



Dr Maciej KOZŁOWSKI

Supernowa SN 1987a, którą mieszkańcy południowej półkuli mogli oglądać gołym okiem od 23 lutego do jesieni 1987 roku na tle Wielkiego Obłoku Magellana, przejdzie do historii astronomii nie tylko jako najjaśniejsza na niebie od czasów supernowej Keplera z 1604 roku, ale także jako supernowa niezwykła. Niezwykła nie tylko dlatego, że w maksimum blasku (około 20 maja 1987 r.) świeciła jako gwiazda trzeciej wielkości, a więc z mocą wystarczającą dla użycia najbardziej wyrafinowanych technik obserwacyjnych współczesnej astronomii, które umożliwiły prześledzenie wielu szczegółów będących dotychczas poza zasięgiem teleskopów, ale także z racji swej odmienności.

Zacząć trzeba od tego, że po raz pierwszy wiemy dokładnie, kiedy nastąpił wybuch supernowej. Tym razem stało się to 23 II 1987 r. o godzinie 7<sup>30</sup> czasu Greenwich, a więc na 22 godziny przed jej odkryciem optycznym przez Iana Sheltona w obserwatorium Las Campanas w Chile (pedant odejmie jednak od tego momentu 170 000 lat, czyli tyle, ile trwa wędrówka światła od Wielkiego Obłoku Magellana do Ziemi). W tamtej chwili trzy detektory, zbudowane zresztą w zupełnie innym celu – po to, aby zbadać hipotetyczny rozpad protonu w skali 10<sup>31</sup> lat – zanotowały niespodziewany, trwający około 10 sekund, błysk neutrin. Ścisłe – schwytano ich łącznie 21, w tym 11 w japońskim detektorze Kamiokande, 8 w amerykańskim IMB i 2 w radzieckim detektorze BAKSAN, ale że neutrina skrajnie słabo oddziałują z materią, oznacza to, że przez każdy centymetr kwadratowy przekroju Ziemi przeszło wówczas 10<sup>11</sup> neutrin. Nawiasem mówiąc, wszystkie one w drodze do detektorów musiały przesyć na wskroś kulę ziemską, jako że wymienione detektory znajdują się na szerokościach geograficznych, na których Obłoki Magellana są zawsze pod horyzontem. Ale cóż to dla neutrin ...

Dla ścisłości trzeba tu wspomnieć także o pięciu kłopotliwych neutrinach, zanotowanych przez radziecko-włoski detektor, umieszczony w tunelu pod Mont Blanc. Na swoje nieszczęście pośpieszyły się one aż o 4,5 godziny w stosunku do pozostałych neutrin, a w dodatku analiza ich energii prowadzi do wniosku, że supernowa wyemitowała energię 10-krotnie większą, niż to, co na gruncie naszej znajomości fizyki można uznać za rozsądne. Być może, przyszli fizycy wytłumaczą naturę tych neutrin, ale na razie doniesienie o ich rejestracji jest przyjmowane z rezerwą i we wszystkich analizach są one raczej pomijane.

Błysk neutrinowy przekonuje nas jednoznacznie, że przyczyną wybuchu była implozja („kolaps”) jądra gwiazdy – teoria mówi, że dzieje się to w ciągu setnych części sekundy i przydarza się gwiazdom najbardziej masywnym. Zapadnięte jądro tworzy gwiazdę neutronową,

a praktycznie cała jej energia wiązania grawitacyjnego zamienia się w energię ciepłą, powodując ogrzanie materii do fantastycznych temperatur sięgających 10<sup>12</sup> K i w efekcie produkcję termicznych neutrin, które w ciągu około 10 sekund prawie całą tę energię wynoszą w przestrzeń międzygwiazdową. Energię wiązania gwiazdy neutronowej możemy łatwo oszacować sami, przyjmując jej masę jako  $M = 1,5 M_{\odot}$  (symbol  $M_{\odot}$  oznacza tu masę Słońca, czyli  $2 \times 10^{30}$  kg) i promień  $R = 15$  km przy stałej grawitacyjnej  $G = 6,67 \times 10^{-11}$  Nm<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>

$$U = \frac{GM^2}{R} = 1,8 \times 10^{46} \text{ J.}$$

(Zauważmy, że Słońce w ciągu swego trwającego 4,5 miliarda lat życia wyprodukowało ponad 1000 razy mniej energii.) Skala czasowa 10 sekund bierze się stąd, że materia o gęstości przewyższającej tu 10<sup>14</sup> g/cm<sup>3</sup> jest dla neutrin nieprzezroczysta i tyle czasu zabiera im dyfuzja do powierzchni gwiazdy neutronowej, skąd już swobodnie ułatują, nie oddziałując z resztą gwiazdy ani – praktycznie – z niczym już więcej. Nawiasem mówiąc, energia świetlna emitowana przez supernową ( $8 \times 10^{41}$  J) i przewyższająca ją znacznie energia kinetyczna wyrzuconej materii ( $2 \times 10^{44}$  J) to łącznie zaledwie około 1% energii unoszonej przez neutrina! Wracając do zarejestrowanych neutrin: analiza ich energii, z uwzględnieniem faktu, że aparatura rejestrowała tylko antyneutrina elektronowe, podczas gdy teoria mówi, że w tych samych ilościach wyemitowane zostało także 5 innych gatunków neutrin, wskazuje na to, że jeśli wybuch nastąpił w Obłoku Magellana, to ich łączna energia była rzędu 10<sup>46</sup> J. A więc zgadza się ...

Konkurencyjny mechanizm, który lubimy przypisywać supernowym typu I, to eksplozywne zapalenie się węgla w jądrze gwiazdy, składającym się z materii zdegenerowanej – takiej, z jakiej zbudowane są białe karły. Są powody, aby przypuszczać, że w wyniku tej eksplozji następuje rozerwanie całej gwiazdy – sugeruje to teoria, a potwierdzają pozostałości po supernowych, których większość nie zawiera śladu obiektu centralnego. Natomiast neutrina – aczkolwiek są emitowane – to nie w takiej ilości, jak po grawitacyjnym zapadnięciu się jądra gwiazdy.

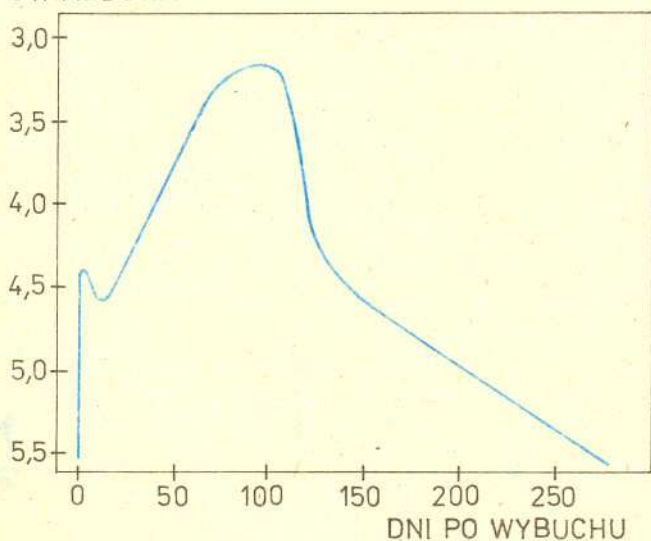
W tym miejscu pora na wyjaśnienie różnic między supernowymi typu I i II. Otóż już wkrótce po odkryciu supernowych (F. Zwicky, W. Baade – druga połowa lat trzydziestych) okazało się, że ich krzywe blasku (przedstawiające zmiany jasności w czasie) dzielą się wyraźnie na dwie kategorie, przy czym kategoria I jest bardzo jednorodna, natomiast krzywe kategorii II wykazują silne indywidualne zróżnicowania. Po przyjrzeniu się widmom supernowych wyodrębniono dodatkową cechę różniącą oba typy: w supernowych typu I nie widać



ślądu wodoru, natomiast w widmach supernowych typu II linie wodorowe są bardzo silne. Interpretacja tego i innych faktów przywiodła nas ku przeświadczeniu, że supernowa typu I to wybuch gwiazdy, niegdyś o masie 3 – 8  $M_{\odot}$ , która w czasie swego życia straciła większość materii, redukując się do węglowo-tlenowego zdegenerowanego jądra, z niezbyt masywną otoczką helową, helowo-wodorową, a jeszcze lepiej – z drugą towarzyszącą gwiazdą, powoli tracącą masę. Otoczką lub towarzysz potrzebne są po to, aby masa jądra mogła rosnąć, a gdy zbliży się ona do krytycznej wartości 1,4  $M_{\odot}$ , znanej jako granica Chandrasekhara, wówczas węgiel zapala się i następuje katastrofa, w wyniku której gwiazda przestaje istnieć. Z kolei gwiazda, która ma wybuchnąć jako supernowa typu II, musi mieć większą masę startową. Ewoluuje ona na tyle szybko, że jądro w przerwach między spalaniem się poprzedniego i zapaleniem się następnego pierwiastka nie ma czasu, aby ostygnąć na tyle, by materia w nim stała się zdegenerowana, a tylko zdegenerowana materia jest niebezpieczna. Do czasu ... Żelazo nie chce się już palić, bo spośród wszelkich pierwiastków nukleonów są w nim związane najsilniej. Powstanie żelaznego jądra o masie przewyższającej masę Chandrasekhara przesądza jego los: kurcząc się stopniowo, wcześniej czy później zostanie ono zgniecione przez narastającą siłę samograwitacji, nastąpi implozja, a reszta gwiazdy zostanie wyrzucona w przestrzeń z prędkościami sięgającymi 20 000 km/s.

Nieco uwagi trzeba poświęcić jeszcze krzywom blasku supernowych typów I i II. Statystyka jest tu spora – corocznie odkrywa się obecnie co najmniej kilkanaście supernowych w mniej lub bardziej odległych galaktykach. O skali czasowej narastania jasności wiemy mniej. Statystyka jest tu uboższa, bo zwykle zauważamy supernową dopiero w maksimum blasku. Często jest to jednak po 1 – 2 tygodniach. W epoce po maksimum blasku jasność supernowych typu I przez 1 – 2 miesiące spada szybciej, a potem następuje długi etap wolniejszego, liniowego w skali wielkości gwiazdowych, czyli eksponencjalnego w skali (liniowej) spadku jasności, zawsze

## JASNOŚĆ GWIAZDOWA



Rys.1. Krzywa blasku SN 1987a.

w tym samym tempie: o 50% w ciągu 60 dni. Krzywa blasku przypomina tu znaną ze szkoły średniej krzywą rozpadu promieniotwórczego. I nic dziwnego, bo ... supernowe typu I są promieniotwórcze! A wszystko to dzięki właściwościom materii zdegenerowanej, którą zapalenie się węgla ogrzewa na tyle mocno, że następuje wówczas cały łańcuch syntez jądrowych, w wyniku których połowa masy jądra zamienia się na nikiel 56. Ten jest  $\beta$ -promieniotwórczy i z połówkowym okresem rozpadu 6 dni zamienia się na kobalt 56, który też jest  $\beta$ -promieniotwórczy i z okresem połówkowym 77 dni rozpada się na żelazo 56. I to jest właśnie to! Rozpad promieniotwórczy ogrzewa materię, a ta świeci pod jego dyktando. Nie należy zapominać o ekspansji materii, w wyniku której jasność spada nieco szybciej niż skala czasowa rozpadu  $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ . Jeśli idzie o krzywe blasku supernowych typu II, to są one bardzo zróżnicowane i żaden ich element nie daje się tak prosto wyjaśnić, jak „ogon” krzywych blasku supernowych typu I.

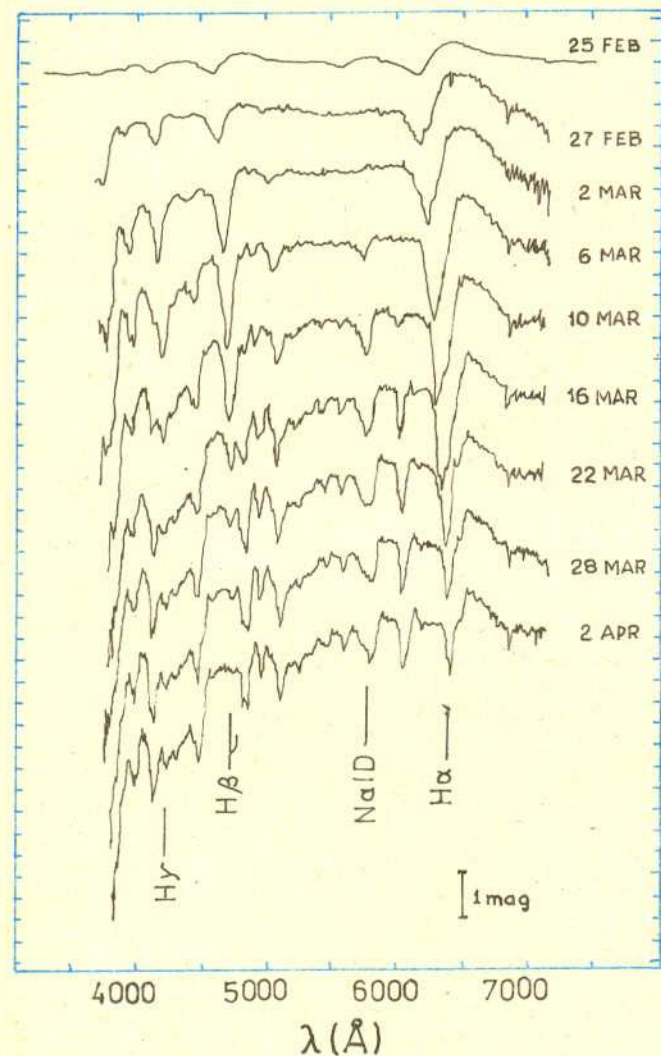
Powróćmy do SN 1987a. Natychmiast po jej odkryciu stało się jasne, że jest to supernowa typu II, ponieważ w jej widmie dominują charakterystyczne szerokie linie absorpcyjne wodoru. Tylko że jakaś ... słaba. Przeciętna supernowa typu II, wybuchając w odległości Wielkiego Obłoku Magellana, powinna osiągnąć blask gwiazdy pierwszej wielkości (supernowa typu I powinna być jeszcze jaśniejsza), tymczasem ta, choć pojaśniała rekordowo szybko, już w dobę po odkryciu zaczęła słabnąć, sięgając zaledwie wielkości gwiazdowej 4,5. To szybkie tempo zmian jasności jest zupełnym unikatem wśród supernowych – niczego podobnego dotychczas nie obserwowano! Znajduje jednak wyjaśnienie na gruncie tego, co wiemy o gwiazdzie, która wybuchła. Okazuje się bowiem, że po raz pierwszy w historii obserwacji supernowych wiemy, co wybuchło, i co więcej – wcale nie gwiazda bezimienna. Pozycja supernowej na niebie wskazuje na gwiazdę Sk-69.202 (Sk od nazwiska Sanduleak, autora katalogu jasnych gwiazd w Wielkim Obłoku Magellana) – niebieskiego nadolbrzyma (dla znawców astronomii: typu widmowego B3Ia), jedną z jaśniejszych (12,24 mag) gwiazd w Wielkim Obłoku Magellana.

I tu zdziwienie: teoria ewolucji gwiazd przyzwyczaiła nas do poglądu, że jako supernowe typu II wybuchają czerwone nadolbrzymy (dla ścisłości: nie każdemu z nich jest pisany ten los), a charakterystyki dotychczas obserwowanych supernowych raczej to potwierdzały. Specjaliści od teorii ewolucji, komentując niespodziankę – w najbliższym otoczeniu Sk-69.202 z pewnością nie było żadnego czerwonego olbrzyma – wyjaśnili, że nie ma tu jednak kryzysu teorii ewolucji gwiazd. W istocie nie wyklucza ona wybuchów niebieskich olbrzymów, a mówi jedynie, że są one mało prawdopodobne. Czynnikiem sprzyjającym są tu: niska obfitość pierwiastków cięższych niż hel w materii, z której gwiazda powstała, duża masa początkowa gwiazdy oraz silna utrata materii przez gwiazdę w trakcie jej życia. Pierwsza z tych okoliczności prawdopodobnie ma miejsce w przypadku Sk-69.202, ponieważ całe Obłoki Magellana są wyraźnie uboższe w pierwiastki ciężkie niż nasza Galaktyka. Specjaliści skłaniają się ku pogładowi, że Sk-69.202 w niedalekiej przeszłości była jednak czerwonym nadolbrzymem, tracąc w tym stadium sporo masy, która nie zdążyła zresztą daleko odpłynąć i da jeszcze o sobie znać w oddziaływaniu z produktami eksplozji.



Jeśli idzie o masę początkową Sk-69.202, to wnosimy, że była ona większa niż  $10 M_{\odot}$ . Próba modelowego odtworzenia tego, co zaobserwowano po wybuchu, najlepiej udaje się przy założeniu, że była to gwiazda o początkowej masie  $17 - 20 M_{\odot}$ , zredukowanej później do  $12 M_{\odot}$ . Jej struktura przed wybuchem wyglądałaby następująco: w środku żelazne jądro o masie około  $1,5 M_{\odot}$ , nad nim około  $2 M_{\odot}$  materii cięższej niż hel, powyżej warstwa zawierająca  $2,5 M_{\odot}$  helu i ponad tym helowo-wodorowa otoczka o masie  $6 M_{\odot}$ . Promień takiej gwiazdy wynosi około  $3 \times 10^{10}$  m, a więc 50 razy więcej, niż promień Słońca, zaś jej jasność przewyższa jasność Słońca 130 000 razy.

Model ten dobrze odtwarza szybkie zmiany jasności bezpośrednio po wybuchu: gwiazda gęsta i niezbyt rozległa szybko reaguje na przebiegającą przez nią falę detonacyjną niż czerwonololbrzym, którego promień potrafi przewyższać promień Słońca kilka tysięcy razy. Tłumaczy on nawet pewien wzrost jasności, który nastąpił poczynając od ósmego dnia po wybuchu, ale ... nie cały. Jasność zaś supernowej niespodziewanie rosła aż do 85 dnia po wybuchu, osiągając w maksimum 3 mag. Tęgo już nie da się wytłumaczyć prostym wyświecaniem energii materii ogrzanej przez falę uderzeniową.



Rys.2. Początkowe widma SN 1987a w dziedzinie widzialnej. Szerokie, przesunięte ku falam krótszym linie świadczą o ekspansji materii.

Potrzebny jest dodatkowy zastrzyk energii przechowanej jako od chwili wybuchu. Może pulsar? Silnie namagnetyzowana gwiazda neutronowa intensywnie wyhamowuje swój ruch obrotowy (na początku np. 1000 obr./s) mogąc w ten sposób dostarczyć olbrzymiej ilości energii do otaczającej ją materii. Sprawa wyjaśniła się definitywnie, kiedy po trwającym do 130. dnia od chwili wybuchu szybszym spadku blasku jasność poczęła spadać wolniej, w charakterystycznym tempie 0,01 wielkości gwiazdowej na dobę, czyli o połowę w ciągu 70 dni. A więc radioaktywna supernowa!

Ile promieniotwórczego niklu potrzeba, aby wytłumaczyć krzywą blasku SN 1987a? Otóż, nie tak dużo, jak w przypadku supernowych typu I. Wystarczy  $0,07 M_{\odot}$ . Nie implikuje to, że przyczyną wybuchu było zapalenie się węgla; nadal upieramy się, że nastąpiła tam implozja żelaznego jądra. Syntezę zaś pewnej ilości promieniotwórczego niklu przy wybuchu supernowej typu II niektórzy teoretycy nawet przewidywali ...

Spośród ciekawostek dotyczących supernowej warto wspomnieć, że średnica powierzchni świecącej jest już mierzalna. Np. w listopadzie 1987 roku wynosiła ona 0,02 sekundy łuku, co oznacza ekspansję ze średnią prędkością 4000 km/s. Jest to wyraźnie mniej niż maksymalna prędkość, wyznaczona z przesunięć dopplerowskich linii widmowych, przewyższająca 20 000 km/s, ale pamiętajmy, że najszybsze warstwy najszybciej stygną i przestają świecić.

Inną ciekawostką jest to, że SN 1987a to najjaśniejszy w historii astronomii obiekt pozagalaktyczny (mowa o jasności pozornej, a nie absolutnej). Na tyle jasny, że możliwa była rejestracja jego widm optycznych w wysokiej skali rozdzielczości. W widmach tych znaleziono około 30 systemów wąskich linii absorpcyjnych, pochodzących od różnych obłoków materii międzygwiazdowej, znajdujących się między Wielkim Obłokiem Magellana a nami. Z linii tych można dowiedzieć się wiele o odległościach, rozmiarach i składzie chemicznym obłoków (jeden z tych systemów należy prawdopodobnie powiązać z materią straconą przez Sk-69.202 przed wybuchem). Jest to najlepsze w historii prześwietlenie naszej Galaktyki, potwierdzające skądinąd, że SN 1987a leży poza jej granicami.

Z tych wszystkich powodów SN 1987a dołącza chwalebnie do słynnej kompanii sześciu historycznych supernowych naszego tysiąclecia, którą stanowią: SN 1006 (najjaśniejsza), SN 1054 (Krab), SN 1181 (3C58), SN 1572 (Tycho Brahe), SN 1604 (Kepler) i najbardziej tajemnicza, Cas A, której nikt nie widział, choć w zasadzie powinien, a która wybuchła gdzieś około roku 1680. Jest jednocześnie pierwszą supernową typu II odkrytą w galaktyce nieregularnej, choć z różnych powodów nie jest to niespodzianka - dotychczas pytaliśmy raczej, dlaczego w galaktykach nieregularnych wciąż odkrywa się same supernowe typu I. A może są one po prostu słabsze, podobnie jak słabszą okazała się SN 1987a?

Astronomia poświęca supernowym sporo uwagi nie bez powodu. Bez supernowych bowiem nie nastąpiłaby synteza wielu pożytecznych pierwiastków, a gdyby nawet nastąpiła, to pozostałyby one uwięzione we wnętrzach gwiazd. Nie miałyby z czego powstać Ziemia i siłą rzeczy, my sami.