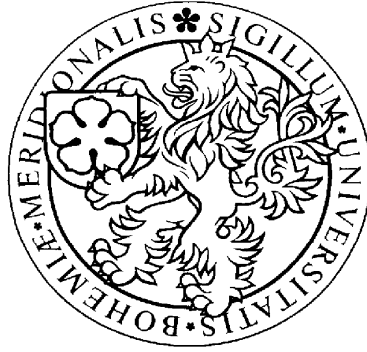


**JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
Zdravotně sociální fakulta**



**ÚVOD DO PRAKTIKA
Z RADIOLOGICKÉ FYZIKY**

*doplňkové texty pro posluchače kombinované formy studia
studijního programu „B5345 – Specializace ve zdravotnictví“*

studijního oboru „Radiologický asistent“

Doc. RNDr. Přemysl Záškodný, CSc.

ČESKÉ BUDĚJOVICE 2007

ÚVOD DO PRAKTIKA Z RADIOLOGICKÉ FYZIKY

1. Struktura radiologické fyziky

Klíčová slova: Ionizace prostředí, Prostředky ionizace, Způsoby ionizace, Elektromagnetické spektrum, Přehled ionizujících a neionizujících záření a vlnění používaných v radiologii

1.1. Proces ionizace prostředí

Elektrický proud v kovech je spojen s pohybem téměř volných elektronů, které vznikly odtržením valenčních elektronů od atomů kovu. Vedení proudu v kovech (a pevných látkách obecně) lze vysvětlit zonální teorií pevných látek.

Z hlediska typu vodivosti a možných chemických změn je odlišná situace u látek, které mají iontovou vodivost. **Mezi látky s iontovou vodivostí patří elektrolyty** (elektrolyty jsou většinou kapalné látky). U elektrolytů vznikají ionty procesem disociace molekul. Vznik iontů v elektrolytech je důsledkem procesu disociace, nikoliv procesu ionizace.

Plyny jsou za normálních okolností nevodivé - jsou velmi dobrými izolanty. Vodivými se stávají procesem ionizace. **Ionizace plynů** je vznik volných elektronů a kladných iontů v plynu v důsledku rozštěpení neutrální molekuly nebo atomu na kladný iont a elektron. Ionizace je vyvolávána různými způsoby pomocí prostředků ionizace. Děj opačný k ionizaci se nazývá rekombinace. **Prostředky a způsoby ionizace** lze popsat následujícím přehledem:

a) Vysoká teplota může být příčinou ionizace nárazem.

b) Elektrické pole může být příčinou ionizace nárazem, jestliže již v plynu existují ionty.

c) Korpuskulární záření (tj. jaderná i nejaderná záření látkových částic) - ionizace nárazem, jaderná i nejaderná záření tvořená nabitými částicemi mohou vedle ionizace nárazem **ionizovat přímo**. Jaderná záření tvořená nenabitými částicemi mohou vedle ionizace nárazem **ionizovat nepřímo**.

d) Elektromagnetické záření jaderného či nejaderného původu se rovněž může stát ionizátorem vyvolávajícím ionizaci plynu. Ionizace částic plynu nebo i jiného prostředí může nastat absorpcí fotonu např. ultrafialového záření, rentgenového záření či gama záření nebo procesem nepřímé ionizace, který byl popsán již u korpuskulárních záření.

Obecně lze ionizaci prostředí vymezit jako přeměnu původních elektricky neutrálních mikroobjektů prostředí na elektricky nabitě částice.

Prostředky ionizace jsou ionizátory a příčiny ionizace. Ionizátorem mohou být korpuskulární nebo elektromagnetická záření, příčinami ionizace může být vysoká teplota nebo elektrické pole. Ionizátory lze nazvat ionizujícími zářeními.

Způsobem ionizace může být ionizace nárazem látkovou částicí (vznik např. páru iont, elektron), ionizace absorpcí fotonu (opět např. vznik páru iont, elektron), přímá ionizace korpuskulárním zářením nabitých částic (vznik obrovského počtu párů např. iont, elektron) a nepřímá ionizace korpuskulárním zářením nenabitých částic nebo elektromagnetickým zářením (opět vznik např. obrovského počtu párů iont, elektron).

Radiologie jako vědní směr byla z hlediska medicínské praxe zkráceně definována jako klinický obor založený na diagnostickém a terapeutickém využití ionizujícího záření, tj. klinický obor vycházející z ionizujícího záření a jeho aplikací v medicíně (v této zkratce je implicitně skryto i využití neionizujících záření a mechanického ultrazvukového vlnění). Proto je potřebné popsat celý proces radiologického využití ionizujícího záření. To znamená stručně popsat vedle zdrojů ionizujícího záření, interakce ionizujícího záření s prostředím a měření ionizujícího záření také fyzikální základy radiodiagnostiky a radioterapie a fyzikální základy dílčích radiodiagnostických a radioterapeutických postupů (viz uvedená literatura)

Úvod do praktika z radiologické fyziky vyžaduje vedle struktury radiologické fyziky uvést také strukturu fyziky jako celku a potřebné základy praktické fyziky z hlediska fyzikálního praktika.

1.2. Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetickým spektrem je nazýván přehled druhů elektromagnetického záření uspořádaný od největších vlnových délek až k vlnovým délkám nejkratším. Přehled druhů elektromagnetického záření je uveden v Tab.1.

Sloupce tabulky postupně uvádějí: název záření, přibližné hranice pro vlnové délky, frekvenci v Hz, energii jednoho fotonu v eV, charakteristickou teplotu Θ (teplota vyplývající ze srovnání „kvantové“ energie fotonu a „klasické“ energie $k\Theta$, kde k je Boltzmannova konstanta).

| Druh záření (název) | Vlnová délka λ v metrech (m) | Frekvence ν v Hertzích (Hz) | Energie fotonu $\varepsilon = \hbar\omega$ (eV) | Charakteristická teplota $\Theta = \hbar\omega / k$ (K) |
|--|---|---|--|---|
| Rozhlasové vlny dlouhé střední krátké | 1 – 15 km 200 – 700 m 2 – 100 m | $10^6 - 10^5$ $10^7 - 10^6$ $10^8 - 10^7$ | $10^{-9} - 10^{-10}$ $10^{-8} - 10^{-9}$ $10^{-7} - 10^{-8}$ | $10^{-5} - 10^{-6}$ $10^{-4} - 10^{-5}$ $10^{-3} - 10^{-4}$ |
| Hertzovy vlny | 0,1 – 2 m | $10^9 - 10^8$ | $10^{-6} - 10^{-7}$ | $10^{-1} - 10^{-2}$ |
| Mikrovlny | 1 – 100 mm | $10^{11} - 10^{10}$ | $10^{-4} - 10^{-5}$ | $10^1 - 10^{-1}$ |
| Tepelné záření | 10 – 1000 μ m | $10^{13} - 10^{12}$ | $10^{-1} - 10^{-3}$ | $10^3 - 10^1$ |
| Světlo infračervené | 0,75 – 10 μ m | $10^{14} - 10^{13}$ | $10^0 - 10^{-1}$ | $10^4 - 10^3$ |
| Světlo viditelné | 0,35 – 0,75 μ m | $10^{15} - 10^{14}$ | $10^1 - 10^0$ | $10^5 - 10^4$ |
| Světlo ultrafialové | 0,014 – 0,35 μ m | $10^{16} - 10^{15}$ | $10^2 - 10^1$ | $10^6 - 10^5$ |
| Měkké RTG záření | 10 – 1000 Å | $10^{17} - 10^{16}$ | $10^3 - 10^2$ | $10^7 - 10^6$ |
| Tvrdé RTG záření | 1 – 10 Å | $10^{18} - 10^{17}$ | $10^4 - 10^3$ | $10^8 - 10^7$ |
| Měkké záření γ | 0,1 – 1 Å | $10^{19} - 10^{18}$ | $10^5 - 10^4$ | $10^9 - 10^8$ |
| Tvrdé záření γ | 000,1 – 0,1 Å | $10^{21} - 10^{19}$ | $10^7 - 10^5$ | $10^{11} - 10^9$ |
| Zánikové záření | $10^{-13} - 10^{-12}$ m | $10^{21} - 10^{20}$ | $10^7 - 10^6$ | $10^{11} - 10^{10}$ |
| Penetrantní záření | $10^{-15} - 10^{-13}$ m | $10^{23} - 10^{21}$ | $10^9 - 10^7$ | $10^{13} - 10^{11}$ |

Tab. 1 Elektromagnetické spektrum

Stručný popis jednotlivých druhů záření uvedených v tabulce elektromagnetického spektra bude obsahovat: typický zdroj záření v přírodě, umělý zdroj záření, způsob detekce záření a schopnost ionizovat atomy prostředí.

Rozhlasové vlny (neionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou přechody v systému jaderných spinů (především v oblasti velmi krátkých vln), mezi umělé zdroje patří vedle vysílače s vysílací anténou (otevřeného elektrického obvodu) např. magnetrony a klystrony (speciální elektronky ve vysokofrekvenčních generátorech, které mohou pracovat jako vysokofrekvenční oscilátory o velmi vysokých frekvencích řádově GHz). Detekce rozhlasových vln využívá přijímačů s přijímací anténou, důležitou součástí je činnost např. krystalových detektorů, jejichž činnost je v podstatě činností usměrňovací.

Mikrovlny (neionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou přechody v systému elektronových spinů, mezi umělé zdroje patří radary, jejichž vysílací anténa vyzáří najednou značnou elektromagnetickou energii - pak se vysílání přeruší. Tyto pulsy se opakují mnohokrát za 1 s. Detekce je založena na přepojení antény na přijímač po každém pulsu - např. po tisícíně sekundy se vše opakuje.

Tepelné záření (neionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou všechna tělesa s teplotou vyšší než je teplota absolutní nuly. V těchto tělesech se odehrávají přechody mezi kvantovými stavy rotačními (např. molekul) a vibračními (např. molekul). Umělé zdroje jsou rovněž spojeny s použitím vhodného tělesa zahřátého na potřebnou teplotu. Mezi detektory patří např. baterie termočlánků, termokamery.

Světlo infračervené, viditelné, ultrafialové (neionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou přechody mezi kvantovými stavy vnějších elektronů v atomech, ale také mezi vibračními stavy molekul. Mezi umělé zdroje patří např. výboj v plynu, obloukový a jiskrový výboj, rozžhavená vlákna. Vhodnými detektory jsou vedle termočlánků také fotobuňky a fotonásobiče.

Rentgenové záření (ionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou přechody mezi kvantovými stavy vnitřních elektronů v atomech. Mezi umělé zdroje patří především rentgenka. Vhodnými detektory jsou Geigerovy a scintilační počítače a ionizační komůrky, ale také vhodné filmy. Při detekci se využívají především luminiscenční a fotochemické účinky rentgenového záření.

Gama záření (ionizující záření)

Typickým zdrojem v přírodě jsou vedle reakcí fundamentálních částic přechody mezi kvantovými stavy v jádrech atomů. Mezi umělé zdroje patří vedle uměle vyrobených radionuklidů (např. v radionuklidových generátorech) také urychlovače částic, např. betatrony a elektronové synchrotrony, které mohou poskytovat gama záření vlnové délky až 10^{-15} m (formálně takové gama záření patří již do oblasti zánikového a penetrantního záření - tzv. ultragama záření). Mezi detektory lze opět zařadit scintilační počítače, krystalové počítače a ionizační komůrky s vhodnými rozsahy voltampérových charakteristik.

1.3. Přehled ionizujících a neionizujících záření a vlnění používaných v radiologii

Schematický a jen orientační přehled obsahuje pro každý druh záření či vlnění údaje o vlnové délce a frekvenci, o přírodním a umělém zdroji, o způsobu detekce a o zařazení do příslušné oblasti radiologie. U elektromagnetických záření bylo využito spektra elektromagnetických záření podle Tab.1. U korpuskulárních záření nejsou uvedeny typy látkových částic, z této příčiny je uveden jen obecný vzorec pro de Broglieovu vlnovou délku a frekvenci příslušné pravděpodobnostní vlny.

Schematický přehled záření a vlnění používaných v radiologii je uveden v následující tabulce Tab.2:

| | | |
|---|---|-----------------------------------|
| a) Gama záření (nepřímě ionizující záření, ionizace absorpcí fotonu) | | |
| Vlnová délka: | $10^{-13} - 10^{-12}$ m | Frekvence: $10^{20} - 10^{21}$ Hz |
| Přírodní zdroj: | Přechody v jádře atomu | |
| Umělý zdroj: | Urychlovače, radioizotopy | |
| Detekce: | Plynové, jiskrové, scintilační detektory | |
| Oblast radiologie: | Nukleární medicína | |
| b) Rentgenové záření (nepřímě ionizující záření, ionizace absorpcí fotonu) | | |
| Vlnová délka: | 10^{-10} m | Frekvence: 10^{18} Hz |
| Přírodní zdroj: | Přechody v obalu atomu | |
| Umělý zdroj: | Rentgenka | |
| Detekce: | Plynové, krystalové, scintilační, fotochemické detektory | |
| Oblast radiologie: | Rentgenová diagnostika (rentgen, výpočetní tomografie), Rentgenová terapie | |
| c) Infráčervené záření (neionizující záření) | | |
| Vlnová délka: | 10^{-5} m | Frekvence: 10^{13} Hz |
| Přírodní zdroj: | Vibrace a rotace molekul | |
| Umělý zdroj: | Tělesa s teplotou vyšší než 0 K | |
| Detekce: | Radiotermometry, termokamery | |
| Oblast radiologie: | Termografie | |
| d) Rádiové vlny (neionizující záření) | | |
| Vlnová délka: | $10^0 - 10^4$ m | Frekvence: $10^4 - 10^8$ Hz |
| Přírodní zdroj: | Pohyb téměř volných elektronů | |
| Umělý zdroj: | Vysílač vysokofrekvenčního elektromagnetického signálu | |
| Detekce: | Přijímač vysokofrekvenčního elektromagnetického signálu | |
| Oblast radiologie: | Nukleární magnetická rezonance | |
| e) Ultrazvukové vlny (mechanické vlnění) | | |
| Vlnová délka: | 10^{-3} m | Frekvence: $10^6 - 10^7$ Hz |
| Přírodní zdroj: | Chvění těles | |
| Umělý zdroj: | Magnetostrikční a piezoelektrický oscilátor | |
| Detekce: | Magnetostrikční a piezoelektrický oscilátor | |
| Oblast radiologie: | Sonografie | |
| f) Korpuskulární záření (přímě a nepřímě ionizující záření, ionizace nárazem) | | |
| Vlnová délka: | de Broglieova vlnová délka $\lambda = h / mv$ | Frekvence: $\nu = mc^2 / h$ |
| Přírodní zdroj: | Přirozeně radioaktivní prvky | |
| Umělý zdroj: | Uměle radioaktivní prvky, urychlovače | |
| Detekce: | Plynové, jiskrové, krystalové, scintilační detektory | |
| Oblast radiologie: | Nukleární medicína, radioterapie | |

Tab. 2 Přehled ionizujících a neionizujících záření používaných v radiologii

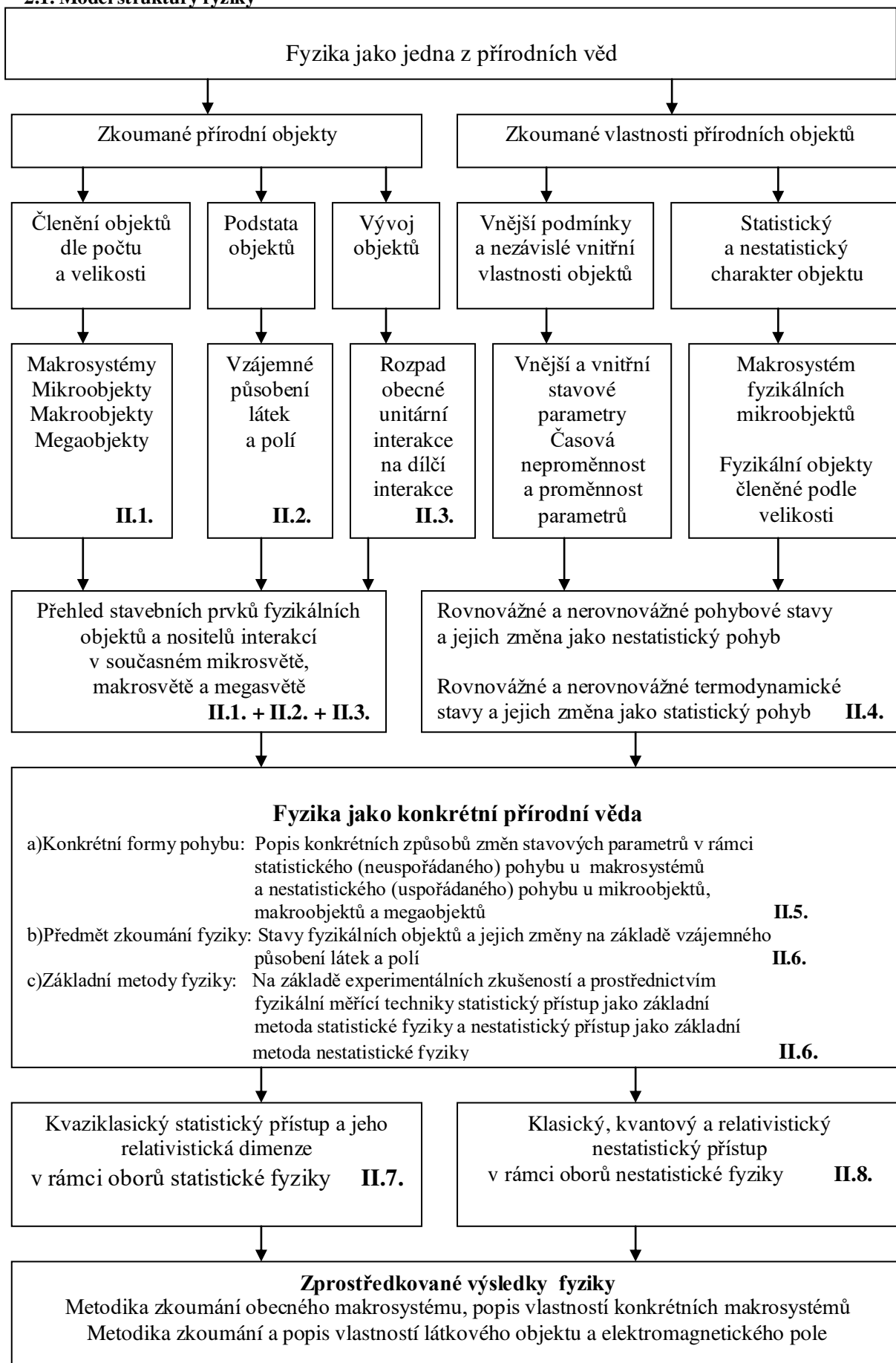
Kontrolní otázky:

- 1) Co je ionizace prostředí?
- 2) Co je to ionizace nárazem?
- 3) Co je to přímá a nepřímá ionizace?
- 4) Jak jsou děleny prostředky ionizace?
- 5) Která elmg. záření patří mezi ionizující?
- 6) Vyjmenujte složky profilu radiologického asistenta
- 7) Která záření a vlnění charakterizují jednotlivé složky profilu

2. Struktura fyziky

Klíčová slova: Statistická a nestatistická fyzika,
Klasická dimenze,
Kvantová dimenze,
Relativistická dimenze,
Pohybová rovnice a pohybový zákon

2.1. Model struktury fyziky



2.2. Popis modelu fyziky

Model na Obr.1 lze stručně popsat následujícím způsobem (v uvedené literatuře je popis proveden pomocí odstavců, které mají v Obr.1 označení II.1. až II.8.):

a) Fyzika jako jedna z přírodních věd zkoumá makrosystémy tvořené obrovským počtem objektů (většinou částic) pohybujících se neuspořádaným (statistickým) pohybem. Dále zkoumá mikroobjekty, makroobjekty a megaobjekty, které jsou buď osamocené nebo tvořeny objekty, které se pohybují uspořádaným (nestatistickým) pohybem (např. proud částic nebo vlnění). Podstatou těchto objektů je vzájemné působení látek a polí. Vývoj těchto objektů až do současnosti je spojen s postupným rozpadem obecné unitární interakce na dílčí interakce (gravitační, elektromagnetickou, silnou a slabou interakci)

b) Makrosystémy mají statistický charakter, je brána v úvahu jejich vnitřní struktura. Zkoumá je statistická fyzika, jejich stavy se nazývají stavy termodynamickými. Možným stavům je přiřazována pravděpodobnost jejich výskytu pomocí distribučních funkcí, stavové parametry těchto stavů jsou souborovými středními hodnotami fyzikálních veličin. Pohyb je pojímán jako změna stavu. Většinou jsou zkoumány stavy termodynamické rovnováhy, v nichž se střední hodnoty stavových parametrů s časem nemění. Příkladem mohou být makrosystémy molekul vzduchu, ale také makrosystémy fermionů (např. elektronový plyn v kovech jako degenerovaný Fermiho plyn) nebo bosonů (např. fotonový plyn záření černého tělesa nebo fononový a rotonový plyn v krystalech, amorfních látkách a supravodivých materiálech jako degenerované Boseho plyny)

c) Mikroobjekty, makroobjekty a megaobjekty mají nestatistický charakter, jejich vnitřní struktura není brána v úvahu. Zkoumá je nestatistická fyzika, jejich stavy se nazývají stavy pohybovémi. Popis pohybových stavů umožňuje pohybové zákony (kinematika), příčiny změn pohybových stavů umožňují popsat pohybové rovnice (dynamika). Jsou zkoumány stavy rovnovážné (statické, stacionární) a také stavy nerovnovážné (kvazistacionární, nestacionární). Pohyb je opět pojímán jako změna stavu. Příkladem stacionárního stavu může být stav vázaného elektronu v obalu atomu, který nezáří a neabsorbuje. Příkladem nestacionárního stavu může být stav vázaného elektronu při jeho excitaci nebo deexcitaci (atom při excitaci může absorbovat foton, při deexcitaci naopak foton vyzařovat).

d) Statistická i nestatistická fyzika mají svou variantu klasickou, kvantovou (je uplatňován vlnově korpuskulární dualismus) a relativistickou (prostor a čas závisí na rozložení a pohybu fyzikálních objektů). V rámci statistické fyziky jsou tyto tři dimenze spojovány do kvaziklasického statistického přístupu, v rámci nestatistické fyziky je klasická dimenze zkoumána klasickou mechanikou a klasickými aplikacemi elektromagnetického pole, kvantová a relativistická dimenze kvantovou a relativistickou mechanikou a kvantovými a relativistickými aplikacemi elektromagnetického pole.

e) Nestatistickou fyziku (nestatistický přístup) lze vystavět na základě pojmů **“pohybová rovnice”** (např. druhý Newtonův zákon v klasické mechanice, nestacionární Schrödingerova rovnice v nerelativistické kvantové mechanice) a **“pohybový zákon”** (např. tvar trajektorie jako množina koncových bodů polohového vektoru v klasické mechanice; v kvantové mechanice si lze představit tvar trajektorie jako množinu “pravděpodobnostních oblaků” vázaného elektronu při jeho excitaci nebo deexcitaci v obalu atomu).

f) Statistickou fyziku (statistický přístup) lze vystavět na pojmu **“distribuční funkce”** (např. Maxwellova distribuce rychlostí v molekulách plynu jako jednoduchá aplikace Maxwellova-Boltzmannova rozdělení) a **“souborová střední hodnota”** (např. střední kvadratická rychlost molekul plynu).

Kontrolní otázky:

- 1) Které objekty a stavy zkoumá nestatistická fyzika
- 2) Které objekty a stavy zkoumá statistická fyzika
- 3) Která z obou fyzik hraje rozhodující roli v radiologii
- 4) Co je to klasická dimenze nestatistické fyziky
- 5) Co je to kvantová dimenze nestatistické fyziky
- 6) Co je to relativistická dimenze nestatistické fyziky
- 7) Co je to pohybový zákon a pohybová rovnice

3. Východiska fyzikálního měření – teorie

Klíčová slova: Fyzikální veličina, Metrologické rovnice, Přehled skupin fyzikálních veličin, Měřicí princip, metoda a postup, Metody zpracování výsledků měření, Pracovní etapy fyzikálního měření

Důležitými charakteristikami laboratorních úloh fyzikálního praktika je jejich vazba na teoretickou výstavbu oboru „Základy fyzikálního měření“.

3.1. Fyzikální veličina a její měření, jednotky veličin a jejich soustava, metrologické rovnice

Experimentální fyzika čerpá řadu poznatků prostřednictvím kvalitativního i kvantitativního sledování probíhajících dějů, tj. prováděním a vyhodnocováním kvalitativních a kvantitativních pokusů.

Provádění kvantitativních pokusů je nazýváno měřením a umožňuje získávat i číselné údaje o pozorovaných jevech. Měření slouží k objektivnímu určování fyzikálních veličin. Podle ČSN 01 1301 je fyzikální veličina pojem užívaný ke kvalitativnímu a kvantitativnímu popisu fyzikálních jevů, stavů a těles (různých fází). Podle téže normy je jednotka veličiny zvolenou veličinou stejné skupiny, která umožňuje kvantitativní pozorování veličiny měřením. Číselná hodnota veličiny je pak v této normě definována jako poměr veličiny k její zvolené jednotce. Hodnota veličiny X je rovna součinu číselné hodnoty veličiny $\{X\}$ a jednotky veličiny $[X]$.

Zápis hodnoty veličiny X pak bude nabývat podoby

$$X = \{X\} \cdot [X].$$

Volba fyzikálních jednotek vychází z mezinárodní soustavy jednotek SI (Système International d'Unités). Stručně lze připomenout:

- soustava SI obsahuje základní jednotky metr (m), kilogram (kg), sekunda (s), ampér (A), kelvin (K), mol (mol), kandela (cd). V závorkách jsou uváděny značky jednotek,
- soustava SI dále obsahuje doplňkové jednotky radián (rad), steradián (sr) pro úhel rovinný a prostorový,
- další součástí soustavy SI jsou veličiny odvozené. Pro ně lze zapisovat veličinové rovnice, pro jejich jednotky rovnice jednotkové,
- poslední součástí soustavy SI tvoří násobky a díly jednotek SI.

Používané metrologické rovnice (rovnice umožňující definici a následně i kvantifikaci fyzikálních veličin) jsou následující:

- veličinové rovnice, např.

$$H_e = \sigma \cdot T^4,$$

kde H_e je intenzita vyzařování u plošných zdrojů záření měřená v jednotkách watt na čtverečný metr, σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, T je termodynamická teplota

- rovnice číselných hodnot, např.

$$H_e = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}. 1000^4 \text{ K}^4 = 5,67 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}, \{H_e\} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} = \{\sigma\} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \{T\} \text{ K}^4$$

- jednotkové rovnice
 - a) konkrétní, např. 1 m = 100 cm = 1000 mm,
 - b) symbolická forma, např.

$$[\sigma] = \frac{[H_e]}{[T]^4} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} = \text{watt na čtverečný metr a na kelvin na čtvrtou} = \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

- rozměrové (dimenzionální) rovnice.

Označíme-li rozměrové symboly 7 základních jednotek postupně L, M, T, I, O, N, J lze jako příklad použití dimenzionální rovnice uvést získání fyzikálního rozměru Stefanovy-Boltzmannovy konstanty σ :

$$\dim(\sigma) = \dim\left(\frac{H_e}{T^4}\right) = \dim(H_e) \cdot [\dim(T)]^{-4} = \dim(P_e) \cdot [\dim(S)]^{-1} \cdot [\dim(T)]^{-4}.$$

Jelikož P_e je zářivý tok, platí:

$$\dim(P_e) = L^2 M T^{-3}$$

Pro plošný obsah S obdržíme $\dim(S) = L^2$.

Pro $\dim(\sigma)$ lze pak zapsat $\dim(\sigma) = L^2 M T^{-3} L^{-2} \Theta^{-4} = M T^{-3} \Theta^{-4}$.

Fyzikální veličiny lze dělit rozmanitými způsoby. Např. podle povahy na intenzivní (vyjadřující fyzikální stavy a nelze je chápat jako veličiny složené z menších částí), extenzivní (vyjadřující „množství“ a lze je považovat za část větších celků nebo za součet menších částí) a protenzivní (trvale a spojitě se mění).

Pro potřeby praktik z radiologické fyziky bude použito rozdělení fyzikálních veličin podle úvodní části obecné mezinárodní normy ISO 31/0:

- a) základní veličiny použité v SI a veličiny prostoru a času
- b) veličiny periodických a příbuzných jevů
- c) mechanické veličiny
- d) termické (tepelné) veličiny
- e) elektrické a magnetické veličiny
- f) optické veličiny a veličiny příslušející elektromagnetickým zářením
- g) akustické veličiny
- h) veličiny fyzikální chemie a molekulární fyziky
- i) veličiny atomové a jaderné fyziky
- j) veličiny jaderných reakcí a ionizujícího záření
- k) veličiny fyziky pevné fáze
- l) bezrozměrné parametry (veličiny).

Výběr fyzikálních veličin potřebných pro praktikum z radiologické fyziky a doložených některými metrologickými rovnicemi (veličinovou, jednotkovou a fyzikálním rozměrem) má následující podobu.

1. perioda (doba kmitu), značka: T
 veličinová rovnice: doba jednoho periodického děje (čas je základní fyzikální veličina)
 jednotková rovnice: $T = \text{sekunda} = \text{s}$
 fyzikální rozměr: $\dim(T) = T$
2. frekvence (kmitočet), značka: f, ν
 veličinová rovnice: $f = \frac{1}{T}$
 jednotková rovnice: $[f] = \text{hertz} = \text{Hz}$
 fyzikální rozměr: $\dim(f) = T^{-1}$
3. úhlová frekvence (kruhová frekvence), značka: $\omega = 2\pi f$
 veličinová rovnice: $[\omega] = 2\pi f$
 jednotková rovnice: $[\omega] = \text{s}^{-1} = \text{reciproká sekunda (nelze zaměnit za jednotku úhlové rychlosti)}$
 fyzikální rozměr: $\dim(\omega) = T^{-1}$
4. vlnová délka, značka: λ
 veličinová rovnice: $[\lambda] = \frac{c}{f}$ (c je fázová rychlost šíření vlnění)
 jednotková rovnice: $[\lambda] = \text{metr} = \text{m}$
 fyzikální rozměr: $\dim(\lambda) = L$
5. vlnočet, značka σ
 veličinová rovnice: $\sigma = \frac{1}{\lambda}$
 jednotková rovnice: $[\sigma] = \text{reciproký metr} = \text{m}^{-1}$
 fyzikální rozměr: $\dim(\sigma) = L^{-1}$
6. rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu (rychlost světla), značka: c
 veličinová rovnice: konvenční hodnota z roku 1976 je $c = 2,99792459 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$
 jednotková rovnice: $[c] = \text{metr za sekundu} = \text{m.s}^{-1}$

fyzikální rozměr: $\dim(c) = \text{LT}^{-1}$

7. zářivá energie, značka U_e
 veličinová rovnice: energie přenášená zářením
 jednotková rovnice: $[U_e] = \text{joule} = \text{J}$
 fyzikální rozměr: $\dim(U_e) = \text{L}^2 \text{M T}^{-2}$

8. zářivý tok, značka: P_e
 veličinová rovnice: $P_e = \frac{dU_e}{dt}$
 jednotková rovnice: $[P_e] = \text{J} \cdot \text{s}^{-1} = \text{watt} = \text{W}$
 fyzikální rozměr: $\dim(P_e) = \text{L}^2 \text{M T}^{-3}$

9. plošný obsah, značka: S
 veličinová rovnice: $S = l^2$ (l je délka)
 jednotková rovnice: $[S] = \text{čtverečný metr} = \text{m}^2$
 fyzikální rozměr: $\dim(S) = \text{L}^2$

10. intenzita vyzařování (u plošných zdrojů záření), značka: H_e
 veličinová rovnice: $H_e = \frac{dP_e}{dS}$
 jednotková rovnice: $[H_e] = \frac{[P_e]}{[S]} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \text{watt na čtverečný metr} = \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
 fyzikální rozměr: $\dim(H_e) = \text{M T}^{-3}$

11. Stefanova-Boltzmannova konstanta, značka: σ
 veličinová rovnice: $H_e = \sigma T^4$ (T je termodynamická teplota)

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15h^3 c^2}$$

(k je Boltzmannova konstanta, h je Planckova konstanta)

$$\sigma = (5,6697 \pm 0,0029) \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

jednotková rovnice:

$$[\sigma] = \frac{[H_e]}{[T]^4} = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} = \text{watt na čtverečný metr a na kelvin na čtvrtou} = \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

fyzikální rozměr: $\dim(\sigma) = \text{M T}^{-3} \Theta^{-4}$

12. svítivost, značka: I
 veličinová rovnice: základní fyzikální veličina
 jednotková rovnice: $[I] = \text{kandela} = \text{cd}$
 fyzikální rozměr: $\dim(I) = \text{J}$

13. světelný tok, značka: Φ
 veličinová rovnice: $\Phi = I \omega$ (ω je prostorový úhel)
 jednotková rovnice: $[\Phi] = [I] \cdot [\omega] = \text{cd} \cdot \text{sr} = \text{lumen} = \text{lm}$
 fyzikální rozměr: $\dim(\Phi) = \text{J}$

14. jas, značka: L

veličinová rovnice: $L = \frac{dI}{dS_n}$ (S_n je obsah plošky kolmé na směr záření)

jednotková rovnice: $[L] = \frac{[I]}{[S_n]} = \text{kandela na čtverečný metr} = \text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$

fyzikální rozměr: $\dim(L) = \text{L}^{-2} \text{J}$

15. osvětlení, značka: E

veličinová rovnice: $E = \frac{d\Phi}{dS}$ (S je obsah plochy, na niž světlo dopadá)

jednotková rovnice: $[E] = \frac{[\Phi]}{[S]} = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{lux} = \text{lx}$

fyzikální rozměr: $\dim(E) = \text{L}^{-2} \text{J}$

16. absolutní index lomu, značka: N

veličinová rovnice: $N = \frac{c}{v_\lambda}$ (v_λ je rychlost světla v daném prostředí)

(v_λ je rychlost světla v daném prostředí)

fyzikální rozměr: $\dim(N) = 1$

17. Planckova konstanta, značka: h

veličinová rovnice: $U_f = hf$ (U_f je elementární kvantum zářivé energie)

$h = (6,6256 \pm 0,0005) \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$

jednotková rovnice: $[h] = [U_f] \cdot [t] = \text{joule krát sekunda} = \text{J}\cdot\text{s}$

fyzikální rozměr: $\dim(h) = \text{L}^2 \text{M T}^{-1}$

18. aktivita, značka: A

veličinová rovnice: $A = \frac{dN}{dt}$ (N je počet radioaktivních přeměn)

jednotková rovnice: $[A] = \frac{[N]}{[t]} = \frac{1}{\text{s}} = \text{becquerel} = \text{Bq}$

fyzikální rozměr: $\dim(A) = \text{T}^{-1}$

19. (absorbovaná) dávka, značka: D

veličinová rovnice: $D = \frac{\Delta E_D}{\Delta m}$ (ΔE_D je část energie ionizujícího záření, absorbovaná nějakým objektem o hmotnosti Δm)

jednotková rovnice: $[D] = \frac{[E_D]}{[m]} = \frac{\text{J}}{\text{kg}} = \text{gray} = \text{Gy}$

fyzikální rozměr: $\dim(D) = \text{L}^2 \text{T}^{-2}$

20. (ekvivalentní) dávka, značka: D_{eq}

veličinová rovnice: $D_{eq} = a \cdot D$ (a je relativní biologická účinnost)

jednotková rovnice: $[D_{eq}] = \frac{[E_D]}{[m]} = \frac{\text{J}}{\text{kg}} = \text{sievert} = \text{Sv}$

fyzikální rozměr: $\dim(D_{eq}) = \text{L}^2 \text{T}^{-2}$

21. ozáření, značka: X

veličinová rovnice: $X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$

(ΔQ je střední hodnota součtu elektrických nábojů všech iontů stejného znaménka, vzniklých v určitém množství vzduchu o hmotnosti Δm po doletu všech elektronů uvolněných dopadajícími fotony)

jednotková rovnice: $[X] = \frac{[Q]}{[m]} = \frac{\text{C}}{\text{kg}} = \text{coulomb na kilogram} = \text{C}\cdot\text{kg}^{-1}$

fyzikální rozměr: $\dim(X) = \text{M}^{-1} \text{T I}$

3.2 Pojem měřicího principu, metody a postupu, měřicího prostředku

Laboratorní úloha fyzikálního praktika vychází z měřicího principu, je postavena na vhodně zvolené měřicí metodě a měřícím postupu a používá odpovídající měřicí prostředky. Uvedené pojmy budou stručně objasněny.

Měřicí princip

Fyzikální veličiny jsou v úzkém vztahu k určitým jevům, na nichž je měření daných veličin založeno. Z hlediska měření lze takové jevy nazvat měřícím principem, v obecné poloze principem fyzikálním (např. fotoelektrický jev). Na jediném měřícím principu může být založeno více měřících metod pro zkoumanou veličinu.

Měřicí metoda

Měřícími metodami rozumíme způsoby, které jsou používány ke kvantifikaci fyzikálních veličin (z hlediska metrologie i ke kvantifikaci dalších měřitelných veličin, např. technického charakteru). K provedení měření na základě určité metody (vycházející z daného měřicího principu) je potřebné zpravidla uvažovat ještě o měřícím postupu.

Měřicí postup

Měřícím postupem je určitý sled úkonů potřebných k provedení měření. Měřící postupy vycházející z vybrané měřicí metody se mohou lišit. Pro dobrou reprodukovatelnost měření mají být proto předepsány nejen měřicí metody, ale také jejich konkretizace prostřednictvím vhodného měřicího postupu na základě dostupných měřících prostředků.

Měřicí prostředek

Z hlediska obecné metrologie lze za měřicí prostředek považovat každý technický prostředek, který je určen k měření. Měřicí prostředky dělíme na měřidla (která dělíme dále na míry a měřicí přístroje) a na pomocná měřicí zařízení. Pomocná měřicí zařízení neslouží přímo k měření, ale jsou k němu nutně zapotřebí. Podle určení lze měřidla dělit na provozní měřidla, kontrolní měřidla a etalónová měřidla.

V oblasti fyzikálních měření lze považovat za měřicí prostředky obvykle přístroje a další pomůcky k měření. Jako příklad míry mohou sloužit závaží, mezi měřicí přístroje patří např. ampérmetr (indikační měřicí přístroj), zápisové a registrační kotouče a zařízení (registrační měřicí přístroje).

Rozdělení měřících metod

Obecná kategorie měřících metod:

1. Přímé metody a nepřímé metody

Přímé metody obvykle vycházejí z definice měřené veličiny, metody nepřímé pak ze vztahů měřené veličiny k veličinám dalším, které s měřenou veličinou nesouvisejí prostřednictvím její definice.

2. Metody absolutní (nezávislé) a metody relativní (srovnávací)

Absolutní metody dávají prostou hodnotu měřené veličiny ve zvolených jednotkách, srovnávací metody umožňují získat měřené veličiny k jiné veličině stejného druhu.

3. Metody výhylkové a metody nulové

U výhylkových metod je hodnota měřené veličiny určena z velikosti výhylky měřicího přístroje, naopak u metod nulových se pokoušíme udržet ukazatel přístroje v nulové poloze (např. vážení).

Vedle obecných kategorií lze hovořit i o některých zvláštních metodách, např. o metodě substituční, kompenzační, rozdílové, interpolační a extrapolací. Těmto metodám je věnován dostatek pozornosti v literatuře zabývající se obecnými základy fyzikálního měření.

V praktiku z radiologické fyziky bude využíváno k popisu laboratorních úloh především první z obecných kategorií měřících metod, která rozděluje měřicí metody na metody přímé a nepřímé.

3.3 Metody zpracování výsledků měření

Metody zpracování výsledků měření lze formálně rozdělit do tří skupin:

- statistické metody,
- početní metody,
- grafické metody.

Statistické metody zpracování výsledků měření představují aplikaci teorie chyb na fyzikální měření a jsou použitelné i pro obecné kategorie měřicích metod (např. pro kategorii přímá – nepřímá metoda). Početní metody reagují spíše na zvláštní měřicí metody (postupná, rozdílová apod.), které představují určitý stupeň specifikace obecných kategorií. Grafické metody vycházejí ze snahy o grafické vyjádření výsledků měření.

Uvedené skupiny metod nelze od sebe zcela oddělovat. Např. metody regresní analýzy, které lze zařadit mezi metody početní, představují v mnoha směrech prohloubení statistických zákonitostí platících pro náhodné chyby. Nebo metody interpolace (příp. extrapolace) mají svou podobu jak v oblasti početních, tak i grafických metod.

3.3.1 Statistické zpracování výsledků měření jedné veličiny

Úplnou chybou v měření je rozdíl naměřené hodnoty a hodnoty správné. Měření zatížená tzv. hrubou chybou zpravidla vylučujeme ze souboru měření. Dva základní druhy chyb jsou chyby náhodné a soustavné (systematické). Kontrolovatelné podmínky měření jsou příčinou chyb soustavných, podmínky, které nejsou pod kontrolou, pak chyb náhodných. Za stálých podmínek měření je střední hodnota souboru náhodných chyb nulová, střední hodnota soustavných chyb je pak od nuly různá. Různými způsoby korekce soustavných chyb lze docílit toho, že soustavnou chybu lze prakticky vyloučit z měření.

Náhodné chyby jsou zcela nahodilé, proto je lze zahrnout pod obecnější pojem náhodné veličiny. Výskyt hodnoty náhodné veličiny X je pak dán pravděpodobností $p(x)$.

Pro velké soubory náhodných chyb již platí statistické zákonitosti, jejichž použití umožňuje vedle určení přesnosti měření také jeho analýzu včetně případného zkvalitnění a zpřesnění měření. Vlastnosti náhodných chyb jsou dobře známy – malé chyby jsou častější než chyby velké, kladné chyby jsou stejně časté jako záporné. Statisticky zpracované soubory náhodných (případně i kvazisoustavných) chyb umožňují zavést pojem „výsledek měření nějaké veličiny“: Výsledkem měření nějaké veličiny je číselná hodnota této veličiny vhodným způsobem matematicky a statisticky zpracovaná.

Měření veličiny x přímou metodou

- Získání souboru např. 10 naměřených hodnot x_1, \dots, x_{10} .
Výpočet

$$\sum_{i=1}^{10} x_i$$

a aritmetického (výběrového) průměru.

- Určení zdánlivých chyb $\Delta_i = x_i - \bar{x}$, výpočet

$$\Delta_i^2 \text{ a } \sum_{i=1}^{10} \Delta_i^2 .$$

- Výpočet směrodatné odchylky jednoho měření

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} \Delta_i^2}{9}}$$

- Výpočet směrodatné odchylky aritmetického průměru

$$S_x^- = \frac{S_x}{\sqrt{10}}$$

- Určení krajní chyby aritmetického průměru

$$k_x^- = t \cdot S_x^- = 2,26 \cdot S_x^-$$

- V případě potřeby zjištění úplné krajní chyby

$$d_x^- = \sqrt{k_x^{-2} + m^2} = \sqrt{(2,26 \cdot S_x^-)^2 + m^2}$$

- Vymezení intervalu spolehlivosti výsledku zápisem

$$x = (\bar{x} \pm k_x^-) [x], \text{ případně } x = (\bar{x} \pm d_x^-) [x].$$

- Zjištění relativní chyby s_r a přesnosti měření pomocí chyby procentové

$$s_r = \frac{S_x^-}{\bar{x}}, \text{ přesnost měření } 100 \cdot s_r$$

3.3.2 Další metody zpracování výsledků měření

Kromě statistického zpracování výsledků měření se používají také metody početní a grafické. Jako zvláštní skupina metod se někdy uvádějí metody vyrovnávací. Obvykle tyto skupiny metod vycházejí z ekvidistantních měření (např. měříme-li veličinu x prostřednictvím měřitelného parametru a , pak hodnoty parametru a_1, a_2, a_3, \dots odpovídající hodnotám x_1, x_2, x_3, \dots vytvářejí aritmetickou posloupnost).

Početní metody zpracování výsledků měření reagují obvykle na zvláštní měřicí metody a předkládají algoritmus zpracování výsledků, který vychází ze specifika měřicí metody. Např. výsledky získané metodou postupných měření lze zpracovat obdobně nazvanou početní metodou. Mezi početní metody s obecnějším použitím patří např. metoda skupinová nebo metoda početní interpolace (řešení tvaru závislosti mezi fyzikálními veličinami, určování hodnoty veličiny ležící mezi dvěma jinými měřitelnými hodnotami apod.). Na tyto metody mohou vhodně navazovat metody regresní analýzy, které umožňují nejen odhad teoretických parametrů funkčních závislostí z empiricky zjištěných rozptýlených bodů, ale také zpětnou analýzu (z již naměřených údajů) chyb výsledků měření i parametrů funkčních závislostí. O početních metodách lze nalézt dostatečné poučení v literatuře zabývající se obecným úvodem do teorie a praxe fyzikálního měření.

Grafické metody zpracování výsledků měření vycházejí z grafického vyjadřování např. výsledků měření závislosti dvou fyzikálních veličin. Tyto metody se uplatňují i u měření neekvidistantními hodnotami nezávisle proměnné.

Mezi tyto metody patří i zásady a způsob konstrukce grafů (včetně kvalitního označování souřadnicových os) z diskrétní množiny prvků sestaveného grafu. Patří sem metody grafické interpolace (rychlejší než interpolace výpočtem, ale méně přesné), případně i grafické extrapolace.

V případě většího rozptylu naměřených hodnot je zapotřebí přistoupit k použití metod vyrovnávání jednoduchých (případně i složitějších) závislostí – z hodnot měřené veličiny zatížených chybami je určována nejpravděpodobnější hodnota. Vyrovnávací metody mohou mít podobu jak grafického vyrovnání, tak i vyrovnání početního např. metodou skupinovou. Nejvýznamnější vyrovnávací metodou je pak metoda minimalizace součtu čtverců zdánlivých chyb (odchylek od naměřených hodnot), tj. metoda nejmenších čtverců – proti skupinové metodě však vede k řešení rovnic vyšších stupňů než stupně prvního.

Podrobnější údaje o grafických a vyrovnávacích metodách lze opět nalézt ve snadno dostupné literatuře.

3.4 Pracovní etapy fyzikálního měření a jejich organizace

Průběh fyzikálního měření lze rozčlenit na několik pracovních etap. V průběhu celého měření v rámci dané laboratorní úlohy je nezbytné dodržovat základní organizační a řídicí směrnici, kterou je řád fyzikálního praktika. Stejně tak je nezbytné brát ve všech pracovních etapách měření v úvahu způsob výpovědi o studentově práci – laboratorní protokol a formu jeho zpracování.

3.4.1 Vymezení pracovních etap

Průběh fyzikálního měření lze rozdělit do tří pracovních etap – příprava měření, vlastní měření a zpracování výsledků.

V rámci přípravy měření je zapotřebí splnit následující kroky:

- seznámit se s názvem laboratorní úlohy,
- stručně vymežit základní úkol měření a popsat měřicí (fyzikální) princip úlohy,
- seznámit se s přístroji a dalšími pomůckami potřebnými k měření,
- seznámit se (případně navrhnout) se způsobem uspořádání přístrojů a pomůcek a s jejich umístěním,
- prostudovat požadavky k přezkoušení fyzikální problematiky s využitím předepsané literatury.

Při vlastním měření je nezbytné vycházet z následujících zásad:

- vybrat vhodnou měřicí metodu, respektovat její typologické znaky a specifika,
- seznámit se (případně navrhnout) s měřicím postupem jako konkretizací zvolené měřicí metody, v rámci vybraného postupu vycházet z odpovídajících forem zápisu vlastního průběhu měření,
- dodržovat jednotlivé fáze měřicího postupu s důsledným respektováním zásad bezpečnosti práce a ochrany zdraví (zvláště při práci s elektrickým proudem, chemikáliemi a jadernými zářiči).

Při zpracování výsledků měření je potřebné vycházet:

- ze stanovených statistických metod zpracování výsledků měření,
- ze stanovených početních metod zpracování výsledků měření,
- ze stanovených grafických metod zpracování výsledků měření.

Důležitou součástí zpracování výsledků měření je jejich vyhodnocení z těchto zorných úhlů:

- srovnání zpracovaných výsledků s tabulkovými a jinými ověřujícími hodnotami,
- vyhodnocení přesnosti měření,
- význam laboratorní úlohy z pohledu radiologické fyziky (se zvláštním zřetelem na studovaný radiologický obor),
- význam laboratorní úlohy z pohledu studijní látky předmětu Praktikum z radiologické fyziky.

Dodržení posloupnosti pracovních etap fyzikálního měření je jedním z předpokladů splněné podmínky exaktnosti měření – měření je považováno za exaktní, je-li provedeno vhodnou metodou na vhodných přístrojích a je-li výsledek správně odvozen z měření a vyjádřen se známou přesností v jednotkách jednoznačně definovaných (podmínka exaktnosti převzata podle Horák, Z.: Praktická fyzika, SPN, Praha, 1953).

Na přehled a popis pracovních etap úzce navazuje řád fyzikálního praktika a základní údaje a pokyny pro zpracování protokolu laboratorního měření.

3.4.2. Pokyny k vypracování protokolu

1. Osnova přípravy na měření

- Jméno, studijní skupina, datum měření
- Název a číslo laboratorní úlohy
- Měřicí princip úlohy
- Přístroje a pomůcky potřebné k měření
- Měřicí postup
- Tabulky, schémata
- Tabulkové hodnoty měřených veličin

2. Osnova protokolu

- Název laboratorní úlohy
- Měřicí princip úlohy, základní vztahy, význam používaných symbolů
- Přístroje a pomůcky k měření
- Schémata zapojení
- Měřicí metoda a postup měření
- Tabulky naměřených hodnot

- Zpracování výsledků měření
- Vyhodnocení výsledků měření; srovnání s tabulkovými hodnotami nebo s výsledky měření získanými jinými metodami; zhodnocení přesnosti měření na základě relativní chyby, případně odhadem úplné krajní chyby – krajní chyby aritmetického průměru
- Literatura

Kontrolní otázky:

- 1) Co je to fyzikální veličina
- 2) Které metrologické rovnice jsou spojeny s pojmem fyzikální veličiny
- 3) Popište skupiny fyzikálních veličin
- 4) Co je to měřicí princip, metoda a postup, co je to měřicí prostředek
- 5) Popište statistické zpracování výsledků měření přímou metodou
- 6) Popište početní a grafické metody zpracování výsledků měření
- 7) Popište pracovní etapy fyzikálního měření

4. Východiska fyzikálního měření - praxe

Klíčová slova: Studium fotoelektrického jevu, Měření Planckovy konstanty, Ověření statistického charakteru rozpadového zákona, Zkoumání vlastností Geigerova-Müllerova detektoru

- 4.1. Studium fotoelektrického jevu. Stanovení Planckovy konstanty (viz uvedená literatura)
- 4.2. Ověření statistického charakteru přeměnového zákona (viz uvedená literatura)
- 4.3. Zkoumání vlastností Geigerova-Müllerova detektoru (viz uvedená literatura)

Kontrolní otázky:

- 1) Jaký je měřicí princip, metoda a postup úlohy 4.1
- 2) Jaký je měřicí princip, metoda a postup úlohy 4.2
- 3) Jaký je měřicí princip, metoda a postup úlohy 4.3
- 4) Jaké jsou metody zpracování výsledků u úlohy 4.1
- 5) Jaké jsou metody zpracování výsledků u úlohy 4.2
- 6) Jaké jsou metody zpracování výsledků u úlohy 4.3

5. Etapy statistického zpracování výsledků měření

Klíčová slova: Formulace statistického šetření, Škálování, Měření, Elementární statistické zpracování, Neparametrické testování

- 5.1 Formulace statistického šetření (viz uvedená literatura)
- 5.2 Škálování (viz uvedená literatura)
- 5.3 Měření (viz uvedená literatura)
- 5.4 Elementární statistické zpracování (viz uvedená literatura)
 - 5.4.1 Tabulka
 - 5.4.2 Empirické rozdělení četností
 - 5.4.3 Empirické parametry
 - 5.4.4 Ilustrace výpočtu empirických parametrů
- 5.5 Přiřazení teoretického rozdělení rozdělení empirickému (viz uvedená literatura)
 - 5.5.1 Intervalové rozdělení četností
 - 5.5.2 Teoretické rozdělení
 - 5.5.3 Aparát neparametrického testování
 - 5.5.4 Ilustrace neparametrického testování
- 5.6. Přehled úloh praktika z radiologické fyziky (viz uvedená literatura)

Kontrolní otázky:

- 1) Co je to formulace statistického šetření
- 2) Co je to škálování
- 3) Co je to měření
- 4) Co je to elementární statistické zpracování
- 5) Jak je definován obecný moment 1.řádu, centrální moment 2.řádu, normované momenty 3. a 4.řádu
- 6) Popište přiřazení teoretického rozdělení rozdělení empirickému (viz uvedená literatura)

Literatura:

Záškodný,P.: Přehled základů teoretické fyziky (s aplikací na radiologii).

Didaktis, Bratislava, 2005

Záškodný,P.: Survey of Principles of Theoretical Physics (with application to radiology). Algoritmus, Avenir Foundation, 2006

Kozlovská,D., Skalická,Z., Záškodný,P.: Úvod do praktika z radiologické fyziky. JU, České Budějovice, 2005