Reálná instalace detektoru LHCb v podzemní hale. Na snímku je zachycena část týmu fyziků a techniků, kteří na experimentu pracují. Tento obrázek ukazuje skutečný vzhled zařízení a jeho okolí v kontrastu s předchozím počítačovým 3D modelem.

Vesmír funguje podle jednoduchých zákonů

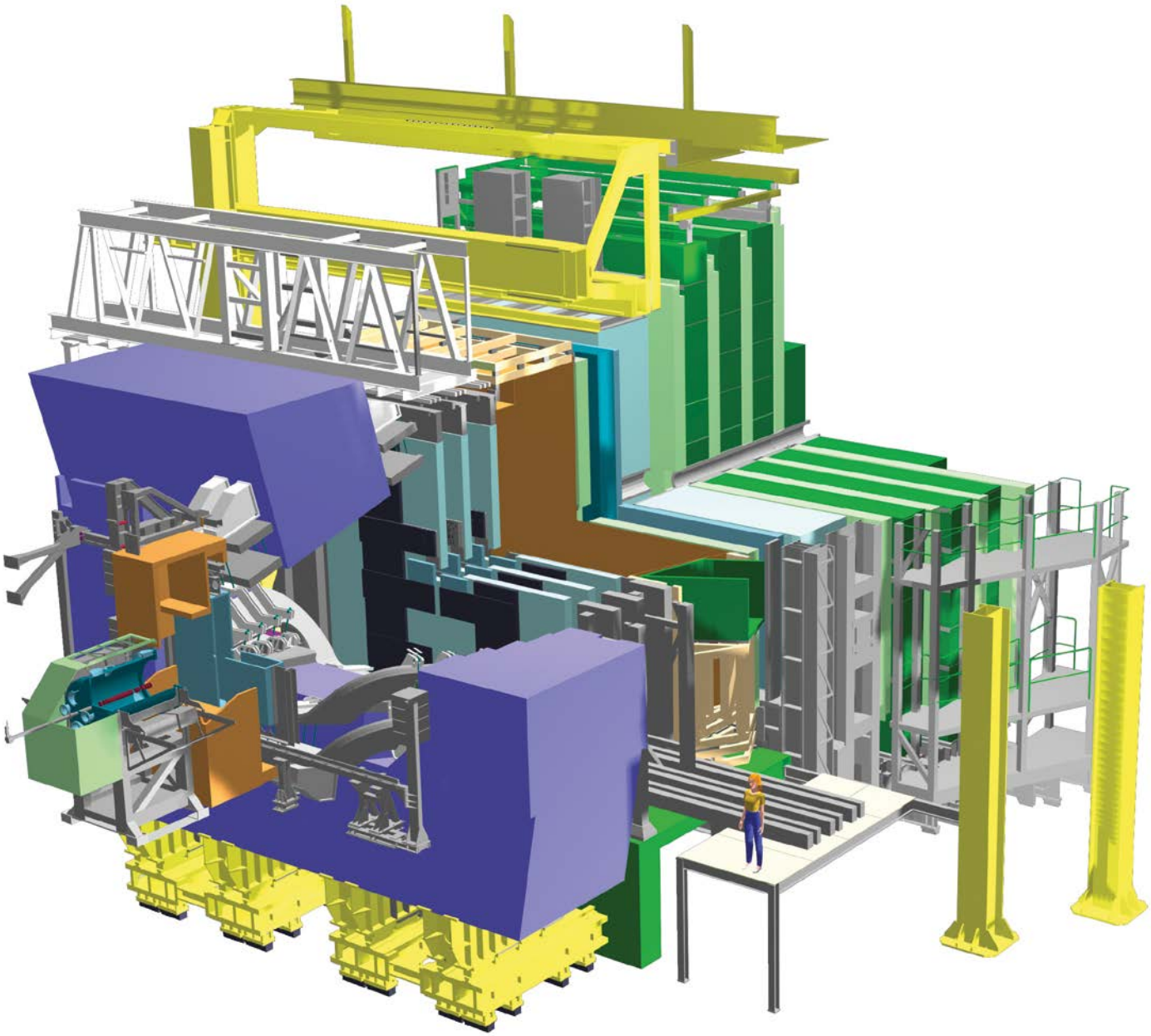
Kosmologické modely předpokládají, že se při uvažovaném velkém třesku vytvořilo stejné množství hmoty i antihmoty. Pokud se tak skutečně stalo, proč místo toho, aby všechny částice a antičástice při procesu anihilace zanikly a zanechaly po sobě pouze záření, přesto malé množství hmoty zůstalo? Na tuto tému hovoříme s českým fyzikem Tomášem Jakoubkem z Fyzikálního ústavu Akademie věd České republiky.

V tomto rozhovoru budeme hovořit o tom, proč ve vesmíru nezvítězila antihmota. Dalo by se to chápat tak, že pokud by hmota a antihmota při anihilaci zanikla, znamenalo by to, že by nezačal existovat vesmír?
Vesmír by možná existoval, ale určitě ne takový, jak ho známe dnes. Byl by to prostor vyplněný pouze zářením, prostor pravděpodobně velmi plochý (nezakřivený), homogenní a chladný. Příroda má ráda symetrii, ale právě díky jejímu narušení nezanikla v raném vývoji vesmíru všechna vytvořená hmota a antihmota. Představte si, jak velké asi muselo být to původní množství, když to, co vidíme na nebi, je jen malý zbyteček, který po anihilaci zůstal...

Hmotu pozorujeme všude kolem nás a proto je pojem „hmota“ lidem všeobecně znám. Mohl byste nám vysvětlit, jaké konkrétní částice hmotu tvoří?
V prvním přiblížení je hmota skutečně vše, co vidíme okolo nás. Tvoří ji atomy, které se skládají z jádra a z elektronového obalu. Jádro atomu je pak tvořeno protony a neutrony. Při současném stavu poznání považujeme elektron za dále nedělitelný – jde tedy o elementární částici. Naopak protony a neutrony se skládají z elementárních částic zvaných kvarky, které ale za normálních podmínek nemohou existovat samostatně. Kvarky drží pohromadě díky jiným částicím zvaným gluony (od anglického slova glue – lepidlo) a proto nemůžeme pozorovat jeden jediný samotný kvark. Na velkých urychlovačích je možné kvarky na krátký okamžik uvolnit a ony pak chvíli „plavou“ v jakési kvark-gluonové polévce, ale samostatně „žijící“ kvark ještě nebyl nalezen.

A co antihmota, jak by se dala definovat?
Jde o „zrcadlový“ protějšek běžné hmoty. Skládá se z antičástic, které mají opačné vlastnosti než částice hmoty (např. pozitron má kladný náboj, zatímco elektron záporný). I kvarky mají své antičástice – antikvarky – a z těch můžeme „složit“ například antiproton.

Mohl byste nastínit, co by nastalo, pokud by se setkala částice a antičástice?
Při setkání hmoty a antihmoty dochází k tzv. anihilaci – obě „hmoty“ zaniknou a uvolní energii, nejčastěji ve formě dvou a více fotonů. Pokud je dostupná energie vyšší, mohou vzniknout i jiné hmotné částice. Zde se krásně uplatní Einsteinův slavný vztah $E = mc^2$. Z 10 kg uhlí a 10 kg „anti-uhlí“ bychom anihilací získali na jeden den energii pro celý svět. Kdybychom to uměli!



Počítačový model detektoru LHCb, který se nachází asi 100 m pod zemí v laboratoři CERN ve Švýcarsku. Tento detektor slouží k pozorování a měření částic, které vznikají při srážkách protonů v urychlovači částic LHC. Barevné části představují různé součásti detektoru, které mají za úkol zaznamenat různé vlastnosti částic, například jejich dráhu, energii nebo typ. Pro představu o velikosti je na obrázku také postava člověka. Detektor je opravdu obrovský – je velký jako menší dům a váží přes 5 tisíc tun.

Vaši kolegové z experimentu LHCb v CERN oznámili první pozorování rozdílného chování baryonové hmoty a antihmoty. Co nového jste se dozvěděli?
Na tento okamžik jsme čekali dlouhých 60 let, tak dlouho totiž víme, že se tímto způsobem chovají jiné částice, mezony. A baryony jsou pro nás možná ještě důležitější, protože mezi ně patří i všudypřítomné protony, základní stavební kameny naší hmoty.

Mohl byste nám více představit experiment LHCb.
LHCb je jeden z detektorů na urychlovači částic LHC (Velký hadronový urychlovač - Large Hadron Collider) v CERN. Fyzikové z kolaborace LHCb pomocí něj zkoumají právě rozdíly mezi hmotou a antihmotou. Jde o veliké a složité zařízení, které dokáže měřit rozpady (nebo lépe „přeměny“) částic hmoty a antihmoty. I malé odchylky v jejich chování mohou pomoci vysvětlit, proč ve vesmíru převažuje hmota.

V LHC se vědci snaží vytvořit mimo jiné i podmínky, shodné s těmi, které zřejmě panovaly okamžik po velkém třesku. Jak náročné tyto experimenty jsou a jakým způsobem probíhají?
Tyto experimenty a z nich získaná data umožňují fyzikům studovat právě tu zmíněnou kvark-gluonovou „polévku“ (správně nazývanou kvark-gluonové plazma), která nejspíše po velkém třesku existovala. Za obrovských hustot a teplot se kvarky a gluony pohybovaly volně, což je pro fyziky ohromně zajímavý stav. Nyní jsme tento stav schopni vytvořit při srážkách urychlených jader olova a jiných těžkých prvků. Při těchto srážkách dosáhne hmota teploty zhruba třistatisíckrát vyšší, než je ve středu Slunce, ale v tomto stavu vydrží samozřejmě jen velmi krátký okamžik.

V které části LHC vědci podmínky po velkém třesku zkoumají?
Na LHC máme experiment ALICE, který je přímo postaven, aby tento stav dokázal

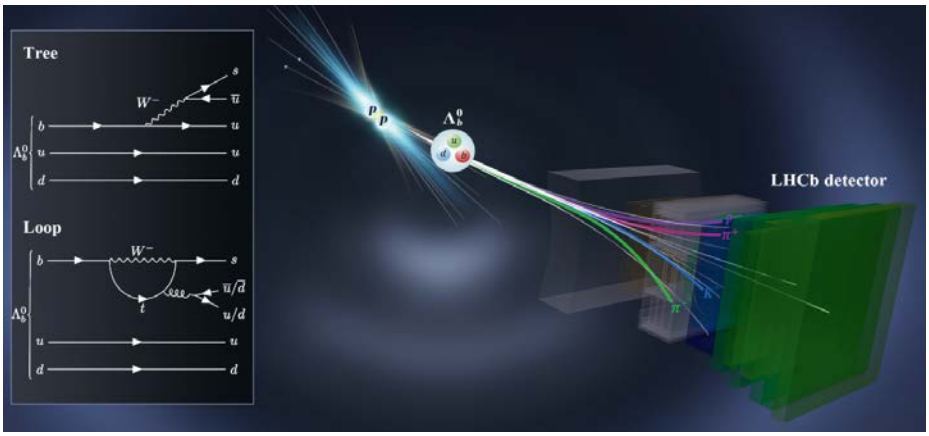
zkoumat. Ostatní LHC experimenty to neumí tak dobře, i když i ty k výzkumu přispívají. Mimochodem, někdy se popularizátoři vědy uchylují k popisu, že děláme „velký třesk v laboratoři“, ale to je samozřejmě nesmysl. Jde opravdu jen o podmínky těsně *po* velkém třesku.

Hovořil jste o důležitém objevu na experimentu LHCb. Mohl byste nám objasnit, co tento objev vědcům přinesl?
Tento objev zásadním způsobem rozšiřuje naše chápání rozdílů mezi hmotou a antihmotou a otevírá vědcům nové cesty k pochopení, proč při vzniku vesmíru převládla právě hmota. Zmiňovaný vědecký výsledek byl nedávno s velkou slávou představen na konferenci Rencontres de Moriond v Itálii.

Co tento objev může přinést naší společnosti? Mohou výsledky tohoto odhalení i celkového výzkumu podmínek po velkém třesku v LHCb nějakým způsobem například pomoci i běžným lidem?
Na LHCb, resp. v laboratoři CERN, se provádí základní výzkum, který nemá přímou aplikaci. Mnohdy se totiž na praktické aplikace čeká desetiletí, a nakonec ani nemusí přijít. Dobrým příkladem je vlastně historie antihmoty.

Mohl byste nás provést historií výzkumu antihmoty?
Roku 1928 přišel Paul Dirac s rovnicí, která měla pro energii částice dvě řešení – kladné a záporné. Dirac to interpretoval tak, že pro každou částici existuje antičástice. Roku 1931 publikoval článek, kde přímo předpověděl existenci pozitronu (anti-elektronu). Carl Anderson nezávisle na Diracově teorii studoval kosmické záření pomocí mlžné komory s magnetickým polem. Roku 1932 zachytil fotografii stopy částice, která měla stejnou hmotnost jako elektron, ale v magnetickém poli se její dráha zakřivila na opačnou stranu – měla tedy opačný náboj. Diraca a Andersona zpočátku nebrali ostatní vědci moc vážně, ale o rok později byly výsledky potvrzeny Blackettem a Occhialinim. Dirac získal Nobelovu cenu téhož roku, Anderson o tři roky později.

Důležitým výsledkem výzkumu antihmoty je využití v lékařství při tzv. pozitronové emisní tomografii, že?
Ano, pozitronová emisní tomografie (PET) byla poprvé použita v roce 1976, ale běžně se začala používat až od 90. let 20. století, tedy nějakých 60 let od objevu pozitronu. Ide o lékařskou zobrazovací metodu v nukleární medicíně. Principem

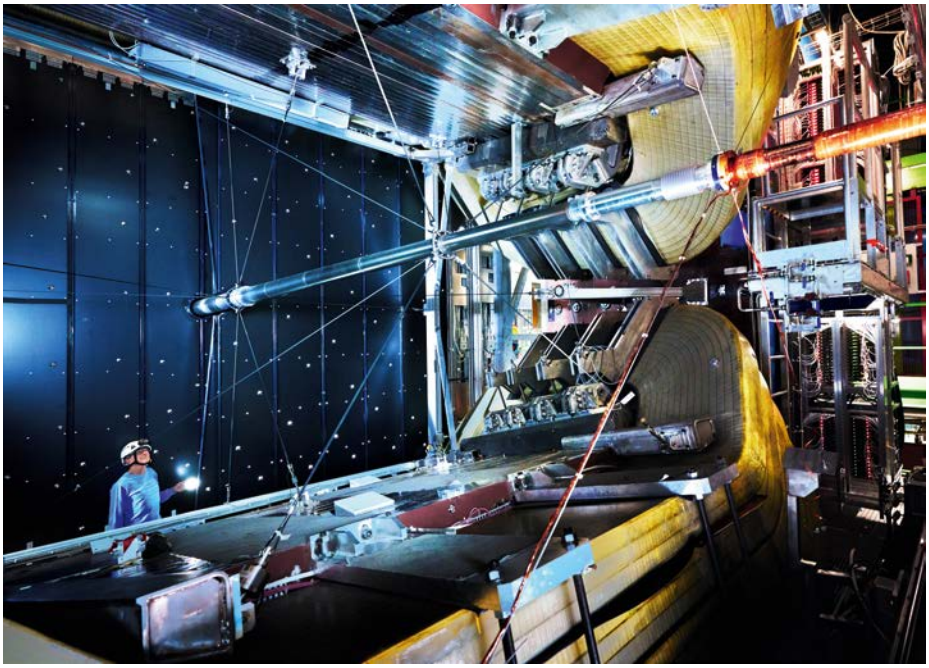


Ilustrace vzniku částice $\Lambda^0 b$ při srážce protonů a jejího rozpadu na konečný stav $pK^-\pi^+\pi^-$. Dvě vložené schémata vlevo znázorňují základní stromový a smyčkový proces na úrovni kvarků, které zprostředkovávají rozpad $\Lambda^0 b \rightarrow pK^-\pi^+\pi^-$. Během těchto procesů kvarky nakonec vytvoří částice proton (p), kaon (K^-) a dva piony (π^+ a π^-), které jsou detekovány experimentem LHCb.

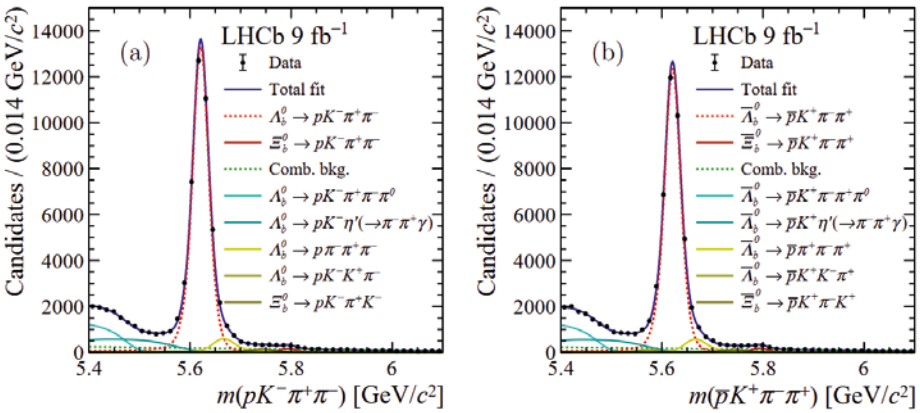
této metody je lokalizace místa vzniku fotonů γ, které v těle vznikají při anihilaci pozitronů, uvolněných podanou radioaktivní látkou (radiofarmakem), a elektronů v lidském těle.

Jak zmiňovaná pozitronová emisní tomografie probíhá a co se při ní děje?
Ze zákonů zachování energie a hybnosti plyne, že při anihilaci vzniknou dva fotony, které letí přesně vzájemně opačnými směry. Výjimečně může vzniknout fotonů více, ale tyto případy jsou při metodě PET ignorovány. Oba fotony mohou být zachyceny tzv. koincidenčními detektory a tím je dáno, že místo anihilace leží na přímce mezi nimi. Poslední souřadnice – poloha na této přímce – se určí z případného drobného rozdílu v časech příletu. Počítač pak vytvoří trojrozměrnou rekonstrukci aktivity radiofarmaka v těle. PET tedy nezobrazuje ani tak anatomickou strukturu, jako spíše ochotu konkrétní tkáně vychytávat příslušné radiofarmakum. V dnešní době je metoda kombinována s výpočetní tomografií nebo magnetickou rezonancí pro přesnější anatomickou lokalizaci metabolických změn.

V rámci výzkumu chování hmoty a antihmoty figuruje velmi důležitý pojem, kterým je CP-symetrie. Co bychom si mohli pod tímto označením představit?
CP-symetrie znamená, že fyzikální zákony by měly platit stejně pro částice (v na-



Na obrázku je vidět část detektoru LHCb (uvnitř „modré“ části obrázku na vedlejší straně). Středem experimentu prochází speciální vakuová trubice – tzv. beampipe – kterou letí svazek protonů urychlovače LHC. Tato trubice má unikátní kónický tvar a je upevněna pomocí jemné podpůrné konstrukce, která minimalizuje množství materiálu v dráze částic vznikajících při srážkách.



Rozložení hmotností částic vzniklých při rozpadu Λb^0 a její antičástice $\bar{\Lambda} b^0$. Rozdíl v počtu rozpadů Λb^0 (vlevo) a $\bar{\Lambda} b^0$ (vpravo), po zohlednění experimentálních vlivů, jasně ukazuje existenci porušení CP symetrie. Fyzikové z experimentu LHCb naměřili hodnotu tzv. CP asymetrie ACP = (2,45 ± 0,46 ± 0,10) %, což se od nuly liší o 5,2 směrodatné odchylky. Takto výrazně nenulová hodnota znamená, že bylo opravdu pozorováno porušení CP symetrie.

šem světě) i pro antičástice v zrcadlovém vesmíru. Zrcadlový vesmír samozřejmě nemáme, ale můžeme tady na Zemi studovat zrcadlové procesy. Narušení této symetrie znamená, že realita není dokonalé zrcadlo – některé procesy například probíhají častěji u hmoty než u antihmoty.

Co v tomto případě vědcům naznačuje narušení této symetrie?
Narušení CP-symetrie je jedna z nutných podmínek pro převahu hmoty nad antihmotou v našem vesmíru. Narušení CP-symetrie je dobře prozkoumané pro částice zvané mezony, pro které bylo pozorováno již před 60 lety, ale až nyní se podařilo jej změřit pro baryony – tedy pro částice podobné našim protonům. Naše současné teorie sice narušení CP-symetrie zahrnují, ale bohužel s hodnotou příliš malou na to, aby vysvětlila dominanci hmoty ve vesmíru.

Co tedy tento jmenovaný nejnovější objev přináší?
Tento vědecký výsledek otevírá cestu k lepšímu pochopení, proč po velkém třesku nezanikla veškerá hmota anihilací s antihmotou a v konečném důsledku může v budoucnu přispět k zásadním změnám v našem chápání vesmíru i k praktickým inovacím. Jde o další – a to důležitý – kousek skládačky pro teoretické a experimentální studie povahy narušení CP-symetrie, které nám mohou ukázat, kde za hranicemi Standardního modelu hledat novou fyziku.

Zajímal jste se o fyziku a vesmír již od malička, když nyní působíte v rámci výzkumu interakcí částic a antičástic, který by mohl pomoci objasnit vznik vesmíru.
O vědu a techniku jsem se zajímal již od dětství, a to jednak díky svým rodičům, ale také kvůli seriálu MacGyver. Velmi se mi jako malému líbilo a vlastně se mi to stále líbí, jak uměl vždy vyřešit problém, protože chápal, jak věci fungují. A zajímavé je, že v jednom díle dokonce potvrdili, že studoval fyziku!

Otázkami vzniku, stavby a vývoje vesmíru jako celku se zabývá mnoho vědních oborů na rozhraní astronomie, teoretické fyziky a filozofie. Co znamená vesmír pro vás osobně?
Je to úžasné místo, kde jsou možné i „nemožné“ věci. Napadne mě to vždy, když vidím udivené výrazy svých dětí nebo obecně lidí – laiků, kterým vysvětluji, co všechno je podle současných teorií možné nebo dokonce velmi pravděpodobné. Rád popularizuji vědu a vesmír je plný skvělých příkladů. Jsem nohama na zemi, ale rád se dívám na noční oblohu, protože je prostě fascinující a pak se chvíli toulám vesmírem, jak ho „znám“ z povídek a románů A. C. Clarka.

Působíte v Oddělení experimentální fyziky částic Fyzikálního ústavu AV ČR a tomuto výzkumu se v CERN věnujete již 15 let. Co byste si přál v oblasti hmoty a antihmoty zjistit?
Určitě něco zásadního… Ale začal bych tím, že například velmi dobře změříme proces, který má symetrii zachovávat a ono ejhle, ona to nebude pravda. A to nás povede zase někam dál. Já tak nějak intuitivně věřím tomu, že celý vesmír funguje podle krásných a jednoduchých zákonů a že je to jen naší lidskou omezeností, že to nevidíme. Když to vztáhneme k mému oboru, tak všechny známé částice (a antičástice), jejich chování a vzájemné interakce popisuje Standardní model fyziky elementárních částic. I přes veškerý úspěch tohoto modelu a jeho prediktivní sílu (například předpověď Higgsova bosonu) se ale nejedná o dokonalou teorii.

Mohl byste nám popsat nedokonalosti, které vnímáte u Standardního modelu fyziky elementárních částic?
Tak například mimo jiné nepopisuje gravitaci, nedokáže vysvětlit temnou hmotu a temnou energii, a ačkoli předpovídá narušení CP-symetrie, tak v mnohem menším rozsahu, než je zapotřebí pro vysvětlení pozorované asymetrie ve vesmíru. Navíc má tento model hodně volných parametrů, je komplikovaný. Kvůli těmto a dalším nedostatkům fyzikové předpokládají, že Standardní model bude časem rozšířen nebo nahrazen lepší teorií, stejně jako byla nakonec Newtonovská mechanika nahrazena Einsteinovou obecnou teorií relativity. A já doufám, že tahle teorie už bude „krásná“. Anebo ta další. ■

Jana Žďárska

Ing. Tomáš Jakoubek, Ph.D. (*1985) je český fyzik. Vystudoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze, poté pracoval jako postdoktorand ve Weizmann Institute of Science v Izraeli. V prosinci roku 2024 se vrátil do Oddělení experimentální fyziky částic Fyzikálního ústavu Akademie věd. Od roku 2007 pracoval na experimentu ATLAS na LHC (CERN, Švýcarsko), kde se zabýval hlavně narušením CP-symetrie. V současnosti se přesunul na experiment LHCb v CERN a rozšiřuje zapojení Fyzikálního ústavu do tohoto experimentu.