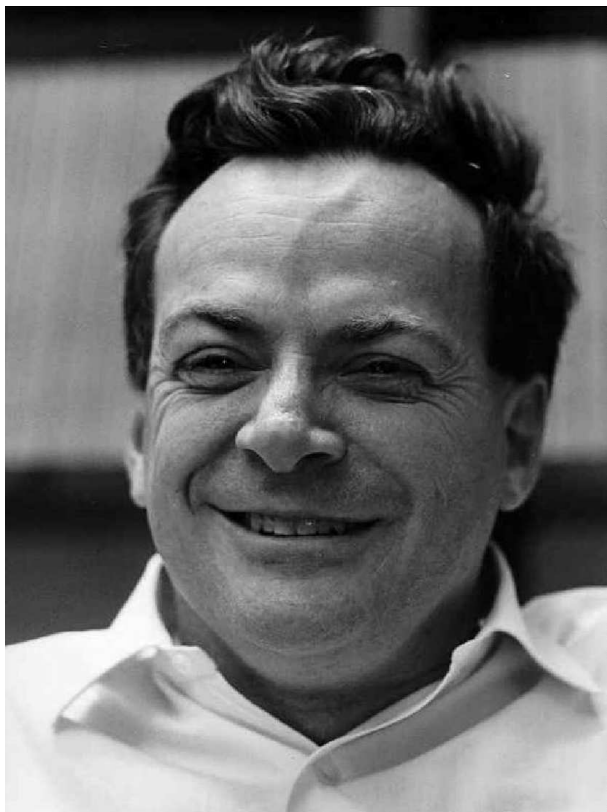


vzpomínky na  
richarda feynmana







*Richard Phillips Feynman 1918–1988*



Richard Feynman byl teoretickým fyzikem. Byl člověkem, pro něhož bylo přímo vášní přemýšlet o neživé přírodě a vesmíru. Přemýšlet a počítat ve snaze porozumět přírodním jevům, najít matematický způsob jejich popisu. Byl jedním z těch, kterým takovéto nepraktické věci daleké od každodenní zkušenosti přinášely radost. Radost z vyřešeného hlavolamu či radost z toho, že to lze ukázat a vysvětlit jiným lidem.

Zemřel 15. února 1988. Ale již v létě se v Řeži konal vzpomínkový seminář a jeden z přednášejících tam říkal: „Nevím, jak je vám, ale mně umřel papež.“ Feynmanův vliv na moderní fyziku byl obrovský. V únoru 1989, rok po jeho smrti, vyšlo speciální číslo *Physics Today*, které mu bylo celé věnováno. Několik předních fyziků (a nejen fyziků) se v tomto časopise zmiňuje o tom, jak viděli jeho práci a jeho samého. Jejich vzpomínky jsou shrnuty v tomto dokumentu a doplněny o některé další, které vyšly porůznu v jiných časopisech. O Feynmanovi bylo mnoho napsáno, ale ještě víc zůstalo a navždy zůstane jen ve vzpomínkách jeho přátel. . .



# Mladík Feynman

*John Archibald Wheeler*

„Ten mládenec z MITu. Podívejte se na výsledky jeho testů z matematiky a fyziky. Fantastické! Nikdo z ostatních, kteří se sem na Princeton hlásí, nedosáhl výsledků bližících se k absolutnímu maximu!“ Někdo jiný v přijímací komisi na postgraduální studium poznamenal: „Je to nebroušený diamant. Nikdy jsme nepřijali někoho, kdo by měl tak málo bodů v historii a v angličtině. Ale podívejte se na jeho praktickou zkušenost v chemii a v eliminaci tření!“

Není to doslovný záznam a vystižení podstaty toho, jak probíhalo přijímací řízení na jaře 1939, které k nám přineslo 21letého Richarda Phillipse Feynmana jako postgraduálního studenta. Nikdy jsem se nedozvěděl, jakým řízením osudu byl přidělen k 28letému asistentovi coby cvičící v kursu mechaniky pro třetí ročník, ale navzdýcky jsem byl vděčný té náhodě, která nás dala dohromady. Když mi přinášel opravené a nápomocnými komentáři doplněné úlohy studentů, naskytla se často příležitost, abych se zmínil o práci, kterou dělám a záhadách, se kterými se setkávám. Diskuse přecházely v smích, smích v narážky a vtipy a ty zase zpět ve smích a nové nápady.

## **Rozbitá láhev**

Jednou se naše hovory stočily k Machovu principu. Věděli jsme, jakou inspiraci našel Einstein, když přemýšlel o setrvačnosti proti zrychlování ne vůči Newtonově absolutnímu prostoru, ale vůči Machovým vzdáleným hvězdám. Snad to byla úloha z kursu mechaniky, která nás přivedla k úvahám o zahradním rozprašovači. Rozprašovači ve tvaru hákového kříže, ze kterého stříkají čtyři proudy vody. Zpětná reakce otáčí rozprašovačem dokola, ve kterém místě však působí? Nepůsobí v bodě, kde se proud vody stáčí do pravého úhlu? Předpokládejme však, že nyní vodu nasáváme, místo abychom ji rozstříkovali. Říkali jsme si, že máme co do činění s toutéž změnou směru a tedy i s toutéž reakcí. A tak se roz-

prašovač bude určitě otáčet dokola, když vodu budeme nasávat místo toho, abychom ji vytlačovali. Ale ne, nebude. Ale ano, bude. Obě strany otázky jsme diskutovali s našimi kolegy a s přibývajícím časem jich stále víc a víc zaujímalo vyhraněné pozice. Debaty se stávaly vášnivějšími. Žádný teoretický argument nebyl dostatečně přesvědčivý a situace volala po experimentu.

Feynman vyrobil ze skleněných trubic miniaturní šestipalcový rozprašovač. Zjistil, že jako rozprašovač pracuje tak, jak má. Poté protáhl ten vaklavý aparát hrdlem velké obedněné láhve naplněné vodou a celé to umístil na podlahu cyklotronové laboratoře, kde byl k dispozici vhodný přívod stlačeného vzduchu. Ten vhněl dovnitř druhou dírkou v zátce láhve. Ha! Malý záchvěv v okamžiku, kdy se začal vzduch vhnět do láhve a voda začala proudit rozprašovačem. Ale jak proudila dál, nic se nedělo. Zvýšil tedy tlak vzduchu, čímž se voda více rozproudila, a znovu pozoroval chvilkový zákmit na začátku manévru, avšak žádný kontinuální pohyb. OK, ještě větší tlak. A ještě! Prásk! Skleněná láhev explodovala. Voda a střepy z láhve se rozletěly po celé místnosti. Od té doby platil pro Feynmana přísný zákaz vstupu do laboratoře.

## **Všechno jako rozptyl**

Feynmanovy pomoci jsem využil také k jednomu přetrvávajícímu problému, který jsem si do Chapel Hill a poté do Princetonu přinesl z dob krátce po doktorátu. Na velké londýnsko-cambridgeské konferenci, konané v říjnu 1934 a věnované Rutherfordovi, byly představeny čtyři úlohy. Z nich mne později nejvíce zaujala úloha minispršky, jak jsem ji nazýval – úloha tzv. „anomálního“ zpětného rozptylu  $\gamma$  paprsků na olovu. K vysvětlení experimentálních výsledků Louise Graye a Geralda Tarranta, Chung-Yao Chaoa, Lise Meitnerové, H. H. Hupfelda a Jacoba Jacobsena z let 1930–35 bylo potřeba současně uvážit téměř všechny elementární procesy fyziky fotonů: produkci comptonovských elektronů, fotoelektronů a elektronových párů dopadajícími 2,6 MeV  $\gamma$  paprsky a elektronový a fotonový rozptyl – jak jednoduchý, tak vícenásobný. Pro každý z elementárních procesů jsem měl symbolický diagram a křivku účinného průřezu v závislosti na energii. Ale k tomu,



aby člověk dal dohromady všechny tyto procesy s cílem spočítat spektrum záření rozptýleného zpět, bylo třeba spousty numerické dřiny.

Když jsme to s Feynmanem probrali, shodli jsme se, že na to nemáme národu. Dodnes tento problém nikdo nedokončil. Místo toho jsme se zaměřili na dvě témata, která stála v původním problému na periférii. Jak vypadá pohled na Comptonův rozptyl z hlediska Fermi-Diracovy statistiky? A jak lze pouze rozptylem vysvětlit šíření fotonu prostředím s nehomogenním indexem lomu či průchod elektronu nehomogenním potenciálním polem atomu? Kolik zajímavých aspektů fyziky je soustředěno v těchto otázkách, zvláště v té druhé: Huygensův princip jakožto představa o šíření světla (a dnes i hmoty); index lomu jako kumulativní důsledek mnoha individuálních aktů rozptylu; spirály – Cornuova a jiné – jako prostředek ke sčítání rozptýlených vln; a jako inspirující motto fráze „všechno jako rozptyl.“ Kolik zábavy jsme s tím měli, kolik legrace jen tak mimochodem, jaká pozoruhodná směsice diagramů a rovnic, známých i nových! Práci jsme nikdy nepublikovali, ale oba jsme získali náhled do věcí zúročili v letech po válce.

### **Točící se konzerva**

Někdy jsme společně pracovali v mé kanceláři ve Fine Hall, tři bloky východně od Feynmanovy koleje – hodinu za hodinou jsme popisovali skládané balíky počítačového papíru, které byly stejně velké tehdy jako nyní. Ale při delších sezeních jsme častěji pracovali u mne doma, dva bloky západně od koleje. Když jsme sešli ze schodů poobědvat, pětiletá Letitia a tříletá Jamie se k nám připojily v naději, že Feynman vytáhne z rukávu nějaký ze svých triků. Jak na něj svými očičky stále hleděly, neodolal: „Konzervu.“ Vešel do kuchyně, kde žena vařila oběd a z police vzal neotevřenou konzervu. „Řeknu vám, jestli to uvnitř je tekuté nebo tuhé bez toho, že bych konzervu otevřel nebo se podíval na obal. Víte jak?“

„Jak?,“ přišla odpověď.

„Podle toho, jak se bude otáčet, když ji vyhodím do vzduchu.“ A vyhodil ji, aby zpozoroval prudkou precesi. „Tekuté,“ konstatoval. Když jsme konzervu otevřeli, mohli jsme se všichni přesvědčit, že měl pravdu.

## Hypnotizován?

„Můžu Tě příští středu večer pozvat na večeri k nám na kolej?“, zeptal se jednou Feynman. „Bude tam přednáška o hypnóze s demonstrací.“ Když při demonstraci byla poptávka po dobrovolnících, přihlásil se právě Feynman a šel dopředu před celý sál. Hypnotizér vykonával své pohyby a říkal svá zaklínadla. Hrobovým hlasem přednášel povely: „Jdi do rohu místnosti. Otoč se. Vezmi knihu, která před tebou leží. Dej si ji na hlavu. Přines mi ji.“ Feynman, který vypadal jako náměsíčník, prováděl, co mu poručil. Pak plnil další příkazy až nakonec seance skončila.

S tím, jak jsem znal Feynmana a jak jsem sledoval jeho vystoupení, jsem došel ke všední, věcné teorii „hypnózy“ – je to divadlo. Shakespeare herec je puzen k tomu, aby hrál žádanou roli, prostřednictvím jemného tlaku publika. Stejně tak v hypnóze! Neznám nikoho, kdo by kdy zahrál neznámou roli tak rozkošně, nápaditě a zábavně jako tehdy Richard Feynman.

Kdyby to dovolovalo místo, bylo by lákavé po historkách o točící se konzervě a hypnotické seanci pokračovat s dalšími příběhy Feynmanova života v Princetonu: elektrické obvody coby černé skříňky, třesoucí se medúza, magnetické paměti. Poslední dva patřily k prvním projevům jeho celoživotního zájmu o fungování mozku. Zájmu, který se nejjasněji projevil v seminářích, které na Caltechu vedl v posledních letech života. Nejprve společně s Johnem J. Hopfieldem a Carverem Meadem, poté samostatně.

## Prolog k dizertaci

Richard Feynman byl jedním z báječných doktorandů, od kterých jsem se toho tolik naučil. Vyjadřuji-li mu vděčnost za řadu náhledů na věci, musím přiznat svůj nesmírný vděk všem studentům, jenž mne o mnohé obohatili.

V roce 1939 Feynman ještě nebyl rozhodnut, jaké bude téma jeho dizertace a kdo jeho školitelem. Jako postgraduálnímu studentovi bez

specializace či školitele, bez povinností navštěvovat jakékoli přednášky (jako všichni princetonská studenti tehdy i teď), se před ním otvíralo bohatství matematiky a fyziky na univerzitě a v Ústavu pro pokročilá studia. Na druhé straně věděl, že já jsem rozpolcený člověk, jehož to táhlo ke všem tématům, která se objevila jako důsledek různorodé práce a neuhastitelné zvědavosti ohledně základů fyziky. Z některých mých přednášek znal mou víru v to, že vše důležité je ve svém základu velice jednoduché. Nebyly však moje představy z let 1934–35 bláznivé? Předíracovat Diraca a uvažovat elektrony jako základ všeho, všech částic, tzv. „silných interakcí“ v jádře či dokonce elektromagnetického pole? Nicméně Feynmana tyto představy zaujaly natolik, že mne zaměstnával coby jeho školitele.

### **Interakce s absorbérem**

Podněcován představou „všechno jako elektrony“ jsem si mezi bezprostředními zájmy vyšetřil nějaký čas a jen tak bokem zjistil, že umím kvantitativně spočítat zářivý odpor pomocí konceptu síly od částic vzdáleného absorpčního bodu. Ukázalo se, že hustota a vzdálenost těchto částic z výsledku vypadnou za předpokladu, že v okolí je dostatek částic na to, aby totálně pohltily vycházející záření. Závadou však bylo, že spočtená síla zářivého odporu se lišila faktorem 2 od známé a mnohokrát ověřené hodnoty.

Když se dalšího rána objevil Feynman s opravenými studentskými úlohami, pověděl jsem mu o svém výpočtu a o těžkostech s faktorem 2. S obvyklou vervou se zapojil do prostřed této nové hry a brzy objevil zdroj obtíží – nezapočítal jsem dostatečně efektivní sílu, kterou zářící bod působí na absorpční bod. Při správném uvážení této síly již všechno bylo v pořádku.

Nedlouho poté jsme o našem výsledku referovali na semináři. Za pár dní se mi na odpoledním čaji Pauli svěřil s pochybnostmi, zda náš výsledek nevznikl z nějaké matematické tautologie. Ale i přesto jsme s Feynmanem navštívili Einsteina v jeho domě na Mercer Street č. 112, abychom s ním naši práci prodiskutovali. Einstein se o věc zajímal a byl nápomocný. Pověděl nám o článku, který napsali s Walterem Ritzem, aby

zaznamenali svá opačná stanoviska ohledně původu zářivého odporu – což se nám jevílo jako hezký příklad opravdové kolegiality a zodpovědnosti v království vědy. V tomto krátkém článku Ritz tvrdil, že nevratný charakter reakce záření je následkem nějaké nevratnosti v elektrodynamice samotné. Einstein zástával opačné stanovisko. Podle jeho názoru byly všechny základní rovnice dynamiky částic a polí samy o sobě invariantní vůči inverzi času. Tlumení mělo podle Einsteina původ v nějaké asymetrii počátečních podmínek.

Einstein projevil o naši práci silný zájem, poněvadž jsme konečně podali konkrétní vizi o tom, jaké ty počáteční podmínky jsou a jak to na nich závisí.

Příležitost prezentovat [34] náš nový pohled jsme ale měli až po válce, případně při ukradených hodinách na konferencích v Los Alamos a jinde.

## **Nová metoda pro problém nového druhu**

Jak naši koncepci sil působících na dálku mezi nabitými částicemi bez prostřednictví jakéhokoliv pole převést z klasické do kvantové teorie? Jak k tomuto účelu zúročit princip účinku Adriana Fokkera? Feynman se se svým úžasným elánem úkolu ujal. Poznámku z jedné Diracovy práce brzy mocně rozvinul v kompletní předpis pro kvantování [5], v jeho slavnou metodu „součtů přes světočáry“ či „dráhového integrálu“ – také v úplnosti publikovanou až po válce [17].

Fáze která vstupuje do problémů rozptylu, jimž jsme se věnovali, fáze která se objevuje v časové Schrödingerově rovnici, fáze která vstupuje do Feynmanovy nové metody součtů přes světočáry! Aby uviděl ústřední místo fáze vlny ve schématu věcí, musel novým způsobem prohlédnout ústřední místo principu minimální akce v klasické mechanice. V diskusích s Feynmanem jsem se dovídal, že integrál akce klasické mechaniky je, ve významu mnohem přesnějším než panovala představa a až na univerzální faktor, jenom jiným jménem pro fázi amplitudy pravděpodobnosti asociované s klasickou světočárou.

Když jsem jednoho dne navštívil Einsteina, musel jsem mu o Feynmanově novém pohledu na kvantovou teorii povědět. „Feynman našel

krásný způsob, jak porozumět amplitudě pravděpodobnosti, když dynamický systém přechází ze zadané konfigurace v jednom okamžiku do jiné konfigurace v okamžiku pozdějším. Vychází z naprosté rovnocenosti všech myslitelných světočar, které soustavu převedou z počátečního do konečného stavu, ať by byl pohyb jakýkoli. Příspěvky těchto světočar se neliší v amplitudě, ale ve fázi. A fáze není ničím jiným než klasickým integrálem akce, nehledě na Diracův faktor. Z jeho předpisu lze získat veškerou standardní kvantovou teorii. Není možné najít jednodušší způsob, jak se na kvantovou teorii dívat! Nezamýšlíte, pane profesore, na základě tohoto úžasného objevu přijmout kvantovou teorii?“

Einstein odpověděl vážným hlasem: „Stále nevěřím, že by Bůh hrál v kostky. Ale je možné,“ pousmál se, „že jsem si už vydobítil právo dělat chyby.“

Nezastrašen jsem trval (a stále trvám) na tom, že Feynmanova doktorská práce byla momentem, kdy se kvantová teorie poprvé stala jednodušší než teorie klasická. Svou nadcházející postgraduální přednášku z klasické mechaniky jsem začal Feynmanovou myšlenkou, že mikroskopická bodová částice neproběhne svoji cestu z A do B jedinou světočarou, ale sleduje všechny myslitelné světočáry s demokraticky stejnou amplitudou pravděpodobnosti. Jen z Huygensova principu, jen z představy konstruktivní a destruktivní interference mezi jednotlivými příspěvky – a to jen v aproximaci – je možné pochopit existenci klasické světočáry. Feynman na přednáškách býval a dělal zápisky, jejichž kopii stále uchovávám. Mnoho nejasných bodů pomohl osvětlit jak diskusí v posluchárně, tak mimo ni.

### **Má ten kluk z Far Rockaway nějakou perspektivu?**

V době, kdy Richard pracoval na své dizertaci, mi jednoho dne zavolal jeho otec, Melville Arthur Feynman, obchodní ředitel jedné středně velké společnosti. Jak důležitou roli zastával v jeho výchově, viděla řada z nás ve Feynmanově televizním programu [32] a většina z nás četla v jeho dvou autobiografických bestselerech [23], [24]. Ptal se mne, jestli má jeho syn před sebou nějakou perspektivu.

„Úžasnou,“ ujistil jsem ho.

„A nebude handicapován svým jednoduchým založením či dokonce určitým druhem protižidovských předsudků?“

„Ne,“ odpověděl jsem a popsals jsem mu životní dráhu některých blízkých kolegů. Neřekl jsem mu, že za studentských let v Baltimoru jsem byl jedním ze zakladatelů a prvním prezidentem Federace náboženské mládeže!

## **Od studenta a učitele k zákazníkovi a dodavateli**

Starost ohledně blízkosti války vedla některé z našich princetonských kolegů do Laboratoře záření na MITu. Současně se v Princetonu rozvíjel uranový projekt: Heinz H. Barschall, Morton Kanner a Rudolf Ladenburg prováděli experimenty s řízeným neutronovým štěpením, Edward Creutz, Lewis A. Delsasso a Robert Wilson pracovali s cyklotronem, Henry W. Smyth, Louis A. Turner, Eugene Wigner a já jsme prováděli teoretickou analýzu. Do této práce jsme zatáhli i Feynmana. Několik měsíců po Pearl Harboru se někteří z nás včetně jeho přesunuli do Los Alamos, kde Turnerův plutoniový koncept došel ještě většího uznání. Před odjezdem složil Feynman ústní část rigorózní zkoušky. Byl jsem zklamaný, že jsem u toho nemohl být. V té době jsem již v Chicagu pracoval na uranovém projektu. Na podzim byl West Stands – první jaderný reaktor – před dokončením a Arthur Compton mne požádal, abych přenesl chicagské znalosti do Du Pontu, k producentovi plutonia pro našeho zákazníka, Feynmanova Los Alamos. Nejednou jsme se spolu setkali v Los Alamos, abychom formulovali přepečlivá bezpečnostní opatření pro chemickou separaci plutonia v Hanfordu.

Jednoho večera jsme s Richardem, Joe Fowlerem a jeho týmem stoupali na kopec, abychom zhlédli vysoce explozivní test výbušnin. Vysvětloval mi, jak zjistil, že teplo nelze spoutat. Na jednom z nejlepších štítkových počítadel IBM znovu a znovu počítal tutéž úlohu – hydrodynamické řešení exploze. Ve výsledných rychlostech a tlacích se tu a tam objevovaly nepravidelnosti. Tyto nepravidelnosti se však čas od času odlišovaly. Co se to dělo s počítačem? Najednou zachytil jeho poselství. Program nezahrnoval tepelný člen. Stroj pracoval lépe. Když

hloupé rovnice teplo nezapočetly, musel počítač vytvořit vlastní způsob, jak reprezentovat teplo – pohyb měnicí se chaoticky od místa k místu a z okamžiku na okamžik. S jakou radostí to Richard vysvětloval a jaké potěšení měl během nočních ohňostroju! Ale věděl jsem, že celou tu dobu nese ve svém srdci těžké břemeno.

Jeho žena Arlene pomalu umírala v nemocnici v Albuquerque.

## Arlene

Na jedné z cest z Hanfordu (stát Washington) do Los Alamos (Nové Mexiko) jsem Arlene navštívil v nemocnici. Se ženou jsme poprvé poznali Arlene Greenbaumovou, když ji Richard zval ze svého města Far Rockaway (New York) do Princetonu na příležitostné sobotní taneční večírky ve své koleji. Se svými kaštanovými vlasy nebyla Arlene atraktivní; byla *velice* atraktivní. Z těch víkendů nám zůstaly dva akvarely, které malovala.

Tyto princetonské večírky byly přestávkami v jejím přetíženém životě. Ve dne byla řádnou studentkou umění v New Yorku. V noci učila hru na piáno, aby si vydělala na studia. Napětí tohoto dvojího života v jednom čase bylo, myslím, přílišné. Dostala infekci. Běžely měsíce a lékaři střídali diagnózy. Když nakonec vykašlávala krev a diagnostikovali tuberkulózu, bylo příliš pozdě. Feynmanova poslední kniha, jejíhož vydání se nedožil, vypráví láskyplný příběh dvou mladých lidí, kteří se navzdory radám rodiny a přátel a navzdory jistotě blízké smrti vzali a sdíleli hlubokou vzájemnou starost a oddaně spolu zůstávali až do konce. Týden poté, co jsem se s Arlene v nemocnici rozloučil, zemřela.

Arlene byla silnou osobností. Byla jednou z mála lidí, které jsem znal, jež se dokázali postavit po Richardově boku. Ona a jeho rodiče byli lidmi, ve které věřil. To ona mu dala radu, která stojí v titulu jeho poslední knihy: „Co je Ti po tom, co si druzí lidé pomyslí?“

# Feynman na Cornellu

*Freeman J. Dyson*

V tomtěž městě jako Richard Feynman jsem žil jen jediný rok. Bylo to ve školním roce 1947/48, kdy on byl na Cornellu profesorem a já postgraduálním studentem. Poté jsem se s ním vídal jen příležitostně, většinou uprostřed davu na konferencích. Nejživější vzpomínky na něj mám z toho prvního roku před 40 lety, kdy mi bylo 24 a jemu 30 let. Měl jsem to štěstí poznat ho na vrcholu jeho tvůrčích sil, kdy urputně pracoval na zakončení teorie, kterou nazýval *prostorčasový přístup*, a která se poté stala základním kamenem pro všechny, kdo něco počítali v částicové fyzice.

Jako vzorný syn jsem rodičům do Anglie každý týden psal o mých amerických příhodách. Rodiče dopisy schovávali a nyní je držím v ruce. Namísto abych psal smyšlené vzpomínky na Feynmana, rozhodl jsem se pro přímé citace z dopisů, v nichž se vyskytuje. Tyto výňatky jsou jenom fragmenty a říkají jen málo o Feynmanových vnitřních myšlenkách. Jejich cena je však v jejich autenticitě, v tom, že byly napsány jen pár dní po událostech, které popisují, a že jsou prosty pozdějších zásahů a zpětného pohledu.

Do Ameriky jsem přijel v září 1947 pracovat pod vedením Hanse Betheho na své dizertaci. Do té míry, do jaké se můžu spolehnout na záznamy, jsem o Feynmanovi slyšel až po mém příjezdu na Cornell. Nějakou dobu mi trvalo, než jsem objevil jeho velikost.

Začnu dopisem, ve kterém se Feynman objevuje poprvé. Datován je do doby dvou měsíců po mém příjezdu do Ameriky.

Cornellova univerzita

19. listopadu 1947

Krátký dopis než odjedeme do Rochesteru. Každou středu se koná seminář, na kterém vždy někdo mluví o vybraném vědeckém tématu. Čas od času máme seminář společný s Rochesterskou univerzitou a dnes poprvé jedeme my k nim. Je krásný den, mohl by to být hezký výlet; Rochester



je na sever odtud a cestou pojedeme necivilizovanými místy. Mám jet Feynmanovým autem, což bude obrovský zážitek, ovšem pokud přežijeme. Feynman je člověk, kterého více a více obdivuji. Je nejchytřejší ze zdejších mladých teoretiků a je prvním exemplářem vzácného druhu vědců, kteří jsou rodilými Američany. Vytvořil vlastní verzi kvantové teorie o níž se mluví velmi pochvalně, a která je pro některé problémy asi užitečnější než teorie ortodoxní. A vůbec, neustále přichází a vytahuje se s novými nápady, které jsou většinou více senzační než plodné a sotvakterý z nich rozvine trochu dál, neboť brzy objeví nějakou novou inspiraci, která tu starou zastíní. Jeho nejcenějším přínosem fyzice je jeho funkce nositele morálky. Vpadne do místnosti se svou nejnovější myšlenkou, začne ji vysvětlovat za doprovodu mocných zvukových efektů a mávání rukama. Aspoň tu není nuda. Hlavní rochesterský teoretik Victor Weisskopf je také zajímavý a schopný muž, ale normální Evropan. Pochází z Mnichova, odkud se už od studentských let zná s Bethem.

Událostí minulého týdne byla návštěva Rudolfa Peierlse, který zde byl v nějaké vládní záležitosti. Dvě noci přespával u Bethů a pak odletěl domů. V pondělí měl oficiální přednášku o své práci, která byla přijata velice dobře. Zbytek doby strávil v diskusích s Bethem a ostatními, z nichž jsem získal mnoho. V pondělí večer pořádali Bethovi na jeho počest večírek, na který pozvali většinu mladých teoretiků. Když jsme přišli, byli jsme představeni pětiletému Henrymu Bethemu. Na něj to však přílišný dojem neudělalo, po pravdě řečeno jedině, co řekl, bylo: „Chci Dicka. Říkali jste, že Dick přijde.“ Nakonec ho poslali do postele, poněvadž Dick (alias Feynman) se nezjevoval. Asi za půl hodiny Feynman vpadnul do místnosti, sotva stačil pronést „Omlouvám se za zpoždění. Právě když jsem odcházel, napadla mne skvělá věc“ a hned se vrhnul ke schodům, aby utěšil Henryho. Konverzace utichla, neboť společnost naslouchala zvukům shora, které měly někdy formu duetu a někdy jednočlenného bicího bandu.

Peierlsovi ukazovali novou a rozhazovačně postavenou budovu Jaderné laboratoře, která má být oficiálně otevřena na sobotním večírku. Feynman poznamenal, že mu přijde škoda vši té práce, kterou stavbaři vykonali, na to málo, které pravděpodobně vykonají lidé, jež se tam

zabydlí. A Bethe řekl, že jedinou jadernou fyzikou, co stojí za řeč, je ta americká jen proto, že je nedostatek oceli. Asi to bude pravda. V každém případě nejvýznačnější experimenty na světě provádí v Bristolu Cecil Powell, jehož nejsložitějšími přístroji jsou mikroskop a fotografická deska.

Následuje krátký dopis o týden později

27. listopadu 1947

Výlet do Rochesteru měl velký úspěch. Tam i zpátky jsem jel v autě Dicka Feynmana s Philipem Morrisonem a Edwinem Lennoxem a probírali jsme všechno od kosmického záření dolů.

V sobotu se konal ten velký inaugurační večírek pro Synchrotronovou budovu a byl velmi úspěšný. Poprvé jsem hrál poker a docela mi to šlo – vyhrál jsem 35 centů. Synchrotron tu ještě nějakou dobu nebude, a tak je budova prázdná. Večírek sestával hlavně z tancování a jezení. Bethe tancoval asi hodinu s Trudy Eygesovou, zatímco Rose Betheová si s Leonardem Eygesem vyměňovali nesouhlasné pohledy.

Leonard Eyges byl dalším postgraduálním studentem, který pracoval s Bethem. Trudy byla jeho žena.

Nyní poskočíme o tři měsíce.

8. března 1948

Včera jsem byl s Trudy Eygesovou a Richardem Feynmanem na dlouhé procházce jarní přírodou. Feynman je mladý americký profesor, zpola génius, zpola šašek, který svou nespoutanou vitalitou baví všechny fyziky a jejich děti. Jak jsem se onehdy dověděl, nese s sebou však mnohem víc a možná by vás mohl jeho příběh zajímat. Jeho část začala, když přijel do Los Alamos. Tam našel a zamiloval si úžasnou a krásnou dívku, která měla tuberkulózu a byla poslána do Nového Mexika s vírou, že se její nemoc zastaví. Když přijel Feynman, vypadalo to s ní tak špatně, že jí doktoři dávali pouhý rok života. On se však rozhodl s ní oženit a tak i učinil. Rok a půl, když naplno pracoval na Projektu, o ni pečoval a činil ji šťastnou. Zemřela krátce před koncem války. (Jak jsem se poz-

ději dozvěděl, ve skutečnosti se Feynman se svou první ženou poznal dlouho před Los Alamos.)

Jak Feynman říká, nikdo, kdo byl jednou šťastně ženatý, nemůže dlouho zůstat sám, a tak jsme včera probírali jeho nový problém – znovu dívka z Nového Mexika, kterou zoufale miluje. Teď není problémem tuberkulóza, ale skutečnost, že je dívka katolička. Dokážete si představit, jaké trable to přináší. Jestli existuje něco, co by Feynman pro spasení své duše nikdy neudělal, tak je to to, že by se sám stal katolíkem. A tak jsme mluvili a mluvili, nechali slunce zapadnout a pokračovali v hovoru i po setmění. Obávám se, že na konci nebyl Feynman k řešení svých problémů o nic blíž než na začátku, ale snad se mu alespoň ulevilo, když shodil břímě. Osobně si myslím, že se s tou dívkou ožení a že bude šťastný, ale naprosto nepatří k mé povaze, abych v takovýchto věcech někomu radil.

O týden později se začínají objevovat rysy věci, jež mají přijít.

15. března 1948

Má práce dostala minulý týden nový impuls díky Weisskopfově návštěvě. Měl s sebou Schwingerův preprint o nové kvantové teorii, kterou Julian Schwinger, když přednášel v New Yorku, ještě neměl zakončenou. Tato nová teorie je velice dobrou prací, těžko stravitelnou, ale s řadou vysoce originálních a bezpochyby korektních představ. A tak se jí právě prokousávám a zkouším ji důkladně pochopit. Poté budu ve velmi dobré pozici, pokud jde o možnost řešit nejrůznější speciální problémy fyziky korektní teorií, zatímco většina ostatních lidí dosud tápe. Jiná velice zajímavá věc se přihodila nedávno; náš Richard Feynman, který vždycky pracuje podle svého a má svou vlastní soukromou verzi kvantové teorie, pracoval na stejném problému jako Schwinger, ale z jiného pohledu, a nyní došel k přibližně ekvivalentní teorii s řadou stejných závěrů dosažených nezávisle. Z toho je zřejmé, že je teorie správná. Feynmanovy myšlenky jsou tak obtížně uchopitelné, jak jsou Betheho jednoduché. Z toho důvodu jsem se doposud naučil mnohem více od Betheho, ale myslím, že až tu budu mnohem déle, zjistím, že více spolupracuji s Feynmanem.

## Na cestě do Albuquerque

Uplynuly tři měsíce bez jakékoliv zmínky o Feynmanovi. Znovu přichází na scénu v posledním dopise z Cornellu.

11. června 1948

Přestože se naše společnost rozpadá a řada přátel již odjela, nejsou tyto poslední dny vůbec osamělé. Experimentátoři stále pilně pracují na svém synchrotronu a minulý týden jsme měli jeden piknik, jednu plavací výpravu a jednu výpravu na lodi. Obě byly parádní. Tento týden odjíždím na Západ a bezpochyby tam bude též legrace. Mimochodem, americký „piknik“ není přesně to, co tím myslíme my. Začíná smaženým řízkem se saláty, jídlo je připravované na polním vaříči a je servírováno s talíři, vidličkami a dalším příslušenstvím. Podobné věci, stejně jako elegance průměrného amerického domova či ženských šatů, mi připadá jako znovuzrození viktoriánské éry, zde kvetoucí pro stejné podmínky, jež ji živily v Anglii. Myslím, že nejen v chování, ale i v politice a zahraničních záležitostech, by si viktoriánská Anglie s moderní Amerikou rozuměla lépe než si rozuměly tehdy či nyní.

Nepamatuji si, kolik jsem vám toho napsal o svých plánech. Velice mi pomohlo, když mi Feynman, ten chytrý mladý profesor, o kterém jsem často psal, nabídl cestu napříč Státy. Chystá se navštívit svou (katolickou) lásku v Albuquerque v Novém Mexiku a tento týden vyjede na cestu. Mám jet s ním, abych mu dělal společnost a odpojím se na svou vlastní cestu do Ann Arboru, když toho budu(-eme) mít dost. Mohla by to být hezká cesta, navíc budeme moci hovořit o celém širém světě. Během této návštěvy se Feynman hodlá s tou dívkou buď oženit nebo rozejít. Většina lidí sází na tu první alternativu.

Další výňatek je psán dva týdny poté ze Santa Fe v Novém Mexiku.

25. června 1948

Feynman původně plánoval, že na Západ pojedeme volně, se zastávkami a obhlídkami okolí během cesty, a že nebude řídit příliš rychle.

Nikdy jsem však nijak zvlášť nevěřil, že by ten plán dodržel, když na něj v Albuquerque čeká jeho láska. Dopadlo to tak, že jsme těch 1 800 mil z Clevelandu do Albuquerque ujeli za tři a půl dne a to ještě navzdory určitým problémům. Feynman řídil celou cestu – řídí dobře, nikdy neriskuje a přesto mimo město udržuje 65 mil za hodinu. Cesta byla zážitkem, viděli jsme většinu toho, co lze vidět bez zastavování. Vyčítám si jedině to, že jsem během této cesty viděl méně Feynmana, než jsem mohl vidět.

V St. Louis jsme se napojili na dálnici US 66, tzv. *Hlavní cestu Ameriky*, která se vine z Chicaga do Los Angeles a vede přes Albuquerque. Mysleli jsme si, že pak už bude jízda bez komplikací, neboť ta dálnice je jedna z nejlépe značených a nejlépe udržovaných cest co existují. Avšak na konci druhého dne jsme se dostali do dopravní zácpy a kdosi nám řekl, že směrem dál je cesta zaplavena a není průjezdná. Vrátili jsme se do města zvaného Vinita, kde jsme s velkými obtížemi našli nocleh. Město bylo obleženo ztroskotanými cestovateli a my jsme skončili v něčem, co Feynman nazýval „doupě“ – v nejlevnějším hotelu, kde bylo na chodbě napsáno: *Tento Hotel je pod Novým Vedením a tak jste-li opilí, nacházíte se na špatném místě*. Během noci pořád přšelo a místní nám říkali, že již víc než týden prší prakticky neustále.

Čtvrtý den jsme do jedné hodiny odpoledne ujeli posledních 300 mil do Albuquerque. Bylo to nejhezčí z celé cesty, ač jsem byl překvapen, jak malá její část vedla přes typické novomexické hory. Ve skutečnosti zabírá polovinu Nového Mexika prerie a jen posledních 20 mil jsme jeli horami – pohořím Sandia kousek na východ od údolí Rio Grande, kde leží Albuquerque. Jak jsme přijížděli k Novému Mexiku, byla prerie sušší a sušší, až nakonec velkou část vegetace tvořily kaktusy, které touto dobou oplývají velkými krvavě červenými květy. Když jsme přijeli do Albuquerque, Feynman poznamenal, že to tu sotva poznává, jak se to změnilo za ty tři roky, co byl pryč. Je to hezké, rozlehlé, typicky americké město, ve kterém zůstalo jen málo španělského.

Na konci naší Cesty jsme měli smůlu, že nás chytli pro překročení rychlosti. Feynman byl natolik nedočkavý, že přehlédl značení omezující rychlost. A tak naším prvním setkáním v tomto romantickém městě byl rozhovor s policistou. Byl to docela příjemný chlapík, naprosto

neoficiální a naše interview skončilo tím, že nás pokutoval 14,50 dolary, zatímco jsme rozmlouvali o rozvoji Jihovýchodu. Poté Feynman odjel za svou dámou a já jsem nastoupil do autobusu do Santa Fe.

Po celou dobu Feynman mnoho povídal o své lásce, o své ženě, která zemřela v Albuquerque ve čtyřicátém pátém, a o manželství vůbec. A také o Los Alamos a životě a filozofii. Poznal jsem, že je výjimečně vyrovnaným člověkem, jehož názory jsou vždycky jeho vlastní. Velice dobře vychází s lidmi a jak jsme jeli na Západ, měnil nevědomky svůj hlas a vyjadřování tak, aby se přizpůsobil svému okolí. Až říkal „Nic ne'im“ jako ostatní.

### **Kvantová elektrodynamika**

Poté, co jsem Feynmana zanechal v Albuquerque, jsem strávil celé léto v Ann Arboru a Berkeley, kde se mi podařilo pochopit, jak spolu souvisí Schwingerova a Feynmanova verze kvantové elektrodynamiky. V září jsem přijel do Ústavu pro pokročilá studia v Princetonu. Následující část byla psána z Princetonu jako odpověď na otcovu žádost, abych mu vysvětlil, co teď vlastně dělám. Otec citoval větu z Athanasova kréda, která říká: „Je Otec nepochopitelný, je Syn nepochopitelný, je Duch nepochopitelný, ale přesto nejsou tři nepochopitelní, ale jen jeden.“ Poznamenal, že je to trochu jako Schwinger, Feynman a Dyson. Zde je má odpověď:

4. října 1948

Dnes mi od Tebe přišel obsáhlý dopis. Myslím, že Tvé poznámky o Athanasově krédu jsou blízko skutečnosti. Musím však zklamat jakékoliv naděje v to, že by se jména Dyson, Schwinger a Feynman dala volně zaměňovat.

Když nyní těm teoriím náležitě rozumím, chtěl bych o nich někdy zkusit napsat nějaký polopopulární článek. Bude to však obtížné, žádná práce na jedno odpoledne. Ústřední myšlenkou teorií je podat korektní vysvětlení experimentálních faktů při současném ignorování určitých matematických nekonzistencí, které se objevují, když se člověk zabývá věcmi, jež nejsou přímo měřitelné. V tom je blízká podobnost s Atha-

nasovým krédem, podstatný rozdíl je však v tom, že tyto teorie nejspíš nepřezijí nové experimenty a tak budou stěží tvořit nějaký základ.

Dopis jasně ukazuje, jak jsme všichni v roce 1948 považovali novou teorii kvantové elektrodynamiky za vratkou strukturu, která bude určitě brzy nahrazena nějakou mnohem lepší teorií. Nikdy bychom neuvěřili, kdyby nám tehdy někdo řekl, že naše teorie tu bude i za čtyřicet let, a že se vypočtené jevy reakce záření s hmotou budou s experimentem shodovat na deset či jedenáct platných cifer! Ještě více bychom byli překvapeni, kdybychom se dozvěděli, že nejošklivější a nejneohrabanější prvky naší teorie, renormalizace hmotnosti a náboje, se stanou naprosto klíčovými prvky, až bude tato teorie začleněna do Weinbergovy-Salamovy-Glashowovy jednotné teorie elektroslabých interakcí a později do velkých sjednocených teorií slabých a silných interakcí. Pro Feynmana však nebyla renormalizace něčím, na co by měl být člověk pyšný, ale něčím, čeho by se měl co nejdříve zbavit. Spoustu času strávil pokusy vypracovat teorii konečného elektronu, která by nepotřebovala renormalizaci.

## Cécile Morettová

V následujícím dopise se objevuje veliká žena, která se tehdy jmenovala Cécile Morettová, nyní Cécile De Wittová. V roce 1948 přijela z Francie přes Dublin a Kodaň do Ústavu pro pokročilá studia v Princetonu. Byla z mladé generace první, kdo v plném rozsahu pochopil přístup k fyzice pomocí Feynmanových dráhových integrálů. Zatímco já jsem používal Feynmanovy metody „pouze“ k podrobným výpočtům, ona přemýšlela o mnohem obecnějších otázkách a snažila se rozšířit myšlenku dráhového integrálu na všechno ve vesmíru, včetně gravitace a zakřivených prostoročasů.

Boston

1. listopadu 1948

Poté, co jsem vám poslal minulý dopis, jsem se rozhodl pro dlouhý víkend mimo Princeton a tak jsem přesvědčil Cécile Morettovou k návštěvě Feynmana v Ithace. Z mé strany to byl troufalý krok, ale nemohl

být lepší a víkend byl báječný. Po deseti hodinové cestě vlakem nás na nádraží čekal Feynman ve skvělé náladě, překypující myšlenkami a historkami a poté nás bavil až do jedné v noci hrou na indiánské bubny z Nového Mexika.

Následující den, v sobotu, jsme měli tajnou poradou o fyzice. Feynman nám předvedl mistrovskou přednášku o své teorii, která nutila Cécile do záchvatů smíchu a vůči níž byla moje princetonská přednáška bledým stínem. Říkal, že kopii mé přednášky dal jednomu postgraduálnímu studentovi k přečtení a poté se ho ptal, jestli si to sám má přečíst. Student odpověděl „Ne“ a Feynman s tím tedy neztrácel čas a věnoval se svým vlastním myšlenkám. S Feynmanem si opravdu navzájem rozumíme. Víím, že on je jediným člověkem na světě, který se z toho, co jsem napsal, nemá co naučit. A naprosto se nezdráhá mi to říct. To odpoledne vyprodukoval tolik brilantních myšlenek na čtverečnou minutu, co jsem jaktěživ předtím ani potom neviděl.

Večer jsem se zmínil, že jsou již jen dva problémy, pro které ještě nebyla konečnost teorie dokázána. Oba problémy jsou dobře známé a obávané, neboť o nich byla napsána spousta článků. Obtížných a dlouhých padesát či více stran a neúspěšně se pokoušejících dát na ně smysluplnou odpověď s pomocí dřívějších teorií. Oba zůstávaly záhadou mj. pro Nicholase Kemmera či velikého Wernera Heisenberga.

Když jsem se o tom zmínil, Feynman poznamenal: „Podíváme se na to,“ posadil se a za dvě hodiny před našima očima obdržel konečné a smysluplné odpovědi na obě otázky. Byl to nejúžasnější příklad bleskových výpočtů co jsem kdy viděl a jejich výsledky dokázaly, odhlédneme-li od určitých nepředvídaných komplikací, konzistenci celé teorie.

Těmi problémy byl rozptyl světla na elektrickém poli a rozptyl světla na světle.

Po večeri Feynman pracoval do tří do rána. Celé léto měl prázdniny a vrátil se s neuvěřitelnými zásobami nevybité energie. V neděli vstával jako obvykle (v 9 hodin) a šli jsme na fakultu, kde mi další dvě hodiny vysvětloval své rozličné objevy. Jedním z nich bylo odvození Maxwellových rovnic elektromagnetického pole ze základních principů kvantové teorie, věc, která je záhadou každému mimo Feynmana, neboť by to nemělo být možné.



V poledne jsme nastoupili na cestu domů, kam jsme přijeli ve 2 v noci notně osvěženi. Cécile mne ujistila, že se jí to líbilo stejně jako mně.

Feynmanův důkaz Maxwellových rovnic je stále nepublikovaný a i po čtyřiceti letech stejně záhadný jako dřív. Odmítl ho publikovat s tím, že to prý byla jen legrace. Nejsem si tím však zcela jistý. Důkaz je totiž matematicky naprosto korektní a týká se přesně toho, o čem jsem hovořil v dopise. Začíná komutačními relacemi mezi polohou a rychlostí nerelativistické částice podléhající Newtonovým zákonům a odvozuje existenci elektrického a magnetického pole, která splňují Maxwellovy rovnice. Řečeno moderním jazykem, důkaz předvádí, že jedinými možnými poli, které mohou konzistentně působit na kvantově mechanickou částici, jsou kalibrační pole. Mrzí mne, že se mi nikdy nepodařilo Feynmana přesvědčit, aby to publikoval.

V následujícím dopise se znovu objevuje Cécile Morettová.

14. listopadu 1948

Cécile nás včera rozveselila, když se v ústavu objevila s francouzským milionářem (nějaký průmyslový magnát). Říkala, že mu poměrně důrazně naznačovala, že by mohl ve Francii vzniknout také podobný institut. A že jestli se stane ředitelkou toho ústavu, všechny nás tam pozve přednášet. Bude zajímavé sledovat, zda se z toho něco vyklube.

Mužem, který s Cécile navštívil princetonský ústav byl Léon Motchane. Motchane se později stal zakladatelem a prvním ředitelem Institut des Hautes Etudes Scientifiques v Bures-sur-Yvette ve Francii. IHES je prosperující instituce, která značně podpořila francouzskou matematiku a teoretickou fyziku. Když přivedla Motchaneho do Princetону a zasela semínko, z něž vyrostl IHES, bylo Cécile 26 let. Pár let nato založila letní školu Les Houches, která je rovněž vzkvétající institucí a již prošly generace evropských studentů.

Můj poslední výňatek z roku 1948/49 popisuje Feynmanovu návštěvu v princetonském ústavu. Ti, kdo četli *To snad nemyslíte vážně!* ví, že Feynman neměl institut moc rád. J. Robert Oppenheimer mu v institutu nabídl profesorské místo, ale Feynman odmítl. Považoval totiž celý in-

stitut za snobský, zkosnatělý a vědecky sterilní. Mnohokrát byl pozván, aby přijel, ale téměř nikdy tak neučinil. Jednou však přijel, jak dokládá následující záznam.

Chicago

28. února 1949

Ve čtvrtek k nám do Princetonu přijel Feynman a zůstal tu až do mého nedělního odjezdu. Během tří dnů odpřednášel asi osm hodin a byla také spousta privátní diskuse. Jeho úsilí bylo pozoruhodné a myslím, že všichni lidé v institutu začali chápat, co dělá. Aspoň já jsem se toho dozvěděl mnoho. Jako obvykle byl plný entuziasmu, mával kolem sebe rukama a každého rozesmál. Dokonce i Oppenheimer něco začal chápat a věci, které řekl, byly méně skeptické než obvykle. Feynman se očividně snažil mluvit jaksí neurčitě a byl by tak pokračoval, kdybychom mu to dovolili. Bezpochyby trpěl stejným dusivým pocitem, který jsem poznal loňského podzimu, kdy jsem byl naplněn nápady. Problém s ním je v tom, že ty věci, kterými se zabývá, nikdy nepublikuje. Někdy se cítím trochu provinile, když před ním předvádím jeho vlastní myšlenky. Nyní však konečně píše dva velké články, které světu ukážou jeho genialitu.

### Dopis od občasného pisatele

Nyní přichází konec mých skromných záznamů o mladém Feynmanovi. Následující dopis je jediným, který jsem kdy od Feynmana dostal. Rád ho zveřejňuji, neboť Feynmanovy dopisy jsou ještě méně časté nežli Feynmanovy články.

Cornellova univerzita

15. května 1950

Freemane,

doslechl jsem se, že Ti Cornellova univerzita nabízí místo. Jsem moc rád, neboť myslím, že se Ti tu bude velice líbit. Samozřejmě, byl jsi tu rok a víš, jaké to je pracovat s Bethem atd., a tak nebudu všechny tyhle věci zmiňovat. Chci Ti však říct, že řízení katedry fyziky na Cornellu je vynikající. Katedra je naprosto nevšímavá k politice a pouličním hádkám

ap., což ji činí ideálním místem k práci. Ať člověk chce spíš dělat výzkum než učit anebo naopak, všechno lze zařídit. Byl jsem tu velice šťastný.

Hlavně Ti píšu, abych Tě ujistil, že z Cornellu neodcházím proto, že by na univerzitě bylo něco špatného. Prostě tu nemám rodinu ani nic jiného, co by mne k tomuto místu poutalo a navíc se ve mně ozvalo tuláctví, tak jsem si řekl, že nějakou dobu pobytu v Kalifornii. Doufám, že mé rozhodnutí Ti umožnilo dostat opravdu dobré místo.

Tvůj,

R. P. Feynman

Jelikož jsem věděl, jak moc je pro Feynmana náročné napsat dopis, byl jsem za toto povzbuzení velice vděčný. Na Cornell jsem se vrátil na podzim 1951 poté, co odjel na Caltech. Byl jsem tam spokojen, ale bez Feynmana mi to místo připadalo smutné a prázdné. V mé kartotéce se Feynman znovu objevuje 29 let poté.

Princeton

21. prosince 1979

Největší událostí byla večere s Dickem Feynmanem u něj doma v Pasadeně. Setkali jsme se poprvé po asi 12 letech. Mezitím, před jedním a půl rokem, byl na vážné operaci rakoviny. Říkalo se, že umírá, ale já ho našel s kypícím zdravím a svěžím duchem. Je to ten stejný Feynman, se kterým jsem před 30 lety jel do Albuquerque. Říkal, že z něj odebrali šestilibrový kousek. Protože však šlo jen o tukovou tkáň (liposarkom), je značná naděje, že odebrali všechno a že se to nevrátí.

Před asi 20 lety se Feynman oženil s Angličankou, která se jmenuje Gweneth. Těší se z domácího života a v domácnosti mají zvěřinec úplně jako my – jednoho koně (pro 12letou dceru), dva psy, jednu kočku a pět králíků. Ale na několik následujících měsíců nás překonali, neboť se starají o sousedovic hroznýše.

Později jsem se od Feynmana dozvěděl, že ta akce s hroznýšem neskončila zrovna nejlépe. Měl se o hroznýše starat a krmit ho. Problém byl však v tom, že hroznýš měl žrát živé bílé myšky. Když mu ale Feynman nějaké podstrčil, byl hroznýš tak pitomý nebo tak líný, že je vůbec

nechytal. Místo aby hroznýš jedl myši, jedly myši hroznýše. A tak Feynman musel v noci vstávat, aby zabránil myším v ohlodávání hroznýšovy kůže. Když se majitel hroznýše vrátil, vyplísnil Feynmana za to, že se o něj tak špatně staral. Feynman říkal, že se z té zkušenosti opět poučil. Když byl později žádán aby o hroznýše pečoval, odmítl. Byla to patová situace. Říkal, že je zcela v pořádku říci ano nějakému divokému nápadu, zkusit to a zjistit, jestli to k něčemu vede. Ale člověk je hloupý, když dvakrát řekne ano stejně pitomé věci. Poté, co to poprvé dopadlo tak špatně, řekni ne.

### Feynman v pozdních letech, nezměněn

A nyní poslední dopis v mé sbírce, psaný Sáře Courantové. Sára byla na Cornellu v roce 1948, když tam její manžel Ernest byl na stáži.

Urbana, Illinois  
9. dubna 1981

Drahá Sáro,  
právě jsem strávil tři báječně dny s Dickem Feynmanem. Škoda, že jsi tu s námi a s ním nemohla být. Šedesátka a těžká operace rakoviny ho neoslabily. Je stále tím stejným Feynmanem, jakého jsme znali za starých časů na Cornellu.

Byli jsme na jednom menším setkání fyziků organizovaném Johnem Wheelerem z Texaské univerzity. Z jakéhosi důvodu vybral Wheeler pro setkání groteskní místo zvané *Svět tenisu*, venkovský klub, kam texasští ropní milionáři jezdí odpočívat. Všichni jsme reptali na vysoké ceny a extravagantní ošklivost našich pokojů. Ale nebylo kam jinam jít. Ale spoň jsme si to mysleli. Dick měl však jiný názor. Řekl jen: „Do pekla s tím. Tady spát nebudu.“ Vzal si svůj kufr a osamocen odešel do lesů. Ráno se zjevil a po noci pod širákem nevypadal nijak zle. Říkal, že se moc nevyspal, ale že to stálo za to.

Hodně jsme hovořili o vědě a historii, jako za starých časů. Nyní měl však něco nového, o čem mluvil – své děti. Říkal: „Vždycky jsem si myslel, že budu obzvláště dobrým otcem, protože nebudu nutit své děti do nějakých konkrétních věcí. Že se nebudu snažit mít z nich vědce

či intelektuály, když samy nebudou chtít. Že budu stejně tak spokojen, když se stanou šoféry kamiónu nebo kytaristy. Ve skutečnosti bych byl dokonce raději, kdyby šly do světa a dělaly něco opravdového, namísto aby byly profesory jako já. Ony si však vždycky najdou cestu, jak ti to vrátit zpátky. Třeba můj kluk Carl. Je druhák na MITu a nechce být ničím jiným než zatraceným filozofem!“

Když jsme na letišti čekali na přílety našich letadel, Dick vytáhl kus papíru a začal kreslit tváře okolo sedících lidí. Kreslil je pozoruhodně dobře. Říkal jsem, že mne mrzí, že nemám pro kreslení talent. On odpověděl: „Také jsem si vždycky myslel, že nemám talent. Ale abys dělal takovéhle kresbičky, žádný talent mít nemusíš. Před pár lety jsem se sprátlil s jedním umělcem a udělali jsme takovou dohodu. Já jsem ho učil kvantovou mechaniku a on mne kreslení. Dělali jsme obojí, ale on byl lepším učitelem než já.“

A tak jsem ho zanechal na letišti v texaském Austinu, když mluvil o Michelangelovi, Raphaelovi a Giottovi s nadšením teenagera. Říkal: „Víš, byl jsem se podívat do Sixtinské kaple v Římě a najednou se mi zdálo, že jeden z těch obrazů nevypadá tak dobře jako ty ostatní. Prostě nebyl dobrý. Později jsem se díval do průvodce a zjistil jsem, že tento obraz maloval někdo jiný. To mne potěšilo. Vždycky jsem uměleckou kritiku považoval za nesmysl a teď jsem zjistil, že to sám dokážu.“

Nebylo to naposled, co jsem se s Feynmanem viděl, je to však můj poslední záznam o něm. Naštěstí o něm máme mnohem kompletnější obraz podaný jeho vlastními slovy zaznamenanými Ralphem Leightonem a uveřejněnými ve dvou knihách *To snad nemyslíte vážně!* a *Snad ti nedělají starosti cizí názory?* Když se podíváte na kapitolu „Hotel City“ v té druhé knize, naleznete tam Feynmanovu verzi příběhu noci, kterou jsme spolu strávili v tom hotelu ve Vinitě ve čtyřicátém osmém. Jeho verze se od verze z mého dopisu značně odlišuje. S ohledem na viktoriánskou citlivost mých rodičů jsem nejlepší část příběhu vypustil. Feynman vždycky vzpomínal, jak mu jeho první žena, Arlene, psala z nemocnice: „Co je Ti po tom, co si druzí lidé pomyslí?“ Její duch ho provázel po celý život a pomohl mu stát se tím, čím byl – velkým vědcem a velkým člověkem.

# Cesta ke kvantové elektrodynamice

*Julian Schwinger*

Požádali mne, abych napsal o Feynmanově příspěvku k vývoji kvantové elektrodynamiky. Za posledních čtyřicet let jsem měl řadu příležitostí prezentovat historii kvantové elektrodynamiky a tyto prezentace přirozeně zahrnovaly i zmínku o Feynmanově práci. Charakter všech těchto článků a přednášek však určoval můj pohled na věci – byly vyřčeny mým hlasem. Pro tento článek bude ale mnohem lepší, aby zazněl hlas Feynmanův. A myslím, že bychom ho neměli nechat mluvit o technických detailech, ale o jeho motivech, náhledech a zkušenosti pro budoucnost. Citace Feynmana, které se v tomto článku v hojně míře vyskytují, pocházejí se tří zdrojů. Nejvíce jsem upřednostnil jeho nobelovskou přednášku [20], a to nejen pro její široký záběr, ale i ve víře, že na rozdíl od dvou dalších knih nebyla upravována, a tak věrněji zachycuje hlas Richarda Feynmana.

## Výzva

Poprvé jsem se s Feynmanem setkal v Los Alamos přibližně týden po testu Trinity, který započal věk jaderné hrůzy. Ne, nebyl jsem zapojen do Projektu Manhattan, i když jsem nějaký čas strávil v Metalurgické laboratoři v Chicagu zkoumajе, zda se připojím. Neučinil jsem tak. Do Los Alamos jsem přijel z Laboratoře záření MITu na čistě kulturní misi, abych pronesl pár přednášek o elektromagnetických vlnovodech a elektronových urychlovačích. Přednáška o urychlovačích zahrnovala diskusi o synchrotronovém záření.

Jeden večer jsem se potkal s Feynmanem, který vypadal dost zachmuřeně (možná, že mu Robert R. Wilson [23] právě řekl: „Udělalі jsme strašnou věc.“) Začal horovat na nenahraditelnou ztrátu času, který mohl věnovat fyzice, což jsem také pociťoval. Oběma nám tehdy bylo 27 let. Říkal něco ve smyslu: „Já jsem nic neudělal, Ty však již máš jméno.“ Nikdy jsem nevěděl, co tím myslel.

Nebylo pravdou, že nic neudělal. Již ke konci třicátých let si jako student MIT uvědomil, že „fundamentálním problémem dneška je, že kvantová teorie elektřiny a magnetismu není zcela uspokojivá.“ Například ohledně knížek Waltera Heitlera a Paula Diraca Feynman říká:

„V těch knihách mne inspirovaly poznámky. Ne části, kde bylo všechno dokázané a demonstrováno, ale poznámky, že něco nedává naprosto žádný smysl. A poslední větu z Diracovy knihy si pamatuji dosud: *Ždá se, že je zde potřeba nějakých zásadně nových fyzikálních představ.* To mi sloužilo coby výzva i coby inspirace. Rovněž jsem zastával názor, že tomu, co se udělalo, nemusím věnovat příliš pozornost, když se nedošlo k žádné uspokojivé odpovědi na problém, který jsem hodlal řešit.“

Z těch knížek však Feynman poznal „dva zdroje obtíží teorie kvantové elektrodynamiky. Prvním byla nekonečná energie působení elektronu na sebe samého, která existovala i v klasické teorii. Tehdy se mi zdálo naprosto evidentní, že představa o částici působící na sebe samu, o tom, že elektrická síla působí na tutéž částici, která ji generuje, není nezbytná – že je to ve skutečnosti hloupost. A tak jsem si řekl, že elektrony nemohou působit samy na sebe, že mohou působit jen na jiné elektrony. Což znamená, že neexistuje vůbec žádné pole.“

Feynmanovi se tato odpověď velice líbila. Zdálo se mu, že řeší současně i druhý problém kvantové elektrodynamiky – nekonečnou energii vakua spjatou s nekonečným počtem stupňů volnosti elektromagnetického pole. Žádné pole, žádný nekonečný počet stupňů volnosti. Jak Feynman říká:

„To byl začátek a ta představa se mi zdála natolik zřejmá, že jsem si ji zamíloval. K teorii mne poutalo moje mladické nadšení.“

Pak jsem přešel na postgraduál a nějak jsem se dozvěděl, kde selhává představa o tom, že elektron na sebe nepůsobí. Když jej zrychlujete, vyzařuje energii a vy musíte konat dodatečnou práci, která by tyto ztráty kompenzovala. Dodatečná síla, proti níž práci konáte, se nazývá silou zářivého odporu. Její původ byl tehdy ztotožňován s působením elektronu na sebe samotného. První člen tohoto působení je jakýmsi druhem setrvačnosti, pro bodový náboj je však nekonečný. Nicméně další člen rozvoje dává velikost energetických ztrát, které pro bodový náboj přesně

souhlasí s tím, co dostanete, když spočtete, kolik energie se vyzařuje. Kdybych tedy řekl, že náboj na sebe nemůže působit, zmizela by síla zářivého odporu, která je naprosto nezbytná k zachování energie.

Tak jsem našel do nebe volající závadu své teorie. Ale stále jsem v ní měl zálibení a stále jsem se domníval, že v ní spočívá řešení obtíží kvantové elektrodynamiky.“

Feynman nakonec s problémem přišel za Johnem Wheelerem, který byl jeho postgraduálním školitelem v roce 1940/41. Našli odpověď, která má dvě části. Obvyčejná klasická teorie říká, že pohyb nabitě částice v nějakém čase je ovlivněn chováním ostatních nábojů v časech dřívějších tak, aby za příslušný čas urazilo světlo příslušnou vzdálenost. Wheeler s Feynmanem přeměnili tuto elektrodynamiku tzv. retardovaného působení na dálku na elektrodynamiku, která je zpola retardovaná a zpola advansovaná. To se samozřejmě zdálo vylučovat obvyklé pojetí kauzality. Bylo to nicméně ekvivalentní retardovanému popisu a obsahovalo sílu zářivého odporu za předpokladu, že se všechno emitované záření úplně pohltí systémem nábojů.

Wheeler s Feynmanem také zjistili, že teorie, která je symetrická vůči retardovanému a advansovanému působení, připouští formulaci pomocí principu akce, na rozdíl od situace s retardovanými interakcemi. To samo o sobě nebylo nové – např. Adriaan D. Fokker to ukázal v roce 1929 – avšak představa, že vhodné okrajové podmínky mohou vysvětlit kauzální, disipativní situaci zářících interagujících nábojů, jistě novou byla.

O tomto úspěchu Feynman říká: „Nyní jsem byl přesvědčen, že když jsme vyřešili problém klasické elektrodynamiky (a zcela v souladu s mým programem z MIT – jen přímé působení mezi částicemi tak, že pole jsou nadbytečná), bude již všechno v pořádku. Myslel jsem, že již stačí udělat kvantovou teorii analogickou té klasické a vše bude vyřešeno.“

Wheeler pak Feynmana požádal, aby o jejich klasické teorii připravil seminář s tím, že on sám vypracuje její kvantovou verzi, o které bude referovat později. Feynman popisuje, jak jeho první přednáška přitáhla takové celebrity jako byl John von Neumann, Wolfgang Pauli a Albert Einstein. Zmiňuje také Pauliho správnou předpověď, že Wheeler nikdy slíbený seminář o kvantové verzi neuskuteční.



Feynman tak našel zcela vlastní cestu ke kvantové mechanice. Než se po ní však vydáme dál, měli bychom zmínit ještě některé další aspekty tohoto klasického příběhu, počínaje *náměty na zajímavé modifikace elektrodynamiky*.

Část funkcionalu akce, která popisuje interakci mezi nabitými částicemi obsahuje nespojitou funkci  $\delta$ , která je nenulová jen tehdy, když jsou prostoročasové pozice nábojů takové, že si mohou vyměňovat světelné signály – tj. když jeden leží ve světelném kuželu toho druhého. Feynman s Wheelerem přišli s tím, že by bylo možné „nahradit tuto delta funkci jinou funkcí  $f$ , která není nekonečně ostrá, ale má úzký pík tak, aby byly splněny všechny testy elektrodynamiky, které byly v Maxwellově době k dispozici. Nevíte přesně, jak  $f$  zvolit, je to však možnost, kterou je zajímavé mít na zřeteli při vývoji kvantové elektrodynamiky.

Zjistili jsme, že když tak učiníme (nahradíme  $\delta$  za  $f$ ), obnoví se konečné působení náboje na sebe samotného. Ve skutečnosti lze ukázat, že hlavním efektem působení na sebe sama je modifikace hmotnosti. Celá mechanická hmotnost tak může být vysvětlena elektromagnetickým působením náboje na sebe samého.“

Ve zpětném pohledu na tuto část cesty Feynman říká: „Chci také zdůraznit, že jsem si tou dobou zvykal na pohled, který je fyzikálně odlišný od pohledu obvyklého, v němž se vše uvažuje jako funkce času. Například v nějakém okamžiku máte pole, diferenciální rovnice vám dá pole v okamžiku následujícím a tak dál – metoda, kterou nazvu Hamiltonovskou. Teď tu namísto toho máme akci, která popisuje charakter trajektorie v celém prostoročase.“

## Diracův základ

V roce 1933 ve *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* uveřejnil Dirac článek *Lagrangian v kvantové mechanice*, který začíná slovy:

„Kvantová mechanika byla vystavěna na analogii s Hamiltonovou formulací klasické mechaniky. Stalo se tak proto, že klasické pojmy kanonické souřadnice a hybnosti měly jednoduchou kvantovou analogii. . .

Existuje však alternativní formulace klasické mechaniky, která využívá Lagrangian. To znamená pracovat se souřadnicemi a rychlostmi namísto souřadnic a hybností. Tyto dvě formulace jsou samozřejmě úzce spjaté, existují však důvody věřit, že Lagrangeova je fundamentálnější.

Zprv Lagrangeova metoda umožňuje sdružit všechny pohybové rovnice a vyjádřit je jakožto stacionární funkcionál akce. (Tento funkcionál akce je obyčejným časovým integrálem Lagrangianu.) V Hamiltonově teorii odpovídající princip akce vyjádřený v souřadnicích a hybnostech neexistuje. (Dnes víme, že tento argument není pravdivý, ale to teď nevíme.) Zadruhé může být Lagrangeova metoda snadno formulována i relativisticky, když bude akce lorentzovsky invariantní. Metoda Hamiltonova je ve své podstatě nerelativistická, protože explicitně pracuje s časovou souřadnicí. . .

Z těchto důvodů se zdá žádoucí vyřešit otázku, co v kvantové teorii odpovídá Lagrangeově metodě klasické mechaniky.“

Již od raných dob nerelativistické vlnové mechaniky se vědělo, že když vlnovou funkci vyjádříme jako  $e^{iW/\hbar}$  s  $W$  vyjádřenou v mocninách  $\hbar$ , dostaneme semiklasickou aproximaci, ve které je první člen  $W$  (ten, co nezávisí na  $\hbar$ ) klasickou akcí. Další člen, imaginární a úměrný  $\hbar$ , lze dostat integrací přes známé klasické veličiny. Dále jsou tyto dvě veličiny pro volnou částici dostatečné pro přesnou odpověď. To znamená, že plně určují jak reálnou fázi, tak i reálnou amplitudu vlnové funkce volné částice. (Můžeme zde doplnit, že jeden zcela speciální tvar vlnové funkce volné částice byl znám díky zřejmé analogii mezi Schrödingerovou rovnicí a rovnicí vedení tepla či rovnicí difúze.)

Dirac se zajímal o vlnovou funkci, která vztahuje stav s přesnou souřadnicí v jednom čase, řekněme  $t_1$ , k analogickému stavu v nějakém jiném čase, řekněme  $t_2$ . Souhrn těchto vlnových funkcí pro zadané časy  $t_1$  a  $t_2$  tvoří časovou transformační funkci, která spojuje popis fyzikální soustavy ve dvou okamžicích. Jako tvůrce teorie kvantových transformací Dirac věděl, a explicitně to uváděl, že žádaná transformační funkce může být zkonstruována ze sekvence transformačních funkcí spojujících stavy v časech mezi  $t_1$  a  $t_2$ . V limitě, když se následující časové okamžiky infinitezimálně liší, přejde transformační funkce na nekonečné množství

nezávislých integrálů přes všechny souřadnicové hodnoty, přičemž každému času mezi  $t_1$  a  $t_2$  bude patřit jeden integrál. Integrand je součinem všech transformačních funkcí sdružených s následujícími infinitezimálními přírůstky času.

A jaká je transformační funkce sdružená s infinitezimálním posunem z času  $t$  do času  $t + dt$ ? Dirac tvrdí, že *odpovídá* veličině  $e^{(i/\hbar) dt L}$ , kde „bychom klasický Lagrangian měli uvažovat ne jako funkci souřadnic a rychlostí, ale jako funkci souřadnic v čase  $t$  a odpovídajících souřadnic v čase  $t + dt$ .“ Integrand je potom  $e^{iW/\hbar}$ , kde

$$W = \int_{t_1}^{t_2} L dt.$$

Tento integrál Dirac označuje  $F$  a je součtem přes všechny členy závislé na souřadnicích, které se vztahují k následujícím hodnotám  $t$ .

Víme, a Dirac to jistě také věděl, že když popisujeme soustavu nelineárních částic, které mají potenciální energii  $V$  závislou na souřadnicích, je „korespondence“ pro infinitezimální  $dt$  rovností, až na konstantní faktor. (Vzhledem k neinteragujícím částicím přítomnost  $V$  přidá jenom fázový faktor.) Proč tedy Dirac nevyřknul přesnější, ač méně obecnější tvrzení? Protože se zajímal jen o obecnou otázku: Co v kvantové mechanice odpovídá klasickému principu stacionární akce?

Dirac svou fundamentální otázku zodpověděl pomocí formálního postupu, který klasickou limitu reprezentuje jako limitu  $\hbar \rightarrow 0$ . V této limitě bude  $e^{iW/\hbar}$  zřejmě nekonečně oscilovat v každé z myriády proměnných. A tak konstrukce transformační funkce z vícenásobného integrálu obsahuje kvantovou analogii principu akce, neboť váha, jakou přisuzujeme nějaké množině hodnot pro mezilehlé souřadnice je určena vahou této množiny v integraci. Když nyní  $\hbar$  pošleme k nule, přejde tvrzení na klasické tvrzení o tom, že váha, kterou přisuzujeme nějaké množině hodnot pro mezilehlé souřadnice je nulová mimo hodnoty, pro něž je funkcionál akce stacionární.

## Dráhový integrál

Proč v následující dekádě nikdo nevyužil výpočetních možností, které nabízí tento integrální přístup k časové transformační funkci? Stroze řečeno, zřejmě to nikdo nepotřeboval – až Feynman. Popisuje, jak na jednom princetonském pivním večírku navázal rozhovor s Herbertem Jehlem, který chtěl vědět, na čem Feynman zrovna pracuje. Poté, co Jehlemu řekl o svém zápolení s elektrodynamikou, se k němu otočil a zeptal se: „Poslouchej, neznáš nějaký způsob, jak dělat kvantovou mechaniku, který by začínal od akce?“ Jak se ukázalo, Jehle znal Diracův článek, a tak Feynman našel co potřeboval – formulaci kvantové mechaniky, která by mohla být použita k jeho klasické elektrodynamice s působením na dálku – když považujeme za samozřejmé, že Diracova konstrukce bude fungovat i v případě, kdy Lagrangián neexistuje. Feynman tento přístup ke kvantové mechanice nazval formulací dráhového integrálu, protože hodnota akce  $W$  je přiřazena všem sekvencím mezilehlých souřadnic – jakékoli trajektorii mezi počáteční a konečnou souřadnicí – a všechny takové hodnoty  $e^{iW/\hbar}$  jsou sečteny dohromady.

Netrvalo dlouho, než objevil, že „... nemůžu dostat správný popis relativistického případu spinu  $1/2$ . A přestože látku (elektrony) můžu zkoumat jen nerelativisticky, mohu se světlem či interakcemi fotonů nakládat zcela korektně...“

Bylo též možné zjistit, co znamenají staré pojmy energie a hybnosti v této zobecněné akci. A tak jsem si myslel, že mám kvantovou teorii klasické elektrodynamiky, či spíše nové klasické elektrodynamiky popsané napůl retardovaným a napůl advansovaným působením...“

Rovněž bylo vidět, jakým způsobem lze modifikovat elektrodynamiku, kdyby to někdo někdy chtěl dělat. Prostě jsem zaměnil  $\delta$  za  $f$  stejně jako v klasickém případě. Bylo to velice jednoduché...“

Nicméně jak jsem prováděl řadu těchto věcí a zkoumal různé tvary a různé okrajové podmínky, měl jsem takový zvláštní pocit, že to není úplně v pořádku. Nedařilo se mi však identifikovat příčinu obtíží a v jednom z krátkých období, kdy jsem nabyl dojmu, že bude dobré to nechat uležet, jsem sepsal dizertaci a získal Ph.D.“

Feynman se připojil k projektu Manhattan již krátce po jeho začátku. Wilson ho získal pro práci na metodě separace izotopů uranu, která se však nakonec nikdy nepoužívala. Byl jedním z prvních, kdo v roce 1943 přijeli do Los Alamos.

O válečných letech a o jeho tehdejší zaměstnání kvantovou elektrodynamikou říká: „Během války jsem na bádání o těchto věcech neměl příliš mnoho času. Přemýšlel jsem o nich v autobusech a podobně, počítal jsem si na malé kousky papíru, až jsem objevil závadu. Velmi podstatnou závadu. Zjistil jsem, že když se akce zobecní z hezké Lagrangeovy formy (tj. z časového integrálu Lagrangiánu na akci v elektrodynamice s působením na dálku), pak se veličiny, které jsem definoval jako energii atd. stanou komplexními. Hodnoty energie stacionárních stavů nebudou reálné a pravděpodobnosti událostí nedají v součtu jedničku.“

Pozici, ve které byl před konferencí na Shelter Island v červnu 1947, shrnuje Feynman následovně: „Měl jsem bohatou zkušenost s kvantovou elektrodynamikou, alespoň co se týče znalosti mnoha různých způsobů její formulace. Jedním z důležitých produktů této zkušenosti byl například fakt, že jsem věděl, jak zkombinovat to, co se tehdy nazývalo podélná a příčná pole a všeobecně, že teorie je relativisticky invariantní. Nikdy jsem však nepoužil celý ten vytvořený aparát k řešení byť jediného relativistického problému. Do té doby jsem nespočítal ani vlastní energii elektronu, zkoumal jsem jenom obtíže se zachováním pravděpodobnosti. Ve skutečnosti jsem nedělal nic, kromě studia obecných vlastností teorie.“

## Experimenty

Měření Lambova posuvu a Betheho nerelativistický výpočet, který velkou část měření vysvětlil, upozornily na potřebu efektivní relativistické kvantové elektrodynamiky. Bethe tvrdil, že k nalezení veličin, které ve studovaných jevech hrají podstatnou roli, by byla užitečná teorie dávající konečné výsledky, i kdyby odporovala nějakému fyzikálnímu principu. Feynman, jak říká, byl přesvědčen, že ví, jak na to.

„Konečně jsem si uvědomil, že musím vymyslet, jak provádět výpočty. Nakonec jsem se tedy naučil, jak spočítat energii elektronu. Potom

jsem se jednoduše řídil Bethovým programem a ukázal, jak spočítat různé věci jako nezářivý rozptyl elektronů na atomech, posun hladin atd., vše s pomocí experimentálně zjištěné hmotnosti. . .

Zbytek mé práce spočíval jednoduše ve zdokonalení metod, které tehdy byly k výpočtům k dispozici, ve vytvoření diagramů, které usnadňovaly rychlejší analýzu poruchové teorie. Na většinu věcí jsem poprvé přišel hádáním – neměl jsem relativistickou teorii hmoty. Například mi připadalo zřejmé, že rychlosti v nerelativistických formulích je třeba nahradit Diracovými maticemi. Své odhady jsem odvozoval z formulí, které jsem našel pro nerelativistickou hmotu a relativistické světlo. Vytvořit pravidla pak už bylo snadné. Začlenil jsem také diagramy, vylepšenou notaci, vypracoval snadný způsob výpočtu integrálů a tím vytvořil jakousi příručku, jak dělat kvantovou elektrodynamiku.

Jeden důležitý krok zahrnoval Diracovo moře negativní energie, které mi způsobilo spoustu logických obtíží. (*Zde Feynman naráží na Wheelerovu ideu o tom, že pozitron je elektron pohybující se zpět v čase.*) A tak jsem v časově závislé poruchové teorii, která se k získání vlastní energie obvykle používala, jednoduše na chvíli předpokládal, že je možné jít dozadu v čase. Nadbytečné členy, které takto vznikly, byly (snad s výjimkou nějakých znamének) stejné jako členy, které dostali jiní, když tentýž problém řešili pomocí děr v moři. Nejprve jsem je určil empiricky vynalezením a vyzkoušením nějakých pravidel.

Snažil jsem se vysvětlit, že všechna zdokonalení relativistické teorie byla nejprve přímými, poloempirickými podfuky. Pokaždé, když jsem něco objevil, jsem to však mnoha způsoby ověřoval, až jsem byl zcela přesvědčen o pravdivosti rozličných pravidel a předpisů, které jsem si vymyslel pro zjednodušení práce.

V tomto stádiu na mne naléhali, abych to publikoval, neboť každému se to zdálo jako jednoduchý způsob počítání a každý chtěl vědět, jak to dělat. Musel jsem to publikovat bez dvou věcí. Jednou z nich byl obvyklý matematický důkaz každého tvrzení. Často jsem dokonce ani fyzikálně nedemonstroval, jak se k těm pravidlům či rovnicím dojde z konvenční elektrodynamiky. Ze zkušenosti, z počítání jsem však věděl, že vše je ve skutečnosti ekvivalentní obvyklé elektrodynamice a měl jsem řadu částečných důkazů. Nikdy jsem ale jako Euklid pro řecké

geometrie nezjišťoval, že vše lze dostat z jediné jednoduché sady axiomů. Následkem toho byla práce kritizována, nepamatuji si však, zda příznivě či nepříznivě, a *metoda* byla nazvána *intuitivní*. Pro ty, kteří to nezakusili, bych chtěl zdůraznit, že úspěšné používání *intuitivní metody* v sobě zahrnuje spoustu práce. Jelikož formule a myšlenky nemají žádný jasný důkaz, je třeba neobvyklého množství kontroly a přezkoumávání konzistence a korektnosti pomocí toho, co je známé. Tváří v tvář nepřítomnosti přímé matematické demonstrace by se člověk měl neustále snažit demonstrovat co nejvíce formulí. Jakkoli, mnohem víc pravdy můžeme poznat, než umíme dokázat. . .

Tím se dostáváme k druhé věci, nevyřešené obtíži, kterou jsem do publikace nezahrnul. Když  $\delta$  nahradíme  $f$ , dostaneme výsledky, pro které součet pravděpodobností všech alternativ nedává jedničku. Myslím, že ve skutečnosti neexistuje žádná uspokojivá kvantová elektrodynamika, jist si tím však nejsem.

Domnívám se, že renormalizace je jednoduše způsob, jak obtíže s divergencemi elektrodynamiky zamést pod koberec. Jistotu samozřejmě nemám.“

Přibližně za dvacet let zastával Feynman naprosto stejný názor, když psal [16]: „*Hazardní hra, kterou hrajeme, se nazývá renormalizace. Ale ať to zní jak chce chytře, nazval bych to pošetilým procesem! To, že jsme se uchýlili k takovému hokus-pokusu, nám zabránilo ukázat, že teorie kvantové elektrodynamiky je matematicky self-konzistentní. Je překvapivé, že self-konzistence teorie tak či onak dosud nebyla dokázána. Mám podezření, že renormalizace není matematicky legitimní. Je tedy jisté, že nemáme dobrý matematický způsob, jak popsat teorii kvantové elektrodynamiky.*“

## Význam fyzikálního uvažování

Feynmanova zpráva se chýlí ke konci, když říká: „Tím končí příběh o vývoji prostoročasového pohledu na kvantovou elektrodynamiku. Nevím, zda se z něj můžeme něčemu naučit. Pochybuji. Nejpozoruhodnější je, že většina představ rozvinutých během bádání, nakonec nebyla použita. Kupříkladu poloadvansovaný, poloretardovaný potenciál nako-

nec nebyl použit, výraz pro akci (při působení na dálku) nebyl použit, představa, že náboje nepůsobí na sebe samotné, byla také opuštěna. Formulace kvantové mechaniky pomocí dráhového integrálu byla užitečná k odhadu konečných výrazů a při formulaci všeobecné teorie elektrodynamiky novými způsoby – ač striktně řečeno, absolutně nezbytná nebyla. Totéž platí i pro představu pozitronu jako elektronu pohybujícího se zpět v čase – byla velice užitečná, ale ne naprosto nezbytná. . .

Máme před sebou velikou spoustu různých fyzikálních hledisek a značně odlišných matematických formulací, jež jsou všechny navzájem ekvivalentní. Metoda, kterou jsme použili – uvažování ve fyzikálních pojmech – se tudíž jeví jako nesmírně neefektivní. Při zpětném ohlednutí cítím určitou lítost nad nesmírným úsilím věnovaným fyzikálním úvahám a matematické reformulaci, jejichž výsledkem bylo pouze přeformulování dříve známého, ač do tvaru, který je pro výpočet konkrétních problémů mnohem efektivnější. Nebylo by tedy k vytvoření efektivnější formulace snadnější pracovat výlučně na matematickému problému? Bezpochyby to tak vypadá, musím však poznamenat, že navzdory tomu, že vyřešeným problémem byla pouze takováto reformulace, původním problémem (zřejmě dosud neřešeným) byla snaha o vyloučení nekonečen běžné teorie. Neboli, hledali jsme novou teorii, ne jenom modifikaci staré. Ačkoli snaha nebyla úspěšná, věnujme se ještě otázce významu fyzikálních představ při vývoji nové teorie. . .

Myslím, že úkolem není najít nejlepší či nejefektivnější způsob, jak dojít k objevu, ale najít vůbec nějaký způsob. A právě fyzikální uvažování některým lidem pomáhá nastínit, jak by neznámé mohlo být spojeno se známým. Teorie známého, formulované pomocí různých fyzikálních představ, mohou být ekvivalentní ve všech svých predikcích a jsou tudíž vědecky nerozlišitelné. Nejsou však identické psychologicky, když se s jejich pomocí pokoušíte dosáhnout neznámého. Neboť různé pohledy přinášejí různé inspirace. Proto si myslím, že by pro dobrého teoretického fyzika mohlo být užitečné mít zásobu fyzikálních představ a matematických formulací jedné a téže teorie. Možná je to příliš mnoho na jednoho člověka. Měli by to tedy mít noví studenti jako celek. Když se každý student řídí toutéž současnou módou ve vyjadřování a přemýšlení o *všeobecně známých věcech*, pak je nutně omezena



rozmanitost hypotéz, které budou vygenerovány k vysvětlení dosud otevřených problémů. Snad je to tak správně, neboť šance, že pravda leží v módním směru, je vysoká. Kdyby však ležela v jiném směru, kdo ji najde?“

Takto mluvil čestný muž, vynikající intuicionista našeho věku a prvotřídní příklad toho, co může čekat na někoho, kdo má odvahu bubnovat na odlišnou notu.

# Chlapík z pracovny odnaproti

*Murray Gell-Mann*

Když vzpomínám na Richarda, často si vybavím jedno studené odpoledne v Altadeně, krátce po jeho sňatku s okouzující Gweneth. V září 1960 jsem se se svou ženou Margaret vrátil z ročního pobytu v Paříži, Londýně a Africe a Richard mne přivítal sdělením, že „mne dohání“ – chystal se oženit s Angličankou a mít malého hnědého psa. Svatba se konala brzy a byla hezká. Jak Feynmanovi, tak i my jsme si koupili dům v Altadeně a ono zmíněné odpoledne jsme s Margaret Feynmanovy navštívili.

Richard se chystal zapálit oheň. Mačkal noviny a házel je do krbu. Kdokoli jiný by to dělal stejně, ale způsob, jakým z toho on dělal hru, a nadšení, které do ní vkládal, byly zvláštní a magické. Přitom po domě nahoru a dolů běhal pes a on šťastně volal na Gweneth. Byl ztělesněním energie, vitality a hravosti. Takový byl Richard v nejlepších letech.

Stejným způsobem, s nadšením a humorem, často pracoval na teoretické fyzice. Diskutovali jsme spolu o fyzice a mezi zátahy matematických výpočtů jsme hýřili nápady a vtipy – křesali jsme jiskry jeden z druhého, bylo to radostné.

Na Richardově stylu se mi vždycky líbila nepřítomnost okázalosti. Neměl jsem rád, když teoretikové odívali svoji práci do honosného matematického jazyka či pro své někdy skromné příspěvky vymýšleli honosné konstrukce. Osvěžením bylo, jak Richard své myšlenky, mocné, důvtipné a originální, prezentoval přímo.

Méně se mi líbil jiný aspekt jeho stylu. Obklopil se oblakem mýtu a spoustu času strávil tím, jak o sobě vytvářel anekdoty.

Někdy to nebylo příliš obtížné. Například v dobách mých začátků na Caltechu platilo ve fakultním klubu Athenaeum pravidlo, že na oběd musí muži nosit saka a vázanky. Na fakultu Richard obvykle přicházel oblečen poměrně konvenčně a sako s vázankou nechával viset v pracovně. V Athenaeu jedl zřídkakdy, ale když tak učinil, dal si záležet, aby přišel pouze v košili, bez vázanky. Pak si na sebe hodil nějaké otřepené

sportovní sáčko a křiklavou vázanku, které byly v Athenaeu v šatně pro ty, kdo přišli oblečení nevhodně.

Řada anekdot samozřejmě vznikla díky příběhům, které Richard vyprávěl a byl jejich hrdinou a ze kterých měl, pokud možno, vyjít chytřejší než všichni ostatní. Musím přiznat, že s lety se mi méně a méně líbila představa, že jsem rival, kterého chce předčit, a že práce s ním mi již nebyla tak příjemná, když přemýšlel spíš v pojmech „ty“ a „já“ nežli „my“. Pravděpodobně bylo pro něj těžké zvyknout si na spolupráci s někým, kdo netvořil jen pozadí jeho myšlenek (zvláště s někým jako já, protože jsem Richarda považoval za báječnou osobu, které můžu vyklopit své nápady!).

Zprvu však nic z toho nebylo problémem a v těch dobách jsme vedli spoustu skvělých rozmluv. Nejenže jsme v těchto rozmluvách „chytali Vesmír za ocas,“ ale také jsme se obměňovali velkou spoustou živých zkušeností z bádání.

### Sčítání přes světočáry

Samozřejmě mi také vykládal o tom, jak u Johna Wheelera v Princetonu dělal postgraduál. Wheeler o jejich práci na „absorbérové teorii záření“ mluvil v tom smyslu, že jde až moc o spolupráci, než aby šla kvalifikovat jako dizertace na Ph.D., a tak se Richard věnoval svému zájmu o práci Paula Diraca týkající se role účinku  $S$  v kvantové mechanice. Ve své knize o kvantové mechanice a ještě více v článku ve *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* z roku 1932 Dirac tyto úvahy rozvinul poměrně široce. V podstatě ukázal, jak může být kvantově mechanická amplituda přechodu z jedné množiny souřadnic v jednom čase do jiné množiny v jiném čase reprezentována násobným integrálem přes hodnoty souřadnic v hustě rozmístěných mezilehlých časech z veličiny  $e^{iS/\hbar}$ , kde  $S$  je klasická akce podél každé posloupnosti mezilehlých souřadnic. Dirac tento výsledek neřekl tolika slovy, aby ukázal, že tuto metodu lze použít jako výchozí bod pro veškerou kvantovou mechaniku, a aby ji zmínil jako praktický způsob pro kvantově mechanické výpočty.

Ale právě tohle, jak tomu rozumím, učinil Richard ve své dizertaci v roce 1942 a poté tento přístup „dráhového integrálu“ či „součtu přes

světočáry“ mnohokrát použil ve svém dalším bádání. Byl například základem jeho přístupu k nyní standardní kovariantní metodě výpočtu v kvantové teorii pole (kterou Ernst Stueckelberg našel jiným způsobem). Metoda je samozřejmě vždy prezentována pomocí *Feynmanových diagramů*, takových, jaké si Dick později namaloval na svou doávku.

Formulace přes dráhový integrál je zvláště vhodná pro odintegrovaní jedněch souřadnic a soustředění se na ty zbývající. Propagátor fotonu se tedy v kvantové elektrodynamice [10] dostane „odintegrovaním“ proměnných fotonu a ponecháním elektronů a pozitronů, jak reálných, tak virtuálních, interagujících přes kovariantní funkci  $\delta(x^2) + (\pi i x^2)^{-1}$ .

V roce 1963 Feynman se svým bývalým žákem F. L. Vernonem ml. pokračovali ve výzkumu, který odlišným způsobem dříve dělal Ugo Fano. Ukázali, jak lze v řadě problémů z laserové fyziky, fyziky pevných látek a jiných praktických fyzikálních disciplín, odintegrovat nezájímavé proměnné s cílem zdůraznit chování těch, které zůstanou. Jestliže se matice hustoty na začátku rozpadne na součin dvou, z nichž jedna závisí na zajímavých proměnných a druhá na tom zbytku, pak následující časový vývoj redukované matice hustoty pro zajímavé proměnné lze vyjádřit pomocí dvojitého dráhového integrálu. V tomto integrálu je koeficientem počáteční redukovaná matice hustoty, přičemž  $S$  je akce podél dráhy, která se vztahuje k levé straně matice hustoty,  $S'$  je akce podél dráhy, která se vztahuje ke straně pravé, a  $W$  je „funkcionál vlivu“ závisící na obou drahách, který vznikne odintegrovaním všech nezájímavých proměnných. Feynman s Vernonem několik případů rozpracovali do podrobností a následující výzkum mj. A.O. Caldeiry a Anthonyho Leggetta dále některé otázky ujasnil.

## Osvětlení kvantové mechaniky

Později tento směr v pracích H. Dietera Zeha, Ericha Joose, Wojciecha Zureka a jiných osvětlil, jak v kvantové mechanice vzniká dekoherence, jedna z podmínek pro téměř klasické chování známých předmětů. Pro planetu či pro prachové zrníčko srážející se např. s fotony reliktního záření se díky imaginární části funkcionálu  $W$ , který vznikne

integrací přes tato kvanta, objeví faktor, který exponenciálně klesá s mírou separace mezi trajektorií na levé straně matice hustoty a trajektorií na straně pravé. V souřadnicích částice může tudíž být matice hustoty v téměř diagonálním tvaru, čímž vznikne dekoherence. Je-li dále setrvačnost zrníčka dostatečná na to, aby jeho trajektorie nebyla příliš rušena kvantovými a tepelnými fluktuacemi pozadí, a na to, aby kvantové rozmazání souřadnic probíhalo pomalu, bude se operátor polohy zrnka chovat téměř klasicky.

Jestliže operátor dáme do korespondence s téměř klasickým operátorem, pak ho můžeme měřit a pozorovat. Práce Feynmana a Vernona tedy nevedla jen k praktickým aplikacím, ale i k lepšímu porozumění toho, jak kvantová mechanika popisuje svět, na který jsme zvyklí.

Přístup přes dráhový integrál se v řadě situací ukázal jako užitečná alternativa ke klasickému přístupu přes operátory v Hilbertově prostoru. Má řadu výhod, nejen tu, že za vhodných podmínek umožňuje odintegrovat některé proměnné. Metoda dráhového integrálu s jejím využitím akce obvykle elegantním způsobem umožňuje ukázat invariance teorie a nastínit cestu, jak ukázat tyto invariance v poruchovém rozvoji. Zjevně je dobrým přístupem pro odvození klasické limity a velice užitečná může být i v semiklasické aproximaci, např. při popisu tunelování. Pro jisté efekty, např. tunelování instantonů, dovoluje provést výpočty, které jsou v obvyklém smyslu vysoce neporuchové. Rovněž je zvláště vhodná pro globální studii konfigurací v kvantové teorii pole, neboť umožňuje přímou diskusi topologických efektů.

Pro některé účely je samozřejmě zase vhodnější přístup konvenční. Např. pro důkaz unitárnosti matice  $S$  či faktu, že pravděpodobnosti nevyjdou záporné. Kdyby Richard uvažoval v pojmech hamiltonovské formulace, nikdy by ho nemohlo napadnout konzistentní vynechání všech uzavřených smyček, jak to učinil kolem roku 1948. Automatická unitarita hamiltonovské formulace takového vynechání nedovoluje. (Mimoходом, nepřípustná teorie bez uzavřených smyček mohla reflektovat pozoruhodnou Wheelerovu představu, kterou jednou Richardovi předstřel: Pozitrony nejen že jsou elektrony běžící zpět v čase, ale všechny elektrony a pozitrony představují jediný elektron běžící dopředu a dozadu, čímž se vysvětlí, proč všechny mají tentýž elektrický náboj!)

V každém případě znamenala formulace dráhového integrálu pouze reformulaci kvantové mechaniky. Říkám *pouze*, protože Richard byl se svým talentem pro nalezení důsledků známých zákonů, často naprosto novým a zajímavým způsobem, snad až přecitlivělý, když šlo o objevení zákonů nových. Ve spojení s objevem univerzální a axiální slabé interakce z roku 1957 napsal [23]: „Poprvé a naposled v mém životě jsem znal přírodní zákon, který neznal nikdo jiný. (Ovšem pravda to nebyla. Když jsem ale později zjistil, že přinejmenším Murray Gell-Mann – a také E. C. George Sudarshan a Robert Marshak – vytvořili stejnou teorii, moji radost to nijak nezkazilo.) Jen tehdy jedinkrát jsem objevil nový zákon.“

A tak by Richarda potěšilo (možná to i věděl, ač si toho nejsem vědom), že se nyní objevily určité náznaky toho, že jeho dizertace nebyla jen formálním rozvojem teorie, ale znamenala opravdu základní pokrok. Formulace kvantové mechaniky pomocí dráhového integrálu je totiž možná fundamentálnější než formulace klasická, neboť existuje oblast, kde pravděpodobně platí a kde formulace konvenční pravděpodobně selhává. Touto oblastí je kvantová kosmologie.

## Hledání pravidel kvantové gravitace

Ze všech fyzikálních polí je gravitační pole vybráno jako to, které (einsteinovsky) určuje strukturu prostoročasu. Dokonce i ve sjednoceném popisu všech polí a částic. Prvního rozumného kandidáta na takovou teorii máme dnes v teorii superstrun, která je zřejmě konečná v perturbací teorii a zhruba řečeno popisuje nekonečné množství lokálních polí, z nichž jedno je polem gravitačním, které je spojeno s metrikou prostoročasu. Když všechna ostatní pole vynecháme, dostaneme Einsteinovu teorii gravitace.

Jestliže však konvenční formulace opravdu selhává, pak je toto selhání spjato s kvantově-mechanickým rozmazáním prostoročasu, které se musí nutně objevit v jakékoli kvantové teorii pole, zahrnující Einsteinovu gravitaci.

Když v případě dominantní metriky pozadí, zvláště metriky Minkowského, sledujeme chování malých kvantových fluktuací (např. roz-

ptyl gravitonu na gravitonu), nevystoupí hluboké otázky o prostoročasu v kvantové mechanice do popředí.

Při vypracování pravidel kvantové gravitace hrál Dick významnou roli. Náhodou se stalo, že jsem se ocitnul na periferii tohoto příběhu. Poprvé jsme o tom diskutovali, když jsem o vánocích 1954 navštívil Caltech. (Během pár dnů mi nabídli místo – to se dnes děje pomaleji.) Zajímal jsem se o podobné věci, ale obtížným kosmologickým otázkám jsem se vyhýbal. Když jsem zjistil, že on již velmi pokročil, povzbuzoval jsem ho k pokračování – k výpočtům jednosmyčkových efektů a k nalezení, zda je kvantová gravitace divergentní do předpokládaného řádu. Nikdy se mu příliš nepozdávalo, že nerenormalizovatelnost je kritériem pro zavržení teorie, přesto se však bádání na tomto poli s přestávkami věnoval. V roce 1960 mi pověděl o svých problémech. Jeho metoda kovariantního diagramu dávala výsledky neslučitelné s unitaritou. Imaginární část amplitudy pro procesy čtvrtého řádu se měla přímo vztahovat k součinu amplitudy druhého řádu a jejího komplexního sdružení. Tento vztah však nefungoval.

Navrhl jsem, aby vyzkoušel analogický problém v Yang-Millově teorii, což je nelineární kalibrační teorie, mnohem jednodušší než Einsteinova gravitace. Richard se zeptal, co to je Yang-Millova teorie. (Musel to zapomenout, neboť v roce 1957 jsme vypočítali coupling fotonu na nabitý intermediální boson pro slabou interakci a zjistili, že v Yang-Millově teorii je to pravý coupling.) Za chvíli jsem ho seznámil se základy Yang-Millovy teorie a on se s novou energií vrhnul na rozřešení rozporů. Nakonec zjistil, že v lorentzovsky kovariantní formulaci obou teorií je třeba zavést jakási tajemná dodatečná pole zvaná „duchové“, která se od té doby začala používat a nabývala na důležitosti. Mluvil o nich na konferenci v Polsku (myslím, že to bylo v roce 1963). Obvykle se nazývají „Faddeevovi-Popovovi duchové“ podle L. D. Faddeeva a V. N. Popova, kteří je také zkoumali.

V šedesátých letech tedy mohl Feynman říct, že v interakci s elektrony, protony a jinými částicemi je Einsteinova gravitace značně divergentní. (V čisté kvantové gravitaci se objevily také závažné divergence, ale to ukázali až mnohem později dva studenti Caltechu, Marc Goroff a Augusto Sagnotti, pomocí dvojsmyčkové aproximace.)

Těmto problémům čelí teorie superstrun sjednocením všech částic a interakcí. Stále se však potýkáme s otázkami, které před nás staví fakt, že metrika je kvantově mechanická a že ji všeobecně nelze studovat jako jednoduché klasické pozadí plus malé kvantové fluktuaace.

## Kvantová kosmologie

V nedávných letech byl v otázkách kosmologických aspektů kvantované einsteinovské gravitace učiněn značný pokrok. Práce Stephena Hawkinga, Jamese Hartleho, Claudia Teitelboima, Alexandra Vilenkina, Jonathana Halliwella a dalších ukázaly, jak lze k těmto problémům využít metodu dráhového integrálu a jakým způsobem by bylo možné metodu zobecnit k popisu *dynamiky vesmíru, ale i jeho počátečních okrajových podmínek* pomocí klasické akce  $S$ . Jak jsem se již zmínil, jsou navíc náznaky, že kromě případů, kdy nosný prostoročas vystupuje s malými kvantovými fluktuacemi, není konvenční formulace kvantové mechaniky dobrá. Zejména Hartle tuto skutečnost zdůraznil.

Přibližně to můžeme demonstrovat, když vlnovou funkci vesmíru (o kterém předpokládáme, že je v čistém stavu) vyjádříme jako dráhový integrál přes všechna pole v přírodě (např. přes nekonečné množství lokálních polí reprezentovaných superstrunou), přičemž integrování přes metriku  $g_{\mu\nu}$  ponecháme úplně nakonec. Celkovou akci  $S$  potom můžeme vyjádřit jako součet Einsteinovy akce  $S_G$  pro čistou gravitaci a akce  $S_M$  pro všechno ostatní, pole „hmoty“ včetně jejich spojení s gravitací. Pak pro amplitudu pravděpodobnosti  $A$  dostaneme

$$A = \int Dg_{\mu\nu} \exp \frac{iS_G}{\hbar} \times \int D(\text{ostatní}) \exp \frac{iS_M}{\hbar}.$$

Na chvíli předpokládejme, že jsou dovoleny jen konfigurace  $g_{\mu\nu}$  odpovídající jednoduché topologii.

Dokud neprovedeme integraci přes  $g_{\mu\nu}$ , máme zcela určitý prostoročas, ve kterém lze zkonstruovat prostorově-podobné plochy ve zcela určité posloupnosti popsané časově-podobnou proměnnou. Máme ekvivalentní formalismus v Hilbertově prostoru. Máme unitaritu (zachování kladné pravděpodobnosti) a máme obvyklou kauzalitu (ve formulaci



Hilbertova prostoru odpovídá požadavku na časové uspořádání operátorů ve vzorci pro pravděpodobnosti).

Jakmile však integraci provedeme, není vůbec jasné, jestli z toho všeho něco zůstane. Poněvadž integrujeme přes strukturu prostoročasu, nelze po integraci ukázat na prostorově-podobné plochy či posloupnost popsanou časově-podobnou proměnnou. Snad by bylo možno nějakým novým způsobem zkonstruovat formulaci s Hilbertovým prostorem, s unitaritou a kauzalitou, snad s využitím nějaké nové, vnější časové proměnné (tu Feynman často nazýval páté kolo u vozu). Jestli takový program lze doopravdy uskutečnit, však není jasné.

V nynějším stádiu lze připustit možnost sumace přes všechny topologie prostoročasu (nebo odpovídajícího prostoročasu s Euklidovou metrikou). Uděláme-li to, jsme ihned přeneseni do království dceřiných vesmírů a červích děr, tak milovaného Stephenem Hawkingem a nyní tak módního, ve kterém se zdá, že lze ukázat, že kosmologická konstanta vymizí. V tomto království vládne metoda dráhového integrálu a dosud nevíme, do jaké míry se může uplatnit konvenční kvantová mechanika.

Kvůli Richardovi (a také Diracovi) by se mi líbilo víc, kdyby se ukázalo, že metoda dráhového integrálu je opravdovým fundamentálním kamenem kvantové mechaniky a tudíž i dalších fyzikálních teorií. A to navzdory tomu, že s algebraickými sklony jsem osobně vždycky dával přednost operátorovému přístupu. A navzdory obtíži s interpretací vlnové funkce či matice hustoty bez hilbertovského formalismu (to je již dosti obtížné na vysvětlení, jak dosvědčí kdokoli z mých přednášek). A když se pojmy transformační teorie, unitarity a kauzality vynoří z mlhy až poté, co se objeví velmi jasná nosná metrika (metrika samotná je výsledek kvantově mechanických pravděpodobnostních procesů), dostaneme řadu dalších věcí k vysvětlování. Zde by pomohl talent a jasnost myšlení Dicka Feynmana.

## Otáčení věcí

Jak je dobře známo, Richard se rád na každý problém, ať důležitý či ne, díval novým způsobem – *otáčeje to dokola*, jak říkal. Mluvil o tom, jak ho to učil jeho otec, který zemřel, když byl Richard ještě mladý. Tento

přístup šel ruku v ruce s neobyčejným úsilím, které vynakládal na to, aby se odlišoval, zvláště od přátel a kolegů.

Je samozřejmé, že kdokoli z nás, co se věnujeme tvořivé práci, a ve skutečnosti kdokoli s tvořivými nápady v každodenním životě, musí nějakým způsobem zpochybnit zaběhlé návyky, aby se dostal z vyjetých kolejí konvenčního myšlení, zavrhnout určité přijaté, ale nesprávné představy a nalézt nový a lepší způsob, jak nějaký problém formulovat. Pro Dicka však toto „otáčení věcí“ a odlišování se od ostatních bylo vášní.

Když při nějaké příležitosti, ať už ve vědě či v běžném životě, bylo zapotřebí nového pohledu na věc, byl schopen vynalézt pozoruhodně užitečné inovace. Když však při řadě jiných okolností byl konvenční model dostatečně dobrý, nebyl tou ideální osobou, na kterou se obrátit o radu. Pamatujete si na jeho televizní vystoupení, ve kterém si dělal legraci z každodenního zvyku čistit si zuby? Nebo si vezměte jeho příležitostné výlety do politiky v padesátých letech, během jeho druhého manželství. Ty jej zcela vzdálily od většiny přátel. Tehdy mi však jednou volal a bezmocně se přiznal, že hlasoval pro jednoho zvláště ostudného kandidáta do celostátního úřadu – a požádal mne, abych v budoucnu ta jména dopředu zběžně prozkoumal a upozornil ho, kdyby se choval bezhlavě!

Žádná z těchto vad však nic nemění na faktu, že Dick Feynman byl velice inspirujícím člověkem. Poukazoval jsem na jeho originalitu, přímou a na jeho energii, hravost a vitalitu. Všechny tyto charakteristiky se projevovaly v jeho práci a také v jiných stránkách života. A ta vitalita má zřejmě co do činění s jakýmsi druhem biologické (a pravděpodobně psychologické) vitality, která mu dovozovala tak pozoruhodně a tak dlouho vzdorovat nemoci, jíž nakonec podlehl.

Když na něj dnes myslím, vybavuji si ho obvykle takového, jaký byl v tom prvním desetiletí, kdy jsme se stali kolegy, kdy jsme byli oba mladí a všechno se zdálo možné. Telefonovali jsme si dobré a bláznivé nápady, vážné zprávy a fraškovité gagy. Křičeli jsme na sebe před tabulí. Učili jsme letušky říkat „rozptyl kvarku na kvarku“ a „rozptyl kvarku na antikvarku.“ Nesli jsme páva našemu příteli Jirayru Zorthianovi do ložnice, zatímco naše manželky ho odlákávaly. Přeli jsme se o všechno pod sluncem.

Později jsme se do značné míry vzdálili, věděl jsem však, že jsme stále kolegové a že když se objeví opravdu hluboká vědecká otázka, bude zajímavé a užitečné diskutovat ji s Dickem. Ač jsem za posledních dvacet let tuto příležitost mnohokrát nevyužil, věděl jsem, že tak mohu učinit.

A také ne vždycky jsem ji nevyužil. Například během posledních měsíců a dokonce týdnů jeho života jsme diskutovali o jedné z nejzákladnějších věcí, o roli *klasických objektů* při interpretaci kvantové mechaniky. Obnovili jsme sérii diskusí na toto téma, kterou jsme začali před čtvrtstoletím. V mezidobí 1964–1987 jsme o kvantové mechanice mluvili zřídka. Alespoň jeden pozoruhodný moment z těch posledních let však pamatuji. Richard přišel na jednu z mých přednášek o významu kvantové mechaniky a chvílemi mne přerušoval. Neměl však námitky proti tomu, co jsem říkal. Naopak má tvrzení podporoval. Studenti byli zcela jistě potěšeni, když jsme stejnými argumenty tvořili jakýsi druh protikladu.

Je pro mne velmi těžké zvyknout si na to, že když chci prodiskutovat nějakou hlubší fyzikální otázku, Dick Feynman tu už není.

# Feynman a partony

*James D. Bjorken*

Stejně jako pro řadu ostatních je i pro mne Richard Feynman zvláštním hrdinou. Stal se jím, když jsem na postgraduálu studoval kvantovou elektrodynamiku. Kurs byl uspořádán historicky a po dobu několika měsíců byl vyučován stylem třicátých let z klasických Heitlerových učebnic s použitím nemoderní poruchové teorie a Diracových matic  $\alpha$  a  $\beta$  (ale ne  $\gamma$ ). Po tomto křestu ohněm následovalo zdánlivě nekonečné, ubíjející a přebujelé množství formalismu pro kvantování pole. Když začaly Feynmanovy diagramy, bylo to jako slunce, které spolu s duhou a hrncem zlata vykuklo zpoza mraků. Nádhera! Fyzikální a hluboké! V mžiku jsem se stal jeho žákem.

Po mnoho následujících let se mé žácství vyvíjelo jako u většiny ostatních – silným vlivem jeho článků a občasnou příležitostí poslechnout si ho osobně. Později jsem však získal privilegium, když jsem se několik let věnoval stejným věcem jako on. K tomuto přiblížení došlo následkem pozoruhodné série experimentů týkajících se nepružného elektronového rozptylu, které se prováděly ve spolupráci s MIT ve Stanfordu (SLAC). Tyto experimenty hrály rozhodující roli při odhalení existence bodových kvarkových komponent protonu a Feynmanovy představy a intuice poskytly velkou část teorie pro interpretaci experimentů.

Když ke konci šedesátých let začal program SLACu, snažil se Feynman vysvětlit vysokoenergetické srážky hadronů. Představou, kterou o typické reakci vytvořil, byla výměna komponent – ty nazval partony – mezi rychle se pohybujícími projektily. Primární základna jeho partonové představy byla empirická. Významnou evidencí bylo exponenciální omezené rozdělení příčné hybnosti vzniklých a rozptýlených sekundárních částic. To naznačovalo, že převládá „měkká“ interakce, tj. že dynamika probíhá především na vzdálenostech srovnatelných s velikostí protonu. Výměna komponent toto kritérium „měkkosti“ splňuje velice dobře. Ve skutečnosti se nezaváděla vůbec žádná explicitní interakce

a existovala jen interakce implicitní, která komponenty udržovala uvnitř protonu.

## Inkluzivní procesy

Teorie lokálního pole byla tehdy k popisu silných interakcí populární asi jako je dneska k popisu kvantové gravitace. Panovaly zlaté časy *Regge-pole* teoretiků. Věřilo se, že je důležité se v detailu věnovat procesům, ve kterých v konečném stavu nevystupují více než dvě částice. Vysokoenergetická limita příčného průřezu těchto srážek je přirozenou doménou použitelnosti teorie *Regge-pole*. Feynmanovy partony poskytly nový způsob k interpretaci *Regge-pole* představ. Ještě závažnějším byl Feynmanův vynález nového jazyka k popisu nepružných srážek, při nichž vznikají více než dvě částice.

Teoretici se tehdy vícečásticovým srážkám vyhýbali a dávali přednost studiu procesů, v nichž se pozorují všechny vystupující částice a jsou určeny všechny hybnosti. Feynman tyto procesy nazýval *exkluzivní*, aby zdůraznil rozdíl vůči procesům *inkluzivním*, při nichž se v konečném stavu identifikuje jedna (či několik) částic a jsou určeny jejich hybnosti, zatímco všechny ostatní možnosti jsou uváženy dohromady. Takovéto procesy teoretikové znali zřídka, přestože experimentální komunita o nich věděla jako o *paprskových průzkumech* – pracích, které se dělaly při navrhování nových urychlovačů, aby bylo možné správně umístit kanály sekundárních svazků a navrhnout radiační stínění. Feynman přišel s tím, že inkluzivní rozdělení jsou teoreticky zajímavá sama o sobě a odvodil škálovací chování v proměnné  $x_F$ , což je poměr podélné hybnosti sekundární částice k její maximální hodnotě, jež připouští zákon zachování energie-hybnosti. Tvrdil, že rapidita (v podstatě logaritmus hybnosti částice) je zvláště užitečná proměnná, a že rozdělení částic vzniklých ve vysokoenergetických srážkách je v této proměnné v podstatě rovnoměrné.

Tuto původní motivaci Feynmanových partonů později nahradila motivace silnější. Došlo k tomu téměř náhodou. Feynman byl na návštěvě u své sestry v San Franciscu a náhodou se zastavil ve SLACu. Ukázali mu nejnovější data z elektron-protonového rozptylu a také fito-

vání na škálovací zákon, který jsem jim poradil. Byl jsem zrovna mimo město a zmatenému Feynmanovi se od experimentátorů nepodařilo dozvědět, odkud se ten škálovací zákon bere – „je to něco z moderní algebry, sumační pravidla, *Regge* teorie. . .“

Během večera ale se svými partony spočítal, o co se jedná. Na proces nahlížel ze souřadné soustavy, ve které je terčový proton ultrarelativistický. Stejně jako v předchozích výpočtech nahradil proton v této soustavě „svazkem“ jeho komponent či partonů. Předpokládal, že se elektron na těchto partonech rozptyluje pružně a partony že jsou bodová navzájem neinteragující kvanta. Na škálovací funkci, kterou jsem zavedl, pohlížel jako na zadání pravděpodobnosti, že ve „vstupujícím“ protonovém svazku nalezneme parton s danou hybností, přičemž pravděpodobnost je vážena čtvercem náboje partonu.

Do SLACu jsem se vrátil, když byl Feynman před odjezdem a zjistil jsem, že nejen mezi teoretiky panuje vzrušení. Feynman mě zmerčil a začal mě bombardovat otázkami. Neustále říkal: „Bezpochyby víte, že. . . Samozřejmě, že víte. . .“ O něčem jsem věděl, o nečem zase ne. A byly věci, které jsem já věděl a on ne. Živě si pamatuji na jazyk, který používal. Nebyl nezvyklý, ale byl výrazně *odlišný*. Byl to jednoduchý jazyk, kterému mohl kdokoli rozumět. Netrvalo dlouho a vagón s partonovým modelem se dal do pohybu.

Feynmanovy výpočty příčného průřezu elektron-protonového rozptylu byly využity k zobecnění řady elektromagnetických a slabých procesů. Svým myšlenkám se Feynman dále věnoval na Caltechu. Já jsem pracoval s Emmanuelem Paschosem a dalšími ve SLACu a spousta dalších se k nám připojila. Rozvinuly se metody k určení spinu partonů, jejich náboje a vlastností při slabých interakcích a časem se nabitě partony ztotožnily s kvarky. Běh událostí byl řízen experimenty, zvláště elegantní, důmyslnou sérií měření elektron-protonového rozptylu ve spolupráci SLACu a MITu (viz [30]) a také neutrinovými experimenty v CERNu a ve Fermilabu.

Jak se kvark-partonový model uchytil, okamžitě vznikla otázka: Proč (anebo přinejmenším *jak to, že*) nebyl žádný neceločíselný náboj pozorován v troskách srážky? Tyto otázky se pro Feynmana i pro mne staly důležitými. A právě při tomto vývoji partonového modelu *druhé generace*

se můj vědecký život nejvíce přiblížil tomu Feynmanovu. Bylo pro mne trvalou výzvou, abych se snažil zjistit, jak o daném problému přemýšlí nebo jak by o tom přemýšlel, kdyby se k němu dostal. Občas mi tento postoj pomáhal nalézt řešení. Přímou jsme komunikovali jen zřídka, ač jsem občas dostával nepřímé informace od těch, kteří byli na Caltechu na výzvědách.

Jednou mi moje snaha řídit se Feynmanovými způsoby přinesla opravdový úspěch. V přehledové přednášce o partonech a příbuzných věcech jsem „Feynmanovy poznámky“ citoval s frekvencí jedna citace na jednu fólii, neboť jsem si myslel, že všechny ty věci udělal, ale nepublikoval. Posluchači tím byli nadšeni. Ale nejen, že jsem ve skutečnosti nevěděl, co Feynman ví a co ne, dokonce jsem nevěděl, jestli svoje poznámky *udržoval*. (Později mi bylo řečeno, že existují pečlivé a kompletní záznamy jeho celodenní práce.) Někdy později jsem se mu o té přednášce zmínil a on mi potvrdil, že s jedinou výjimkou (nepamatuji si už, o co šlo) to všechno měl. Ta nepublikovaná práce zahrnovala kvantování ve světelném kuželi (s několika důmyslnými aplikacemi v kvantové elektrodynamice), nezávislou práci na rozvoji operátorového součinu a jeho *kapalinovou analogii*, ve které se srovnávaly vlastnosti partonového (či hadronového) rozdělení v relativistickém fázovém prostoru s rozděleními obyčejných kapalin (těch, které mají jenom krátkodosahové korelace) v konfiguračním prostoru. (Představy kapalinové analogie světa odhalil Kenneth Wilson.)

## Myšlení deduktivní versus induktivní

Tato paralelní interakce s Feynmanem měla velký vliv na můj způsob fyzikálního myšlení. Problémy, které předkládal partonový model, se nedaly řešit metodami z *Fyziky 101*. Pro Feynmana bylo charakteristické, že se k fundamentálním otázkám partonového modelu stavěl přímo a od začátku. Například v jeho prvním článku o partonech [15] psal: „Tyto představy vznikly z teoretických zkoumání v řadě směrů a nepředstavují výsledek nějakého konkrétního modelu. Jsou výtažkem z toho, co z relativity, kvantové mechaniky a některých empirických faktů plyne

téměř nezávisle na modelu. Tento příspěvek se mi píše obtížně, neboť to není deduktivní referát a výsledek indukce. Jsem si více jist závěry než kterýmkoli z argumentů, které mne k nim přivedly, neboť mají takovou vnitřní konzistenci, jež mne překvapuje a jež převyšuje konzistenci mých deduktivních argumentů.“

Síla partonového modelu nepocházela z lineární, deduktivní logické linie – takové, kterou lze nalézt v obyčejném počítači – ale naopak z mnohorozměrné logické sítě, která je typičtější pro lidský mozek. A tato situace nevystihovala jenom tvůrčí proces, ve kterém bývá běžná, ale i konečný produkt. Zarážející byla vnitřní konzistence mnoha přístupů. Tento přístup ke vědě á la domeček z karet lze jistě zpochybnit: Jeden dobrý argument je přeci jen lepší než dvaapadesát slabších, které se navzájem podpírají.

Uvědomil jsem si, že ve skutečnosti tento induktivní přístup převládal i v mé práci o škálování při nepružném elektronovém rozptylu. Ale tehdy jsem byl mladým asistentem a neměl jsem v něj příliš mnoho důvěry. Abych něco tvrdil, vyžadoval jsem čistou logickou linii (i kdyby měla být zkonstruována *ex post facto*), aby se vyhovělo úrovni řemesla. A takovéto logické linie se hledají obtížně.

Feynmanův původní článek [15] o partonovém modelu nikde nezmiňuje slovo parton či protonová komponenta. Parton zavedl až v poněkud méně formálním referátu [21] na konferenci konané přibližně v téže době. A ta neurčitost se objevuje i v pozdější knize [9] *Foton-hadronové interakce*. Závěrečné strany knihy obsahují následující věty:

„Postavili jsme velice vysoký domeček z karet. Spoustu slabě podložených hypotéz jsme naskládali jednu na druhou a velký kus toho všeho může být špatně. . .

Nakonec poznamenejme, že i v případě, že náš domeček z karet přežije a ukáže se jako správný, neukázali jsme tím existenci partonů. . .

Z tohoto pohledu se partony jeví jako přebytečné lešení, které jsme použili při stavbě domečku.

Na druhou stranu jsou partony užitečným psychologickým vodítkem k tomu, co máme čekat – a když stále budou takto sloužit k vytváření pravdivých očekávání, začnou se samozřejmě stávat *reálnými*, snad stejně reálnými jako ostatní teoretické struktury vynalezené k popisu přírody.“



Z těchto vět se ta poslední stala nejvíce prorockou.

Stěží tady mohu uvést úplně všechny důvody pro víru v partonovou ideologii. Řada výsledků byla založena na širokých principech většinou kinematické povahy. Jedním z hlavních rysů partonové představy je například pozoruhodně nerelativistický charakter ultrarelativistické limity. Vnitřní pohyby komponent vysokoenergetického hadronu se zpomalují v důsledku relativistické dilatace času, ale i samotná příčná dynamika vypadá nerelativisticky. Tuto skutečnost můžeme ihned upozorovat, když vztah pro hybnost-energie volné částice, která se rychle pohybuje ve směru  $z$

$$E^2 = c^2(p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) + m^2c^4$$

přepíšeme jako Hamiltonián příčné dynamiky

$$H = E - p_z c = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2\eta} + \frac{m^2 c^4}{2\eta}$$

kde

$$\eta = \frac{E + p_z c}{2c^2}$$

představuje *setrvačnost* v závislosti (když  $E, p_z \rightarrow \infty$ ) na celkové hybnosti částice. Tato analogie představovala kvalitativní, intuitivní pohled na problém, abstrahovaný z nerelativistické kvantové teorie.

Tato nerelativistická intuitivní představa o dynamice v ultrarelativistické limitě byla však jen jednou z řady přístupů. Jiným byla konzistence – někdy nesnadně získaná – předpovědi, které dávalo studium dynamiky v různých souřadných soustavách. Dalším byl například souhlas předpovědi pro daný inkluzivní proces s předpověďmi pro sadu exkluzivních procesů, které dohromady tvořily zkoumaný inkluzivní proces. Heslem tohoto kritéria je dualita.

Čistý výsledek těchto druhogeneračních pokusů porozumět konečným stavům v takovýchto srážkových procesech se ukázal být nepozo-

ruhodný: Měly by vypadat v podstatě *stejně* jako obyčejné srážky při stejné energii těžiště. Tato skutečnost nebyla pro teoretickou veřejnost *ab initio* očividná. Přes nepozoruhodnost tohoto výsledku vyvolala data, která ho potvrzovala, malou senzaci mezi experimentátory. Pro mne, a myslím že i pro Feynmana, byly však experimentální výsledky velice uspokojujivé.

Je třeba znovu zdůraznit, že podstatným vstupním předpokladem při vývoji partonového modelu bylo, že silné interakce jsou „měkké“, tj. charakterizované silou, jejíž dosah je srovnatelný s velikostí protonu. Jak se ukazuje, není tento předpoklad zcela správný. Kvantová chromodynamika (QCD) – v současné době přijímaná teorie silných interakcí – uvažuje mimo silné a měkké síly ještě slabší tvrdou sílu, která se projevuje na mnohem kratších vzdálenostech. Je analogická coulombovské elektromagnetické síle s konstantou jemné struktury přibližně  $1/7$ . Možnost existence takovéto tvrdé síly byla uvažována již dlouho před objevením QCD. Feynman tuto hypotézu vždy starostlivě odděloval od základních hypotéz partonového modelu. Jak rostla přesvědčivost QCD, vypracoval (spolu s Richardem Fieldem) modifikace „naivního“ partonového modelu, které si QCD vynutila. Nyní jsou základní představy partonového modelu integrovány do formalismu QCD do té míry, že většina teoretiků považuje partony za její zřejmý důsledek. Víím, že tímto příběh ještě neskončil. To, co zbývá vykonat, je však otázkou rigoróznosti a detailu. Partonový přístup nezastará.

Poté, co se objevila QCD, se mé zájmy od Feynmanových vzdálily. I v době, kdy jsme měli společné zájmy, jsem se s Feynmanem osobně setkával jen málo. Náš vztah byl vlídný, ne však blízce osobní. Nemyslím tím, že bych se necítil Feynmanovi blízko. Něco z něj ve mně hluboce zakotvilo a navždy tam zůstane. A navždycky to budu chránit.

# Fyzika kondenzovaného stavu

*David Pines*

V letech 1953 až 1958 byla primárním zájmem Richarda Feynmana fyzika kondenzovaného stavu. Ze čtrnácti článků, které v té době publikoval, je deset věnováno fyzice kapalného hélia, jeden diskutuje vztah mezi supravodivostí a supratekutostí a jeden se týká *polaronového* problému – pohybu elektronu v krystalech. Zbývající dva se týkají Feynmanovy dřívější práce z Cornellu o kvantové elektrodynamice a fyzice hadronů. Do problémů kondenzovaného stavu vložil stejně pozoruhodnou originalitu a fyzikální náhled, jaké jsou charakteristické pro jeho dřívější práce na kvantové elektrodynamice a metodě dráhového integrálu. Svými příspěvky zanechal trvalou stopu ve fyzice nízkých teplot a statistické mechanice.

V tomto článku se zaměřím především na jeho příspěvky k teorii kapalného hélia. Zmíním se také krátce o jeho představách o supravodivosti, jeho práci na polaronech a jeho přednáškách ze statistické fyziky, neboť poskytují dobrý příklad toho, jak Feynman přistupoval k novým problémům.

Před pětatřiceti lety\* byla komunita teoretiků ve fyzice kondenzovaného stavu a nízkých teplot poměrně malá. Všichni jsme se navzájem osobně znali, navštěvovali přednášky těch ostatních a při jakémkoli setkání jsme společně o problémech diskutovali. Nakolik to bude možné, pokusím se vám dát představu, jaké to bylo mít Richarda Feynmana za člena této komunity.

Jako nelze slovy vystihnout zážitek z naslouchání Feynmanovi, když mluvil o svém bádání, není stejně tak možné vystihnout příchut' jeho článků. Čtení Feynmana je radostí a potěšením, poněvadž ve svých člancích tak jako ve svých přednáškách komunikuje velice zpříma, jako kdyby ho čtenář sledoval, když odvozuje výsledky na tabuli. A tak těm z nás, kdo jsme měli to štěstí, že jsme Feynmana znali, ožívují jeho články vzpomínky na jeho přednášky a semináře. Výslovně uvádí, ja-

---

\* Napsáno v roce 1989

kým způsobem formuloval úlohu a jaké metody zkoušel, nijak nezastírá obtíže a čtenáři se svěřuje s takovými věcmi, jako je výzkumná strategie, fyzikální představy versus matematické výpočty, nevyřešené aspekty problému, slibné přístupy k jejich řešení a podobně. Čtenáře tohoto článku chci povzbudit, aby neváhali a přečetli si originál. Náhrada za něj neexistuje.

## Kapalně hélium před rokem 1953

Abychom Feynmanovy příspěvky k našemu porozumění kapalnému héliu zařadili do kontextu, zmíníme se o pracích Fritze Londona, Lazlo Tiszy a Lva Davidoviče Landaua. London [27] vyslovil tvrzení, že fyzikální původ  $\lambda$  přechodu mezi normálním kapalným héliem He I a héliem supratekutým He II při 2,19 K leží ve vytváření Boseho kondenzátu – stavu, v němž budou při absolutní nule všechny atomy v jednoduchých kvantových stavech. Mechanismus byl analogický kondenzaci ideálního Bose-Einsteinova plynu. Tisza [33] k vysvětlení He II navrhl fenomenologický dvojkapalinový model, ve kterém se hélium skládalo ze dvou složek. Složky supratekuté o hustotě  $\rho_s$ , která proudila bez tření a byla jedinou složkou při absolutní nule, a složky normální o hustotě  $\rho_n$ , která se chovala jako obyčejná kapalina či dokonce plyn. S rostoucí teplotou vzrůstalo zastoupení normální složky, přičemž v bodě  $\lambda$  se  $\rho_s$  stávalo nulové a  $\rho_n$  bylo rovno hustotě héliu  $\rho$ . K podobnému modelu dospěl Landau [26], když vytvářel teorii kvantové hydrodynamiky. Normální složce v ní odpovídá plyn dvou druhů interagujících excitací: *fononů*, které na dlouhých vlnových délkách odpovídají kvantovaným zvukovým vlnám stlačitelné kapaliny, a *rotonů*, krátkovlnných excitací (odpovídající hybnosti  $p \sim p_0 \sim 2 \text{ \AA}^{-1}$ ) s konečnou energií  $\Delta$  ( $\sim 10 \text{ K}$ ). Analýzou raných experimentů týkajících se specifického tepla a druhého zvuku obdržel Landau explicitní tvar rotonového spektra.

Feynman však říká: „Londonovy představy lze kritizovat, neboť silné síly mezi héliovými atomy mohou přiblížení ideálního plynu zpochybnit i kvalitativně [11], že Tiszův přístup je čistě fenomenologický [12], a že není jasná role statistiky v Landauových argumentech [12]. A poně-

vadž rotony zřejmě odpovídají jen několika atomům, můžeme úplného porozumění dosáhnout jen pohledem přes atomy.“

Dále říká, že úplnější zkoumání kapalného hélia ze základních principů by mohlo dát odpověď alespoň na tři důležité otázky:

- a) Proč v kapalině existuje přechod mezi He I a He II?
- b) Proč kromě fononů neexistují v He II žádné nízkenergetické excitované stavy (tj. pod 0,5 K)?
- c) Jaká je povaha excitací, které vytváří ‚normální složku kapaliny‘ při vyšších teplotách, řekněme mezi 1 a 2,2 K?

Těmito slovy Feynman načrtnul svůj výzkumný program o héliu a v letech 1953–57 jej plnil.

### Atomová teorie $\lambda$ přechodu

Aby ukázal, že silné síly mezi héliovými atomy nezmění hlavní rys bosonové kondenzace navržené Londonem, použil Feynman svůj prostorčasový přístup ke kvantové mechanice [17], aby zapsal exaktní partiční funkci jako dráhový integrál [11]. S tímto výrazem poté zkoumal charakter nejvýznačnějších drah a došel k závěru, že pohyb daného atomu bude prakticky neovlivněn pohyby jiných atomů, a to navzdory tomu, že atomy interagují téměř jako tuhé kuličky. Okolní atomy přispějí jen k efektivní hmotnosti. Tím dostal přibližný tvar partiční funkce, jehož analýzou ukázal, že při snižování teploty musí dojít k přechodu, který podstatným způsobem závisí na Boseho statistice héliových atomů, a který blízce připomíná přechod třetího řádu (tepelná kapacita spojitá, ale s nespojitou derivací), který se vyskytuje u ideálního bosonového plynu. Dále poznamenal, že není obtížné získat přibližně dvoukelvinovou teplotu přechodu a že geometrické korelace, které zanedbal, pravděpodobně přechod změní na přechod druhého řádu, pozorovaný experimentálně.

Feynmanův program byl uskutečněn až za třicet dva let – v roce 1985 David Ceperley a Eugene Pollock [3] na superpočítači Cray1 spočetli příslušné dráhové integrály a dosáhli vynikajícího souhlasu s experi-

mentálními daty pro tepelnou kapacitu (a jiné veličiny) na  $\lambda$  a pod  $\lambda$  přechodem.

Ve zpětném pohledu je v tomto prvním Feynmanově článku o heliu vidět příchuť magie, matematický důvtip a rafinovanost a fyzikální náhled, jež byly téměř výlučně Feynmanovy. Při četbě tohoto a dalších článků je člověk překvapen, jak odlišně pracovala Feynmanova mysl od myslí jiných velikých fyziků, kteří řešili – a zcela odlišnými způsoby vyřešili – stejný problém. Feynmanův způsob byl přímý výpočetní. Lars Onsager používal teorii pole a Landau nejvšobecnější argumenty. A přesto všichni došli k podobným závěrům.

### Feynman o nízkých excitovaných stavech

Na zmíněnou práci navázal Feynman článkem o charakteru vlnové funkce základního stavu kapalného He II a nízko položených excitací. Článek je ukázkou vrcholného umění a obsahuje jedinou rovnici (pro změnu volné energie při záměně atomu He<sup>4</sup> atomem He<sup>3</sup>). Sestává z řady navazujících argumentů, které vedly Feynmana a vedou i čtenáře k závěru, že kromě podélných fononů nemohou v He<sup>4</sup> existovat nízké excitace, poněvadž podléhá Boseho statistice.

Článek začíná kvalitativním popisem vlnové funkce základního stavu a tvrdí, že když v nějakém čase zmrazíme pohyb všech atomů, bude amplituda vlnové funkce zanedbatelná, když se nějaké dva atomy překrývají (kvůli silnému odpuzování), a maximální, když se daný atom nachází ve středu „klece“ vytvořené jeho sousedy. Poté ukazuje, že nízké excitované stavy musí zahrnovat velké skupiny atomů a že správný mód excitace vystihují tlakové vlny s disperzním vztahem  $\omega = sq$  (kde  $\omega$  je frekvence,  $s$  rychlost zvuku a  $q$  vlnové číslo). Předvádí, že k této situaci nedojde u ideálního Fermiho plynu a klasického (Boltzmannova) plynu, ve kterých vznikne dominantní nízkoležící mód díky jednočásticovým excitacím. Vývody jsou potvrzeny poukázáním na to, že nízké jednočásticové excitace nemohou v Boseho kapalině existovat, neboť v takovéto soustavě je pohyb daného atomu z jednoho místa na druhé *pouhou záměnou toho, který atom je který a nemůže tedy změnit vlnovou funkci*. Feynman dále zkoumá možnou podstatu „vysokoenergetických“ excitací odpo-

vídajících pohybu jednoho atomu či malé skupiny atomů a tvrdí, že tyto excitace mohou odpovídat Landauovým rotonům. Článek uzavírá výčtem témat, kterým se bude věnovat v článcích následujících: existenci kritické rychlosti supratekutého proudění a pohybu malé kuličky či atomu  $\text{He}^3$  v kapalině.

## Vlnová funkce fononů a rotonů

Ve třetím článku [13] celé série Feynman rozšířil fyzikální úvahy článku druhého a ukázal, že vlnová funkce excitace v He II má tvar

$$\Psi_{\text{exc}} = \Psi_0 \sum_j f(r_j),$$

kde  $\Psi_0$  je vlnová funkce základního stavu,  $f$  nějaká funkce polohy  $r$  a sčítání se provádí přes všechny atomy. Potom z variačního principu určil tvar  $f(r)$  a odpovídající energii excitovaného stavu. Zjistil, že  $f(r) = e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}}$  a tudíž, že pro excitaci hybnosti  $\mathbf{q}$  je vlnová funkce [25]

$$\Psi_{\text{exc}} = \Psi_0 \sum_j e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}_j} \equiv \rho_q^+ \Psi_0$$

s odpovídající energií

$$E_q = q^2/2mS_q.$$

$\rho_q^+$  představuje Fourierův obraz hustoty  $\rho(r)$ . Fourierův obraz  $S_q$  dvojčásticové korelační funkce lze zapsat ve tvaru

$$S_q = \langle \Psi_0 | \rho_q^+ \rho_q | \Psi_0 \rangle / N,$$

kde  $N$  je číselná hustota héliových atomů. Z tohoto tvaru je vidět, že  $S_q$  je faktor kapalné struktury, který určuje pružný rozptyl neutronů či rentgenového záření, a lze jej tedy získat experimentálně. Pro velká  $q$  se

blíží jedničky, zatímco pro malá  $q$  má tvar  $S_q = q/2ms$ , kde  $s$  je rychlost zvuku, protože  $\rho_q$  popisuje fonon. Pro hodnoty  $\rho \sim 2 \text{ \AA}^{-1}$  dosahuje  $S_q$  maxima a odpovídající hodnota excitační energie nabývá lokálního minima. Excitace v blízkosti tohoto minima jsou Landauovy rotony. Jejich energie  $\Delta$  je však příliš velká – nějakých 18 K namísto hodnoty 9,6 K, kterou Landau určil podle měření tepelné kapacity a rychlosti druhého zvuku. Feynmana tento výsledek zklamal a přičítal ho nepřesnosti vlnové funkce  $\Psi_{\text{exc}}$  v daném intervalu hybností.

S využitím své formule pro excitační spektrum pak v článku zkoumal termodynamické vlastnosti He II a (zcela správně) poznamenal, že při přibližování se k bodu  $\lambda$  se počet excitací zvětší natolik, že při výpočtech musíme vzít do úvahy jejich vzájemnou interakci. Poté se věnoval pohybu kapaliny jako celku a zjistil, že pro nevírové proudění nabývá vlnová funkce tvar

$$\Psi = \Psi_0 e^{i \sum_j S(r_j)},$$

kde  $S(r)$  je nějaká funkce polohy a

$$\mathbf{v}_s(r) = \nabla S(\mathbf{r})/m$$

je rychlost proudění kapaliny, které je vskutku nevírové, tj.  $\nabla \times \mathbf{v}_s = 0$ . Ukázal, že vírová rychlostní pole lze získat, když uvažujeme oblasti, které nejsou jednoduše propojeny (například v torus), neboť  $S$  pak nemusí nabývat jediné hodnoty. Dále poznamenal, že za takových okolností mohou existovat stavy, v nichž moment hybnosti nabývá násobků  $N\hbar$ . To byl zřejmý náznak toho, že začal přemýšlet o vírech.

Pro excitace v pohybující se kapalině dostal známý výsledek  $E = E_q + \mathbf{q} \cdot \mathbf{v}_s$  (kde  $\mathbf{v}_s$  je rychlost supratekuté složky), z něhož pak získal vztah mezi excitacemi a hustotou  $\rho_n$  normální složky. Obdržel Landauovy výsledky a se čtenářem se rozdělil o své znepokojení ohledně toho, jak vypadá matematicky korektní rozdělení proudění do dvou částí. Na příkladu plynu interagujících rotonů ilustroval své představy o tom, jak by se takové rozdělení mělo provádět.



Při zkoumání excitací v pohybující se kapalině ukázal Feynman na další obtíž jeho vlnové funkce pro excitovaný stav: když vytvoříme vlnové klubko popisující excitaci, které nese proud  $\hbar\mathbf{q}/m$  a driftuje grupovou rychlostí  $\nabla_q E_q$  (extrémním případem je roton s nulovou grupovou rychlostí), nevede vlnová funkce k zachování počtu částic. Proto navrhl zdokonalení své vlnové funkce tak, aby zpětný proud nosné kapaliny kolem pohybující se excitace zachovával částice. Poznamenal, že tento *zpětný proud* by měl být na velkých vzdálenostech od excitace dipolární a například vazba rotonu na toto zpětné pole by měla vést k nižší energii rotonu a poskytnout mechanismus vzájemné interakce rotonů. Dále odhadnul velikost této interakce, aby demonstroval, že povede ke korekci Landauova výrazu pro hustotu normální složky a tudíž ovlivní výpočet bodu  $\lambda$ . Zmínil se, že  $\Delta$  klesá s tlakem (čímž máme mechanismus interakce fononů s rotony) a že při zvyšování počtu rotonů se kapalina bude stlačovat. Feynmanova tvrzení byla dobře podložena a nemálo prorocká. Nicméně uplynulo pětadvacet let, než byla vytvořena přesnější teorie roton-rotonové interakce [1], [2].

## Feynman-Cohenova vlnová funkce a zpětný proud

Se svým studentem Michaelem Cohenem se pokusili řešit problém formulovaný Feynmanem na konci jeho třetího článku a najít k popisu rotonů lepší vlnovou funkci pomocí začlenění zpětného proudu do zkusmé vlnové funkce [6]. Na zkoušku nejprve uvážili pohyb nečistoty, která má stejnou hmotu  $m$  jako héliové atomy, podléhá stejným silám, ale neřídí se Boseho statistikou. Zkusmá vlnová funkce, kterou pro pohyb této nečistoty vybrali, obsahovala zpětný proud okolní kapaliny ve funkci  $g(r)$ :

$$\Psi_A = \Psi_0 e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}_A} e^{i\sum_{j\neq A} g(r_j - r_A)},$$

kde  $g(r)$  má dipolární tvar  $A\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}/r^3$ , který nabude na velkých vzdálenostech. Z variačního principu určili, že  $A$  je přibližně  $3,8 \text{ \AA}^3$  (což je blízko klasické hodnoty  $3,6 \text{ \AA}^3$  pro ideální zpětný proud) a že efektivní hmotnost nečistoty je  $1,54m$ , což je blízko k hodnotě pro tuhé koule

1,5*m*. Pro vlnovou funkci excitovaného stavu tudíž vzali symetrický tvar předchozí rovnice :

$$\Psi_{FC} = \Psi_0 \sum_j e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}_j} e^{i \sum_{j \neq k} g(r_{jk})} \cong \Psi_0 \sum_j e^{i\mathbf{q}\cdot\mathbf{r}_j} \left( 1 + i \sum_{j \neq k} g(r_{jk}) \right),$$

kde  $g(r) = A\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}/r^3$ . Výpočet energetického spektra byl obtížný a zahrnoval dlouhé numerické výpočty, které závisely na dvojčásticových a tříčásticových korelačních funkcích. Výsledkem byla podstatně lepší hodnota energie rotonu ( $\Delta \simeq 11,5$  K).

Po zakončení jejich původní práce o fonon-rotonovém spektru se Feynman s Cohenem věnovali otázce měření excitačního spektra zkoumáním energetických ztrát monoenergetických neutronů rozptýlených na kapalném heliu. Ukázali [4], že většina rozptylu na daný úhel pochází ze vzniku či zániku jedné excitace z kondenzátu a že tedy lze ve spektru rozptýlených neutronů očekávat pozorování úzkých píků superponovaných na široké pozadí odpovídající energetickým ztrátám, při kterých vznikají alespoň dvě excitace. Diskutovali rovněž vliv konečné teploty, přístrojového rozlišení a šířky čar. Mimo to, že jejich práce značně podnítila úsilí experimentátorů o změření spektra, byla i výjimečně úspěšná v popisu hlavních rysů experimentů s neutronovým rozptylem [29], a to ještě před prvním experimentem.

## Co je roton?

Na základě této zkusmé vlnové funkce pak Feynman s Cohenem nastínili fyzikální obraz rotonu – připomíná klasický vír tak malého poloměru, že jeho centrem může projít jen jediný atom a zpětný proud popisuje pomalý drift atomů navracejících se k dalšímu průchodu vírem. Charles Aldrich a poté i já jsme ukázali, že tento poněkud poetický obraz není zcela správný. Na roton bychom měli nahlížet jako na souhrn kvazičástice  $\text{He}^4$ , která má hmotu  $m^* \sim 2,8m$  a pohybuje se v přitažlivé potenciální jámě s energií  $\sim 2$  K. Pole jejího zpětného proudu má původ ve vazbě kvazičástice na pozadové fluktuace hustoty kapaliny. A právě kombinace změn síly, této na hybnosti závislé potenciální energie (která

pochází z interakcí částic zodpovědných za párovou korelační funkci) se změnou  $p^2$  energie kvazičástice, je zodpovědná za minimum křivky  $E(p)$  [31]. Myslím, že svědčí o Feynmanově otevřenosti a ochotě naslouchat jiným i to, že ačkoliv se mu velice líbil jeho vírový obraz (objevuje se ve všech jeho člancích o excitačním spektru), nijak příliš se nezdráhal jej opustit. Zjistil jsem to během rozhovoru po semináři, který jsem měl na Caltechu v roce 1978. Popsal jsem práci, kterou jsme s Aldrichem udělali a Feynman mi říkal, že se mu naše práce líbí a že správným obrazem rotonu bude asi ten náš.

Když se integrály z Feynman-Cohenovy vlnové funkce spočítají pečlivěji a v jednom integrálu se navíc opraví chyba ve znaménku, vyjdou výsledky pro krátkovlnné spektrum méně přesné, než původně. Chybu objevil až po dvaceti sedmi letech postgraduální student Illinoiské univerzity v Urbaně, Efstratios Manousakis, který pracoval s Vijayem Pandharipandem na vylepšené variační vlnové funkci pro excitace v kapalném heliu. Opravený Feynman-Cohenův výsledek [28] leží dost daleko od experimentálních hodnot, a tak je těžké říct, zda by Feynman ještě ve svém úsilí spektrum vylepšit nepokračoval, kdyby o chybě věděl.

## Feynman o supratekutém proudění

V článku [22] uveřejněném v *Progress in Low Temperature Physics* diskutuje Feynman povahu supratekutého proudění, zejména pak kvantování cirkulace vírového proudění, chování supratekuté kapaliny v rotujícím válci a existenci kritické rychlosti. Ukázal, jak vytvoření kvantových vírů navržené Larsem Onsagerem v roce 1949 (nezávislá práce, článek, který Feynman četl až po zakončení práce své) může vést k tomu, že kapalina rotuje jako tuhé těleso. Kvantování cirkulace má tvar

$$\oint \mathbf{v}_s \cdot d\mathbf{l} = \frac{n\hbar}{m},$$

přičemž se integruje přes libovolnou uzavřenou křivku. Důkladnou analýzou kinetické energie vírů pak Onsager a Feynman ukázali, že při

rotaci je energeticky mnohem výhodnější vytvořit jediný kvantový vír způsobem, který simuluje rotaci tuhého tělesa.

Hned poté Feynman studoval roli vírů ve všeobecnějších pohybech, přičemž věnoval zvláštní pozornost možnosti, kdy byla kritická rychlost supratekutého proudění určena produkcí vírů. Když pro typické experimentální uspořádání odhadl energii potřebnou k vytvoření vírů, získal velice rozumný odhad kritické rychlosti ( $\sim 1$  m/s). Nakonec učinil řadu pionýrských úvah, týkajících se povahy supratekuté turbulence. Článek se stal klasickým. Nápaditým, velmi fyzikálním a korektním způsobem se dotýká celé řady extrémně obtížných problémů a připravuje scénu pro veškeré následující práce o supratekutém proudění.

### **Feynman o supravodivosti**

V letech 1954–57 se Feynman velice intenzívně zabýval supravodivostí, jak jsem poznal z odkazů v některých jeho článcích a z jeho přednášky na *Mezinárodním kongresu o teoretické fyzice* v Seattlu v roce 1956. Skutečnou míru úsilí, kterou tomuto problému věnoval, jsem však zjistil, až když jsem v prosinci 1956 na dva týdny navštívil Caltech. Téměř každý den jsem s Feynmanem chodil na oběd a on mi předkládal své nové představy o supravodivosti. (Jejich neúplný výčet lze nalézt v jeho přednášce ze Seattlu [18].) Z rozhovorů jsem zjistil, že byl dobře obeznámen jak s experimentální, tak s teoretickou literaturou o supravodivosti. Nezávisle na Arkadiji Migdalovi zkoumal pomocí svých diagramů elektron-fononový systém a zjistil, že se chová normálně. Cohen mu řekl, že to nemusí být až tak překvapivé, neboť je možné, že základní stav z poruchové teorie získat nepůjde, což byla docela prorocká poznámka.

Za povšimnutí stojí Feynmanova strategie pro řešení problému supravodivosti, jak ji popsal ve zmíněné přednášce:

„Přístup k problému, který se mi zamlouvá, je trochu neobvyklý. Když nějakou vlastnost vysvětlujeme korektně pomocí základních principů, nezáleží na tom, o kterou jde. Když odvodíme, že ta a ta vlastnost existuje – samozřejmě nějaká vlastnost, která supravodič odlišuje od vodiče obyčejného – pak jsme chytili tygra za ocas, neboť aspoň pro jednu vlastnost známe její mechanismus. Známe-li ho dobře, máme v rukou

klíč k vlastnostem dalším, a tak není důležité, čím začneme. Nejjednodušší je tedy vybrat vlastnost, kterou nejsnadněji zvládneme matematikou, která je obsažena ve Schrödingerově rovnici. Chci zde shrnout některé nápady, které se této myšlenky týkají, ač v žádném případě nejde o řešení. Jde spíš o formulaci problému a nějaké osobní názory.

Snadnější než vysvětlovat elektrické vlastnosti bude vysvětlovat tepelnou kapacitu. Nemusíme však vysvětlovat celou její křivku, stačí, když si vybereme nějaký její rys, jako třeba existenci přechodu nebo to, že tepelná kapacita je v blízkosti absolutní nuly menší než úměrná  $T$ . Vybral jsem si ten druhý rys, neboť u absolutní nuly je to mnohem jednodušší než při konečné teplotě. Problém tedy zní: Proč má supravodič tepelnou kapacitu menší než  $T$ ?

Na rozdíl od řady jiných velikých teoretických fyziků, kteří se dlouho a neúspěšně pokoušeli vytvořit mikroskopickou teorii supravodivosti, Feynman brzy poznal, že John Bardeen, Leon Cooper a Robert Schrieffer problém opravdu vyřešili v jejich epochálním článku z roku 1957. A tak v roce 1958 na konferenci věnované Kammerlinghu Onnesovi říkal, že supravodivost již byla vyřešena a v roce 1961 teorii BCS zařadil do svých přednášek ze statistické fyziky.

O tom, že zájem o supravodivost ho neopustil, svědčí popis *Josephsonova jevu* ve *Feynmanových přednáškách z fyziky*, který ukazuje, že si byl vědom významu té práce, ač se této otázce sám nikdy nevěnoval.

## Feynman o polaronech

V iontových krystalech jsou elektrony (často silně) vázány na frekvenčně téměř nezávislé optické módy a tak když se elektron pohybuje, doprovází ho polarizační vlna, která zmenšuje jeho energii a zvyšuje jeho hmotnost. Vzniklá entita – elektron s jeho doprovodem fononovým oblakem – se nazývá polaron. Polaronový problém je sám o sobě pro teoretiky zajímavý, neboť bezrozměrná konstanta elektron-fononové vazby je obvykle velká, a tak nelze použít metody poruchové teorie. Poprvé byl řešen ve třicátých letech Landauem a S. I. Pekarem a znovu oživen na konci čtyřicátých let Herbertem Fröhlichem. Začátkem let padesátých se o něj začala zajímat řada z nás, neboť panovala představa, že když

porozumíme problému s tak silnou vazbou, budeme schopni postoupit v mikroskopické teorii supravodivosti. A tak když jsem v roce 1952 coby asistent přišel do Urbany, navrhl mi Bardeen, abych se podíval na polarony. Na Illinoiské univerzitě jsme s Tsung-dao Leem a Francisem Lowem vytvořili teorii polaronů s intermediální vazbou a v Liverpoolu se podobnému problému nezávisle věnoval Fröhlich se svými žáky.

Feynmana otázka zaujala, neboť v polaronech uviděl možnost vyzkoušet sílu svého přístupu přes dráhový integrál k výpočtu energie základního stavu elektronu, vázaného na fononové pole. Měl pravdu. S relativně malým úsilím reprodukoval naše výsledky týkající se intermediální vazby a jinou volbou parametrů ve zkusmé akci ve svém dráhovém integrálu dostal přesné hodnoty efektivní hmotnosti a energie základního stavu, které šlo hladce prodloužit do oblasti silné vazby [14].

(Bardeenova intuice ohledně toho, že porozumění polaronům by mohlo pomoci při vytváření mikroskopické teorie supravodivosti, se ukázala správnou. K variační vlnové funkci v BCS dospěl Schrieffer, když ve vlnové funkci základního stavu pro intermediální vazbu, kterou jsme dostali s Leem a Lowem, zohlednil Hamiltonián, který Bardeen, Cooper a Schrieffer použili k popisu supravodivosti.)

Feynman se o polarony zajímal i v šedesátých letech. Se svým asistentem Robertem Hellwarthem a svými studenty Carlem Iddingsem a Philipem Platzmanem rozšířil svůj přístup přes dráhový integrál na výpočet odezvy polaronu na vnější pole (v nepublikovaných výpočtech Feynman nezávisle odvodil Kubův-Laxův popis transportních vlastností pomocí funkcí odezvy) a dostal výraz pro pohyblivost polaronu pro libovolnou vazebnou konstantu. To jim pak umožnilo zkoumat transport za podmínek, kdy Boltzmannova rovnice není adekvátní aproximací [7].

## **Feynmanův odkaz**

Počínaje původními pracemi Migdala a jeho studentů Spartaka Běljaeva a Viktora Galického a Murray Gell-Manna s Keithem Bruecknerem se v polovině padesátých let staly Feynmanovy diagramy jednou z hlavních metod k výpočtu a popisu fyzikálních procesů ve fyzice kondenzovaného stavu. Nicméně samotný Feynman je téměř nikdy nepoužíval.

Tento zdánlivý paradox lze pochopit, když si uvědomíme, že problémy, které ve fyzice kondenzovaného stavu Feynmana zajímaly, byly problémy silně interagujících soustav, pro které se ideálně hodil variační přístup, ať už samotný anebo v kombinaci s dráhovým integrálem. Feynmanovy diagramy poskytují úžasně kompaktní způsob konzistentních výpočtů v poruchové teorii a v některých případech dávají všeobecné důkazy. Pro problémy, které Feynmana zajímaly, nebyly tudíž příliš užitečné a ve svých článcích o fyzice kondenzovaného stavu je používal jen zřídkakdy.

Po dobu několika let trávil Feynman jeden den v týdnu v Hughesových výzkumných laboratořích, kde přednášel na témata, která ho zajímala, a diskutoval s tamějšími kolegy. V roce 1961 přednášel o statistické mechanice. Zápisky z přednášek, které pořídili R. Kikuchi a H. A. Feiveson, se brzy staly samizdatovým klasickým dílem oboru. Několik let poté se nakladatel W. A. Benjamin zajímal o možnost publikace těchto zápisků. Feynman mi tehdy říkal, že ponevadž od té doby uplynulo již několik let, kdy na těch věcech nepracoval, není si jistý, jestli mohou být ještě zajímavé. A že je uveřejní, jen pokud si je přečtu a zaručím mu, že nezastaraly. Tak jsem i učinil a bez obtíží jsem mu žádanou záruku mohl poskytnout, neboť přednášky obsahovaly pozoruhodně jasný a občas velice osobní výklad statistické mechaniky. Při jejich čtení si člověk zase znovu uvědomí, jak vynikající vkus Feynman měl na to, aby vybral témata, která začátečníkovi poskytnou náhled do klíčových metod a koncepcí statistické mechaniky. A jak rád zkoumal témata do hloubky, od jejich začátků po současnou dobu. Generace postgraduálních studentů (kniha byla nyní vydána pojedenaťetě) mohly tento pohled sdílet a nepochybují, že se tyto přednášky [19] připojí k jiným jeho přednáškám a knihám coby součástí knihovny aktivních fyziků následujících generací.

Feynmanův vliv na fyziku kondenzovaného stavu byl hluboký a stále bude, stejně jako vliv na jiné obory, kterým se věnoval. Feynmanovy diagramy a dráhové integrály se staly nezastupitelnými prostředky pro teoretiky i experimentátory a zpětný proud je nyní důležitým slůvkem ve slovníku fyzika, zkoumajícího mnohačasticové problémy. Jeho práce o polaronech se stala činem, který následovat je obtížné, ne-li nemožné

a jeho články o kapalném héliu ukázaly cestu pro budoucí práci v dané oblasti. Práci, která na všech úrovních musí zahrnout fyzikální obraz, jenž před pětatřiceti lety nakreslil.



# Učitel Richard P. Feynman

*David L. Goodstein*

Jedním z hlavních cílů tohoto článku je pojednat o Dicku Feynmanovi jako o učiteli. Nebudu vás držet v nejistotě ohledně mých závěrů. Myslím si, že Dick Feynman byl opravdu velkým učitelem, snad největším jeho a naší doby. Tím nechci říct, že byl úspěšný vždy, jak ostatně sám zdůrazňoval v předmluvě k *Feynmanovým přednáškám z fyziky*. Řekl bych, že tyto přednášky často v jejich vnějším úmyslu neuspěly. Byli jeho cílem při přednášení připravit ročník adolescentů k řešení úloh u zkoušky, pak se mu to zřejmě úplně nepodařilo. Bylo-li jeho cílem při vytváření těch tří svazků nabídnout vhodné učebnice pro úvodní kurs fyziky, nebyl zřejmě úspěšný rovněž. Jetliže však jeho cílem bylo na příkladech ilustrovat, jak přemýšlet o fyzice, pak se mu to podle všech příznaků podařilo skvěle. Snad proto jsou ty knihy ryzími a trvalými klasickými díly vědecké literatury a snad i proto zanechaly jeho přednášky nesmazatelnou stopu v těch šťastných, kteří je slyšeli nebo četli.

Feynman byl v úloze učitele poněkud nekonvenční, jako ostatně téměř ve všem ostatním. Miloval hádanky a hry. Ve skutečnosti se na celý svět díval jako na určitý druh hry, jejíž vývoj či „chování“ se řídí jistými pravidly, z nichž některá známe a některá ne. Jsou dána „známá“ pravidla, nalezni chování; je dáno chování, nalezni pravidla. Najdi místa a okolnosti za nichž pravidla fungují a vymysli nová pravidla. To byl jeho přístup ve všem, co učil.

Snad se mi podaří osvětlit Dickovu osobnost a jeho přístup k učení tím, že uvedu několik příběhů, jimž jsem byl jediným svědkem, a které dosud nevstoupily do „feynmanovské“ literatury, protože nejde o příběhy, které by vyprávěl on sám.

## Zahloubán do problému

První příběh je z toho týdne, kdy jsem se od Heleny Tuckové, jeho sekretářky, dozvěděl, že Dick má rakovinu. Říkala mi, že příští týden půjde do nemocnice na operaci a že není jisté, zda ji přežije. Myslím, že to bylo v červnu 1979.

Ten pátek dopoledne jsem se s ním setkal, když jsme se „strojili“ na promoce (ano, Feynman si oblékl akademický talár a byl přítomen na promociích týden před první operací rakoviny). Někdo mi říkal, že je chyba ve výpočtech, které jsme s Dickem udělali, ale já jsem ji nemohl najít. Zeptal jsem se ho, zda by si o tom chtěl promluvit. Domluvili jsme si schůzku na pondělí.

V pondělí ráno jsme se dali do práce. Tedy spíš on se dal do práce. Já jsem se celou dobu jen díval a sem tam jsem něco poznamenal. Obdivoval jsem tohoto muže, který stál nad propastí a přesto s neutuchající trpělivostí a energií pracoval na tajemném problému z dvojrozměrné teorie pružnosti. Samozřejmě nevěděl, že znám jeho strašné tajemství.

Problém se ukázal být nad naše síly – bylo šest večer a výsledek nikde. Feynman prohlásil situaci za beznadějnou a odešel domů.

Za dvě hodiny mi ale volal domů a oznámil mi vyřešení problému. Byl velice vzrušený a nemohl problém opustit, dokud ho nevyřešil. Tento muž, kterého čekala za čtyři dny velmi těžká operace, byl ve *velice* dobré náladě.

## Věc uznání

Druhý příběh je z doby, kdy jsme na zmíněných výpočtech začali spolupracovat. Diskutoval jsem s Feynmanem o některých experimentech, které provedl jeden z mých studentů. Jednou z rána vstoupil do mé pracovny, přešel k tabuli a řekl: „Podívej, je jasné, že...“, a několik dalších minut načrtával představy, které by mohly naše výsledky vysvětlit. Bylo to jednoduché, intuitivní a krásné. Ihned jsem začal převádět experimentální data do podoby, ve které by se dala srovnat s jeho modelem. Velice dobře to souhlasilo a tak jsem začal psát článek. Zrovna

když jsem ho dokončil, přišel mi preprint dvou Angličanů, J. Michaela Kosterlitz a Davida Thoulesse. Obsahoval tutéž teorii, kterou Feynman načrtl na mé tabuli.

Podle zkušenosti soudím, že se pod povrchem každého vědce skrývá ublížená bytost, která si myslí, že její práce nebyla náležitě oceněna. V tomto směru byl Feynman řídkou, snad jedinou výjimkou. Mnohokrát jsem ho viděl, jak dělal vše, aby se ujistil, že si nepřivlastňuje zásluhy nějakého mladého teoretika, který potřeboval uznání mnohem víc. Když jsem dostal Kosterlitz-Thoulessův článek, šel jsem ho hned Feynmanovi ukázat. Na chvíli mu přeběhl po obličeji neznatelný stín zklamání, ale hned poté se rozzářil a řekl (zřejmě považoval Kosterlitz a Thoulesse za jednu osobu): „No, když dva chlapíci v různých částech světa přemýšlí o různých problémech a dostanou stejný nápad, tak to musí být správně!“

Kosterlitz-Thoulessova teorie se stala jednou z nejdůležitějších teorií statistické mechaniky.

## Účinkující

Dovolte mi vyprávět ještě jednu osobní historku. Krátkou, ale dotýkající se podstaty Dickovy motivace k učení. V roce 1968 jsme se se ženou vrátili na Caltech z post-doktorálního studia v Itálii. Byl jsem nyní docentem, ale byli jsme zadluženi, neměli jsme téměř nic a nastěhovali jsme se do bytu blízko univerzity, ve kterém nebyl prakticky žádný nábytek. V našem vlastnictví se v podstatě nacházely jen dvě věci, které stály za řeč. První byla 2 700 let stará etruská keramika – hrníček na pití. Druhou byl veliký espresso kávovar. Jednoho dne jsme pozvali Feynmana a další kolegy do našeho bytu na šálek espressa.

V okamžiku, kdy vstoupil do bytu, uviděl Feynman etruský hrníček (nebylo to tak těžké, neboť kolem dokola nebylo téměř nic). Okamžitě ho vzal do ruky a začal si s ním pohrávat. Převracel ho, ťukal na něj a vychloubal se, že nám vysvětlí, jak lze poznat, že není pravý. Má žena v naprostém zděšení zbledla jako stěna, když si začal s hrníčkem pohazovat v ruce, přičemž nám vyprávěl o tom, co všechno bylo nalezeno v etruských hrobkách. Nakonec ani hrníček nerozbil, ani nedokázal,

že je padělkem. Co však udělal, bylo to, co dělal vždycky. Strhnul na sebe pozornost každého v místnosti na celou dobu, co tam byl přítomen. Jeho potřeba dělat takové věci pomáhá vysvětlit některé z jaderných historek, které o sobě vypravoval, ale současně leží blízko jádra toho, co ho učinilo velikým učitelem. Pro Feynmana byla přednášková místnost divadlem a přednášející účinkujícím, který je zodpovědný za drama a ohňostroj, stejně jako za fakta a čísla. To platilo bez ohledu na obecnost – ať už to byli vysokoškoláci, postgraduální studenti, kolegové či laická veřejnost.

Pamatuji si řadu dramatických momentů v jeho přednáškách. Například jednou před několika lety přednášel ve velké místnosti kurs pokročilé kvantové mechaniky pro pár zapsaných postgraduálních studentů a většinu fyzikální fakulty Caltechu. Na diagramu začal vysvětlovat, jak reprezentovat jisté komplikované integrály: čas na této ose, prostor na téhle, klikatá čára pro toto, přímka pro támhleto a... najednou se otočil k posluchárně s přihloupným úšklebkem a řekl: „a tohle je Diagram!“ Posluchárna zabouřila spontánním potleskem.

Pozdější vzpomínka pochází z poslední přednášky, kterou jsem od Feynmana slyšel – hostované přednášky v základním kursu pro prváky na Caltechu. Takové skutečnosti bylo třeba držet v tajnosti, aby v posluchárně zůstalo místo pro prváky samotné. Tématem byl zakřivený prostoročas a přednáška byla charakteristicky úžasná. Nezapomenutelným momentem se však stal samotný začátek. V té době byla právě objevena supernova 1987 a Feynman tím byl velmi nadšen. „Tycho de Brahe měl svoji supernovu,“ řekl Feynman, „a Kepler také svoji. Pak dalších 400 let žádná nebyla. Ale nyní mám i já svoji.“ Pak pokračoval, aby přerušil vzniklé ticho. „V Galaxii je  $10^{11}$  hvězd,“ oznámil. „To bývalo velikánské číslo. Ale je to jen 100 miliard. To je méně než národní deficit! Taková čísla jsme nazývali astronomická. Nyní bychom je však měli nazývat spíše ekonomická.“ Třída se dala do smíchu a Dick začal svoji přednášku.

Ve vystoupeních pro veřejnost se Dick nikdy nezdráhal vyjádřit to, co si myslel. Když jel přednášet na nějakou jinou univerzitu – osobně jsem tomu byl svědkem dvakrát – zmínil se o svých názorech na psychologii a všichni z katedry psychologie se na to hromadně zvedli a odešli. Pak

udělal totéž s filozofií. Můžete si představit to zlomyslné potěšení, které Dick čerpal z těchto demonstrací. Věděl však také, jak závažná místa osvětlit jednoduchým příkladem, kterému by každý porozuměl. Pamatuji si, jak jednou vysvětloval, že hypotézu nelze verifikovat daty, z nichž byla vytvořena. To je věc, kterou si i řada vědců neuvědomuje. Zdánlivě změnil téma, když řekl: „Poslechněte, co úžasného se mi dnes večer přihodilo. Přicházel jsem sem na přednášku přes parkoviště. Nebudete věřit, co se mi stalo. Viděl jsem auto s poznávací značkou ARW 262! Dokážete si to představit? Jaká byla šance uvidět z milionu poznávacích značek ve státě právě tuto? Úžasné!“

### Oficiální záznamy

Když jsem tento článek připravoval, měl jsem pocit, že bych měl provést nějaký průzkum a tak jsem se rozhodl, že zjistím, co všechno během svého života Feynman učil. Nemám žádné informace o přednáškách, které vedl coby mladík na Cornellově univerzitě, mám však záznamy o tom, co přednášel na Caltechu.

Během 35 let, od roku 1952 do roku 1987, je uveden jako učitel 34 kursů. Většinu z nich (25) tvořily pokročilé přednášky pro postgraduální studenty; podle caltechovských pravidel byly tyto přednášky striktně omezeny na postgraduální studenty, vysokoškoláci však mohli požádat o povolení navštěvovat je (často tak dělali a téměř vždy jim bylo vyhověno). Devětkrát učil *Pokročilou kvantovou mechaniku*, pětkrát vedl kurs nazvaný *Témata teoretické fyziky*, kde povídal o všem, co se mu líbilo. Také učil *Teorii elementárních částic* a *Fyziku vysokých energií*, které byly v šedesátých letech, v době jejich rozkvětu na Caltechu, oddělenými předměty. Učil i relativitu či úvodní postgraduální kursy zahrnující matematické metody fyziky a kvantové mechaniky.

Ke konci své kariéry, v roce 1981, Feynman, spolu s Johnem Hopfieldem a Carverem Meadem, připravil interdisciplinární kurs nazvaný *Počítačová fyzika*. Dva roky poté Hopfield a Mead stále přednášeli *Počítačovou fyziku*, ale Dick se oddělil se speciálním kursem *Možnosti a omezení počítačů*. Nepodařilo se mi zjistit, zda toto oddělení znamenalo rozšíření naší nabídky v oboru či rozkol ve svatostánku počítání. V každém

případě přednášky čistě pro vysokoškoláky vedl jen dvakrát. Jde o oslavované roky 1961/62 a 1962/63, kdy prváky a poté stejné studenty coby druháky učil věci, ze kterých vznikly *Feynmanovy přednášky z fyziky*.

Měli bychom na základě těchto informací považovat Dicka za poměrně nezkušeného co se týče učení vysokoškoláků? Ne tak docela. Skutečný příběh – příběh přátelských kontaktů s vysokoškoláky – se poněkud liší od formálních písemných záznamů. Po řadu let – alespoň sedmnáct, ale žádný písemný záznam umožňující ověření faktu neexistuje – učil neformální kurs nazvaný *Fyzika X*. Tento seminář, za který nebyl přidělován žádný zápočet, se konal každý týden v pondělí nebo v úterý v pět odpoledne. Podle toho, jak to studentům vyhovovalo nejvíc. Semináře byly naplněny čímkoliv, s čím studenti přišli a co chtěli prodiskutovat. Bylo s nimi spojeno jedno neporušitelné pravidlo: zákaz vstupu pro postgraduální studenty či jiné učitele a fyziky. A tak vám o tom, co se dělo na *Fyzice X*, nemohu nic povědět. Ale snad ještě jednu věc bych zmínit měl. Paní Tucková, která byla po sedmnáct let Feynmanovou sekretářkou, měla za úkol odrazovat všechny návštěvy, nesmlouvat schůzky a všeobecně chránit Feynmanovo soukromí. Těmto pravidlům však vévodila jedna jediná trvalá výjimka: dveře byly vždy a bezpodmínečně otevřeny kterémukoliv studentovi, jenž se chtěl s Feynmanem sejít.

## Přednášení vysokoškolákům

Dick se mi jednou zmínil, že v perspektivě času nebude jeho nejdůležitějším příspěvkem fyzice kvantová elektrodynamika, teorie kapalného hélia, polarony či partony. Řekl, že jeho skutečným monumentem budou *Feynmanovy přednášky*. Myslím, že se všichni shodneme alespoň na tom, že to byl jeho nejdůležitější přínos k vyučování fyziky. Na Caltech jsem se dostal až několik let poté, co byly dokončeny a tak ve snaze zjistit, jak byly vytvářeny, jsem hovořil s řadou zainteresovaných lidí. Nyní uvedu něco z toho, co jsem zjistil.

Byl to zřejmě Matthew Sands, kdo přišel s myšlenkou požádat Dicka o vedení přednášek. Tehdy panoval pocit, že studenti Caltechu, kteří patřili mezi nejlepší v zemi, byli dvěma roky povinné fyziky spíše od-

razování než přitahování a že je třeba něco podniknout. Když Dick vyslovil souhlas, bylo okamžitě rozhodnuto přednášky přepisovat a publikovat. Tento úkol se ukázal být mnohem náročnější než si kdokoli dovedl dopředu představit. Sestavení publikovatelných knih vyžadovalo nesmírné množství práce ze strany Sandse, Roberta Leightona, Gerry Neugebauera, Rochuse Vogta a řady dalších včetně Feynmana.

Během kursu bylo také třeba zorganizovat dvě stě studentů. Vše bylo komplikováno tím, že si Feynman připravoval jen minimální nástin toho, čemu se chce v přednáškách věnovat, a tak nikdo mimo něj nevěděl, co řekne, dokud to skutečně neřekl. Jeden list přípravy s heslovitými pojmy a diagramy byl normou.

Tento způsob byl zvláště náročný pro Neugebauera, tehdy mladého docenta, který měl každé odpoledne po přednášce připravovat studentům domácí úlohy. Problém byl podle jeho slov v tom, že ne vždycky pochopil celou přednášku. Aby se tento problém vyřešil, chodili Feynman, Leighton, Sands a Neugebauer po každé přednášce spolu na oběd do fakultního bistra známého pod důvěrným jménem „Špeluňka“. Na těchto obědech Feynman, Leighton a Sands znovu probírali některé podrobnosti z přednášky, zatímco Neugebauer (jak vypráví) se zoufale snažil získat další střípky porozumění, aby mohl připravit domácí úkoly.

Řada studentů se kursu, který Feynman učil, bála, jak říká Gerry. S některými z nich jsem mluvil a ze vzpomínek, které jim zůstaly v paměti, mi každý z nich řekl, že dva roky fyziky s Feynmanem byly zkušeností na celý život. Gerry to však pamatuje z jiného pohledu. Jak kurs postupoval, začal se varovně zmenšovat počet studentů, kteří jej navštěvovali. Současně však na přednášky bylo přitahováno víc a víc postgraduálních studentů a učitelů, takže posluchárna zůstávala zaplněna a Feynman se možná nikdy nedozvěděl, že ztrácí své původní posluchače.

Proč Feynman přijal úkol věnovat po dva roky všechnu svou impozantní energii vedení úvodního kurzu fyziky tak, jak jej nikdy dříve nikdo nevedl? Podle mého názoru ho k tomu vedly tři hlavní důvody. Prvním byl fakt, že měl rád obecenstvo. A přednáška vysokoškolákům mu dávala obecenstvo větší, než když obvykle učil postgraduální studenty. Druhým důvodem bylo, že se v hloubi duše velice staral o studenty.

A tak si řekl, že učit prváky je důležitá věc a nabídku neodmítl. Třetím, a možná nejdůležitějším důvodem byla veliká výzva k přeformulování fyziky, jak ji rozuměl. Tak, aby mohla být podána mladičkým studentům. To bylo jeho specialitou, standardem, kterým měřil, zda něčemu opravdu rozumíme. Jednou jsem ho požádal, jestli by mi nevysvětlil, tak abych tomu porozuměl, proč se částice s polocelým spinem řídí Fermi-Diracovou statistikou. Výborně odhadl svoje obecenstvo, když řekl: „Připravím o tom přednášku pro prváky.“ Ale za několik dní za mnou přišel a sdělil mi: „Víš, nedokážu to. Nedokážu to zjednodušit na úroveň prváků. To znamená, že ve skutečnosti této otázce ještě nerozumíme.“

Je pravdou, že někdy minul cíl. Přednášky z fyziky, které připravoval, nebyly ve skutečnosti pro prváky, ale pro nás, jeho kolegy. Když jsem loňské léto znovu pročítal ty červené svazky, zdálo se mi, jako bych ho každou chvíli přistihl, jak se ohlíží přes rameno. Ne však na jeho nejmladší posluchače, ale na nás. Ohlíží se a přitom říká: „Koukněte se na to! Podívejte, jak jsem zvládnul tuto delikátní otázku! Není to parádní?“ Avšak i v okamžicích, kdy si myslel, že vysvětluje věci srozumitelně pro prváky či druháky, nebyli to vždycky oni, kdo z toho měl největší užitek. Častěji jsme to byli my, vědci, fyzikové, profesori, kteří jsme sklízeli největší žně těchto úžasných skutků, kterými nebylo nic menšího, než pohled na fyziku svěžima, jinýma očima. Feynman byl více než jenom veliký učitel. Jeho trvalým monumentem zůstává, že byl velikým učitelem učitelů.

Skončím citací přímo od zdroje. Samozřejmě mám své oblíbené pasáže. Snad všichni takové máme. Chci však vybrat tu, kterou v podstatě vybral on sám. Kdysi před pár lety jsme na sebe na fakultě narazili. Byl ve stavu vysokého vzrušení, pro něj ovšem zcela běžném, a nyní byla příčinou tohoto stavu pasáž z *Feynmanových přednášek*, kterou mi mával před očima. „Koukni,“ řekl. „Tvrdil jsem to dlouho předtím, než byla vyslána první mise do vesmíru.“ Zrovna byla doba některého z Vikingů, která byla zvláště na Caltechu vzrušující, neboť JPL prezentovala svoji show. Tehdy jsme se dozvěděli, že ve sluneční soustavě pravděpodobně není život, jak řada lidí původně doufala. Snímky Marsu, přicházející na Zemi z Vikingů, však pro všechny byly neobyčejným zážitkem. A jak



říkal, v roce 1962 předvídal přesně, co se stane. Dovolte mi citovat z jeho *Přednášek*: „Řada lidí bude zklamána, když na jiných planetách nebude nalezen život. Já však ne – chci si znovu připomenout, potěšit se a nechat se překvapit zase znovu, nyní prostřednictvím meziplanetárního výzkumu, nekonečnou rozmanitostí a novostí jevů, které mohou nastat jako důsledek takovýchto jednoduchých principů. Ověření vědy spočívá v její schopnosti předvídat. Kdybyste nikdy nenavštívili Zemi, byli byste schopni předpovědět bouřky, sopky, vlny na moři, polární záře či přebarevný západ slunce? Bude pro nás užitečnou lekcí, když se dovíme o tom všem, co se děje na každé z těch mrtvých planet – těch osmi či deseti kuličkách, všech sestavených ze stejného prachového mračna a všech uznávajících stejné zákony fyziky.“

# Richard Feynman a Connection Machine

W. Daniel Hillis

Jednoho jarního dne roku 1983 jsem obědval s Richardem Feynmanem a zmínil jsem se mu, že mám v úmyslu založit společnost, která by postavila paralelní počítač s milionem procesorů. (V té době jsem byl postgraduálním studentem v Laboratoři umělé inteligence na MIT.) Jeho reakce byla jednoznačná: „To je rozhodně nejpřítroubější myšlenka, co jsem kdy slyšel.“ Bláznivé myšlenky byly pro Richarda příležitostí ukázat jejich falešnost – anebo jejich správnost. Jakkoli, představa ho zaujala a ke konci oběda souhlasil, že stráví léto jako pracovník společnosti.

Richard si s počítači užil legrace jako nikdo jiný, koho jsem znal. O výpočty se začal zajímat, když byl v Los Alamos, kde řídil „počítače“ – lidi, kteří obsluhovali mechanické kalkulátory. Tehdy byl nápomocný v přizpůsobení těchto strojů k fyzikálnímu modelování. Jeho zaujetí pro tuto oblast se ještě zvýšilo koncem 70-tých let, kdy jeho syn Carl začal studovat počítače na MIT.

S Richardem jsem se seznámil právě prostřednictvím jeho syna. Carl byl jedním z vysokoškoláků, kteří mi pomáhali s projektem řešeným v mé dizertaci. Snažil jsem se navrhnout počítač, který by byl dostatečně rychlý pro řešení problémů souvisejících s počítačovým myšlením. Stroj, jak jsme si představovali, měl obsahovat milion maličkých počítačů spojených komunikační sítí. Nazvali jsme ho *Connection Machine*. Richard, který se vždycky zajímal o to, co jeho syn dělá, sledoval projekt zblízka. Byl skeptický pokud šlo o hlavní myšlenku projektu, ale kdykoli jsme se potkali, ať už na konferenci nebo při mých návštěvách Caltechu, zůstávali jsme vzhůru do brzkého rána a diskutovali podrobnosti zamýšleného počítače. Až při našem setkání na obědě toho jarního dne v osmdesátém třetím poprvé vypadal, že věří, že to se stavbou počítače myslíme vážně.

Do Bostonu přijel den po založení společnosti. My jsme zatím dávali dohromady peníze, hledali pronájem vhodného místa, vystavovali

cenné papíry a podobně. Našli jsme starší obytný dům kousek za městem a když se objevil Richard, ještě jsme se vzpomínali ze šoku, že v bance máme prvních několik milionů dolarů. Po řadu měsíců nikdo z nás nepřemýšlel o ničem technickém. Hádali jsme se o jméno společnosti, když přišel Richard, zsalutoval a řekl: „Richard Feynman se dostavil na vaše předvolání. Šéfe, jaké je moje zařazení?“

Naše skupina studentů z MIT byla ohromena. Po spěšné soukromé diskusi („Já nevím, Ty jsi ho pozval. . .“) jsme Richardovi oznámili, že jeho zařazením bude místo poradce pro aplikace paralelního zpracování na vědecké problémy. „To jsou leda prázdný kecý,“ řekl. „Přidělte mi nějakou skutečnou činnost.“

Tak jsme ho poslali, aby nakoupil kancelářské potřeby. Zatímco byl pryč, shodli jsme se, že částí počítače, která se zdá nejvíce problematickou, je *router*, který řídí tok zpráv mezi jednotlivými procesory. Nebyli jsme si úplně jisti, zda náš návrh je zcela spolehlivý. Když se Richard vrátil s tužkami, jako zařazení jsme mu přidělili analyzovat *router*.

## Počítač

Router počítače *Connection Machine* byl tou částí hardwaru, která umožňovala procesorům vzájemnou komunikaci. Byla to dosti komplikovaná část; procesory samotné byly ve srovnání s routerem hračkou. Propojení všech počítačů navzájem bylo naprosto nerealizovatelné; milion procesorů by vyžadoval  $10^{12}$  spojení. Namísto toho jsme navrhli spojit procesory do útvarů podobných dvacetiměrné krychli – každý procesor by tak komunikoval jen s dvaceti jinými. Protože současně musí komunikovat spousta procesorů, řada zpráv bude zápasit o tentýž spojovací vodič. Úkolem routeru bylo nalézt volnou cestu touto dvaceti rozměrnou dopravní zácpou, anebo, nebylo-li to možné, podržet zprávu v bufferu do doby, než se cesta uvolní. A Feynman měl za úkol zjistit, zda jsme navrhli dostatečný počet bufferů k tomu, aby router pracoval efektivně.

V těch prvních měsících zkoumal Richard schémata zapojení stejně, jako kdyby zkoumal přírodní jevy. Ochotně naslouchal, jak a proč věci

pracují právě tak, ale hlavně dával přednost tomu, že si na vše přišel sám. Sedával v lesích za domem a modeloval činnost každého obvodu s tužkou a papírem v ruce.

My ostatní, šťastní, že jsme našli něco, čím se Richard zabavil, jsme mezitím objednávali nábytek a počítače, přijímali první inženýry a zařizovali, aby *Agentura pro projekty obranného výzkumu* financovala vývoj prvního prototypu. Richard se ve věci svého „zařazení“ pozoruhodně činil. Práci přerušoval, jen když bylo třeba zadrátovat počítačovou místnost, zřídit dílnu, potřást rukou investorům, zavést telefony či vesele nám připomenout, jací jsme všichni blázni. Byl potěšen, když jsme konečně vybrali jméno naší společnosti – *Thinking Machines Corporation*: „Jsem rád. Už nemusím lidem říkat, že pracuji s bandou bláznů. Prostě jim řeknu jméno společnosti.“

Technická stránka projektu byla dost náročná. Rozhodli jsme se úkol zjednodušit tím, že začneme s 64 000 procesory, ale i tak bylo množství práce obrovské. Museli jsme navrhnout vlastní integrované obvody, procesory a router. Také bylo třeba vynalézt zapouzdření, chladicí mechanismus, napsat překladače a assemblyery, navrhnout způsoby současného testování všech procesorů a podobně. I taková jednoduchá věc jako spojení desek dohromady vypadá jinak v perspektivě desítek tisíc procesorů. Kdybychom tehdy tušili, jak složitým se projekt stane, nikdy bychom nezačali.

## Zorganizujme je

Nikdy dřív jsem nešéfoval velké skupině a nyní to občas bylo nad moje síly. A tak mi Richard nabídl pomoc. „Musíme ty chlapíky zorganizovat,“ řekl mi. „Řeknu Ti, jak jsme to dělali v Los Alamos.“

Zdá se mi, že všichni velcí muži mají ve svém životě určitou dobu a určité místo, které berou jako referenční bod při pozdějších rozhodnutích. Dobu, kdy věci plynuly tak, jak měly, a kdy byly vykonány velké činy. Takovou dobou byl pro Richarda čas strávený v Los Alamos na projektu Manhattan. Kdykoli se věci zadrhly, Richard si vybavil vzpomínky a zkoušel přijít na to, co tehdy bylo jinak. Tímto způsobem rozhodl, že bychom v každé oblasti – softwaru, zapouzdření, elektronice ap. – měli

mít experta, který by se stal vedoucím skupiny. Přesně jako v Los Alamos.

Druhou částí Feynmanova „Zorganizujme je“ byl pravidelný seminář, na kterém pozvaní přednášející navrhovali zajímavé způsoby využití počítače. Richardovou představou bylo, že bychom se měli zaměřit na lidi pracující na nových věcech, neboť ti budou méně konzervativní, pokud jde o počítač, který by potřebovali. Na první seminář pozval přítele z Caltechu Johna Hopfielda, který přednášel o neuronových sítích. V roce 1983 byl výzkum neuronových sítí stejně populární jako výzkum mimosmyslového vnímání a tak ho někteří lidé považovali za blázna. Richard předpokládal, že se do *Thinking Machines* bude dobře hodit.

Hopfield vynášel způsob konstrukce *asociativní paměti*, zařízení pro zapamatování předloh. Asociativní paměť je nejprve trénována na sérii předloh, např. obrázcích písmen abecedy. Poté když ji ukážeme nové předlohy, je schopná vyvolat podobné předlohy, které už někdy viděla. Nový obrázek písmene A „připomene“ paměti jiné A, které viděla dříve. Hopfield zjistil, že takovou paměť by bylo možno sestavit z prvků funkčně podobných biologickým neuronům.

Nejenže Hopfieldova metoda vypadala životaschopně, ona vypadala i obzvláště vhodná pro *Connection Machine*. Feynman vytvořil návrh, jak použít každý z procesorů pro simulaci každého z Hopfieldových neuronů, ve kterém síla každého propojení byla reprezentována číslem v paměti procesoru. Hopfieldův algoritmus byl ve své podstatě paralelní, a tak mohly být všechny procesory využity současně se 100% účinností. *Connection Machine* by tak byl stokrát či tisíckrát rychlejší než jakýkoli konvenční počítač.

## Algoritmus pro logaritmy

Feynman vytvořil program Hopfieldovy sítě pro *Connection Machine*. Nejpyšnější byl na rutinu pro výpočet logaritmu. Zmiňuji ji zde nejen proto, že je to elegantní algoritmus, ale také proto, že se jedná o Richardův specifický příspěvek k hlavnímu proudu informatiky. Našel ji v Los Alamos.

Mějme za úkol nalézt logaritmus čísla mezi 1 a 2. (Bez přílišných těžkostí lze algoritmus zobecnit.) Feynman si všiml, že jakékoli takové číslo lze jednoznačně reprezentovat součinem čísel tvaru  $1 + 2^{-k}$ , kde  $k$  je celé číslo. Testování přítomnosti těchto faktorů je v binární reprezentaci záležitost posouvání a odečítání. Když tyto faktory stanovíme, dostaneme logaritmus čísla sečtením předem spočtených logaritmů faktorů. Algoritmus byl zvláště vhodný pro *Connection Machine*, neboť malá tabulka logaritmů mohla být sdílena všemi procesory. Celý výpočet byl rychlejší než dělení.

Soustředění pozornosti na algoritmus pro základní aritmetickou operaci byl typický Richardův přístup. Miloval detaily. Když zkoumal router, věnoval pozornost činnosti každé brány, když psal program, musel rozumět implementaci každé instrukce. Neměl důvěru v abstrakce, které nemohly být přímo vztaženy k faktům. Když jsem pár let poté napsal všeobecný článek o *Connection Machine* do časopisu *Scientific American*, byl zklamaný, že je v něm vynechána spousta detailů. Ptal se: „Jak se má někdo dovědět, že to všechno není jenom hromada humbuku?“

Feynmanův důraz na detaily nám pomohl odhalit možnosti využití počítače k numerickým výpočtům a fyzikálnímu modelování. Mysleli jsme si, že *Connection Machine* nebude na „válcování čísel“ tak efektivní, neboť první prototyp neměl speciální hardware pro vektorové operace a aritmetiku reálných čísel. O těchto věcech bylo známé, že jsou pro válcování čísel potřeba. Feynman se rozhodl otestovat tento předpoklad na problému, ve kterém se vyznal – kvantové chromodynamice.

Kvantová chromodynamika je teorie, která je v současné době přijímána na vysvětlení jevů mezi silně interagujícími elementárními částicemi pomocí kvarků a gluonů. V principu z ní lze spočítat hmotnost protonu (v jednotkách hmotnosti pionu). V praxi však takové výpočty mohou znamenat tolik aritmetiky, že by nejrychlejší počítače světa na problému pracovaly roky. Jeden ze způsobů, jak dělat výpočty, je použít diskrétní čtyřrozměrnou mřížku jako model kousku prostoročasu. Nalézt řešení znamená posčítat příspěvky všech možných konfigurací jistých matic na spojích mříže, nebo alespoň na nějakém reprezentativním vzorku. (V podstatě je to Feynmanův dráhový integrál.) Těžkosti vznikají z toho, že výpočet příspěvku by i jediné konfigurace zahrnuje

násobení matic přes všechny smyčky v mříži – a počet smyček roste se čtvrtou mocninou velikosti mříže. Poněvadž všechna tato násobení lze provádět simultánně, je tu příležitost zaměstnat všech 64 000 procesorů.

Aby zjistil, jak věci půjdou v praxi, musel Feynman napsat program pro kvantovou chromodynamiku. Poněvadž byl Basic jediným jazykem, se kterým byl Richard obeznámen opravdu dobře, vytvořil verzi Basicu pro paralelní zpracování a v ní poté napsal žádaný program. Činnost programu posléze ručně simuloval, aby zjistil, jak rychle na *Connection Machine* poběží.

Výsledek ho rozrušil. „Danny, nebudeš tomu věřit, ale váš počítač opravdu může dělat něco užitečného!“ Podle Feynmanových výpočtů měl být *Connection Machine*, i bez speciálního hardwaru pro reálnou aritmetiku, výkonnější než počítač, který byl konstruován v Caltechu speciálně pro výpočty v kvantové chromodynamice. Od té doby nás Richard víc a víc nabádal k hledání numerických aplikací.

Koncem léta 1983 zakončil analýzu chování routeru a k našemu překvapení i pobavení představil své výsledky ve formě soustavy parciálních diferenciálních rovnic. Fyzikovi to může připadat přirozené, ale informatikovi přijde poněkud podivné popisovat množinu booleovských obvodů jako spojitý diferencovatelný systém. Feynmanovy rovnice routeru obsahovaly proměnné reprezentující spojitě veličiny jako třeba „střední počet jedniček v adrese zprávy.“ Mnohem víc jsem byl zvyklý na indukativní analýzu a rozbor jednotlivých případů než na časové derivování „počtu jedniček.“ Naše diskrétní analýza říkala, že potřebujeme sedm bufferů na každý čip; Feynmanovy diferenciální rovnice říkaly, že pět bufferů stačí. Rozhodli jsme se pro jistotu a Feynmana jsme ignorovali.

Rozhodnutí ignorovat Feynmana bylo učiněno v září. Koncem jara příštího roku jsme se však dostali do problémů. Čipy, které jsme navrhli, byly příliš velké, než aby se daly vyrobit a jediným způsobem, jak problém řešit, bylo redukovat počet bufferů zpět na číslo pět. Protože Feynmanovy rovnice říkaly, že to s jistotou můžeme provést, začala se nám jeho nekonvenční metoda analýzy víc a víc zamlouvat. Rozhodli jsme se vyrobit čipy s menším počtem bufferů.

Naštěstí měl Feynman pravdu. Když jsme vše dali dohromady, počítač pracoval. Prvním programem, který na stroji běžel (v dubnu 1985), byla hra Life Johna Hortona Conwaye.

## Buněčné automaty

Hra Life je příkladem třídy výpočtů, které Feynmana zajímaly – buněčné automaty. Jako řada fyziků, kteří během svého života zkoumali postupně nižší a nižší úrovně subatomárních struktur, Feynman často přemýšlel o tom, co tvoří dno. Jednou z možných odpovědí byl buněčný automat. Je představa, že by prostoročas mohl být diskrétní, a že pozorované zákony fyziky by jednoduše byly velkoškálovými důsledky průměrného chování maličkých buněk. Každá buňka by byla jednoduchým automatem, který se řídí malým počtem pravidel a komunikuje jen s nejbližšími sousedy – jako body v mřížových výpočtech kvantové chromodynamiky. Kdyby Vesmír opravdu fungoval tímto způsobem, mělo by to ověřitelné důsledky, jako např. horní mez hustoty informace na metr krychlový.

Představu buněčných automatů zavedli matematici John von Neumann a Stanislaw Ulam, které Feynman poznal v Los Alamos. Richardův zájem byl dále podnícen jeho přáteli Edem Fredkinem a Stephenem Wolframem, neboť oba byli nadšeni buněčnými automaty jako fyzikálními modely. Feynman se nikdy nezdráhal říci jim, že jejich modely považuje za ztřeštěné, ale stejně jako *Connection Machine*, i buněčné automaty považoval za dostatečně bláznivé na to, aby do nich vložil určité úsilí.

S buněčnými automaty coby modely prostoročasu je spojena řada problémů. Například nalézt sadu pravidel, která v pozorovatelných měřítcích dává relativistickou invariantnost. Jeden z prvních problémů je udělat fyziku rotačně invariantní. Nejběžnější způsoby uspořádání buněčných automatů, jako např. pevná třírozměrná mříž, preferují směry podél mřížových os. Je možné na automatech s pevnou mříží implementovat aspoň Newtonovu fyziku?

Feynman navrhl řešení tohoto problému anizotropie, které se (neúspěšně) pokusil rozpracovat do podrobností. Jeho představou bylo spo-



jit automaty náhodným způsobem. Vlny šířící se takovýmto prostředím by se šířily ve všech směrech stejně rychle.

Buněčným automatům se v *Thinking Machines* začalo věnovat více pozornosti v roce 1984, kdy Wolfram navrhl nepoužívat je jako model přírody, ale jako praktickou aproximační metodu pro modelování fyzikálních soustav, např. pro mechaniku kapalin. Wolfram působil v princetonském Ústavu pro pokročilá studia, ale část doby trávil i v *Thinking Machines*.

Pro dvojrozměrné úlohy existovalo elegantní řešení problému anizotropie. Bylo dokázáno, že šestiúhelníková mřížka s jednoduchou sadou pravidel v makroskopickém měřítku vykazuje izotropní chování. Wolfram dělal na *Connection Machine* simulace právě se šestiúhelníkovými buňkami. Výsledkem byla hezká animovaná prezentace turbulentního proudění kapaliny ve dvou rozměrech. Shlédnutí „filmu“ nás všechny, a Feynmana obzvláště, nadchlo pro fyzikální modelování. Začali jsme plánovat hardwarová rozšíření (např. podporu reálné aritmetiky), která by umožnila provádět a zobrazovat řadu simulací v reálném čase.

## Feynman vysvětlující

Měli jsme spoustu problémů s tím, jak vysvětlit lidem, co s buněčnými automaty děláme. Oči jim skelnatěly, když jsme mluvili o diagramech fázových přechodů či soustavách s konečným počtem stupňů volnosti. Nakonec nám Feynman poradil, abychom to vysvětlovali následovně: „V přírodě jsme si všimli, že chování kapaliny závisí jen velice málo na povaze jejích individuálních částic. Například proudění písku je velmi podobné proudění vody či proudění hromady kuličkových ložisek. Tento fakt jsme využili k tomu, abychom zavedli imaginární částice, které umíme snadno simulovat. Touto částicí je ideální kuličkové ložisko, které se může pohybovat jedinou možnou rychlostí v jednom ze šesti směrů. V dostatečně velkých měřítcích je proudění těchto částic velice blízke proudění kapalin v přírodě.“

To bylo Feynmanovo typické vysvětlení. Na jedné straně to rozzuřilo experty, kteří na problému pracovali, neboť vůbec nezmínilo všechny ty důležité problémy, které vyřešili. Na druhé straně to potěšilo poslu-

chače, neboť získali porozumění našim výpočtům a tomu, jak to souvisí s realitou.

Richardův talent pro jasnost jsme využívali, když jsme mu dávali k připomínce technické zprávy pro uvádění našich produktů. Před oficiálním oznámením prvního *Connection Machine*, CM-1, a všech dalších našich produktů, poskytl Richard detailní kritiku plánované prezentace. „Neříkejte ‚odražená akustická vlna‘. Řekněte ozvěna.“ Nebo: „Zapomeňte na všechny ty věci s lokálními minimy. Prostě řekněte, že v krystalu je bublina a že ji potřebujete dostat ven.“ Nic ho nerozlobilo tolik jako složité vysvětlení něčeho jednoduchého.

Ale dostat z Richarda podobné rady vyžadovalo někdy důvtip. Předstíral, že nerad pracuje na problémech mimo jeho oblast zařazení. Když ho někdo z nás požádal o radu, často nevrle odmítnul s tím, že „to není jeho oblast.“ Nikdy jsem nezjistil, co vlastně bylo jeho oblastí, ale to nicméně nevadilo, neboť většinu doby trávil řešením těchto „není moje oblast“ problémů. Někdy se doopravdy vzdal, ale častěji přicházel za několik dní po odmítnutí a poznamenal: „Přemýšlel jsem o tom, co jsi onehdy říkal a myslím, že...“ Nejlépe to fungovalo, když jste nedali najevo, že to očekáváte.

Nemám v úmyslu tvrdit, že by se Richard zdráhal dělat „špinavou práci.“ Naopak ji vždycky dělal rád. Mnoho návštěvníků *Thinking Machines* bylo šokováno, když viděli laureáta Nobelovy ceny, jak letuje obvody či bílí stěny. Tím, co však Richard nenáviděl, anebo alespoň předstíral, že nenávidí, bylo být požádán o radu. Tak proč se ho lidé pořád ptali? Protože i když nerozuměl, rozuměl podle všeho lépe než my všichni ostatní. A to, čemu rozuměl, dokázal jiným vysvětlit tak, že tomu také rozuměli. Vyvolával v lidech pocit, jaké má dítě, když s ním dospělý jedná jako se sobě rovným. Nikdy se nebál říct pravdu a ať byla vaše otázka sebehloupejší, nikdy nedopustil, aby ve vás vznikl pocit, že jste hloupí.

Příjemné stránky Richarda pomáhaly lidem zapomenout na ty méně příjemné. Kupříkladu byl Richard v mnoha ohledech sexistou. Když přišel čas na jeho každodenní talíř polévky, rozhlédl se okolo po nejbližším „děvčeti“ a požádal ho, jestli by mu polévku nepřinesla. Přitom nezáleželo, jestli to byla kuchařka, inženýrka nebo prezidentka společ-

nosti. Jednou jsem se zeptal inženýrky, která se právě stala obětí tohoto jednání, jestli jí to obtěžuje. „Ano, opravdu mi to vadí,“ řekla. „Ale na druhou stranu je on jediný, kdo mi kdy vysvětlil kvantovou mechaniku tak, abych jí rozuměla.“ Takové bylo Richardovo kouzlo.

## Druh hry

Richard pracoval pro společnost s přestávkami následujících pět let. Počítač byl konečně vybaven hardwarem pro reálnou aritmetiku a jak přešel spolu s jeho následníky do komerční produkce, začal být víc a víc využíván pro numerické simulace, které Richard zahájil svým programem pro kvantovou chromodynamiku. Richardův zájem se přesunul z oblasti konstrukce počítače do oblasti jeho využití. Jak se ukázalo, konstruování velkého počítače bylo výbornou záminkou k rozhovorům s lidmi, kteří pracovali na nejvíce vzrušujících vědeckých problémech. Začali jsme spolupracovat s fyziky, astronomy, geology, chemiky. Každý z nich se pokoušel řešit problém, který dříve nebyl vyřešen. Stanovit, jak takovéto výpočty provádět na paralelních počítačích, vyžadovalo porozumění těmto výpočtům v detailu. A to bylo přesně to, co Richard miloval.

Pro něj bylo řešení těchto problémů určitým druhem hry. Vždycky začal tím, že se zeptal na nejzákladnější věci, jako např. „Co slouží jako nejjednodušší příklad?“ nebo „Kdy řeknete, že odpověď je správná?“ Vypytał se do té doby, než problém zredukoval na nějakou podstatnou hádanku, o níž se domníval, že je schopen ji vyřešit. Pak začal pracovat, čmáral na kus papíru a poté hleděl na výsledky. Když byl uprostřed takového řešení hádanky, bylo nemožné ho přerušit. „Neotravujte mě. Mám práci,“ říkal bez toho, že by odtrhnul oči. Na konci se buď rozhodl, že problém je příliš obtížný (v takovém případě o něj ztratil zájem) anebo našel řešení (v tom případě strávil další den či dva jeho vysvětlováním komukoli, kdo byl ochoten poslouchat). Tímto způsobem pomáhal v práci na vyhledávání v databázi, geofyzikálním modelování, analýze obrazů či čtení pojišťovacích formulářů.

Posledním projektem, na kterém jsem s Richardem pracoval, bylo simulování evoluce. Napsal jsem program, který simuloval vývoj popu-

lace pohlavně se reprodukujících bytostí po dobu stovek tisíc generací. Výsledky byly překvapivé v tom, že vývoj populace probíhá náhlými skoky, a ne očekávaným stálým zdokonalováním. Fosilní nálezy vykazují určité náznaky toho, že skutečná biologická evoluce mohla vykazovat takovouto přerušovanou rovnováhu, a tak jsme se s Richardem rozhodli podrobněji prozkoumat, co se děje. Tou dobou byl nemocný, a tak jsem odjel a strávil týden u něj v Pasadeně. Vypracovali jsme model evoluce konečných populací založený na Fokker-Planckově rovnici. Když jsem se vrátil do Bostonu, navštívil jsem knihovnu, kde jsem objevil knihu Motoo Kimury, která o této otázce pojednávala. K mému zklamání byly všechny naše „objevy“ popsány na prvních několika stranách knihy. Když jsem volal Richardovi a říkal mu, co jsem našel, byl radostně rozrušen: „Tak jsme to měli správně!“ řekl. „Na amatéry docela dobré.“

V retrospektivě si uvědomuji, že ve všem, v čem jsme společně pracovali, jsme oba byli amatéry. V počítačové fyzice, neuronových sítích i paralelních výpočtech jsme nikdy nevěděli co děláme. Ale věci, kterým jsme se věnovali, byly tak nové, že nikdo z ostatních, kdo řešili podobné problémy, nevěděl co dělá. To amatéři vytvářeli pokrok.

### **Říci to důležité, co znáš**

Pochybuji, že by tím, co Richarda zajímalo nejvíce, byl „pokrok.“ Vždycky hledal podobnosti, souvislosti, nový způsob pohledu na nějakou věc, ale myslím, že jeho motivací nebylo až tak porozumět světu jako nalézt nové myšlenky k vysvětlování. Objev pro něj nebyl úplný, dokud jej nepředal někomu jinému.

Pamatuji si na náš rozhovor přibližně rok před jeho smrtí. Procházeli jsme se v kopcích nad Pasadenou a zkoumali neznámou cestu. Richard, který se zotavoval z těžké operace rakoviny, chodil pomaleji než obvykle. Vyprávěl dlouhou a humornou historku o tom, jak si četl o své nemoci a jak překvapoval doktory, když předpovídal jejich diagnózy a své šance na přežití. Poprvé jsem se dozvěděl, jak daleko u něj rakovina postoupila, a tak mi ty historky nepřipadaly tak legrační. Všiml si mé nálady, neboť náhle příběh přerušil a zeptal se: „Co se děje?“

„Jsem smutný, protože umíráš,“ vykoktal jsem.

„Jo,“ povzdechnul si, „také mi to někdy vadí. Ale ne tak, jak si myslíš.“ A po pár krocích dodal: „Když zestárneš do mého věku, začneš si uvědomovat, že už jsi stejně většinu důležitého, co znáš, druhým lidem pověděl.“

Několik minut jsme pokračovali v tichosti. Pak jsme došli na nějakou křižovatku, kde se Richard zastavil, aby se rozhlédl po okolí. Najednou se jeho obličej rozzářil: „Hele,“ řekl beze stopy smutku, „vsadím se, že ti ukážu lepší cestu domů.“ A jak řekl, tak i učinil.

# Vzpomínky na Richarda Feynmana

*Anthony J. G. Hey*

Dobře si vzpomínám, jak jsem jednoho slunečného říjnového rána roku 1970 přijel do *Caltechu*. Jako čerstvý absolvent *Oxfordské univerzity*, kde i studenti v té době nosili kravaty a košile, jsem si nebyl jist, co si mám na své první setkání s Murrayem Gell-Mannem vzít na sebe. Vsadil jsem – nesprávně – na oblek a přišel jsem do kanceláře sekretářky teoretického oddělení, Julie Curciové, kde jsem se začal cítit čím dál tím nevhodněji oblečen a kde se mě zmocňoval pocit, že mi na límci visí velká cedule s nápisem „Nový Ph.D. z Oxfordu.“ Ačkoliv jsem Gell-Manna již jednou předtím v Anglii viděl, nebyl jsem si jist, zda to vousaté individuum oblečené v košili s rozhalenkou a sedící v Juliině kanceláři je opravdu oním slovutným profesorem. Mé pochyby se rozptýlily krátce poté, co jsem se představil a ten muž napřáhl ruku a pravil: „Ahoj, já jsem Murray.“ Tato epizoda částečně ilustruje zdravý kulturní šok, který jsem v Kalifornii zažil. Šest let v Oxfordu ve mě zanechalo zvyk nazývat svého profesora „panem profesorem Dalitzem.“ V té době bych se rozhodně neodvážil oslovit Richarda Dalitze „Dicku.“

Jedním z mých prvních úkolů po příjezdu do Pasadeny bylo koupit si auto. Nebylo to tak snadné, jak se zdá. Obchody s ojetými auty byly typicky americkým způsobem rozestry několik mil podél Coloradského bulváru, a dostat se k nim ve dnech, kdy veřejná doprava v Los Angeles byla snad na svém úplném minimu, nebylo vůbec jednoduché. Teprve až mě se ženou zastavil policista, který se nás ptal, proč chodíme po pasadenských ulicích pěšky, pochopil jsem paradox, že v Kalifornii musíte auto mít, abyste si mohli auto koupit. Další problém typu „slepice nebo vejce“ vyvstal v souvislosti s termínem „ID,“ s nímž jsem se do té doby nesetkal. Při rutinních kontrolách chtěla policie vidět naše ID, a samozřejmě jediným přijatelným ID v hloubi tehdejší Pasadeny byl kalifornský řidičský průkaz. Britský řidičský průkaz bez fotografie nositele byl evidentně nedostatečný, a dokonce i na naše pasy pohlížela policie s podezřením.

Úvodní seznámení s Amerikou prostřednictvím obchodníků s ojetými vozidly je něco, co bych skutečně nedoporučil ani svému nejhoršímu nepříteli; proto snad nikoho nepřekvapí, že jsem hledal radu u doktorandů na Caltechu, kteří měli s tímto problémem své vlastní zkušenosti. Nasměrovali mě na jakéhosi Steva Ellise, jehož rada byla ceněna, neboť pocházel z Detroitu a byl považován za světa znalého. Zastihl jsem Steva v seminární místnosti, kde jsem ho spatřil zabraného do debaty s chlápkem, vzdáleně připomínajícím jednoho obchodníka s ojetými automobily, kterého jsem nedávno potkal. Bylo to ovšem mé první setkání s Dickem Feynmanem. Podle mnohem starší fotografie, kterou jsem znal z tří červených knih *Feynman Lectures on Physics*, jsem ho napoprvé nepoznal. Je zvláštní, že i po deseti a více letech mi bylo přirozenější oslovovat ho pane Feynmane spíše než Dicku.

### **Žádné paběrkování o vědě**

Ve srovnání s mým předchozím životem doktoranda v Oxfordu byl život v Caltechu něco jako přejetí do nejrychlejšího pruhu na dálnici. Za prvé, tam byl Oxford středem vesmíru, kdežto zde bylo zřejmé, že Evropa a Spojené království prostě neexistují. Za druhé, rychle jsem objevil, že étosem teoretické skupiny Feynmana a Gell-Manna bylo, že fyzika je o řešení nejvýznamnějších fundamentálních problémů dne: zpřesňovat fázové konvence v nějaké obtížné, ale nakonec dobře probádané oblasti – to bylo o něčem jiném. Vzpomínám si, jak jsem požádal George Zweiga, spoluobjevitele celého kvarkového obrazu hmoty, o názor na jeden svůj článek. Byla to SLAC-PUB 1000, nepříliš slavná publikace o analýze tříčásticových konečných stavů, kterou jsem napsal s jedním přítelem, experimentátorem na stanfordském lineárním urychlovači (SLAC). Zweigova typicky laskavá odpověď zněla: „Konečně opravdu rozumíme rotační invarianci.“ Ve skutečnosti byl článek užitečný i správný, avšak podle měřítek Caltechu šlo jen o paběrkování na okraji vědy. V oněch dnech jsem si přál být aspoň tak dobrým fyzikem, jakým byl Zweig. Má tehdejší ctižádost mi nyní připadá, asi jako kdybych se v raných dobách kvantové mechaniky chtěl vyrovnat Jordanovi spíše než jeho spolupracovníkům, Heisenbergovi a Bornovi.

Jednou z nejhezčích věcí na Caltechu bylo čiré vzrušení z blízkosti Feynmana a Gell-Manna. Jako „postdoc“ z Anglie, kde člověk projde rychlou, ale poměrně úzce zaměřenou inicializací do výzkumné práce, jsem byl se svou ženou vrstevníkem zdejších doktorandů v posledním roce a většinu svého společenského života jsme trávili s nimi. Feynman aktivně pracoval se dvěma z nich, Finnem Ravndalem a také s Markem Kislingerem, který právě dostal doktorát za svoji vlastní verzi kvarkového modelu. Snad právě díky své práci s Ravndalem a Kislingerem se Feynman končícím doktorandům velmi věnoval, a my všichni – postdoci i doktorandi v posledním roce – jsme s ním téměř každý den obědvali v „Mastňáku“ (*Greasy*), jak se obecně říkalo samoobslužné kafeťerii na Caltechu. Není třeba dodávat, že náš stůl byl vždy středem zájmu. Častým námětem diskusí byl Feynmanův výklad některých nových experimentálních výsledků, získaných ve SLAC na rozptylu elektronů na protonech. Feynmanův *partonový model*, intuitivně lákavý obraz protonu skládajícího se z bodových komponent, před sebou smetal všechno ostatní, a to k nemalému Murrayově znechucení.

Nebylo překvapující, že jsem opustil Oxford pln nadšení pro práci na partonovém modelu a těšil jsem se, až uslyším Feynmana hovořit o tom, co sám objevil. Bylo zvláštní, že Feynmanova jediná publikace o partonech byla aplikována na proton-protonový rozptyl. Až když navštívil SLAC, kde mu experimentátoři řekli o svých překvapujících výsledcích s elektrony a protony, si Feynman uvědomil, že by to mohlo poskytnout pro jeho partonový model mnohem jednodušší případ k aplikaci. Tehdy tam Feynman uspořádal seminář, na kterém vysvětloval jejich výsledky pomocí partonů. Po semináři však nezanechal žádné psané poznámky, a tak zůstalo na Jamesi Bjorkenovi, který v době Feynmanovy návštěvy ve SLAC nebyl, a Emmanuelu Paschosovi, čerstvému Ph.D. na stáži ve SLAC, aby analýzu experimentálních výsledků na základě Feynmanova partonového modelu sepsali.

Moje první setkání s Feynmanem na odborné úrovni bylo skličující. Dvěma experimentátorům z Caltechu, Barrymu Barishovi a Franku Sciullimu, právě schválili návrh na experiment s neutrinami a protony. Protože se mi líbilo pracovat s experimentátory, požádali mě, abych pro jejich skupinu uspořádal neformální polední seminář, kde bych vysvět-



lil aplikaci partonového modelu na jejich experiment. Představte si mé překvapení, když jsem se před experimentální skupinou objevil, abych seminář zahájil, a mezi posluchači spatřil Feynmana. Nicméně jsem začal, ba dokonce uhrál na Feynmana bod. V počáteční fázi semináře se mě zeptal, jak jsem odvodil jeden vztah. Má odpověď mi nyní připadá povážlivě drzá: „Použil jsem teorii zachování vektorového proudu; to byste měl vědět, vždyť jste ji sám vymyslel!“ Vlastně šlo všechno hladce – až do doby, kdy už jsem byl skoro u konce semináře. Právě jsem nastínil, co ještě lze předpovědět, když mě Feynman přerušil: „Stop! Nakreslete čáru. Všechno nad tou čarou je partonový model. Pod čarou jsou jen nějaké Bjorkenovy a Paschosovy odhady.“ Jak jsem si rychle uvědomil, příčinou Feynmanovy přecitlivělosti na tento bod bylo, že Murray obcházel čtvrté patro *Lauritsenu*, budovy fyziky a astronomie na Caltechu, a vrčel, že „partony jsou hloupost“ a že „kdo chce vědět, co partonový model předpovídá, měl by konzultovat Feynmanovy útroby!“ Ve skutečnosti byly všechny výsledky nad Feynmanovou čarou v mém semináři shodné s těmi, které uměl Murray odvodit pomocí mnohem komplikovanějších algebraických metod. Feynman se chtěl prostě distancovat od některých divočejších předpovědí, které z partonového modelu vyvozovali jiní, a zdůraznit, že jeho jednoduchý intuitivní partonový přístup dává stejné předpovědi jako mnohem vyumělkovanější Gell-Mannovy techniky. Bohužel se můj seminář náhodou stal pro Feynmana vhodným nástrojem, jak své stanovisko připomenout!

## Nepříjemné Feynmanovy zápisníky

Být ve stejné skupině s Feynmanem a Gell-Mannem mělo ovšem i své nevýhody. Přišel jsem na Caltech s pevným úmyslem pokračovat v bádání na Feynmanově partonovém modelu. Neuvědomil jsem si však, že Caltech je jediné místo, kde není možné výzkumy na partonech publikovat! Proč tomu tak bylo? Gell-Mannova nechuť k celému tomuto přístupu byla zřejmá; ta by však tolik nevadila, nebýt trapné existence Feynmanových zápisníků.

Přicházel jsem za Feynmanem s nějakým nápadem a hrdě jsem mu na jeho tabuli předváděl svoji analýzu. Feynman pokaždé naslouchal,

komentoval a opravoval, a pak pokračoval v odvození mých „nových“ výsledků několika rozdílnými způsoby, přičemž se opřel o termodynamiku, rotační invarianci, či cokoli vás napadne, a použil všech možných alternativních přístupů. Vysvětloval mi, že když lze odvodit týž výsledek více různými způsoby, lze mít v jeho správnost větší důvěru. Ačkoli bylo jeho vysvětlení velice poučné a stimulující, bylo také jaksi skličující a frustrující. Koneckonců, bylo sotva možné publikovat výsledek, který byl již Feynmanovi znám, a který si zapsal do svých pověstných pracovních zápisníků, ale který mu nikdy nestál za publikaci.

A tak jsem si, spíše ze zoufalství než čehokoliv jiného, vybral Gell-Mannův algebraický přístup jako formálnější rámec pro svoji práci. S docentem Jeffem Mandulou jsme se zajímali o rozptyl elektronů na protonech, při nichž jak elektrony, tak i protony byly polarizovány a jejich spiny orientovány ve stejném směru. Objevili jsme novou předpověď, jejíž partonový ekvivalent byl obskurní. Zhruba řečeno, při vysokých energiích se směr spinu partonu srážkou s elektronem nemění. Náš výsledek se týkal pravděpodobnosti, že spin partonu změní při srážce směr, což se vztahovalo k takzvaným spin-flip amplitudám, které jsou v partonovém modelu normálně zanedbávány. Vyzbrojen tímto novým výsledkem, šel jsem za Feynmanem a vyzval jsem ho, aby jej odvodil svým partonovým přístupem. Jak se s touto výzvou Feynman vyrovnal, najdete v přednáškách, které měl na Caltechu v následujícím semestru. Později byly publikovány i v knižní podobě [9].

## Co Dick a Murray vyvádějí

Život na Caltechu s Feynmanem a Gell-Mannem nebyl nikdy nudný. Historek o jejich kouscích kolovalo mnoho, řadu těch Feynmanových zachoval pro budoucnost jeho přítel Ralph Leighton [23]. Těch historek však bylo mnohem víc. Jeden přítel mi vyprávěl, jak se právě chystal vstoupit do posluchárny a setkal se u dveří s Gell-Mannem, který tam měl mít přednášku. Když můj přítel chtěl otevřít dveře, zabránil mu v tom Murray, který řekl: „Počkej!“ Venku právě zuřila bouře a teprve když se zvlášť parádně zablesklo, zavelel Murray, „Ted!“ – a vstoupil do posluchárny provázen ohlušujícím zahřměním.

Jedna z dalších historek byla o tom, jak Feynman přednášel o V-A modelu slabých interakcí, který objevil spolu s Gell-Mannem. Po přednášce k němu přistoupil jeden z posluchačů a řekl, „Promiňte, pane profesore, není snad zvykem při přednášce o společné práci zmínit také jméno vašeho spolupracovníka?“ Feynman údajně opáčil: „Ano – je však zvykem, že váš spolupracovník v tom něco udělal!“ Podobné historky se postupným vyprávěním zřejmě nafukovaly, na tuto jsem se však Feynmana zeptal, poněvadž mi připadala pro Feynmana, jak jsem ho znal, tak necharakteristická. Usmál se a řekl: „Jistě nevěříte, že bych něco takového mohl udělat!“ Poznal jsem Feynmana až poté, co dostal Nobelovu cenu a našel štěstí v manželství s Gweneth. Před touto dobou se z jeho biografii vynořuje poněkud drsnější a agresivnější obrázek – takže si nakonec stejně nejsem jist!

Feynmana zcela jistě bavilo dávat rychlé a zábavné odpovědi. Tento rys jeho povahy se velmi často projevoval na seminářích hostujících řečníků. Při jedné pamětihodné příležitosti začal řečník tím, že napsal na tabuli název své přednášky: „Pomeron Bootstrap.“ Feynman hned vykřikl: „Dvě absurdity“ – a sál se začal otřásat smíchem. Chudák přednášející, odvozoval potom teoretické výsledky, o nichž se předpokládalo, že platí v jednom oboru energií, ale on se je chystal aplikovat v jiném. A to byl právě případ akademické nepoctivosti, který Feynman z duše nenáviděl; při této zvláštní příležitosti to neměl řečník snadné, protože musel čelit náporu nelichotivých připomínek z celého auditoria. Nicméně Feynman se dovedl i ovládat. Během jiného semináře se ke mně naklonil a zašeptal: „Kdyby tenhle člověk nebyl pravidelným návštěvníkem, tak bych ho zničil!“

V té době měl Feynman na Caltechu svoji slavnou přednášku o rozluštění mayského hieroglyfického písma. Vypráví o tom v knize *To snad nemyslíte vážně!* Historika dokonale ilustruje Feynmanův přístup, jak se vypořádat s novým předmětem. Spíše než by se podíval na překlad Kodexu, předstíral Feynman, že je prvním, komu to padlo do ruky. Při zápolení s mayskými tyčinkami a kolečky v tabulkách Feynman pochopil, že Drážďanský kodex předpovídá jak různé fáze Venuše, tak i zatmění Měsíce. Se svou typickou přízemní analogií, přirovnával Feynman mayskou zálibu v „magických“ číslech k našemu dětskému potěšení

sledovat, jak ukazatel ujeté vzdálenosti v automobilu překračuje hranici 10 000, 20 000, 30 000 mil, atd.

Jak říká Feynman: „O pár týdnů později se mě Murray Gell-Mann pokusil trumfnout překrásnou sérií šesti přednášek o lingvistických vztazích mezi všemi jazyky světa.“ Na tyto přednášky přicházel Murray s náručí plnou knih a vyprávěl posluchačům o klasifikaci jazyků na „nadrodiny“ a o jejich společném původu. Vždycky se mu líbilo upozorňovat na podobnosti mezi angličtinou a němčinou a kupříkladu s potěšením nazýval Georga Zweiga „George Twig.“ I když se to zdálo poněkud zvláštní, že profesionální fyzici vysokých energií navštěvují přednášky z komparativní lingvistiky, život na Caltechu byl vždy zajímavý!

I další vzpomínky na Feynmana mám stále čerstvě v paměti. Jednou jsem si šel při obědě v Mastňáku pro kávu, a když jsem se vrátil ke stolu, zjistil jsem, že Feynman mezitím pozval moji ženu na víkend do svého domu v Mexiku – s jeho rodinou, spěchám dodat! Když mě spatřil, pozval mě také. A tak jsme se nakonec s Feynmanem procházeli v Mexiku po pláži a hovořili o fyzice dlouho do noci. Při té příležitosti mi Feynman radil: „Čtete více románů.“ On sám totiž začínal s velmi úzkým a jednostranným zaměřením; teprve mnohem později se v jeho životě zájmy tak rozšířily. Rada to byla snad dobrá, ale během oněch let, co jsem Feynmana znal, jsem se také naučil, jak je pro kohokoliv zcela nemožné ho napodobit – v jeho opovržení „nedůležitými“ věcmi v životě, jako například různými výbory a administrací, a v jeho jedinečné schopnosti zaútočit na fyzikální problémy z mnoha různých stran.

Při své další návštěvě Caltechu o mnoho let později, když jsem s ním seděl na zahradě jeho domu v Altadeně, jsem sledoval, jak si Feynman odepíná pásek a demonstrovuje své nové pojetí pravidla spinové statistiky. Sepsal to později v pamětní přednášce věnované svému fyzikálnímu hrdinovi Paulu Diracovi, objeviteli antihmoty. To bylo asi dvacet let po vydání *Feynmanových přednášek o fyzice*, v nichž se omlouval, že neumí toto pravidlo elementárně vysvětlit. Jak tehdy řekl: „Pravděpodobně to znamená, že fundamentálnímu principu, na kterém pravidlo spočívá, ještě úplně nerozumíme.“

## Přednášky jediné svého druhu

Čím byly *Feynmanovy přednášky* tak jedinečné? N. David Mermin, sám známý svými promyšlenými a pronikavými analýzami zdánlivě dobře chápaných fyzikálních problémů, byl ve svém přehledovém článku v *Science* (20. července 1973) pohnut k výroku: „Oželel bych cokoli, jen abych ho mohl slyšet přednášet na téma městských odpadních vod.“ 14. března 1967 napsal redaktor vědecké rubriky *Los Angeles Times*, Irvin Bengelsdorf: „Přednáška Dr. Feynmana je vskutku vzácným požitkem. Humorem, dramatickým napětím a zajímavostí často vážně konkuruje broadwayským divadelním představením. A především, přímo překypuje jasností. Je-li fyzika základní ‚melodií‘ vědy, pak je Dr. Feynman jejím nejsrozumitelnějším trubadúrem.“ V témže článku shrnul Bengelsdorf Feynmanův přístup: „Bez ohledu na obtížnost tématu – od gravitace přes kvantovou mechaniku k relativitě – jsou slova ostře řezaná a jasná. Žádné vycpané fráze, žádné vodění za nos, žádné mlžení.“ Později téhož roku (8. října) napsal *New York Times Magazine*, že Feynman „užívá gest a intonace stejným způsobem, jakým Billy Rose používal žen na scéně: okázale, avšak s půvabem.“

Pro mne to byla Feynmanova volba slov, která dělala z jeho přednášky takový jedinečný zážitek. Týž článek v *New York Times Magazine* pokračoval, že „jeho přednášky jsou vyjádřeny hutnými, často hrubě tesanými větami.“ Je možné uvést nespočetné příklady, a to i z jeho publikovaných přednášek. Uprostřed stran komplikované matematiky Feynman kupříkladu úmyslně odlehčoval text frázemi, jako je „můžete si ‚uklohnit‘ dva nové stavy...“, nebo oživil výklad imaginární konverzací fyziků, jako „Nyní,“ pravil Gell-Mann a Pais, „nastává zajímavá situace.“ Ve své přednášce z roku 1971, kdy mu byla předávána Oerstedova cena za jeho zásluhy ve vyučování fyziky, Feynman začal zcela odzbrojujícím způsobem – „o vyučování nevím nic,“ a pak pokračoval strhujícím vyprávěním o výzkumném problému, na kterém právě pracoval: „Z čeho se skládá proton? To nikdo neví, ale právě se to snažíme zjistit.“ V přednášce přirovnal srážku dvou protonů ke srážce dvou náramkových hodinek. Můžeme sledovat ozubená kolečka a všechny ostatní součástky a kou-

síčky, které vzniknou a snažit se pochopit, co se vlastně stalo. A tak se mu podařilo vysvětlit, že vržení jednoduché bodové částice, např. elektronu proti protonu, je mnohem jednodušší případ, protože k pozorování máme pouze jedny náramkové hodinky. Na letní škole v Erice na Sicílii v roce 1964 mu někdo položil otázku na téma zákonů zachování. Feynman odpověděl: „Kdyby se v Pasadeně ztratila kočka a současně se objevila v Erice, byl by to příklad zákona globálního zachování koček. Ale takhle se kočky nezachovávají. Kočky, nebo náboje, či baryony se zachovávají způsobem mnohem spjitějším.“

## Povinná četba

Povinnou četbou všech aspirantů na vědeckou dráhu by měla být Feynmanova nobelovská přednáška. V ní totiž obešel obvyklý zvyk odstraňování lešení, které bylo použito při budování nové teorie. Místo toho popsal všechny slepé uličky a mylné názory, s kterými se na cestě ke svým velkým objevům setkal. Článek odhaluje i něco víc z Feynmanovy přednáškové metody, jako třeba tam, kde říká: „Zahrnu i anekdotické detaily, které nemají ani žádnou vědeckou cenu, ani žádný význam pro pochopení vývoje idejí. Zahrnuji je proto, aby byla moje přednáška zábavnější.“ V přednášce se dovídáme, jak se Feynman nejprve pustil do pokusu odpovědět na Diracovu výzvu týkající se obtížných divergencí, kterými byla zamořena relativistická kvantová mechanika. V poslední větě své slavné knihy *The Principles of Quantum Mechanics* Dirac říká: „Zdá se, že je zde zapotřebí nějakých podstatně nových fyzikálních idejí.“ O svém vlastním, mladém a zásadně novém nápadu, jak problém vyřešit, Feynman říká: „Ta myšlenka mi připadala tak zřejmá a tak elegantní, že jsem se do ní hluboce zamiloval. A to je jako zamilovat se do ženy: možné je to jen tehdy, když o ní moc nevíte, takže nemůžete vidět její chyby. Chyby se projeví později, ale pak už je láska tak silná, že vás k ní připoutá. A tak jsem byl přes všechny obtíže připoután k té teorii svým mladistvým zápalem.“

Později v přednášce Feynman říká: „Náhle jsem si uvědomil, jaký jsem hlupák; neboť to, co jsem popsal a spočetl bylo obyčejné odražené světlo, nikoli radiační reakce.“ Tato osvěžující poctivost z úst jed-

noho z největších fyziků 20. století mi připomíná jiného z mých hrdinů, Johannese Keplera, který první formuloval fyzikální zákony jako precizní, ověřitelná tvrzení, vyjádřená matematicky. Narozdíl od Koperníka a Newtona, popsal Kepler všechny zákruty a obraty svých myšlenkových pochodů, jež ho nakonec nevyhnutelně přivedly k šokujícímu závěru, že oběžná dráha Marsu není kruhová, ale eliptická. Kepler shrnul svůj boj slovy: „Ach, byl jsem to ale pošetilý starý pták!“

Jedna z nejlepších historek, kterou Feynman ve své přednášce vyprávěl, se týkala fyzika Murraye Slotnicka a jeho setkání s *Caseovým teorémem*. Historka popisovala okamžik, kdy si Feynman uvědomil, že jeho *diagramy* jsou opravdu něčím novým. V úplné formě zní příběh takto: Na sjezdu *Americké fyzikální společnosti* v New Yorku v lednu 1949 měl Slotnick příspěvek, v němž porovnával dva různé tvary elektron-neutronové vazby. Po dlouhých a komplikovaných výpočtech Slotnick konstatoval, že tyto dva tvary vedou také k různým výsledkům. V tom okamžiku vstal Robert Oppenheimer a poznamenal, že Slotnickovy výpočty musí být chybné, neboť jsou v rozporu s Caseovým teorémem. Ubohý Slotnick musel přiznat, že o takovém teorému ještě nikdy neslyšel a tak mu Oppenheimer laskavě sdělil, že (Slotnick) ještě může svoji ignoranci napravit, poslechne-li si přednášku Kennetha Case, který má o svých výsledcích referovat následující den. Ten večer ve svém hotelu nemohl Feynman usnout, a tak se rozhodl použít svou novou metodu a zopakovat Slotnickovy výpočty. Feynman pak pokračuje:

„Příští den při zasedání jsem uviděl Slotnicka a řekl mu: ‚Pane Slotnicku, včera večer jsem to spočítal; chtěl jsem vědět, zda dostanu stejné výsledky jako vy. Pro každou vazbu jsem dostal jiný výsledek ale rád bych si to s vámi podrobně zkontroloval, protože si chci být svou metodou jist.‘ A on řekl: ‚Co myslíte tím, že jste to vyřešil včera večer? Mně to trvalo šest měsíců!‘ A když jsme výsledky porovnávali, podíval se na mé a pak se zeptal: ‚Co znamená tady tohle  $Q$ , ta proměnná  $Q$ ?‘ Já jsem mu řekl: ‚To je hybnost přenesená elektronem, který se může odchýlit do různých úhlů.‘ ‚Ach ne,‘ řekl on, ‚já mám jen limitní hodnotu pro  $Q$  blížící se k nule, pro přímý rozptyl.‘ Inu, bylo snadné dosadit v mých vzorcích  $Q = 0$  a dostal jsem stejné výsledky jako on. Jemu však trvalo půl roku, než vyřešil případ nulového přenosu hybnosti, kdežto já jsem

za jediný večer vyřešil přenos libovolné konečné hybnosti. To pro mne byl vzrušující okamžik, něco jako získání Nobelovy ceny, protože mě to konečně přesvědčilo, že opravdu mám nějakou novou metodu a že touto metodou umím udělat něco, co jiní neumí. To byl okamžik mého triumfu, kdy jsem si uvědomil, že se mi povedlo udělat něco cenného.“

Ve své přednášce už Feynman neuvedl, jak se na konci Caseova referátu zvedl a řekl: „Váš teorém musí být chybný. Zkontroloval jsem včera večer Slotnickovy výpočty a souhlasím s jeho výsledky.“ V době, kdy výpočty podobné Slotnickovým mohly trvat až šest měsíců, bylo setkání Feynmana se Slotnickem a Casem událostí, která uvedla Feynmanovy diagramy do análů fyziky.

Další povinnou četbou pro studenty všech přírodovědních oborů je Feynmanův článek o *kargokultických vědách* (Cargo Cult Science), který je v knize *To snad nemyslíte vážně!* poněkud upraven. Původně šlo o Feynmanův projev k čerstvým absolventům Caltechu při slavnostní promoci v roce 1974; v ní Feynman diskutoval o vědě, pseudovědě a o umění neklamat sebe sama. Jednotící ideou přednášky byla Feynmanova vášnivá víra v nutnost „naprosté vědecké bezúhonnosti“ neklamat grantové agentury o pravděpodobných aplikacích vašeho výzkumu, publikovat experimentální výsledky – i když nepodporují vaši oblíbenou teorii. Jako konzultant dávat vládě rady – i ty, které by spíš neměla slyšet, navrhnout jednoznačné experimenty, atd. Jak řekl: „Naučit se, jak neklamat sebe sama, je bohužel něco, co jsme explicitně nevložili do žádného mně známého kurzu. Pouze doufáme, že vás k tomu přitáhla osmóza.“ Projev zakončil jediným přáním novým absolventům: „Přeji vám štěstí pracovat někde, kde budete mít dost svobody, abyste si zachovali onu bezúhonnost, o níž jsem mluvil, a kde vás potřeba udržet si svoje postavení v organizaci nebo finanční podporu nebude vystavovat tlaku, abyste tuto bezúhonnost ztratili.“ I když riskuji, že to bude znít pompézně, myslím si, že svět dluží Caltechu slova díky za to, že zajistil takové prostředí pro Richarda Feynmana.



## Dva příběhy na závěr

Zdá se mi na místě ukončit tyto vzpomínky dvěma dalšími Feynmanovými historkami. První z nich se pojí s dny, kdy v Los Alamos otevíral trezory. Na konferenci o elementárních částicích v kalifornském Irvine (1972) se Feynman na závěr konference uvolil účastnit se panelové diskuze. Zeptali se ho, zda si myslí, že to fyzikům k něčemu je, hledat odpověď na „velké otázky.“ Feynman odpověděl: „Ptáte se, zda to k něčemu je. Připomíná mi to situaci, kdy mi byla položena stejná otázka. Snažil jsem se vykrást sejf. Někdo se mně zeptal: ‚Jak vám to jde? Je to k něčemu?‘ Dokud sejf neotevřete, nemůžete říci nic. Vyzkoušeli jste však již mnoho číselných kombinací, o nichž víte, že nefungují!“

Druhá historka je vůbec Feynmanovou poslední. Gweneth seděla u jeho lůžka v nemocnici a Feynman byl v bezvědomí. Všimla si, že se jeho ruka pohybuje, jako by chtěla stisknout ruku její. Zeptala se doktora, zda je to možné, a dostalo se jí odpovědi, že pohyb ruky je jen automatický a nic neznamena. Feynman, který byl v kómatu už asi jeden a půl dne, v ten okamžik zvedl ruce, setřásl si rukávy a ruce si založil za hlavu. Byl to Feynmanův způsob, jak sdělit doktorovi, že i ve stavu hlubokého bezvědomí může slyšet a mluvit – a že byste nikdy neměli věřit tomu, co vám napovídají takzvaní odborníci!

Poslední slovo si zasluhuje James Gleick, autor knihy *Genius: The Life and Science of Richard Feynman* (Pantheon, 1992). Gleick skvěle shrnul Feynmanovu filozofii vědy těmito slovy:

*„Věřil v nadřazenost pochybnosti, nikoli jako skvrny na naší schopnosti poznávat, nýbrž jako samé podstaty poznávání.“*



# Literatura

- [1] K. S. Bedell, I. Fomin, D. Pines. *J. Low. Temp. Phys.* **48**, 417 (1982).
- [2] K. S. Bedell, A. Zawadowski, D. Pines. *Phys. Rev. B* **29**, 102 (1984).
- [3] D. M. Ceperley, E. L. Pollock. *Phys. Rev. Lett.* **56**, 351 (1986).
- [4] M. Cohen, R. P. Feynman. *Phys. Rev.* **107**, 13 (1957).
- [5] R. P. Feynman. *A Principle of Least Action in Quantum Mechanics*, doktorská dizertace. Princeton University 1942.
- [6] R. P. Feynman, M. Cohen. *Phys. Rev.* **102**, 1189 (1956).
- [7] R. P. Feynman, R. W. Hellwarth, C. K. Iddings, P. M. Platzman. *Phys. Rev.* **127**, 1004 (1962).
- [8] R. P. Feynman, A. R. Hibbs. *Quantum Mechanics and Path Integrals*. McGraw-Hill, New York 1975.
- [9] R. P. Feynman. *Photon-Hadron Interactions*. Benjamin, Reading, Massachusetts (1972).
- [10] R. P. Feynman. *Phys. Rev.* **76**, 749, 769 (1949).
- [11] R. P. Feynman. *Phys. Rev.* **91**, 1291 (1953).
- [12] R. P. Feynman. *Phys. Rev.* **91**, 1301 (1953).
- [13] R. P. Feynman. *Phys. Rev.* **94**, 262 (1954).
- [14] R. P. Feynman. *Phys. Rev.* **97**, 660 (1955).
- [15] R. P. Feynman. *Phys. Rev. Lett.* **23**, 1415 (1969).
- [16] R. P. Feynman. *QED*. Princeton University Press, Princeton 1985.
- [17] R. P. Feynman. *Rev. Mod. Phys.* **20**, 367 (1948).
- [18] R. P. Feynman. *Rev. Mod. Phys.* **29**, 205 (1957).
- [19] R. P. Feynman. *Statistical Mechanics*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts (1972).
- [20] R. P. Feynman. *The Development of the Space-Time View of Quantum Electrodynamics*. Nobelovská přednáška 11. prosince 1965. Uveřejněno v *Les Prix Nobel en 1965*. Nobel Foundation. Stockholm 1966. Upravená verze otištěna ve *Physics Today* ze srpna 1966, str. 31.
- [21] R. P. Feynman. v *Proc. III Int. Conf. on High-Energy Collisions* organizované C. N. Yangem et al., Gordon and Breach, New York (1969).
- [22] R. P. Feynman v *Progress in Low Temperature Physics*, díl 2, editor C. J. Gorter. North-Holland, New York (1955), str. 17.

- [23] R. P. Feynman, zaznamenal R. Leighton. *Surely You're Joking, Mr. Feynman!* Norton, New York 1985. Český *To snad nemyslíte vážně!* Mladá Fronta Praha 1989.
- [24] R. P. Feynman, zaznamenal R. Leighton. *What Do You Care What Other People Think?* Norton, New York 1988. Český *Snad ti nedělají starosti cizí názory?* Aurora, Praha 2000.
- [25] Jak Feynman poznamenal, podobné vlnové funkce byly předloženy již dříve, např. viz A. Bijl. *Physica* **7**, 896 (1940).
- [26] L. D. Landau. *Ž. Phys. USSR* **5**, 71 (1941); *Phys. Rev.* **60**, 354 (1941); *Ž. Phys. USSR* **8**, 1 (1944); *Ž. Phys. USSR* **11**, 91 (1947).
- [27] F. London. *Phys. Rev.* **54**, 947 (1938). Další rozpracování Londonových původních myšlenek viz F. London. *Superfluids*, díl 2. Dover, New York (1954).
- [28] E. Manousakis, V. R. Pandharipande. *Phys. Rev. B* **30**, 5062 (1984).
- [29] Pionýrské experimenty prováděl H. Palevsky se spolupracovníky v Brookhavenu v roce 1957. Přehledové články viz A. D. B. Woods, R. A. Cowley. *Rep. Prog. Phys.* **36**, 1135 (1973); D. L. Price ve *Physics of Liquid and Solid Helium*, díl 2, Editoři K. H. Bennemann, J. B. Ketterson. Wiley, New York (1978), str. 675.
- [30] Přehled lze nalézt v J. I. Friedman, H. W. Kendall. *Ann. Rev. Nucl. Sci.* **22**, 203 (1972).
- [31] Přehled viz D. Pines. *Can. J. Phys* **65**, 1357 (1987).
- [32] *The Pleasure of Finding Things Out*. Nova, vysílání číslo 25, leden 1983.
- [33] L. Tisza. *Nature* **141**, 913 (1938); *C. R. Acad. Sci.* **207**, 1035, 1186 (1938); *Phys. Rev.* **72**, 838 (1947).
- [34] J. A. Wheeler, R. P. Feynman. *Rev. Mod. Phys.* **17**, 157 (1945); *Rev. Mod. Phys.* **21**, 425 (1949).

# Obsah

Mladík Feynman . . . . .	5
Feynman na Cornellu . . . . .	14
Cesta ke kvantové elektrodynamice . . . . .	28
Chlapík z pracovny odnaproti . . . . .	40
Feynman a partony . . . . .	50
Fyzika kondenzovaného stavu . . . . .	57
Učiteľ Richard P. Feynman . . . . .	71
Richard Feynman a Connection Machine . . . . .	80
Vzpomínky na Richarda Feynmana . . . . .	92
Literatura . . . . .	105