

6. Neutrinová komunikace

„Nejdůležitější věcí v komunikaci je zaznamenat i to, co nebylo řečeno nahlas.“

Peter Drucker, rakouský spisovatel

Na našich expedicích se dosti často vyskytují problémy v komunikaci s místním obyvatelstvem. Snad nejsložitější to bylo v roce 2009 v Číně, kam jsme letěli za úplným zatměním Slunce. Přistání v Šanghaji proběhlo bez problémů i následná cesta maglevem¹ do města. Na velkých nádražích a letištích jsou nápisy dvojjazyčné, takže zásadní problém v orientaci není. Horší je to v menších městech. Téměř pokaždé se kolem nás srotila skupina Číňanů, kteří se snažili zjistit, kam jedeme, proč tam jedeme, jak tam pojedeme atd. Zpočátku jsme se báli, že jsou to místní loupeživé tlupy, které se nás snaží obrát o to málo, co s sebou vezeme. Pravda byla ale nakonec zcela jiná. Nejčastěji šlo o studenty, kteří se snažili zdokonalovat v angličtině. Pravidelně zevlovali na nádražích, a jakmile se vynořil cizinec, pokoušeli se s ním navázat hovor. Časem jsme zjistili, že jsou neškodní a dokonce ochotni i nezištně pomoci v podstatě s čímkoli.

Naše první noc v Šanghaji znamenala první opravdovou komunikaci s domorodci neznalými jiného než vlastního jazyka. K večeři jsme si objednali podle obrázku kuře, doufajíce, že se na něm nedá nic zkazit. Přinesli jeden velký kotel jakési kejdy a na míse rýži. Když jsem do kotlíku poprvé zanořil nástroj připomínající naběračku,

1 **Maglev** – rychlovlak pohybující se na magnetickém polštáři. Ten šanghajský s námi vyvinul rychlost přes 400 km/h. Rychlostní rekord je 581 km/h a byl dosažen v Japonsku. Slovo „maglev“ je zkratkou ze sousloví „magnetická levitace“. Poprvé ho použil v 60. letech 20. století americký fyzik Howard Coffey.

vytáhl jsem pařátky. Na druhý pokus to byla hlavička i s očičky a hřebínkem. Nakonec jsem jedl jen rýži a i tu s nechutí, neboť žaludek už byl rozhozený. Večer jsme před hotelem objevili obchod, kde měl místní prodavač mrazák se zmrzlinou. Větší zájem jsme projeвили o pivo vyskládané v regálech. Pán byl obchodník a okamžitě pochopil. Zmrzlinu z mrazáku vyházel, zaplnil ho pivem a zůstal v obchodě celou noc. Tahle komunikace byla na výbornou.

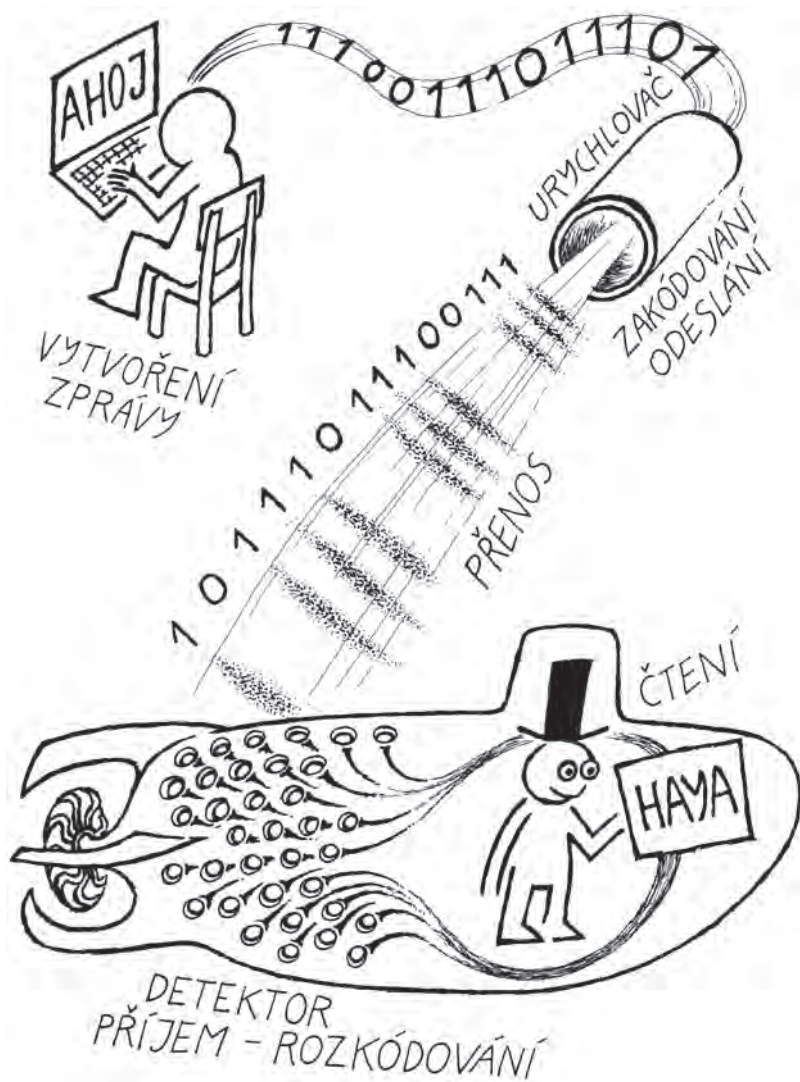
Druhý den jsem vyslal kamaráda na nádraží zakoupit jízdenku na vlak na další pouť do Hefeje. Vrátil se po několika hodinách, zcela vysílený a s konstatováním, že úkol je nad jeho síly. Vydal jsem se tedy na jedno z menších šanghajských nádraží sám. Čtyři otevřené přepážky a čtyři obrovské fronty přes celou halu. Zařadil jsem se do jedné z nich. Místní do mě šťouchali a ukazovali na frontu úplně vpravo. Pochopil jsem. Na nejpravější přepážce byl nápis, že u tohoto okénka hovoří i anglicky. Zařadil jsem se tedy do správné fronty a mysl si, že kamarád selhal jen proto, že cizinecké okénko nevypátral. Po hodině čekání jsem se dostal na řadu. Anglicky jsem požádal o 16 jízdenek do Che-feje (anglicky Hefei). Vytřeštěné oči dámy za přepážkou se mně vybavují dodnes. Z celé věty ji zaujalo anglické slovo *sixteen* (šestnáct) a z něho jen písmenka *s* a *x*, z nichž sestavila slovo *sex*. Myslela si, že sháníme prostitutky a snažila se splnit naše přání. Když jsem pochopil, že obtelefonovává místní nevěstince, zarazil jsem ji a na lísteček napsal číslo 16 a slovo *Hefei*. Názvy velkých měst měli všude v jízdnicích řádech anglicky, mohla by ho poznat. Konečně! Pochopila, že si na nádraží nechceme sexuálně užívat, ale opravdu jen někam cestovat. Automat za přepážkou začal chrlít jízdenky a já si oddechl. Bohužel předčasně. Jízdenek bylo pouze šest. Později jsem se dozvěděl, že jednička, jak ji píšeme my, tedy s doleva vlajícím praporkem, znamená u Číňanů něco úplně jiného a ona viděla jen tu šestku. Nevzdal jsem to. Požádal jsem o papír a tužku a nakreslil vlak, kupé, v něm 16 postýlek a spících aldebaránků. Celé to trvalo už přes půl hodiny a fronta kupodivu neprotestovala. Dámě se nad mou malůvkou rozzářil úsměv na tváři. Konečně bylo jasno! Chceme lůžka ve vlaku. Přepočítala postýlky a z pod peřinek koukající hlavičky, vydala nový balík jízdenek na příští den a bylo hotovo.

Má komunikace sice nebyla zcela přímočará, ale nakonec úspěšná. Oproti neutrinové komunikaci, o níž pojednává nadcházející příběh, byly ovšem naše čínské potíže s komunikací zcela malicherné.

Napříč vesmírem

Neutrina by mohla být ideálním prostředkem pro komunikaci. Procházejí bez problémů látkou, většinu z nich nezastaví ani bilion kilometrů olova a neutrinovou zprávu je možné přijmout i na druhém konci viditelného vesmíru. Můžeme začít ale tady u nás na Zemi, kde by se neutrinová komunikace hodila armádě pro vydávání povelů ponorkám, obchodníkům pro komunikaci napříč Zemí či astronomům pro posílání zpráv základně na odvrácené straně Měsíce. Pojďme si věc vysvětlit podrobněji.

K neutrinové komunikaci potřebujeme nejprve dosti intenzivní zdroj neutrin. Tím jsou jaderné reaktory nebo výbuchy atomových bomb. Pokud chceme směrovaný zdroj, neznáme zatím jiný způsob, než výkonný částicový urychlovač. Urychlené částice, například protony, jsou namířeny do útlumového členu, kde z nich vznikají piony a kaony a ty se poté rozpadají na neutrina. Nabité protony, piony i kaony lze směřovat magnetickým polem tak, aby vznikající neutrina tvořila svazek putující určitým směrem. Zdroj bychom tedy měli. Jak do něj ale zapsat zprávu? Naše technologie zatím umožňují jen zprávu zakódovat do časového průběhu svazku neutrin. Svazek se může skládat z pravidelných oddělených shluků neutrin a přítomnost či nepřítomnost takového shluku bude znamenat logickou jedničku či nulu. Trošku to připomíná počátky elektromagnetické komunikace, kdy se zprávy kodovaly Morseovou abecedou. Kontinuální svazek neutrin neumíme tak jako tak v současné době vyrobit, protože protony zahřívají útlumový člen a ve vysílání musí být přestávky potřebné k jeho chlazení. Neutrinový svazek nese informaci, která by měla být někde přijata, tedy k neutrinové komunikaci potřebujeme také vhodný přijímač. Tím nemůže být nic jiného než detektor neutrin. Současné detektory jsou velmi objemná zařízení. Na druhou stranu interakční schopnosti neutrina s látkou rostou do sta teraelektronvoltů lineárně s jejich energií,



Základní princip neutrinové komunikace

nad sto teraelektronvoltů už pak jen logaritmičtěji. Čím energetičtějiší neutrino pro komunikaci použijeme, tím snáze budou interagovat s látkou a tím menší detektor pro přijetí zprávy postačí.

Oscilace neutrin nemusí být při komunikaci na závalu. Buď budeme přijímat více druhů neutrin, nebo komunikace probíhá v podmínkách, kdy oscilace nemusí být vůbec podstatné. Například při prvních experimentech s neutrinovou komunikací byly k vytvoření neutrin použity protony o energii 120 GeV z hlavního injektoru bývalého Tevatronu. U vzniklých neutrin je oscilační vzdálenost kolem 80 000 kilometrů, což pro komunikaci v rámci naší planety není překážkou.

Velkým problémem je komunikace s ponorkou plující pod hladinou oceánu. Vodní masa znemožňuje posílat zprávy prostřednictvím elektromagnetických vln. Mnohdy by stačilo ponorce předat jen jednoduchý povel typu ano/ne či číslo určující operaci, kterou má provést. Taková zpráva může být snadno namodulovaná do neutrinového svazku, který k ponorce přiletí i nitrem Země od protinožců. A detekce? Okolní oceán může sloužit jako ideální vodní detektor a vzniklé Čerenkovovo záření mohou přijímat fotonásobiče umístěné na povrchu ponorky. Její trup by se tak sám o sobě stal dostatečně velkým neutrinovým detektorem. Samozřejmě by šlo pouze o jednostrannou komunikaci – pouhé přijetí povelu k akci.

Dnes jen malá část populace vytváří nějaké hodnoty. Zbytek se pasuje do role nejrůznějších manažerů, překupníků, prodejců, politiků, zlodějů a dalších prapodivných existencí. V dnešním elektronickém světě je pro obchodníka rozhodnutí, zda prodat či nakoupit, otázkou velmi krátkého času. Několik ztracených milisekund může znamenat promarněný obchod za miliardy. Současná komunikace probíhá po optických vláknech, jimiž se signál šíří rychlostí zhruba 2/3 rychlosti světla nebo bezdrátově přes různé retranslační družice a mezistanice. Rozhodně nejde o přímočarou komunikaci. Přímá neutrinová komunikace nitrem Země například mezi Spojenými státy a Austrálií by obchodníkům dala k dispozici tolik času navíc, že by ti, kteří by byli vybaveni neutrinovou technologií,

mohli uzavírat bezkonkurenčně lepší obchody. Budou tedy obchodníci nastupujících generací skupovat částicové urychlovače? Ani to není vyloučené.

Neutrinová komunikace by byla velmi výhodná i v rámci Sluneční soustavy. Pověly vysílané na základnu na odvrácené straně Měsíce či Marsu by nepotřebovaly žádné pomocné družice, které signál zpracovávají a posílají dál.

Posledních několik desítek let je velmi módní hledání mimozemských civilizací. Různé programy se snaží zachytit jejich signál, jiné naopak vysílají signály ze Země – něco ve stylu: „*Tady jsme, přijďte si pro nás!*“. Těžko odhadnout, nakolik jsou takové snahy jen naivní a nakolik vypočítavé. Podobné rádoby projekty totiž přitahují peníze a ty lze pak využít i na smysluplný výzkum. Navíc mělo hledání mimozemských civilizací i jeden pozitivní dopad. V roce 1999 odborníci z Kalifornské univerzity v Berkeley spustili program SETI@home (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence at home, vyhledávání mimozemských civilizací doma*). Na milionech počítačů různých uživatelů se v době, kdy počítač nepoužívali, rozběhl program provádějící analýzu dat z hledání mimozemských civilizací. Šlo o první distribuovaný výpočet tohoto druhu, který se později začal využívat i v jiných oblastech lidské činnosti.

Pokud by byla mimozemská civilizace skutečně inteligentní, sotva bude posílat vzkazy v elektromagnetickém spektru. Elektromagnetické vlny jsou spolehlivě zachyceny jakoukoli mezilehlou galaxií a při komunikaci v rámci naší Galaxie jsou silně absorbovány a pozměňovány všudypřítomným plynem a prachem. Nic takového pro neutrina neplatí, a pokud máme v současnosti prostředky pro omezenou neutrinovou komunikaci my, budou je mít vyspělé civilizace samozřejmě také. Hledání stop jiných civilizací by tedy mělo být spíše doménou neutrinové fyziky než úsměvných rádiových experimentů. Pro galaktickou komunikaci se jeví velmi výhodná tzv. Glashowova² rezonance. Pokud má elektronové antineutrino

2 **Sheldon Glashow** – americký fyzik, nositel Nobelovy ceny za sjednocení elektromagnetické a slabé interakce. Cenu obdržel spolu se Stephenem Weinbergem a Abdusem Salamem, v roce 1979.

energii 6,3 PeV ($6,3 \times 10^{15}$ eV), relativně ochotně interaguje s obyčejnými elektrony, kterých je ve vesmíru všude dostatek. Při této interakci vzniká polní částice slabé interakce W^- , která se následně rozpadá na charakteristickou spršku dalších částic. Civilizace hledající jiné inteligentní bytosti by zjistila, že v určitém směru vidí tyto nezaměnitelné spršky částice W^- a že je tedy z tohoto směru vysílán nějaký signál. Spršky byly samozřejmě vytvořeny zcela zanedbatelnou částí neutrin přilétajících z daného směru. Příslušný detektor by byl extrémně jednoduchý, šlo by o rezonanční detektor, který by využíval ochotu elektronových antineutrin spojovat se s elektrony, a my bychom detekovali následné W spršky. Ve vesmíru, pokud víme, není žádný přirozený zdroj elektronových antineutrin s energií 6,3 PeV, takže by příjemcům bylo na první pohled jasné, že jde o umělý signál. Naše civilizace zatím nedisponuje takovými technickými prostředky, aby vytvořila svazek antineutrin s energií 6,3 PeV. Přijetí takového signálu je ale jen otázkou peněz a priorit, na jaké účely půjdou.

Uzavření Tevatronu

Některé špatné zprávy mohou mít i drobné pozitivní důsledky. Uzavření druhého největšího urychlovače světa v roce 2011 vedlo nakonec k vyzkoušení první neutrinové komunikace v historii lidstva. Nejprve se ale krátce vraťme do onoho osudného roku 2011. Ve Spojených státech je prezidentem Barack Obama, právě probíhá třetí rok jeho prvního funkčního období. Politické klima v zemi nepřeje finančním tokům do vědeckého výzkumu, peníze dominantně proudí na zcela jiné účely a věda zažívá jedny z největších škrtů v historii. V roce 2011 byly ukončeny lety raketoplánů (to jediné byl dopředu plánovaný krok), byla ukončena účast v projektu vesmírného interferometru LISA a byl uzavřen druhý největší urychlovač světa Tevatron.

Raketoplány byly jedním z hlavních dopravních prostředků do vesmíru v letech 1981 až 2011. Celkem došlo ke 135 startům. Lety raketoplánů byly ale provázeny celou řadou závad a havárie raketoplánů Challenger (1986) a Columbia (2003) byly jejich nutným

vyústěním. Ukončení letů raketoplánů bylo plánované dlouhodobě. Že k tomu došlo právě v roce 2011, byla spíše náhoda. Na raketoplánech bytostně záviselo budování Mezinárodní kosmické stanice. Jedině raketoplány dokázaly přivést velké díly a manipulovat s nimi u stanice. Při předposledním letu raketoplánu byl přivezen na Mezinárodní kosmickou stanici detektor AMS 2. Byla to poslední šance, jak tento částicový detektor kosmického záření vyvinutý v CERNu na stanici dopravit, jinak by se stal velmi drahým muzeálním kouskem. Snahy o jeho dopravu ke stanici se vlekly od roku 2006.

Ukončení americké účasti v projektu LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) bylo naopak nečekané. Společný evropsko-americký projekt měl za cíl vyslat do vesmíru trojici sond, která by vytvořila obří optický interferometr s rameny dlouhými pět milionů kilometrů. Přesné měření vzdálenosti mezi odraznými krychlemi volně se vznášejícími v sondách mělo umožnit detekci gravitačních vln dlouhých vlnových délek. Po vystoupení USA z projektu se nějakou dobu snažila projekt udržet Evropská kosmická agentura a ne zcela se to nakonec podařilo. K oživení projektu došlo až po objevu gravitačních vln v roce 2015 a dnes je plánován start detektoru LISA na rok 2034. Spojené státy se omezeným způsobem do projektu vrátily.

Rozhodnutí o uzavření druhého největšího urychlovače světa Tevatronu zapůsobilo na americkou fyzikální komunitu jako blesk z čistého nebe. Tevatron byl chloubou americké částicové fyziky. Jeho název symbolizoval, že v prstenci o obvodu 6,3 kilometru je možné urychlit protony až na energii jednoho teraelektronvoltu. Tevatron byl dostaven v roce 1983 ve Fermilabu v Batávii, ve státě Illinois. Stál 120 milionů amerických dolarů. Další velkou investicí byl hlavní injektor za 290 milionů dolarů přidáný v letech 1994 až 1999. K největším objevům patří nalezení top kvarku v roce 1995 a pěti exotických baryonů v různých letech činnosti. Od roku 2009 začal v Evropě fungovat Velký hadronový kolider LHC, který roli největšího urychlovače světa převzal. Uzavření Tevatronu bylo ale zásadní chybou, kterou nelze vzít zpět. Naměřených dat je tak enormní množství, že se intenzivně zpracovávala ještě mnoho let. V roce 2014, tři roky po uzavření urychlovače, byl například ohlášeno

objev atypicky vázané čtveřice kvarků. Naštěstí nebyl s Tevatronem uzavřen také hlavní injektor, předstupeň s obvodem 3,3 kilometru, který urychloval protony na energii až 150 GeV. Teprve poté byly nasměrovány do hlavního urychlovače. Hlavní injektor funguje dodnes a právě on je jakoby předurčen pro různé experimenty s neutriny. Hlavní injektor byl v roce 2012 využit jako zdroj protonů pro vytvoření neutrinového svazku, který uskutečnil historicky první neutrinovou komunikaci.

První přenesené slovo

Uzavření Tevatronu byla pro americké vědce citelná rána. O to více se upnuli k fungujícímu hlavnímu injektoru a vymýšleli pro něj nejružnější projekty. Už od roku 2010 je možné nasměrovat protony o energii 120 GeV z hlavního injektoru do uhlíkového útlumového terče. Vylétávající piony a kaony jsou kolimovány magnetickým polem do málo rozbíhavého svazku. Ten prolétá 675 metrů dlouhým rozpadovým tunelem, který je plněný inertním heliem. Zde se částice rozpadají na neutrina. Absorbér na konci tunelu pohltí veškeré částice, až na neutrina. Svazek nemůže být kontinuální, útlumový terč je třeba chladit. Svazek je proto složen z oddělených shluků neutrin. Jsou vytvářeny protonovými impulzy obsahujícími $2,25 \times 10^{13}$ protonů. Jeden impuls trvá 8,1 mikrosekundy. Další impuls je možné opakovat až za 2,2 sekundy. Vzniklý neutrinový svazek o průměru několika metrů patří k nejintenzivnějším na světě a dostal název NuMI (*Nu at the Main Injector*). Neutrina se označují písmenem ν (ný), které se anglicky řekne „nu“. Svazek obsahuje 88 % mionových neutrin, 11 % mionových antineutrin a 1 % elektronových neutrin. Jejich průměrná energie je 2,8 GeV.

V roce 2010 byl neutrinový svazek NuMI generovaný hlavním injektorem využíván v experimentech MINOS, MINERvA a NOvA. V roce 2011, po uzavření Tevatronu, se Američané pokusili o první průlom v neutrinové komunikaci. Pouhý kilometr od uhlíkového terče se totiž nachází detektor MINERvA, který běžně sloužil jako blízký detektor různých oscilačních experimentů. Jako dosud

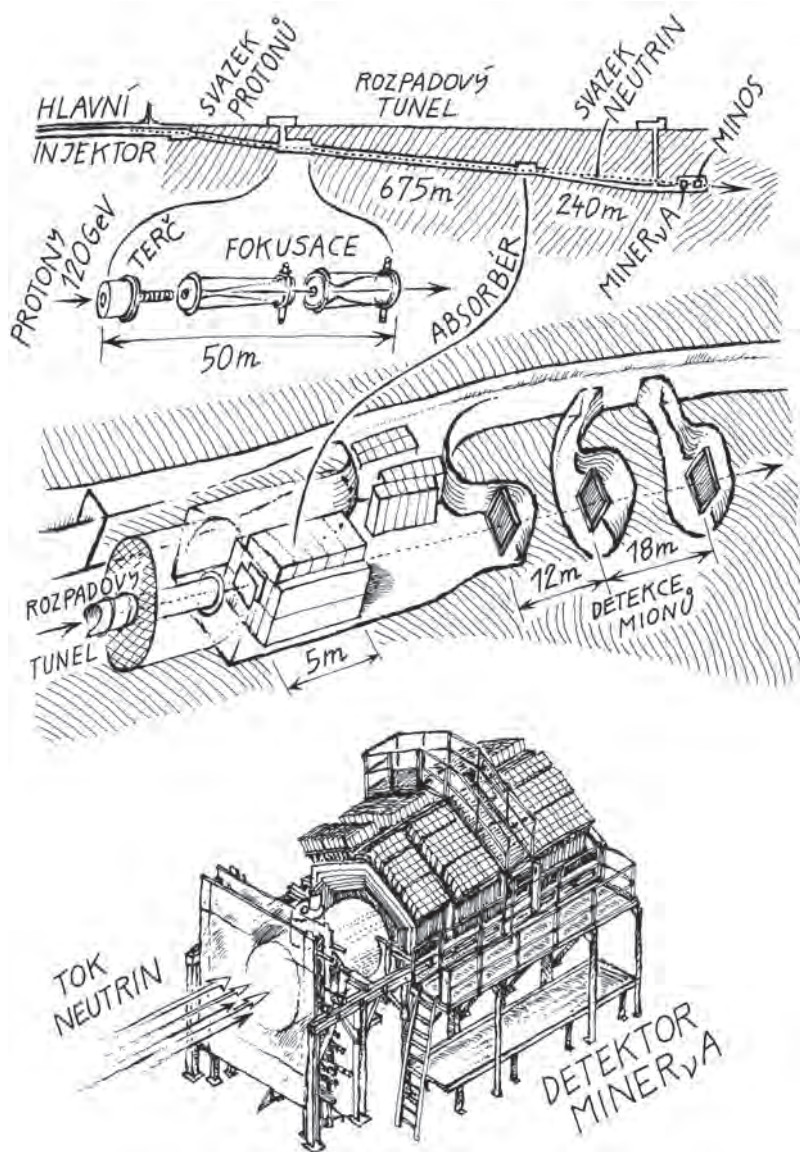


Schéma první neutrinové komunikace

nejvzdálenější detektor posloužil 810 kilometrů vzdálený detektor v severní Minnesotě (šlo o experiment NOvA). Blízký detektor MINERvA byl pro první koketování s neutrinovou komunikací velmi vhodný. Jeho název má připomínat římskou bohyni řemesel a moudrosti Minervu. Současně jde o zkratku z *Main INjector Experiment for ν-A*. Předposlední písmeno v názvu MINERvA (podobně v NOvA) je tedy písmeno „v“ naší abecedy a současně písmeno „ný“ řecké abecedy, symbol pro neutrino.

Detektor MINERvA se nachází 100 metrů pod zemí a jeho celková hmotnost je 170 tun. Jádru detektoru je tvořeno olovem, železem a uhlíkem. Zachycená neutrina se změnila na miony, které v detektoru urazí několik metrů. Jejich stopa je zaznamenávána ve dvou stech scintilačních proužcích, jejichž roviny tvoří šestiboký hranol. Z jednoho impulzu neutrinového svazku je v průměru v detektoru MINERvA zachyceno 0,6 neutrina. Je tedy značná pravděpodobnost, že průlet shluku neutrin bude detektorem zaznamenán.

Experiment s první neutrinovou komunikací uskutečnil tým vědců pod vedením Daniela Stancila ze Státní univerzity v Severní Karolíně. Jeden neutrinový shluk měl význam logické jednotky. Pulzy byly vysílány pravidelně každé 2,2 sekundy (to je opakovací frekvence protonových impulzů). Vynechání pulzu v sekvenci znamenalo logickou nulu. Přenášená informace tak byla zakódována do posloupnosti logických nul a jedniček a přenos bylo nutné vzhledem k chybovosti opakovat dvakrát. Vzdálenost mezi místem kódování a detektorem byla 1035 metrů, z toho čtvrt kilometru vedlo dolomitovou skálou. Vědcům se podařilo zakódovat, neutrinu přenést a posléze rozkódovat slovo „neutrino“. Chybovost přenosu díky opakování nepřesáhla jedno procento. Každý ajťák by sice nad tímto experimentem ohrnul nos, protože bylo dosaženo přenosové rychlosti pouze 0,1 bitu za sekundu (vzpomeňte si na megabity za sekundu vašeho internetového připojení). My ale víme, že v tomto přelomovém experimentu nešlo o kvantitu, ale o kvalitu. V roce 2012 se lidstvu poprvé podařilo přenést informaci pomocí neutrin. A tento krok přenesl úvahy o neutrinové komunikaci z říše snů do světa aktuálních možností současné neutrinové fyziky.

Víte, že?

■ Víte, že rezonanční elektronové antineutrino s energií 6,3 PeV prolétne ve vodě v průměru vzdálenost sto kilometrů, než je zachyceno přítomnými elektrony? Poté se změní na polní částici slabé interakce W^- .

■ Víte, že souřadnicové roviny v detektoru MINERvA byly označeny X, U a V? Američané se od evropského systému neliší jen svými mílemi, couly, yardy a Fahrenheity, ale i značením os v souřadnicové soustavě.

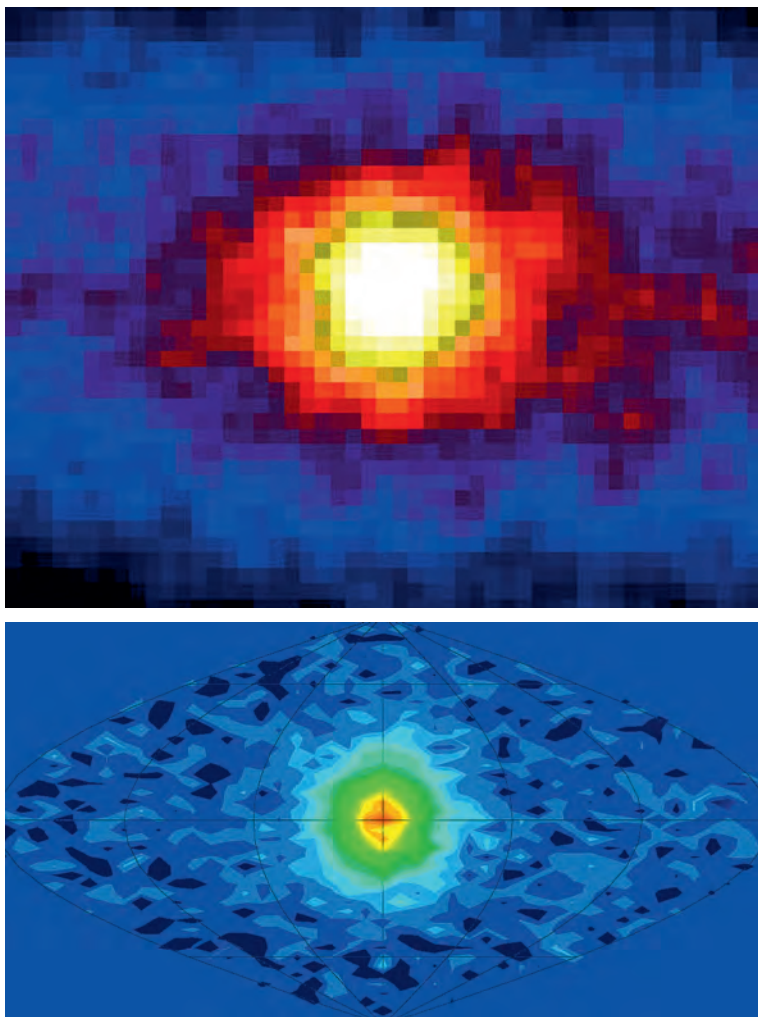
■ Víte, že Fermilab, v němž proběhl první experiment s neutrinovou komunikací, je pojmenován podle italského fyzika Enrica Fermiho? Jde o jednu z deseti amerických národních laboratoří, které jsou financovány z amerického státního rozpočtu. Těchto deset klíčových laboratoří spadá přímo pod ministerstvo energetiky USA.

■ Víte, že *bit* je nejmenší jednotkou informace? Bit je dvoustavová informace typu ANO/NE, 0/1, černá/bílá. Větší jednotkou je *byte*, který je roven osmi bitům. Byte je tedy řada osmi nul či jedniček. Dosažený tok 0,1 bitu za sekundu znamená, že přenesení jednoho znaku 0/1 trvalo deset sekund, přenesení jednoho písmene abecedy 80 sekund a přenesení slova neutrino 10 minut.

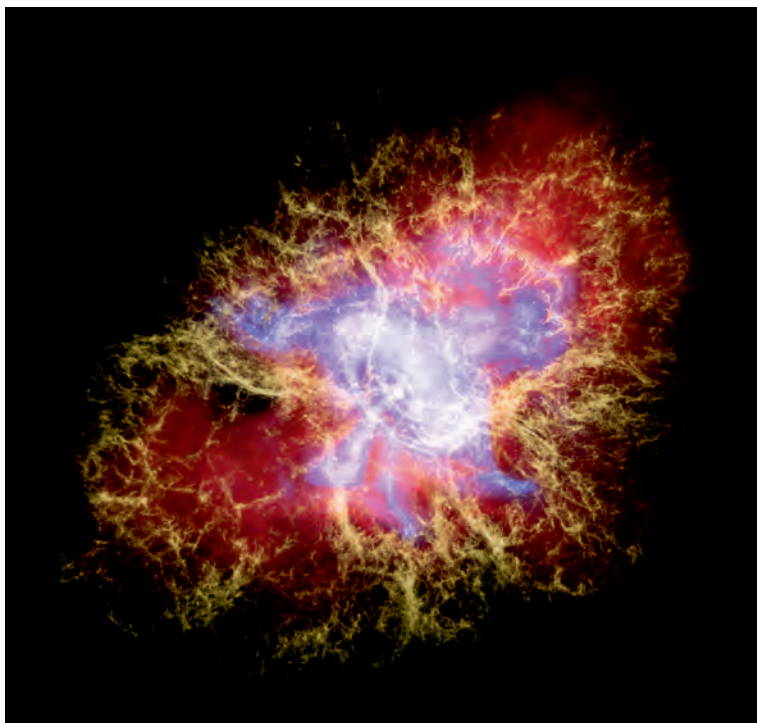
Poučení na závěr: Nebojte se mluvit pomalu a zřetelně. Nic vám neuteče. A i kdybyste ze sebe jedno slovo soukali minutu, budete stále desetkrát rychlejší než současná neutrinová komunikace.



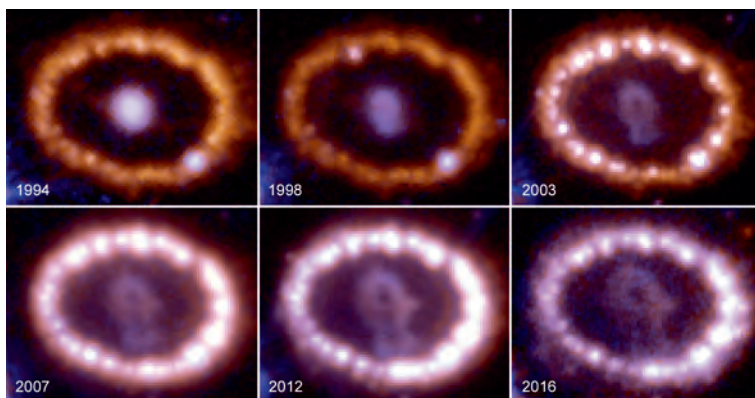
Barevná příloha



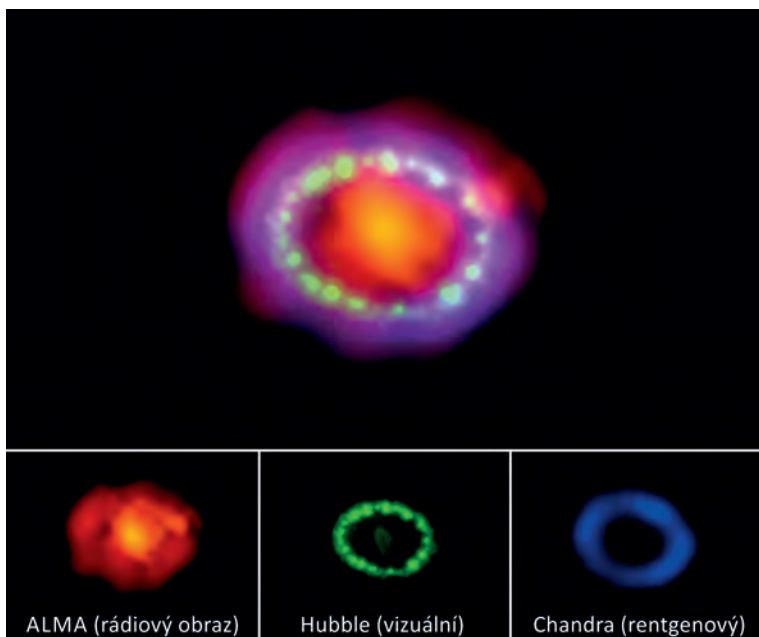
Obr. 1: Neutrinový obraz jádra Slunce zobrazený japonským detektorem Super-Kamiokande. Na prvním snímku je noční pohled na Slunce exponovaný v noci 503 dní napříč celou zeměkoulí. Expozice druhého snímku trvala 1500 dní. Detektor Super-Kamiokande je 1000 metrů pod povrchem. Kolaborace Super-Kamiokande.



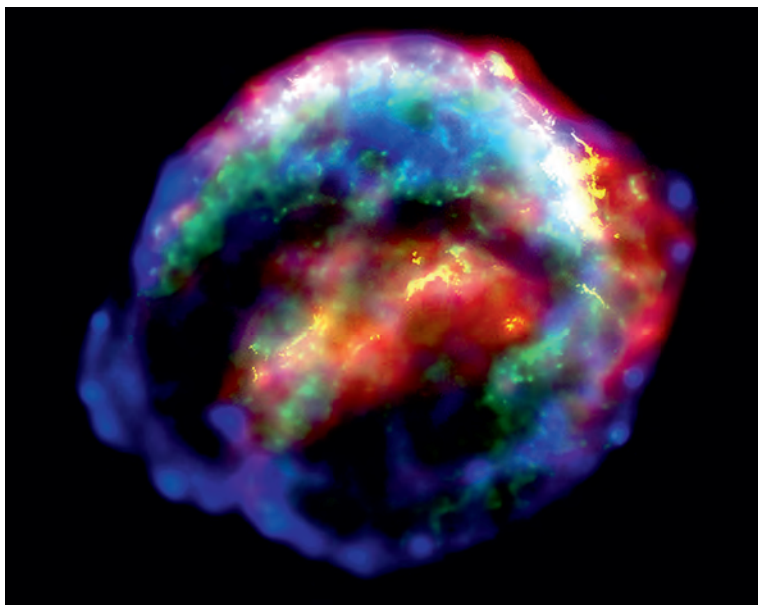
Obr. 2: Krabí mlhovina, pozůstatek po explozi supernovy z roku 1054. Kombinace vizuálního oboru (HST, žlutě), infračerveného oboru (SST, červeně) a rentgenového oboru (Chandra, modře). V modré barvě je vidět výtrysk z centrálního pulzaru. NASA, EShA, J. DePasquale (STScI), R. Hurt (Caltech/IPAC).



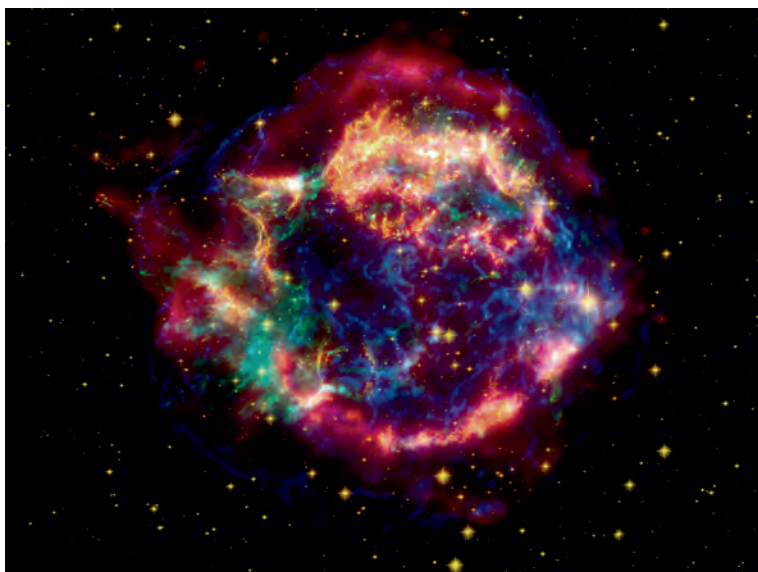
Obr. 3: Supernova 1987A ve Velkém Magellanově mračnu. HST, NASA/ESA.



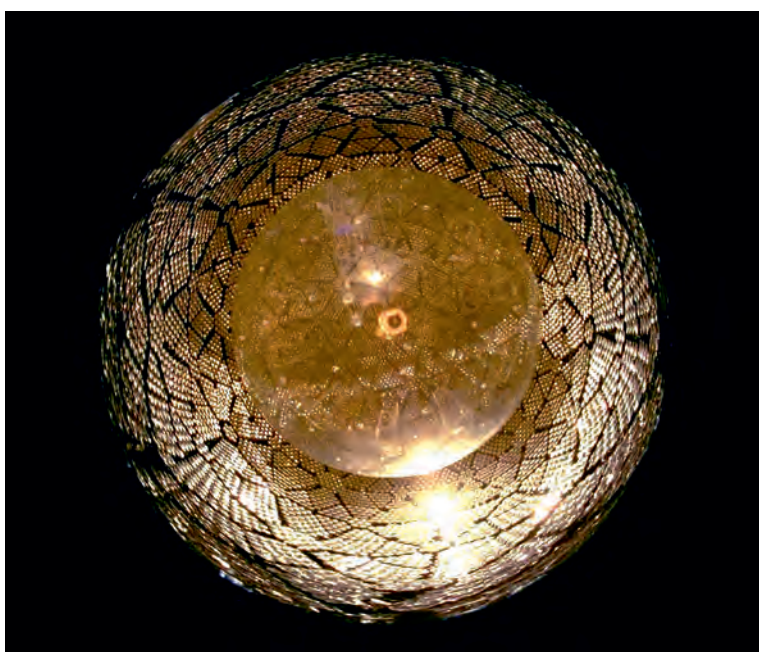
Obr. 4: Supernova 1987A ve Velkém Magellanově mračnu. Nahoře je kombinovaný snímek z různých oborů spektra, dole záběr na detailní strukturu rázových vln v širším okolí. HST/WFPC2, 1997.



Obr. 5: Keplerova supernova z roku 1604 v Hadonoši v RTG oboru. Chandra.



Obr. 6: Poslední supernova z roku 1680 v souhvězdí Kasiopieji nebyla současníky pozorována. Kombinovaný snímek HST, Spitzer, Chandra, 2005.



Obr. 7: Sudburská neutrinová observatoř. Nahoře je rutinní kontrola fotonásobičů. Dole je patrná vnitřní sféra s těžkou vodou. Kolaborace SNO.