Na čem pracujeme: Přežití prachu v okolí hmotných hvězd po výbuchu supernovy

13.5.2025 - | Astronomický ústav AV ČR

Prach hraje zásadní roli v mezihvězdném prostředí, ovlivňuje vznik hvězd a planetárních systémů, ale také interakci se supernovami. Jaký osud čeká prachové částice po hvězdných erupcích a explozích supernov? Nová studie pomocí pokročilých numerických simulací zkoumá, jak různé faktory – včetně geometrie okolního prostředí a načasování výbuchu – určují, zda prach přežije, nebo bude zničen. Výsledky ukazují, že prach může být odolnější, než se dříve myslelo, a jeho osud závisí na složitém propojení fyzikálních procesů.

Prach hraje v dynamice meziplanetárního prostředí zásadní roli, přesto je jeho původ ne zcela uspokojivě vysvětlen. Přitom je jeho zastoupení i složení důležité pro pochopení procesů v chemickém obohacování mezihvězdné látky a má mimo jiné i velký vliv na tvorbu nových hvězd a formování planet a planetárních systémů. Obecně se soudí, že velkým zdrojem prachu ve vesmíru jsou hvězdy, a to zejména ve svých závěrečných stádiích. Tak kupříkladu velmi hmotné hvězdy na sklonku svého života podléhají intenzivním erupcím, při kterých hvězdy ztrácejí značné množství hmoty. Tyto erupce mohou být spojeny s přítomností hustých obálek plynů a prachu kolem hvězdy, což vytváří složité struktury v jejím okolí. Prach se může vytvořit při kondenzaci těžších prvků v chladných částech tohoto vyvrženého materiálu.

Když taková hvězda exploduje jako supernova, vzniklé rázové vlny se šíří okolním materiálem a mohou způsobit destrukci prachových částic. Prach se může zahřívat a být zničen intenzivním zářením nebo mechanickými procesy souvisejícími s rázovou vlnou. Jaké množství prachu je schopno explozi supernovy přečkat ale není jasné. Autoři představované studie se proto snažili pochopit, jak různé faktory ovlivňují přežití tohoto prachu po explozi supernovy. Mezi klíčové faktory patří geometrie okolního materiálu, časový odstup mezi erupcí a explozí supernovy a energie samotné exploze.

Představované studie se účastnil i Santiago Jiménez Villarraga z ASU. Autoři pro svůj výzkum použili trojrozměrné hydrodynamické simulace, které zahrnovaly hvězdný vítr, obří hvězdnou erupci a následnou explozi supernovy. Zaměřili se na hvězdy s hmotnostmi 45, 50 a 60 hmotností Slunce. Tyto simulace umožnily sledovat vývoj okolního prostředí v čase a posoudit, jak se vyvíjí interakce mezi rázovou vlnou supernovy a prachovými částicemi. Kromě různých počátečních hmotností vybraných hvězd autoři zvážili, jak okolohvězdné prostředí vypadá a také, jak rychle po prachové erupci dojde k explozi supernovy. Dále pak zohlednili několik možných energií výbuchu supernovy.

Simulace ukázaly, že geometrie okolního materiálu (okolohvězdného prostředí) hraje klíčovou roli v přežití prachu. Pokud došlo k explozi supernovy 200 let po erupci a okolní materiál byl uspořádán sféricky, přežilo pouze 25 % původního množství prachu po 250 letech od exploze. V případě bipolárního uspořádání okolního materiálu přežilo pouze 2 % prachu po 100 letech od exploze. To znamená, že pokud je prach distribuován asymetricky, je vystaven dřívějšímu setkání s rázovou vlnou, což vede k jeho efektivnější destrukci. Bipolární struktury u hmotných hvězd přitom nejsou žádnou výjimkou, krásným příkladem je například mlhovina Homunkulus, která obklopuje masivní hvězdu η Carinae v souhvězdí Lodního kýlu a jež jen pozůstatkem mohutné erupce, k níž došlo kolem roku 1843.

Naopak, pokud by exploze supernovy následovala krátce po erupci (přibližně 12 let), přežilo až 75 % prachu, zatímco u energetičtějších explozí s větší hmotností vyvržené hmoty přežilo pouze 20 %

prachu. To ukazuje, že pokud se supernova odehraje brzy po erupci, rázová vlna oslabuje kvůli efektivnější přeměně pohybové energie na záření a její destruktivní efekt na prach může být omezenější.

To má důsledky nejen pro prach v okolí hvězdy, ale i pro prach vytvořený samotnou supernovou a prach v mezihvězdném prostoru. Z pozorování víme, že některé zbytky po supernově vykazují velké množství infračerveného záření, což naznačuje přítomnost prachových částic. Může jít o systémy, kdy exploze supernovy následovala relativně krátce po erupci prachu.

Důsledky této studie se dotýkají nejen astrofyziky hvězd, ale i kosmologie a formování galaxií. Prach, který přežije explozi supernovy, se může stát součástí nově vznikajících hvězdných systémů, včetně planetárních soustav. Například prach pocházející ze supernov obsahuje těžké prvky, které jsou nezbytné pro tvorbu kamenných planet typu Země. Pokud by supernovy veškerý prach efektivně ničily, mohlo by to ovlivnit obohacování mezihvězdného média těmito klíčovými prvky.

Tato práce rovněž ukazuje, jak důležitou roli hraje odstup mezi erupcí a explozí supernovy. Pokud hvězda prochází mnoha epizodami ztráty hmoty a exploduje jako supernova až po delší době, její rázová vlna může mít dostatek času na to, aby zničila většinu prachu. Naopak, pokud se tyto události odehrají rychle za sebou, prach má větší šanci přežít.

V budoucnu by podobné simulace mohly být rozšířeny o další efekty, jako je magnetické pole nebo detailnější modelování chemických procesů v prachových zrnech. To by mohlo vést k ještě přesnějším predikcím o tom, jaké podmínky umožňují přežití prachu v extrémních prostředích a jaký to má vliv na kosmickou evoluci.

D. B. Serrano-Hernández, S. Martínez-González, S. Jiménez-Villarraga a kol, *The bright, dusty aftermath of giant eruptions and H-rich supernovae: Late interaction of supernova shocks and dusty circumstellar shells created by 45, 50, and 60 $M_\odot$ stars*, Astronomy & Astrophysics v tisku, preprint arXiv:2502.09700

https://www.asu.cas.cz/articles/2403/19/na-cem-pracujeme-preziti-prachu-v-okoli-hmotnych-hvezd-po-vybuchu-supernovy