



Polski model supernowej

Andrzej Odrzywołek

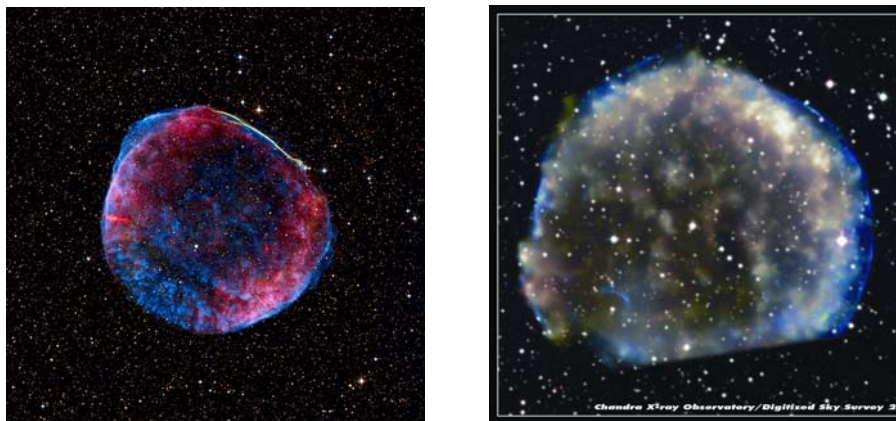
Instytut Fizyki UJ

1. Wstęp: Dwa typy supernowych

Supernowe to eksplodujące gwiazdy, spektakularne, najpotężniejsze znane wybuchy we Wszechświecie (rys. 1). Ze względu na ogromną skalę (wybuchają gwiazdy o masie przekraczającej masę Układu Słonecznego), zjawiska te są obserwowane przez wiele miesięcy z odległości sięgających krańca obserwowalnego Kosmosu. Wybuchy wewnątrz naszej Galaktyki (rys. 2), ostatnio w 1006, 1054, 1572 i 1604 roku, bywają widoczne nawet w ciągu dnia. Jednak nie tylko to przyciąga astronomów i astrofizyków do tego tematu. Zdziwiający są mechanizmy fizyczne eksplozji. Panują tam ekstremalne warunki fizyczne, w których prędkości są bliskie prędkości światła. Formują się czarne dziury i prawie wszystkie znane atomy, a neutrino, które zwykle przenikają na wskroś Ziemię, zostają uwięzione niczym gaz w butelce. Istnieje sieć powiązań problemu supernowych z nieomal wszystkimi gałęziami wiedzy ludzkiej, od kosmologii do wielkich wymiarów żywych organizmów; to tylko część zagadnień związanych z supernowymi.



Rys. 1. Supernowa typu Ia o numerze katalogowym SN 1994 D



Rys. 2. Pozostałości po termojądrowej eksplozji białych karłów w 1006 i 1572 roku

Najważniejszym elementem teorii supernowych jest mechanizm wybuchu, określany popularnym anglojęzycznym zwrotem „engine”. Ten „silnik” napędza eksplozję, której dalszy przebieg zależy od struktur zewnętrznych: samej wybuchającej gwiazdy, gwiazdy towarzyszącej, otaczającej mgławicy i materii międzygwiazdowej. Teoria rozwija się w dwóch kierunkach: (1) wyjaśnienia natury „silnika”, który musi wygenerować w krótkim czasie – rzędu sekund – gigantyczną energię oraz (2) obliczenia widzialnych, obserwowanych przez astronomów skutków wybuchu: przyszłej supernowej. Problem pierwszy jest ogromnym wyzwaniem teoretycznym, i mówiąc szczerze, jego rozwiązanie ciągle wydaje się odległe. Wiemy już sporo, ale potykamy się o liczne szczegóły, a supernowe modelowane w komputerach nie chcą wybuchnąć. Drugie zagadnienie jest kluczowe, gdyż pomijając fale grawitacyjne i neutrino (których nie potrafimy skutecznie obserwować) tylko druga faza eksplozji dostarcza informacji astrofizykom. Trudno oprzeć się wrażeniu, że niezależnie od wyrafinowania stosowanych metod, zawsze będą to informacje niejako „z drugiej ręki”.

Tematem artykułu będzie mechanizm wybuchu, konkretnie jeden z dwóch znanych sposobów na wyzwolenie energii wystarczającej do rozerwania gwiazdy. Pierwszym z nich jest kolaps grawitacyjny. Proces ten jest łatwy do zrozumienia i znany od nieomal 100 lat.

Niech w pewnym momencie kulista gwiazda o masie M i promieniu R utraci stabilność i zapadnie się do obiektu o promieniu r , który jest znacznie mniejszy niż R . Wyzwolona energia, zgodnie z teorią Newtona, wynosi – pomijając bliski 1 czynnik:

$$E = E_{\text{start}} - E_{\text{koniec}} = G M^2/R - G M^2/r,$$

gdzie G to stała grawitacyjna. Wstawiając wartości typowe dla jądra gwiazdy pre-supernowej np. $M = 3 \times 10^{30}$ kg (1,5 masy Słońca), $R = 1000$ km (promień wypalonego jądra gwiazdy) i zakładając, że wynikiem zapadania się będzie

gwiazda neutronowa o promieniu $r = 10$ km otrzymamy energię około 4×10^{46} J, czyli ponad 100 razy więcej niż dla typowej supernowej. Niestety, przekształcenie energii grawitacyjnej do postaci „użytecznej” jest niezwykle trudne i większość z niej zostaje albo wypromieniowana w postaci neutrin albo zamrożona w postaci masy i pola grawitacyjnego czarnej dziury. Astrofizycy z trudem wyszukują procesy pozwalające wydobyć 1% energii grawitacyjnej na użytek eksplozji gwiazdy. Z najbardziej popularnych można wymienić podgrzewanie neutrinami, efekty 3D, wibracje gwiazdy neutronowej czy oddziaływanie pól magnetycznych i rotującej czarnej dziury prowadzące do wyrzutu strug plazmy, tzw. *jetów*.

Drugi z mechanizmów jest tak oczywisty, że dziwne wydaje się, iż do lat 60. nikt go nie zaproponował: wybuch termojądrowy. Jest to tym bardziej zaskakujące, bo kilka lat wcześniej były przeprowadzone próby z bronią wodorową, a od dawna wiadano, że reakcje termojądrowe zachodzą w Słońcu. Upraszczając, „engine” jest w tym wypadku gigantyczną bombą, w wielu aspektach podobną do „zwykłych”, posiadanych przez armie. Zajmiemy się teraz bardziej szczegółowo tym zjawiskiem, określanym jako „supernowa termojądrowa” (ang. *thermonuclear supernova*) w odróżnieniu od „supernowej implozyjnej” (ang. *core-collapse supernova*) opisaney w poprzednim akapicie.

2. Wybuchy termojądrowe w Kosmosie

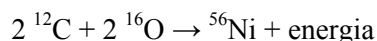
2.1. Standardowy model supernowej Ia

Wśród kilku typów wybuchów termojądrowych, takich jak gwiazdy nowe i rozbłyski rentgenowskie, supernowe zajmują specjalne miejsce. Po pierwsze, energia wybuchu jest największa, po drugie, następuje kompletne zniszczenie gwiazdy, która dosłownie zostaje roznieciona w pył. Jak do tego dochodzi?

Musimy dysponować odpowiednią ilością „materiału wybuchowego”, znaleźć obiekt lub układ, w którym może samorzutnie dojść do zapłonu oraz upewnić się, że eksplozja nie skończy się niewypałem. Dodatkowe warunki nakładają obserwacje. Ponieważ wybuchy supernowych typu Ia, które identyfikujemy z termojądrowymi, obserwowane są (w odróżnieniu od pozostałych typów) we wszystkich typach galaktyk, a nawet w przestrzeni międzygalaktycznej, nie mogą to być egzotyczne, rzadko spotykane ciała niebieskie. Co więcej, supernowe te obserwujemy w galaktykach, które od miliardów lat nie „produkują” nowych gwiazd. Dlatego mechanizm zapłonu musi działać niezwykle powoli.

Wiele lat pracy teoretyków i astronomów–obserwatorów pozwoliło zawęzić gigantyczny zbiór kombinacji paliwo / sposób zapłonu / rodzaj eksplozji / wybuchające ciało niebieskie. Obecnie rozważa się ich kilka. Dominuje pogląd, że klasyczna supernowa termojądrowa (około 85% przypadków) jest wybuchem białego karła (wygasłej gwiazdy), składającego się z mieszaniny 50% węgla (C) i 50% tlenu (O).

Oczywiście taki biały karzeł pozostawiony sam sobie nigdy nie wybuchnie. Dlatego musi znajdować się w układzie podwójnym, a materia z jego towarzysza musi być powoli wysysana i gromadzona na jego powierzchni. Proces ten nazywamy **akrecją** i spotykamy go w Kosmosie bardzo często. Nie zawsze prowadzi to do wybuchu supernowej, zwykle zgromadzony materiał spala się gwałtownie, a wybuch nie przenosi się dalej. Zjawisko takie, tysiące razy słabsze od supernowej, nazywamy gwiazdą nową. Jeżeli jednak w wyniku akrecji masa białego karła wzrasta, sytuacja jest inna. Prawa fizyki ograniczają jego maksymalną masę. Można obliczyć, że biały karzeł CO, którego masa rośnie zbliżając się do wartości 1,38 masy Słońca, ulega samozapłonowi w rejonie centralnym. Dla jasności należy podkreślić, że nie jest to bynajmniej chemiczny zapłon węgla w tlenie, ale *synteza termojądrowa* tlenu i węgla prowadząca do powstania jąder znajdujących się w tablicy Mendelejewa blisko żelaza. Szczegóły tej reakcji nie będą potrzebne do zrozumienia samego wybuchu, wystarczy wiedzieć, że dochodzi do połączenia jąder atomowych węgla i tlenu, w wyniku czego powstają (w przypadku zachodzenia kompletnej reakcji) jądra radioaktywnego niklu:



gdzie, zgodnie ze słynnym wzorem Einsteina:

$$\text{energia} = (2 M_{\text{C}} + 2 M_{\text{O}} - M_{\text{Ni}}) c^2.$$

Całkowita energia wyzwolona na skutek wspomnianej powyżej reakcji w białym karle o masie 1,38 masy Słońca wynosi około 2×10^{44} J, czyli właśnie tyle, ile wyzwala wybuch supernowej typu Ia. Aż do tego momentu większość teoretyków jest dosyć zgodna. „Schody” zaczynają się jednak już w następnym kroku.

2.2. Mechanizmy wybuchu: spalanie, wybuch, detonacja

Naiwnie rozumując, poprzez analogię ze zwykłymi bombami, wydaje się, że jeżeli mamy już zgromadzony materiał wybuchowy i podpaliliśmy lont, to reszta nie ma znaczenia. Otóż nie jest to takie proste. Prawie każda wydzielająca energię (egzotermiczna) reakcja, zarówno chemiczna jak i termojądrowa, może przebiegać zasadniczo w trzech reżimach: spalaniu, wybuchu (deflagracji) i detonacji. Granica oddzielająca spalanie i deflagrację jest nieco umowna. Na ogół o spalaniu mówimy, gdy reakcja zachodzi na tyle wolno, że wyzwolona energia jest natychmiast odprowadzana na zewnątrz. Przykład to płomień świecy czy reakcje termojądrowe w Słońcu. Jeżeli energia *nie jest* odprowadzana na zewnątrz to naturalnie gromadzi się, prowadząc do wzrostu temperatury. Wzrost temperatury powoduje zwiększenie tempa spalania itd. Proces ten może narastać bardzo szybko aż do wyczerpania się „paliwa”. Na ogół jednak znacznie wcześniej wyzwolona energia przekształca się w energię kinetyczną i „paliwo” zostaje rozrzucone zanim zdąży się spalić. Zazwyczaj tworzy się front

spalania: powierzchnia oddzielająca „paliwo” od „popiołu” nazywana jest zwykle płomieniem. Przemieszcza się ona stosunkowo wolno (w porównaniu do prędkości dźwięku) i na skutek niestabilności może przybierać bardzo złożone kształty. Tego rodzaju wybuch jest nie tylko powolny, ale również mało efektywny. Spaleniu ulega na ogół tylko ułamek całkowitej masy materiału wybuchowego. W warunkach ziemskich stosujemy liczne triki zwiększające efektywność wybuchu, jak zapłon wielopunktowy, grube obudowy bomb zapobiegające rozrzutowi materiału palnego itp.

Najsukuteczniejsze, z punktu widzenia gwałtowności wybuchu, jest zmuszenie (pobudzenie) paliwa do detonacji. Pojęcie to jest blisko spokrewnione z *falą uderzeniową*. Front fali uderzeniowej (ang. *shock*) jest to przemieszczająca się powierzchnia, na której skokowo zmienia się ciśnienie, temperatura i gęstość płynu. Powstaje samorzutnie jako skutek rozchodzenia się bardzo dużych (nie liniowych) zaburzeń, zazwyczaj związanych z wybuchami. Amplituda fali uderzeniowej (np. różnica ciśnienia przed i po jej przejściu) w otwartej przestrzeni zwykle szybko maleje z czasem i odległością od „epicentrum” wybuchu. W odróżnieniu od fal akustycznych, które są małymi zaburzeniami, czy też płomienia (fali deflagacyjnej), który stanowi także powierzchnię nieciągłości, fale uderzeniowe poruszają się z prędkościami ponaddźwiękowymi. Jeżeli taka fala uderzeniowa wejdzie w obszar zajęty przez paliwo lub też wytworzy się wewnątrz niego i będzie dostatecznie silna, temperatura i ciśnienie tuż za jej frontem mogą być wystarczająco duże, aby nastąpił zapłon. Wydzielona energia „napędza” falę uderzeniową, która od tego momentu nie słabnie, ale porusza się ze stałą prędkością praktycznie do miejsca, w którym paliwo się kończy. Fala detonacyjna przesuwa się tak szybko, że materia, do której jeszcze nie dotarła, „nie wie” o eksplozji, która już się rozpoczęła. Z tego powodu „paliwo” nie jest w stanie rozproszyć się i w 100% zostaje zużyte, wyzwalając co najmniej kilka razy więcej energii niż to samo paliwo w zwykłej deflagacji. Co więcej, energia ta zostaje wyzwolona w bardzo krótkim czasie. Takie szczegóły, jak miejsce zapłonu, kształt powierzchni i rozkład gęstości materiału wybuchowego, mają drugorzędne znaczenie.

2.3. Termojądrowy wybuch białego karła

Uzbrojeni w podstawową wiedzę na temat wybuchu, możemy łatwo prześledzić sposób rozumowania astrofizyków badających supernową typu Ia. Biały karzeł jest obiektem dosyć egzotycznym, posiada masę rzędu masy Słońca i promień porównywalny z ziemskim. Elektronowy gaz zdegenerowany, którego ciśnienie powstrzymuje przyciąganie grawitacyjne, zachowuje się w sposób możliwy do wyjaśnienia jedynie na gruncie mechaniki kwantowej i szczególnej teorii względności. Nie powinien więc zdziwić fakt, że biały karzeł, który wysysa masę ze swojego towarzysza, staje się na skutek tego coraz *mniejszy*, a zatem

gęstszy. Kompresja powoduje wzrost temperatury, największy w obszarze centralnym. Proces ten jest powolny, rzędu tysiąca lat, a jego szczegóły są tematem aktualnych prac naukowych. Na pewnym etapie tego okresu, określanego jako „tlenie się” (ang. *smouldering, simmering*), tempo reakcji jądrowych zaczyna wzrastać w sposób nieograniczony i zaczyna się wybuch. W latach 60. sądzono, że niemal natychmiast przechodzi on w detonację rozchodzącą się od środka ku powierzchni. W wyniku takiej eksplozji materia, z której zbudowany jest biały karzeł, zostałaby w niecałą sekundę przekształcona całkowicie w radioaktywny nikiel, ostatecznie rozpadający się (poprzez kobalt) do żelaza w czasie rzędu 2–3 miesięcy. Jest to z grubsza zgodne z obserwowaną krzywą blasku supernowej. Bardziej szczegółowe obserwacje ustaliły skład chemiczny wybuchającej supernowej i okazało się, że co prawda „żelazo” jest produkowane, ale w znacznie mniejszej ilości. Około połowa wyrzucanej materii to atomy znajdujące się w układzie okresowym pomiędzy tlenem a żelazem. Ich obecność jest tak bardzo charakterystyczna dla supernowych termojądrowych, że linie widmowe krzemu od lat 80-tych służą do identyfikowania typu Ia. Na pierwszy rzut oka, biorąc pod uwagę ogólne informacje przedstawione wyżej, wyklucza to detonację.

Jeżeli nie detonacja, to może deflagracja? Podobny, jak opisany wyżej model, przyjmujący, że płomień termojądrowy rozchodzi się sferycznie od środka do powierzchni, okazał się niezwykle skuteczny w odtwarzaniu obserwowanych własności supernowych i jest powszechnie używany przez astronomów. Problem polega na tym, że prędkość rozchodzenia się fali deflagracyjnej w tych modelach nie tylko jest sprzeczna ze znanymi prawami fizyki, ale na dodatek zależy od chwilowego położenia wewnątrz białego karła. Można wręcz powiedzieć, że 20 ostatnich lat prac nad supernowymi termojądrowymi to próby odtworzenia tego typu modeli w ramach dobrze przecieź ugruntowanych praw fizyki. Zgodna z obserwacjami prędkość rozchodzenia się płomienia jest około 3 razy *mniejsza* niż prędkość detonacji (dźwięku) i kilka lub kilkanaście razy *większa* niż prędkość deflagracji. Zaproponowano wiele sposobów wyjaśnienia anomalnej prędkości spalania.

Jeden z kierunków to zwiększenie efektywnej prędkości deflagracji poprzez np: zapłon w wielu miejscach równocześnie lub sfałdowanie płomienia do postaci bliskiej fraktalnej (zob. prace autora i np.: <http://astro.sunysb.edu/mzingale/SNr1/> lub http://astro.sunysb.edu/mzingale/rt3d/rt_1.5e7_3d_new.avi), dzięki czemu „paliwo” zużywa się znacznie szybciej. Nadal niektórzy astrofizycy próbują „przyspieszyć” spalanie, mimo to jednak wydaje się, że osiągnięcie wymaganej prędkości nie jest możliwe. Z drugiej strony, prędkość detonacji jest dobrze określona i niemożliwe jest, aby przebiegała ona wolniej, niż wymagają tego prawa zachowania masy, energii i pędu. Jeżeli jednak detonacja rozpoczęłaby się w połowie spalania, średnia prędkość wybuchu może okazać się zgodna z obserwacjami.

Model taki, w którym na pewnym etapie deflagracja przechodzi w detonację, przez astrofizyków określany jest jako DDT (ang. *Deflagration to Detonation Transition*, przejście spalania w detonację). Przy odpowiednim wyborze miejsca, w którym przejście to nastąpi, zgodność z obserwacjami astronomicznymi jest bardzo dobra. Czy przejście takie jest możliwe? W warunkach ziemskich udaje się to osiągnąć – na tej zasadzie działa część zapalników pobudzających detonację. Detonator to urządzenie niezbyt skomplikowane, ale jego geometria i użyte materiały są starannie dobrane. Czy takie samo zjawisko może zajść dla rozchodzącej się prawie sferycznie fali deflagracyjnej w supernowej? Bez wchodzenia w zbędne szczegóły odpowiedź powinna brzmieć: nie.

2.4. Model DFD

Na początek mała dygresja. W ostatnich latach supernowe Ia, używane ze względu na ich powtarzalność jako indykatory odległości we Wszechświecie, nabrały ogromnego znaczenia. To w znacznej części na nich oparte zostały ogromnego ciężaru gatunkowego wnioski: Kosmos składa się z atomów w 4%, reszta to „ciemna materia” i „ciemna energia”. Co więcej, „ciemna energia” wykazuje jawnie antygravitacyjne własności, prowadząc do przyspieszania tempa ucieczki galaktyk. Nadal jednak nie mamy poprawnego i spójnego z prawami fizyki modelu supernowej typu Ia. Oczywiście, nic nie zabrania nam korzystać ze „świacy standardowej” (w postaci supernowej termojądrowej), której działania nie rozumiemy. Wątpliwości i niedosyt intelektualny jednak pozostają.

Taka mniej więcej sytuacja panowała, gdy polski astrofizyk Tomasz Plewa, pracujący wtedy na Uniwersytecie w Chicago, zaproponował niezwykle interesujący model **DFD** (ang. *Detonating Failed Deflagration*, detonacja nieudanej deflagracji). Od pewnego czasu wiadomo było, że wybuch termojądrowy w polu grawitacyjnym prowadzi do sferycznie rozchodzącego się płomienia tylko wtedy, gdy zapłon nastąpi prawie idealnie w centrum idealnie symetrycznego białego karła. W praktyce, zapłon w niewielkiej odległości, rzędu kilkunastu kilometrów od centrum (biały karzeł ma promień około 2000 km), powoduje powstanie płomienia kształtem przypominającego raczej grzyb atomowy. Zwykle „grzybów” tego „gatunku” jest podczas deflagracji przynajmniej kilka, a ich początkowa liczba czy położenie jest w zasadzie losowa. Astrofizycy starali się dosyć sztucznie zwiększać ich liczbę, bo to zwiększa tempo spalania. Co stanie się, gdy ograniczymy się do najbardziej naturalnego przypadku: jednego płonącego „bąbla”? Nie wyprodukuje on energii wystarczającej do rozerwania białego karła, ale spali sporo węgla i tlenu oraz zdeformuje go. Ponieważ „grzyb” unosi się cały czas do góry, wcześniej czy później musi „wyskoczyć” (dochodzi do tego po około sekundzie) na powierzchnię. W tym momencie na powierzchni gwiazdy tworzą się ogromne rozchodzące się koncentrycznie fale.

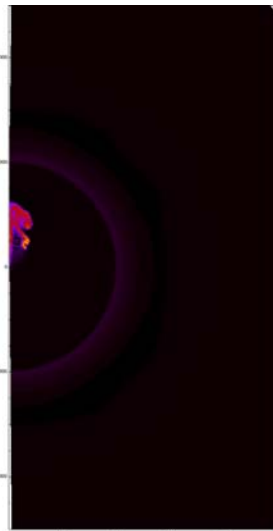
Przypominają one ziemskie fale tsunami. Na powierzchni białego karła nie ma jednak gór czy kontynentów. Rozchodzące się fale, nie napotykając na żadne przeszkody, obiegają (w czasie kilku sekund) powierzchnię gwiazdy i zderzają się w punkcie znajdującym się na antypodach. Zogniskowana energia jest wystarczająco duża, aby powstała fala uderzeniowa zadziałała jak zapalnik i pobudziła białego karła do detonacji. Fala detonacyjna w ułamku sekundy spala to, co pozostało po wcześniejszej, nieudanej deflagracji. Całe to zjawisko, od zapłonu deflagracji do wygaśnięcia detonacji, trwa około 5 sekund. Pomimo, że eksplozja jest bardzo asymetryczna, już kilka minut później trudno zauważyć niewielkie odstępstwo od sferycznej ekspansji (zobacz np. http://flash.uchicago.edu/~jbgallag/wd_det_8km_16rb_80off_movies/). Warto zwrócić uwagę, że w opisanym sekwencji nie ma żadnych „wyciągniętych z kapelusza” elementów. Model ten po raz pierwszy na świecie zademonstrował, w jaki sposób początkowe spalanie w nieuchronny sposób może prowadzić do opóźnionej detonacji, bez „ręcznego sterowania” prawami fizyki. A to jest jeden z głównych problemów teorii wybuchów supernowych typu Ia. Model ten (DFD) jest obecnie w trakcie porównywania z danymi astronomicznymi. Pierwsze wyniki tej analizy są obiecujące, ale ustalenie, czy wybuch supernowej Ia faktycznie przebiega według zaproponowanego przez T. Plewę scenariusza, wymaga dalszych badań, głównie symulacji komputerowych, jak również obserwacji.

Literatura

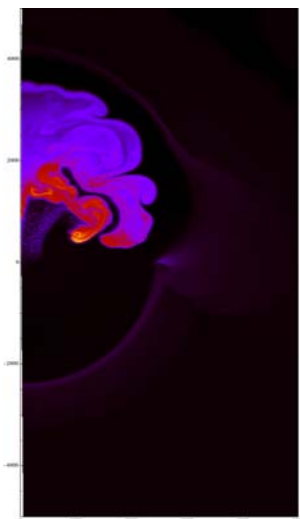
- W. Hillebrandt, H.-Th. Janka, E. Müller, *Rozsadzić gwiazdę*, „Świat Nauki” 11, 36–43 (2006).
- I. Asimov, *Supernowe*.
- A. Odrzywołek, *400 lat bez supernowej. Kiedy następna?*, Prace Komisji Astrofizyki PAU, Nr 10 (2006) 73–136, Eksplozje gwiazd, osobliwa materia w ich pozostałościach, astrofizyka otoczenia czarnych dziur i ogólna teoria względności.
- A. Odrzywołek, *Turbulencja w eksplozjach supernowych*, Prace Komisji Astrofizyki PAU, w druku.
- D. Kasen, T. Plewa, *Detonating Failed Deflagration Model of Thermonuclear Supernovae II. Comparison to Observations*, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0612198>
- T. Plewa, *Detonating Failed Deflagration Model of Thermonuclear Supernovae I. Explosion Dynamics*, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0611776>
- T. Plewa *et al.*, *Type Ia Supernova Explosion: Gravitationally Confined Detonation*, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0405163>
- Zbiór animacji i rysunków powiązanych z modelowaniem supernowych typu Ia: <http://flash.uchicago.edu/~jbgallag/>
- Symulacje płomienia termojądrowego: M. Zingale <http://astro.sunysb.edu/mzingale/>



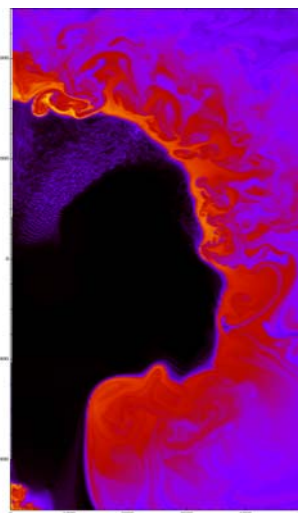
Rys. 3a. Biały karzeł w momencie zapłonu $t = 0$ (połowa przekroju południkowego). Pokazano rozkład temperatury w zakresie 0–10 GK (gigakelwinów) biały – 0 GK, czarny – 10 GK. Wyraźnie widać powierzchnię gwiazdy, oddzielającą zimne wnętrze gwiazdy od nieco gorętszego gazu na zewnątrz. Skala w kilometrach, model Y12 T. Płewy



Rysunek 3b. Dla $t = 1$ s wyraźnie widoczny jest płonący unoszący się do góry bąbel przypominający „grzyb atomowy”, który wkrótce „pęknie” na powierzchni



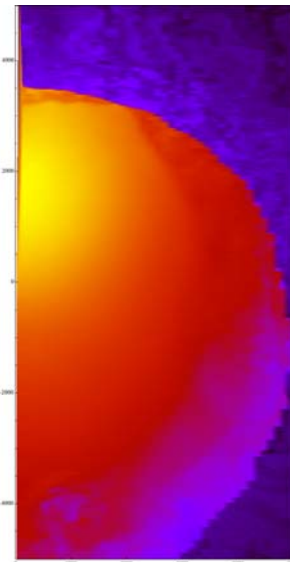
Rys. 3c. Dla $t = 1,5$ s „fala tsunami” osiągająca rejon równika



Rys. 3d. Dla $t = 3$ s, następuje zderzenie fal na antypodach, prowadząc do wzrostu temperatury i powstania fal uderzeniowych



Rys. 3e. Dla $t = 3,65$ s rozpoczyna się detonacja, która kończy się po około 0,5 s



Rys. 3f. Fala detonacyjna dla $t = 4,1$ s „skonsumowała” już całego białego karła

Zachęcamy czytelników do obejrzenia wersji internetowej artykułu z kolorowymi ilustracjami.