

Wszechświat narodził się podczas gwałtownego Wielkiego Wybuchu. Nie znamy jeszcze stanu materii w tamym czasie. W rzeczywistości niewiele wiadomo o tej bardzo wczesnej fazie ewolucji Wszechświata, poza tym że charakteryzowała się bardzo szybką ekspansją. W jej wyniku rozszerzający się Wszechświat ostygł i na pewnym etapie powstała zwykła materia. Zanim jednak powstały jądra atomowe i cząsteczki, dochodziło do różnorodnych procesów termojądrowych, w których brały udział najlżejsze jądra, takie jak wodór, w rzeczywistości podobnych do tego, co dzieje się obecnie w Słońcu. Procesy te nazywane są zbiorczo nukleosyntezą Wielkiego Wybuchu. W jej wyniku powstały najliczniejsze, a zarazem najlżejsze pierwiastki występujące we Wszechświecie - wodór i hel. W miarę rozszerzania się Wszechświata pierwiastki te były budulcem pierwszej i wszystkich kolejnych generacji gwiazd. Dobre zrozumienie nukleosyntezy, pozwoliło zrozumieć pochodzenie najlżejszych pierwiastków. Pochodzenie ciężkich pierwiastków, w tym złota, pozostaje jednak nadal tajemnicą.

Zderzenia dwóch gwiazd neutronowych od dawna uważa się za źródło ciężkich pierwiastków we Wszechświecie (gwiazdy zwarte są pozostałością po wybuchach gwiazd około dziesięciokrotnie cięższych od Słońca, znanych jako supernowe typu core-collapse). Rzeczywiście, pierwsza i jak dotąd jedyna obserwacja fal grawitacyjnych, promieniowania optycznego, gamma i rentgenowskiego, związana z tzw. zdarzeniem GW170817, która miała miejsce 17 sierpnia 2017 r., potwierdziła nie tylko samo istnienie zderzeń gwiazd neutronowych, ale także to, że w ich następstwie powstają ciężkie pierwiastki, tzw. kilonowa. W ten sposób powstały najcięższe pierwiastki we wszechświecie, na przykład ołów, a nawet uran i pluton. Wraz z wykryciem fal grawitacyjnych, nie tylko z tego zdarzenia, ale także z wielu zderzeń czarnych dziur, badania wkroczyły w nowy obszar astronomii wielowskaźnikowej. Za to odkrycie w 2017 roku została przyznana Nagroda Nobla.

Zderzenia dwóch gwiazd neutronowych nie mogą być jednak jedynym źródłem ciężkich pierwiastków we wszechświecie. Nie tłumaczą one obserwacji gwiazd niewzbogaconych w żelazo, zbiorczo zwanych niskometalicznymi, jednocześnie bogatych w najcięższe pierwiastki, np. europ i bar. Głównym źródłem żelaza i pierwiastków z grupy żelaza, takich jak nikiel i cynk, są supernowe typu core-collapse. Metale te wyrzucane są podczas eksplozji każdej supernowej, wzbogacając przestrzeń międzygwiazdową. Trudność pojawia się przy próbie wyjaśnienia wzbogacenia pierwiastków cięższych od żelaza w gwiazdach z niedoborem metali, ponieważ zderzenie gwiazd neutronowych wymaga czasu. Najpierw muszą wystąpić dwie supernowe typu core-collapse (masywne gwiazdy żyją od kilkudziesięciu do setek milionów lat), a następnie scalenie pozostałych po nich gwiazd neutronowych. To ostatnie związane jest z emisją fal grawitacyjnych, które niosą energię, a co za tym idzie separacja orbitalna zanika w ciągu milionów, a może nawet miliardów lat. Zostało to po raz pierwszy potwierdzone obserwacyjnie dla słynnego pulsara Hulse'a-Taylora, nazwanego na cześć ich odkrywców R. Hulse'a i J. Taylora, za co otrzymali Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 1993 roku. Po pierwszych zderzeniach gwiazd neutronowych w czasie wczesnej ewolucji galaktycznej, przestrzeń międzygwiazdowa była już wzbogacona metalami po kilku wcześniejszych wybuchach supernowych. Musi zatem istnieć inne źródło o niskiej metaliczności, które produkuje najcięższe pierwiastki. Można to wytłumaczyć jedynie innymi rozważanymi od dawna eksplozjami masywnych gwiazd. Co więcej, ze względu na duże rozproszenie ciężkich pierwiastków obserwowane w gwiazdach z niedoborem metali, wysunięto wniosek, że takie zdarzenia muszą być rzadkie.

W ramach tego projektu rozważone będą dwa nowe źródła w kontekście chemicznej ewolucji galaktyk. Są one związane z eksplozjami ciężkich gwiazd, które potencjalnie mogą wyjaśniać obserwowane wzbogacenie w pierwiastki gwiazd z niedoborem metali. Są to, po pierwsze, wybuchy obiektów podobnych do białych karłów, które są końcem ewolucji gwiazd o początkowej masie równej 8-9 mas Słońca, a także osobiwej ewolucji układów podwójnych, która pozostawia ultra-stripped jądro, po drugie klasa rzadkich wybuchów masywnych gwiazd powstałych w wyniku przejścia fazowego z materii jądrowej do egzotycznego, gęstego stanu materii, tzw. plazmy kwarkowo-gluonowej. Taki stan materii w ekstremalnych warunkach nie jest jeszcze dobrze poznany, ale przypuszcza się, że istniał w bardzo wczesnej ewolucji wszechświata. Nie można wytworzyć takich warunków nawet w najpotężniejszych akceleratorach cząstek. Wielkoskalowe symulacje wybuchowych procesów astrofizycznych są więc idealnymi laboratoriami do szukania egzotycznych stanów materii. Dlatego Instytut Fizyki Teoretycznej UW jest europejskim węzłem badań materii w ekstremalnych warunkach w astrofizyce.

Jeśli projekt zakończy się sukcesem, włączenie tych dwóch nowych źródeł do najnowocześniejszych symulacji ewolucji chemicznej galaktyk, odpowie na aktualne zagadki związane ze wzbogaceniem w ciężkie metale i ich rozproszeniem obserwowanym w gwiazdach ubogich w żelazo.