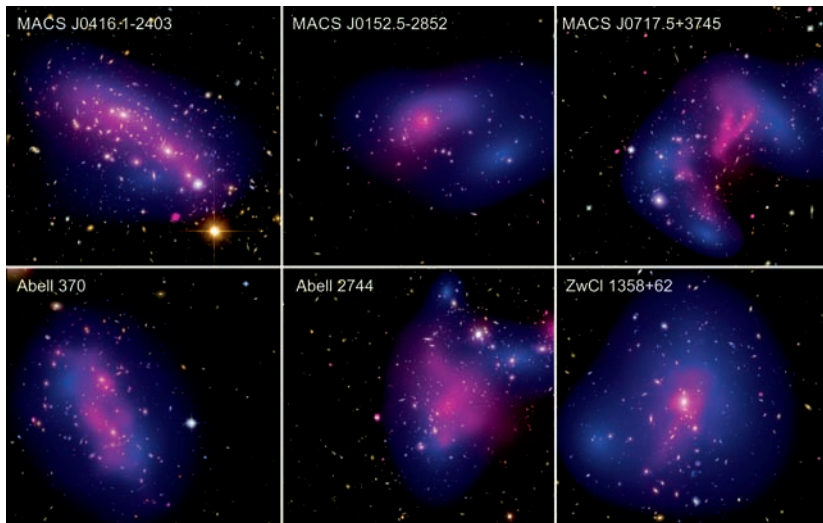


Pátá interakce

Gravitační interakce – interakce působící na všechny částice bez výjimky. Má nekonečný dosah a její intenzita ubývá s druhou mocninou vzdálenosti. Současnou teorii gravitace je obecná relativita publikovaná Albertem Einsteinem v roce 1915. Podle této teorie kolem sebe každé těleso zakřivuje prostor a čas a v tomto pokriveném světě se tělesa pohybují po nejrovnějších možných drahách, tzv. geodetikách. Obecná relativita předpověděla řadu jevů, které z Newtonovy gravitace nevyplývají.

Dosud nevysvětlenými projevy gravitační interakce jsou temná hmota a temná energie. Za temnou energii by mohly být zodpovědné kvantové fluktuace vakua, ale také síly spojené s modifikovanou gravitací. Předpokládá se, že temná hmota je naopak tvořena neznámými částicemi, které nejsou součástí standardního modelu. Na snímku je rekonstrukce rozložení temné hmoty v kupách galaxií. Zdroj: D. Harvey, NASA, ESA, EPFL.



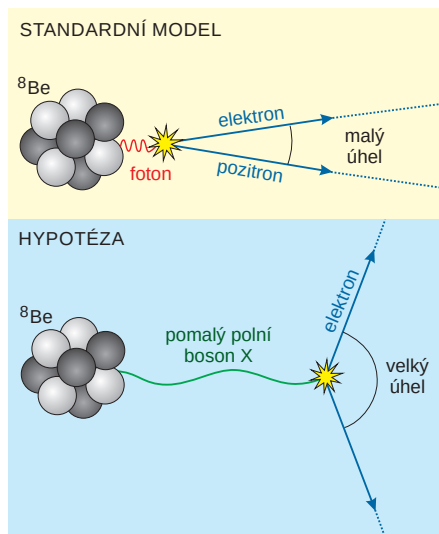
V současnosti lze veškeré interakce mezi objekty v přírodě popsat čtyřmi základními interakcemi: gravitační, elektromagnetickou, silnou a slabou. Dvě z nich jsou dalekodosahové (gravitační a elektromagnetická) a dvě krátkodosahové (silná a slabá). Gravituaci úspěšně popisuje prostřednictvím zakřiveného časoprostoru obecná relativita a zbývající tři interakce jsou popsány kvantovou teorií. V současnosti nemáme jedinou teorii pro všechny čtyři interakce. Kvantovou část dobře popisuje tzv. *standardní model elementárních částic a interakcí*. Celkový počet čtyř interakcí nemusí být konečný. Například nizozemský teoretický fyzik Erik Verlinde se domnívá, že gravitace není samostatnou silou, ale jde o projevy, kterými se statisticky chová navenek mikrosvět popsaný kvantovými zákony. Pokud by se tato vize potvrdila, poklesl by počet základních interakcí na tři. Většina fyziků nespokojených s číslem 4 se ale domnívá, že budou naopak existovat i další, velmi slabé interakce, které jsou současnými prostředky obtížně měřitelné a může jich dokonce být i větší počet. Jedna z nich by mohla být spojena se samotným Higgsovým polem, které by mohlo způsobovat další, zatím neměřitelnou, interakci elementárních částic. Není ani vyloučené, že by gravitace na velkých škálách mohla mít více složek, které

se nám dosud nepodařilo objevit. Snad by taková interakce mohla vysvětlit podstatu temné energie. Většina fyziků se ale domnívá, že pokud nějaká další interakce existuje, bude mít kvantovou povahu, tj. bude za ní zodpovědná nějaká polní částice, která není součástí stávajícího standardního modelu. Taková polní částice by navíc mohla být usilovně hledanou částicí temné hmoty. V některých současných experimentech se opravdu zdá, že by pozorovaná fakta mohla být projevem dalších interakcí. Pojďme se na dva takové experimenty podívat podrobněji.

Modifikovaná gravitace

Gravitace je jedinou silou, která by měla působit na veškerá tělesa bez rozdílu. Ústřední tezí současné teorie gravitace, obecné relativity, je princip ekvivalence, který předpokládá, že setrvačné a gravitační účinky všech těles jsou shodné. Nejasnou otázkou je velmi silný princip ekvivalence, podle kterého by i samotná energie gravitačního pole (a jí odpovídající zakřivení prostoročasu a hmotnost) měla mít jak setrvačnou povahu, tak schopnost gravitačního přitahování. Pokud by velmi silný princip ekvivalence neplatil, mohla by na tělesa působit další velmi slabá síla, kterou poprvé popsal už v roce 1968 americký fyzik Kenneth Nordtvedt. V roce 1981 šokoval australský geofyzik, profesor Frank Donald Stacey (*1929) z Queenslandské univerzity, měřeními gravitační konstanty v důlní šachtě kilometr pod povrchem. Výsledek se lišil o 2 % od hodnoty měřené na povrchu. Jedním z možných vysvětlení byla existence newtonovské složky gravitační síly. Obdobná měření se proto konala na palubě americké ponorky USS Dolphin (AGSS 555), která byla schopna se ponořit do podstatně větší hloubky. Australská měření se ale nepotvrdila. *Nordtvedtova síla* by také mohla způsobovat malé změny vzdálenosti Měsíce od Země, které se pokouší detekovat experiment LRR (*Lunar Laser Ranging*) využívající pro laserová měření vzdálenosti koutové odražeče umístěné na Měsíci posádkami Apollo 11, 14 a 15. Další síla analogická gravitaci by mohla mít původ v extradimenzech, které jsou součástí některých snah o sjednocení všech čtyř interakcí. Za extradimenze považujeme další dimenze přidávané v modelech ke třem běžným prostorovým dimenzím a k jedné časové dimenzi. Mohou být jak makroskopické, tak komptifikované (svinuté). Jejich projevy ale dosud nebyly pozorovány, takže není jisté, zda existují, nebo zda jde o slepou uličku. Jestliže by nová síla závisela na složení látky (například poměru protonů a neutronů), byla by v principu objevitelná nějakou sofistikovanou variantou Eötvösova experimentu (dvě různá tělesa na rameni torzních vah, na která působí jak odstředivé síly způsobené rotující Zemí, tak gravitace). Výsledkem by byl nenulový moment síly působící na tato tělesa. Zatím se ale žádné síly tohoto typu detekovat nepodařilo.

Jako modifikovaná gravitace se také označují různé snahy o modifikaci Newtonova gravitačního zákona. Nejznámější jsou pokusy o nahrazení druhé mocniny, s níž gravitace ubývá se vzdáleností, jiným exponentem. Žádný z těchto pokusů ale zatím nevedl k cíli.



Atomki anomálie (viz str. 194). Pik na velkých úhlech by mohl být způsoben novou částicí. Zdroj: Atomki.

Elektromagnetická interakce – interakce působící na všechny částice s elektrickým nábojem. Má nekonečný dosah, mezi tělesy ubývá s druhou mocninou vzdálenosti. Polními částicemi jsou fotony, které vytvářejí mezi nabitými tělesy elektromagnetické pole. Nemají elektrický náboj, mají nulovou klidovou hmotnost a spin rovný jedné. Teorie elektromagnetické interakce se nazývá kvantová elektrodynamika (QED).

Silná interakce – interakce krátkého dosahu, přibližně 10^{-15} m. Silná interakce je výběrová, působí jen na částice s barevným nábojem, tj. kvarky. Polními částicemi silné interakce jsou gluony (z anglického „glue“ = lepit, lepidlo). Gluony spojují kvarky do větších celků, tzv. hadronů. Nejznámější jsou proton a neutron složený ze tří kvarků. Silná interakce je odpovědná za soudržnost atomárního jádra. Polní částice mají barevný náboj, a proto mohou působit samy na sebe. Barevný náboj na malých vzdálenostech (při vysokých energiích) slábne a kvarky se chovají jako volné částice. V tomto případě hovoříme o tzv. asymptotické volnosti kvarků. Teorii silné interakce se nazývá kvantová chromodynamika (QCD).

Spektrometr s vysokým rozlišením ve vědeckém ústavu Atomki, který analyzuje páry gama fotonů vylétajících z excitovaných jader. Zdroj: CERN Courier.



Částice X17 (Atomki anomálie)

Velmi zajímavý experiment provedli v roce 2015 v Ústavu jaderného výzkumu Maďarské akademie věd v Debrecíně (ústav je znám pod kratším a výstižnějším názvem Atomki). Skupina vědců pod vedením Attily Krasznahorkaye posílala urychlené protony na jádra ${}^7\text{Li}$, která se při srážkách měnila na excitovaná jádra ${}^8\text{Be}$. Z těchto jader by podle standardního modelu měly vylétávat energetické fotony, které se vzápětí přemění na elektronový-pozitronový pár. Skupina měřila úhly mezi vylétávajícími elektrony a pozitrony. Pro malé úhly statistika souhlasila se standardním modelem, ale kolem 140° se objevil malý pík (zvýšené množství elektronů a pozitronů vylétávajících pod tímto úhlem), který se standardním modelem částic a interakcí nesouhlasil. Statistická významnost byla „jen“ $3,1\sigma$, což znamená, že pravděpodobnost, že jde o náhodnou fluktuaci je 1:1000. Za prokázaný objev se považuje 5σ (pravděpodobnost náhodné fluktuace 1:3 500 000). Zvýšenému počtu elektronů a pozitronů rozptylujících se pod úhlem 140° odpovídal pík v energetickém spektru o energii/hmotnosti 17 MeV. Skupina upozornila, že by mohlo jít o novou elementární částici – boson – za hranici standardního modelu, která získala podle své hmotnosti pracovní označení X17. Bosony patří ve standardním modelu

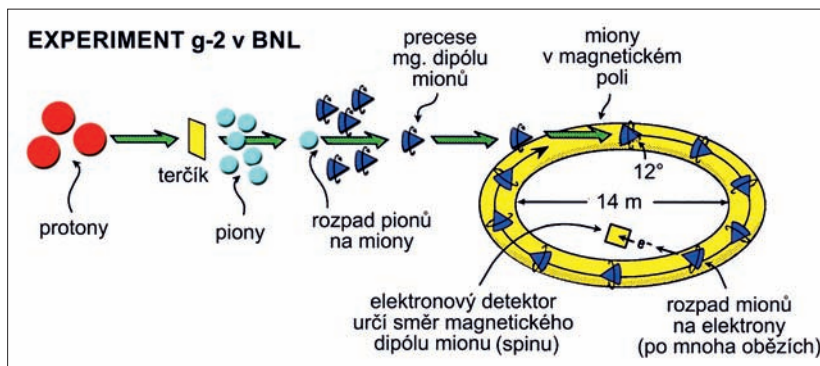
k nosičům sil, takže by částice X17, pokud skutečně existuje, mohla být spojena s novou neznámou silovou interakcí. Hmotnost 17 MeV je padesátinou hmotnosti protonu a 34-násobkem hmotnosti elektronu. Taková částice by mohla být i žhavým kandidátem na usilovně hledané částice temné hmoty.

Publikace o existenci možné nové částice vyšla v roce 2016. Novou částici bohužel nepotvrdila žádná jiná skupina, neuspěl ani experiment NA64 prováděný na urychlovači SPS v CERNu. Řada fyziků poukazovala na možné systematické chyby. V letech 2017 až 2018 proto debrecínská skupina

detektor představěla a začala provádět další sérii experimentů, mj. i s rozpadem excitovaného jádra ^4He . Nové výsledky byly velmi zajímavé. Kromě již známého píku na úhlu 140° se objevil další pík na úhlu 115° . Oba píky hovoří ve prospěch existence částice X17. Výsledky byly publikovány v letech 2019 a 2020, ale opět nebyly potvrzeny žádnou jinou vědeckou skupinou. V současnosti už ale nejde jen o záležitost maďarské vědecké skupiny. Nezávislou analýzu experimentálních dat provedla skupina z Kalifornské univerzity v USA (Jonathan Feng, Tim Tait, Christopher Verhaaren) s podobnými závěry. Američané navrhli další experiment s excitovaným jádrem ^{12}C . Navíc bude částice X17 hledána v Jeffersonově laboratoři, kde plánují experimenty, v nichž budou elektrony/pozitrony urychlené v injektoru CEBAF nastřelovány na tantalové a uhlíkové terče a ve vylétávajících částicích bude hledán podpis částice X17. V průběhu několika nadcházejících let by tak mohla být případná existence nové polní částice X17 definitivně potvrzena, nebo vyvrácena.

Mionový experiment g-2

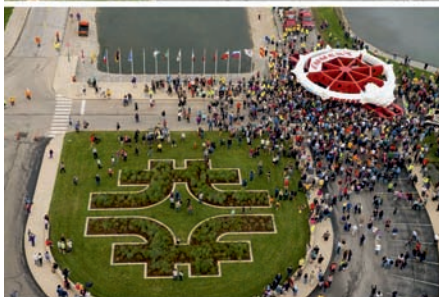
Další skupina experimentů, která vedla na podezření z existence páte interakce, se týká měření magnetického momentu mionů (těžších příbuzných elektronu). Magnetický moment nabitých částic je dán jak jejich spinem (vlastní část), tak orbitálním momentem (pohybová část). Magnetický moment je kvantovaný a základní kvantum se nazývá *Bohrův magneton*. Podle Diracovy rovnice, popisující chování mionu, by měl být vlastní (spinový) magnetický moment mionu dvojnásobkem Bohrova magnetonu. Výpočet se provádí přes tzv. *Feynmanovy diagramy* s jedním a dvěma vrcholy. V roce 1948 ukázal americký teoretik Julian Schwinger, že příspěvky od složitějších Feynmanových diagramů povedou na tzv. *anomální magnetický moment* elektronu a mionu, který se od dvojnásobku Bohrova magnetonu nepatrně liší. Příslušný koeficient se nazývá *gyromagnetický faktor* a pro miony ze Schwingerova výpočtu (ze standardního modelu) vychází



Princip mionového g-2 experimentu v Brookhavenu.

Zdroj: Brookhavenská národní laboratoř.

Slabá interakce – interakce s konečným dosahem, který je přibližně 10^{-17} m. Působí pouze na levotočivé kvarky a leptony. Polními částicemi jsou vektorové bosony W^+ , W^- a Z^0 se spinem rovným jedné. Hmotnosti částic jsou v rozmezí 80 až 90 GeV. Typickým slabým procesem je například beta rozpad neutronu. Teorie slabé interakce se nazývá kvantová flavourdynamika (QFD).



Stěhování magnetu z Brookhavenské národní laboratoře do Fermilabu. Zdroj: BNL, Fermilab.

→ Standardní model elementárních interakcí a částic.
Zdroj: Particle Data Group.

$g = 2,00233183620(86)$, číslo v závorce udává neurčitost posledních dvou platných cifer měření. Odchylka od hodnoty 2 vypovídá o jemných mechanismech kvantové elektrodynamiky, proto se experimenty testující kvantovou elektrodynamiku založené na měření magnetického momentu označují jako $g-2$ (g minus dvě). Jakákoli nepatrná odchylka od hodnoty g faktoru $2,00233183620(86)$ vypočtené ze standardního modelu znamená, že standardní model neplatí přesně a existují v něm další částice a silová pole.

První větší experiment tohoto druhu byl uskutečněn před zhruba dvěma desítkami let v Brookhavenské národní laboratoři na poloostrově Long Island v blízkosti New Yorku. Urychlené protony byly nastřeleny na terčík, z něhož vylétaly piony, jež se rozpadaly na miony. Miony poté vletly do akumulárního prstence, kde byly udržovány na kruhové trajektorii magnetickým polem. Elementární magnetické dipóly, které v magnetickém poli precedují (jejich osa se otáčí kolem siločar magnetického pole po kuželové ploše) se po mnoha obězích rozpadnou na obyčejný elektron letící ve směru osy magnetického dipólu. Zařízením je možné velmi přesně určit magnetický moment mionů. Brookhavenský experiment měl označení E821 a z analýzy dat nasbíraných v roce 2001 vzešel článek v roce 2004 oznamující, že byly naměřeny odchylky od standardního modelu se statistickou významností $2,7\sigma$. Šlo tedy spíše o podezření než o skutečný objev.

V roce 2013 byl brookhavenský experiment rozebrán a jeho podstatné části, zejména magnet o hmotnosti 15 tun, byly převezeny do Fermilabu sídlícího na předměstí Chicaga. Cesta měřila 5 120 kilometrů a zaměstnanci Fermilabu uvítali přijíždějící magnet s velkou pompou. Mionový experiment $g-2$ byl znovu postaven ve Fermilabu a získal označení E989. Supravodivý magnet akumulárního prstence o průměru 15 metrů je provozován za teploty -268°C . Staronový experiment sbírá data od roku 2018 a první výsledky byly oznámeny v dubnu 2021. Naměřený magnetický moment mionu je $2,00233184122(82)$, tedy se od hodnoty předpověděné standardním modelem liší na osmém desetinném místě. Je to nepatrná odchylka, ale byla naměřena se statistickou významností $4,2\sigma$. Pokud další sběr povede k překročení hodnoty 5σ , nebude již pochyb o vědeckém objevu, který by znamenal, že na miony působí další neznámé síly za hranicí standardního modelu. Bylo by to poprvé, kdy by k popisu přírodních dějů standardní model nestačil. Zatím se experimenty vždy chovaly podle tohoto modelu.

Standardní model elementárních částic

tři generace částic látky
(fermiony)

interakce / nosiče sil
(bosony)

	I	II	III		
hmotnost	$\approx 2,2 \text{ MeV}$	$\approx 1,28 \text{ GeV}$	$\approx 173,1 \text{ GeV}$	0	$\approx 124,97 \text{ GeV}$
náboj	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
KVARKY	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	$\approx 4,7 \text{ MeV}$	$\approx 96 \text{ MeV}$	$\approx 4,18 \text{ GeV}$	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	d down	s strange	b bottom	γ foton	
	$\approx 0,511 \text{ MeV}$	$\approx 105,66 \text{ MeV}$	$\approx 1,7768 \text{ GeV}$	$\approx 91,19 \text{ GeV}$	
	-1	-1	-1	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
LEPTONY	e elektron	μ mion	τ taun	Z Z boson	
	$< 1,0 \text{ eV}$	$< 0,17 \text{ MeV}$	$< 18,2 \text{ MeV}$	$\approx 80,39 \text{ GeV}$	
	0	0	0	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e elektronové neutrino	ν_μ mionové neutrino	ν_τ taunové neutrino	W W boson	
					POLNÍ BOSONY VEKTOROVÉ BOSONY
					SKALÁRNÍ BOSONY



Rozluštit záhadu páté interakce by mohl největší urychlovač světa – Velký hadronový kolider v komplexu urychlovačů CERN v blízkosti Ženevy. Obvod urychlovače je 27 kilometrů a protony zde mohou získat energii až 14 teraelektronvoltů. Zdroj: CERN.

A co dál?

Další nezávislý poznatek, že se miony nechovají zcela dle standardního modelu, přinesly experimenty na Velkém hadronovém kolideru v komplexu CERN. Na detektoru LHCb se statistickou významností 4,2 σ vychází, že se při rozpadu b kvarku miony chovají poněkud jinak než elektrony. Poprvé se tak objevují experimenty, které naznačují, že existují jevy, které nejsou standardním modelem popsatelné. Bombastické novinové titulky o objevu páté interakce je ale třeba brát zatím s rezervou. Je třeba dalších dat a dalších experimentů s podstatně vyšší citlivostí. I v případě, že budou maďarské, fermilabské a cernské experimenty potvrzené, není zatím jasné, zda mají společného jmenovatele, nebo zda jde o několik různých jevů. Probíhají usilovné diskuze o charakteru polní částice nové silové interakce, může jít o tzv. *leptokvark*, který je schopen převádět kvarky na leptony, ale také o analogii polní částice slabé interakce, tzv. *Z' boson* (na rozdíl od polní částice Z slabé interakce se za označením píše čárka). Další diskuze probíhají o názvu případné nové síly. Někteří navrhuji *voňavá síla* podle kvantové vlastnosti (vůně) odlišující elektrony od mionů, jiní *hypersíla*. Žijeme v převratné době, kdy standardní model, který byl po mnoho desetiletí neochvějným stavebním kamenem veškerých znalostí o elementárních částicích a interakcích, začíná ztrácet půdu pod nohama a pravděpodobně dojde k tomu, tak jak tomu už bylo mnohokrát v minulosti, že se stane jen speciálním případem nějakého obecnějšího modelu, který bude schopen popsat i jevy, které v současnosti objevujeme.

■ Petr Kulháněk, 10. 9. 2021, AB 32/2021