

Vilém Santholzer

Význam vlnové mechaniky pro teorie radioaktivního záření

Časopis pro pěstování matematiky a fysiky, Vol. 61 (1932), No. 4, 189--198

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/121316>

Terms of use:

© Union of Czech Mathematicians and Physicists, 1932

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Význam vlnové mechaniky pro teorie radioaktivního záření.

Referuje V. Santholzer.

(Došlo 20. května 1931.)

1. Primární druhy radioaktivního záření pocházejí z atomových jader. Stav názorů o atomovém jádře má tudíž vliv na teorie radioaktivního záření, zejména na teorie jeho vzniku.

Jaké jsou dnes dobře pokusně zajištěné poznatky o atomovém jádře? Od prací Rutherfordových a od jeho pokusů o průchodu radioaktivního záření alfa hmotou (kol r. 1910) byl navržen jádrový model atomu. Od té doby zabývá se však fyzikální badání hlavně světem vnějších elektronů kolem jádra kroužících. Bohr a jeho škola provádějí zde pomocí teorie kvant základní práce, které novými mechanikami (Heisenberg, Schrödinger) jsou vyvrcholeny ve skutečné „mikromechaniky“ světa vnějších elektronů.

Současně však pokusná fyzika — možno říci — vlastně jen sbírá velký materiál o samotném atomovém jádře. Mezi fysiky vyskytují se mnohé spekulativní mozky, které se snaží z dosavadních dat pokusného rázu vybudovati teorii struktury atomových jader. Pokusná fakta však tvrdošíjně odolávají teoretickému výkladu, mnohdy vzbuzují přímo dojem záhadnosti. Teprve nová vlnová mechanika v poslední době správně klasifikuje jednotlivá fakta a daří se jí jakési modely jádra, ovšem dosud značně hrubé a předběžné. Nové práce vlnové mechaniky o atomovém jádře nezůstaly ovšem bez hlubokého vlivu na teorie radioaktivního záření. Vlnová mechanika konečně také poodhrnuje roušku ze záhadnosti vzniku radioaktivního záření z jeho mateřských jader.

2. Než si uvědomíme důležitost a výhodu vlnové mechaniky pro teorie radioaktivního záření, přehlédneme si stručně různé paradóxní rozpory a nesrovnalosti, které před zavedením vlnové mechaniky vznikaly hromaděním pokusného materiálu o jádře po stránce radiologické.

R. 1923 prohlásila berlínská badatelka Meitnerová, že t. zv. magnetická spektra gamma záření (vlastně magnetická spektra sekundárního beta záření vzbuzeného gamma zářením jádra v oblasti vnějších elektronů, viz obr. 1), která vznikají rozložením záření velmi silným magnetickým polem, mají pro poznání struktury atomového jádra též význam, jako spektra optická a fakta röntgenspektroskopická pro poznání oblasti vnějších elektronů. Stejně cíle sledují od té doby také cambridgští fyzikové Ellis a Skinner. Od r. 1923 až dodnes prostudována fotografickou cestou spousta magnetických spekter. Usilováno o teorii energetických hladin v jádře atomu na základě polohy čar v magnetických spektrech. Toto úsilí mělo však až dosud jen skromné výsledky, a to ještě více rázu schematického. Neúspěchy podobných metod záleží pravděpodobně v tom, že radioaktivní prvky mají těžká



Obr. 1.

Magnetické spektrum sekundárního beta záření, vznikajícího v oblasti elektronů čnějším účinkem gama záření jádra. (Podle L. Meitnerové.)

jádra a tudíž asi hodně složitá, než aby jejich vnitřní strukturu bylo možno vyspekulovati z tak poměrně skromných náznaků, jakými jsou magnetická spektra. Předpokládáme-li, že nejzákladnějšími stavebními kameny jádra jsou protony (jádra vodíková) a elektrony, pak na př. jádro atomu prvku radia musí se skládati z 226 protonů a 138 elektronů. (V jádře je vždy tolik elektronů, kolik činí přebytek kladného náboje protonů, který musí býti neutralisován: počet elektronů = atomová váha minus řadové číslo prvku.) Jádro atomu prvku radia skládá se tedy z 364 částic, zatím co největší počet elektronů vnějších je 92 (prvek uran). Jaké silové zákony ovládají tak veliký počet částíček v oblasti tak nepatrných prostorových dimensí (řádu 10^{-12} cm), to zůstává stále záhadou.

Ze zjevů isotopie prvků ze zjevů radioaktivního záření a z t. zv. rozbíjecích pokusů, můžeme pokládati za prokázané, že vodíkový atom (proton) a elektron jsou základní stavební kameny jader atomů všech prvků. Radioaktivita mimo to dokazuje, že také jádra heliová jsou součástí jader atomů. Alfa částice jsou jádra heliová, vymrštěvaná obrovskými rychlostmi z jader atomů radioaktivních prvků. Je to zvláště stabilní konglomerát čtyř protonů a dvou elektronů (hmota = 4, náboj = + 2). Poměrně veliký

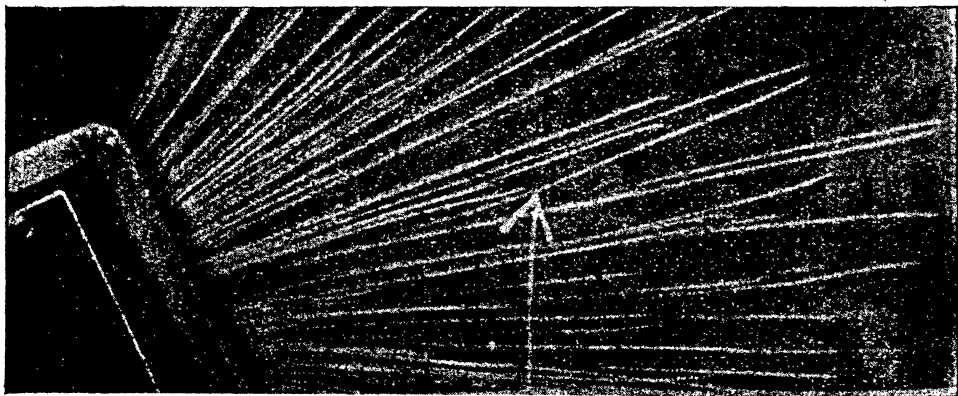
„hmotný defekt“ alfa částice vysvětluje fakt, že alfa částice neztrácí v jádře svoji individualitu. To vše je v soulase s vynikající rolí alfa částice jakožto stavebního kamene jader prvků, také ovšem prvků lehčích, než jsou prvky radioaktivní. Vskutku také vyskytuje se mnoho prvků a isotopů, jejichž atom. váha je dělitelná čtyřmi. Podle výzkumů Harkinsových (z r. 1923) skládají tyto prvky dokonce 91% veškeré známé hmoty.

Radioaktivita prvků nám poukázala nejen na „úlomky“ jádra, avšak také na enormní silová pole rozkládající se v těsné blízkosti jádra. A zde jsme vlastně u největší záhady moderní atomistiky. Radioaktivní záření je dnes jediným prostředkem, kterým je možno prováděti sondáže v těchto silových polích jádra. Jedině radioaktivní alfa částičky mají dostatečně velkou energii koncentrovanou na nepatrnou hmotu, která jim umožňuje proniknouti enormně silným elektrostatickým polem jádra a dostat se tak do těsné blízkosti cizího jádra. Bombardováním různých prvků alfa zářením bylo dokonce docíleno rozbití jádra atomů dotyčného prvku a tudíž rozbití prvků. Účinkem nárazu alfa částice vyletují z rozbitých jader protony. (Neznáme dnes zatím nějakého umělého prostředku, kterým bychom mohli provésti rozbití atomu; pouze úsilí o výrobu umělého radioaktivního záření má zde velké vyhlídky do budoucnosti.)

Z rozbíjecích pokusů vznikla v r. 1925 t. zv. *satelitová hypotéza* o jádře (Rutherford). Vídeňští badatelé v čele s Kirschem a Petterssonem prohlásili na základě svých (do jisté míry odchýlných) výsledků rozbití prvků t. zv. *explosivní hypotézu* o jádře. Obě hypotézy jsou však jen ryze pracovní. Je konec konců jedno, dívá-li se Rutherford na rozbití atomu jako na amputaci jednoho protonu od jádra, kterýžto proton krouží jako družice (satelit) kolem jádra, nebo pokládá-li Kirsch rozbití atomu za výbuch jádra, doprovázený vymrštěním protonu. Obě hypotézy neříkají ničeho o mechanismu, kterým se řídí mikrokosmos jádra v okamžiku rozbití.

3. Při průchodu alfa částic hmotou nastává mnohem častěji než rozbití atomu pouhý *rozptyl* alfa částic, jevíci se jako náhlé úchylky drah alfa částic od původního směru. Některé alfa částice při letu hmotou ocitají se náhodně v těsnější blízkosti jader atomů, které na ně účinkují svým silovým polem. Tak se uchylují alfa částice z původního směru (obr. 2). Klasický vzorec Rutherfordův pro rozptyl alfa částic byl odvozen za předpokladu, že jádro atomu (kolem kterého kladně nabitá alfa částice proletuje) je bodový náboj velikosti $+Ze$ (kde Z = řadové číslo prvku v periodické soustavě, e = náboj elektronu); týž vzorec podává i moderní kvantová mechanika (Born, Wentzel, Gordon, 1926—1928). Elektrostatický přitažlivý účinek oblasti vnějších

elektronů na alfa částici je možno při tom zanedbati nejen klasicky, ale také při kvantovém způsobu počítání. Experimentálně byly obě teorie uspokojivě potvrzeny průchodem alfa záření *těžkými* kovy (folie Au, Ag). Tak na př. již r. 1920 ověřil Chadwick teorii Rutherfordovu v studiu průchodu alfa záření těžkými kovy a dokázal také naopak, že řadové číslo prvku (Z) je vskutku totožné s nábojem jádra.



Obr. 2.
Rozptyl alfa záření. (Fotogr. Santholzer.)

Od r. 1924 však spolu se vzrůstajícím pokusným materiálem začínají vzrůstat také odchylky od Rutherfordovy teorie rozptylu. R. 1924 začíná Bieler prováděti svoje pokusy o průchodu alfa částic *lehkými* kovy (hliník, hořčík). Při úchylce alfa částic na jádrech lehkých kovů musí se totiž alfa částice přiblížiti do mnohem menší vzdálenosti k jádru atomu, než při stejně velké úchylce vzniklé účinkem jádra atomu kovu těžkého. Stručně řečeno, silová pole jader lehkých kovů lze alfa částicemi důkladněji sondovati než jádra kovů těžkých.

Teorie Rutherfordova předpokládala bodové náboje alfa částice i rozptylujícího jádra. Odpudivý účinek obou nábojů má probíhati podle zákona Coulombova. Byly však pozorovány odchylky od teorie tím větší, čím úhel odchýlení alfa částice od původního směru byl větší, t. j. čím těsněji se alfa částice setkala s jádrem. R. 1924 narážíme ponejprv na úchylky od zákona Coulombova v mikrokosmu.

Je nutno vzdáti se platnosti zákona Coulombova v mikrokosmu? R. 1925 snaží se ještě Pettersson vysvětliti Bielerovy pokusy v duchu teorií klasických: zákon Coulombův má podržeti

i nadále svoji platnost v mikrokosmu, nikoliv však v jednoduchém tvaru platném pro bodové náboje. Názor Petterssonův matematicky propracoval Hardmeier. Přiblížení se alfa částice k jádru lze si podle něho představovati jako přiblížení se bodového náboje ke kulovému vodiči téhož druhu náboje; ve větší vzdálenosti působí na bodový náboj sice síla odpudivá podle zákona Coulombova, v menší vzdálenosti přistupuje však k této síle ještě síla přitažlivá, vznikající indukčním účinkem náboje alfa částice na náboj jádra. V určité kritické vzdálenosti se obě síly ruší, ve vzdálenosti od jádra menší než je tato kritická vzdálenost, převládá síla přitažlivá nad odpudivou a je nepřímou úměrná s pátou mocninou vzdálenosti. — Tato teorie je kompromisem. Rutherford, Chadwick a Bieler netvoří zatím žádné teorie a prostě předpokládají, že pro dva náboje stejného znaménka v malých vzdálenostech neplatí zákon Coulombův. Oba náboje se přitahují silou nepřímou úměrnou se čtvrtou mocninou (tedy nikoliv s pátou mocninou) vzájemné vzdálenosti. Tato přitažlivá síla nám má zároveň vysvětlovati soudržnost stejně nabitých součástek atomových jader, rozložených v prostoru velmi nepatrném. Kritickou vzdálenost, v níž se odpudivost mění v přitažlivost, udává Bieler na 3.4×10^{-13} cm pro jádro hliníku a hořčíku. Na tomto místě ovšem potenciál není nulový, naopak má zde maximum. Představme si nyní, co znamená tento fakt pro teorii vzniku alfa záření. Když alfa částice vyletí z mateřského jádra radioaktivního prvku, musí míti kinetickou energii alespoň tak velikou, aby odpovídala velikosti zmíněného maximálního potenciálu. Kde je však pramen této energie? Ocítáme se opět ve slepé uličce. —

Pro potenciál atomového jádra vůči alfa částici stanoven tedy vzorec

$$U = \frac{2Ze^2}{r} - \frac{c}{r^n}. \quad (\text{kde } n > 2, \text{ stačí } n = 3, 4). \quad (1)$$

Jakékoliv klasické vysvětlení druhého členu ve vzorci (1) selhávalo, proti všem druhům výkladu bylo možno mnohé namítati. Tak na př. r. 1927 dokázal Heisenberg, že jádro helia (a tudíž také alfa částice) je bez jakéhokoliv momentu. Moment jádra musel by se totiž projevovati v pásmovém spektru heliovém. Tím také padá Enskogův model alfa částice, jehož teorie byla založena právě na existenci magnetického momentu heliového jádra.

Pokusy o rozptylu alfa částic v heliu — tedy vlastně pokusy o rozptylu alfa částic na alfa částicích — prováděné v r. 1927 (Rutherford, Chadwick) jevíly také veliké úchytky od zákona Coulombova. Na čas se stala populární Rutherfordova interpretace alfa částice jakožto rotačního elipsoidu (malá osa ve směru letu $2 \cdot 10^{-12}$ cm, velká osa $7 \cdot 10^{-13}$ cm).

4. Chtěl bych nyní upozorniti na zajímavé paradoxon, na které narážíme, užijeme-li klasických názorů na teorii vyslání alfa částic z jader atomů radioaktivních prvků.

Předpokládejme, že celá energie alfa částice E , kterou měříme mimo radioaktivní atom, pochází z odpudivého účinku atomového jádra na alfa částici podle zákona Coulombova. Energii alfa částice musí pak býti možno vyjádřiti takto

$$E = \frac{2e(Z-2)e}{r}, \quad (2)$$

kde Z je řadové číslo radioaktivního prvku, r poloměr jádra atomů dotyčného radioaktivního prvku.

Energie různých druhů alfa záření dá se vypočísti z jejich rychlostí. Tak na př. pro prvek uran dostáváme z rovnice (2) hodnotu $r = 6.4 \cdot 10^{-12}$ cm. Jádro uranu může býti sice větší, než odpovídá tomuto poloměru, avšak nikoliv menší. Pro menší poloměr vycházela by energie E větší, než jak je naměřena; pro větší poloměr pak předpokládáme, že alfa částice pochází z hlouběji položené oblasti jádra.

Všechny tyto úvahy jsou však v paradoxním rozporu s pokusy o rozptylu velmi rychlých alfa částic na uranu. Těmito pokusy bylo totiž dokázáno, že Coulombův zákon platí zcela přesně ještě do vzdálenosti $4 \cdot 10^{-12}$ cm. To znamená, že jádro uranového atomu musí býti menší než $4 \cdot 10^{-12}$ cm; podle svrchu provedené úvahy však jádro uranu nemůže býti menší než $6.4 \cdot 10^{-12}$ cm.

Rutherford hledal východisko z této diskrepance v mezích klasického způsobu vysvětlení hypotésou, podle které alfa částice jsou v jádře radioaktivního prvku neutralisovány elektrony a v tomto neutralisovaném stavu obíhají kolem jádra právě ve vzdálenosti $6.7 \cdot 10^{-12}$ cm. Před vylétnutím alfa částice z jádra spadnou elektrony nejprve na jádro, když se před tím nějakým způsobem odpoutaly od alfa částice. — Celá tato hypotéza je dosti libovolná a také není původní; již r. 1921 Meitnerová usuzovala z různých zákonitostí v rozpadových řadách radioaktivních prvků (ze sledů rozpadů: beta, beta, alfa nebo alfa, beta, beta), že v atomových jádrech jsou t. zv. neutralisované alfa částice.

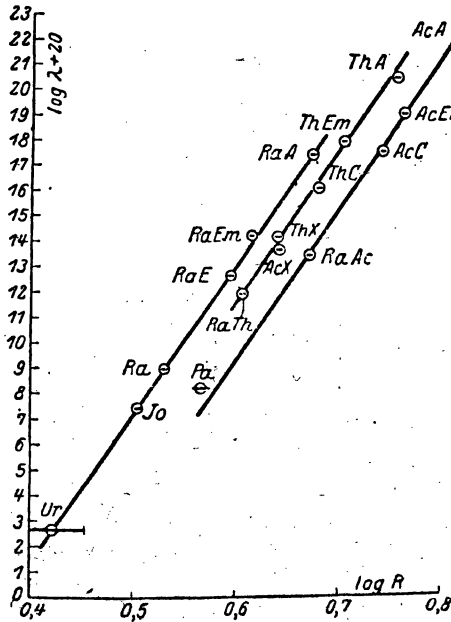
5. Teprve v l. 1928—29 podařilo se na základě nových představ *vlnové mechaniky* odstraniti všechny tyto rozpory. Na základě vlnové mechaniky tvoří Gamov, Condon a Gurney teorii jádra, která nemá obdoby ani v teorii klasické, ani ve starší teorii kvantové. Nová teorie snaží se především vysvětliti t. zv. *pravidlo Geigerovo - Nuttallovo*, které vzdorovalo až do r. 1928 jakémukoliv teoretickému výkladu. Pravidlo uvádí v souvislost rozpadovou konstantu λ radioaktivního prvku s rychlostí v alfa částic tímto prvkem vyzařovaných:

$$\log \lambda = A + B \log v, \quad (3)$$

kde A , B jsou konstanty. Je známo od r. 1912. Čím kratší dobu žije radioaktivní prvek, tím větší rychlostí vyletují jeho alfa částice. (Rozpadové konstantě je nepřímě úměrný poločas radioaktivního prvku.) Viz obr. 3.

Doběh R alfa částic je úměrný v^3 . G.-N. pravidlo lze tudíž také psát v tvaru

$$\log \lambda = A + C \log R. \quad (4)$$

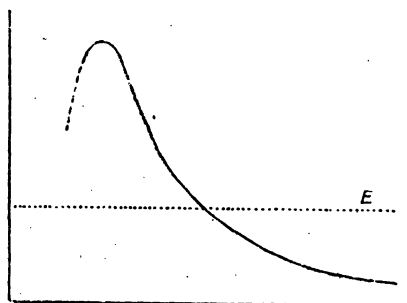


Obr. 3.
Pravidlo Geigerovo-Nuttalovo.

Známe sice některé výjimky od tohoto pravidla, na př. poločas prvku $Ra C'$ je asi 60krát menší než hodnota vypočtená z doběhu alfa záření radia C' . Pravidlo zůstává však přes to nejpodivuhodnější ze všech, které v moderní fyzice známe, neboť poločasy v něm zahrnuté jsou v poměru $1 : 10^{23}$.

Teprve vlnová mechanika objasňuje nám do jisté míry G.-N. pravidlo. Než k tomu přejdeme, ujasníme si nejprve základy kvantové teorie atomového jádra na podkladě vlnové mechaniky, tak jak se vyvíjí od r. 1928.

Zmínil jsem se již o průběhu potenciálu v okolí atomového jádra, jak se jeví z moderních pokusů o rozptylu alfa částic. (Viz obr. 4.) V duchu představ klasických nemůže se alfa částice dostat z jádra na venek. Jádro je obklopeno „hradbou“ potenciálu, potenciálním „kráterem“, jehož vrchol podle klasických představ nemůže alfa částice přeletět. Tato vysoká potenciální hradba zabraňuje právě rozběhnutí součástek jádra do světa vnějších elektronů. Spojením představy této hradby potenciálu s výsledky vlnové mechaniky vybudovali Gamov a spolupracovníci nejen teorii atomového jádra, avšak také *teorii radioaktivity*. Vlnová optika připouští odchylky od přímočarého šíření světla. Podobně



Obr. 4.

Schema „potenciální hradby“ atomového jádra.

také se stanoviska vlnové mechaniky je možno „přeskočení“ (slip out) oblasti vysoké potenciální hradby. To je názor, který je zcela protichůdný klasickým představám a zejména zmíněné explosivní hypotéze Petterssonové. Jen pro potenciální hradbu nekonečně vysokou je přeskok nemožný. Vlnová mechanika stanoví také *pravděpodobnost* pro přeskok potenciální hradby. Ta je závislá na třech veličinách: na „šířce“ a „výšce“ hradby — výška je vyjádřena určitým integrálním výrazem — a na energii částice z jádra vyletující.

Ve výrazu pro pravděpodobnost vyklouznutí částičky za potenciální hradbu je skryto již kvalitativní porozumění pravidlu Geigerovu - Nuttallovu. Pravděpodobnost je tím větší, čím je hradba nižší a užší. Radioaktivní rozpad je podle G. - N-ova pravidla tím častější (t. j. rozpadová konstanta λ tím větší), čím je energie alfa částic vyšší, čím je tedy pro alfa částice potenciální hradba nižší. Vlnová mechanika přímo „razí tunel“ v potenciální hradbě pro alfa částice mateřské jádro opouštějící.

Vlnová mechanika však dociluje i kvantitativního porozumění pravidla Geigerova - Nuttallova. Pravděpodobnost zjevu „slip

out“ závisí v podstatě na exponenciálním členu

$$e^{-4\pi d\sqrt{2m(U-E)}/h}, \quad (5)$$

kterýžto výraz platí vlastně pro t. zv. schematisovanou hradbu pravoúhelníkovou. (Pro hradbu typu potenciální jádrové hradby, tak jak ji vidíme na obr. 4, dlužno integrovati $\sqrt{2m(U-E)}$ podél šířky hradby). Výraz (5) dlužno násobiti ještě jistým členem, abychom dostali zmíněnou pravděpodobnost. Tento člen je však přibližně velikosti jedničky.

Zde přicházíme konečně ke kvantitativnímu výkladu G. - N. pravidla.

Rozpadové konstanty a tudíž také poločasy mění se ve velmi širokých mezích. Známe radioaktivní prvky o poločasech obnášejících zlomky vteřiny, avšak také miliony let. Počáteční rychlost alfa částic nemění se však ani v poměru 1 : 2! Teoreticky musíme obdržeti rozpadovou konstantu, když zmíněnou pravděpodobnost násobíme frekvencí oběhu alfa částice v jádře.*) Tu stanovíme snadno za předpokladu, že se alfa částice pohybuje kol jádra periodicky s rychlostí v , kterou měříme v makrokosmu. Rozpadová konstanta závisí tedy na exponenciálním výrazu (5). Z vlastností tohoto výrazu je zřejmé, že malá změna v mocniteli (t. j. malá změna E , rychlosti alfa částic) působí velkou změnu celého výrazu a tudíž také rozpadové konstanty. To odpovídá faktu, že malé změně rychlosti alfa částic odpovídá veliká změna poločasu.

Exponenciální výraz je větší pro větší energii E . Čím je tedy energie E větší, tím je rozpadová konstanta větší a poločas dotyčného prvku kratší. Fakt, dobře známý z Geigerova - Nuttallova pravidla.

Přesný výpočet ukazuje, že exponenciální výraz (5) nezávisí prakticky na tom, jak probíhá neznámá část potenciální křivky (křivky průběhu potenciálu v okolí jádra v závislosti na vzdálenosti od jádra). Stačí, když máme část této křivky, probíhající podle zákona Coulombova.

Exaktní řešení všech těchto otázek podává Houtermans (viz Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, 1930). Pro jednoduchost omezuje se Houtermans na jednorozměrnou dvojitou potenciální hradbu — alfa částice je totiž uvnitř jádra a „s obou stran“ je uzavřena potenciální hradbou. Poněkud odchylný způsob řešení podal Laue a Gamov. V citované práci Houtermansově dozví se čtenář z ryze matematického hlediska podrobnosti otázky.

*) Frekvencí ω oběhu alfa částice kolem jádra rozumíme poměr rychlosti alfa částice (tak jak ji měříme mimo radioaktivní atom) a polooměru jádra dotyčného radioaktivního atomu. Pravděpodobnost zjevu „slip out“ je dána poměrem rozpadové konstanty a frekvence oběhu alfa částice ($= dN/dt : \omega N = \lambda N : \omega N = \lambda : \omega$).

V ní je také úplný seznam literatury na který — vzhledem k jeho rozsáhlosti — odkazují čtenáře, hodlajícího proniknouti do podrobností otázek zde nastíněných.

Zatím jsme měli na zřeteli vznik alfa záření z jádra atomů. Mnohem větší obtíže však jsou s vysvětlením vzniku *záření beta a gamma*. Zde zatím i vlnová mechanika selhává. Také v teorii „rozbití jádra“ a v teorii t. zv. rezonančního rozbití jádra jsou mnohé nesrovnalosti, ba přímo rozpory. Nejnověji objevená „jemná struktura“ alfa záření odolává také řádnému teoretickému výkladu. A tak stále ještě zůstáváme jen na prahu poznání pravé podstaty a struktury atomového jádra!
