

6. Úlohy z jaderné a atomové fyziky

Praktikum jaderné a atomové fyziky je věnováno základním experimentům se zdroji radioaktivního záření, které poskytnou dobrou představu o vlastnostech ionizujícího záření, jak se šíří materiálem, jak jej lze odstínit a experimentálně si ověříme schopnost beta a gama částic rozptylovat se na atomech pevné látky a jejich chování v magnetickém poli. V první úloze zopakujeme slavný Rutherfordův experiment, kterým byla dokázána existence kladně nabitého jádra atomu. Budeme se také věnovat spektroskopii alfa záření a ověříme si, zda spektrum alfa zářiče je skutečně diskrétní.

Důležitou součástí je také spektroskopie gama záření, kde si jednak experimentálně ověříme, jaká je závislost účinných průřezů pro fotoefekt a Comptonův rozptyl na energii gama kvant a jednak zjistíme jak je gama záření absorbováno v závislosti na hustotě, tloušťce nebo protonovém čísle absorbujícího materiálu. V neposlední řadě se seznámíme se základy detekce ionizujícího záření, máme k dispozici polovodičové bariérové detektory, scintilátor a Geiger- Müllerovu trubici.

Úkolem praktika je podat studentům základy experimentální atomové a jaderné fyziky a seznámit je ve skutečnosti s jevy, které znají z předchozí teoretické přednášky.

6.1. Studium Rutherfordova rozptylu na zlaté a hliníkové fólii

V této úloze provedeme dnes již klasický experiment, na jehož základě bylo objeveno atomové jádro. Rutherford realizoval pokus, v němž byl zdroj nabitých částic alfa (jádra helia ${}^4_2\text{He}$) umístěn před zlatou fólií a studoval počet registrovaných částic, které fólií prošly a jejich úhlové rozložení. Výsledek byl neočekávaný, neboť se předpokládalo, že kladná hmota jádra je rozmístěna po celém atomu rovnoměrně, tudíž odklon kladných částic procházejících takovými atomy bude jen nepatrný. Kladná částice bude odpuzována kladným nábojem rovnoměrně rozloženým v celém atomu do mnoha směrů a statisticky bude průměrná odchylka od původního směru velmi malá. Ukázalo se však, že bylo možno registrovat nabitě částice odkloněné pod velkými úhly a dokonce i částice zpětně odražené a rovněž četnosti měřených částic neodpovídaly tehdejší představě o skladbě atomu. Proto se přiklonil Rutherford k myšlence, že jádro je jen velmi malá část atomu, kde je soustředěn veškerý kladný náboj atomu a jehož velikost je o několik řádů menší, než rozměr atomu. Vztah a souvislost velikosti rozptylového úhlu a počtu částic alfa, které se do tohoto úhlu rozptýlí při průchodu kovovou fólií, byl předmětem studia Rutherforda již na počátku minulého století. V této úloze zopakujeme tento Rutherfordův pokus ve zjednodušeném uspořádání.

Pro detekci nabitých alfa částic, které jsou produkovány alfa-zářičem americiem ^{241}Am , používáme polovodičové detektory. Pro zajištění největší možné statistiky měření používáme geometrii pokusu takovou, jaká je uvedena na obrázku 6.1. Je možno měnit polohu fólie podél axiální osy (osa vakuového válce) a tudíž měnit rozptylový úhel měření.

K dispozici jsou dvě tenké kovové fólie zlatá a hliníková, které umožní studovat vliv rozptylového materiálu na počet rozptýlených nabitých alfa částic v daném rozptylovém úhlu.

Prostudujte



ÚLEHLA, I., SUK, M., TRKA, Z. Atomy, jádra, částice, Akademia, 1990

Princip měření

Rutherfordova teorie rozptylu nabitých částic je založena na následujících předpokladech: Hmota atomu je koncentrována v jádře, které lze považovat za bodové rozptylové centrum a jeho rozměry mohou být zanedbány vzhledem k velikosti atomu jako celku. Jádro nese kladný náboj a je tudíž obklopeno elektrostatickým polem, jehož účinek se snižuje se čtvercem vzdálenosti. Alfa částice nesoucí kladný náboj o velikosti 2^+ je odkloněna v tomto elektrostatickém poli jádra a pohybuje se tedy po hyperbolické trajektorii. Počet částic alfa $\Delta n(\theta)$ rozptýlených pod úhlem θ v prostorovém úhlu $\Delta\Omega$ splňuje Rutherfordův vztah pro rozptyl alfa částice

$$\Delta n(\theta) = n \cdot N \cdot d_F \cdot \frac{1}{4} \left(\frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 2E_\alpha} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}, \quad (1)$$

kde:

n je celkový počet dopadajících alfa částic,

N je koncentrace atomů v použité fólii,

d_F je tloušťka fólie,

Z je náboj jádra rozptylového atomu, z něhož je vyrobena fólie,

E_α je energie alfa částice,

e je elementární náboj elektronu $-1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$,

ϵ_0 je permitivita vakua, konstanta $8,8524 \cdot 10^{-12} \text{ C} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Celkový počet částic n dopadajících na kovovou fólii lze vyjádřit vztahem

$$n = \frac{Q}{4\pi \cdot r_1^2} \cdot A_F,$$

kde:

A_F je plocha fólie ozářená alfa částicemi,

Q je aktivita zdroje alfa částic americia ^{241}Am ,

r_1 je vzdálenost zdroje alfa částic od kovové fólie.

Předpokládejme, že zdroj alfa částic je bodový a zanedbáváme tak velikost okénka, ze kterého vyletují alfa částice vůči vzdálenosti mezi zdrojem a detektorem. Prostorový úhel, ve kterém se rozptylují alfa částice, je definován vzdáleností r_2 mezi fólií a detektorem, po které se pohybuje alfa částice viz obr. 6.1, a aktivní plochou detektoru A_D

$$d\Omega = \frac{A_D}{r_2^2}.$$

Zahrneme-li výše uvedená vyjádření do původního vztahu pro počet částic $\Delta n(\theta)$ (1), dostáváme následující vyjádření

$$\Delta n(\theta) = \left(\frac{Q \cdot A_F \cdot d_F \cdot A_D}{4\pi r_1^2 \cdot r_2^2} \right) \cdot S \cdot \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}, \quad (2)$$

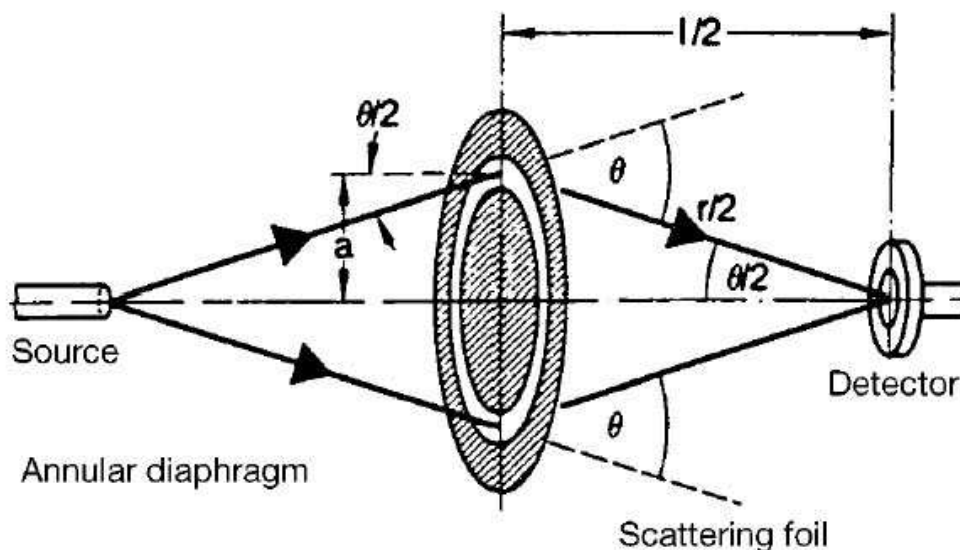
kde jako S je označena veličina

$$S = N \cdot \frac{1}{4} \left(\frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 2E_\alpha} \right)^2.$$

Z důvodu bezpečnostních opatření je aktivita zdroje alfa částic omezena na 370 kBq. Fólie je posuvná podél centrální osy, proto rozptylový úhel θ můžeme měnit pomocí posuvu fólie nebo detektoru. Fólie je vždy umístěna centrálně mezi zdrojem a detektorem, takže rozptylový úhel je dán následujícím vztahem

$$\theta = 2 \arctan \frac{2a}{l},$$

a je poloměr fólie a l je vzdálenost zdroje alfa částic a detektoru, kterou odměříme na skleněném vakuovém válci opatřeným měřítkem.



Obr. 6.1: Schéma uspořádání experimentu – geometrie zdroje (vlevo), fólie (uprostřed) a detektoru (vpravo)

Dále ve vztahu (2) nahradíme účinnou plochu detektoru A_D projekcí této plochy do směru přicházejících alfa částic A'_D , a dále nahradíme tloušťku fólie d_F opět projekcí této tloušťky do směru letu alfa částice d'_F

$$A'_D = A_D \cdot \cos \frac{\theta}{2}, \quad d'_F = \frac{d_F}{\cos \frac{\theta}{2}}.$$

Stejně tak nahradíme ozářenou plochu fólie A_F efektivní plochou A'_F a vzdálenost $r_1 = r_2$ je nahrazena $r/2$

$$A'_F = A_F \cdot \cos \frac{\theta}{2}.$$

Výše uvedené úpravy souvisí s faktem, že fólie je připevněná na kovové kruhové ploše, v níž je vyříznut otvor viz. obrázek 6.1., který determinuje určitou část prostorového úhlu, ze kterého jsou detekovány částice detektorem. Musíme tedy brát v úvahu nikoli celou aktivní plochu detektoru a aktivní plochu fólie, ale jejich efektivní části. Současně vezmeme v úvahu vztah pro rozptylový úhel

$$\sin \frac{\theta}{2} = \frac{2a}{r},$$

a pro poslední člen ve vztahu (2) tak můžeme psát

$$\frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} = \frac{r^4}{16a^4},$$

Vezmeme-li v úvahu výše uvedené změny a vztah (3) viz. Obr. 6.1, pak se vztah (1) zjednodušuje na následující:

$$\Delta n(\theta) = \frac{Q \cdot A_F \cdot d_F \cdot A_D}{4\pi a^4} \cdot S \cdot \cos \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

Q	$370 \text{ kBq} = 2,22 \cdot 10^7 \text{ min}^{-1}$	N_{Au}	$5,9 \cdot 10^{28} \text{ atomů/m}^3$
A_F	$6 \text{ cm}^2 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	Z_{Au}	79
d_{FAu}	$0,8 \text{ } \mu\text{m}$	Z_A	13
d_{FAl}	$8,0 \text{ } \mu\text{m}$	e	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
A_D	50 mm^2	ϵ_0	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
a	2 cm	E_α	$5,4 \text{ MeV} = 8,65 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

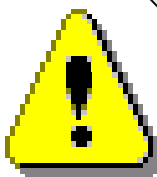
Úkoly

1. Zjednodušte vztah (3) pro závislost počtu rozptýlených částic na rozptylovém úhlu $\Delta n(\theta)$ pro hliník a zlato dosazením všech číselných hodnot uvedených na konci teoretické části tak, aby se na pravé straně vztahu nacházela pouze proměnná rozptylového úhlu θ . (Spočítejte hodnotu N_{Al}).
2. Změřte počet alfa částic $\Delta n(\theta)$ dopadající za minutu do detektoru pro vzdálenosti detektoru a zdroje $l = 4, 6, 10, 16, 22 \text{ cm}$ a graficky znázorněte závislost četnosti měřených alfa částic na vzdálenosti detektoru od zářiče s vynesemím směrodatných odchylek měření. Jaký odhadujete dolet alfa částic z radioaktivního zdroje ve vzduchu? (Použijte empirický vztah pro dolet $R = 0,318 \cdot E_k^{3/2}$ a srovnajte s měřením ve vakuu – vztah platí pro R v cm a E_α v MeV).
3. Změřte závislost počtu rozptýlených alfa částic $\Delta n(\theta)$ za minutu na vzdálenosti l tedy na změně rozptylového úhlu θ . Pro rozptylový experiment použijte zlatou fólii a vzdálenosti $l = 4, 6, 8, 10, 12, 16 \text{ cm}$. Vyneste do grafu a srovnajte s teoretickými hodnotami určenými pomocí vztahu z úkolu 1.
4. Odvoďte z (3) vztah mezi četností dopadajících alfa částic $\Delta n(\theta)$ a veličinou $d_F \cdot Z^2$ pro $l = 10 \text{ cm}$ a číselně stanovte veličinu $d_F \cdot Z^2$, což je součin protonového čísla prvku, ze kterého je zhotovena fólie a tloušťky fólie. d_F pro zlato je $0,8 \text{ } \mu\text{m}$ a pro hliník $8 \text{ } \mu\text{m}$.
5. Nakreslete graf závislosti naměřené četnosti dopadajících alfa částic $\Delta n(\theta)$ pro $l = 10 \text{ cm}$ z úkolu 4. na veličině $d_F \cdot Z^2$, srovnajte s teoretickými hodnotami $\Delta n(\theta)$ určené vztahem odvozeným v úkolu 5.

Potřeby

Vakuová komůrka – skleněný válec, polovodičový detektor, předzesilovač pro alfa detektor, analyzátor výšky pulsů, Geigerův čítač, zdroj alfa částic – americium ^{241}Am , zlatá (0,8 μm silná) a hliníková (8 μm silná) fólie, U magnet, vakuová rotační pumpa, vakuová měrka, vakuové hadice a propojovací kabely pro elektroniku.

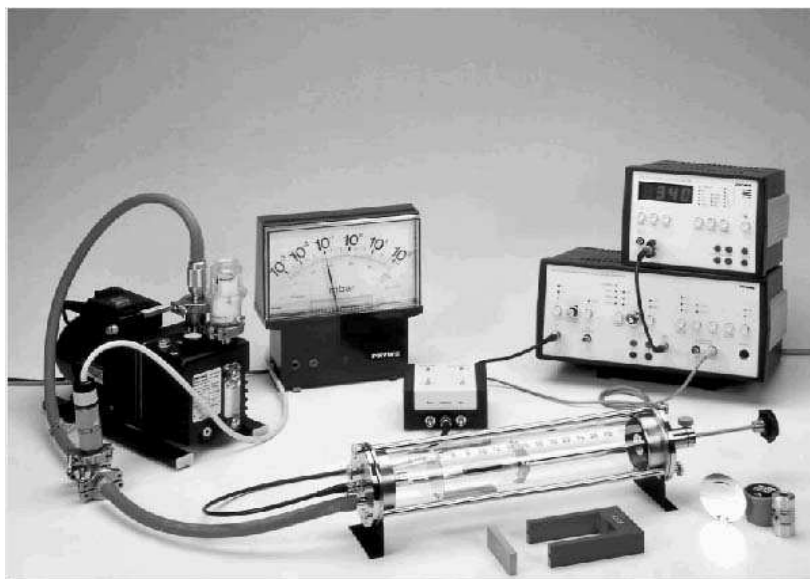
Upozornění



Všechno výše uvedené vybavení je velmi citlivé k nárazům (vakuová měrka, polovodičový detektor, skleněný vakuový válec), k poškození a protržení (skleněný vakuový válec, tenké kovové fólie, skleněná výplň měřiče vakua) nebo se jedná o radioaktivní zdroje ^{241}Am . Se všemi těmito částmi zacházejte s nejvyšší opatrností! Při vypnutí rotační pumpy musí být uzavřen ventil oddělující rotační vakuovou pumpu od vakuového skleněného válce, aby nedošlo ke styku detektoru a vnitřku válce s olejovými parami! Před započítáním měření a otevřením ventilu k rotační pumpě vždy kontaktujte dozor!

Postup měření

1. Celkové uspořádání experimentu, viz obr. 6.2 je pevné s tím, že vzdálenost detektoru a zdroje záření bude třeba měnit. Analyzátor výšky pulsů by měl být vypnutý vždy, když neměříme, nebo není detektor ve vakuu.



Obr. 6.2: Celkové uspořádání experimentu

2. Nejdříve připravte fólii na danou vzdálenost dovnitř skleněného válce. Poté vyčerpajte vakuový válec na cca 0,5 hPa a uzavřete ventil umístěný mezi válcem a rotační pumpou.

Nikdy nevypínejte pumpu bez uzavření tohoto ventilu. Budete pozorovat zhoršování vakua kvůli netěsnostem systému, ale lze měřit i při hodnotě 2 hPa, kdy by se pokles vakua měl zastavit.

3. Zapnutím analyzátoru velikosti pulsů přivedete napětí na detektor. Vyberte volbu *Integral*. Uvolněte tlačítko *Auto/Man* pro manuální operace. Nastavte napětí na 0,5 V tlačítkem *Base*.
4. Vzdálenost měňte od 4 do 22 cm, tj. změna úhlu od 20 do 90°. K měření použijte na čítači volbu čas nekonečno a dále použijte stopky. Měření pozastavte stiskem *Start* a *Stop* a současně pozastavíte čas na stopkách. Veškeré zapínání elektrických přístrojů, jiskrového výboje, mobilních telefonů atd. vnáší do měření velký šum, který znehodnocuje měření, proto pro tyto případy měření pozastavujte.
5. Po měření vypněte analyzátor pulsů, uzavřete ventil spojující vakuovou komoru a rotační pumpu a napouštěcím ventilem na těle vakuového válce napusťte prostor válce.
6. Zaměňte zlatou a hliníkovou fólii a vraťte se k prvnímu bodu.

Kontrolní otázky



1. Jak je ovlivněna přesnost měření počtu rozptýlených alfa částic kvalitou používané kovové fólie?
2. Jak je ovlivněna četnost zaregistrovaných alfa částic v závislosti na tlaku ve skleněném válci při měření?

Chyby měření

Při posuzování správnosti výsledků je třeba vzít v úvahu, že naše výpočty jsou značně zjednodušené, proto teoretický výsledek se v absolutní hodnotě může výrazně od experimentu lišit. Je to důsledek mnoha faktorů, např. zdroj alfa částic není ideálně bodový zdroj a produkuje ne striktně monochromatické (monoenergetické) alfa částice. Při snižování rozptylového úhlu se rovněž zvětšuje pravděpodobnost vícenásobných rozptylů alfa, což opět může mít vliv na statistiku měření. Důležitá jsou srovnání tendence změny absolutních hodnot měřených a experimentálních tak, abychom ověřili platnost Rutherfordova vztahu.

Chcete vědět více?



Chcete-li vědět více o přirozených radioaktivních zdrojích podívejte se na <http://physics.isu.edu/radinf/natural.htm>

Chcete-li vědět k čemu se v praxi využívá Rutherfordova rozptylu podívejte se na <http://omega.ujf.cas.cz/vdg>