



Rozluštění skrytých symetrií přírody

Jaroslav Jindra¹, Fakulta pedagogická Západočeské univerzity v Plzni

Studium symetrií a spontánních symetrií přineslo v roce 2008 Nobelovu cenu celkem třem vědcům. Získali ji americký fyzik japonské národnosti **Yoichiro Nambu** (polovina ceny za objev mechanismu spontánního narušení symetrie) a japonští fyzikové **Makoto Kobajaši** a **Tošihide Maskawa** (dohromady polovina ceny za objev původu spontánního narušení symetrie).²



Obr. 1 – Nepatrná převaha hmoty nad antihmotou umožnila vznik vesmíru.

Za život, jaký známe dnes, vděčíme narušení symetrie, které muselo nastat téměř okamžitě po velkém třesku před zhruba 14 miliardami let, když byla stvořena hmota a antihmota. Jejich střetnutí vede k vzájemné anihilaci doprovázené vznikem záření. Pokud by ve vesmíru bylo stejné množství hmoty a antihmoty, po anihilaci by zbylo pouze záření. Vzhledem k existenci hmotných objektů ve vesmíru je zřejmé, že před anihilací muselo být o něco více hmoty než antihmoty. Přesněji řečeno na každých deset miliard částic antihmoty připadalo deset miliard a jedna částice hmoty. Takto nepatrné narušení symetrie vytvořilo podmínky pro vznik dnešního vesmíru.

Pohled do zrcadla

Se symetrií a narušenou symetrií se setkáváme i v každodenním životě. Například písmeno **A** se nezmění, pokud se podíváme na jeho obraz do zrcadla, zatímco písmeno **E** vypadá v zrcadle jinak, protože není symetrické podél vertikální osy. Naopak písmeno **E** bude vypadat stejně, pokud ho otočíme vzhůru nohama, ale písmeno **A** horizontálně symetrické není.

Základní teorie elementárních částic používá tři různé symetrie: zrcadlovou symetrii označovanou písmenem **P** (z angl. parity – shoda), symetrii mezi částicemi a antičásticemi **C** (z angl. charge – náboj) a časovou symetrii **T** (z angl. time – čas).

Vzrcadlové symetrii budou všechny události vypadat stejně, nezáleží na tom, jestli je pozorujeme přímo, nebo v zrcadle. Děje vypadají shodně, tudíž pozorovatel není schopen rozhodnout, jestli probíhají v jeho vlastním světě, nebo ve světě za zrcadlem. Nábojová symetrie částic říká, že každá částice se bude chovat stejně jako její antičástice, která má shodné vlastnosti, ale opačný elektrický náboj. Podle časové symetrie jsou fyzikální děje v mikrosvětě nezávislé na tom, zda se na ně díváme poslopně, nebo si je promítáme pozpátku. V obou případech budou vypadat stejně.

Symetrie ve fyzice však nemají pouze estetickou hodnotu. Ulehčují mnoho složitých výpočtů, a proto hrají významnou roli pro matematický popis mikrosvětě. Mnohem důležitějším je fakt, že tyto symetrie jsou v mikrosvětě spojeny s mnoha zákony zachování, jako je například zákon zachování náboje v elektromagnetických interakcích.

Standardní model elementárních částic a jejich interakcí

S pojmem narušená symetrie se prvně setkáváme přibližně v polovině dvacátého století v době, kdy se fyzikové snažili sjednotit všechny síly a stavební částice hmoty do jedné univerzální teorie. Avšak záhy po spuštění prvních

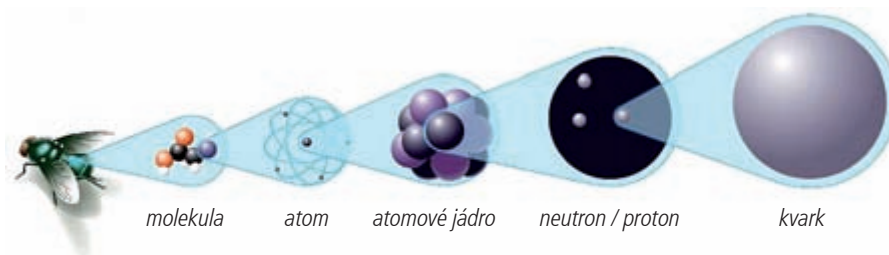
¹ jar.jindra@seznam.cz

² Článek byl vytvořen s pomocí materiálů na webové stránce http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/



urychlovačů bylo objeveno mnoho doposud neznámých částic. Většina z nich odporovala tehdejšími teoriím, že hmota je složena z atomů, v jejichž jádře jsou protony a neutrony, kolem nichž obíhají v obalu elektrony. Bližší zkoumání odhalilo, že proton i neutron v sobě ukrývají trojici částic – kvarků. Ukázalo se, že kvarky tvoří i jiné nově objevené částice.

Standardní model zahrnuje tři skupiny částic. Tyto skupiny se navzájem podobají, ale pouze částice první a zároveň nejjednodušší skupiny jsou dostatečně stabilní, aby vytvořily objekty ve vesmíru. Ostatní těžší částice jsou velmi nestálé a téměř okamžitě se rozpadají na lehčí částice.



Obr. 2 – Složení hmoty. Nejmenšími stavebními částicemi jsou elektrony a kvarky.

Uvedený model prozatím popisuje tři ze čtyř základních přírodních sil včetně jejich nositelů, částic, které zprostředkovávají interakci mezi elementárními částicemi. Nositelem elektromagnetické síly je foton s nulovou hmotností, slabá interakce odpovědná za radioaktivní rozpad je přenášena těžkými W- a Z-bosony, zatímco nositelem silné interakce je gluon, díky němuž drží jádra atomů pohromadě. Začlenění gravitační síly do standardního modelu představuje pro fyziky jednu z největších výzev dneška.

Uvedený model prozatím popisuje tři ze čtyř základních přírodních sil včetně jejich nositelů, intermediálních částic, které zprostředkovávají interakci mezi elementárními částicemi. Nositelem elektromagnetické síly je foton s nulovou hmotností, slabá interakce odpovědná za radioaktivní rozpad je přenášena těžkými W- a Z-bosony, zatímco nositelem silné interakce je gluon, díky němuž drží jádra atomů pohromadě. Začlenění gravitační síly do standardního modelu představuje pro fyziky jednu z největších výzev dneška.

Elementární částice

	první rodina	druhá rodina	třetí rodina		interakce	intermediální částice
leptony	elektronové neutrino	mionové neutrino	tauonové neutrino	Higgsův boson	elektromagnetická	foton
	elektron	mion	tauon			slabá
kvarky	up (nahoru)	charm (půvabný)	top (horní)		silná	
	down (dolů)	strange (podivný)	bottom (spodní)			

Obr. 3 – Standardní model elementárních částic a interakcí

Narušená symetrie

Standardní model je syntézou všech poznatků mikrosvětla, které se v minulém století podařilo učinit. Tyto poznatky jsou podpořeny nespočty měření. Dnešní podoba standardního modelu však musela vysvětlit řadu problémů.



První překvapení přišlo v roce 1956, když se Lee Tsung-Dao a Chen Ning Yang (ocenění Nobelovou cenou v roce 1957) zaměřili na zrcadlovou symetrii slabé síly a navrhli sérii pokusů pro její ověření. O několik měsíců později se ukázalo, že rozpad atomového jádra radioaktivního prvku kobaltu 60 neprobíhá podle pravidel zrcadlové symetrie. Symetrie byla porušena, když elektrony opouštějící jádro atomu kobaltu upřednostňovaly pouze jeden směr.

Kobalt 60

Kobalt 60 je radioizotop s poločasem rozpadu 5,2714 let. Během rozpadu je uvolňováno silné gama záření, které se využívá ve zdravotnictví, kde jím bývají ozařovány zhoubné nádory, v defektoskopii se sním setkáme při odhalování vnitřních skrytých vad materiálů, v zemědělství se používá pro sterilizaci a konzervaci potravin.

Jak nás ovlivňuje symetrie?

Symetrie mezi částicemi i zrcadlová symetrie mohou být narušeny, avšak dlouhou dobu se mělo za to, že symetrie mezi částicemi spojená se zrcadlovou a zároveň nábojovou symetrií nazývaná též CP-symetrie být narušena nemůže. Což by znamenalo, že fyzikální zákony se nezmění, pokud vstoupíme do zrcadlového světa, kde je veškerá hmota zaměněna za antihmotu.

Narušení této symetrie bylo objeveno v roce 1964, při zkoumání rozpadu neutrálních mezonů K^0 . Malý zlomek těchto částic se nechoval podle zrcadlové a nábojové symetrie, porušil CP-symetrii a zpochybnil tak celou teorii.

První, kdo upozornil na zásadní význam narušené symetrie pro vznik vesmíru, byl ruský fyzik Andrej Sacharov. V roce 1967 vyslovil tři podmínky pro vznik světa podobného našemu (bez přítomnosti antihmoty). Za prvé: fyzikální zákony rozlišují mezi hmotou a antihmotou, což bylo objeveno narušením CP-symetrie. Za druhé: vesmír vznikl při velkém třesku a za třetí: protony se rozpadají. Poslední podmínka zní hrozně. Zmizení veškeré hmoty by mělo katastrofální následky pro náš vesmír. Experimentálně však bylo ověřeno, že protony zůstávají stabilní po 10^{33} let, což je téměř bilionkrát déle, než je stáří vesmíru.



Obr. 4 – Yoichiro Nambu, Makoto Kobajaši, Tošihide Maskawa a jejich nobelovské diplomy



Vyřešení problému narušené symetrie

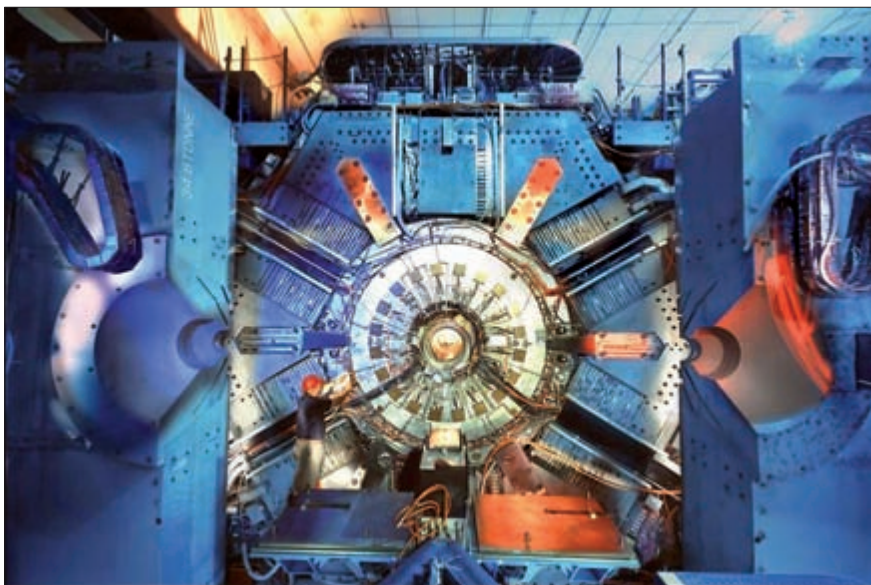
Každou částici K^0 tvoří kombinace kvarku a antikvarku. Kvůli slabé síle se kvark neustále přeměňuje na antikvark a naopak antikvark se stává kvarkem. Takto se z K^0 stává jeho antičástice. Za příhodných podmínek tedy může dojít k narušení symetrie mezi hmotou a antihmotou. Makoto Kobajaši a Tošihide Maskawa z Kjótské univerzity vypočetli v roce 1972 matici pravděpodobností transformací kvarků a vyřešili otázku, proč byla na počátku vesmíru narušena symetrie mezi hmotou a antihmotou. Abychom si představili důležitost jejich výpočtu je nutno dodat, že tehdy byly ze všech šesti kvarků známy pouze tři nejjednodušší. Kobajaši a Maskawa tedy svými výpočty předpověděli existenci tří nových základních stavebních kamenů hmoty.

Ukázalo se, že kvarky a antikvarky mění svou identitu v rámci své vlastní skupiny. Pokud došlo k výměně identity s porušením CP-symetrie mezi hmotou a antihmotou, bude zapotřebí najít další skupiny kvarků (obr. 3). Tento předpoklad potvrdily pozdější experimenty. Kvark charm byl objeven v roce 1974, kvark bottom v roce 1977 a kvark top v roce 1994.

Odpověď přináší továrny na mezony

Částice druhé a třetí skupiny se v mnoha ohledech podobají částicím první skupiny, ale na rozdíl od nich mají velmi krátkou dobu života na to, aby utvořily jakýkoliv stabilní objekt. Existuje možnost, že tyto pomíjivé částice plnily veledůležitou funkci v počátku vesmíru, kdy jejich přítomnost zaručila narušení symetrie a převahu hmoty nad antihmotou.

Teorie Kobajašiho a Maskawy rovněž naznačuje, že studium rozpadu B-mezonů, částic desetkrát těžších než jsou jejich příbuzné mezony K^0 , by mělo odhalit významná narušení symetrie. Jelikož porušení symetrie B-mezonů je málo častým



Obr. 5 – Detektor BaBar urychlovače SLAC ve Stanfordu v Kalifornii

jevem, je zapotřebí sledovat ohromné množství těchto částic. Za tímto účelem byl postaven detektor BaBar na urychlovači SLAC ve Stanfordu v Kalifornii (obr. 5) a Belle na urychlovači KEK v Cukubě v Japonsku, které produkovaly více než milion B-mezonů denně. Na počátku roku 2001 oba experimenty nezávisle na sobě potvrdily narušení symetrie B-mezonů, a to přesně tak, jak před téměř třiceti lety předpověděli Kobajaši a Maskawa.

Tento objev znamenal doplnění standardního modelu, který fyzici úspěšně používali k popisu mikrosvěta již mnoho let. Téměř všechny dílky skládky do sebe zapadly. Nicméně několik otázek zůstává dodnes nezodpovězeno.

Spontánní narušení symetrie

Proč jsou základní přírodní síly odlišné? Proč mají elementární částice tak rozdílné hmotnosti? Nejhmotnější částice kvark top je víc než třítisícekrát těžší než elektron. Naopak foton, který zprostředkovává elektromagnetickou interakci a má nulovou hmotnost.

Většina fyziků věří, že na samém počátku vývoje vesmíru došlo mezi silami k dalšímu spontánnímu narušení symetrie, které dalo částicím jejich hmotnost. Popsaný jev se nazývá Higgsův mechanismus.



Spontánní narušení symetrie částic mikrosvěta popsal Yoichiro Nambu již v roce 1960. Nambu se nejprve věnoval supravodivosti. Matematicky se snažil popsat jev, kdy spontánní narušení symetrie způsobí průtok proudu za nulového odporu. Matematický aparát později využil pro popis mikrosvěta. Dnes s ním operují všechny teorie standardního modelu.

Se spontánním porušením symetrie se však můžeme setkat i v běžném životě. Například tužka postavená na hrot je ve všech směrech dokonale symetrická (obr. 6). Stačí ale malé vychýlení v libovolném směru a tužka spadne. V tomto stavu je však tužka mnohem stabilnější, protože má nejnižší energii.



Obr. 6 – Spontánní narušení symetrie

Ve vesmíru má nejnižší možnou energii vakuum. Vakuum však není zcela prázdné. Ve skutečnosti se podobá vířící polévce plné částic, které se vynoří, jen aby záhy opět zmizely ve vsudypřítomném, avšak neviditelném kvantovém poli.

Ve vesmíru jsme obklopeni mnoha různými kvantovými poli. Čtyři základní síly jsou také popisovány jako projevy polí.

Nambu si velmi záhy povšiml významu vakua pro studium narušení spontánní symetrie. Vakuum jako nejnižší možný stav energie neodpovídá nejsymetričtějšimu stavu. Podobně jako u spadlé tužky byl vybrán pouze jeden ze všech možných směrů a symetrie kvantového pole byla narušena. Nambuova metoda je dnes běžně používána pro výpočet účinků silné interakce.

Hmotnosti částic zprostředkovalo Higgsovo pole

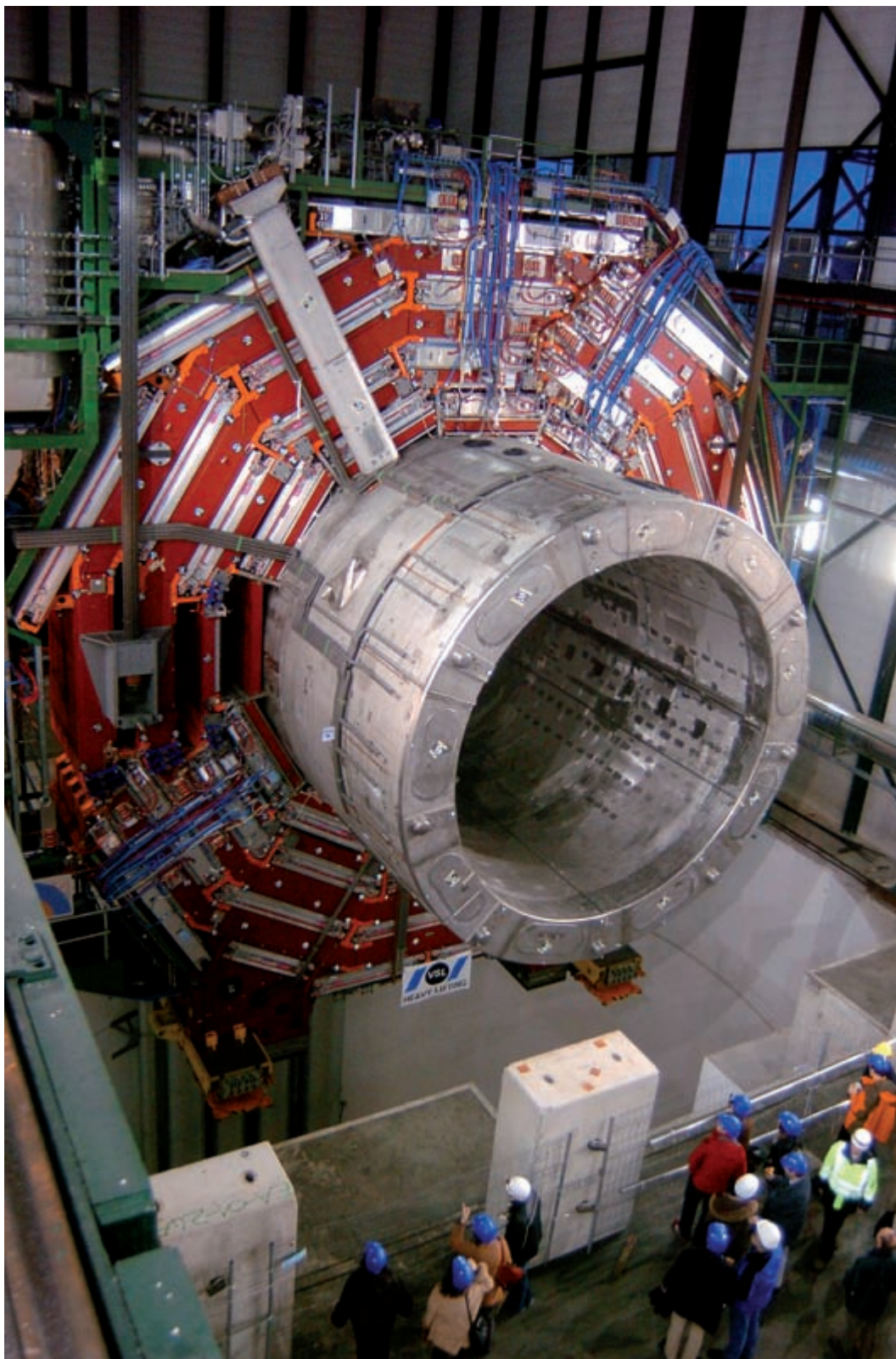
Otázka hmotnosti elementárních částic byla zodpovězena spontánním narušením symetrie hypotetického Higgsova pole. Předpokládá se, že pole při velkém třesku bylo dokonale symetrické a že všechny částice měly nulovou hmotnost. Ale Higgsovo pole, stejně jako tužka stojící na svém hrotu, nebylo stabilní. Zatímco se vesmír ochlazoval, pole snížilo svou energii na nejnižší možnou hodnotu. Symetrie se narušila a Higgsovo pole se stalo jakýmsi sirupem pro elementární částice, které absorbovaly různé množství pole a získaly tak odlišnou hmotnost. Například fotony nebyly tímto polem ovlivněny a zůstaly bez hmotnosti. Tímto způsobem lze vysvětlit, proč částice hmotnost získaly, nikoliv však určit její hodnotu. Hmotnosti základních stavebních kamenů jsou ve standardním modelu volnými parametry a nemohou být jeho prostřednictvím číselně určeny.

Podobně jako ostatní kvantová pole i Higgsovo pole má své vlastní zprostředkovatele, které nazýváme Higgsovy částice. K jejich nalezení byl postaven vysoce výkonný urychlovač částic světa LHC v CERNu v Ženevě. V současné době probíhají v LHC experimenty s cílem potvrdit standardní model, případně získat více podkladů pro alternativní teorie.



Obr. 7 – Umělecký dojem z rozpadu Higgsova bosonu³

³ Zdroj CERN; převzato z webové stránky <http://www.fieend.com/finding-or-finding-%E2%80%99Chiggs-boson%E2%80%9D-matters>



Obr. 8 – LHC v CERN (The Large Hadron Collider at the European Organization for Nuclear Research)⁴

4 Zdroj CERN; převzato z webové stránky <http://www.lhc.ac.uk/resources/image/jpg/hi003694370.jpg>