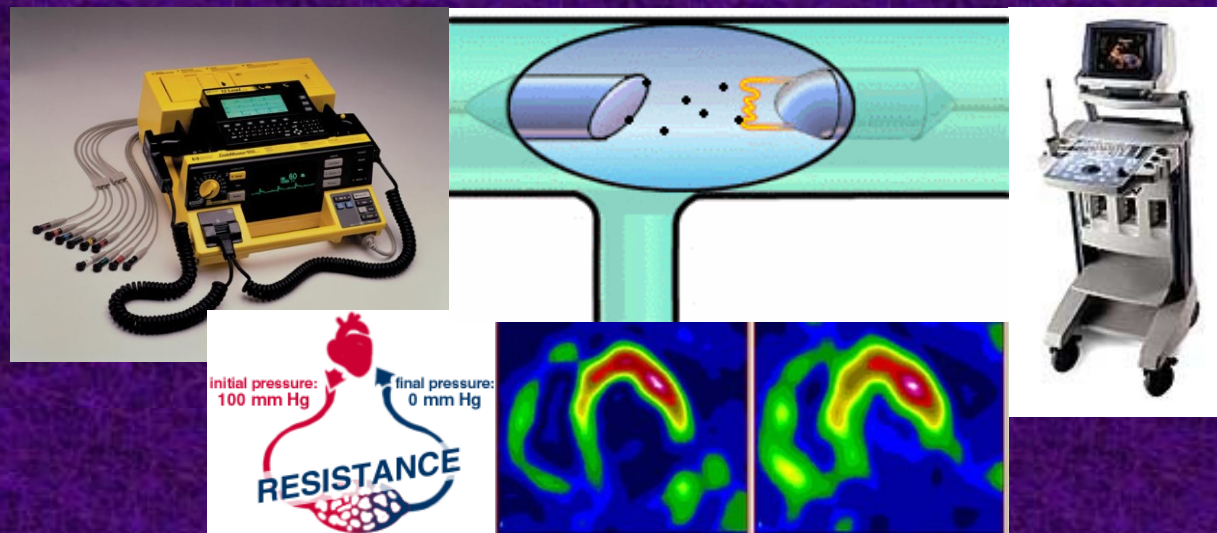


Přednášky z bioenergetiky

Masarykova univerzita v Brně – Biofyzikální
ústav



Úvod

Energie, práce a výkon

Energie a práce:

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg} = 0,239 \text{ cal} = 1 \text{ W}\cdot\text{s}$$

$$1 \text{ kW}\cdot\text{h} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

$$1 \text{ cal} = 4,19 \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Výkon:

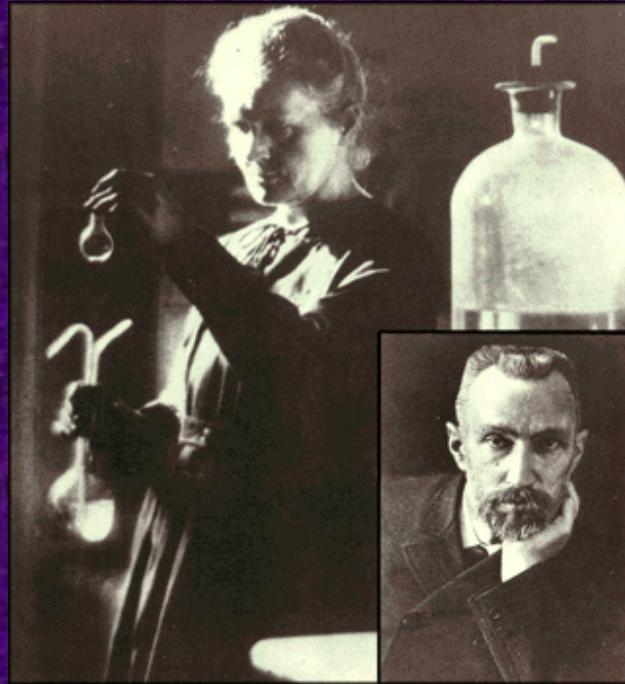
$$(\text{práce za čas}) 1 \text{ W} = 1 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$1 \text{ ks} = 746 \text{ W}$$

Jak se učit?

- Hrazdira, Mornstein: Lékařská biofyzika a přístrojová technika, Neptun, Brno, 2001
- Problém studia lékařské fyziky (biofyziky) není v množství látky, kterou je nutno zvládnout, ale v nutnosti pochopení fyzikálních principů a jejich aplikace. Paměťové učení zpravidla **nedostačuje** pro úspěch u zkoušky.
- Problémům je nutno **rozumět**, jinak je nelze vyřešit.





•http://www.accessexcellence.org/AE/AEC/CC/historical_background.html

Struktura hmoty a ionizující záření

Látka a pole

- Základní stavební elementy organického a anorganického světa jsou **identické**.
- Živá hmota se liší od neživé pouze svou **vysokou organizovaností**.
- Látka a pole jsou dvě formy hmoty, které se mohou **vzájemně přeměňovat** (např. „anihilace“, tvorba elektron-pozitronových párů)

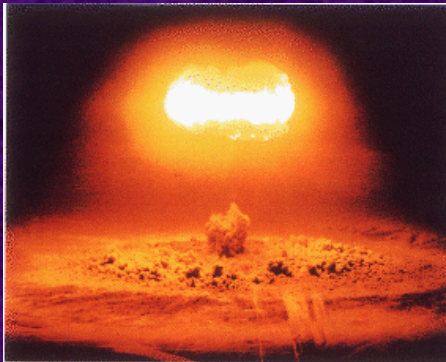
Čtyři základní fyzikální interakce



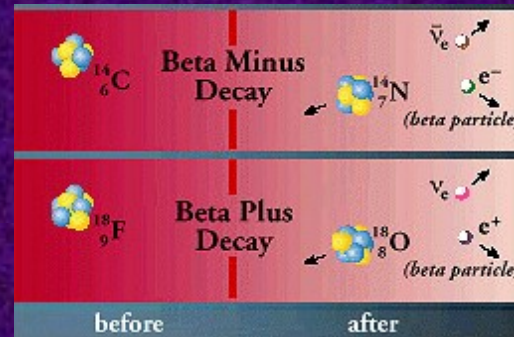
•gravitační



•elektromagnetická



•silná



•slabá

Silná : slabá :elektromagnetická : gravitační = $10^{40} : 10^{15} : 10^3 : 1$

(při interakční vzdálenosti 10^{-15} m, tj. přibližně rozměru atomového jádra)

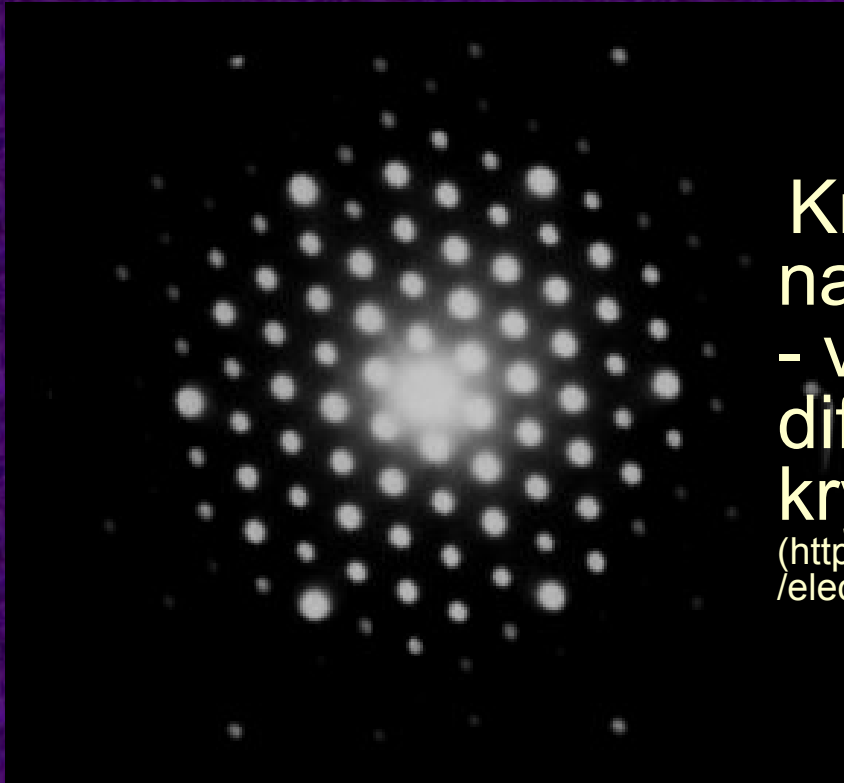
Kvantové a vlnové vlastnosti částic

- Energie fotonů: $E = h \cdot f = h \cdot c / \lambda$
 h je Planckova konstanta ($6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s),
 f frekvence,
 c rychlost světla ve vakuu a
 λ vlnová délka
- Foton má hybnost!
- Pro částice s klidovou hmotností odvodil de Broglie vlnovou délku tzv. hmotnostních vln:

$$\lambda = h/p, \quad \text{kde } p = m \cdot v \text{ (hybnost)}$$

Dualismus částice-vlna

difrakce elektronů



Krystalogram - obraz
na fotografické desce
- vzniká v důsledku
difrakce elektronů na
krystalové mřížce.

(http://www.matter.org.uk/diffraction/electron/electron_diffraction.htm)

Důsledek dualismu částice-vlna: Heisenbergovy relace (vztahy) neurčitosti

$$\begin{aligned}\delta r \cdot \delta p &\geq h/2\pi \\ \delta E \cdot \delta t &\geq h/2\pi\end{aligned}$$

Polohu r a hybnost p částice **nelze** současně změřit s libovolnou přesností (bude-li se neurčitost polohy částice – δr – blížit k nule, pak neurčitost hybnosti částice – δp – poroste nad všechny meze). Totéž platí pro současné měření velikosti změny energie částice E a času t k této změně potřebnému.

Význam vlnové funkce

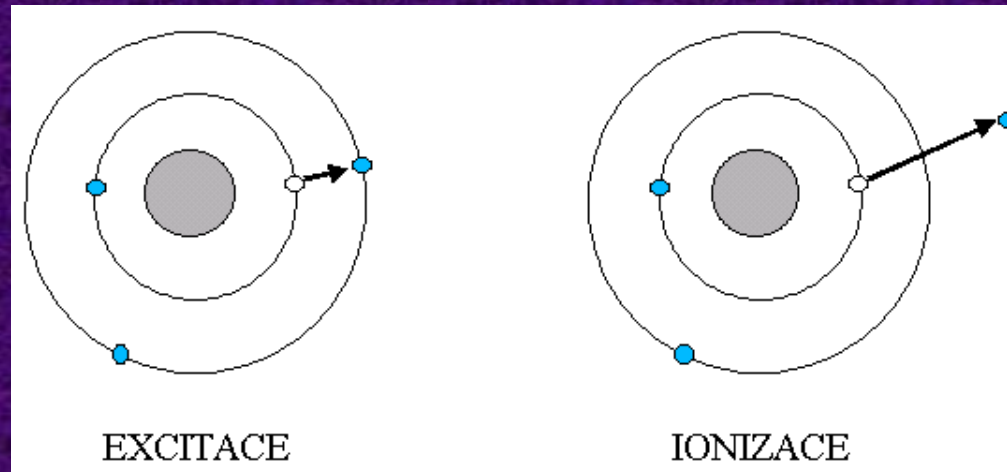
- Absolutní hodnota druhé mocniny vlnové funkce $|\Psi^2|$ má význam **hustoty pravděpodobnosti výskytu částice** v daném místě prostoru.
- Schrödingerova rovnice však má řešení jen pro některé hodnoty číselných koeficientů určujících možné hodnoty energie a prostorové lokalizace elektronů.
- Tyto číselné koeficienty nazýváme **kvantová čísla**

Kvantová čísla

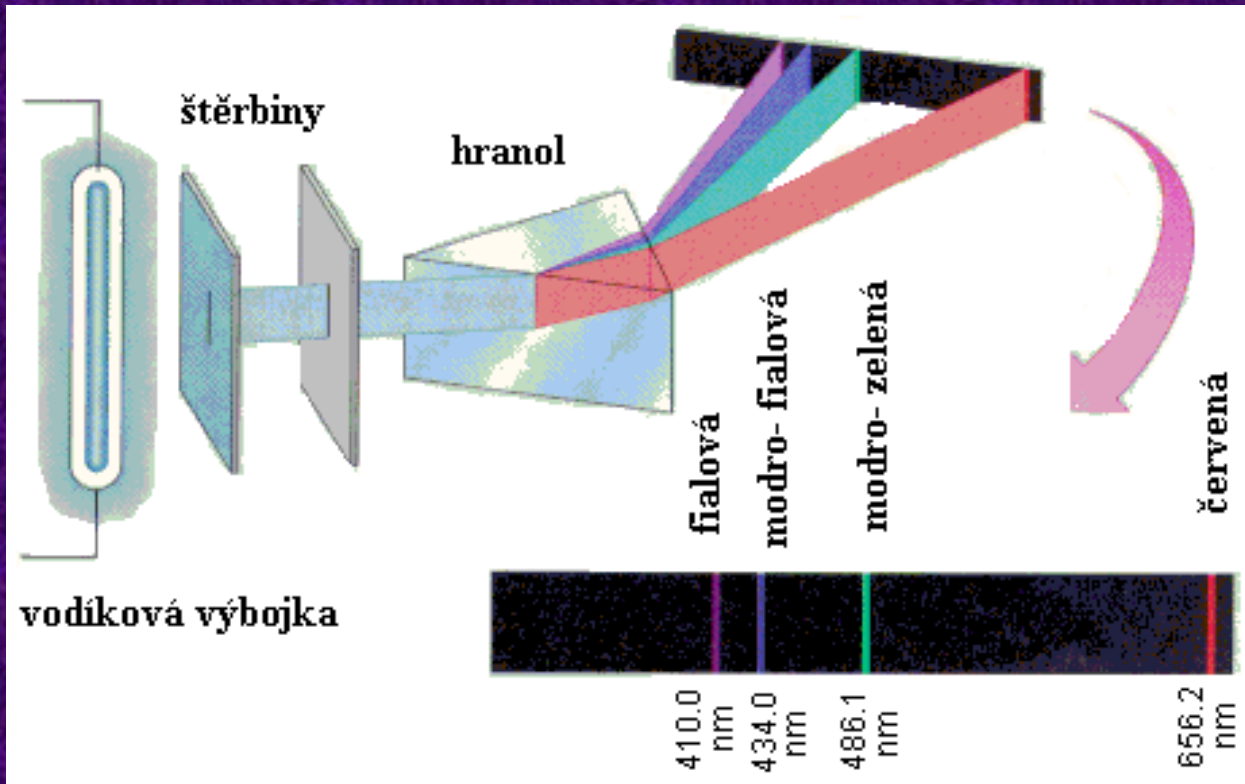
- **Hlavní** $n = 1, 2, 3 \dots$ (K, L, M,)
- **Vedlejší** pro každé n $l = 0, 1, 2, \dots n - 1$ (s, p, d, f ...)
- **Magnetické** pro každé l $m = 0, 1, 2, \dots l$
- **Spinové** pro každé m $s = 1/2$
- **Pauliho princip výlučnosti** – v jednom elektronovém obalu atomu se nemohou vyskytovat dva elektrony popsané stejnými kvantovými čísly

Excitace a ionizace atomů

- Energie vazby (elektronu) E_V – závisí především na hlavním kvantovém čísle



Spektra - emisní



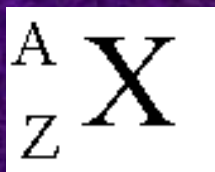
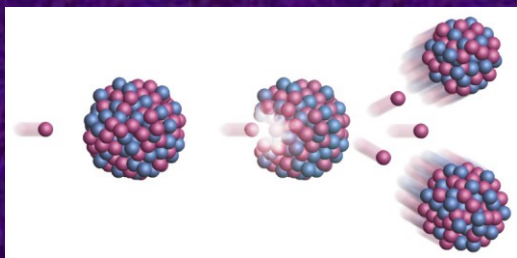
Viditelné
emisní
spektrum
vodíku.

Zpracováno dle:

<http://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch6/bohr.html>

Přechody mezi diskrétními energetickými stavy umožňují vyzařovat fotony pouze s určitými energiemi, tj. záření o určitých vlnových délkách

Jádro atomu



Protonové (atomové) číslo – Z

Nukleonové (hmotnostní) číslo – A

Neutronové číslo – N

$$N = A - Z$$

- Atomová hmotnostní jednotka $u = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg, tj. 1/12 hmotnosti jádra izotopu uhlíku C-12
- Elektrický náboj jádra $Q = Z \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}$ C
- **Nuklid** – látka tvořená atomy, jejichž jádra mají stejné složení a energii
 - **Izotopy** – nuklidy, jejichž jádra mají stejné Z a různé A
 - **Izobary** – nuklidy, jejichž jádra mají různé Z a stejné A
 - **Izomery** – nuklidy, jejich jádra mají stejné Z a stejné A , avšak různé energie
 - **Radionuklidy** – nuklidy schopné radioaktivního rozpadu

Přednášky z lékařské biofyziky

Masarykova univerzita v Brně – Biofyzikální centrum



**Biologické účinky
ionizujícího záření**

Zákon radioaktivního rozpadu (přeměny)

Rychlost radioaktivního rozpadu radionuklidu je úměrná celkovému počtu nerozpadlých jader v daném okamžiku ve vzorku:

$$-\frac{dN}{dt} = N \cdot \lambda$$

• dN je počet jader rozpadlých během času dt , dN/dt je rychlost rozpadu, λ je rozpadová (dezintegrační, přeměnová) konstanta. Znaménko „-“ vyjadřuje, že dochází k úbytku jader. N je skutečný počet jader na počátku časového úseku dt . Rovnici řešíme integrací: N se mění od N_0 do N_t a t se mění od nuly do t :

$$\bullet N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

• **aktivita** – počet rozpadů za 1 s ve vzorku.

• **becquerel (Bq) [s⁻¹]**

• curie (Ci, aktivita 1 g radia): 1 Ci = 3,7.10¹⁰ Bq

Poločas rozpadu

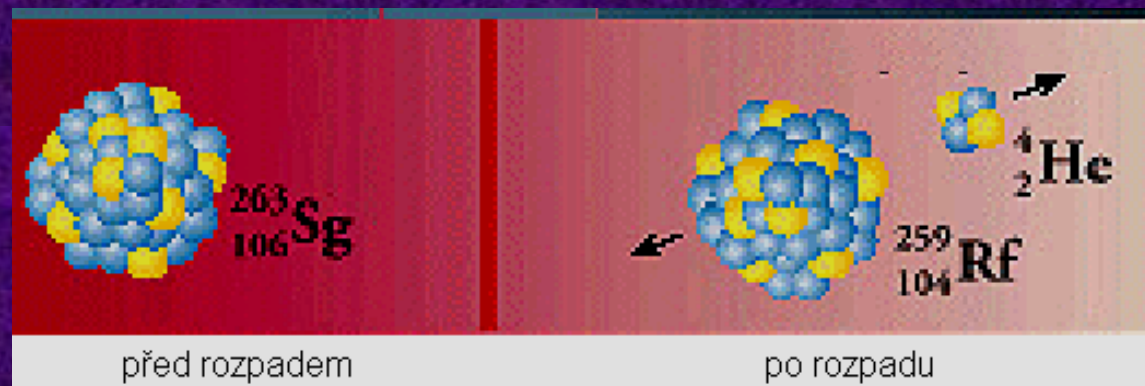
- T_f – fyzikální poločas rozpadu (radioaktivní přeměny) čas potřebný k poklesu radioaktivity vzorku na polovinu výchozí hodnoty:

$$T_f = \ln 2 / \lambda_f \quad \text{tedy} \quad T_f = 0,693 / \lambda_f$$

- T_b – biologický poločas – doba potřebná pro odstranění poloviny nějaké látky z těla
- λ_b – poměrná rychlost vylučování látky (biologická „rozpadová“ konstanta)
- Biologický a fyzikální proces sloučíme:
- T_{ef} – efektivní poločas
- λ_{ef} – efektivní rozpadová konstanta
- Platí: $\lambda_{ef} = \lambda_b + \lambda_f$ a $1/T_{ef} = 1/T_f + 1/T_b$

Druhy radioaktivního rozpadu (přeměny)

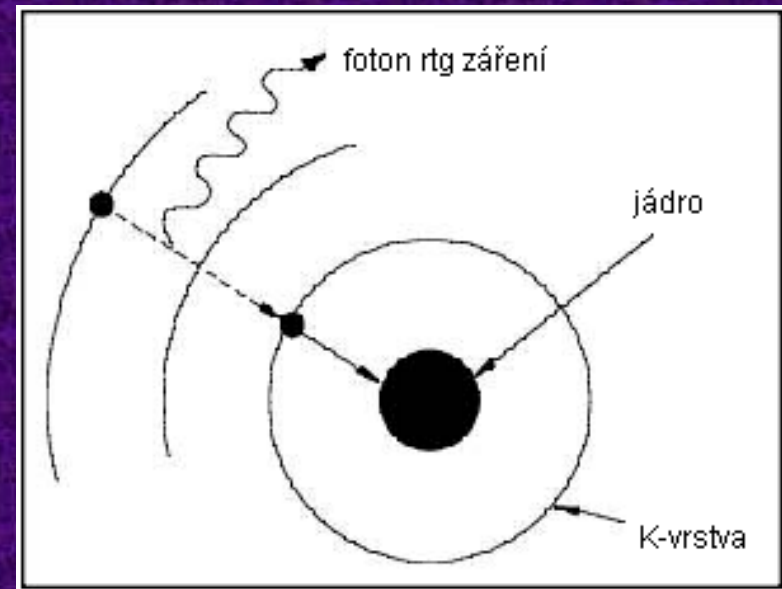
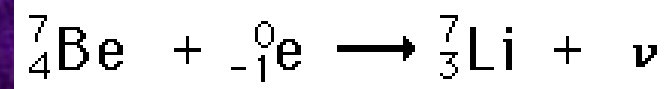
- Rozpad α (alfa)



- Seaborgium se přeměňuje na rutherfordium a uvolňuje se heliové jádro – částice α (<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/theory/nuclearstability.html>)

Druhy radioaktivního rozpadu (přeměny)

B rozpad je izobarická transmutace, při které vznikají vedle β částic i neutrina (elektronové antineutrino $\bar{\nu}_e$ a elektronové neutrino ν_e)

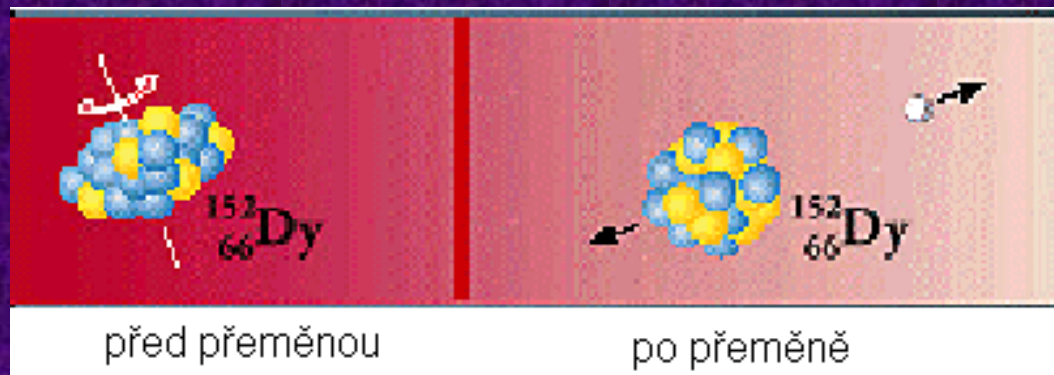


Rozpad β (beta), vyzáření elektronu nebo pozitronu

K - záchyt

Druhy radioaktivního rozpadu (přeměny)

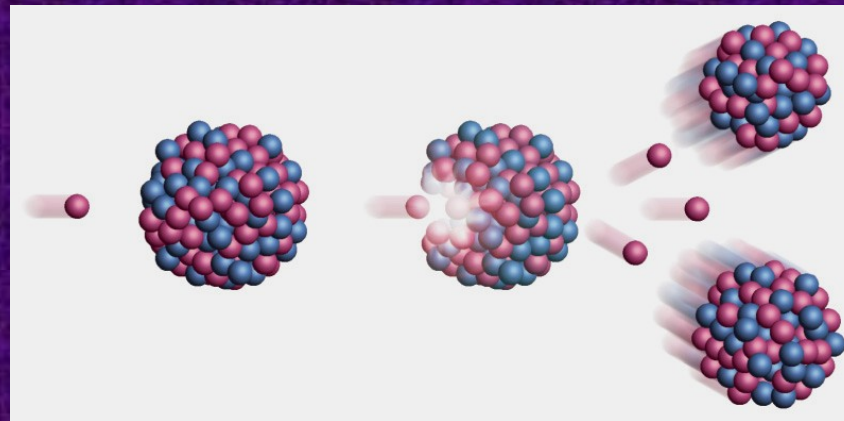
- Rozpad γ (gama)



Přeměna dysprosia v metastabilním stavu

Druhy radioaktivního rozpadu (přeměny)

- Jiné druhy radioaktivního rozpadu:
- Emise protonu, deuteronu, neutronu ...
- Štěpení těžkých jader



Interakce ionizujícího záření s hmotou

- Důsledkem interakce záření s hmotou je zpravidla vznik **sekundárního záření**, které se od primárního liší energií a často i druhem částic.
- Primární i sekundární záření přímo nebo nepřímo **ionizuje** prostředí a vytváří i **volné radikály**.
- Část energie záření se vždy přeměňuje v **teplo**.
- Úbytek energie primárního záření popisujeme pomocí **lineárního přenosu energie** (LET, *linear energy transfer*), který vyjadřuje ztrátu energie částice v daném prostředí na jednotkové délce její dráhy.

Útlum záření

Svazek ionizujícího záření prochází látkou:

absorpce + rozptyl = útlum

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

I je intenzita záření prošlého vrstvou tloušťky x , I_0 je intenzita dopadajícího záření, μ je lineární koeficient útlumu [m^{-1}] závislý na druhu záření, interagující látce i na její hustotě.

Interakce záření rtg a gama - fotoelektrický jev (FJ)

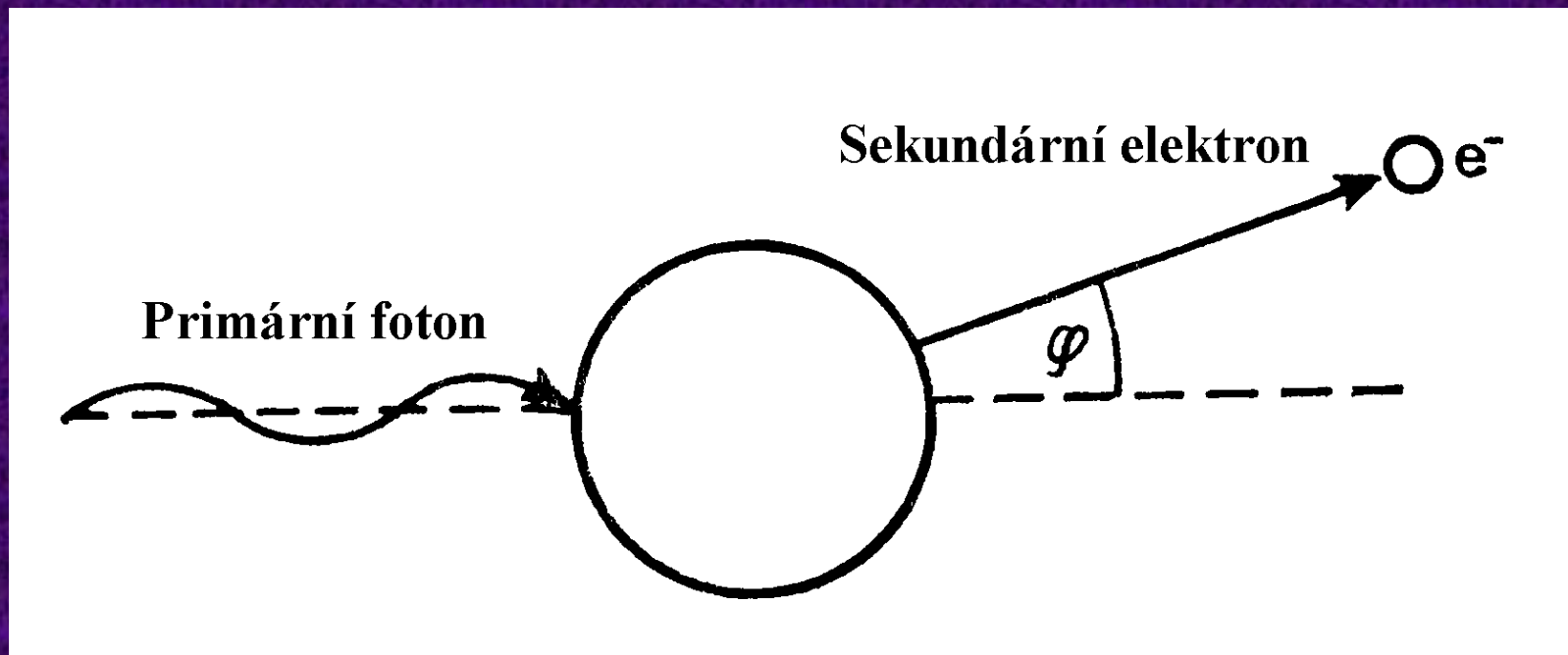
- Foton zaniká a vyráží elektron z některé vrstvy obalu atomu - typicky K. Energie fotonu $h.f$ je nutná pro přeměnu ve **výstupní práci** elektronu (= energii nutnou pro přemístění elektronu z dané vrstvy do „nekonečna“) a v jeho **kinetickou energii** ($1/2m.v^2$). Platí **Einsteinova rovnice pro fotoelektrický jev**:

$$h.f = W + 1/2m.v^2,$$

W je výstupní práce (vazebná energie) elektronu.

- Hmotnostní koeficient útlumu závisí na energii dopadajících fotonů. Uvolněná místa ve vrstvách musí být rychle zaplněna jinými elektrony. Atomu však nadále chybí elektron, je ionizován. Vzniká sekundární **charakteristické rentgenové záření**, interagující s elektronovými obaly jiných atomů - opět dochází k FJ a energie sekundárních fotonů přitom klesá.
- K FJ dochází především při nižších energiích fotonů rtg záření 50 - 500 keV, v závislosti na protonovém čísle atomů prostředí.

Fotoelektrický jev



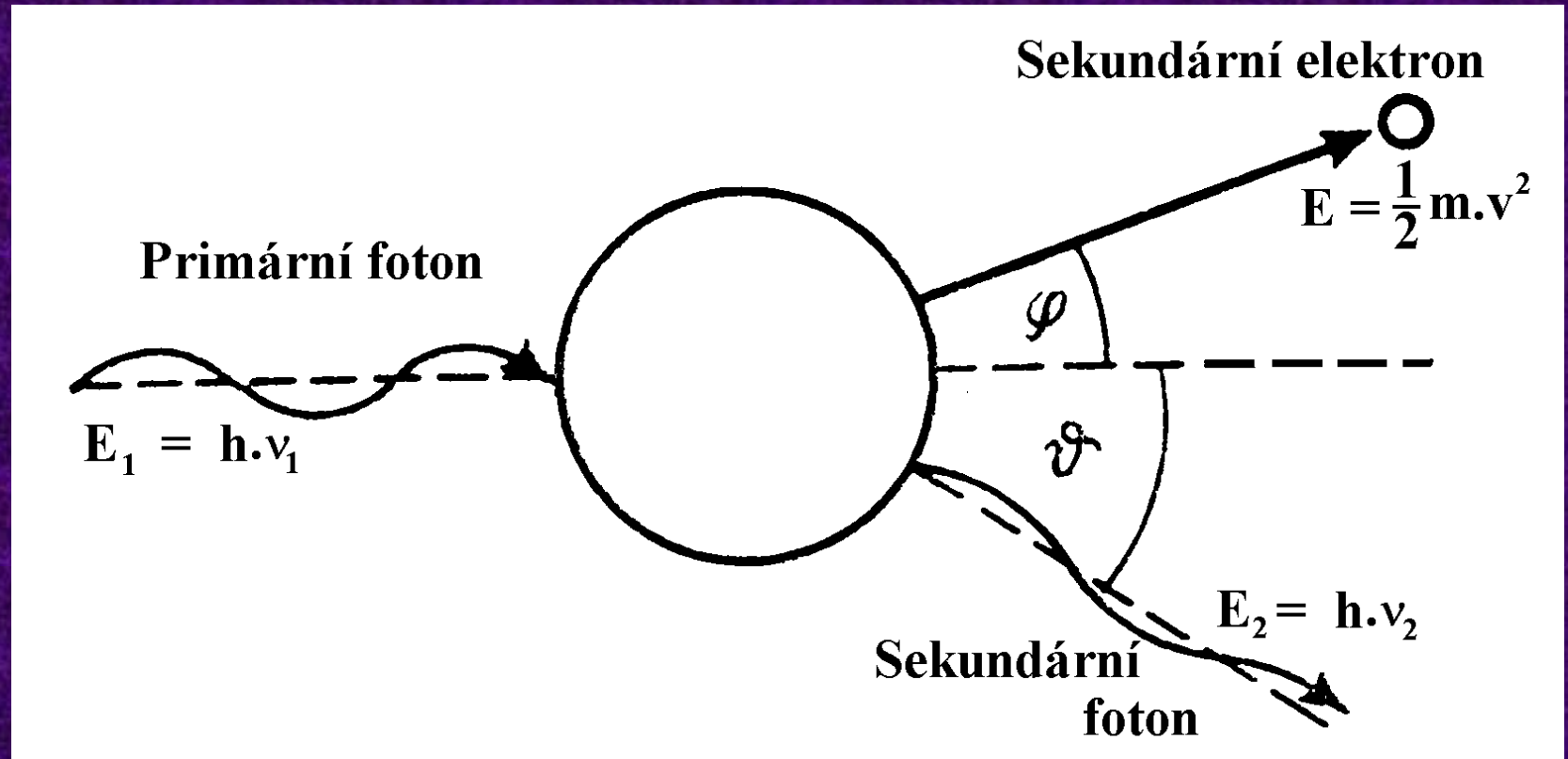
Interakce záření rtg a gama – Comptonův rozptyl (CR)

- Při vyšších energiích fotonů je vazebná energie elektronů W zanedbatelná ve srovnání s energií fotonu. Energie fotonu není zcela absorbována - vzniká foton o nižší energii. Můžeme napsat:

$$h.f_1 = (W) + h.f_2 + 1/2m.v^2,$$

- kde f_1 je frekvence dopadajícího fotonu a f_2 je frekvence fotonu rozptýleného. CR převažuje při energiích fotonů 0.5 - 5 MeV.

Comptonův rozptyl



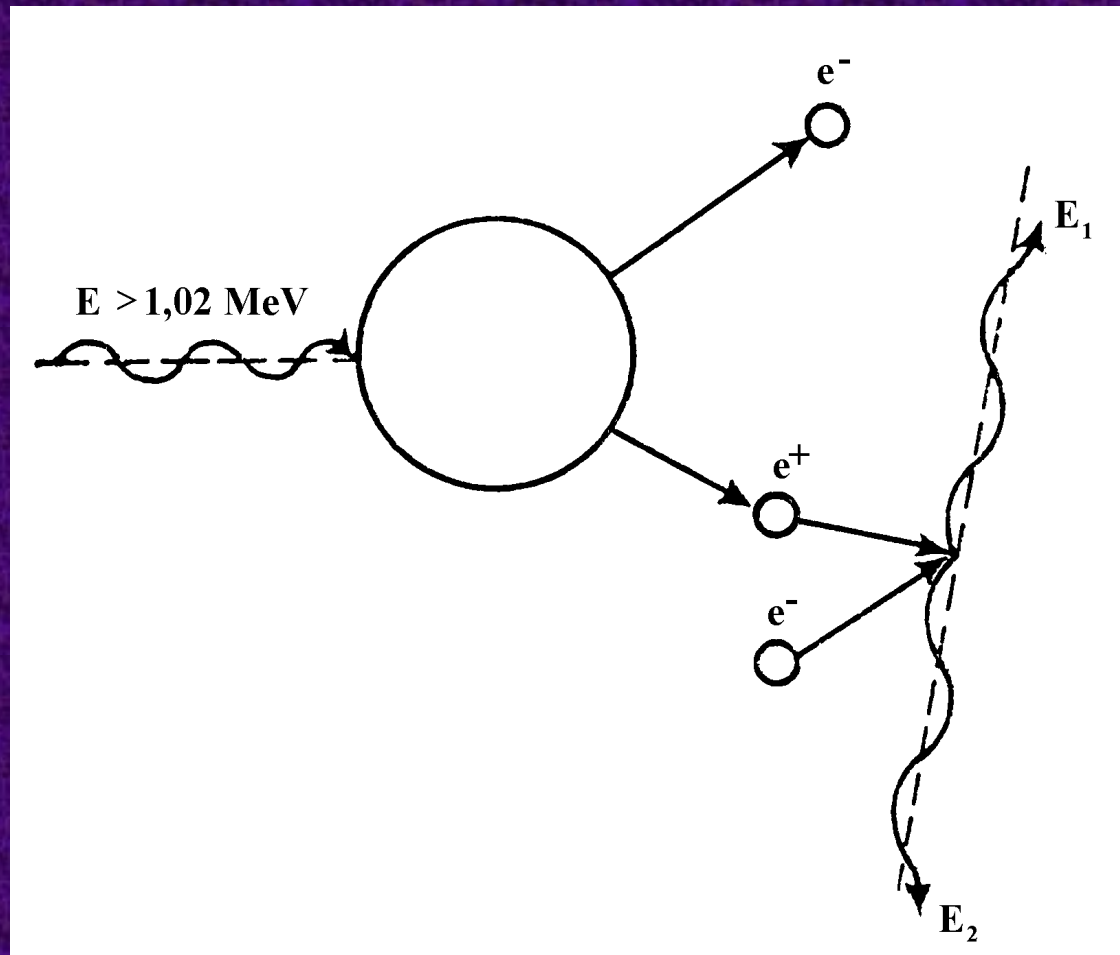
Interakce záření rtg a gama – tvorba elektron pozitronových párů (TP)

- Energie fotonu se přeměňuje do hmotnosti a kinetické energie elektronu a pozitronu v blízkosti těžkých atomových jader. Energie E „ukrytá“ v každé částici je dána:

$$E = m \cdot c^2,$$

- m je hmotnost částice, c je rychlost světla ve vakuu. Hmotnosti elektronu a pozitronu jsou shodné. Energie interagujícího fotonu musí být větší než energie dle výše uvedeného vzorce. Minimální energie fotonu potřebná pro TP je 1.02 MeV. Pravděpodobnost TP je vysoká jen při energiích podstatně vyšších.
- Pozitron rychle interaguje (anihiluje) s libovolným elektronem v blízkosti, vznikají dva „nové“ fotony, každý o energii 0,51 MeV.

Tvorba elektron pozitronových párů



Interakce částicového jaderného záření

- **Záření β** – tj. rychlé elektrony nebo pozitrony, ionizují prostředí jako při vzniku brzdného a charakteristického rtg záření. Po vyražení elektronu se atom stává kladně nabitým. Elektron z vrstvy K může být zachycen jádrem, které následně emituje charakteristické rtg záření. Přebytková energie jádra je vyzářena jako záření γ . Dráha částice β měří ve vodném prostředí řádově několik milimetrů.
- **Záření α** ionizuje přímo nárazem. Podél velmi krátké dráhy látkou (μm) se tvoří velké množství iontů - proto ztrácí velmi rychle energii a jeho dráha je krátká.
- **Neutrony** ionizují pružnými a nepružnými nárazy do atomového jádra. Výsledek **pružného nárazu** se liší dle poměru hmotnosti neutronu a atomového jádra. Pokud zasáhne **rychlý neutron** jádro těžkého prvku, je odražen téměř bez ztráty energie. Srážky s lehkými jádry vedou k velkým ztrátám energie.
Při **nepružném nárazu** pronikají **pomalé (moderované, tepelné) neutrony** do jádra, a pokud jsou z něho opět emitovány, nemají stejnou energii jako neutrony dopadající. Mohou vyvolat i emisi jiné částice nebo štěpení těžkých jader.

Jednotky charakterizující ionizující záření

- Energie částic je velmi malá ve srovnání s joulem (J). Proto zaveden **elektronvolt** (eV). 1 eV je kinetická energie elektronu urychleného z klidu elektrostatickým polem o potenciálovém rozdílu 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

- Energii předanou prostředím vyjadřujeme pomocí **absorbované dávky (D)** - jednotka **gray (Gy)**. Je to střední množství energie odevzdané prostředí o určité hmotnosti, dělené touto hmotností. Gray = 1 J předaný 1 kg látky [J.kg⁻¹].
- Dříve: **rad (rad)** (*radiation absorbed dose*).

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

- **Dávková rychlost** vyjadřuje absorbovanou dávku vztaženou na jednotkový časový interval [J.kg⁻¹.s⁻¹]. Tatáž absorbovaná dávka může být dosažena při různých dávkových rychlostech.

Jednotky používané pro hodnocení ionizujícího záření

- Rtg záření nebo záření γ , které prochází **vzduchem**, můžeme kvantifikovat pomocí **expozice** (ozáření): V jednotlivém místě svazku záření je dána poměrem q/m , kde q je celkový záporný (nebo kladný) náboj vytvořený v malém objemu vzduchu o hmotnosti m . Jednotkou expozice je **coulomb na kilogram ($C \cdot kg^{-1}$)**. Expozice se někdy označuje jako absorbovaná dávka ve vzduchu. Od ní je odvozena míra intenzity rtg či γ -záření, zahrnující časový faktor - **expoziční rychlost** - definovaná jako **coulomb na kilogram za sekundu ($C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$)**.

Jednotky charakterizující ionizující záření

- Stupeň poškození biologických objektů zářením závisí především na absorbované dávce, zatímco dávková rychlost určuje dobu, za kterou k poškození dojde.
- **Dávkový ekvivalent D_e** vyjadřuje relativní biologickou účinnost záření. Je dán součinem dávky záření a faktoru jakosti (QF) - dohodnutého faktoru odvozeného od LET ve vodě. QF slouží k posouzení rizikovosti jednotlivých druhů záření pro člověka. Dávkový ekvivalent má rozměr $J \cdot kg^{-1}$. Jednotkou je **sievert (Sv)**.

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

Faktor kvality

Druh záření	hustota střední ionizace [iont. párů/mm]	Lineární přenos energie [keV/mm]	Faktor kvality
γ , rtg, β	100	2 - 40	1
pomalé neutrony	100 - 500	5 - 50	3
rychlé neutrony, protony	200 - 1000	20 - 80	5
α	1000 - 3000	50 - 150	10
štěpné produkty	3000 - 5000	100 - 200	10 - 20

Biologické účinky ionizujícího záření

- **Fyzikální fáze** - časový úsek primárních účinků. Dochází k absorpci energie záření v atomech nebo molekulách. Průměrná doba se odhaduje na 10^{-16} s.
- **Fyzikálně-chemická fáze** - doba mezimolekulárních interakcí spojených s absorpcí energie a vlastním energetickým transferem. Asi 10^{-10} s.
- **Chemická (biochemická) fáze** - tvorba volných radikálů a jejich interakce s biologicky významnými molekulami, především s nukleovými kyselinami a bílkovinami. Asi 10^{-6} s.
- **Biologická fáze** - komplex interakcí produktů předešlých fází s biologickým systémem na všech úrovních organismu. Podle těchto úrovní kolísá délka této fáze od sekund po léta.

Biologické účinky ionizujícího záření

- **Přímý účinek** - fyzikální a fyzikálněchemický proces absorpce zářivé energie, vedoucí přímo ke změnám ve významných buněčných strukturách. Převládá v buňkách s nízkým obsahem vody. Teorie přímého účinku je označována jako **teorie zásahová**. Její podstatou je fyzikální přenos energie.
- **Nepřímý účinek** je zprostředkován produkty radiolýzy vody, zejména volnými radikály H^* a OH^* , které vedou k molekulovým produktům (H_2 , O_2 , H_2O_2), působícím na biologicky významné struktury. Převažuje v buňkách s vysokým obsahem vody. Volné radikály mají volný nepárový elektron, který z nich činí velmi reaktivní látky. Štěpí různé druhy vazeb v biomolekulách a degradují jejich strukturu. Teorie nepřímého účinku - **teorie radikálová** - má za základ chemický přenos energie.

Biologické účinky ionizujícího záření na buňku

- U proliferujících buněk nacházíme tyto stupně radiačního poškození:
- **dočasné zastavení proliferace**
- **reproduktivní smrt buněk** (dočasné uchování funkce při ztrátě proliferační schopnosti)
- **okamžitá smrt buněk**

Citlivost buněk vůči ionizujícímu záření (radiosenzitivita), či jejich odolnost (radiorezistence) závisí na mnoha faktorech, především na reparační schopnosti buňky.

Biologické účinky ionizujícího záření na buňku

Faktory ovlivňující biologické účinky obecně:

- **Fyzikální a fyzikálně chemické:** dávkový ekvivalent, dávková rychlost, teplota, prostorové rozdělení absorbované dávky, přítomnost vody a kyslíku
- **Biologické:** druh organismu, orgánu nebo tkáně, stupeň diferenciacce buněk, fyziologický stav organismu, schopnost spontánní reparace, repopulace a regenerace, fáze buněčného cyklu (S-fáze!)
- Velmi citlivé jsou proto buňky embryonální, germinativní, epidermální, retikuloendotelové a též **nádorové**

Biologické účinky ionizujícího záření – citlivost tkání

Pořadí od nejvíce citlivých tkání k nejméně citlivým:

lymfatická
zárodečný epitel varlete
kostní dřeň
gastrointestinální epitel
vaječníky

buňky kožních zhoubných nádorů

pojivová tkáň

játra

pankreas

ledviny

nervová tkáň

mozek

svaly



Ochrana před zářením

- **Fyzikální ochrana:**

- **Vzdálenost:** expoziční příkon se snižuje s druhou mocninou vzdálenosti. Ochranný faktor **času:** maximální zkrácení doby pobytu u zdroje. Pro **stínění** se volí vhodný absorbent.
- **Záření α** má ve vzduchu dosah několik desítek cm, ve vodě desítek μm . K ochraně stačí oděv, papír, apod. U záření α je velmi nebezpečná vnitřní kontaminace.
- **Záření β** má dosah ve vzduchu několik metrů, ve vodě desítky milimetrů. Ke stínění se užívají lehké materiály, omezující vznik brzdného záření. Stačí většinou 3-5 mm silný Al-plech a k odstínění brzdného záření 5 mm olova.
- **Záření γ** se odstiňuje materiály s vyššími protonovými čísly (ocel, olovo, barytový beton).
- **Neutrony** se nejprve zpomalí látkami obsahujícími hodně vodíku a pak se pohltnou látkami s výraznou absorpční schopností pro neutrony, např. Cd nebo B. Kombinované stínění: např. polyetylén obsahující sloučeniny bóru.

Ochrana před zářením

- **Chemická ochrana:** radioprotektivní látky, chrání organismus proti zejména nepřímému účinku záření. Vychytávají volné radikály nebo vyvolávají hypoxii buněk s následným omezením tvorby toxických produktů radiolýzy vody.
- **Biologická ochrana** je nespecifická a spočívá ve zlepšování stavu výživy organismu a ve zvyšování jeho odolnosti (podávání vitaminů - vitamin E chrání proti volným radikálům - imunizace proti infekčním onemocněním aj.)