

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA MAXSUS
TA'LIM VAZIRLIGI**

**ALISHER NAVOIY NOMIDAGI SAMARQAND
DAVLAT UNIVERSITETI**

FIZIKA FAKULTETI

ASTRONOMIYA YO'NALISHI

ASTROFIZIKA KAFEDRASI

**YULDUZLAR EVOLYUTSIYASINING OXIRGI
STADIYALARIDAGI NUKLEOSINTEZ
JARAYONLARI**

Malakaviy bitiruv ishi

Bajaruvchi: Irgasheva X.

Ilmiy rahbar: dots.T.A.Alimov

Malakaviy bitiruv ishi Astrofizika kafedrasida bajarildi. Kafedraning 2012 yil 24 maydagi majlisida muhokama qilindi va himoyaga tavsiya etiladi (bayonnoma № 13).

Kafedra mudiri:

dots.T.A.Alimov

Malakaviy bitiruv ishi YaDAKning 2012 yil “___” _____dagi majlisida himoya qilindi va _____ ball bilan baholandi (bayonnoma № ____).

YaDAK raisi: _____

A'zolari: _____

Samarqand – 2012

M U N D A R I J A

Kirish

Bob – I. Yulduzlar evolyutsiyasi jarayoni to'g'risidagi umumiy ma'lumotlar

§1.1. Yulduzlar evolyutsiyasining asosiy etaplari

§1.2. Yulduzlarning evolyutsiyalarini belgilovchi reaksiyalar

Bob – II. Yulduzlar evolyutsiyasining oxirgi stadiyalari

§2.1. Uglerod va kislorodning yonishi

§2.2. Kremniyning yonishi

§2.3. Neytronlar ta'siri ostida o'tuvchi jarayonlar. S-jarayon

§2.4. O'ta yangi yulduzlardagi nukleosintez jarayoni.

Bob – III. Yulduzlar evolyutsiyasining oxirgi stadiyalarida hosil bo'luvchi obyektlar

§3.1. Oq karliklar

§3.2. Neytronli yulduzlar

§3.3. Qora tuynuklar

§3.4. Neytronlar ta'siri ostida o'tuvchi jarayonlar. r-jarayon.

Xulosalar

Foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati

KIRISH

Koinotda eng ko'p tarqalgan ob'yektlar yulduzlar hisoblanadi. Kosmik muhit massasini qariyb 38 % i ana shu gazli sharlarda taqsimlangandir. Yulduzlarning evolyutsiyasi bilan tabiatda mavjud bo'lgan deyarli barcha kimyoviy elementlarni paydo bo'lishi bog'liqdir. Shuning uchun yulduzlarni o'rganilishi nafaqat kimyoviy ob'jekt sifatida, balki materiyani hosil bo'lishini ma'lum bosqichini aniqlashda o'ta muhimdir.

Nazariy astrofizikani ko'rsatishicha yulduzlar qa'rida nukleosintez jarayonlari natijasida turli elementlar atom yadrolari tug'iladi. Yuqori bosim va temperaturalarda bir elementar zarralarni ikkinchisiga aylanish jarayonlariga termoyadro reaksiyalari deyiladi. Termoyadro reaksiyalari amalga oshishi uchun bir nechta ketma-ket o'tuvchi jarayonlar vujudga kelishi kerak:

1) Ikki zarrani o'zaro ta'siri; 2) o'zaro ta'sir etuvchi zarralardan biri ikkinchi zarrani o'rab olgan potensial to'siqni yorib kirishi kerak va 3) gamma – fotonni nurlanishi yoki pozitronni va neytrinolarni chiqarilishi bilan o'tuvchi yadro o'zaro ta'siri amalga oshishi kerak. Termoyadro reaksiyalari ichida eng asosiysi vodorod 4 ta yadrosidan (protondan) bitta geliy yadrosi hosil bo'lish jarayonidir. Geliy yadrosi ikkita proton va ikkita neytronlardan tashkil topgan bo'ladi. Bunday reaksiya jarayonida ikkita protonni neytronga aylanishi va neytrinolarni nurlanishi vujudga keladi. 4 ta protonni geliy yadrosiga aylanishi termoyadro reaksiyasiga protonli sikl termoyadro reaksiyasi deyiladi. Protonli sikl termoyadro reaksiyalari Quyoshga o'xshagan yulduzlar tarkibida nisbatan past temperaturalarda amalgam oshadi. Yana uglerod – azotli sikl deb ataluvchi termoyadro reaksiyalari ham mavjud bo'lib, bunday reaksiyalar massasi Quyosh massasidan katta, qa'ridagi temperatura yuqori yulduzlarda kechadi. Uglerod – azotli sikl (CN - sikl) termoyadro reaksiyalarida, uglerod va azot yadrolari reaksiya katalizatori rolini o'ynaydi, ya'ni bu yadrolar termoyadro reaksiyasi oxirida yana paydo bo'ladi.

Protonli sikl tufayli yulduzlar o'z hayot yo'lini milliard yillar davomida o'tsa, CN – sikl tufayli esa bir necha o'n million yilda o'tadi, ya'ni CN – sikl

protonli siklga nisbatan tez o'tuvchi jarayondir. Nazariyani ko'rsatishicha CN – siklda protonli siklga nisbatan ko'p energiya ajraladi.

Nazariy astrofizika yulduzlarning temperaturasiga bog'liq ravishda qancha energiya ajralishini hisoblash imkoniyatiga egadir.

Yulduzlar qa'rida protonlar zaxirasi tamom bo'lgandan keyin yulduz siqilishi natijasida temperatura bir necha yuz million kelvingacha oshib geliy yadrolarini berilliy yadrolariga, keyinchalik uglerod, azot va hokazolar temir yadrolarigacha sintez qilinadi.

Ko'rsatilishicha yulduzlar qa'rida termoyadro reaksiyasi natijasida kimyoviy elementlar yadrosiga qadar davom etadi. Yanada og'irroq atom yadrolarining hosil bo'lishi chog'ida energiya ajralmaydi va shuning uchun yadro reaksiyalari yulduzni hamma kimyoviy elementlar temirga aylangunicha energiya bilan ta'minlab turadi. Temirdan og'irroq elementlar yadrolari portlash tarzidagi jarayonlar vaqtidagina masalan, o'ta yangi yulduzlar chaqnashlari paytida sintezlanishi mumkin.

Massasi katta bo'lgan yulduzlarning umri oxiridagi evolyutsiyasi halokatli tarzda kechadi. Yulduzning yadro energiya manbalari tugagach, u o'zining gravitatsiya kuchi ta'siri ostida keskin siqiladi. Shunda portlash tarzida ajralib chiqqan ulkan gravitatsion energiya, yulduz qobig'ini fazoga uloqtirib tashlaydi. Ushbu jarayonga o'ta yangi yulduzning chaqnashi deyiladi. Bu jarayonda zarbaviy to'lqin ham tarqalib, o'zi bilan olib ketayotgan gazni juda katta haroratgacha qizdirib yuboradi. Zarbaviy to'lqin fronti ortida kechayotgan termoyadroviy reaksiyalar jarayonlarida uran va toriygacha bo'lgan og'ir elementlarning sintezi yuz beradi.

Bob – I. Yulduzlar evolyutsiyasi jarayoni to'g'risidagi umumiy ma'lumotlar

§1.1. Yulduzlar evolyutsiyasining asosiy etaplari

Hozirgi vaqtda biz koinotni 10-20 mlrd. yil yorug'lik yiliga teng bo'lgan masofasi masshtabigacha tuzilishi to'g'risida gapirishimiz mumkin. Biz ko'ramizki koinotning bu oblasti materiyaning juda kompakt konsentratsiyalashgan (sayyoralari bilan birgalikda galaktikalarni hosil qiluvchi yonuvchi va so'nuvchi yulduzlar sistemalari) qismlari va ular orasidagi juda katta bo'shliqdan tashkil topgan. Buning hammasi muhit va nurlanish bilan (neytronlarni qo'shgan holda) to'ldirilgandir. Muhit yulduzlarda va sayyoralarda asosan nuklidlar (Z dona proton va N dona neytronlardan tashkil topgan yadrolar) ko'rinishida ($Z=1$ vodoroddan tortib $Z=92$ urangacha bo'lgan 92 ximiyaviy element) konsentratsiyalashgan. Koinotning yadroviy tarkibining turli ko'rinishlari taxminan 300 ta nuklidgacha oqib kelib, fanning hozirgi darajasi bu nuklidlarni qanday paydo bo'lganligini va ularni taqsimlanishini tushuntira oladi.

Tabiiy sharoitda bu nuklidlar qanday paydo bo'lgan? Hozirgi vaqtda aniqlanishicha koinotning ximiyaviy elementlari yulduzlar evolyutsiyasi jarayonida paydo bo'lgan. Yulduzlar hosil bo'lishi nimadan boshlanadi? Hozirgi vaqtda aniqlanishicha faqatgina bizning galaktikamiz – somon yo'li taxminan 100 mlrd yulduzdan tashkil topgan. Yulduzlar hozirgi vaqtda ham koinot paydo bo'lishidan 10-20 mlrd yil keyin ham tug'ilyapti. Yulduzlar gravitatsion kuch ta'siri ostida ulkan molekulyar holatidagi gaz bulutlaridan kondensatsiyalangan. Molekulyar bulutlarda konsentratsiyalangan muhitning massasi butun galaktika massasining asosiy qismini tashkil etadi. Birlamchi muhitning bunday gazli bulutlari asosan vodorod yadrolaridan tashkil topgan bo'lib, geliy yadrolarining uncha katta bo'lmagan ulushi, yulduzlar hosil bo'lishi davridan (epoxasidan) oldin birlamchi nukleosintez natijasida hosil bo'lgan. Orion katta tumanligi bunday tumanlikni ko'rinishlaridan biridir. Bulutlar eng yaqin yulduzlar tomonidan yoritilganligi sababli ko'rinuvchandir. Yulduzlar gigant molekulyar bulutlardagi

alohida birjinslimaslardan paydo bo'ladi. Bunday birjinslimaslar maxsus nom-kompakt zonalar deb yuritiladi. Odatdagi kompakt zona birnecha yorug'lik oyi o'lchamiga ega bo'lib vodorodning 1 sm^3 hajmdagi zichligi $3 \cdot 10^4$ ga teng, temperatura $\sim 10 \text{ K}$ ga teng bo'ladi. Kompakt zonaning siqilishi markaziy sohasining kollapsidan boshlanadi, ya'ni muhitning zona markaziga erkin tushishidan boshlanadi. Gravitatsion kuchlar atomlarni shunday yaqinlashtiradiki turon kuchayadi zichlik esa oshadi. Molekulalar markazga tushib energiya oladi, o'zaro ta'sir natijasida ular avval atomlarga bo'linadi. Gravitatsion siqilish natijasida quyun temperaturasi oshiradi. Bunga mos keluvchi energiya atomning uyg'onish energiyasidan katta bo'lganda, vodorodning uyg'ongan atomlari hosil bo'ladi. Sokinlik bilan kollaps oblasti periferiyaga ko'chib, butun zonani egallaydi. Anashunday yulduz hosil bo'lish jarayoni boshlanadi.

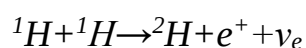
Uyg'ongan vodorod atomlari asosiy holatga o'tib vodorodga taalluqli bo'lgan spektral chiziqlarni nurlaydi. Obyekt nurlanuvchanga aylanadi. Yulduzning diametri bir necha yorug'lik sekundiga teng bo'ladi, yani kompakt zonaning 10^{-6} diametriga teng bo'ladi. Kompakt zonaning markazida quyosh massasiga teng massa 100 ming yildan 1 mln yilgacha vaqt davomida to'planadi.

Muhitning keying siqilishi uning temperaturasi ko'tarib, u ionlashgan holatiga o'tganidan muhit evolyutsiyasida yangi davr boshlanadi. Nurlanish bir necha tartibda ko'tariladi. Bunday nurlanish allaqachon vodorodli nurlanish bo'lmasdan, ionlashgan muhitda erkin harakat qiluvchi elektronlarni uzluksiz spektridan iboratdir. Kollapslanuvchi bulut markazida hosil bo'luvchi quyunga protoyulduz deyiladi. Protoyulduz yuziga tushuvchi gaz (bu hodisaga akretsiya hodisasi deyiladi) zarbali to'lqin hosil qilib, gazni 10^6 K gacha temperaturasi ko'tarishiga olib keladi. Keyin gaz nurlanish natijasida tezlik bilan 10^4 K gacha soviq, protoyulduzning ketma-ket qatlamlarini hosil qiladi. Bunday kartina yosh yulduzlarning yuqori nurlanishlarini tushuntiradi. Protoyulduzlarni optik teleskoplar bilan kuzatish mumkin. Gap shundaki zarbali to'lqinning nurlanishi, protoyulduz sirtidan chiqib o'z yo'lida ko'p sovuq molekulyar gaz va changga uchraydi. Natijada changning nurlanishi hosil bo'lib, fotonlarning qayta sochilishi

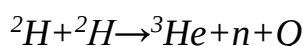
vujudga keladi. Sovuq chang zarralari katta to'liq uzunlik intervalida fotonlarni qayta nurlaydi. Bir tomondan tiniq bo'lmagan zonalar hosil bo'lsa, ikkinchi tomondan ko'p marotaba sochilgan birlamchi fotonlar spektri, spektrning infraqizil oblastiga ko'chadi. Nurlanishning to'liq uzunligi yetarlicha oshib, endi chang zarralari bunday nurlanishni yuta olmaydi. Shuning uchun protoyulduzni infraqizil diapozonda kuzatish mumkin. Hosil bo'luvchi muammolar shu bilan bog'langanki, hattoki infraqizil spektrometriya ham effektiv ravishda protoyulduzni nisbatan qari yulduzlardan effektiv ajrata olmaydi.

Protoyulduz yuziga tushuvchi gaz tushish tezligini aniqlashda dopler effekti qo'shimcha analizi talab etiladi.

Akretsiya natijasida yulduz muhiti massasi 0,1 quyosh massasiga yetganda, yulduz markazida temperatura 1 mln k yetadi va yulduz hayotida yangi etap, termoyadroviy sintez reaksiyasi etapi boshlanadi. Lekin bunday termoyadro reaksiyalari statsionar holatda bo'lgan quyoshga o'xshash yulduzlarni markazida o'tuvchi termoyadro reaksiyasidan farq qiladi. Farq shundaki, quyoshda o'tuvchi sintez reraksiyalarida



ancha katta temperatura ~ 10 mln. k talab etiladi. Protoyulduzning markazida esa 1 mln. k temperaturada o'tib, effektiv ravishda deyteriy qo'shilishi hosil bo'lishi termoyadro reaksiyasi o'tadi ($d\equiv^2H$).



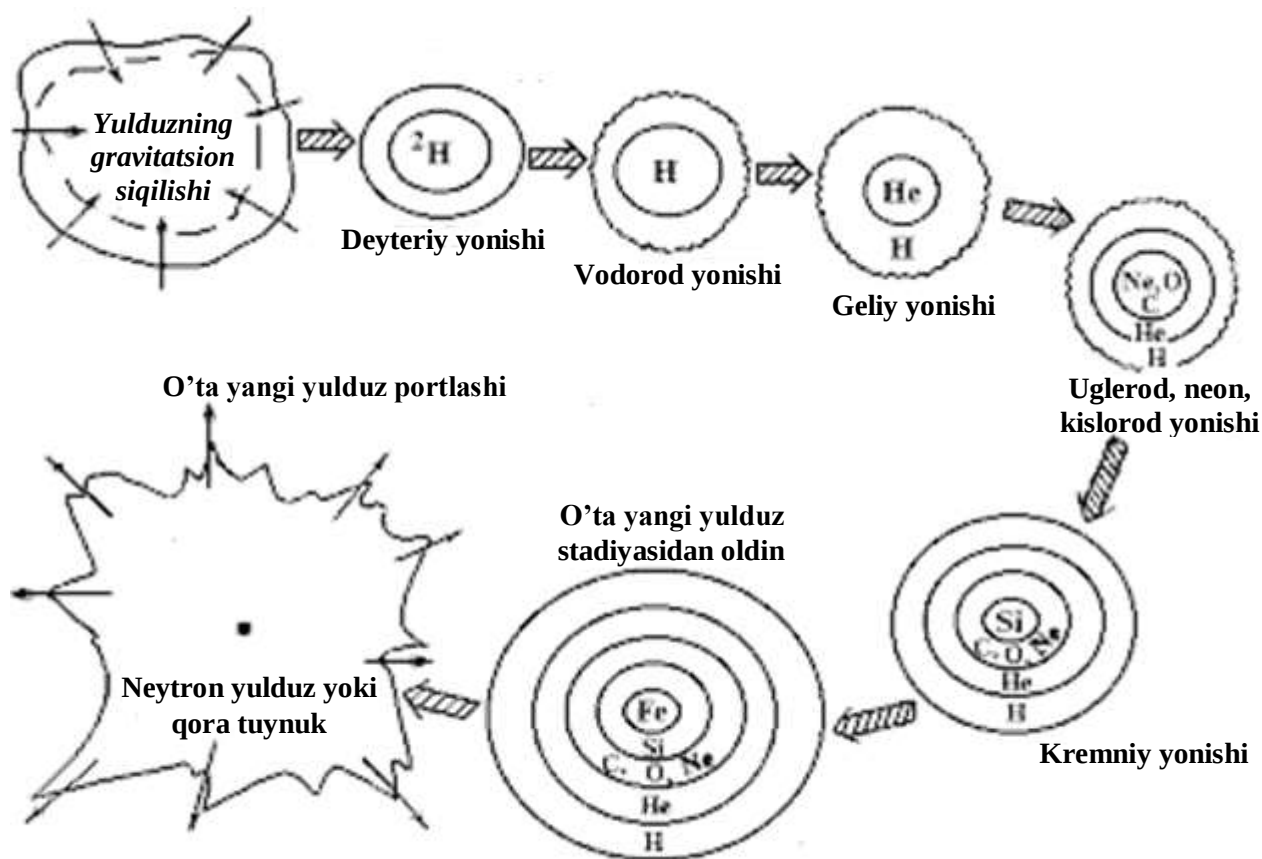
Bunda $Q=3.26\text{ MeV}$ – ajraluvchi energiya. Deyteriy xuddi 4He singari koinot evolyutsiyasining yulduzgacha erasida ham hosil bo'ladi. Lekin bu uncha katta bo'lmagan miqdor protoyulduzning markazida hosil bo'luvchi effektiv energiya manbai uchun yetarli bo'ladi.

Protoyulduz muhitining notiniqligi unda konvektiv zonalarini paydo bo'lishiga sabab bo'ladi. Isitilgan gaz pufaklari yulduz markazidan uning periferiyasiga ko'chsa, uning sirtidan markaziga sovuq muhit ko'chib, yangi deyteriy miqdorini uzatadi. Deyteriyning yonish etapida deyteriy protoyulduz periferiyasiga ko'chib, uning tashqi qobiqlarini isitadi, bundan esa protoyulduz

kengayishi kelib chiqadi. Massasi quyosh massasiga teng bo'lgan protoyulduzni radiusi quyosh radiusidan taxminan s marotaba katta bo'ladi.

Kompakt zonaning massasi hosil bo'layotgan protoyulduz massasidan katta bo'ladi. Ortiqcha massani uzoqlashishi, yulduz yuziga muhit akretsiyasini yo'qolishi yulduz shamoli ta'siri ostida vujudga keladi. Obyekt yalang'ochlanadi, uni optik diapozonda kuzatish mumkin bo'ladi. Xuddi protoyulduz kabi, yulduz ham o'sha nurlanishiga ega bo'lib, bu nurlanish endi muhitni akretsiyasi yoki termoyadro sintezi hisobidan emas, balki gravitatsion siqilish natijasida hosil bo'ladi. Yulduzning gravitatsion siqilishi natijasida uning markazidagi temperatura ko'tariladi va vodorod yonishi termoyadro reaksiyasi hosil bo'lishi uchun sharoit yaratadi (rasm-1).

Yulduzning ma'rkazidagi temperatura 10-15 mln. k-ga yetganda vodorod yadrolarining kinetik energiyasi, ular orasidagi ta'sir etuvchi kulon itarish kuchini yengishiga yetarli bo'lib vodorod yadrolari ular orasida termoyadro reaksiyasi o'tishi uchun masofagacha yaqinlashadi.



Rasm 1. Massiv yulduzining ($M > 25 M_{\odot}$) evolyutsiyasi etaplari

Natijada vodorodni yonish reaksiyasi boshlanadi. Termoyadro reaksiyalari yulduzning kichik markaziy oblastida boshlanadi. Natijada yulduzning siqilishi to'xtaladi, chunki termoyadro reaksiyasi natijasida chiquvchi nurlanish bosim kuchi gravitatsiya siqilishi kuchini muvozanatlaydi. Yulduzda nurlanish energiyasi mexanizmi sifatidan o'zgaradi. Vodorod yadrolarini yonish reaksiyalari boshlaguncha yulduz isitilishi gravitatsion siqilish hisobidan amalga oshayotgan bo'lsa, endi boshqa mexanizm ochiladi, yadroviy sintez reaksiyasi hisobidan endi energiya ajraladi. Yulduz stabil o'lchamga ega bo'lib, massasi quyosh massasiga yaqin bo'lgan yulduzni nurlanishi, vodorod yonishi bilan milliard yillar davomida o'zgarmaydi. Bu yulduzlar evolyutsiyasida eng uzun davrdir. Shunday qilib termoyadro reaksiyalarini boshlang'ich etapida 4 ta proton hisobidan bitta geliy yadrosi hosil bo'ladi. Yulduz markazida vodorod yonishi bilan geliy yadrolari to'planib boradi. Yulduz markazida geliy yadro hosil bo'ladi. Yulduz markazidagi barcha vodorod yonib bo'lganda, energiya vodorod yonishini termoyadro reaksiyasi hisobidan ajralishi to'xtaydi, yana gravitatsion kuch ta'siri ostida siqilish jarayoni boshlanadi. Geliyli yadro siqila boshlaydi. Siqilib geliyli yadro temperaturasi ko'tariladi. Geliy kinetik energiyasi oshib oxir-oqibat bunday yadrolar kulon itarish kuchini yengishga yetarli bo'lib geliy yonishi uchun yadrolar yetarli bo'lgan masofagacha yaqinlashadi.

Termoyadro reaksiyalarini keying etapi geliyni yonishi boshlanadi. Geliyni yonishi yadro reaksiyalari natijasida uglerod yadrolari hosil bo'ladi. Keyinchalik uglerod, neon, kislorodlarni yonish reaksiyalari boshlanadi. Z-ti katta bo'lgan yadrolarning yonishi boshlanishi bilan, yulduz markazidagi temperatura va bosimni oshishi oshuvchan tezlik bilan oshadi va o'z navbatida bu yadro reaksiyalari tezligini oshiradi (rasm-2).

Massiv yulduz uchun (massasi taxminan 25 quyosh massasiga teng) vodorod yonishi reaksiyasi bir necha million yil davom etsa, geliyning yonishi 10 marotaba tez o'tadi. Kislorodning yonishi 6 oy davom etsa, kremniyni yonishi bir sutka davom etadi. Termoyadro reaksiyalari zanjirida qanday elementlar hosil bo'ladi, javob aniq.

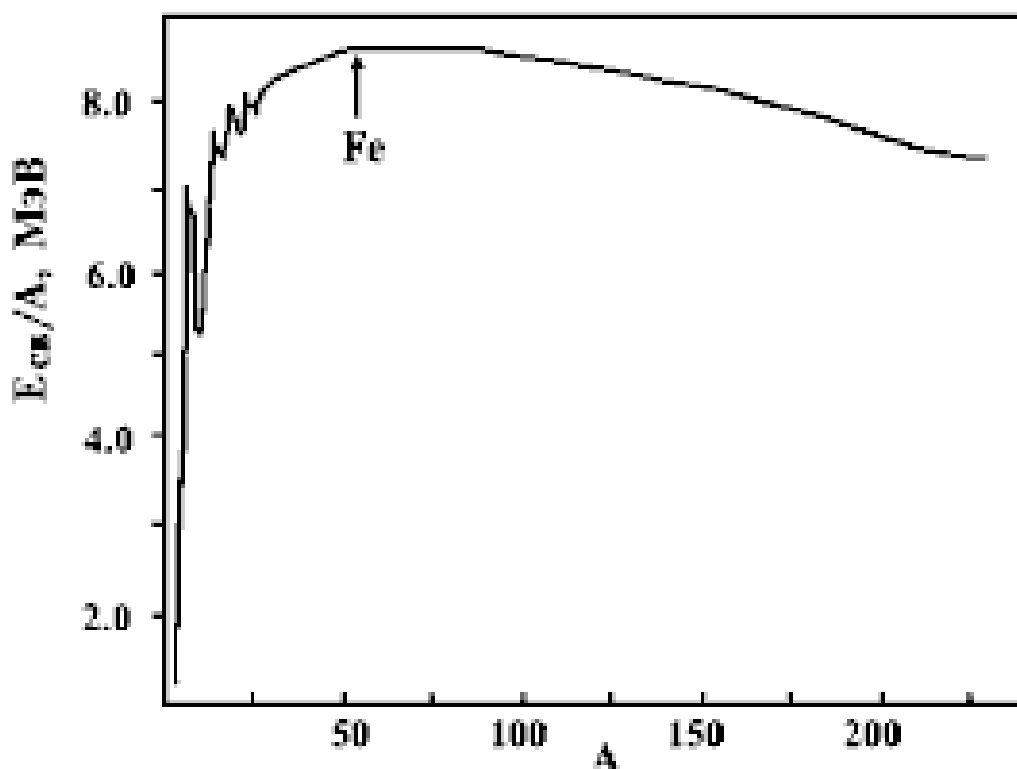


Рasm 2. Massiv yulduzning evolyutsiyasi

Nisbatan og'ir elementlarning sintezi, energiya ajralishi mumkin bo'lgan hollargacha davom etiladi. Termoyadro reaksiyalarining tamom bo'lish etaplarida kremniyni yonish jarayonida temir elementi rayonidagi elementlar hosil bo'ladi. Bu yulduzlarda termoyadro sintezi reaksiyalarining oxirgi etapidir, chunki temir yadrosi rayonidagi elementlar yadrolari maksimal solishtirma bog'lanish energiyasiga ega bo'ladilar (rasm-3). Yulduzlarda kechuvchi yadro reaksiyalari yulduz massasiga nisbatan bog'langan bo'ladi. Bu bog'lanish shuning uchun vujudga keladiki, yulduz massasi gravitatsion siqilishi kuchini belgilaydi, shuning uchun oxir-oqibat yulduz markazidagi temperaturani maksimal qiymatini belgilaydi. Birinchi Jadvalda turli massali yulduzlar uchun bo'ladigan yadro reaksiyalarini nazariy hisoblash natijalari keltirilgandir.

Jadval – 1. Turli massali yulduzlar uchun bo'ladigan yadro reaksiyalarining nazariy hisoblash natijalari

Massa $M_{\odot}$	O'tishi mumkin bo'lgan yadro reaksiyalari
0,08	Yo'q
0,3	Vodorod yonishi
0,7	Vodorod va geliy yonishi
5,0	Vodorod, geliy, uglerod yonishi



Rasm 3. Solishtirma bog'lanish energiyasi E_{bog}/A – ning massalar soni A – ga bog'lanishi.

Jadvaldan ko'rinyaptiki, yadro sintez reaksiyalarining to'liq ketma-ketligi og'ir yadrolarda kechadi. Massasi $M < 0,1M_{\odot}$ bo'lgan yulduzlarda gravitatsion siqilish energiyasi yulduzlarni termoyadro reaksiyalari kechishi uchun kerak bo'lgan holgacha keltirishiga yetarli emas. Vodorod yonishi termoyadro reaksiyasi davom etguncha berilgan yulduz, yulduzlarning asosiy ketma-ketligida joylashgan bo'ladi. Vaqt o'tishi bilan yulduz markazida geliy kuli to'planishi bilan uning markaziy qismi siqila boshlab, temperaturasi ko'tariladi. Termoyadro yonish reaksiyasi

jarayoniga markazdan tobora uzoqda joylashgan qismlari qo'shila boshlaydi. Bunday qisilish jarayoni natijasida yulduzni kengayishi va tashqi qatlamlarini sovushi vujudga keladi. Yulduzning o'lchami oshib boradi va uning spektrida qizil rang oshishiga boshlanadi. Natijada yulduz, yulduzlarning asosiy ketma-ketligidan uzoqlashib qizil gigant yoki o'ta gigant oblastiga o'tadi.

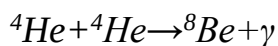
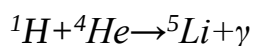
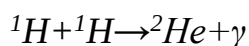
Hozirgi etapda quyoshdagi vodorod zaxirasi yana 100 mlrd yilga yetadi. Lekin quyoshning markaziy oblastidagi vodorod oqayotganligini hisobga olsak undagi vodorod zaxirasi yana 5-6 mlrd yilga yetishini topamiz ya'ni 5-6 mlrd yildan keyin quyosh qizil gigant yulduzga aylanishi kerak. Bunday etapda quyoshning radiusi taxminan 200 marotaba oshadi. Quyosh tashqi qabata avval Merkuriy, keyin Veneraga yetib keladi. Quyosh o'zining siqilishi va kengayishini murakkab sikliga erishadi. Quyoshda dinamik muvozanat buzilishi stadiyasida davriy ravishda uning muhitini tashqariga otilib chiqishi vujudga keladi. Natijada yulduz tashqi qobig'ini yo'qotib, barcha termoyadro reaksiyalari tamom bo'lgandan keyin yalang'och markaziy yadro sifatida qoladi. Hosil bo'lgan yulduzni keyingi taqdiri uning massasiga bog'liq ravishda aniqlanadi. Agar qoldiq yadro yulduz massasi $< M_{\odot}$ (boshlang'ich paytdagi massasi $< 8M_{\odot}$) bo'lsa u gravitatsion siqilib o'lchamda kichrayib oq karlikka aylanadi. Izolyatsiyalangan yulduz oq karlik holatiga chegaralanmagan uzoq vaqt davomida sovib keladi. Oq karliklarda dinamik muvozanat gravitatsion kuch va aynigan gaz bosim kuchi tenglashganida vujudga keladi. `

Agar yulduzning massasi $10M_{\odot}$ oshganda bunday yulduz evolyutsiyasini oxirgi stadiyasi o'ta yangi yulduz deb nomlanadi. Massiv yulduzda yadro reaksiyalari energiyasi tugaganda gravitatsion kuchlar yulduzni markaziy qismini yana siqa boshlaydi. Aynigan gaz bosim kuchi gravitatsion kuchni muvozanatlay olmaydi. Siqilish temperaturani ko'tarilishiga olib keladi. Natijada temperatura shu darajada ko'tariladiki, temir yadrolarining yemirilishi boshlanadi. Yulduz markaziy qismidagi temirdan iborat bo'lgan yadrolar neytronlarga, protonlarga va geliy yadrolariga bo'linadi. Bunday yuqori temperaturalarda ($T=10^9k$) proton+elektron juftlari effektiv ravishda neytron+neytrino juftlariga aylana boshlaydi. Past

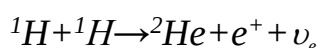
energiyali neytrinolarning ($E_\nu < 10 \text{ MeV}$) muhit bilan o'zaro ta'sir kesimi kichik bo'lganligi ($\sim 10^{-43} \text{ sm}^2$) sababli neytrinolar tezlikda yadroni tashlab chiqib ketadi, natijada yadro-yulduz soviy boshlaydi. Temirning kichik fragmentlarga bo'linishi jarayoni ham yulduz markaziy qismini intensiv ravishda soviy boshlaydi. Yulduzning keskin ravishda sovishi uni ustuvor ravishda oxirigacha buzadi. Bir necha sekund davomida yulduz yadrosi siqilgan holat neytronli yulduzga yoki qora tuynukka aylanadi. Katta miqdorda energiyani ajralishi bilan o'tuvchi o'ta yangi portlashi vujudga keladi. Zarbali to'lqinlarni hosil bo'lishi natijasida yulduz tashqi qatlamini 10^9 K temperaturagacha isilishi va nurlanish bosimi va neytrinolar oqimi tasiri ostida tashqi fazoga tashlanishi vujudga keladi. Ko'z bilan ko'rinmaydigan yulduz bir onda nurlanib ko'rinuvchiga aylanadi. Ko'rinuvchi diapozonda o'ta yangi nurlanish energiyasi butun galaktikani nurlanish energiyasiga teng yoki undan katta bo'lishi mumkin. Misol tariqasida Krabovid tumanligini Xitoy va Koreyada 1054 yilda ko'ringan o'ta yangi portlashi qoldig'i hisoblanadi. Teleskopda 1731 yilda topilgan Krabovid tumanligi hozirgi vaqtda ham kengayishda davom etayapti va hozirgi vaqtda 1054 yilda kuzatilgan portlash joyida bir necha yorug'lik yiliga teng bo'lgan diametriga ega tumanlikga aylangan. Katta Magelan tumanligida portlash vujudga kelganligi qayd etilgan. Bu tumanlik bizning galaktikamizdan 170000 yorug'lik yili masofasida joylashgan. O'ta yangini qobig'i portlash natijasida sekundiga bir necha 10 ming kilometr tezlik bilan tashqariga uloqtirilgan SN1987A belgi bilan belgilangan o'ta yangi o'rnida oldin ko'k rangdagi massasi $16 M_0$ bo'lgan o'ta gigant kuzatilgan. Portlash momentida temperatura keskin oshadi va yulduzning tashqi qobiqlarida portlovchi yadro reaksiyalari deb ataluvchi nukleosintez jarayoni o'tadi. Xususiy holda hosil bo'luvchi intensiv neytrinolar oqimi $A > 60$ massalar oblastidagi elementlarni hosil bo'lishiga olib keladi. O'ta yangi portlashi juda noyob hodisa bo'lib, $\sim 10^{11}$ yulduzdan tashkil topgan bizning galaktikamizda oxirgi 1000 yilda hammasi bo'lib 3 ta o'ta yangi chaqnashi vujudga kelgan. Lekin o'ta yangilarni chaqnashi chastotasi va yulduzlararo fazoda tashlanayotgan muhit miqdori, kosmik nurlar intensivligini tushuntirish uchun yetarlidir. O'ta yangi portlashdan keyin

yulduzning qolgan yadrosi masasiga bog'liq ravishda neytronli yulduzga yoki qora tuynukga aylanadi.

Shunday qilib yulduzlarning evolyutsiyasi jarayonida vodorodning o'gir elementlarga aylanishi sintez jarayoni vujudga keladi. Keyin hosil bo'lgan elementlar atrof fazoga o'ta yangi portlash natijasida yoki nisbatan katastrofik bo'lmagan qizil gigantlarda o'tuvchi jarayonlar natijasida atrof fazoga sochilib ketadi. Koinotga sochilgan muhit yana keyingi yulduzlar hosil bo'lishida va evolyutsiyasida yana foydalaniladi. I naseleniyasi va II naseleniyasidagi yulduzlarning evolyutsiyasi jarayonida yana og'irroq elementlar hosil bo'ladi. Elementlarning hosil bo'lish jarayonida yengil elementlar geliy, litiy, beriliy va borning sintezi problemi muhim rol o'ynaydi. Vodoroddan keyin geliy eng ko'p tarqalgan elementdir. Koinotda har 10 ta vodorod yadrosi bitta geliy yadrosi mos keladi. Bu kattalik koinot turli oblastlari va turli obyektlari uchun o'zgarmasdir. Geliy va vodorod yadrolari sonini nisbati bunday qiymati va uni o'zgarmasligi geliy koinot paydo bo'lishini boshlang'ich momentlarida birlamchi nukleosintez natijasida paydo bo'lgan degan gipotezani ilgari suradi. Shuning uchun yulduzlarning II-chi naseleniyasidagi yadroviy nukleosintezni ko'ruvchi modellarida muhitning birlamchi tarkibida geliy yadrolari ham mavjud deb olinadi. Vodorod va geliyning miqdori 10:1 ulushda olinadi. Birlamchi yadrolarni bunday tarkibi birdaniga keyingi yadroviy reaksiyalar zanjirini yozishda ma'lum qiyinchiliklarga olib keladi. Muammo shundan iboratki, ikkita vodorod yadrosi orasidagi ikkita geliy yadrosi orasidagi, vodorod yadrosi va geliy yadrosi orasidagi reaksiyalar yoki bog'lanmagan ${}^2\text{He}$, ${}^5\text{Li}$ sistemalarga yoki yashash vaqti 10^{-10} s bo'lgan ${}^8\text{Be}$ yadrosini hosil bo'lishiga olib keladi.



Og'ir yadrolarni hosil bo'lish reaksiyalari zanjiri ikkita vodorod yadrosini o'zaro ta'sir etib deyteriy yadrosi hosil bo'lishidan boshlanadi.



Bunday reaksiya kuchsiz ta'sir asosida o'tganligi sababli yerda hech qachon kuzatilmagan. Bunday reaksiyani kesimini juda kichikligi vodorodni yonish reaksiyasi nima uchun yulduzlar evolyutsiyasida eng uzoq davom etadigan reaksiya ekanligini tushuntiradi.

Litiy, beriliy va bor hosil bo'lishini tushuntirish, bunday yadrolarni kichik bog'lanish energiyaga ega bo'lishi bilan bog'liq bo'lgan muammolarga uchraydi. Shuning uchun yulduzlar qa'rida ular effektiv ravishda hosil bo'lmasdan effektiv ravishda buzilishi kerak. Litiy yadrolarining katta qismi boshlang'ich epoxadagi nukleosintez natijasida hosil bo'lgan bo'lishi mumkin. Beriliy, bor va qisman litiy katta energiyali kosmik zarrachalarni gaz changli muhit bilan o'zaro ta'sirida va kichik energiyali protonlarni yulduzlar sirtidan tashqariga tashlanayotgan muhit bilan ta'siri natijasida hosil bo'lgan bo'lishi mumkin.

Ximyaviy elementlarni yulduzlarda hosil bo'lishini tushuntirish hozirgi zamon astrofizika fanining muhim xulosalaridan iboratdir. Elementlarning paydo bo'lishi yadroviy nazariyasi bunday elementlarni koinotda tarqalishini va qanday sharoitlarda hosil bo'lishini hisobga oladi. Shunday qilib nukleosintez savollari bir tomondan yulduzlarni va bir butun koinotni tuzilishi va evolyutsiyasiga bog'liq bo'lsa, ikkinchi tomondan yadro ta'sirlarining xususiyatlariga bog'liqdir.

Bir qator murakkab haligacha yechilmagan muammolar borki, bunday muammolar koinotda elementlarni paydo bo'lish va evolyutsiyasi to'la nazariyasini hosil qilsak. Bular quyidagi muammolar:

1. Birlamchi yulduzlar massasini ifodalash va vaqtda va fazoda o'zgarish muammosi.
2. Past energiyalarda zarralarning to'g'risidagi muammolar.
3. Kuchsiz o'zaro ta'sir ostida o'tuvchi reaksiyalarni korrekt hisobga olinishi.
4. Radiaktiv yadrolar bilan neytronlarni o'zaro ta'siri kesimi to'g'risidagi ma'lumotlarni yo'qligi. Bu muammo r-jarayonda hosil bo'luvchi elementlarni ifodalashda paydo bo'luvchi muammo.
5. O'ta yangilarni portlashiga olib keluvchi mexanizmlarni yanada aniqlash muammosi.

Oxirgi yillarda bu muammolarni yechish arsenali kengaydi koinotni optik kuzatishga uni radiopozonda kuzatish, mikroto'liqlikli detektorlar yordami qayd qilish, rentgen nurlanishni, kosmik zarralarni qayd qilish usullar paydo bo'lganligi tushunarliki yuqoridagi muammolarni kelgusida yechish imkonini beradi.

§1.2. Yulduzlarning evolyutsiyalarini belgilovchi reaksiyalar

Yulduzlarning evolyutsiyalarini belgilovchi quyidagi reaksiyalarni ajratish mumkin:

1. H – jarayon – vodorod yadrolarini geliy yadrolariga aylanish jarayoni. Bunday jarayonlar Quyosh va Quyosh tipidagi yadrolar markazida, $\rho_c = 10^5 \text{ kg/sm}^3$ zichlik va $T_c = 15 \cdot 10^6 \text{ K}$ temperaturalarda quyidagi $4 {}^1H \rightarrow {}^4He$ sxemada amalgam oshadi.
2. α – jarayon – uglerodni $3 {}^3He \rightarrow {}^{12}C$ sxemasida sintezi jarayonlari majmui. Bundan tashqari keyingi kislorod, neon, magnit yadrolarini sintez jarayoni. Bunday jarayonlar $T_c \geq 5 \cdot 10^8 \text{ K}$ temperaturalarda massasi 1,5 Quyosh massasidan katta bo'lgan yulduzlarda amalgam oshadi.
3. ℓ - jarayon – temir guruhidagi elementlar yadrolarini hosil bo'lish jarayonlari (${}^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{28}Si + {}^4He$, ${}^{28}Si + {}^{28}Si \rightarrow {}^{56}Ni$, va hokazolar). Bunday reaksiyalar $T_c \approx 3 \cdot 10^9 \text{ K}$ temperaturalarda o'ta yangi yulduz chaqnashidan oldingi momentlarda vujudga keladi.

Yulduzlar evolyutsiyasini oxirgi etaplari amalga oshuvchi sintez jarayonlari:

4. S – jarayon – yulduzlar rivojlanishining oxirgi etaplari $m > 1,5 m_\odot$ massali yulduzlar yadrolarida neytronlarni ushlab qolish jarayoni bo'lib, bunda vismut (${}^{209}Bi$) – gacha bo'lgan kimyoviy elementlar yadrolari hosil bo'ladi. Bunda erkin neytronlar manbai bo'lib, ${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{23}Mg + n$, ${}^{16}O + {}^{16}O \rightarrow {}^{31}Si + n$ reaksiyalari xizmat qiladi.
5. r – jarayon – o'ta yangi yulduzni chaqnashi paytida uning qa'rida o'tuvchi tez jarayon 100 sekund vaqt davomida atom yadrolari tomonidan

neytronlarni ushlab qolishi natijasida yadrosini massalar soni $A \approx 270$ - gacha bo'lgan (uran va toriy ham) kimyoviy elementlarni hosil bo'lishi xususiy holda S – jarayon natijasida $A = 86, 130$ va 196 massalar soni yaqinidagi ortiqcha yadrolar hosil bo'lsa, r – jarayon natijasida $A = 90, 140$ va 210 yaqinidagi ortiqcha yadrolar hosil bo'ladi.

O'ta yangi yulduzlar chaqnashi davomida β – yemirilishlar $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ ketma-ketligi zanjiri natijasida yadrolarni hosil bo'lishi, bunday yemirilishlar kuchli γ – nurlanish bilan amalgam oshishi aniqlangan. Yanada massiv yulduzlar qa'rida yadro tomonidan elektronlarni ushlab qolish jarayoni natijasida, neytronli yulduzlarni vujudga kelishi ko'rsatilgan.

Bob-II. Yulduzlar evolyutsiyasining oxirgi stadiyalari

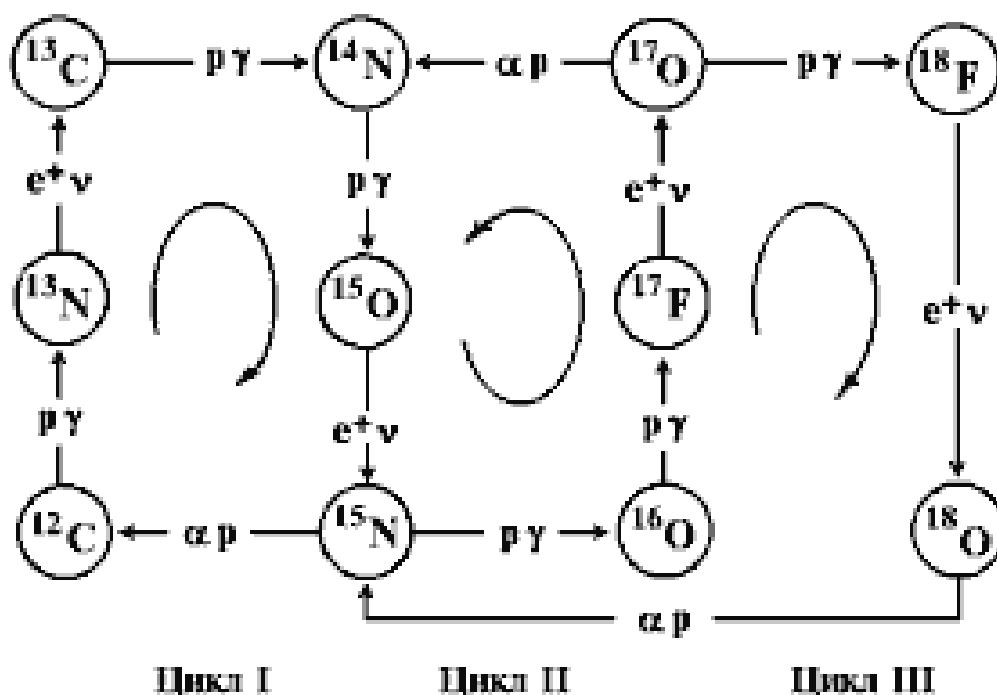
§2.1. Uglerod va kislorodning yonishi

Rasm 4-da massasi $5 M_0$ bo'lgan yulduzda uglerod yona boshlanishi momentidagi nazariy hisoblab topilgan ximiyaviy tarkibi ko'rsatilgan. Rasmning x o'qida Quyosh massasi birligidagi yulduz massasi ko'rsatilgan bo'lsa, Y o'qida C, He va H elementlarini massalarini ulushi ko'rsatilgan. Turli nazariy madellar ma'lum detallariga ko'ra bir-biridan farq qilib ularning umummiyligi quyidagilardadir.

1. Yulduz markaziy qismida vodorod yonishi natijasida hosil bo'lgan uglerodga aylangan geliy ulushini ko'pligi.
2. Yonmagan geliy yulduzning nisbatan tunuk qatlamida joylashgan. Bu qatlamning massasi yulduz to'la massasini 10 % - idan oshmaydi.
3. Yonmagan vodorod yulduzning tashqi qatlamlarida joylashgan.

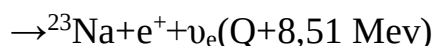
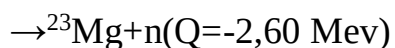
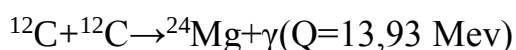
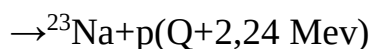
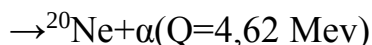
Yetarlicha massiv yulduzlarda geliy yonishi fazasidan keyin uglerod ($Z=6$) yonish fazasi, neon ($Z=10$) yonish fazasi va kislorod ($Z=8$) yonish fazasi vujudga keladi. Bu yadrolar yetarlicha katta zaryadga ega bo'lganliklari tufayli Kulon barerini yengishda ularni yona boshlashi uchun nisbatan

yuqori temperatura talab etiladi. Massiv yulduzlarda uglerod termodinamik muvozanat holatida yonishi mumkin.



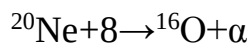
Rasm 4. Massasi $5 M_0$ bo'lgan yulduzning uglerod yona boshlanishi momentidagi ximiyaviy tarkibi keltirilgan. Yulduz tarkibidagi C, He va H uning umumiy massasi ulushida ko'rsatilgan.

Nazariy hisoblashlar ko'rsatadiki ($M=25 M_0$ yulduzlar uchun o'tkazilgan) uglerodni yona boshlanishi $8 \cdot 10^9$ K temperaturada boshlanadi, bunda zichlik taxminan 10^5 gr/sm^3 bo'ladi. Uglerod yonishini reaksiyalari quyidagilardir.

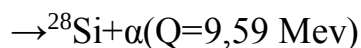
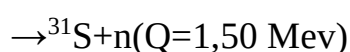
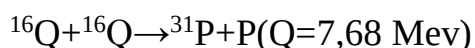
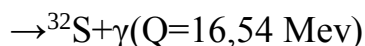


$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ reaksiyalarning kesimi 2,4 Mev energiyalardan laboratoriya sharoitlarida o'lchangan. Bunday energiyada kesim 10^{-8} barnga teng. Uglerod yonish temperaturasi $8 \cdot 10^8$ K o'zaro ta'sirlanuvchi zarralarni E_0 1,7 Mev energiyasiga mos keladi. Bunday energiyalarda kesimni ekstrapolyatsiya qilingan qiymati $\sim 10^{-13}$ barnga tengdir. Uglerod yonishini asosiy mahsulot ^{20}Ne hisoblanadi. Bosim va

temperaturani keyingi oshishi ^{20}Ne yadrosini quyidagi fotobo'lishi reaksiyasi natijasida bo'ladi.



Bu ^{20}Ne yadrolarda α -zarralar bog'lanish energiyasini kichikligi tufayli ($E^\alpha(^{20}\text{Ne})$ 4,73 Mev) vujudga keladi. Solishtirish uchun ^{16}O yadrosi α -zarralarni bog'lanish energiyasi 7,2 Mev ekanligini ko'rsatamiz. Keyingi stadiya kislorodni yonish reaksiyalari quyidagilardir.

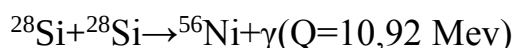


Uglerod va kislorod yadrolarining yonishini asosiy xususiyatlari quyidagilardir.

1. Reaksiya kanallarini ko'pligi.
2. Oxirgi hisobda paydo bo'luvchi protonlar, neytronlar, γ -kvantlar tezlik va yangi reaksiyalarga kirishib, mumkin bo'lgan reaksiya kanallari sonini va izotoplar sonini oshiradi.
3. Uglerod va kislorod yonishini asosiy mahsuloti ^{28}Si bo'lib.
4. Uglerod yonishi reaksiyasidan kislorod yonishi reaksiyasiga o'tishi bilan yulduz neytrinom ravshanligini oshishi. Yulduz markazidagi temperatura $0,5 \cdot 10^9\text{k}$ dan $2,5 \cdot 10^9\text{k}$ gacha oshishida neytrinolar yorqinligi 6 tartibda oshadi.

§2.2. Kremniyning yonishi

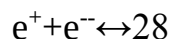
Kremniy yonishi xarakterli sharoiti quyidagichadir temperatura $(3-5) \cdot 10^9\text{k}$ bo'lsa, zichlik $10^5-10^6 \text{ gr/sm}^3$ ga tengdir. Kremniyning yona boshlashi bilan yonish jarayoni o'zgaradi. ^{56}Ni hosil effektiv bo'lishidan Kulon baryeri yetarlicha kattadir.



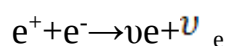
Yulduzlar evolyutsiyasining bunday etapida, evolyutsiya jarayonida neytronlar, protonlar, α -zarrachalar va γ -kvantlar yordamida o'tuvchi reaksiyalar muhim rol

o'ynaydi. Bunday reaksiyalar birlamchi ^{28}Si yadrosi asosida temir yadrosi maksimumidagi elementlar hosil bo'lishiga olib keladi. Yadro reaksiyalariga nisbatan og'ir yadrolar qatnashishi bilan yulduz temperaturasi oshishi vujudga keladi. Temperatura 10^9K yetishi bilan yulduzlar evolyutsiyasida yangi etap boshlanadi, yadro aylanishlariga γ -kvantlar va elektronlar qo'shilishi bilan bog'liq bo'lgan elektromagnit elektronlar rol o'yna boshlaydi. Fotonlarning temperatura oshishi bilan energiyasini oshishi ($E_\gamma \sim T$) fotonlar soni ham osha boshlaydi ($N_\gamma \sim T^4$). Kompakt yulduz materiyasi bilan muvozanatda bo'lgan fotonlarning energiyasi yadro kulon maydonida juft hosil qilish uchun yetarli bo'ladi.

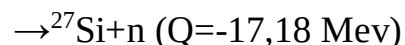
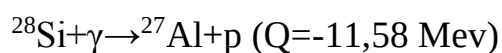
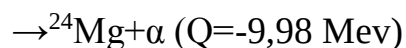
Bunda quyidagi



jarayonlari bilan birgalikda yana quyidagi jarayonlar



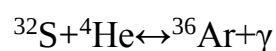
hosil bo'lishi mumkin. Neytrinoli jarayonlar kuchsiz o'zaro ta'sir natijasida hosil bo'ladi. ν_e va $\bar{\nu}_e$ ta'sirlarning kesimi kichik ($\sigma \sim 10^{-42} - 10^{-43} \text{cm}^2$) neytrinolar yulduz markazidan tezlik bilan energiya olib ketadi. Ikkita kremniy yadrosini bir-biriga tegishi uchun sharoitlardan oldinroq, fotonlarning intensivligi va energiyasi kremniy yadrosini fotobo'linishi hosil bo'lishi uchun yetarli bo'ladi.



Natijada ko'plab n, p, va α -zarralar hosil bo'lib ularni roli kremniy yadrosini yonishida katta bo'ladi. ^{28}Si va katta Z-ga ega bo'lgan reaksiya produktalari termodinamik muvozanatda n, p va γ kvantlar bilan nurlanib temir maksimumi rayonidagi ko'plab elementlarni hosil qiladi. 10^9K temperaturalarda boruvchi yadro reaksiyalarini ikkiga bo'lish mumkin. Birinchi guruhiga shunday yadro reaksiyalarini kiritish mumkinki, bunda katta A-yadro massali yadrolarni hosil bo'lish tezligi γ kvantlarni ta'siri ostida o'tuvchi yadrolarni bo'linish reaksiyasining tezligidan katta bo'ladi. Ana shunday reaksiyalar natijasida massalari soni $A \sim 60$ gacha teng bo'lgan yadrolar tug'iladi. Massalar sonini bu

oblastida elementlar tarqalishini keskin kamayishi bu oblastda kulonli barerni ta'siri ostida vujudga keladi. Ikkinchi guruhga kiruvchi reaksiyalar yulduz evolyutsiyasining nisbatan tinch davrlarida energiyaning eneratsiyasiga sababchidir. Yulduz markazida temperaturani oshishi bilan katta A massali elementlarni hosil bo'lishida fotobo'linish reaksiyalarini roli oshib boradi, chunki γ kvantlarni yadro bilan to'qnashishi natijasida yadrolarni bo'linishi vujudga keladi. Eng xarakterli reaksiyalar quyidagilardir (γ, p) va (γ, n) . Fotobo'linish reaksiyalari ikkinchi tip reaksiyalarga kirib protonlar va neytronlar hosil bo'lishiga olib kelib, bunday protonlar va neytronlar uglerod va kislorod yonishi mahsulotlari bilan o'zaro to'qnashadi. (γ, p) va (γ, n) reaksiyalarning bo'sag'asi α zarrali zarralar uchun $(N \alpha)$ qo'shni yadrolar uchun bo'sag'asidan katta bo'lganligi sababli ular fotonlar ta'sirida kam buziladi, ya'ni ularni nisbatan tarqalishi oshadi. Bunday effekt α -zarrali to ^{56}Ni ($T_{1/2}=6,1$ kun) izotopigacha kuzatilgan. Shunday qilib evolyutsiyaning bunday etapida katta A li jarayonlar fotobo'linish jarayoni bilan konkurensiyalashadi.

A-zarralarni ushlash reaksiyalari teskari fotobo'linishi reaksiyalari bilan muvozanatda bo'ladi.



E-jarayonlar deb ataluvchi bunday reaksiyalar termodinamik muvozanat sharoitida o'tadi.

Hisoblar ko'rsatadiki, bu ikki mexanizmdan foydalanib elementlarni o'rtacha massali yadrolar sohasidagi va temirning maksimumi rayonidagi tarqalishini yaxshi tushuntirish mumkin. Gap shundaki yadro energiyasi ajraladigan elementlar zanjirining oxirida turadi. Bu quyidagicha tushuntiriladi, bitta nuklonga to'g'ri keluvchi solishtirma bog'lanish energiyasi A ning funksiyasi sifatida temir rayonida maksimumga ega bo'ladi. Shuning uchun temirdan massalar soni katta bo'lgan elementlar sintez reaksiyalari energiya yutilishi bilan o'tadi. Yulduzlarda geliydan germaniy elementini taqsimlanishini tushuntiruvchi hisoblashlarni ko'rsatishicha, hisoblashlar natijalari temir maksimumi rayonigacha

elementlarni taqsimlanishini to'g'ri ifodalaydi. Bundan bu modelda olingan moddalar taqsimlanishi, moddalarni yulduzlarda taqsimlanishini real situatsiyasiga mos keladi. Kremniy yonishi situatsiyasida yulduz o'zining maksimal o'lchamiga ega bo'ladi, chunki yulduz markazida ketma-ket vodorod, geliy, kislorod, kremniy yadro zapaslari tamom bo'lgandan keyin, yulduz yadrosi qisila boshlaydi, yadro muhiti zichligi ketma-ket oshadi va termoyadro sintez reaksiyalari yulduzning periferiyasiga ko'chadi hamda yulduz qobig'i kengayadi. Agar boshlang'ich holatda yulduz bir jinsli bo'lib vodorod va geliydan tashkil topgan bo'lsa, oxirida u qavatli tarkibdan tashkil topgan bo'ladi. Yulduz markazida temir gruppasidagi og'ir elementlar joylashgan bo'lsa, periferiyasida yengil elementlar joylashgan bo'ladi. Tashqi qobiq vodoroddan tashkil topgan bo'ladi. Hisoblashlar ko'rsatadiki, yulduz markazidan uzoqlashgan sari kichik A li yulduzlar ulushi oshib boradi. Massasi $25M_{\odot}$ dan katta bo'lgan yulduzlarda o'tkazilgan hisoblashlarni ko'rsatishicha, yulduzning markaziy sohasi temirdan va uncha katta bo'lmagan neytronlar, γ ta'siri ostida hosil bo'luvchi temir dissotsiatsiyasi mahsuli bo'lgan α zarralaridan tashkil topgan bo'ladi. $M/M_{\odot}=1,5$ rayonida ^{28}Si , ^{20}Ne va ^{16}O yadrolari muhitning asosiy qismini tashkil etib, u 1,6 dan 6 $M/M_{\odot}$ oblastgacha o'z ichiga oladi. Yulduz tashqi qobig'i ($M/M_{\odot}>8$) asosan vodorod va geliydan tashkil topgan bo'ladi. Biz keltirgan elementlarni bunday yulduzni ichida tarqalishi, yulduzning o'ta yangi holatidan oldingi momentiga mos keladi. Bunday stadiyadan keyin temirni γ kvantlar ta'siridagi fotobo'linishi yulduz markaziy qismini qisilishi keyingi portlash jarayoniga olib keladi.

§2.3. Neytronlar ta'siri ostida o'tuvchi jarayonlar. S – jarayon

Temirdan keying oblastda turuvchi elementlarni tarqalishini nisbatan massalar soni I-ga kuchsiz bog'langanligi bu oblastga o'tganda elementlarni hosil bo'lish mexanizmi o'zgarganligini bildiradi. Bunday elementlarni zaryadlangan zarralarning ta'siri ostida hosil bo'lishi kuchli kulon bareri tufayli bosilgan bo'ladi. Bundan tashqari katta A – li yadrolarni ko'pchiligi β radiaktiv ekanligini hisobga

olish kerak. Hozirgi zamon tasavvurlariga ko'ra og'ir elementlar neytronlarni ushlash reaksiyalarida hosil bo'ladi. Odatda neytronlarni tez – rapid (r) va sekin – slow (s') ushlash jarayonlarini ajratish kerak. Bu ikkita mexanizm neytronlarni ushlash tezligini β -yashirilish tezligiga nisbati bilan farqlanadi. $\tau_\beta/\tau(n, \gamma) \ll 1$ sharti bajarilganida, og'ir elementlarbi hosil bo'lish jarayonida stabil va katta yarim yemirilishi davriga ega bo'lgan β radiaktiv yadrolar hisobga olinadi. Ya'ni elementlarni hosil bo'lishi β tabii dalasi bo'ylab hosil bo'ladi. Ketma-ket neytronlar yadrolarga qo'shiladi va bunda faqatgina nisbatan stabil yadrolar hosil bo'ladi. Yarim yemirilish davri kichik bo'lgan yadrolar neytronni ushlashidan oldin yo'qoladi. Shuning uchun tushunarliki, og'ir elementlarni hosil bo'lishi qo'rg'oshin va vismutda tamom bo'lishi kerak. Hozirgi zamon tasavvurlariga ko'ra $A > 60$ oblastidagi elementlarni yarmi S-jarayonlarda hosil bo'ladi. Sekin o'tuvchi S-jarayonlar qizil gigantlarni obolochkasida o'tadi. Izotoplarning konkret ko'rinishi va ular orasidagi nisbat neytronlarni sekin ushlash reaksiyalarida β -yemirilish tezligi va neytronlarni ushlash tezligi nisbatiga bog'liq bo'ladi. Agar $\tau_\beta/\tau(n, \gamma) \gg 1$ bo'lsa, og'ir elementlarni hosil bo'lish jarayoniga yarim yemirilish davri kichik bo'lgan (r - elementlar) β -radiaktiv elementlar hisobga olinadi. Nazariy hisoblashlarni ko'rsatishicha S-jarayon vujudga kelishi uchun neytronlarni zichligi 10^{10} gr/sm³ bo'lishi kerak. Og'ir yadrolarni neytronlarni ushlash jarayoni natijasida aylanish natijasida og'ir yadrolarga aylanishida birlamchi yadro sifatida “temir cho'qqisi” yadrosi olinadi. Neytronlarni 10^{10} gr/sm³ zichligida temirni neytronlar bilan nurlanishida qo'rg'oshin hosil bo'lish to'la vaqti 10^3 yilga yaqin bo'ladi. Birlamchi yadro sifatida nisbatan yengil yadrolarni olinishi katta qiyinchiliklarga uchraydi. Birinchidan birlamchi yadro sifatida qancha yengil yadro olingan bo'lsa, shunga ko'p neytronlarni ushlashi kerak bo'lib, og'ir elementlarni hosil bo'lishida shunga katta vaqt talab etiladi. Ikkinchidan A-5 va A-8 li stabil yadrolar mavjud emasligi, bunday rubejni neytronlarni ushlash yo'li bilan o'tish mumkin bo'lmaydi. Uchinchidan, ¹²C, ¹⁶O va ⁴³Ca yadrolar tomonidan neytronlarni ushlash radiaksion reaksiyalarini kesimi juda kichik bo'lganligi sababli bunday jarayonda og'ir elementlarni hosil bo'lishida bir necha tartibda

ko'p vaqt talab etiladi. Bu argumentlar “temir cho'qisi” yaqinidagi birlamchi nuklid yadrolarni tanlashda muhim bo'ladi. Neytronlarni ushlash orqali og'ir elementlarni hosil bo'lish mexanizmda quyidagilar muhim argument bo'lib xizmat qiladi. Neytronlarni ushlash reaksiyasi kesimi $\delta_{n\gamma}(A)$ va yadrolarni tarqalishi $n(A)$ ning ko'paytmasi β stabillik dominasida monoton o'zgaruvchi bo'lib, berilgan vaqtda $\delta_{n\gamma}$ kesim va $(n\gamma)$ reaksiya kesimi yadrodan, yadroga o'zgaruvchandir. Buni quyidagicha tushuntirish mumkin $n(A)$ yadrolar sonining A ga ko'ra o'zgarishi quyidagi tenglama bilan ifodalanadi

$$dn(A)/dt = kn(A-1)\delta_{n\gamma}(A-1) - kn(A)\delta_{n\gamma}(A)$$

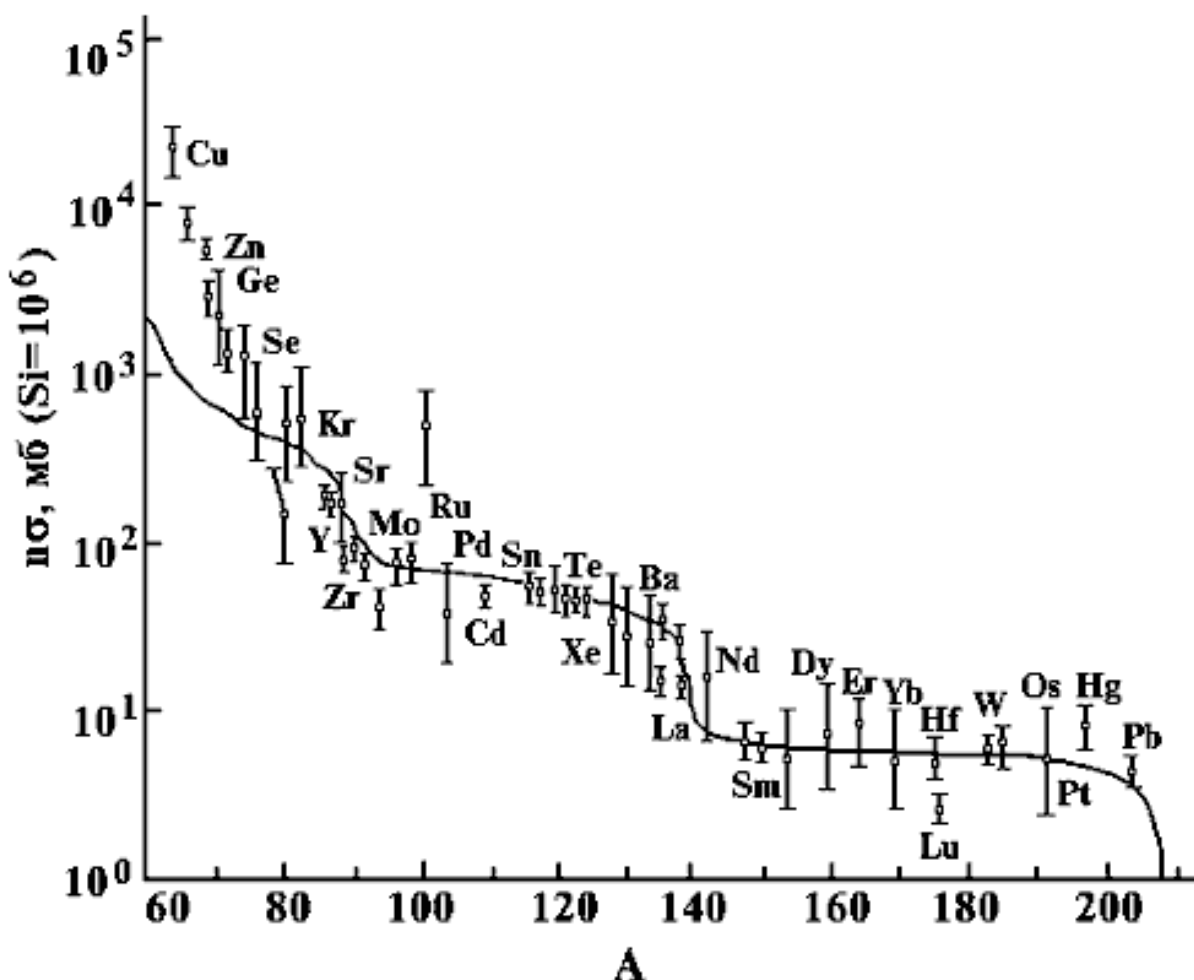
bunda k -neytronlar oqimi. Agar jarayon statsionar bo'lsa, $dn(A)/dt=0$. Bunda quyidagini topamiz

$$n(A-1)\delta_{n\gamma}(A-1) = n(A)\delta_{n\gamma}(A) = \text{const.}$$

Oxirgi tenglikdan neytronlarni radiatsion ushlash kesimi qancha kichik bo'lsa, S -jarayonda hosil bo'luvchi elementlar shuncha tarqalgan bo'lishi kerak. Xususiyl holda bu nima uchun magicheski N va Z sonly yadrolar ko'p tarqalishini ko'rsatadi. Bu shunga bog'liq bo'ladiki, magicheski yadrolar uchun neytronlarni radiatsion ushlash reaksiyasi kesimi magicheski bo'lmagan yadrolar uchun kesimdan bir tartibda tushadi. Neytronlarni ushlash kesimini abalochkalari to'ldirilgan yadrolarda kichikligini sababi quyidagidir. Kichik energiyalar oblastida $E_n \sim KT \sim 10-100$ Kev neytronlarni radiatsion ushlanishi $\delta_{n\gamma} \sim G_\gamma/D$ bo'lib, bunda G_γ -rezonanslarni radiatsion kengligi, D -rezonanslar orasidagi masofa G_γ -ni kattaligi qo'shni yadrolar uchun ham o'zgaradi, chunki pastki holatlarga turli xil o'tishlar soniga bog'liq bo'ladi. Berilgan vaqtda D kattalik magik yadrolar uchun keskin o'zgaradi. Elementlarning tarqalishida $A=90$, $A=138$ va $A=208$ da maksimumlar kuzatilishi kerak. Bu maksimumlar neytronli obolochkalarni $N=50, 82$ va 126 dagi to'ldirishiga mos keladi. Elementlarning tarqalishi chizig'ida bu maksimumlar osongina kuzatiladi. S -jarayon mustahkam eksprimental tasdiqqa ega.

Beshinchi rasmda S -jarayonda neytronlarni yadrolar tomonidan ushlash reaksiyasi $\delta = \delta_{n\gamma}$ kesimini nukliodlar tarqalishi n ko'paytmasini yadrolar massalar soni a ga bog'lanishi ko'rsatilgan ($E_n \sim 30$ Kev). Modellardan kelib chiqqan

natijalarga ko'ra (ularda faraz qilinadiki neytronlar ketma-ket ravishda sekinlik bilan ushlanadi) $n\text{-}\delta$ haqiqatdan ham ba'zi uchastkalarda ($A=90\text{-}130$, $140\text{-}190$) doimiy bo'lib, buni 5-chi rasmdagi natijalar tasdiqlaydi.



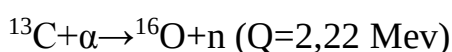
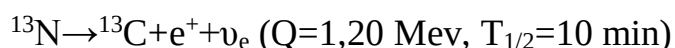
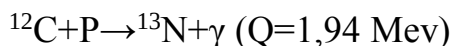
Rasm 5. Quyosh sistemasi elementlari uchun $n\sigma$ -ni A -ga bog'lanishi.

Yulduzlarda S-jarayon ketishi uchun quyidagi shartlar bajarilishi lozimdir:

1. Neytronlarni ushlash bilan o'tuvchi jarayonlar amalga oshishi uchun yulduzlarda temperatura 10^8k -dan katta bo'lishi kerak.
2. Neytronlarni zichligi 10^{10} sm^{-3} katta bo'lishi kerak.
3. Yulduzlarda muhit yadrolari tomonidan neytronlarni ushlash jarayoni vujudga kelib, og'ir atom yadrolari hosil bo'lishi uchun birinchi va ikkinchi shartlar uzoq vaqt 10^3 yildan ham katta vaqt davomida bajarilishi kerak.
4. S-jarayon mahsulotlari yulduzning tashqi obolochkalariga effektiv ravishda chiqarilib, keyingi yadro reaksiylarisiz yulduzlararo muhitga o'tishi kerak.

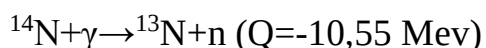
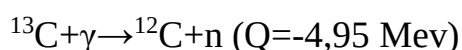
S-Jarayonni ifodalashda asosiy muammo neytronlar manbasi muammosidir. Odatda neytronlar manbasi sifatida quyidagi $^{13}\text{C} (\alpha, n) ^{16}\text{O}$ va $^{22}\text{Ne} (\alpha, n) ^{25}\text{Mg}$ yadro reaksiyalari olinadi. Birinchi reaksiyani o'tishi uchun shunday sharoit bajarilishi kerakki, unda birgalikda uglerod va geliy yonishi vujudga kelishi kerak. Bunday sharoit sifatida shunday mexanizm qaraladiki, yulduzda geliy yonayotgan konvektiv obolochkasi vodorodga boy bo'lgan obolochkaga tegadi.

Neytronlarni hosil bo'lishi quyidagi reaksiyalar seppochkasida yuz beradi.



$^{13}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O} + n$ reaksiyalari effektiv ravishda $>10^8\text{k}$ reaksiyalarda yuz beradi. $^{22}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{25}\text{Mg} + n$ ($Q=-0,48 \text{ Mev}$) reaksiyasida neytronlarni hosil bo'lishi, geliy yonishi zonasida ^{14}N yadrolarni bo'lishiga bog'liq bo'ladi (ikkita ketma-ket α -ushlash va β^+ yemirilishi natijasida hosil bo'lgan ^{22}Na yadrosi ^{22}Ne yadrosidagi ^{14}N yadrosidan oshadi). Buning uchun geliy yonayotgan yulduzning birlamchi muhitida ^{14}N izotoplari bo'lishi kerak. ^{14}N yadrolarining manbasi CNO sikl hisoblanadi.

Neytronlarni $>10^8\text{k}$ temperatura va $10^9\text{-}10^{11} \text{ gr/sm}^3$ zichliklarda qo'shimcha manbasi fotoyadro (fotoneytronli) reaksiyalari bo'lishi mumkin.

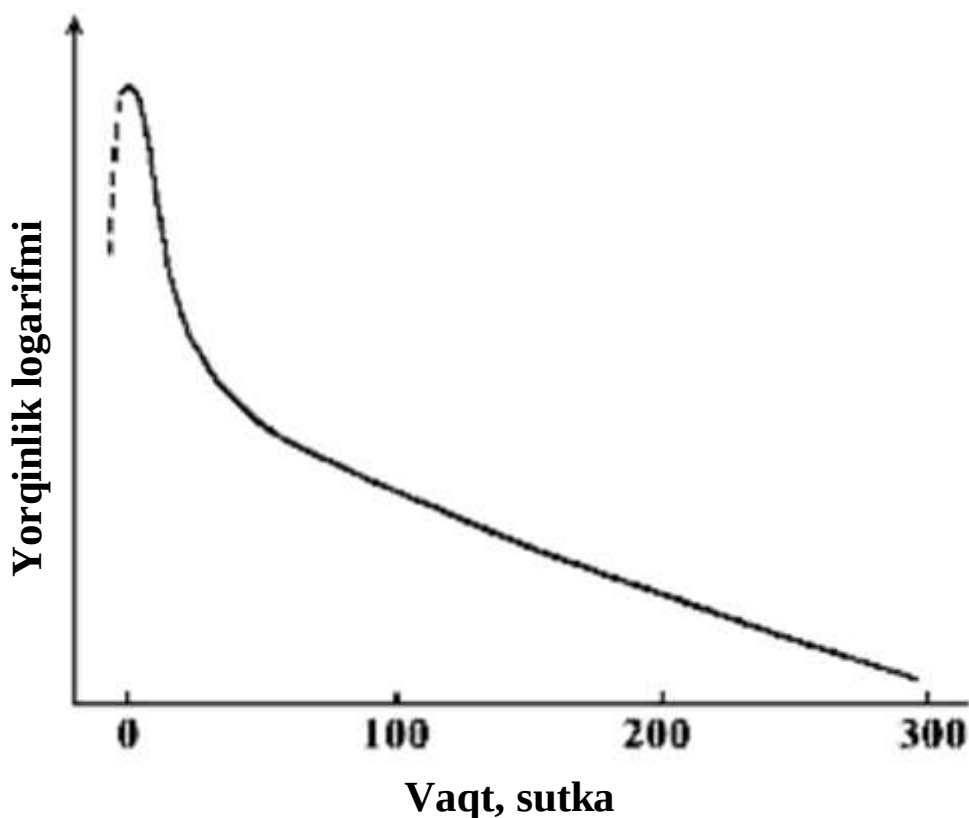


Temperatura oshishi bilan fotoneytron reaksiyalarining roli oshadi. S-jarayon natijasida og'ir elementni hosil bo'lish sharoiti qizil gigantlarda mavjuddir. S-jarayon hisobida $Z=83$ gacha bo'lgan og'ir elementlarni hosil bo'lish tushunriladi. $Z=84\text{-}89\text{-li}$ yadrolar stabil izotoplariga ega bo'lmasdan ular radiaktivdir. Shuning uchun S-jarayon bilan Z ning bu oblastidan o'tish mumkin emas. Lekin tabiatda $Z=90$ (boriy) va $Z=92$ (uran izotoplari ^{235}U va ^{233}U) mavjuddir. Bu yadrolarning mavjudligini tushuntirish yulduzlarda S-jarayon bilan birgalikda R-jarayon neytronlari tez ushlash yadro reaksiyasi mavjudligi bilan tushuntiriladi. R-

jarayonda nestabiya yadrolar tomonidan neytronlarni tez ushlab jarayoni vujudga keladi.

§2.4. O'ta yangi yulduzlardagi nukleosintez jarayoni

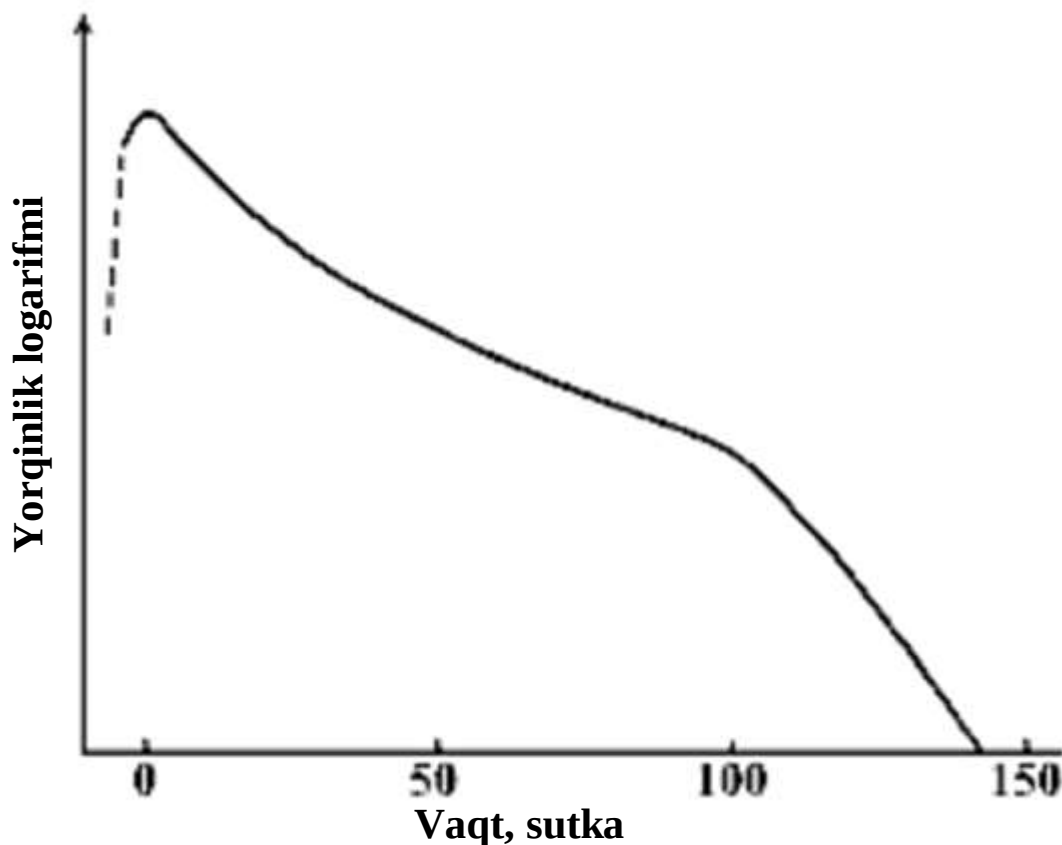
O'ta yangi yulduzlar deb shunday yulduzlarga aytiladiki, ularning yorqinligi tasodifan birdaniga oshib keyinchalik sekinlik bilan kamayadi. O'ta yangi yulduz yulduzlar evolyutsiyasining barcha etapini o'tib, gravitatsion kollaps jarayoni natijasida hayot yo'lini tugaydi. O'ta yangi yulduz gravitatsion kollaps jarayonidan oldin ham keyin ham bir qism massasini yo'qotganligi sababli uning boshlang'ich massasi $8-10 M_{\odot}$ ga teng bo'lishi kerak. Odatda ikki xil yorqinlik (rasm. 6,7) chizig'i to'g'risida gapiriladi. Yorqinlik chizig'ini maksimumida o'ta yangi yulduz shuncha energiya nurlaydiki, bu energiya oddiy yulduzlardan tashkil topgan galaktika nurlanish energiyasidan ham katta bo'ladi. O'ta yangi yulduz portlashi natijasida chiqarilgan energiya $10^{51}-10^{54}$ ga teng bo'ladi.



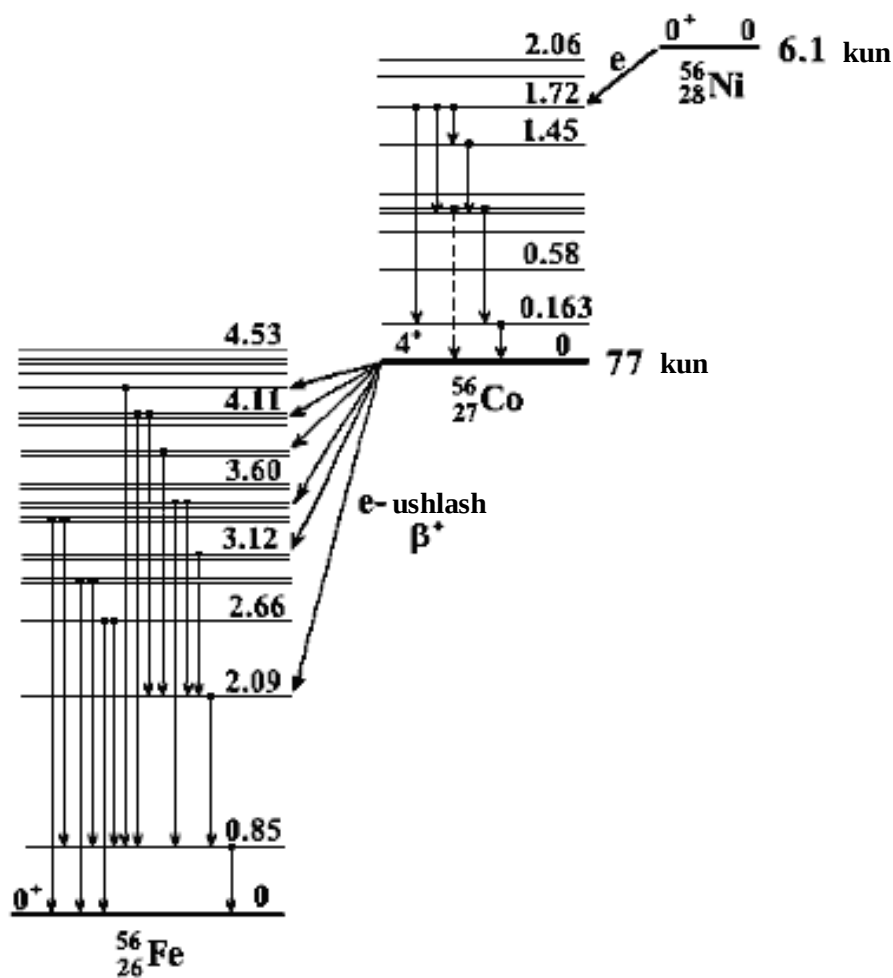
Rasm 6. I-chi tipdagi o'ta yangi yulduz yorqinlik chizig'i.

Qanday evolyutsiya etapidagi yulduz o'ta yangi yulduzga aylanadi. Yulduzlar evolyutsiyasida termoyadro reaksiyasi to'xtalib, yulduz markazida temir rayonidagi elementlardan tashkil topgan yadro hosil bo'lganda, o'ta yangi yulduz hosil bo'ladi. Temirdan tashkil topgan yulduz yadrosi hosil bo'lganda, yadroviy energiya manbai to'xtagandan keyin yadroni isishi to'xtaladi va gravitatsion kuch ta'sirida siqila boshlaydi. Yulduz yadrosida deyarli boshqacha yadroviy jarayonlar o'ta boshlaydi. Bunday jarayonlar ta'sirida yadroning "termirli" maksimumi rayoni yangi elementlar α -zarralar, neytronlar va protonlarga bo'linadi. Birinchi tipdagi o'ta yangi yulduzlarning yorqinlik chizig'i 6-chi rasmda ko'rsatilgan yorqinlik ~ 2 hafta mobaynida maksimumga erishib, 2 haftada tez kamayadi, keyinchalik yorqinlikni namoyishi eksponensial ravishda yuz beradi. Bunda 50 kun davomida yorqinlik taxminan 2 marotaba kamayadi.

O'ta yangi yulduzni chaqnashini sababi uglerodni yona boshlashi g'oyasi Fauler va Xayl tomonidan berilgan I-tipdagi o'ta yangi yulduzlar oq karlik tipidagi kompakt yulduzlardan hosil bo'ladi.

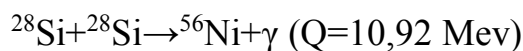
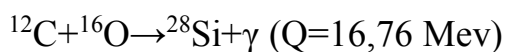


Rasm 7. II-chi tipdagi o'ta yangi yulduz yorqinlik chizig'i.



Rasm – 7a. $Ni^{56} \rightarrow {}^{56}Co \rightarrow {}^{56}Fe$ zanjirida β va γ o'tishlarining sxemasi. Energetik sathlar ustida yadroning qo'zg'alish energiyasi MeV da keltirilgan. Asosiy holatlar uchun spini va yarim emirilish davri ko'rsatilgan.

Portlash sababi shundaki, keyinchalik o'ta yangi yulduzga aylanuvchi obyekt ikkilangan yulduzlarning biridir. Hozirgi zamon tasavvurlariga ko'ra asosiy yulduz oq karlikning kuchli gravitatsiya maydoni ta'siri ostida muhitning yo'ldoshdan oq karlikka akretsiyasi vujudga keladi va natijada oq karlikning massasi oshadi. Shu biln birgalikda temperatura ham oshib, oq karlikda uglerod alanga oladi. Natijada oq karlik markazidan periferiyasiga tomon portlashli yonish to'liqini tarqaladi.



O'ta yangining obolochkasida kremniyni portlashni yonishi natijasida kollapslanuvchi yadro tashqarisida asosan radiaktiv bo'lgan ^{56}Ni hosil bo'ladi (^{56}Ni -ning yarim yemirilish davri 6,1 kunga teng). Keyinchalik e-ushlash qo'zg'algan holatda bo'lgan ^{56}Co yadrosini hosil qiladi. Bu yadro asosiy holatiga o'tib γ kvant chiqarib 0,163 Mev energiya nurlaydi. Hosil bo'lgan γ kvantlarni muhit bilan o'zaro ta'sir asosiy mexanizmi komton sochilishidir. Natijada tezlik bilan γ kvantlarni energiyasi ~ 100 Kevgacha kamayadi. Hosil bo'lgan γ kvantlar yulduz muhiti tomonidan fotoeffekt natijasida yutiladi, yutilish yulduz muhitini qizdiradi. Yulduz kengayishi bilan unda muhit zichligi kamayadi, fotonlarning to'qnashishlar soni kamayib, yulduz sirtini muhiti nurlanish uchun tiniq bo'ladi. Nazariy hisoblashlarni ko'rsatishicha, yulduz yorqinligini maksimumidan 20-30 sutka o'tgandan keyin bunday situatsiya vujudga keladi. Portlashdan keyin 60 sutkadan keyin γ kvantlarning effektiv ta'siri soni 1 gacha kamayadi va γ kvantlar yulduzdan bemalol chiqadigan bo'ladi. Bu vaqt intervali yorqinlikni eksponensial kamayishga o'tish muddatiga to'g'ri keladi. Bunday katta vaqt mobaynida γ kvatlari manbai ^{56}Co ni β yemirilish mahsuli bo'lgan ^{56}Fe hisoblanadi. ^{56}Fe 4,2 Mev energiyali uyg'ongan holatda paydo bo'ladi. Yorqinlikni chizig'i bunday modelni tasdiqlaydi. Yorqinlikni maksimumidan keyin yorqinlikni ^{56}Ni ($T_{1/2}=6,1$ kun) yemirilish xarakterli vaqti bilan va ^{56}Co ($T_{1/2}=77$ kun) yemirilish xarakterli vaqti kamayishini tasdiqlaydi. Energiya ajralishini qo'shimcha manbai bo'lib ^{56}Co yadrosini pozitron chiqarishi hisoblanadi. Pozitronlar xuddi γ kvantlar singari yulduz muhitini qizdiradi. Shunday qilib o'ta yangi 1-tip yorqinlik chizig'i xususiyati $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ yemirilishlar xususiyatlari bilan aniqlanadi. γ -kvant ko'rinishida nurlanayotgan energiya 1-tip o'ta yangilarni barcha tur issiqlik nurlanishidan taxminan bitta tartibda kattadir. Koinotga tashlanayotgan massa $\sim M_{\odot}$ tengdir.

γ -kvantlarning spektrlarining analizi 1-tur o'ta yangilar dinamikasi borasida qo'shimcha ma'lumot berar edi, xususiyl holda ^{56}Ni yemirilishidan hosil bo'luvchi γ -kvantlar portlanayotgan obolochka o'lchami to'g'risida va tashlanayotgan muhit tezligi to'g'risida ma'lumot beradi. ^{56}Co ning chiziqlarini kuzatilishi potrlash

dinamikasi to'g'risida ma'lumot beradi. ^{56}Ni va ^{56}Co -lardan hosil bo'lgan γ -kvantlar bir xil muhit qatlamidan o'tganliklari uchun ularning chiziqlarini intensivliklarini nisbati chaqnash vaqtini va portlashli sintez tamom bo'lish vaqtini baholash imkonini beradi. SN1987A o'ta yangidan γ kvantlar 1987 yil avgustda yerga yetib kelgan. Bunda spektrda ^{56}Co chiziqlari borligi ham aniqlangan. Shunday qilib ^{56}Co portlash natijasida hosil bo'lishi ko'rsatilgan (aks holda uning ko'pchilik qismi boshqa elementlarni hosil bo'lishi bilan bo'linar edi) chunki $T_{1/2}$ (^{56}Co =77 kun). Bundan tashqari o'ta yangilarni portlashida yuqori temperatura va bosimda o'rta og'irlikdagi elementlar ham hosil bo'lish gipotezasi tasdiqlanadi. SN1987A o'ta yangida ^{56}Co dan γ nurlanishni qayd qilish jarayonida ma'lum vaqt mobaynida intensivlikni oshishi kuzatilgan. Bu shuni ko'rsatadiki, o'ta yangini tashqi qobig'ini koinotda kengayishi bilan zichligi kamayib, γ -kvant uchun tiniqligi oshganligi sababli, ko'proq kobalt kuzatish imkoni paydo bo'lgan. $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ jarayon natijasida ajratilgan energiya 1987 yili davomida SN1987A o'ta yangini yorqinligini ushlab turgan. Qayd etilgan kuchli γ nurlanish bilan o'tuvchi $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ mexanizmi har qanday o'ta yangida bo'lishi kerak.

II-tipdagi o'ta yangilar. Bunday o'ta yangilar yana massivroq yulduzlarda vujudga keladi (SN1987A o'ta yangi shu tipdagi o'ta yangidir). Pastda massasi $25 M_{\odot}$ bo'lgan yulduzlarda 2 ta model uchun temir yadrosi kolapsi hosil bo'lgan nukeosintez jarayonini qamrab olgan nazariy hisoblashlar natijalari keltirilgan. Modellar bir-biridan yulduz muhitining birlamchi himoyaviy tarkibi bilan farq qiladi. II-tip o'ta yangi evolyutsiyasi hisoblashlaridagi ximiyaviy tarkibi.

Z	Elementlar	A _{min}	A _{mak}	Z	Elementlar	A _{min}	A _{mak}
2	He	4	4	17	Cl	35	38
6	C	12	14	18	Ar	36	41
7	N	13	15	19	K	39	42
8	O	15	18	20	Ca	40	49
9	F	17	19	21	Sc	43	49
10	Ne	20	23	22	Ti	44	51
11	Na	21	24	23	V	47	52
12	Mg	23	27	24	Cr	48	55
13	Al	26	28	25	Mn	51	56
14	Si	27	31	26	Fe	52	59
15	P	30	33	27	Co	55	60
16	S	31	37	28	Ni	56	65

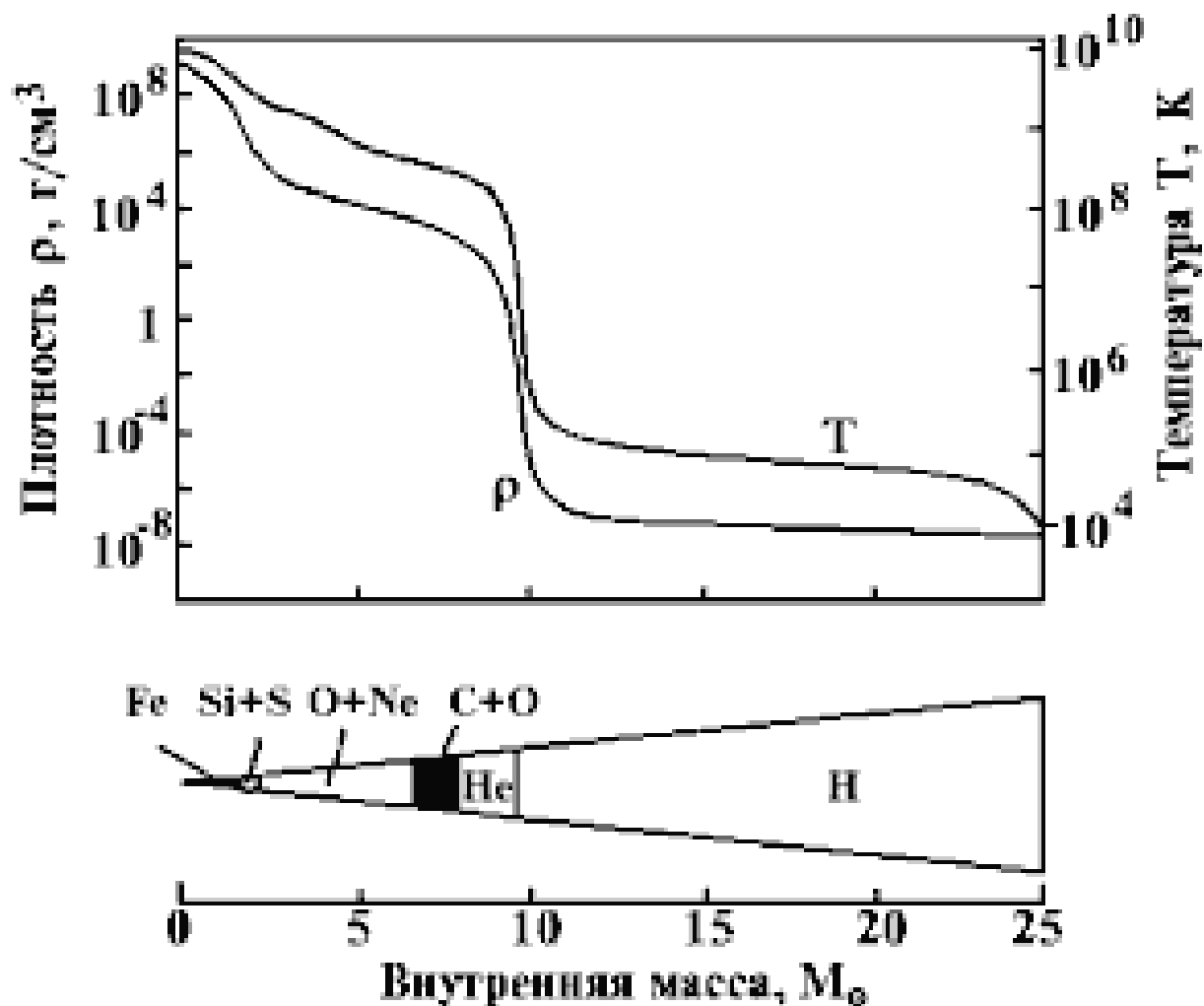
Model – I. Birlamchi ximiyaviy tarkib quyoshnikidek. Model-I birinchi tur yulduzlar naseleniyasini ifodalaydi. Bunday yulduzlar bizning galaktikamiz uchun xarakterlidir.

Model-II. Birlamchi tarkibda $Z \geq 3$ li elementlar 1% quyoshnikidek. Model-II yulduzlarni naseleniya II-chisini ifodalaydi. Bunday yulduzlar naseleniyasi bizning galaktikamizni evolyutsiyasini boshlang'ich etapida mavjud bo'lgan.

EHM yordamida yulduzlarning asosiy ketma-ketlikda paydo bo'lishidan boshlab evolyutsiyasi ko'rib chiqilgan. Vodorod, uglerod, neon, kislorod, kremniyni yulduz yadrosi kollapsi vujudga kelgunga qadar yonishi ko'rib chiqilgan. Yulduz yadrosining kollapsi yulduzning temirli yadrosi yangi zarralarga bo'linishi natijasida vujudga keladi. Yulduzlarning xarakteristikalarini kollapsi davrida har ikki model uchun ham jadvalda keltirilgan.

Model	Massa $M_{\odot}$	Radius, sm	Temperatura yuzasi, K	Fotonliyorqinligi, Erg/s
Model I	25	$6,49 \cdot 10^{13}$	4370	$1,09 \cdot 10^{39}$
Model I	25	$1,27 \cdot 10^{13}$	9790	$1,05 \cdot 10^{39}$

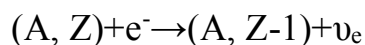
Kollaps davrida har ikki yulduz ham cho'zilgan obolochkaga ega bo'lgan o'ta gigant xarakteristikaga ega bo'ladi, ikkinchi modelga ko'ra yulduzning yuzidagi temperatura yuqoriroq, radiusi kichikroq bo'ladi. Yulduzlarning ichidagi temperatura va zichlik har ikki yulduz uchun ham markazdan sirtiga qarab turlicha kamayib boradi. Mantida sekinroq sirtida tezroq kamayadi. Massiv yulduzlarning hayotining oxirida kollapsdan oldin $10^9 \div 10^{10} \text{K}$ gacha isigan zichligi $\rho \sim 10^8 - 10^{10} \text{g/sm}^3$ bo'lgan yadro hosil bo'ladi. Bu yadroning massasi elementlarning temirli cho'qisida $\sim 1 \div 2 M_{\odot}$ ga teng bo'lib, radiusi $\sim 10^7 \div 10^8 \text{sm}$ bo'ladi. Birinchi va ikkinchi modellardagi yulduzlarning ximiyaviy tarkibining kengroq analizi natijalari 8-chi rasmda keltirilgandir. X-oq'da quyosh massasi birligida yulduz massasi keltirilgan bo'lsa, ordinatalarda zichlik va temperatura ko'rsatilgandir. Asosiy elementlar uchun har ikki holda ham taxminan bir xil taqsimlanish kelib chiqadi. Temirli yadro neytronlashtirilgan muhitda joylashgan bo'lib, kremniy, sera, kislorod, neon, uglerod va geliydan tashkil topgan qobiq bilan o'ralgan bo'ladi. Bularning hammasi yana siyraklashgan vodorod qavati bilan o'ralgan bo'ladi.



Rasm 8. Massiv yulduzning evolyutsiyasi oxirida gravitatsion kollapsdan oldin xarakterli tuzilishi.

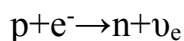
Birinchi model holida yulduzning tashqi qobig'ini tarkibi neon, kislorod elementlari kabi elementlar bilan boyitilgandir. Yulduzning markazida kremniy yadrolarining o'zaro tegib temir yadrosi hosil qilish momentidan boshlab uning rivojlanishini kengroq ko'rib chiqamiz. Massiv yulduzni bunday holatga kelishigacha bir necha million yil kerak bo'lib, keyingi evolyutsiyasi tez o'tadi. Kremniy yonishi reaksiyasi taxminan bir sutkada otadi. Yulduz markazida kremniyli obolochka ichida temirli yadro vujudga keladi. Temirli yadro va kremniyli obolochka chegarasida va undan uzoqda elementlarning sintez jarayoni davom etib energiya ajralishi termoyadro jarayonlari hisobidan bo'ladi. Temir elementlari maksimumidan tashkil topgan markaziy qism qisilishda davom etadi. Lekin markazda allaqachon energiyaning yadroviy manbalari tamom bo'lgan bo'ladi, chunki markazda hosil bo'lgan yadrolar maksimal solishtirma bog'lanish

energiyasiga ega bo'ladi. Bundan markazda umuman yadro reaksiyalari bo'lmaydi degan xulosa chiqadimi? Albatta yo'q. Haqiqatda temperatura va shuning uchun o'zaro ta'sir etuvchi zarralar kinetik energiyasi shu darajaga yetadiki, unda nisbatan kuchsiz bog'langan yadrolar reaksiyalari davom etadi. Yadroviy reaksiyalarning xarakterida muhim sifatiy o'zgarish yuz beradi. Bu vaqtgacha energiya ajralishi sintez jarayoni hisobidan bo'layotgan bo'lsa, situatsiya butunlay o'zgaradi. Temirli yadroni nisbatan yengil fragmentlarga bo'linishi yuz beradi. $5 \cdot 10^9$ K temperaturalarda temir yadrolarini neytronlarga, protonlarga va geliy yadrosiga bo'linishi vujudga keladigan fotobo'linishi reaksiyasi muhim rol o'ynaydi. Bunday reaksiyalar energiya yutilishi bilan o'tuvchi reaksiyalardir. Temirli yadro hosil bo'lishi jarayonida ajratilgan energiya endi temirni vodorod, neytron, protonlarga bolinishi uchun yutiladi. Yana yangi yadro reaksiyalari kanallari ochiladi. Yemirilish natijasida hosil bo'lgan yengil zarralar, protonlar, neytronlar, X-zarralar orasida reaksiyalar o'ta boshlaydi va bu reaksiyalarda endi energiya yana yutiladi. Natijada yulduz markaziy qismi soviy boshlaydi. Bundan tashqari kuchsiz o'zaro ta'sir natijasida vujudga keladigan reaksiyalar ham bo'ladiki, natijada yulduz markaziy qismini temperaturasi yana pasayadi. Katta zichliklarda elektronlarni massasi shu darajada oshadiki, ularni ushlash natijasida ^{56}Fe - ^{56}Mn (3,7 Mev) va ^{56}Mn - ^{56}Cr (1,6 Mev) va boshqa izotoplarning massalarning farqi protonni neytron bilan almashtirishi natijasida kompensatsiyalanadi. Shunday qilib muhit yadrosi tomonidan elektronlarni ushlashi reaksiyasida



yulduz markaziy qismini neytronlar bilan boyishi vujudga keladi. Bu jarayonga muhitni neytronizatsiya jarayoni deyiladi. Tezlik bilan sovish jarayoni yulduzni yana siqilishi bilan davom etadi. Bunda kvazistatiklik muvozanatidan farqli gravitatsion energiya ajralishi temperaturani oshishiga olib kelmaydi. Bu etapda yulduz markazida bosim oshishi gravitatsiya kuchini kompleksatsiya qilishga yetmaydi. Yulduz muvozanatligini yo'qotadi va uning qobiqlari markaziga erkin tusha boshlaydi. Yulduz markaziga tushuvchi muhit kinetik energiyasi uning tashqi obolochkalarini tez yonishiga olib keladi. 10^9 - 10^{10} K temperaturada tashqi

donadagi kislorod bir necha minutda yonadi. Agar yulduz yetarlicha massiv bo'lsa va uning tashqi qobig'idagi kislorodning massasi quyosh massasiga teng bo'lsa, u holda bir necha minutda ajralgan energiya miqdori quyoshni bir necha milliard yilda ajratadigan energiyasiga teng bo'ladi. Massiv yulduzning evolyutsiyasini oxirgi etapidagi siqilishi odatda nihoyat darajada tez vujudga keladi. Bir necha sekund davomida markaziy qism zichligi $10^{14} \div 10^{15} \text{ gr/sm}^3$ dan oshishi mumkin, temperatura $10^{11} \div 10^{12} \text{ K}$ dan ham oshadi. Bunday sharoitlarda protonlarni neytronlarga neytronlarni ajratish bilan o'tuvchi reaksiyasi amalga oshadi.



Neytronli yorqinlik juda katta 10^{53} Erg/s bo'ladi. Hosil bo'lgan neytrinolar portlash natijasida hosil bo'lgan energiya olib ketib zichligi $\rho \sim 10^{14} \div 10^{15} \text{ gr/sm}^3$ bo'lgan neytronli yulduzni qoldirib ketadi. Neytronli yadroni hosil bo'lishi bilan yulduz markazini qisilishi keskin to'xtaydi, natijada qaytgan zarbali to'lqinlar hosil bo'ladi. Bunday zarbali to'lqinlar xususiyatlari hali oxirigacha o'rganmagan bo'lib aniqlanishicha o'ta yuqori energiyali kosmik zarralarni tezlashishi zarbali to'lqinlar ta'siri ostida o'tadi. Yuqorida qayd etilgan o'ta yangi yulduz portlashini tasdiqlovchi fakt koinotdan kelayotgan neytrinoli impulsni qayd qilish hisoblanadi. SN1987A o'ta yangi portlash davrida bunday neytrinoli impuls qayd etilgan. Bundan tashqari yulduz muhitining $M < 2,3 M_{\odot}$ oblastli qismida portlash momentida temperatura shunchaga oshadiki, portlashli nukleosintez jarayoni hosil bo'lishida sharoit yaratiladi, natijada bir necha minut davomida bu oblastda yulduz ximiyaviy tarkibini yangi taqsimlanishi vujudga keladi. Yulduz qolgan qismini massasi ($M > 2,3 M_{\odot}$) ximiyaviy tarkibi o'zgarishsiz koinotga uloqtiriladi. O'ta yangilarni massa yo'qotish mexanizmi yulduzlarni evolyutsiyasi davomida hosil bo'lgan elementlarni yulduzlararo fazoga tashlashida muhim rol o'ynaydi. Agar portlashdan keyin yulduz massasining ko'p qismi o'zida saqlangan bo'lsa, uning yengil elementlardan asosan vodorod va geliydan tashkil topgan tashqi qobig'i fazoga tarqatgan bo'ladi. Bundan tashqari portlashning kichik interval vaqti mobaynida portlashli nukleosintez jarayonida hosil bo'lgan elementlar ham koinotga tashlangan bo'ladi. Yulduzning ichki qatlamlari nisbatan tinch jarayon

termodinamik muvozanat jarayonida hosil qilingan elementlariga tegizilmaydi. Yulduzning ko'proq massasi tashlangan bo'lsa, tashlangan muhit elementlari termodinamik jarayonlar sharoitida hosil bo'lgan elementlarni nisbiy ulushini ifodalaydi, bunday elementlar o'ta yangi portlashi yuz bergan vaqtgacha hosil bo'lgan bo'lishi mumkin.

Hozirgi vaqtgacha qaysi model o'rinli ekanligini oxirigacha ko'rsatuvchi dalillar yo'q. O'ta yangi II portlashi mexanizmi hali yana topshirilishi lozim.

Yulduzlarning evolyutsiyasining oxirgi stadiyasi yulduzlar massasiga bog'liq bo'ladi. Allaqachon qayd etildiki, massiv yulduzlar, ularning markazi ketma-ket sintezning yuqorida qayd etilgan barcha reaksiyalari vujudga kelib, markazida temir yadrolari guruhiga kiruvchi elementlardan tashkil topgan yulduz yadrosi hosil bo'ladi. Bunday obyekt keyinchalik portlab tashqi qobig'ini fazoga uloqtiradi markazida esa neytron yulduzi yoki qora tuynuk hosil bo'ladi.

Agar yulduz hayotini oxirida o'ta yangi portlash yuz berishiga yetadigan massaga ega bo'lmasa, u yadro reaksiyalari tugagandan keyin asta sekinlik bilan soviydi. Massasiga bog'liq ravishda bunday yulduz sovigandan keyin yoki oq karlik yoki neytron yulduziga aylanishi mumkin.

Bob – III. Yulduzlar evolyutsiyasining oxirgi stadiyalarida hosil bo'luvchi obyektlar

§3.1. Oq karliklar

Massasi kritik massadan kichik bo'lgan yulduzlar uchun gravitatsion siqilish Oq karlik deb ataluvchi stadiyadan to'xtaydi. Oq karlik zichligi 10^7 gr/sm^3 dan katta bo'lib, yuzining temperaturasi $\sim 10^4 \text{ k}$ bo'ladi. Bunday yuqori temperaturada atomlar to'la ionlashgan bo'lib, yulduz ichida yadrolar, aynigan elektronlar gazini hosil qiluvchi elektronlar daryosi ichida joylashgan bo'ladi. Bunday gazning bosimi yulduzni yana gravitatsion kollapsini chegaralaydi. Aynigan elektronli gaz bosimi kvant tabiatiga ega bo'ladi. Bosim elektronlar bosimi Pauli prinsipiga bo'y

sunganligi uchun vujudga keladi. Pauli prinsipi har bir elektron egallashi mumkin bo'lgan chegaraviy hajmni belgilaydi. Tashqi bosim bu hajmni kamaytrish qobiliyatiga ega emas. Oq karlikda barcha elektronlar o'zining chegaraviy egallashi mumkin bo'lgan hajmiga erishgan bo'lib, aynigan elektronli gazning bosimi gravitatsion siqilishni muvozanatlaydi. Kvant mexanikasidagi aniqmaslik prinsipidan foydalanib, Oq karliklarni maksimal massasini baholaymiz. Kvant mexanikasidagi aniqmaslik prinsipidan

$$\Delta p \cdot \Delta x \approx \hbar$$

taxminan $p \approx \Delta p$, $x \approx \Delta x$ deb olamiz.

Gravitatsiya kuchlari ta'siri ostida elektronlar x-masofagacha yaqinlashib p_e -impulsga ega bo'lsin. Sistemada electron zichlik $n=1/x^3$ bo'lganligi sababli, aniqmaslik prinsipidan

$$p_e \approx \hbar n^{1/3}$$

ekanligini topamiz. Elektronli gaz p bosimi quyidagi munosabatdan aniqlanadi.

$$p \approx n c p_e \approx \hbar c n^{4/3}$$

Bu formulani chiqarishda elektronlar yorug'lik tezligiga yaqin tezlikga ega deb olindi.

Muvozanatlik shartida bajarilganda, elektronli gaz bosimi gravitatsion bosimni muvozanatlashi kerak.

$$\left(\frac{3}{5}\right)m_p \left(\frac{GM}{R}\right) = \hbar c n^{4/3}$$

Bunda m_p -proton massasi bo'lib, elektronlar konsentratsiyasi va protonlar konsentratsiyasi o'zaro teng deb olingan, bunday tenglik sistemani elektroneytralligidan kelib chiqadi. Haqiqatdan ham

$$\frac{M}{R} = \frac{\hbar c}{G m_p} n^{1/3} = \frac{\hbar c}{G m_p} \left(\frac{M}{\frac{4}{3\pi R^3 m_p}} \right)^{1/3}$$

bo'lib, oq karlik massasi uchun chegara quyidagicha bo'lishini topamiz:

$$M = \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{3/2} \frac{5}{6} \frac{1}{m_p^2} \approx 1,5 M_{\odot}$$

Bunday chegaraviy massaga Chandrasekar chegarasi deyiladi. Shunday qilib oq karlikni chegaraviy massasi $1,4 M_{\odot}$ ga tengdir. Shunday qilib aynigan elektronli gazning bosimi $1,4 M_{\odot}$ katta bo'lgan massani ushlab olmaydi. Agar $0,5 M_{\odot} < M < 1,4 M_{\odot}$ bo'lsa Oq karlikning yadrosi uglerod va kisloroddan tashkil topgan bo'ladi. Agar $M < 0,5 M_{\odot}$ bo'lsa, Oq karlikning yadrosi geliydan tashkil topgan bo'ladi.

Oq karlikning zichligi quyidagi munosabatdan topiladi:

$$\rho \approx n m_p \approx \left(\frac{Pe}{\hbar} \right)^3 m_p$$

Baholash uchun faraz qilamizki electron tezligi yorug'lik tezligi yarmiga tengdir. U holda $p_e \approx m_e c/2$ (m_e -elektron) tinchlikdagi massasi bo'lib

$$\rho \approx \frac{m_p}{(2\hbar/m_e c)^3} \approx 6 \cdot 10^6 \text{ gr/sm}^3$$

bo'ladi. Massasi Chandrasekar chegarasiga teng bo'lgan yulduz radiusini topamiz

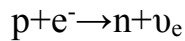
$$R = \left(\frac{31,4 M_{\odot}}{4\pi\rho} \right)^{1/3} \approx 5 \cdot 10^3 \text{ km}$$

Oq karlikni yorqinligi Quyosh yorqinligini 10^{-2} - 10^{-4} qismini tashkil etadi. Oq karlikning nurlanishi ular zaxiralangan issiqlik energiyasi hisobidan vujudga keladi. Oq karliklar tarkibida Si, S va Ar yadrolari borligini kuzatilishi shunday karliklar borligidan xabar beradiki, ular asosan O, Ne va Mg element yadrolaridan tashkil topgan.

§3.2. Neytron yulduzlar

Hisoblashlar ko'rsatadiki massasi $M \sim 25 M_{\odot}$ bo'lgan o'ta yangi portlashi natijasida yulduzlar zichligi katta bo'lgan massasi $\sim 1,6 M_{\odot}$ bo'lgan qoldiq yulduz

(neytronli yulduz) qoladi. O'ta yangi stadiyasiga yetmagan massasi $M > 1,4 M_{\odot}$ bo'lgan yulduzlarda ham aynigan elektronli gaz bosimi gravitatsion kuchni kompensatsiyalay olmaydi va yulduz yadro materiyasi zichligiga qadar siqiladi. Bunday gravitatsion kollapsning mexanizmi xuddi o'ta yangi yulduz portlashida kuzatilganidek bo'lib, bunda bosim va temperatura yulduz ichida shu darajaga yetadiki, elektronlar va protonlar bir-biriga siqilib quyidagi reaksiya amalga oshadi



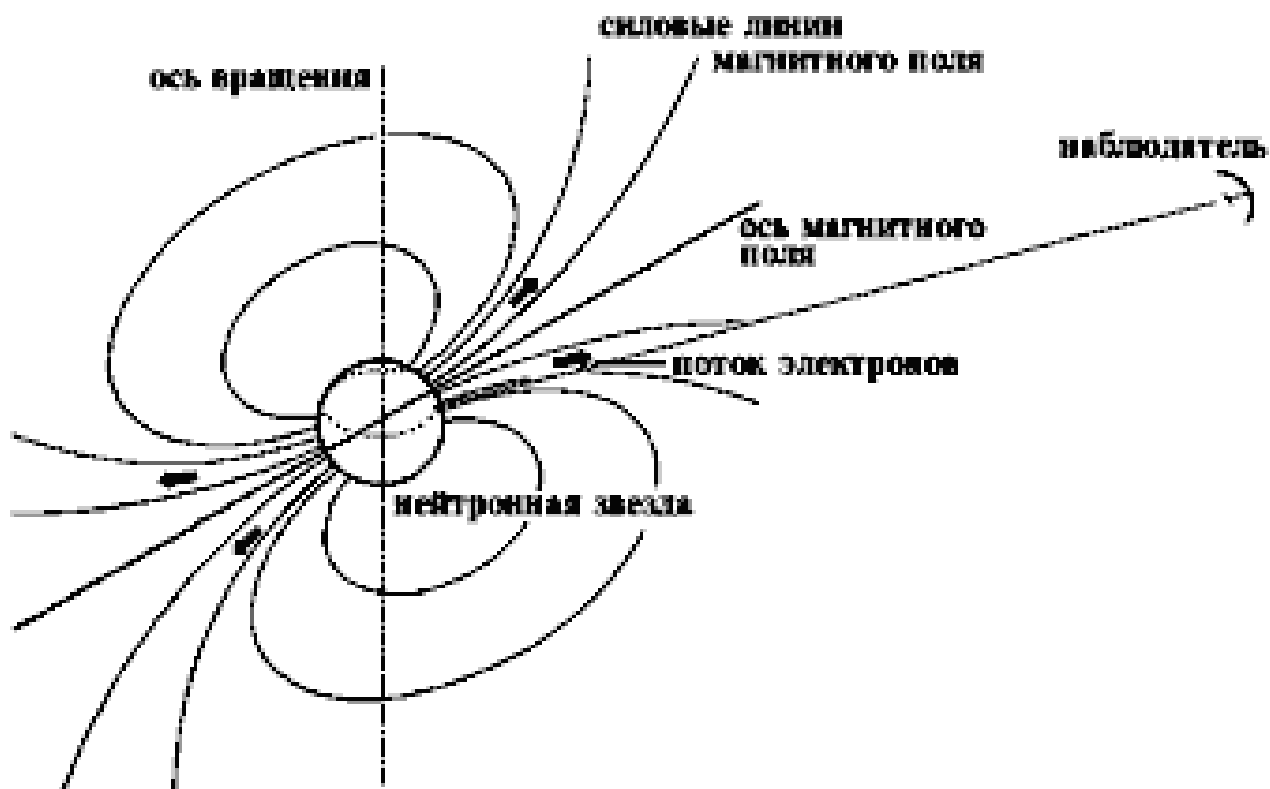
neytrinolar chiqib ketgandan keyin neytronlar hosil bo'ladi. Hosil bo'lgan neytronlar elektronlarga nisbatan kichikroq fazoviy hajmni egallaydi. Natijada zichligi $10^{14} - 10^{15} \text{ gr/sm}^3$ bo'lgan neytronli yulduz hosil bo'ladi. Bunday yulduzlarning xarakterli radiusi 10-15 kmga tengdir. Qandaydir ma'noda neytronli yulduz gigant atom yadrosidan iboratdir. Bunday yulduzlarda yana gravitatsion siqilishga yadroviy materiya bosimi to'sqinlik qiladi, bunday bosim neytronlarni o'zaro ta'siri tufayli hosil bo'ladi. Bunday bosim ham aynigan gaz bosimidek bo'lib lekin yana katta zichlikli neytronli gaz bosimidir. Bunday bosim $3,2 M_{\odot}$ massagacha ushlay oladi. Kollaps davrida hosil bo'luvchi neytrino yulduzni tez sovitadi. Hisoblashlarni ko'rsatishicha temperatura 100 s mobaynida 10^{11} K dan 10^9 K gacha pasayadi, keyinchalik sovish tezligi kamayadi, lekin astronomik masshtabda tezlik katta. Temperaturani 10^9 K dan 10^8 K gacha pasayishi 100 yilda vujudga kelsa, 10^6 K gacha pasayishi million yilda vujudga keladi. Optik usullarda neytronli yulduzlarni qayd qilish temperaturasi past va o'lchami kichik ekanligi uchun juda qiyindir.

1967 yilda Kembridj universitetida Xyushi va Bell kosmik elektromagnit nurlanish manbai-pulsarlarni ochdilar. Ko'pchilik pulsarlarni impulslarini takrorlanishi $3,3 \cdot 10^{-2} - 4,3 \text{ s}$ intervalida yotadi. Hozirgi zamon tasavvurlariga ko'ra pulsarlar bu massasi $1 - 3 M_{\odot}$ bo'lgan diametri 10-20 km bo'lgan aylanuvchi neytronli yulduzdan iboratdir. Faqatgina neytronli yulduzlar xususiyatiga ega bo'lgan obyektlargina bunday tezlik bilan aylanib formasini saqlashi mumkin. Neytronli yulduzni hosil bo'lishida burchak momenti saqlanishi va magnit

maydoni tez aylanuvchi pulsarlarni tez hosil bo'lishiga olib keladi. Pulsarlar kuchli $\beta \sim 10^{12}$ gs magnit maydoniga ega bo'lgan obyektlardir.

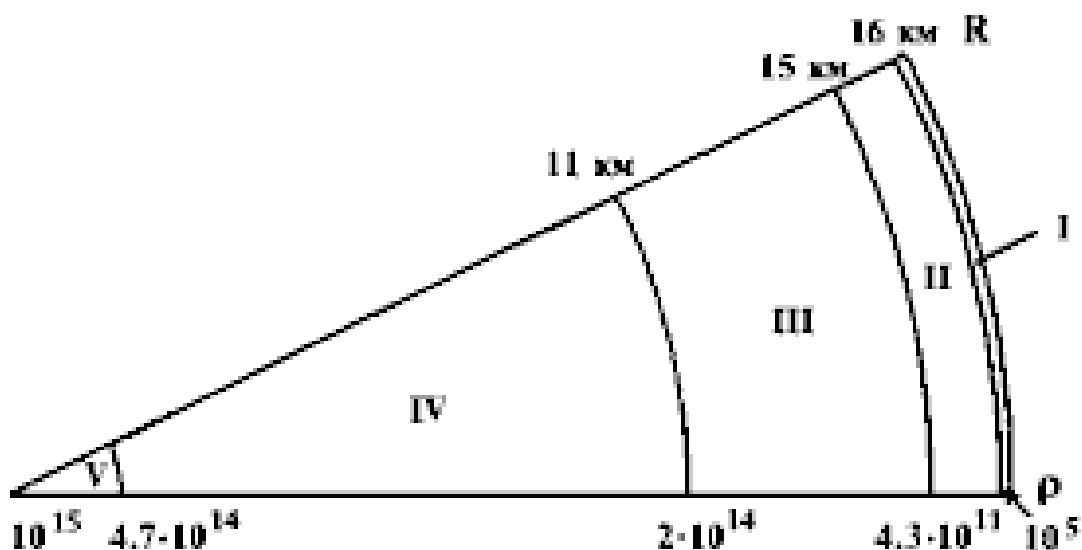
Pulsarlar magnit maydoniga ega bo'lgan neytronli yulduzlar deb olinadi. Bunday yulduzlarni magnit maydonini o'qi uning aylanish maydoniga mos kelmaydi. Bu holda yulduz nurlanishi (radio to'lqin yoki ko'rinuvchi nur) mayoq nurlanishidek Yer sirtida ishqalanadi. Nur Yerni kesganda impuls qayd etiladi. Neytron yulduzni qayd nurlanishi zaryadlangan zarralarni yulduz magnit maydoni kuch chiziqlari bo'ylab harakat qilmaganlarida hosil bo'ladi. Pulsar bunday nurlanish mexanizmi birinchi marotaba Gold tomonidan ilgari surilgan bo'lib, 9-rasmda ko'rsatilgandir.

Nurlanish dastasi Yerdagi kuzatuvchiga tushganda radioteleskop qisqa impulsni qayd qiladi. Bu impulsning davri neytron yulduzni aylanish davriga teng bo'ladi. Impulsning formasi neytron yulduzni magnit maydonini formasiga bog'liq ravishda murakkab bo'lib, har qaysi pulsar uchun xarakterli bo'ladi. Pulsarlarni aylanish davri (qayd etilgan impuls davri) aniq o'zgarmas bo'ladi. Hozirgi vaqtda



Rasm 9. Pulsar modeli.

ikkilangan yulduzlarga kiruvchi pulsarlar qayd etilgan. Agar pulsar yo'ldosh asosiy yulduz atrofida aylanayotgan bo'lsa Dopler effekti tufayli pulsardan qayd etilgan impuls davrini variatsiyasi kuzatilishi kerak. Agar pulsar kuzatuvchiga asosiy yulduz atrofida aylanayotib kuzatuvchiga yaqinlashsa Dopler effekti tufayli impuls davri kamayib, uzoqlashayotgan bo'lsa oshadi. Shu hodisa tufayli qo'shaloq yulduzlar tarkibiga kiruvchi pulsarlar qayd etilgan edi. Birinchi marotaba qayd etilgan qo'shaloq yulduzga kiruvchi pulsar PSR1913-16-ni orbita bo'ylab aylanish davri 7 soat 45 minutga teng bo'lsa, xususiy aylanish davri 59 mikrosekundni tashkil etadi. Pulsarni nurlanishi neytron yulduzni aylanishini kamaytirishi kerak. Qo'shaloq yulduz tarkibiga kiruvchi neytron yulduzi yana intensiv rentgen nurlanishi manbai ham bo'lishi mumkin. Massasi $1,4 M_{\odot}$ ga teng bo'lgan 16 km radiusli neytron yulduzining ichki strukturasi 10-chi rasmda ko'rsatilgandir. Bunda I-tashqi zich



Rasm 10. Massasi $1,4 M_{\odot}$ bo'lgan $R = 16$ km radiusli neytron yulduzining kesimi.

yulduz turli qismlaridagi zichlik ρ , gr/sm^3 -larda ko'rsatilgan atomlardan tashkil topgan qavatdir II va III oblastlarda yadrolar hajmiy markazlashgan kubik reshyotka joylashgandir. IV oblast asosan neytronlardan tashkil topgandir. V-chi oblast pionlar va giperonlardan tashkil topgan bo'lib, neytron yulduzining adronli markazini hosil qilgan bo'lishi mumkin. Neytron yulduzlarni alohida detallari

hozirgi paytda aniqlanayapti. Neytronli yulduzlar hamma vaqt ham o'ta yangi portlash natijasi bo'lavermaydi. Ularni qo'shaloq yulduzlardagi Oq karliklar evolyutsiyasi jarayonida boshqa mexanizm asosida hosil bo'lishi ham mumkin. Yulduz kompaniyondan muhitni asosiy komponenta Oq karlikga akreksiyasi uni massasini oshirishi mumkin. Oq karlikni massasi chandrasekar chegarasidan oshgandan keyin u neytron yulduziga aylanadi. Neytron yulduzi hosil bo'lgandan keyin muhit akreksiyasi yana davom etsa neytron yulduzini massasi oshib ketib qora tuynukga aylanishi mumkin. Bu tinch kollaps deb ataluvchi jarayonga mos keladi.

Kompakt qo'shaloq yulduzlar rentgen nurlanishi manbai kabi namoyon bo'lishi ham mumkin. Magnit maydonini induksiyasi $B > 10^{10}$ gs bo'lgan neytron yulduziga muhitni akreksiyasi yulduz magnit qutblariga tushishi mumkin. Rentgen nurlanishi neytron yulduzini o'qi atrofida aylanishi natijasida modulyatsiyalanishi mumkin. Bunday pulsarlarga rentgen pulsarlari deyiladi.

Shunday rentgen pulsarlari borki ularga Basterlar deyiladi. basterlarga davriy ravishda bir necha soatdan bir sutkagacha davr bilan nurlanishni yarqirashi (vgleski) vujudga keladi. yarqirashni oshishini xarakterli vaqti ~ 1 sekundga tengdir. Yarqirashni davri 3 sekunddan 10 s gacha bo'ladi. yarqirash davridagi intensivlik odatdagi tinch davrdagi intensivlikdan 2-3 tartibda katta bo'ladi. Hozirgi vaqtda bir necha yuz bunday manbalar qayd etilgandir. yarqirashlar neytron yulduzi sirtiga muhit akreksiyasi natijasida sirtida hosil bo'luvchi termoyadro reaksiyalari natijasida hosil bo'ladi.

Ma'lumki, nuklonlar orasidagi kichik masofalarda ($0.3 \cdot 10^{-13}$ sm) tortilish yadro kuchlari itarilishi kuchlariga aylanadi, ya'ni kichik masofalarda yadroviy muhiti qisuvchi kuchga qarshi ta'siri oshadi. Agar neytron yulduzi markazida zichlik yadro zichligi p_{yad} -dan oshsa va 10^{15} gr/sm³ ga yetsa, yulduz markazida nuklonlar va elektronlardan tashqari yana mezonlar, giperonlar va boshqa massiv zarralar paydo bo'ladi. zichligi yadro zichligidan katta bo'lgan muhit xususiyatlarini o'rganish hozirgi vaqtda boshlang'ich holatda turib juda ko'p muammolarga ega. Hisob-kitoblar ko'rsatadiki $p > p_{\text{yad}}$ -larda pionli kondensat hosil

bo'lishi bilan o'tuvchi jarayonlar neytronlashgan muhitni qattiq kristallik holatga o'tishi, giperonli va kvark-gulyonli plazma hosil bo'lishi mumkin. Neytronli muhitni o'ta oquvchan, o'ta o'tkazuvchan holati vujudga kelishi mumkin. hozirgi zamon tasavvurlariga ko'ra yadro zichligidan 10^2 - 10^3 marotaba katta zichlikli muhitda mustahkamlik chegarasiga yaqin bo'lgan atom yadrolari hosil bo'ladi. Yetarlicha chuqur ma'lumotlarni muhit holatini temperatura , zichlik, yadro materiyasini mustahkamligi protonlar sonini neytronlar soniga nisbatini ekzotik qiymatlarida tekshirish natijasida olish mumkin.

§3.3. Qora tuynuklar

Neytronli yulduzlarda zich upakovka qilingan neytronlar gravitatsion kolaps jarayonida qancha massani ushlashi chegarasi mavjuddir. Bu chegarani hali zichli yadro muhiti zichligidan katta bo'lgan muhit xususiyatlari oxirigacha o'rganilmaganligi sababli hali hisoblash mumkin emas. Aynigan neytronlar hisobidan stabilizatsiyalanadigan yulduz massasining bahosi ko'rsatadiki, bu massa $\sim 3 M_{\odot}$ bo'lishi kerak. Shunday qilib agar o'ta yangi portlashidan qolgan yulduzning massasi $M > 3 M_{\odot}$ bo'lsa, bunday yulduz ustuvor neytron yulduzi bo'la olmaydi. kichik masofalarda ta'sir etuvchi yadro kuchlari ham gravitatsion siqilish kuchiga qarshi tura olmaydi. Qora tuynuk deb ataluvchi obyekt hosil bo'ladi. Qora tuynuklarni asosiy xususiyati shundan iboratki, undan hech qanday signal chiqib keta olmaydi, kuzatuvchi uchun bunday obyekt ko'rinmas bo'ladi. M massali yulduz kollapslanib qora tuynukga aylanib r_g – radiusli sferaga erishadi, r_d - Shvartsschild radiusi va bu radius quyidagi munosabatdan hisoblanadi.

$$r_g = 2GM/c^2$$

Bu formulani ikkinchi kosmik tezlik formulasidagi $v_{k2} = (2GM/R)^{1/2}$ - tezlikni chegaraviy qiymati yorug'lik tezlikga teng deb olib topishimiz mumkin.

Obyekt qora tuynukga aylangandan keyin uning gravitatsion maydoni shu darajada kuchayadiki, undan hatto elektromagnit nurlanishlar ham chiqib keta olmaydi. Quyosh shvartsschild radiusi 3 kmga, yerniki-1 smga tengdir.

Shvartsshild qora tuynuklari aylanmaydigan obyektlar bo'lib, aylanmaydigan, massasi nihoyat katta bo'lgan yulduzlarning mahsulotidir. aylanuvchi massiv yulduz aylanuvchi qora tuynukga aylanadi va bunday qora tuynuklarga Kerr qora tuynugi deyiladi. Qora tuynuklarni (Kosvenniy-teskari) priznaklariga ko'ra agar u qo'shaloq yulduz tarkibiga kirgan bo'lsa kuzatish mumkin. Bunday holda qora tuynuk yo'ldosh yulduzni gaz muhitini so'riydi. Bunday gaz isib, intensiv rentgen nurlanishi manbaiga aylanishi mumkin va rentgen nurlanishini qayd qilishi mumkin bo'ladi.

Hozirgi vaqtda qora tuynuklar borligini tasdiqlovchi to'g'ri eksperimental natijalar mavjud emas. Lekin koinotda bir nechta obyektlar borki, ularning xususiyatlarini tarkibida qora tuynuk bor deb olib tushuntirish mumkin. Masalan Oq qush XI obyekti bo'lib, bu obyekt qo'shaloq yulduzdan iborat bo'lib, yo'ldoshning aylanish davri 5,6 sutkani tashkil etadi. Oq qush tarkibiga ko'k massasi $22 M_{\odot}$ bo'lgan gigant va pulsatsiyalanuvchi rentgen nurlanishi manbai bo'lgan massasi $8 M_{\odot}$ yulduz kiradi. Bu yulduz qora tuynuk bo'lishi mumkin. (Bunday katta massali obyekt neytron yulduzi bo'lishi mumkin emas.) Yulduzlarning gravitatsion kollapsi natijasida hosil bo'lgan qora tuynuklar bilan birgalikda koinotning birjinslimaslaridan katta portlash natijasida hosil bo'lgan qora tuynuklar ham bo'lishi mumkin. Katta portlash natijasida muhitning birjinslimaslari siqilib qora tuynukga aylangan koinot qolgan qismi kengayib sovigan bo'lishi mumkin. koinot evoyutsiyasini boshlang'ich paytlarida hosil bo'lgan qora tuynuklarga relikt qora tuynuklari deyiladi. faraz qilinadiki relikt qora tuynuklarining ba'zilarini o'lchami proton o'lchamidan ham kichik bo'lishi mumkin.

1974 yilda Xoking nazariy yo'l bilan isbot etdiki, qora tuynuklar zarralarni nurlanishi ham mumkin. Bunday zarralarning manbalari virtual zarra va antizarra jufti bo'lishi mumkin. Bunday virtual zarralar jufti odatdagi maydonda shunday tez anigilatsiyalanadiki, ularni kuzatish mumkin emas. Lekin juda kuchli gravitatsion maydonida bu juft o'zaro anigilyatsiyalanmasdan birini maydon qora tuynukga tortib olsa ikkinchisi uzoqlarga ketib kuzatuvchi tomonidan kuzatiladi. Bunday

nurlanish qora tuynukning Xoking nurlanishi deyiladi. Bu nurlanishda energiya qora tuynuk ichkarisidan chiqadi. Shuning uchun bunday nurlanish tufayli qora tuynukning massasi va o'lchami kamayib boradi. Baholashlar ko'rsatadiki, qora tuynuklarning nurlanish tezligi juda kichikdir. O'ta massiv qora tuynuklar vaqti 10^{97} yilga yetadi.

§3.4. Neytronlar ta'siri ostida o'tuvchi jarayonlar, r-jarayon

Hozirgi vaqtda tan olinishicha temir yadrosidan og'ir yadrolar (^{209}Bi yadrosidan ham og'ir yadrolarni qo'shib olganda) protonlarni ketma-ket tez ushlab olish r-jarayon natijasida hosil bo'ladi. Asosiy shart shundan iboratki, neytronlarni ushlash tezligi β -yemirilish tezligidan katta bo'lishi kerak. Neytronlarni ushlashni asosiy mexanizmi (n, γ) -reaksiyadir. Neytronlarni ushlash jarayoni tezligi izotopning yemirilish tezligidan kichik bo'lguncha davom etadi. Hosil bo'lgan yadro β -yemirilish natijasida bo'linadi va keyin yana ketma-ket neytronlarni ushlash jarayoni amalga oshadi. Haqiqatdan ham og'ir yadrolarni r-jarayon natijasida bo'lishini tasdiqlovchi dalil bo'lib, yadrolarni turli jarayonlarda hosil bo'lishini ifodalovchi chiziqda yulduzlarda ikkilangan maksimumlarni magik neytronlar soni $N=50, 82, 126$ bilan korreksiyalanishidir. Biz qayd etgan edikki, $A=90, 138$ va 208 ga to'g'ri keluvchi maksimumlar s-jarayonda hosil bo'luvchi yadrolarni bildirsa, kichik $A=80, 130$ va 195 ga mos keluvchi maksimumlar r-jarayonda hosil bo'luvchi yadrolarni bildiradi. Agar kerakli neytronlar konsentratsiyasi kamaysa yoki hosil bo'lgan yadrolar ketma-ketligida α -yemirilish yoki bo'linadigan yadrolar hosil bo'lsa r-jarayon tugallanadi.

Hisoblanadiki r-jarayon o'tishi uchun zarur bo'lgan kerakli neytronlar konsentratsiyasi o'ta yangi portlashlarda hosil bo'ladi. r-jarayon uchun kerak bo'ladigan neytronlar zichligini p_n -ni baholaymiz. Agar r-jarayon davomida n -ta neytron ushlangan bo'lsa, β -yemirishi hosil bo'lguncha neytronlar konsentratsiyasi quyidagi shartdan aniqlanadi

$$\tau_{\beta} \approx n \tau(n, \gamma)$$

Bunda τ_{β} β -yemirilishni o'rtacha vaqti bo'lsa, $\tau(n, \gamma)$ reaksiyada neytronlarni ushlash vaqti.

O'z navbatida

$$\tau(n, \gamma) \approx \frac{1}{p_n(\delta_{n\gamma} v_n)}$$

Bunda $(\delta_{n\gamma} v_n)$ (n, γ) reaksiya kesimini neytroni mishen yadrosiga nisbatan tezligi ko'paytmasi bo'lib, ko'paytma Maksvel tezliklar bo'yicha taqsimlanishi spektriga ko'ra o'rtalashtirilgan.

$$(\delta_{n\gamma} v_n) \approx \delta_T v_T$$

Bunda $\delta_T (\approx 100 \text{ mbarn})$ va v_T -neytronlarning kesimi va zichligi bo'lib bu xarakteristikalar 3/2 kt energiyaga mos keladi.

$\tau(n, \gamma)$ uchun quyidagini topamiz

$$\tau(n, \gamma) \approx \frac{\sqrt{m_n}}{p_n \delta_T \sqrt{3KT}} = \frac{2 \cdot 10^{16}}{p_n T^{\frac{1}{2}}}$$

Bunda $\tau(n, \gamma)$ sekundlarda ifodalangan bo'lsa, 10^9 k birligida, $p_n \text{ sm}^{-3}$ birligida ifodalangandir. P_n -ning oxirgi ifodasi quyidagicha

$$\rho_n \approx \frac{2 \cdot 10^{16} n}{T^{\frac{1}{2}} \tau_{\beta}}$$

r-jarayon chizig'i bo'ylab β -yemirilishning xarakterli vaqti τ_{β} -1s, $n=10$ va $T=10^9$ k bo'lib, quyidagini topamiz

$$\rho_n \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ neytron/sm}^3$$

Endi r-jarayon kechadigan turli astrofiz shartlarni ko'rib chiqamiz.

1. O'ta yangini portlashda hosil bo'lgan zarbali to'lqinlar geliyli va nionli qatlamlardan o'ta turib $^{22}\text{Ne} (\alpha, n) ^{25}\text{Mn}$ reaksiyalarini hosil qiladi.
2. O'ta yangi portlash stadiyasida massiv yulduzning markaziy qismida r-jarayon natijasida og'ir elementlarni hosil bo'lish mexanizmini bilish muhimdir.

Yulduzning markaziy qismi juda ko'p neytronlar va α -zarralarga ega, bunday zarralar temirni fotobo'linish $^{56}\text{Fe} \rightarrow 13\alpha + 4n$ reaksiyasida yulduz evolyutsiyasi oxirgi stadiyasida vujudga keladi. Markazda muhit zichligi, yadro

muhiati zichligiga teng bo'lganligi sababli ko'pzarrali α va nuklonlarni bir-biriga yopishish yadro reaksiyalari muhim rol o'ynaydi

$$\alpha + \alpha + \alpha$$

$$\alpha + \alpha + \alpha + n$$

$$\alpha + \alpha + \alpha + p$$

bunda osonghina nostabil yadro $A=5$ va 8 oblasti o'tiladi. Bunday ko'pzarrali yadro reaksiyalari yuqori zichlik sharoitida o'tayotganligi uchun temir cho'qqisi yaqinidagi yadrolar hosil bo'lib, ularda r-jarayon o'tadi. Ko'rsatilgan ediki bitta jarayon yordamida yetarlicha yaxshi r-jarayonda hosil bo'luvchi har uchta cho'qqini kuzatish mumkin. R-jarayonning detalli hisoblashlarida nafaqat temir cho'qqisida hosil bo'luvchi yadrolar, balki r-protsesda bo'linish natijasida hosil bo'lgan yadrolardan ham foydalaniladi.

Haqiqatdan ham r-jarayon natijasida og'ir yadrolarni hosil bo'lishini tasdiqlovchi fakt sifatida tabiatda faqatgina r-jarayon hisobida hosil bo'luvchi yadrolar ^{100}Mo , ^{96}Zr , ^{76}Ge va boshqalar borligini ko'rsatish kerak. Bu izotoplarning s-jarayonda hosil bo'lishi izotoplarni yarim yemirilish davrini kichikligi bilan ekranlashtirilgan.

XULOSALAR

Bu malakaviy bitiruv ishida olingan ilmiy natijalarni quyidagicha bayon etish mumkin.

1. Massasi $25 M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ – quyosh massasi) ga teng va undan katta bo'lgan yulduzlarning tarkibi birjinslimas bo'lib, markazida temirli yadro paydo bo'ladi. temirning γ -kvantlar ta'siridagi fotobo'linishi jarayoni yulduz markazini qisilishi va keyinchalik o'ta yangi portlashiga olib keladi.
2. Yulduzlar temirli yadrosini vodorodlardan hosil bo'lish evolyutsiya jarayonida chiqargan energiya miqdorini, hayotini oxirgi etaplarida temirli yadrodan foto bo'linish reaksiyalari natijasida vodorod, neytron, protonlar hosil bo'lishida yutadi.
3. I – tip o'ta yangilarning yorqinlik egri chizig'ining asosiy xususiyatlari $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ yemirilishlar xususiyatlari bilan belgilanadi, ya'ni o'ta yangi I-tipdagi yulduzlar evolyutsiyasining berilgan etapida bu yemirilishlar muhim rol o'ynaydi. Kuchli gamma nurlanish bilan o'tuvchi bunday reaksiyalar zanjiri har qanday o'ta yangida mavjud bo'lib, portlash jarayonida o'ta yangi yulduz yorqinligini ta'minlaydi.
4. O'ta yangi yulduzni chaqnashi paytida uning qa'rida o'tuvchi tez jarayon ~ 100 sekund vaqt davomida (r jarayon) atom yadrolari tomonidan neytronlarni ushlab qolishi natijasida yadrosini massalar soni $A=270$ gacha bo'lgan kimyoviy elementlar yadrolari hosil bo'ladi.
5. Yulduzlar rivojlanishining oxirgi etaplarida $M > 1,5 M_{\odot}$ massali yulduzlar yadrolari tomonidan neytronlarni ushlab qolish jarayoni natijasida og'ir yadro (^{209}Bi) gacha bo'lgan kimyoviy elementlar yadrolari hosil bo'ladi. Bunda erkin neytronlar manbai bo'lib, $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{23}\text{Mg} + n$, $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{31}\text{Si} + n$ reaksiyalari xizmat qiladi.
6. Yulduzlar o'zlarining evolyutsiya jarayoni davomida massasiga bog'liq ravishda yulduzlarning asosiy ketma-ketligiga tushib hayotining oxirigacha qizil o'ta gigantlardan tortib oq karlikgacha yoki qora tuynukgacha bo'lgan guruhlariga tushish yo'lidan o'tadi.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR RO'YXATI:

1. E. M. Birbidge et. Al. –rev. Mod. Phys, 1957, V.29, p 547-650.
2. Yadernaya Astrofizika. Pod redaksiyey Ch. Barnsa, D. Kleytona, D. Shramma. - M, Mir, 1986.
3. Ya. M. Kramarovskiy, V. P. Chexov. Sintez elementov vo vselenoy - M, Nauka. 1987.
4. S.Vaynberg. perviy tri minuti M: Energo izdat.
5. Zeldovich Ya. B, Novikov I. D. Novikov. Stroyeniye i evolyutsiya vselenno-. M: Nauka. 1987.
6. D. Silk. Bolshoy Vzriv-M: Mir, 1982.
7. B. S. Ishxanov i dr. “Nukleosintez vo vselennoy” M: iz-vo MGU, 1988.
8. Ya. M. Kramarovskiy, V. P. Chexov, “Radioaktivnost i evolyutsiya vselennoy”-m: Nauka, 1978.
9. A. Aller atomi, zvyozdi i tumannosti, - M: Mir, 1976.
- 10.R. Teylor. Stroyeniye I evolyutsiya zvyozd-M: Mir, 1975.
- 11.R. Teylor, Proisxojdeniya ximicheskix elementov-M: Mir, 1978.
- 12.B. S. Ishxanov, I. M. Kopitonov, Yadernaya fizika. Proisxojdeniya elementov – Iz - vo MGU, 1989.
- 13.I. D. Novikov. Kak vzorvalas vseleennaya. – M: nauka. 1988.
- 14.Dj. Dj. Narlikar. Ot chyornix oblakov k chyornim Diram. M: energo atom izdat. 1989.
- 15.I.D.Novikov “Kak vzorvalis vseleennaya”, M.: Nauka, 1988
- 16.G.S. Bisnovatiy – Kogan “Evolutsiya zvyozd”. Fizicheskaya ensiklopediya, T.5, S.487 – 494. M.: Nauchnoye izdatelstvo “Bolshaya rossiyskaya ensiklopediya”, 1988 y.
- 17.I. Sattorov “Astrofizika”, I – qism. Toshkent. 2007 yil.
- 18.I. Sattorov “Astrofizika”, II – qism. Toshkent. 2007 yil
- 19.M.Mamadazimov “Astronomiya”. Kasb-hunar kollejlari va akademik litseylar uchun o’quv qo’llanma. Toshkent, 2000 y.
- 20.Mirsalimova “Umumiy astronomiya”. Toshkent, 2001 y.