

Lise Meitnerová a Otto Frisch: Interpretace a ověření procesu jaderného štěpení

Filip Grygar

Filozofická fakulta, Univerzita Pardubice, Studentská 84, 532 10 Pardubice; filip.grygar@upce.cz

Úvod

V našich třech předchozích článcích publikovaných v tomto časopise jsme zmapovali výzkum a životní pouť zejména dvou renomovaných vědců, kteří měli největší zásluhu na objevení a interpretaci procesu jaderného štěpení z přelomu roku 1938 a 1939.¹ Byli to radiochemik Otto Hahn (1879–1968), ikona německé vědy, elegán s pověstným sebeironizujícím smyslem pro humor, a neméně proslulá Lise Meitnerová (1878–1968), půvabná teoretická i experimentálně zručná fyzikálka rakouského a židovského původu. Oba nerozluční kolegové, milovníci klasické hudby a celoživotní přátelé spolu od roku 1907 zkoumali různorodé radioaktivní jevy a záření. Ze skromné sklepní laboratoře na *Univerzitě Fridricha Viléma* v Berlíně se v roce 1912 přestěhovali do nového Ústavu pro chemii ve *Společnosti císaře Viléma pro podporu věd*.

Během své zářné kariéry oba tito vědci zažili čtyři politické režimy a dvě světové války. Jestliže v té první hájili jako patrioti společně na frontě zájmy Německa, potažmo Rakouska-Uherska, v té druhé už stáli – i názorově – každý na jiné straně válečného konfliktu. On zůstal v nacistickém Německu, a třebaže nebyl nacistou, jako tisíce dalších vědců či techniků se zločinným režimem kolaboroval. Získával velké finanční prostředky na chod a rozvoj svého pracoviště, byl členem nacistického *Uranového spolku* na sestavení atomového reaktoru či bomb. Po válce se stal solidárním obhájcem Němců, nacistických vědců, manažerů průmyslu nebo norimberských zločinců. Meitnerová musela v červenci roku 1938 uprchnout do neutrálního Švédska, kde dlouho jako opuštěná i nešťastná přežívala v ponižujících pracovních a platových podmínkách.

Od roku 1934 do její emigrace pracovali oba jako šéfové svých oddělení v Ústavu pro chemii na výzkumu tzv. transuranů. Záhy se k nim připojil i Hahnův mladý německý asistent, analytický a fyzikální chemik Fritz Strassmann (1902–1980). Meitnerová však i ze Stockholmu s kolegy nadále spolupracovala prostřednictvím intenzivní korespondence a kromě toho se tajně v listopadu 1938 sešla s Hahnem v Kodani, kde po něm požadovala jiné uspořádání experimentů a kontrolní testy



Otto Hahn v roce 1930.

pro ni pochybných berlínských výsledků (tyto podstatné skutečnosti Hahn nikdy nezveřejnil). Podle Strassmanna byla lídrem jejich týmu Meitnerová, bez ohledu na to, že už nebyla fyzicky přítomna při závěrečných pokusech, jež vedly v prosinci k mimořádné události, a sice k objevu jaderného štěpení.

Ovšem jediný, kdo si za tento průlomový objev převzal v roce 1946 Nobelovu cenu, byl Otto Hahn. Navzdory četným nominacím žili Meitnerová a Strassmann neoprávněně desítky let v Hahnově stínu jako jeho *pouzí* spolupracovníci nebo *jen* významní žáci. V našich třech již publikovaných statích jsme proto nastínili i diskusi k této nespravedlnosti, která byla způsobena řadou propletených událostí, o nichž se historici vědy začali z nově otevřených archivů dozvídat nebo utvrzovat až koncem devadesátých let 20. století.²

Osudová třicátá léta 20. století

Ve třicátých letech 20. století došlo jak k nástupu nacistického Německa, tak k několika fatálním objevům,

1 Viz [1] a dále viz [2].

2 K dalším podrobnostem a použité literatuře viz [1] a [2].

» Existují
jedny Vánoce,
na které nikdy
nezapomenou
– v roce 1938
OTTO FRISCH «

jež zapříčinily, že dnes žijeme v atomovém věku. Proto si, než se dostaneme k interpretaci a ověření procesu jaderného štěpení, zrekapitulujeme několik dějinných souvislostí a vědeckých milníků, jež tomuto zásadnímu fyzikálnímu příspěvku předcházely.

Již od roku 1919 zainteresovaní vědci věděli, že s částicemi α (jádra prvku hélia) lze bombardovat (ozářovat) jádra lehkých prvků takovým způsobem, že ze stabilního prvku dusíku (7 protonů v jádře) po nukleární reakci mezi jádrem a částicí α vznikne stabilní kyslík, který má pouze o jeden proton více (8). Od roku 1934 se navíc dařilo proměňovat lehké stabilní prvky na o něco těžší radioaktivní izotopy různých prvků, například hořčík (12) transmutovat na jeden z rozpadajících se izotopů křemíku (14). Jakmile však byla v roce 1932 objevena strategická částice neutron, kterou bylo navíc možné od roku 1934 produkovat ve velkém měřítku, začali vědci tímto šikovným projektillem bombardovat i jádra atomů těžkých prvků až k nejtěžšímu v přírodě se vyskytujícímu prvku – uranu (92).

Fyzici a chemici ze světových laboratoří včetně berlínského týmu se většinou domnívali, že při vhodně nastavené rychlosti neutronu a zároveň po jeho průniku do bombardovaného jádra uranu musí (pokud z něj neunikne) docházet k takovým jaderným reakcím, jejichž výsledkem budou zcela nové, uměle vyprodukované prvky za uranem, tzv. *transurany* 93, 94, 95 atd. Tyto vskutku průkopnické výzkumy si však s sebou nesly netušený problém v nesprávných chemických a fyzikálních předpokladech, s nimiž vědci k honbě za transurany přistupovali. Navzdory některým varovným hlásům věřili, že nukleární změny, jež se dějí po zachycení neutronu v bombardovaném jádru, nemohou být v zásadě velké; budou tedy podobné transmutacím dějícím se s lehkými prvky. To znamená, že vzniklé prvky mohou mít o jeden nebo maximálně dva protony ve svém jádru více anebo méně, stejně jako tomu bylo již u mnoho let zkoumaných rozpadových řad radioaktivních prvků.



Lise Meitnerová, 30. léta 20. století.

Tuto honbu za transurany však Hahn se Strassmannem prozatímne ukončili v prosinci roku 1938. Postupně se utvrdili v tom, že v jejich pokusech namísto transuranů došlo k *rozpuknutí* jádra uranu na dva mnohem lehčí prvky. O jednom z nich se pouze dohadovali a druhým prvkem bylo nakonec baryum (56). O něm byli nejprve několik týdnů přesvědčeni, že to je aktivní izotop těžkého prvku radia (88), třebaže byl i tento prvek o 4 protony lehčí než uran. Hahn se Strassmannem o revolučním objevu publikovali 6. ledna 1939 článek a kromě toho, že v tomto reportu ještě nenajdeme pozdější pojem štěpení, obsahoval některé zbytečné nedostatky. Hahn, jenž text sepsal, si totiž neuvědomil, že součet protonů ve dvou štěpných produktech musí být roven počtu protonů v uranu (92). Místo toho uvažoval o součtu nukleonů, tj. baryum má 138 protonů a neutronů v jádře a tehdy nepotvrzený prvek masurium, dnes technecium (43), obsahuje 101 nukleonů, což je dohromady 239 nukleonů odpovídajících složenému jádru uranu 238 plus 1 zachycený neutron.

Hahnova či německá poválečná a tradovaná legenda o uranovém výzkumu v nacistickém Německu až do nedávna hlásala, že poté, co musela Meitnerová kvůli rasovým zákonům emigrovat do Stockholmu, spolupráce mezi Hahnem a jeho kolegyní skončila (víme, že to není pravda) a objev jaderného štěpení byl potom prý jen záležitostí chemie, na niž neměla Meitnerová – respektive teoretická fyzika – vůbec žádný vliv (Strassmann jako analytický či fyzikální chemik byl zprostředkující linkou mezi radiochemií a fyzikou). Pochopitelně že zjišťování substancí, jež se nalézají ve sraženinách vzniklých po nukleárních reakcích, probíhalo tehdy na základě velmi komplikovaných chemických analýz, metod frakcionování nebo separování, což byla čistá práce špičkových berlínských chemiků. Nicméně k definování tak extrémně miniaturních produktů je potřebná i fyzikální interpretace, proto od roku 1934 šla chemie s fyzikou ruku v ruce. Hahn si kromě jiného tyto souvislosti asi neuvědomoval, neboť byl ryzí praktik a teoretizování neměl už od svých studií vůbec v lásce, navíc fyzice (natož kvantové a nukleární) nerozuměl, což sám přiznával. Strassmann v roce 1974 uvedl, že kromě vůdčí role Meitnerové byla ve finálních pokusech rozhodující nikoli tak Hahnova radiochemie, ale Strassmannova analytická chemie, v níž měl Hahn jen povšechné znalosti.

V jedné autobiografii se Hahn rozepisuje o tom, že svoji kolegyni o finálních prosincových experimentech informoval v prosincových dopisech, nicméně předchozí čilou korespondencí zamlčel; cituje pouze ze tří dopisů (jeden je od Meitnerové). V dopise z 19. prosince 1938 jí napsal, že jejich poslední výsledky jsou opravdu *děsivé*, že nalezené těžké izotopy radia se chovají jako lehké baryum. Pokračuje, že přece nemůže dojít k nějakému *rozpuknutí* jádra a že se se Strassmannem shodli, že o těchto výsledcích řeknou zatím pouze jí. Současně Meitnerovou prosil o *nějaké fantastické vysvětlení*. Hahn však z tohoto dopisu vynechává zásadní dovětky, totiž, že by to byla stále *práce nás tří*.³ Samozřejmě všichni tři věděli, že tehdy bylo politicky nemožné, aby společně publikovali článek tak jako dřív. Avšak po válce a v pozdějších vzpomínkách nebo přednáškách Hahnovi nic nebránilo v tom, aby veřejně přiznal kontinuální spolupráci se svojí kolegyní na průlomovém

3 Ke třem citovaným dopisům viz [9], s. 151–153.

objevu. Nepřiznal ani, že téměř všechny experimenty se Strassmannem prováděli v jejím oddělení, tj. s jejími neutronovými zdroji a přístroji, které k pokusům sestavila (mimořádně o tom píše i v korespondenci).

Hahn 21. 12. napsal další dopis, ve kterém si stýskal, že Meitnerová nemůže být s nimi. Zároveň kolegyně potvrdil, že nalezený produkt je z hlediska chemie opravdu baryum a že to musí nyní rychle publikovat, ačkoliv tyto výsledky jsou z fyzikálního hlediska nepochopitelné. Dodal, že jí pošle brzy kopii článku, což udělal 22. 12. Ve svých vzpomínkách upřesňuje, že se posléze již sama Meitnerová se svým synovcem, fyzikem Otto R. Frischem (1904–1979), zasloužili o interpretaci, název *jaderné štěpení* a první experimentální ověření procesu štěpení v Kodani.⁴ Frisch emigroval z Německa v roce 1934 do Kodaně, kde pracoval ve *Fyzikálním ústavu*, který založil filozofující fyzik a nobelista Niels H. D. Bohr (1885–1962).⁵

Interpretace procesu jaderného štěpení

Meitnerová 21. 12. 1938 reagovala na Hahnovu neuvěřitelnou zprávu z 19. 12. Její dopis je třetím a posledním textem, z něhož Hahn veřejně cituje. Napsala mu, kromě jiných odborných poznámek, že rozpad uranového jádra na baryum a další prvek je opravdu zatím těžko pochopitelná věc, leč jaderná fyzika přinesla vědcům už *tolik četných překvapení*, takže prý takový výsledek *není nemožný*. V tu dobu se chystala na první posmutnělé vánoční svátky. Byla pozvána k bývalé kolegyni a přítelkyni z Berlína Evě von Bahr-Bergiusové (1874–1962), která bydlela s manželem v Kungälvu (přibližně 20 km na sever od Göteborgu a od Severního moře). O tom berlínského kolegu také informovala, proto měl další korespondenci posílat tam (zminila, že odjede ze Stockholmu pravděpodobně v pátek 23. 12.). Její zpráva dorazila do Berlína den poté, co netrpělivý Hahn odeslal ve čtvrtek 22. 12. úspěšnou, nicméně převratnou zprávu do časopisu *Naturwissenschaften* a současně Meitnerové poslal do Stockholmu slíbenou kopii, již si prostudovala až 30. 12. (nechala si posílat poštu do Kungälvu). Intuitivní fyzikální potvrzení možnosti vzniku lehkého barya, jímž si Hahn stále nebyl dostatečně jistý – to byl od ní krásný vánoční dárek. Proto po přečtení oné povzbudivé zprávy a další práci v laboratoři Hahn telefonoval 27. 12. editorovi časopisu, aby doplnil do článku ještě další upřesňující informace.⁶

Podle rodinné tradice trávil v Německu Štědrý den s Meitnerovou její synovec Otto Frisch, za nových okolností se proto chystal za tetou a jejími přáteli do Švédska. Chtěl s ní hovořit hlavně o svém nově připravovaném experimentu a o otci, jehož po hrůzné Křišťálové noci deportovali z Vídně do koncentračního tábora Dachau. Vzpomíná však, že tématem bylo nakonec něco zcela neočekávaného a jak variačně uvádí, „*byla to nejzávažnější návštěva v celém mém životě*“;⁷ jinde poznamenal: „*Existují jedny Vánoce, na které nikdy nezapomenu – v roce 1938.*“⁸ Městečko Kungälv bylo od Kodaně několik hodin lodí (dnes 3,5 hod. autem). Pro jeho tetu, jež přijela



Otto Robert Frisch v roce 1950.

vlakem zřejmě v pátek 23. 12., trvala cesta ze Stockholmu také několik hodin (dnes 5,5 hod. autem či vlakem). Avšak jaký den přijel Frisch, nevíme, nicméně to, na co si velmi dobře vzpomíná, je, že ráno po přenocování v předem domluveném hotelu našel svoji tetu u snídaně dumající nad Hahnovým dopisem z 19. 12.⁹ Pokud by spolu snídali v pátek, znamenalo by to, že Meitnerová odjela ze Stockholmu buď neplánovaně už ve čtvrtek, anebo v pátek ve velmi časných ranních hodinách. Je také možné, že se viděli ráno až na Štědrý den.¹⁰

Dále přesně nevíme, jak dlouho trvala jejich diskuse o průlomové interpretaci jaderného štěpení, o níž se hovoří jako o *aktu stvoření*.¹¹ Frischova dramatizace, již si následně ocitujeme, uvádí jako zásadní pouze dopolední procházku – po inkriminované snídani – zasněženou krajinou Kungälvu. Je též možné, že si hlavu lámali o svátcích i několik dní (nadto Meitnerové kamarádka byla docentka fyziky); z uvedeného důvodu by bylo pochopitelné, proč Meitnerová napsala další důležitou zprávu Hahnovi až 29. 12. Na začátku psaní zdůraznila, že si oba *své mozky značně potrápili*. Následně s Frischem reagovala na Hahnovu poštu z 21. 12. o průkaznosti barya a z 28. 12., v níž Hahn oslovil už oba kolegy a prosil je o posouzení spekulací o vzniku barya a masuria a připojil své pocity, že vlastně ani neví, zda má být *velmi smutný* z toho, že možnost transuranů *odumřela*, anebo nikoliv. Kopii Hahnova článku z 22. 12. obdrželi až 30. 12. a na něj samozřejmě také ihned odpověděli.

Shrneme-li si dvě stěžejní vědecká poselství, jež Hahnovi Meitnerová zaslala po vánočních diskusích s Frischem 29. 12. a 1. 1. 1939, budou znít takto: 1) Transurany jsou možné. Totiž u dřívějších berlínských pokusů vzniklo po bombardování vzorku uranu pomalými neutrony aktivní složené jádro izotopu uranu-239 (při emitaci β záření a rezonančním procesu kolem 25 eV),

» Náboj uranového jádra, jak jsme zjistili, byl skutečně natolik veliký, že by mohl téměř zcela překonat účinek povrchového napětí.

OTTO FRISCH «

4 V epilogu své vědecké autobiografie ovšem poznamenal, že se mu se Strassmannem kromě objevu štěpení podařilo poskytnout i vysvětlení tohoto procesu. K dalším podrobnostem a použitým literaturám viz [1] a [2].

5 Více k *Fyzikálnímu ústavu* v Kodani viz [12].

6 Viz [1, 2, 10, 11 a 12].

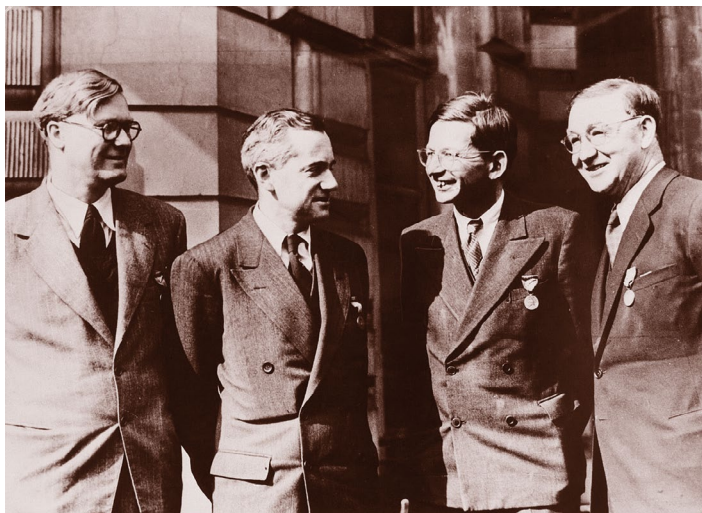
7 Viz [3], s. 114, nebo viz [8].

8 Viz [4], s. 833.

9 P. Rifeová uvádí i dopis z 21. 12. Viz [10].

10 Nejvíce vzpomínek na tyto osudové vánoční svátky máme zachované v různých Frischových textech nebo rozhovorech (více viz [3–8] a dále viz [10 a 11]). R. L. Simeová se přiklání k tomu, že se viděli již ráno 23. 12. Viz [11].

11 Viz [12], kap. 4.3.



Zleva: William Penney, Otto Frisch, Rudolf Peierls a John Cockcroft v roce 1946.

jehož poločas rozpadu byl 23 minut. A rozpad této substance podle Meitnerové „musí nutně vést k transuránům“. (Transuran 93 byl vyroben v USA až v roce 1940.)²⁾ „Pravděpodobně je pro tak těžké jádro energeticky možné, aby se rozbilo. Avšak tvoje hypotéza, že výsledkem bude Ba [baryum – pozn. autora] a Mo [v rukopise četla namísto masuria – Ma (43) – molybden – Mo (42), pozn. autora], to je z několika důvodů nemožné [také Mo je nesprávně, pozn. autora].“¹²

Frisch výstižně a návodně shrnuje krok za krokem, jak s touto dospěli k fantastickému vysvětlení procesů jaderného štěpení. Když nalezl druhý den po příjezdu do hotelu tetičku u snídaně zahloubanou do Hahnova dopisu, nebyla s ní řeč, dokud jej nepřinutila přečíst si neuvěřitelné berlínské výsledky, jimž zpočátku nemohl vůbec uvěřit – považoval je za nějaké pomýlení. Meitnerová ovšem Frische rázně ubezpečila, že Hahn je natolik výtečný chemik, že chyby takového druhu prostě nedělá. „Avšak jak mohlo být vytvořeno z uranu baryum? Vždyť žádné větší fragmenty než protony a jádra helia (α částice) dosud nebyly z jader odseknu ty a odštipnout jejich nějaký větší počet, k tomu nebyl dostatek energie. Nebylo možné ani to, aby se uranové jádro náležitě rozštěpilo napříč. Jádro rozhodně není jako nějaké křehké tělísko, jež by mohlo být odseknu to nebo rozlomeno. Už dříve George Gamow navrhl a Bohr k tomu potom podal pádné argumenty, že jádro bylo spíše podobné kapce kapaliny. Mohla by se snad taková kapka postupně rozdělit na dvě menší kapičky tak, že by se nejprve protáhla, potom zúžila, a nakonec by se roztrhla na dvě spíše, než rozlomila.“¹³

To byla zásadní otázka, Frisch proto požádal tetu, zda by si o tom nemohli promluvit na procházce zasněženým lesem. Tato vycházka měla kromě osudového otevření Pandořiny atomové skříňky dokořán, i groteskní stránku. Frisch se totiž tetu zeptal, zda by jí nevadilo, kdyby si vzal lyže. Meitnerová jej přesvědčovala, že nikoliv a že vedle něj pošlape stejně rychle i bez nich. Obraz závažné fyzikální procházky tak vypadal následovně: stále skeptický čtyřiatřicetiletý mladík na lyžích si to s lehkostí ujíždí lesní cestou a jeho šedesátiletá teta, bořící se do sněhu, se snaží vedle něj držet krok a synovce ubezpečit v tom, že kolegové v Berlíně přišli na převrat-

ný objev s tím, že chybu určitě neudělali. Nikdo na světě tehdy netušil, že tato bizarní procházka bude zásadní pro výchozí kalkulace a obecné porozumění možnosti v budoucnu sestrojených jaderných reaktorů a zbraní.

Frisch ohledně roztržení atomového jádra nebo kapky tekutiny píše: „Věděli jsme, že existují velmi mohutné síly, jež by takovému procesu kladly odpor, právě tak jako povrchové napětí kapky obyčejné tekutiny zase vzdoruje rozdělení na dvě menší. Jenže jádra se přeci jen liší od obyčejných kapek v jedné důležité věci: jsou elektricky nabitá a právě tento známý jev působí proti povrchovému napětí.“ To bylo nutné promyslet. Konečně se oba vědci posadili v lese na kmen spadlého stromu a začali tyto závěry propočítávat, naštěstí měli s sebou tužku i kousek papíru. „Náboj uranového jádra, jak jsme zjistili, byl skutečně natolik veliký, že by mohl téměř zcela překonat účinek povrchového napětí. Takže uranové jádro se může opravdu podobat velmi rozkolísané a nestabilní kapce, jež je připravena se rozdělit při malém podnětu, jakým je srážka s jediným neutronem.“¹⁴

Ovšem vzápětí narazili na další problém. Pokud by se jádro uranu takto roztrhlo na dvě části, pak by se tyto fragmenty rozletěly od sebe – kvůli jejich vzájemnému elektrickému odpuzování – vysokou rychlostí, k čemuž by potřebovaly obrovskou kinetickou energii, něco kolem 200 MeV. To sice obecně není moc velké množství energie, nicméně z hlediska jejího uvolnění pouze jedním atomem je to množství neuvěřitelné. Pro srovnání si uvedme, že neenergetičtější chemické reakce dokážou uvolnit cca jen 5 eV na atom. Cyklický urychlovač, na nějž bylo tehdy v USA spotřebováno 200 tun magnetu, dokázal urychlit částice pouze na 25 MeV. Nebo jestliže například při spalování uhlí jeden atom uhlíku uvolní kolem 2 eV, tak jeden atom uranu v procesu štěpení uvolní stamilionkrát více energie, což je fantastické. Jinak řečeno, když rozštěpíme pouhý gram čistého uranu, dojdeme k neuvěřitelným cca 5×10^{23} MeV a k dosažení takovéto obří energie nebo vyrobení tepla bychom museli spálit dvě a půl tuny velmi kvalitního uhlí.¹⁵

Frisch si vzpomíná, že kardinální otázka byla nasnadě: „Odkud by se taková energie mohla vůbec vzít? Naštěstí si Lise Meitnerová zapamatovala empirický vzorec pro vypočítání hmotností jader a spočítala, že by dvě jádra vytvořená rozdělením uranového jádra byla dohromady lehčí než původní jádro uranu, a to přibližně o jednu pětinu hmotnosti protonu. Nuže pak podle Einsteinovy rovnice $E = mc^2$ platí, že kdykoli mizí hmota, vytváří se energie [zmizelá hmota se přeměnila na energii kinetickou – pozn. autora]. A právě jedna pětina hmotnosti protonu odpovídala 200 MeV. Takže zde byl onen zdroj energie.“¹⁶ Frischovi s tetou již bylo všechno jasné, popřáli si požehnané Vánoce a šťastný Nový rok. Posléze ke svým závěrům doplnili, že dvě části po rozštěpení uranu (92) musejí být – v případě berlínských pokusů – nutně prvky barya (56) a kryptonu (36), tj. $56 + 36 = 92$. Jejich slavný článek ve formě dopisu editorům vyšel 11. února 1939 v časopise *Nature*. V něm také prvně použili slovo štěpení (*fission*).¹⁷

Na závěr této části ještě zcela stručně shrňme některé historické údaje k tzv. kapkovému modelu (*Tröpfchenmodell, liquid-drop model*) a modelu složeného jádra (*compound nucleus, compound system*). Bez nich by

14 Viz [3], s. 116.

15 Dále viz [12], s. 220.

16 Viz [3], s. 116.

17 Viz [13].

12 Viz [11], s. 239 a 240.

13 Viz [3], s. 115, nepatrně pozměněné v [7], s. 144.

totiž nebylo možné, aby v onom *aktu stvoření* dospěla Meitnerová (s letitým předporozuměním nukleární fyziky v Německu) a Frisch (s letitým předporozuměním nukleární fyziky v Kodani) k tak senzační syntéze vysvětlení jaderného štěpení. Dodnes panuje tradovaná představa (zejména kvůli tzv. *Betheho Bibli* nukleární fyziky z roku 1937), že s kapkovým modelem jádra přišel Bohr. Tak tomu není. I Frisch – teprve až v roce 1979 – doplnil do své autobiografie (z níž jsme právě citovali) jako původce kapkového modelu jméno fyzika George Gamowa (1904–1968); v dřívějším a obsahově téměř stejném vzpomínkovém článku byl jmenován pouze Bohr. Gamow v prosinci 1928 vytvořil v Kodani ideu jádra atomu jako kapky vody (*water-drop*), v únoru 1929 ji v Londýně prezentoval a později s dalšími kalkulacemi publikoval. Nicméně už tuto představu dál nijak nerozvíjel. Na statistické rysy tohoto modelu jader jako kapiček nukleární kapaliny (*nuclear fluid*) však počátkem třicátých let v Německu fundovaně a obšírně navázali fyzici Werner Heisenberg (1901–1976) a Carl F. von Weizsäcker (1912–2007). Podobně jako povrchové napětí kapiček tekutin udržuje všechny molekuly pohromadě, tak silné jaderné interakce kapiček nukleární kapaliny udržují pohromadě kladně nabitě protony a neutrální neutrony, třebaže jsou vzájemně odpuzovány elektrostatickou silou. Z této tradice, zjednodušeně řečeno statického pojetí jádra, těžila až do své emigrace i Meitnerová.¹⁸

Naproti tomu Frisch vycházel z Bohrova proslulého modelu složeného jádra (jádro plus zachycená částice) z roku 1936 a 1937, který vytvořil s Fritzem Kalckarem (1910–1938). Oproti dosavadnímu pojetí jádra jako jednoduché rigidní soustavy neinteragujících nukleonů (*one-body model*) chovající se obdobně jako atomový obal (rozptylování elektronů, ionizace atomů elektrony apod.) a jednoduše uplatňující síly vůči bombardovaným částicím, vypracovali kodaňští kolegové fantasticky zpracovaný a dynamický model fungování jádra, jenž zásadně ovlivnil rozvoj nukleární fyziky na téměř 20 let.

Když Bohr použil nezávisle na Gamowovi metaforu kapky, bylo to z jiných důvodů a motivací, poněvadž pro Bohra bylo jádro atomu především cosi jako interagující elastická látka či tělísko, jež na svém povrchu spíše bombardované částice absorbuje (dosavadní představy zohledňovaly více jejich rozptyl, projití jádrem nebo jeho vybuzení). Takové jádro může být i zničeno, ale jen při vysokých teplotách, kdy se jako celek vypaří. Bohr s Kalckarem promysleli mnoho různých možností nukleárních reakcí jakožto vícesystémových nebo mezistupňových procesů, tj. toho, co se děje a co se může stát poté, co neutron při různých rychlostech či energiích zasáhne jádro. Zkoumali trvání nukleárních reakcí, přechodnost, stabilitu, excitace a životnost složených jader, otázku jejich energetických spekter, interakce nukleonů atd. Nenapadla je však jedna prostinká možnost, tj. že se i jádro může rozdělit jako kapka vody. V různých kombinacích kapkový model a model složeného jádra Bohr začal hojně používat až po Meitnerové–Frischově interpretaci jaderného štěpení a nejvýrazněji ve svém slavném článku „Mechanismus jaderného štěpení“, jenž vyšel v den vypuknutí druhé světové války a který napsal po intenzivní spolupráci s fyzikem Johnem A. Wheelerem (1911–2008).¹⁹

18 Podrobně viz [12], kap. 4.2 a v této knize diskutovaná literatura.

19 Viz [12], s. 229 a 230.

Vrátíme-li se zpět k Frischovým vzpomínkám, potom snadno pochopíme, co po Frischově návratu (3. ledna) do Kodaně v Bohrovi vyvolala senzační zpráva o rozštěpení jádra, když zvolal: „*Jací idioti jsme to všichni byli! Ó, to je ale báječné! Je to přesně tak, jak má být! Napsali jste o tom s Lise Meitnerovou článek?*“ Bohr zároveň Frische urgoval, aby své teoretické závěry ještě urychleně experimentálně ověřili a slíbil, že o nových objevech nikomu v USA, kam 7. ledna 1939 odplouval se svým synem a dalším kolegou Léonem Rosenfeldem (1904–1974), neřekne.

Experimentální ověření procesu jaderného štěpení a jeho pojmenování

Během sepisování reportu pro časopis *Nature* Frisch s Meitnerovou spolu komunikovali prostřednictvím telefonu a současně připravovali experiment, který by jejich teoretické závěry ověřil. Frischovi s tím v Kodani pomáhal další doživotní exulant, jeho kolega fyzik Georg Placzek (1905–1955; rodák z Brna), který navrhl, že by se měli soustředit především na dva od sebe se rychle pohybující fragmenty rozštěpeného uranového jádra. Jednoduchý experiment se pak připravoval dva dny a spočíval v propojení osciloskopu se zesilovačem, ten zase s upravenou ionizační komorou, v níž byl mimo jiné umístěn kousek uranové fólie, jež byla následně ozařována proudem neutronů (zdroj neutronů byl kvůli efektu jejich zpomalení obalen parafinem). Verifikační experiment trval od odpoledne (patrně) 12. ledna do ranních hodin dalšího dne. Pokus byl očividně vzrušující, leč velmi vyčerpávající a Frisch se uložil k zaslouženému spánku až nad rozbřeskem. V tu dobu bydlel přímo v ústavu, v podkrovní místnůstce, kde v roce 1927 Heisenberg zformuloval relace či princip neurčitosti. Jenže už v sedm hodin ráno rozespaleho Frische nemile probudil pošťák, ale stálo to za to, poněvadž mu matka v telegramu napsala, že jeho otec byl propuštěn z Dachau (Frischovi rodiče pak emigrovali do Švédska).²⁰

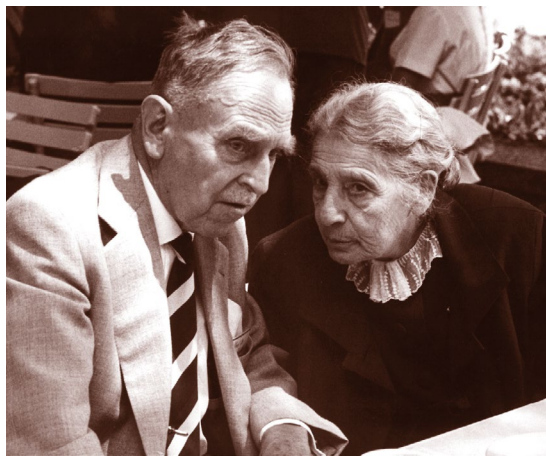
Experiment dosvědčující roztržení uranového jádra na dvě části musel Frisch k údivu všech vědců několikrát opakovat. Jedním z přihlízejících byl americký stážísta a mikrobiolog William A. Arnold (1904–2001), který vzpomíná, že byl doslova konsternován obrovskými pulzy, jež zaznamenal osciloskop: „*Z velikosti vr-*

20 Viz [8].



Lise Meitnerová (vpravo) s herečkou Katherine Cornellovou a fyzikem Arthurem H. Comptonem v roce 1946.

» Po Frischově senzační zprávě o rozštěpení jádra Bohr zvolal: „Jací idioti jsme to všichni byli! Ó, to je ale báječné!“ «



Lise Meitnerová v rozhovoru s Otto Hahnem na setkání nositelů Nobelovy ceny v Lindau v červnu 1962.

cholí bylo zřejmé, že musí reprezentovat 100–200 MeV [...]“.²¹ Frisch se kolegy dotázal, jak se v biologii říká procesu, když se buňka nebo bakterie rozdělí na dvě části. Následně po vzoru tzv. binárního dělení či štěpení (*binary fission*) Frisch pojmenoval i jaderné štěpení (*nuclear fission*, *Kernspaltung*, *fission nucléaire*).²² Jak stručný dopis pro editory, tak shrnující experimentální výsledky odeslal Frisch do časopisu *Nature* 16. 1. 1939.

Mezitím se do USA plavil Bohr. Do kajuty si vyžádal tabuli a s Rosenfeldem počítali, malovali grafy, obrázky a žasli nad tím, co vše nového se na konci prosince 1938 v Berlíně a Kungälvu událo. Bohr však zapomněl kolegu upozornit na to, že vědcům v USA nesmí ještě nic říci; Rosenfeld se tak domníval, že články o interpretaci či ověření jaderného štěpení už byly odeslány do vědeckých časopisů. Po příjezdu 16. ledna do USA odjel Bohr se slavným fyzikem Enricem Fermim (1901–1954) k němu do New Yorku a Rosenfeld odjel s Wheelerem do Princetonu. Oněmělému kolegovi vše vyzradil a vrcholem potom bylo večerní setkání amerických vědců, kde nová zpráva způsobila nepopsatelný poprask (Hahnův–Strassmannův článek dorazil do USA až někdy kolem 20. ledna a dva Meitnerové–Frische reporty do *Nature* vyšly až 11. a 18. února). Během chvílky se prostřednictvím vytížených telefonních linek informace o nových objevech dovídali další a další vědci včetně nic netušícího Bohra. V USA proto záhy mnoho fyziků začalo poukazovat na to (a zároveň psát do časopisů), že jako první provedli výklad i ověření jaderného štěpení právě oni. Bohr a Rosenfeld byli pochopitelně z nastalé situace nešťastní, navíc museli na konferenci v Washingtonu (26.–28. 1.) přihlížet v místní laboratoři stejným výsledkům, jakým zvědaví vědci v Kodani. Vzhledem k tomu, že Bohr s Rosenfeldem o těchto pokusech ještě nevěděli, na dochované fotografii se usmívá pózující Fermi a další američtí vědci, nikoli tak vědci kodaňští. Ti si oddechli až na konci ledna, když Bohr dostal od Frische kopie obou odeslaných článků.

Závěr

Bohr v únoru pobýval na univerzitě v Princetonu (Einstein mu zapůjčil svoji velkou kancelář) a 5. 2. za ním dorazil Placzek. Ráno u snídaň hovořili s vědci o výsledcích experimentů v Kodani. Placzek poukázal na to, že cesta k transuranům nemusí být ještě uzavřena, po-

nevadž v pokusech dochází k prapodivným výsledkům u procesů štěpení a u procesů, kdy je neutron jen zachycen uranovým jádrem (experimenty s rezonančním vrcholem u energií kolem 25 eV, na něž upozorňovala již dlouho Meitnerová). Bohr byl po jeho sdělení naprosto vyveden z míry. Dožadoval se odchodu do kanceláře, nicméně již během chůze a k údivu všech přítomných Bohr doslova vykouzlil průlomové řešení. Následně ukázal, namaloval a spočítal, že je nutné odlišit oba procesy; kámen úrazu spočíval v tom, že ke štěpení dochází jen v případě čistého uranu (menšinový izotop, uran-235), jehož je pouze necelé procento v bombardovaných vzorcích uranové rudy (většinový izotop, uran-238). Nevyloučil tak ani budoucí možnost produkce transuranů. Ovšem podrobný popis těchto Bohrových výsledků, objevení funkčnosti tzv. řetězové reakce dánským fyzikem Christianem Møllerem (1904–1980) nebo záslužná práce Meitnerové a Frische v Kodani na štěpných produktech či transuranech s pomocí urychlovače částic, to již náleží do jiného příběhu.²³

Literatura

- [1] F. Grygar: „Osmdesát let od objevu a interpretace jaderného štěpení (1938): Otto Hahn a tradovaná verze příběhu“, Čs. čas. fyz. **69**, 49 (2019); „Lise Meitnerová v kontextu rozvoje nukleárního výzkumu a vzestupu i pádu nacistického Německa“, Čs. čas. fyz. **69**, 203 (2019) a „Zneuznaná role Lise Meitnerové na cestě k objevu jaderného štěpení“, Čs. čas. fyz. **69**, 339 (2019).
- [2] F. Grygar: „Odvrácená strana legendy: Otto Hahn v kontextu nacistického Německa“, *Teorie vědy*, **XLI**, 1 (2019).
- [3] O. R. Frisch: *What little I remember*. Cambridge University Press, Cambridge – New York – London 1980.
- [4] O. R. Frisch: „A Walk in the Snow“, *New Scientist* **60**, 833 (1973).
- [5] O. R. Frisch: „The Discovery of Fission – How It All Began“, *Physics Today* **20**, 43 (1967).
- [6] O. R. Frisch: „Lise Meitner, 1878–1968“, *Biogr. Mems. Fell. R. Soc.* **16**, 405–420 (1970).
- [7] O. R. Frisch: „The Interest is focussing on the atomic Nucleus“, in S. Rozental (ed.): *Niels Bohr – His Life and Work as seen by his Friends and Colleagues*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam 1967.
- [8] O. R. Frisch: *Oral Histories. Otto R. Frisch interviewed by Charles Weiner*, 3. května 1967. Online přepis viz <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4616>.
- [9] O. Hahn: *Mein Leben – Die Erinnerungen des Grossen Atomforschers und Humanisten*. R. Piper GmbH & Co. KG, München 1986.
- [10] P. Rife: *Lise Meitner and the Dawn of the Nuclear Age*. Birkhäuser, Boston – Berlin 2007.
- [11] R. L. Sime: *Lise Meitner. A Life in Physics*. University of California Press, Berkeley – London 1996.
- [12] F. Grygar: *Komplementární myšlení Nielse Bohra v kontextu fyziky, filosofie a biologie*. Pavel Mervart, Červený Kostelec 2014.
- [13] L. Meitner a O. Frisch: „Disintegration of Uranium by Neutrons. A New Type of Nuclear Reaction“, *Nature*, **143**, iss. 3615, February (1939).
- [14] O. Frisch: „Physical Evidence for the Division of Heavy Nuclei under Neutron Bombardment“, *Nature*, **143**, iss. 3616, February (1939).
- [15] R. Rhodes: *The Making of the Atomic Bomb*. Simon and Schuster, New York – London 1986.

21 Viz [15], s. 263.

22 Viz [3], s. 117, nebo [7], s. 145.

23 Více viz [12], kap. 4.3.