

Садржај

Увод.....	2
1. Супернове.....	3
2. Спектри и криве сјаја супернових.....	3
3. Механизми настанка супернових.....	6
3.1. Гравитационе (колапсирајуће) супернове.....	6
3.2. Термонуклеарне супернове.....	10
4. Посматрања супернових.....	12
5. Значај супернових.....	14

Увод

Анализом електромагнетног зрачења које нам стиже од неког објекта добијамо информације о карактеристикама тог објекта: физичким параметрима, фази еволуције, хемијском саставу, итд. Објекти који се најчешће проучавају анализом зрачења су звезде. Звезде су сјајна, огромна тела са сопственим извором енергије. Посебну групу звезда чине променљиве звезде. Променљивим називамо оне звезде чији се сјај, ефективна температура, радијус и други параметри мењају током времена, као последица физичких процеса који се у њима дешавају. Проучавање променљивих звезда је важно за боље разумевање структуре и еволуције звезда. Неке класе променљивих звезда (RR Lyrae, cefeide) су битне за одређивање растојања до далеких звезданих система.

Основна информација о променљивим звездама садржана је у кривој сјаја, која представља промену привидне звездане величине (m) са временом (t). Према узроку и начину промене сјаја, променљиве звезде се могу поделити у две основне групе:

- 1) пулсирајуће променљиве и
- 2) катаклизмичне променљиве.

У групу катаклизмичних променљивих звезда су сврставане звезде са изненадним, непредвидивим бљеском, који се јавља због ерупције или експлозије. Према номенклатури која је усвојена 1993. године, у катаклизмичне променљиве звезде се убрајају нове и супернове. Најважнија карактеристика нових је да припадају тесно двојним системима (TDS) у којима долази до претакања масе између компонената. Супернове (SN) чине посебну класу звезда које могу, али не морају, бити у тесно двојним системима.

1. Супернове

Супернове су експлозије звезда, ретки догађаји који ослобађају огромну количину енергије током више месеци и који су посматрани још у античко доба. Почев од 1930. године, систематско посматрање стотина супернових у удаљеним галаксијама, посебно оно које су вршили Цвики и Минковски (Fritz Zwicky, Rudolph Minkowski)^[1], омогућило је боље разумевање њихових карактеристика као и механизма њихове експлозије. Године 1987. појава једне супернове у Великом Магелановом облаци у великој мери је потврдила теорије о експлозији масивних звезда.

2. Спектри и криве сјаја супернових

Према спектралним особинама супернове су разврстане у две главне категорије: тип I (SNI) и тип II (SNII). Спектри SNII имају апсорпционе линије карактеристичне за водоник, што није случај код SNI. Класа SNI је подељена на поткласе: SNIa (коју одликују јаке линије силицијума), SNIb (без силицијума, али са jakim линијама хелијума), SNIc (са линијама калцијума и гвожђа). Овакав изглед спектра долази до изражаја током првих недеља након експлозије. Неколико месеци касније долази до прелаза свих апсорпционих линија (насталих у непрозрачној атмосфери) у емисионе линије (насталих у средини која је углавном прозачна). Тада нпр. SNIa показују емисионе линије елемената у близини гвожђа (Fe, Co). Тај прелаз, апсорпционих у емисионе линије, карактеристичан је за атмосферу која се шири и све више разређује. Спектрални профил тих линија нам омогућава да меримо брзину ширења ($v \sim 5000-10000 \text{ km/s}$ за SNII и $\sim 15000-20000 \text{ km/s}$ за SNIa)^[1].

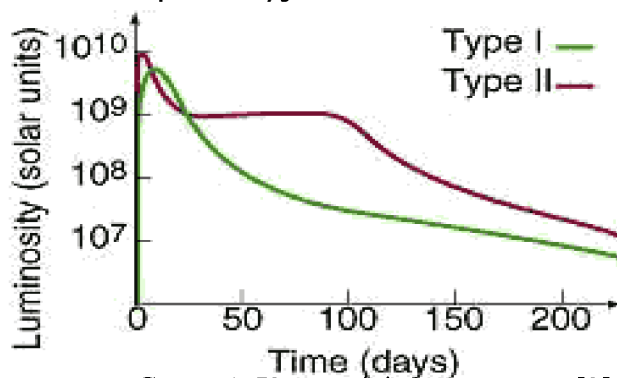
Супернове одликује њихова крива сјаја (промена сјаја са временом). Супернове типа SNIa имају врло типичне криве сјаја, са брзим растом после експлозије, исту максималну луминозност (10^{36} J/s - 10 милијарди пута већа од луминозности Сунца), правилан и брз први период опадања.

Максимум сјаја других типова супернових је 5 до 10 пута мањи од максимума сјаја SNIa док им се криве сјаја такође знатно разликују. Током месеци након експлозије супернова SNIa израчи

10^{42} J енергије, што је само 1% од укупне енергије. Осталих 99% се ослобађа у облику кинетичке енергије. Сличан однос важи и за супернове типа SNII, код којих је укупна енергија 10^{46} J,^[5] с тим што значајан део енергије односе и неутрини.

SNIa достижу свој максималан сјај за око недељу дана и он траје неколико дана. Криве сјаја супернових овог типа су најчешће сличног облика. Након максимума, наредних 20 до 30 дана, сјај почиње да опада за $0,1^m$ на дан, а затим се опадање успорава на $0,014^m$ на дан. Апсолутни сјај ових експлозија, у тренутку максимума достиже -19^m . Разлика звезданих величина пре експлозије и након максимума, тј. амплитуда промене сјаја износи око 20^m . Супернове овог типа забележене су у свим типовима галаксија и у просеку се јављају једном у 650 година. Старост звезда које експлодирају као SNIa процењује се на 10^{10} година.

У тренутку максимума спектар је континуиран, а након тога у њему се виде спектралне линије јона гвожђа, калцијума, силицијума, сумпора, аргона и неутралног хелијума, али нема линија водоника. На основу спектра може се закључити да је за време



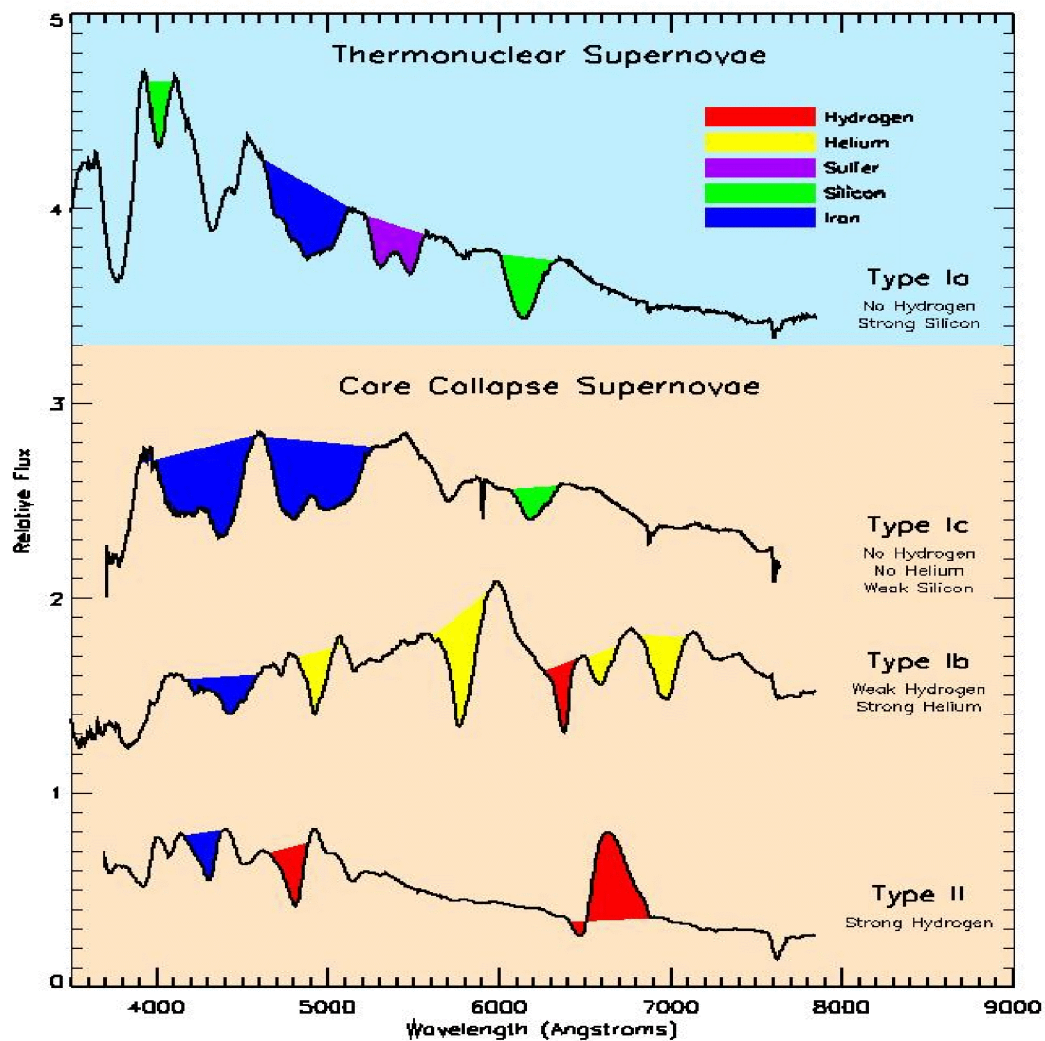
Слика 1. Криве сјаја супернових [3]

максимума температура атмосфере око 20000 K, а затим опада на око 5500 K. У спектрима је уочљив плави помак линија. Овај помак је последица облака који се шири након експлозије и то брзинама од 5000 km/s до 20000 km/s.^[1] У време максимума сјаја, фотосфера звезде достиже такве димензије, да је десетине пута већа од пречника Земљине орбите око Сунца, а снага зрачења овакве експлозије је неколико милијарди пута већа од снаге зрачења Сунца. Током експлозије звезда ослобађа енергију у виду електромагнетног зрачења, магнетног поља и врло брзих честица, а највећи део одлази на кинетичку енергију облака који се шири.

Супернове типа II настају као последица еволуције врло масивних звезда. Оне су чешће него SNI, али њихова звездана величина је мања и износи око -17^m . Криве сјаја се разликују од оних код SNI по ужем максимуму, односно SNII у стању максимума проводе мање времена него SNI. У првих 100 дана сјај SNII опада споро, али након тога много брже него код SNI. Спектар у максимуму сјаја је континуалан, затим се појављују линије водоника, хелијума и других елемената. На основу спектралних

линија закључено је да се гасни омотач ових супернових шири брзином између 6000 и 12000 km/s^[1]. Маса гаса избаченог приликом експлозије је између 1 и 10 соларних маса.

SNII се јављају код спиралних галаксија и њихова учесталост је око 1,5 пута већа од учесталости SNI. Јављају се у спиралним крацима, далеко од галактичког центра, односно у областима где се налазе масивне звезде спектралних класа О и В. Еволутивни пут ових звезда је доста брз, тако да експлодирају као SNII након 10⁶ до 10⁸ година од свог настанка. Велика маса звезда, која може бити већа од 8 соларних маса, омогућава да се, за релативно кратко време, одигра комплетан циклус термонуклеарних реакција. У њима се одвијају фузиони процеси, све до добијања гвожђа.



Слика 2. Спектри супернових [4].

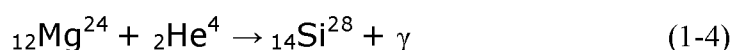
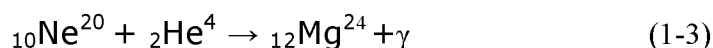
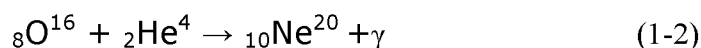
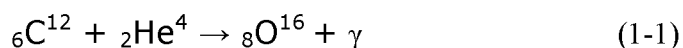
3. Механизми настанка супернових

Један механизам настанка супернових је гравитациони колапс недегенерисаног језгра врло масивне звезде. Други механизам је експлозивно паљење белог патуљка, ако је акрецијом масе у тесно двојном систему прешао Чандрасекарову границу. Постоји још могућност да супернова настане експлозивним паљењем дегенерисаног језгра старе усамљене звезде.

3.1. Гравитационе (колапсирајуће) супернове

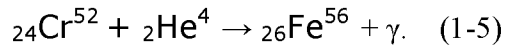
Гравитационим суперновама се назива већина супернових (SN II, SNIb, SNIc), док се супернове типа Ia називају термонуклеарним суперновама.

Након што се истроши сав водоник у звезданом језгру, долази до нарушавања равнотеже између притиска гаса и зрачења, са једне, и гравитационе силе са друге стране. Због тога долази до гравитационог сажимања које обезбеђује повећање температуре. На вишим температурама (реда 10^8 K) почињу реакције сагоревања хелијума. Након што се истроши хелијум, долази до гравитационог сажимања, при чему унутрашњост звезде постаје све гушћа и топлија. Тако се стварају услови за сагоревање све тежих елемената. Реакције фузије тежих елемената су приказане једначинама^[2]:

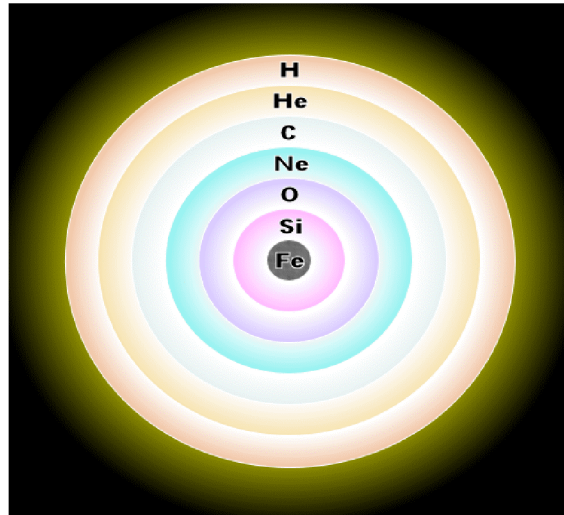


Фузијом тежих језгара ослобађа се мања енергија по јединици масе, него при фузији лаких језгара. Ови процеси обезбеђују равнотежу звезде и све краће трају. Формирање тежих

елемената, захватима α честица, траје све до реакције у којој настаје ${}_{22}\text{Ti}^{44}$. Пошто је нестабилан, ${}_{22}\text{Ti}^{44}$ се распада дајући изотоп ${}_{20}\text{Ca}^{44}$. Даљим захватима α честица настају изотопи ${}_{22}\text{Ti}^{48}$ и ${}_{24}\text{Cr}^{52}$, при чему ${}_{24}\text{Cr}^{52}$ учествује у реакцији настанка гвожђа:



Код старих звезда када се истроши хелијум у језгру, остаје обиље тежих елемената. Тада, при високим температурама, нема више захвата језгара хелијума, већ долази до фузије тежих језгара. Температура потребна за фузију Si^{58} у Fe^{56} , које је последњи продукт термонуклеарних реакција у



Слика 3. Сагоревање све тежих елемената (према [3]).

језгру звезде, је око $5 \cdot 10^9$ К. Елементи тежи од гвожђа формирају се захватом неутрона у језгро, али те реакције не производе енергију, већ захтевају утрошак енергије.

Након што истроши гориво у језгру све до гвожђа, масивна звезда постаје нестабилна и обрушава се ка свом центру. Колапсом звезданог језгра температура у њему расте до $10 \cdot 10^9$ К. На тако високој температури γ фотони изазивају фотодезинтеграцију гвожђа ($\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13 \text{He} + 4\text{n}$) уз нагло хлађење околине (ендотермна реакција). Овај колапс траје мање од једне секунде (тачније неколико милисекунди) и при томе се поништавају процеси фузије. Језгро се састоји само од протона, електрона и неутрона. При великим густинама и притисцима електрони се убрзавају до ултарелативистичких брзина. Електрони при судару са протонима производе реакцију:



Неутрини напуштају звезду, а произведени неутрони се сабијају на још мању запремину, дајући дегенерисано неутронско језгро. Такво језгро има густину већу од 10^{12}g/cm^3 . Због велике густине и притиска долази до успоравања и заустављања сажимања језгра. Виши слојеви при паду ударају у језгро, затим

као да се еластично одбију (слика 4.) и образују талас материје који се креће од језгра ка површини звезде. Пролазећи кроз све ређу средину талас се убрзава и постаје ударни. Он на свом путу ка површини загрева спољашње слојеве (у којима могу почети термонуклеарне реакције) и уз експлозију разноси звездани омотач. Колапс недегенерисаног језгра врло масивне звезде је имплозивно-експлозивни процес.

Заробљени током неколико секунди у густом језгру, неутрини, који на тако високим температурама настају у великом броју, пролазе кроз језгро. Око 10^{58} неутрина односи готово сву енергију урушавања ($\sim 10^{46}$ J) и пролази кроз зону у којој ударни талас троши енергију на подизање слојева који брзо падају ка центру. Довољно је да се само 1% енергије неутрина пренесе материји у тој области, да би тако "освежен" ударни талас доспео до дна омотача и да би дошло до експлозије. Сматра се да је овакав механизам експлозије, уз помоћ неутрина, једини способан да изазове експлозију звезда масивнијих од 15 маса Сунца.

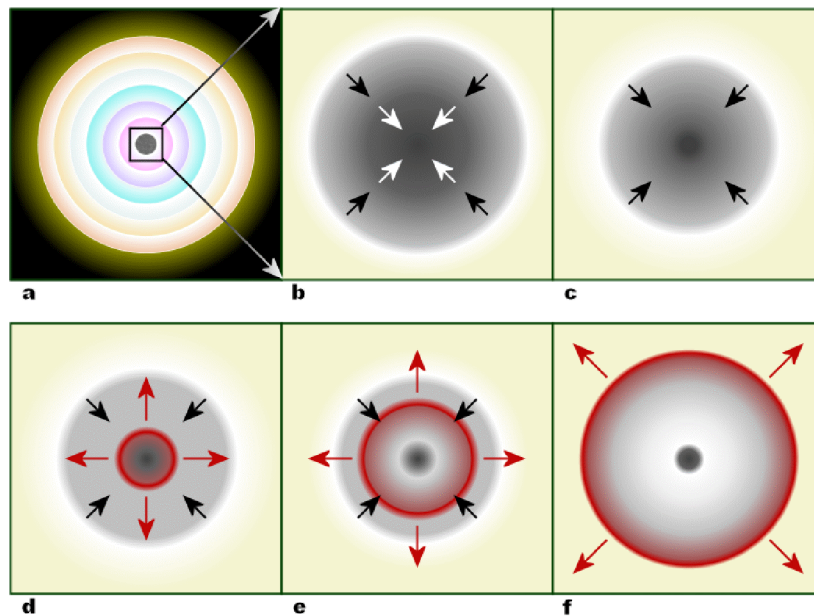
Ударни талас погађа дно звезданог омотача десет секунди након напуштања језгра, подиже га и избацује у околни простор. Слојеви који сачињавају језгро нагло се загревају до температура од неколико милијарди К. Током тих неколико секунди, експлозивна нуклеосинтеза мења хемијски састав слојева производећи мање стабилна језгра од оних које је звезда раније синтетисала.

Ударни талас стиже до површине звезде за неколико сати или неколико дана након урушавања језгра (у зависности од величине омотача која зависи од претходног губитка масе). Површински слојеви се загревају до неколико стотина хиљада степени и тада експлозија постаје видљива услед снажног бљеска X и UV зрака. Луминозност супернове зависиће од односа њеног ширења (које повећава емисиону површину $\sim 4\pi R^2$) и њеног хлађења (које смањује снагу израчену по јединици површине, σT^4). На крају преовладава хлађење, али неминовно смањивање луминозности може каснити услед "споре" енергије. Реч је о радиоактивности нестабилних језгара насталих у експлозији, попут $^{56}_{27}\text{Co}$, који је настао брзим распадањем $^{56}_{28}\text{Ni}$. Распадање $^{56}_{27}\text{Co}$ и $^{56}_{26}\text{Fe}$ током периода од 11 недеља полако ослобађа енергију која загрева омотач, што објашњава правилно опадање кривих сјаја код SNII током више месеци након експлозије.

Механизам експлозије је код SNIb и SNIc у суштини исти као претходно описан (који се односи на SNII). Долази до урушавања гвозденог језгра масивне звезде. Разноврсност њихових спектра и кривих сјаја потиче од различитих својстава њихових омотача. Звезде које свој живот завршавају експлозијом супернове типа II

сачувале су свој проширени омотач од водоника, док су га оне које су типа SNIb и SNIc изгубиле, чиме се објашњава присуство тежих елемената у њиховим спектрима. Тај губитак омотача је изазван или јаким звезданим ветром, или привлачним дејством друге компоненте у пару (у случају тесно двојних система).

Експлозије масивних звезда остављају на месту урушеног гвозденог језгра, један изузетно компактан остатак: неутронску звезду, или црну рупу, у зависности од масе. Од омотача настаје маглина која се шири-SNR (supernova remnant). SNR се шири брзином од 10^3 до 10^4 km/s^[2] и извор је нетермалног, поларизованог зрачења у видљивој, X, UV и радио области. Таква маглина је богата тешким елементима.



Слика 4. Имплзивно-експлозивни процес код гравитационих супернових [3].

3.2. Термонуклеарне супернове

За разлику од гравитационих супернових, механизам термонуклеарних супернових у великој мери зависи од претходне историје тесно двојног система чији су оне део. Масивнија звезда једног таквог система прва стиже до краја живота и преображава се у белог патуљка масе до 1.4 масе Сунца, ако је почетна маса те звезде била мања од 8 маса Сунца. Друга звезда у систему постаје црвени џин, а њен проширени омотач почиње да бива привлачен гравитацијом белог патуљка. Омотач богат водоником доспева у акрециони диск који се формира око белог патуљка. Након што изгуби један део своје енергије трењем, зрачењем, турбуленцијом, материја пада из акреционог диска на површину белог патуљка. Слој водоника сабијен на површини белог патуљка почиње да гори, мирно или експлозивно, у зависности од тога да ли је његово прикупљање било споро или брзо. Експлозија нове се може повремено десити на површини белог патуљка, што је прилично бурна појава, мада хиљадама пута мање интензивна од супернове, тако да се не разара двојни систем. У овим случајевима остаци сагоревања водоника нагомилавају се на површини белог патуљка чија се маса постепено повећава.

Када маса белог патуљка пређе Чандрасекарову границу од 1.4 масе Сунца, притисак дегенерисаног гаса релативистичких електрона не може више да уравни тежи гравитациону силу. Звезда се нагло урушава, а њена температура расте до неколико стотина милиона келвина. На 500 милиона келвина почиње фузија језгара угљеника, олакшана великом густином. Енергија ослобођена тим сагоревањем загрева средину, али овај гас, за разлику од идеалног, не реагује ширењем (што би га охладило), јер његов притисак не зависи од температуре. Притисак дегенерисаног гаса p_d расте са повећањем густине ρ . То је приказано у једначинама (2-1) и (2-2)^[2].

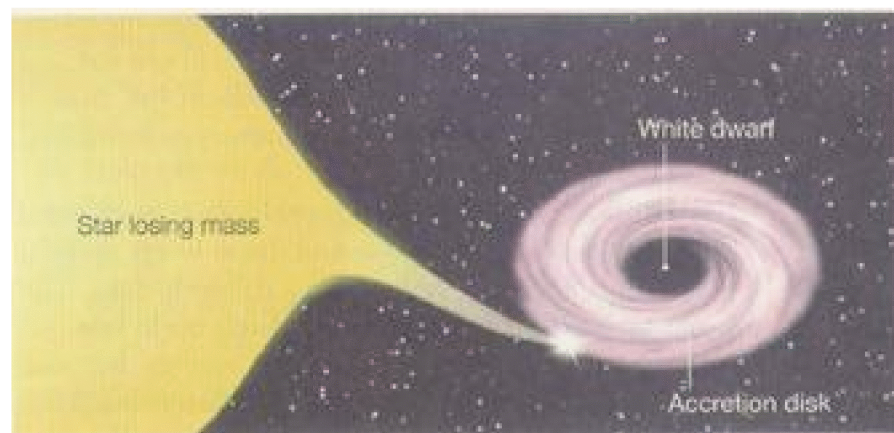
$$p_d = k' \cdot \rho^{5/3} \quad (2-1)$$

$$p_d = k'' \cdot \rho^{4/3}, \quad (2-2)$$

где су k' и k'' константе.

Једначина (2-1) се односи на притисак дегенерисаног гаса нерелативистичких електрона, а једначина (2-2) на притисак гаса релативистичких електрона.

Фузија почиње скоро истовремено свуда у унутрашњости и у целој звезди настаје детонација угљеника. Према моделима, половина Чандрасекарове масе се претвара у никал. Мање тешка језгра калцијума и силицијума настају у спољним слојевима које загрева фронт паљења који стиже до површине за мање од једне секунде. Ослобођена термонуклеарна енергија потпуно разара белог патуљка.



Слика 5. Бели патуљак привлачи масу са пратиоца (према [5]).

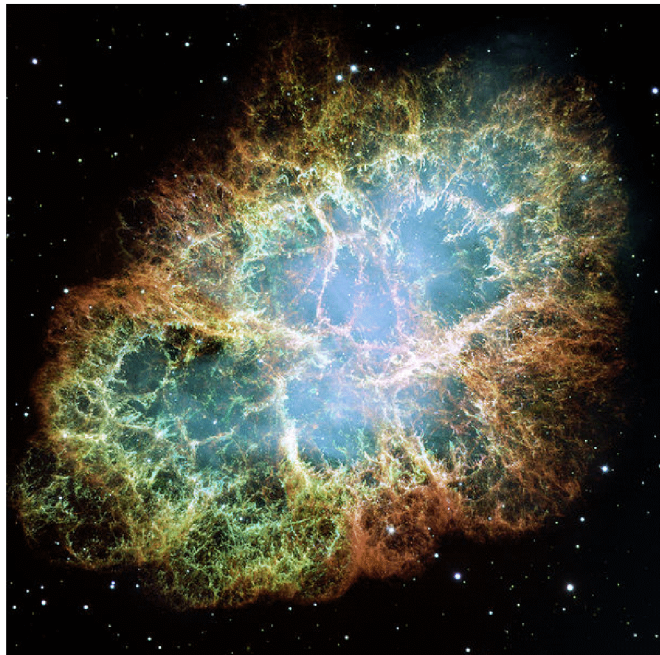
4. Посматрања супернових

Као и нова, супернова је звезда чији се сјај изненада, драстично повећа, затим се полако смањује, ишчезавајући са неба. У неким случајевима криве сјаја блиских нових и удаљених супернових могу бити врло сличне и због тога се, скоро до 1920. године, сматрало да се у оба случаја ради о истој појави.

Термин супернова први пут се јавио 1934. године и означава експлозије звезда са емитованом снагом већом од 10^{33} W.

Супернове се не дешавају често као нове. Сматра се да се у галаксијама у просеку деси једна експлозија сваких 200 година^[5]. У галаксијама изван наше оне се теже уочавају, јер је њихова привидна величина мала због велике удаљености. До данас је забележено неколико хиљада супернових. Једна од најпознатијих је она из 1054. године у сазвежђу Бика. Ова супернова је могла да се види и голим оком и то не само ноћу, већ и током дана. Дању се могла видети око месец дана, а на ноћном небу је сијала две године. Ова супернова је забележена у јапанским и кинеским

аналима. Бљеснула је изненада и имала је сјај између -6^m и -7^m . Сјај јој је опао на $+6^m$, када је престала да буде видљива голим оком. Ова супернова је највише допринела разумевању саме појаве, јер се на њеном месту налази Краб маглина, један од највише изучаваних објеката на небу. Из брзине ширења маглине (око 1300 km/s) и њених данашњих димензија израчунато је да је стара око 950 година, што представља време од експлозије супернове, а 1969.



Слика 6. Краб маглина [3].

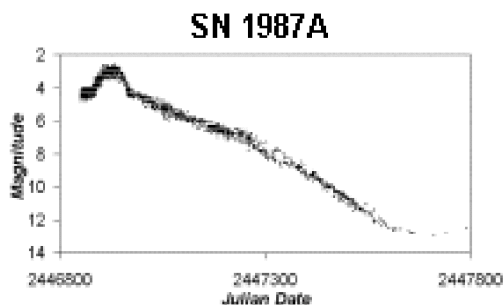
године је откривен пулсар у њеном центру. Супернове су ретки догађаји. У последњих 1000 година, у нашој галаксији виђено је свега пет супернових. Једну је посматрао Тихо Брахе 1572. године и дао јој је име *Stella Nova*. Она је за неколико дана постала

сјајнија од Венере, њен сјај је затим слабио, да би после две године ишчезла.

Последња супернова у нашој галаксији била је 1604. године (пре открића телескопа), а оне које данас бивају регистроване у удаљеним галаксијама слабо се виде ($15^m < m < 20^m$). Супернова 1987 А је тип II супернове која је експлодирала у Великом Магелановом облаку. Први пут је посматрана 23. фебруара 1987. године. Достигла је максимум привидне величине од 2.8^m средином маја исте године. То је била прва супернова од 1604. године која је достигла сјај видљив голим оком и која је остала видљива све до краја 1987. Ова супернова је по многим карактеристикама атипична. Звезда родитељ јој је био плави суперџин^[2] спектралне класе В3, супротно претпоставкама да супернове типа II потичу од црвеног суперџина. На месту експлозије није регистрован пулсар. Запажене су линије γ зрачења из радиоактивног распада Co^{56} и Fe^{56} , што потврђује да тешки елементи настају у суперновама.

За само неколико дана сјај супернове порасте неколико стотина милиона пута. Најчешће апсолутни сјај достиже -15^m , а некад чак и -20^m , па су због тога неке од њих сјајније и од галаксије у којој се налазе. Пример овакве експлозије је супернова из 1937. године, која је експлодирала у галаксији IC4182 и била је око 100 пута сјајнија од те галаксије.

Супернова ствара бљесак светлости који је милијарду пута сјајнији од Сунца и тај сјај достиже за неколико сати. Укупна енергија електромагнетног зрачења које супернова емитује током неколико месеци, тј. од када њен сјај почне да расте, па све док сасвим не ослаби, износи 10^{44} J- скоро онолико енергије колико ће Сунце емитовати током целог свог живота. Много већи део енергије односе неутрини, који настају у језгру умируће звезде.



Слика 7. Крива сјаја за SN 1987 А [2].



Слика 8. SN 1987 А пре и после експлозије [5].

5. Значај супернових

Идентификација хемијских елемената у спектру супернове је отежана, због тога што су спектралне линије проширене и деформисане великим брзинама истицања материје и високим температурама. Изучавање супернових (које су и најспектакуларнији астрономски феномен) битно је због синтезе тежих хемијских елемената (експлозивна нуклеосинтеза). Супернове су догађаји који обезбеђују постојање тешких елемената у данашњим количинама. Хемијски елементи који преовлађују у Космосу су водоник и хелијум, али су за живот, органске молекуле, биолошке процесе, физичке процесе, за изградњу појединих система у природи, укључујући људски организам (у коме се налазе магнезијум, калцијум, гвожђе...) неопходни тешки елементи. Присуство ових елемената обезбеђују супернове. Супернова представља једну етапу звездане еволуције и због тога је проучавање супернових битно, јер омогућава кориговање теоријских модела који се односе на еволуцију звезда. Катаклизмични догађај, какав је супернова доводи до настанка црних рупа и неутронских звезда, до настанка космичких зрака (α честице, протони, електрони,..), иницира процесе формирања звезда. Ударни талас настао при експлозији супернове може да индукује гравитационо сажимање облака међузвездане материје. Даље сажимање и загревање материје све до температура и притисака довољних за почетак термонуклеарне фузије доводи до настанка звезде. На тај начин супернова (ударни талас) бива "иницијатор" настанка звезде. Супернове типа Ia се могу користити за одређивање галактичких растојања, као стандардне свеће. Све имају исти апсолутни сјај који износи око -19^m . Чињеница да је познат апсолутни сјај неког објекта омогућава да се тај објекат користи као стандардна свећа, односно омогућава одређивање растојања на основу посматраног (мереног) сјаја тих објеката.

Литература

- [1] Geogre W. Collins, *The fundamentals of stellar astrophysics*, 2003. Филадельфија.
- [2] Мирјана Вукићевић-Карабин, Олга Атанацковић Вукмановић, *Општа астрофизика*, 2004. Београд.
- [3] <http://wikipedia.org/>
- [4] <http://supernova.lbl.gov/>
- [5] <http://scienceblogs.com/>