

Po stopách evoluce hvězd, kulových hvězdokup a spirálních galaxií

Pavel Kroupa¹, Jana Žďárská²

¹Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, D-53121 Bonn, SRN

²Kosmologická sekce České astronomické společnosti, K Panskému poli 274, 251 01 Světlice

Vesmír, hmota, energie, galaxie, hvězdy a planety... Prapodstata fyziky prostoročasu a našeho pohledu na něj. Vesmír... Jak se vlastně vyvíjel? A proč jsou si všechny galaxie obdobné hmotnosti tolik podobné? Definice praví, že vesmír či kosmos (z řeckého slova značícího cosi uspořádaného) je vžité souhrnné označení veškeré hmoty, energie a časoprostoru. Vývojem vesmírných struktur se zabývá vědní obor astrofyzika. Badatelé se pomocí simulací na počítačích snaží porozumět evoluci hvězd a hvězdných systémů. A na to, jak chutná denní chleba astrofyzikovi, jsem se zeptala prof. Pavla Kroupy, významného vědce s českými kořeny, profesora Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität v Bonnu a také hostujícího profesora v Astronomickém ústavu UK v Praze.

■ **Jana Žďárská:** Vážený pane profesore, velice si cením vašeho času, který jste se uvolil věnovat našemu rozhovoru pro Československý časopis pro fyziku. Je známo, že váš vědecký záběr je dost široký. Zabýváte se nejen evolucí hvězd, ale i dynamikou galaxií, výzkumem kulových hvězdokup či trpasličích galaxií. Pátráte po informacích, hledáte souvislosti. Mohl byste nám prosím říci, co vy osobně považujete za největší úspěch svého dosavadního vědeckého života?

Pavel Kroupa: Já svoji vědeckou kariéru a její postup nevnímám jako směřování k určitému jedinému cíli, jedinému objevu, ale spíš jako neustálý pokrok v chápání zákonitostí vesmíru, který nelze rozdělit na jednotlivé vědecké problémy, nýbrž naopak je naprosto nutné chá-

pat jej ve všech jeho souvislostech. Velmi rád vzpomínám na své amatérské astronomické začátky i na svůj první skutečný vědecký výzkumný projekt, týkající se naší druhé nejbližší hvězdy Proximy Centauri. Zabýval jsem se také studiem naší Galaxie a jejích satelitních galaxií, strukturou kulových hvězdokup a trpasličích galaxií. Postupnými kroky jsem dospěl až k výzkumu těch nejzákladnějších zákonitostí vesmíru, do nichž patří i zkoumání hypotetické temné hmoty. Významnou součástí mé vědecké práce je zároveň vzdělávání studentů, z nichž 18 doktorandů již úspěšně ukončilo doktorské studium. Dva z mých německých doktorských studentů získali Hubbleovo stipendium a nyní pracují v USA (Andreas Kuepper a Marcel Pawlowski). Asi nejvíce jsem v povědomí díky svým výsledkům o rozdělení hvězd a dynamice a vývoji mladých hvězdokup. Pro mnoho vědců jsem známý také tím, že moje práce silně kritizuje standardní kosmologický model. Dokázal jsem, že pozorovaná data nedovolují existenci temné hmoty. V rámci této intenzivní činnosti měli moji doktorandi velké úspěchy, protože objevili nové struktury kolem naší Galaxie.

■ **JŽ:** Narodil jste se v Jindřichově Hradci. Vaším nejranějším domovem se stala půvabná jihočeská krajina, plná rybníků, lesů a polí. Přestože jste zde pobýval jen jen několik let, mohl byste nám prosím říci, co pro vás česká krajina znamená, jak ji vnímáte a zdali vás něčím okouzila?

PK: Ano, máte pravdu. Jižní Čechy se mi staly domovem jen na necelých pět let. Poté bylo toto kouzlo



Univerzita v Bonnu zaměstnává 5 500 zaměstnanců, vyučuje na ní 550 profesorů a studuje zde přibližně 34 tisíc studentů.

násilně přerváno historickými událostmi roku 1968, které natolik vyděsily moje rodiče, že se rozhodli emigrovat. Díky tomu jsem většinu svého dosavadního života strávil v Německu, Jihoafrické republice, Austrálii a Anglii. Prošel jsem spoustou zajímavých míst, pozoroval jsem neobyčejná zvířata africké divočiny, vdechoval vůni oceánu omývajícího břehy Austrálie, procházel se historickými scenériemi anglických hrabství. Přesto mohu s naprostou jistotou nazvat malebnou krajinu Čech za jednu z nejkrásnějších, kterou jsem kdy viděl. Případá mi tak přirozená, harmonická a klidná se všemi svými rybníky, lesy a poli, ozdobená korálky mohutných hradů, zdobných zámků a malebných vesniček. Taková krajina se dnes v Evropě vyskytuje už jen velmi zřídka. Vidím, že jsem vás svými poetickými slovy poněkud zaskočil. Zřejmě jste takové vyznání od astrofyzika příliš nečekala.

■ *JŽ: Skutečně jste mě zaskočil, pane profesore. Ale musím říci, že velice mile, protože já českou krajinu naprosto zbožňuji. A pokaždé, když se mohu pohledem na ni potěšit, vždycky si blahopřeji, že jsem se narodila právě tady. Vraťme se ale k vám a k době, kdy jste spolu s vaším tatínkem narychlo opouštěli rodnou zem. Jeli jste tehdy na mopedu, vy a váš otec, někam do neznáma. Utkvěly vám z této doby nějaké vzpomínky?*

PK: V noci z úterý 20. na středu 21. srpna došlo k invazi vojsk Varšavské smlouvy do Československa. A můj táta tehdy už na nic nečekal. Nedokázal si zřejmě život pod sovětskou okupační armádou představit. Já jsem se svým otcem uprchl na mopedu ještě 21. srpna přes českou hranici do Bavorska. Podařilo se nám to jen díky tomu, že se otec jako geolog znal s českými vojáky a mohl tedy přes jejich hlídku bez problémů projet. Cesta na mopedu byla zdlouhavá a krušná. Od této doby je mi zvuk mopedu spíše nepříjemný, a když jej slyším, vrací se mi jistý znepokojující pocit jako tenkrát, když jsme prchali z naší vlasti. Po šesti měsících se k nám v Hessenu připojila i maminka a život v cizí zemi se mi stal snesitelnějším.

■ *JŽ: Svoje dětství jste tedy prožil nejprve v Německu a poté dokonce v Jižní Africe. Byl jste ještě stále malý chlapec, který se zčistajasna musel učit cizí jazyk, chápat odlišnou kulturu a vnímat jiný způsob života. Jak na vás tyto okolnosti působily a co vás v této době nejvíce překvapilo?*

PK: Nebyla to úplně snadná doba, to přiznávám. Každý v životě občas zažije něco nového, ale tady bylo nové

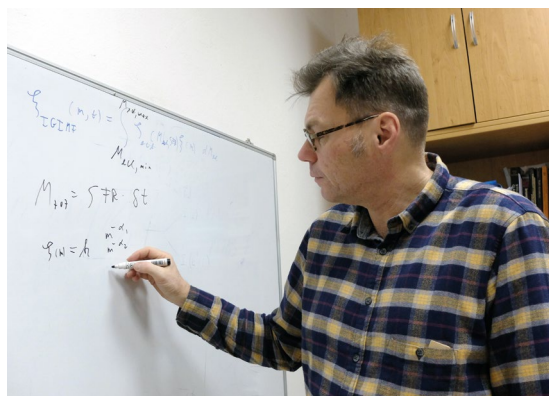


Svoji vědeckou kariéru a její postup nevnímám jako směřování k určitému jedinému cíli, jedinému objevu, ale spíš jako neustálý pokrok v chápání zákonitostí vesmíru...

všechno. Německu jsem se ale nakonec přizpůsobil poměrně rychle, přirozeně jsem se učil jazyk a snažil se chápat německou kulturu. Těšilo mě, že doma rodiče mluvili česky. Za to jsem jim dosud neskonale vděčný, protože díky tomu jsem nikdy na češtinu nezapomněl. Dnes češtině dobře rozumím a myslím, že mohu mluvit na rozumné úrovni. Po pěti letech života v Německu získal můj otec geolog zajímavou práci v Jižní Africe. A tak nás opět čekal úplně jiný způsob života, jiná krajina a především odlišná mentalita tamních obyvatel. Kapské Město se svými nákupními středisky, parky a palmami se od evropského města podstatně lišilo. Vzpomínám si na Stolovou horu a na vlak do Pretorie, kde jsme se poté usadili. Slunce, bazény, grilování, venkovní domek, soukromá internátní škola – a apartheid, ten nejvíce. Tady jsem si uvědomil, jak je důležité, že se naší civilizaci podařilo zbavit se otroctví. Skutečnost, že Evropa dokázala rozvinout takovou společnost, která není založena na otročské práci, ale v podstatě se skládá z lidí, kteří jsou si „rovni před Bohem“ mě v porovnání s africkým apartheidem neustále fascinuje. A ještě jedna věc – to úžasné nebe, které probudilo můj zájem o vesmír, z nějž se nakonec vyvinula téměř neskonalá vášně pro astronomii.

■ *JŽ: Osud tomu chtěl, aby ani Jižní Afrika nezůstala vaším trvalým domovem, a po jisté době jste byli spolu s rodiči opět nuceni změnit místo pobytu. Díky nestabilní politické situaci v Jižní Africe jste odcestovali zpět do Německa. Zde jste se poprvé začal věnovat intenzivnímu amatérskému astronomickému pozorování. Vzpomínáte, co vás tehdy na obloze nejvíce zaujalo?*

PK: V době, kdy se situace v Jihoafrické republice začínala destabilizovat, rozhodli se moji rodiče k návratu zpět do Německa. Tentokrát jsme se přestěhovali do Göttingenu. Tady jsem byl přijat na Gymnázium Theodora Heusse – do nové školy, která se věnovala především matematice a přírodním vědám. Velmi jsem si cenil tohoto místa, a to nejen proto, že Göttingen byl v minulosti ústředním výzkumným centrem při vývoji kvantové mechaniky. Ve starém Göttingenu panovala taková zvláštní atmosféra – stěny budov jakoby doslova dýchaly aurou objevů a připomínaly doby, kdy zde vědci jako Max Born a Werner Heisenberg vyučovali



Moje vědecká práce silně kritizuje standardní kosmologický model. Dokázal jsem, že pozorovaná data nedovolují existenci temné hmoty.



Důležitá spolupráce s českými vědci v rámci mezinárodní konference *Cosmology on Small Scales 2016* v Matematickém ústavu AV.

a pracovali. Začal jsem se věnovat intenzivnímu astronomickému pozorování pomocí malého 6 cm refraktoru. Pozoroval jsem všechno, ale především Slunce. Vyvinul jsem svoje vlastní sofistikované způsoby jeho fotografování tak, že jsem byl schopen opakovaně zachytit jeho granulaci. Usilovně jsem fotografoval doslova každý den, počítal jsem sluneční skvrny a odesílal k posouzení výsledky svých pozorování.

■ *JŽ: V té době v Evropě gradovala „studená válka“ a vaši rodiče pocítovali velmi nepříjemně silné politické napětí, které v tehdejší Německu vládlo. Bylo to jistě dáno i tím, že se Göttingen nacházel tak blízko hranice s východním Německem. Situace byla natolik vypjatá, že ačkoliv jste ještě neměl dokončenou školu, rozhodli jste se urychleně změnit místo pobytu. Opět jste změnili nejen zemi, ale i kontinent a z Evropy jste odcestovali až do daleké Austrálie. Jak jste tuto výraznou změnu chápal vy – středoškolský student, mladík s mnoha zájmy a dá se říci, že nyní i tak trochu „světoběžník“?*

PK: Byla to pro naši rodinu skutečně zvláštní, až divoká doba. Opustili jsme Evropu a skoro jsme se ani neohlédli. Bylo to neobvyklé, ale cítili jsme, že na nás čeká nové dobrodružství, celý nový kontinent, neuvěřitelně cizokrajné místo, které vyčkávalo, až jej prozkoumáme. Exotická Austrálie nás uvítala a přijala. Západní Austrálie je doslova magnetem pro geology, a tak jsme se díky otcově pracovnímu zaměření usadili v Perthu. Mým prvním problémem bylo získat možnost studovat na některé z univerzit, což nebylo zcela snadné, protože jsem svoje středoškolské studium v Německu nedokončil. Také jsem se rozhodoval, jaký studijní obor by mi nejvíce vyhovoval. Nebyl jsem si zcela jistý, zda studovat zoologii, fyziku nebo třeba geologii. Nakonec jsem byl přijat ke studiu na nejlepší univerzitě v západní Austrálii a rozhodl jsem se studovat fyziku na The University of Western Australia v Perthu, za což jsem dodnes velmi rád.

■ *JŽ: Psal se rok 1988 a spolu s ním i další z mnoha vašich stěhování. To tehdy, když jste získal stipendium Isaaca Newtona na věhlasné univerzitě v Cambridge. To byla skutečně významná událost... Ale vy jste „svoji“ Austrálii niterně miloval. Jaké to pro vás bylo – opustit slunný Perth a zakotvit v poněkud ponuré, umrholené a deštivé Anglii?*

PK: Ano, velmi jsem toužil studovat na proslulé univerzitě s věhlasnou historií. A tak jsem se s těžkým srd-

cem rozhodl z milované Austrálie odjet. V Perthu se mi podařilo ukončit studium jako jeden z nejlepších studentů, a tak jsem začal studovat na Trinity College na Cambridge University v Anglii, kde bylo moje studium financováno z Isaac Newton Stipendia, které mi bylo nabídnuto. Snad to bude znít příliš změkčile, ale toto rozhodování pro mě bylo víc než těžké. Přesto jsem nakonec opustil slunný Perth s otevřenými, širokými horizonty, brilantními plážemi a spoustou vzpomínek na překrásnou přírodu, kde jsem s australskými kamarády strávil mnoho času v hluboké buši pouze pod stanem a s kompasem, abych odvážně vstoupil na neznámou půdu vlhké, tmavé a chladné starověké Anglie. Bylo mi tehdy velice, velice těžko.

■ *JŽ: Byl to pro vás jistě velmi nesnadný krok, ale čekalo na vás studium na legendárním astronomickém ústavu, kde jste měl možnost osobně se setkat s velikány fyzikálních věd, jako je profesor Martin Rees nebo profesor Donald Lynden-Bell. Co pro vás tato setkání znamenala a ovlivnila nějakým způsobem vaši budoucí vědeckou dráhu?*

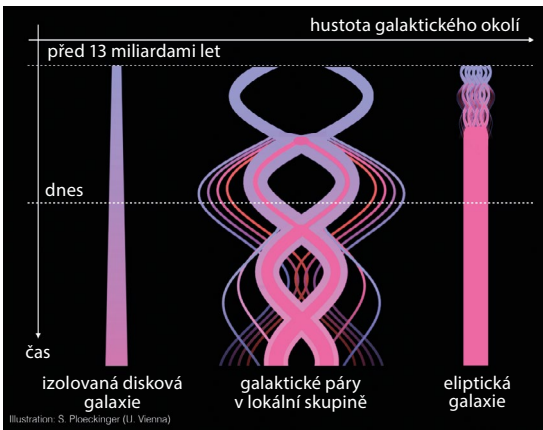
PK: V proslulé Cambridge jsem studoval na slavném astronomickém ústavu a právě tam jsem se osobně setkal s významným profesorem a vynikajícím vědcem Martinem Reesem. Byl to výjimečný muž a já nikdy nezapomenu na jeho zdvořilost a vstřícnost. Poznal jsem zde i profesora Donalda Lyndena-Bella, profesora Petera Eggletona a setkal jsem se i s dr. Sverrem Aarsethem. Průběžně jsem spolupracoval se svým anglickým kolegou Christopherem Toutem pod vědeckým dohledem dr. Gerryho Gilmora z Nového Zélandu. Kontakt s těmito unikátními vědci mě nasměroval k další vědecké práci a díky nim jsem měl možnost začít se věnovat hvězdné dynamice.

■ *JŽ: V roce 1992 jste v Anglii získal doktorát. Spolu s vaším kolegou Christopherem Toutem jste se zabývali rozdělením hvězd v blízkosti Slunce. Poprvé jste podrobně vzali v úvahu fyziku vnitřků hvězd, abyste vypočetali, jak závisí svítivost málo hmotných hvězd na jejich hmotnosti. V této problematice jste dosáhli průlomového zjištění v rozdělení hmotností hvězd a zjistili jste, že tato funkce překvapivě roste se zmenšující se s hmotností hvězd. Mohl byste nám výsledky vašeho výzkumu ještě více přiblížit?*

PK: Když jsem přijel do Cambridge, téma mojí disertační práce nebylo ještě stanoveno. S kolegou Christopherem Toutem jsme se zabývali rozdělením hvězd v blízkosti Slunce. Poprvé jsme podrobně vzali v úvahu fyziku vnitřků hvězd, abychom vypočetali, jak závisí svítivost málo hmotných hvězd na jejich hmotnosti.



Ta úžasná australská příroda podpořila můj zájem o vesmír, ze kterého se vyvinula nesmírná vášně pro astronomii.



Evoluce galaxií bez temné hmoty: Hustota okolí izolované diskové galaxie, páru obíhajících se galaxií a eliptické galaxie.

V této problematice jsme dosáhli průlomového zjištění v rozdělení hmotností hvězd, které je dáno tzv. hmotnostní funkcí hvězd. Zjistili jsme, že tato funkce překvapivě roste se zmenšující se hmotností hvězd. To ovšem bylo ve sporu s tím, co jiní zjistili dříve, protože jejich práce nesprávně interpretovaly děje probíhající uvnitř hvězd. Naši teorii jsme ještě rozšířili, abychom opravili počty hvězd pozorovaných na obloze, protože většina z nich jsou binární hvězdy. Ukázali jsme, že hmotnostní funkce hvězd narůstala ještě strměji k malým hmotnostem, protože mnoho hvězd málo svítivých nelze pozorovat z důvodu přezáření jejich svítivějšími průvodci. Tento mnohem větší počet málo svítivých hvězd byl však stále ještě malý na to, aby odpovídal nebarytonové temné hmotě, která tehdy byla považována za součást galaktického disku. Christopher Tout opustil Cambridge a odjel do Kalifornie. V Cambridgeu jsem pokračoval na vývoji úplného modelu rozložení hvězd v prostoru i jejich stáří a rozložení hmotností uvnitř našeho galaktického disku. Tento model odpovídal pozorování a potvrzoval skutečné vlastnosti galaktického disku, binárních systémů i průběh hmotnostní funkce hvězd. Christopher mě pozval do Kalifornie. Velice si vážím toho, že jsem díky tomu mohl v Santa Cruz prožít tři nádherné měsíce plné dobrodružství a cestování. Naše společná výzkumná práce se zdá i dnes být považována za mezník v analýze rozložení hvězd a byla mnohokrát prověřována nezávislými týmy, které použily lepší a novější data.

■ JŽ: *Období 1992–2000 znamenalo velký přelom ve vaší dosavadní vědecké práci. Díky svým výpočtům jste dospěl k velmi zajímavým výsledkům týkajících se problematiky existence temné hmoty. Mohl byste nás se svými objevy seznámit?*

PK: Po dokončení své doktorské práce jsem vyhrál Rouse Ball Research stipendium, které mi umožnilo i nadále zůstat v Cambridgeu. Zde jsem se věnoval vědeckému výzkumu a zároveň si užíval High Table – tamní vyhlášené společenské večírky. V roce 1992 jsem obdržel nabídku pracovat v kouzelném Heidelbergu, kterou jsem s potěšením přijal. Zde jsem působil v různých vědeckých ústavech a také na Max-Planckově ústavu a na univerzitě. V tomto období jsem se začal více věnovat dynamickým výpočtům vývoje hvězdokup a galaxií. Byl to pro mě úplně nový obor. Snažil jsem se zjistit, zda se hvězdy rodí jako dvojhvězdy, které se pak rozdělí díky jejich velkému množství v malém prostoru v mladé hvězdokupě. Získal jsem další grant od Smithsonian

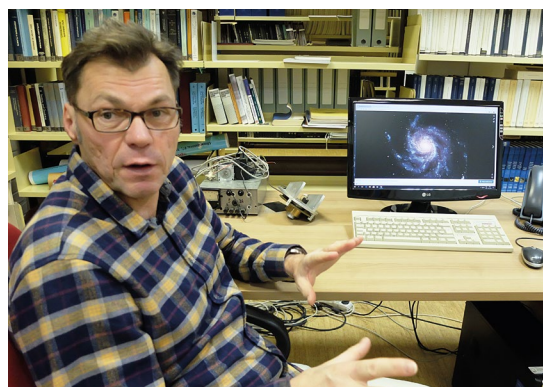
Institutu v USA. Díky tomu jsem mohl pracovat čtyři měsíce v Harvardu a v Bostonu u dr. Charlese Lady, který je velmi známým pozorovatelem mladých hvězdokup. V Heidelbergu jsem se nadále věnoval výzkumu satelitních galaxií a moje výpočty poprvé ukázaly, že uvažovaná temná hmota uvnitř nich není nutná. Bylo to pro mě obrovské překvapení, doslova revoluce v poznání. Výsledky svých výzkumů jsem publikoval s dosti velkým ohlasem, i když hodně vědců tyto moje výsledky zkoušelo ignorovat či tuto práci kritizovali, především před mladými studenty.

■ JŽ: *V roce 2004 jste se habilitoval na univerzitě v německém Kielu a začal jste zde pracovat jako vysokoškolský profesor. S vašimi spolupracovníky jste vyvinuli teorii IGIMF, která je v současnosti stále více využívána. Mohl byste nám toto vaše vědecké období více přiblížit?*

PK: V roce 2000 jsem se přestěhoval na univerzitu v Kielu v nejsevernějším Německu na pobřeží Baltského moře a začal zde svou kariéru jako vysokoškolský učitel pod vedením prof. Gerharda Henslera. Habilitoval jsem se zde v roce 2004. S mým prvním doktorandem Carstenem Weidnerem jsme vyvinuli explicitní metodu výpočtu, týkající se změny výpočtu hmotnostní funkce hvězd v galaxiích. S řadou spolupracovníků jsme dokázali, že evoluce galaxií značně závisí na tom, jak se vypočítá hmotnostní funkce hvězd. Vyvinuli jsme teorii, která umožňuje stanovit hmotnostní funkci hvězd v různých typech galaxií a tato „teorie IGIMF“ je dnes stále více využívána kolegy působícími na různých místech světa.

■ JŽ: *V současné době pracujete jako profesor Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität v Bonnu a také spolupracujete s českými vědci Astronomického ústavu UK v Praze na několika vědeckých programech. Je o vás známo, že se ve svých zkoumáních snažíte ponořit do samé prapodstaty fungování vesmíru. Mohu se otázat, kterému vědeckému problému byste rád porozuměl nejvíce?*

PK: Asi nejvíce bych rád porozuměl tomu, jak se vlastně galaxie vyvíjejí. Podle mých dosavadních pozorování a výpočtů mohu s jistotou potvrdit, že žádná nebaryonová temná hmota neexistuje. Obrovské množství galaxií jsou, podobně jako naše Mléčná dráha, diskové hvězdotvorné galaxie. Do nich musí být neustále doplňován nějakým způsobem plyn, aby mohlo docházet k tvorbě nových hvězd. Odkud ale tento plyn pochází? A proč jsou si vlastně všechny galaxie obdobné hmotnosti tak neuvěřitelně podobné? Tyto otázky se dotýkají samé prapodstaty fyziky prostoročasu a naše-



V Heidelbergu jsem se věnoval výzkumu satelitních galaxií a moje výpočty poprvé ukázaly, že uvažovaná temná hmota uvnitř nich není nutná.

» Dynamické tření naznačuje, že částice temné hmoty neexistují. «

» Vesmír je mnohem více organizovaný, než jsme předpokládali. «

ho pohledu na něj. Rád bych této problematice mnohem více porozuměl a velmi rád bych přispěl k posunu našeho vědění vpřed i několika svými myšlenkami.

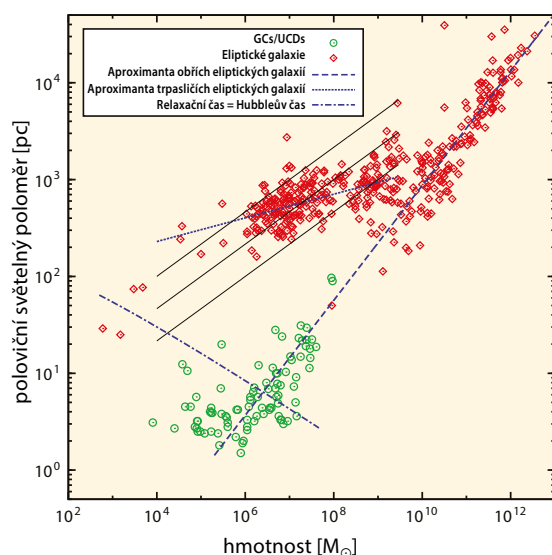
■ **JŽ:** Již dlouhodobě se věnujete výzkumu vzniku, vývoje a struktury kulových hvězdokup. Kulové hvězdokupy jsou velmi staré, obvykle alespoň 10 miliard let, a pravděpodobně vznikly v době, kdy se galaxie právě vytvářely. Mohl byste nám prosím popsat, jak asi nejspíše tehdy vypadaly?

PK: Většina kulových hvězdokup byla asi tak 10- až 100krát hmotnější a možná milionkrát jasnější, než jsou dnes. To proto, že obsahovaly mnohem více hvězd. Byly také mnohem modřejší, protože byly zhruba o 10 miliard let mladší než dnešní kulové hvězdokupy. Tehdy měly podobné rozměry jako dnes a bylo jich také více. Možná byly vzdálenější, protože jak hmotnost naší Galaxie postupně narůstala, tak si je přitáhla. V mém výzkumném týmu počítáme, jak se takové kulové hvězdokupy vyvíjejí. Například Dr. Long Wang z Číny, který se nedávno připojil k naší skupině jako mladý postgraduální vědec a získal Humboldtovo stipendium, nasimuloval na superpočítači první skutečně realistický vývoj kulové hvězdokupy čítající milion hvězd na časové škále srovnatelné s Hubbleovým stářím vesmíru.

■ **JŽ:** Průměr kulových hvězdokup se pohybuje řádově v desítkách světelných let. Co je příčinou jejich dlouhodobé stability?

PK: Kulové hvězdokupy jsou stabilní na časových škálách miliard let, protože při svém zrození obsahovaly miliony hvězd a vzájemná gravitační přitažlivost všech hvězd na sebe je silná. S časem některé hvězdy postupně ztrácejí, takže dnešní kulové hvězdokupy jsou 10- až 100krát méně hmotné, než když vznikly.

■ **JŽ:** Kulové hvězdokupy obsahují statisíce až miliony hvězd. Po jakých drahách létají hvězdy v jejich vnitřku a jaké je rozložení jejich rychlostí?



Závislost polovičního světelného poloměru v parsecích na hmotnosti vyjádřené v hmotnostech Slunce M_{\odot} . Poloviční světelný poloměr je poloměr vnitřní kruhové oblasti, z níž vychází právě polovina celkového světla emitovaného hvězdokupou či galaxií. Červenými kosočtverci jsou označeny eliptické galaxie. Zelené kroužky značí hvězdokupy: kulové hvězdokupy (angl. Globular Clusters = GC) a ultrakompaktní trpasličí hvězdokupy (angl. Ultra-Compact Dwarfs = UCD).

PK: Hvězdy se pohybují po hladkých, ale chaotických drahách uvnitř kulových hvězdokup. Typická hvězda stráví nejvíce času ve vnějších částech kupy, asi deset světelných let od centra. Pak začne poměrně rychle padat do vnitřní části a vrátí se zpět. Taková hvězda se pohybuje v průměru okolo 10 km/s. Její rychlost však může v centru dosáhnout až několiknásobku této hodnoty a ve vnějších částech může být naopak téměř nulová. Před 10 miliardami let byly ovšem rychlosti mnohem větší, protože kulové hvězdokupy byly hmotnější.

■ **JŽ:** Kulové hvězdokupy jsou rozptýleny ve sférickém halu obklopujícím naši Galaxii. Oběžná doba kolem středu Galaxie se pohybuje v řádech stovek milionů let. Věříte, že se uvnitř kulových hvězdokup nacházejí středně velké černé díry?

PK: Vědec by měl především pracovat s hypotézami než mít zbožná přání. Pracovní hypotéza, že mnoho kulových hvězdokup má ve svém středu masivní černou díru, nebyla zatím přesvědčivě vyvrácena. Je tedy možné, že masivní kulové hvězdokupy mají poblíž svých středů černé díry o hmotnostech stovek tisíců Sluncí. V současnosti však nemáme teorii, která by zřetelně predikovala existenci takových centrálních černých děr. V mém výzkumném týmu nyní pracujeme na problematice, jak by takové masivní černé díry mohly v centrech kulových hvězdokup vznikat.

■ **JŽ:** Pro spirální galaxie je typická středová výdut kulového tvaru, ze které vycházejí jednotlivá ramena. Proč mají některé spirální galaxie takový perfektně symetrický tvar? Co je toho příčinou?

PK: Pokud spirální galaxie nic nenarušuje, pak mají téměř perfektně kulaté disky. Obvykle mají obří akreční disky o poloměrech zhruba 100 tisíc světelných let. Okolní plyn na galaxie neustále padá dobře definovanou rychlostí (zatím nevíme, odkud se tento plyn bere, ani proč je jeho pád tak dobře řízený), a protože plyn je disipativní, ukládá se do rotujícího disku. V disku je hustota plynu vyšší než mimo něj. V některých místech je hustota tak vysoká, i když stále nižší než nejdokonalší vakuum na Zemi, že se plyn vlastní gravitací smršťuje a dochází k tvorbě hvězd. Galaxie se tedy vyvíjejí tak, že roste počet jejich hvězd. A protože rotují, zdají se být kulaté při pohledu shora dolů, zatímco z boku se jeví jako tenký disk. Galaxie tak zůstává docela hladká s obrovským hvězdným a plynovým diskem. Pokud je její tvar nepatrně perturbován, například když nějaká galaxie proletí kolem (třeba i ve velké vzdálenosti), vzniklé gravitační působení vyvolá změny mezi silami uvnitř uvažované galaxie, což vyvolá vznik symetrických spirálních vzorů. Galaxie na to reaguje tím, že se z ní stane spirální galaxie. Je to podobné jako slapové působení Měsíce na Zemi, které je také patrné na obou protilehlých stranách zeměkoule. Spirální charakter galaxií trvá velice dlouho ve srovnání s lidským životem. Může existovat třeba deset otáček, což může trvat miliardu let i více, protože jakmile se jednou spirální tvar vytvoří, tak se snaží zachovat si svůj tvar díky rezonancím (i když drobné nestability vznikají mohou). Například ve vnitřní části se může vytvořit příčka, v níž se hvězdy a plyn pohybují více radiálně. Ale protože diskové galaxie rotují a jsou gravitačně vázané, jsou obecně (když nejsou perturbovány) středově symetrické.

■ *JŽ: Naše galaxie Mléčná dráha je velká spirální galaxie s příčkou typu SBc podle Hubbleovy klasifikace. Rozměrem jde o druhou největší galaxii (po galaxii M31 v Andromedě) v místní skupině galaxií. Střed a ramena Galaxie obklopuje galaktické halo, které má pravděpodobně tvar elipsoidu. Čím je podle vašeho názoru toto halo tvořeno?*

PK: Halo Mléčné dráhy obsahuje staré hvězdy. Tyto hvězdy jsou tak staré jako kulové hvězdokupy a patrně z nich i pocházejí, protože jak už bylo řečeno, kulové hvězdokupy postupně své hvězdy ztrácejí. Mnoho hvězd z hala se také zformovalo v mnohem menších kupách ve stejnou dobu jako soudobé kulové hvězdokupy. Tyto menší kupy ztratily své hvězdy hodně dávno. Halo naší Galaxie je její nejstarší struktura. Zformovalo se ještě předtím, než se Galaxie stala spirální. V té době byl zrod naší protogalaxie extrémně prudký s neskutěčně hmotnými plynnými mračny postupně padajícími na protogalaxii a rychle se formujícími hvězdami v obrovských shlucích, z nichž později vznikly kulové hvězdokupy. Původní plyn se většinou dávno spotřeboval na tvorbu hvězd hala a kulových hvězdokup, což bylo patrně řízeno mladou galaxií, a také padal do jejího disku, aby později vytvořil spirální ramena. Galaktické halo je tak většinou bez plynu. Zbývající plyn pak pochází z hvězdných větrů nebo padá na Galaxii zvnějšku, což podporuje neustálou tvorbu nových hvězd. Kdyby na Galaxii nepadal, tak bychom veškerý plyn spotřebovali už před mnoha miliardami let.

■ *JŽ: Můžete prosím našim čtenářům objasnit pojem gravitermální katastrofa?*

PK: Gravitermální katastrofa nebo též nestabilita je zajímavý jev v gravitačně vázaných hvězdných dynamických systémech. V kupě s mnoha hvězdami, které žijí dostatečně dlouhou dobu, se může stát toto: hvězdy se neustále vzájemně potkávají a gravitačně se přitahují. I když je tato interakce poměrně slabá, způsobuje nepatrné změny trajektorií hvězd v kupě. Například hvězda na kruhové orbitě začne postupně měnit rychlost a její dráha se stane excentrickou. Pak se může dostat blíže ke středu, přitom nabere větší rychlost, a tak může minout více hvězd v krátkém čase a pozměnit tím jejich rychlost. Tento proces se vyvíjí tak, že některé hvězdy padají ke středu kupy, zatímco ostatní hvězdy putují do vnějších oblastí. Je to důsledek zákona zachování energie. Hvězdy směřující do vnitřních částí mají nejmenší energii a hvězdy pohybující se ven to kompenzují tím, že mají větší energii. Hvězdy vlastně tvoří termody-



Gravitermální nestabilita je zajímavý jev v gravitačně vázaných hvězdných dynamických systémech.

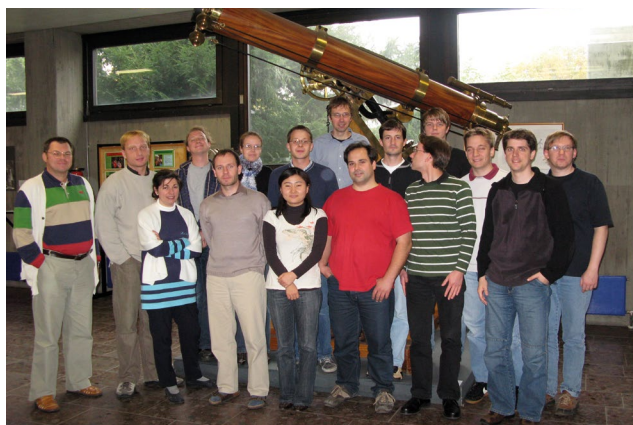
namický systém, v němž nejrychlejší hvězdy (ty z vnitřních částí kupy) ztrácejí část své energie a předávají ji pomalejším hvězdám, které se tak vymaní z vnitřních částí. Čím se hvězda pohybuje rychleji, tím hlouběji padá do potenciálové jámy a tento proces se zdá být nekonečným. Množství hvězd může stále směřovat ke středu, generovat tak zápornou energii a přispívat k vyšší hustotě centrální části kupy, zatímco zbytek kupy expanduje. Tomu se říká *gravitermální nestabilita*. Vzniká tím, že gravitačně vázané systémy mají zápornou tepelnou kapacitu, tzn. ubereme-li energii, systém bude teplejší. Můžeme si to krásně ilustrovat na satelitu obíhající Zemi. Jestliže jej budeme brzdit, satelit sice bude padat k Zemi, ale bude se pohybovat rychleji. Naprosto stejný proces probíhá v kupách hvězd. Hvězda, která je brzděna gravitací jiné hvězdy, zrychluje, protože padá do středu kupy. Pomocí principu rovnoměrného dělení energie tyto urychlené hvězdy mohou sdílet svoji kinetickou energii s ostatními hvězdami, a tak se mohou dokonce zpomalit, což je opět nasměruje ke středu kupy.

■ *JŽ: Dlouhodobě se zabýváte Newtonovou teorií, pane profesore. Myslíte si, že tato teorie gravitace dostatečně přesně popisuje chování kulových hvězdokup a že tedy není třeba předpokládat hypotetickou nebaryonovou temnou hmotu?*

PK: Když se na mě obrátíte s touto otázkou, je třeba mít na mysli, že Newton odvodil svůj zákon všeobecné gravitace pro data limitovaná sluneční soustavou pouze k Saturnu. Publikoval jej roku 1687, zatímco Uran byl objeven v roce 1781 a Neptun ještě později. Albert Einstein v roce 1916 použil stejný zákon jako nutnou a zároveň požadovanou klasickou limitu své reinterpretace teorie gravitace v geometricky deformovaném časoprostoru. Observační data, která vymezují platnost gravitačního zákona, však byla stále limitována sluneční soustavou. Podstata galaxií, jež určují dynamiku vesmíru, v době Einsteinových objevů nebyla známa. Astronomové a fyzici přesto extrapolují empirické zákony gravitace na objekty o mnoho řádů větší, jako jsou kupy hvězd či galaxie. Každé školou povinné dítě ví, že takové extrapolace nemusejí fungovat. Přesto na škálách běžných kulových hvězdokup, což odpovídá extrapolacím o více než čtyři řády v prostorové velikosti, však zákon všeobecné gravitace Newtona a též Einsteina platí poměrně dobře, tedy tak, že se hvězdy uvnitř kupy statisticky pohybují tak, jak se očekává. Není zde žádná zásadní odchylka. Velké



Praha mi učarovala nejen tím, že se v ní nachází nejstarší středoevropská univerzita, ale i proto, že mi dědeček kladl na srdce, abych nikdy nezapomněl, že jsem Čech.



Univerzita v Bonnu 2007 – s kolegy Jaroslavem Haasem, Ladislavem Šubrem a Jorgem Dabringhausenem.

odchylky ale už začínáme pozorovat na škálách galaxií, které představují extrapolaci v prostoru o osm řádů oproti sluneční soustavě. Zde jsou pozorované rychlosti hvězd příliš velké. Jinými slovy, normální hmota hvězd a plynu nemůže způsobit dostatečnou gravitační přitažlivost (při obrovské extrapolaci Einsteinovy a Newtonovy teorie), aby držela hvězdy pohromadě. Většina fyziků a astronomů si pak toto interpretuje tak, že je to důsledkem jakési neviditelné „temné hmoty“, která způsobuje dodatečnou gravitační přitažlivost, aby se hvězdy a plyn pohybovaly rychleji. Toto vysvětlení má však velký problém v tom, že „temná hmota“ není součástí standardního modelu částic a jejich interakcí. Pak je zapotřebí vymyslet nové exotické částice temné hmoty, které vůbec neinteragují elektromagneticky, a tak zůstávají zcela neviditelné. Existuje však ještě fyzikálně mnohem přijatelnější vysvětlení, a sice to, že všeobecný Newtonův zákon, později reformulovaný Einsteinem, nemůže být extrapolován na příliš velké vzdálenosti.

■ *JŽ: V roce 1901 byla poprvé udělena Nobelova cena za fyziku (v Nobelově závěti se fyzika objevila na prvním místě, protože na konci 19. století byla vnímána jako nejdůležitější vědní obor), a to Wilhelmu Röntgenovi za objev rentgenového záření. V roce 2011 byla udělena Nobelova cena za fyziku S. Perlmutterovi, B. Schmidtovi a A. Riessovi za objev zrychleného rozpínání vesmíru. Překvapil vás tento objev?*

PK: Všeobecně jsem proti existenci takových cen v čisté vědě, protože narušují pokrok. Co tím zde myslím, je to, že mnoho institucí prahne po tom zaměstnávat nositele Nobelových a jim podobných cen. Tito vědci pak mají speciální postavení v příslušných ústavech i ve společnosti. Bylo by lepší, kdyby vědci nezískávali uznání skrze ceny, ale kdyby byl po nich pojmenován nějaký efekt či teorie (jako Einsteinova teorie relativity či Newtonova teorie gravitace). Mám pocit, že příliš mnoho vědců se snaží dělat tu vědu, která zvyšuje šanci získat nějaké prestižní ocenění. Skutečný cíl pravého vědce by však měl spočívat pouze v porozumění, jak se příroda chová, bez ohledu na udělení nějaké ceny. Důvod, proč se vědecká komunita vrhla na pojem temné hmoty a temné energie, by mohl patrně být příkladem toho, co mám na mysli. Budete-li totiž skutečně dobře pracovat v předpokládaném hlavním proudu, který se během let vynořil, můžete si zvýšit šance, že budete oceněni. Můžeme pozorovat, jak někteří mladí vědci dělají kariéru v oblasti blízké hlavnímu proudu a ostře odmítají jakoukoliv kritiku. Byl by to zajímavý problém

ke studiu pro filozofy – jak se moderní věda může mýlit. Co se týká vaší otázky o Nobelově ceně za rok 2011 Perlmutterovi, Schmidtovi a Riessovi, tak tvrdím, že jejich objev je důležitý. Proč? Protože hlavní proud interpretuje svá pozorování tak, že se vesmír rozpíná rychleji, než se myslelo, což je založeno na výše uvedených extrapolacích o mnoho řádů. Vědci z hlavního proudu jsou totiž skálopevně přesvědčeni, že tato extrapolace je korektní a že jediná správná cesta spočívá ve studiu, proč pozorování překvapivě ukazují na neshodu s teorií. Tuto neshodu lze odstranit zavedením termínu „temná energie“. Takže průměrný vědec z hlavního proudu se domnívá, že Perlmutter, Schmidt a Riess učinili významný objev nové fyziky nazývaný temná energie. To ale může být zcela chybná fyzikální interpretace, protože extrapolace fyzikálních zákonů platných ve sluneční soustavě, jak již bylo konstatováno, je jistě chybná. Popravdě je mnohem pravděpodobnější, že pozorování organizovaná Perlmutterem, Schmidtem a Riessellem spíše ukazují, že právě ona extrapolace je chybná a že dynamiku vesmíru nelze popisovat Einsteinovou či Newtonovou teorií, tak jak ji v současnosti používají vědci z hlavního proudu. V mém výzkumném týmu jsme se vydali právě touto cestou výzkumu, tj. snažíme se zjistit, co nám zmíněná observační (ale i jiná) data říkají o fyzikální teorii, která gravitačně řídí dynamiku galaxií a celého vesmíru. Můj velmi nadaný doktorand z Íránu Behnam Javanmardi, který se mnou pracoval v Bonnu, posuzoval data o rozpínání vesmíru a zjistil, že evidentně ukazují na anizotropickou kosmologii, což však nemůže být ve standardním kosmologickém modelu. Explicitně sledujeme ideje o gravitaci a dynamice, jež jdou za Newtona a Einsteina.

■ *JŽ: V roce 2017 byla udělena Nobelova cena za detekci gravitačních vln, které vygenerovaly dvě kolidující černé díry o hmotnostech zhruba třiceti Sluncí. Je vůbec vznik takového systému realistický a jaký je váš názor na tuto problematiku?*

PK: Vznik binárního systému dvou černých děr o hmotnostech 30 Sluncí je dnes již dobře pochopen. I v mém výzkumném týmu pracuje dr. Sambaran Banerjee, vynikající vědec z Indie, který je jedním ze špičkových světových odborníků na tento problém. Počítá, jak se vyvíjejí kulové hvězdokupy, jejichž hvězdy mají nízkou metalicitu, během mnoha miliard let. Hned na počátku během prvních 50 milionů let mnoho masivních hvězd zaniklo, což vedlo k tvorbě černých děr. Tyto díry postupně klesaly k centru výše popsaným procesem rovnoměrného dělení energie, což vede ke gravitermální nestabilitě. V jádře kulové hvězdokupy pak černé díry mohou vytvářet binární systémy. Takové systémy ztrácejí energii tak, že vyvrhují hvězdy i případné černé díry dále od středu a stávají se tak mnohem těsnějšími. Vypuzené objekty mohou po čase opustit i kulovou hvězdokupu a přitom po sobě zanechají těsný binární systém černých děr. Ten vyzařuje gravitační vlny tak dlouho, až díry splynou. Splynout mohou uvnitř kupy, ale dokonce i mimo ni. Dr. Banerjee učinil mnoho numerických testů, které ukazují, že to, co bylo pozorováno, je vcelku přirozené a běžné. Ve skutečnosti jsme v roce 2010 byli jedni z prvních, kteří předpověděli typ těchto gravitačních událostí, jež jsou nyní pozorovány. Je také možné, že zmiňovaný systém dvou černých děr vznikl ze dvou masivních hvězd, které se zrodily v binárním systému. Takové hvězdy

však musely být velice hmotné, možná 100krát hmotnější než Slunce, a evoluce takového binárního systému musela být perfektně vyladěna, aby výsledný binární systém černých děr přežil obrovské ztráty hmotnosti při vývoji velice hmotných hvězd. Navíc obě složky binárního systému musely být blízko sebe, aby mohly časem splynout tím, že budou generovat pozorované gravitační vlny. Oba směry výzkumu, tj. pomocí dynamiky hvězdokup i hvězdné evoluce, jsou důležité a představují velice zajímavé zaměření současného výzkumu.

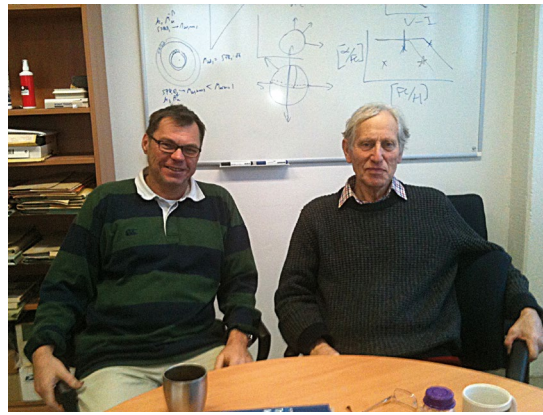
■ *JŽ: Vy rád říkáte, pane profesore, že spolupracujete s výzkumnými pracovníky nejraději tam, kde je to zajímavé, včetně Číny a Íránu, Chile a Iráku, USA a Velké Británie či Austrálie. Je potěšující, že ve výčtu vámi zmíněných zemí figuruje i Česká republika, potažmo Praha, kde spolupracujete s Astronomickým ústavem UK. Co pro vás možnost pracovat ve vaší rodné zemi fakticky znamená?*

PK: Praha mi učarovala nejen tím, že se v ní nachází nejstarší středoevropská univerzita, ale i proto, že je Česká republika zemí mého původu a můj dědeček mi kladl na srdce, abych nikdy nezapomněl, že jsem Čech. S podporou doc. Ladislava Šubra z Astronomického ústavu UK v Praze a ředitele Astronomického ústavu UK prof. Davida Vokrouhlického jsem zde našel atraktivní výzkumné prostředí. Díky této spolupráci jsme mohli uspořádat řadu menších konferencí. Nbdy na počest Sverra Aarsetha a jednu velkou mezinárodní konferenci o modelování a pozorování hustých hvězdných systémů MODEST17. V Praze se zabýváme problematikou dynamiky hustých hvězdných systémů a spolu s mým čínským studentem se zde věnujeme teorii IGIMF pod bedlivým dohledem Dr. Jaroslava Haase. Spolupracujeme také s vynikající talentovanou studentkou Terezou Jeřábkovou na její disertační práci. Jsem přesvědčen o tom, že aby mohl vědecký výzkum dostatečně vzkvétat, potřebujeme mnoho výzkumníků, kteří pracují na různých vědeckých úkolech nebo se zabývají různorodými vědeckými myšlenkami. Výsledkem pak jsou racionální a logické argumenty založené na experimentálních datech.

■ *JŽ: Vážený pane profesore, dovoluji mi prosím poslední otázku. Studoval jste na několika proslulých univerzitách, prošel jste mnoha věhlasnými akademickými pracovišti, podílel jste se na řadě zajímavých výzkumných témat. Registrujete nějaký zásadní rozdíl mezi prací v Bonnu a v České republice?*



Oceněn prof. Janem Kratochvílem, děkanem Matematicko-fyzikální fakulty UK.



Produktivní spolupráce s Dr. Sverrem Aarsethem, týkající se pohybu hvězd, uniknuvších z hvězdokupy a pohybujících se skrz galaxie.

PK: Mohu říci, že německý systém je obecně hluboce hierarchický, s řadou profesorů, kteří na svých univerzitách doslova vládou, a jejich kolegové, kteří jsou sice vynikající vědci, ale nezískají profesorské místo, jsou zde odsouzeni k méně významné roli. Díky tomuto zřízení je zde téměř nemožné uskutečnit jakýkoliv nový inovační výzkum, protože kariéra významně závisí na dobré vůli několika profesorů a vědecká důvěryhodnost a úspěch nejsou bohužel těmi hlavními kritérii. To je zvláště patrné u ředitelů Max-Planckových ústavů. Moje zkušenosti s českým systémem zatím nejsou příliš hluboké, ale eviduji, že zatímco je vcelku obtížné zde získat profesuru, mít profesorství neznamená mít nad svými spolupracovníky moc. Na druhou stranu je česká vědecká komunita malá, protože i Česko je malá země. Jeden problém, který vidím v Čechách, je ten, že se tu příliš moc závidí (v Německu je to také tak, ale v Anglii nebo v USA či v Austrálii mnohem méně), a také, že někteří lidé mohou mít veliký vědecko-politický vliv na mnoho let právě proto, že se jedná o poměrně malou zemi. A tyto boje mezi jednotlivými ústavami mohou trvat mnoho let, což by se nestalo, kdyby lidé měli důležitá a vysoká pozice pouze na docela krátkou dobu. V Německu jsou velké boje mezi profesory, protože mají administrativní moc na celý akademický život a dobře si pamatují, kdo koho jak poškodil. Jako velmi pozitivní počín v Praze považuji založení Středoevropského institutu pro kosmologii a základní fyziku (CEICO) ve Fyzikálním ústavu AV v Praze, kde jsou aktivně zkoumány nestandardní gravitační teorie. Taková instituce je v Německu v současné době nemyšlitelná. Přestože se jedná o malou zemi, nedávno zde vzniklo působivé doktorské studium v rámci Milgromiánské gravitace Dr. Michala Bílka v Akademii věd ČR. V Německu neexistuje žádná skupina, kde by byl takový výzkum možný mimo moji skupinu. A musím zdůraznit, že lidé jako prof. Michal Křížek z Matematického ústavu AV významně přispívají ke zdravému vědeckému diskusnímu prostředí tím, že otevřeně řeší důležité kritické kosmologické otázky a organizují konference na tato témata.

■ *JŽ: Děkuji vám, pane profesore, za vskutku mimořádný rozhovor, který by ve své původní nezkrácené formě bezpochyby vydal na dobrou knihu. Věřím, že váš neotřelý náhled na vědecké prostředí v Česku i ve světě napomůže především mladým vědcům při budování jejich vědecké kariéry. A vám přeji právě ty vynikající myšlenky, kterými byste tak rád přispěl k posunu našeho vědění co nejvíce vpřed.*

» Přírodovědec by neměl mít názor, pouze logické dedukce. «