

Generace neutronových svazků

Interakce laserového záření s pevnou látkou jako zdroj neutronů

David Fridrich, Vojtěch Horný, Martin Jirka

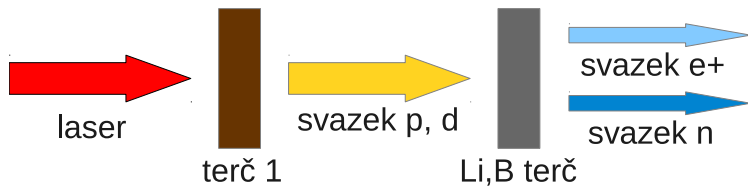
Katedra fyzikální elektroniky
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
České vysoké učení technické

6. prosince 2011

Obsah prezentace

- 1 Úvod
 - Obsah
 - Fyzikální systém
 - Zavedení základních veličin
- 2 Vstupní údaje
 - Účinné průřezy
 - Brzdící výkon
- 3 Výpočet výtěžku neutronů
 - Bez brzdění
 - S brzděním
 - Diskuse
- 4 Druhotná generace pozitronů
 - Inspirace v literatuře
 - Výpočet aktivační křivky ^{11}C
- 5 Pár slov závěrem

Uvažovaný fyzikální systém



Uvažované jaderné reakce

Generace neutronů

pomocí reakcí

- (p,n)
- (d,n)

Práce se věnuje výhradně reakcím lithia a boru



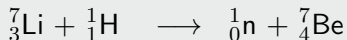
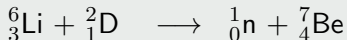
Uvažované jaderné reakce

Generace neutronů

pomocí reakcí

- (p,n)
- (d,n)

Práce se věnuje výhradně reakcím lithia a boru



Účinný průřez σ

- pravděpodobnost uskutečnění jaderné reakce
- data z databází NANL SIGMA a EXFOR

Měrná reakční rychlost r

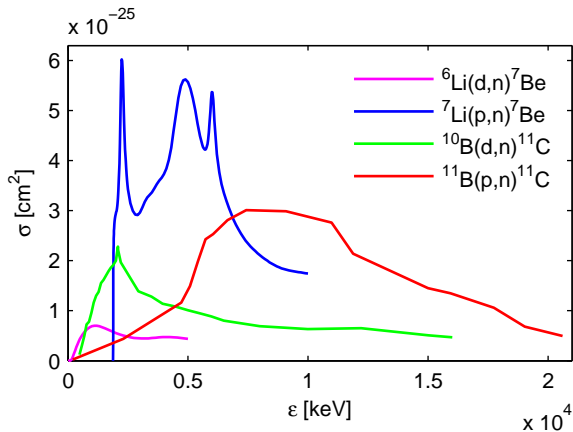
- $r = \sigma n$
- součin účinného průřezu a částicové hustoty terčíku
- počet uskutečněných reakcí na jednu dopadnuvší částici na jednotkovou délku terčíku

Měrný reakční výtěžek y

- $y = \int_0^l r(x) dx$
- integrace přes délku terčíku či hloubku průniku
- počet uskutečněných reakcí na jednu dopadnuvší částici

Účinné průřezy

Grafy účinných průřezů v závislosti na energii



Zdroj: NANL Sigma, EXFOR - webové databáze

Brzdící výkon

Úbytek energie při průchodu částic materiálem

Využíváme Betheho vztah

$$\frac{dE}{dx} = -78\,500 \frac{Z}{AE(x)} \ln \left(\frac{1.166E(x)}{J} \right)$$

Diferenciální rovnice pro $E = E(x)$.

Numerické řešení s podmínkou $E(0) = E_0$.

materiál	J (eV)
-----------------	---------------

lithium	40
---------	----

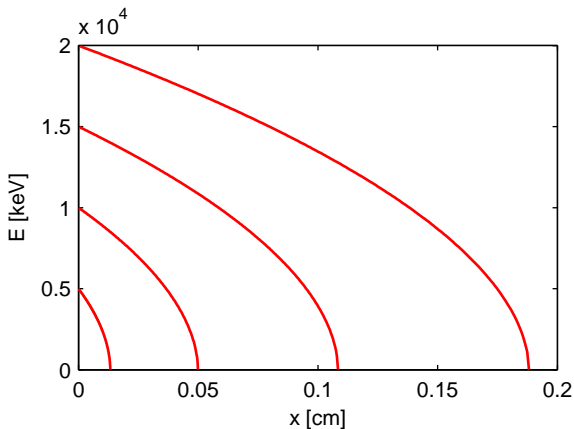
bor	76
-----	----

Zdroj: D. Joy, A. Romig, J. Goldstein, Principles of analytical electron microscopy, Springer, 1986.

Brzdící výkon

Závislost energie na hloubce průniku

Průnik protonového svazku borovým terčíkem



Rychlejší útlum pro nižší energie.

Výpočet výtěžku neutronů

Zanedbáno brzdění

Výpočet bez započtení brzdění

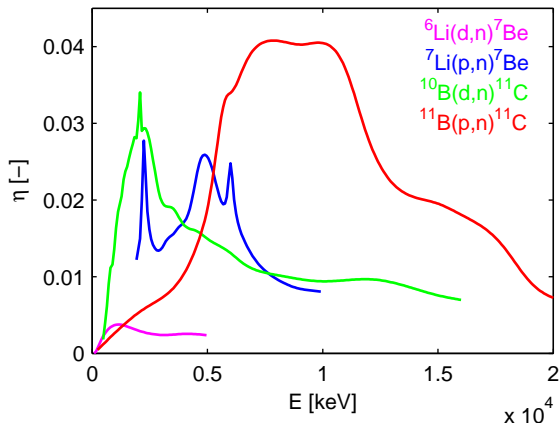
$$y(E, l) = \sigma(E)nl$$

- tvar $y(E)$ stejný jako $\sigma(E)$
- možno použít jako přiblížení u velmi tenkých terčů
- potřeba méně než 100 protonů/deuteronů na generaci neutronu

Výpočet výtěžku neutronů

Zanedbáno brzdění

Počet vzniklých neutronů na ostřelující částici



Výpočet výtěžku neutronů

Zohledněno brzdění

Výpočet se započtením brzdění

Průběh výpočtu

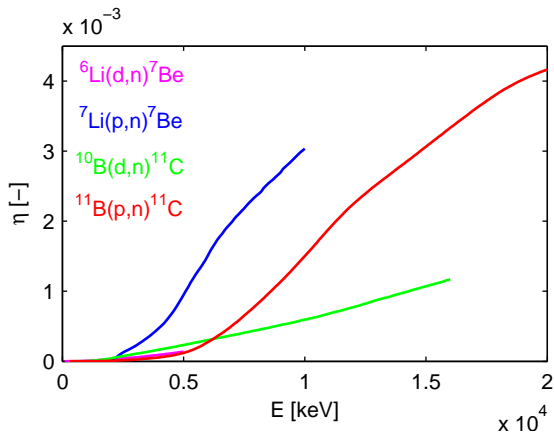
$$y(E_0) = \int_0^{L(E_0)} r(E(x)) dx$$

- 1 výpočet závislosti energie částice na hloubce průniku do terčíku
- 2 výpočet doletové vzdálenosti L řešením $E(L) = 0$
- 3 samotná integrace obdélníkovou metodou

Výpočet výtěžku neutronů

Zohledněno brzdění

Počet vzniklých neutronů na ostřelující částici



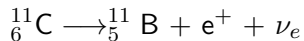
Diskuse ke generaci neutronů

Doporučené reakce

- 1 pro $E < 10$ MeV nejvhodnější ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$
 - snadnější získat protonový svazek
 - 3 neutrony/1 000 protonů pro 10 MeV
 - **nevýhoda:** pod 200 keV neutrony nevznikají
- 2 pro vyšší energie ${}^{11}\text{B}(p,n){}^{11}\text{C}$
 - 4 neutrony/1 000 protonů pro 20 MeV
 - pomalejší brzdění pro vyšší energie
- 3 pro deuteronové reakce výtěžek nižší

Druhotná generace pozitronů

Vznik pozitronů **reakcí**



Možná následná aplikace pro PET, aplikace v materiálových vědách či průmyslu.

Proveden experiment

intenzita laseru	$4,5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$
opakovací frekvence	50 fs
materiál terčíku	nanovláčna vody (sníh)
metoda generace protonů	TNSA
# protonů	$(4\,708 \pm 707) \text{ sr}^{-1} \text{ střela}^{-1}$

Predikováno výrazné zlepšení parametrů vylepšením terčíků a geometrického uspořádání experimentu.

Zdroj: A. Zigler, T. Palchan, N. Bruner, E. Schleifer, S. Eisenmann, Z. Henis, M. Botton, S. Pikuz, A. Faenov Jr, D. Gordon, et al., Arxiv preprint arXiv:1011.0632 (2010)

Výpočet aktivační křivky ^{11}C

Parametry výpočtu

veličina	hodnota
laser	Ti:safír
intenzita	$4.5 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$
opakovací frekvence	10 Hz
terč	nanovlákn H ₂ O
energie protonů	7 MeV přesně
počet protonů	1 000 000/střela
reakce	$^{11}\text{B}(p,n)^{11}\text{C}$

Poločas rozpadu ^{11}C je 20,3 min^a.

^aWebElements, <http://www.webelements.com>

Výpočet aktivační křivky ^{11}C

Změna počtu jader ^{11}C

$$\frac{dN}{dt} = Ry - \lambda N$$
$$N(0) = 0$$

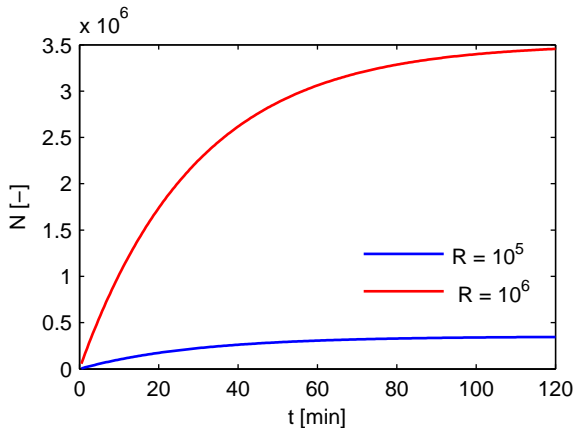
R tok protonů k terčíku
 $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$ rozpadová konstanta
 T poločas rozpadu

Řešení

$$N(t) = \frac{Ry}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

Aktivační křivka ^{11}C

Závislost počtu jader ^{11}C na čase



Zhodnocení aktivity pozitronového zářiče

Aktivita zářiče

Při počtu jader ^{11}C

$$N = 3 \times 10^6$$

a poločase rozpadu

$$T = 20.3 \times 60 \approx 1200 \text{ s}$$

je aktivita zářiče

$$A = 1\,250 \text{ Bq.}$$

Potřebná aktivita pro aplikaci

- onkologie: 200–400 MBq^a

^ahttp://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography

Zhodnocení aktivity pozitronového zářiče

Aktivita zářiče

Při počtu jader ^{11}C

$$N = 3 \times 10^6$$

a poločase rozpadu

$$T = 20.3 \times 60 \approx 1200 \text{ s}$$

je aktivita zářiče

$$A = 1\,250 \text{ Bq.}$$

Potřebná aktivita pro aplikaci

- onkologie: 200–400 MBq^a

^ahttp://en.wikipedia.org/wiki/Positron_emission_tomography

Představený pozitronový zdroj je slabý, **není vhodný pro aplikaci.**

Návrhy pro zlepšení

Je možno

- použít intenzivnější laser
- tímto zvýšit přítok protonů (řádově)
- tímto zvýšit měrný výtěžek neutronů

Pro zrychlení doby náběhu je možno

- po spuštění systému nastavit nejvyšší opakovací frekvenci laseru
- ve vhodnou dobu před nasycením snížit opakovací frekvenci
- obecně optimalizovat průběh vzhledem k měrnému výtěžku a míře nasycenosti našeho pozitronového zdroje

Představený pozitronový zdroj je slabý, **není vhodný pro aplikaci.**

Návrhy pro zlepšení

Je možno

- použít intenzivnější laser
- tímto zvýšit přítok protonů (řádově)
- tímto zvýšit měrný výtěžek neutronů

Pro zrychlení doby náběhu je možno

- po spuštění systému nastavit nejvyšší opakovací frekvenci laseru
- ve vhodnou dobu před nasycením snížit opakovací frekvenci
- obecně optimalizovat průběh vzhledem k měrnému výtěžku a míře nasycenosti našeho pozitronového zdroje

- 1 Interakcí laserového záření s pevným terčem a druhotnou reakcí protonů či deutronů s lithiem či borem lze poměrně efektivně generovat neutrony.
- 2 Nejlepší výtěžky poskytuje reakce ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ pro energie pod 10 MeV.
- 3 Pro vyšší energie je vhodnější ${}^{11}\text{B}(p,n){}^{11}\text{C}$.
- 4 Je možno vyrobit až 3 neutrony z 1 000 protonů.
- 5 Prozatím není možno využít reakce ${}^{11}\text{B}(p,n){}^{11}\text{C}$ ke generaci pozitronů.
- 6 Pro přesnější kvantitativní závěry by bylo třeba zlepšit
 - fyzikální model
 - metodiku výpočtů

Děkujeme za pozornost!

David Fridrich

d.fridrich@volny.cz

Vojtěch Horný

vojtech.horny@atlas.cz

Martin Jirka

martin_jirka@centrum.cz

Prezentace a článek online

kfe.fjfi.cvut.cz/~horny/FVHE/PrezentaceFVHE.pdf

kfe.fjfi.cvut.cz/~horny/FVHE/NeutronoveZdroje.pdf