

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Ján Pišút

Objav intermediárneho bozónu

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 30 (1985), No. 1, 17–29

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139160>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1985

Institute of Mathematics of the Czech Academy of Sciences provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This document has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://dml.cz>

Objav intermediárneho bozónu

Ján Pišút, Bratislava

1. Úvod

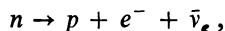
Uprostred roku 1983 bol v CERNe (Európsky ústav pre jadrový výskum) v Ženeve objavený tzv. intermediárny vektorový bozón a fyzici zaoberajúci sa elementárnymi časticami hneď hovorili o jednom z objavov storočia.

Toto tvrdenie má viacero dôvodov. Najzávažnejším z nich je to, že tento objav potvrdil jednu z dvoch základných predpovedí zjednotenej teórie elektromagnetických a slabých interakcií, vypracovanej v šesťdesiatych rokoch Glashowom, Weinbergom a Salamom.

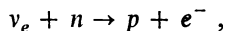
„Veľké zjednotenia“ boli vždy vo fyzike mimoriadnymi udalosťami, pripomeňme si aspoň

- zjednotenie „pozemskej“ a „nebeskej“ mechaniky v Newtonovej dynamike a v jeho gravitačnom zákone,
 - zjednotenie elektrických, magnetických a svetelných javov v Maxwellovej elektrodynamike,
 - zjednotenie teórie tepelných javov a mechaniky v kinetickej teórii plynov
- a určite by sa dalo vymenovať ešte niekoľko ďalších.

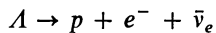
Objav intermediárneho bozónu je potvrdením ďalšej veľkej syntézy: zjednotenia všetkých elektromagnetických javov so slabými interakciami elementárnych častíc. Elektromagnetické javy sú nám všetkým dobre známe, preto pripomeňme len stručne niečo o slabých interakciách. Sú zodpovedné za rozpad neutrónu



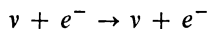
za dnes už podrobne známu reakciu



za všetky beta-rozpady jadier, za mnohé slabé rozpady elementárnych častíc, napríklad



aj za reakcie s „neutrálnymi prúdmi“



atď.*)

*) Pri zápise reakcií sme použili symboly: n – neutrón, p – protón, e^{-} – elektrón, ν_e – elektrónové neutríno, $\bar{\nu}_e$ – príslušné antineutríno, Λ – lambda hyperón (má podobné vlastnosti ako neutrón a protón); v ďalšom e^{+} označuje pozitron, μ^{+} , μ^{-} kladný a záporný mión, symbol m_p označuje hmotnosť protónu atď.

Hlavným aspektom objavu intermediárneho bozónu je teda potvrdenie zjednotenej teórie elektromagnetických a slabých interakcií. O tejto teórii si povieme niečo až nakoniec, zatiaľ uveďme len toľko, že táto teória predpovedala existenciu troch častíc W^+ , Z^0 , W^- s veľmi špecifickými vlastnosťami:

hmotnosti častíc: $m_{W^\pm} \approx 83 \text{ GeV}/c^2$, $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$,

$$m_{Z^0} \approx 93 \text{ GeV}/c^2,$$

typy rozpadu (okrem iných)

$$W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e, \quad W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e,$$

$$W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu, \quad W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu,$$

$$Z^0 \rightarrow e^+ + e^-,$$

$$Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$

a podľa týchto vlastností boli nájdené W a Z bozóny v polovici roku 1983.

Všimnime si ich obrovskú hmotnosť. V jednotkách GeV/c^2 má protón hmotnosť

$$m_p = 0,938 \text{ GeV}/c^2,$$

a preto platí

$$m_W \doteq 88,5 m_p,$$

$$m_Z \doteq 99,1 m_p.$$

Hmotnosti W - a Z -bozónov sú teda takmer 100krát väčšie, ako je hmotnosť protónu (hmotnosť jadra kryptónu je $83,8 m_p$ a jadra striebra $107,9 m_p$).

Mohli by sme si povedať: „No dobre, zas jedna teoretická predpoveď bola potvrdená – no a čo?“, ale aby bolo toto potvrdenie vidno z iného hľadiska, dovoľm si trochu odbočiť.

Predstavme si geológa, ktorý podrobne preskúma plochu o rozmeroch $10 \times 10 \text{ km}^2$ a po istom uvažovaní povie: „Vo vzdialenosti 90 km odtiaľto, presne týmto smerom, sa nachádza veľký vrch, ktorý vyzerá tak a tak (a presne ten vrch popíše).“ Ľudia, čo ho počujú, sa vyberú tým smerom a skutočne vrch na udanom mieste a s udanými vlastnosťami nájdu.

Niečo veľmi podobné sa stalo pri objave intermediárneho bozónu. Pri vzniku teórie Glashowa, Salama a Weinberga (GWS) boli známe vlastnosti častíc a ich interakcií len zhruba do energií okolo 10 GeV a najťažšie častice – ak atómové jadrá za častice nerátame –, ktoré boli koncom 60. rokov známe, mali hmotnosť okolo 2 GeV .

Pri predpovedi W^\pm - a Z -bozónov boli fyzici vedení len dovtedajšími údajmi a teoretickými predpokladmi, ktoré by sa v mnohom dali považovať za „estetické“: viera v existenciu zjednotenej teórie elektroslabých interakcií, viera v kalibračný princíp a viera v renormalizovateľnosť teórie.

V tomto zmysle je objav W -bozónu triumfom rozumu. K tomu sa ešte vrátíme, teraz si všimneme druhý aspekt – objav W -bozónu je totiž tiež triumfom praxe, triumfom empirie všeobecne a experimentálnej fyziky, techniky a technológie 20. storočia zvlášť.

2. Experimenty vedúce k objavu W -bozónu

Vzhľadom na to, že W -bozón má obrovskú pokojovú hmotnosť, je možné ho vyprodukovať len v tých zrážkach elementárnych častíc, pri ktorých sa uvoľňuje prinajmenšom energia $\Delta E = m_W c^2$. Žiadny z urýchľovačov častíc, ktoré v súčasnosti vo svete pracujú, nebol konštruovaný pre štúdium takýchto zrážok, ale aj tak sa podarilo ich uskutočniť doplnením a prispôbením už existujúceho zariadenia.*) V CERNe bol v 70. rokoch postavený nový urýchľovač nazývaný SPS (superprotónový synchrotrón), ktorý bol schopný urýchľovať protóny až na energiu 400 GeV. Pri zrážke 400 GeV protónu so stojacim terčom sa však uvoľňuje iba okolo 30 GeV energie na produkciu častíc, takže W -bozóny tu produkovať nemožno.

V roku 1976 si ale Carlo Rubbia všimol, že nedávny vývoj v urýchľovačovej technike a technológii umožňuje úplne novú vec. Išlo o toto: V SPS sa protóny pohybujú po približne kruhovej dráhe vnútri urýchľovača. Na tejto kruhovej dráhe ich udržiava magnetické pole. Energia protónov sa zvyšuje pôsobením pulzov elektrického poľa v niekoľkých miestach ich kruhovej dráhy.

Keby sa podarilo, a v tom bola Rubbiova myšlienka, dostať do urýchľovača aj zväzok antiprotónov, a pritom tak, aby sa pohybovali proti protónom, potom by sa v jedinej kruhovej trubici urýchľovača dali urýchľovať aj protóny aj antiprotóny. Vtip je v tom, že to isté magnetické pole udrží v trubici aj protóny aj antiprotóny, ak majú opačné rýchlosti. To vidno už z tvaru Lorentzovej sily

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B},$$

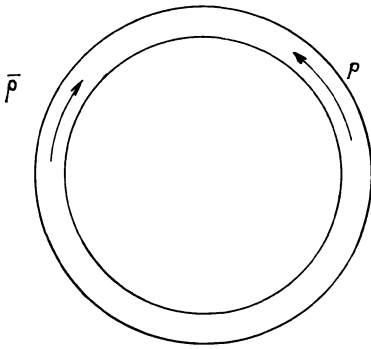
kde \mathbf{F} označuje silu pôsobiacu na časticu s nábojom q , \mathbf{v} je rýchlosť častice a \mathbf{B} je indukcia magnetického poľa. Výraz pre Lorentzovu silu ukazuje, že \mathbf{F} sa nezmení, ak zmeníme súčasne znamienko náboja a rýchlosti častice (obr. 1). Situácia je v skutočnosti o čosi zložitejšia než obr. 1, ale základná myšlienka je naozaj takáto.

Pred 20 rokmi by takýto nápad bol považovaný za nepodarený vtip. Je totiž dobre známe, že protóny možno dostať, ak dajakým spôsobom odstránime jeden elektrón z atómu vodíka, a vodíka je na svete dosť.

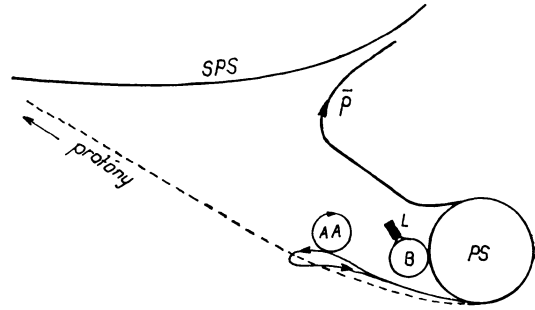
Ale s antiprotónmi je to podstatne horšie, jediný spôsob ich „výroby“ spočíva v tom, že na nejaký terč dopadajú vysokoenergetické protóny a medzi produktami reakcie sa objavajú aj nejaké antiprotóny. Ak sa ale antiprotón dostane do interakcie s „obyčajným“ materiálom, okamžite sa stráca.

V roku 1972 publikoval vynikajúci urýchľovačový fyzik Simon van der Meer prácu o „stochastickom chladení“ častíc, ktorá sa neskôr ukázala byť podstatnou pre vytvorenie antiprotónových zväzkov požadovaných vlastností. Rubbia o týchto prácach vedel, a keď v r. 1976 so spolupracovníkmi navrhoval využitie SPS ako zariadenia na zrážky protibežných zväzkov protónov a antiprotónov, bolo získanie antiprotónových zväzkov a ich urýchľovanie považované za realizovateľný projekt. Po preverení mechanizmu stochastického chladenia na menšom urýchľovači bol projekt v CERNe schválený.

*) Urýchľovače konštruované špeciálne pre štúdium vlastností W - a Z -bozónov budú dokončené až koncom osemdesiatych rokov.



Obr. 1. To isté magnetické pole udržuje v trubici aj protóny aj neutróny, ak sa pohybujú rovnakou rýchlosťou, ale opačným smerom.



Obr. 2. Schéma urýchľovača s protibežnými zväzkami protónov a antiprotónov.

Urýchľovačové štádium v súčasnosti pracuje nasledovne (pozri obr. 2):

Protóny sa najprv urýchľujú na 0,8 GeV v predurýchľovači (L, B), potom prechádzajú do protónového synchrotrónu (PS), kde dosiahnu energiu 26 GeV, odtiaľ sú vedené na kovový terč tesne pred AA (antiprotónový akumulátor). Zo spršky častíc, ktoré vznikajú pri náraze protónov na terč, sa magnetickým fokusačným systémom vyberú antiprotóny s energiou okolo 3,5 GeV a tie sa akumulujú do hrčiek (bunches) s malým priestorovým rozmerom v AA . Každý pulz protónov dopadajúci na terčik obsahuje okolo 10^{13} častíc, zo zrážok v terči vznikne iba 10^7 antiprotónov, ktoré sa ďalej dajú použiť. Asi tri dni trvá, kým sa v AA nazhromaždia hrčky so $6 \cdot 10^{11}$ antiprotónmi. Aby sa antiprotóny nestrácali, musí byť v AA vákuum okolo 10^{-10} torr. Energia antiprotónov sa stále udržuje na 3,5 GeV, lebo úlohou AA nie je zvyšovať energiu častíc, ale vytvárať hrčky s tvarom nevyhnutným pre ďalšie urýchľovanie. Po troch dňoch skladovania v AA sa antiprotóny vracajú do PS , kde sú urýchlené až na energiu 26 GeV. Odtiaľ prechádzajú do SPS , kde sa ich energia zdvihne až na 270 GeV. V tom istom čase sa do SPS vstriknu aj protóny a dômyselný urýchľovací systém zvyšuje zároveň aj energiu protónov aj antiprotónov. Obidva zväzky sa napokon „stlačia“ tak, aby mali čo najmenšie prierezy a tieto stlačené zväzky sa zrážajú presne v miestach, kde sú podzemné experimentálne laboratóriá. V SPS vtedy cirkulujú tri hrčky protónov (každá obsahuje asi $4 \cdot 10^{11}$ častíc) a tri hrčky antiprotónov (každá má asi $4 \cdot 10^{10}$ častíc) a tie sa zrážajú asi $6 \cdot 10^3$ krát za sekundu. Výsledná luminozita $L \approx 10^{-29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ udáva experimentátorom počet očakávaných reakcií určitého typu. Ak má reakcia účinný prierez σ , potom za 1 s nastane $L\sigma$ reakcií tohto typu.

To je len prvá časť problému – získanie zrážok protibežných zväzkov protónov a antiprotónov. Druhá časť je štúdium toho, čo sa v samotnej zrážke stane a nájdenie W -bozónu alebo Z -bozónu.

Detektory, v ktorých boli W - a Z -bozóny objavené, sa skráteno nazývajú $UA-1$ a $UA-2$, a to podľa podzemných laboratórií (underground, antiproton), v ktorých boli

umiestnené. Podstatne zjednodušená schéma *UA-1* je na obr. 3. Grupa *UA-1* obsahuje asi 100 ľudí z rôznych laboratórií, jej vedúcim je Carlo Rubbia. Spolupracujúce laboratóriá sú:

Aachen, Annecy, Birmingham, CERN, London (Queen Mary College), Paris (Collège de France), Riverside – California, Rome, Rutherford Lab., Saclay-France, Vienna, Helsinki, Harvard-USA, Wisconsin.

Systém použitý pri výstavbe *UA-1* je takýto (citát od Rubbia): Je to systém krabíc, z ktorých každá robí to, čo predchádzajúce nevedia. Centrálny detektor je urobený tak, že registruje nabité častice a určí ich dráhu v magnetickom poli. Zo zakrivenia dráh sa získa v centrálnom detektore istá informácia o hybnostiach jednotlivých častíc.

Obr. 3. Veľmi zjednodušená schéma *UA-1* zariadenia. Detektor má tvar válcu s dĺžkou okolo 15 m a priemerom okolo 10 m.

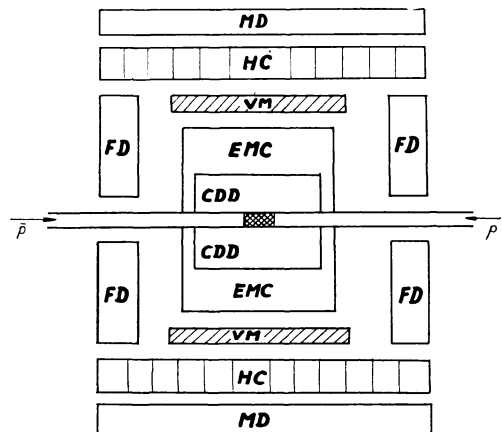
CDD – Centrálny dráhový detektor (určí dráhu častíc)

EMC – elektromagnetický kalorimeter (meria energiu e^+ , e^-)

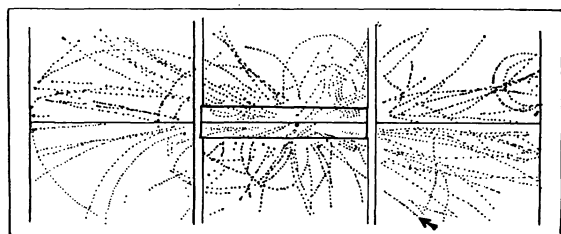
VM – vinutie magnetu (pole ako v sole-noide)

HC – hadrónový kalorimeter

MD – miónový detektor



Obr. 4. Typický výsledok zrážky protónu s antiprotónom pri energiách (v systéme ťažiska) okolo 540 GeV. Šípka označuje stopu vysokoenergetického elektrónu, ktorú bolo potrebné oddeliť od všetkého ostatného.



Ostatné detektory určia presnejšie energiu častíc (kalorimetre) a celá informácia o jedinej zrážke je zachytená elektronikou a skombinovaná v počítači do celkového obrazu. Úloha výpočtovej techniky je tu oveľa väčšia ako v experimentoch pri nižších energiách. Prečo tomu tak je, ukazuje obr. 4, kde vidno celkom typický príklad výsledku jednej zrážky. Treba zdôrazniť, že to, čo je vidieť na obrázku, je výsledok práce počítača, ktorý skombinoval údaje jednotlivých detektorov do jediného obrazu.

Úloha nájsť *W*-bozóny sa napokon ukázala byť technicky ľahšou, ako sa pôvodne očakávalo. Vďaka tomu, že *W*-bozón má hmotnosť $83 \text{ GeV}/c^2$ pri rozpade podľa schémy

$$W_{\mp} \rightarrow e_{\mp} + \nu(\bar{\nu})$$

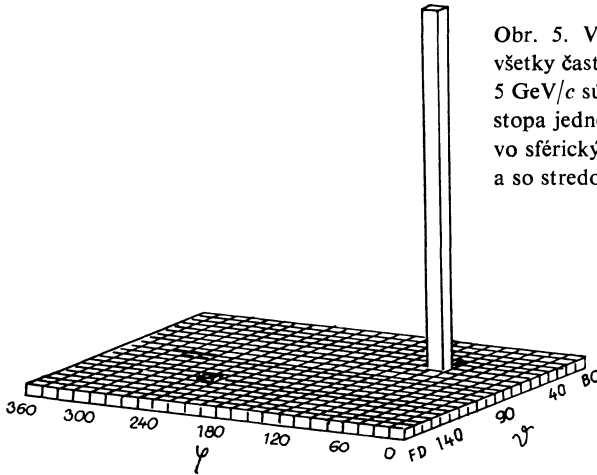
bude mať elektrón hybnosť okolo $40 \text{ GeV}/c$. W -bozóny sa týmto kanálom rozpadajú prakticky izotropne, a preto sa často objavujú v ich rozpadoch elektróny s hybnosťou okolo $40 \text{ GeV}/c$ v smere takmer kolmom na os zrážky. Pre zrážky pri týchto energiách sú ale priečne hybnosti ostatných produkovaných častíc zväčša len okolo niekoľko GeV/c , a preto prítomnosť elektrónu s veľkou priečnou hybnosťou signalizuje rozpad W -bozónu. Typický prípad je na obr. 5, kde sú na plochu vynesené uhly udávajúce určitý smer v detektore (ekvivalentné súradniciam na ploche valca) a smerom nahor sa vynáša priečna hybnosť častice. Z grafu boli vynechané všetky častice s priečnymi hybnosťami menšími ako 5 GeV a ostal len elektrón pochádzajúci z rozpadu W -bozónu. Neutrino, ktoré vzniká v rozpade W -bozónu, nie je detektormi registrované, ale nepriamo sa jeho prítomnosť dá zistiť zo zdanlivého narušenia zákona zachovania hybnosti pri zrážke.

Ešte jednoduchšia je situácia v prípade produkcie a rozpadu Z^0 mezónu podľa schémy



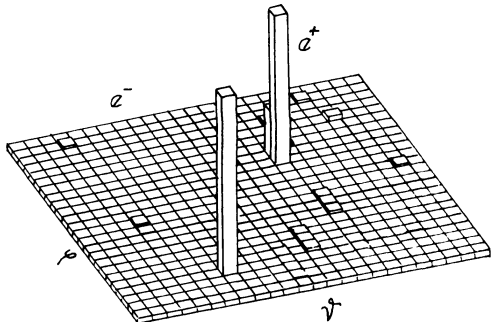
Typický obrázok po vynechaní častíc s malými priečnymi hybnosťami je na obr. 6.

A to je v hrubých rysoch náčrt cesty, ktorou boli W^\pm - a Z - bozóny objavené.



Obr. 5. Výsledok $p\bar{p}$ zrážky vyneseny tak, že všetky častice s priečnou hybnosťou menšou ako $5 \text{ GeV}/c$ sú vynechané. Ukázalo sa, že ostala len stopa jedného elektrónu. Uhly φ, ϑ sú zavedené vo sférických súradniciach s osou v smere zrážky a so stredom v mieste zrážky.

Obr. 6. Podobne ako na obr. 5 zakreslené e^+e^- pochádzajúce z produkcie Z^0 -bozónu v $p\bar{p}$ zrážke a rozpadu $Z^0 \rightarrow e^+e^-$.



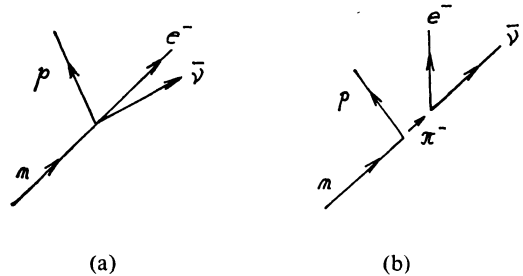
3. Ako sa dostali W- a Z-bozóny do zjednotenej teórie elektroslabých interakcií

Prvú teóriu slabých interakcií navrhol Fermi už r. 1934. Podľa nej bola slabá interakcia „bodová“ – vlnové funkcie všetkých častíc, ktoré sa na interakcii zúčastňovali, vstupovali do interakčného hamiltoniánu v jedinom bode. Napríklad pre rozpad neutrónu na protón, elektrón a antineutrino mal interakčný hamiltonián tvar

$$(1) \quad H_I = G \int d^3x (\psi_p^* \Gamma_1 \psi_n) (\psi_e^* \Gamma_2 \psi_e).$$

G je väzbová konštanta slabých interakcií a ψ_e je vlnová funkcia elektrónu v koncovom stave reakcie. Podobne sú označené aj vlnové funkcie ostatných častíc. Index označuje typ častice, hviezdička hermitovské združenie a Γ_1, Γ_2 matice 4×4 , ktoré pôsobia na indexy spinorov. V tejto teórii neexistovali žiadne „intermediárne“ častice, ktoré by interakciu sprostredkovali. V r. 1935 Yukawa navrhol mezónovú teóriu jadrových síl a urobil tiež predpoklad o tom, že π -mezón (dnešné označenie) je časticou, ktorá sprostredkuje slabé interakcie. Podľa jeho návrhu rozpad neutrónu prebieha v dvoch štádiách: v prvom neutrón vyšle (virtuálny) π^- mezón a zmení sa na protón, v druhom sa tento π^- mezón rozpadne na elektrón a antineutrino (pozri obr. 7a, 7b).

Obr. 7. Schematické zhrázornenie (a) štvorfermiónovej lokálnej interakcie zodpovednej za rozpad neutrónu vo Fermiho teórii, (b) mechanizmu nvrhnutého Yukawom. π^- -mezón tu hrá úlohu intermediárnej častice.



Podrobné štúdium slabých interakcií však v päťdesiatych rokoch ukázalo, že tvar Γ -matic v (1) je taký, že intermediárna častica by mala mať vektorový charakter. Vzhľadom na to, že aj fotón zodpovedný za elektromagnetické interakcie je opísaný 4-vektorom elektromagnetických potenciálov, objavila sa prirodzene myšlienka o príbuznom mechanizme slabých a elektromagnetických interakcií. Takýto mechanizmus je znázornený na obr. 8 a skladá sa z dvoch štádií: v prvom neutrón emituje W^- -bozón a sám sa pritom zmení na protón, v druhom sa W^- rozpadne na $e^- + \bar{\nu}$. Fundamentálna interakcia má potom dva členy

$$(2) \quad H_I = g \int \psi_p^* \Gamma \psi_n W d^3x + g \int \psi_e^* \Gamma' \psi_e W d^3x,$$

ktoré „pracujú“ v dvoch spomínaných štádiách interakcie.

Teória tiež naznačuje, aká by rádove mala byť hmotnosť W -bozónu. Amplitúda procesu vo Fermiho kontaktnej interakcii je daná väzbovou konštantou

$$(3) \quad G = 10^{-5} m_p^{-2}.$$

Podľa teórie s intermediárnym bozónom je táto amplitúda daná výrazom

$$(4) \quad g^2 \frac{1}{m_W^2 - q^2} \approx \frac{g^2}{m_W^2},$$

kde q^2 je štvorec štvorhybnosti intermediárneho W -bozónu na obr. 8. Pretože $|q^2| \ll m_W^2$ pri rozpade neutrónu môžeme tu q^2 zanedbať proti m_W^2 .

Z porovnania (3) a (4) máme $G \approx g^2/m_W^2$. Ak má byť ale takáto teória príbuzná elektromagnetickým interakciám, musí byť g zhruba rovnako veľké ako konštanta elektromagnetických interakcií e . Takto dostaneme pre m_W podmienku

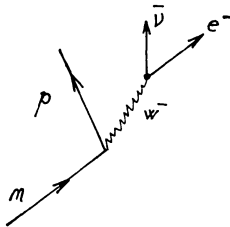
$$(5) \quad G \approx e^2/m_W^2 \Rightarrow m_W^2 \approx e^2/G.$$

Ak za e^2 dosadíme $1/137$ (používame jednotky $\hbar = c = 1$), dostaneme z (5) odhad

$$(6) \quad m_W \approx 30m_p.$$

Odhad je prirodzene len rádový.

Nenulová hmotnosť W -bozónu ale zdanlivo úplne zabraňuje vybudovať skutočne zjednotenú teóriu slabých a elektromagnetických interakcií. Nulovosť hmotnosti fotónu je totiž jeho základnou vlastnosťou.



Obr. 8. Rozpad neutrónu v teórii s intermediárnym bozónom.

Do tohto štádia dospeli pokusy, kulminujúce v práci Glashowa, začiatkom šesťdesiatych rokov. Bolo možné si vybrať jednu z dvoch málo príťažlivých možností:

- buď mať teoreticky plne uspokojivú schému, v ktorej majú W -bozóny nulovú hmotnosť, teória ale potom úplne protirečí experimentu,
- alebo dať „rukou“ W -bozónom nenulovú hmotnosť a dostať súhlas s vzťahmi (5), (6), ale schéma je potom teoreticky nesympatická, lebo nie je renormalizovateľná (t.j. výpočty vyšších korekcií obsahujú úplne ľubovoľné parametre).

Nová myšlienka, ktorá viedla neskôr až k teórii Glashowa-Weinberga-Salama prišla z teórie tuhých látok. V teórii supravodivosti sa totiž ukázalo, že v supravodičoch existuje kondenzát Cooperových párov elektrónov, a keď sa elektromagnetické pole šíri v supravodiči, získava fotón nenulovú efektívnu hmotnosť (to je zodpovedné za Meissnerov jav, pri ktorom magnetické pole nepreniká do vnútra supravodiča). Pritom ale v interakčnom lagranžiáne figuruje vždy len bezhmotové elektromagnetické pole.

Táto idea bola napokon vtelená v prácach Weinberga (1967) a Salama (1968) do zjednotenej teórie elektroslabých interakcií. Teória obsahuje „na počiatku“ bezhmotové intermediárne bozóny W^+ , W^0 , W^- a bezhmotový fotón. Vzhľadom na to, že tieto vektorové častice sú bezhmotové, je teória renormalizovateľná. Tieto vektorové mezóny interagujú aj s poľom Higgsových častíc (skalárne Higgsove častice sú analógom Cooperových párov). Ak lagranžián vyberieme tak, aby to odpovedalo vytvoreniu konden-

zátu Higgsových častíc, potom intermediárne bozóny získajú „efektívnu hmotnosť“ rôznu od nuly a teória má reálnu nádej súhlasiť s experimentom. V ďalšom sa už ukázali len dve podstatné skutočnosti: 1. teória prešla úspešne všetkými experimentálnymi previerkami, 2. ako ukázal 't Hooft (r. 1972), prechod Higgsovho poľa do kondenzátu nepokazí pôvodnú renormalizovateľnosť teórie. Glashow raz povedal, že 't Hooft týmto premenil Weinbergovu a Salamovu žabu na krásneho princa.

Experimentálny objav W -bozónu v lete 1983 potvrdil jednu zo základných črt zjednotenej teórie elektroslabých interakcií.

O druhej, a snáď ešte vážnejšej črte, o Higgsových časticiach, zatiaľ niet žiadnej experimentálnej informácie. Problém je v tom, že teória má presnú predpoveď pre hmotnosť W -bozónu (a podľa tejto predpovede bol aj W -bozón nájdený), ale nemá predpoveď pre hmotnosť Higgsovej častice. Je to tým, že do výrazu pre hmotnosť W -bozónu vstupuje len hustota kondenzátu Higgsových častíc, ale nie samotná hmotnosť týchto častíc.

Teraz si ešte všimneme niektoré základné myšlienky zjednotenej teórie elektroslabých interakcií aj s použitím príslušného formálneho aparátu.*) Začneme s pripomienkou o kalibračnej invariantnosti elektromagnetických interakcií. V rámci špeciálnej teórie relativity je elektromagnetické (ďalej len EM) pole popísané tenzorom intenzít poľa

$$(7) \quad F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu,$$

kde A_μ je štvorpotenciál poľa. Intenzity $F_{\mu\nu}$ ostávajú nezmenené pri kalibračných transformáciach

$$(8) \quad A_\mu \rightarrow A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \Lambda,$$

kde $\Lambda(x)$ je ľubovoľná skalárna funkcia priestorových súradníc a času a $\partial_\mu \Lambda \equiv \partial \Lambda / \partial x^\mu$. Hustota lagranžiánu EM poľa

$$(9) \quad L_{\text{EM}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

je tiež invariantná voči transformáciám (8). Požiadavka invariantnosti L voči týmto transformáciám nám zabraňuje pridať do (9) člen

$$(9') \quad \Delta L = \frac{m^2}{2} A_\mu A^\mu,$$

ktorý by dal fotónu nenulovú hmotnosť m . Takto súvisí kalibračná invariantnosť teórie s nulovosťou kludovej hmotnosti fotónu. Lagranžián Diracovho poľa, popísaného štvorkomponentným spinorom ψ , interagujúceho s EM poľom popísaným potenciálmi A_μ

$$(10) \quad L = \bar{\psi} [i\gamma^\mu (\partial_\mu - ieA_\mu) - m] \psi - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

je invariantný voči kalibračným transformáciám

$$(11) \quad A_\mu \rightarrow A'_\mu = A_\mu + \frac{1}{e} \partial_\mu \alpha$$

$$\psi \rightarrow \psi' = e^{i\alpha} \psi,$$

*) Zvyšok odstavca možno aj preskočiť.

kde $\alpha = \alpha(x, y, z, t)$ je ľubovoľná skalárna funkcia. Táto kalibračná invariantnosť pochádza z toho, že do (10) vstupuje iba tzv. kovariantná derivácia

$$(12) \quad D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu$$

a pre ňu platí pri (11)

$$(13) \quad D_\mu \psi \rightarrow D' \psi' = e^{i\alpha} D_\mu \psi .$$

Interakcia EM poľa so skalárnym tzv. Higgsovým poľom ϕ musí potom obsahovať tiež len kovariantné derivácie a má tvar

$$(14) \quad \Delta L = \frac{1}{2} (D_\mu \phi)^* (D_\mu \phi) - V(\phi) ,$$

kde $V(\phi)$ už neobsahuje priestoročasové derivácie poľa ϕ .

Mechanizmus, ktorým Higgsovo pole môže dať nenulovú hmotnosť EM poľu, spočíva teraz v nasledujúcom: Nech $V(\phi)$ má taký tvar, že pole ϕ má v minime $V(\phi)$ nenulovú hodnotu. Táto hodnota bude práve „hustotou“ kondenzátu Higgsových častíc. Pre pole ϕ potom môžeme písať

$$\phi = \langle \phi \rangle + \eta ,$$

kde $\langle \phi \rangle$ je hustota kondenzátu a η popisuje excitácie tohto kondenzátu.

Prvý člen na pravej strane (14) po rozpísaní kovariantnej derivácie bude

$$\frac{1}{2} \{ (\partial_\mu + ieA_\mu) (\langle \phi \rangle^* + \eta^*) \} \{ (\partial^\mu - ieA^\mu) (\langle \phi \rangle + \eta) \}$$

a ako ihneď vidno obsahuje člen

$$\frac{1}{2} e^2 \langle \phi \rangle^* \langle \phi \rangle A_\mu A^\mu$$

a toto je presne člen typu (9b), ktorý odpovedá nenulovej hmotnosti fotónu, pričom

$$m = e |\langle \phi \rangle| .$$

Vo Weinbergovom-Salamovom modeli je situácia o čosi komplikovanejšia, lebo namiesto jediného fotónu máme triplet vektorových bozónov, ale idea je v podstate tá, čo sme naznačili vyššie. Hmotnosť Higgsovho bozónu je schovaná vo výrazoch typu $V(\phi)$ v (14), ale ako vidno z predchádzajúceho, pre sektor EM a slabých interakcií je podstatný len parameter $\langle \phi \rangle$.

Poznamenajme ešte, že v modeli Salama a Weinberga hrá Higgsovo pole ešte jednu dôležitú úlohu: dáva hmotnosť fermiónom. Mechanizmus je jednoduchý. Predpokladá sa, že pred vznikom kondenzátu Higgsovho poľa majú všetky fermióny nulové hmotnosti a interagujú s poľom Higgsových častíc Yukawovou väzbou

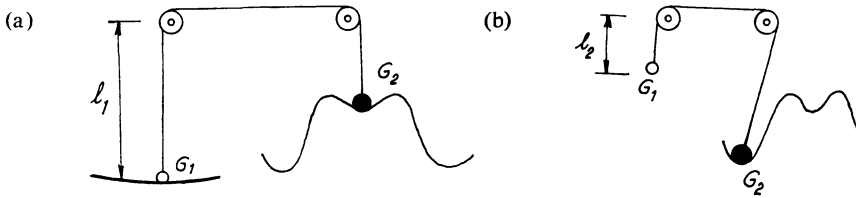
$$a_i \phi \bar{\psi}_i \psi_i ,$$

kde a_i sú bezrozmerné väzbové konštanty, ϕ označuje vlnovú funkciu Higgsovho poľa, ψ_i je spinorné pole fermiónu typu i . Po vzniku kondenzátu tieto interakčné členy prejdú na tvar (pozri (15))

$$a_i \langle \phi \rangle \bar{\psi}_i \psi_i + a_i \eta \bar{\psi}_i \psi_i ,$$

kde prvý člen odpovedá hmotnostiam fermiónov rovným $m_i = a_i \langle \phi \rangle$ a druhý už opisuje interakciu s excitáciami Higgsovho poľa.

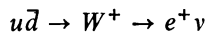
Na záver odstavca ešte uvedieme jednoduchú mechanickú analógiu generácie hmotnosti vektorových mezónov. Predstavme si dve viazané guľôčky pohybujúce sa (v jednom rozmere) na čiare naznačenej na obr. 9. Kým guľôčka G_2 (ťažká) kmitá v polohe naznačenej na obr. 9a, guľôčka G_1 (ľahká) kmitá na niti o dĺžke l_1 s istou frekvenciou ω_1 . Ak guľôčka G_2 preskočí do polohy naznačenej na obr. 9b, guľôčka G_1 bude kmitať na niti o dĺžke l_2 a jej frekvencia už bude iná. To, čo sa deje pri Higgsovom mechanizme, je niečo podobné. Analógom guľôčky G_2 je Higgsovo pole, ktoré môže „preskočiť“ do stavu odpovedajúceho kondenzátu a tým mení energie kmitov vektorového poľa (hmotnosť častice vidno z jej energetického spektra).



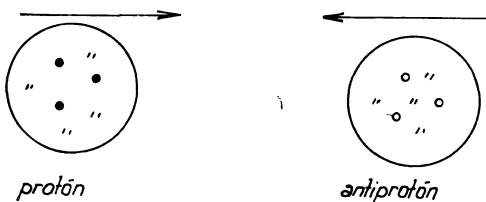
Obr. 9. Schematický model typu „špagátik a vosk“ pre mechanizmus spontánneho narušenia symetrie.

4. Perspektívy na najbližšie obdobie

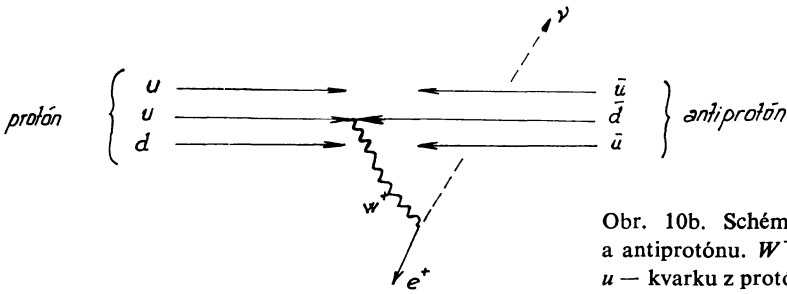
Protón-antiprotónové zrážky nie sú ideálnym spôsobom štúdia vlastností W -bozónov. Vidno to hoci aj z obr. 4, kde sa okrem W produkuje aj mnoho ďalších častíc. Prečo je to tak, ukazuje obr. 10. Podľa súčasných predstáv sa protón skladá z troch tzv. valenčných kvarkov, z gluónov a z kvark-antikvarkových párov. Podobne sa antiprotón skladá z troch valenčných antikvarkov, gluónov a párov. Pri zrážke protónu a antiprotónu vzniká W bozón z jedného kvarku typu u a jedného antikvarku typu \bar{d} (obr. 10b)



a tento W^+ sa neskôr rozpadá na pozitron a neutríno. Ostatné kvarky, antikvarky a gluóny sa pri zrážke zmenia na mnoho hadrónov. Podstatne „čistejšiu“ produkciu W a Z bozónov možno očakávať v zrážkach elektrónov s pozitronmi. Tam je možnosť

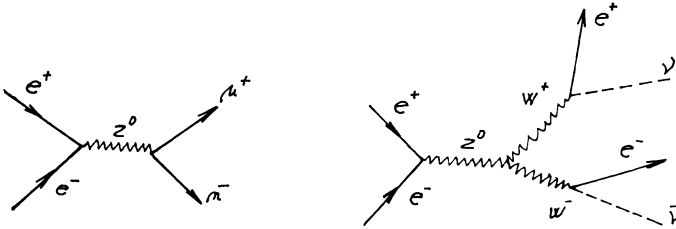


Obr. 10a. Protón a antiprotón pred zrážkou (plné guľôčky sú kvarky, prázdne antikvarky).



Obr. 11. Produkcia Z^0 , W^+ , W^- v e^+e^- zrážkach pri vysokých energiách.

Obr. 10b. Schéma zrážky protónu a antiprotónu. W^+ vzniká pri zrážke u – kvarku z protónu a d – antikvarku z antiprotónu. Zrážka vedie k tomu, že ostatné kvarky a antikvarky sa menia na mnoho ďalších hadrónov.



produkcie podľa znázornenia na obr. 11 a proces je „čistejší“ ako v hadrónových zrážkach.

V súčasnosti sa v CERNe stavia zariadenie *LEP* na štúdium zrážok vysokoenergetických elektrónov a pozitronov (obvod tunelu 27 km, dokončenie plánované na koniec 80. rokov).

Podobné zariadenia sa stavajú alebo pripravujú aj inde vo svete, napr. v Stanforde a v Novosibirsku. Čs. fyzika vysokých energií sa bude orientovať na prácu na novom urýchľovačovom komplexe *UNK*, ktorý je vo výstavbe v Protvine v podmoskovskej oblasti. Tento komplex bude hotový v 90. rokoch. Práca na *UNK* bude veľmi náročná a bude vyžadovať znalosti špičkovej metodiky experimentu, i výpočtovej techniky. Je preto veľmi žiadúce, aby sa mladí talentovaní a perspektívni experimentátori pracujúci vo fyzike vysokých energií zapojili do programu experimentov na zariadení *LEP* a získali tam skúsenosti potrebné pre úspešnú prácu na komplexe *UNK*.

Zjednotenie EM a slabých interakcií stimulovalo aj ďalšiu prácu na poli teórie, kde už vznikla zjednotená teória EM slabých a silných interakcií. Pokusy o experimentálnu verifikáciu tejto teórie sú ešte len v začiatkoch. Toto tzv. veľké zjednotenie predpovedá nestabilitu protónu. Doba života protónu by mala byť okolo 10^{31} rokov a rozpady protónu sa intenzívne hľadajú.

Základnou a doteraz nerozriešenou otázkou zjednotenej teórie EM a slabých interakcií však ostáva mechanizmus vzniku kondenzátu Higgsových častíc – dnes napríklad ešte nie je jasné, či Higgsove častice sú elementárne, alebo zložené (podobne ako Coopere páry).

Nech je ako je, objav *W*-bozónu ukázal, že zjednotená teória EM a slabých interakcií je krokom v správnom smere a vedie k podstatnému prehĺbeniu nášho poznania mikro-

sveta. A snáď o sto či dvesto rokov to bude považované za objav podobného významu ako Hertzov dôkaz existencie elektromagnetických vln, ktorý bol potvrdením Maxwellovho zjednotenia elektrických, magnetických a optických javov.

Poznámka k literatúre

Základné práce k zjednotenej teórii elektrostatických interakcií sú [1, 2, 3]. Z dostupnej učebnicovej literatúry odporúčame napríklad Okuňovu knižku [4]. Objav W^\pm bozónov bol publikovaný skupinami UA-1 a UA-2 v článkoch [5, 6]. Detektor UA-1 je opísaný v prácach [7, 8, 9]. Celkové vyrozprávanie histórie okolo objavu intermediárnych bozónov je v špeciálnom čísle CERN Courieru [10].

Literatúra

- [1] S. L. GLASHOW, Nuclear Physics 22 (1961) 579.
- [2] S. WEINBERG, Phys. Rev. Lett 1.9 (1967) 1264.
- [3] A. SALAM, Proc. 8th Nobel Symposium, 1968 Almquist and Wiksell, Stockholm 1968, str. 367.
- [4] L. B. OKUŇ, *Leptony i kvarki*. Moskva, Nauka, 1981 (kap. 19, 20, 21).
- [5] G. ARNISON a spol., (UA-1 Collaboration) Phys. Lett. 122B (1983) 103.
- [6] G. BANNER a spol., (UA-2 Collaboration) Phys. Lett. 122B (1983) 476.
- [7] M. BARRANCE LUQUE a spol., Nucl. Instr. Meth. 176 (1980) 175.
- [8] M. CALVETTI a spol., Nucl. Instr. Meth. 176 (1980) 255.
- [9] K. EGGERT a spol., Nucl. Instr. Meth. 176 (1980) 217, 223.
- [10] CERN Courier, 23 (1983) No 9.

... vy, kteří přemýšlíte, nevěřte těm autorům, kteří jen díky své představitivosti chtějí vykládat vztahy mezi člověkem a přírodou, ale věřte těm, kteří třibili svůj rozum... svými zkušenostmi. A je třeba uznat, že zkušenosti klamou, když někdo nepozná jejich povahu, protože ty, které se zdají být stejné, bývají, jak se ukazuje, obvykle dosti různé.

Dříve než bych šel dál, udělám nějaký pokus, protože mým záměrem je udělat pokus a pak rozumem dokázat, proč se to musí dít právě tak. To je jediné správné pravidlo, podle kterého musí postupovat ti, kteří zkoumají přírodní úkazy, protože když příroda postupuje od rozumu ke zkušenosti, my musíme postupovat opačně, začínat totiž, jak jsem již řekl, zkušeností a vyvodit z ní důkazy.

Mysliteli, nechlub se, že znáš věci, které sama příroda dává jako výsledek svých úkazů, ale pyšni se tím, že znáš cíl těch věcí, o kterých ve své mysli uvažuješ.

Zkušenost, prostředník mezi tvořivou přírodou a lidským pokolením, učí, jaké vztahy utváří příroda mezi smrtelníky a k čemu je vede nutnost, neboť jen tak může působit tak, jak ji učí rozum, její vůdce.

Ani jedno lidské bádání nelze nazvat pravou vědou, jestliže neprojde matematickými důkazy.

Mně se zdá, že zbytečné a plné omylů jsou ty vědy, které se nerodí ze zkušenosti, matky každé jistoty, nebo které nekončí ve známé zkušenosti, tj. jejich počátek, střed ani konec neprochází žádným z pěti smyslů.

Ti, kteří se pohroužili do praxe bez vědy, jsou jako mořeplavec, který nastoupí na loď bez kompasu nebo bez kormidla a který nemá jistotu, kam pluje.

Praxe se vždy musí budovat na dobré teorii, neboť ta je její vůdkyní a usměrňovatelkou, bez ní nelze nic vykonat ani v malířství.

Leonardo da Vinci