $(n, \gamma)$  reactions
3. Other

# 3.1. Spectrometry of fast neutrons (Ø40 mm×40 mm stilbene detector )

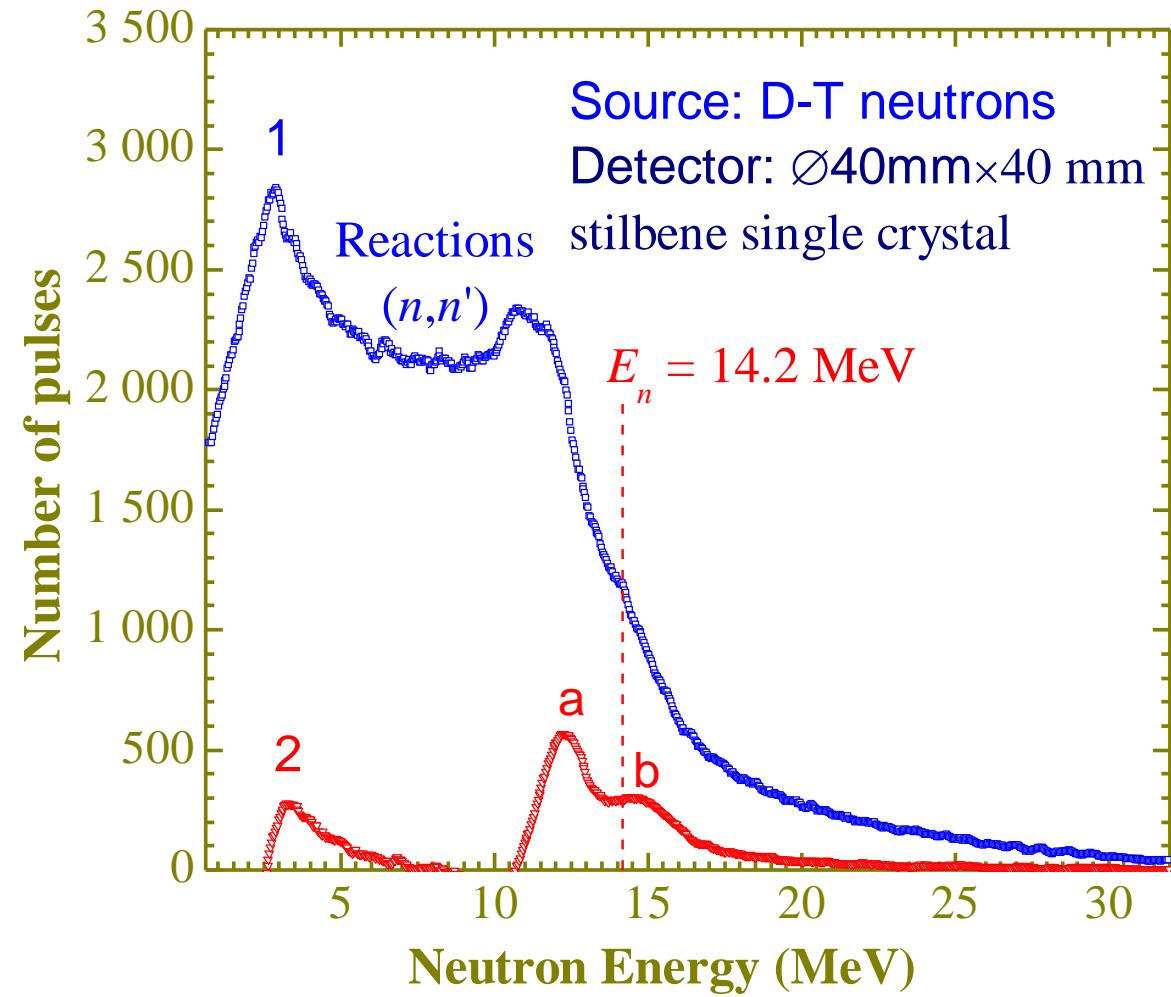
## Recoil proton spectrum

$$\varphi(E_n) = -\frac{E_n}{\varepsilon(E_n)} \times \frac{du(E_p)}{dE_p} \Big|_{E_p=E_n}$$

The reconstructed  
neutron spectrum of a  
 $^{239}\text{Pu-Be}$  source



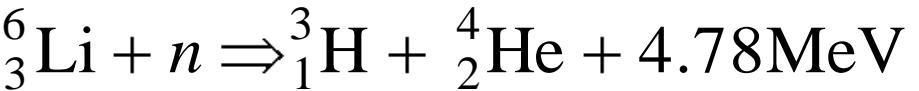
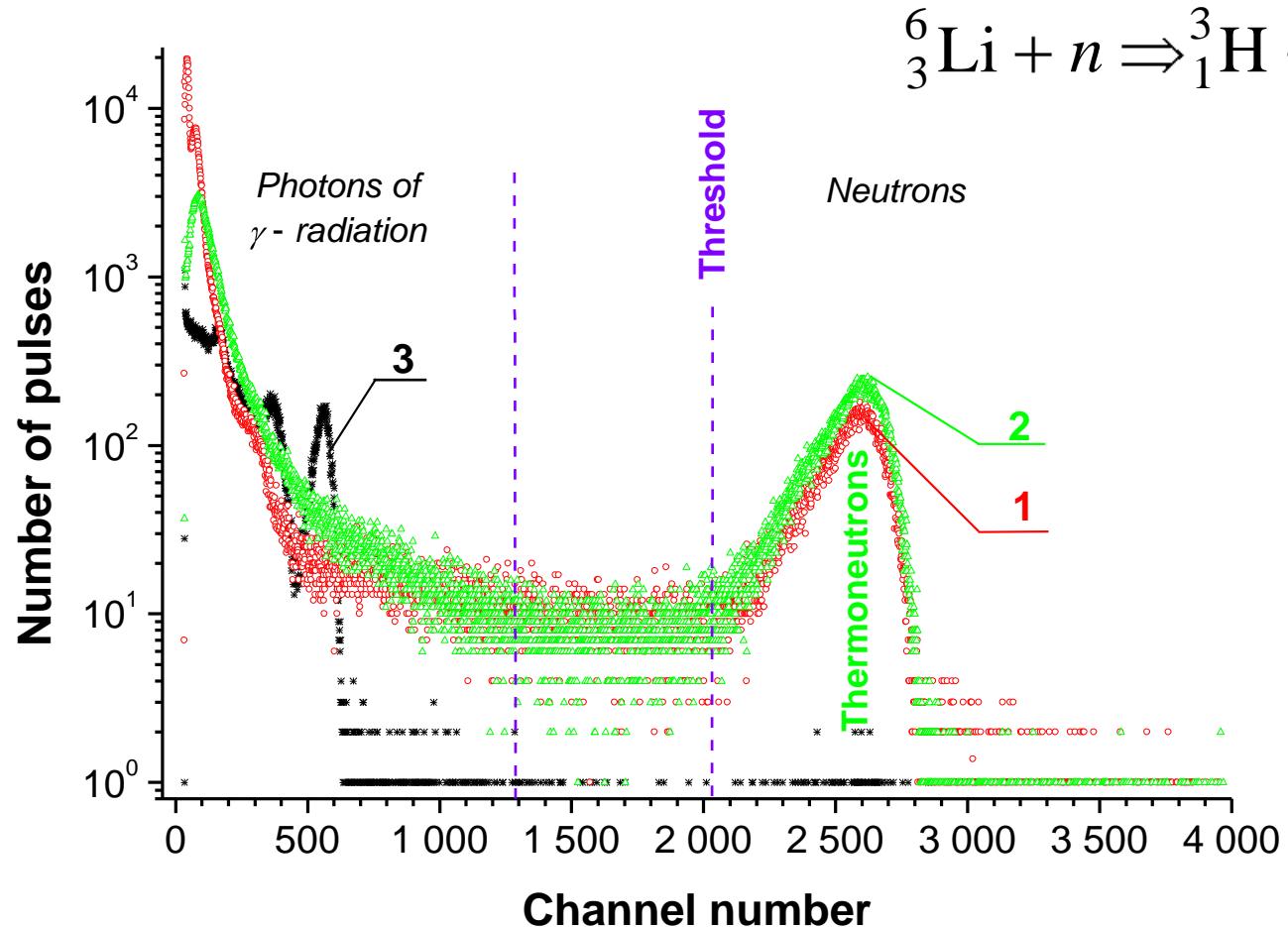
# Scintillation amplitude spectra a $\varnothing 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ stilbene detector irradiated by the D-T neutron source



## 3.2. Thermal neutrons detection

1. Boric counter { $^{10}\text{BF}_3[\text{B}(\text{CH}_3)_3]$ ,  $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ } ( $E_n < 100\text{eV}$ )
  2. Boric scintillators { $^{10}\text{B}$ ,  $E_\gamma = 478 \text{ keV}$ }, { $^{10}\text{B}_2\text{O}_3 + \text{ZnS(Ag)}$ }
  3. Detectors contain  $^6\text{LiI}$  {(for  $E_n = 10\text{eV}$  the efficiency of detection is 60%) The scintillation amplitude generated by neutrons corresponds to the amplitude generated by  $E_\gamma = 4,1 \text{ MeV}$ }
  4. Inorganic glass scintillators { $^6\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cl}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , ...}
- 
5. Detectors contain Gd ( $E_e = 33 \text{ keV}$ ,  $E_X = 44 \text{ keV}$ )  
GSO ( $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$ )  $\tau = 60\text{ns}$ , GPS ( $\text{Gd}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ )  $\tau = 46\text{ns}$ .
  6. Combined scintillation detectors

# Scintillation amplitude spectra from a LiI(Eu) detector ( $\varnothing 25$ mm x 3 mm) [ $(n, \alpha)$ reaction]



Irradiated by Pu-Be (red curve 1) and  $^{252}\text{Cf}$  (green curve 2) radionuclide sources have been introduced inside moderator (a paraffin sphere 15 cm in diameter).

# The typical spectrum of photons of gamma radiation obtained from water moderation of fast neutrons from the D-T source

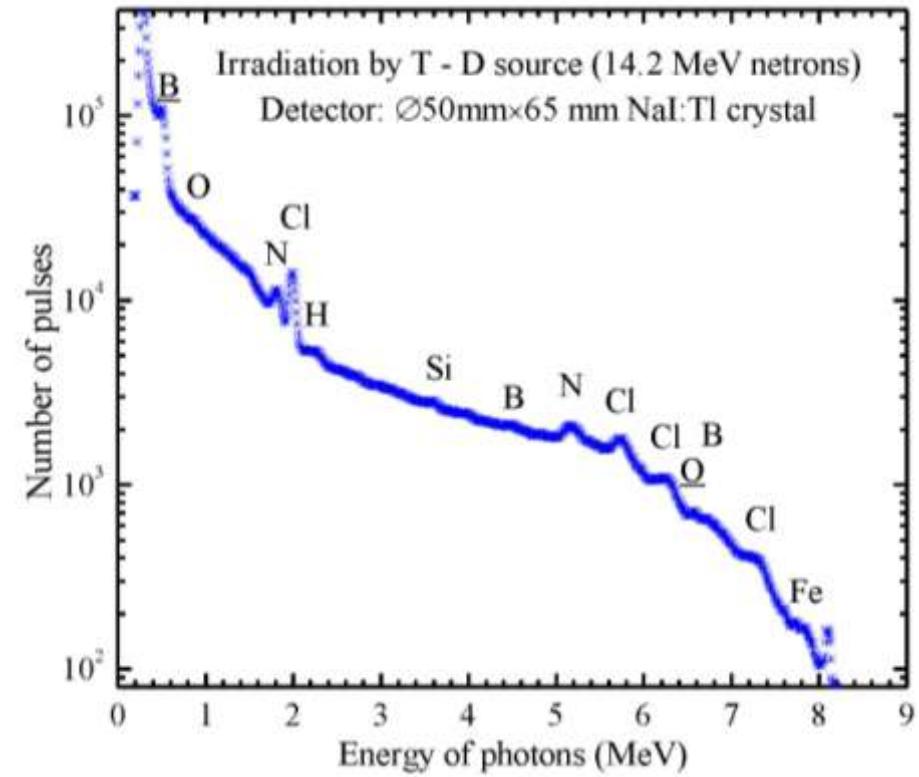


Fig. shows the well-known gamma lines which must appear due to the absorption of fast neutrons by:

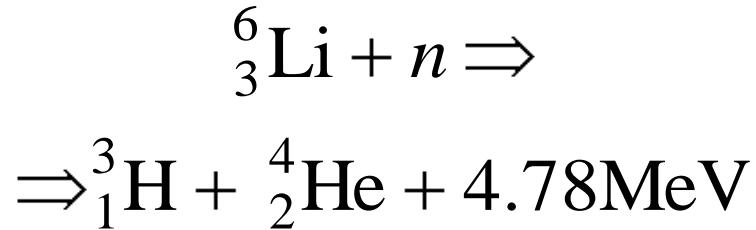
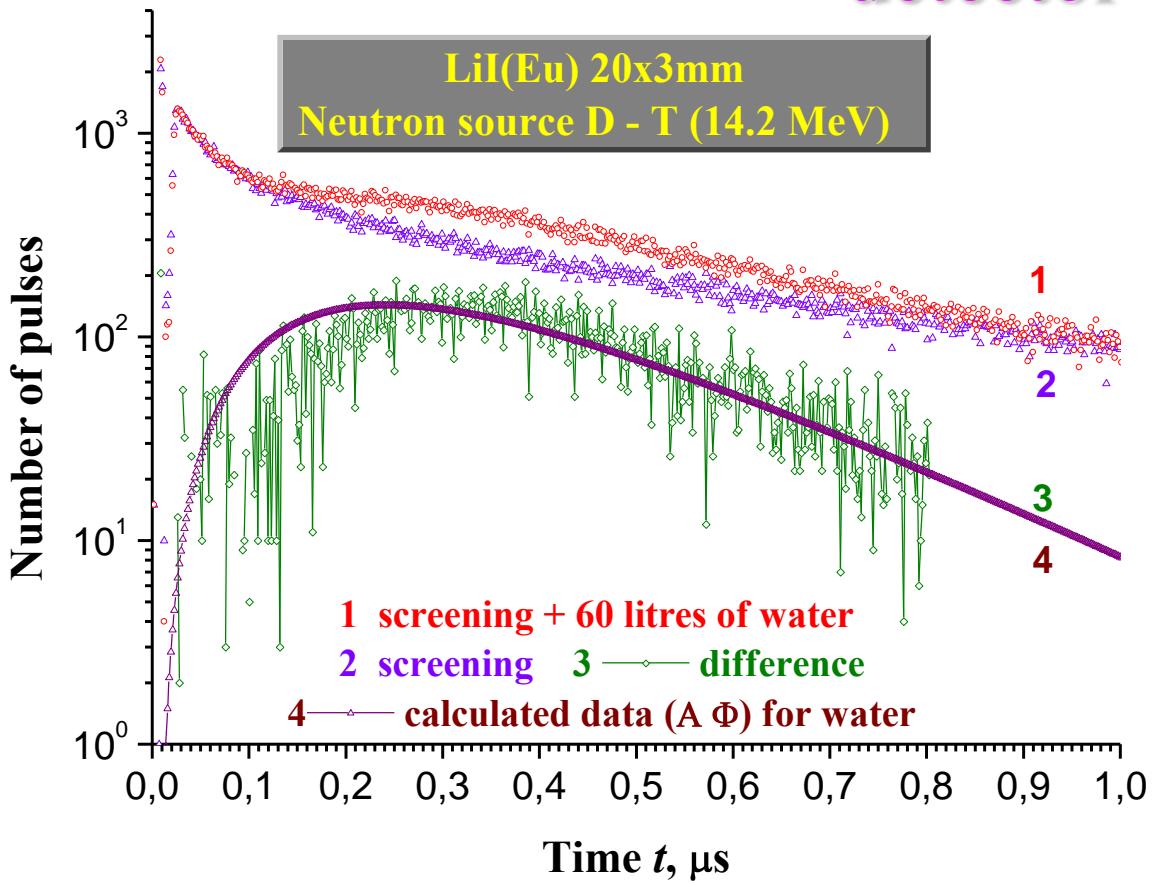
- boron (0.48 MeV),
- oxygen (6.13 MeV)

lines appearing due to the interaction of thermal neutrons with:

- hydrogen (2.22 MeV),
- boron (4.44 and 6.76 MeV),
- nitrogen (1.88 and 5.27 MeV),
- oxygen (0.87 MeV),
- chlorine (1.95, 5.75, 6.11 and 7.41 MeV),
- silicon (3.54 MeV)
- iron (7.63 MeV).

The chemical elements underlined correspond to the energy spectrum of photons generated by fast neutrons (the reaction of radiation capturing); while non-underlined elements correspond to those generated by thermal neutrons (the reaction of inelastic neutron scattering)

# Time spectra of thermal neutrons measured by a Ø20 mm×3 mm LiI:Eu detector



$$\Phi = x^2 \exp(-x),$$

$$x = \sum_{el} \cdot v \cdot t,$$

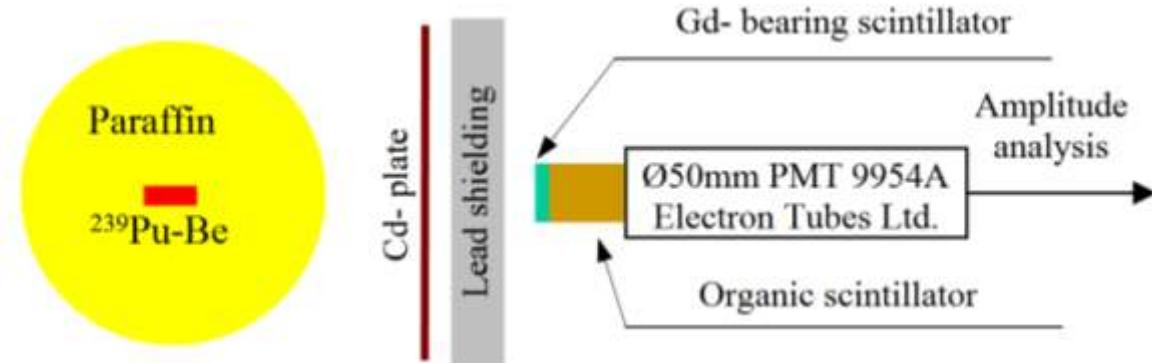
where  $t$  is the time which is necessary to moderate fast neutrons up to velocity  $v$  of thermal motion in a medium and  $\Sigma_{el}$  is the macroscopic cross-section of the elastic scattering of fast neutrons.

$$\Sigma_{el} = \sum_{i=1}^j \Sigma_{el}^i = \sum_{i=1}^j N_i \sigma_{el}^i$$

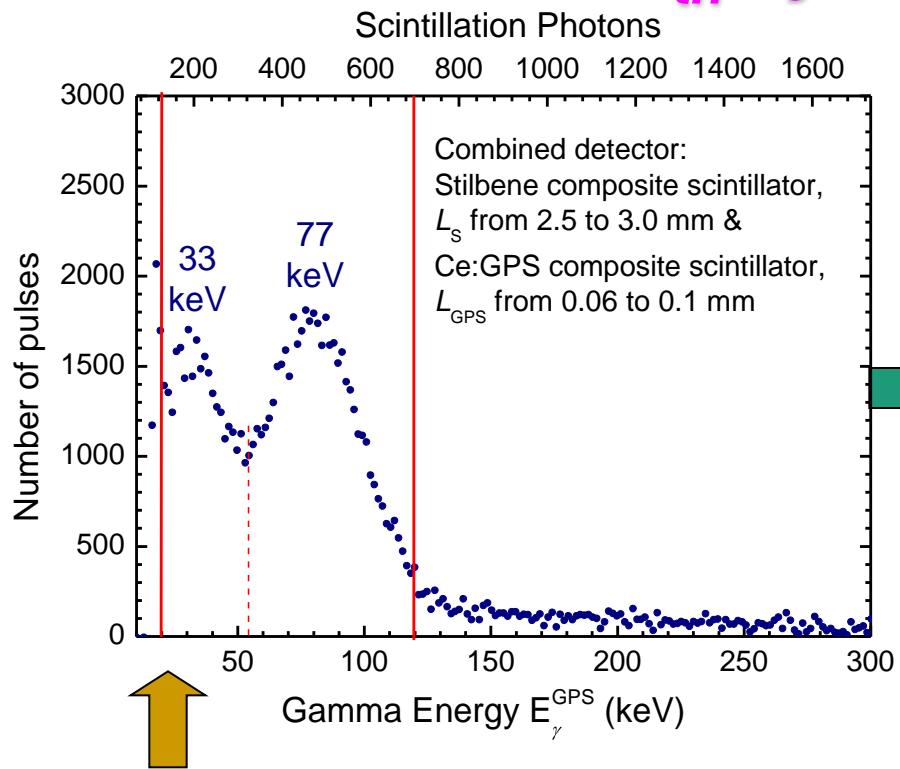
# Phoswich for separate detection thermal and fast neutrons

A phoswich (“phosphor sandwich”) is a combination of scintillators with dissimilar pulse shape characteristics optically coupled to each other and to a common PMT (or PMTs). Pulse shape analysis distinguishes the signals from the two scintillators, identifying in which scintillator the event occurred

Phoswich detectors were developed to detect low-intensity, low-energy gamma rays, X-rays, as well as alpha and beta particles efficiently in a higher-energy ambient background. Some detector designs can measure and separately identify all energies simultaneously

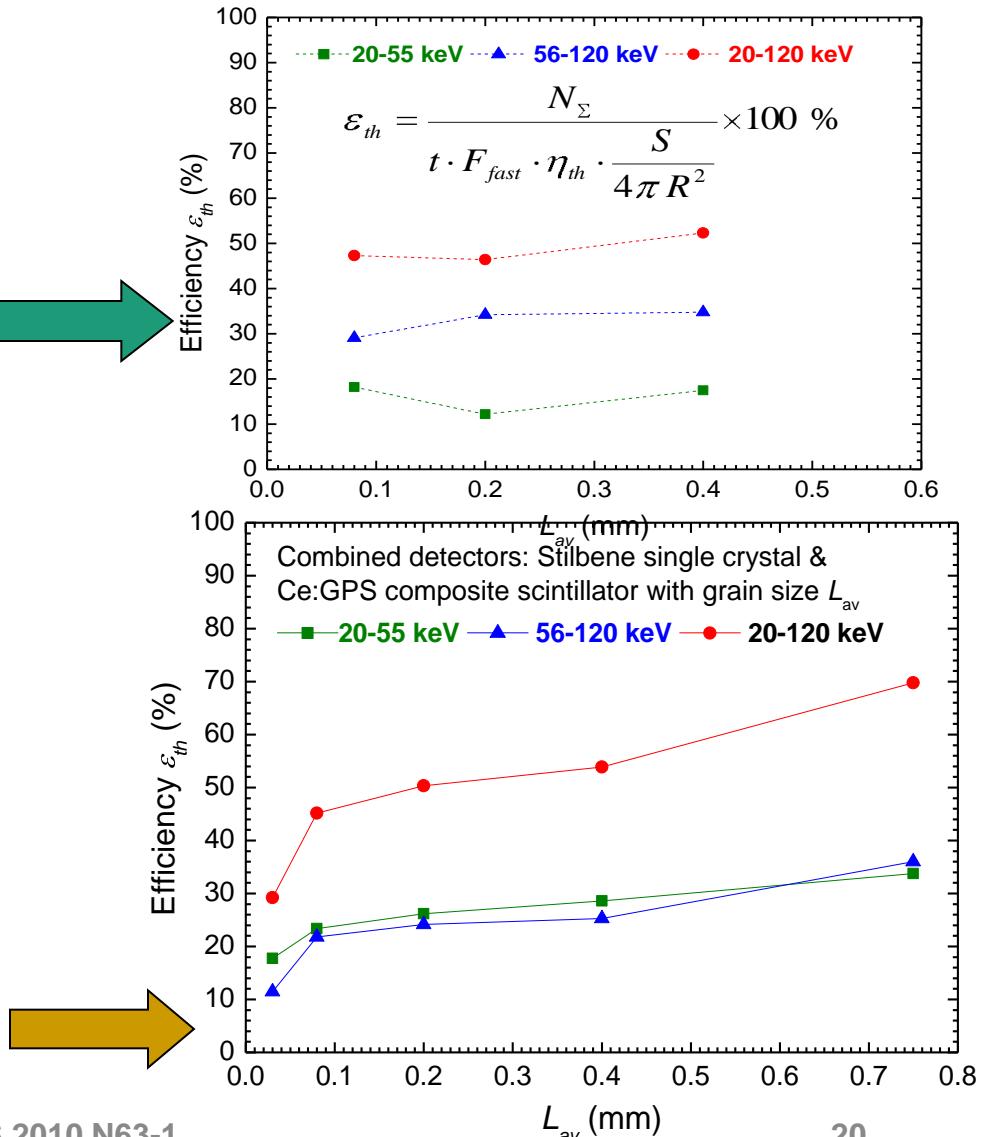


## detection $\varepsilon_{th}$ by composite scintillators



A scintillation amplitude spectrum of the combined detector (stilbene composite scintillator with  $L_{Stilb}$  from 2.5 to 3.0 mm and Ce:GPS composite scintillator with  $L_{GPS}$  from 0.06 to 0.1 mm)

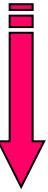
Stilbene single crystal & Ce:GPS composite scintillator with grain size  $L_{GPS}$



# Phoswich for separate detection thermal and fast neutrons

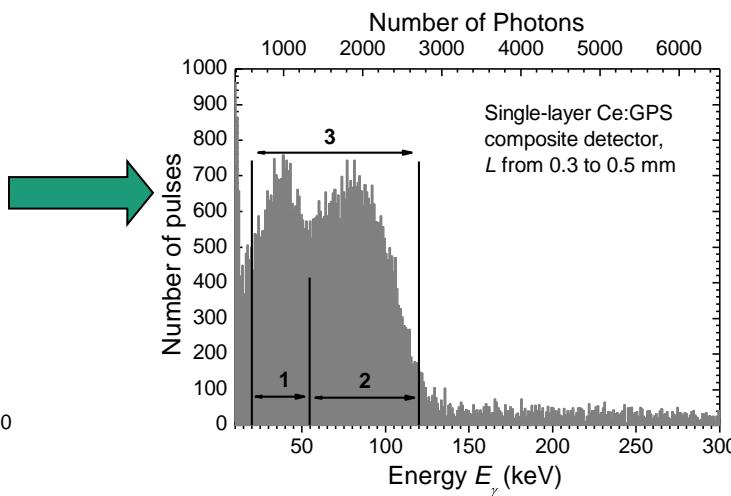
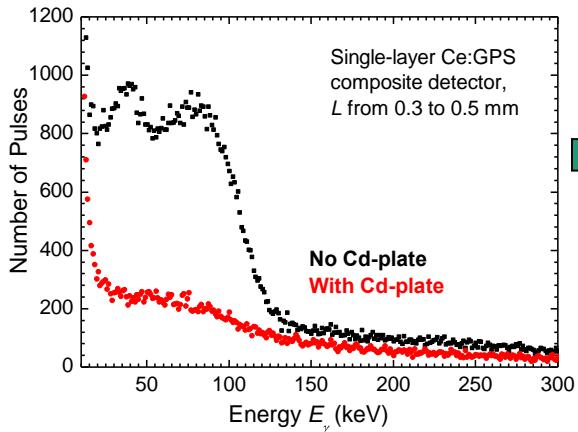
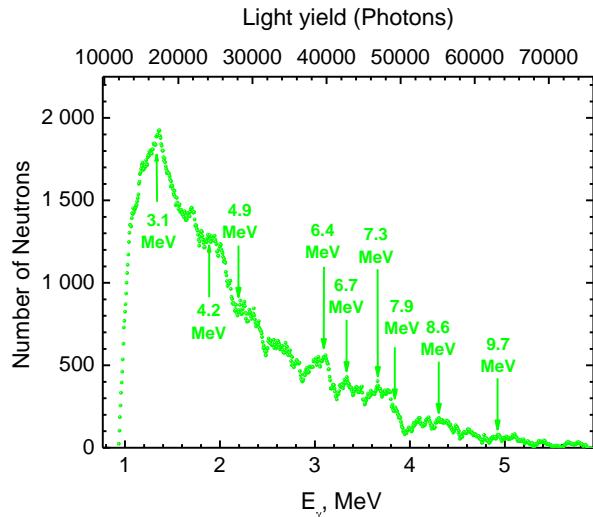
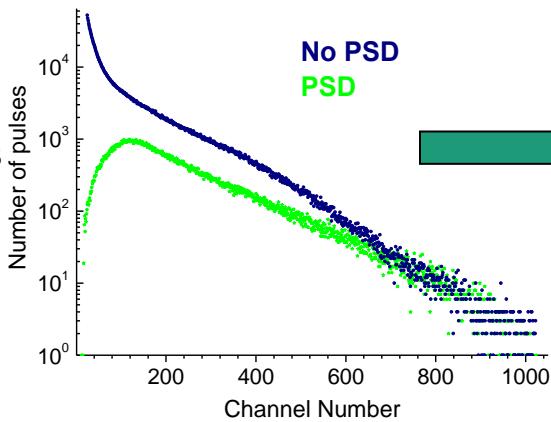
Fast and thermal  
neutrons, gamma -  
radiation

Additional  
shielding, witness  
detector, or their  
combination



Schematic diagram of  
a combined detector  
which consists an  
**organic fast neutron  
detector and a Gd-  
based thermal neutron  
detector.**

01.12.2016



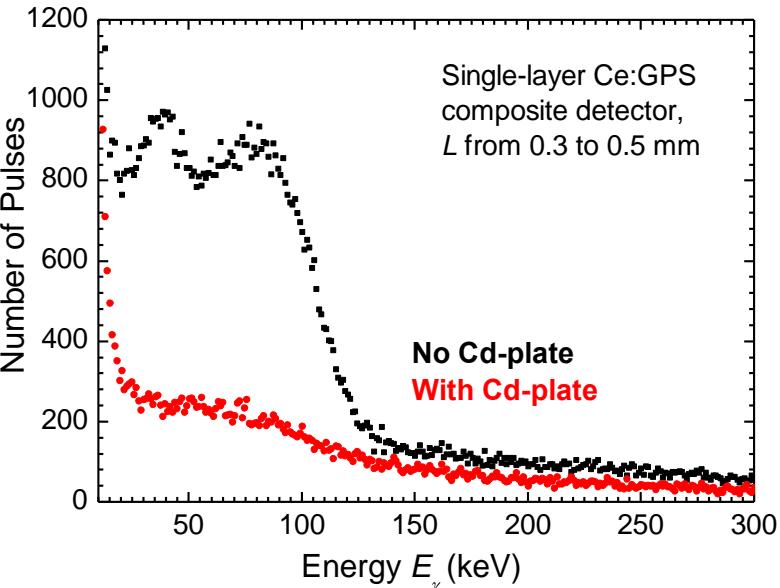
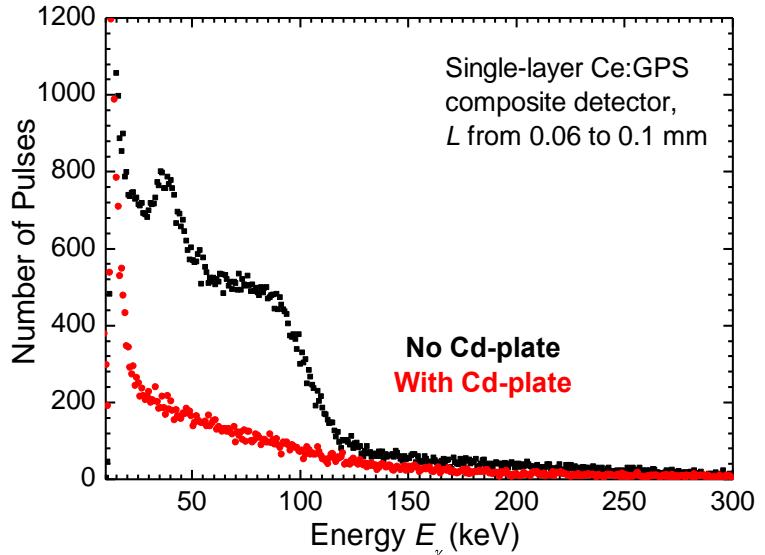
# Conclusions

There is no other approach besides the scintillation technique, which has such a wide field for application in different tasks of neutron detection from radioecology to high energy physics.

Thank  
you

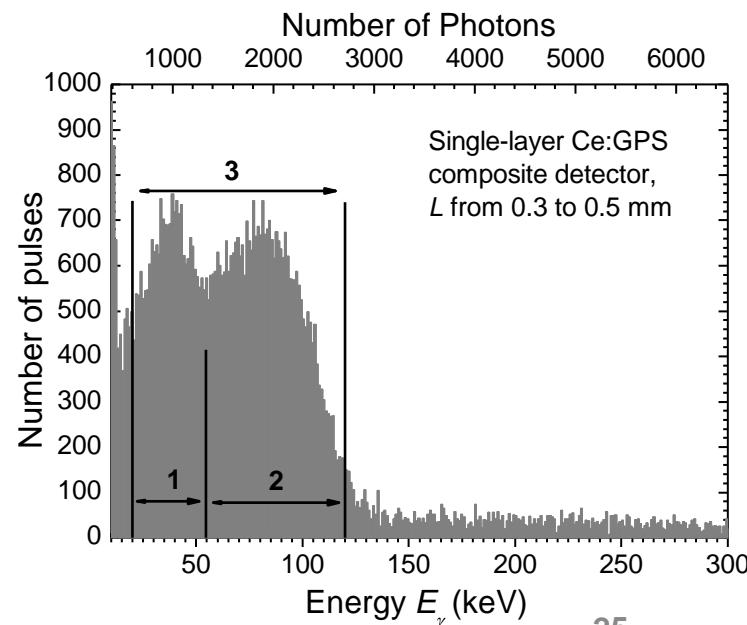
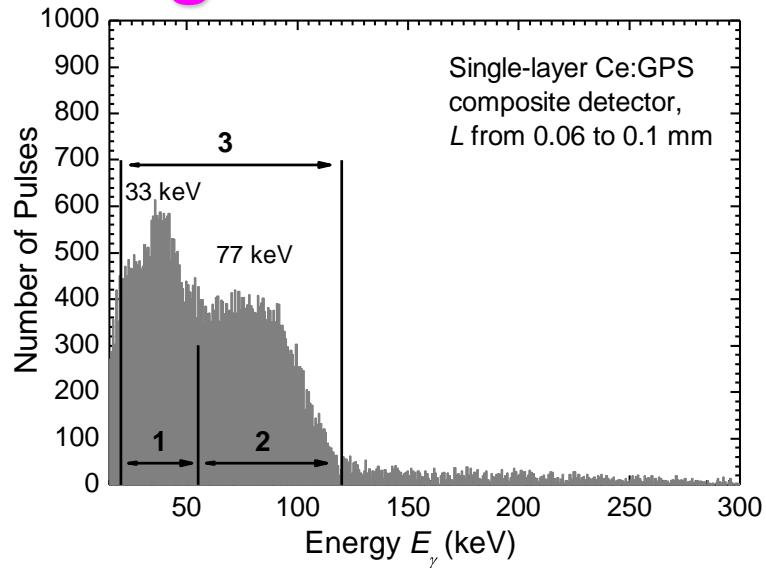
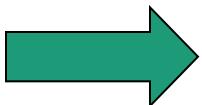


# Detection of neutrons by composite scintillators with different grain size



1 December 2016

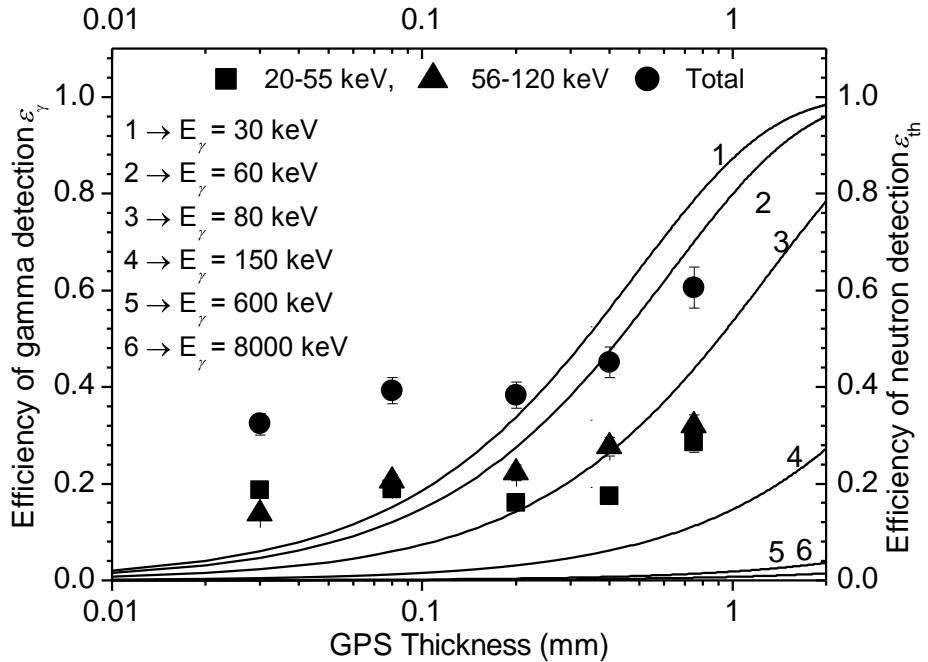
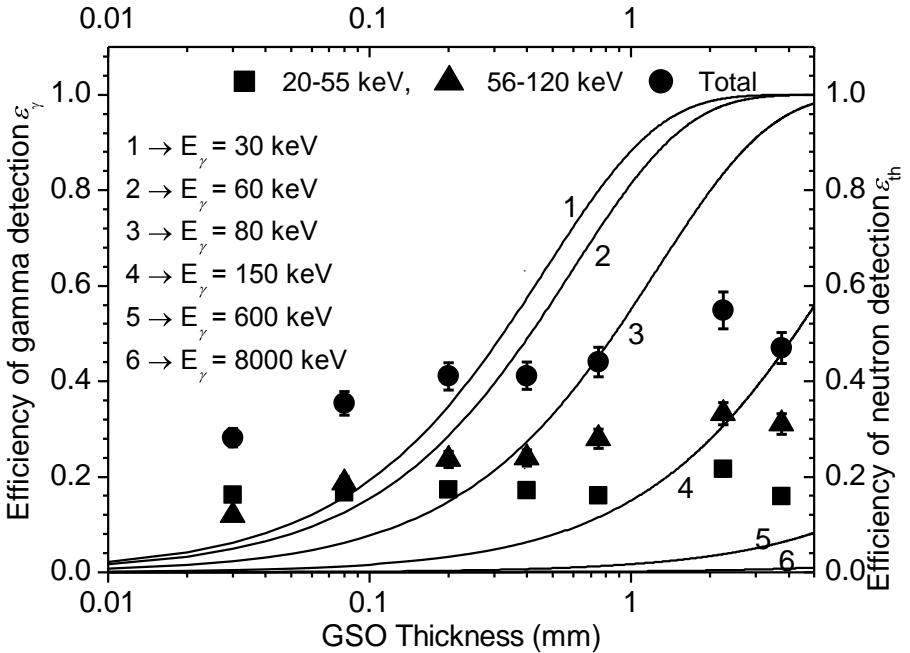
NSS 2010 N63-1



# Efficiency of detection of gamma radiation and thermal neutrons for different one layer scintillators

$$\varepsilon_{\gamma} = 1 - \exp(-\mu_{\rho} \xi d)$$

$\mu_{\rho}$  is X-ray mass attenuation coefficient,  $\rho$  is a density,  $\xi$  is volume fraction of scintillation grains (i.e. 0.28 and 0.38 for Ce:GSO and Ce:GPS respectively), and  $d$  is the thickness of scintillator. The  $d$ -value is taken as  $L_{av}$ .



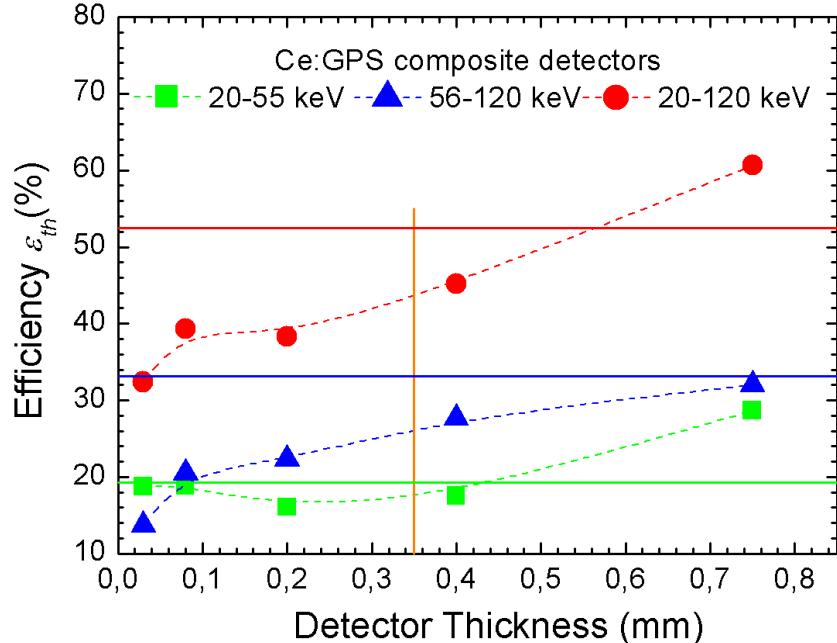
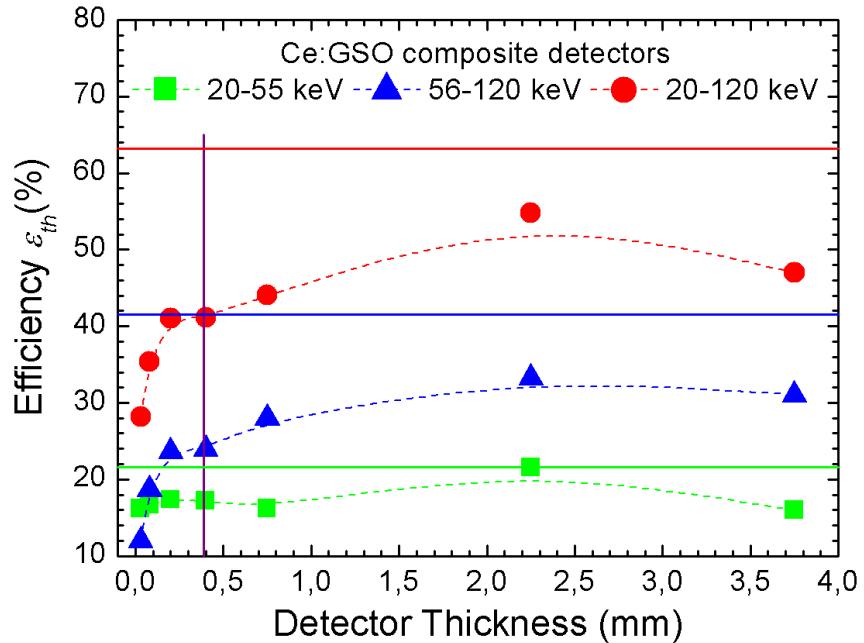
# Decay times

For organic single crystal or composite scintillator:

$$\tau_F = 3 - 4 \text{ ns}, \tau_S \sim 300 \text{ ns}$$

Detector	Decay Time, ns
Ce:GSO single crystal, thickness 0.39 mm (0.5 mol.% Ce)	33.0
Single-layer composite detector, Ce:GSO, grains from 0.06 to 0.1 mm	44.5
Single-layer composite detector, Ce:GSO, grains from 0.3 to 0.5 mm	44.5
Ce:GPS single crystal, thickness 0.35 mm (7 mol.% Ce)	45.2
Single-layer composite detector, Ce:GPS, grains from 0.06 to 0.1 mm	42.1
Single-layer composite detector, Ce:GPS, grains from 0.3 to 0.5 mm	42.1

# The efficiency of thermal neutron detection $\varepsilon_{th}$



$$\varepsilon_{th} = \frac{N_{\Sigma}}{t \cdot F_{fast} \cdot \eta_{th} \cdot \frac{S}{4\pi R^2}} \times 100 \%$$

$$\xi_{th} = \frac{\varepsilon_{th}^C S_C}{\varepsilon_{th}^S S_S}; \xi_{th} \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_{th}^C / \varepsilon_{th}^S \approx 0.7 - 0.9 \\ S_S \leq S_S^{\max} \\ S_C \text{ has no limitation} \end{cases}$$

$N_{\Sigma}$  is the number of detected events,  $t$  is the time of accumulation of the events;  $F_{fast}$  is a flux of fast neutrons from the source,  $\eta_{th} = 0.09$ ,  $S$  is an area of input window,  $R$  is the distance between the source and the detector. The  $\varepsilon_{th}^C$  and  $\varepsilon_{th}^S$ ,  $S_C$  and  $S_S$  are the  $\varepsilon_{th}$ ,  $S$  - values for composite scintillator and single crystal, respectively.

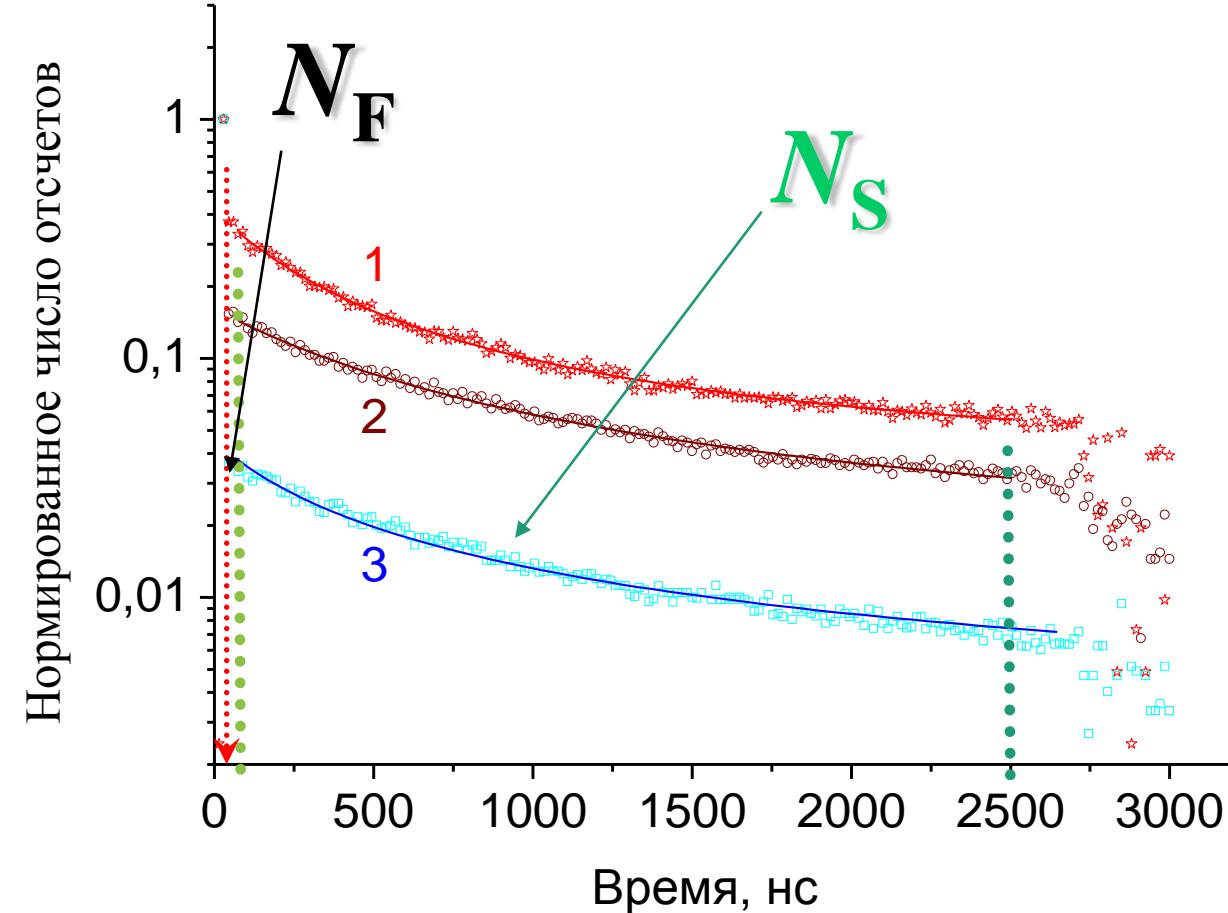
8. Радиационный захват нейтронов ( $n$ ) протонами ( $p$ ), т.е. реакция создания дейтрана ( $d$ ), приводит к излучению гамма-излучения (с энергией  $E_\gamma = 2.224 \text{ MeV}$ ). Для тепловых нейтронов сечение этой реакции ( $n + p \rightarrow d + \gamma$ )  $\sigma_{n\gamma} = 0.311 \text{ барн}$  ( $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$ ).

9. Для малых энергий (менее 15-20 МэВ) рассеяние нейтрона на протоне изотропно.

10. Сечение образования бинейтрана (т.е. двух нейтронов как некого связанного состояния) менее  $10^{-5} \text{ барн}$ .

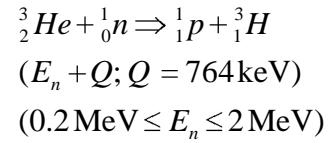
11. Механизм взаимодействия нейтрона со средой может существенно изменяться с изменением его энергии. Хорошо известно серьезное различие в методах детектирования и материалах детекторов используемых для быстрых и тепловых нейтронов. Для замедления нейтронов с энергией 14 МэВ, 5 МэВ и 1 МэВ до энергии тепловых нейтронов (0.026 эВ) в водородной среде необходимо 20, 19, 18 соударений соответственно, в то время как в тяжелых материалах эта величина может составлять  $10^2 - 10^3$  соударений.

## 4.2. Спектрометрия быстрых нейтронов. Задержанная радиолюминесценция



Форма сцинтилляционных импульсов монокристалла стильбена и их аппроксимация для разных видов возбуждения

- 1)  $\alpha$ -воздействие;
- 2) воздействие быстрыми нейtronами;
- 3)  $\gamma$ -воздействие





# Characteristics of some nuclear and atomic radiations

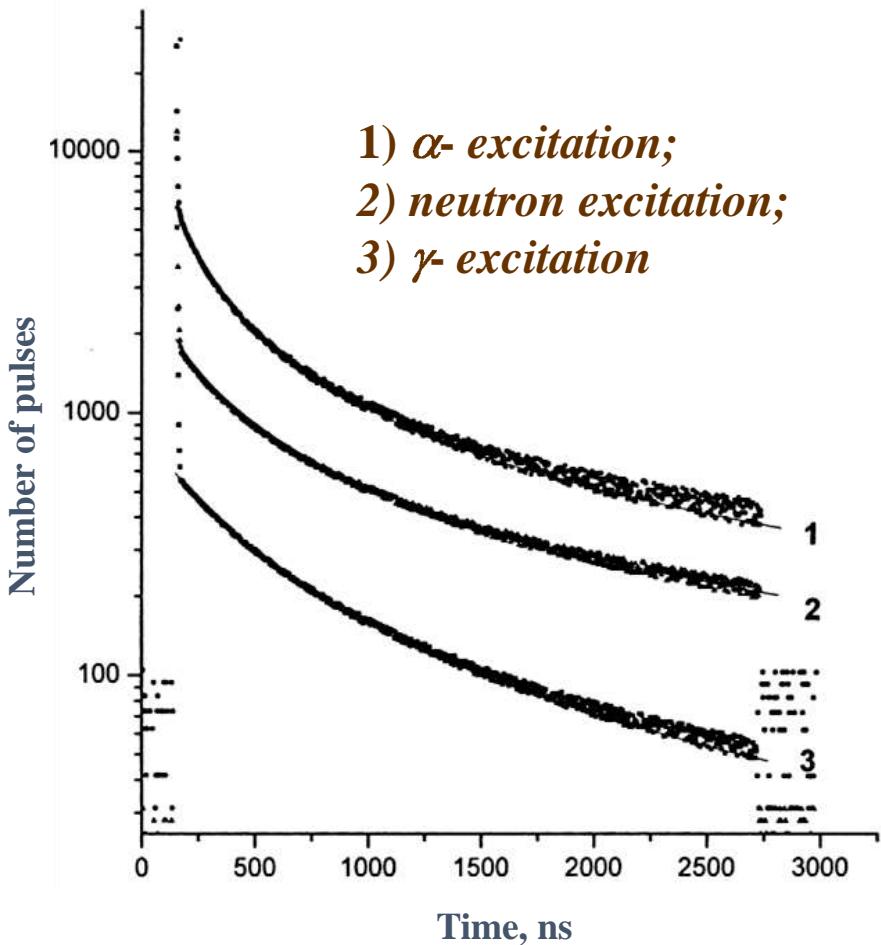
PRINCIPAL TYPES OF NUCLEAR AND ATOMIC RADIATIONS

Particle	Symbol	Rest-mass ( $m_0$ )	Charge ( $e$ )	Spin	Lifetime	Decay
Neutrino	$\nu$	0	0	$\frac{1}{2}$	—	—
<i>Electrons</i>						
Electron	$e^-$	1	-1	$\frac{1}{2}$	—	$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$
Positron	$e^+$	1	+1	$\frac{1}{2}$	$\sim 0.1 \text{ nsec}$ (In matter)	
<i>L-Mesons</i>						
$\mu^+$ -Meson	$\mu^+$	207	+1	$\frac{1}{2}$	$2.15 \mu\text{sec}$	$e^+ + 2\nu$
$\mu^-$ -Meson	$\mu^-$	207	-1	$\frac{1}{2}$	$2.15 \mu\text{sec}$	$e^- + 2\nu$
$\pi^+$ -Meson	$\pi^+$	273	+1	0	25 nsec	$\mu^+ + \nu$
$\pi^-$ -Meson	$\pi^-$	273	-1	0	25 nsec	$\mu^- + \nu$
$\pi^0$ -Meson	$\pi^0$	264	0	0	$\sim 5 \times 10^{-15} \text{ sec}$	$2\gamma$
<i>K-Mesons</i>						
$K^+$ -Meson	$K^+$	967	+1	0	12 nsec	$\pi^+ + \pi^0, \pi^+ + \pi^+ + \pi^-, \text{ etc.}$
$K^-$ -Meson	$K^-$	967	-1	0	12 nsec	$\pi^- + \pi^0, \pi^+ + \pi^- + \pi^-, \text{ etc.}$
$K_1^0$ -Meson	$K_1^0$	965	0	0	$\sim 10^{-10} \text{ sec}$	$\pi^+ + \pi^-, \pi^0 + \pi^0$
$K_2^0$ -Meson	$K_2^0$	965	0	0	$\sim 10 \text{ nsec}$	$\pi^+ + e^- + \nu, \text{ etc.}$
<i>Nucleons</i>						
Proton	$p(\text{H}_1^1)$	1836 (1.0076 a.m.u.)	+1	$\frac{1}{2}$	—	—
Neutron	$n(\text{n}_0^1)$	1.0090 a.m.u.	0	$\frac{1}{2}$	$\sim 13 \text{ min}$	$p + e^- + \nu$
<i>Heavy ions</i>						
Deuteron	$d(\text{H}_2^2)$	2.0142 a.m.u.	+1	1	—	$\text{He}_2^3 + e^- + \nu$
Triton	$t(\text{H}_1^3)$	3.0165 a.m.u.	+1	$\frac{1}{2}$	12.3 years	—
$\text{He}^3$ nucleus	$\text{He}_2^3$	3.0159 a.m.u.	+2	$\frac{1}{2}$	—	—
$\alpha$ -particle	$\alpha(\text{He}_2^4)$	4.0028 a.m.u.	+2	0	—	—
<i>Electromagnetic radiation</i>						
Photon ( $\gamma$ -rays, X-rays etc.)	$h\nu(\gamma)$	—	0	1	—	—

$$m_0 = 9.1 \times 10^{-28} \text{ g}$$

$$1 \text{ a.m.u.} = 1.66 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$e = 4.80 \times 10^{-10} \text{ e.s.u.}$$



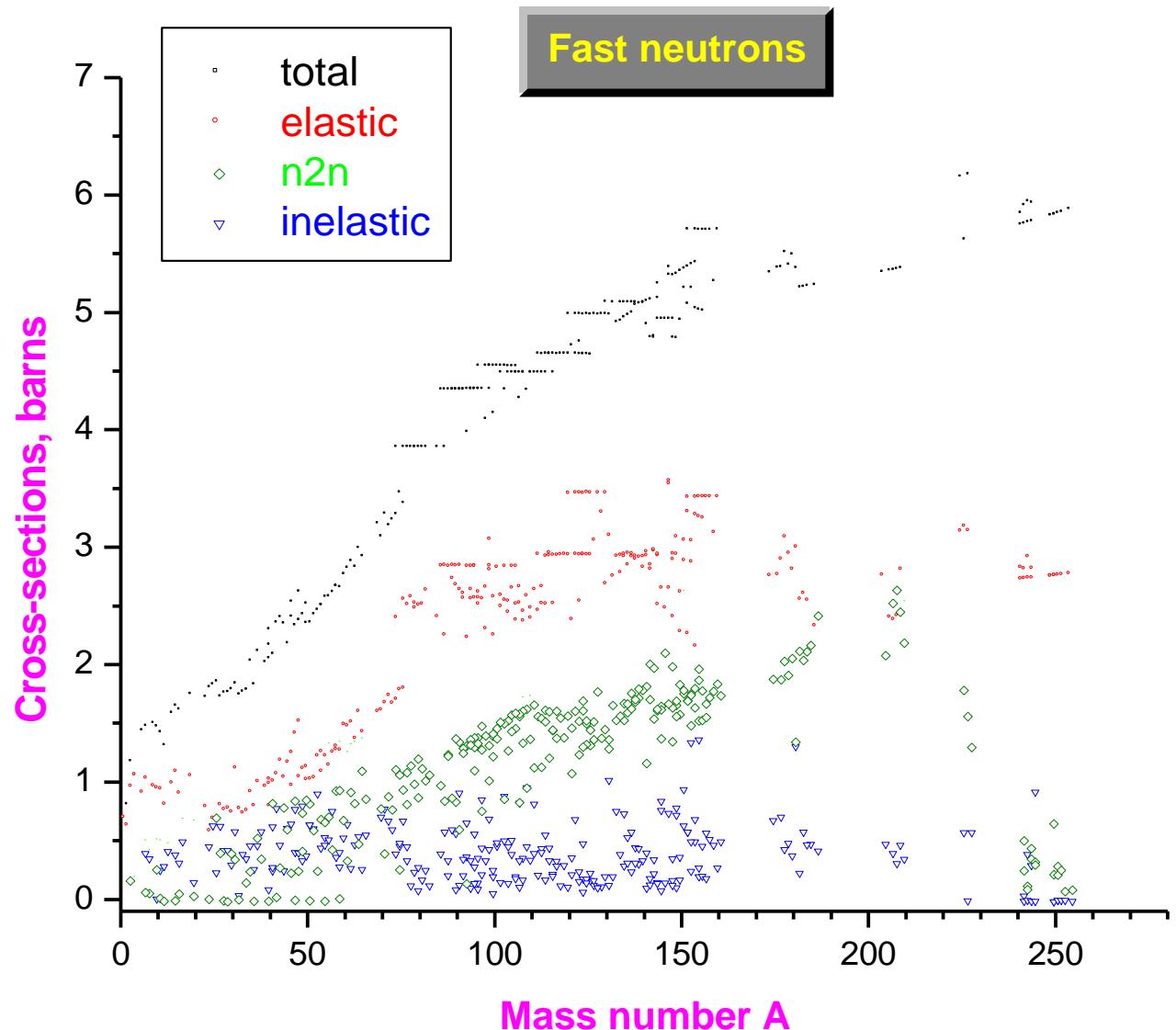
$$N(t) \approx \text{const} \cdot \left(1 + \frac{t}{t_D}\right)^{-k} \quad (1)$$

$$t_D = r_0^2 / 4D_T \quad (2)$$

$t_D$  – is characteristic time of diffusive track expansion;  
 $r_0$  – is the mean value of cross-section radius of high activation density regions;  
 $k$  – is a constant.

Delayed radioluminescence pulse curves for stilbene single crystal and their approximations by Eq.(1).

The values of cross-sections of reactions between fast neutrons and elements with different mass number **A**



# Conclusions

The following types of back-scattering radiation can be detected:

**1. Fast neutrons** They may be obtained from the source (it makes possible the calibration of the irradiation intensity in concrete measurements), as well as from reactions  $(n, 2n)$ ,  $(n, 3n)$ , etc. which are specific for concrete element. Information about characteristics of these processes can be obtained from an energy spectrum of fast neutrons.

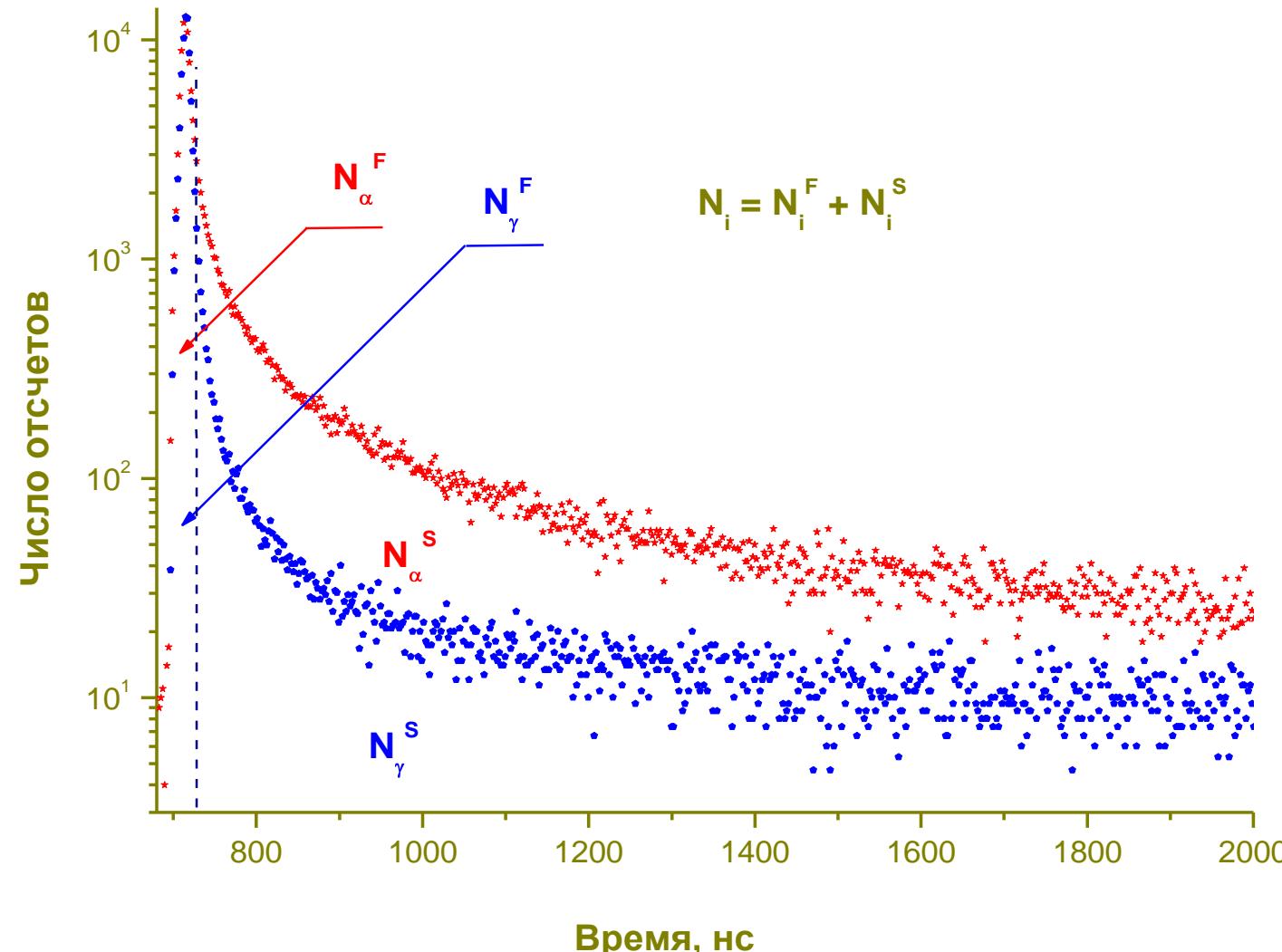
**2. Thermo neutrons** They can be obtained in elastic scattering of fast neutrons. The mean time delay between the irradiation moment (burst of pulse neutron source) and appearance of back-scattering thermo neutrons increases with  $A$  growth. Information about such a process can be obtained from the time distribution of a back-scattering thermo neutron appearance. The same one synchronizing signal for starting the measuring unit and the neutron source has to be used.

**3. Photons of gamma radiation** They are specific for specific elements, and therefore the set of energies in a gamma spectrum gives direct information about the composition of irradiated medium. Information can be obtained from an energy spectrum of gamma radiation photons.

# Conclusions

**4. For the theoretical case** of chemical investigation of a set of media each of which consists of one element using one of the above mentioned types of measurements may give a good result. For a real situation when an irradiated medium is composed of various elements such a statement would be right only for the case when the presence of a specific element is the aim of investigation and the real chemical composition of medium is not studied.

**5. For analysis the chemical composition of a real medium** using only one of the methods of analysis may cause the non-single-valued nature of results to be obtained. Only a linking research based on comparison of the results of different studies may provide an authentic analysis of a complex medium.



# Нейтроны и их характеристики

В 1932 году Чедвик [1] выдвинул гипотезу о существовании новой частицы с малой массой, равной примерно массе протона. Это привело к переименованию открытой им в 1914 году частицы из нейтрона в нейтрино. Новая частица была названа нейтроном.

В 1932 Д.Д. Иваненко и Гейзенберг выдвигают гипотезу о том, что ядра состоят из протонов и нейронов. При прохождении нейтрона через вещество **вероятность экзотермических ядерных реакций** [с выделением тепла] растет с уменьшением скорости нейтрона, тормозящегося в среде.

В 1934 Ферми с сотрудниками впервые обнаружили **повышения вероятности захвата нейтронов во время их торможения** в водородосодержащих средах.

1. Нейtron ( $n$ ) (от латинского *neuter* – “ни тот не другой”) — это фундаментальная [элементарная] частица с нулевым электрическим зарядом. Его масса равна  $939,5731(27)$  МэВ/ $c^2$  =  $1,675 \cdot 10^{-24}$  г, или на  $1,293323 (16)$  МэВ/ $c^2$  больше чем у протона. Его барионное число  $B = 1$  (барион). Спин  $s_n = 1/2$  (фермион). Магнитный момент  $\mu_n = -1,9\mu_B$  ( $\mu_B = e\hbar/2m_p c$ ).

# Структура нейтрона

4. Нейtron состоит из двух *d*-кварков и одного *u*-кварка (*ddu*). Нейtron наряду с протоном называют нуклоном. Протон состоит из одного *d*-кварка и двух *u*-кварков (*duu*). Т.е. переход между "down" кварком то "up" кварком внутри ядра приводит к реакции (1). Общей характеристикой для подобного типа переходов является ограничение расстояния взаимодействия  $\leq 10^{-13}$  см ("удержание цвета"). Поэтому вероятность реакции (1) для нейтронов находящихся внутри стабильного ядра и для нейтронов бомбардирующих ядра различна.

5. Распад свободного нейтрона со временем  $T = 898$  (14) с описывается:



Край энергетического спектра электронов in reaction (1) is 782 keV. Отметим, время жизни нейтрона в связанном состоянии может превышать  $10^{32}$  лет.

6. Сечения взаимодействий нейтрон-нейтрон и нейтрон-протон практически одинаковы благодаря очень малому различию в массах  $d$ - и  $u$ -夸克ов.

7. Электромагнитное взаимодействие между нейтронами и электронами определяется взаимодействием их магнитных моментов. Оно становится равным потенциалу ионизации атома ( $\sim 10$  эВ) на расстоянии  $\sim 10^{-11}$  см, т.е. меньшем в  $10^6$  раз чем для заряженной частицы. Поэтому, сечение взаимодействия для такого процесса  $\sim 10^{-22}$  см $^2$ , что превышает сечение взаимодействия между быстрым нейтроном и ядром ( $\sim 10^{-24}$  см $^2$ ). Тем не менее роль ионизационных потерь при движении нейтрона сквозь среду пренебрежимо мала из-за того, что в нейтрон-электронных взаимодействиях быстрый нейтрон теряет чрезвычайно малую часть энергии ( $\sim 10$  eV).

Основную энергию быстрый нейтрон теряет в ядерных столкновениях (например, в создании **протонов отдачи**).

# Типы взаимодействия нейтронов со средой

1. Нейтроны в основном **взаимодействуют с ядрами атомов среды**

Эти взаимодействия можно разделить на два типа:

(A) Рассеяние. Нейтроны при столкновении с ядрами отдают лишь часть энергии ядрам **отдачи**. В результате быстрый нейtron теряет энергию до величин энергии теплового движения молекул и атомов вещества. Он становится **тепловым нейтроном**.

(B) Поглощение. Нейtron поглощается ядром.

1. Образуется продукт реакции в возбужденном состоянии который может излучать фотоны  $\gamma$ -излучения, а после чего стать стабильным либо радиоактивным.
2. Инициируются ядерные реакции приводящие к излучению тяжелых заряженных частиц.

## 3.1. Рассеяние

### в процессе рассеяния нейтрон

1. способен проникнуть во внутрь ядра, что дает следующие ядерные реакции:  $(n, \gamma)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, a)$ ,  $(n, f)$ , а также неупругое (с поглощением) рассеяние нейtronов  $(n, n')$ ;
2. может при столкновении с ядром претерпеть акт упругого (резонансного) рассеяния  $(n, n)_{res}$  что приводит к потере части энергии нейтрона.

Относительная роль каждого из процессов определяется значениями соответствующих микроскопических сечений ( $\sigma_i$ ).

Столкновения не изменяют среднюю энергию тепловых нейtronов и при их движении через вещество (диффузия нейtronов) они лишь могут поглощаться ( $\sigma_A$ ). В среде, где  $\sigma_S < \sigma_A$ , реакции с нейtronами могут приводить к генерации нейtronов меньших энергий  $(n, n')$ , заряженных частиц  $(n, p)$ ,  $(n, a)$ ,  $(n, f)$ , либо фотонов гамма излучения  $(n, \gamma)$ .

Тип и концентрация ядер определяют типы и вероятности (макроскопическое сечение  $\Sigma_{ik} = \sigma_{ik} \times N_k$ ) реакций. Величина  $\Sigma_{ik}$  - это вероятность того, что на отрезке в 1 см при взаимодействии с атомами сорта  $k$  (концентрация  $N_k$ ) нейtron испытает акт рассеяния или будет поглощен в реакции  $i$ -типа.

## Протоны отдачи

другое рассеяние нейтронов возможно на всех ядрах, но

максимально энергия передается протонам отдачи ( $n, p$ ).

**2.** При упругом рассеянии нейтрона, с начальной энергией  $E_n$ , на покоящемся ядре массой  $A$ , создается ядро отдачи с энергией  $E_r$ :

$$E_r = \frac{4AE_n}{A+1} \cos^2 \alpha = \frac{2AE_n}{A+1} [1 + \cos \beta] \quad (2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  - углы отдачи в лабораторной центра масс системе соответственно ( $\beta = 2\alpha$ ).

**3.** В лобовом столкновении с протоном ( $A = 1$ ) может быть передана вся энергия нейтрона ( $E_{max} = E_n$ ), с ядром углерода ( $A = 12$ )  $E_{max} \approx 0.35 E_n$  и т.д. Для ( $n, p$ ) рассеяния, получим

$$E_p = E_n \cos^2 \alpha \quad (3)$$

**Зависимость (3) выглядит как ступенька в интервале энергий  $0 \leq E_p \leq E_n$ .**

## 3.2. Поглощение

возможен ряд конкурирующих процессов поглощения нейтронов.

- (i) Радиационный захват ( $n, \gamma$ ) ( $E_n \leq 0.5$  МэВ,  $^{113}\text{Cd}$  { $\sigma = 2 \cdot 10^4$  б},  $^{155}\text{Gd}$  { $\sigma = 5,6 \cdot 10^4$  б},  $^{157}\text{Gd}$  { $\sigma = 2,5 \cdot 10^5$  б}). Большая часть энергии связи нейтрона в ядре (~6 - 8 МэВ) превращается в  $\gamma$ -излучение. Образовавшийся изотоп может быть как стабильным, так и нестабильным. Нестабильное ядро претерпевает  $\beta^-$  или  $\beta^+$  - переход, что часто сопровождается испусканием дополнительных фотонов  $\gamma$ -излучения.
- (ii) Генерация протонов ( $n, p$ ) ( $0,2$  МэВ  $> E_n > 10$  МэВ, или тепловые нейтроны с  $^3\text{He}$  { $\sigma = 5,3 \cdot 10^3$  б, 0,77 MeV});
- (iii) Генерация а- частиц ( $n, \alpha$ ) ( $0,5$  МэВ  $> E_n > 10$  МэВ, или тепловые нейтроны с  $^6\text{Li}$  { $\sigma = 940$  б (7,5%), 2.31 MeV},  $^{10}\text{B}$  { $\sigma = 3,8 \cdot 10^3$  б (19%), 4.7 MeV});
- (iv) Инициируемые нейtronами реакции деления ( $n, f$ );
- (v) Реакции генерации двух или более нейтронов ( $n, 2n$ ), ( $n, np$ ), ( $n, 3p$ )... ( $E_n > 10$  МэВ);
- (vi) Неупругое рассеяние ( $n, n'$ ) ( $E_n \geq 0.5$  МэВ). После проникновения в ядро нейтрон испускается с более низкой энергией.

Продукты реакций (ii) - (iv) обладают ионизирующей способностью и могут непосредственно возбуждать сцинтилляции.



# Сравнение вероятностей реакций тепловых нейтронов с химическими элементами (для естественной смеси изотопов).

Период	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII				
1	<sup>1</sup> H Hydrogen	Элементы, для которых $\sigma_S > \sigma_A$ , обозначены зеленым, для которых $\sigma_A > \sigma_S$ , обозначены красным, для которых $\sigma_S \sim \sigma_A$ , обозначены синим			<sup>2</sup> He Helium	$\sigma_S$ – сечение рассеяния тепловых нейтронов; $\sigma_A$ – сечение поглощения тепловых нейтронов			<sup>10</sup> Ne Neon	<sup>27</sup> Co Cobalt	<sup>28</sup> Ni Nickel	
2	<sup>3</sup> Li Lithium	<sup>4</sup> Be Beryllium	<sup>5</sup> B Boron	<sup>6</sup> C Carbon	<sup>7</sup> N Nitrogen	<sup>8</sup> O Oxygen	<sup>9</sup> F Fluorine					
3	<sup>11</sup> Na Sodium	<sup>12</sup> Mg Magnesium	<sup>13</sup> Al Aluminium	<sup>14</sup> Si Silicon	<sup>15</sup> P Phosphorus	<sup>16</sup> S Sulphur	<sup>17</sup> Cl Chlorine	<sup>18</sup> Ar Argon				
4	<sup>19</sup> K Potassium	<sup>20</sup> Ca Calcium	<sup>21</sup> Sc Scandium	<sup>22</sup> Ti Titanium	<sup>23</sup> V Vanadium	<sup>24</sup> Cr Chromium	<sup>25</sup> Mn Manganese	<sup>26</sup> Fe Iron	<sup>27</sup> Kr Krypton	<sup>28</sup> Rh Rhodium	<sup>46</sup> Pd Palladium	
	<sup>29</sup> Cu Copper	<sup>30</sup> Zn Zinc	<sup>31</sup> Ga Gallium	<sup>32</sup> Ge Germanium	<sup>33</sup> As Arsenic	<sup>34</sup> Se Selenium	<sup>35</sup> Br Bromine					
5	<sup>37</sup> Rb Rubidium	<sup>38</sup> Sr Strontium	<sup>39</sup> Y Yttrium	<sup>40</sup> Zr Zirconium	<sup>41</sup> Nb Niobium	<sup>42</sup> Mo Molybdenum	<sup>43</sup> Tc Technetium	<sup>44</sup> Ru Ruthenium	<sup>45</sup> Rh Rhodium	<sup>46</sup> Pd Palladium		
	<sup>47</sup> Ag Silver	<sup>48</sup> Cd Cadmium	<sup>49</sup> In Indium	<sup>50</sup> Tin Tin	<sup>51</sup> Sb Antimony	<sup>52</sup> Te Tellurium	<sup>53</sup> I Iodine	<sup>54</sup> Xe Xenon				
6	<sup>55</sup> Cs Cerium	<sup>56</sup> Ba Barium	<sup>57</sup> La Lanthanum	<sup>72</sup> Hf Hafnium	<sup>73</sup> Ta Tantalum	<sup>74</sup> W Tungsten	<sup>75</sup> Re Rhenium	<sup>76</sup> Os Osmium	<sup>77</sup> Ir Iridium	<sup>78</sup> Pt Platinum		
	<sup>79</sup> Au Gold	<sup>80</sup> Hg Mercury	<sup>81</sup> Tl Thallium	<sup>82</sup> Pb Lead	<sup>83</sup> Bi Bismuth	<sup>84</sup> Po Polonium	<sup>85</sup> At Astatine	<sup>86</sup> Rn Radon				
7	<sup>87</sup> Fr Francium	<sup>88</sup> Ra Radium	<sup>89</sup> Ac Actinium	<sup>104</sup> Rf Rutherfordium	<sup>105</sup> Dubnium	<sup>106</sup> Sg Seaborgium	<sup>107</sup> Bh Bohrium	<sup>108</sup> Hs Hassium	<sup>109</sup> Mt Meitnerium			

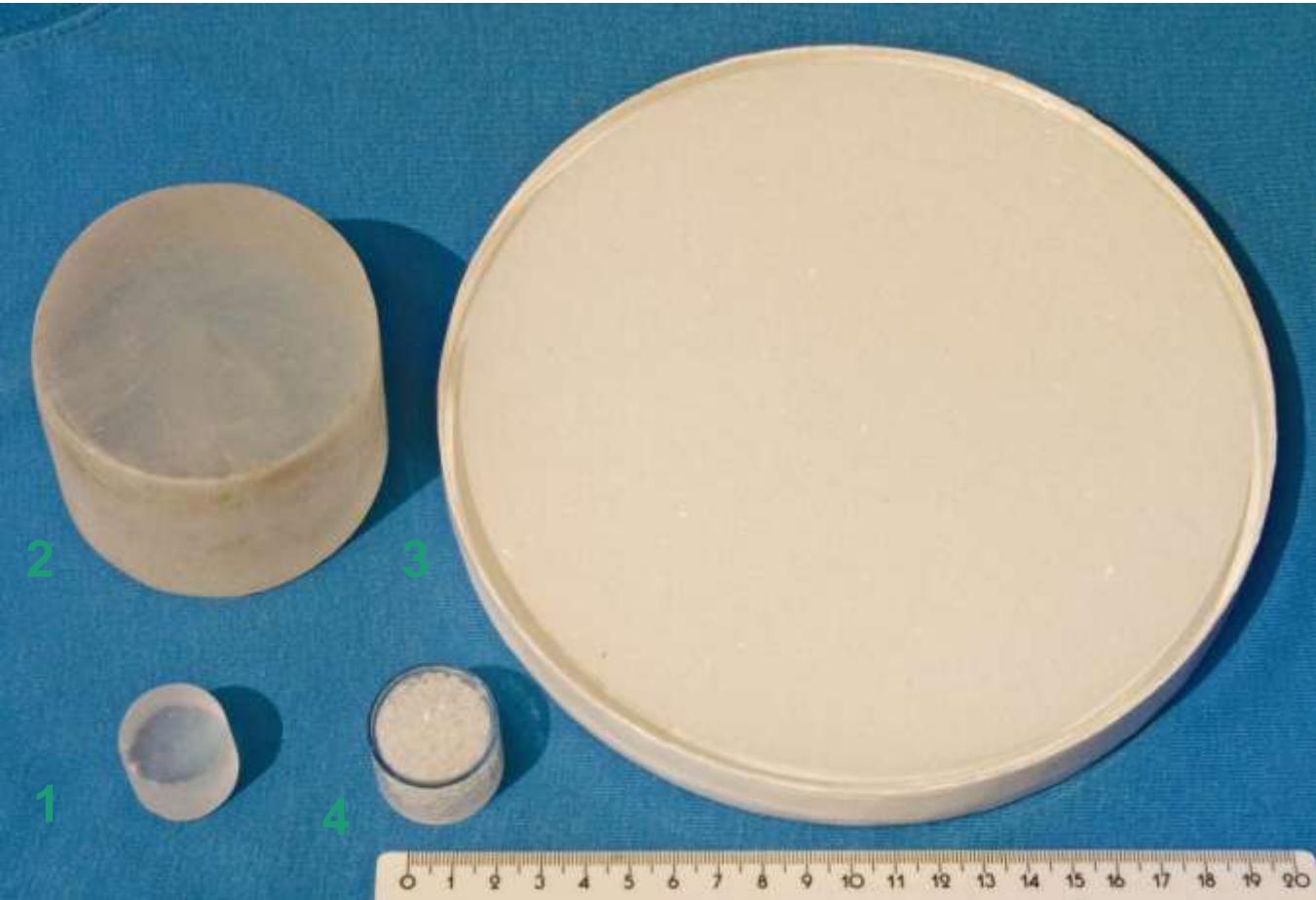
## Lanthanides (rare earths)

<sup>58</sup> Ce Cerium	<sup>59</sup> Pr Praseodymium	<sup>60</sup> Nd Neodymium	<sup>61</sup> Pm Promethium	<sup>62</sup> Sm Samarium	<sup>63</sup> Eu Europium	<sup>64</sup> Gd Gadolium	<sup>65</sup> Tb Terbium	<sup>66</sup> Dy Dysprosium	<sup>67</sup> Ho Holmium	<sup>68</sup> Er Erbium	<sup>69</sup> Tm Thulium	<sup>70</sup> Yb Ytterbium	<sup>71</sup> Lu Lutetium
----------------------------	----------------------------------	-------------------------------	--------------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------	-----------------------------	--------------------------------	-----------------------------	----------------------------	-----------------------------	-------------------------------	------------------------------

## Actinides

<sup>90</sup> Th Thorium	<sup>91</sup> Pa Protactinium	<sup>92</sup> U Uranium	<sup>93</sup> Np Neptunium	<sup>94</sup> Pu Plutonium	<sup>95</sup> Am Americium	<sup>96</sup> Cm Curium	<sup>97</sup> Bk Berkelium	<sup>98</sup> Cf Californium	<sup>99</sup> Es Einsteinium	<sup>100</sup> Fm Fermium	<sup>101</sup> Md Mendelevium	<sup>102</sup> No Nobelium	<sup>103</sup> Lr Lawrencium
-----------------------------	----------------------------------	----------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	----------------------------	-------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	---------------------------------

# Органические сцинтилляторы для спектрометрии быстрых нейтронов



- 1- эталонный  
моноцирсталь  
стильбена  
( $\varnothing 25$  мм×20 мм)  
2- моноцирсталь  
п-терфенила  
( $\varnothing 80$  мм×50 мм )  
Композиционные  
сцинтилляторы на  
основе гранул  
стильбена:  
3-  $\varnothing 200$ мм×20 мм;  
4-  $\varnothing 30$ мм×20 мм