

Aktivita

- **radioaktivní rozpad**

$$\Delta N = -N\lambda\Delta t \quad \longrightarrow \quad \frac{dN}{dt} = -N\lambda$$

↑ ↑
počet atomů $N(t)$ rychlost rozpadu

- počet radioaktivních atomů exponenciálně klesá $N = N_0 e^{-\lambda t}$

↑
počet atomů v čase $t_0 = 0$, $N_0 = N(0)$

- **poločas rozpadu** $T_{1/2}$: počet radioaktivních atomů poklesne na polovinu

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \longrightarrow \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

- **aktivita** A : počet rozpadů za jednotku času

hmotnost

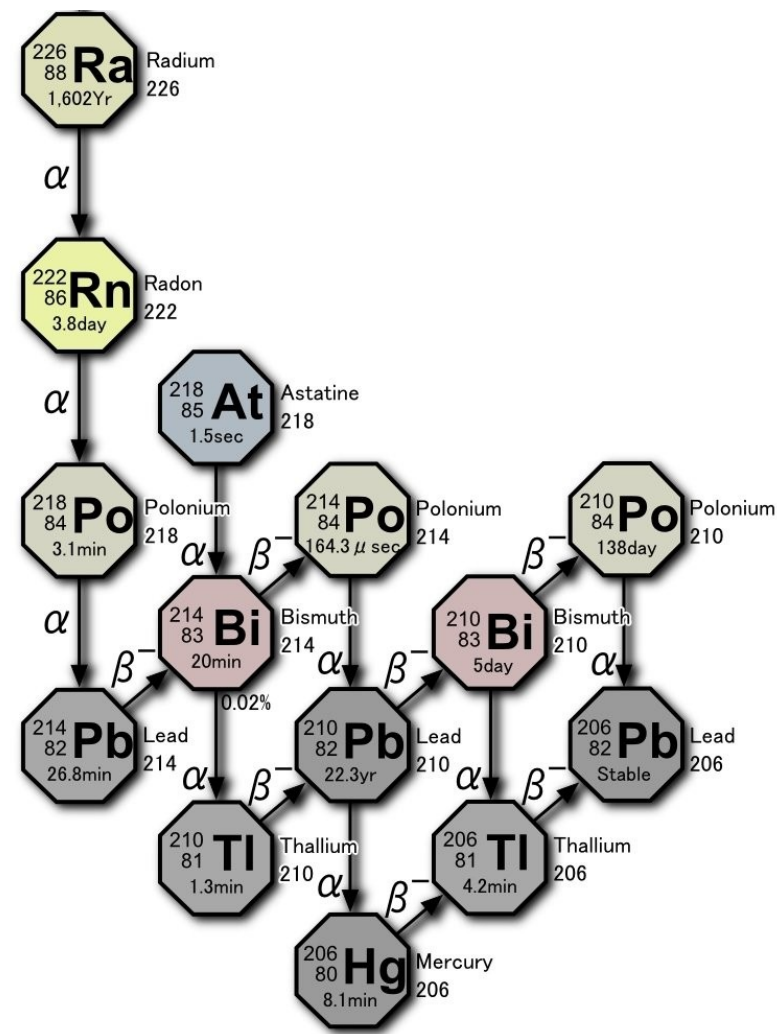
$$A = N\lambda = \frac{m}{M_m} N_A \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

↑ ↑
molární hmotnost Avogadrova konstanta
 $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Aktivita

počet rozpadů za jednotku času

- Curie (Ci) = 3.7×10^{10} rozp. \cdot s $^{-1}$
- 1 Ci \approx aktivita 1g ^{226}Ra (α , $T_{1/2} = 1600$ let)
- 1 Becquerel (Bq) = 1 rozp. s $^{-1}$ = 2.7×10^{-11} Ci = 27 pCi
- 1 MBq = 27 μ Ci



Aktivita

počet rozpadů za jednotku času

- Curie (Ci) = 3.7×10^{10} rozp.s⁻¹
- 1 Ci \approx aktivita 1g ²²⁶Ra (α , $T_{1/2} = 1600$ let)
- 1 Becquerel (Bq) = 1 rozp. s⁻¹ = 2.7×10^{-11} Ci = 27 pCi
- 1 MBq = 27 μ Ci

• příklad: aktivita člověka

- koncentrace draslíku v lidské těle je ≈ 0.2 wt.%

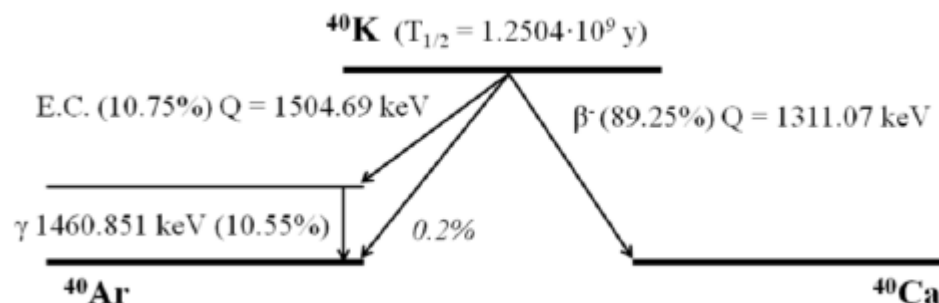
- izotopy draslíku: ³⁹K 93.258%, ⁴⁰K 0.0117%, ⁴¹K 6.730%

- v lidském těle (80 kg) je $0.002 \times 80 = 160$ g draslíku

- z toho je $0.00017 \times 160 = 19$ mg ⁴⁰K, tj. látkové množství $n = m/M_m = 0.019 / 39.964 = 4.75 \times 10^{-4}$ mol

- toto množství ⁴⁰K má aktivitu

$$A = nN_A \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 4.75 \times 10^{-4} \times 6.022 \times 10^{23} \times \frac{\ln 2}{1.2504 \times 10^9 \times 365 \times 24 \times 3600} = 5.03 \text{ kBq}$$



Dávka

množství radiace absorbované objektem

- **dávka** D , absorbovaná energie na jednotku hmotnosti, jednotka: Gray (Gy) = 1 J / kg
- energie absorbovaná jednotkou hmotnosti

velikost poškození biologické tkáně způsobeného radiací absorbovanou objektem

- **ekvivalentní dávka** $H = D \times Q$, jednotka: 1 Sievert (Sv) = 1 Gy \times Q
- Q = quality factor \rightarrow míra nebezpečnosti daného typu záření $Q \sim \frac{dE}{dx}$

	γ	β	p	α	rychlé n	termalizované n
Q	1	1	10	20	20	3

- the International Commission on Radiological Protection (ICRP) 2007

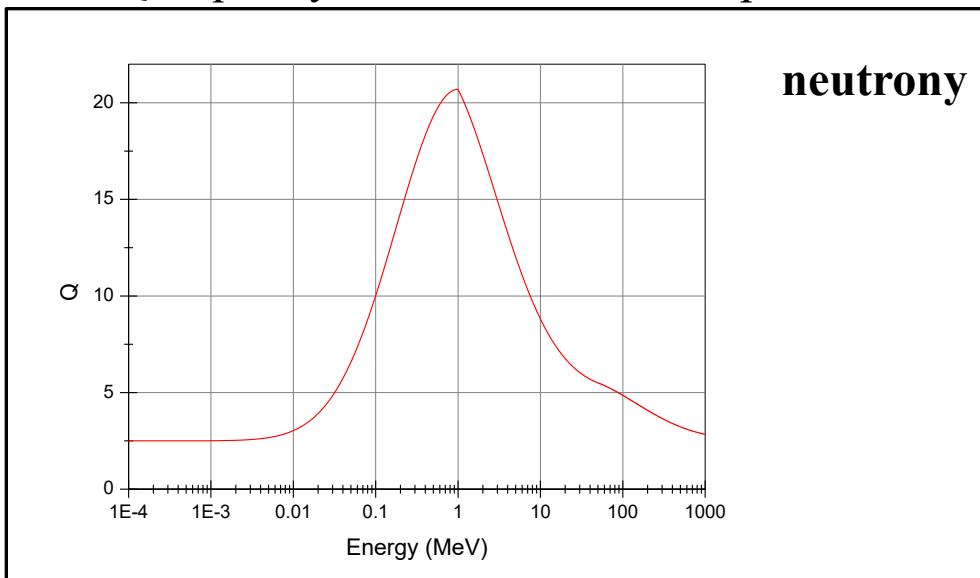
Dávka

množství radiace absorbované objektem

- **dávka D** , absorbovaná energie na jednotku hmotnosti, jednotka: Gray (Gy) = 1 J / kg
- energie absorbovaná jednotkou hmotnosti

velikost poškození biologické tkáně způsobeného radiací absorbovanou objektem

- **ekvivalentní dávka $H = D \times Q$** , jednotka: 1 Sievert (Sv) = 1 Gy \times Q
- Q = quality factor \rightarrow míra nebezpečnosti daného typu záření $Q \sim \frac{dE}{dx}$



rychlé n	termalizované n
20	3

Dávka

člověk - limity na ozáření

- přípustná dávka 1 mSv/rok
- radiační pracovníci: max. 50 mSv/rok
doporučeno < 20 mSv/rok
- vážné poškození organismu: 4-5 Sv (LD50/30 - 50% pravděpodobnost úmrtí do 30 dní)
- smrtelná dávka: 7 Sv

jednorázové ozáření	<i>H</i> (mSv)
banán	0.0001
rtg. skener na letiši	0.00025
rtg. zubů	0.005-0.01
Mammogram	0.4-0.6
CT skan celého těla	10-30
Půl roku pobytu na ISS	80
Fukushima – max. dávka absorbovaná pracovníkem	670

opakované ozařování	<i>H</i> (mSv / rok)
kosmické záření	2.8
přirozené pozadí	2.4
radioizotopy v těle	2.8
přirozené pozadí na palubě letadla	24
přirozené pozadí Ramsar, Irán	260
přirozené pozadí pláž Monazite, Guarapari, Brazílie	800
Fukushima – primární okruh reaktoru roztavený v roce 2017	5×10^9

Dávka

člověk - limity na ozáření

- přípustná dávka 1 mSv/rok
- radiační pracovníci: max. 50 mSv/rok
doporučeno < 20 mSv/rok
- vážné poškození organismu: 4-5 Sv (LD50/30 - 50% pravděpodobnost úmrtí do 30 dní)
- smrtelná dávka: 7 Sv



opakované ozařování	H (mSv / rok)
kosmické záření	2.8
přirozené pozadí	2.4
radioizotopy v těle	2.8
přirozené pozadí na palubě letadla	24
přirozené pozadí Ramsar, Irán	260
přirozené pozadí pláž Monazite, Guarapari, Brazílie	800
Fukushima – primární okruh reaktoru roztavený v roce 2017	5×10^9

Dávka

člověk - limity na ozáření

- přípustná dávka 1 mSv/rok
- radiační pracovníci: max. 50 mSv/rok
doporučeno < 20 mSv/rok
- vážné poškození organismu: 4-5 Sv (LD50/30 - 50% pravděpodobnost úmrtí do 30 dní)
- smrtelná dávka: 7 Sv



pláž Guarapari 800 mSv/rok

opakované ozařování	H (mSv / rok)
kosmické záření	2.8
přirozené pozadí	2.4
radioizotopy v těle	2.8
přirozené pozadí na palubě letadla	24
přirozené pozadí Ramsar, Irán	260
přirozené pozadí pláž Monazite, Guarapari, Brazílie	800
Fukushima – primární okruh reaktoru roztavený v roce 2017	5×10^9

Dávka

člověk - limity na ozáření

- přípustná dávka 1 mSv/rok
- radiační pracovníci: max. 50 mSv/rok
doporučeno < 20 mSv/rok
- vážné poškození organismu: 4-5 Sv (LD50/30 - 50% pravděpodobnost úmrtí do 30 dní)
- smrtelná dávka: 7 Sv

jednorázové ozáření	<i>H</i> (mSv)
banán	0.0001
rtg. skener na letiši	0.00025
rtg. zubů	0.005-0.01
Mammogram	0.4-0.6
CT skan celého těla	10-30
Půl roku pobytu na ISS	80
Fukushima – max. dávka absorbovaná pracovníkem	670

opakované ozařování	<i>H</i> (mSv / rok)
kosmické záření	2.8
přirozené pozadí	2.4
radioizotopy v těle	2.8
přirozené pozadí na palubě letadla	24
přirozené pozadí Ramsar, Irán	260
přirozené pozadí pláž Monazite, Guarapari, Brazílie	800
Fukushima – primární okruh reaktoru roztavený v roce 2017	5×10^9

Dávka

standardní pozitronový zářič

- $A = 1 \text{ MBq}$
- energie na rozpad $E = 205 + 2 \times 511 + 1274 \text{ KeV} = 2501 \text{ keV} = 4 \times 10^{-13} \text{ J}$
- absorbovaná energie na rozpad na kg $5 \times 10^{-15} \text{ J kg}^{-1}$ (člověk 80 kg)
- max. dávka absorbovaná za rok $H = 5 \times 10^{-15} \times 10^6 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 = 0.16 \text{ Gy} = 160 \text{ mSv}$

jednorázové ozáření	H (mSv)
banán	0.0001
rtg. skener na letiši	0.00025
rtg. zubů	0.005-0.01
Mammogram	0.4-0.6
CT skan celého těla	10-30
Půl roku pobytu na ISS	80
Fukushima – max. dávka absorbovaná pracovníkem	670

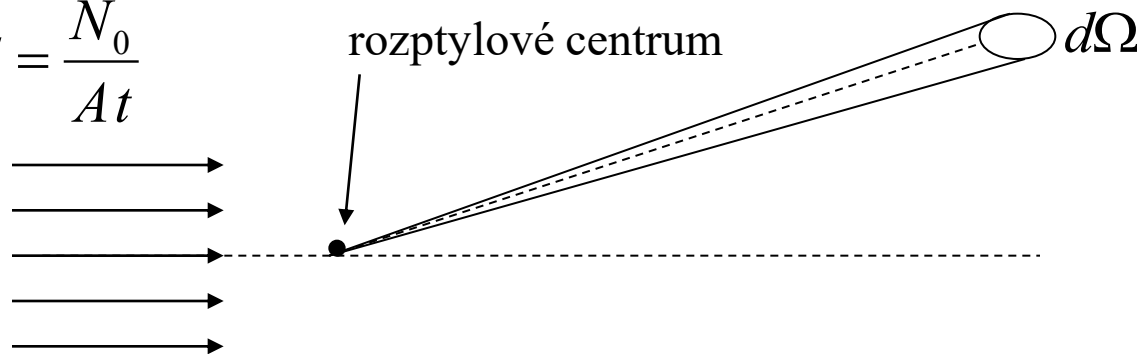
opakované ozařování	H (mSv / rok)
kosmické záření	2.8
přirozené pozadí	2.4
radioizotopy v těle	2.8
přirozené pozadí na palubě letadla	24
přirozené pozadí Ramsar, Irán	260
přirozené pozadí pláž Monazite, Guarapari, Brazílie	800
Fukushima – primární okruh reaktoru roztavený v roce 2017	5×10^9

Účinný průřez

tok = počet částic dopadajících
na jednotku plochy za jednotku času

dN_S počet částic detekovaných
za jednotku času

$$F = \frac{N_0}{At}$$



$$dN_S = F \frac{d\sigma(E, \Omega)}{d\Omega} d\Omega$$

diferenciální účinný průřez

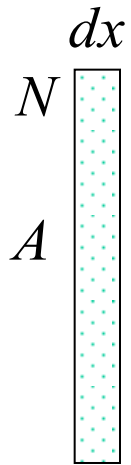
$$\frac{d\sigma(E, \Omega)}{d\Omega} = \frac{1}{F} \frac{dN_S}{d\Omega} \quad [\text{m}^2 \text{srad}^{-1}]$$

celkový účinný průřez

$$\sigma(E) = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad [\text{m}^2]$$

$$[1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2]$$

Střední volná dráha



N - počet atomů na jednotku plochy

A - plocha terčíku

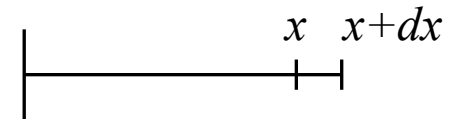
$$dN_s = F A N \frac{d\sigma(E, \Omega)}{d\Omega} dx$$

$$N_{tot} = F A N \sigma(E) dx$$

Pravděpodobnost interakce *jedné* částice v terčíku o tloušťce dx : $N \sigma dx$

$P(x)$ - pravděpodobnost, že částice urazí dráhu x **bez jakékoliv interakce**

$w dx$ - pravděpodobnost, že částice **bude interagovat na úseku** $x, x + dx$



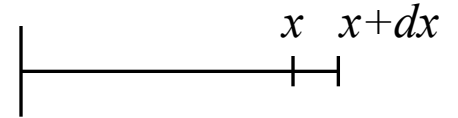
$$P(x + dx) = P(x)(1 - w dx) \longrightarrow \frac{dP}{dx} = -wP \longrightarrow P(x) = e^{-wx}$$

$$\frac{P(x + dx) - P(x)}{dx} = -wP(x)$$

Střední volná dráha

- pravděpodobnost, že částice urazí dráhu x a pak bude interagovat na úseku $x, x + dx$:

$$F(x) dx = e^{-wx} w dx$$



- průměrná dráha, kterou částice urazí než dojde k interakci:

$$\lambda \equiv \int_0^{\infty} x F(x) dx = \int_0^{\infty} x w e^{-wx} dx = \frac{1}{w}$$

- pravděpodobnost, že částice interaguje při průletu terčíkem o tloušťce dx :

$$P_{\text{int}} = 1 - P(dx) = 1 - e^{-w dx} = 1 - e^{-\frac{1}{\lambda} dx} = 1 - \left(1 - \frac{dx}{\lambda} + K \right) \approx \frac{dx}{\lambda}$$

$$P_{\text{int}} = N \sigma dx$$



$$\text{střední volná dráha} \quad \lambda = \frac{1}{N \sigma}$$

Interakce γ -záření látkou

1. fotoelektrický jev (fotoefekt)

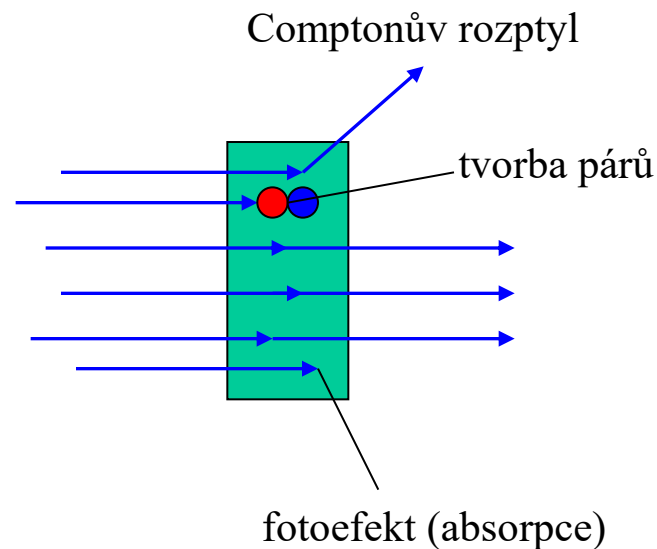
2. Comptonův rozptyl

3. tvorba párů

4. jaderné reakce např. (γ , n)

základní odlišnosti od nabitých částic:

- podstatně větší pronikavost (menší σ)
- při průchodu svazku fotonů terčíkem dochází k zeslabení intenzity, ale ne ke změně energie
- zeslabení intenzity po průchodu terčíkem o tloušťce x : $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$
- μ – absorpční koeficient

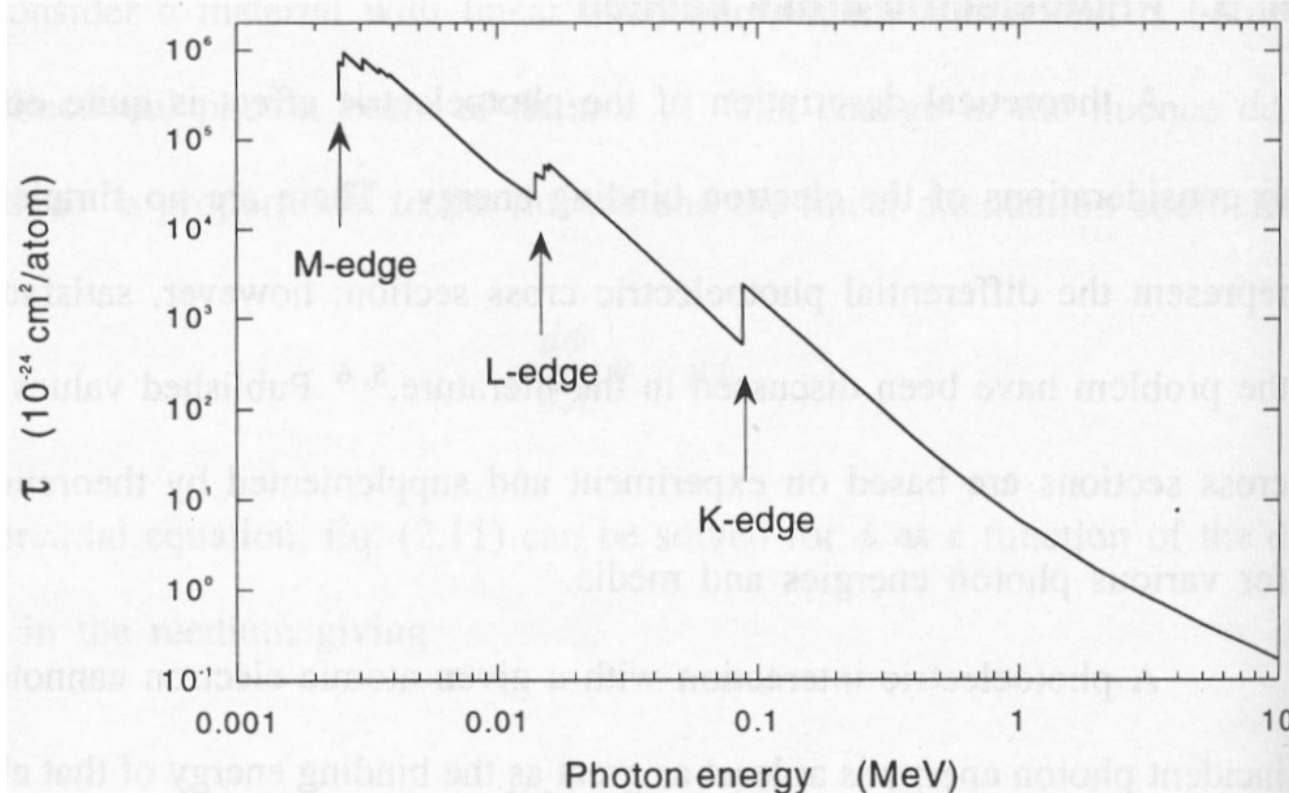
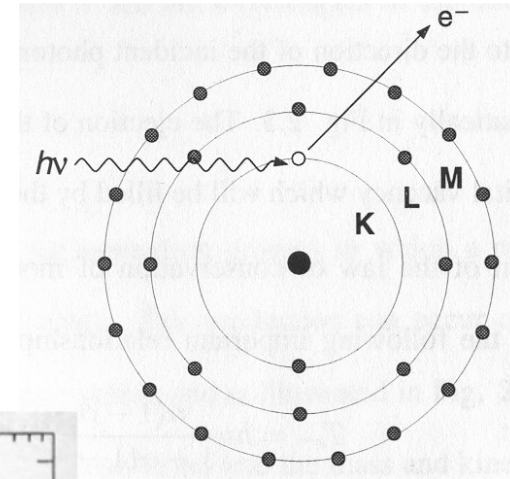


Fotoefekt

energie vyraženého elektronu: $E = h\nu - E_B$

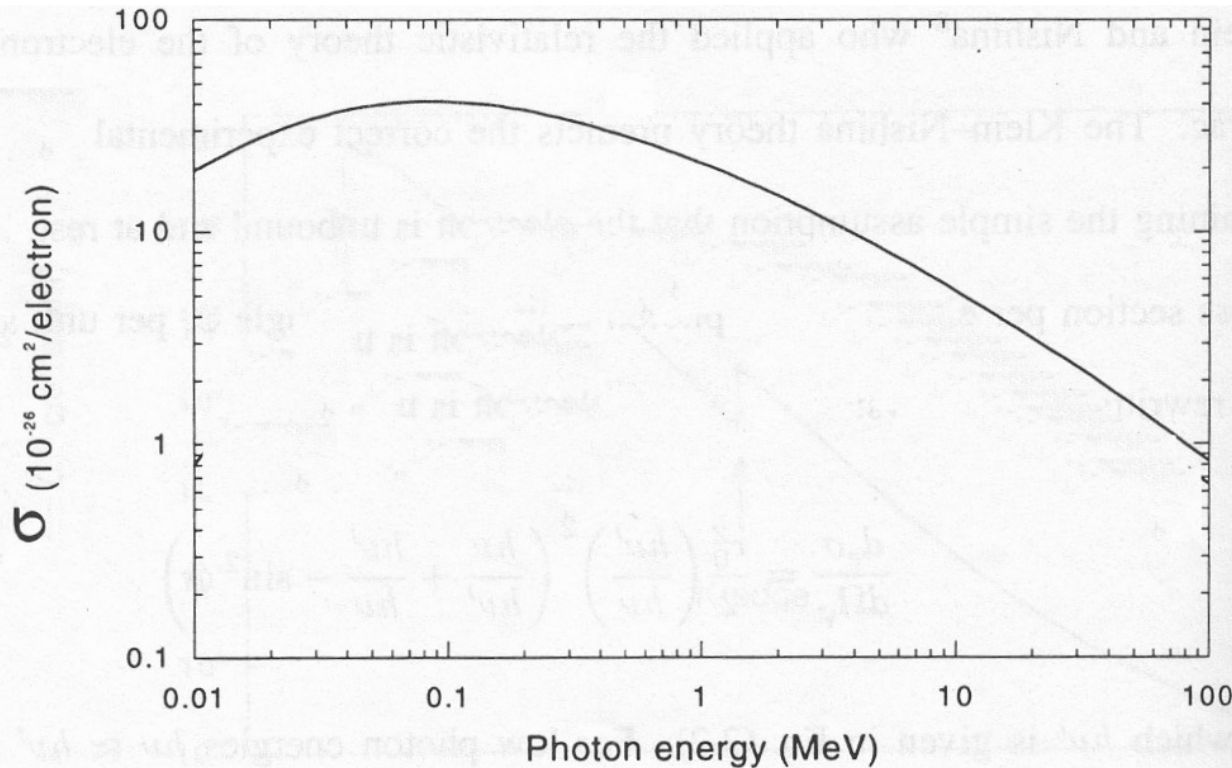
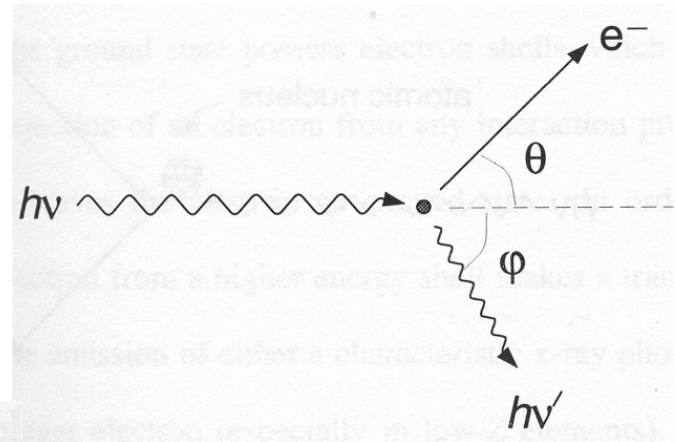
$h\nu$ - energie absorbovaného fotonu

E_B - vazebná energia elektronu



Comptonův rozptyl

energie rozptýleného fotonu:
$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \varphi)}$$



maximální energie elektronu:
($\varphi = 180^\circ$)

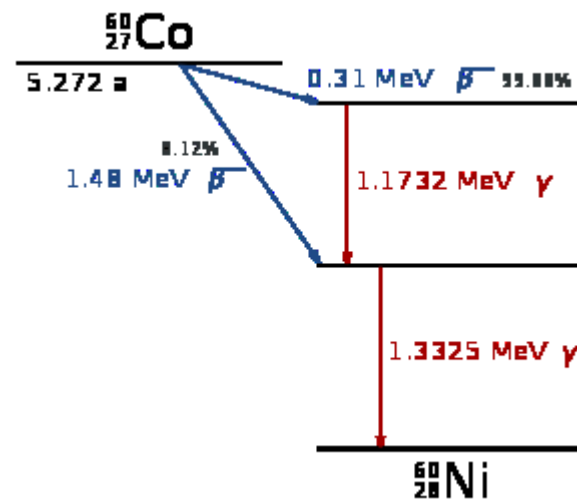
$$T = h\nu \frac{2\gamma}{1 + 2\gamma} \quad \text{Comptonova hrana}$$

$$\gamma = \frac{h\nu}{m_e c^2}$$

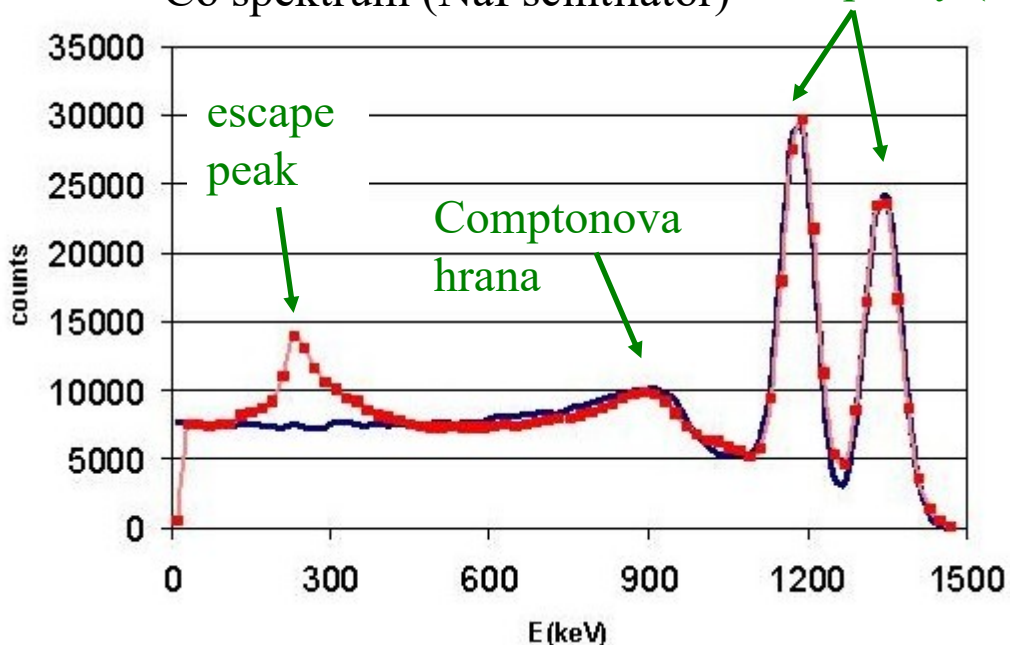
Comptonův rozptyl

energie rozptýleného fotonu:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \varphi)}$$



^{60}Co spektrum (NaI scintilátor) fotopeaky (1173, 1333 keV)

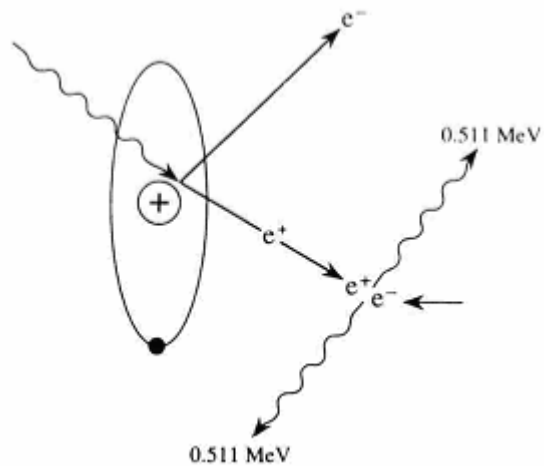


maximální energie elektronu:
($\varphi = 180^\circ$)

$$T = h\nu \frac{2\gamma}{1 + 2\gamma} \quad \text{Comptonova hrana}$$

$$\gamma = \frac{h\nu}{m_e c^2}$$

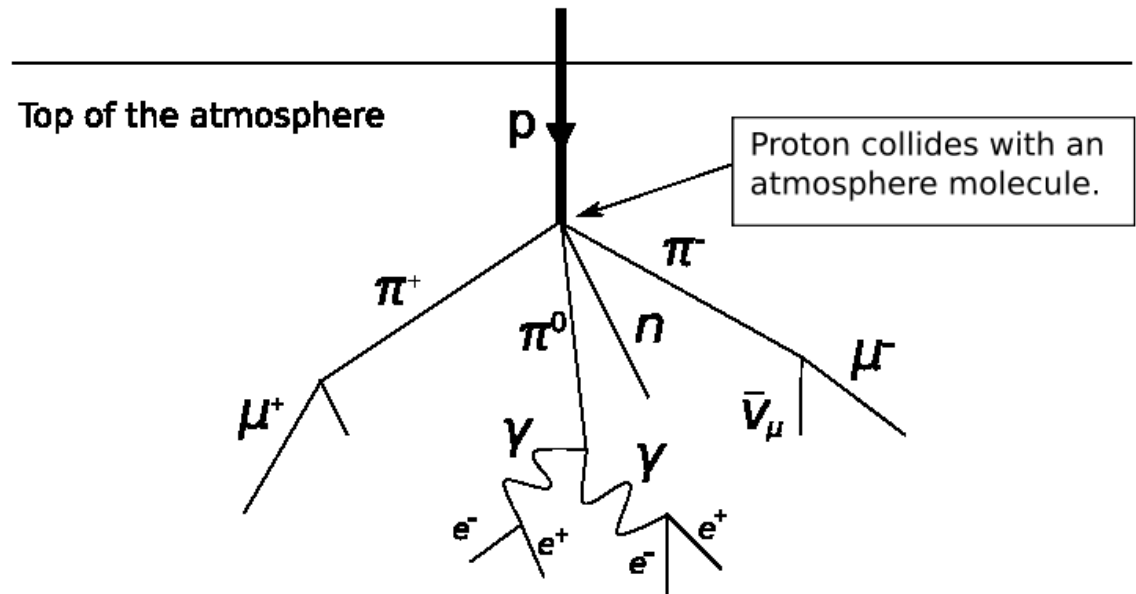
Tvorba párů



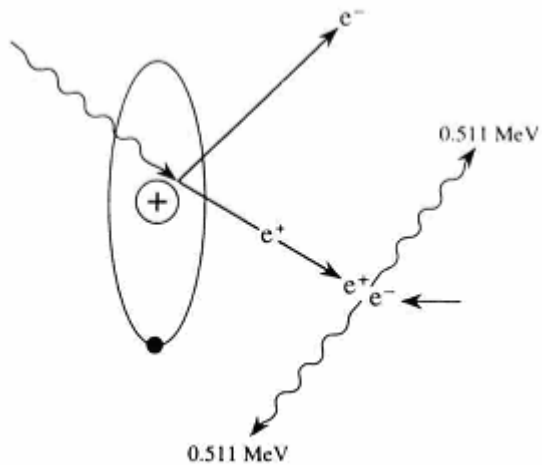
$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

$$E_\gamma > 2m_e c^2 = 2 \times 511 \text{ keV} = 1022 \text{ keV}$$

- nutná přítomnost další částice



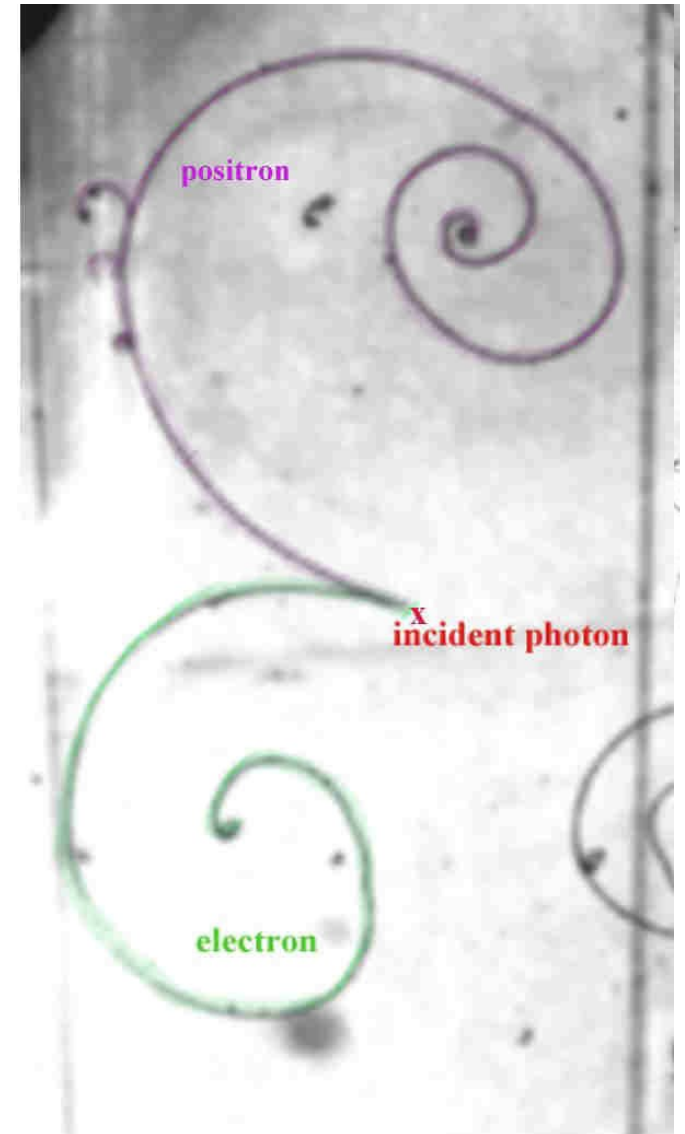
Tvorba párů



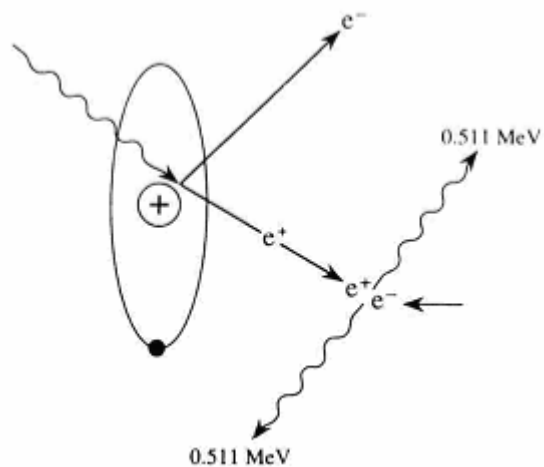
$$\gamma \rightarrow e^- + e^+$$

$$E_\gamma > 2m_e c^2 = 2 \times 511 \text{ keV} = 1022 \text{ keV}$$

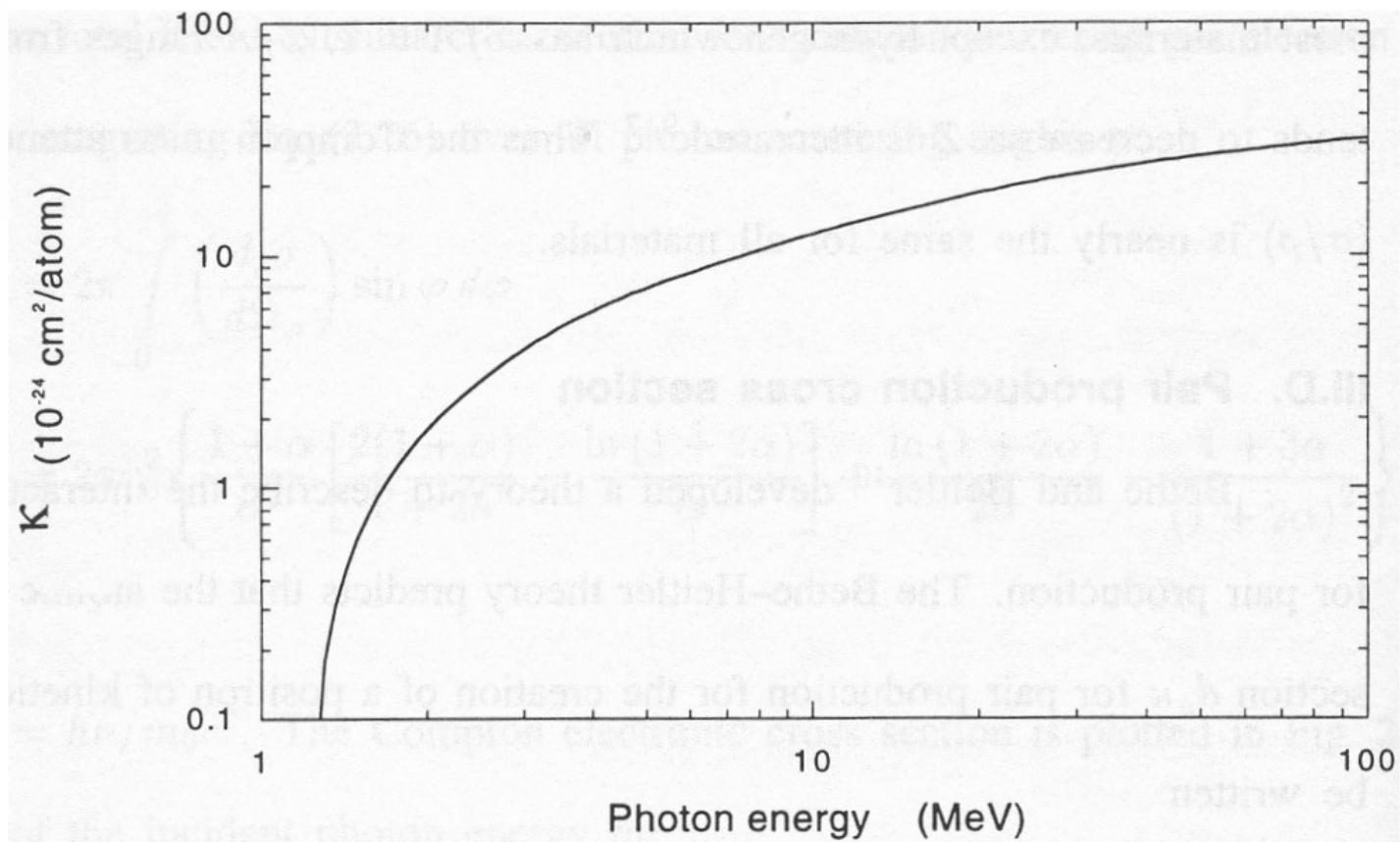
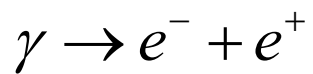
- nutná přítomnost další částice



Tvorba párů



- účinný průřez $\sigma \propto Z^2$



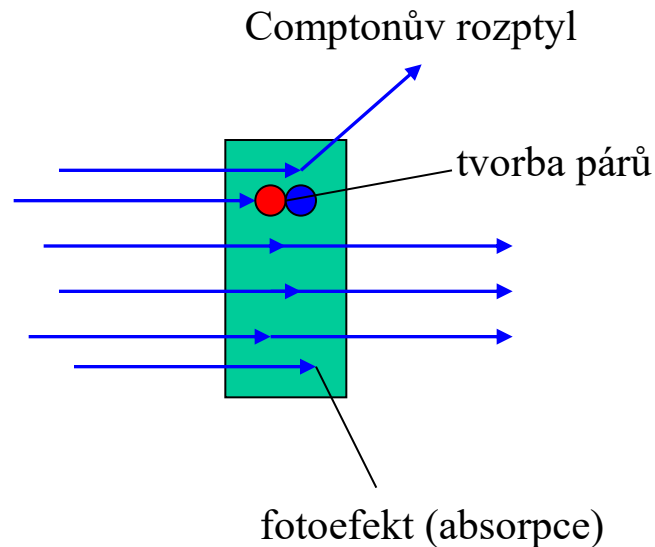
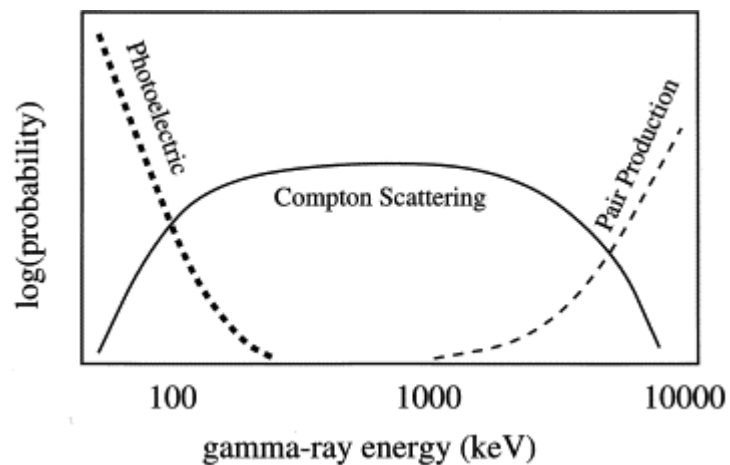
Interakce γ -záření látkou

1. fotoelektrický jev (fotoefekt)

2. Comptonův rozptyl

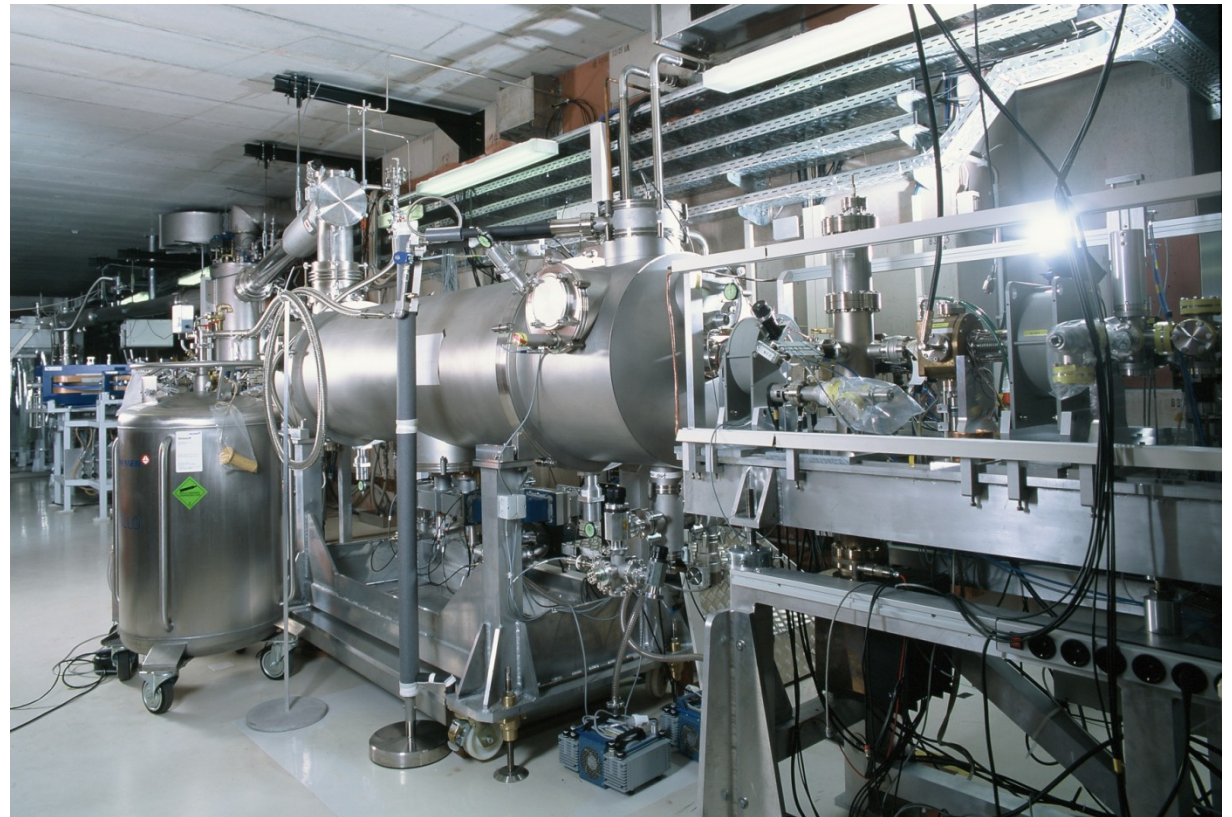
3. tvorba párů

4. jaderné reakce např. (γ , n)



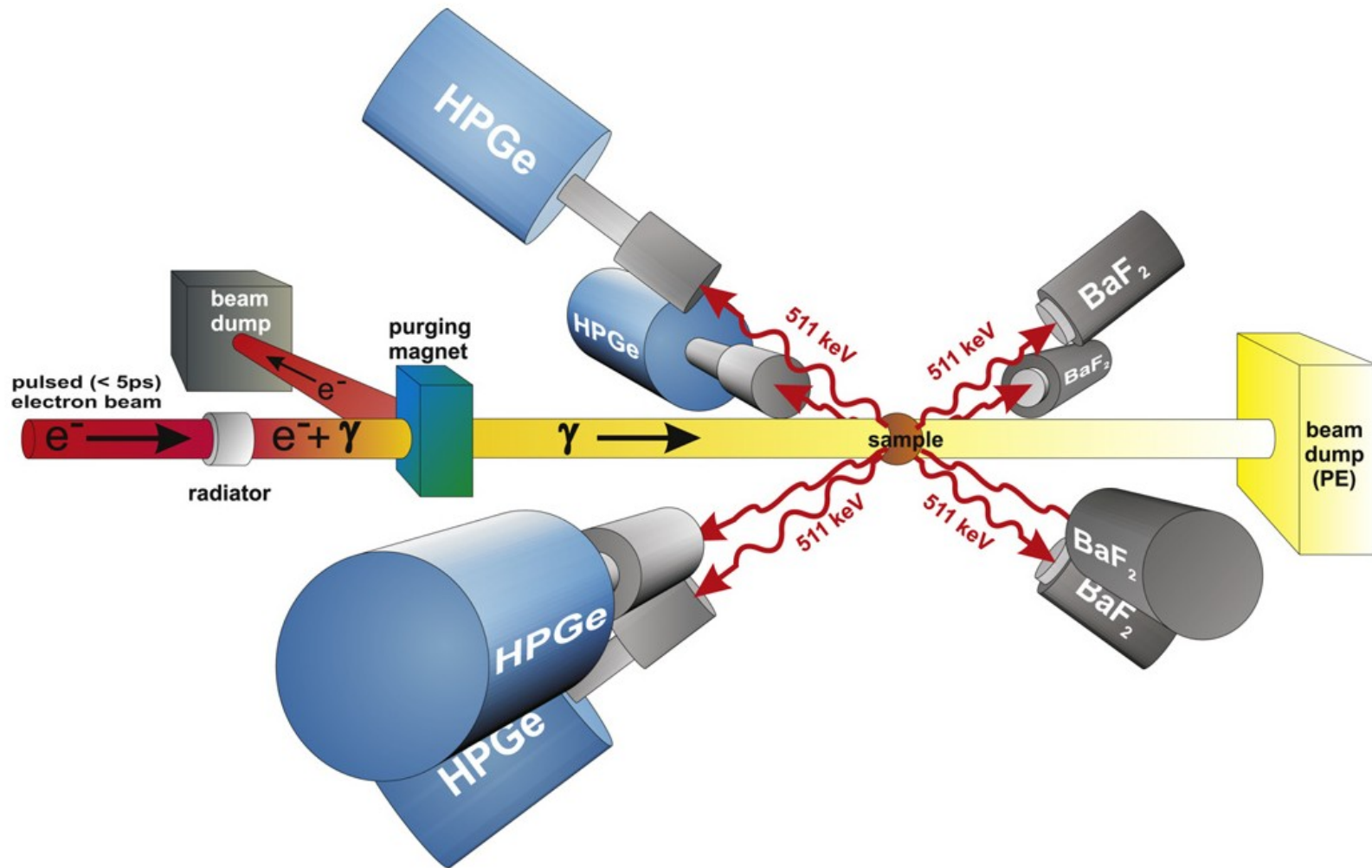
Tvorba párů – GIPS

- GIPS = Gamma Induced Positron annihilation Spectroscopy
- ELBE LINAC, Helmholtz Zentrum Dresden-Rossendorf
- e^- : $T = 16$ MeV, frekvence $f = 26$ MHz (vzdálenost mezi pulsy 38.5 ns), délka pulsu 5 ps



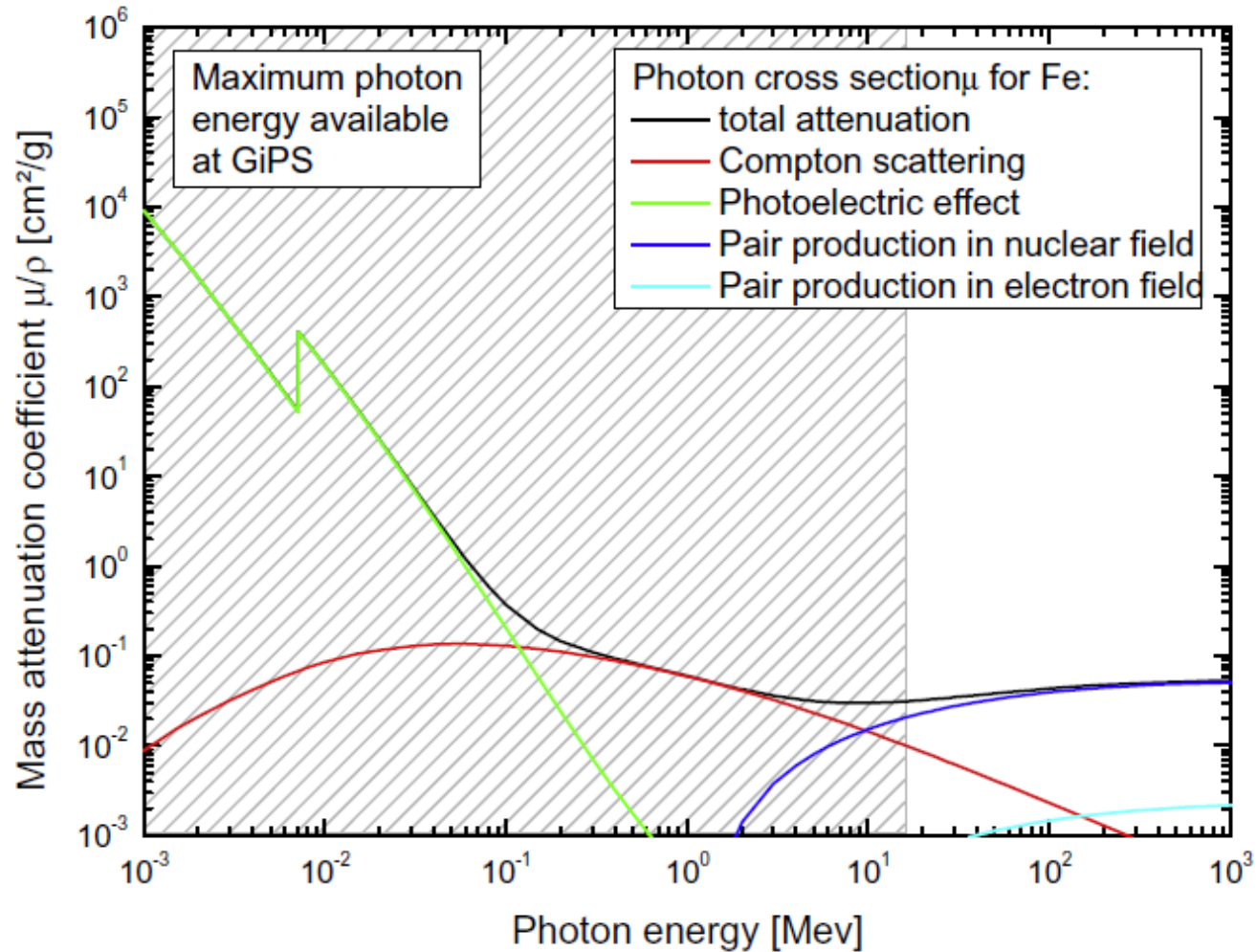
Tvorba páru – GIPS

- GIPS = Gamma Induced Positron annihilation Spectroscopy



Tvorba páru – GIPS

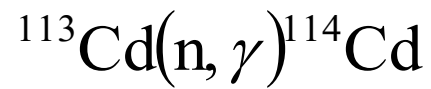
- GIPS = Gamma Induced Positron annihilation Spectroscopy



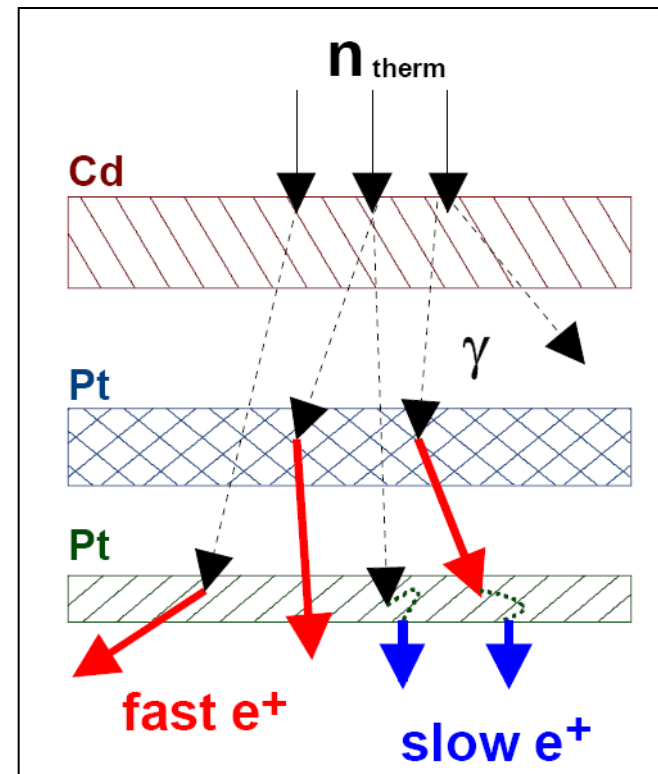
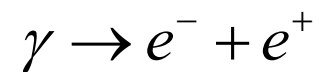
Tvorba párů – NEPOMUC FRM II Munich



- výroba e^+ pomocí pomalých neutronů z reaktoru



$$E_\gamma = 9.04 \text{ MeV}$$



Tvorba párů – NEPOMUC FRM II Munich

