

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Miroslav Pardy

Hans Albrecht Bethe (2. 6. 1906 – 6. 3. 2005)

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 50 (2005), No. 4, 325--331

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/141286>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2005

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>

- Spotřebitelé by měli bojkotovat předražené knihy. Buďte vybíraví, snad dokonce snobští.

Mantra „publish or perish“ neumírá, je jen nemocná. Publikování vědeckých prací je rozsáhlé podnikání a nemoc, která může být vyléčena dávkou zdravého rozumu.

Tento komentář mohl být napsán ještě daleko kousavěji nebýt moudrých rad mnoha mých přátel, jejichž jména si nechám pro sebe. Scientia est potentia.

Hans Albrecht Bethe

(2. 6. 1906 – 6. 3. 2005)

Miroslav Pardy, Brno

Dne 6. března 2005 zemřel ve věku 98 let ve svém domě v Ithace jeden z nejvýznamnějších světových fyziků Hans Albrecht Bethe. Narodil se 2. června roku 1906 v tehdy německém Strasbourgu. Na konci 1. světové války se Alsasko-Lotrinsko stalo opět součástí Francie. Bethův otec byl univerzitním profesorem fyziologie a vyznáním protestant, matka, která pocházela z židovské rodiny, byla hudebnicí a zároveň autorkou her pro děti. Mladý Bethe navštěvoval v letech 1915–1924 Gymnasium J. W. Goetha ve Frankfurtu nad Mohanem. Poté studoval dva roky na tamní univerzitě, další dva a půl roku absolvoval v Mnichově. Záhy si získal pověst velmi talentovaného matematika. Po skončení studia v roce 1928 obhájil doktorát z teoretické fyziky pod vedením slavného Arnolda Sommerfelda.

Následně se stal instruktorem fyziky ve Frankfurtu a ve Stuttgartu, a to vždy na dobu jednoho semestru. Od roku 1929 do roku 1933 byla jeho působištěm mnichovská univerzita, kde se v roce 1930 stal soukromým docentem. V této době získal od Mezinárodní vzdělávací nadace stipendium pro pobyt v Cambridge na rok 1930 a v jarních semestrech 1931 a 1932 rovněž pro pobyt v Římě, kde mohl navázat spolupráci s Enrico Fermim. Po návratu z Říma nastoupil jako vysokoškolský učitel v zimním semestru 1932–1933 na univerzitu v Tübingen. Z tohoto postu byl však záhy odstraněn, protože nacistům, kteří se tehdy dostali k moci, vadilo, že jeho matka byla neárijského původu.

V říjnu roku 1933 Hans Bethe emigroval do Anglie, kde na rok získal místo lektora na univerzitě v Manchesteru. Udělal dobře, že zvolil emigraci, neboť v Německu od roku 1935, kdy byly proti lidem neárijského původu uplatňovány norimberské rasové

Doc. RNDr. MIROSLAV PARDY, CSc. (1943), katedra fyzikální elektroniky, Kotlářská 2, Masarykova univerzita, 611 37 Brno, e-mail: pamir@physics.muni.cz

zákony, platila zásada, že „kdo uteče, vyhraje“. Mnozí lidé ocitnuvši se ve stejné situaci, kteří tak neučinili, tragicky zahynuli v koncentračních táborech, německých továrnách na smrt.

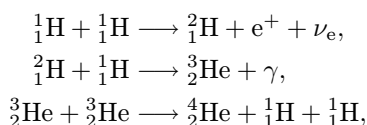
Bethe dostal možnost uplatnit se v USA a v únoru roku 1935 se stal členem učitelského sboru na Cornellově univerzitě v Ithace. V roce 1937 mu byla udělena řádná profesura. Zde kromě profesorského volna a nepřítomnosti během druhé světové války setrval až do konce své činné služby. Ve válečném období pracoval na vývoji mikrovlnného radaru v radiační laboratoři Massachusettského technologického institutu a potom rovněž v laboratořích v Los Alamos, kde se podílel na vývoji první atomové bomby. Po válce spolupracoval s Edvardem Tellerem i na vývoji vodíkové bomby. Do Los Alamos se ještě vrátil v roce 1952 na půlroční pobyt. Profesorská volna využil dvakrát k pobytu na Kolumbijské univerzitě, dále v Cambridge, pak v CERNu v Ženevě a nakonec v Kodani.

Těžiště Betheovy vědecké práce spočívalo v teorii atomových jader. Spolu s R. Peierlsem vytvořil v roce 1934 teorii deuteronu a dále ji pak ještě zdokonalil v roce 1949. V roce 1935 vyřešil problém nesrovnalostí v jaderných hmotnostech. V letech 1935 až 1938 se zabýval teoriemi jaderných reakcí, přičemž předpověděl mnohé reakční účinné průřezy. V rámci výzkumu převedl Bohrovu teorii složených jader do kvantitativní podoby. Výsledky práce spolu s tehdejší jadernou teorií a se zahrnutím experimentálních výsledků publikoval ve třech článcích v renomovaném časopise *Reviews of Modern Physics*. Ty se staly na mnoho let učebnicí jaderné fyziky, mezi vědci známou jako „Betheho bible“.

Zaujetí pro práci v oblasti jaderných reakcí přivedlo Betheho k objevu reakcí, jež jsou zdrojem energie hvězd. Zjistil, že v jasných hvězdách s teplotou nad sto milionů kelvinů je nejdůležitější jadernou reakcí tzv. uhlíkový cyklus, zatímco ve Slunci a ve vyhasínajících hvězdách s teplotou pod sto milionů stupňů Kelvinovy stupnice probíhá především slučování jader vodíku. Tuto reakci lze vyjádřit tak, že proton interaguje s protonem tím způsobem, že dochází k jejich sloučení a při něm vzniká deuteron, pozitron a elektronové neutrino. Betheův hlavní přínos spočíval v nalezení sekvence dominantních jaderných reakcí a v eliminaci možných nedominantních jaderných reakcí, jež probíhají ve hvězdách. Hans Bethe tak dokázal, že rozhodujícím faktorem ve vývoji hvězd jsou jaderné reakce při vysokých teplotách a vysokých tlacích a nikoliv fyzika zakřiveného prostoročasu nebo extra dimenze. Tento fakt je však snadno pochopitelný, uvážíme-li, že vazebné konstanty jaderných reakcí jsou o několik desítek řádů vyšší, než je gravitační konstanta.

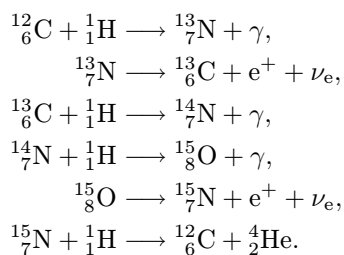
Betheovo spojení jaderných reakcí s hvězdami připomíná průkopnický čin L. D. Landaua, jenž navrhl možné seskupení neutronů v klastry, a tím pouhý rok po objevu neutronu Chadwickem v roce 1932 teoreticky předpověděl existenci neutronových hvězd. Tyto hvězdy byly objeveny až v roce 1968 pomocí nově vybudovaných mohutných radioteleskopů. Nobelovu cenu získal Hans Bethe v roce 1967 především za objev jaderných reakcí ve hvězdách s přihlédnutím k významu jeho dalších příspěvků v oblasti teorie jaderných reakcí.

Konkrétně můžeme připomenout proton-protonový cyklus termojaderných reakcí ve hvězdách, který objevil Hans Bethe ve tvaru následující posloupnosti:



kde jsme použili klasického označení pro proton a deuteron. V moderní symbolice bychom psali ${}^1_1\text{H} = p = \textit{proton}$, ${}^2_1\text{H} = d = \textit{deuteron}$.

Pokud jde o konkrétní vyjádření procesu uhlíkového-dusíkového cyklu termojaderných reakcí, jež probíhají ve hvězdách a které nezávisle na Betheovi objevil Karl Weizsäcker, potom základní posloupnost těchto reakcí je následující:



V roce 1955 se Bethe vrátil k teorii atomových jader, přičemž vytvořil teorii jaderné hmoty, aby vysvětlil vlastnosti jader jako důsledek jaderných sil působících mezi nukleony v atomovém jádře. Výsledky bádání byly publikovány v knize *The nuclear Matter*, která byla přeložena do mnoha jazyků.

Počátkem třicátých let, ještě před vytvořením teorie jaderných reakcí, se Bethe zabýval také elektronovou teorií kovů a teorií srážek v pevných látkách. V roce 1931 publikoval mimořádně významný článek: *Zur Theorie der Metalle: Eigenwerte und Eigenfunktionen der linearen Atomkette*. V článku studoval model lineárního řetězce N atomů, jež interagovaly pouze se svými sousedy. Model je analogií Heisenbergova modelu feromagnetizmu nebo modelu Isingova anebo Thirringova atd. a v teorii lineárních řetězců zaujal tak významnou roli, že o Betheově modelu a o matematických metodách s ním spojených se v současné době publikují obsáhlé monografie. Bethe totiž v tomto svém článku zformuloval tzv. Betheho ansatz pro vlnové funkce matematicky komplikovaného mnohočásticového samointeragujícího systému atomů. Tento jeho ansatz umožnil prakticky konstruovat vlastní funkce a vlastní hodnoty takového systému interagujících atomů. Dnes představuje základ oboru, nazývaný v matematické fyzice *teorie integrabilních systémů*.

V Československu se rovněž studovaly lineární řetězce jak na univerzitách v Praze, tak v Brně a Bratislavě. Betheův vliv na teoretickou fyziku na těchto univerzitách byl sice skrytý, ale nikoliv zanedbatelný.

Později vyšla kniha *Elektronentheorie der Metalle*, již napsal Hans Bethe spolu s A. Sommerfeldem. Vyšla v roce 1933 v řadě *Handbuch der Physik* a je dosud aktuální. Pokud jde o teorii srážek, vytvořil relativistickou kvantovou teorii a odvodil

vzorec pro energetickou ztrátu částice, která se rychle pohybuje v prostředí složeném z atomů. Je obecnější a přesnější než předcházející klasická teorie Bohrova. Pro pochopení zákonitostí, jež probíhají při implantaci iontů, je nutné se opírat o teorii Betheovu. Je použitelná i v jaderné fyzice a ve fyzice elementárních částic, neboť ze znalosti energetických ztrát poznáme, o jakou částici jde. Rovněž pro pochopení pohybu vysokoenergetických částic v kvark-gluonovém plazmatu je studium Betheovy publikace žádoucí.

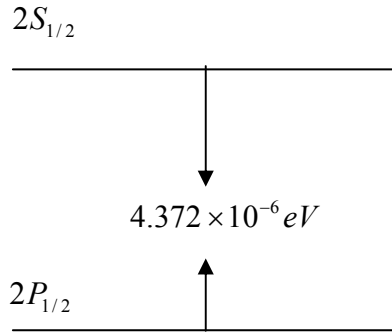
Spolu s W. Heitlerem Bethe odvodil ve třicátých letech vzorec pro brzdné záření, jež vzniká, pohybuje-li se nabitá částice v brzdném prostředí. Podařilo se jim rovněž objasnit produkci elektron-pozitronových párů generovaných vysoce energetickými paprsky gama.

Ve fyzice pevných látek studoval Hans Bethe štěpení atomových energetických hladin za okolností, kdy je atom vložen do nitra krystalu. Přispěl rovněž k vývoji teorie slitin, která v současné době hraje fundamentální roli v oblasti těch slitin, jež jeví vysokoteplotní supravodivé vlastnosti.

Hans Bethe jako první teoreticky objasnil neuvěřitelný a fascinující Lambův posuv ve spektru atomu vodíku, když teoreticky dokázal, že vodíkový stav $2S_{1/2}$ není energeticky totožný se stavem $2P_{1/2}$, a proto odpovídající spektrální čáry jsou dvě a nikoli jedna, ačkoliv nerelativistická teorie, ale i relativistická Dirakova rovnice předpovídají absolutní splývání těchto čar v jednu, a tím nemožnost jejich optického a jakéhokoli dalšího rozlišení. Betheův heuristický krok spočíval v uvědomění si faktu, že kvantový popis elektronu je úplný teprve tehdy, když zahrnuje i člen popisující interakci elektronu s vlastním elektromagnetickým polem, tedy elektrodynamickou samointerakci.

Z hlediska kvantové teorie pole jde o vyzáření virtuálního fotonu elektronem a o jeho následné pohlcení. Právě tento virtuální proces, jenž je jednou z takzvaných radiačních korekcí, působí štěpení zmíněné spektrální čáry ve dvě. Je ovšem tak malé, že žádná optická metoda na rozlišení těchto čar nestačí. Pouze brilantně propracovaná a aplikovaná metodika centimetrových vln umožnila Lambovi a Rutherfordovi koncem čtyřicátých let tyto hladiny od sebe rozlišit, a to ještě dříve, než Bethe štěpení určil kvantitativně. Není divu, že za experimentální výkon byla Lambovi a Rutherfordovi udělena Nobelova cena. Je třeba ovšem dodat, že Betheho výpočet, ač nerelativistický, nebyl bez problémů. Ve výpočtu se vyskytovaly divergentní matematické výrazy, které ale Bethe odstranil cestou matematických kompenzací, jež zahrnovaly renormalizaci hmoty a náboje elektronu. Tímto způsobem byl učiněn zásadní krok vpřed v řešení problému radiačních korekcí a položen začátek rychlého rozvoje kvantové elektrodynamiky a kvantové teorie pole. Renormalizační metoda se později rozvinula v dokonalou teorii, jež umožňovala výpočty radiačních korekcí libovolného řádu s dosažením souladu s experimentem. Byli to Betheovi následovníci J. Schwinger, R. Feynman a další, kteří přivedli kvantovou elektrodynamiku do stavu, kdy tato teorie začala být schopna dávat nejpřesnější fyzikální predikce. Tím se stala nejpřesnější fyzikální teorií všech dob.

H. Bethe a R. Marshak jsou známi rovněž jako spoluzakladatelé teorie π -mezonů a Bethe sám pak jako autor a spoluautor řady článků o mezonech a kvantových polích.



Obr. 1. *Ilustrace Lambova posuvu v atomu vodíku.* Spin-orbitální interakce přispívá k energetické korekci a tedy k energetickému posuvu hladin, který závisí na kvantových číslech „ n “ a „ j “. Stavy $2S_{1/2}$ a $2P_{1/2}$ ve vodíku mají touž energii po aplikaci této korekce, i když první stav odpovídá kvantovému číslu orbitálního momentu hybnosti $l = 0$ a druhý stav odpovídá kvantovému číslu $l = 1$. Gyromagnetický faktor „ g “ elektronu je nepatrně větší nežli číslo 2, takže spinový moment hybnosti, číselně rovný $g\hbar/2$, přispívá k elektronovému magnetickému momentu více než orbitální moment hybnosti, který je roven \hbar . To způsobuje, že stav $2S_{1/2}$ má nutně vyšší energii než stav $2P_{1/2}$.

Mezony byly do fyziky zavedeny japonským fyzikem H. Yukawou s cílem vysvětlit silné interakce. Původně měly π -mezony objevené v roce 1947 vysvětlovat silné interakce, podobně jako foton vysvětluje interakce elektromagnetické. Asi za čtyřicet let se však ukázalo, že Yukawova teorie není správná, protože π -mezon je složen z kvarků a fundamentální interakce mezi kvarky je zprostředkována částicemi zvanými gluony. Nicméně Yukawova teorie sehrála ve vývoji fyziky elementárních částic klíčovou roli.

Ve fyzice částic je velmi často citována Betheova práce, v níž spolu s E. Salpeterem vytvořili rovnici nesoucí jejich jméno. Rovnice popisuje relativistické kvantové stavy systému dvou nabitých částic, a to jak jejich vázané stavy, tak rozptylové. I přes nemalé matematické obtíže má tato rovnice ve fyzice elementárních částic stále podstatnější význam. Dnes je například velmi známý experiment *DIRAC*, na němž se pracuje v CERNu. Zabývá se fyzikou pionia, tj. vázaného stavu kladného a záporného π -mezonu. Je to analogie pozitronia, které je vázaným stavem elektronu a pozitronu. Experiment s pioniem, na němž se podílejí i pražští fyzikové, se teoreticky opírá rovněž o predikce plynoucí z Betheovy-Salpeterovy rovnice. Připomeňme její matematickou formu.

Jestliže označíme souřadnice první částice číslem 1 a druhé částice číslem 2, potom vlnová funkce obou částic může být označena symbolem $\psi(1, 2)$ a Betheova-Salpeterova rovnice pro jejich vázaný stav je integro-diferenciální rovnice tvaru:

$$(i\nabla_3^a - m_a)(i\nabla_4^b - m_b)\psi(3, 4) = i \int d\tau_5 d\tau_6 G(3, 4; 5, 6)\psi(5, 6),$$

kde

$$\nabla_3^a = \gamma_\mu^a \frac{\partial}{\partial x_\mu^a}, \quad \nabla_4^b = \gamma_\mu^b \frac{\partial}{\partial x_\mu^b}$$

jsou dirakovské operátory první částice o hmotnosti m_a a druhé částice o hmotnosti m_b , funkce $G(3, 4; 5, 6)$ je dvoučásticová Greenova funkce odvozená v rámci kvantové teorie pole tak, že charakterizuje invariantním způsobem interakci obou částic. Tuto funkci nelze pravděpodobně vyjádřit v uzavřeném tvaru, ale pouze pomocí rozvoje v exponenciální řadu v závislosti na vazebné konstantě. Pokud je vazební konstanta velmi malá, lze Betheovu-Salpeterovu rovnici aproximovat následujícím způsobem:

$$(i\nabla_1^a - m_a)(i\nabla_2^b - m_b)\psi(1, 2) = iG_0(1, 2)\psi(1, 2),$$

přičemž byla použita aproximace, jež ponechává z Greenovy funkce pouze první člen ve tvaru

$$G^1(1, 2; 3, 4) = G_0(1, 2)\delta^4(1, 3)\delta^4(2, 4).$$

Další zjednodušení lze provést tak, že např. multifotonovou interakci mezi nabitými částicemi nahradíme interakcí jednofotonovou. Tím se Greenova funkce v poslední rovnici rovněž zjednoduší. Lze ukázat, že v nerelativistické limitě přechází Betheova-Salpeterova rovnice ve známou rovnici Breita-Wignera, která se běžně používá pro svou jednoduchost v teorii dvoučásticového kvantově-mechanického problému. Problémy popisu dvoučásticových systémů jsou prezentovány detailně v mimořádně významné monografii *Quantum mechanics of one- and two-electron atoms*, kterou napsal H. Bethe právě s E. Salpeterem a která vyšla v roce 1957.

Bylo by možné jmenovat mnoho publikací a knih Hanse Betheho (uvádí se oficiálně, že jich napsal kolem tří set), jež měly vždy průkopnický význam, ale k tomu účelu bude nutné napsat obsáhlou monografii, k čemuž v budoucnu jistě dojde.

Hans Bethe získal během svého života mnohá ocenění a čestné medaile. Jmenujme alespoň některé: v roce 1947 mu byla udělena medaile Henryho Drapera od Národní akademie věd, v roce 1955 se stal laureátem medaile Maxe Plancka od Německé fyzikální společnosti, v roce 1959 rovněž laureátem medaile Benjaminu Franklina, již uděluje Franklinův institut, a další medaili se stejným názvem získal začátkem r. 2005 i od Americké filozofické společnosti. V roce 1961 mu Královská astronomická společnost udělila Eddingtonovu medaili a v témže roce dostal od Americké komise pro atomovou energii i cenu Enrica Fermiho. V roce 1963 byl vyznamenán Rumfordovou cenou Americké akademie věd a umění. V roce 1984 mu německá vláda udělila Čestný řád umění a vědy. V roce 2001 pak získal medaili Národní laboratoře v Los Alamos.

Hans Bethe si vysoce cenil takzvané čisté vědy, která není v dnešní době často docenována. Řekl: „Intelektuální hodnota čisté vědy je jednou z věcí, které dávají životu smysl.“ Pod pojmem čisté vědy ovšem Bethe nechal jen čistou matematiku. Naopak aproximační metody ve fyzice považoval za stejně užitečné a krásné jako metody čisté matematiky. Kdo mu vnukl tuto myšlenku? Pravděpodobně Enrico Fermi, jehož si velmi vážil. Za svého pobytu v Římě, kde nutně musel reflektovat i proslulost a monumentalitu tamních památek, Bethe přátelsky prohlásil: „Koloseum je sice velkolepé, ale největší pozoruhodností v Římě je přece jen Fermi.“ Hans Bethe byl znám i tím, že při fyzikálních výpočtech dokázal používat logaritmické pravítko tak, aby získal výsledek s přesností na šest desetinných míst. Dnes, v době masového rozšíření kapesních elektronických kalkulaček, jež jsou běžnou součástí jakéhokoli

elektronického zařízení, se tato přesnost může jevit jako elementární, přesto ještě před půlstoletím vyžadovalo použití pravítka neobyčejnou zručnost.

Z dalších myšlenek H. Betheho je známý i výrok týkající se vědy a lidských práv. Říká v něm, že: „Věda obsahuje vždy více nezodpovězených otázek než zodpovězených, avšak její velká přednost je v tom, že umí dokázat, že něco je pravda a něco jiného nepravda. Toto však neplatí v oblasti lidských práv, kdy většina lidských záležitostí je z jednoho hlediska správná a z druhého nesprávná.“

O Bethem je známo, že dělal fyziku s úsměvem a s profesionální lehkostí, což mu získávalo sympatie širokého okolí vědců a obzvláště studentů. Byl tak příkladem učitele, kterého mají studenti rádi a který jim svým pojetím fyziky dokazoval, že fyzika je věda přitažlivá, krásná a dokonce nádherná. Překonal tak pojetí J. A. Komenského, jenž sice požadoval „školu hrou“, ale uznával pouze „ráj srdce“, jenž tehdy ještě nesouvisel s matematikou a fyzikou. Zatímco se Komenský jako dědic novověkého evropského humanismu nedokázal vymanit ze svých sladkobolných pocitů, Bethe pochopil, že i ve fyzice je „něco krásného, co drtí, odvaha a radost ze života a smrti“ (V. Nezval, *Edison*).

Jestliže se Hans Bethe podílel na vývoji atomové bomby z etických důvodů v době války, na jeho účast při vývoji vodíkové bomby lze nahlížet jako na méně etickou. Možná však, že ve své době byla nutností. Později se spolu s ostatními vědci Hans Bethe postavil proti Reaganově strategicko-obranné iniciativě známé též jako hvězdné války, jež měla v první řadě vyčerpat Sovětský svaz a jeho satelity praktickým uzbrojením. O mezinárodní odsouzení tohoto nesmyslného programu se snažila velká část světové vědecké komunity.

Pro vědce a jeho práci bývá důležité i rodinné zázemí. Provázel významně i soukromý život Hanse Betheho. Dobře se oženil, když si vzal dceru významného odborníka v oblasti rentgenové fyziky P. P. Ewalda, s níž vychoval syna Henryho a dceru Moniku. Kromě zaujetí pro náročnou, ale nesmírně zajímavou práci ho tedy životem provázela i ideální rodinný soulad.

L i t e r a t u r a

- [1] *Selected Works of Hans A. Bethe with Commentary*. World Scientific Series in 20th Century Physics, Vol 18., World Scientific, Singapore.
- [2] FERMI, L.: *Atomy v Rodině*. Práce, Praha 1973.
- [3] ROHLF, J. W.: *Modern Physics from α to Z^0* . John Wiley & Sons, Inc., New York 1994.
- [4] *Novějšije razvitije kvantovoj elektrodinamiky*. Sbornik statěj, Red. D. D. IVANĚNKO, Izdatelstvo Innostranoj Literatury, Moskva 1954.