

Fyzika nad rámec Standardního modelu

Do roku 2012, kdy byl v CERNu na Velkém hadronovém urychlovači potvrzen Higgsův boson, byl Standardní model (SM) na papíře kompletní. Každá předpovězená částice byla nalezena. Jeho rovnice prošly každou experimentální zkouškou s ohromující přesností.

Přesto v oblasti fyziky nepřevládal pocit uzavření, ale spíše pocit neúplnosti. Podobně jako Newtonovy zákony před Einsteinem nebo klasická fyzika před kvantovou mechanikou, Standardní model byl příliš úspěšný na škálách, které můžeme testovat, ale neschopný odpovět na hlubší otázky. Byl to téměř dokonalý plán – ale pouze malé části krajiny.

Gravitace: Chybějící síla

Nejviditelnějším opomenutím je gravitace.

- SM popisuje tři ze čtyř známých základních sil: elektromagnetismus, slabou sílu a silnou sílu.
- Gravitace, popsaná Einsteinovou **obecnou relativitou (GR)**, je zcela nepřítomná.

To není jen drobný přehmat. Obecná relativita považuje gravitaci za zakřivení časoprostoru, hladké geometrické pole, zatímco SM zachází se silami jako s kvantovými poli zprostředkovanými částicemi. Pokusy o kvantizaci gravitace stejným způsobem narážejí na nekonečna, která nelze renormalizovat.

Standardní model a GR jsou jako dva různé operační systémy – skvělé ve svých doménách, ale zásadně neslučitelné. Jejich sladění je možná největší výzvou současné fyziky.

Hmotnosti neutrin

SM předpovídá, že neutrina jsou bezhmotná. Experimenty, počínaje detektorem Super-Kamiokande v Japonsku (1998) a potvrzené po celém světě, však ukázaly, že neutrina oscilují mezi různými druhy (elektronové, mionové, tau). Oscilace vyžadují hmotnost.

To byl první potvrzený důkaz fyziky mimo Standardní model. Objev získal v roce 2015 Nobelovu cenu pro Kajitu a McDonalda.

Neutrina jsou extrémně lehká, nejméně milionkrát lehčí než elektron. Jejich hmotnosti nejsou SM vysvětleny – ale mohou naznačovat novou fyziku, jako je **mechanismus klouzavého pohybu**, sterilní neutrina nebo spojení s raným vesmírem. V některých scénářích těžká klouzavá neutrina umožňují **leptogenezi**, kde je vytvořena asymetrie leptonů v raném vesmíru, která se později přemění na pozorovanou **asymetrii hmoty a antihmoty**.

Temná hmota

Viditelná hmota popsaná SM tvoří méně než 5 % vesmíru. Zbytek je neviditelný.

- **Temná hmota** (~27 % vesmíru) se projevuje pouze prostřednictvím gravitace: galaxie rotují rychleji, než viditelná hmota umožňuje, kupy galaxií ohýbají světlo více, než by měly, a kosmické mikrovlnné pozadí vyžaduje dodatečnou neviditelnou hmotu.
- Žádná z částic SM nemůže temnou hmotu vysvětlit. Neutrino jsou příliš lehká a rychlá. Běžná hmota je příliš vzácná.

Teorie navrhuje nové částice: WIMPy (slabě interagující hmotné částice), axiony, sterilní neutrino nebo něco podivnějšího. Přes desetiletí pátrání – podzemní detektory, experimenty na urychlovačích, astrofyzikální průzkumy – temná hmota zůstává nepolapitelná.

Temná energie

Ještě záhadnější je **temná energie**, síla pohánějící zrychlující se expanzi vesmíru.

- Objevena v roce 1998 prostřednictvím pozorování supernov, temná energie tvoří ~68 % vesmíru.
- V principu by mohla být vysvětlena jako „vakuová energie“ kvantových polí. Naivní výpočty QFT však předpovídají hustotu vakuové energie o 120 řádů vyšší – nejhorší předpověď ve fyzice.

Tento **problém kosmologické konstanty** je pravděpodobně nejostřejším střetem mezi kvantovou teorií pole a gravitací. Standardní model nemá o temné energii co říci. Je to obrovská díra v našem chápání vesmíru.

Problém hierarchie

Další hlubokou hádankou je samotný Higgsův boson.

Hmotnost Higgsova bosonu je změřena na 125 GeV. Kvantové korekce by ji však měly vytlačit až k Planckově škále (10^{19} GeV), pokud neexistují zázračné vyrušení. Proč je tedy tak lehký ve srovnání s přirozenými energetickými škálami gravitace?

Toto je **problém hierarchie**: Higgs se jeví jako nepřirozeně jemně vyladěný. Fyzici tuší novou fyziku, jako je **supersymetrie (SUSY)**, která by mohla stabilizovat hmotnost Higgsova bosonu zavedením partnerských částic, jež ruší nebezpečné korekce. (Debaty o **přirozenosti** zahrnují myšlenky od dynamických řešení po **antropické** úvahy v možném „krajním“ prostředí vakua.)

Asymetrie hmoty a antihmoty

SM zahrnuje určité porušení CP symetrie, ale zdaleka ne dost na vysvětlení, proč je vesmír dnes plný hmoty místo stejného množství hmoty a antihmoty. Jak bylo uvedeno výše, mechanismy jako **leptogeneze** (často spojené s původem hmotnosti neutrin typu klouzavého pohybu) poskytují jednu přesvědčivou cestu, kde fyzika mimo SM naklání rovnováhu.

Krásný, ale neúplný obraz

Standardní model je někdy nazýván „nejúspěšnější teorií ve fyzice“. Jeho předpovědi odpovídají experimentům na 10–12 desetinných míst. Vysvětluje téměř vše, co vidíme v urychlovačích částic a laboratořích.

Ale je neúplný:

- Ignoruje gravitaci.
- Nedokáže vysvětlit hmotnosti neutrin.
- Nemůže vysvětlit temnou hmotu ani temnou energii.
- Zanechává nevyřešené hluboké hádanky, jako je problém hierarchie a asymetrie hmoty a antihmoty.

Fyzici nyní stojí před známým momentem v historii. Stejně jako Newtonova mechanika ustoupila relativitě a klasická fyzika kvantové mechanice, musí Standardní model nakonec ustoupit něčemu hlubšímu.

Svatý grál: Sjednocená teorie

Konečným cílem je **Velká sjednocená teorie (GUT)** nebo dokonce **Teorie všeho (ToE)**: rámec, který sjednocuje všechny čtyři síly, vysvětluje všechny částice a funguje konzistentně od nejmenších škál (kvantová gravitace) po největší (kosmologie).

Toto je svatý grál moderní fyziky. Proto vědci tlačí urychlovače na vyšší energie, budují masivní detektory neutrin, mapují vesmír teleskopy a vynalézají odvážnou novou matematiku.

Další kapitoly prozkoumají hlavní kandidáty:

- **Supersymetrie (SUSY)** – symetrie mezi částicemi hmoty a sil.
- **Teorie strun a M-teorie** – kde částice jsou vibrující struny a graviton vzniká přirozeně.
- **Extra dimenze** – od rané myšlenky Kaluzy–Kleina po moderní modely Randall–Sundrum.
- **Další přístupy** – jako například kvantová gravitace smyček a asymptotická bezpečnost.

Každá z těchto myšlenek nevznikla jako dogma, ale jako věda v nejlepším slova smyslu: všímání si trhlin, budování nových teorií a jejich testování proti realitě.

Supersymetrie: Další velká symetrie?

Fyzika má dlouhou historii sjednocení prostřednictvím symetrie. Maxwellovy rovnice sjednotily elektřinu a magnetismus. Speciální relativita sjednotila prostor a čas. Elektroslabá teorie sjednotila dvě ze čtyř základních sil. Každý skok vpřed přišel odhalováním skryté symetrie v přírodě.

Supersymetrie – nebo SUSY, jak ji fyzici láskyplně nazývají – je odvážný návrh, že další velká symetrie spojuje dvě zdánlivě odlišné kategorie částic: **hmotu** a **síly**.

Fermiony a bosony: Hmota vs. síla

V Standardním modelu se částice dělí do dvou širokých rodin:

- **Fermiony (spin 1/2):** Patří sem kvarky a leptony, stavební kameny hmoty. Jejich poloviční spin znamená, že se řídí Pauliho vylučovacím principem: žádné dva identické fermiony nemohou být ve stejném stavu. To je důvod, proč mají atomy strukturované obaly a proč je hmota stabilní.
- **Bosony (celočíslný spin):** Patří sem fotony, gluony, W a Z bosony a Higgsova boson. Bosony zprostředkovávají síly. Na rozdíl od fermionů se mohou hromadit ve stejném stavu, což je důvod, proč existují lasery (fotony) a Bose–Einsteinovy kondenzáty.

Stručně řečeno: fermiony tvoří hmotu, bosony přenášejí síly.

Hypotéza supersymetrie

Supersymetrie navrhuje symetrii, která spojuje fermiony a bosony. Pro každý známý fermion existuje bosonový partner. Pro každý známý boson fermionový partner.

- Kvarky → **skvarky**
- Leptony → **sleptony**
- Gluony → **gluiny**
- Gauge/Higgsova sektor → **neutralina** (směsi bina, wino, higgsin; neutrální) a **charginos** (směsi wino, higgsin; nabitá)

(„Fotino“ a „zino“ jsou starší přezdívky pro gauge-vlastní stavy; experimenty ve skutečnosti hledají **hmotnostní vlastní stavy** uvedené výše.)

Proč navrhopvat tak radikální zdvojení světa částic? Protože SUSY slibuje elegantní řešení některých nejhlubších problémů, které Standardní model zanechal.

Řešení problému hierarchie

Jedním z největších lákadel SUSY je její schopnost řešit **problém hierarchie**: proč je Higgsova boson tak lehký ve srovnání s Planckovou škálou.

V Standardním modelu by kvantové korekce od virtuálních částic měly vytlačit hmotnost Higgsova bosonu na obrovské hodnoty. Supersymetrie zavádí spartice, jejichž příspěvky ruší tyto divergence. Výsledek: hmotnost Higgsova bosonu je přirozeně stabilizována, bez potřeby jemného ladění (alespoň v „přirozených“ SUSY spektrech).

SUSY a velké sjednocení

Další motivací pro SUSY je sjednocení sil.

- Výpočet spojovacích konstant silné, slabé a elektromagnetické síly na vyšších energiích ukazuje, že v Standardním modelu se téměř, ale ne zcela setkávají v jednom bodě.

- V SUSY, s příspěvkem spartic, se konstanty krásně setkávají přibližně na 10^{16} GeV.

To naznačuje, že při extrémně vysokých energiích se všechny tři síly mohou sjednotit do jedné **Velké sjednocené teorie (GUT)**.

SUSY jako kandidát na temnou hmotu

Supersymetrie také poskytuje přirozeného kandidáta na **temnou hmotu**.

Pokud je SUSY správná, jedna ze spartic by měla být stabilní a elektricky neutrální. Hlavním kandidátem je **nejlehčí neutralino**, směs bina, wina a higgsin.

Neutralina by interagovala pouze slabě, což odpovídá profilu WIMPů (slabě interagujících hmotných částic). Pokud by byla objevena, mohla by vysvětlit chybějících 27 % hmoty vesmíru.

Experimentální hledání SUSY

Po desetiletí fyzici doufali, že se supersymetrické částice objeví těsně nad energetickými škálami, které již byly prozkoumány.

- **LEP (CERN, 1990s):** Žádné SUSY částice do ~100 GeV.
- **Tevatron (Fermilab, 1990s–2000s):** Žádné spartice.
- **LHC (CERN, 2010s–2020s):** Srážky proton–proton při energiích až **13,6 TeV** (design: **14 TeV**). Přes masivní pátrání žádné důkazy o skvarcích, gluinech ani neutralinech až do škál několika TeV.

Nedostatek objevů SUSY na LHC byl zklamáním. Mnoho nejjednodušších verzí SUSY, jako je „minimální supersymetrický Standardní model“ (MSSM), je nyní silně omezeno. „Přirozená“ spektra jsou tlačena do těžších hodnot, což znamená více ladění, pokud SUSY existuje poblíž škály TeV.

Přesto SUSY nebyla vyloučena. Složité modely předpovídají těžší nebo jemnější spartice, možná mimo dosah LHC, nebo s interakcemi příliš slabými na snadné odhalení.

Matematická krása SUSY

Kromě svých fenomenologických motivací má SUSY hlubokou matematickou eleganci.

- Je jediným možným rozšířením symetrií časoprostoru konzistentním s relativitou a kvantovou mechanikou.
- Supersymetrické teorie jsou často lépe vypočitatelné: krotí nekonečna a odhalují skryté struktury v QFT.
- V teorii strun je SUSY nezbytná pro konzistenci: bez ní teorie obsahuje tachyony a další patologie.

I když příroda nerealizuje SUSY na dostupných energiích, její matematika již obohatila fyziku.

Současný stav supersymetrie

Dnes SUSY zaujímá zvláštní pozici.

- Zůstává jedním z nejvíce přesvědčivých rámců pro fyziku mimo Standardní model.
- Řeší problém hierarchie, podporuje sjednocení a nabízí kandidáta na temnou hmotu.
- Přesto dosud nebyly nalezeny žádné experimentální důkazy.

Pokud LHC a jeho nástupci nenajdou nic, může být SUSY realizována pouze na energetických škálách daleko mimo náš dosah – nebo možná příroda zvolila zcela jinou cestu.

Metoda, ne dogma

Supersymetrie ilustruje vědeckou metodu v akci.

Fyzici identifikovali problémy: otázku hierarchie, sjednocení, temnou hmotu. Navrhli odvážnou novou symetrii, která je všechny řeší. Navrhli experimenty k jejímu testování. Zatím jsou výsledky negativní – ale to neznamená, že byla myšlenka zbytečná. SUSY zdokonalila naše nástroje, objasnila, co hledáme, a vedla celé generace výzkumu.

Podobně jako éter nebo epicykly před ní, SUSY může být odrazovým můstkem k hlubší pravdě, ať už přežije jako konečné slovo, nebo ne.

Teorie strun a M-teorie

Fyzika mimo Standardní model je často motivována záplatami: řešením problému hierarchie, vysvětlením temné hmoty, sjednocením gauge konstant. Teorie strun je jiná. Nezačíná konkrétním problémem. Místo toho začíná matematikou – a končí přetvořením našeho celkového pojetí prostoru, času a hmoty.

Počátky: Teorie zrozená z neúspěchu

Teorie strun začala, překvapivě, ne jako teorie všeho, ale jako neúspěšný pokus o pochopení silné jaderné síly.

Koncem 60. let, než byla plně vyvinuta QCD, se fyzici snažili vysvětlit zoo hadronů. Všimli si vzorců v datech o rozptylu, které naznačovaly, že rezonance mohou být modelovány vibrujícími strunami.

„Model duální rezonance,“ představený Venezianem v roce 1968, popisoval silné interakce, jako by hadrons byly excitacemi drobných strun. Byl elegantní, ale rychle opuštěn, jakmile se QCD ukázala jako skutečná teorie silné síly.

Přesto teorie strun odmítla zemřít. V jejích rovnicích byly skryty pozoruhodné vlastnosti, které zdánlivě ukazovaly daleko za jadernou fyziku.

Překvapivý objev: Graviton

Když teoretici kvantovali vibrace strun, zjistili, že spektrum nevyhnutelně obsahuje **bezhmotnou částici se spinem 2**.

To bylo šokující. Kvantová teorie pole ukázala, že bezhmotná částice se spinem 2 je unikátní: musí to být kvantum gravitace, **graviton**.

Jak později poznamenal John Schwarz: „*Ale objevila se překvapivá skutečnost: matematika teorie strun nevyhnutelně obsahovala bezhmotnou částici se spinem 2 – graviton.*“

To, co začalo jako teorie hadronů, náhodně vytvořilo stavební kámen kvantové gravitace.

Základní myšlenka: Struny, ne body

V jádru teorie strun nahrazuje bodové částice drobnými jednorozměrnými objekty: strunami.

- Struny mohou být **otevřené** (s dvěma koncovými body) nebo **uzavřené** (smyčky).
- Různé vibrační módy struny odpovídají různým částicím.
 - Určitá vibrace může vypadat jako foton.
 - Jiná jako gluon.
 - Další jako kvark.
 - A jeden mód, nevyhnutelně, jako graviton.

Tato jednoduchá změna – z bodů na struny – řeší mnoho nekonečen, která sužují kvantovou gravitaci. Konečná velikost struny rozmazává interakce, které by jinak explodovaly na nule.

Supersymetrie a superstruny

Rané verze teorie strun měly problémy: obsahovaly tachyony (nestability) a vyžadovaly ne-realistické vlastnosti. Průlom přišel se zavedením **supersymetrie**, což vedlo k **teorii superstrun** v 70. a 80. letech.

Superstruny eliminovaly tachyony, zahrnovaly fermiony a přinesly novou matematickou konzistenci.

Ale byl tu háček: teorie strun funguje pouze ve vyšších dimenzích. Konkrétně v **10 dimenzích časoprostoru**.

- Čtyři, které vidíme (tři prostorové, jedna časová).
- Šest dalších, kompaktních nebo stočených do drobných škál, neviditelných pro současné experimenty.

Tato myšlenka, jakkoli radikální, nebyla zcela nová. Ve 20. letech **teorie Kaluzy-Kleina** už naznačila, že extra dimenze mohou sjednotit gravitaci a elektromagnetismus. Teorie strun tuto myšlenku oživila a značně rozšířila.

Pět teorií strun

V polovině 80. let fyzici zjistili, že teorie strun není jedinečná, ale přichází v **pěti odlišných verzích**:

1. **Typ I** – Otevřené a uzavřené struny, včetně orientovaných i neorientovaných strun.
2. **Typ IIA** – Uzavřené, orientované struny, nechirální.
3. **Typ IIB** – Uzavřené, orientované struny, chirální.
4. **Heterotická $SO(32)$** – Uzavřené struny s hybridní konstrukcí.
5. **Heterotická $E_8 \times E_8$** – Vysoce symetrická verze, později klíčová pro spojení s realistickou fyzikou částic.

Každá se zdála matematicky konzistentní, ale proč by si příroda měla vybrat jednu?

První revoluce superstrun

V roce 1984 Michael Green a John Schwarz ukázali, že teorie strun dokáže automaticky rušit kvantové anomálie – něco, co kvantové teorie pole musely pečlivě navrhovat. Tento objev spustil **první revoluci superstrun**, kdy se tisíce fyziků obrátily k teorii strun jako kandidátovi na sjednocenou teorii všech sil.

Byl to první vážný rámec, ve kterém byla kvantová gravitace nejen konzistentní, ale nevyhnutelná.

Druhá revoluce superstrun: M-teorie

V polovině 90. let se rozvinula druhá revoluce. Edward Witten a další zjistili, že pět různých teorií strun nebyly soupeři, ale různými limity jedné, hlubší teorie: **M-teorie**.

M-teorie je považována za existující v **11 dimenzích** a zahrnuje nejen struny, ale i vyšší dimenzionální objekty nazývané **brány** (zkráceně membrány).

- 1-rozměrné brány = struny.
- 2-rozměrné brány = membrány.
- Vyšší dimenzionální brány až do 9 prostorových dimenzí.

Tyto brány daly vzniknout bohatým novým možnostem: celé vesmíry by mohly existovat jako 3-brány plovoucí ve vyšší dimenzionálním prostoru, přičemž gravitace prosakuje do objemu, zatímco ostatní síly zůstávají omezeny. Tento obraz inspiroval moderní modely extra dimenzí, jako je **Randall–Sundrum**.

Významné příklady: Kaluza–Klein a Randall–Sundrum

- **Kaluza–Klein (1920s)**: Navrhla pátou extra dimenzi k sjednocení gravitace a elektromagnetismu. Myšlenka byla na desetiletí odložena, ale teorie strun ji oživila v grandióznější podobě. Kompaktní extra dimenze zůstávají klíčovou vlastností modelů strun.

- **Randall-Sundrum (1999):** Navrhla „zkroucené“ extra dimenze, kde je náš vesmír 3-bránou vloženou do vyšších dimenzí. Gravitační síla se šíří v objemu, což vysvětluje, proč je slabší než jiné síly. Takové modely předpovídají možné signály v urychlovačích částic nebo odchylky od Newtonova zákona na velmi krátkých vzdálenostech.

Experimentální náznaky a výzvy

Teorie strun přináší odvážná tvrzení, ale jejich testování je nesmírně obtížné.

- **Extra dimenze:** Mohly by se projevovat prostřednictvím signálů chybějící energie nebo **excitací Kaluzy-Kleina** – potenciálně pro **gravitony nebo dokonce pole Standardního modelu**, v závislosti na nastavení. Omezení urychlovačů obvykle dosahují rozsahu **multi-TeV**.
- **Gravitony:** Předpovídá se bezhmotná částice se spinem 2, ale detekce jednoho gravitonu je mimo možnosti současné technologie. Nepřímé efekty, jako odchylky v gravitačních vlnách, jsou možné.
- **Supersymetrie:** Teorie strun vyžaduje SUSY na nějaké škále, ale LHC dosud nenašel žádné spartice.
- **Kosmologie:** Raný vesmír, inflace a kosmické mikrovlnné pozadí mohou nést otisky strunové fyziky, ačkoli dosavadní výsledky jsou neprůkazné.

Navzdory výzvám poskytla teorie strun plodnou půdu pro matematiku, inspirovala pokrok v geometrii, topologii a dualitách, jako je AdS/CFT (spojující gravitaci ve vyšších dimenzích s kvantovou teorií pole bez gravitace).

Krása a kontroverze

Zastánci tvrdí, že teorie strun je nejslibnější cestou k sjednocené teorii: zahrnuje kvantovou gravitaci, sjednocuje všechny síly a vysvětluje, proč graviton musí existovat.

Kritici argumentují, že bez experimentálního potvrzení riskuje teorie strun odtržení od empirické vědy. Její obrovský „krajinný“ prostor možných řešení (až 10^{500}) ztěžuje vytváření jednoznačných předpovědí.

Obě strany se shodují na jednom: teorie strun změnila způsob, jakým přemýšlíme o fyzice, poskytuje nový jazyk pro sjednocení.

Směrem k teorii všeho

Pokud je supersymetrie dalším krokem za Standardním modelem, teorie strun je krokem za tím: kandidátem na dlouho hledanou **Teorii všeho**.

Její nejodvážnější tvrzení není jen to, že zahrnuje Standardní model a gravitaci, ale že tyto jsou nevyhnutelnými důsledky vibrujících strun ve vyšších dimenzích. Graviton není přídatkem – je vestavěný.

Zda příroda zvolila tuto cestu, zůstává k objevení.

Zkoumání hranic: Experimenty mimo Standardní model

Teorie jsou životní silou fyziky, ale experimenty jsou jejím tepem. Supersymetrie, teorie strun a extra dimenze jsou krásné matematické konstrukce, ale žijí nebo umírají podle důkazů. Pokud mají být více než spekulacemi, musí zanechat otisky v datech.

Fyzici vymysleli důmyslné způsoby, jak tyto otisky hledat – v urychlovačích, ve vesmíru a ve struktuře samotného časoprostoru.

Urychlovače: Lov na spartice a gravitony

Velký hadronový urychlovač (LHC) v CERNu je nejvýkonnějším urychlovačem částic na světě, srážející protony při energiích až **13,6 TeV** (design: **14 TeV**). Byl hlavním nástrojem lidstva pro zkoumání fyziky mimo Standardní model.

Supersymetrie na LHC

- **Hledání spartic:** Experimenty na ATLAS a CMS prohledaly data po skvarcích, gluinech a neutralinech/charginech. Ty by se často projevovaly jako signatury „chybějící energie“, protože SUSY částice unikají detekci.
- **Výsledky:** Dosud nebyly nalezeny žádné potvrzené SUSY částice až do škály několika TeV. To vyloučilo mnoho nejjednodušších modelů SUSY a tlačí „přirozenou“ SUSY do těžší, více vyladěné oblasti.

Gravitony a extra dimenze

- **Módy Kaluzy–Kleina:** Pokud existují extra dimenze, **gravitony nebo dokonce pole SM** se mohou jevit jako masivní KK excitace, detekovatelné jako rezonance v dileptonových, difotonových nebo dijetových kanálech.
- **Signály Randall–Sundrum:** Zkroucené extra dimenze by mohly produkovat rezonance gravitonů s charakteristickými spin-2 úhlovými vzory.
- **Výsledky:** Pátrání na LHC dosud nenašlo žádné důkazy, ale posunulo limity do rozsahu **multi-TeV**, omezující velikost, zkroucení a geometrii extra dimenzí.

Mikro černé díry

Některé teorie naznačují, že pokud se gravitace stane silnou na škále TeV, mohly by se v srážkách na LHC tvořit drobné černé díry, odpařující se v záblescích částic. Žádné takové události nebyly pozorovány.

Přesné experimenty: Testování gravitace na malých škálách

Pokud existují extra dimenze, Newtonův zákon gravitace by mohl selhat na krátkých vzdálenostech.

- **Experimenty s torzní rovnováhou („Eöt-Wash“):** Testují zákon inverzní čtverce až do **submilimetrových škál** – aktuálně **desítky mikronů (~50 μm)**.

- **Výsledky:** Nebyly nalezeny žádné odchylky. Tyto experimenty **vylučují** širokou třídu scénářů s extra dimenzemi s charakteristickými délkami **většími než $\sim 10^{-4}$ m** (závisící na modelu).

Tyto stolní experimenty jsou pozoruhodně citlivé a zkoumají škály nedostupné urychlovačům.

Gravitační vlny: Nové okno na kvantovou gravitaci

Objev gravitačních vln LIGO v roce 2015 otevřel novou hranici.

- **Extra polarizace / modifikovaná propagace:** Některé modely kvantové gravitace nebo extra dimenzí předpovídají odchylky od GR (dodatečné polarizace, disperze nebo modifikované dozvuky).
- **Spektroskopie dozvuků:** „Zvonění“ černých děr po sloučení může odhalit jemné odchylky od GR.
- **Prvotní gravitační vlny:** Vlnky z Velkého třesku by mohly nést otisky strunné fyziky, detekovatelné budoucími observatořemi, jako je LISA nebo Einsteinův teleskop.

Dosavadní pozorování jsou konzistentní s GR v rámci současných nejistot, ale vyšší přesnost může odhalit překvapení.

Kosmologie: Vesmír jako laboratoř

Samotný vesmír je konečným urychlovačem částic.

- **Kosmické mikrovlnné pozadí (CMB):** Drobné fluktuace mapují raný vesmír. Některé modely strun předpovídají specifické signatury, jako jsou negaussiánství nebo oscilační rysy.
- **Inflace:** Rychlá expanze vesmíru mohla být poháněna poli souvisejícími s teorií strun. Detekce prvotních B-módů v CMB by byla silnou stopou.
- **Pátrání po temné hmotě:** Neutralina z SUSY jsou hlavními kandidáty na temnou hmotu. Experimenty jako XENONnT, LUX-ZEPLIN a PandaX hledají WIMPy prostřednictvím jaderných odrazů.
- **Axiony:** Teorie strun také předpovídá částice podobné axionům, které by mohly být detekovány prostřednictvím rezonančních dutin nebo astrofyzikálních pozorování.

Zatím je obloha tichá. Temná hmota zůstává neodhalena a kosmologická data odpovídají modelu Λ CDM bez jasných strunných otisků.

Současný stav: Omezení, ne potvrzení

Desetiletí pátrání nepotvrdila SUSY, extra dimenze ani strunné signály. Ale absence důkazů není důkazem absence:

- SUSY může existovat na škálách mimo dosah LHC nebo v méně nápadných spektrech; nulové výsledky dosud **upřednostňují více vyladěné („méně přirozené“)** verze, pokud je SUSY poblíž škály TeV.

- Extra dimenze mohou být menší, více zkroucené nebo jinak skryté před současnými sondami.
- Teorie strun může zanechat detekovatelné otisky pouze ve velmi raném vesmíru, dostupné pouze prostřednictvím kosmologie.

Několik **přesných anomálií** (např. měření **(g-2)** mionu a některé napětí ve **fyzice chutí**) zůstává **zajímavých, ale nevyřešených**; motivují pokračující zkoumání, aniž by zatím převracely SM.

Co experimenty udělaly, je **zúžit prostor parametrů**. Řekly nám, kde SUSY není, jak malé musí být extra dimenze a jak silně může nebo nemůže temná hmota interagovat.

Cesta vpřed

Budoucí experimenty slibují hlubší průzkum:

- **Vysokosvitivý LHC (HL-LHC):** Shromáždí $\sim 10\times$ více dat, zkoumá SUSY až do vyšších hmotností a vzácných procesů.
- **Budoucí kruhový urychlovač (FCC-hh):** Navrhovaný 100 TeV urychlovač, dostatečně výkonný k prozkoumání energetických škál, kde by se mohla objevit fyzika GUT.
- **LISA (2030s):** Vesmírná observatoř gravitačních vln, citlivá na prvotní signály z raného vesmíru.
- **Detektory temné hmoty nové generace:** S citlivostí na slabé signály mohou konečně zachytit WIMP nebo axion.

Věda jako cesta

Experimentální příběh fyziky BSM není příběhem selhání, ale procesu.

- Nulové výsledky vylučují jednoduché modely a zdokonalují naše teorie.
- Každé omezení nás vede k přesnějším, prediktivnějším rámcům.
- Absence SUSY nebo extra dimenzí na škále TeV tyto myšlenky nezabíjí – tlačí je do nového území.

Stejně jako Rutherfordův experiment se zlatou fólií rozbil model švestkového pudinku nebo LIGO rozbilo pochybnosti o gravitačních vlnách, další velký objev může přijít náhle – a změnit všechno.

Směrem k teorii všeho

Po staletí fyzika postupovala sjednocením. Newton sjednotil nebesa a Zemi pod jedním zákonem gravitace. Maxwell sjednotil elektřinu a magnetismus. Einstein sjednotil prostor a čas. Elektroslabá teorie ukázala, že dvě velmi odlišné síly jsou aspekty jedné.

Příští krok je nejodvážnější: sjednotit **všechny čtyři základní interakce** – silnou, slabou, elektromagnetickou a gravitační – do jednoho, sebe konzistentního rámce. Toto je svatý grál fyziky: **Teorie všeho (ToE)**.

Proč je ToE důležitá

Kompletní sjednocení není jen filozofická elegance; řeší hluboké praktické a konceptuální problémy:

- **Kvantová gravitace:** Obecná relativita selhává na Planckově škále (10^{19} GeV). Pouze kvantová teorie gravitace může vysvětlit černé díry a singularitu Velkého třesku.
- **Přirozenost a jemné ladění:** Problém hierarchie a problém kosmologické konstanty volají po hlubším vysvětlení.
- **Parametry Standardního modelu:** Proč mají částice hmotnosti a náboje, které mají? Proč tři generace kvarků a leptonů? ToE by mohla tyto záhady vysvětlit.
- **Kosmologie:** Temná hmota, temná energie a inflace mohou být všechny spojeny s fyzikou na škále sjednocení.

ToE by nesjednotila jen síly – sjednotila by škály, od nejmenších strun kvantové teorie po největší kosmické struktury.

Supersymetrie a velké sjednocení

Supersymetrie (SUSY), pokud je realizována v přírodě, poskytuje odrazový můstek k ToE.

- **Problém hierarchie vyřešen:** Spartice ruší divergentní korekce hmotnosti Higgsova bosonu.
- **Sjednocení gauge konstant:** S SUSY se síly tří sil krásně sbíhají na 10^{16} GeV, což naznačuje **Velkou sjednocenou teorii (GUT)**.
- **Kandidát na temnou hmotu:** Neutralino poskytuje přirozené vysvětlení kosmické temné hmoty.

SUSY-inspirované GUTy (jako SU(5), SO(10) nebo E_6) předpokládají, že při ultra-vysokých energiích jsou kvarky a leptony sjednoceny do větších multipletů a síly jsou sloučeny do jedné gauge skupiny.

Ale SUSY se v experimentech dosud neobjevila. Pokud existuje pouze na škálách mimo náš dosah, její sjednocující síla může zůstat lákavá, ale skrytá.

Teorie strun: Kvantová gravitace a graviton

Teorie strun jde dále. Místo záplatování Standardního modelu přepisuje základy:

- **Struny, ne body:** Všechny částice jsou vibracemi drobných strun.
- **Graviton vzniká přirozeně:** Bezhmotná excitace se spinem 2 je nevyhnutelná, což znamená, že kvantová gravitace je vestavěná.
- **Sjednocení:** Různé vibrační módy produkují všechny známé částice – kvarky, leptony, gauge bosony, Higgsův boson – v jednom rámci.
- **Extra dimenze:** Teorie strun vyžaduje 10 dimenzí časoprostoru; M-teorie vyžaduje 11, s skrytými dimenzemi kompaktními nebo zkroucenými.

V této vizi není sjednocení náhodou – je to geometrie. Síly se liší, protože struny vibrují různými způsoby, tvarovanými topologií extra dimenzí.

M-teorie a světy brán

Objev, že pět teorií strun je propojeno dualitami, vedl k M-teorii, ještě grandióznějšímu rámci:

- Zahrnuje struny, membrány a vyšší dimenzionální brány.
- Naznačuje, že náš vesmír by mohl být 3-bránou vloženou do vyšší dimenzionálního objemu.
- Nabízí přirozená vysvětlení, proč je gravitace slabší (šíří se do extra dimenzí) a jak by mohly existovat více vesmírů v „multivesmíru.“

M-teorie je stále neúplná, ale představuje nejambicióznější krok směrem k ToE, jaký kdy byl podniknut.

Další cesty ke kvantové gravitaci

Teorie strun a M-teorie nejsou jedinými cestami. Fyzici zkoumají více rámců, každý s jinými silnými stránkami:

- **Kvantová gravitace smyček (LQG):** Pokouší se kvantovat časoprostor přímo, předpovídá, že prostor je na Planckově škále diskrétní.
- **Asymptotická bezpečnost:** Naznačuje, že gravitace může být na vysokých energiích dobře chována díky netriviálnímu pevnému bodu.
- **Kauzální dynamické triangulace (CDT):** Buduje časoprostor z jednoduchých geometrických stavebních bloků.
- **Teorie twistorů a amplitudhedra:** Nové matematické rámce, které přehodnocují časoprostor a amplitudy rozptylu.

I když zatím žádný z nich nerivalizuje sjednocujícímu rozsahu teorie strun, ukazují bohatství hledání.

Role experimentu

ToE musí být nakonec testovatelná. Ačkoli je Planckova škála daleko za dosahem současných experimentů, fyzici hledají nepřímé důkazy:

- **Urychlovače:** Částice SUSY, extra dimenze nebo mikro černé díry.
- **Přesné testy:** Odchytky od Newtonova zákona na krátkých škálách.
- **Gravitační vlny:** Exotické polarizace nebo ozvěny vyšších dimenzí.
- **Kosmologie:** Otisky inflace, kandidáti na temnou hmotu nebo axiony předpovězené teorií strun.

Zatím ToE zůstává mimo dosah, ale každý nulový výsledek zužuje možnosti.

Krása a výzva

Skutečná ToE by nesjednotila jen fyziku – sjednotila by **lidské poznání**. Propojila by kvantovou mechaniku a relativitu, mikro a makro, částici a vesmír.

Přesto čelí paradoxu: škála, na které dochází ke sjednocení, může být navždy mimo experimentální dosah. 100 TeV urychlovač zkoumá jen zlomek cesty k Planckově škále. Možná budeme muset spoléhat na kosmologii, matematickou konzistenci nebo nepřímé signatury.

Sen zůstává naživu díky hluboké eleganci rámců. Jak poznamenal Witten, teorie strun není jen „soubor rovnic“, ale „nový rámec pro fyziku.“

Věda jako metoda, ne dogma

Hledání ToE není o prohlašování teorie strun, SUSY nebo jakékoli jednotlivé myšlenky za „pravdivou“. Jde o **vědeckou metodu**:

- Identifikaci trhlin v existujících teoriích.
- Navrhování odvážných nových rámců.
- Testování proti realitě, odhazování nebo zdokonalování podle potřeby.

Příběh je zdaleka neukončen. Ale právě tato otevřenost – odmítání považovat jakoukoli teorii za posvátnou – činí fyziku živou vědou, nikoli dogmatem.

Horizont před námi

Příští století fyziky může odhalit:

- Důkazy o supersymetrii nebo jejích alternativách.
- Kosmologická data, která potvrzují nebo vyvracejí strunné předpovědi.
- Hlubší přeformulování samotného časoprostoru.

Nebo možná skutečná ToE je něco, co si zatím nikdo nepředstavil.

Ale samo hledání – touha sjednotit, vysvětlit, vidět přírodu jako celek – je stejně součástí lidskosti jako rovnice samotné.

Reference a další čtení

Supersymetrie a velké sjednocení

- Wess, J., & Bagger, J. (1992). *Supersymetrie a supergravitace*. Princeton University Press.
- Baer, H., & Tata, X. (2006). *Supersymetrie na slabé škále: Od superpolí k rozptylovým událostem*. Cambridge University Press.
- Georgi, H., & Glashow, S. L. (1974). „Jednota všech sil elementárních částic.“ *Physical Review Letters*, 32(8), 438.

Teorie strun a M-teorie

- Green, M. B., Schwarz, J. H., & Witten, E. (1987). *Teorie superstrun* (Svazky 1 & 2). Cambridge University Press.

- Polchinski, J. (1998). *Teorie strun* (Svazky 1 & 2). Cambridge University Press.
- Witten, E. (1995). „Dynamika teorie strun v různých dimenzích.“ *Nuclear Physics B*, 443(1), 85–126.
- Becker, K., Becker, M., & Schwarz, J. H. (2006). *Teorie strun a M-teorie: Moderní úvod*. Cambridge University Press.

Kvantová gravitace smyček a alternativy

- Rovelli, C. (2004). *Kvantová gravitace*. Cambridge University Press.
- Thiemann, T. (2007). *Moderní kanonická kvantová obecná relativita*. Cambridge University Press.
- Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. (2005). „Rekonstrukce vesmíru.“ *Physical Review D*, 72(6), 064014.

Experimentální hranice

- Aad, G., et al. (ATLAS Collaboration). (2012). „Pozorování nové částice při hledání Higgsova bosonu Standardního modelu.“ *Physics Letters B*, 716(1), 1–29.
- Chatrchyan, S., et al. (CMS Collaboration). (2012). „Pozorování nového bosonu při hmotnosti 125 GeV.“ *Physics Letters B*, 716(1), 30–61.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2016). „Pozorování gravitačních vln ze sloučení binární černé díry.“ *Physical Review Letters*, 116(6), 061102.

Přístupné populární zprávy

- Greene, B. (1999). *Elegantní vesmír: Superstruny, skryté dimenze a hledání konečné teorie*. W. W. Norton.
- Randall, L. (2005). *Zkroucené průchody: Rozplétání záhad skrytých dimenzí vesmíru*. Harper Perennial.
- Rovelli, C. (2016). *Sedm krátkých lekcí o fyzice*. Riverhead Books.
- Wilczek, F. (2008). *Lehkost bytí: Hmota, éter a sjednocení sil*. Basic Books.