

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Silvester Takács

Pulzary ako neutónové hviezdy

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 18 (1973), No. 6, 322--329

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139540>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1973

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>

# Pulzary ako neutrónové hviezdy

*Silvester Takács, Bratislava*

## Vlastnosti pulzarov

Vo februári r. 1968 sa podarilo skupine rádioastronómov v Cambridge zachytiť bodové rádioemitujúce objekty nového druhu, ktorých vlastný pohyb bol minimálny, nachádzali sa teda mimo slnečnej sústavy. Zdroje tohto záhadného žiarenia – periodických „výbuchov“ rádiových signálov – dostali „prezývku“ *pulzary*.

Periodičnosť pulzov bola taká presná, že všetky vtedy objavené pulzary (spolu štyri) sa mohli používať ako hodinky s presnosťou 1 : 100 miliónom. Síce sme si už stáročia zvykli na to, že sa čas vzťahuje na astronomické deje (pohyb Zeme okolo Slnka a vlastnej osi), prekvapilo ale, že periódy boli nepomerne kratšie ako dovtedy známe astronomické deje (0,25–1,3 s) a vyznačovali sa vysokou stálosťou. Pre časť tlače to bola vítaná príležitosť na rozličné fantazírovanie o tom, že snáď nejaké cudzie bytosti z iných planét sa snažia o nadviazanie kontaktu.

Vplyv slnečného vetra ako jediného zdroja pulzácie sa podarilo vylúčiť objavom takéhoto pulzujúceho objektu okolo poľnoci, keď vplyv slnečného vetra je zanedbateľný.

Časové intervaly medzi jednotlivými pulzami boli veľmi presné, štruktúra pulzov však bola veľmi rôznorodá. Žiarenie sa obyčajne skladá zo súboru vln s rôznou vlnovou dĺžkou (vlnový balík). Rýchlosť týchto vln v medzihviezdnom priestore (hustota je asi  $0,1 - 0,01$  elektronov/cm<sup>3</sup>), je ale nižšia ako rýchlosť svetla vo vákuu (čím je vlnová dĺžka väčšia, tým väčšia je táto odchýlka).

Z disperzie pulzu sa potom dá vyčísliť vzdialenosť pulzaru (desiatky až stovky svetelných rokov). Keďže Slnko vyžaruje väčšinu svojej energie v optickej oblasti, hľadali sa zdroje týchto signálov optickými metódami. Ale dlho neúspešne. Všetko nasvedčovalo tomu, že tieto opticky nepozorovateľné zdroje nemožno pripísať nijakým dovtedy známym hviezdным štruktúram. V krátkosti si uvedieme niektoré argumenty, ktoré vylučujú známe astronomické objekty z úvahy.

Podľa pôvodu síl, ktoré pôsobia proti gravitačným silám (vytvárajúc tak rovnovážny stav), poznáme tri kategórie stabilných hviezd. V obyčajných hviezdach je sila spôsobená tepelným pohybom elektrónov a iónov stlačeného plynu. Tieto hviezdy musia byť horúce, aby mohli existovať, ich hustota je asi  $10^{-4} - 10$  g/cm<sup>3</sup>.

Druhou kategóriou je „degenerovaná“ studená hviezda, nazývaná taktiež bielym trpaslíkom. Jej stredná hustota je  $10^4 - 10^8$  g/cm<sup>3</sup> a môže sa vyskytovať aj pri veľmi nízkych teplotách. Sila pôsobiaca proti gravitácii je spôsobená degeneráciou elektrónov, popr. iónov. Následkom Pauliho princípu totiž ani pri veľmi nízkych teplotách nemôžu všetky elektróny (a všeobecne fermióny, t. zn. častice s neceločíselným spinom) zaujať najnižšie energetické stavy, keďže každý stav môže byť obsadený nanajvyš dvomi

časticami s opačnými spinmi. Bieli trpaslíci sa teda podobajú akýmsi obrovským atómom (elektróny v atónoch sú v rôznych stavoch).

Takáto sila spôsobuje aj malú stlačiteľnosť kvapalín a pevných látok. Bez nej by museli všetky kondenzované systémy kolapsovať.

Tretiu kategóriu tvoria neutrónové hviezdy (NH), predpovedané v rokoch 1930–40 (medzi inými F. ZWICKY, R. OPPENHEIMER a L. D. LANDAU).

Ak sú atómy veľmi silne stlačené, môžu elektróny „tunelovaním“ prejsť do jadier a vytvoriť tak neutrónový plyn (opačný dej nastáva pri  $\beta$ -rozpade rádioaktívneho atómu, keď elektrón tuneluje von z jadra). Odpudivá jadrová interakcia medzi neutrónmi môže kompenzovať gravitačnú silu a vytvoriť tak stabilnú hviezdu s hmotou rovnajúcou sa približne hmote Slnka. Ak bielych trpaslíkov možno porovnať s obrovskými atómami, NH sú podobné ich jadrom. Môžu sa vyskytovať i pri teplotách veľmi blízkych k absolútnej nule, ich hustota je obrovská,  $10^{11} - 10^{15} \text{ g/cm}^3$ . Na skúmanie vlastností hviezd s takýmito hustotami treba použiť zákony všeobecnej teórie relativity.

Až do objavu pulzarov sa NH pokladali za vec, ktorá by bola veľmi krásna, keby existovala. Otázka, či pulzary sú NH, bola spočiatku tiež dosť nejasná. Ak by ich veľkosť mala byť rádovo rovná veľkosti Zeme, potom za predpokladu, že vysielanie je simultánne z celého povrchu, musel by byť interval pulzu značne väčší ako 20 ms. Ťažko totiž predpokladať, že vysielanie z jednotlivých bodov sa deje vždy postupne v smere spojnice Zem – pulzar.

Z optických meraní vyplynulo, že pulzary sú buď veľmi malé, buď veľmi studené – alebo oboje. Ako kandidáti zdrojov pulzov teda zostávali bieli trpaslíci a neutrónové hviezdy.

Pozornosť sa sústredila najmä na presné „načasovanie“ pulzov. Z astronomického hľadiska prichádzajú do úvahy tri druhy periodických zdrojov okolo 1s: oscilácia atmosféry samostatnej hviezdy, periodické vzájomné zatmenie hviezdneho páru a točenie sa hviezdy s nerovnomernou jasnosťou povrchu. Pulzujúce hviezdy sa z týchto úvah vyčlenili, lebo bieli trpaslíci dávali veľmi veľké, NH zasa veľmi malé periódny. Orbitálne dvojhviezdy bielych trpaslíkov by dávali periódny  $T > 1,7 \text{ s}$ . Dvojica NH by sa následkom vzájomného zrýchľovania hviezd špirálovite približovala k sebe, a tým by vyžarovala gravitačnú energiu (podobne ako v elektrodynamike urýchľovaná nabitá častica vyžaruje elektromagnetickú energiu). To by znamenalo oveľa väčšie predĺžovanie periódny, ako pripúšťajú merania pulzov. Ako jedna z možností vysvetlenia pulzov sa ukázala teória „majákov“ na rotujúcich hviezdach, ktorých žiarenie sa pre náhodného pozorovateľa objavuje v tvare pulzov. Podľa toho by muselo existovať nespočetne viac pulzarov, ako sme schopní pozorovať na Zemi. Závety z majákovej teórie pre NH sa ukázali pre pulzary správne (možnosť veľmi silných magnetických polí, vyžarovanie vysokoenergetických nabitých častíc).

Základným príspevkom pri rozriešení pôvodu pulzarov bol objav dvoch zdrojov pulzov v oblasti Krabej hmloviny. Jeden z týchto zdrojov bol v centre hmloviny, jeho periódna bola 1/30 s. Zo spomínaných objektov sa tak rýchlo môže otáčať iba NH. Periódna pulzov sa postupne predĺžovala približne o 38 ns/deň. Ukázalo sa, že energia, ktorú stráca hviezda pri otáčaní, je dostatočná na vysvetlenie trblietania Krabej hmloviny, ktoré bolo dovtedy záhadou.

Z meraní Krabej hmloviny a jej pulzaru (NP 0531) možno dedukovať, že ak pulzar je rotujúcou hviezdou, potom je to NH, ktorej hmota sa približne rovná hmote Slnka a polomer je okolo 10 km. Predpokladá sa, že Krabia hmlovina je pozostatkom supernovy, pozorovanej orientálnymi astronómami v r. 1054 n. l. To je taktiež v súlade s teóriou NH, nakoľko sa už v prvých teóriách predpokladalo, že energia pri explózii supernovy sa môže uvoľniť rýchlym kolapsom jadra hviezdy na neutrónovú hustotu.

S takou presnosťou určený zdroj pulzov znovu nastolil problém hľadania „optického dvojníka“. Úspech sa dostavil v r. 1969, pulzarom bola už predtým známa hviezda.

Optické pulzy sa trochu líšili od rádiových, silný záchvev na začiatku pulzu vystriedal jeden slabší na konci pulzu.

Obidva druhy pulzov (optické i rádiové) boli zhodne lineárne polarizované. Aby sa mohla utvoriť takáto polarizácia, je nevyhnutné mať špeciálne podmienky pri vytváraní žiarenia (napr. silné magnetické pole). Výskum sa preto sústredil na vlastnosti rotujúcich zmagnetizovaných neutrónových hviezd.

Na presný popis vlastností NH by bol potrebný značný pokrok vo viacerých fyzikálnych oblastiach (fyzika elementárnych častíc, všeobecná teória relativity, fyzika tuhých látok, hydrodynamika).

Otázok je veľa, istých odpovedí málo. Aké môže byť magnetické pole pulzaru? Ako rýchlo sa pulzar môže otáčať? Ako sa presne vyvíja v procese explózie supernovy? Ako vznikajú rádiové signály? V ďalšom sa pokúsime na niektoré nadhodené otázky odpovedať. Niektoré časti sa budú zdať neoverené, iné dokonca fantastické.

Hoci naše Slnko má permanentné magnetické pole okolo 1 G (gauss) – „náhodou“ je to rovnakého rádu ako na Zemi – magnetické pole na povrchu väčších hviezd býva až 0,1–10 kG. Môžeme predpokladať, že magnetické pole vo vnútri hviezdy je oveľa väčšie.

V laboratórnych podmienkach sa podarilo „imitovať“ procesy pri silnom a náhlo stlačení systému s magnetickým poľom predtým, než sa dalo vôbec tušiť, že to bude mať do činenia s astrofyzikou. Keď sa oblasť s magnetickým poľom, obklopená dobre vodivou vrstvou, rýchlo stiahne (napr. výbuchom), magnetické siločary sa „zamrazia“, takže pole na povrchu sa zvyšuje nepriamo úmerne štvorcu polomeru (pole je úmerné počtu siločiar cez nejakú plochu). Došiahnuté polia boli niekoľko miliónov kG (polia dosiahnuté normálnymi metódami sú v súčasnosti okolo 400 kG). Podobné procesy sa odohrávajú pri vývine NH. Keďže jej polomer je asi 100 000 krát menší ako normálnej hviezdy, dosiahnuté polia budú okolo  $10^{12}$ – $10^{15}$  G. Ako „predkovia“ NH prichádzajú najskôr do úvahy masívne modré hviezdy. Tieto hviezdy sa otáčajú pomerne rýchlo (asi 10 dní  $\approx 10^6$  s). Ak by sa moment otáčania mal v procese kolapsu zachovať, výsledné periódy by boli okolo  $10^{-5}$  s. Boli by veľmi malé na to, aby sa hviezda mohla udržovať v celku. V procese kolapsu sa pravdepodobne časť momentu stratí (jednou z možností je gravitačné žiarenie), perióda je potom rádovo  $10^{-2}$  s.

Na základe našich doterajších vedomostí z elektrodynamiky môžeme predpokladať toto rozloženie elektromagnetického poľa okolo hviezdy: V blízkosti povrchu budú siločiar sledovať rotujúcu hviezdu, takže pole sa nebude veľmi líšiť od poľa stojaceho dipólu, známeho z elektrodynamiky. V istej vzdialenosti od osi otáčania by sa však už rýchlosť poľa rovnala rýchlosti svetla, takže mimo tohoto valca sa pole (magnetické a s ním spojené elektrické) bude oneskorovať. V dostatočnej vzdialenosti od hviezdy je rozloženie poľa také isté ako pre elektromagnetické vlny. Tieto vlny spĺňajú tie isté rovnice ako optické a rádiové vlny, iba ich vlnová dĺžka je oveľa väčšia a príslušné polia sú oveľa vyššie. Žiarením stráca hviezda energiu a uhlový moment. Z meraní

predlžovania periódy možno spätne usúdiť na magnetické pole hviezdy. Takto vypočítaná hodnota pre pulzar z Krabej hmloviny ( $2,6 \cdot 10^{12}$  G) podporila hypotézu, že „magnetodipólové“ žiarenie je príčinou strát energie pulzaru.

Z meraní pulzov doteraz známych pulzarov a zväčšovania ich períód možno odhadnúť ich stredný vek (asi 10 miliónov rokov).

Zatiaľ sa podarilo objaviť veľmi málo pulzarov s períodami väčšími ako 1 s. Naznačuje to, že pulzary staršie ako uvedený stredný vek sa buď musia rozplynúť na plynové zložky, alebo iným spôsobom sa stávajú pre nás nedetekovateľné. Malo by teda existovať približne  $10^3 - 10^4$ -krát toľko „mŕtvych“ pulzarov, ako sme schopní teraz zaregistrovať.

Doteraz nevieme presne určiť pôvod pulzov. Treba si uvedomiť, že elektromagnetické žiarenie predstavuje iba okolo  $10^0/_{00}$  celkového žiarenia. Väčšina teoretických prác vychádza z teórie majákov, pričom žiarenie vytvárajú nabité častice vychádzajúce z magnetických pólov. Zmenou elektrických a magnetických polí sa častice urýchľujú až na rýchlosti blízke rýchlosti svetla a potom vyžarovaním strácajú energiu. Zo špeciálnej teórie relativity vyplýva, že toto žiarenie je z hľadiska pozorovateľa vyžarované najmä v smere pohybu častice, i keď v referenčnej sústave častice je žiarenie izotropné. Nabité častice sa pohybujú oveľa ľahšie v smere magnetických siločiar ako kolmo k nim, dipólové pole tedy pôsobí ako kolimátor častíc a tým aj žiarenia.

Okolo 99,9% vyžarovanej energie však nemá pulzný charakter. Na objasnenie tejto otázky taktiež značne prispela Krabia hmlovina, ktorá vyžaruje vlny s vlnovými dĺžkami od veľmi malých röntgenových až po najdlhšie rádiové. Nijaký tepelný zdroj toho nie je schopný. Známy sovietsky astrofyzik ŠKLOVSKIJ už r. 1953 poukázal na možnosť, že zdrojom tohto žiarenia by mohol byť pohyb relativistických elektrónov v magnetickom poli. Takéto žiarenie sa nazýva synchrotrónnym. Možnosť takéhoto žiarenia podporujú odhady magnetického poľa v hmlovine, ktoré je o niekoľko rádov vyššie ako magnetické pole medzihviezdneho priestoru. Tok energie vlny je kolmý na čelo vlny. Častice absorbujú časť tejto energie a nezávisle od ich počiatočnej rýchlosti sa budú po nejakom čase pohybovať kolmo na čelo (v smere vyžarovanej vlny). Častice sa takouto „jazdou na vlnách“ dostávajú do hmloviny. Vlna sa rozširuje, tým postupne slabne, až častica sa môže od nej uvoľniť. Energia takto urýchľovaných elektrónov (okolo  $10^{14}$  eV) je dostatočná na vyžarovanie spozorovaných X-lúčov.

Krabia hmlovina sa ukázala ako veľmi vhodný objekt na skúmanie procesov, možno typických pre celý vesmír. Okrem jej pomernej blízkosti (asi 6 000 svetelných rokov) a ľahkej pozorovateľnosti nám môže dať vysvetlenie na niektoré otázky súvisiace s kozmickými lúčmi a možno aj s ďalšími objektami (napr. kvazary).

V krátkosti si spomeňme ešte jednu oblasť, v ktorej výskum pulzarov nahodil alebo znovunastolil niektoré problémy. Použitím maxwellovskej elektrodynamiky na pohyb magnetických polí v pulzaroch sa ukázalo, že tento pohyb by sa mal diať približne dvojnásobnou rýchlosťou, ako je rýchlosť svetla. Už predtým boli teoretické i experimentálne náznaky možnosti nadsvetelných rýchlostí (explózia veľkých hviezdnych hmôt na neutrónovú hustotu, presné merania času preletu kozmických muónov v blízkosti kvazarov, vzdáľovanie sa častí dvojhviezd). Možno, že procesy v pulzaroch nám pomôžu aj pri hľadaní hypotetických častíc pohybujúcich sa nadsvetelnou rýchlosťou, ktoré sa doteraz nazývali tachyonmi.

## Štruktúra neutrónových hviezd

Bez „učeneného“ pohľadu – ktorému je zrejme najbližšie detský pohľad – sa nám hviezdy na nebi javia ako trblietajúce drahokamy, zapichnuté do tmavej oblohy. V ďalšom procese poznania (najmä vlastností Slnka) sme si zvykli dívať sa na hviezdy ako na gule rozžeraveného plynu. Posledné desaťročie nás však znovu priviedlo do sveta detských rozprávok. Je pravdepodobné, že jadro niektorých hustých a dokonca aj kôra ešte hustejších hviezd je veľmi silne stlačená pevná látka. Niektoré hviezdy pozostávajú hlavne z uhlíka (v nejakej exotickej forme), takže predstava, že hviezdy sú vlastne obrovskými diamantami, je zrejme veľmi blízka skutočnosti.

Ako už bolo v predošlej časti spomenuté, je nemysliteľné dosiahnuť hoci len približné podmienky v laboratóriách, a to nie kvôli nemožnosti dosiahnutia vysokých teplôt, ako skôr dosiahnutia príslušných tlakov. Pri týchto tlakoch sa totiž látka správa ako pri teplotách veľmi blízkych k absolútnej nule. Preto pri výskume štruktúry NH pribúdajú ďalšie oblasti k doteraz vymenovaným: typicky nízkoteplotné javy supratekivosti a supravodivosti, fázové prechody kvapalina – pevná látka, rozptylové procesy pre neutróny a protóny v hustých látkach a pod.

Možno však predpokladať, že vnútorná štruktúra týchto hviezd bude do istej miery „jednoduchšia“ ako u pevných látok za normálnych podmienok. Napr. v kryštáli železa (Fe) sa jednotlivé jadrá nachádzajú v uzloch periodickej mriežky a sú obklopené väčšinou svojich elektrónov. Vlastnosti týchto „vnútorných“ elektrónov sa takmer nelíšia od vlastností elektrónov v atóme Fe. Pozmenia sa iba vlastnosti elektrónov vo vonkajšej vrstve; tieto elektróny sa sčasti „osamostatnia“ a vytvoria vodivostný pás kovu, ktorý určuje všetky chemické, fyzikálne a technologické vlastnosti kovu.

Pri veľmi veľkých tlakoch sa tento obraz zjednoduší. Ak degeneračná energia elektrónov pri silnom stlačení značne prevýši coulombovskú energiu, ktorou sú elektróny viazané na jednotlivé atómy, potom sa elektróny budú pohybovať približne priamočiario (bez ovplyvnenia coulombovskými silami atómov) a vytvoria tak viac-menej homogénny, záporne nabitý oblak, v ktorom sa nachádzajú kladne nabité ióny atómov. Tieto ióny pôsobia na seba coulombovskou odpudivou silou a sformujú sa do pravidelnej mriežky, ak ich kinetická energia nie je dostatočná na to, aby sa jednotlivé atómy mohli ľahko „preklzávať“ v tejto mriežke (podobne ako v pevnej látke: ak sa kinetická energia následkom tepelného pohybu zväčší, kryštál sa roztopí).

Pri stlačení hmoty na hustotu približne  $10^8 \text{ g/cm}^3$  elektróny pretunelujú do jadra a spolu s protónmi vytvárajú neutróny. Tým sa jadrá stávajú bohaté na neutróny a elektrónov ubúda. Pri hustotách  $3 \cdot 10^{11} \text{ g/cm}^3$  sú jadrá také bohaté na neutróny, že tieto sa začínajú spontánne uvoľňovať. Priestor je potom zaplnený oblakom voľných elektrónov a neutrónov, v ktorom sa nachádzajú jadrá bohaté na neutróny. Pri hustotách nad  $3 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$  (keď sa všetky jadrá rozpadnú na protóny a neutróny) je odpudivá jadrová interakcia medzi neutrónmi taká silná a degeneračná energia taká veľká, že znovu môže kompenzovať gravitáciu a tým zastabilizovať hviezdu – vytvorila sa stabilná NH s polomerom okolo 10 km (ak sa hmota hviezdy rovnala približne hmote Slnka).

Ak sa teraz pozeráme na hviezdu v pričnom reze, postupne prechádzame od nepatr-

ných hustôt až po tie najväčšie. Pritom hustota  $10^8 \text{ g/cm}^3$  sa dosiahne už v hĺbke asi jedného metra od povrchu. Ďalšia vrstva pozostáva z pevnej kôry, pretože teplota tavenia by mala byť asi o dva rády vyššia ako teplota hviezdy. Táto vrstva je približne  $10^{18}$ -krát pevnejšia a  $10^{25}$ -krát menej stlačiteľná ako oceľ a asi  $10^5$ -krát vodivejšia ako čistá meď. Pod ňou sa nachádza hlavná zložka neutrónovej hviezdy – supratekutá a supravodivá.

Fyzikálna podstata supravodivosti a supratekutosti sa objasnila v r. 1957, keď BARDEEN, COOPER a SCHRIEFFER vytvorili mikroskopickú teóriu supravodivosti (BCS). Autorom tejto teórie bola udelená Nobelova cena za fyziku pre rok 1972. Ak v systéme fermiónov (častice s poločíselným spinom, napr. elektróny, neutróny, protóny; na rozdiel od tzv. bozónov – častíc s celočíselným spinom, ako sú fotóny – kvantá elektromagnetického žiarenia, fonóny – kvantá tepelných kmitov mriežky a i.) existuje hoci i slabá príťažlivá interakcia medzi časticami, systém je nestabilný voči tvoreniu viazaných párov častíc (Cooperov jav). V prípade supravodivosti sa tieto páry nazývajú cooperovskými. Najvýhodnejšia je tvorba párov s opačnými impulzami a spinmi. Takýmto spôsobom vytvorené páry sa správajú podobne ako bozóny, môžu teda pri veľmi nízkych teplotách skondenzovať do najnižších možných energetických stavov. Tento jav sa nazýva Boseho-Einsteinovou kondenzáciou (takáto kondenzácia pre fermióny nie je možná následkom Pauliho princípu – energetická hladina, po ktorú sa zaplnia stavy pri nulovej teplote, sa nazýva Fermiho energia). Častice v blízkosti Fermiho energie sa skondenzujú, tým vznikne v energetickom spektre zakázaný pás (energetická „štrbina“), ktorej šírka  $2\Delta$  závisí od teploty a je maximálna pri  $T=0$ . Pri tzv. kritickej teplote supravodiča  $T_c$  tento pás vymizne a supravodič prejde do normálneho stavu. Približne platí  $T_c \approx \approx \Delta(0)/k_B$  ( $k_B$ -Boltzmannova konštanta) alebo pre  $\Delta$  vyjadrené v MeV  $T_c[\text{K}] \approx 10^{10} \Delta(0)$ .

Hlbší význam energetickej štrbiny je v tom, že častice sa nerozptyľujú na rozličných nedokonalostiach a poruchách, pokiaľ interakčná energia nedosiahne šírku štrbiny. Ak sa teda nejakým spôsobom vytvoril určitý tok častíc, nebude zanikávať – systém sa správa ako supratekutý a v prípade, že ide o nabitú časticu – ako supravodivý (pretože pri prenose nabitých častíc sa vytvorí elektrický prúd). Stavy supratekutosti a supravodivosti sa preto vyznačujú niektorými extrémnymi vlastnosťami (bezviskóznosť, nekonečná elektrická vodivosť). Neutrónová kvapalina by sa mala správať podobne ako supratekuté  $\text{He}^3$ . Napriek ochladeniu na teploty nižšie ako 1 mK sa však tento stav nepodarilo realizovať. Supratekutosť  $\text{He}^4$  je už dávno známa, v tomto prípade však ide o bozóny, a teda o klasickú kondenzáciu Boseho-Einsteinovho plynu. Vodivostné elektróny, skondenzované do cooperovských párov, spôsobujú supravodivosť kovov pri nízkych teplotách. Príťažlivú interakciu medzi nimi sprostredkuje elektrón-fonón – elektrónová interakcia, ktorá môže prevládať nad odpudivou coulombovskou interakciou medzi elektrónmi.

Neutróny v základnom stave sa v určitých vzdialenostiach priťahujú. Táto sila nestačí na vytvorenie stabilných bineutrónov, ale pri dostatočne veľkých hustotách sa môžu tvoriť páry podobné cooperovským a systém neutrónov môže prejsť do supratekuteho stavu. Energetická štrbina sa bude rovnať rádove energii jadrovej interakcie (okolo 1 MeV) a kritická teplota systému  $T_c \approx 10^{10}$  K. Tento odhad platí pre hustoty  $10^{13}$  až  $10^{14} \text{ g/cm}^3$  (hustota neutrónov v jadrách je  $1,5 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$ , celková hustota nukleónov v jadre je približne dvojnásobná, teda  $3 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ). Protónová kvapalina sa bude správať analogicky. Príťažlivá interakcia je ale následkom odpudivej coulombovskej interakcie asi o rád menšia ako pre neutróny. Kritická teplota pre supravodivosť protónov bude teda  $T_c \approx 10^9$  K.

Pretože teplota hviezdy je pravdepodobne menšia ako tieto kritické teploty, možno očakávať, že hmota pod pevnou kôrou je supratekutá (neutrónová kvapalina) alebo supravodivá (protónová kvapalina). To platí pre hustoty  $<10^{15} \text{ g/cm}^3$ . Pre väčšie

hustoty nemôžeme urobiť ani hrubé odhady. Preto sa pripúšťa existencia zatiaľ nedefinovateľnej hmoty v strede veľmi hustých hviezd.

Pozorovanie pulzarov môže poskytnúť vhodné informácie o štruktúre a evolúcii magnetického póla NH a jeho dynamike – konkrétne o zmenách rýchlosti otáčania. Uvážením povrchovej vrstvy vychádza relaxačný čas pre zanikanie magnetického póla iba trochu menší ( $10^{12} - 10^{14}$  s), ako vyplýva z pozorovania. Procesy tlmenia sú ale ešte slabšie pre neutrónovo-protónovú kvapalinu a zanedbateľné pre supratekutý a supravodivý stav. Ale nehomogenity kôry a vnútra hviezdy veľmi vplývajú na relaxačný čas, takže táto otázka zatiaľ nie je jednoznačne zodpovedaná.

Veľmi zaujímavým a nečakaným objavom bolo pozorovanie náhlych skokov v predĺžovaní periódy pri dvoch pulzaroch (NP 0532 v Krabej hmlovine a PSR 0833–45 v súhvezdí Plachiet). Tento jav sa pripísal seizmickým otrasom hviezdy. Otáčanie NH sa totiž spomaľuje postupne. Keďže kôra je pevná, nesleduje spojitie tieto zmeny, pretože vydrží určitý tlak, až praskne a potom náhle zmení tvar a priblíži sa k rovnovážnemu stavu pri danej uhlovej rýchlosti. Ukázalo sa, že stredný polomer sa pri takomto otrase zmenil pri prvom pulzare iba o 1 cm, pri druhom iba o stotinu cm. Obrovská gravitačná sila udržuje hmotu NH vždy v tvare veľmi blízkom ku guli, preto väčšie nerovnomernosti na povrchu nie sú možné. Možno práve objav týchto otrasov znamená začiatok kozmickej seizmológie (ktorá by podľa analógie s geológiou – náukou o zemskej kôre, mohla niesť názov astrológia).

Nepatrná zmena polomeru by mala znamenať, že spomaľovanie otáčania sa pri otrase nezmení. V prípade pulzaru zo súhvezdia Plachiet to však tak nebolo. Vysvetlenie treba pravdepodobne hľadať v supravodivosti a supratekutosti neutrónovo-protónovej kvapaliny.

Tu nám znovu prichádzajú na pomoc naše vedomosti o správaní supratekutého hélia pri otáčaní a supravodičov vo vonkajšom magnetickom poli. Niektoré supravodiče (supravodiče II. typu) účinkom magnetického póla neprechádzajú zrazu do normálneho stavu (ako supravodiče I. typu), ale postupne sa v nich tvoria prúdové víry s periodickou štruktúrou. Magnetický tok víru je kvantovaný. Pri zvyšovaní vonkajšieho magnetického póla sa tieto víry (tzv. fluxoidy) zhusťujú, a tým supravodič prechádza postupne do normálneho stavu, keď magnetické pole prenikne úplne do látky. Podobne je to aj v prípade supratekutosti. Magnetické pole je tu nahradené otáčaním nádoby so supratekutou kvapalinou. Tak ako magnetický tok vniká do supravodiča od povrchu (najväčšie pole), víry v supratekutom stave vznikajú tam, kde je obvodová rýchlosť najväčšia (steny nádoby).

V čisto supratekutom stave je možné iba bezvírové prúdenie. Ale už pri pomerne malých uhlových rýchlostiach NH (okolo  $10^{-14}$  s<sup>-1</sup>) je energeticky výhodné, aby sa v supratekutej kvapaline objavili víry rovnobežné s osou otáčania (podobne ako magnetické pole vo fluxoidoch je rovnobežné s vonkajším polom) a nejakým spôsobom viazané na kôru. Pri vyšších rýchlostiach otáčania je počet vírov už taký veľký, že supratekutá fáza sa pohybuje zároveň s kôrou. Tento pohyb je pri nezmenenej uhlovej rýchlosti navonok nebadateľný. Celkom ináč je to pri náhlej zmene uhlovej rýchlosti. V prípade normálnej (nesupratekutej) kvapaliny je interakcia medzi neutrónmi, protónmi a elektrónmi veľmi rýchla (charakteristický čas okolo  $10^{-15}$  s). V supratekutom stave sprostredkujú túto interakciu iba normálne jadrá vírov, ktorých objem je iba  $10^{-18}$  časť z celkového objemu. Relaxačný čas sa preto predlžuje na dni i roky. Najprv sleduje zmenu iba kôra, predĺžovanie periódy je preto po otrase väčšie.



Pravdepodobne aj „kolísanie“ (nemonotónne zmeny frekvencií s periódou okolo troch mesiacov) v uvedenom pulzare NP 0532 možno vysvetliť existenciou normálnych vírov v supratekutej kvapaline a ich pomalými kmitmi okolo rovnovážnych polôh.

Sledovaním nerovnomerností kmitov a periód pulzarov máme takto možnosť pozrieť sa do „vnútra“ NH. Existencia NH nie je síce ešte úplne dokázaná, predsa len predstava, že meraním nerovnomerností pulzov môžeme sledovať javy vo vnútri hviezd, je viac ako potešujúca.

Presná perióda pulzov dokazuje, že magnetické pole je spojené s pevnou kôrou a s neutrónovo-protónovou kvapalinou. Preto sa nepohybuje voči povrchu – ako je to s magnetickým poľom v plynnej atmosfére (typickým príkladom toho sú slnečné škvrny).

K dôkladnejšiemu pochopeniu vlastností pulzarov bude zrejme potrebné hlbšie štúdium vlastností pevnej kôry (najmä jej elastických vlastností) a neutrónovo-protónovej kvapaliny. Všetko svedčí o tom, že tieto ligotajúce objekty – s kôrou podobnou drahokamom, ktorá uzatvára v sebe supratekutú a supravodivú kvapalinu a v strede s exotickou hmotou – môžu mať azda najzaujímavejšiu „architektúru“ zo všetkých objektov vesmíru.

---

Na otázku „Jaké máte zaměstnání?“ odpoví lékař, inženýr, učitel tak, že se nazve lékařem, inženýrem, učitelem (pedagogem). Člověk zabývající se vědou, i když je to jeho zaměstnáním, zřídka nazve sám sebe vědcem. Větu „Já jsem vědec“ jsem zaslechl v životě jen několikrát, a to ještě jen od lidí, kteří měli sotva právo na tento titul.

Myslím, že povolání „vědec“ neexistuje; je pouze povolání vědeckého pracovníka ... zaměstnaného ve vědeckých ústavech i v podnicích a zabývajícího se řešením úloh často teoretického charakteru, ale zejména úloh vyvolaných praxí, technikou nebo zemědělstvím, a to je důvodem, proč toto povolání (blízké povolání inženýra) může mít masový charakter.

Vědecká produktivita za každou cenu – to je zvláštní případ té „vlády kvantity“, kterou považují za jedno z velkých a všeobecně rozšířených nebezpečí naší doby. Již Gogol si stěžoval, že literáti píší tolik různých děl, že brzy nebude na světě dost věcí, které by se daly zabalit do popsaného papíru.

V současné době musejí nepřetržitě vyplňovat plány vědecké činnosti, psát a obhajovat diser-

tace nejen vědečtí pracovníci ve vlastním smyslu slova, ale i učitelé vysokých škol. Požadavek vědecké produktivity, která se vykazuje v hlášeních, je přirozený v případě vědeckých pracovníků, ale ... je nepřirozený a nesprávný, pokud se aplikuje na přednášející vysokých škol; přispívá jedině k nadvýrobě nepotřebných prací.

Říká se: Co je to za vysokoškolského učitele, když nedělá nepřetržitě vědeckovýzkumnou práci? Někteří hovoří také o „tvůrčí“ práci – jakoby pedagogická práce nebyla tvůrčí! Je možné, že ti, kdož tak hovoří, mají pravdu, a že dotyčný člověk, který vědecky nepracuje, skutečně špatně přednáší. Tak tedy ho posuzujte „podle skutků jeho“, zda je dobrý nebo špatný přednášející, zda dobře nebo špatně učí studenty, ale ne podle počtu otištěných prací a jejich seznamu ... Nemyslete si, že jsem proti tomu, aby učitelé vysokých škol vědecky pracovali. Jsem jen proti tomu, aby to byla činnost povinná a podléhající termínovaným hlášením. Nešťastím je to, když se psaní vědecké práce (zejména disertační) stane samoúčelným.

*P. S. Aleksandrov*