

ZDROJE NEUTRÓNŮV

Vlastnosti neutrónového žiarenia

Dozimetria a radiačná ochrana

Ing. Róbert Hinca

Neutrón

- Neutrón môže byť viazaný v jadre ako **nukleón**. Vtedy je stabilný.
- Neutrón môže existovať ako **voľná častica**. Vtedy je nestabilný a podlieha beta premene s polčasom 10,3 min (stredná doba života $10,3/0,693=14,9$ min).
- V prírode v podstate neexistujú nuklidy, ktoré by podliehali spontánnej premene spojenj s emisiou neutrónov s výnimkou spontánneho štiepenia uránu.
- Podiel štiepení na premene ^{235}U je $7 \cdot 10^{-9}$ a ^{238}U je $5,45 \cdot 10^{-5}$ (ostatné je alfa premene).

2

Rozdelenie neutrónov

- Tepelné (pomalé) neutróny (0-0,1 keV)
 - ultrastudené ($E < 10^{-7}$ eV), majú **vlnové vlastnosti**
 - studené ($E < 5 \cdot 10^{-3}$ eV), majú vlnové vlastnosti
 - tepelné ($E < 0,1$ eV), charakteristická **difúzia** v látke
- Nadtepelné (rezonančné) neutróny (0,1-500 eV), charakteristické je **spomaľovanie** ($\sigma_s \sim 1/v$) a rezonančný záchyt (n, γ)
- Rýchle neutróny (0,2 - 2 MeV), pružný a nepružný rozptyl, prahové jadrové reakcie
- Veľmi rýchle neutróny ($E > 20$ MeV), spalačné reakcie, roztrieštenie jadier

3

Rozdelenie neutrónov podľa rýchlosti (energie)

$$E_p = kT$$

$$\bar{E} = \frac{4kT}{\pi}$$

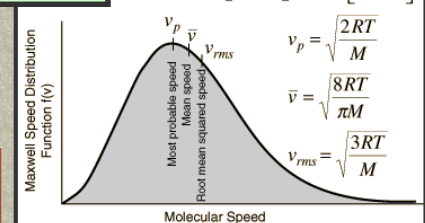
$$E_{rms} = \frac{3}{2}kT$$

Bolzmanna konštanta
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
 $J = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ eV}$

$$R = k \cdot N_A$$

M - molárna hmotnosť

$$f(v) = 4\pi \left[\frac{M}{2\pi RT} \right]^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left[\frac{-Mv^2}{2RT} \right]$$



$T[\text{K}]$	$E_p[\text{eV}]$	$E_{rms}[\text{eV}]$	$v_p[\text{ms}^{-1}]$	$v_{rms}[\text{ms}^{-1}]$
300	0.025	0.039	2222	2740
600	0.052	0.077	3144	3870

4

Zdroje neutrónov		
PROCES	PRIKLAD	VÝŤAŽOK NEUTRÓNOV
$(\alpha, n), (\gamma, n)$	^{226}Ra - Be zdroj (α, n)	502 n na $10^6 \alpha$
	^{124}Sb - Be zdroj (γ, n)	5,1 n na $10^6 \gamma$
Urychľovače častíc (p, n), (d, n), (α, n)	$^7\text{Li}(p, n), ^{12}\text{C}(d, n),$ $^9\text{Be}(\alpha, n), ^2\text{H}(d, n),$ $^3\text{H}(p, n), ^3\text{H}(d, n)$	$2 \cdot 10^{11} \text{ n}/(\mu\text{C} \cdot \text{s})$
Delenie (n, f)	^{235}U v reaktore	1 / delenie
Jadrová syntéza	400 keV deutерóny a tríciový terčik	$4 \cdot 10^{-5} / \text{d}$
(γ, n) a foto-delenie (γ, f) Reakcie s brzdným elektrónovým žiarením	100 MeV elektróny a uránový terčik	$5 \cdot 10^{-2} / \text{e}$
Spalačná reakcia	800 - 1600 MeV protóny a terčik z ťažkého kovu	30 n / p

5

Reakcie v rádionuklidových zdrojoch neutrónov	
$^9\text{Be} + \alpha \rightarrow ^{12}\text{C} + ^1_0\text{n}$ $^{13}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O} + ^1_0\text{n}$ $^7\text{Li} + \alpha \rightarrow ^{10}\text{B} + ^1_0\text{n}$ $^{19}\text{F} + \alpha \rightarrow ^{22}\text{Na} + ^1_0\text{n}$	
$\gamma + ^9\text{Be} \rightarrow ^8\text{Be} + ^1_0\text{n}$ $\gamma + ^2\text{H} \rightarrow ^1\text{H} + ^1_0\text{n}$	

6

Charakteristiky niektorých zdrojov (γ, n)			
Zdroj	Polčas rozpadu	Terčové jadro	Výťažok neutrónov na $10^{10} \text{ Bq } \gamma, \text{ n/s}$
^{24}Na	15 hod	Be	340 000
		D	330 000
^{28}Al	67 dní	Be	32 600
^{38}Cl	3 roky	Be	43 100
^{88}Y	107 dní	Be	229 000
		D	160
^{124}Sb	60.2 dní	Be	210 000

7

Charakteristiky Be (α, n) zdrojov		
Zdroj	Polčas rozpadu	Výťažok neutrónov na 10^6 častíc α
$^{239}\text{Pu}/\text{Be}$	24 000 rokov	57
$^{210}\text{Po}/\text{Be}$	138 dní	69
$^{238}\text{Pu}/\text{Be}$	87,4 rokov	79*
$^{241}\text{Am}/\text{Be}$	433 rokov	70
$^{244}\text{Cm}/\text{Be}$	18 rokov	100*
$^{226}\text{Ra}/\text{Be}$	1 602 rokov	502*
$^{227}\text{Ac}/\text{Be}$	21,6 rokov	702

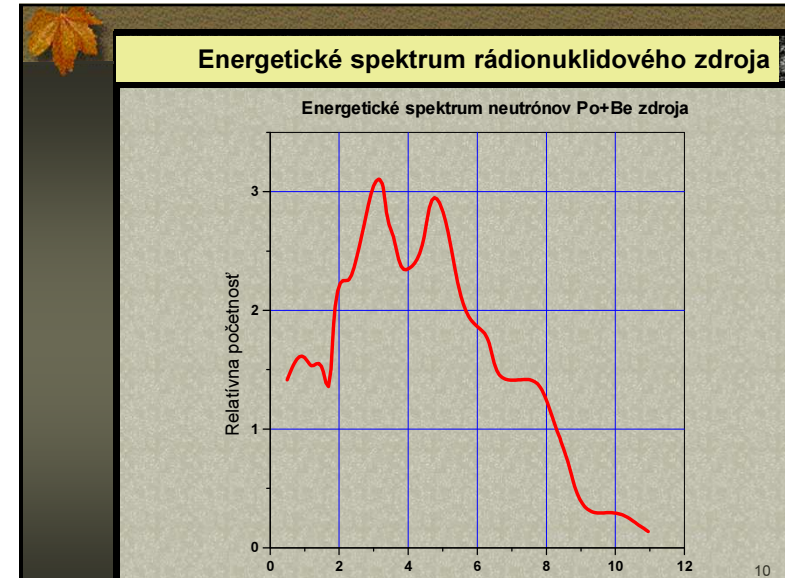
* veličina určená výpočtom

8

^{252}Cf

- Izotop ^{252}Cf emituje neutróny spontánne po štiepení.
- Tento prvok sa v prírode nevyskytuje.
- V jadrovom reaktore vzniká izotop ^{252}Cf z izotopu ^{238}U (^{242}Pu) sériou záchytných reakcií neutrónov a následných beta rozpadov.
- ^{252}Cf sa rozpadá α rozpadom na ^{248}Cm ($E_{\alpha}=6,2$ MeV 96,91%) alebo sa spontánne štiepi (3,09%) s $T_{1/2}=2,647$ roka.
- Pri štiepení emituje v priemere 3,7675 neutrónov, teda na 100 rozpadov emituje $3,09 \times 3,7675 = 11,627$ neutrónov.
- 1 mg čistého ^{252}Cf emituje cca. $2,36 \cdot 10^9$ n/s.

9



Produkcia neutrónov pri štiepnej reakcii

An example of one of the many reactions in the uranium-235 fission process.

$^{235}_{92}\text{U}$ Impact by slow neutron with energy on order of an eV.

$^{236}_{92}\text{U}$ compound nucleus is unstable, oscillates.

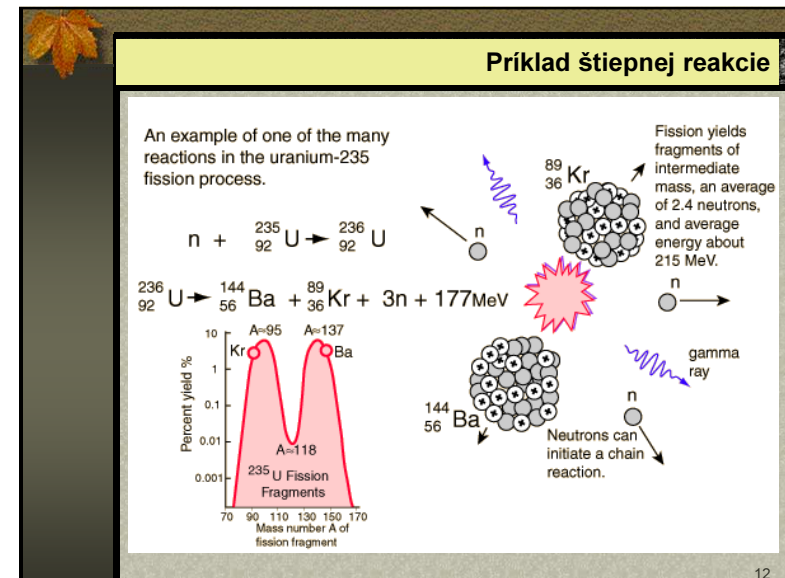
$^{144}_{56}\text{Ba}$ $^{89}_{36}\text{Kr}$

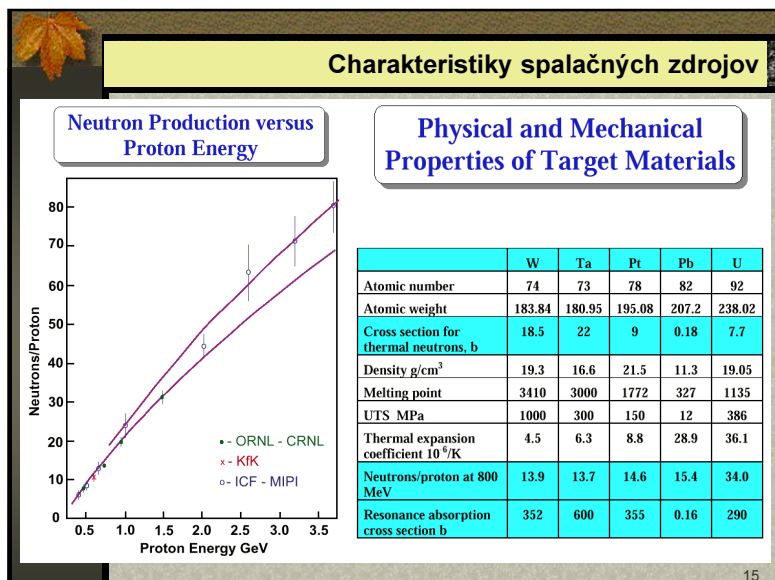
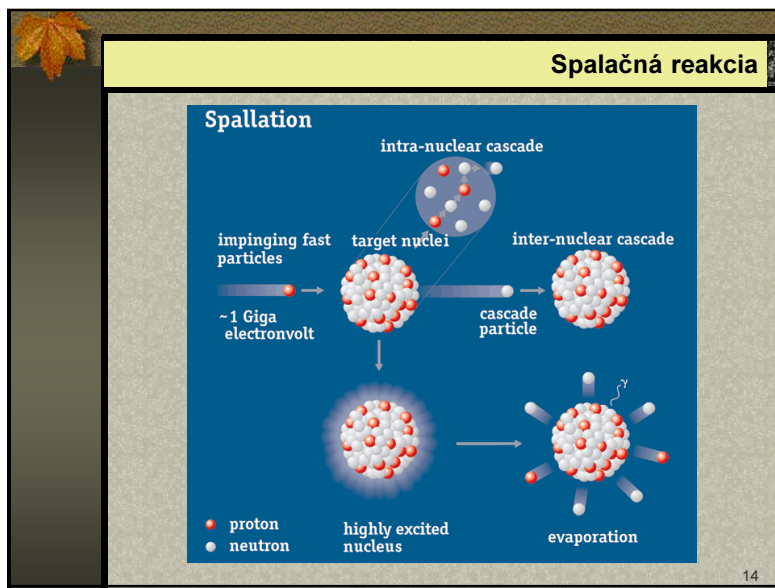
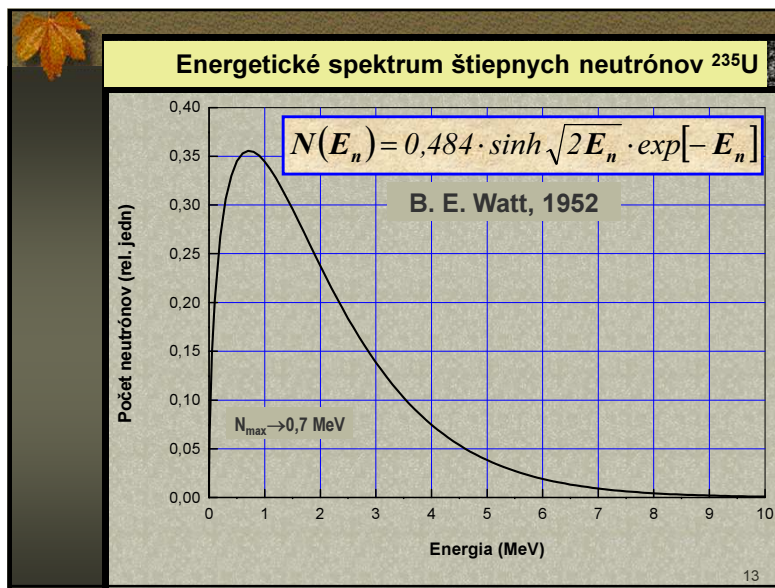
Fission yields fragments of intermediate mass, an average of 2.4 neutrons, and average energy about 215 MeV.

gamma ray

Neutrons can initiate a chain reaction.

11





Základné procesy pri interakcii neutrónov s látkou

- **Pružný rozptyl** - neutrón odovzdáva časť svojej energie odrazenému jadrú, pričom sa mení smer jeho dráhy.
- **Nepružný rozptyl** (n, n') - neutrón s dostatočnou energiou je pohltý jadrom, ktoré sa dostáva do excitovaného stavu. Pri prechode do základného stavu môže excitované jadro emitovať jeden alebo viac fotónov (n, n', γ).
- **Radiačný záchyt** - (n, γ) veľmi pravdepodobný proces tepelných neutrónov a rezonančných neutrónov.
- **Uvoľňovanie nabitých častíc** - (n, α), (n, d), (n, f), (n, p). Proces je najpravdepodobnejší pre ľahké jadrá a rýchle neutróny (typickým príkladom sú reakcie vzniku α z jadier Li, B).
- **Štiepenie** - (n, f)
- **Roztriešenie jadier** - spalačná reakcia

17

Interakcia neutrónov s látkou

- Mierou pravdepodobnosti interakcie neutrónov s látkou je **účinný prierez** σ [m^2].
- Staršou jednotkou je barn ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$).
- Vo všeobecnosti je definovaný pre danú terčovú entitu a pre danú interakciu alebo proces vyvolaný dopadajúcimi nabitými alebo nenabitými časticami daného typu a energie ako **podiel pravdepodobnosti tejto reakcie alebo deja pre danú terčovú entitu a fluencie dopadajúcich častíc**.

$$\sigma = \frac{P}{\Phi}$$

18

Mikro- a makroskopický účinný prierez

- σ_a - účinný prierez pre záchyt
- σ_s - účinný prierez pre rozptyl
- σ_f - účinný prierez pre štiepenie
- σ_{tot} - celkový účinný prierez

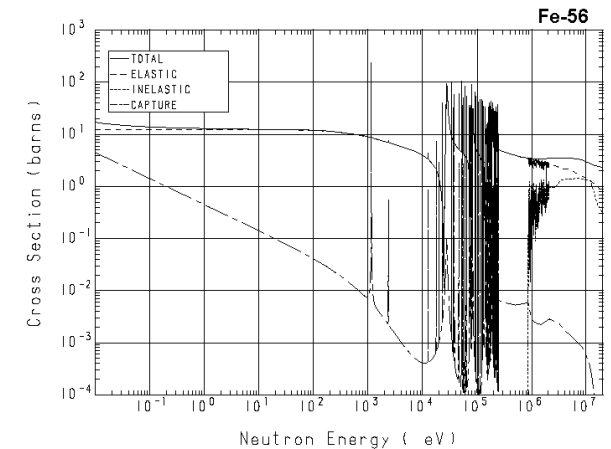
$$\sigma_{tot} = \sum_i \sigma_i$$

- Σ - makroskopický (objemový) účinný prierez [m^{-1}]
- $\Sigma = n\sigma$, kde n je hustota jadier [m^{-3}]

$$\Sigma = \sum_i n_i \sigma_i$$

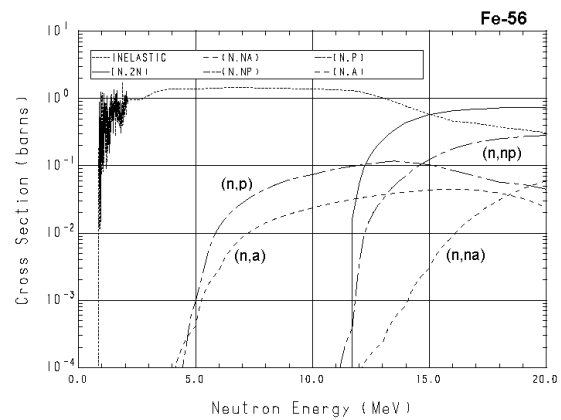
19

Účinný prierez interakcie neutrónov



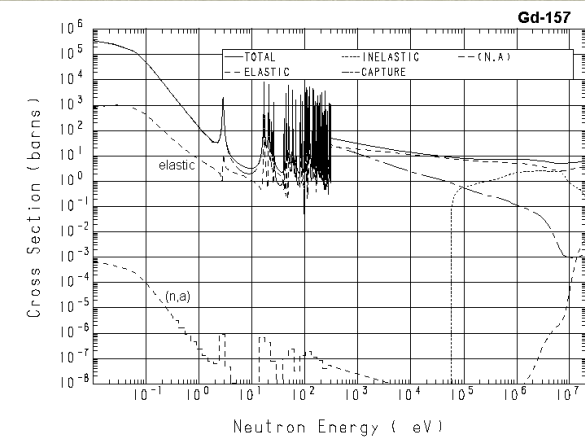
20

Účinný prierez interakcie neutrónov



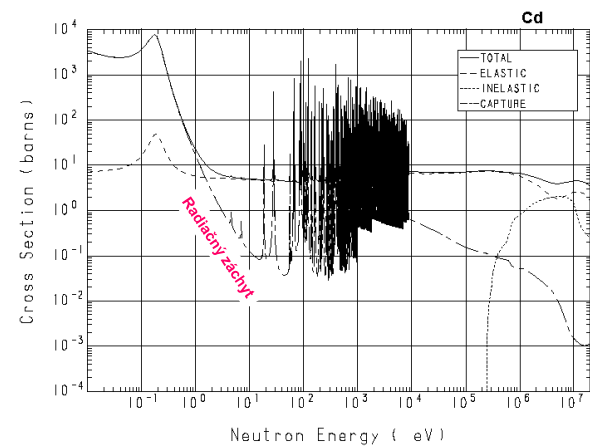
21

Účinný prierez interakcie neutrónov



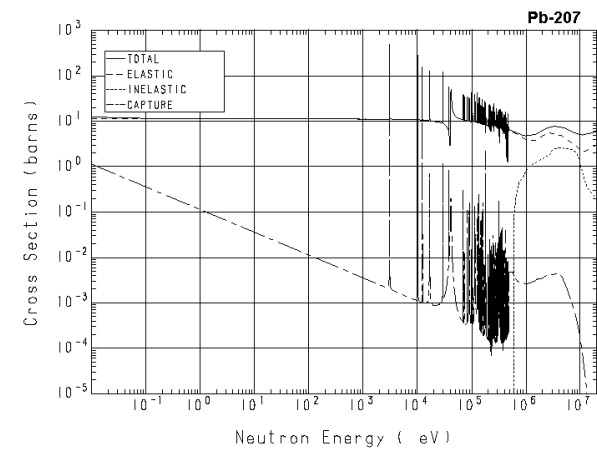
22

Účinný prierez interakcie neutrónov



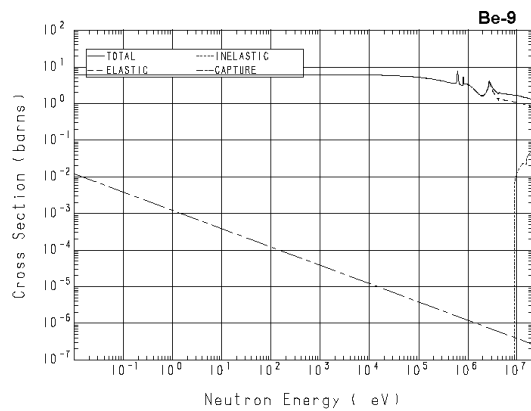
23

Účinný prierez interakcie neutrónov



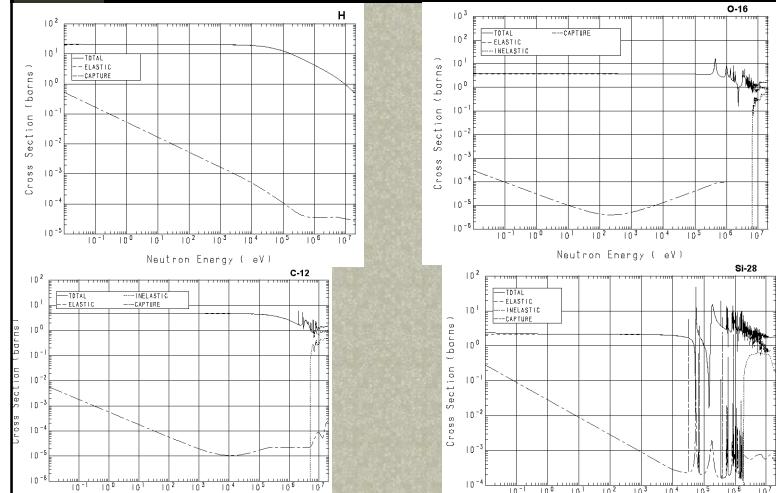
24

Účinný prierez interakcie neutrónov



25

Účinný prierez interakcie neutrónov



Zoslabovanie toku neutrónov v látke

- Zoslabovanie úzkeho kolimovaného zväzku neutrónov prebieha podľa exponenciálneho zákona

$$\varphi_x = \varphi_0 \cdot e^{-n\sigma_t x} = \varphi_0 \cdot e^{-\Sigma_t x}$$

$$\Sigma = n\sigma = \frac{\rho N_A}{A} \sigma$$

27

Relaxačná dĺžka λ

- Recipročná hodnota veličiny Σ , sa nazýva **relaxačná dĺžka** daného materiálu, čo je vzdialenosť, na ktorej pôvodná hustota toku neutrónov poklesne e - krát.

$$\varphi_x = \varphi_0 \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

- Hustotu toku neutrónov vo vzdialenosti R od izotropného bodového zdroja neutrónov, z ktorého vyletuje N_0 neutrónov za jednotku času, určíme zo vzťahu

$$\varphi_R = \frac{N_0}{4\pi R^2} e^{-\frac{R}{\lambda}}$$

28

Relaxačná dĺžka pre neutróny s $E \sim 1$ MeV

Materiál	ρ (g·cm ⁻³)	λ (cm)
Grafit	1,67	13,2
Hliník	2,7	14,8
Betón	2,2	11
Voda	1	9
Železo	7,6	12,6
Karbid bóru	1,3	14,6
Polyetylén	0,92	6,5
Titán	4,5	10
Olovo	11,34	18

29

Princípy návrhu ochrany pred neutrónmi

- Absorpcia neutrónov je najvyššia v oblasti tepelných, pomalých a rezonančných energií. Rýchle neutróny treba najprv **spomaliť**.
- Stredná strata energie neutrónov pri pružnom rozptyle je maximálna pre **ľahké jadrá** a rastie s poklesom protónového čísla Z absorbátora. Rýchle neutróny sú účinne spomaľované takými látkami, ako sú voda, parafin, PE, plasty, betón a pod.
- Na **absorpciu** tepelných neutrónov treba vybrať materiál s veľkým účinným prierezom absorpcie, napr. zlúčeniny bóru, zlúčeniny kadmia, betón a pod.
- Po zachytení tepelných neutrónov vždy vzniká sekundárne γ žiarenie, ktoré pri navrhovaní ochrany treba brať do úvahy. Najlepšie pohlcuje **gama** žiarenie ťažký materiál.

30

Spomaľovanie neutrónov

Materiál	A	ξ	$\xi \Sigma_s / \Sigma_a$	n ($E_0=2\text{MeV}$, $E_n=0,025\text{ eV}$)
Vodík	1	1,0	66	18
Voda		0,927	67	19
Deutérium	2	0,726	5820	25
Berýlium	9	0,208	160	85
Uhlík	12	0,158	169	115
Kyslík	16	0,120	487	150
Urán	238	0,00838		2172

ξ Priemerný logaritmický dekrement energie
 $\xi \Sigma_s$ Spomaľovacia schopnosť
 $\xi \Sigma_s / \Sigma_a$ Moderačný pomer
 n Počet zrážok potrebných na spomalenie neutrónu


31

Priemerný logaritmický dekrement energie ξ

- je priemerná hodnota nárastu **letargie** pri pružných zrážkach medzi neutrónmi a jadrmi, ktorých kinetická energia je zanedbateľná vzhľadom na kinetickú energiu neutrónov.
- Letargia $u = \ln(E_0/E)$, kde E_0 je referenčná energia a E je aktuálna kinetická energia neutrónu.
 - Pre $E_0=2\text{MeV}$, $E_n=0,025\text{ eV}$, bude $u=18$
 - Počet zrážok potrebných na spomalenie neutrónu:

$$n = \frac{u}{\xi}$$


32



Voda

- Voda sa používa nielen ako moderátor, ale vďaka veľkému obsahu vodíkových atómov aj ako ochranný materiál - absorbátor.
- Po niekoľkých zrážkach s atómami vodíka sa neutróny rýchlo spomalia do tepelných energií a absorbujú sa.
- Pri absorpcii tepelných neutrónov jadrami vodíka pri reakcii $H(n,\gamma)D$ vznikajú zachytané fotóny γ , ktorých energia $E = 2,23 \text{ MeV}$. Ich množstvo možno znížiť doplnkovou ochranou, napr. použitím boritej vody. V takom prípade budú tepelné neutróny absorbované bórom podľa reakcie $B(n,\alpha)Li$. Zachytané žiarenie bude mať energiu $0,5 \text{ MeV}$. Boritá voda je však silný korozívny materiál.


33



Oceľ

- Oceľ je základný konštrukčný materiál reaktorov. Má dobré konštrukčné aj mechanické vlastnosti. V porovnaní s olovenou ochranou je oceľová ochrana pred gama žiarením o 30% ťažšia. Pre ochranu pred neutrónmi je oceľová v porovnaní s olovenou účinnejšia.
- Železo, ktoré oceľ obsahuje, sa aktivuje, vzniká pritom izotop ^{59}Fe , ktorý emituje fotóny o energii $1,1 \text{ MeV}$ a $1,29 \text{ MeV}$. Okrem toho vzniká zachytané žiarenie s energiou $E = 7,7 \text{ MeV}$.
- Prímesi, ktoré oceľ obsahuje (Co, Mn, Ta), môžu byť tiež aktivované. V oceli by mangánu nemalo byť viac ako 0,2%, kobalt a tantal by mal byť prítomný iba v stopových množstvách.


34



Betón

- Betón je základným ochranným materiálom. Obsahuje rôzne plnivé, navzájom spojené cementom. Sú to najmä kyslíčniky Ca, Si, Al, Fe a ľahké jadrá, ktoré účinne pohlcujú žiarenie a spomaľujú rýchle neutróny pri pružných a nepružných zrážkach.
- Zoslabovanie toku neutrónov závisí od obsahu vody v materiále, z ktorého ochrana pozostáva.
- Absorbovanie neutrónového toku v betónovej ochrane možno zlepšiť pridaním do nej zlúčenín bóru. Najčastejšie sa používa karbid bóru B_4C .

35



Grafit

- Grafit má výborné tepelné vlastnosti, je dobrým **moderátorom i reflektorom**. Je ľahko obrábatelný. Jeho nevýhodou je, že po ožiarení neutrónmi sa jeho kryštalická mriežka narúša, čo mení jeho mechanické vlastnosti.

36

Kadmium

- Kadmium vynikajúco pohlcuje neutróny o energii menšej ako 0,5 eV.
- Vrstva kadmia o hrúbke 1 mm zníži tok tepelných neutrónov 10^9 krát, pričom vzniká zachytané žiarenie o energii 7,5 MeV.
- Nemá dobré mechanické vlastnosti. Častejšie ho z týchto dôvodov používajú v zliatine s olovom.

37

Polyetylén

- Polyetylén $(CH_2)_n$ obsahuje väčšie množstvo **vodíkových atómov** v jednotke objemu ako voda, preto je lepší moderátor.
- **Mäkne** pri 115°C , čo obmedzuje jeho použitie v reaktore.
- Pri vyšších teplotách **horí**, pričom vzniká voda a CO_2 .
- Jeho lineárna roztťažnosť je 13 krát väčšia, ako u železa.
- Je dobre **tvarovateľný**.
- Kvôli zníženiu zachytného žiarenia sa do polyetylénu pridávajú zlúčeniny, obsahujúce bór. Komerčne je z takého materiálu dostupný tzv. "**neutrónstop**".

38

Parafín

- Parafín podobne ako polyetylén sa používa na spomaľovanie rýchlych neutrónov.

Záver

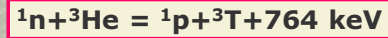
- Najčastejšie sa používa kombinovaná ochrana.
- Optimálnymi sú kombinácie ťažkých materiálov s látkami s vysokým obsahom vodíka, napr.: Pt, Os, Ir, Rh s polyetylénom alebo parafínom, Cd + polyetylén alebo parafín, W + H_2O a i.

39

DETEKTORY NEUTRÓNŮV

40

Plynové detektory neutrónov na báze He-3



- (1) The counter length can be agreed with the customer.
 (2) PC-proportional counter mode (with gas amplification)
 IIC-Impulse ionization chamber mode (without gas amplification)
 (3) He-3 pressure in the counter CN-04 can be increased up to 6 atm, if ordered specifically
 (4) In case of isotropic flow of thermal neutrons, registration efficiency increases if He-3 pressure is increased, too.

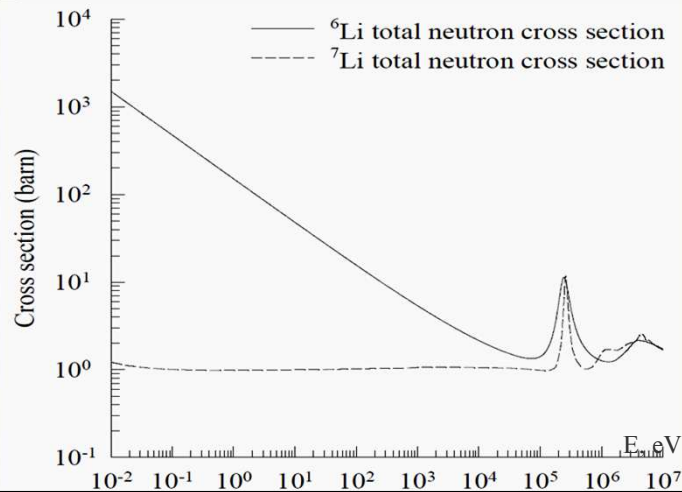
Counter type	CN-01	CN-03	CN-04
Diameter	30 mm	18 mm	30 mm
Length of the operating part (1)	900 mm	100 mm	970 mm
Operation mode (2)	IIC	PC	PC, IIC
He-3 pressure	2 atm	7 atm	2 atm (3)
Own background, not more	0.01 imp/s	0.001 imp/s	0.001 imp/s
Insulation resistance, not less	1011 Ohm	1011 Ohm	1011 Ohm
Operating voltage	400 V	1200 V	400-1200 V
Efficiency of registration of thermal neutrons(4), not less	50%	70%	60%
Charge collection time	4 mcs	2 mcs	2 mcs
Length of working plateau	-	200 V	200 V
Plateau tilt for 100V	-	1%	1%



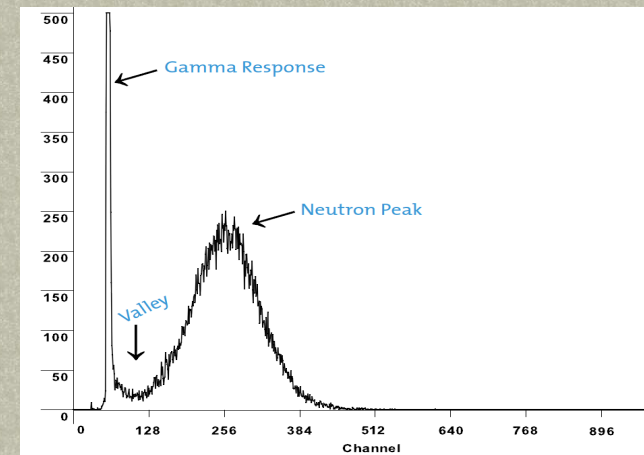
Scintilačný detektor neutrónov na báze ^6Li

- $^6\text{LiF} + \text{ZnS(Ag)}$ je homogénne zmiešané so spojivom a vylisované na 100 μm tenké fólie
- Využíva sa reakcia $^6\text{Li} + \text{n} = ^4\text{He} + ^3\text{H} + 4.8 \text{ MeV}$
- Produkty reakcie spôsobujú v ZnS záblesky, ktoré sa svetlovodom s vlnovým posunom vedú k fotonásobiču
- Impulzy od gama žiarenia sa oddeľujú diskriminátorom
 - PHD – Pulse High Discriminator
 - PSD – Pulse Shape Discriminator

Mikroskopický účinný prierez lítia



Scintilačný detektor neutrónov na báze ^6Li



Scintilačné detektory neutrónov

Koncentrické disky z akrylu a scintilátora ZnS:Ag na detekciu rýchlych neutrónov prostredníctvom rozptýlených protónov

Akryl alebo aj polymetylmetakrylát tiež plexisklo obsahuje veľa vodíka a využíva sa reakcia n-p. Sumárny vzorec je $(C_5H_8O)_n$

Scintilátor ZnS:Ag v kombinácii s Li sklom na detekciu tepelných neutrónov

TLD osobný dozimeter neutrónov

Izotopy ^6Li a ^7Li sú citlivé na beta a gama žiarenie. Len ^6Li je citlivý na tepelné neutróny (0.025 eV to 0.6 MeV) reakciou $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$.

Dozimeter obsahuje tabletky ^7LiF a ^6LiF . Celý je pokrytý kadmiovým plieskom aby odienil priame pomalé neutróny. Detektor potom detekuje iba neutróny, ktorých zdrojom sú nadtepelné neutróny, spomalené v tele pracovníka a odrazili sa z vnútra tela späť do detektora. Taký dozimeter sa nazýva **albedo** dozimeter.

Na detekciu rýchlych neutrónov sa používa stopový detektor CR39+radiátor.

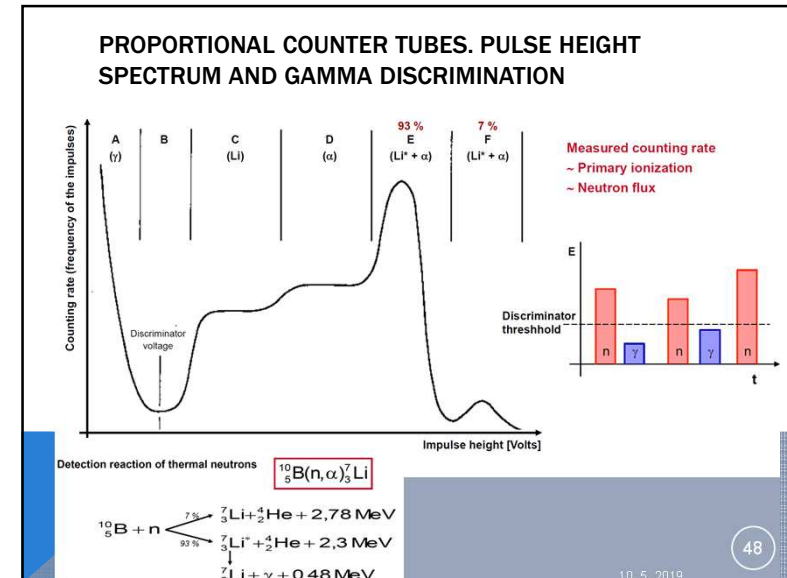
PARAMETRE EXCORE DETEKTOROV NA BÁZE B-10

Source Range:	Proportional counter tube with boron coating (B-10 enrichment = 92 %)
Filling gas:	Ar + CO ₂ (15 %)
Size:	Ø= 48 mm, height = 766 mm (B-10 55.8 mm)
Intermediate Range:	Compensated ionization chamber with B-coating (B-10 enr. = 92 %)
Filling gas:	N ₂ (pressure = 1 bar)
Size:	Ø= 50 mm, height = 670 mm
Power Range:	Ionization chamber with B-coating (B-10 enrichment = 92 %)
Filling gas:	N ₂ (pressure = 1 bar)
Size:	Ø= 50 mm, height = 670 mm

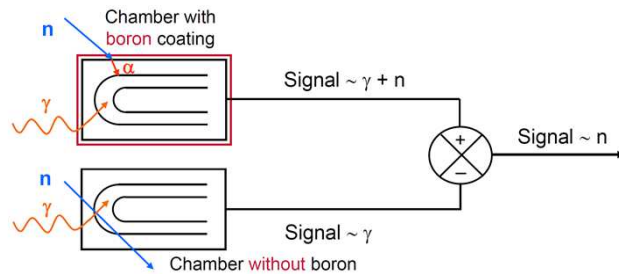
Detection reaction of thermal neutrons $^{10}_5\text{B}(n,\alpha)^7_3\text{Li}$

$$^{10}_5\text{B} + n \begin{cases} 7\% \rightarrow ^7_3\text{Li} + ^4_2\text{He} + 2,78 \text{ MeV} \\ 93\% \rightarrow ^7_3\text{Li}^* + ^4_2\text{He} + 2,3 \text{ MeV} \\ \quad \downarrow \\ \quad ^7_3\text{Li} + \gamma + 0,48 \text{ MeV} \end{cases}$$

47



PRINCÍP KOMPENZOVANEJ IONIZAČNEJ KOMORY

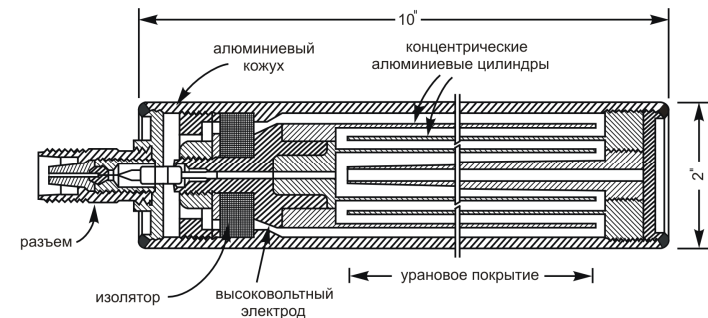


High energetic gamma quanta escaping from the core may also cause ionization, directly in the detector. In particular in the intermediate range, delayed gamma radiation which is **not proportional to the core power**, contributes significantly to the measuring signal and has therefore to be compensated.

49

10. 5. 2019

ŠTIEPNA KOMORA S VIACNÁSOBNÝMI KONCENTRICKÝMI STENAMI



50

10. 5. 2019

VÝHODY ŠTIEPNEJ IONIZAČNEJ KOMORY

Fission chambers use neutron-induced fission to detect neutrons. The chamber is usually similar in construction to that of an ionization chamber, except that the coating material is highly enriched U235. The neutrons interact with the U235, causing fission. One of the two fission fragments enters the chamber, while the other fission fragment embeds itself in the chamber wall.

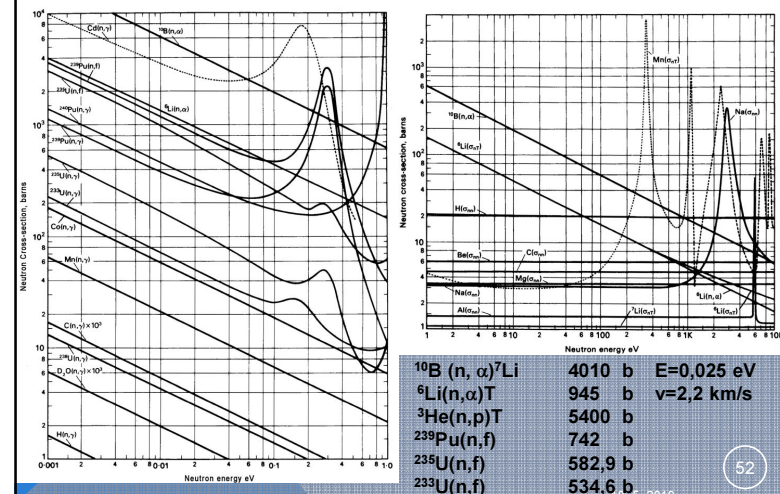
One **advantage** of using U235 coating rather than boron is that the **fission fragment has a much higher energy level than the alpha particle from a boron reaction**. Neutron-induced fission fragments produce many more ionizations in the chamber per interaction than do the neutron induced alpha particles. **This allows the fission chambers to operate in higher gamma fields than an uncompensated ion chamber with boron lining.**

Fission chambers are often used as **current indicating devices and pulse devices simultaneously**. They are especially useful as **pulse chambers**, due to the very large pulse size difference between neutrons and gamma rays. Because of the fission chamber's dual use, it is often used in **"wide range"** channels in nuclear instrumentation systems. Fission chambers are also capable of operating over the **source and intermediate** ranges of neutron levels.

51

10. 5. 2019

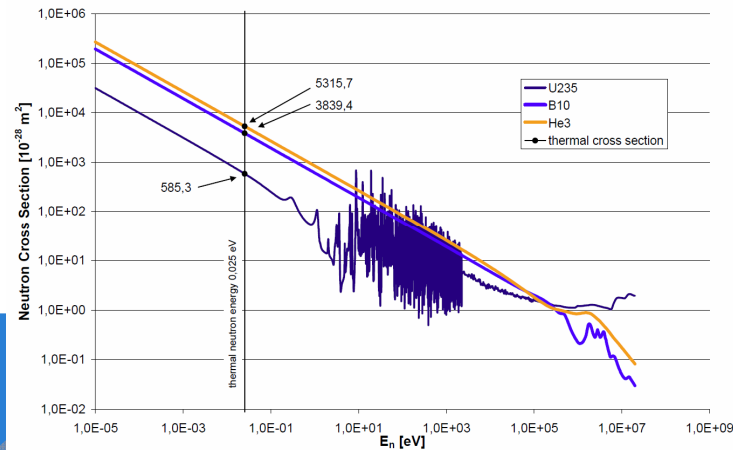
ÚČINNÝ PRIEREZ INTERAKCIE NEUTRÓNŮV



52

10. 5. 2019

MIKROSKOPICKÉ ÚČINNÉ PRIEREZY PRE NEUTRÓNY



BÓROVÁ IONIZAČNÁ KOMORA KNK-53M



pracovný plyn: 94% ^4He +6% N_2 , tlak plynu 0,6 MPa, napájanie 500 V
Radiátor ^{10}B , hrúbka 1 mg/cm², celková plocha 1800 cm²
Platne Ø44,5 mm sú pokryté bórom sú striedavo napájané a γ kompenzované
V každej zo 4 (rozdelené iba kvôli pevnosti) sekcií je 77 bórom pokrytých platní a 77 nepokrytých pre kompenzáciu gama.

54

10. 5. 2019

BORON LINED PROPORTIONAL COUNTERS

Type	Neutron sensitivity (c.s ⁻¹ /n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Ø (mm)	Length (mm)	Max operating T° (°C)	Integral cable (mm)	Connector
CPNB25	4	25.4	394	200	no	HN
CPNB48	10	25.4	560		no	
CPNB45	8	25.4	678		no	
CPNB44	8	48	761		6	
CPNB35	12	76.5	443		no	
CPNB34	12	76.5	457.5		6	
CPNB65	20	76.5	727		no	
CPNB64	20	76.5	741.5		6	



Thermal neutron detectors / Operating in pulse mode
Watertight HN connectors ensure a high safety of use.
Applications:

- monitoring nuclear reactors in the source range
- fuel reprocessing operations
- special equipments in reactors (boron-meters)

55

10. 5. 2019

FISSION CHAMBERS FOR OUT-OF-CORE

Type	Neutron sensitivity Current mode (A/n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Pulse mode (c.s ⁻¹ /n.cm ⁻² .s ⁻¹)	Ø (mm)	Length (mm)	Max operating T° (°C)	Integral cable (mm)	Connector
CFUM11	1×10^{-14}	1×10^{-1}	25.4	227	250	no	HN
CFUM18	1×10^{-14}	1×10^{-1}	25.4	263	250	6	
CFUM21	1×10^{-15}	1×10^{-2}	25.4	227	250	no	
CFUC06	2×10^{-13}	1	48	412	600	6 + 6	
CFUC07	2×10^{-13}	1	48	372	400	6 + 6	
CFUL01	2×10^{-13}	1	48	337	250	no	
CFUL08	2×10^{-13}	1	48	384.5	250	6	
CFUK08	6×10^{-13}	3	60	362	250	6	
CFUG08	8×10^{-13}	4	80	419	250	6	
CFUH08	1×10^{-14}	4	80	410	250	6 + 4	



- Integral watertight HN connectors
 - Integral mineral insulated cable
 - Complete Inconel protection
- Applications**
- thermal neutron detection
 - wide range reactor monitoring
 - waste monitoring

10. 5. 2019

FISSION CHAMBERS FOR IN-CORE USE

Type	Neutron sensitivity		Ø (mm)	Length (mm)	Max operating T° (°C)	Integral cable (mm)	Connector
	Current mode (A/n.cm ² .s ⁻¹)	Pulse mode (C.s ⁻¹ /n.cm ² .s ⁻¹)					
CFUZ53	5 x 10 ⁻¹⁸	-	1.5	50	350	1	BNC
CFUR43	3 x 10 ⁻¹⁸	-	3	48.5	350	1	BNC
CFUF43	1 x 10 ⁻¹⁷	-	4.7	86	350	1	BNC
CFUE32	1 x 10 ⁻¹⁶	1 x 10 ⁻³	7	150	600	6	HN
CFUE43	1 x 10 ⁻¹⁷	-	7	85.5	500	3	BNC

Under severe environmental conditions:
high T° - humidity - gamma flux

Applications

- detection of thermal neutrons in high flux
- monitoring of the reactor fuel burn up
- start-up, intermediate and power range
- flux map measurement



57

10. 5. 2019

SIGNÁLOVÉ KÁBLE

Cable extensions

High-immunity mineral insulated extension cables.
Transmission of low level impulsive signals.
Under hard environmental conditions.
Pulse or current transmission up to 20 bars external pressure.

Options

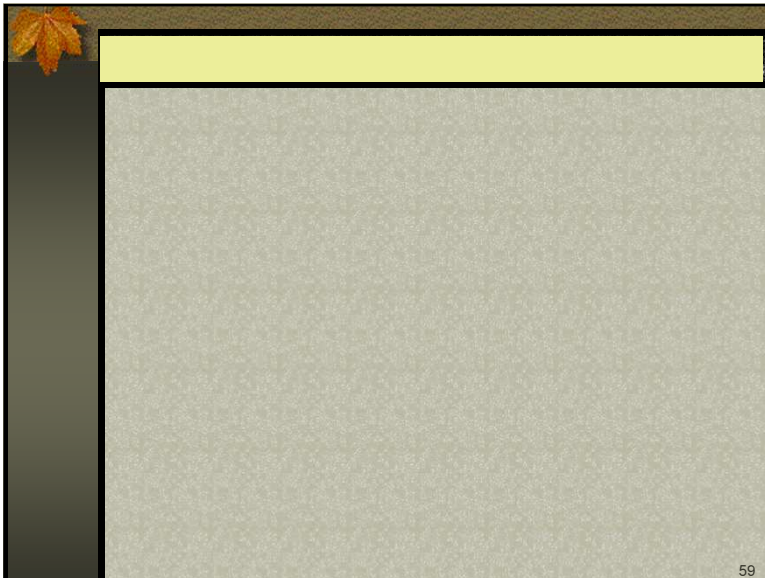
- BNC connectors
- watertight HN connectors
- high resistance to radiations and electromagnetic parasitic signals
- cable insulator MgO, SiO₂ or Al₂O₃



Type	Mode	Cable Ø (mm)	insulator	Connector type	insulator	Characteristic impedance Ω
EXT-BNC	current	3	MgO	BNC	PTFE	-
EXT-HN	pulse	16	MgO	HN	Al ₂ O ₃	50

58

10. 5. 2019



59