

# Od objevu atomového jádra k jeho proton-neutronové struktuře

---

ALEŠ LACINA

Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Rutherfordovo experimentální zjištění, že atom sestává z relativně rozlehlého souboru lehkých elektronů nacházejícího se v přitažlivém kulombovském poli velmi malého těžkého jádra bylo mezníkem, který rozdělil další **studium atomu do dvou hlavních směrů**:

Na počátku jednoho z nich stála záhada stability tak nerovnoměrného rozložení hmoty a náboje. Snaha o její vyřešení vedla od přirozeně se nabízející, avšak fyzikálně neudržitelné, planetární představy o atomu přes axiomatický – jako celek logicky nekonzistentní – Bohrov model a jeho Sommerfeldovo zobecnění k nejprve jen částečně úspěšnému a fyzikálně nepříliš uspokojivému popisu elektronového obalu atomu. Tato obtížná tematika (spolu s navazující problematikou vzájemných interakcí různých atomů) se stala nejen těžištěm relativně samostatné části fyziky – **fyziky atomové**, ale i inspirací obecněji koncipovaných teoretických úvah o vlastnostech mikroobjektů (de Broglie, Schrödinger, Heisenberg a další), na jejichž základě byla vybudována současná teorie mikrosvětla – **kvantová fyzika**.

Srovnatelný vědecký zájem ovšem vzbudilo hned po svém objevu také samo atomové jádro. Jako zdroj sil držících celý atom pohromadě totiž především určuje svým nábojem počet obalových elektronů v atomu a tak fakticky do značné míry determinuje i jeho celkové vlastnosti, včetně chemické identity. A přestože se ukázalo, že pro většinu problémů atomové fyziky lze jádro považovat za nehybný bodový náboj, bylo od samého počátku nanejvýš žádoucí podrobněji prozkoumat jeho další vlastnosti a případnou vnitřní strukturu. Systematickou činností v této oblasti – ve své první etapě převážně experimentální – pak vznikla druhá víceméně samostatná fyzikální disciplína – **jaderná fyzika**.

Následující text stručně komentující základní představy o složení atomového jádra je volným pokračováním pojednání [1]. Stejně jako ono se snaží co nejpřehledněji – a snad i dostatečně přesvědčivě – na dílčím tématu ukázat postupný vývoj fyzikálního porozumění světu. Zdůrazňuje zásadní význam konkrétních experimentálních zjištění, na základě jejichž teoretické interpretace vyvozuje představu o složení atomového jádra, která bývá v učebnicích většinou prezentována bez zdůvodnění jako odnepaměti známý hotový fakt. Použitá argumentace se přitom opírá jen o poznatky předcházejících partií (středo)školské fyziky, což jednak umožňuje je přirozeným způsobem zopakovat a prohloubit jejich operační znalost, ale také aktivizovat jimi vybavené posluchače k dalšímu vlastnímu přemýšlení a v neposlední řadě i demonstrovat vzájemnou provázanost různých částí fyziky. (První kroky na cestě k fyzikálně bezespornému popisu elektronového obalu atomu, jež byly východiskem atomové fyziky, rozebírá podobným způsobem článek [2].)

## První spekulativní představy o složení jádra

Za duchovního otce a jednoho z hlavních tvůrců jaderné fyziky je všeobecně uznáván Ernest Rutherford (1871 – 1937), který se studiu atomového jádra věnoval od jeho objevu po celý zbytek svého života. Již v práci [3], v níž jaderný model atomu publikoval, s odkazem na existenci  $\alpha$ -radioaktivity spekuluje, že

- „**JÁDRO SE MOŽNÁ SKLÁDÁ Z ATOMŮ HELIA**“. <sup>1)</sup>

Na základě pečlivého chemického rozboru řady různých radioaktivních rozpadů (1911 – 1913) pak Frederick Soddy (1877 – 1966) a Kasimir Fajans (1887 – 1975) tuto domněnku zpřesnili zjištěním, že emise jedné  $\alpha$ -částice způsobí přeměnu atomu mateřského prvku v atom prvku, který jej předchází o dvě místa v Mendělejevově tabulce, zatímco v důsledku  $\beta$ -rozpadu dochází k transmutaci výchozího prvku v prvek, který za ním v periodické soustavě bezprostředně následuje. Z toho Soddy vyvozuje závěr, že

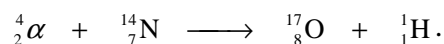
- „**CENTRÁLNÍ NÁBOJ V RUTHERFORDOVĚ ATOMU NEMŮŽE BÝT ČISTĚ KLADNÝ**“ [4].

Toto konstatování je vlastně implicitní formulací nové ideje „**vnitrojaderných elektronů**“, kterou Soddy následně konkretizuje tvrzením

- „**JÁDRO SE SKLÁDÁ Z  $\alpha$ -ČÁSTIC (MOŽNÁ I ATOMŮ VODÍKU) A ELEKTRONŮ**“. <sup>1)</sup>

### Jádro jako soubor protonů a elektronů

Tato poněkud vágní představa se udržela až do roku 1919, kdy během svých pokračujících experimentů s rozptylem  $\alpha$ -částic různými látkami Ernest Rutherford pozoroval při bombardování dusíku jejich svazkem emisi rychlých vodíkových iontů  $H^+$  [5]. Poté, co následující analýza odhalila v ozařovaném vzorku přítomnost kyslíku, byl tento proces popsán jadernou rovnicí



Následné analogické experimenty provedené s bórem, fluórem, neonem, draslíkem a dalšími prvky daly podobné výsledky: v důsledku nárazu  $\alpha$ -částice se zasažené jádro ostřelovaného atomu přeměnilo v jádro jeho pravostranného souseda v periodické tabulce za současné emise vodíkového iontu  $H^+$  (vodíkového jádra  ${}^1_1H$ ). Rutherfordovi se tak nejen podařilo uskutečnit odvěký sen alchymistů – (umělou) přeměnu jednoho prvku v druhý, ale také – což bylo ještě důležitější – získat velmi podstatnou informaci o složení jádra. Interpretují-li se totiž tato zjištění jako důsledek vyražení původně vnitrojaderných částic  $H^+ \equiv {}^1_1H$  střelami  ${}^4_2\alpha$ , které po svém nárazu do terčového jádra v něm uvíznou, jde o přímé experimentální potvrzení dřívějšího tušení přítomnosti vodíkových iontů v atomových jádrech. Ke zdůraznění fundamentální důležitosti těchto částic – jsou univerzální součástí všech atomových jader – pro ně Rutherford navrhl speciální název **protony** (z řeckého protos = první), který byl vzápětí všeobecně přijat.<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> ) Poznamenejme, že terminologie tehdejších textů není z dnešního hlediska zcela důsledná. Jejich autoři často užívali termínu „atom“ i k označení iontů či jader.

<sup>2)</sup> ) Za tyto práce – a také s přihlédnutím k jeho dosud přiměřeně oficiálně neocenenému objevu atomového jádra – byl Rutherford v roce 1919 znovu navržen na Nobelovu cenu (tentokrát za fyziku). Přinejmenším z lidského hlediska je jistě zajímavé, že tuto kandidaturu odmítl s tím, že jednu takovou cenu už má (1908, za chemii; za výsledky dosažené ve studiu radioaktivity) a další že si brzy nepochybně zaslouží některý z „jeho chlapců“, jak tituloval svoje oblíbené žáky. Jeho předpověď se bohatě naplnila, když Nobelovu cenu postupně získali Niels Bohr (1922 – za zásluhy ve výzkumu struktury atomů a jimi emitovaného záření), James Chadwick (1935 – za objev neutronu), Otto Hahn (1944 /za chemii/ – za objev jaderného štěpení), Patrick Manyard Blackett (1948 – za zdokonalení Wilsonovy mlžné komory a za objevy s ní uskutečněné v oblasti jaderné fyziky), Cecil Frank Powell

Popsané experimentální výsledky a navazující úvahy tak přivedly k zásadní změně základního názoru na složení atomového jádra:

- **JÁDRO SESTÁVÁ Z PROTONŮ A (VNITROJADERNÝCH) ELEKTRONŮ.**

Jeho hmotnostní číslo přitom – díky nepatrné relativní hmotnosti elektronů ( $\frac{m_e}{m_p} \ll 1$ ) – určuje

přímo počet jeho protonů, zatímco jeho náboj  $Z$  – vyjádřený v násobcích elementárního kladného náboje ( $\equiv$  atomové číslo) – udává, oč je tento počet  $A$  větší než počet elektronů  $A - Z$ :

$$Z \cdot (+e) = A \cdot (+e) + (A - Z) \cdot (-e) \quad [6].$$

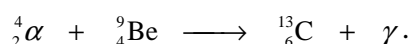
### **Předpověď a experimentální potvrzení existence neutronu**

V roce 1920 vyslovil Rutherford přesvědčení [7, 8], že by dvojice proton–elektron měly v jádru vytvářet silně vázané neutrální objekty a formuloval tak – zatím v embryonální podobě – pozdější koncepci proton–neutronové struktury atomového jádra:

- **JÁDRO  ${}^A_Z$  OBSAHUJE  $Z$  PROTONŮ A  $N = (A - Z)$  (hypotetických) NEUTRONŮ.** <sup>3)</sup>

Šlo jistě o velmi rozumnou myšlenku: zdá se být nanejvýš pravděpodobné, že dvě elektricky nabitě částice ( ${}^1_1\text{p}$ ,  ${}^0_{-1}\text{e}$ ) se stejně velkými náboji opačných znamének nacházející se v těsné blízkosti (uvnitř jádra) vytvoří silně vázaný pár  $n$ , jehož celkový náboj bude nulový a hmotnost nepříliš odlišná od hmotnosti protonu –  ${}^1_0\text{n}$ . A všechny do té doby získané empirické poznatky o jádru tuto představu také připouštěly, na druhé straně ji však žádný z nich přímo nepotvrzoval. Provedení experimentálního důkazu existence zatím hypotetického neutronu totiž nadmíru ztěžuje fakt, že neutrální částice nevykazují ionizační účinky, na nichž jsou založeny běžné metody detekce mikroobjektů [11].

V letech 1930 – 1931 konal Walther Bothe se svým studentem Herbertem Beckerem řadu experimentů, při nichž pozorovali, že z některých lehkých prvků (lithium, berylium, bór, ...) během jejich bombardování  $\alpha$ -částicemi o energii  $T_\alpha \cong 5 \text{ MeV}$  vystupuje mimořádně pronikavé záření [12]. Poněvadž je nebylo možné odchýlit elektrickým ani magnetickým polem, interpretovali je jako  $\gamma$ -záření a celý proces popsali jadernou rovnicí



Ve snaze prozkoumat vlastnosti tohoto pozoruhodného záření podrobněji, zacílili o rok později Iréne a Fréderick Joliot-Curieovi (1897 – 1956, 1900 – 1958) jeho svazek na blok parafínu (a posléze i další látky s vysokým obsahem vodíku), při čemž zjistili, že z ozařovaného bloku vylutují protony se značnou energií ( $\cong 7,5 \text{ MeV}$ ) [13]. O jejich emisi by sice bylo v principu

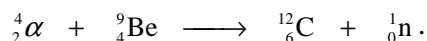
---

(1950 – za rozvinutí fotografických metod detekce mikročástic a za objevy mezonů uskutečněné pomocí těchto metod), John Douglas Cockroft (1951 – za průkopnické práce v oblasti transmutací atomových jader pomocí urychlených částic), Pjotr Kapica (1978 – za nové teoretické přístupy a objevy v oblasti fyziky nízkých teplot). A pokud bychom výčet rozšířili i o Rutherfordovy spolupracovníky – často o dost mladší – byl by tento seznam ještě delší. Takovou úrodou laureátů Nobelovy ceny se nemůže – s výjimkou Nielse Bohra – pochlubit žádný jiný učitel.

<sup>3)</sup> Název neutron (z lat. *neuter* = žádný z obou) ovšem zavedl až o dvanáct let později Rutherfordův žák James Chadwick [9, 10].

možné uvažovat jako o protonech odražených při (jaderném) komptonovském rozptylu dopadajícího  $\gamma$  záření (na těchto protonech), kvantitativní analýza takového jevu však vedla k nepřijatelně vysokým hodnotám energie fotonů primárního záření ( $\cong 70$  MeV) [14]<sup>4</sup>).

Už o několik měsíců později podal James Chadwick (1891 – 1974) jiný výklad těchto výsledků, když vysvětlil výron protonů z parafínu jako jejich vyražení **elektricky neutrálními mikroobjekty srovnatelné hmotnosti** (a srovnatelné energie!), které jsou emitovány z beryliového vzorku v důsledku jeho ozařování  $\alpha$ -částicemi z přirozeně radioaktivního poloniového zdroje [14, 15]. Původní Botheho-Beckerovu rovnici tak nahradil zápisem



Následné úspěšné ověření této hypotézy celou řadou dalších podobných Chadwickových experimentů znamenalo

- **EXPERIMENTÁLNÍ POTVRZENÍ EXISTENCE NEUTRONU** [16].

Tento objev, za nějž Chadwick obdržel Nobelovu cenu (1935), vzbudil nový zájem o neutron. Přestože jeho existence byla předpovězena již před dvanácti lety jako nutný důsledek párování protonů s vnitrojadernými elektrony, měl tento výklad i svoje kritiky. Oponovali mu zejména Ettore Majorana (1906 – 1938), Dmitrij Ivaněnko (1904 – 1994) a nejdůsledněji Werner Heisenberg (1901 – 1976) [6, 17], kteří po řadě hlubokých sporů s mnoha svými (i velmi významnými) kolegy prosadili – zpočátku především odkazy na některé experimentální výsledky – roku 1933 názor, že

- **NEUTRON NENÍ TĚSNĚ VÁZANOU DVOJICÍ (PROTON+ELEKTRON), ALE NOVOU ELEMENTÁRNÍ ČÁSTICÍ** [18, 19].<sup>5</sup>)

<sup>4</sup>) Energiová bilance výchozí jaderné reakce vede totiž k hodnotě zhruba pětkrát menší:

Poněvadž čistý energetický zisk  $Q$  přeměny  ${}^4_2\alpha + {}^9_4\text{Be} \longrightarrow [{}^{13}_6\text{C}]^*$  je 10,4 MeV, činí energie odnášená jejími konečnými produkty  $[{}^{13}_6\text{C}]^* \longrightarrow {}^{13}_6\text{C} + \gamma$  (počítaná v těžišťové soustavě)

$$Q + \frac{m_{\text{Be}}}{m_{\alpha} + m_{\text{Be}}} T_{\alpha} \cong 14 \text{ MeV} \quad (m_{\alpha}, m_{\text{Be}} \text{ jsou hmotnosti interagujících částic}),$$

z čehož na samotné záření připadá o něco málo méně než 14 MeV. Na základě výsledků absorpčních měření pak byla energie domnělých fotonů odhadována dokonce na ještě menší hodnotu ( $\approx 7$  MeV) [14].

<sup>5</sup>) Z dnešního časového odstupu lze, zřejmě poněkud zjednodušeně, říci, že příčina obtížnosti přijetí této ideje spočívala v jisté konzervativnosti myšlení: Jednak – což je ve světle současných znalostí až úsměvné – šlo o neochotu rozšiřovat do té doby postačující soubor dvou elementárních částic (elektron, proton) o částici další, jednak se zdálo, že představa o jádru sestávajícím jen z protonů a (elementárních) neutronů není slučitelná s pozorovanou  $\beta$ -radioaktivitou některých jader. (Interpretace tohoto jevu jako důsledku samovolné přeměny jaderného neutronu na proton, elektron a /anti/neutrino je až pozdějšího data.)

Ve prospěch nového pohledu na neutron naopak svědčilo více experimentálních argumentů. Nejznámějším – a snad i nejjednodušším – je vyřešení tzv. „dusíkové katastrofy“. Tento název označoval nesouhlas teoreticky určeného spinu  $s$  dusíkových jader  ${}^{14}_7\text{N}$  (podle původní představy o neutronu je takové jádro souborem sedmi protonů nespárovaných a sedmi protonů spárovaných /každý z nich má spin  $s = 1/2$ / se sedmi vnitrojadernými elektrony /majícími rovněž spin  $s = 1/2$ / – jako soustava lichého počtu fermionů by tedy jádro  ${}^{14}_7\text{N}$  mělo být fermionem) s experimentálním zjištěním, že tato jádra jsou bosony. To je naopak v souladu s novou koncepcí, podle níž je dusíkové jádro složeno ze sudého počtu fermionů (sedm protonů a sedm neutronů / $s = 1/2$ /).

Postupně vítězí představa o složení jádra jen z kladných a neutrálních elementárních částic (nukleonů) znovu oživila dosud otevřenou starší otázku jeho stability.

### Stabilita atomového jádra

Existence jader nesoucích kladný elektrický náboj je zřejmě nemyslitelná bez nějakého soudržného mechanismu, který by kompenzoval vzájemné elektrické odpuzování jejich protonů. A jelikož jsou atomová jádra velmi stabilními útvary, musí toto působení nad elektrickými dezintegračními tendencemi dominovat výrazně. Tyto **jaderné síly** jsou novým druhem interakce, neredukovatelným na silové působení jiného (dříve známého) typu <sup>6</sup>). Řadou experimentů – převážně rozptylových – a navazujících teoretických úvah bylo zjištěno, že jde o přitažlivou interakci velmi krátkého dosahu ( $\approx 10^{-15}$  m), která působí mezi libovolnými dvěma nukleony: n – n, n – p, p – p [20, 21].

Pohlížíme-li na atomová jádra jako na vícečásticové soubory, které vznikají sdružováním jednotlivých nukleonů, potom přidání každého dalšího protonu posílí jednak krátkodosahové jaderné přitahování (působí jen na nejbližší sousedy), ale současně i dalekodosahové elektrické odpuzování (dosáhne na všechny protony v jádru). Přidání neutronu pak posílí jen soudržné tendence.

A na tomto místě svůj úvodní komentář složení atomového jádra ukončíme.

Běžné učebnice celý jeho obsah zpravidla komprimují jen do lakonické informace:

**ATOMOVÉ JÁDRO  $\begin{smallmatrix} A \\ Z \end{smallmatrix}$  □ OBSAHUJE Z PROTONŮ**  
*určujících jeho náboj, počet obalových elektronů příslušného atomu a jeho chemickou identitu*  
**A N = (A – Z) NEUTRONŮ,**  
*které v něm mají stabilizační účinek.*

Autor je přesvědčen, že takový způsob fyzikálního „vzdělávání“ je nepřijatelný.

---

<sup>6</sup>) Podle současných představ jsou jaderné síly vnějším projevem jedné ze čtyř základních fyzikálních interakcí – interakce silné – působící mezi kvarky, z nichž jsou vytvořeny nukleony. To však už je jiný příběh, který přesahuje rámec tohoto textu.

## Literatura

- [1] *Lacina, A.*: Deset kroků do mikrosvěta. Čs. čas. fyz. **57**, č. 4 (2007) 243.  
<http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/desetkroku.pdf>
- [2] *Lacina, A.*: Bohrov model atomu. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie **53**, č. 2 (2008) 125. <http://www.physics.muni.cz/kof/clanky/bohruvmodel.pdf>
- [3] *Rutherford, E.*: The Scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  Particles by Matter and the Structure of the Atom. Phil. Mag. **21** (1911) 669.
- [4] *Soddy, F.*: Intra-Atomic Charge. Nature **92** (1913) 399.
- [5] *Rutherford, E.*: Collision of  $\alpha$  Particles with Light Atoms IV. An Anomalous Effect in Nitrogen. Phil. Mag. **37** (1919) 578.
- [6] *Brown, L. M., Pais, A., Pippard, B.*: Twentieth Century Physics. IOOP & AIPP, Bristol and New York 1995.
- [7] *Rutherford, E.*: Nuclear Constitution of Atoms. Proc. Roy. Soc. **A97** (1920) 374.
- [8] *Rutherford, E.*: The Newer Alchemy. Cambridge University Press, Cambridge 1937. (Český překlad: Novodobá alchymie. Elektrotechnický svaz československý, Praha 1938.)
- [9] *Boorse, A., H., Motz, L. (Eds.)*: The World of the Atom. Basic Books, New York and London 1966.
- [10] *Kudrjavcev, P. S.*: Kurs istorii fiziki. Prosvěščenije, Moskva 1974.
- [11] *Kapica, P., L.*: Eksperiment, teorija, praktika. Nauka, Moskva 1977. (Český překlad: Experiment, teorie, praxe. Mladá fronta /edice Kolumbus/, Praha 1982.)
- [12] *Bothe, W., Becker, H.*: Eine Kern- $\gamma$ -Strahlung bei Leichten Elementen. Naturwissenschaften **18** (1930) 705; Künstliche Erregung von Kern- $\gamma$ -Strahlen. Z. Physik **66** (1930) 289.
- [13] *Curie, I., Joliot, F.*: Émission de protons de grande vitesse par les substances hydrogénées sous l'influence des rayons- $\gamma$  très pénétrants. Comptes Rendus Acad. Sci. Paris **194** (1932) 273.
- [14] *Alonso, M., Finn, E., J.*: Fundamental University Physics, Vol. III. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts 1969.
- [15] *Chadwick, J.*: Possible Existence of a Neutron. Nature **129** (February 27, 1932) 312.
- [16] *Chadwick, J.*: The Existence of a Neutron. Proc. Roy. Soc. **A136** (1932) 692.
- [17] *Weinberg, S.*: The Discovery of Subatomic Particles. Cambridge University Press 2003.
- [18] *Ivaněnko, D., D.*: The Neutron Hypothesis. Nature **129** (May 28, 1932) 798.
- [19] *Heisenberg, W.*: Structure of Atomic Nuclei. Zeitschrift für Physik **77** (1932) 1; **78** (1932) 156; **80** (1932) 578.
- [20] *Ne'eman, Y., Kirsh, Y.*: The particle hunters. Cambridge University Press, Cambridge 1996.
- [21] *Hodgson, P., E., Gadioli, E., Gadioli Erba, E.*: Introductory Nuclear Physics. Clarendon Press, Oxford 1997.