

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

T. Goldman; R. J. Hughes; M. M. Nieto
Gravitácia a antihmota

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 35 (1990), No. 2, 57--65

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139264>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1990

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Gravitácia a antihmota

T. Goldman, R. J. Hughes a M. M. Nieto

Newton ako aj Einstein tvrdili, že gravitačné zrýchlenie objektu nezávisí od jeho hmotnosti a substancie. K tomuto názoru sa kriticky stavajú nové predstavy; test by mohol poskytnúť antiprotónový experiment.

Ešte nikto nikdy nevrhol jedinú časticu antihmoty. Predsa však väčšina fyzikov predpokladá, že by táto častica padala na zem presne tak ako obyčajná hmota. Svoje argumenty opierajú o dve veľmi solídne podložené myšlienky: gravitačný princíp ekvivalencie a kvantovomechanickú symetriu medzi hmotou a antihmotou. Dnes sa začína otriasať tento spôsob argumentácie v tom, že sa považuje za možné, že prvá idea, princíp ekvivalencie, nemusí byť správna. A skutočne všetky moderné pokusy pričleniť gravitáciu k ďalším silám prírody v rámci konzistentnej jednotnej kvantovej teórie predpovedajú existenciu nových síl gravitačnej intenzity, ktoré mimo iného budú narúšať tento princíp.

Možno, že takéto efekty sa už aj pozorovali v nedávnych experimentoch. Podľa bežnej skúsenosti, ktorú máme s hmotou v zemskom gravitačnom poli, sú tieto účinky malé. Avšak pokiaľ ide o antihmotu, tieto nové sily mohli byť za následok veľkej anomálie. Z toho plynie, že experiment, ktorým by sa meralo gravitačné zrýchlenie antihmoty, mohol byť veľmi dôležitý pre chápanie kvantovej gravitácie. Sme členmi medzinárodného tímu, ktorý sa utvoril, aby sa uskutočnil takýto experiment.

Ak sa ukáže, že sa princíp ekvivalencie narúša, bude to významná udalosť v dejinách fyziky, pretože tento princíp je základom, na ktorom spočíva Newtonova, ako aj Einsteinova gravitačná teória. Princíp hovorí, že dva objekty padajú s rovnakým gravitačným zrýchlením, a to bez ohľadu na ich hmotnosť a hmotné zloženie. Myšlienku v tejto podobe prvýkrát vyložil Galileo, ktorý oprel svoje závery o pokusy s naklonenými rovinami (obr. 1) a o matematické domnienky o pohybe projektílov.*) Einstein poznajúc, že hmotnosť a energia sú ekvivalentné, rozšíril princíp na svoju všeobecnú teóriu relativity, aby ho mohol aplikovať nielen na objekty s pokojovou hmotnosťou, ale aj na všetky formy energie, vrátane svetla. Einsteinovu odvážnu domnienku verifikoval r. 1919 A. Eddington, ktorý meral ohyb svetla v gravitačnom poli Slnka počas jeho zatmenia.

R. 1932 s objavom pozitronu čiže antielektrónu vznikla nová otázka: splňuje antihmota fyzikálny zákon tak isto ako obyčajná hmota? Odpoveď sa všeobecne prijala r. 1957 s CPT teorémou G. Lüdersa, ktorý dokázal, že matematické operácie, ktoré transformujú opis častice na opis jej antičastice, nemenia zákony fyziky. A tak gravitácia

*) Obrázky pozri na kriedovej prílohe uprostred čísla.

vo všeobecnej relativite nerobí nijaký rozdiel medzi časticou a antičasticou; všetko, čo sa berie do ohľadu, je časticová energia. (Obr. 2 ukazuje vznik elektrón-pozitrónového páru.) Keďže energia izolovanej antičastice je rovnaká ako energia odpovedajúcej častice, anti-hmota by mala padať na zem presne ako normálna hmota.

Tento záver je správny, ak veríme, že Einsteinova všeobecná relativita je konečnou teóriou gravitácie. V poslednej dobe však navrhlo mnoho fyzikov alternatívy, v ktorých gravitácia môže interagovať s hmotnými aspektmi, ktoré sú iného typu než energia, ako je napr. kvantové číslo. Pri tomto pohľade CPT teoréma môže len tvrdiť, že anti-jablko by padalo na antizem takisto, ako padá jablko na zem. Nehovorí nič o tom, ako padá antijablko na zem zloženú z riadnej hmoty. Inými slovami, nemalo by sa predpokladať, že sa princíp ekvivalencie hodí aj na antihmotu. To by ozaj ani nemalo prekvapovať, pretože nikdy ešte neboli úspešne spojené do jedinej teórie dva oporné piliere, ktoré tvoria základ konvenčnej argumentácie, gravitácia a kvantová mechanika.

Zjednotenie kvantovej mechaniky a gravitácie sa stalo svätým Grálom fyziky 20. storočia. Nikto zatiaľ nemal úspech, ale dnes napodiv väčšina realistických teórií predpovedá nové typy gravitačných interakcií, ktoré by veru mohli byť príčinou, že antičastica padá na zem inak než riadna častica. Preto sme už pred niekoľkými rokmi predložili návrh merať gravitačné zrýchlenie antiprotonov. Takýto experiment by poskytoval jednoznačnú skúšku, či skutočne existujú nové gravitačné interakcie. Zariadenie pre tento experiment sa teraz buduje a ak všetko pôjde dobre, výsledky budú k dispozícii na začiatku r. 1991.

Bolo to len nedávno, čo výskumníci vedení novými experimentmi a koncepciami zistili určité anomálie, ktoré naznačujú, že za určitých podmienok nemusí platiť princíp ekvivalencie. Po stáročia však fyzici mali dôvod veriť v tento princíp: prežil totiž mnohé prísne skúšky, ktoré dokázali jeho správnosť s mimoriadnou presnosťou.

Sám Newton skúšal ekvivalenčný princíp v experimentoch. Aby sme pochopili jeho experiment, musíme znovu nejak sformulovať tento princíp. Newton zaviedol pojem hmotnosti vo dvoch kontextoch. Podľa jeho druhého pohybového zákona sila pôsobiaca na nejaký objekt je rovná inerciálnej hmotnosti krát zrýchlenie. Podľa jeho gravitačného zákona príťažlivá sila medzi dvoma objektmi je úmerná súčinu ich gravitačných hmotností a nepriamo úmerná štvorcu vzdialenosti medzi nimi (a preto ho nazývame zákonom inverzného štvorca). Inerciálna hmotnosť je kinematická veličina, ktorá súvisí s pohybom. Gravitačná hmotnosť je na druhej strane „nábojom“: objekt cíti gravitačnú silu úmerne jeho gravitačnej hmotnosti zrovna tak, ako by cítil elektromagnetickú silu úmerne jeho elektrickému náboju.

Hoci ide o úplne rozdielne pojmy, Newton tvrdil, že tieto dva typy hmotností, inerciálna a gravitačná, sú ekvivalentné. Aby overil túto myšlienku, urobil pokusy s kyvadlami. Doba kyvu kyvadla je daná súčinom dvoch faktorov: jedného, ktorý závisí od dĺžky, a druhého, ktorý závisí od pomeru inerciálnej a gravitačnej hmotnosti. Newton zistil, že dobu kyvu vždy určoval faktor závisiaci jedine od dĺžky a že pomer dvoch typov hmotnosti bol vždy jednotka; inými slovami, gravitačná a inerciálna hmotnosť sú rovnaké. Týmto spôsobom verifikoval Newton ekvivalenčný princíp s presnosťou jednej tisíciny. (Koncom rokov 1820 F. W. Bessel urobil experimenty, ktoré zvýšili presnosť na jednu šesťdesiat tisícinu.)

Ďalší výraznejší pokrok v testovaní princípu ekvivalencie urobil maďarský barón R. Eötvös. Tento učiteľ-geofyzik vyvinul torzné váhy, ktorými sondoval zem meraním zmien v gravitačnom poli (roku 1880). Pomocou váh mohol mapovať lokálne gravitačné polia, a tak urobiť závery o lokálnych anomáliách v hmotnosti, pričom najzaujímavejšie boli tie, ktoré súviseli s usadeninami minerálov. Váhy boli natoľko presné, že aj napriek tomu, že pre každé meranie sa vyžadoval dlhý čas, bol to štandardný geofyzikálny nástroj, osvedčený na toto storočie.

Eötvös si uvedomoval, že tieto torzné váhy mohli by sa použiť na testovanie princípu ekvivalencie, ak sa na opačné konce váh umiestnia objekty z rôznych materiálov. Výsledná sila pôsobiaca na každý objekt je kombináciou gravitačnej príťažlivej sily zeme, ktorá je úmerná gravitačnej hmotnosti objektu a odstredivej sily spôsobenej zemskou rotáciou, ktorá je úmerná inerciálnej hmotnosti objektu. Eötvösove váhy by sa roztočili, keby sme položili na váhy dve rôzne látky a pomer gravitačnej a inerciálnej hmotnosti pre jednu by sa nerovnal tomuto pomeru aj pre druhú.

R. 1890 Eötvös uverejnil výsledky demonštrujúce rovnosť gravitačnej a inerciálnej hmotnosti niekoľkých látok s presnosťou $5 \cdot 10^{-8}$. Túto prácu zlepšil r. 1909 a dospel k záveru, že príslušná hranica presnosti jeho pokusu je $5 \cdot 10^{-9}$. Zistil nesúlad pre menšiu hranicu, než je táto hranica pri rôznych typoch materiálu, čo pripísal experimentálnej chybe (o tom si viac povieme ďalej).

V rokoch 1960. a 1970. nezávisle od experimentov Eötvösovho typu urobili R. D. Dicke a V. B. Braginsky experimenty, pri ktorých merali pomer inerciálnej a gravitačnej hmotnosti objektov skôr v gravitačnom poli Slnka ako Zeme a zistili, že princíp ekvivalencie je odpovedajúco správny až do $5 \cdot 10^{-11}$ resp. 10^{-12} . Podobná presnosť sa dosiahla pre rovnosť gravitačnej a inerciálnej hmotnosti Zeme a Mesiaca z meraní, používajúcich rohové zrkadlá nechané na mesačnom povrchu astronautmi Apolla, mesačnej dráhy okolo Zeme, keď samotná sústava Zem – Mesiac obieha okolo Slnka. Tento posledný experiment mimochodom demonštroval, že slnečná gravitácia pôsobí na gravitačnú energiu, ktorá púta hmotu v zemi – skrátka, že gravitácia prífahuje gravitáciu.

Myšlienka, že samotná gravitačná energia je podrobená vplyvu gravitačnej sily, je dôsledkom revolúcie vo fyzike, ktorá sa stala približne v čase Eötvösových pokusov. A ňou bola Einsteinova formulácia špeciálnej a všeobecnej teórie relativity. Keďže terajšie úvahy okolo existencie nových síl súvisiacich s gravitáciou vyplývajú zo snahy rozšíriť Einsteinovu teóriu gravitácie, patrí sa, aby sme urobili o čosi podrobnejšie prehľad histórie tejto práce.

Všeobecná teória relativity sa vynorila z Einsteinovho pokusu vyriešiť základný problém, ktorý pre newtonovskú predstavu o gravitácii postavila jeho skoršia práca o špeciálnej teórii relativity. Keďže, hoci je Newtonova teória úplne adekvátna pre väčšinu praktických účelov (ako je vyslanie ľudí na Mesiac), je pre teoretického fyzika neprijateľná, pretože predpokladá, že gravitácia okamžite pôsobí na nekonečné vzdialenosti, a tým narušuje ostrú požiadavku špeciálnej relativity obmedzujúcu rýchlosť všetkého – objektov, energie, prenosu sily – k rýchlosti svetla.

V klasickej relativistickej poľnej teórii sily sa majú podriaďovať špeciálnej relativite tým, že sa zavádza pole, ktoré nesie energiu a hybnosť medzi interagujúcimi časticami hmoty

(ako sú elektróny a protóny) rýchlosťou nie väčšou, ako je rýchlosť svetla. Je to výmena energie a hybnosti nesených poľom, ktoré produkuje silu zakúšanú časticami. Napríklad oscilujúce elektróny vo vysielacej anténe produkujú pole rádiových vln, ktoré sa šíria priestorom a vyvolávajú silu pôsobiacu na elektróny v prijímacej anténe.

S príchodom relativistickej poľnej teórie stalo sa prirodzeným, že fyzici začali študovať možné formy gravitačného poľa, o ktorých by sa dalo uvažovať. J. C. Maxwell napríklad spoznajúc, že gravitačný, ako aj Coulombov zákon (ktorý opisuje silu medzi elektricky nabitými časticami) je vzťahom typu inverzného štvorca, premýšľal, či by jeho vlastnú teóriu elektrodynamiky nebolo možné modifikovať, aby opisovala gravitáciu. Boli pochopiteľne nevyhnutné určité zmeny, pretože elektrodynamická sila produkuje odpudzovanie medzi rovnakými nábojmi, kým gravitácia produkuje priťahovanie. Maxwell dokázal splniť túto podmienku, a to tým, že zmenil znamienko poľnej energie, urobiac ho záporným. Ale rýchlo si uvedomil, že výsledná teória zaznamenala osudnú trhlinu: systém by získaval so zápornou poľnou energiou energiu z tiaže, a tak by jeho energia vzrastala neobmedzene.

Prvú matematicky konzistentnú relativistickú teóriu gravitácie skonštruoval r. 1913 G. Nordström ešte pred Einsteinovou teóriou relativity. Nordströмова teória bola v súlade so všetkými gravitačnými experimentmi tých čias. Einstein a A. D. Fokker zistili, že Nordströmove rovnice gravitačného poľa skutočne opisujú priestoročas, ktorý je zakrivený – bolo to ako keby sa mal človek pokúsiť opísať povrch gule pomocou rovinatej plochy a napokon si uvedomil, že tá istá plocha by mohla byť prirodzenejšie opísaná sférickými súradnicami. Preto Nordströмова teória nevedomky zavádzala myšlienku zakriveného priestoročasu.

V Nordströmovom modeli gravitačné pole pôsobilo len na objekty, ktoré mali pokojovú (česky: klidovou – pozn. red.) hmotnosť. Ale podľa špeciálnej relativity energia je ekvivalentná hmotnosti. Preto prečo by aj energia nemala byť podrobená účinku gravitačnej sily? Bola to predstava, ktorú Einstein líčil ako najšťastnejší nápad svojho života, nápad, ktorý viedol k zrodu všeobecnej teórie relativity.

Tiež z Einsteinovej teórie vyplývala ako dôsledok krivosť priestoročasu v blízkosti hmotnostných objektov. Okrem toho, keďže táto teória opisuje gravitačné pole, ktoré je viac spojené s energiou a hybnosťou než s hmotnosťou, predpovedá, že gravitácia by mala vychyľovať bezhmotnostné formy energie, ako je svetlo. Einstein navrhol preskúšať tento jav meraním zdanlivého posunutia polohy hviezd v blízkosti Slnka v čase zatmenia. Predpoveď sa potvrdila r. 1919 počas Eddingtonovej výpravy do Afriky. Einsteinova teória vysvetlila aj anomálny posun perihélia Merkúra a červený posun svetla prichádzajúceho z hviezd alebo planét (posledne citované overil Poundov-Rebkov experiment).

Teórie gravitácie, ako je Nordströмова a Einsteinova, v ktorých sa sila prejavuje prostredníctvom priestoročasovej krivosti, sú teraz známe ako „metrické teórie“. V takýchto teóriách je sila manifestovaná priestoročasovou krivosťou a tá stvárnjuje trajektóriu, pozdĺž ktorej sa objekt pohybuje (obr. 3). Sila formulovaná takýmto spôsobom nezávisí od zloženia objektov, na ktoré pôsobí. (Poznamenajme, že toto je iný spôsob vyjadrenia ekvivalenčného princípu.)

Všeobecná teória relativity s jej revolučnou a ohromne úspešnou predstavou vesmíru sa pokladá za jednu z najväčších intelektuálnych výmôžeností tohto storočia. Avšak zvýrazňovanie jej štatútu by nemalo pred človekom zastierať fakt, že predsa ona nemá jedinečné postavenie, pokiaľ ide o schopnosť vysvetliť všetky experimentálne testy z gravitácie. Dnes skutočne máme dôkaz, že jestvujú gravitačné javy, ktoré sa prejavujú ako narušenie princípu ekvivalencie, ktoré nemožno vysvetliť pomocou klasickej všeobecnej relativity, ak ovšem je dôkaz korektný. Avšak možno že tieto javy sú konzistentné s novšími teóriami – s prácou, ktorá je dôsledkom úsilia zjednotiť všeobecnú relativitu s ďalším veľkým pilierom modernej fyziky, s kvantovou teóriou.

A ozaj existuje povážlivá nezlúčiteľnosť medzi kvantovou mechanikou a princípmi ekvivalencie, ktoré tvoria základ klasických nekvantových teórií gravitácie. Napríklad podľa ekvivalenčného princípu počiatočná poloha a rýchlosť objektu určujú presne vymedzenú dráhu objektu voľne padajúceho v gravitačnom poli. Avšak v kvantovej mechanike dráha objektu nie je vymedzená presne, je pravdepodobnostná (pozri *Kvantová gravitácia* od B. S. De Witte; Scientific American, December, 1983). Preto v rámci kvantového opisu gravitácie ekvivalenčný princíp nemôže byť exaktným pojmom. Nemalo by nás teda zarážať, keby kvantová teória gravitácie umožnila zahrňovať aj interakcie, ktoré narúšajú ekvivalenčný princíp.

Kvantová mechanika hlboko zmenila klasickú teóriu poľa. Klasické stanovisko buduje na tom, že pole prenáša energiu a hybnosť. Kvantová mechanika tvrdí, že táto energia a hybnosť existujú v diskrétnych jednotkách zvaných kvantá, ktoré možno opisovať ako častice. V kvantovopolnej teórii sa potom o silách hovorí, že sa objavujú pri výmene takýchto častíc (ako pri prudkom vrhnutí basebalu, keď strelec prenáša energiu a hybnosť na lapača, pozri obr. 4). Napríklad elektromagnetické sily sú „sprostredkované“ výmenou fotónov čiže svetelných kvánt. Intenzita výslednej sily sa udáva časticovou „väzbovou intenzitou“ vzťahovanou na hmotu, ktorá je podrobená účinku sily.

Častice prenášajúce silu majú určitú pokojovú hmotnosť (nulovú v prípade fotónov) a vnútorný spin čiže moment hybnosti, ktorý môže nadobúdať celočíselné alebo poločíselné hodnoty. Všetky známe sily – gravitácia, elektromagnetizmus, slabá sila zodpovedajúca za rádioaktívny rozpad, silná sila, ktorá viaže atómové jadrá – sú sprostredkované časticami s celočíselným spinom, ktoré produkujú sily majúce čo do vzdialenosti dosahy určené prevrátenou hodnotou hmotnosti častice. Sily sprostredkované hmotnostnými časticami, ako je slabá sila, pôsobia len v rámci konečného dosahu. Sily sprostredkované bezhmotnostnými časticami ako elektromagnetizmus a gravitácia, majú zrejme nekonečný dosah a sila sa čo do intenzity znižuje inverzne ako štvorec vzdialenosti medzi interagujúcimi časticami.

Teraz vieme, že spin nejakého poľa súvisí s povahou sily: polia s nepárnymi celočíselnými spinmi môžu produkovať tak príťažlivé ako aj odpudivé sily; polia s párnymi celočíselnými spinmi, ako sú skalárne (spin 0) a tenzorové (spin 2) polia, produkujú čisto príťažlivú silu (obr. 5). Maxwellovu elektrodynamiku napríklad možno dnes opísať ako pole so spinom 1 (silu prenáša fotón, ktorý má spin 1). Sila pre tento typ poľa je príťažlivá medzi opačne nabitými časticami a odpudivá medzi rovnako nabitými časticami.

Podľa teže argumentácie sa očakávalo, že teória gravitácie bude vybudovaná výlučne na skalárnom alebo tenzorovom poli sprostredkovanom časticami s párnym spinom. Naozaj sa ukázalo, že ak sa všeobecná relativita, ktorá je konštruovaná na tenzorovom poli, prebuduje na kvantovú poľnú teóriu, gravitačnú silu nesie bezhmotnostná častica so spinom 2 zvaná gravitón. Avšak matematicky je kvantová verzia všeobecnej relativity poznačená nekonzistentnosťami. To viedlo fyzikov, aby pouvažovali o spôsoboch, ako rozšíriť všeobecnú relativitu, aby sa gravitácia stala viac prístupnou pre kvantovanie.

Jedným z favorizovaných spôsobov kvantovania gravitácie je spôsob, ktorý sa opiera o triedu teórií známych ako kalibračné teórie. Tieto teórie zahŕňajú istý druh teórií, o ktorých široko panuje viera, že opisujú silné a elektroslabé interakcie, ktoré sú teraz kandidátmi na zjednotenie do tzv. veľkej jednotnej teórie. Kalibračné teórie sa zakladajú na určitom type vnútornej symetrie a sú atraktívne pre teoretikov z toho dôvodu, že iba niekoľko počiatočných parametrov bude človeku umožňovať, aby v ich rámci spočítal všetky javy (pozri „Supergravitácia a zjednotenie zákonov fyziky“ od D. Z. Freedmana a P. van Nieuwenhuizen; Scientific American, Február, 1978).

Úspech kalibračných teórií naznačuje, že by sa tiež mohli prekonať matematické nekonzistentnosti v kvantovej všeobecnej relativite zavedením čohosi, čo sa teraz nazýva lokálna supersymetria. Ak sa všeobecná relativita rozšíri o lokálne supersymetrie, zistíme (u väčšiny verzií takýchto modelov), že jestvuje časticový partner s poločíselným spinom pre každú časticu s celočíselným spinom a naopak, čím sa kreuje kaleidoskopická kaskáda nových častíc (obr. 8): gravitón so spinom 2 má partnera so spinom $3/2$, ktorý má partnera so spinom 1 (gravifotón), ten má zas partnera so spinom $1/2$, ktorý má partnera so spinom 0 (graviskalár). (Niektoré modely opisujú viac než jedného partnera pre každý spin.) Títo noví partneri sú akoby zvláštne kvantové stavy gravitónu a zdá sa, že ich existencia zabezpečuje, že supergravitačné teórie majú pre kvantové pole rozumné (ale snáď ešte nedokonalé) vlastnosti. A všetky kalibračné teórie kvantovej gravitácie, ktoré teraz prichádzajú do úvahy, obsahujú naozaj supersymetrické extrastavy.

Čaká sa, že častice s poločíselným spinom majú v týchto tzv. supergravitačných teóriách extrémne veľkú hmotnosť. Očakáva sa, že energia odpovedajúca ich pokojovej hmotnosti je približne bilión elektrónvoltov (tj. 10^{12} eV – pozn. red.), t. zn. tisíckrát väčšia, ako je energia protónu. Zatiaľ niktorá z predpovedaných častíc nebola objavená. Advokáti supergravitačných teórií dúfajú, že ich vyprodukujú v nových urychľovačoch, ako je tevatrón vo Fermiho národnom urychľovačovom laboratóriu, LEP (Large Electron-Proton) v Európskom laboratóriu pre časticovú fyziku (CERN) a navrhovaný supravodivý superkolider.

Na druhej strane častice s celočíselným spinom sú ako gravitón sprostredkovateľmi síl a mali by generovať nové javy s intenzitou, ktorá je zrovnateľná s gravitáciou – ovšem s istými pozoruhodnými rozdielmi. Tak graviskalár ako gravifotón majú, ako sa čaká, pokojovú hmotnosť, a tak ich dosah bude skôr konečný ako nekonečný. Gravisikalár bude okrem toho produkovať len priťahovanie, zatiaľčo gravifotónový účinok bude závisieť od toho, či interagujúce častice sú rovnaké, alebo rozdielne. Medzi hmotou a hmotou (alebo antihmotou a antihmotou) gravifotón bude produkovať odpudzovanie; medzi hmotou a antihmotou bude produkovať priťahovanie. Pre riadnu hmotu bude sa teda graviskalárna príťažlivá sila viac alebo menej rušiť gravifotónovou odpudivou silou.

Avšak medzi hmotou a antihmotou tak graviskalár, ako aj gravifotón budú produkovať príťažlivú silu, a preto sa budú sčítavať. Má to byť dôkaz tejto dodatočnej príťažlivosti, o ktorý sa bude usilovať antiprotónový experiment.

Je zaujímavé, že podobné efekty predpovedá osobitná skupina teórií, ktoré sa priblížili ku kvantovaniu gravitácie z celkom iného zorného uhla. Objavenie sa nových častíc predpovedali nedávno aj určité metrické teórie, ktoré obsahujú viac rozmerov než 4 konvenčné priestoročasové. Táto práca vracia sa späť do minulosti o viac než 60 rokov ku práci T. F. Kaluzu a O. Kleina, ktorí sformulovali model gravitácie vo viac dimenzionálnom priestore a potom ho „premietli“ na bežný priestoročas v snahe vytvoriť jednotnú teóriu gravitácie a elektromagnetizmu (pozri *Skryté rozmery priestoročasu* od D. Z. Freedmana a P. van Nieuwenhuizen; Scientific American, Marec, 1985).

Kaluzov-Kleinov model stratil na pol storočia svoj vplyv ako už definitívne neúspešný, avšak niekoľko teoretických fyzikov prehodnotilo ho v poslednom desaťročí nanovo a tí začali skúmať, čo by sa stalo, keby sa model rozšíril dokonca o viac rozmerov. Zistili, že viacdimenzionálny gravitón so spinom 2 by mal, ak sa naň dívame v štyroch rozmeroch, niekoľko častí: štvorrozmerný gravitón so spinom 2, vektorové pole so spinom 1 odpovedajúce gravifotónu a jednorozmerné skalárne pole so spinom 0 odpovedajúce graviskaláru. Je to analogické tomu, ako keby sme zobrali v troch rozmeroch šípku a premietli ju do roviny: dva rozmery by definovali šípku v rovine a tretí, vertikálny rozmer by definoval bod. (Niektoré modely ako u symetrie majú viacerých partnerov na každý spin.) Tak nemetrické supergravitačné teórie, ako aj viacrozmerne metrické teórie majú teda nápadne podobné dôsledky.

Predseda sa však niktorá z teórií kvantovej gravitácie neukázala byť matematicky konzistentnou. Aj keď je tomu tak, J. Scherk nie dlho pred svojou smrťou r. 1980 spoznal, že kvantovogravitačné teórie mohli by mať merateľné fyzikálne dôsledky vo svete normálnej hmoty. Napríklad graviskalár a gravifotón nie sú bezhmotnostné a tak sa nesprávajú podľa Newtonovho zákona inverzného štvorca. Možno sa teda usilovať experimentálne dokázať, že sa Newtonov zákon narušuje v pásme niekoľko sto metrov alebo kilometrov, kde, ako sa domnievame, prejavujú svoj účinok nové častice.

Experimenty mohli by tiež hľadať možné rozdiely vo väzbových intenzitách graviskaláru a gravifotónu pre rôzne komponenty hmoty, ako je väzbová energia alebo baryonové číslo (celkový počet protónov a neutrónov). Teórie dovoľujú, aby sa graviskalár viazal na väzbovú energiu s inou intenzitou, než s akou sa viaže na pokojovú hmotnosť elementárnych častíc. Graviskalárna sila mohla by byť napríklad väčšia pri grame vodíka než pri grame železa, pretože na každých 56 neviazaných vodíkových atómov je jeden atóm železa obsahujúci 56 viazaných protónov a neutrónov. Gravifotón zas na druhej strane musí byť viazaný na nejaké zachovávajúce sa kvantové číslo elementárnych častíc, ako je celkový počet baryónov alebo kvarkov, alebo súčet baryónov a leptónov (ako sú elektróny). Gravifotón bude preto aj produkovať silu, ktorá závisí od zloženia hmoty. Obe nové sily môžu teda narušovať ekvivalenčný princíp (obr. 9).

Súčasná teória teda predpovedajú, že sa zvrátia dva dlho existujúce zákony fyziky: nenulové hmotnosti graviskaláru a gravifotónu vedú k záveru, že v pásme ich konečného dosahu nebude správny Newtonov gravitačný zákon inverzného štvorca, a povaha nových síl závisiaca od zloženia znamená, že aj ekvivalenčný princíp bude narušený.

Očakáva sa, že pre bežnú hmotu v zemskom gravitačnom poli sú narušenia zákona inverzného štvorca nepatrné. Zdôvodňuje sa to tým, že sa sily prenášané graviskálárom a gravifotónom budú približne navzájom rušiť (obr. 6). Možno že malý reziduálny účinok zistili F. D. Stacey, G. J. Tuck z univerzity v Queenslande a ich spolupracovníci vo svojich meraniach lokálnej gravitačnej sily, ktoré vykonali v rôznych hĺbkach v austrálskych banských šachtách. Merania boli nekonzistentné s predpovediami Newtonovej teórie po tom, čo sa zarátal gravitačný účinok lokálnej geológie. Namiesto toho boli zhruba konzistentné tieto údaje s existenciou jedinej odpudivej sily 100krát menšej než bežná gravitácia s dosahom stovák metrov, alebo tak odpudivej ako aj príťažlivej sily s intenzitami približne rovnými riadnej gravitácii, no rušiacimi sa až na jednu stotinu a s dosahmi až do 450 kilometrov.

Austrálsky výsledok a čerstvejšie anomálne výsledky, ktoré oznámili A. T. Hsui z univerzity v Illinois v urbanskej Rovine a D. H. Eckhardt a jeho kolegovia v Geofyzikálnom laboratóriu Vzdušných síl USA, testujú nezávisle M. E. Ander, M. A. Zumberge a ich kolegovia v los-alamoskom Národnom laboratóriu, scrippský Ústav oceánografie, texaská univerzita v Dallase, amoscké Spoločenstvo a škótsky Ústav polárneho výskumu. V uplynulom lete merali gravitáciu vo vnútri dnešného vrtu na ľadovej ploche kontinentálneho Grónska, kde rovnaké zloženie okolného ľadu pomáhalo redukovať chyby v ich analýzach (obr. 7).

Nedávno bolo tiež veľa rozruchu okolo reanalýzy Eötvösovho pokusu z r. 1909, vedenej E. Fischbachom z purdueskej univerzity. Táto skupina našla korelácie medzi drobnými diskrepanciami v Eötvösových výsledkoch, o ktorých sme sa skôr zmienili, a pomerom baryónového čísla ku inerciálnej hmotnosti rôznych látok, ktorý namerlal Eötvös. Purdueská skupina naznačuje, že táto korelácia môže byť dôkazom pre úplne novú „piatu silu“ v prírode, avšak my si myslíme, že vzhľadom na to, že je ona teľže intenzity ako gravitácia, je táto sila novým aspektom samotnej gravitácie. Odpoveď príde definitívne z experimentu a teórie.

Aby sa preskúšali javy kompozičnej závislosti, zostavili sa mnohé nové experimenty. V čase písania tohto článku došli štyri výsledky: dva negatívne výsledky od skupiny z univerzity vo Washingtone vedenej E. G. Adelbergerom a od skupiny z Národného úradu pre miery, vedenej J. E. Pallerom, a dva pozitívne výsledky od P. Thiebergera z brookhavenského Národného laboratória a od P. B. Boyntona a jeho kolegov na univerzite vo Washingtone (pozri „Science and Citizen“, December, 1987).

Všetky dosiaľ opísané experimenty skúšali zrýchlenie obyčajnej hmoty v gravitačnom poli Zeme. Pripomeňme si však ako sa veci zmenia, ak nahradíme hmotu antihmotou. Takýto experiment by tvoril najextrémnejší test na ekvivalenčný princíp. Tu gravifotónový účinok je príťažlivý, ako je aj príťažlivá graviskalárna sila. Teda tieto dva účinky by sa skladali namiesto toho, aby sa zrušili. Antihmota by takto zakúšala smerom k zemi väčšie zrýchlenie než hmotu.

Dvaja z nás, motivovaní skoršími diskúsiami o tejto možnosti, navrhli r. 1982 experiment merať gravitačné zrýchlenie antiprotonov v Low Energy Antiproton Ring (LEAR) v CERN. Od tej doby pripojili sa k nám mnohí spolupracovníci z Los Alamos, Rice University, Texas A. and M. University, Amesovho výskumného strediska správy Národnej aeronautiky a kozmu, univerzity v Ženeve, univerzity v Pize a CERN. Expe-

riment (obr. 10) by mal vyextrahovať antiprotóny z LEAR, ochladiť ich bezmála na absolútnu nulu a potom by ich mal vyslať, 100 v určitom čase, do driftovej elektrónky, kde sa bude merať čas potrebný na to, aby dosiahli vrch. Záporné vodíkové ióny, ktoré majú ten istý náboj a skoro tú istú hmotnosť ako antiprotón, budú poskytovať meranie preletovej doby pre obyčajnú hmotu. Výsledok sa potom porovná s časom letu pre antiprotóny, aby sa určilo, či podliehajú antiprotóny väčšiemu gravitačnému zrýchleniu. Metóda driftovej elektrónky preráža si cestu od čias pionierskej práce F. C. Wittenborna a W. M. Fairbanka zo stanfordskej univerzity, ktorí r. 1966 referovali o meraní gravitačného zrýchlenia elektrónu. Fairbank teraz dúfa, že podnikne exemplárny pozitronový experiment, ktorý by mal poskytnúť doplnok k nášmu antiprotónovému experimentu.

Očakáva sa, že antiprotónový gravitačný experiment dosiahne presnosť vyššiu než 1 percento. Ak naozaj existujú obe interakcie, vektorová aj skalárna, s väzbovými intenzitami, ktoré sú blízko normálnej gravitačnej sily a s dosahmi okolo 450 kilometrov, antiprotón by mal padať so zrýchlením, ktoré je o 14% väčšie, než je zrýchlenie obyčajnej hmoty. Keby boli väzbové intenzity väčšie, ako je normálna gravitačná sila, bol by účinok ešte väčší.

Aj keby sa experiment neukázal schopným objaviť nijaké nové efekty ako prvé meranie gravitačného zrýchlenia antihmoty predsa by rozšíril experimenty z gravitácie na novú oblasť, zrovna tak, ako tomu bolo v prípade Eötvösovho-Dickeovho a Poundovho-Rebkovho experimentu. Tieto experimenty dostali presne také výsledky, aké sa čakali od prevládajúcej teórie tých čias. Predsa však boli tak krásnymi a jasnými verifikáciami fyziky, že sa stali klasické — druhom experimentov, ktoré vchádzajú do učebníc.

Čo ale ak experiment s antihmotou bude schopný získať výsledok, ktorý narušuje klasické chápanie gravitácie? Ako by sme sa my a zbytok komunity fyzikov presvedčili, že výsledok nebol experimentálnou chybou? Keď sme o tejto ťažkosti diskutovali s dvoma členmi experimentálneho tímu, R. Brownom a N. Jarmiemi, ich oči sa rozžiarili. Ich odpoveď vyjadruje všetko: „Sme radi, že máme tento problém“. Nech je už výsledok akýkoľvek, všetci netrpezlivo čakáme, čo experimenty prinesú.

Poznámka prekladateľa: Podrobnosti týkajúce sa diskutovanej témy môže nájsť erudovaný čitateľ v týchto prácach autorov:

1. M. M. NIETO, T. GOLDMAN and R. J. HUGHES, Phys. Rev. *D36*, 3684 (1987).
2. M. M. NIETO, T. GOLDMAN and R. J. HUGHES, Phys. Rev. *D36*, 3688 (1987).
3. M. M. NIETO, K. I. MACRAE, T. GOLDMAN and R. J. HUGHES, Phys. Rev. *D36*, 3694 (1987).
4. M. M. NIETO, T. GOLDMAN and R. J. HUGHES, Phys. Rev. *D38*, 2937 (1988).