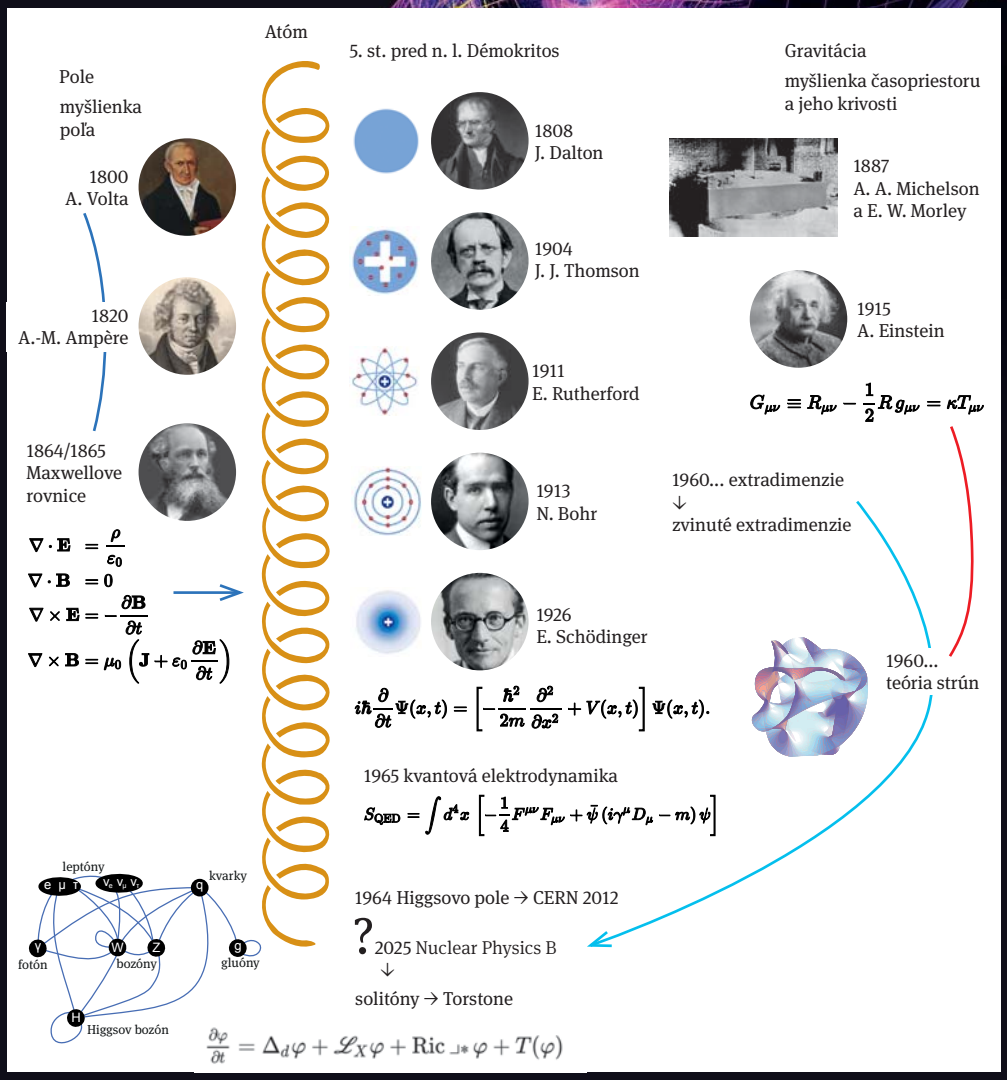
TEORETICKÁ FYZIKA

Cesta za podstatou hmoty

Je za všetkým geometria časopriestoru?

Otázka stará takmer ako ľudstvo samo: z čoho sa skladá okolitý svet? Z čoho sme my sami a všetko okolo nás? V súčasnosti by väčšina fyzikov odpovedala, že svet tvoria základné častice, ktoré opisuje tzv. štandardný model fyziky častíc. To, čo si už desaťročia myslíme, je, že svet tvorí niekoľko kvantových polí prestupujúcich celý vesmír, ktoré existujú v každom bode priestoru.



Zdroje obrázkov wikipédia, public domain

Prehľad štandardného modelu častíc: elementárne fermióny a silové bozóny ako excitácie kvantových polí, ktorých hmotnosť vzniká interakciou s Higgsovým poľom (stred), ilustrácia CERN

Častica v tomto obraze nie je samostatný objekt, ale krátkodobé rozvlnenie takéhoto poľa podobne ako vlna na hladine mora. Tieto lokálne rozvlnenia sú častice štandardného modelu. A možno sa teraz pýtate: čo to vlastne znamená? Ako sme na to prišli? A je to už úplný a presný obraz? Poďme sa na to pozrieť.

Odhaľovanie

Celý príbeh sa začal pred dva a pol tisíc rokmi v starovekom Grécku, kde sa zrodila predstava, že svet sa skladá z malých, ďalej nedeliteľných objektov, atómov. Aj keď táto predstava ustúpila na dvetisíc rokov do úzadia, nakoniec sa ukázala ako veľmi užitočná na opis sveta okolo nás.

Postupne, v priebehu storočí, sme sa blížili k presnejším opisom. Na prelome 19. a 20. storočia sme v prvom priblížení skončili pri predstave rôznych druhov atómov usporiadaných v periodickej tabuľke – sto základných stavebných kociek sveta od vodíka až po rádioaktívne prvky.

Ďalej sme sa približovali a sériou objavov sa ukázalo, že atóm má svoju štruktúru a skladá sa z menších častíc. Správanie týchto častíc v prvých desaťročiach minulého storočia postupne uchopila kvantová mechanika. Obraz sveta spresnila predstavou, že častice v atómoch nemajú ľubovoľnú energiu, správajú sa aj ako vlny a pri opise ich správania dokážeme predpovedať len pravdepodobnosti výsledkov meraní, nie jednotlivé udalosti.

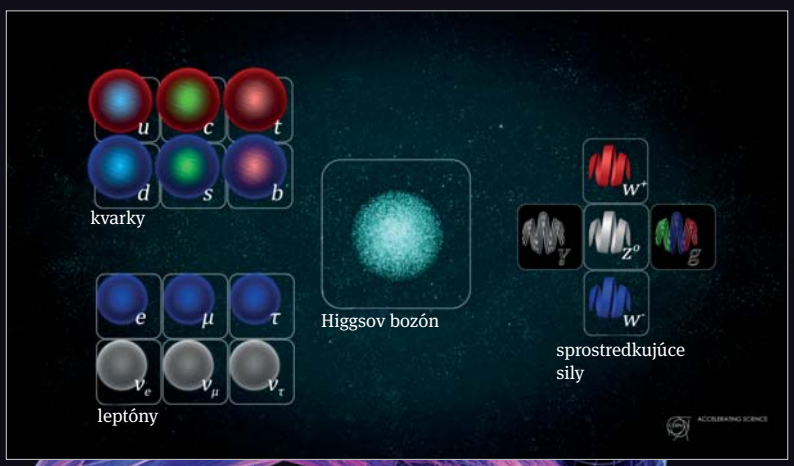
Kvantová mechanika

V opise mikrosveta sa objavila častica, ktorá sa správa ako vlna. S touto myšlienkou prišiel pred 101 rokmi Louis de Broglie, inšpirovaný Einsteinovým vysvetlením fotoelektrického javu, podľa ktorého sa svetlo správa ako častice, fotóny. De Broglieho koncept sa v nasledujúcich rokoch potvrdil sériou experimentov s elektrónmi. Pred sto rokmi sme tak začali chápať správanie sa častíc ako objektov s vlnovou pravdepodobnosťou. Celá oblasť postupne dospela k pomenovaniu kvantová mechanika.

To, že ide opäť o presnejší opis sveta, ukázali jej úspechy pri vysvetľovaní emisných spektier atómov a ich štruktúry. Pri experimentoch sa ukázalo, že pri elektrických výbojoch v plyne sa jeho atómy *rozsvietia*. Vyžarujú svetlo len s určitými presnými vlnovými dĺžkami. Každá farba zodpovedá rozdielu energií medzi dvoma kvantovými hladinami.

Pri štruktúre atómu kvantová mechanika ukázala dôvod, prečo elektrón z atómového obalu nespadne do jadra. Podľa klasickej elektrodynamiky by elektrón obiehajúci okolo jadra neustále vyžaroval energiu a atóm by veľmi rýchlo skolaboval. Kvantová mechanika však ukazuje, že viazané častice ako elektróny majú v atóme iba určité energie. Existuje pritom minimálna energia, ktorú môžu mať, a elektróny s ňou tvoria základný stav atómu. Neexistuje teda klasická dráha, z ktorej by elektrón *padal* do jadra.

Týmto spôsobom kvantová mechanika vysvetlila existenciu stabilnej hmoty. Nasledovali ďalšie úspechy, napríklad polovodičová technika, ktorá stojí na objavoch kvantovej mechaniky. Až do polovice minulého storočia sme tak častice vnímali duálne, teda ako objekty, ktoré majú súčasne časticové aj vlnové vlastnosti.



Nové častice, nové problémy

Postupne sa však začali objavovať javy, ktoré kvantová mechanika nedokázala vysvetliť, a to aj preto, že bola vo svojej vtedajšej podobe nerelativistická. V priebehu 30. až 50. rokov 20. storočia sa v kozmickom žiarení objavili častice, napríklad mióny a pióny, čo ukázalo, že pri vysokých energiách môžu vznikať nové častice. Zároveň sme zistili, že niektoré častice sa spontánne rozpadajú na iné.

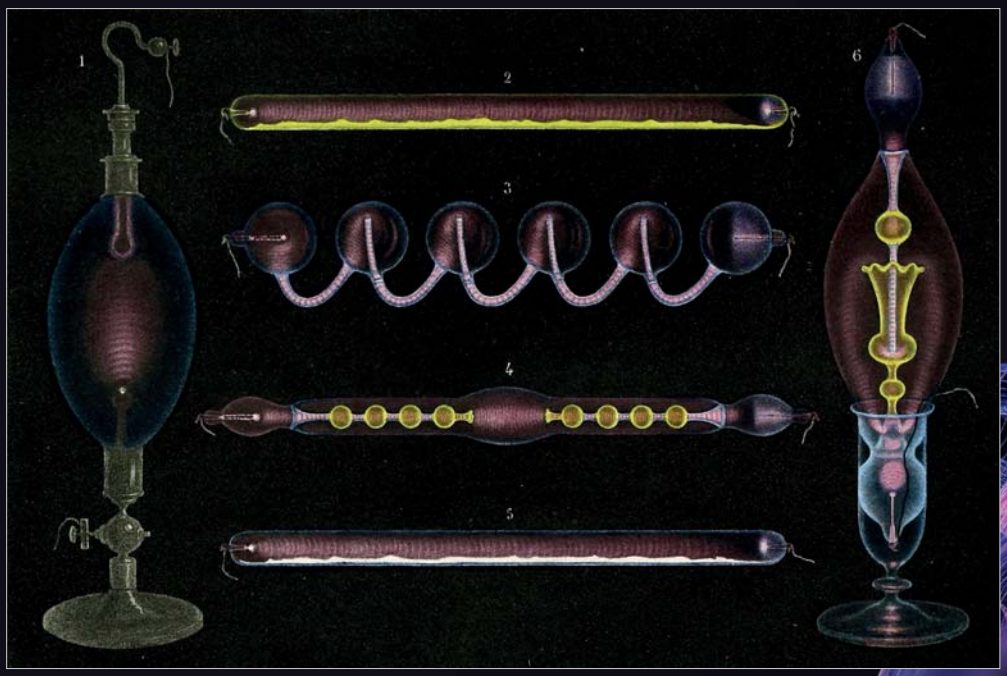
Nerelativistická kvantová mechanika však opisuje systémy s pevným počtom častíc, v jej rámci častice ani nevznikajú, ani nezanikajú. Keď sa teda ukázalo, že v mikrosvete môžu častice pri dostatočnej energii vznikať a zanikať a že fyzikálne zákony musia byť v súlade s relativitou, bolo nevyhnutné pristúpiť k novému opisu.

Pokusy o vytvorenie relativistickej kvantovej mechaniky viedli k paradoxom ako záporné energie či nestabilné vákuum. Bol potrebný nový pohľad, ďalšie priblíženie sa k podstate hmoty. Ním sa ukázal byť prístup, v ktorom sú základnými objektmi polia a ich kvantové excitácie vnímame ako častice.

Kvantová teória poľa

Nový opis, ktorý znamenal zásadný zlom v pohľade na svet, dozrieval postupne. Už v 19. storočí sa objavila myšlienka, že v prírode existujú polia aj tam, kde nie sú častice. Michael Faraday zaviedol pojem silových polí, elektrického a magnetického. Tento koncept vyústil do opisu elektromagnetického poľa ako samostatného objektu, ktorý sformuloval James Clerk Maxwell. Na začiatku 20. storočia Max Planck ukázal, že energia elektromagnetického poľa je kvantovaná a nadobúda len diskrétne hodnoty. Albert Einstein následne tieto kvantá interpretoval ako fotóny.

Paul Dirac v roku 1927 ako prvý prišiel s teóriou, v ktorej kvantoval elektromagnetické pole. Zaviedol pojem vákuový stav, základný stav poľa, a jeho teória umožňovala vznik a zánik fotónov. Diracova rovnica bola relativistická, no poskytovala riešenia s kladnými aj zápornými energiami. V jednočasticovej kvantovej mechanike je to fatálny problém, pretože ak existujú stavy s nižšou energiou, častica by mala bez obmedzenia *padať* do čoraz negatívnejších energií. Výsledkom by bola nestabilita, keďže by neexistoval najnižší energetický stav.



Ilustrácia Geisslerových plynových výbojových trubíc z knihy Les phénomènes de la physique *(1868) od Amédéeho Guillemina ukazujúca rozsvietenie plynu pri prechode elektrického prúdu, ilustrácia wikipédia, public domain*

Diera v mori

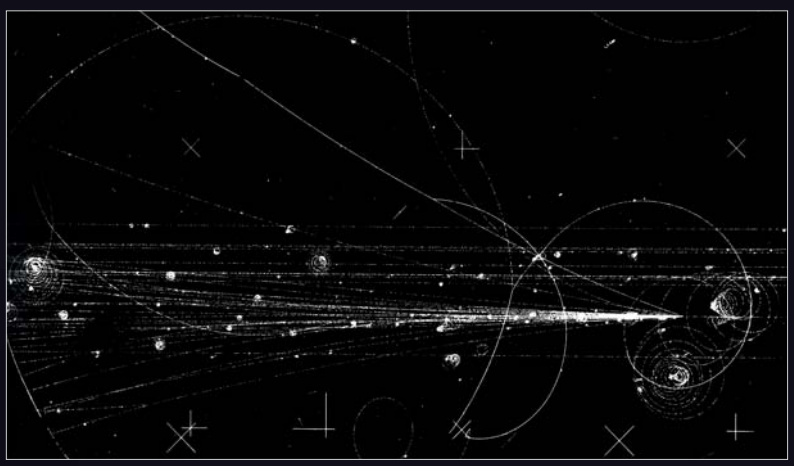
P. Dirac navrhol riešenie, v ktorom sú všetky záporné energetické stavy už obsadené elektrónmi. Toto nekonečne zaplnené spektrum nazval *morom*. *Diera v mori* sa správa ako častica s kladným nábojom, pozitrón, ktorého existencia sa experimentálne potvrdila v roku 1932.

Diracovo *more* bolo pokusom zachrániť relativistickú jednočasticovú kvantovú mechaniku, ktorá opisuje jednu časticu. No ukázalo sa, že vedie k viacerým problémom, napríklad k nekonečným energiám. Tieto ťažkosti naznačovali, že čosi nie je v poriadku a že základným objektom, ktorý opisuje Diracova rovnica, nemá byť častica, ale pole.

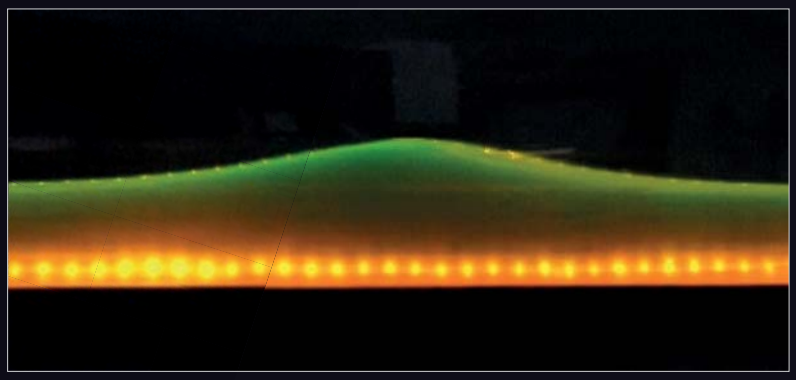
História vedy si cestu vpred hľadá mnohými cestičkami, poznanie postupuje prechádzaním početných trás. Až z cieľa vidíme tú cestu, ktorá k nemu viedla najpriamejšie. Každý historický opis vedeckých objavov je tak pohľadom zhora, kde sa milióny dôvodov, ktoré viedli k nájdeniu správneho výsledku, pretavia do opisu najkratšej cesty.

Aj cesta od klasickej kvantovej mechaniky ku kvantovej teórii poľa pozostávala z mnohých krokov.

Výskum vedený Ústavom experimentálnej fyziky SAV, v. v. i., skúma myšlienku, že všetky základné sily a vlastnosti častíc by mohli vyplynúť z geometrie skrytých extradimenzií.



Snímka z bublinovej komory demonštruje stopy častíc, ktoré vznikli pri vysokoenergetickej interakcii, a ukazuje, že pri dostatočne vysokých energiách môžu vznikať nové častice, foto wikipédia/ENERGY. GOV, public domain.



Šírenie deformácie Ricciho toku v priestore, foto wikipédia/ Christophe Finot, Kamal Hammani, CC BY-SA 2.5

Z dnešného pohľadu sa ukazuje, že rozhodujúci posun urobil Pascual Jordan, keď namiesto polôh a hybností častíc začal kvantovať samotné fyzikálne polia. Tým umožnil opis procesov, v ktorých častice vznikajú a zanikajú.

Vákuum nie je nič

Pozrime sa, k akému opisu sveta sme sa v tomto bode dostali. Svet prestupujú polia, objekty existujúce vždy a všade, v každom bode priestoru. Pod poľom myslíme fyzikálnu veličinu definovanú v každom bode, napríklad v elektromagnetickom poli sú to hodnoty elektrického a magnetického poľa. Ak sa pole v určitom mieste a jeho okolí nachádza v kvantovo excitovanom stave, vzniká objekt, ktorý v experimentoch pozorujeme ako časticu. Častica teda nie je kúsok poľa existujúci samostatne, ale zvlnená časť nekonečného poľa.

Obraz sveta, v ktorom sme si človeka predstavovali ako súbor približne miliárd miliárd miliárd drobných guľôčok (označme si toto číslo ako N), sa tak zmenil na N kvantových excitácií niekoľkých polí prestupujúcich celý vesmír. Inými slovami môžeme povedať: som N zvlnení niekoľkých polí vypĺňajúcich celý vesmír. A nielen ja, všetci a všetko ostatné sme spojení na úrovni celého vesmíru.

Už pred 70 rokmi bolo zrejmé, že predstava častice ako objektu ohraničeného objemom je len priblížením. Presnejším obrazom je svet skladajúci sa z polí a ich lokálnych excitácií. Vákuum už nie je *nič*. V kvantovej teórii poľa je vákuum stav poľa s najnižšou energiou, pole v ňom neustále existuje, len nie je excitované.

Zdroj hmotnosti

Tento opis sveta už umožňoval vznik a zánik častíc a z historického pohľadu bol blízko tomu, čo dnes poznáme ako štandardný model. Ide o model malej skupiny základných častíc, ktoré sú excitáciami príslušných polí. Každá častica má svoje pole: elektrón má elektrónové pole, horný (*up*) kvark svoje, a rovnako ho majú všetky ostatné častice štandardného modelu.

V tomto obraze sa však objavil zásadný problém, v jeho vtedajšej podobe mali excitácie polí nulovú pokojovú hmotnosť. Všetky sa v tomto podobali fotónom, ktoré skutočne majú nulovú pokojovú hmotnosť. Na rozdiel od fotónu však v prípade elektrónu vieme, že pokojovú hmotnosť má. Nová teória sa v tomto bode líšila od pozorovaného sveta. Ukázalo sa, že pokusy zaviesť do modelu hmotnosť častíc viedli k nesprávnym alebo nekonečným predpovediam.

Vo fyzike a vo vede všeobecne hľadáme taký opis, ktorý čo najpresnejšie predpovedá, čo sa meria v experimentoch. Aby boli tieto predpovede správne, musíme použiť len určité *ingrediencie*. V prípade kvantových polí to boli symetrie. Pri ich použití všetko fungovalo a predpovede boli extrémne presné. Hmotnosť častíc sa však do nich pridať nedala. Niečo chýbalo.

Až Peter Higgs prišiel s predstavou, že to, čo chýba, je ďalšie kvantové pole. Pri interakcii s ním ostatné častice, excitácie ďalších polí, menia svoje vlastnosti tak, akoby mali hmotnosť. Zjednodušene preto hovoríme, že toto nové pole časticiam dáva hmotnosť.

Nové smery

Toto nové pole dostalo pomenovanie Higgsovo pole a doplnilo štandardný

Účastníci piatej Solvayovej konferencie (1927), kde sa formovali základy kvantovej mechaniky a moderného chápania fyzikálnych polí. Po radoch od horného A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, E. Herzen, Th. de Donder, E. Schrödinger, J. E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R. H. Fowler, L. Brillouin; P. Debye, M. Knudsen, W. L. Bragg, H. A. Kramers, P. A. M. Dirac, A. H. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr; I. Langmuir, M. Planck, M. Skłodowska-Curie, H. A. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, Ch. E. Guye, C. T. R. Wilson, O. W. Richardson, foto wikipédia/Benjamin Couprie, Institut International de Physique de Solvay, public domain

model. Dostali sme sa ním k súčasnému obrazu sveta overenému experimentmi. Tým overením bol objav Higgsovho bozónu, predpovedanej excitácie Higgsovho poľa, v CERN-e v roku 2012. A sme v súčasnosti – z pohľadu toho, čo vieme o skladbe sveta.

Naďalej však nevieme, odkiaľ sa Higgsovo pole vzalo, čo je príčinou jeho existencie, ani aký je pôvod jeho vlastností a dynamiky. Po objave Higgsovho bozónu sa zdalo, že keď už poznáme správnu cestu, dokážeme tieto otázky čoskoro vyriešiť a obraz sveta doplniť. V nasledujúcich desaťročiach vznikli teórie, ktoré sa snažili vysvetliť pôvod Higgsovho poľa, napríklad ako zloženého objektu z ďalších častíc, ale tie sa po objave Higgsovho bozónu v roku 2012 nenašli.

Higgsovo pole je tak do štandardného modelu vložené, ako sa vo fyzike hovorí, postulované. Súčasne sa začali objavovať nové javy a rozpory v meraniach, ktoré naznačujú, že tento obraz nie je finálny. Prišli sme na to, že vo vesmíre je tmavá energia, ktorá doplnila tmavú hmotu a ktoré štandardný model nezahŕňa. Nevysvetľuje, z čoho sa skladá väčšina sveta, nedáva vysvetlenie, ktoré by bolo potvrdené meraním. Navyše sa objavili problémy s meraním rýchlosti rozpínania sa vesmíru: dva spôsoby merania vedú k odlišným výsledkom, čo sa nateraz označuje ako *kríza v kozmológii*.

Žijeme v čase, keď sa objavujú rôzne teórie tvoriace rázcestia možných riešení. Nevieme, ktoré z nich budú správne, no máme nové cesty, ktorými sa môžeme vydať a skúmať, či na nich nájdeme uspokojivé odpovede.

Skrútenie extradimenzií

Jedným z rázcestí na tejto ceste je aj riešenie publikované minulý rok v časopise *Nuclear Physics B* výskumným tímom vedeným Ústavom experimentálnej fyziky SAV, v. v. i., v článku Introduction of the G2-Ricci flow: Geometric implications for spontaneous symmetry breaking and gauge boson masses. Práca skúma myšlienku, že všetky základné sily a vlastnosti častíc by mohli vyplynúť z geometrie skrytých extradimenzií.

Extradimenzie prišli s teóriou strún, ktorá vznikala v období po zavedení Higgsovho poľa do štandardného modelu. Rozšírením priestoru o ďalšie dimenzie vysvetľovala existenciu častíc ako vibrujúcich strún. Tieto dimenzie sú však mimoriadne malé a skrútené, a preto ich nemôžeme súčasnými metódami pozorovať.

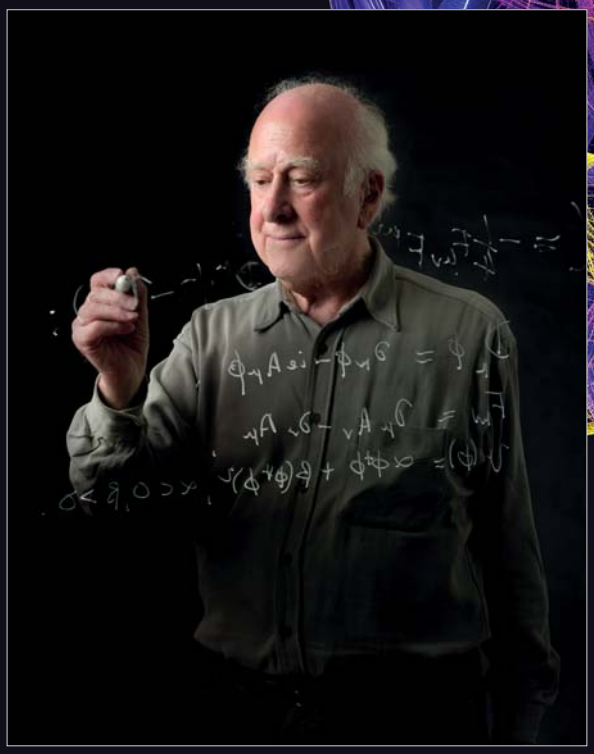
V spomínanej štúdii v *Nuclear Physics B* sa skúma vesmír, ktorý obsahuje tieto neviditeľné dimenzie poskladané do zložitých sedemrozmerných tvarov označovaných G_2-variety. Tieto extradimenzionálne štruktúry môžu mať tzv. torziu, akýsi vnútorný skrútený tvar. Nejde pritom o rotáciu celého vesmíru, ale o malú *skrutku* ukrytú v každom bode. Keď ňou častica prechádza, skrutka ju mierne otáča bez potreby vonkajších síl. Táto lokálna mikrorotácia sa označuje ako torzia a mení *vnútornú* orientáciu častice.

Tradične sa tieto extradimenzionálne štruktúry študovali ako statické. V uvedenom článku sa skúmajú ako dynamické a vyvíjajúce sa v procese nazývanom G_2-Ricciho tok, kde sa vnútorná geometria mení s časom. Keď ich necháme vyvíjať sa v čase, zistíme, že sa dokážu usadiť do stabilných konfigurácií nazývaných solitóny. Práve tie by mohli poskytnúť čisto geometrické vysvetlenie javov, ako je spontánne narušenie symetrie.

Narušenie symetrie

Spontánne narušenie symetrie v Higgsovom poli znamená, že jeho najnižší energetický stav má nenulovú hodnotu. Malé kvantové kmity okolo tohto stavu sa prejavujú ako Higgsov bozón. Hodnota Higgsovho poľa vo vákuu sa nazýva vákuová stredná hodnota (*vacuum expectation value*, VEV). Rovnice teórie pripúšťajú množstvo ekvivalentných vákuových stavov s rovnakou energiou, ktoré sa líšia len hodnotou Higgsovho poľa. Vákuum si musí *zvoliť* jeden z nich, čím dochádza k spontánnemu narušeniu symetrie. Táto zvolená nenulová hodnota Higgsovho poľa potom určuje, akú pokojovú hmotnosť častice pri interakcii s týmto poľom získajú.

Solitóny extradimenzionálnych štruktúr s torziou tak môžu hrať rolu Higgsovho poľa, no v tomto prípade už vieme, prečo existujú. Ich prítomnosť je dôsledkom samotnej geometrie priestoru, presnejšie skrútenia jeho extradimenzií. Geometria časopriestoru by tak mohla byť hlbším dôvodom toho, prečo majú častice hmotnosť.

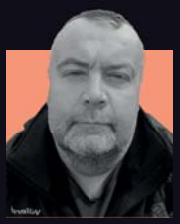


Peter Higgs v roku 2008, foto Claudia Marcelloni/CERN

Geometria časopriestoru

Geometrický pohľad prináša aj ďalšie zaujímavé vysvetlenia. Keď sa torzia pridá k bežnému zakriveniu časopriestoru, prirodzene generuje efektívnu kozmologickú konštantu, ktorej hodnota zodpovedá pozorovaniam. Zrýchlenie expanzie vesmíru potom vyplýva z mierne upravenej gravitačnej rovnice, v ktorej úlohu zvyčajne pripisovanú tmavej energii hrá samotná torzia časopriestoru. Nie je pritom potrebné manuálne zavádzať ďalšie skalárne polia, ako je Higgsovo pole. Z pohľadu štvorrozmernosti sa zakrivenie extradimenzií javí ako vákuový tlak, ktorý poháňa kozmickú expanziu. Geometrický vývoj riadený Ricciho tokom s modifikovanou torziou vedie systém k stabilnej konfigurácii s nemiznúcou reziduálnou torziou. Tým zabezpečuje, že efektívna kozmologická konštanta zostane stabilná počas kozmologických časov.

A sme na konci. Dostali sme sa až k rozmerom extradimenzií a ich možnému vplyvu na základné vlastnosti hmoty, k mierkam približne 10^{20}-krát menším, než je atóm. Podľa súčasných poznatkov sa už nachádzame blízko hraníc, kde prestáva dávať zmysel ďalšie zmenšovanie mierky. Svet sme rozložili na jeho základné stavebné prvky. Teraz hľadáme spôsob, ako ho z nich opäť poskladať tak, aby zodpovedal tomu, čo pozorujeme. –



RNDr. RICHARD PINČÁK, PhD.
Ústav experimentálnej fyziky SAV, v. v. i.

RNDr. PAVOL BOBÍK, PhD.
Ústav experimentálnej fyziky SAV, v. v. i.