

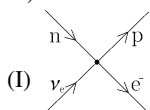
Mikrosvět (II)

V tomto pokračování seriálu o současném stavu fyziky vysokých energií se věnujeme jednomu z přelomových okamžiků nedávné minulosti - teoretické předpovědi a experimentálnímu potvrzení existence intermediálních bosonů W^\pm, Z^0 .

Úvod

Jak jsme si již řekli v dílu minulém, intermediální bosony W^+, W^-, Z^0 jsou částice zprostředkující **slabou interakci** a hrající stejnou roli jako fotony v interakci elektromagnetické. I když objev intermediálních bosonů je událostí již historickou (1983), znamenal potvrzení v současnosti užívaného modelu elektroslabých interakcí - tzv. **standardního modelu (SM)**¹ a právem si zaslouží samostatný díl.

Prvním úspěšným modelem popisujícím slabé interakce byl **Fermiho model**, který např. rozpad neutronu $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ popisoval v řeči Feynmanových diagramů (viz dále) takto:



Tuto teorii jsme ovšem při dosažení vyšších energií v experimentech museli opustit. Proč? To si řekneme po zavedení několika potřebných pojmů.

Poruchová teorie a Feynmanovy diagramy

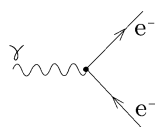
Ve fyzice se pro vyjádření vztahů mezi veličinami používají různé typy rovnic. Mohou to být rovnice algebraické, ale také rovnice diferenciální, integrální, či jejich vzájemné kombinace, které, což je podstatné, prakticky nikdy nelze vyřešit přesně. V takovém případě se musíme snažit alespoň o co nejpřesnější přibližné řešení.

Grafickou reprezentací přibližného řešení rovnic v kvantové teorii pole jsou **Feynmanovy diagramy**, přičemž každý diagram představuje určitý matematický výraz. Pro jejich ilustraci použijeme kvantovou elektrodynamiku (**QED**), popisující interakci elektronů s elektromagnetickým polem, a budeme se zabývat pružným rozptylem elektronu na elektronu, tj. situaci kdy se dva elektrony srazí a výsledkem jejich srážky jsou opět pouze dva elektrony:

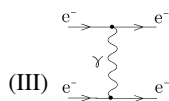
$$(1) \quad e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-.$$

Naší úlohou může být např. určení pravděpodobnosti P , že se elektrony po interakci budou pohybovat určitým směrem.

Protože interakci elektronu (e^-) s fotonem (γ) zobrazujeme pomocí diagramu:

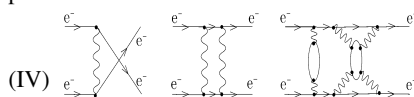


rozptyl (1) můžeme znázornit např. diagramem který odpovídá interak-



čujících dále.

Diagram (III) ale představuje pouze jednu z možností, jak popsat rozptyl (1), neboť existuje (nekonečně) mnoho dalších možností, např.:



Přesné řešení úlohy vzájemného rozptylu dvou elektronů by představovalo započtení všech možných diagramů se dvěma vcházejícími a dvěma vycházejícími elektrony, což však není početně zvládnutelné. To nám ale vůbec nemusí vadit!

Diagram (III) se skládá z tzv. vrcholů (uzlů) a vnějších a vnitřních linií. Všem jsou přiřazeny, na základě tzv. **Feynmanových pravidel** (pro QED), určité matematické výrazy (jejichž uvedení nám zde poslouží pouze pro ilustraci jejich formy), např.

vcházející elektron		$u(p)$
vycházející elektron		$\bar{u}(p')$
vnitřní fotonová linie		$g^{\mu\nu}/k^2$
vrchol		$\sqrt{\alpha} \gamma_\mu$

přičemž $u(p)$, resp. $\bar{u}(p')$ jsou funkce popisující vcházející resp. vycházející elektron, p, p' a k jsou tzv. čtyřhybnosti - vektory tvaru $p = (E, \vec{p})$ - vcházejícího, resp. vycházejícího elektronu a virtuálního fotonu; α je tzv. **konstanta jemné struktury** a $\{\gamma_\mu\}$ představují tzv. Diracovy matice.

Zdůrazníme, že uvedením těchto (pro někoho snad i lehce „odpudivých“ či zbytečných) podrobností se snažíme pouze ilustrovat tvar výrazů, s nimiž se v kvantové teorii běžně setkáváme a pro jejichž pochopení čtenář musí nahlédnout do příslušné učebnice.

Použitím výše uvedených pravidel snadno sestavíme příspěvek diagramu (III), který má tvar

$$(2) \quad \alpha \bar{u}(p') \gamma_\mu u(p) \frac{g^{\mu\nu}}{k^2} \bar{u}(q') \gamma_\nu u(q)$$

Všimněme si, že každý vrchol diagramu je úměrný $\sqrt{\alpha}$, a tedy čím více má (obecný) diagram vrcholů, tím menší je hodnota jeho příspěvku, neboť $\sqrt{\alpha} \approx 0.09$.

Proto, potřebujeme-li znát hodnotu P , nemusíme započítat příspěvky všech diagramů, ale jen těch, jejichž hodnotu jsme schopni reálně změřit. To dává našemu přibližnému řešení (započtení jen relevantních diagramů) dobrý fyzikální smysl.

Pozn.: Vcházející linii částice můžeme interpretovat zároveň i jako vycházející linii antičástice, což je také případ diagramu (I) a jeho linie elektronového antineutrína.

Renormalizace

Běžně se stává, že příspěvky odpovídající jednotlivým diagramům mají nekonečnou hodnotu. Takovým je např. třetí diagram na obrázku (IV).

Vzniklá situace je ovšem v rozporu s naší představou, že každý krok přiblížení přispívá menším a menším dílem k řešení. Vzniklá nekonečna však mohou mít docela dobrou fyzikální interpretaci.

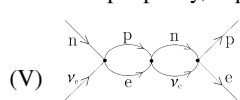
Představme si elektron pohybující se v krystalové mřížce. Jeho efektivní hmotnost se, díky interakci s mřížkou, liší od hmotnosti, kterou má ve vakuu. Jinak řečeno, pokud v parku vrazíme do hubeného pána, pak se, pokud jsme konstituice celkem normální, pán od nás odrazí a našeho vlastního pohybu se kolize přilíží nedotkne. Pokud se však spolu srazíme v nacpaném ranním pražském metru, pán, díky interakci s ostatními cestujícími, zůstane prakticky na místě a bude se nám proto jevit mnohem těžší. Totéž se děje s elektronem, a to v jakémkoliv prostředí. Pokud budeme zmenšovat velikost mřížky (či ekvivalentně zvyšovat hustotu lidí v metru), efektivní hmotnost elektronu poroste (naš pohyb v metru bude prakticky nemožný).

Elektron pohybující se ve vakuu interaguje s vlastním elektromagnetickým polem (to hraje roli prostředí, které ho obklopuje). Díky tomu jeho hmotnost vychází ve výpočtech nekonečná. Protože tuto interakci nemůžeme odstínit a měřená hmotnost elektronu je konečná, musíme se nekonečného příspěvku zbavit. Například tím, že srovnáme teoretický výsledek s měřením a na tomto základě změníme teorii tak, aby se její výsledek kryl s výsledkem experimentu. Tomuto postupu, při kterém kalibrujeme teorii, říkáme **renormalizace**, což symbolizuje proces opětovné (slůvko re) normalizace přibližného řešení - říkáme totiž, s čím porovnáváme měřenou veličinu. Můžeme se ptát, k čemu je nám teorie, do které musíme dosazovat výsledky experimentu. Tato otázka je zcela oprávněná, ale musíme si uvědomit, že nám stačí dosadit jen jednou! Představme si funkční váhu, jejíž měření však chceme dále zlepšit. Poté, co tak učiníme (což je ekvivalentní přidání diagramů s větším počtem vrcholů), zjistíme, že jsme váhu „rozhodili“, a proto musíme provést její opětovnou kalibraci. Na to stačí jediné měření, jehož výsledek známe (např. díky jiné váze), a váha bude opět plně funkční a navíc přesnější.

Slabá interakce

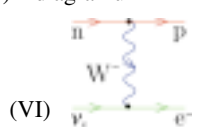
Vraťme se však k samotné slabé interakci. Pokud se pohybuje v rámci nízkých energií, Fermiho teorie nám pro vysvětlení experimentálních dat plně postačuje.

Při vyšší energii se ale začnou projevovat i dříve malé příspěvky, např. diagramy typu



a **čtyřfermionový typ interakce** (v jednom bodě spolu interagují 4 fermiony)

má tu vlastnost, že není poruchově renormalizovatelný, tj. výše naznačená procedura není proveditelná. To považujeme za nepřijatelné, a proto přecházíme k teorii, jež renormalizovatelná je a v níž místo čtyřfermionové interakce dochází k výměně částice². To v případě rozpadu neutronu znamená přechod od diagramu (I) k diagramu



kde W^- je tzv. intermedieální (zprostředkující) vektorový boson jehož náboj vyplývá ze zákona zachování. Znak W je zkratkou anglického „weak“ (slabý).

Diagram (VI) můžeme interpretovat tak, že neutron se nejprve rozpadne na proton a virtuální boson W^- , který se dále rozpadá na elektron a elektronové antineutrino.

Další možnou interpretací diagramu (VI) je interakce dvou typů proudů tzv. hadronového, tvořeného vrchní souvislou červenou linií, s proudem leptonovým vyznačeným modře. Oba proudy spolu interagují výměnou W^- . V tomto případě diagram (VI) může popisovat např. nepružnou srážku neutronu s elektronovým neutrinem, při níž vzniká proton a elektron. V případech kdy dochází ke změně náboje hadronů (leptonů) hovoříme o **interakci nabitých proudů**.

Jelikož příspěvek linie částice W^- (viz diagram (VI)) je ve skutečnosti obdobný fotonovému příspěvku (viz. výše uvedená Feynmanova pravidla), s tím rozdílem, že W^- má nenulovou hmotnost, můžeme psát, v případě že $k^2 \ll m_W^2$

$$(3) \frac{g^{\mu\nu}}{k^2 - m_W^2} \approx - \frac{g^{\mu\nu}}{m_W^2}$$

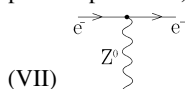
To znamená, že vnitřní linii v diagramu (VI) je pak přiřazena konstanta. Graficky znázorněno, přecházíme od diagramu (VI) k diagramu (I), a tedy v nízko-energetické oblasti přechází teorie obsahující vektorový boson na Fermiho teorii.

Kromě bosonu W^- musí teorie obsahovat také jeho antičástici W^+ . Existence dalšího neutrálního bosonu - Z^0 - vyplývá z požadavku symetrie slabých interakcí (budeme o ní mluvit příště). Právě důkaz existence „**neutrálních proudů**“, který SM předpovídal, byl důležitým momentem pro potvrzení jeho platnosti.

Objev částic W^\pm, Z^0

Procesem, ve kterém dochází k interakci

neutrálních proudů, je pružný rozptyl mionového neutrina na elektronu. V řeči Feynmanových diagramů jej můžeme zapsat (v rámci prvního přiblížení) ve tvaru



(VII) Tento proces by byl bez přítomnosti Z^0 možný jen ve vyšším přiblížení a tím by byl silně potlačen.

A právě v tomto procesu byly neutrální proudy nalezeny, a to v roce 1973 v bublinové komoře Gargamelle v evropské laboratoři CERN.



Foto CERN

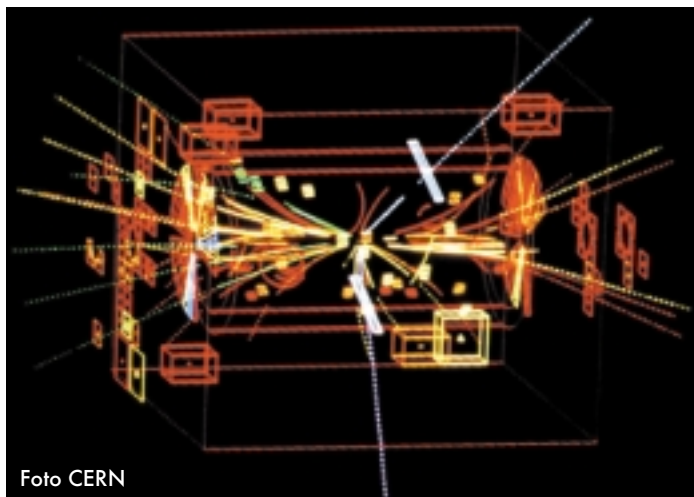


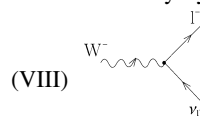
Foto CERN

Existence neutrálních proudů ovšem představovala pouze nepřímý důkaz správnosti SM pro níž byla naprosto zásadní otázka existence částic W^\pm a Z^0 . Proto vznikl v CERN projekt urychlovače umožňujícího studium srážek vstřicích svazků protonů a antiprotonů při energii (v těžišťovém systému) 540 GeV. Jeho duchovním otcem byl Carlo Rubbia.

Základ urychlovače *Sp̄pS* (Super proton antiproton Synchrotron) tvořil již tehdy existující urychlovač SPS (Super Proton Synchrotron). Velmi důležitou součástí zařízení byl akumulární prstenec, v němž se hromadily antiprotony tak, aby před finálním urychlením měl jejich svazek srovnatelnou intenzitu jako svazek protonů.

Právě získání svazku antiprotonů s požadovanými vlastnostmi představovalo značný technický problém. S jeho řešením přišel Simon van der Meer. Pomocí jím navrženého postupu se podařilo připravit antiprotonový

svazek s potřebnými parametry a první srážky protonů a antiprotonů v SPS byly registrovány v létě 1981. V prosinci 1982 už byla statistika pozorovaných případů srážek natolik vysoká, že mezi nimi bylo možno identifikovat signál produkce bosonů W^\pm , a sice na základě jejich rozpadů na nabitý lepton l a příslušné neutrina (to v komoře vidět nebylo; jeho existence ale vyplývala ze zákona zachování čtyřhybnosti).



(VIII) Oficiální oznámení bylo vydáno v lednu 1983 a o něco později byl také detekován neutrální vektorový boson Z^0 , pomocí rozpadů na páry $e^+ e^-$ (viz světlé přímkové na posledním obrázku).

Hmotnosti detekovaných intermedieálních bosonů přítom dobře souhlasily s předpovědí SM, kterou experimentátoři využili při hledání rozpadových produktů W^\pm a Z^0 . Potvrzení existence intermedieálních bosonů elektroslabých interakcí s hmotnostními předpověďmi teorií bylo skutečným triumfem SM a tato ohromující souhra abstraktní teorie a obtížného experimentu se dá považovat za jeden z největších výkonů fyziky 20. století

a moderní přírodovědy vůbec. Za svůj příspěvek k objevu W^\pm a Z^0 získali C. Rubbia a S. van der Meer Nobelovu cenu za fyziku v roce 1984.

A co dále?

Naši experimentální fyzikové se samotného objevení intermedieálních bosonů aktivně neúčastnili a stejně tak tomu bylo i v případě objevení t -kvarku. Nám však tento objev neuteché.

Takže, nashledanou příště, při hledání posledního z kvarků.

Zdroje

- www.cern.ch (obrázky),
- J. Hořejší, Historie standardního modelu, bude publikováno.
- Děkuji J. Dolejšimu, J. Formánkovi, J. Hořejšimu a M. Malinskému (MFF UK) za cenné připomínky při přípravě tohoto příspěvku.

¹ V současné době existují data, které mohou naznačovat nutnost zdokonalení SM. Jedná se o měření anomálního magnetického momentu mionu v Brookhavenu (tzv. g-2 experiment).

² Není to ale jediná změna. V nové teorii se objeví také nové částice, např. Higgsův boson.

TOMÁŠ SÝKORA, ÚČJF MFF UK ■
tomas.sykora@mff.cuni.cz