

Vývoj prostoročasového hlediska v kvantové elektrodynamice

Richard P. Feynman

Když píšeme články k publikaci ve vědeckých časopisech, předkládáme obvykle svou práci v podobě co nejukončenější; zakrýváme stopy svého úsilí, nestaráme se o slepé uličky, nepopisujeme, jak chybnou myšlenku jsme na začátku měli a podobně. Tak nemáme, kde důstojně publikovat to, co jsme skutečně dělali, abychom problém vyřešili, ačkoli by dnes byl právě o něco takového zájem. Vzhledem k tomu, že přijetí Nobelovy ceny je osobní záležitostí, bude mi snad v této zvláštní situaci prominuto, budu-li hovořit osobně o svém vztahu k elektrodynamice, spíše než abych vytříbeným a hotovým způsobem mluvil o problému samém. Kromě toho byli cenou za fyziku vyznamenáni tři lidé, a kdyby všichni hovořili o kvantové elektrodynamice, mohli bychom být tímto tématem znuděni. Proto bych dnes rád mluvil o sledu událostí, či spíše o sledu myšlenek, jímž se mi podařilo vyrovnat se s dosud nevyřešeným problémem, za což mi nakonec byla udělena Nobelova cena.

Uvědomuji si, že čistě vědecké pojednání by mělo větší hodnotu, ale takové pojednání bych mohl publikovat v běžných časopisech. Proto využiji této nobelovské přednášky, abych učinil cosi, co má sice menší hodnotu, co však nemohu udělat nikde jinde. Požádám vás o shovívavost i jinak: uvedu i anekdotické detaily, jež nemají hodnotu ani z vědeckého hlediska, ani pro pochopení myšlenkového vývoje. Zahnu je sem pouze proto, aby přednáška byla zábavnější.

Pracoval jsem na tomto problému asi osm let až do konečné publikace v roce 1947. Všechno to začalo na technice v Massachusetts. Byl jsem tehdy posluchačem posledního ročníku. Četl jsem o známých fyzikálních zákonech, vnikal jsem pomalu do všech těch věcí,

kteří lidi znepokojovaly, a nakonec jsem si uvědomil základní problém, že totiž kvantová teorie elektřiny a magnetismu není plně uspokojivá. To jsem posbíral např. z knih od Heitlera a Diraca. Neinspirovaly mě ty části, kde vše bylo dokázáno a pečlivě demonstrováno a vypočítáno, protože jsem tomu dost dobře nerozuměl; inspirovaly mě v těch knihách především poznámky. To, čemu jsem v tak mladém věku mohl rozumět, byly právě poznámky o tom, že to nedává smysl. Ještě si pamatuji poslední větu z Diracovy knihy: „Zdá se, že zde bude zapotřebí podstatně nových fyzikálních myšlenek.“ To se mi stalo výzvou a inspirací. Měl jsem tehdy také pocit, že pokud nebylo dosaženo uspokojivé odpovědi na problém, který chci řešit, nemusím se ani v nejmenším zajímat o to, co je už známo.

Z četby jsem pochopil, že zdroje obtíží teorii v kvantové elektrodynamice jsou dva. Jednak nekonečná energie interakce elektronu se sebou samým. Tato těžkost byla i v klasické teorii. Druhá nesnáž spočívala v divergencích, způsobených nekonečným počtem stupňů volnosti pole. V té době – pokud se dobře pamatuji – jsem této potíži rozuměl prostě tak, že kvantujeme-li harmonické oscilátory pole (umístěné například v potenciálové jámě), má každý oscilátor energii základního stavu $\hbar\omega/2$ a v jámě je nekonečné množství modů stoupajících frekvencí ω ; proto je v jámě nekonečná energie. Dnes si uvědomuji, že to nebyla zcela správná formulace základního problému; tato obtíž může být odstraněna prostě tím, že změníme nulu, od níž se měří energie. V každém případě jsem myslel, že všechny těžkosti povstaly z kombinace představy, že elektron působí sám na sebe, a z nekonečného počtu stupňů volnosti pole.

Nuže – zdálo se mi zcela evidentní, že představa, že částice působí sama na sebe – a podle níž tedy elektrická síla působí na tutéž částici, která jí dala vzniknout – není nezbytná. Zeje to vlastně hloupost. A tak jsem si pro sebe navrhl představu, že elektrony nemohou působit samy na sebe, že mohou působit pouze na jiné elektrony. To znamená, že není vůbec žádné pole. Jestliže totiž všechny náboje spolu vytvářejí jediné společné pole a působí-li toto společné pole zpětně na všechny náboje, potom každý náboj nutně působí sám na sebe. Nu – a tady právě byla chyba: žádné pole není. Když rozkmitáte jeden náboj, za chvíli se rozkmitá další. Mezi náboji je přímá interakce, i když zpožděná. Zákon síly, který spojuje pohyb jednoho náboje s pohybem druhého, musí zahrnovat zpoždění. Rozkmitajte tohle, tamto se rozkmitá později. Atom na slunci kmitá; elektron v mém oku se rozkmitá za osm minut následkem přímé interakce.

Tahle myšlenka je přitažlivá tím, že řeší oba problémy najednou. Za prvé mohu ihned říci: „Nenechám působit elektron na sebe sama, nenechám ho působit na jiný elektron. A tedy – vlastní energie neexistuje.“ Za druhé neexistuje nekonečný počet stupňů volnosti pole. Není vůbec žádné pole; a trváte-li na termínech a myšlenkách jako je pole, pak je toto pole zcela určeno působením částic, které je vytvářejí. Rozkmitáte tuto částici, ta rozkmitá další; ale chcete-li operovat s pojmem pole, pak pole – je-li jaké – je zcela určeno hmotou, jež je vytváří. Proto pole nemá žádné nezávislé stupně volnosti a nekonečna pocházející ze stupňů volnosti by byla odstraněna. Je to vlastně tak, že když kdekoli vzhledneme a vidíme světlo, můžeme vždycky „vidět“ nějakou hmotu jako zdroj světla. Nevidíme prostě světlo (až na to, že nedávno byly objeveny radiové vlny, jejichž zdroj nebyl zatím nalezen).

Vidíte tedy, že mým generálním plánem bylo nejprve vyřešit klasický problém, zbavit se nekonečných vlastních energií v klasické teorii a doufal jsem, že až z toho udělám kvantovou teorii, bude všechno úplně skvělé.

To byl tedy začátek. Moje myšlenka se mi zdála tak zřejmá a tak elegantní, že jsem se do ní hluboce zamiloval. Zamilujeme-li se do ženy a nevíme o ní mnoho, je zcela samozřejmé, že nevidíme její chyby. Chyby se objeví později, ale až tehdy, když už je láska dosti silná, aby nás u ní udržela. Tak mne můj mladistvý entuziasmus udržel u této teorie i přes všechny její potíže.

Stal jsem se vědeckým aspirantem a postupně jsem se poučil, co je chybného na myšlence, že elektron nepůsobí sám na sebe. Udělíte-li elektronu zrychlení, vyzařuje energii a ta musí být kryta dodatečnou prací. Dodatečná síla, proti níž tuto práci konáme, se nazývá síla radiačního odporu. Původ této síly navíc byl tehdy identifikován, podle Lorentze, jako působení elektronu na sebe sama. První člen ve vzorci pro tuto sílu, totiž pro působení elektronu sama na sebe, způsobuje cosi jako setrvačnost (která není relativisticky zcela uspokojivá). Ale tento „setrvačnostní“ člen je pro bodový náboj nekonečný. Následující člen udával rychlost zmenšování energie, která pro bodový náboj přesně souhlasí s rychlostí, kterou získáme, vypočítáme-li, kolik energie tento náboj vyzařuje. Kdybych řekl, že náboj nemůže působit sám na sebe, zmizela by síla radiačního odporu, která je nezbytně nutná pro zachování energie.

Tak jsem v době svého dalšího studia poznal do očí bijící chybu své původní teorie. Ale byl jsem do ní stále ještě zamilován a stále jsem si ještě myslel, že v ní je řešení obtíží kvantové elektrodynamiky. A tak jsem se stále snažil ji tak či onak zachránit. Chci-li udělit zrychlení danému elektronu, musí mé působení odpovídat radiačnímu odporu. Jestliže připustím pouze interakci mezi různými elektrony, je jediným možným zdrojem tohoto působení jiný elektron. A tak jsem o tom jednoho dne, když jsem pracoval pro profesora Wheelera a nebyl jsem schopen řešit problém, který mi zadal, přemýšlel znovu a uvažoval jsem takto: Předpokládejme, že máme dva náboje. Rozkmitám první náboj, který si představuji jako zdroj, a ten roz-

kmitat druhý náboj; ale druhý náboj svým chvěním způsobí zpětný efekt na zdroj. A počítal jsem, jak velký je zpětný efekt na první náboj, a doufal jsem, že mi snad vyjde síla radiačního odporu. Ale nevyšlo mi to. Šel jsem tedy za profesorem Wheelerem a řekl jsem mu o své myšlence. „Ano,“ řekl mi, „ale odpověď na váš problém se dvěma náboji, o kterém jste se zmínil, závisí bohužel na náboji a hmotě druhého náboje a síla bude nepřímo úměrná čtverci vzdálenosti R mezi náboji, zatímco síla radiačního odporu na ničem z toho nezávisí.“ Myslel jsem si tehdy, že to měl jistě předem spočítané, ale dnes jako profesor vím, že člověk může být dost chytrý na to, aby ihned pochopil to, s čím se aspirant moří několik týdnů. Navíc zdůraznil něco, co mě také znepokojilo: že totiž, máme-li původní zdroj obklopen mnoha náboji s přibližně konstantní hustotou a sečeteme-li reakci od všech těchto nábojů, bude úměrnost $1/R^2$ kompenzována tím, že element objemu je úměrný R^2 , a výsledek bude úměrný tloušťce vrstvy, která může jít až do nekonečna. To znamená, že celkové zpětné působení na zdroj může být nekonečné. A konečně mi řekl: „A zapomněl jste ještě na něco jiného; jestliže zrychlíte první náboj, druhý se začne zrychlovat později a zpětná reakce u zdroje nastane ještě později.“ Jinými slovy, k akci nedochází tehdy, kdy je třeba. Uvědomil jsem si hned, jaký jsem to hlupák; protože to, co jsem popsal a spočítal, bylo obyčejné odražené světlo a ne radiační reakce.

Ale jak já jsem byl hloupý, tak byl profesor Wheeler chytrý. Pak pokračoval přednáškou, jako by si to všechno promyslel předem a byl dokonale na náš rozhovor připraven. Ale nebylo tomu tak. Ujasnil si to, když jsme celou věc probírali. „Za prvé,“ řekl, „předpokládáme, že zpětné působení nábojů z absorberu nastává nejen zpožděnými (retardovanými) vlnami odraženého světla, ale také vlnami předbíhavými (advansovanými), takže zákony interakce působí jak směrem do budoucnosti, tak do minulosti.“ Byl jsem tehdy už natolik fyzikem, že jsem neřekl: „Ale to

přece není možné!“ Neboť dnes v době po Einsteinovi a Bohrovi všichni fyzikové vědí, že myšlenka, která na začátku vypadá zcela paradoxně, nemusí být paradoxní, jestliže ji důsledně analyzujeme do konce a do všech podrobností a nalezneme její souvislost s experimentem. A tak mě netrápilo o nic víc než profesora Wheelera, že lze užít pro zpětnou reakci předbíhavých vln, tj. řešení Maxwellových rovnic, jehož předtím nebylo fyzikálně použito.

Profesor Wheeler užil předbíhavých vln, aby dosáhl zpětné reakce ve správném čase, a pak navrhl toto: je-li v absorberu mnoho elektronů, bude index lomu n , takže vlnové délky zpožděných vln přicházejících ze zdroje se při průchodu absorberem mírně změní. Předpokládáme-li nyní, že předbíhavé vlny přicházejí zpět z absorberu, aniž by se lámaly (proč? to nevím, prostě předpokládáme, že lom nenastává), pak fázový posun mezi odraženou a původní vlnou bude rovnoměrně růst. Takže nám nezbyvá, než si představit, že příspěvky působí, jako by vycházely jen z konečné tloušťky, a to z tloušťky první vlnové oblasti. (Přesněji řečeno až do hloubky, v níž se fáze v prostředí významně odlišuje od té, která by byla ve vakuu; je to tloušťka řádově daná výrazem $\lambda/(n - 1)$.) A teď: čím menší je v této vrstvě počet elektronů, tím méně každý z nich přispívá i ke zpětnému působení, ale tím tlustší bude vrstva, která přispívá efektivně, protože čím méně elektronů, tím méně se index lomu liší od 1. Čím větší jsou náboje těchto elektronů, tím více každý přispívá ke zpětnému působení, ale tím tenší je efektivní vrstva, protože index lomu bude vyšší. A když jsme to odhadli (spočítali bez zvláštního zřetele na hodnotu numerického faktoru), vyšlo nám, že zpětné působení na zdroj je zcela nezávislé na vlastnostech nábojů tvořících okolní absorber. Navíc se ukázalo, že tento děj může svým způsobem reprezentovat sílu radiačního odporu, ale nepodařilo se nám zjistit, má-li přesně správnou velikost. Profesor Wheeler mě poslal domů s poky-

nem, abych přesně vyčíslil, kolik předbíhávých a kolik zpožděných vln potřebujeme, aby nám to vyšlo numericky správně a abych dále prozkoumal, co se stane s očekávaným zpětným působením, umístíme-li zkušební náboj do těsné blízkosti zdroje. Vytvářejí-li totiž všechny náboje jak předbíhávě, tak zpožděné děje, proč by tento zkušební náboj nebyl ovlivněn předbíhávými vlnami ze zdroje?

Zjistil jsem, že správný výsledek dostaneme, bude-li se pole skládat z poloviny předbíhávých a poloviny zpožděných vln, vzniklých kolem každého náboje, tj. musíme užít řešení Maxwellových rovnic, jež je symetrické v čase. Důvod, proč nepozorujeme předbíhávě vlny v místě položeném těsně u zdroje, přestože zdroj vytváří předbíhávě pole, je tento: Předpokládáme, že zdroj je obklopen kulovou absorbující stěnou vzdálenou deset světelných vteřin a že zkušební náboj je vzdálen jednu světelnou vteřinu vpravo od zdroje. Potom je zkušební náboj vzdálen jedenáct vteřin od některých částí stěny a jen devět vteřin od jiných částí. Zdroj působící v čase $t = 0$ indukuje pohyby ve stěně v čase $+10$. Z toho plyne, že předbíhávě jevy mohou působit na zkušební náboj až o jedenáct vteřin dříve, neboli v čase $t = -1$. To znamená právě ve chvíli, kdy přímé předbíhávě vlny ze zdroje dosáhnou zkušebního náboje. Z toho vyplývá, že tyto dva efekty jsou si rovny co do velikosti, ale liší se ve znaménku a tudíž se ruší. V pozdějším čase $t = +1$ jsou si efekty na zkušební náboj ze zdroje a ze stěn opět svou velikostí

rovny, ale tentokrát mají i stejné znaménko a tudíž se sčítají.

Jestliže se tedy domníváme, že všechna působení se dají popsat polovinou předbíhávých a polovinou zpožděných řešení Maxwellových rovnic, a předpokládáme, že všechny zdroje jsou obklopeny hmotou absorbující všechno vyslané světlo, můžeme vysvětlit radiální odpor jako přímé působení nábojů absorbéru, které zpětně působí předbíhávými vlnami na zdroj.

Několik měsíců jsme to všechno přepočítávali. Snažil jsem se ukázat, že výsledek nezávisí na tvaru kontejneru atd., že vzájemné vztahy jsou zcela správné a že předbíhávě působení se skutečně v každém případě ruší. Hledali jsme stále přesvědčivější potvrzení a pokoušeli se pochopit stále jasněji, proč se to děje. Nebudu vás unavovat podrobnostmi. Protože jsme použili předbíhávě vlny, objevila se nám řada paradoxů, které jsme postupně jeden po druhém redukovali, až jsme se přesvědčili, že ve skutečnosti nejsou s touto naší teorií žádné logické potíže. Byla zcela uspokojivá.

Kromě toho jsme také zjistili, že to všechno můžeme formulovat ještě jinak, a to pomocí principu nejmenší akce. Poněvadž jsem původně chtěl vše popsat přímo v termínech pohybu částic, přál jsem si vyjádřit tuto novou teorii, aniž bych říkal cokoliv o polích. Dopadlo to tak, že jsme našli formuli pro akci, zahrnující jen pohyby částic, jejíž variace dává rovnice pohybu těchto částic. Výraz pro působení A je

$$A = \sum_i m_i \int (\dot{X}_\mu^i \dot{X}_\mu^i)^{1/2} d\alpha_i + \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} e_i e_j \iint \delta(I_{ij}^2) \dot{X}_\mu^i(\alpha_i) \dot{X}_\mu^j(\alpha_j) d\alpha_i d\alpha_j, \quad (1)$$

kde

$$I_{ij}^2 = [X_\mu^i(\alpha_i) - X_\mu^j(\alpha_j)][X_\mu^i(\alpha_i) - X_\mu^j(\alpha_j)],$$

$X_\mu^i(\alpha_i)$ je čtyřrozměrný polohový vektor i -té částice jako funkce parametru α_i , přičemž pro něj platí, že $\dot{X}_\mu^i(\alpha_i) = dX_\mu^i(\alpha_i)/d\alpha_i$. První člen výrazu je integrál vlastního času, tedy normální akce volných částic hmoty m_i podle relativistické mechaniky. (Sčítáme obvyklým způsobem podle opakujícího se indexu μ .) Druhý člen představuje elektrickou interakci nábojů. Sčítá se přes každý pár nábojů, přičemž faktor $1/2$ je zde proto, aby se počítal každý pár jen jednou; člen $s_i = j$ je vypuštěn, abychom se vyhnuli působení elektronu sama na sebe. Interakce je dvojnásobný integrál z δ -funkce čtverce prostorčasového intervalu I^2 mezi dvěma body dráhy. K interakci dochází jen tehdy, je-li tento interval roven nule, tj. leží-li jeden z nábojů na světelném kuželu druhého.

Jestliže je interakce přesně napůl předbíhavá a napůl zpožděná, můžeme tedy takový princip nejmenší akce zformulovat, což se nepodaří, má-li být interakce popsána pouze vlnami zpožděnými.

A tak byla celá klasická elektrodynamika obsažena v tomto velmi jednoduchém výrazu. Vypadalo to velmi dobře, a proto to bylo nepochybně správně, alespoň pro začátečníka. Dávalo to automaticky napůl předbíhavé a napůl zpožděné efekty a fungovalo to bez jakýchkoliv polí. Tím, že jsem vypustil v sumě člen $s_i = j$, vypustil jsem interakci náboje sama se sebou, a tím zmizel problém nekonečné vlastní energie. To bylo kýžené řešení problému, jak zbavit klasickou elektrodynamiku nekonečen.

Chcete-li, můžete tedy znovu zavést pojem polí, ale musíte mít na zřeteli pole vytvářené každou částicí zvlášť. Abychom totiž našli správné pole jež má na danou částici působit, musíme vyloučit pole, jež sama vytváří. Jediné univerzální pole, které je součtem všech polí individuálních, nefunguje. Tuto myšlenku navrhl původně Frenkel, a proto jsme tato pole nazvali Frenkelovými. Naše teorie, která bere v úvahu jen vzájemné působení částic, byla ekvivalentní s teorií Frenkelových polí, pokud

použijeme zpola předbíhavých a zpola zpožděných řešení.

Nabízelo se několik návrhů na zajímavé modifikace elektrodynamiky. Probrali jsme mnohé z nich, ale budu zde referovat pouze o jednom. Byl to návrh nahradit δ -funkci v interakci jinou funkcí, řekněme $f(I_{ij}^2)$, která by nebyla nekonečně ostrá. Místo toho aby k akci došlo jen tehdy, kdy interval mezi dvěma náboji je přesně roven nule, nahradili bychom delta funkci argumentu I^2 jakousi úzkou, avšak konečnou, špičkou. Řekněme, že $f(Z)$ nabývá velikých hodnot pouze v malém okolí nuly, jehož šířka je řádově rovna a^2 . K interakcím nyní dochází, když $T^2 - R^2$ je zhruba řádu a^2 , kde T je časová diference a R vzdálenost nábojů. Mohlo by se zdát, že to nesouhlasí se zkušeností, ale je-li a dostatečně malé, např. řádu 10^{-13} cm, ukazuje se, že časové zpoždění (v akci) T je zhruba rovno $(R^2 \pm a^2)^{1/2}$, nebo je-li R mnohem větší než a , $T \approx R + a^2/2R$. To znamená, že odchylka času T , od ideálního Maxwellova teoretického času R se zmenšuje s rostoucí vzdáleností částic. Proto by všechny teorie zahrnuté v analýze generátorů, motorů atd. a vlastně všechna ověření elektrodynamiky dosažitelná v Maxwellově době byla přiměřeně uspokojena, kdyby velikost a byla zvolena v řádu 10^{-13} cm. Je-li R řádově cm, nepřevyšuje chyba v T hodnotu 10^{-26} . Tak bylo také možno jednoduše změnit teorii a zároveň se shodnout se všemi pozorováními klasické elektrodynamiky. Neměli jsme klíč k tomu, abychom přesně určili, jakou funkci dosadit za f , ale byla to zajímavá možnost, kterou bylo třeba mít na paměti při rozvíjení kvantové elektrodynamiky.

Dále jsme si uvědomili, že když jsme nahradili δ -funkci funkcí f , nemohli jsme zavést znovu do sumy členy $s_i = j$, protože relativisticky invariantně představovaly konečné působení náboje na sebe sama. Ve skutečnosti bylo možné dokázat, že uděláme-li to, bude hlavním efektem vlastního působení

(pro nepřilíš velká zrychlení) změna hmoty částice. Pak vlastně nepotřebujeme člen s hmotou m_i . Všechna mechanická hmota bude výsledkem vlastního elektromagnetického působení. Takže, chcete-li, můžeme mít jinou teorii s ještě jednodušším výrazem pro akci A . Ve výrazu (1) zachováme pouze druhý výraz, suma se vztahuje na všechna i a j a nějaká funkce f nahradí δ -funkci. V takové jednoduché formě by bylo možné si představit celou klasickou elektrodynamiku, což s výjimkou gravitace znamená i celou klasickou fyziku.

Ač to může znít jako něco matoucího, popisují několik různých alternativních teorií najednou. Je důležité poznamenat, že jsme tehdy měli všechny tyto teorie na mysli jako různé možnosti. Bylo několik možných řešení těžkostí klasické elektrodynamiky, z nichž každé může být dobrým východiskem pro řešení obtíží kvantové elektrodynamiky.

Rád bych také zdůraznil, že jsem si v té době zvykl na fyzikální hledisko, které je odlišné od hlediska obvyklého, kdy děje probíhají detailně rozvinuty v čase. Máte např. v této chvíli pole: diferenciální rovnice vám dají pole v následující chvíli atd. Tato metoda dynamických diferenciálních rovnic bude označována jako Hamiltonova časově diferenciální metoda. Místo toho máme v rovnici (1) něco, co popisuje charakter dráhy, která vede celým prostoročasem. Chování přírody je určeno, řekneme-li, že celá její prostoročasová dráha má určitý charakter. Pro akci, jako je akce (1), už není vůbec snadné převést rovnice, které získáme variací $X_\mu^i(a_i)$, do hamiltonovské formy. Chcete-li použít jen koordináty částic jako proměnné, pak můžete mluvit o vlastnosti dráhy, ale dráha jedné částice v daném okamžiku je ovlivněna dráhou jiné částice v jiném okamžiku. Snažte-li se proto popsat věci v diferenciálním tvaru, vyjadřujete stav částic v daný okamžik a to, jak tento stav ovlivní budoucnost, pochopíte, že to není možné vezmete-li v úvahu pouze stav částic samých, neboť to, co dělaly částice v minulosti, ovlivní i budoucnost.

Proto potřebujete vskutku velmi mnoho „účetně-registračních“ proměnných, abyste vysledovali, co dělala částice v minulosti. Tyto proměnné se nazývají proměnné pole. Musíte tedy také říci, co se děje s polem v přítomném okamžiku, máte-li pochopit, co se stane později. Při prostoročasové formulaci principu nejmenšího účinku (akce) se pole redukuje pouze na souhrn „účetně-registračních“ proměnných, které vyžaduje Hamiltonova metoda.

Totéž hledisko mimo jiné způsobilo, že mi jednoho dne mé aspirantury v Princetonu volal prof. Wheeler a povídá: „Feynmane, já vím, proč mají všechny elektrony stejný náboj a stejnou hmotu.“ „Proč?“ „Protože všechny jsou jeden a týž elektron.“ A pak mi do telefonu vysvětloval: „Představte si, že světočáry, které jsme dříve uvažovali v čtyřrozměrném časoprostoru – místo abychom sledovali pouze závislost dráhy na čase – jsou zamotány do obrovského uzle; když pak rozetneme uzel rovinnou odpovídající danému okamžiku, uvidíme mnoho a mnoho světočar a ty budou představovat mnoho elektronů, až na jednu věc. Jestliže jedna část světočáry reprezentuje obyčejný elektron, v jiné části, která se vrací z budoucnosti, máme obrácené znaménko vlastního času – vlastních čtyřrychlostí – a to je ekvivalentní změně znaménka náboje. Proto se bude tato část dráhy chovat jako pozitron.“ „Ale pane profesore,“ řekl jsem, „pozitronů není tolik jako elektronů.“ „No, možná, že jsou schované v protonech nebo tak nějak,“ řekl profesor Wheeler. Myšlenku, že všechny elektrony jsou tentýž elektron, jsem nebral tak vážně jako poznámku, že pozitrony si mohou představit jako elektrony, které jdou z budoucnosti do minulosti po zpátečních úsecích světočar. A tu jsem ukradl!

Abych to tedy shrnul: za dobu, kdy to ve mně pracovalo, jsem získal jako fyzik dvě věci. Jednak jsem poznal mnoho různých způsobů, jak formulovat klasickou elektrodynamiku, a s tím mnoho různých matematických forem. Naučil jsem se formulovat každý pro-

blém všemi způsoby. Za druhé jsem získal hledisko – prostorovočasové hledisko – a ztratil jsem úctu k hamiltonovskému způsobu popisování fyzikálních dějů.

Rád bych zde svůj výklad přerušil a udělal poznámku. Věděl jsem, že elektrodynamiku lze popisovat mnoha způsoby – Maxwellovými diferenciálními rovnicemi, různými minimálními principy za pomoci polí i bez nich, všemi možnými způsoby – ale nikdy jsem to důkladně nechápal. Vždycky se mi zdálo divné, že základní zákony fyziky, když už byly objeveny, se mohou jevit v tolika různých formách, jež na první pohled nejsou identické, ale stačí si s tím trochu matematicky pohrát a souvislost se ukáže. Příkladem je tu vztah Schrödingerovy rovnice a Heisenbergovy formulace kvantové mechaniky. Nevím, proč tomu tak je – to zůstává tajemstvím, ale naučil jsem se tomu prostě ze zkušenosti. Vždycky existuje ještě jiný způsob, jak říci tutéž věc, která se vůbec nepodobá způsobu, jímž jste ji vyjádřili předtím. Nevím, co je toho příčinou. Myslím, že se tu jaksi ukazuje jednoduchost přírody. Například zákon $1/R^2$ je dobře reprezentován řešením Poissonovy rovnice, která je právě velmi odlišným způsobem, jak říci tutéž věc a vůbec se nepodobá způsobu, jímž jsme ji řekli předtím. Nevím, co to má znamenat, že si příroda vybírá tyto kuriozní formy, ale snad právě touto zvláštností lze definovat jednoduchost. Snad je věc jednoduchá tehdy, jestliže ji můžete plně popsat několika různými způsoby, aniž byste ihned poznali, že vlastně popisujete totéž.

Tehdy jsem byl přesvědčen, že když jsme vyřešili problém klasické elektrodynamiky (a zcela v souladu s mým programem z MIT tj. pouhou přímou interakcí mezi částicemi, způsobem při němž pole nejsou nutná), je všechno na nejlepší cestě. Věřil jsem, že stačí pouze vytvořit kvantovou teorii analogickou klasické a vše bude vyřešeno.

Zdánlivě jediným problémem tedy bylo vytvořit kvantovou teorii, jejíž klasickou ana-

logií je výraz (1). Neexistuje ovšem jediný způsob, jak vytvořit kvantovou teorii z klasické mechaniky, ačkoli všechny učebnice věří, že tomu tak je. Učebnice vám řeknou, že je třeba najít hybnosti a nahradit je operátorem $(\hbar/i)(\partial/\partial x)$, ale já jsem nemohl hybnosti nalézt, protože tam prostě žádné nebyly.

Tehdy bylo v kvantové mechanice obvyklé psát vše slavným hamiltonovským způsobem, formou diferenciální rovnice, která popisovala, jak se vlnová funkce mění v čase, a v termínech operátoru H . Kdyby mohla být klasická fyzika redukována na hamiltonovskou formu, bylo by vše v pořádku. Avšak princip nejmenšího účinku nevyžaduje hamiltonovskou formu, není-li účinek pouhou funkcí souřadnic a rychlostí změřených v daném okamžiku, ale závisí-li ještě na čemsi dalším. Má-li účinek formu integrálu funkce (obvykle nazývané Lagrangeova) rychlostí a souřadnic příslušejících danému okamžiku:

$$S = \int L(\dot{x}, x) dt, \quad (2)$$

můžete začít s lagrangianem a až potom vytvoříte hamiltonián a vypracujete kvantovou mechaniku více nebo méně jednoznačně. Ale vztah (1) zahrnuje klíčové proměnné, souřadnice, ve dvou různých časech, a proto nebylo zřejmé, co je třeba udělat, abychom vytvořili kvantově mechanickou obdobu.

Potýkal jsem se s tím různými způsoby. Jeden z nich byl tento: Kdybych měl harmonické oscilátory, které na sebe působí s časovým zpožděním, mohl bych určit jejich normální módy a předpokládat, že kvantová teorie normálních módů je táž jako pro jednoduché oscilátory a potom se nějak vrátit k výchozím proměnným. To se mi podařilo, ale doufám, že to pak zobecním i na jiné oscilátory než harmonické; ke své lítosti jsem však zjistil, co zjistilo už mnoho lidí. Harmonický oscilátor je příliš jednoduchý; velmi často můžete určit, jak by se choval v kvantové teorii, aniž

získáte klíč k tomu, jak výsledky zobecnit pro jiné systémy.

Přilíši jsem si tedy nepomohl, ale právě v době, kdy jsem se potýkal s tímto problémem, jsem zašel na pivo do Taverny Nassau v Princetonu. Byl tam pán, který právě přijel z Evropy (Herbert Jehle), a ten přišel a posadil se ke mně. Evropané jsou mnohem vážnější než my Američané, protože si myslí, že posezení u piva je vhodné pro intelektuální diskusi. Tak se ke mně posadil a povídá: „Co teď právě děláte?“ A já jsem řekl: „Piju pivo.“ Pak jsem si uvědomil, že chtěl vědět, na čem pracuji, a tak jsem mu řekl, že se potýkám s tímhle problémem. Potom jsem se k němu otočil a povídám: „Poslouchejte, nevíte náhodou, jak by se dala dělat kvantová mechanika, kdyby se začalo s účinkem? Jinými slovy aby se do kvantové mechaniky zavedl účinkový integrál?“ „Ne,“ povídá on, „ale Dirac publikoval práci, kde do kvantové mechaniky vstupuje přinejmenším lagrangián. Zítřka vám to ukážu.“

Druhý den jsem tedy zašel do princepské knihovny (mají tam po straně malé místničky, kde se dá diskutovat) a on mi tu práci ukázal. Dirac v ní říká: „V kvantové mechanice je velmi důležitá veličina, která převádí vlnovou funkci z jednoho času do druhého ne pomocí diferenciální rov-

nice, ale způsobem s ní ekvivalentním; je to něco jako jádro, které bychom mohli označit $K(x', x)$, a které převádí vlnovou funkci $\psi(x)$ známou v čase t na vlnovou funkci $\psi(x')$ v čase $t + \varepsilon$.“ Dirac dále zdůrazňuje, že tato funkce K je *analogická* veličině v klasické mechanice, kterou vypočítáme, vezmeme-li exponenciální funkci argumentu $i\varepsilon$ násobenou lagrangianem $L(x, x)$ a předpokládáme, že tyto dvě souřadnice x, x' odpovídají $t, t + \varepsilon$. Jinými slovy $K(x', x)$ je analogické $\exp[i\varepsilon L((x' - x)/\varepsilon, x)]$.

Profesor Jehle mi to ukázal; přečetl jsem si to, on mi to vysvětlil a já jsem hned řekl: „Co myslí tím, že jsou analogické? Co je to – *analogické*? K čemu je to dobré?“ „Vy Američané,“ řekl profesor Jehle, „pořád se snažíte pro všechno najít použití.“ Řekl jsem, že si myslím, že Dirac měl určitě na mysli, že jsou si rovny. „Ne,“ vysvětloval profesor Jehle, „určitě nemyslel, že jsou si rovny.“ „Dobrá,“ povídám, „podívejme se, co se stane, budou-li si rovny.“

Takže jsem mezi nimi udělal rovnítko a vzal jsem ten nejprostší příklad, v němž je lagrangian roven $Mx^2/2 - V(x)$. Brzy jsem však zjistil, že do tohoto vztahu musím vsunout vhodné zvolenou konstantu úměrnosti A . Když jsem dosadil $Ae^{i\varepsilon L}$ za K , dostal jsem výsledek

$$\psi(x', t + \varepsilon) = \int A \exp \left[\frac{i\varepsilon}{\hbar} L \left(\frac{x' - x}{\varepsilon}, x \right) \right] \psi(x, t) dx. \quad (3)$$

Vypočítal jsem integrál rozvojem v Taylorovu řadu, a vyšla mi Schrödingerova rovnice. Otočil jsem se k profesorovi Jehlemu, který to skutečně nechápal, a povídám: „Tak vidíte, profesor Dirac měl na mysli, že jsou si úměrné.“ Profesor Jehle vykulil oči, vzal malé notes, rychle si to opsal z tabule a řekl: „Ne, ne, to je důležitý objev. Vy Američané se stále snažíte najít pro všechno použití. A to je dobrý způsob, jak dělat objevy!“ Tak jsem si myslel, že jsem objevil, co mínil Dirac, ale vlastně

jsem objevil, že to, o čem Dirac předpokládal, že je analogické, je si vlastně ve skutečnosti rovno. Měl jsem tedy přinejmenším spojení mezi lagrangianem a kvantovou mechanikou, ale stále s vlnovými funkcemi a infinitezimálními časy.

Asi tak den nebo dva poté jsem ležel v posteli a zase o tom přemýšlel. Představil jsem si, co by se stalo, kdybych chtěl spočítat vlnovou funkci o konečný časový interval později.

Využiji-li jednoho z činitelů pod integrálem $\exp\{i\varepsilon L\}$, mohu získat vlnovou funkci v příštím okamžiku tj. $t + \varepsilon$. Pak ji mohu dosadit zpět do rovnice (3), znovu použít jádro $\exp\{i\varepsilon L\}$ a získat vlnovou funkci v příštím okamžiku, $t + 2\varepsilon$, atd. Zjistil jsem, že takto získám velký počet integrálů, které následují za sebou. Každý integrand představuje součin exponenciálních funkcí, který je samozřejmě exponenciální funkcí, v jejímž exponentu je součet členů tvaru εL . L je lagrangian a ε má význam časového intervalu dt , takže vezmeme-li součet takových členů, je to přesně totéž jako integrál. Je to podobné Riemannově formulaci pro integrál $\int L dt$; vezmete hodnotu v každém bodě a sečtete je. Musíme ovšem vzít limitu pro $\varepsilon \rightarrow 0$. Proto vztah mezi vlnovou funkcí v jednom okamžiku a vlnovou funkcí v jiném okamžiku, zpožděném o konečný čas, získáme nekonečným počtem integrálů (protože ε se blíží k nule) z exponenciálních funkcí $\exp\{iS/\hbar\}$, kde S je výraz pro akci (2). Nakonec se mi podařilo reprezentovat kvantovou mechaniku přímo v termínech akce S .

To pak dále vedlo k myšlence amplitudy pro dráhu: každé dráze, po níž se částice může pohybovat v prostoročase z jednoho bodu do druhého, je přiřazena jistá amplituda pravděpodobnosti. Tato amplituda je $\exp\{iS/\hbar\}$, kde S je účinek podél dané trajektorie. Pro amplitudy různých drah platí princip superpozice. To je další, třetí cesta, jak popsat kvantovou mechaniku. Cesta, která vypadá zcela jinak než Schrödingerova nebo Heisenbergova, ale je s nimi ekvivalentní.

Po několika kontrolách jsem měl v plánu dosadit účinek (1) na místo účinku (2). První potíž byla v tom, že jsem nemohl pracovat v relativistickém případě s polovičním spínem. Avšak jakkoli jsem se mohl touto věcí zabývat pouze nerelativisticky, mohl jsem se docela dobře zabývat světelnými nebo fotonovými interakcemi tak, že jsem do výrazu pro akci dosadil interakční členy z výrazu (1), a hmotné členy nahradil relativistickou akcí $(Mx^2/2) dt$. Měl-li účinek zpoždění, což

v mém případě měl, a zahrnoval-li veličiny vztahující se k různým okamžikům času, musel jsem se vzdát pojmu vlnové funkce. To znamená, že jsem už nemohl úkol formulovat takto: v určitém okamžiku je dána amplituda pro všechny polohy; zjistíte amplitudu v jiném čase. To však nebyla tak velká potíž. Znamenalo to, že je třeba rozvinout jinou myšlenku. Bez užití vlnové funkce můžeme postupovat takto: vyšle-li nějaký zdroj částici a máme-li detektor, který ji indikuje, můžeme udat amplitudu pravděpodobnosti, že zdroj částici vyšle a detektor ji zachytí. Přitom nespécifikujeme přesný okamžik, kdy ji zdroj vysílá, ani okamžik, kdy ji detektor zachycuje; nesnažíme se určit žádný stav v žádném okamžiku akce, ale hledáme prostě amplitudu pro celý tento pokus. A pak můžeme zkoumat, jak se tato amplituda změní, jestliže mezi zdrojem a detektorem nastane rozptyl, otočíme-li systémem, změníme-li úhly atd., a to vše bez jakékoli vlnové funkce.

Kromě toho bylo možné vysvětlit, co znamenají staré pojmy energie a hybnosti v této zobecněné akci. A tak jsem si byl jist, že mám kvantovou verzi klasické elektrodynamiky – nebo spíše této nové klasické elektrodynamiky, popsané akcí (1). Kontroloval jsem to mnohokrát. Užil-li jsem hlediska Frenkelových polí, které – jak si pamatujete – bylo spíše diferenciální, mohl jsem teorii převést přímo na kvantovou mechaniku konvenčnější cestou. Jediný problém byl, jak v kvantové mechanice specifikovat klasické okrajové podmínky umožňující použití zpoza předbíhavého a zpoza zpožděného řešení. Když jsem definoval, co to znamená, přišel jsem na to, že kvantová mechanika s Frenkelovými poli a zadanými okrajovými podmínkami mi dá zpětně účinek (1) v nové podobě kvantové mechaniky s časovým posuvem. Takže různé věci svědčily o tom, že jsem se bezpochyby se vším vyrovnal.

Bylo také snadné odhadnout, jak modifikovat tuto elektrodynamiku, pokud by to někdo chtěl udělat. Dosadil jsem prostě místo δ

funkce funkci f jako v klasickém případě. Bylo to zkrátka velmi snadné a zcela jednoduché. Abych popsal starou teorii zpoždění, aniž bych se explicitně zmínil o polích, musel bych psát výrazy pro pravděpodobnosti a ne pro amplitudy. Musel bych své amplitudy umocnit na druhou, a to by zahrnovalo dvojné dráhové integrály, v nichž jsou dvě S , atp. A přesto, když jsem řadu těchto věcí vypracovával a studoval různé formy a různé okrajové podmínky, měl jsem jakýsi divný pocit, že takhle to není zcela správně. Nevěděl jsem přesně, v čem je ta potíž a v jednom z těch krátkých období, kdy se mi zdálo, že bych to měl nechat uležet, jsem publikoval dizertační práci a dosáhl doktorského titulu.

Za války jsem neměl čas zabývat se svým problémem příliš intenzivně, ale na cesty autobusem jsem si bral malé kousky papíru a úporně jsem se snažil o něm přemýšlet. Zjistil jsem, že je tu něco špatně, děsně špatně. Zjistil jsem, že zobecní-li se účinek z pěkných Lagrangeových tvarů (2) na tvary (1), pak veličiny, které jsem definoval jako energii, a jiné veličiny téhož typu, budou komplexní. Hodnoty energie stacionárních stavů nebudou reálné a součet pravděpodobností událostí nedá 100%. To znamená, že staně-li se pravděpodobně to a to – pak součet všeho, co si můžete představit, že by se vůbec mohlo stát, bude menší než jedna.

Jiný problém, s nímž jsem se velmi tvrdě potýkal, spočíval v tom, jak s touto novou kvantovou mechanikou reprezentovat relativistický elektron. Chtěl jsem to udělat jednoznačným a samostatným způsobem – ne tak, že bych nějakým výrazem napodobil Diracovy operátory a místo obyčejných komplexních čísel použil Diracovu algebru. Velmi mě povzbudilo to, že v jedné prostorové dimenzi jsem skutečně našel způsob, jak zadat amplitudu každé dráhy, jestliže jsem se omezil jenom na dráhy, které jdou tam a zpátky rychlostí světla. Výraz pro tuto amplitudu byl jednoduchý: $i\epsilon$ umocněno na počet změn znamének rychlosti,

přičemž jsem rozdělil čas na kroky ϵ a připustil jsem, že se rychlost může obrátit pouze v těchto okamžicích. Když se ϵ blíží nule, vyjde Diracova rovnice ve dvou dimenzích – jedné prostorové a jedné časové ($\hbar = M = c = 1$).

Diracova vlnová funkce má čtyři komponenty ve čtyřech dimenzích, ale v tomto případě má pouze dvě komponenty, a z tohoto pravidla pro amplitudu dráhy automaticky vyplývá potřeba dvou komponent. Jde o to, že z takového výrazu pro výpočet amplitudy dráhy, i když znáte hodnoty úhmné amplitudy všech drah procházejících daným bodem, nemůžete stanovit amplitudu pravděpodobnosti, s níž dosáhnete dalšího bodu. Jestliže totiž z následujícího bodu vychází dráha vpravo, nový faktor $i\epsilon$ se neobjeví, přichází-li dráha rovněž zprava, zatímco přichází-li zleva, máme tu nový faktor $i\epsilon$. Takže máme-li prodloužit tutéž informaci do příštího momentu, nestačí znát souhrnou amplitudu příchodu, ale musíme znát oddělené amplitudy v případě příchodu zprava a v případě příchodu zleva. Jestliže je však známe, můžeme znovu vypočítat nezávisle obě složky pro příští časový okamžik, odkud vyplývá, že podmínkou pro možnost napsání diferenciální rovnice (prvního řádu v čase) je znalost obou těchto amplitud.

A tak jsem snil o tom, že budu-li chytrý, najdu takový výraz pro amplitudu dráhy, který bude krásně jednoduchý pro tři dimenze prostoru a jednu dimenzi času, který bude ekvivalentní Diracově rovnici, a pro který všechny ty čtyřrozměrné vlnové funkce a všechny tyhle nepochopitelné matematické legrace vyjdou krásně jednoduše. Nikdy se mi nic takového nepodařilo. Ale chtěl jsem zde opravdu zmínit i neúspěchy, na které jsem spotřeboval přinejmenším tolik úsilí jako na věci, které se podařily.

Mám-li shrnout situaci za těch několik let, řekl bych, že jsem získal značné zkušenosti skvantovou elektrodynamikou; přinejmenším jsem znal mnoho způsobů, jak ji formulovat v termínech dráhových integrálů akce i ji-

nak. Z toho mimo jiné vyplynulo, že jsem pochopil, jak sjednotit to, co se tehdy nazývalo longitudinální a transverzální pole, a že je tato teorie relativisticky invariantní. Protože ve standardní kvantové elektrodynamice se dělají věci diferencially, rozpadají se pole na dvě části: na longitudinální část a na transverzální část, reprezentovanou fotony nebo transverzálními vlnami. Longitudinální část byla popsána Coulombovým potenciálem ve Schrödingerově rovnici, který působil okamžitě, zatímco transverzální část byla popsána zcela odlišně v termínech kvantování transverzálních vln. Toto oddělení záviselo na sklonu osy času v relativistickém čtyřrozměrném prostoročase. Lidé, kteří se pohybují různými rychlostmi, rozdělí totéž pole na longitudinální a transverzální různým způsobem. Kromě toho se úplná formulace kvantové mechaniky, jež přece vychází z vlnové funkce v daném čase, nedá relativisticky analyzovat. Každý, kdo užívá jiné soustavy souřadnic, spočítá sled událostí pomocí vlnových funkcí definovaných na rozdílných řezech prostoročasu a rozdělí jinak pole na longitudinální a transverzální části. Hamiltonova teorie se nezdá relativisticky invariantní, ve skutečnosti však je. Jednou z velkých výhod mého hlediska je, že můžeme pochopit relativistickou invariantnost teorie, neboli – jak by řekl Schwinger – kovariance je zjevná. Měl jsem tedy tu výhodu, že jsem měl zjevně kovariantní formu kvantové elektrodynamiky, možnosti dalších modifikací atd. Měl jsem však tu nevýhodu, že bral-li jsem ji příliš vážně – rozumí se v její tehdejší formě – dostal jsem se do nesnáží s komplexními energiemi, s tím, že pravděpodobnosti nedávaly dohromady jedničku atp. Potýkal jsem se s tím a nijak se mi nedařilo.

A potom udělal Lamb svůj experiment. Změnil rozdíl kmitočtů hladin $2S_{1/2}$ a $2P_{1/2}$ vodíku a zjistil, že se jedná o hodnotu asi 1 000 MHz. Profesora Betheho, u něhož jsem pracoval na Comellově univerzitě, lze charakterizovat asi takto: máte-li dobré experimentální číslo, musíte je vypočítat z teorie.

Tak se snažil získat ze soudobé kvantové elektrodynamiky odpověď na rozdíl těchto dvou hladin. Zdůrazňoval, že vlastní energie elektronu je nekonečná, takže vypočítaná energie vázaného elektronu vyjde také nekonečná. Ale vypočteme-li rozdíl dvou hladin energie a místo původní hodnoty hmoty použijeme její opravené hodnoty, musí nám teorie dát – podle jeho názoru – konvergentní konečné odpovědi. Odhadl rozštěpení touto cestou a shledal, že je stále ještě divergentní; myslím, že je to pravděpodobně proto, že použil nerelativistickou teorii. Předpokládal, že po zahrnutí relativistických efektů dostane konvergentní výsledek a odhadl, že pro Lambův posun vyjde asi 1 000 MHz. A tak učinil nejdůležitější objev v historii teorie kvantové elektrodynamiky. Vypracoval to ve vlaku z Ithacy (New York) do Shenectady a nadšeně mi telefonoval z Shenectady, aby mi sdělil výsledek; pamatují si, že jsem jej nedovedl dostatečně ocenit.

Když se Bethe vrátil na Comellovu univerzitu, udělal na toto téma přednášku, kterou jsem si šel poslechnout. Vysvětlil, že je velmi složité přesně vyčíslit, který nekonečný člen čemu odpovídá, jestliže se snažíme určit korekci pro nekonečně velkou změnu hmoty. Dále říkal, že je-li tu jakákoli modifikace, i kdyby nebyla fyzikálně korektní (tj. neprobíhala takovým způsobem, jak se to v přírodě skutečně děje), ale prostě jakákoli modifikace při vysokých frekvencích, která by učinila tuto korekci konečnou, pak by bylo vše vyřešeno. Vypočítáte prostě konečnou hmotnostní korekci Δm ke hmotě elektronu m_0 , dosadíte numerické hodnoty $m_0 + \Delta m$ za m ve výsledcích jakéhokoliv problému a všechny neurčitosti jsou vyřešeny. Byla-li by ještě k tomu tato metoda relativisticky invariantní, mohli bychom být absolutně spokojeni.

Po přednášce jsem za ním šel a řekl jsem: „Vypracuji vám to a zítra přinesu.“ Myslel jsem, že znám každý způsob, jak modifikovat kvantovou elektrodynamiku, jak byla tehdy známa. Přišel jsem proto druhého dne a vy-

světtil jsem, co jsem získal při záměně delta funkce za f , a požádal jsem ho, zda mi může vysvětlit, jak se počítá např. vlastní energie elektronu, abychom si mohli spočítat, je-li konečná.

Byl bych rád, kdybyste si všimli jedné zajímavé věci. Nepřijal jsem radu prof. Jehleho, zajímat se o to, jak se toho dá použít. Nikdy jsem nepoužil mašinerie, kterou jsem sestrojil, abych s její pomocí vyřešil byt' jediný relativistický problém. Nepočítal jsem až do této chvíle ani vlastní energii elektronu a studoval jsem obtíže zachovávání pravděpodobnosti atd., aniž bych skutečně něco dělal kromě toho, že jsem probíral obecné vlastnosti této teorie.

Ale teď jsem šel za profesorem Bethem, který mi na tabuli vysvětlil, jak se počítá vlastní energie elektronu. Až do té doby byly integrály, k nimž jsme dospěli, logaritmicky divergentní. Řekl jsem mu, jak se dělají relativisticky invariantní modifikace, o nichž jsem si myslel, že vše vyřeší. Sestavili jsme integrál, který pak divergoval v šesté mocnině frekvence místo logaritmicky!

A tak jsem se vrátil domů a lámal jsem si s tím hlavu. Pořád jsem chodil dokola a snažil jsem se zjistit, co je na tom špatně, protože jsem si byl jist, že fyzikálně musí všechno vyjít v konečných číslech. Nemohl jsem pochopit, proč to vyšlo nekonečné. Zajímalo mě to stále víc a nakonec jsem si uvědomil, že se musím naučit, jak se to počítá. Naučil jsem se nakonec počítat vlastní energii elektronu a pracoval jsem se trpělivě hrozným zmatkem tehdejších stavů negativní energie, děr, longitudinálních příspěvků atd. Když jsem konečně přišel na to, jak se to počítá, a počítal jsem to s modifikacemi, které jsem chtěl navrhnout, vyšlo mi to pěkně konvergentní a konečné, přesně tak, jak jsem čekal. Nebyli jsme s profesorem Bethem schopni přijít na to, co jsme tehdy na té tabuli dělali špatně, ale patrně jsme někde udělali chybu a nikdy se nám nepodařilo zjistit, kde. Ukázalo se, že to, co jsem navrhoval – nebyt' té chyby – bylo v pořádku a dalo nám

konečnou korekci. Ale v každém případě měla chyba přinutit, že jsem si všechno zpátky prošel a přesvědčil jsem se, že fyzikálně tam chyba není. Teď byla korekce k hmotnosti konečná, úměrná $\ln(ma/\hbar)$, kde a je šířka funkce f , jíž jsme nahradili δ . Chcete-li přejít k původní elektrodynamice, stačí položit a rovno nule a získáte nekonečnou hmotnostní korekci. Ale o to nešlo. Bylo-li a stále konečné, mohl jsem prostě sledovat program navrhnutý profesorem Bethem, ukázat, jak se počítá rozptyl elektronů na atomech bez záření, posunutí hladin a tak dále. To všechno jsem počítal v termínech experimentální hmotnosti a zjistil jsem, že – jak navrhl Bethe – výsledky nejsou v této formě citlivé na a a mají dokonce konečnou limitu pro $a \rightarrow 0$.

Pak už mi zbývalo jen zlepšit techniku výpočtů a udělat diagramy, aby analýza poruchové teorie byla rychlejší. Mnohé jsem napoprvé počítal odhadem – chápejte neměl jsem relativistickou teorii hmoty. Zdálo se mi např. zřejmé, že rychlosti v nerelativistických případech musí být nahrazeny Diracovou maticí α nebo v relativistických výrazech operátory γ_μ . Odhady jsem bral prostě z výrazů, které jsem vypracoval, když jsem používal dráhové integrály pro nerelativistickou hmotu, ale relativistické světlo. Bylo snadné vyvinout pravidla, co musíme dosadit, abychom dostali relativistický případ. Byl jsem velmi překvapen, když jsem zjistil, že dosud není známo, že všechny výrazy, které se trpělivě sestavovaly s přihlédnutím k rozdělení vln na longitudinální a transverzální, je možno získat z pouhého výrazu pro transverzální vlny, jestliže místo sčítání dvou kolmých směrů polarizace sečteme všechny čtyři možné směry polarizace. Z výrazu pro účinek (1) to bylo tak zřejmé, až jsem myslel, že je to obecně známo a stále jsem to používal. Málem jsem se s některými lidmi pohádal, protože jsem si neuvědomil, že to druzí nevědí. Ale ukázalo se, že všechna jejich trpělivá práce s longitudinálními vlnami znamená totéž, co pouhé rozšíření součtu z dvou transverzálních směrů

polarizace na všechny čtyři směry. To bylo jednou ze zábavných výhod této metody. Pak jsem ještě udělal diagramy pro různé členy poruchové řady, zlepšil symboliku, vypracoval snadné způsoby, jak vypočítat integrály, které se v těchto problémech vyskytují a tak dále a sepsal jsem jakousi příručku o kvantové elektrodynamice.

Ale bylo tu ještě Diracovo moře stavů s negativní energií, jež mi způsobilo mnoho logických potíží a v souvislosti s ním bylo třeba učinit jeden důležitý, fyzikálně nový, krok. Byl jsem z toho zmaten a tehdy jsem si připomněl starou Wheelerovu myšlenku o tom, že pozitron je elektron, který se vrací z budoucnosti do minulosti. Proto jsem v časové poruchové teorii, kterou se obvykle získávala vlastní energie, prostě předpokládal, že bychom se mohli v čase na chvíli vrátit a podívat se, jaké výrazy dostaneme, změníme-li znaménko časové proměnné. Získal jsem – až na některá znaménka – tytéž členy, kteří jiní odvodili, když řešili problém mnohem komplikovanější cestou, využívající teorie děr. Znaménka jsem zprvu určoval empiricky, vynalezl a vyzkoušel jsem si na to určitá pravidla.

Snažil jsem se vysvětlit, že všechna zlepšení relativistické teorie byla více méně zpola empirickými triky. Ale pokaždé, když na něco přijdu, vracím se zpět a ověřuji to všemi možnými způsoby, srovnávám to s každým problémem, který se v elektrodynamice řešil předtím (a později v mezonové teorii slabé vazby), abych poznal, zda staré a nové výsledky spolu zcela souhlasí, až jsem naprosto přesvědčen o pravdivosti každého jednotlivého pravidla a předpisu, jež jsem vymyslel, abych celou práci zjedno-dušil.

Mezitím byla rozvinuta mezonová teorie, kterou jsem prakticky vůbec nestudoval. Zajímalo mě, jak je možné aplikovat moje metody na poruchové výpočty v mezonové teorii. Ale co byla mezonová teorie? Věděl jsem jen to, že mezonová teorie je cosi analogického elektrodynamice, až na to, že částice odpovídající fotonům mají hmotu. Bylo snadné odhad-

nout, že δ -funkci v rovnici (1) (jež byla řešením rovnice, ve které se klade odpovídající d'Alembertian roven nule), bude třeba nahradit řešením jiné rovnice, kde d'Alembertian bude roven m^2 . Také jsem již slyšel, že existují různé druhy mezonů – jedny v nejužší analogii k fotonům, vázané prostřednictvím $\gamma_\mu \gamma_\mu$, které se nazývají vektorové mezony, a druhé skalární mezony. Nu, možná, že to znamená položit jednotku místo matice γ_μ , kterou jak se zdá, nazývají „pseudovektorovou vazbou“, a já bych byl rád odhadl, co to pravděpodobně je. Neměl jsem tolik znalostí, abych porozuměl způsobu, jímž to vše bylo definováno v běžných pracích, protože se tehdy vše vyjadřovalo v termínech kreačních a anihilačních operátorů atp., čemuž jsem se dostatečně nenaučil. Vzpomínám si, že když mi kdosi začal vysvětlovat kreační a anihilační operátory – totiž že operátor vytvoří elektron – řekl jsem: „Jak vytvoříte elektron? Vždyť to naruší zákon zachování náboje,“ a tak jsem seablokoval proti tomu, abych se naučil velmi praktické schéma výpočtu. Proto jsem musel využívat všech možných příležitostí znovu a znovu si ověřovat, zda jsem smysl různých teorií odhadoval správně.

Jednou vznikla na zasedání Fyzikální společnosti diskuze o korektnosti Slotnickova výpočtu interakce elektronu s neutronem, přičemž se používalo pseudoskalární teorie s pseudovektorovou vazbou a rovněž pseudoskalární teorie s pseudoskalární vazbou. Slotnick zjistil, že výsledky nejsou totožné: první byl divergentní a druhý konvergentní. Někteří lidé si mysleli, že tyto dvě teorie musí dát týž problém tutéž odpověď. To mi bylo vítanou příležitostí, abych vyzkoušel své odhady, zda jsem skutečně pochopil, co tyto dvě vazby znamenají. Šel jsem domů a večer jsem vypracoval elektron-neutronový rozptyl pro pseudoskalární a pseudovektorovou vazbu, zjistil jsem, že si nejsou rovny, odečetl jsem je a detailně jsem studoval diferenci. Druhý den jsem na zasedání uviděl Slotnicka a řekl jsem mu: „Tohle jsem vypracoval včera večer;

chtěl bych se podívat, jestli jsem dostal totéž co vy. Pro každou vazbu mi vyšla jiná odpověď – ale rád bych to zkontroloval s vašimi výsledky, protože bych se chtěl ujistit o svých metodách.“ A on mi povídá: „Nevykládejte mi, že jste to vypracoval večera večer; mně to trvalo šest měsíců!“ A když jsme srovnali odpovědi a on uviděl moje, zeptal se: „Co je to tady za Q , myslím tohle proměnné Q ?“ (Měl jsem tam výrazy jako $(\arctg Q)/Q$ atd.) „To je hybnost přenášená elektronem, který je odchylován v různých úhlech.“ „Och ne,“ povídá, „já mám pouze limitní hodnotu pro Q , blížíci se k nule, tj. případ rozptylu vpřed.“ Bylo dost snadné dosadit do mého výrazu za Q nulu a dostat tutéž odpověď jako on. Ale jemu trvalo šest měsíců než vypočítal přenos nulové hybnosti, zatímco já jsem za jeden večer vypracoval přenos konečné a libovolné hybnosti. Byla to pro mne otřesná chvíle, asi jako když jsem dostal Nobelovu cenu, protože mě to konečně přesvědčilo, že jsem vypracoval jakousi metodu a techniku, a že jsem pochopil, jak dělat něco, co ostatní lidé dělat nedovedou. Byl to okamžik triumfu. Uvědomil jsem si, že se mi skutečně podařilo vypracovat něco, co stálo za to.

V této fázi jsem byl nucen to publikovat, protože všichni říkali, že to vypadá jako o snadná cesta výpočtů a chtěli vědět, jak se to dělá. Musel jsem to publikovat a nechat stranou dvě věci: jednak důkaz všech tvrzení v konvenčním matematickém smyslu a jednak fyzikální zdůvodnění souvislosti všech těch pravidel a rovnic s konvenční elektrodynamikou. Ale věděl jsem ze zkušenosti, jak jsem kolem toho bláznil, že všechno je skutečně ekvivalentní regulární elektrodynamice. Měl jsem také dílčí důkazy mnoha částí, ačkoli jsem si nikdy doopravdy nenesl jako Euklides před řeckými geometry, abych se ujistil, že to všechno lze získat z jediné prosté soustavy axiomů. Práce pak byla kritizována, ani nevím zda příznivě nebo nepříznivě, a „metoda“ byla nazvána „intuitivní“. Ale pro ty, kdo si to snad neuvědomují, bych rád zdůraznil, že v tom, abychom

mohli použít té „intuitivní metody“ správně, je spousta práce. Protože žádný prostý a jasný důkaz teorémů nebo odvození vzorců neexistuje, je třeba neobyčejného množství kontrol pro každý získaný výsledek a dále kontrol konzistence a korektnosti v termínech toho, co už je známo. Je třeba srovnávat další analogické příklady a situace, limitní případy a tak dále. Tváří v tvář nedostatečnému matematickému důkazu musí být člověk opatrný a důkladný, aby se o své věci ujistil. Měl by se také stále pokoušet dokazovat ve vzorci co nejvíce. Nicméně můžeme poznat nepoměrně větší část pravdy, než můžeme dokázat.

Je třeba si uvědomit, že jsem v celé této práci reprezentoval konvenční elektrodynamiku se zpožděným působením a ne tu svou, se zpola předbíhavými a zpola zpožděnými jevy odpovídajícími rovnicí (1). Užívám rovnici (1) pouze k tomu, abych uhádl matematické formy. A jedna z forem, které jsem uhádl, odpovídala změně od δ k funkci f šířky a^2 , takže jsem mohl spočítat konečné výsledky pro všechny tyto problémy. To mě přivádí k druhé věci, kterou jsem pominul při publikaci této práce, totiž k obtíži, která dosud nebyla vyřešena. Je-li δ nahrazeno funkcí f , dají nám výpočty výsledky, které nejsou „unitární“, tj. pro něž součet pravděpodobností všech alternativ je v našem případě menší než jedna. Odchyłka od jedničky byla prakticky velmi malá, jestliže a bylo velmi malé. V limitě, kde jsem vzal a velmi malé to bylo zanedbatelné. A tak bylo možné renormalizovat: můžete vypočítat všechno v termínech experimentální hmoty a pak vzít limitu, a zjevná obtíž, že je unitárnost dočasně porušena, zdánlivě zmizí. Nebyl jsem schopen dokázat, že tomu tak fakticky je.

Udělal jsem dobře, že jsem s uveřejněním nečekal, až se tento bod vyjasní, protože – pokud vím – dosud se nikomu nepodařilo tuto otázku rozřešit. Zkušenost s mezonovými teoriiemi se silnou vazbou a se silně vázanými vektorovými fotony, ačkoli nic nedokazovala, mě přesvědčila, že je-li vazba silnější nebo při vyšší

aproximaci (řekněme v přiblížení 137. řádu poruchové teorie pro elektrodynamiku), tato obtíž v limitě zůstává a je to skutečný problém. To znamená, myslím si, že ve skutečnosti neexistuje žádná uspokojivá kvantová elektrodynamika, ale nejsem si tím jist. A myslím si, že jeden z důvodů, proč pokrok v chápání silných interakcí jde tak pomalu, je ten, že nemáme žádný relativisticky teoretický model, ze kterého by se dalo všechno vypočítat. Obtíž je v tom – říká se obvykle – že silné interakce jsou na výpočet příliš těžké; já si však myslím, že ve skutečnosti proto, že silné interakce v teorii polí nemají žádné řešení, nemají smysl – buď jsou nekonečné, nebo, snažíte-li se je modifikovat, zničí modifikace unitaritu. Nemyslím si, že máme zcela uspokojivý relativistický kvantově mechanický model, který by – když už nesouhlasí s přírodou – souhlasil alespoň s logikou, požadující, aby suma pravděpodobností všech alternativ byla 100%. Proto si myslím, že teorie renormalizace je prostě způsob, jak pod pokličkou vymýtít obtíž divergencí elektrodynamiky. Ale tím si samozřejmě nejsem jist.

Tak se uzavírá historie prostoročasového hlediska v kvantové elektrodynamice. Nevím, zda se odtud lze něčemu naučit. Spíše o tom pochybuji. Nejnápadnější je, že většina myšlenek, rozvinutých v průběhu tohoto výzkumu, nebyla v konečném výsledku vůbec použita. Např. zpola předbíhavý a zpola zpožděný potenciál nebyl nakonec použit, výraz pro účinek (1) nebylo rovněž použito; vzdal jsem se myšlenky, že náboje nepůsobí samy na sebe. Formulace kvantové mechaniky pomocí dráhových integrálů byla užitečná, abychom odhadli konečný výraz a formulovali obecnou teorii elektrodynamiky novými způsoby – ačkoli striktně vzato nebyla tak zcela nezbytná. Totéž platí pro myšlenku o tom, že pozitrony jsou zpětně se pohybující elektrony; velmi mi vyhovovala, ale pro teorii nebyla naprosto nezbytná, protože je zcela ekvivalentní použití teorie děr v moři negativní energie.

Jsem překvapen tím, kolik je různých fyzikálních hledisek a zcela různých mate-

matických formulací, které jsou všechny rovnocenné. Metoda uvažování ve fyzikálních termínech, kterých jsme zde užili, se proto zdá být zvláště neúčinná. Dívám-li se zpět na svou práci, mohu jen litovat té spousty fyzikálního zdůvodňování a matematického přeformulovávání, které skončí tím, že se pouze znovu vyjádří to, co už bylo předtím známo, byť i formou, která více vyhovuje pro výpočet určitých problémů. Nebylo by mnohem jednodušší pracovat jen v rámci matematiky, abychom vypracovali účinnější vyjádření? Zdá se, že tomu tak je. Je však třeba poznamenat, že ač byl problém, který jsme skutečně řešili, pouhou novou formulací, chopili jsme se původně (patrně dosud neřešeného) problému, jak se vyhnout nekonečným v obvyklé teorii. Hledali jsme tedy novou teorii, ne modifikaci staré. Ačkoli bylo toto hledání neúspěšné, měli bychom se podívat na hodnotu fyzikálních myšlenek při rozvíjení *nové* teorie.

Mnoho velmi různých fyzikálních myšlenek může popsat tutéž fyzikální realitu. Tak může být klasická elektrodynamika popsána z hlediska polí, z hlediska působení na dálku atd. Maxwell původně zaplnil prostor napínavými kladkami a Faraday siločarami, ale Maxwellovy rovnice samy jsou jaksi prvotní a nezávislé na slovním vyjádření, jež se je pokouší fyzikálně popsat. Jediným správným fyzikálním popisem je popis daný experimentálním významem veličin v rovnicích – nebo lépe způsob, jak se má rovnic užívat při popisu experimentálních pozorování. Jde-li o to, pak nejlepší postup je snažit se uhádnout rovnice a nebrat v úvahu fyzikální modely nebo popisy. McCullough např. uhádl správné rovnice pro šíření světla v krystalu dávno předtím, než jeho kolegové používající elastické modely, mohli tento jev popsat. A také Dirac získal rovnici pro popis elektronu téměř čistě matematickým návrhem. Stále nám chybí jednoduchý fyzikální pohled, kterým bychom mohli přehlednout celý obsah této rovnice.

Proto si myslím, že uhádnout rovnice je snad nejlepší metoda postupu, chceme-li

získat zákony pro tu část fyziky, která je dosud neznámá. Když jsem byl mladší, zkoušel jsem takto uhadnout rovnice a viděl jsem mnoho studentů, kteří to zkoušeli také. Je ale velmi snadné vyjet z kolejí a jít úplně nesprávným a nemožným směrem. Myslím, že nejde o to, jak najít nejlepší nebo nejeftivnější metodu pro postup objevování, ale najít vůbec nějakou metodu. Fyzikální zdůvodňování skutečně některým lidem pomáhá navrhnout způsoby, jak se neznámé vztahuje ke známému. Teorie známého, které je popsáno různými fyzikálními myšlenkami, mohou být navzájem ekvivalentní ve všech předpovědích a jsou tudíž vědecky nerozlišitelné. Nejsou však psychologicky identické, snažíme-li se z nich vyjít k neznámému. Neboť různá hlediska navrhuji různé typy modifikací a nejsou tedy ekvivalentní v hypotézách, jež z nich vyvodíme, snažíme-li se pochopit, co ještě není pochopeno. Proto si myslím, že pro dobrého teoretického fyzika je dnes užitečné mít k dispozici širokou oblast fyzikálních myšlenek a matematických výrazů téže teorie (např. kvantové elektrodynamiky). Na jednoho člověka je to asi příliš náročné. Dnešní studenti by jako celek měli tento přehled mít. Sleduje-li každý student tentýž běžný způsob vyjadřování a myšlení o elektrodynamice nebo teorii polí, pak je omezena různost hypotéz k pochopení – řekněme – silných interakcí. Snad je to tak správné, protože je snad velmi

pravděpodobné, že pravda leží v módním směru. Ale leží-li pravda v jiném směru, který je zřejmý – řekněme z nemoderního hlediska teorie polí, kdo ji najde? Jen ten, kdo se obětuje, aby studoval kvantovou mechaniku z podivného a neobvyklého hlediska, které si sám vynalezne. Říkám obětuje: velmi pravděpodobně z toho totiž nic nezíská, protože pravda může ležet v jiném směru, dokonce snad právě v tom módním.

Ale může-li být moje vlastní zkušenost vodítkem, není ta oběť tak velká, protože je-li ono zvláštní hledisko opravdu experimentálně ekvivalentní obvyklému hledisku v oboru poznání, pak je v tomto oboru vždycky mnoho aplikací a problémů, pro něž speciální hledisko představuje zvláštní sílu a jasnost myšlení, která je cenná sama o sobě. A hledátele kromě toho nové zákony, je vždycky skvělý pocit, že možná dosud nikdo nepřemýšlel o té bláznivé možnosti, kterou se právě teď zabýváte.

Co se tedy stalo se starou teorií, do níž jsem se v mládí tolik zamiloval? Nu – řekl bych, že se z ní stala stará dáma, na níž zbylo jen málo atraktivnosti, a mladíkovi se už nerozbuší srdce, když se na ni podívá. Ale můžeme o ní říci to nejlepší, co můžeme říci o staré ženě: že totiž byla velmi dobrou matkou a dala život některým velmi dobrým dětem. A já děkuji Švédské akademii věd, že jedno z nich poctila. Děkuji vám.