جـــــــامعة قاصدي مربـــــاح ورقـلة
كلـــية الرياضـــــيات وعـــــلوم المـــــادة
قسم الفيزيـــــــــاء

مذكرة تخرج لنيل شهادة
ماستر أكاديمي
مجـــال:عـــلوم االمـادة
تخـــــصص: فيزيـــاء طاقوية والطاقات المتجددة
من إعداد الطالبتين: زوزو الشريفة – قوي منال

بعنوان

التـــــــطور النـــــــــجمي

نـقل وإنتـــاج الـــــطاقة

أمام لجنة المناقشة المكونة من:

الزين عبد الله	أستاذ مساعد(أ)	جامعة ورقلة	رئيسا
سوداني محمد البار	أستاذ محاضر(أ)	جامعة ورقلة	ممتحنا
بالغيثار الحاج بالشراير	أستاذ محاضر(أ)	جامعة ورقلة	مشرفا
مالكي زهيدة	أستاذ مؤقت(ة)	جامعة ورقلة	مساعد-مشرف

الموسم الجامعي:2022/2021

بسم الله الرحمن الرحيم

الإهداء

ما أجمل أن يجود المرء بأغلى
ما لديه، والأجمل أن يهدي الغالي للأغلى،
هي ذي ثمرة جهدي أجنيها اليوم،هي هدية أهديها إلى:
صاحب السيرة العطرة والفكر المستنير، فلقد كان له الفضل الأول في بلوغي التعليم العالي والدي الغالي أطال الله في عمره(قوي محمد الحافظ)
إلى من حملتني وهناً على وهنٍ ووضعتني على طريق الحياة، وجعلتني رابط الجأش وراعتني أمي الحبيبة(قمو عقيلة)
إلى من تقاسمتُ معهم حلو الحياة ومرارتها، إلى من كان لهم بالغ الأثر في كثير من العقبات والصّعاب إخوني وأخواتي(منى، جمعة، سندس، أحمد، زكرياء، صلاح)

إلى أخي الحبيب رحمة الله عليه(حسان)
إلى من ساندتني في إنجاز هذا العمل صديقتي وزميلتي *زوزو الشريفة*
إلى جميع أساتذتي الكرام، ممن لم يتوانوا في مدّ يد العون لي وأخصُّ بالذكر الأستاذ * تخة محمد *

إلى صديقات الحبيبات (فاطمة، إكرام، لميس، كوثر، مروة، أسماء، فريال، إيمان، سميرة، سولاف، فيروز،سميحة،نسرين، مروة، ماجدة، ميسون، إنصاف، نور الهدى، شهيناز، إخلاص، عبير، جنة، جهينة، صفاء، سيليا،صباح، منال، بسمة)

إلى كل مناضلي ومناضلات الاتحاد العام الحر وبالأخص السيد رئيس الفرع " عدنان مبارك " على دعمه ووقوفه لإنجاز هذا العمل
داعية المولى عز وجل أن يُطيل في أعماركم ويرزقكم بالخيارات في االدنيا والآخرة.

أهدي لكم بحث تخرجي

منال

الإهداء

بداية أحمد الله عز وجل الذي وفقني لإتمام هذا البحث العلمي سائلة الله تعالى التوفيق والسداد في بقية مشوار حياتي فالحمد لله حمدا كثيرا طيبا مبارك فيه.

إلى مربية الأجيال وعطر الحنان ونبع المحبة، أمي الغالية حفظها الله وأطال في عمرها(جميلة)

إلى الذي بذل جهد السنين من أجل أن أعتلي سلالم النجاح والدي العزيز بارك الله في عمرك.ع.القادر

إلى من سمعني وكان سندا لي في هذه الحياة، إلى نعم الرفيق والصديق إلى مشجعي على الأمل والتفائل جمعني الله به في الدنيا والآخرة (زوجي المستقبلي تاله مفيد).

إلى إخواني الأفاضل كل باسمه (نوح، محب، سايح، عثمان) وإلى زواجتهم الغوالي.

إلى أخواتي الفضليات الطيبات اللاواتي لم يبخلن علي بشيء (آسيا، عفاف، يسرى) أسأل الله أن يحميكن ويحفظكن وينير دربكن ويرزقكن ما تتمنون.

إلى من كنت لهم العمة والخالة براعمي الصغار أبناء أخواتي وإخواتي(ع.المؤمن، رفيدة، يوسف، عبد الله، عبد الغفار، عبد الشافي، نور الهدى، جنة)

إلى كل من كان سببا في سعادتي، ومن شاركني فرحتي وأحزاني، وإلى من جمعني بهم القدر فكانوا سببا في بهجتي "أصدقائي "

إلى زميلتي ورفيقتي ومساعدتي في هذا العمل(قوي منال)

إلى من حفزني وأرشدني ووجهني أساتذتي كل بإسمه.

الشريفة

شكر وعرفان

الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف المرسلين نبينا محمد وعلى آله وصحبه أجمعين أما بعد:

نشكر الله عز وجل على توفيقه لنا لإتمام هذا العمل، فهو الأحق بالشكر والثناء قال الله تعالى:

﴿فَاذْكُرُونِي أَذْكُرْكُمْ وَاشْكُرُوا لِي وَلَا تَكْفُرُونِ ﴾.

نتقدم بجزيل الشكر والعرفان لأساتذة قسم الفيزياء وخاصة الأستاذ الفاضل " بالغيثار الحاج بالشراير" على إشرافه لنا أولا وعلى دعمه ومساعدته العلمية والمعنوية ثانيا.

كما نتقدم بـأسمى عبارات التقدير والاحترام للأستاذة المساعدة "مالكي زهيدة"

ونتوجه بجزيل الشكر إلى جميع أساتذتنا خاصة " الزين عبد الله" الذي كان رئيسا لمذكرتنا وكذلك الأستاذ"سوداني محمد البار"الذي كان مناقشا.

كما نتوجه بالشكر إلى الذين كان لهم الفضل في دعمنا في مشوارنا الدراسي بالخصوص آباءنا وأمهاتنا وإخواننا وكل من ساندنا في إنجاز هذا العمل.

والى كل طلاب العلم عامة وطلاب جامعة قاصدي مرباح خاصة.

الفهارس

الإهداء
الشكر والعرفان
الفهارس

المقدمة العامة 1

I-الفصل الأول : التطور النجمي

I.1.تمهيد 4

I .2.دورة حياة النجم 4

I.1.2.تعريف النجوم 4

I.2.2.تكوين النجوم..... 4

I .3.تطور النجوم حسب مخطط (H-R)..... 5

I.1.3.العملاق الأحمر..... 8

I.2.3.السدم الكوكبية 9

I.3.3.المستعر الأعظم الضخم..... 9

I .4.موت النجوم..... 10

I.1.4.الأقزام البيضاء 10

I.2.4.النجم النيوتروني أو البلسار 11

I.3.4.الثقب الأسود 13

IIالفصل الثاني : مصادر الطاقة النجمية وطرق نقلها..... 17

II.1.تمهيد 17

II.2.مصادر الطاقة النجمية (التفاعلات النووية)..... 17

II.3.نقل الطاقة..... 23

II.3.1.نقل الطاقة بالإشعاع 23
II.3.2.نقل الطاقة بالتوصيل 28
II.3.3.نقل الطاقة بالحمل الحراري 30
III الفصل الثالث : دراسة مختلف أطوار التطور النجمي 35
III 1.تمهيد 35
III.2.المعادلات الأساسية للبنية النجمية 35
III.2.1. التوازن الهيدروستاتيكي 35
III.2.2.التوزيع الكتلي 36
III.2.3.توزيع اللمعان 37
III.2.4.التدرج 37
III.2.4.1.التدرج الإشعاعي 37
III.2.4.2.التدرج الحراري الادياباتيكي 39
III .3.دراسة نظرية لبعض مراحل التطور النجمي 40
III.3.1.التتابع الرئيسي 40
III.3.2.مرحلة النجوم العملاقة 44
III.3.3.الأقزام البيضاء 47
III.3.4.النجم النيوتروني 50
III.3.5.الثقوب السوداء 53
الخاتمة العامة: 57
قائمة المراجع 59

فهرس الأشكال

الشكل رقم 1 دورة حياة النجوم 5

الشكل رقم 2 . يوضح مخطط Hertzprung-Russe 6

الشكل رقم 3. يمثل مخطط(H-R)مع الأنواع الطيفية للنجوم 7

الشكل رقم 4 . يمثل عملاق أحمر 9

الشكل رقم 5 . يمثل سديم جبار 9

الشكل رقم 6 . يمثل مستعر أعظم..... 10

الشكل رقم 7 . يمثل الأقزام البيضاء..... 11

الشكل رقم 8 تمثل دوران نجم نيوتروني..... 13

الشكل رقم 9 . يمثل نجم نيوتروني..... 13

الشكل رقم 10 . يوضح ثقب أسود يسحب نجم مجاور له..... 15

الشكل رقم 11 يمثل التفاعلات النووية داخل النجم..... 19

الشكل رقم 12 . يوضح قشرة لنواة نجمية 36

الشكل رقم 13 مخطط HR لتطور النجم من التسلسل الرئيسي إلى مرحلة العملاق. 44

الشكل رقم 14 مقارنة العلاقة بين نصف القطر والكتلة لنجم متحلل 48

فهرس الجدول

الجدول رقم : 1 . يمثل الأطياف النجمية..... 7

الجدول رقم : 2.خواص كل من الشمس والقزم الأبيض والنجم النيوتروني 12

قائمة الرموز والوحدات

الرمز	التعريف	الوحدة
G	gravitational constant	$cm^3\ g^{-1}\ s^{-2}$
C	speed of light	$cm\ s^{-1}$
H	Planck constant	erg s
A	radiation density constant	$erg\ cm^{-3}\ K^{-4}$
σ	Stefan-Boltzmann constant	$erg\ cm^{-2}\ s^{-1}\ K^{-4}$
K	Boltzmann constant	$erg\ K^{-1}$
N_A	Avogadro's number	g^{-1}
$\Re$	gas constant	$erg\ g^{-1}\ K^{-1}$
$M_\odot$	Solar mass	G
$R_\odot$	Solar radius	Cm
$L_\odot$	Solar luminosity	$erg\ s^{-1}$

المقدمة

المقدمة العامة

يعبر علم الفلك عن دراسة الأجسام غير الأرضية مثل المذنبات، الكواكب، المجرات والنجوم وغيرها من الأجسام، حيث أثارت هذه الأخيرة جُملة من التَّساؤلات الغَاية منها إشباع الفضول المعرفي بالعالم الخارجي، لذا سنتطرق في هذه الدراسة إلى التَّطور النَّجمي ونَعني به التَغير الذي يحدث للنجم السماوي مع مرور الزمن، ويُمثِّل هذا التَّغيير مراحل تطور النجم التي تحدث في حياتهِ، منذ الولادة حتى الموت، ويَستغرق ذلك أزمنة طويلة جدًا تُحسب بملايين السنيين، حيث إنَّ أكبر إكتشافٍ إكتشفه الإنسان العصري في معرفته للكون بأنه يَزدحم بِالظَّواهر الكونية المذهلة التي أدركتها الرُّؤية الذاتية من خلال الوسائل المستحدثة والمستخدمة (التليسكوب)، وإكتشافهم لتَجمُّعات عديدة وضخمة من النجوم وتَوابِعها إضافةً للغازات والغبار المُنتشر بين تلك النُّجوم، سُميت هذه التجمعات بالمجرّات التي تُعتَبر الوحدة الأساسية لهذا الكون المليء بمليارات النجوم التي تتوزّع على مليارات المجرّاتْ، ففي مجرّةُ درب التبّانة لِوحدها يُوجد ما يقدّر ب 100 إلى 400 مليار نجم تَشْغُل مساحة شاسعةٍ من الفضاء. وإن العين المجردة للإنسان تمكنه من رؤية سِوى عدد صغير جدّاً من نجوم مجرة دربِ التبّانة وحدَها، كما لا يمُكننا رؤيةَ نجوم أي مجرّات أخرى من الأرض. ويقدِّر عُلماء الفلك عدد النجوم في الكون بأرقام عمْلاَقة جدّاً، لهذا السبب من الشائع بين علماء الفلك القول إنّ عدد النجوم في الكون أكثر من عدد حبيبات الرّمال على جميع شواطئ الأرض مجتمِعةً، وتشير بعض التقديرات الرياضية إلى أنّ هذه المقولة قد تكون دقيقةٌ جدّا

إن عالم النجوم كبير ومتنوع مليء بالأسرار و العجائب التي تمر بها البشرية وتنبؤنا الكثير عن الكون وأعماقه، وتُعْرف هذه الأخير على أنها كرات بلازما نشأت من سحابة غازية في مكان يدعى السدم، تُنْتج طاقة كبيرة جداً عن طريق تفاعل يسمى بالإندماج النووي، كما سنعمل على تفسير ظواهر التطور النجمي وخصائصه في كل مرحلة و نقل الطاقة المنتجة في قلب النجم. وكذا التعرف على المعادلات الأساسية للبنية النجمية والدراسة الوصفية لمختلف أطور التطور النجمي.

وهذا ما يدفعنا إلى طرح التساؤل التالي: **كيف يمكننا دراسة النجوم وتطورها وكيف يتم إنتاج ونقل الطاقة منها؟؟؟**

وللإجابة عن هذا التساؤل سنحاول من خلال هذه الدراسة إلى تطبيق المنهج الوصفي التحليلي للوصول إلى جملة الإستنتاجات الخاصة بالموضوع مستعينين بذلك على: مقدمة عامة و ثلاث فصول لنختتم دراستنا بخاتمة عامة وملخص.

أين تطرقنا في الفصل الأول إلى تعريف النجوم وكيفية نشأتها داخل السدم، لتبدأ في عملية التطور والتي تستغرق مدة طويلة أكبر من عمر الكون، وخلال ذلك تمر عبر أول مرحلة بعد الولادة وهي التتابع الرئيسي وتكون نهاية هذه النجوم (قزم أبيض، نجم نيوتروني أو ثقب أسود).

أما في الفصل الثاني فتعرفنا التعرف على مصادر الطاقة النجمية من إنكماش الجاذبية وتفاعلاتٍ نووية(وتتمثل في ماهية سلسلة تفاعلات P-P ودورة CNO،سلسلة تفاعلات ألفا ثلاثية وألفا) وإضافةً إلى كيفية نقل هذه الطاقة المنتجة في قلب النجم والتي لها ثلاث أشكال.

وفي الفصل الثالث قدمنا وصف الهيكل الداخلي للنجم بواسطة المعادلات الأساسية للبنية النجمية المطبقة في كل نقطة من نواتها الداخلية حتى غلافها الخارجي (القشرة)، حيث بنيت هذه الأخيرة على مجموعة من الفرضيات وتتمثل في إعتبرنا أن النجم عبارة عن كرة لها مركز ذو إشعاع لامع (اللمعان) ولها درجة حرارة، بالإضافة إلى الكتلة والكثافة، كل هذه تدخل في تركيبتها، ودراسة سُلوكها خلال مراحل التطور النجمي بدايةَ بالتتابع الرئيسي إلى غاية الثقب الأسود.

الفصل الأول :

التطور النجمي

الفصل الأول :
التطور النجمي

I الفصل الأول: التطور النجمي

1.I. تمهيد

إن النجم عبارة عن جُرمْ سَماوِي كُروي ضَخم مكون من غازات ساخنة، مشحون بالكهرباء، تسوده حرارة وضغط في الأعماق، سنتعرف في هذا الفصل على كيفية تطور النجوم، بدايةً من حياتها وكيف تصل للمراحل النهائية وكيف تموت النجوم، هذه كلها تمثل حقيقة دامغة، إن أهم ما أفرزته الأنشطة العلمية في العصر الحديث هو معرفة قصة حياة النجوم وهي قصة مليئة بالآيات العظيمة التي أبهرت البشرية ويجد فيها الدارس الكثير من التَّشويق والإعتبار.

1. 2.I. دورة حياة النجم

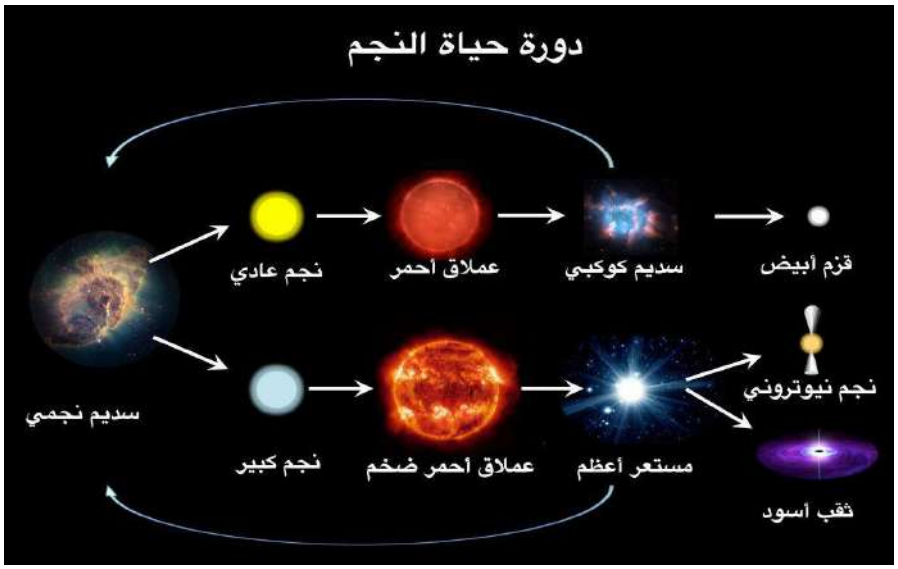
1.2.I تعريف النجوم

النجوم هي كرات ملتهبة تُطْلق كميات كبيرة جداً من الإشعاعات الكهرومغناطيسيّة نتيجة التفاعلات الحاصلة داخِلَها، وجميعُ النُّجوم هي عبارة عن كراتٍ غازيّة عملاقة مُكونةً في مُعظمِها من عنصريْ الهيدروجين والهيليوم. وهي البناءُ الأساسي للمادة في المجرّات والكون، أكثر الأجرام شيوعاً بالفضاء، تختلفُ النُّجوم عن بعضِها البعض في الشّكل، والحجم، واللّون، ودرجة اللّمعان أما الفارقُ الأساسي الذي يُميِّز النجوم عن الكوكب فهو أنَّ للنُّجوم مصدر للطّاقة، إذْ تستمدُّ طاقتها من عملية فيزيائية تُجري في مراكزِها تُسمّى الإندماج النووي.

2.2.I تكوين النجوم

تتكون النجوم داخل السدم وهي عبارة عن سحابة ضخمة من الغاز والغبار الكوني ولكن هذه الغازات موزعة بشكل منتظم في السديم، فبعض المناطق تكون ذات كثافة منخفضة، وأخرى ذات كثافة مرتفعة فتكون كتلتها أكبر مما يجعلها تجذب المزيد من الغازات نحوها، لتتكون كرة من الغازات ذات كثافة عالية إلى أن تصل إلى كتلة كافية، بحيث أن الضغط في داخلها يكون عاليا جدا ملايير المرات من الضغط الغازي بالأرض، وبزيادة هذا الضغط تزداد درجة الحرارة الى10000 كالفن وعند بلوغها أكثر من هذه الدرجة تستطيع ذرات الهيدروجين أو بالأحرى الأنوية من الذرات أن تنصهر، وتندمج مع بعضها البعض في التفاعلات النووية الإندماجية أو الإنصهارية لتتحول فيها ذرات الهيدروجين إلى هيليوم وبالتالي تنتج طاقة، وتعتبر بداية إنتاج الطاقة بهذه الكرة بمثابة الإعلان عن ولادة نجم جديد، تستغرق هذه الفترة من مليون إلى 3 ملايين سنة، هذه الأخيرة تشكل ضغط نحو الخارج هذا الضغط يعاكس الضغط الداخلي الذي تشكله الجاذبية، وبالتالي يحدث توازن وإستقرار لهذا النجم، تستغرق عملية الإستقرار من10إلى20 مليون سنة [2].

التفاعلات الحرارية النووية داخل النجم تنتج عن اتحاد أربع نوى هيدروجين لتكوين نواة هيليوم ويصاحب هذا التفاعل إطلاق كبير للطاقة (بسبب فقدان الكتلة التي تتحول إلى طاقة وفقًا لقانون أينشتاين $E = mc^2$)، هذه الأخيرة تزود النجم بإشعاع طيلة حياته [2].

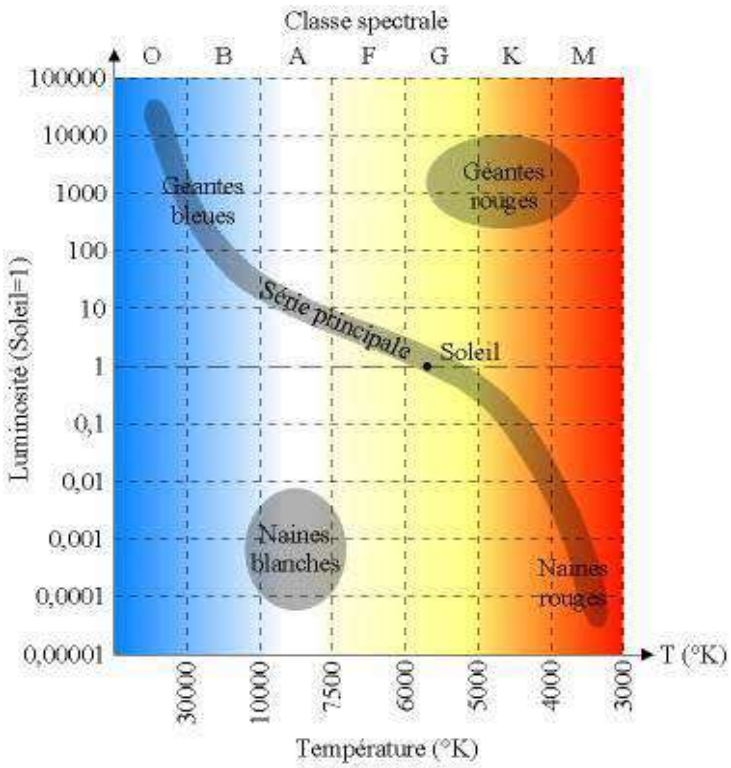


الشكل رقم 1 دورة حياة النجوم[1].

2. 3.I تطور النجوم حسب مخطط (H-R)

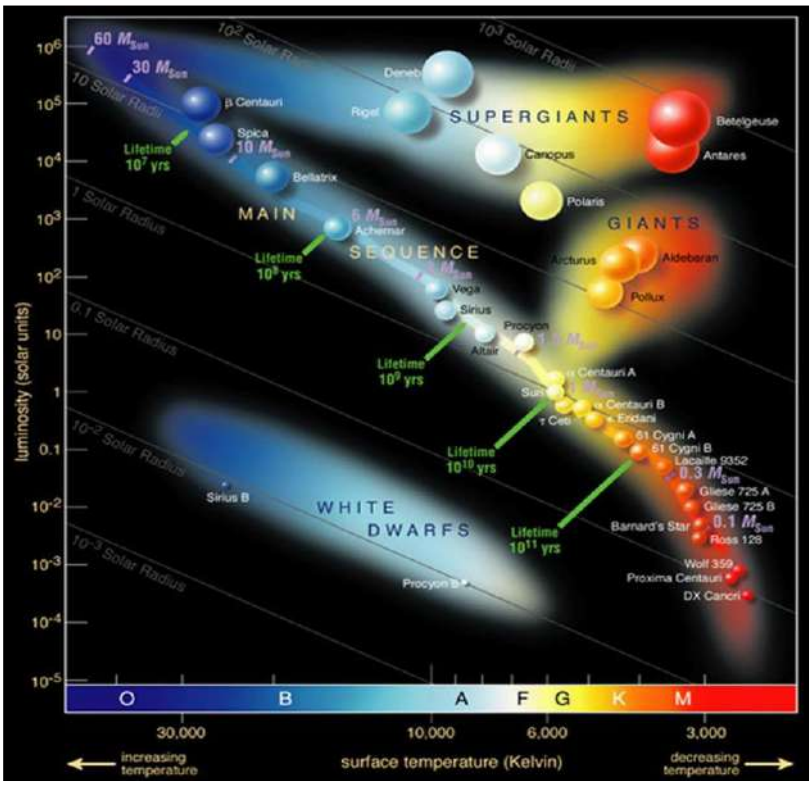
النجم في حالة توازن بين قوتين متعادلتين قوة الجاذبية التي تميل إلى تقلص النجم وقوى الضغط بسبب الطاقة المنبعثة من التفاعلات النووية التي تميل إلى توسيع النجم، ما دام هناك توازن بين هاتين القوتين يبقى النجم ضمن سلسلة نجوم التتابع الرئيسي، يعتمد عمر نجوم التسلسل الرئيسي بشكل أساسي على كتلتها، كلما زادت كتلة النجم زادت سرعة حرق الهيدروجين فيه، وعلى سبيل الذكر فإن عمر الشمس قد يزيد عن 10 مليارات سنة (مع العلم أنها تستهلك 4 ملايين طن من الهيدروجين في الثانية)، بينما النجم الأزرق العملاق سيعيش 10 ملايين سنة فقط، تمتلك أضخم النجوم في الكون عمرًا لا يتجاوز 3 ملايين سنة على العكس الأقزام الحمراء يمكن أن تعيش حتى 200 مليار سنة[3].

يبدأ النجم حياته على التتابع الرئيسي ويظل عليه فترة طويلة تقدر بحوالي تسعة أعشار من عمره حيث يظل تقريبا ثابتا في قدره ولمعانه، يبدو النجم مستقر تحت تغيرات طفيفة نسبيا في نشاطه وإشعاعه وينتهي طور التتابع الرئيسي إذا انتهى الهيدروجين من لب النجم، ويصبح اللب مكونا من الهيليوم، إن النجوم التي لها كتلة مثل كتلة الشمس لها مسار واحد تتطور فيه حتى تصل إلى نهاية حياتها، ومن الواضح أن قوة الجاذبية تعتبر القوة الأساسية في الكون، ولذلك كلما زادت قوة الجاذبية زادت قدرته على التفاعلات النووية، وكما عرفنا أن الشمس تستمد طاقتها من التفاعلات النووية التي تحدث في مركزها وفي هذا الأثناء. يتحول الهيدروجين إلى هيليوم وبالتالي ينكمش الجزء الداخلي من النجم تحت تأثير الجاذبية المتزايد، مما يؤدي إلى زيادة الطاقة المشعة ويتحرك النجم بذلك إلى أعلى قليلا على شريط التتابع الرئيسي (H-R) ونجد في أسفل الفقرة مخطط بياني H-R.



الشكل رقم 2 . يوضح مخطط Hertzprung-Russe [1]

عندما يتحول جميع الهيدروجين إلى هيليوم تتوقف التفاعلات النووية في لب النجم، وبالتالي يبرد هذا اللب، فيزداد انكماشه نحو المركز لتتغلب قوة الجاذبية على الضغط ومن ثم ترتفع درجة الحرارة في المنطقة المحيطة باللب، لتبدأ التفاعلات النووية فيها من جديد، وتتسارع بفعل حرارة الانكماش ومع استمرار الانكماش وزيادة التفاعلات في المنطقة المحيطة بالمركز ترتفع درجة الحرارة ويتمدد الجزء الخارجي من النجم وبالتالي يبرد سطحه، ولكن اللب يستمر في الاندماج وينتج عن تمدد النجم زيادة لمعان لينزاح النجم عن شريط التتابع الرئيسي.



الشكل رقم 3. يمثل مخطط(H-R)مع الأنواع الطيفية للنجوم [4]

مخطط (H-R) Hertzsprung-Russell يوزع النجوم وفقًا للون واللمعان(الشكل رقم2)، ويتشكل هذا المخطط من ثلاثة مجموعات نجمية أساسية وهي: نجوم التتابع الرئيسي، العمالقة (الحمراء والزرقاء) والأقزام البيضاء النجوم ذات النمط الطيفي O تكون ساخنة جدا وتتموقع في الجزء العلوي الأيسر، أما النجوم ذات النمط الطيفي M تكون اقل برودة وتتموقع في السفلي الأيمن، أما شمسنا فهي من نجوم التتابع الرئيسي ذات النمط الطيفي G [3-4].

الجدول رقم : 1 . يمثل الأطياف النجمية [1]

أوقات الحياة	أنواع النجوم
3 MA	النجم O
15 Ma	النجم B
500 Ma	النجم A
2,5 Ga	النجم F
10 Ga	النجم G
13 Ga	النجم K

النجم M	200 Ga

ومن خصائص التتابع الرئيسي H-R:

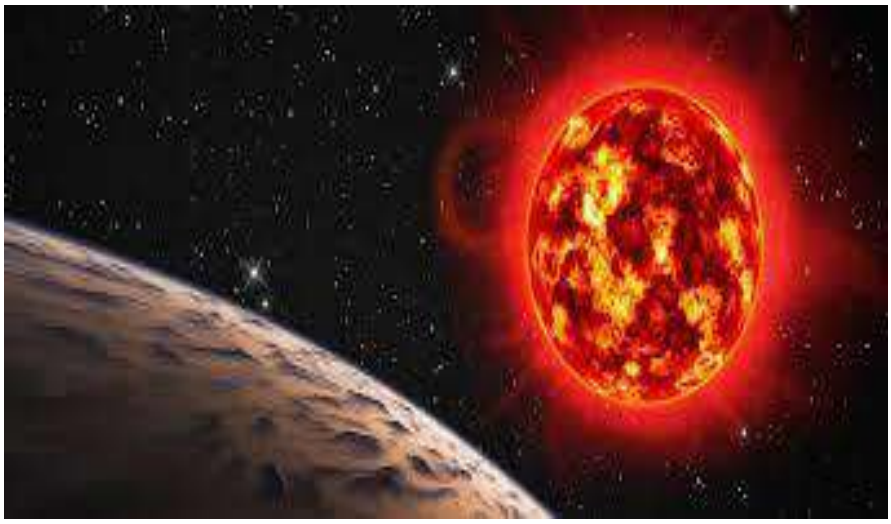
- درجة حرارة سطحه تبلغ 10 آلاف كالفن.
- قدره المطلق1.
- درجة لمعانه تزيد عن 100 من لمعان شمسي.
- كلما إتجهنا على التتابع الرئيسي نحو النجوم الساخنة فإن اللون يميل إلى الزرقة كما ترتفع كل من درجة الحرارة ، اللمعان، الحجم، الكتلة.
- إذا تحركنا في إتجاه النجوم الباردة فإن اللون يميل إلى الحمرة ، كما تقل كل من درجة الحرارة، اللمعان، الكتلة [1].

1.3.I العملاق الأحمر

تضغط الجاذبية بإتجاه مركز النجم حيث تكون درجة الحرارة والكثافة أعلى ليتحول الهيدروجين إلى هيليوم، هذا الأخير يصعد إلى المنطقة المحيطة باللب، عند توقف الجاذبية والضغط المؤثران على لب النجم، تكون تفاعلات الإندماج أسرع، وهكذا تتطور النواة وتتوسع تدريجياً إلى الخارج، في غضون ذلك يكون قلب النجم ساخنًا ومتقلصًا مقارنة بالمحيط الخارجي، تؤدي هذه العملية إلى توسيع الطبقات على سطح النجم ببطء في البداية ثم بشكل أسرع، ليصبح نجمًا أحمر عملاقًا أكبر بمئات المرات.

ومن خصائص العملاق الأحمر:

- عملاق
- طيف يميل للحمرة
- عالي اللمعان والضياء
- طبقاته الخارجية باردة مقارنةً باللب
- يزداد نصف قطره ما بين 10-100 مرة عن مرحلة التتابع الرئيسي
- تزداد كتلة اللب إلى ثلث كتلة النجم [5]



الشكل رقم 4 . يمثل عملاق أحمر [1]

2.3.I السدم الكوكبية

أثناء إستهلاك الجزء الأخير من الهيدروجين المتبوع بالهيليوم، يتحول النجم إلى نجم أحمر عملاق بنصف قطر أكبر بمئات المرات وحجم أكبر، بعدها تقل قوة الجاذبية في الطبقات الموجودة على سطح النجم الأحمر العملاق، كما أنه يصبح غير مستقر في النبض، ومع تمدد وإنكماش إيقاعي بسبب الحجم الكبير للنجم العملاق، يؤدي ذلك إلى فقدان الطبقات السطحية في الفضاء، ليتكون سديم كوكبي (الشكل رقم4) يتمدد ببطء حول النجم المحتضر، تتألق الغازات في السديم الكوكبي بسبب الأشعة فوق البنفسجية المنبعثة من اللب الساخن للنجم، وتنضم إلى الغازات الأخرى والغبار بين النجوم لتشكيل سُدم جديدة، التي ستولد منها نجوم جديدة .

أثناء تقلص السديم، (أقل من 0.07 كتلة شمسية) لا يمكن إطلاق التفاعلات النووية، في هذه الحالة يستمر الإنكماش الثقالي للسحابة وتزداد الكثافة مع تقدم الإنكماش، بحيث تتمزق الإلكترونات من النوى وتقترب من بعضها البعض. ويكون لدينا بعد ذلك نجم يتكون من غاز من الإلكترونات المتدهورة والتي سوف تتنافر، الضغط المتولد بهذه الطريقة سيوقف انهيار النجم ويوازن قوة تقلص الجاذبية، تسمى هذه الأجسام الباردة الكثيفة بالأقزام البنية، وبالتالي فإن القزم البني هو نجم مُجهض، لا يمكن أن يولد بسبب نقص الكتلة الكافية[6].

الشكل رقم 5 . يمثل سديم جبار [1]

3.3.I المستعر الأعظم الضخم

تتوقف تفاعلات الإندماج عند الحديد لأنه العنصر الأكثر إستقرارا، ثم ينهار قلب النجم في جزء من الثانية، وتضمحل كتلة نواة النجم لدرجة أن ضغط غاز الإلكترون المتحلل غير كافٍ لإيقاف الانكماش، في هذه الحالة سيعتمد التطور على كتلة نواة النجم، إذا كانت الكتلة أكبر من 4.1 كتلة شمسية وأقل من 3 كتلة شمسية يتوقف الانكماش، عندها تكون الإلكترونات قريبة جدًا من النوى(حد شاندرا) بحيث تتحد مع البروتونات لإعطاء النيوترونات، ليتكون قلب النجم بشكل أساسي من النيوترونات[1-6].

إن إستمرار قوة الجاذبية لسحق النجم تؤدي إلى إنفجاره على شكل مستعر أعظم يعطي إضاءة شديدة جدا في الفضاء، أما قلبه فيكون عبارة عن جسم كثيف جدا لا يتجاوز قطره كحد أقصى عشرة كيلومترات يدعى النجم النيوتروني.

وإذا كانت كتلة نواة النجم أكبر من 3 كتل شمسية، فلا شيء يمكن أن يوقف تقلص النجم بسبب قوة الجاذبية الهائلة إلى درجة أن كل مادة النجم تنضغط في نقطة صغيرة جدا تدعى النقطة المتفردة(**point de singularité**) معلنةً عن تشكل ثقب أسود[6].

إن الإنكماش الذي يحدث بسرعات عالية في بضع أجزاء من الثانية يرتد من قلب النجم (نجم نيوتروني) وتنتشر موجات الصدمة إلى الخارج في إنفجار هائل يدعى السوبر نوفا.تعتبر المستعرات الأعظمية من أعنف الظواهر في الكون، يمكنها أن تشع طاقة أكثر من مجرة واحدة أو عدة مجرات كاملة، وهذا في فترة زمنية قصيرة جدًا، إضافة إلى أنها تساهم في إثراء الوسط ما بين النجوم بعناصر كيميائية أثقل من الهيدروجين والهيليوم، وهي مصدر معظم العناصر الثقيلة الموجودة في الكون، علاوة على ذلك فإن موجة الصدمة من المستعرات الأعظمية هي التي تعزز تكوين نجوم جديدة عن طريق بدء أو تسريع تقلص السدم الغازية، حيث تشكل المادة المقذوفة سديمًا يتمدد بسرعة (بقايا مستعر أعظم) في وسطه وتبقى بقايا النجم (نجم نيوتروني).

الشكل رقم 6 . يمثل مستعر أعظم[6]

3. 4.I موت النجوم

1.4.I الأقزام البيضاء

القزم الأبيض هو ما ستؤول إليه معظم النجوم الشبيهة الشمس بعد أن ينفذ وقودها النووي، يقوم هذا النوع من النجوم بسكب معظم مواده الموجودة في الطبقات الخارجية منه، مما يؤدي إلى تشكل سديم كوكبي، والقلب الساخن للنجم هو النَّاجي الوحيد من هذه العملية، يُصبح هذا القلب قزماً أبيضاً ساخناً جدا، درجة حرارته تزيد عن 100000 كالفن، إذا لم يتم جمع المادة من نجم قريب، فإن القزم الأبيض يبرد خلال مليار عام أو ما يُقارب ذلك فَيتحول إلى قزم أسود ثم يختفي في الفضاء. تم إكتشاف العديد من الأقزام البيضاء الشابة والقريبة منّا وهي مصدر للأشعة إكس منخفضة الطاقة، ومؤخراً أصبحت الأشعة إكس والأشعة فوق البنفسجية الشديدة أداة فعالة في دراسة تركيب وبنية الغلاف الجوي لهذه النجوم، تبلغ كتلة القزم الأبيض حوالي نصف كتلة الشمس، وهو أكبر حجماً من الأرض، كثافته تصل إلى 10^9 كيلوغرام في المتر المكعب، علما أن كثافة الأرض هي 4.5×10^3 كيلوغرام في المتر المكعب، أي أن كثافة القزم الأبيض أكبر من كثافة الأرض بحوالي 200000 مرة، مما يجعله واحداً من بين أكثف تجمعات المادة في الكون، لا يتجاوزه في هذا الأمر إلا النجوم النيوترونية[1-7].

الأقزام البيضاء غير قادرة على خلق ضغط داخلي وبالتالي تقوم الجاذبية بضغط المادة نحو الداخل وصولاً إلى الإلكترونات المؤلفة للذرات القزم الأبيض بالتصادم مع بعضها البعض، في الظروف

العادية لا يُمكن للإلكترونات المتطابقة أن تحتل نفس مستوى الطاقة، وهذا الأمر ناتج عن وجود طريقتي دوران للإلكترون، وبالتالي يُمكن للإلكترونين أن يحتلا طاقة معينة، ويُعرف هذا الأمر في الفيزياء بمبدأ الإستبعاد لباولي، في الغاز العادي لا يُشكل هذا الأمر مشكلة بسبب عدم وجود عدد كافي من الالكترونات العائمة من أجل ملئ كل المستويات الطاقة المتاحة بشكلٍ كامل، لكن في القزم الأبيض الكثافة أعلى بكثير والالكترونات موجودة عند مسافات قريبة جداً من بعضها البعض، ويُشار إلى هذه الحالة بالغاز (المنحل)، أي أن جميع مستويات الطاقة الموجودة في الذرات ممتلئة بالالكترونات، تمتلك المادة المنحلة خواص إستثنائية، يكون الغلاف الجوي للقزم الأبيض غريب جداً، إذ يتم إبتلاع الذرات الأثقل الموجودة في الغلاف الجوي، في حين تبقى الذرات الأخف فوق السطح، تمتلك بعض الأقزام البيضاء أغلفة جوية نقية جداً ومكونة من الهيدروجين أو الهليوم فقط.

إن للنجوم التي تقل كتلتها عن 0.3 كتلة شمسية، لا تمر بمرحلة العملاق الأحمر والسدم الكوكبية: يتحول النجم فيها مباشرة إلى قزم أحمر يتكون من الهيليوم بعد إستنفاد الهيدروجين.

ومن خصائص القزم الأبيض:

- يتكون من مادة في حالة إنحلال للإلكترونات
- كتلته في حدود كتلة الشمس ،وحجمه مثل حجم الأرض
- كثافة مادته 10^6، أي أن $1cm^3$ من مادته ويزن طن على سطح الأرض
- يشع النجم ماهو مخزون بداخله من طاقة ويبرد بالتدريج ليصل إلى مثواه الأخير بعد فترة تقدر ببلايين السنين
- ضياءه يزداد مع تغير درجة الحرارة حيث أن مساحة سطحه ثابتة [1]

الشكل رقم 7 . يمثل الأقزام البيضاء [7]

2.4.I النجم النيوتروني أو البلسار

تزيد كتلة النجم النيوتروني عن1.5 كتلة شمسية منكمشة في كرة نصف قطرها 10-20 كم فقط، وقد تصل كتلة النجم النيوتروني إلى 3 كتلة شمسية، ولذلك تكون كثافة مادته حوالي10^{14}إلى10^{15} جم /سم³، أي أن السنتيمتر المكعب من مادته تزن بليون طن(الجدول رقم2)، ويوجد في مجرتنا وحدها العديد من النجوم النيوترونية، تعرف باسم البلسار نتيجة انه يمكن رصده من خلال نبضات تخرج من قطبيه الشمالي والجنوبي، يختلف البلسار عن النجوم النابضة من حيث آليات النبض والخصائص

الفيزيائية، يمثل البلسار مرحلة متأخرة من حياة النجوم، بينما النجوم النابضة هي مرحلة اضطراب يصبح عندها النجم متغير في اللمعان والحجم تحدث عندما يكون النجم عملاق ضخم.[1-8]

الجدول رقم : 2.خواص كل من الشمس والقزم الأبيض والنجم النيوتروني[1]

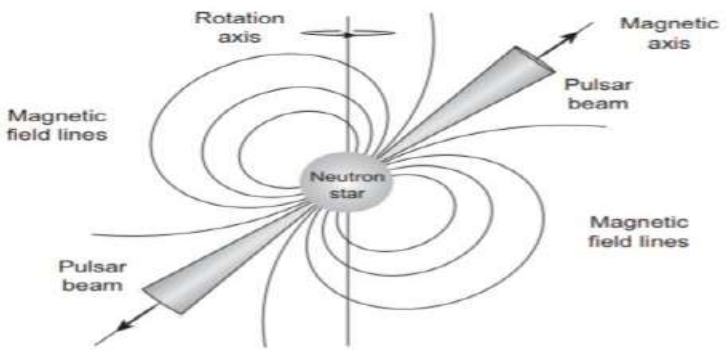
الخاصية	الشمس	القزم الأبيض	النجم النيوتروني
الكتلة (كتلة شمسية)	1	1.4> كتلة شمسية	1.5
حرارة السطح (كالفن)	5780	10000	200مليون
القطر	1	قطر الأرض	10كم
الكثافة (جم/سم³)	1.4	10^6	10^{14}
وزن 1سم³	أكبر قليلا مما	1طن من التربة	بليون طن من تربة

ويمكن تقسيم البلسار من حيث الخصائص التي تميزه إلى ثلاثة أنواع:

1. بلسار يقويه الدوران
2. بلسار يقويه تراكم المادة عليه وهو ما يمكن أن نسميه بلسار الأشعة السينية
3. الماجينارMagnetar والذي يتميز بأعلى قيم للمجال المغناطيسي تتراوح ما بين– 10^{12} 10^{8} وبالتالي فان مجاله المغناطيسي القوي هو مصدر طاقته الكهرومغناطيسية.[9-1]

ومع وصول النجم إلى مرحلة النجم النيوتروني نتيجة للإنكماش السريع فيزداد معدل دورانه حول نفسه ويزداد مجاله المغناطيسي قوة، مما جعل الفلكيون يُطلقون على بعضها إسم الماجينيار، وهو تعبير يوحي بأن هذا الجسم يمثل مغناطيساً جباراً. إن درجة حرارة سطحه تصل إلى مليون كالفن لذا فهو مصدر للأشعة السينية.يتميز الماجنيار بقوة مجاله المغناطيسي كما أشرنا من قبل أنه يتميز ببطء في معدل دورانه حيث يتم ذلك من 1-10 ثواني وهو بالتالي أبطأ بكثير من البلسار العادي. أما نجوم البلسار الماجنيار فهي ذات أشعة كهرومغناطيسية عالية الطاقة وبصفة خاصة للأشعة السينية وأشعة جاما وأصبح الماجنيار معبرا عن كل من SGRs(soft gamma reporters) وAXPs(anomalous X-ray pulsars) مصدر لبث هذه الأشعة، حياته النشطة تعتبر قصيرة بالمقارنة مع البلسارات العادية حيث يقدر عمر الماجنيار بحوالي 10آلاف سنة وبعدها يتوقف بثها لتلك الأشعة عالية الطاقة. وحتى الآن يعتبر الماجنيار هو أقوي الأجسام التي رُصدت في الكون من حيث قوة مجاله المغناطيسي[1].

تسمى النجوم النيوترونية بالنجوم النابضة حيث تخرج منها أشعة النيترون تبدو كوميض يخرج منها عندما يواجه الأرض بأحد قطبيه، يوضح (الشكل رقم8) نموذج للنجم النيوتروني ومجاله المغناطيسي حيث تخرج الشحنات مع خطوط المجال عند قطبيه.



الشكل رقم 8 تمثل دوران نجم نيوتروني[1]

النجوم ذات الكتل الأكبر من 30-40 كتلة شمسية تستمر في التطور إلى مرحلة ما بعد النجوم النيوترونية حيث تنتصر الجاذبية على كل القوى الأخرى، وهو ما يعرف بالثقب الأسود.

ومن خصائص النجم النيتروني:

- كتلته بين 1.5 إلى 3 كتلة شمسية
- قوة الجاذبية على سطحه عالية جداً
- درجة حرارته عالية جداً200 بليون
- له مجال مغناطيسي شديد
- صغير الحجم ومعتم
- يزن بليون طن وكثافته 10^{14} **[9-1]**

الشكل رقم 9 . يمثل نجم نيوتروني[9]

3.4.I الثقب الأسود

إن الثقب الأسود عبارة عن بؤرة مظلمة تصل فيها الجاذبية إلى مستوى هائل، بحيث يستطيع أن يجذب إليه كل شيء، حتى إنه يستطيع أن يمتص الضوء، ينشأ الثقب الأسود عندما يصل عمر النجم إلى نهايته، حين تتلاشى الطاقة التي تحافظ على تماسكه خلال حياته ، فتبدأ مرحلة الإنهيار ويحصل

إنفجار هائل، عقب ذلك تسقط كافة المواد التي خلفها الإنفجار في نقطة صغيرة غير متناهية(المتفردة)، حيث أن هذه المخلفات تزيد عن كتلة الشمس بمئات مرات والغريب في هذه المخلفات التي تفوق حجم الشمس تتوارى في نقطة بالغة الصغر، ومع مرور الوقت، تبتلع هذه الثقوب مواداً أكثر، فتكبر شيئا فشيئا ويتسع نطاقها وهذا ما آثار إستغراب الكثيرين إزاء هذا التفاعل، هو أن نقطة صغيرة تستطيع أن تحتوي كتلة كبيرة، ويُطلق العلماء مصطلح " التفرد" على النقطة التي تتجمع فيها مخلفات الإنفجار النجمي، تستطيع أن تقوم بتأثير كبير على الرغم من صغرها المتناهي

منذ عام 1790 إقترح الإنكليزي جون ميشيل(Jean Michel) والفرنسي بيير سايمون (Pierre-Simon) وجود نجوم مخفية في السماء، ثم في عام 1915 توقعت نظرية النسبية العامة لأينشتاين وجود هذه الأجسام في الفضاء وأثرها على الزمان والمكان، وأخيراً في عام 1967 تحدث الأمريكي جون ويلر(John Wheeler) عن الثقوب السوداء كنتيجة لإنهيار النجوم في عام 1994 أثبت العلماء بواسطة مرصد هابل وجود جسم غير مرئي في مركز المجرة M87 ويلتف حوله الغاز في دوامة واضحة، وقد قدروا وزن هذا الجسم بثلاثة آلاف مليون ضعف وزن الشمس ثم توالت الأدلة على وجود هذه الأجسام بواسطة الأشعة السينية.

من أهمّ الصعوبات التي واجهت العلماء أثناء دراسة الثقب الأسود هو عدم تمَكّنِهم من التفريق بين الثقب الأسود وأي نجم عادي تُغلِّفُه طبقات غازية كثيفة.الأشعة السينية وأدوات التبريد تُحدث ثقباً. وقد إتّضح للعلماء إن عند إقتراب أيّ غازات أو غبار كوني من الثقب الأسود فستُسْحق وتزداد كثافتها بفعل الجاذبية الهائلة. وعندما تضغط هذه الغازات تزداد درجة حرارتها. وتستمر درجة الحرارة بالإرتفاع كلّما زاد الضغط. وهكذا تتسارع في إندفاعها نحو الثقب الأسود في شكل دوامة. وتكون هذه الغازات المضغوطة والساخنة قادرة على إصدار أشعّة سينية عندما تقترب بمسافة كافية من أفقِ الحدث للثُّقب الأسود. وهكذا بدأ العلماء في إستخدام ما يُسمّى بعلمِ فلك الأشعة السينية (x-ray astronomy) وذلك لغرض تتبُّع نبضات التي ترسلها تلك الغازات الهاويَة في شكل دوَّامات هائلة تتسارع نحو الثقب الأسود وذلك كمحاولةٍ منهم لفهم لغز هذا الثُّقب.

أفق الحدث هو حدود منطقة من الزّمكان التّي لا يُمكن للضوءِ الإفلات منها وبما أنه لا شيء يمْكنه السير بأسرع من الضوء فإنّ أي شيء يقع في هذه المنطقة سوف يبلغ بسرعة منطقة ذات كثافة عالية ونهاية الزمان. وتَتنبأ النسبية العامة بأن الأجسام الثقيلة المتحركة سوف تتسبّب ببثّ موجات جاذبية وهي تموّجات في إنحناء الفضاء تنتقل بسرعة الضوء وتشبه موجات الضوء التّي هي تموّجات الحقل الكهرومغناطيسي إلاّ أنّها يصْعُب إكتشافها وهي كالضوء تأخذ الطاقة من الأجسام التي تبثُّها وبالتَّالي يتوقّع أن ينهار نظام من الأجسام الضخمة ويعود في النهاية إلى وضع مستقر لأن الطاقة في أيّ حركة سوف تحملُ بعيدًا. على سبيل المثال دوران الأرض حول الشمس يُولّد موجات جاذبية ويكون تأثير مسارات الطاقة في تغير مدار الأرض حول الشمس الذي يؤدي في آخر المطاف إلى أنّ الأرض تقترب من الشمس حتى تستقر داخلها ومعدل ضياع الطاقة ضئيل جدًّا. وشُوهد هذا التأثير في نظام النجم النابض وهو نوع خاص من النجوم النيوترونية تبُثّ نبضات منتظمة من موجات الراديو، ويضمُّ هذا النظام نجمين نيوترونيين يدوران حول بعضهما البعض.

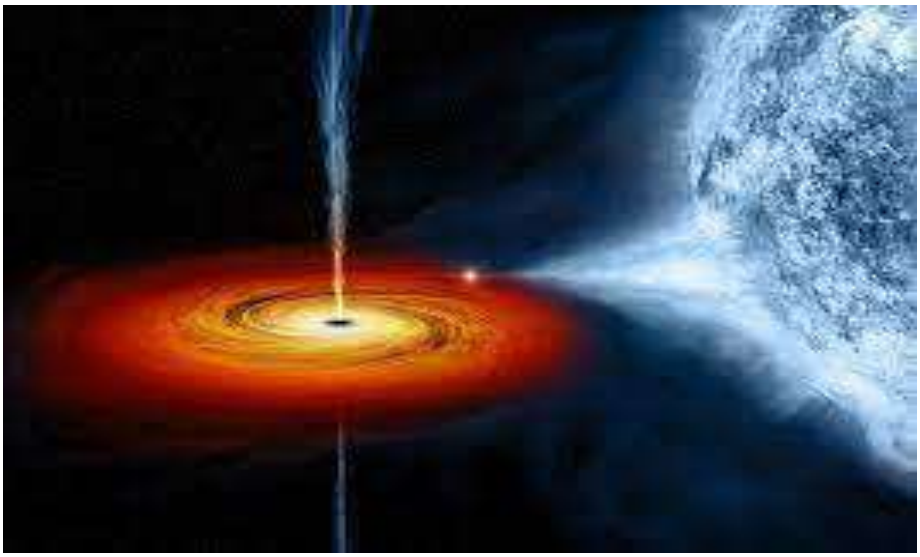
في النظريّة النسبيّة فسّرَ آينشتاين كيفَ تكوَّنت تلكَ الثقوب، حينَ ينتهي نجمٌ عملاق وينهارُ يترك خلفهُ نواة كبيرة، إذا كانَ حجم النواة أكبر من حجم الشَّمس على الأقل ثلاث مرّات فإنَّ الجاذبيّة تُنهي كلّ القوى وتحوّلها إلى ثقب أسود، وهو عبارة عن كميّة كبيرة من مادة مضغوطة في مساحةٍ صغيرة. وعليه فإن تكوين الثقب الأسود هو الموت النجمي، عندما تصلُ النجوم إلى نهاية حياتها، سوف يتضخّم معظمها، وينفذ وقودها، ثمّ تبرُد لتشكّل أقزاماً بيضاء. وكما نوّه العالِم الفيزيائي ستيفن هوكينج(Stephen Hawking)، أنه يوجد في علم الفلك ثقوب سوداء يمكن للأشياء أن تهوي داخلها

ولكن لا يمكنها أن تخرج منها، كما ينبغي أنْ تكون هناك أجرام أخرى حيثُ يُمكن للأشياء أن تخرج منها ولكنّها لا يمكنها أنْ تهوي لداخلها، ويمكننا أن نسمّي هذه الأجرام بالثقوب البيضاء.

يمكن حساب سرعة الهروب من الثقب الأسود باستخدام المعادلة التالية $V = (\frac{2GM}{R})^{0.5}$ حيث أن سرعة الهروب من الثقب الأسود تساوي سرعة الضوء فإن نصف قطر الثقب الأسود يمكن حسابه من المعادلة التالية $R = 2GM/C^2$ وهذه المعادلة تعرف بمعادلة نصف قطرSchwarzschildوهي تعتمد على كتلة النجم فقط وتدل الحسابات على أن نجما في حجم الشمس حينما يصبح ثقبا اسود لابد أن ينكمش حتى يصبح نصف قطره حوالي 3كم فقط**[1-10]** .

أهم خواص الثقب الأسود:

- كتلته تزيد عن 3 كتلة شمسية
- لا تخرج منه أشعة إطلاق
- ينحني الفراغ نحوه بسبب جاذبيته العالية
- ينحرف الضوء نحوه
- يبتلع كل ما يقترب منه من مادة **[10]**



الشكل رقم 10 . يوضح ثقب أسود يسحب نجم مجاور له[10]

الفصل الثاني :

مصادر الطاقة النجمية وطرق نقلها

II. الفصل الثاني: مصادر الطاقة النجمية وطرق نقلها

1.II. تمهيد

يوجد في اللب الداخلي للنجم تفاعلات نووية، وهذه التفاعلات هي المصدر الأساسي لطاقته، كما أن النجوم تظل في حالة إتزان هيدروستاتيكي إذا كانت مستقرة ولها قدر ثابت مثل الشمس، هذا يعني أنها ليست من النجوم المتغيرة، أما إذا كان النجم متغيرا فإنه لا يكون في حالة إتزان هيدروستاسيكي (عدم إتزان وعدم استقرار) بل يتمدد وينكمش، ويظل على هذه الحالة حتى يحدث إتزان بين جميع القوى المؤثرة عليه، بعد ذلك يعود النجم إلى حالة الإتزان الهيدروستاتيكي، هناك سلسلتان مهمتان للتعرف على التفاعلات النووية داخل النجم، هما سلسلة P-P ودورة CNO.

تتضمن سلسلة P-P ذرات الهيدروجين يتم تحويلها أولاً إلى ديوتيريوم بإطلاق إلكترون نيوترون يحمل معه جزءًا من طاقة الربط ، ومن خلال النظر في كتل العناصر قبل وبعد التفاعل، يتم إنتاج نظير الهيليوم He^3 مع إنبعاث الفوتون، ثم يتحد في He^4 بينما يتم إمتصاص الفوتون المنبعث في التفاعل الثاني فورا عن طريق المادة، يهرب النيترون من التفاعل الأول من النجم، بعد الخطوة الثالثة يمكن إستخدام ثلاث مفترقات.(نتحدث عن الفروع الثلاثة للتفاعل)، أولها ينتج 91٪ من الهيليوم في الشمس، الإثنان الآخران يشتملان على عناصر أثقل وأندر من الهيدروجين والهيليوم. لذلك تحدث بشكل نادر وتنتج فقط 9 ٪ و0.1 ٪ على التوالي من الهيليوم، تختلف الأوزان النسبية لهذه الفروع من نجمة إلى أخرى، تهيمن سلسلة P-P على إحتراق الهيدروجين في النجوم الأقل كتلة من 1.5 كتلة شمسية[11].

التفاعل الآخر الذي يؤدي إلى تحويل الهيدروجين إلى هيليوم هو دورة CNO عرفت هذه الدورة في عام 1938 من قبل العالم هانز، تحدث في درجات حرارة أعلى من سلسلة P-P وبالتالي فهي العملية السائدة في النجوم التي يزيد كتلتها عن 1.5 كتلة شمسية، والتي تسهل على طاقة الجاذبية الوصول إلى طاقات الروابط للذرات الثقيلة مثل C، N، O [11]

سنتطرق في هذا الفصل إلى دراسة مصدر الطاقة داخل النجم، إضافة إلى آليات نقل هذه الطاقة النجمية.

2.II. مصادر الطاقة النجمية (التفاعلات النووية)

ناقشنا حتى الآن بنية النجوم، إن النجوم بما في ذلك شمسنا تفقد الطاقة في شكل إشعاع وجزيئات، هذه عملية لا رجوع فيها تُحدث تغييرات مهمة في التطور الهيكلي والنجمي، يتغير هيكل النجم ببطء بمرور الوقت لأنه يفقد طاقته.

تتكون النجوم مبدئيًا من الغاز المنتشر في وسط بين النجوم، لكن هذا الغاز لا يتجمع بشكل عشوائي حتى يكون نجم، بل إن هناك شروط تخضع لها هذه السحب الغازية الواقعة على بعد نصف قطر معين وفي درجات حرارة معينة وتحت كثافة معينة، وقد توصل العالم جيمس جينز الى وضع علاقة يجب أن تتوفر في السحب الغازية كي يتشكل عنها النجم وهذه العلاقة هي[14]

$$L_j \sim \left(\frac{kT}{G\rho m}\right)^{1/2}$$

حيثT درجة الحرارة، k ثابت بولتزمان، m كتلة الغاز،G الجاذبية،ρ هي كثافة الغاز

في حالة$L < L_j$ تعمل قوة الجاذبية على تجميع كل الغاز الذي يكون أقل من نصف قطر جينز بسبب قربه إلى بعض وبمرور الزمن تتكون سحابة غازية كثيفة تجلب إليها كل المادة المحيطة بها معلنة على نشوء مهد للنجم

أما في حالة $L > L_j$ فإن الغازات لا تتجمع وتتبدد في الفضاء

إن قوة الجاذبية الهائلة التي تعرض إليها النجم هي أهم مسبب على نشوء قوة ضغط داخلية من لب النجم تحاول في كل مرة منع النجم من سحق نفسه، لكن الارتفاع الهائل لدرجات الحرارة، وما أن تصل إلى 10 ألاف كلفن تبدأ التفاعلات النووية داخل لب النجم في شكل تفاعلات إندماجية، هذه التفاعلات تعلن عن تشكل أول بنية نجمية، بمعنى آخر نقول أن النجم يشبه إلى حد كبير مُفاعل الإندماج النووي أكثر من قنبلة هيدروجينية التي تُنتج إنفجارا ضخم[12].

في النجوم ذات التسلسل الرئيسي، التفاعلات الأكثر إحتمالاً تلك التي تحول 4 نوى هيدروجين إلى نواة هيليوم واحدة، مجموع كُتل نوى الهيدروجين الأربعة أكبر قليلا من كتلة نواة الهيليوم، الفرق هو 0.7٪، كتلة نوى الهيدروجين الأربعة، تحولت إلى طاقة وفقًا لعلاقة أينشتاين الشهيرة:

$$E = \Delta mc^2 \qquad (1)$$

حيث E هي الطاقة المنتجة، Δm هو فرق الكتلة وc هي سرعة الضوء، بالرغم من أن الكتلة صغيرة، إلا أننا نلاحظ إنتاج كمية من الطاقة، لأن مربع سرعة الضوء كبير جدًا. الطاقة الناتجة عن هذا التفاعل هي مصدر لمعان النجوم[12].

لكي يكون هناك تفَاعل نووي من الضروري أن تكون قادرًا على نقل النِّوى إلى مسافات صغيرة جدًا (حوالي 10-13 سم) عن بعضها البعض، وإلا فلن تتمكَّن من الإندماج، هذا يرجع إلى المدى القصير جدا للقوة النووية، الذرات مشحونة إيجابيا (لأنها تحتوي على بروتونات)، وحتى يتمكنوا من الإقتراب من مسافات قصيرة، فمن الضروري محاربة التَّنافر الكهروستاتيكي الذي يميل إلى فصلهم، للتغلب على هذا يجب دفع النِّوى بسرعات عالية. إن درجة الحرارة هي مقياس للنشاط الحركي للجسيمات، فكلما إرتفعت زادت سرعة الجسيمات، وبالتالي هناك حد أَدْنى من درجة الحرارة الحَرجة من أجل إطلاق التفاعلات النووية الحرارية، ترتفع درجة الحرارة هذه لأن شُحنة النواة كبيرة وبالتالي فإن التَّفاعلات الأسهل هي تلك التي تتضمن نِوى ذات شحنة كهربائية مُنخفضة، بالنسبة لنواة الهيدروجين تكون الشحنة هي الوحدة ودرجة الحرارة الحرجة حوالي 10 مليون كلفن، بالنسبة للعناصر الأخرى تكون درجة الحرارة الحرجة أعلى[12].

نجوم التسلسل الرئيسي تُحول أربع نوى هيدروجين إلى نواة هيليوم فتُطلق الطاقة، هناك طريقتان معروفتان للقيام بهذا التَّحويل لأنه من غير المحتمل أن تَتَصادم أربعة جُسيمَات في نفس الوقت، فإن التحويل لا يحدث بشكل مباشر، بل نتيجة لسلسلة من التَّفاعلات وأهمُّها تفاعلات سلسلة P-P وتفاعلات دورة CNO.وتفاعلات ألفا ثُلاثية.

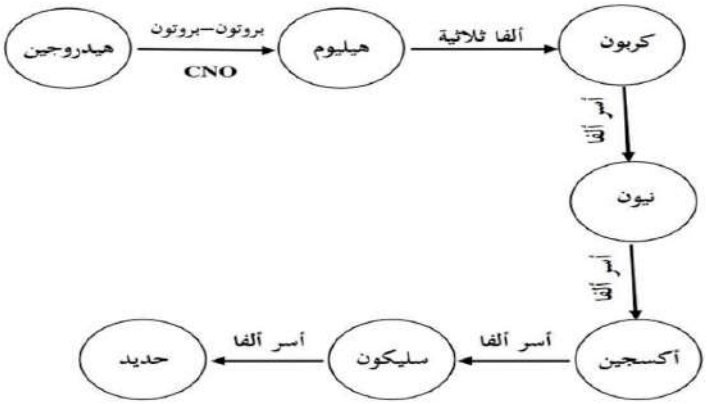
إن من أهم التفاعلات النووية التي تحدث داخل النجوم نجد سلســــــــــــلة بروتون–بروتون P-P) والسلسلة الأخرى المعروفة بدورة CNO وسلسلة ألفا ثلاثية إضافة إلى سلاسل أخرى من نوع ألفا، من المُلاحظ أن الطَّاقة المُنتجة داخل قلب النجم تنتقل إلى الخارج بطريقتين تعملان في نفس الوقت، إحداهما الإشعاع والثانية الحمل، وفي النجوم التي تكون على النصف الثاني من التتابع الرئيسي(أي الأبرد وهي الأنواعF, G, K, M) يحدث الحمل في الطبقة الخارجية والإشعاع في الطبقة الداخلية تماما مثل الشمس، هذا يعني أن النجوم أسفل التتابع الرئيسي تشبه الشمس في تركيبها الداخلي، أما النجوم أعلى التتابع الرئيسي (A,O,B) فإن طبقة الإشعاع تكون خارجية وطبقة إنتقال الحرارة بالحمل هي التي تلي اللب مباشرة، يُمْكن تقدير العمر الإفتِراضي لأي نجم عن طريق تقدير كمية الطاقة التي يمتلكها، أو بمعنى أدق التي يمكن أن ينتجها من خلال التفاعلات النووية والطاقة التي يشعها في الثَّانية الواحدة، التي تعرف بضياء النجم، وبالطبع ستعتمد كمية الطاقة التي يمكن أن ينتجها النجم على كتلته، ومن ثم يمكن حساب عمر النجم من خلال المعادلة التالية.[1]:

$$t = t_{sun}\frac{M}{L}$$

حيث t عمر النجم t_{sun} عمر الشمس M كتلة النجم بدلالة كتلة الشمس، L ضياء النجم بدلالة ضياء الشمس

إن الهيدروجين يتحول بالإندماج النووي إلى هيليوم والهيليوم يتحول بدوره إلى كربون وتستمر سلسلة التحول إلى عناصر ثقيلة تنتهي بالتحول إلى حديد، كما هو مبين في (الشكل رقم11) ومعنى ذلك أن التفاعلات النووية داخل النجوم تُكثِّر من كمية العناصر الثقيلة، وبذلك تزداد هذه العناصر في الوسط بين النجوم، حيث تطلق النجوم في المراحل الأخيرة من عمرها جزءا كبيرا من مادتها إلى وسط بين النجوم المحيط بها، ولذلك نلاحظ أن النجوم التي تولد حديثا في نفس المكان تكون محتوية على كمية أكبر من العناصر الثقيلة عما كانت عليه النجوم التي نشأت في الماضي.

الشكل رقم 11 يمثل التفاعلات النووية داخل النجم[1]



عودة إلى التفاعلات النووية نلاحظ أن النجم يتحول من مرحلة إندماج أنوية الهيدروجين إلى الهيليوم لتكوين وهي مرحلة المرحلة التالية لها الهيليوم تحت تكوين الكربون من درجة حرارة شرط مهم وهو ارتفاع اللازم لبدء لب النجم إلى القدر لابد أن تكون التفاعل النووي الجديد. درجه الحرارة في لب النجم تزيد عن 10 مليون كلفن حتى يستطيع عمل إندماج لأنوية الهيدروجين ويصنع منها هيليوم، إن الطاقة المتحررة من تفاعلات الإندماج تعطي معدلات متباينة حسب نوع التفاعل التي مرت به:

- معدل إنتاج الطاقة من تفاعل(P-P) $(\varepsilon_{PP} \quad \alpha \quad T^4)$
- معدل إنتاج الطاقة من تفاعل (CNO) $(\varepsilon_{CNO} \quad \alpha \quad T^{19.9})$
- معدل إنتاج الطاقة من تفاعل (triple aipha) $(E_{triple\ alpha} \quad \alpha \quad T^{41})$

يتضح من خلال معدلات إنتاج الطاقة أن كمية الطاقة التي يتم إنتاجها بواسطة CNO تكون أعلى بكثير مما يتم إنتاجه في سلسله P-P، كما أنها تصبح أكبر بكثير في سلسلة ألفا ثلاثية، من خلال معدلات إنتاج الطاقة يمكن تفسير قصر أعمار النجوم الكبيرة في الكتلة، حيث أنها تفقد مادتها بسرعة عالية بسبب معدلات إنتاج الطاقة العالية[1].

- **سلسلة بروتون-بروتون(P-P).**

إن السلسلة المهيمنة على التفاعلات النووية في الشمس تعرف بسلسلة بروتون-بروتون، يمكن أن يحدث تفاعل هذه السلسلة عند درجات حرارة أعلى من 5×10^6 كلفن، وهي المناطق المركزية للشمس.(درجة الحرارة الأساسية للشمس هي 1.6×10^6 كلفن) في هذه المناطق تكون الغازات مؤينة تماما، في بداية إحتراق الهيدروجين، كان محتوى الهيدروجين 71% بالكتلة ومحتوى الهيليوم 27% والعناصر الأثقل 2% هذا ما يسمى بوفرة النظام الشمسي، حيث في الوقت الحالي تم تقليل محتوى الهيدروجين في مركز الشمس إلى حوالي 36% بحرق الهيدروجين عبر سلسلة P-P أو (بروتون-بروتون) التي تلخص في الأسطر التالية:[12-13]

$$_1H^1 + {_1H^1} \rightarrow {_1H^2} + e^+ + v$$

$$_1H^1 + {_1H^2} \rightarrow {_2H^3} + \gamma$$

$$_2He^3 + {_2He^3} \rightarrow {_2He^4} + {_1H^1} + {_1H^1}$$

يعطي التفاعل الأول بين نواتين هيدروجين $(_1H^1)$، أي إثنين من البروتونات، نواة الديتيريوم $(_1H^2)$، وهو نظير الهيدروجين (1 نيوترون +1 بروتون)، مع تكوين جسيمات تسمى على التوالي البوزيترون (e^+) والنيترون (v) والتي لم تعد تشارك في التفاعلات اللاحقة، تحمل هذه الجسيمات جزءا من الطاقة المنبعثة، ثم تندمج نواة الديتيريوم مع بروتون ثالث لإنتاج نظير الهيليوم $(_2He^3)$، الذي يحتوي على 1 نيوترون و2 بروتونات، ويفقد الطاقة على شكل فوتون يستخدم لتسخين الوسط، بعد تفاعلين من هذا النوع، تم دمج نواتين $_2He^3$ لإنتاج النواة النهائية للهيليوم العادي $_2He^4$ مع إستعادة نواتين هيدروجين في الوسط لذلك فإن التوازن هو:

$$4 \times {_1H^1} \rightarrow {_2He^4}$$

وعليه فإن سلسلةP-P مسؤولة عن إنتاج الطاقة في النجوم منخفضة الكتلة مثل الشمس.

- **دورة CNO**

النجوم التي تزيد كتلتها عن1.5 كتلة شمسية تكون درجة الحرارة المركزية أكبر من 20 مليون كلفن، وعليه فإن مجموعة أخرى من التفاعلات النووية تصبح مهمة يطلق عليها دورة CNO لأن

نوى الكربون والنيتروجين والأكسجين تشارك في التفاعلات، هذه الدورة تخلق نواة الهيليوم من أربع بروتونات تماما مثل سلسلة P-P، حيث تستفيد دورة CNO من نواة الكربون العرضية الموجودة في قلب النجم والتي تكونت من حطام الأجيال السابقة من النجوم، حيث تتكون من ستة تفاعلات متسلسلة موضحة في الأسطر التالية[12-13-15]

$$_{1}H^{1} + {}_{6}C^{12} \rightarrow {}_{7}N^{13} + \gamma$$

$$_{7}N^{13} \rightarrow {}_{6}C^{13} + e^{+} + v$$

$$_{1}H^{1} + {}_{6}C^{13} \rightarrow {}_{7}N^{14} + \gamma$$

$$_{1}H^{1} + {}_{7}N^{14} \rightarrow {}_{8}O^{15} + \gamma$$

$$_{8}O^{15} \rightarrow {}_{7}N^{15} + e^{+} + v$$

$$_{1}H^{1} + {}_{7}N^{15} \rightarrow {}_{2}He^{4} + {}_{6}C^{12}$$

مرة أخرى، النتيجة النهائية هي دمج 4 بروتونات في نواة من الهيليوم. نواة الكربون الأولية ($_{6}C^{12}$) متاحة لتسلسل جديد في نهاية الدورة. يتم تكوين نظائر النيتروجين (N) والأكسجين (0)، تتحلل وتختفي أثناء التفاعل الكامل.

أولا تخضع نواة الكربون في البلازما لتفاعل إندماج مع نواة الهيدروجين، والنتيجة هي نواة أثقل N^{13} ثم يخضع هذا تلقائيا لتفاعل إضمحلال بيتا المشع ونواتج هذا الإضمحلال هي البوزيترون e^{+} وإلكترون نيوترينو v_e ونظير ثقيل من الكربون C^{13}، يطلق على هذا التفاعل يدعى β لأن الإلكترونات كانت تسمى بأشعة بيتا، في الواقع يحول هذا التفاعل البروتون الذي في النواة إلى نيوترون، ثم ينتج عن تفاعل بروتون آخر نواة مستقرة N^{14} . تنتج الخطوات المتتابعة O^{15} و N^{15} وبدلا من O^{16} النتيجة النهائية هي تكوين He^{4}+ C^{12} تنتج دورة CNO طاقة أقل قليلا من سلسلة-P P نظرا لوجود المزيد من النيوترونات وبالتالي تحمل المزيد من الطاقة النجم[13-15].

- **تسلسل ألفا ثلاثي**

النجوم العمالقة أكبر من 10 كتلة شمسية، يتم زيادة درجة حرارة المركز إلى عدة بلايين درجة مؤوية مما يؤدي إلى تفاعل التسلسلات التالية التي تحول العناصر الثقيلة حتى إنتاج نوى الحديد ($_{62}Fe^{56}$) يعرف باسم تسلسل ألفا ثلاثي ويتطلب درجة حرارة تبلغ حوالي 140 مليون كلفن.[12]

$$_{2}He^{4} + {}_{2}He^{4} \leftrightarrow {}_{4}Be^{8}$$

$$_{2}He^{4} + {}_{4}Be^{8} \rightarrow {}_{6}C^{12} + \gamma$$

يجب أن يحدث هذا الزوج من التفاعلات بسرعة كبيرة لأن نواة البريليوم $({}_4Be^8)$غير مستقر ويتحلل بعد وقت قصير جدا من إنشائها، بالإضافة إلى هذه التفاعلات التي تؤدي إلى تكوين الكربون.

- **سلاسل من نوع ألفا**

عندما تصبح درجة الحرارة أعلى، تكون الفوتونات نشطة للغاية وتبدأ في كسر النوى. تمثل هذه المرحلة من التفكك نهاية التطور النووي في النجوم، هذه العناصر أكثر تعقيدًا وثقلًا ومنها يتم إنتاج النيكل والحديد من تفاعلات أخرى من نوع ألفا تؤدي إلى إنفجار النجم ويكون هناك فائض في الطاقة المتاحة[7-12]

$${}_6C^{12} + {}_2He^4 \rightarrow {}_6O^{16} + \gamma$$

$${}_8O^{16} + {}_2He^4 \rightarrow {}_{10}Ne^{20} + \gamma$$

$${}_{11}Ne^{20} + {}_2He^4 \rightarrow {}_{12}Mg^{24} + \gamma$$

في درجات حرارة من 500 إلى 800 مليون كلفن يمكن أن يندمج الكربون والأكسجين وبالتالي يستمران في التفاعل.

$${}_6C^{12} + {}_6C^{12} \rightarrow {}_{12}Mg^{24} + \gamma$$

$$\rightarrow {}_{11}Na^{23} + {}_1H^1$$

$$\rightarrow {}_{10}Ne^{20} + {}_2H^4$$

$$\rightarrow {}_{12}Mg^{23} + n$$

$$\rightarrow {}_8O^{16} + 2 \times {}_2He^4$$

$${}_8O^{16} + {}_8O^{16} \rightarrow {}_{16}S^{32} + \gamma$$

$$\rightarrow {}_{15}P^{31} + {}_1H^1$$

$$\rightarrow {}_{14}Si^{28} + {}_2He^4$$

$$\rightarrow {}_{16}S^{31} + n$$

$$\rightarrow {}_{12}Mg^{24} + 2 \times {}_2He^4$$

في النهاية، يتحول السيليكون$({}_{14}Si^{28})$ إلى نيكل $({}_{28}Ni^{56})$ والحديد $({}_{26}Fe^{56})$ عند درجة حرارة1 مليار كلفن:

$$_{14}Si^{28} + {}_{14}Si^{28} \rightarrow {}_{28}Ni^{56} + \gamma$$

$$_{28}Ni^{56} \rightarrow {}_{26}Fe^{56} + 2 \times e^{+} + 2 \times v$$

3.II نقل الطاقة

تتجدد الطاقة التي يُشعها النجم بشكل مُستمر من مصادر تقع في مركزه الساخن، حيث يتم تدفق الطاقة من اللب إلى الطبقات إلى الخارجية في النجم، و يتطلب هذا الأخير وسيلة فعالة لنقل الطاقة عبر المادة النجمية. يحدث هذا النقل بسبب التدرج الحراري غير الصفري في النجم. في حين أن الإشعاع غالبًا ما يكون من أهم وسائل نقل الطاقة ،لكنه ليس الوسيلة الوحيدة في تصميمات الداخلية لنجم، حيث تكون المادة والإشعاع دائمًا في حالة توازن ديناميكي حراري، ويتم نقل هذه الطاقة (الحرارة) من المناطق الحارة إلى الباردة بطريقتين أساسيتين.

تحدث الحركات الحرارية العشوائية للجسيمات سواء الفوتونات أو جزيئات الغاز من خلال عملية تسمى بإنتشار الحرارة. في حالة الفوتونات يُعرف بإسم الإنتشار الإشعاعي وفي حالة جزيئات الغاز (الذرات، الأيونات، الإلكترونات) يُطلق عليه عادة التوصيل الحراري، أما بالنسبة لحركات الجماعية (السائبة) لجزيئات الغاز، تُعرف بالحمل الحراري. هذا أمر مهم عملية في التصميمات الداخلية النجمية، ليس فقط لأنها تستطيع نقل الطاقة بكفاءة عالية، بل أيضًا ينتج عنه خلط سريع، ويعتبرا لحمل الحراري هو أحد أقل مكونات الفهم الفيزياء النجمية.

نقل الطاقة في النجوم هو ما سنتطرق إليه في هذا الفصل، والذي سيقودنا إلى قسمين إضافيين المعادلات التفاضلية للبنية النجمية، حيث يتم تحديد حجم تدفق هذه الأخيرة من خلال الآلية التي توفر نقل الطاقة عبر ثلاث أشكال وهي التوصيل، الحمل الحراري والإشعاع، لكلٍ من هذه الآليات تدرج درجة حرارة يحدد التدفق.

1.3.II نقل الطاقة بالإشعاع

تستغرق النجوم مدة طويلة جداً لتحقيق التوازن الحراري، هذا الأخير يُولد طاقة في مركز النجم، حيث يتم إخماد مصدر الطاقة النووية. تتشتت الفوتونات التي تحمل طاقة بإستمرار، حيث أنها تُمتص ويعاد إرسالها في إتِّجاهات عشوائية، إن الفوتون (يعني المسار الحر) صغير جدا، نتيجة لذلك يتم إحتجاز الإشعاع داخل النجم وتنتشر الفوتونات للخارج ببطئ خلال عمليةٍ عشوائيةٍ، الوقت الذي يستغرقه الإشعاع للهروب من مركز النجم (الشمس) من خلال عملية السير العشوائية يقارب 10^7سنوات، على الرغم من أن الفوتونات تنتقل بسرعة الضوء، لن يَحدث لمعان الشمس إلا بعد ملايين السنين في النطاق الزمني لنقل الطاقة الإشعاعية، والذي قد نعرفه على أنه مقياس كلفن-هيلمهولتز الزمني لإعادة التكييف الحراري [19]

إن التقديرات التقريبية التي تميز نقل الطاقة الإشعاعية للفوتونات، ستمكننا من تبسيط الدراسة. يتعلق التقدير الأول بطول متوسط المسار الحر ℓ_f للفوتون الموجود عند نقطة معينة في النجم[14]

$$\ell_f = \frac{1}{k\rho} \qquad (1)$$

حيث ρ الكثافة و κ معامل الإمتصاص "المتوسط" أو العتامة، وهو المقطع العرضي الإشعاعي المجهري لكل وحدة كتلة

يعتمد التعتيم على التفاعل بين الإشعاع والمادة. على وجه التحديد، فإنه يعتمد على التوزيع التفصيلي للذرات في الغاز ومستويات الطاقة وحالات التأين ومعادلة حالة الغاز. حساب k معقد ويتطلب جهودًا مكثفة مما يؤدي إلى نشر جداول العتامة، التي تصف قيمة k كدالة للكثافة، ودرجة الحرارة، والتركيب الكيميائي.

توجد بعض التقريبات البسيطة ولكنها ذات صلة بالتعتيم. يقدمون فكرة تقريبية على الحالة الديناميكية الحرارية للغاز التي وصفها Kramers بالشكل:

$$k = k_0 \rho T^{-3.5} \qquad (2)$$

حيث k_0 ثابت يعتمد على التركيب الكيميائي ρ هي الكثافة، T درجة حرارة العتامة المناسبة في الداخل النجمي للنجوم منخفضة الكتلة، حيث تكون منخفضةً نسبيًا في لب النجوم الضخمة، يسود التشتت بواسطة الإلكترونات الحرة (تشتت طومسون)، مما يجعل العتامة مستقلة عن الكثافة ودرجة الحرارة، هذا الأخير هو أيضا صالح عندما يتأين الغاز بالكامل. في هذه الحالة، $k_e = 0.2\,(1 + X) \approx 0.4cm^2$ هو تقدير تقريبي للعتامة. ويوفر حدًا أدنى لـ k_e.

نظرا لأن الإنتقالات المرتبطة في الذرات المتأينة جزئيًا هي المسؤولة بجزء كبير عن التعتيم، عند درجات حرارة من 6000 إلى 10000 كلفن، يتم إمتصاص الفوتونات بواسطة ذرة الهيدروجين سالبة الشحنة (ذرة الهيدروجين مع إلكترون إضافي واحد $-H$)، يحدث هذا في الغلاف الجوي للنجوم التي تقل كتلتها عن كتلة شمسية واحدة، يتم توفير الإلكترونات عن طريق تأين المعادن، في هذه الحالة يتناسب التعتيم مع كثافة و بالتالي كثافة الإلكترونات، بعبارة أخرى، يتم ضبط التعتيم على درجة التأين، ويزيد مع زيادة درجة الحرارة، على عكس التعبير (2) الذي يصح في التصميمات الداخلية النجمية، القيمة النموذجية لـ k في النجم، يمكننا إعتبار حالة الهيدروجين المتأين في النواة النجمية $k = 1cm^2/kg$ بأخذ متوسط كثافة الشمس، $\overline{\rho_0} = \frac{3M_0}{4\pi {R_0}^3 g}/cm^3$، وباستخدام k_e، نحصل على الحد الأعلى لمتوسط المسار الحر للفوتونات في الشمس $\ell_f \approx 2\text{cm}$ ومن ثم فإن الفوتونات تواجه الكثير من التفاعلات قبل إنتقالها من موقع تكوينها (النواة النجمية) إلى السطح النجمي، هذا يعني بشكل عام أن المادة النجمية غير شفافة للغاية، ويعني أنه لم يعد صالحًا في العمالقة الحمراء (فائقة)، حيث يكون متوسط المسار الحر للفوتون أكبر بكثير[14].

يمكن الحصول على القيمة النموذجية لتدرج درجة الحرارة في نجم مثل الشمس من خلال مقارنة اللب$(T_c \approx 10^7\ K)$ ودرجة حرارة السطح $(T_{s\approx}10^4\ K)$، فيما يتعلق بأبعاد النجوم:

$$\frac{\Delta T}{\Delta r} \approx \frac{T_C - T_S}{R_0} \approx 1.4 * 10^{-4} \qquad kcm^{-1} \qquad (3)$$

أي 14 ألف لكل كيلومتر على طول المسار الحر للفوتون، يكون الجزء الداخلي النجمي متساوي الحرارة تقريبًا.

يحدث نقل الطاقة الإشعاعية في النجم بسبب وجود المزيد من الإشعاع الخارجي (قادم من المادة الساخنة قريبة من اللب) والإشعاع الداخلي (القادم من الطبقات الخارجية الأكثر برودة)، يوضح هذا أن متوسط المسار الحر لـ "الجسيمات الناقلة" (الفوتونات) صغير للغاية ويتعلق بنصف القطر النجمي، أي $\frac{\ell_f}{R_0} \approx 3 * 10^{-11}$. في مثل هذه الحالة، يمكن التعامل مع نقل الطاقة كعملية إنتشار، حيث نَصِف أولاً معادلة الإنتشار، من خلال التدفق المنتشر $\vec{f}$ للجسيمات لكل وحدة سطح من وحدة زمنية، متوسط على جميع الترددات u، بين المناطق ذات الجسيمات مختلفة كثافة (معبرًا عنها لكل وحدة حجم)، يتم الحصول عليها بواسطة.

$$\vec{f} = D\vec{\nabla}_u \tag{4}$$

يتم تعيين معامل الإنتشار D بواسطة السرعة v للجسيمات ومتوسط مسارها الحر ℓ_d:

$$D = \frac{1}{3} v \ell_d \tag{5}$$

بإشتقاق معادلة الإنتشار، حيث نعتبر طبقة من الغاز تُحدث حركة الجسيمات في إتجاه واحد تم، على سبيل المثال، على طول المحور x. نريد تحديد تيار الجسيمات عبر مستوى وهمي متعامد على المحور x. يتم ملاحظة عدد الجسيمات لكل وحدة حجم على يسار المستوى بواسطة n_-، كثافة الجسيمات في اليمين هي n_+. لتتمكن من السفر في فترة زمنية Δt، يجب على الجسيمات في البداية أن تكون أقرب إلى المستوى من المسافة $v_x \Delta t$، حيث v_xهي سرعتها في الاتجاه x. نفترض الحركة العشوائية للجسيمات. ومن ثم، فإن نصف الجسيمات على مسافة $v_x \Delta t$ سوف تتحرك نحو المستوى، النصف الآخر سيبتعد عنها. تيار الجسيمات الناتج عبر المستوى لكل وحدة زمنية فنجد:

$$f_x = \frac{n_- v_x \Delta t}{2\Delta t} - \frac{n_+ v_x \Delta t}{2\Delta t} = \frac{(n_- - n_+) v_x}{2} \tag{6}$$

يمكن لكل جسيم أن يسافر مسافة ℓ_x قبل التفاعل مع جسيم آخر. وبالتالي، يمكننا إيجاد الفرق في كثافة الجسيمات من يسار ويمين المستوى إلى متوسط المسار الحر حيث:

$$n_+ - n_- = \Delta n = \frac{dn}{dx}\Delta x = \frac{dn}{dx} 2\ell_x \tag{7}$$

يكتب التدفق في الاتجاه x:

$$f_x = -\ell_x v_x \frac{dn}{dx} \tag{8}$$

نفترض أنه لا يوجد إتجاه تفضيلي. في هذه الحالة، يكون متوسط سرعة الجسيمات متساويًا وواسعة في الاتجاهات المكانية الثلاثة. ومن ثم، فإن السرعة في الاتجاه x هي $v_x \simeq v/\sqrt{3}$. نطبق على متوسط المسار الحر: $\ell_x = \ell/\sqrt{3}$. نجد

$$f_x = -\frac{1}{3}\ell v\frac{dn}{dx} \tag{9}$$

يمكن تعميم هذه المعادلة محورين Y و Z

بالتطبيق على الغاز النجمي نحصل على تدفق الطاقة الإشعاعية $\vec{f}$، على جميع الترددات، نستبدل n من خلال كثافة الطاقة لجسم أسود (هذه المرة لكل وحدة حجم نحصل من خلال معادلة النقل بالإشعاع) $u = aT^4$. يتم إستبدال السرعة v بسرعة الضوء c و ℓ_d بـ ℓ_f المعطاة في (1). بسبب التناظر الكروي للنجم، تحتوي $\vec{f}$ فقط على مكون نصف قطري $f_r = |\vec{f}| = f$ و $\vec{\nabla}u$ ينتقل إلى مشتق في الإشعاع:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 4aT^3\frac{\partial T}{\partial r} \tag{10}$$

نظرًا لأن معادلات الهيكل النجمي موصوفة بوحدات لكل كتلة، فإننا نعيد كتابة المعادلة في الأعلى(4) فنحصل على

$$f = -\frac{4ac}{3}\frac{T^3}{k\rho}\frac{\partial T}{\partial r} \tag{11}$$

يمكن إعتبار هذه المعادلة أنها معادلة تصف التوصيل الحراري من خلال كتابتها على الشكل التالي

$$\vec{f} = -k_{rad}\vec{\nabla}T \tag{12}$$

مع

$$k_{rad} \equiv \frac{4ac}{3}\frac{T^3}{k\rho} \tag{13}$$

بحل المعادلة (11) لتدرج درجة الحرارة وإستبدال f بالسطوع المحلي $L = 4\pi r^2 f$، نحصل على

$$\frac{\partial T}{\partial r} = -\frac{3}{16\pi ac}\frac{k\rho L}{r^2T^3} \tag{14}$$

أخيرًا، بعد الإنتقال إلى المتغير المستقل عن m، نحصل على المعادلة الأساسية للطاقة الإشعاعية

$$\frac{\partial T}{\partial m} = -\frac{3}{64\pi^2 ac}\frac{kL}{r^4T^3} \tag{15}$$

تسمى هذه المعادلة بمعادلة إدينجتون لنقل الطاقة عبر الإشعاع حيث أن هذا التقريب غير صالح بالقرب من السطح النجمي بسبب إنخفاض الكثافات، يصبح متوسط المسار الحر للفوتونات مشابهًا للمسافة المتبقية التي يتعين عليها السفر للوصول إلى السطح النجمي، ومن ثم ينهار تقريب الإنتشار في الغلاف الجوي النجمي.

هناك معادلة تفاضلية أكثر تعقيدًا تحتاج إلى حل لوصف نقل الطاقة. نقتصر على المنطقة في النجم حيث يكون تقريب الانتشار معتراً بالنسبة لوصف انتقال الطاقة في الغلاف الجوي النجمي.

المعادلات الموصوفة أعلاه مستقلة عن التردد لأن f و L و مُعرَّفة على أنها "متوسطات" على جميع الترددات. نناقش هنا طريقة مناسبة لتحديد متوسط العتامة k. بالاعتماد على التردد ν. نفعل نفس الشيء بالنسبة لجميع الكميات ذات الصلة المعتمدة على التردد و k_ν, D_ν, u_ν وما إلى ذلك

يصف تدفق الإشعاع المنتشر أن $\vec{f}_\nu$ فاصل التردد $[\nu، \nu + d\nu]$ على أنه:

$$\vec{f} = -D_\nu \vec{\nabla} u_\nu \quad ، \quad D_\nu = \frac{1}{3} c l_\nu = \frac{c}{3k_\nu \rho} \tag{16}$$

كثافة الطاقة في فاصل التردد $[\nu، \nu + d\nu]$ تعطى بواسطة

$$u_\nu(T) = \frac{4\pi}{c} B_\nu(T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1} \tag{17}$$

حيث $u_\nu\ (t)$ و $B_\nu\ (T)$ هي دالة بلانك للكثافة وكثافة الطاقة لجسم أسود، على التوالي، علما:

$$\vec{\nabla} u_\nu = \frac{4\pi}{c} \frac{\partial B}{\partial T} \vec{\nabla} T \tag{18}$$

تنتج المعادلة الأخيرة مع المعادلة (16)، التعبير التالي لإجمالي التردد المتكامل تيار $\vec{f}$:

$$\vec{f} = \int_0^\infty \vec{f}_\nu \, d\nu = -\left(\frac{4\pi}{3\rho} \int_0^\infty \frac{1}{k_\nu} \frac{\partial B}{\partial T} d\nu\right) \vec{\nabla} T \tag{19}$$

المعادلة لها نفس شكل (12)، ولكن الآن نجد:

$$k_{rad} = \frac{4\pi}{3\rho} \int_0^\infty \frac{1}{k_\nu} \frac{\partial B}{\partial T} d\nu \tag{20}$$

بالتعبير الوارد في المعادلة (13)، فنحصل على طريقة لحساب متوسط k_{rad} إذا قارنا هذا التعبير بمعاملات الامتصاص:

$$\frac{1}{\bar{k}} \equiv \frac{\pi}{acT^3} \int_0^\infty \frac{1}{k_\nu} \frac{\partial B}{\partial T} d\nu \tag{21}$$

هذا ما يسمى بتعتيم روسلاند، بشرط

$$\int_0^\infty \frac{\partial B}{\partial T} dv = \frac{acT^3}{\pi} \quad (22)$$

تعتيم روسلاند هو متوسط توافقي مع كثافة الطاقة. $\partial B/\partial T$ من السهل حسابها بمجرد معرفة الدالة k_v في شكل جداول العتامة، كما هو موضح أعلاه باستخدام $\vec{f_v} = -D_v \nabla u_v$

نعيد كتابة التعبيرات السابقة

$$\vec{f_v} = -\left(\frac{1}{k_v}\frac{\partial B}{\partial T}\right)\frac{4\pi}{3\rho}\vec{\nabla}T \quad (23)$$

توضح هذه النتيجة أنه بالنسبة لنقطة معينة في النجم (معطى $\vec{\nabla}T$وρ)، فإن التكامل في التعبير (20) يتناسب مع صافي تدفق الطاقة f_v لجميع الترددات. ومن ثم يتم إنشاء روسلاند بطريقة تعطي الوزن الأعلى للترددات ذات التدفق الأقصى للطاقة.

الجانب السلبي من روسلاند يعني أن عتامة مزيج من غازين مختلفين مع العتامات k_2 و k_1 لا تساوي مجموع العتامات الفردية: $k \neq k_1 + k_2$. وبالتالي فإنه يكفي معرفة روسلاند يعني للغازين المختلفين اللذين يحدث كلاهما في خليط الغازات، لتتمكن من تحديد متوسط روسلاند للخليط نفترض، على سبيل المثال، أن الغاز يحتوي على الهيدروجين والهيليوم يجب حساب جزء الهيدروجين X وجزء الهيليوم Y، ثم روسلاند يعني العتامة $k_v = Xk_v(H) + Yk_v(He)$. في كل مرة تتغير الوفرة XوY ، يجب إعادة حساب k_v يمكن تقييم عتامة روسلاند باستخدام التعبير (21).

حتى الآن إفترضنا أن تدفق الطاقة هو فقط نتيجة لعملية إنتشار الفوتونات، في الأقسام التالية سنناقش طريقتين أخريين لنقل الطاقة، لذلك من الآن فصاعدًا سنشير إلى جميع الكميات $\vec{f}_{rad}$، κ_{rad} المتعلقة بنقل الطاقة الإشعاعية .

II.2.3. نقل الطاقة بالتوصيل

يحدث التوصيل الحراري، على المستوى الميكروسكوبي، حين تتفاعل الذرات والجزيئات الساخنة، المتحركة أو المهتزة بسرعة، مع الذرات والجزيئات المجاورة لها ناقلة بعض طاقتها(حرارتها) إلى هذه الجسيمات المجاورة، بعبارة أخرى تنتقل الحرارة بالتوصيل عند إهتزاز الذرات المتجاورة على بعضها البعض، أو عندما تتحرك الإلكترونات من ذرة إلى أخرى، التوصيل أكثر سُبُلْ إنتقال الحرارة تأثيراً في وسط صلب أو بين الأجسام الصلبة المتلامسة حراريا (الموائع) وخاصة الغازات الأقل موصولية حرارية، تُعبر الموصولية الحرارية عند التلامس الحراري عن دراسة التوصيل الحراري بين الأجسام الصلبة المتلامسة تدعى عملية إنتقال الحرارة من مكان إلى أخر دون حركة الجسيمات بالتوصيل.

يحدث نقل الطاقة عبر التوصيل الحراري من خلال الاصطدامات التي تحدثها الحركة الحرارية للجسيمات مثل الإلكترونات والنوى الذرية في المادة المؤينة، وكذلك الذرات والجزيئات في المادة الغير المؤينة (مادة نجمية). يصبح تصادم الجسيمات منخفض نسبيا داخل النجم (حوالي $10^{-20}cm^2$ لكل جسيم)، تشير الكثافة العالية إلى أن متوسط المسار الحر أصغر بكثير من الفوتونات، علاوة على ذلك فإن سرعة الجسيمات ليست سوى جزء بسيط من سرعة الضوء، نتيجة لذلك فإن معامل الإنتشار D أصغر بكثير من معامل النقل الإشعاعي عبر الفوتونات، ومع ذلك يتغير هذا عند النظر في النوى

النجمية للنجوم المتطورة التي يكون فيها إلكترون الغاز متدهور. الكثافة في غاز الإلكترون المتحلل هائلة: (عادة $10^6 gcm^{-3}$)، ولكن من ناحية أخرى فإن السرعات التي حققتها الإلكترونات هي جزء مهم من سرعة الضوء يزيد متوسط المسار الحر بشكل ملحوظ، نتيجة لذلك يصبح معامل الإنتشار كبيرا، وهنا يصبح التوصيل الحراري آلية مهمة لنقـــــــل الطاقة، والتي تهيمن على النقل الإشعاعي[20-14]

يمكن أيضا وصف تدفق الطاقة الناجمة عن التوصيل الحراري $\vec{f}_c$ من خلال صيغة الانتشار $\vec{f}_{cd} = -k\vec{\nabla}T$

يمكن كتابة مجموع التدفق عبر النقل بالإشعاع والتوصيل بالشكل

$$\vec{f} = \vec{f}_{rad} + \vec{f}_{cd} = -(k_{rad} + k_{cd})\vec{\nabla}T \qquad (23)$$

حيث يعطى معامل التوصيل k_{cd} على النحو التالي

$$k_{cd} = \frac{4ac}{3}\frac{T^3}{K_{cd}\rho} \qquad (24)$$

ومنه إجمالي تدفق الطاقة عبر الإشعاع والتوصيل هو

$$\vec{f} = \frac{4ac}{3}\frac{T^3}{\rho}\left(\frac{1}{K_{rad}} + \frac{1}{k_{cd}}\right)\vec{\nabla}T \qquad (25)$$

توضح هذه المعادلة أنه يمكننا الحصول على نفس المعادلة التي حصلنا عليها في حالة النقل بالإشعاع (11)، إذا إستبدلنا $1/k$ ب $\frac{1}{k_{rad}} + 1/k_{cd}$ حيث تهيمن آلية النقل الحراري على المجموع

أصبحت المعادلة (15) مع K المعدلة صالحة الآن للنقل الإشعاعي والموصل. نعيد الصياغة المعادلة. تحت إفتراض التوازن الهيدروستاتيكي (يعطي $\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm\rho}{r^2}$ التفصيل في الفصل3)، نقسم(15) على (17) ونحصل على

$$\frac{(\partial T/\partial m)}{(\partial P/\partial m)} = \frac{3}{16\pi acG}\frac{KL}{mT^3} \qquad (26)$$

نحدد النسبة بين المشتقات الجزئية $\left(\frac{dt}{dp}\right)_{rad}$ تباين T مع العمق، حيث يتم التعبير عن العمق من حيث الضغط (الضغط هو زيادة رتيبة تعمل باتجاه المركز النجمي). لنجم في توازن هيدروستاتيكي ينقل الطاقة عبر الإشعاع والتوصيل، $\left(\frac{dt}{dp}\right)_{rad}$ (له معنى التدرج اللوني الذي يصف تغير درجة الحرارة)

باستخدام الإختصار نجد:

$$\nabla_{rad} \equiv \left(\frac{dlnT}{dlnP}\right)_{rad} \quad (27)$$

نتحصل على:

$$\nabla_{rad} = \frac{3}{16\pi acG}\frac{kLP}{mT^4} \quad (28)$$

حيث k تشير إلى التعتيم المشترك للنقل الإشعاعي والموصل. ∇_{rad}يسمى الإشعاعي تدرج درجة الحرارة. إنه المشتق اللوغاريتمي المحلي لدرجة الحرارة فيما يتعلق بالضغط سيكون ذلك ضروريا إذا كان لابد من نقل اللمعان بالكامل من خلال الإشعاع فقط.

نلاحظ أن ∇_{rad} و ∇_{ad}يتم تعريفهما بشكل مختلف ، وبصرف النظر عن القيم العددية المختلفة، يتم تعريف معنى فيزيائي مختلف. يصف مشتقا محليا يربط P وT، في حين أن ∇_{ad}هو مشتق ديناميكي حراري، يصف التباين الحراري لعنصر واحد، عنصر مائع أثناء التمدد الضغط الحراري.

مرة أخرى نحدد مقياسا زمنيا بناءً على المعادلة (28)، وهو مقياس الوقت الحراري أو مقياس الوقت للتكيف الحراري τ_{th}. يمكن أن يظهر أن $\tau_{th} \approx \tau_{HK}$ عند النظر في القيمة المتوسطة لهذه المقاييس الزمنية على النجم بأكمله. هذا يعني أن مقياس كلفن -هيلمهولتز يمكن أن يُفسر على أنه الفترة الزمنية التي يحتاجها التذبذب الحراري للانتقال من النواة النجمية إلى السطح النجمي. على الرغم من التكافؤ بين المقياسين الزمنيين، فمن الأفضل إستخدامهما بشكل منفصل. في معظم الحالات، يستخدم مقياس كلفن-هيلمهولتز الزمني لوصف النجم بأكمله، بينما المقياس الزمني للتكيف الحراري غالبا ما يستخدم لطبقات محلية معينة في النجم.

3.3.II نقل الطاقة بالحمل الحراري

عندما تصبح العتامة وكمية الطاقة المراد نقلها أكبر مما ينبغي، لا يمكن للإشعاع وحده نقل الطاقة بكفاءة في هذه الحالة يتولى الحمل الحراري مهمة نقل الطاقة، والذي نعني به تبادل الطاقة عبر عناصر مائع تتحرك بين الأسخن والأكثر برودة، في طبقة غير مستقرة ديناميكيًا. يحدث هذا عن طريق تبادل عناصر المادة، حيث تتحرك الخلايا الحرارية الساخنة لأعلى بينما تغرق الخلايا الباردة، أما الخلايا المتحركة تذوب في بيئتها الجديدة وبالتالي تطلق فائض أو نقص في الحرارة، لأن الكثافة قريبة من النواة النجمية العالية جدًا، يمكن أن يكون الحمل الحراري وسيلة فعالة جدا لنقل الطاقة

إن هناك مشكلتان في هذه الآلية وهما: مقدار الطاقة التي يمكن نقلها بالحمل الحراري، والتدرج الفعلي لدرجة الحرارة ∇ داخل منطقة الحمل الحراري، ولحل هاتين المشكلتين يجب التعرف على نظرية مفصلة للحمل الحراري، والتي تمثل مشكلة صعبة ولا تزال دون حل على الرغم من إمكانية محاكاة الحمل الحراري عدديا، إلا أن هذا يتطلب حل معادلات الديناميك المائية في ثلاثة أبعاد على نطاق كبير من مقاييس الطول، المقاييس الزمنية، الضغوط ، الكثافة ودرجات الحرارة، وبالتالي فإن هذه المحاكاة تتطلب وقتا طويلا ويصعب تطبيقها في حسابات التطور النجمي، وعليه سوف نلجأ إلى نظرية بسيطة للغاية أحادية البعد تستند إلى تقديرات تقريبية، وتعرف بإسم نظرية طول الخلط.

تم إجراء العديد من المحاولات لمراعاة الحمل الحراري بأكبر قدر ممكن من الدقة، حيث إعتمدنا على النظرية التي تسمح بمعالجة الحمل الحراري بطريقة بسيطة (نظرية طول الخلط) تطبق بالقرب من النواة النجمية، تم تطويرها في النجوم في حالة التوازن الهيدروستاتيكي ويفترض أن الحمل الحراري مستقل عن الزمن

في هذه النظرية نقارب حركات الحمل المعقدة بنقط من الغاز تنتقل لأعلى أو لأسفل على مسافة شعاعية ℓ_m (طول الخلط)، وبعد ذلك تذوب في محيطها وتفقد هويتها. عندما تذوب النقطة فإنها تُطلق الحرارة الزائدة إلى محيطها (في حالة وجود فقاعة متحركة لأسفل، تمتص عجزها الحراري من محيطها) طول الخلط هو مُعلمة حرة غير معروفة في هذا النموذج التخطيطي للغاية، يفترض أن ذلك من أجل إرتفاع مقياس الضغط المحلي، وهو المسافة الشعاعية التي يتغير خلالها الضغط بواسطة عامل الطي **[19-14]**

$$H_P = \left|\frac{dr}{d\ lnP}\right| = \frac{P}{\rho g} \tag{29}$$

المساواة الأخيرة تنطبق على نجم في حالة إتزان هيدروستاتيكي، نفترض $\ell_m \sim H_P$ وهذا غير معقول بالنظر إلى أن فقاعة الغاز الصاعدة سوف تتوسع، نفترض أنه في منطقة الحمل الحراري في النجم حوالي نصف مساحة السطح الكروية مغطاة بنقط صاعدة والنصف الآخر عن طريق غرق الفقاعات، تبدأ النقط الصاعدة في تغطية معظم مساحة السطح بعد على إرتفاع مقياس الضغط

يمكننا حساب تدفق الطاقة بالحمل الحراري، وتدرج درجة الحرارة، بعد الإرتفاع على مسافة شعاعية في فرق درجة الحرارة بين عنصر الغاز(e) ومحيطه (s)

$$\Delta T = T_e - T_S = \left|\left(\frac{dT}{dr}\right)_e - \left(\frac{dT}{dr}\right)_s\right| \ell_m = \Delta\left(\frac{dT}{dr}\right)\ell_m \tag{30}$$

حيث dT/dr هو تدرج درجة الحرارة المحيطة، و$(dT/dr)_e$ هو تغير درجة الحرارة مع نصف القطر الذي يختبره العنصر عندما يرتفع ويتوسع بشكل ثابت و$\Delta(\frac{dT}{dr})$ هو الفرق بينهما يمكننا كتابة ∇ وبالشكل التالي

$$\frac{dT}{dr} = T\frac{d\ lnT}{dr} = T\frac{d\ lnT}{d\ lnP}\frac{d\ lnP}{dr} = -\frac{T}{H_P}\nabla \tag{31}$$

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_e = -\frac{T}{H_P}\nabla_{ad}$$

تظهر العلامة السالبة لأن dP/dr< 0

$$\Delta T = T\frac{\ell_m}{H_P}(\nabla - \nabla_{ad}) \tag{32}$$

الطاقة الداخلية الزائدة لعنصر الغاز مقارنة بمحيطه هي $\Delta u = Cp\Delta T$ لكل وحدة كتلة، إذا تحركت النقط بالحمل بسرعة متوسطة فإن تدفق الطاقة الذي تحمله عناصر الغاز الحراري يكون

$$F_{conv} = v_c \rho c_P \Delta T \qquad (33)$$

نحتاج إلى تقدير متوسط سرعة الحمل الحراري، إذا كان الإختلاف في الكثافة بين عنصر الغاز ومحيطه $\Delta\rho$ تعطى قوة الطفو تسارعاً بحيث

$$a = -g\frac{\Delta\rho}{\rho} \approx g\frac{\Delta T}{T} \qquad (34)$$

حيث تكون المساواة الأخيرة دقيقة للغاز المثالي الذي يكون له $P \propto \rho T$ و $\Delta P = 0$ تسارع النقطة على مسافة ℓ_m لفترة زمنية t يعطي $\ell_m = \frac{1}{2}at^2$ لذلك فإن سرعتها المتوسطة هي $v_c \approx$ $\ell_m/t = \sqrt{\frac{1}{2}a\ell_m}$ ومنه

$$v_c \approx \sqrt{\frac{1}{2}\ell_m g\frac{\Delta T}{T}} \approx \sqrt{\frac{{\ell_m}^2}{2H_P}(\nabla - \nabla_{ad})} \qquad (35)$$

نجمع هذه مع معادلة تدفق الطاقة السابقة F_{conv} نحصل على

$$F_{conv} = \rho cpT\left(\frac{\ell_m}{H_P}\right)^2\sqrt{\frac{1}{2}gH_P(\nabla - \nabla_{ad})^{3/2}} \qquad (36)$$

ترتبط المعادلتان المذكورتان أعلاه بسرعة الحمل الحراري وتدفق الطاقة بالحمل أو ما يسمى بالإشعاع الفائق $\nabla - \nabla_{ad}$، الدرجة التي يتعدى بها التدرج الفعلي لدرجة الحرارة ∇ هي قيمة ثابتة لدرجة الحرارة.

قيمة $\nabla - \nabla_{ad}$ مطلوبة لنقل التدفق الكامل لطاقة نجم بالحمل الحراري أي $F_{con} = 1/4\pi r^2$ لعمل تقدير تقريبي، نأخذ القيم النموذجية للداخل النجمي باستخدام نظرية virial وبإفتراض غاز مثالي فنجد:

$$\rho \approx \bar{\rho} = \frac{3M}{4\pi R^3} \qquad T \approx \bar{T} \sim \frac{\mu}{\Re}\frac{GM}{R} \qquad c_P = \frac{5}{2}\frac{\Re}{\mu} \qquad \sqrt{gH_P} \qquad (37)$$

$$= \sqrt{\frac{P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\Re}{\mu}T} \sim \sqrt{\frac{GM}{R}}$$

نلاحظ أن التعبير الأخير يساوي تقريبًا متوسط سرعة الصوت في الداخل النجمي. ومع إهمال عوامل وحدة النظام نحصل على

$$F_{conv} \sim \frac{M}{R^3}\left(\frac{GM}{R}\right)^{3/2} (\nabla - \nabla_{ad})^{3/2} \tag{38}$$

إذا استبدلنا $F_{conv} = \frac{1}{4\pi r^2} \sim L/R^2$، فيمكننا إعادة كتابة ما سبق بالشكل التالي

$$\nabla - \nabla_{ad} \sim \left(\frac{LR}{M}\right)^{2/3} \frac{R}{GM} \tag{39}$$

بوضع الأرقام النموذجية، أي اللمعان الشمسي والكتلة ونصف القطر، نحصل على التقريب التالي تقدير الإشعاع الفائق في العمق الداخلي لنجم مثل الشمس

$$\nabla - \nabla_{ad} \sim 10^{-8} \tag{40}$$

الحمل الحراري فعّال للغاية في نقل الطاقة بحيث لا يتطلب سوى إشعاع فائق ضئيل. هذه يعني أن $F_{conv} \gg F_{rad}$ في مناطق الحمل الحراري. ينتج عن هذا التقدير الأكثر $\nabla - \nabla_{ad} \sim 10^{-5} - 10^{-7}$، والذي لا يزال عددًا صغيرًا جدًا. يمكننا أن نستنتج أنه في الداخل النجمي العميق التقسيم الطبقي لدرجة الحرارة يكاد يكون ثابتًا ومستقلًا عن تفاصيل النظرية. وبالتالي ليست هناك حاجة إلى نظرية مفصلة للحمل الحراري لنقل الطاقة عن طريق الحمل ويمكننا ذلك بأخذ

$$\frac{dT}{dm} = -\frac{Gm}{4\pi r^4}\frac{T}{P}\nabla \qquad \text{مع} \qquad \nabla = \nabla_{ad} \tag{41}$$

لكن الوضع مختلف في الطبقات الخارجية، لأن $T \ll \bar{T}$ و $\rho \ll \bar{\rho}$. وبالتالي يكون F_{conv} أصغر بكثير ويصبح الإشعاع الفائق جوهريًا ($\nabla > \nabla_{ad}$). درجة الحرارة الفعلية يعتمد على التدرج

نظرية الحمل الحراري. في سياق MLT، يعتمد التدرج T على القيمة المفترضة لـ $\alpha_m = \ell_m/H_P$. في هذه العملية، غالبًا ما يقوم المرء بمعايرة تفصيلية (نماذج محسوبة بقيم مختلفة) لنصف قطر الشمس والنجوم الأخرى مع أنصاف أقطار جيدة القياس. نتيجة هذا الإجراء هو الحصول على أفضل تطابق حيث يكون $\alpha_m \approx 1.5 - 2$.

مع الإقتراب من السطح، يصبح الحمل الحراري غير فعال للغاية في نقل الطاقة. فيصبح $F_{conv} \ll F_{rad}$ بحيث ينقل الإشعاع بشكل فعال كل الطاقة ، و $\nabla > \nabla_{rad}$ على الرغم من الحمل الحراري

بالإضافة إلى نقل الطاقة، فإن الحمل الحراري له تأثير مهم على حياة النجم. الحمل هي المسؤول عن خلط المواد النجمية على نطاق زمني قصير جدا ومن ثم، عند تحديد البنية النجمية والتطور، يمكن أن نفترض أن الحمل الحراري يسبب إختلاطًا فوريًا لجميع الأنواع الكيميائية في منطقة الحمل الحراري بأكملها.يعتبر الحمل الحراري من التاريخ الكيميائي للنجم.

الفصل الثالث :

دراسة مختلف أطوار التطور النجمي

الفصل الثالث :
دراسة مختلف أطوار التطور النجمي

4. III الفصل الثالث: دراسة مختلف أطوار التطور النجمي

5. 1.III تمهيد

قام علماء الفيزياء الفلكية ببناء نماذج نظرية للنجوم تتمثل في مقارنة الملاحظات بتنبؤاتهم للحفاظ على التحليل النظري، وعليه تم وضع بعض الإفتراضات لها والتي تتمثل فيما يلي:

- النجوم لها تناظر كروي: حيث تحافظ على شكلها الكروي المتناظر مهما كانت حركتها.
- النجوم في حالة توازن ديناميكي: التوازن الديناميكي ويقصد به أن الطاقة المشعة من النجم تساوي الطاقة الواردة من قلبه.
- النجوم في حالة ثبات حراري: وهذا يعني أن درجة الحرارة عند كل النقطة داخل النجم تبقى ثابتة على مدى فترة زمنية طويلة.

في ظل هذه الإفتراضات، سنقوم بالدراسة النظرية للهيكل النجمي الذي يعتمد على أربع معادلات تصف الهيكل النجمي وتَأخذ بعين الإعتبار كل من (التوازن الهيدروستاتيكي، حالة المادة النجمية، آلية توليد الطاقة النجمية بالإضافة إلى طرق نقل الطاقة في الدَّاخل النجمي).

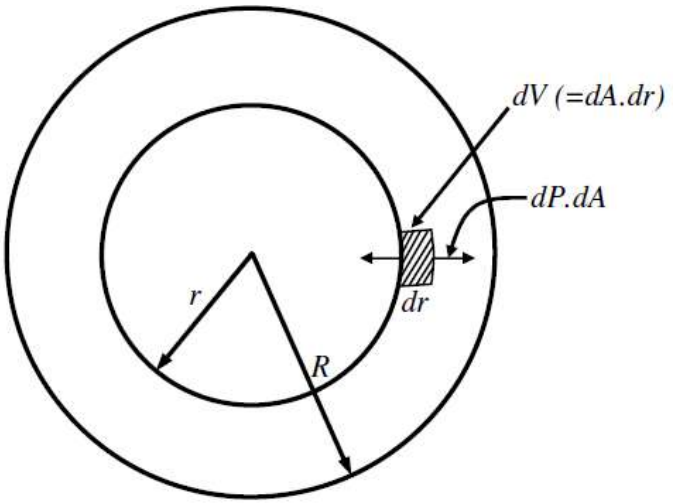
2.III المعادلات الأساسية للبنية النجمية

تستخدم هذه المعادلات الأساسية للوصف النظري لنماذج البنية النجمية، وبمجرد حساب هذه النماذج المختلفة، يتم التعرف على موقعها في مخطط H-R، وذلك لأن هذا الأخير يحدد معيار مفَصَّل يجب أن تفي به أي نظرية عن التركيب النجمي وتطوره.

الخصائص الفيزيائية للنجم في أي نقطة داخله هي درجة الحرارة، $T\ (r)$، الضغط$P\ (r)$، والكثافة $\rho\ (r)$(، واللمعان $L\ (r)$، وهذه المعادلات الأساسية هي توزيعات الكتلة، معادلة اللمعان، معادلة التوازن الهيدروستاتيكي ومعادلة التدرج(الإشعاعي، الحراري).

1.2.III التوازن الهيدروستاتيكي

عند التوازن الميكانيكي يتم التعامل مع نجم غازي غير دوار ليس له مجال مغناطيسي أو رفيق قريب في هذه الحالة القوى المؤثرة عليه هي قوة الجاذبية وقوة الضغط، ممايعني أن جميع القوى المؤثرة على المادة يجب أن تعوض بعضها البعض يسمى هذا التوازن الميكانيكي بالتوازن الهيدروستاتيكي.



الشكل رقم 12 . يوضح قشرة لنواة نجمية [15]

نعتبر قشرة كروية رفيعة ذات سماكة متناهية الصغر dr على مسافة r من مركز النجم(الشكل رقم12)، حيث أن كثافتها عند الحدود ρdr وتسارعها gρdr– والذي يمثل قوة الجاذبية الموجهة نحو المركز النجمي، ولتجنب تسارع المادة لهذه القشرة الكروية بإتجاه المركز، يجب عليها إنتاج قوة ضغط تساوي تماما قوة الجاذبية ولكنها موجة للخارج، ومن هذا المنطلق وضعت معادلة التوازن الهيدروستاتيكي وهي أول المعادلات الأساسية وتعطى بالشكل التالي[11-13]

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{Gm(r)\rho(r)}{r^2} = -g(r)\rho(r) \qquad (42)$$

حيث $P(r)$ الضغط (N/m^2) عند نصف قطر r، و $\rho(r)$ كثافة الكتلة $(kg\ /\ m^3)$، أما (r) m هي الكتلة الداخلية لنصف القطر r.

يجب أن تكون القوة الكلية المؤثرة على القشرة(محصلة قوة الضغط والجاذبية) معدومة، أما العلامة السالبة تدل على أن الضغط يتناقص مع زيادة نصف القطر الداخلي للنجم.

2.2.III التوزيع الكتلي

الكتلة الموجودة في كرة نصف قطرها r وذات الكثافة الحجمية ρ_r هي[11-13]

$$m(r) = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho(r)$$

وبإشتقاق هذه المعادلة نتحصل على

$$\frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \qquad (43)$$

و هي المعادلة الأساسية الثانية والتي تصف التوزيع الكتلي داخل النجم.

3.2.III توزيع اللمعان

ضياء النجم (النورانية أو اللمعان) هو عبارة عن الطاقة المنبعثة من النجم خلال وحدة الزمن(في الثانية الواحدة)

إن التغير في اللمعان $dL(r)$ عبر الغلاف الكروي والذي سمكه dr يعطى على الشكل:

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \in (r) \qquad (44)$$

حيث أن $\in$ هو معدل الطاقة المولدة لكل وحدة كتلة في التفاعلات النووية التي تحدث داخل النجم وحدته هي (kg/w)، علاقته هي$\in (\rho, T)$ ولأن ρ،T كلاهما دالتان لنصف القطر في النجم، ويمكن كتابته كدالة لr، وهي $\in (r)$. [15-13]

يمكن حساب نورانية النجم من قانون ستيفان بولتيزمان:

$$L = 4\pi r^2 E = 4\pi r^2 \sigma T^4 \qquad (45)$$

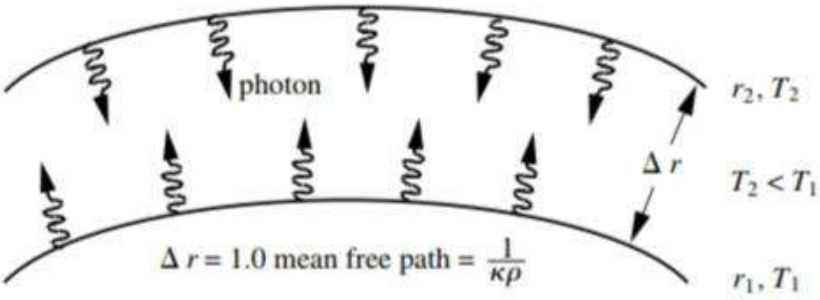
ينص قانون ستيفن بولتزمان على أن كمية الطاقة الإشعاعية (E) المنبعثة خلال وحدة الزمن من وحدة المساحة السطحية للجسم المشع تتناسب طرديا مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة السطحية المطلقة له، ويمكن كتابة القانون على النحو التالي:

$$E = \sigma T^4 \qquad (46)$$

4.2.III. التدرج

المعادلة الأساسية الرابعة والتي تصف التدرج لها شقان (التدرج الإشعاعي، التدرج الحراري) يعتمد محتوى المعادلة على ما إذا كان نقل الطاقة نحو السطح عن طريق نقل الإشعاع (الفوتونات) أو عن طريق الحمل الحراري، يحدث الأول من خلال العديد من عمليات الإمتصاص وإعادة الإنبعاث بينما تعمل الفوتونات في طريقها نحو السطح النجمي، أما الثاني يحدث من خلال الحركات الضخمة للغاز.

1.4.2.III.التدرج الإشعاعي



يشع جزءان كرويان من الأسطح تجاه بعضهما البعض كسطح جسم أسود، إذا كان السطح الداخلي أكثر سخونة من السطح الخارجي(كما في النجم) فهناك صافي تدفق للإشعاع في الإتجاه الخارجي يكتب بالشكل: $E = \sigma T^4$. [13]

نعتبر أن التدفقات من السطحين الكرويين مفصولين بمسار حر متوسط واحد(كما في الشكل)، $\Delta r = (k\rho)^{-1}$ ، حيث k هي العتامة ($\frac{m^2}{kg}$). أحد السطحين في الموضع r والآخر في الموضع $r + \Delta r$. كلاهما لهما درجات حرارة مختلفة قليلا، السطح الخارجي يكون أكثر برودة، تشع تجاه بعضها البعض كأجسام سوداء مع وجود تدفقات، يتم إمتصاص أو تناثر التدفقات التي تصل إلى كل الطبقة (في المتوسط)، ومنه فإن الطبقة الأكثر سخونة تستقبل من الطبقة العلوية الأكثر برودة، معظم القوة التي تشعها.

وبالتالي يبقى هناك تدفق صافي للطاقة إلى الخارج من الطبقة السفلية، $r = r_1$ ، ويكون التدفق الخارجي عند نصف قطر $r = r_2$ هو:

$$E_{net} = \sigma T_1^4 - \sigma T_2^4 \qquad \left(\frac{W}{m^2}\right) \tag{47}$$

التدفق فوق السطح الكروي بأكمله هو اللمعان عند نصف القطر r

$$L_{rad}(r) = -4\pi r^2(\sigma T_2^4 - \sigma T_1^4) \tag{48}$$

وهو الشكل التفاضلي لـ r ، نعيد كتابة المعادلة (48) للحصول على الشكل التالي:

$$L_{rad}(r) \approx -4\pi r^2 \frac{d(\sigma T^4)}{dr}\Delta r \tag{49}$$

حيث Δr هي المسافة بين السطوح، في الإحداثيات الكروية إذا حددنا اللمعان من حيث تدرج التدفق، $L_{rad}(r) = -4\pi r^2 \nabla E \Delta r$ ، حيث $E = \sigma T^4$ ، مما يؤدي مباشرة إلى المعادلة (49) نعوض $\Delta r = (k\rho)^{-1}$ في المعادلة (49)، نشتق ونحل من أجل تدرج درجة الحرارة فنجد:

$$\left(\frac{dT(r)}{dr}\right)_{rad} = \frac{3}{64\pi\sigma}\frac{k(r)\rho(r)}{(T(r))^3 r^2}L(r) \qquad \left(\frac{K}{m}\right) \tag{50}$$

حيث $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ وهي ثابت ستيفن بولتزمان (Stefan–Boltzmann) وk هي العتامة، وهو المقطع العرضي للإمتصاص والتشتت لكل كيلوغرام (m^2/kg).

III.2.4.2.التدرج الحراري الادياباتيكي

آلية نقل الطاقة البديلة هي الحمل الحراري، تنقل الطاقة عن طريق تصاعد فقاعات الغاز الساخن. وُصولاً إلى السطح، تَبرد الفقاعات بسرعة ثم تَنخفضْ إلى مُستويات أقل، حيث تُمتص الحرارة مرة أخرى وتَرتفع، هذا يؤدي إلى عمليات التَّداول، والتي تُنتج مناطق ساخنة وباردة على السطح.

يعطى تدرج درجة الحرارة لفقاعة الغاز الصاعدة التي تمر بمرحلة توسع ثابت الحرارة أثناء توازن الضغط مع محيطها، يتوافق هذا مع التوازن الهيدروستاتيكي. يمكن توسيع تدرج درجة الحرارة dT/ dr على النحو التالي[13]:.

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_{adiab} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{adiab}\frac{dP}{dr} + \left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_{adiab}\frac{dS}{dr} = \left(\frac{dT}{dP}\right)_{adiab}.\frac{dP}{dr} \qquad (51)$$

حيث أن الأنتروبي $dS \equiv \delta Q/T$ متغير حالة، بشرط ثبوت درجة الحرارة أي $\delta Q = 0$، وبالتالي فإن الجزء الموجود في أقصى اليمين يكون صفراً، $dS/dr_{adiab} = 0$.

إن T هي دالة لمتغير حالة واحد فقط، وهو P، يتم التخلص من الأخر بواسطة القيد الثابت حيث، $PV^{\gamma}=C_1$. وهو المشتق الجزئي، فإن $\frac{\partial T}{\partial P}$ يعادل إجمالي المشتق dT/dP ، على النحو الوارد في المعادلة (51).

نقوم بتقييم مصطلح $\left(\frac{dT}{dP}\right)_{adiab}$ في المعادلة (51). يمكن إثبات أن عينة غاز تتمدد أو تنكمش بدون إدخال أو إزالة للحرارة ($\delta Q = 0$) حيث تخضع للقيد التالي:

$$PV^{\gamma} = C_1 \qquad \gamma \equiv \frac{C_P}{C_V} \qquad (52)$$

حيث c_1 ثابت و γ هي نسبة درجات الحرارة النوعية لمتغيرات الحالة مع ثبوت الضغط والحجم فنجد:

$$C_P \equiv \left|\frac{\delta Q}{dT}\right|_P, C_V \equiv \left|\frac{\delta Q}{dT}\right|_V \qquad (JK^{-1}mol^{-1}) \qquad (53)$$

نتخلص من V في المعادلة(52) من قانون الغاز المثالي لمول واحد PV=RT، نأخذ المشتق dP/dT، ثم نقوم بإزالة c_1 بإستخدام المعادلة (52) لإيجاد.

$$\left(\frac{dT}{dP}\right)_{adiab} = \left(1-\frac{1}{\gamma}\right)\frac{T}{P} \qquad (54)$$

نعوض الحد dP/dr للمعادلة (51) من معادلة التوازن الهيدروستاتيكي نتحصل على معادلة التدرج الحراري.

$$\left(\frac{dT(r)}{dr}\right)_{adiab} = -\left(1-\frac{1}{\gamma}\right)\frac{T}{P}\frac{Gm(r)\rho(r)}{r^2} = -\left(1-\frac{1}{\gamma}\right)\frac{m_{av}}{k}g(r) \qquad (56)$$

حيث γ هي نسبة درجات الحرارة النوعية من المعادلة (52)، أما تسارع الجاذبية فهو $g(r) = Gm/r^2$

تعطى m_{av} بدلالة الضغط من المعادلة التالية $P = \rho kT/m_{av}$

حيث m_{av} كتلة الجسيمات المتوسطة و ρ الكتلة الحجمية، $m_{av} = \rho/n$

تحصلنا عليها من خلال قسمة الكتلة الحجمية على عدد الجسيمات n، $m_{av} \approx m_{proton}/2$ وهي البلازما الهيدروجينية للبروتونات والإلكترونات.

6. III.3. دراسة نظرية لبعض مراحل التطور النجمي

III.3.1. التتابع الرئيسي

تعتمد هذه الدراسة على إعتبارين (إعتماد التركيب الكيميائي، إعتماد الكتلة النجمية)، إن بقاء النجم في التتابع الرئيسي يعتمد على نسبة الهيدروجين المتاحة في اللب، فنلاحظ أنه عندما يتم تحويل الهيدروجين إلى هيليوم فإن متوسط الوزن الجزيئي μ يزداد، حيث يمكن كتابة ضغط الغاز المثالي بالشكل[18-17]

$$P = \frac{NkT}{\mu m_H} \qquad (57)$$

إن الزيادة لـμ تؤدي إلى تناقصP بشرط ثبوت ρ وT والنتيجة هي فقدان التوازن الهيدروستاتيكي، تتغلب الجاذبية على قوة الضغط ويبدأ اللب في الإنكماش ونتيجة هذا الأخير هي أن كثافة اللب ودرجة الحرارة ترتفعان، حيث تبدأ التفاعلات النووية الأكثر فعالية، سنقدر الآن الوقت الذي يستغرقه الهيدروجين في اللب، وفي هذه المرحلة يترك النجم التتابع الرئيسي ويبدأ في الإنتقال لمرحلة العملاق.

قبل مواصلة النقاش حول إنتاج الطاقة في اللب، نحتاج لإلقاء نظرة سريعة على كيفية نقل الطاقة من اللب نحو السطح، من الواضح أن الفوتونات المنتجة في التفاعلات النووية في اللب لا تتدفق مباشرة من اللب إلى السطح، إن اللمعان الكلي الذي نلاحظه لا يأتي مباشرة من التفاعلات النووية في اللب، حيث تنتشر الفوتونات الناتجة عن التفاعلات النووية أما الإلكترونات تنقل الطاقة إلى الجسيمات في اللب، وبالتالي ترتفع درجة الحرارة في النواة.

للتعرف على مدى بقاء النجم على التتابع الرئيسي نحتاج إلى حل مجموعة معادلات التوازن الهيدروستاتيكي ومعادلات إنتاج ونقل الطاقة، هذا يعطي نموذجًا للنجم من حيث الكثافة ودرجة الحرارة.

نبحث الآن عن تعبير للمعان النجم، حيث أنه الطاقة المشعة لكل وحدة زمنية، إذا إفترضنا أن مقدار الطاقة المتاحة للنجم بلإشعاع بعيدة خلال فترة حياته، يمكننا تقسيم هذه الطاقة على اللمعان (نفرض أن المعان ثابت خلال مرحلة التتابع الرئيسي).

تُظهر الدورات اللاحقة في الديناميك الحرارية لغاز في نواة نجمية أن كثافة الطاقة لكل وحدة حجم من غاز الفوتون تكتب $\rho E = \alpha T^4$ حيث α هو الإشعاع المستمر.

نفترض أن الآلية الوحيدة لنقل الطاقة هي عن طريق الإشعاع، يتناثر الفوتون الذي يبدأ في اللب على الجسيمات و يقوم بتغيير الإتجاهات بإستمرار حتى يصل إلى سطح النجم، ونفترض أيضا أن الفوتون ينتقل في مسار حر متوسط. حيث يتبعثر N مرة .

بعد العديد من التشتتات، فإن القيمة المتوسطة ستقترب من الصفر لدينا

$$\Delta r = \ell\sqrt{N} \tag{58}$$

نكتب هذا من حيث عدد التشتت N للوصول إلى السطح، علما أن $N = R^2/\ell^2$ حيث R هو نصف قطر النجم، يكون وقت وصول الفوتون إلى السطح (نلاحظ أن المجموع المسافة التي يقطعها الفوتون هي $N\ell$)

$$\Delta t = \frac{N\ell}{c} = \frac{\ell}{c}\frac{R^2}{\ell^2} = \frac{R^2}{\ell c} \tag{59}$$

إذا إفترضنا أنه داخل دائرة نصف قطرها r للنجم، فإن درجة الحرارة T و كثافة الطاقة ρE من غاز الفوتون ثابتة، فإن إجمالي محتوى طاقة يكون:

$$E = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho E \propto r^3 T^4 \tag{60}$$

يعطي النجم محتوى الطاقة لغاز الفوتون بواسطة $E \propto R^3T^4$. إذا إفترضنا أنه يتم إطلاق هذه الطاقة خلال الوقت Δt الذي تستغرقه الفوتونات في القلب للوصول إلى السطح، يمكن كتابة لمعان النجم بالشكل:

$$L \propto \frac{E}{\Delta t} \propto \frac{R^3T^4}{R^2/\ell} \propto RT^4\ell \tag{61}$$

متوسط المسار الحر ℓ يعتمد على كثافة الإلكترونات المختلفة في اللب. إذا إفترضنا أن الفوتونات مبعثرة فقط على الإلكترونات، يمكن إثبات أن متوسط المسار الحر هو $\ell \propto 1/\rho$ كلما زادت الكثافة إنخفض متوسط المسار الحر.

لدينا $\rho \propto M/R^3$. ندخل هذا في المعادلة السابقة فنجد:

$$L \propto RT^4\ell \propto \frac{RT^4}{\rho} \propto \frac{R^4T^4}{M} \tag{62}$$

باستخدام معادلة التوازن الهيدروستاتيكي

$$\frac{dP}{dr} = -\rho g \tag{63}$$

إذا إفترضنا أن الضغط يمكن كتابته ـ $P \propto r^n$ حيث n غير معروف إذا

$$\frac{dP}{dr} = nr^{n-1} = \frac{nr^n}{r} = \frac{nP}{r} \propto \frac{P}{r} \tag{64}$$

من معادلة التوازن الهيدروستاتيكي

$$\frac{P}{R} \propto \rho g \propto \frac{M}{R^3}\frac{M}{R^2} \propto \frac{M^2}{R^5} \tag{65}$$

أو $P \propto M^2/R^4$. بالنسبة الغاز المثالي $P \propto T$. ندخل هذا في المعادلة السابقة يعطي

$$T \propto \frac{M}{R} \tag{66}$$

بإدخال هذا في المعادلة (62) نحصل على:

$$L \propto \frac{R^4}{M}\left(\frac{M}{R}\right)^4 \propto M^3 \tag{67}$$

يتناسب اللمعان مع كتلة النجم ومنه نجد

$$L \propto M^\beta \tag{68}$$

حيث:β عادة ما بين 3 و 4 حسب التفاصيل الدقيقة للنجم.

من خلال الملاحظات اتضح أن معظم النجوم ذات الكتلة المنخفضة أو المتوسطة بها $\beta = 4$. لذلك سنستخدم $L \propto M^4$ وبالتالي وجود لمعان للنجم، يمكننا بسهولة العثور على زمن الحياة.

يفترض أن جزءًا من كتلة النجم يتحول إلى طاقة.

$$E = pMc^2 \tag{69}$$

نفترض أن السطوع ثابت خلال حياة النجم

$$L = \frac{pMc^2}{t_{life}} \propto M^4 \tag{70}$$

و

$$t_{life} \propto \frac{1}{M^3} \tag{71}$$

النجم الذي تبلغ كتلته ضعف كتلة الشمس يعيش فقط1/8 أو ما يقرب من 10^9 سنوات. أما النجوم الأكثر ضخامة تعيش لبضعة ملايين سنوات. حيث نرى من خلال المعادلة (67) أنه يمكن تفسير ذلك بحقيقة أن النجوم الضخمة هي أكثر سطوعًا من النجوم الأقل كتلة، وبالتالي تحرق وقودها النووي بشكل أسرع، أما النجم الذي تبلغ كتلته ضعف كتلة الشمس يحرق 16 مرة (المعادلة 67) من وقودها في كل مرة مثل الشمس.

نظرًا لأن التعبير الأخير هو مجرد تناسب، فنحن بحاجة إلى إيجاد التناسب الثابت، أي أننا بحاجة إلى معرفة وقت الحياة وكتلة نجمة واحدة لاستخدامها في النجوم الأخرى. نستخدم الأرقام للشمس. يمكن أن يظهر أن النجم سيترك التتابع الرئيسي عند حوالي 10٪ من الهيدروجين الخاص به الذي تم تحويله إلى الهيليوم.

نحاول الآن إيجاد طريقة لتقدير كتلة النجم. نفترض أن كثافة ودرجة حرارة النجم ثابتة. تصح هذه الفرضية في قلب النجم فقط. ومن خلال هذا نجد أن درجة الحرارة $T \propto M / R$. بالنسبة لنجوم التتابع الرئيسي تكون ثابتة في اللب، وبإستخدام هذا الإفتراض يمكننا الكتابة

$$T_c \propto \frac{M}{R} = constant \tag{72}$$

يمكننا كتابة هذا بالشكل $R \propto M$. نعلم أن لمعان النجم يمكن كتابته من حيث درجة الحرارة الفعالة بالشكل

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{eff}^4 \tag{73}$$

حيث $4\pi R^2$ هي مساحة السطح و $F = \sigma T_{eff}^4$ هو التدفق الإشعاعي عبر السطح. بإستخدام $R \propto M$ و $L \propto M^4$ يعطي هذا

$$L \propto M^4 \propto R^2 T_{eff}^4 \propto T_{ef}^4 M^2 \tag{74}$$

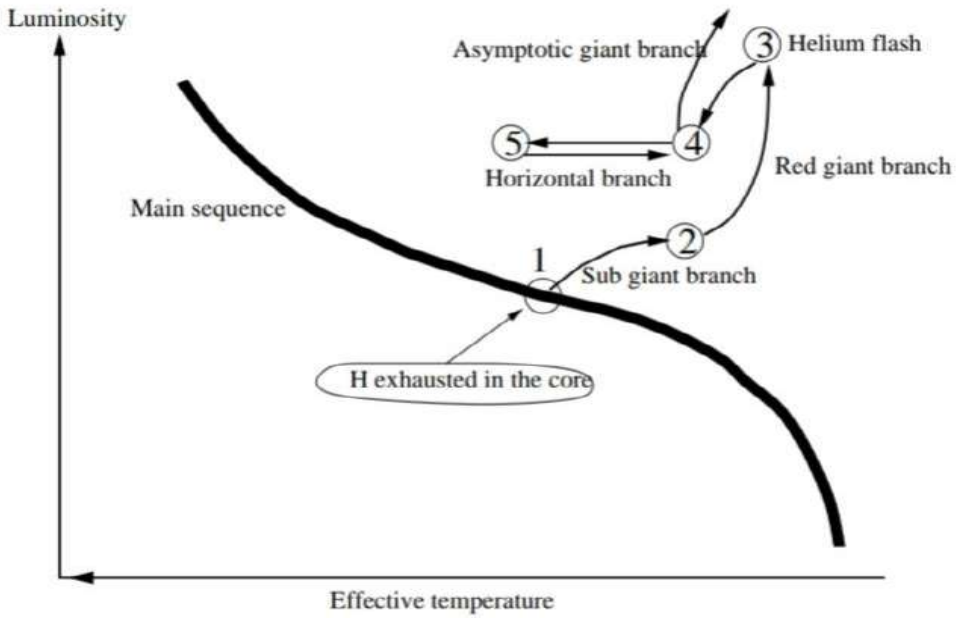
إذا $M^4 \propto T_{eff}^4 M^2$ هذا يعطي

$$M \propto T_{eff}^2 \tag{75}$$

وهذه العلاقة توضح أن هناك تناسب بين كتلة النجم ومربع درجة حرارته الفعالة، ومن خلالها نستطيع معرفة درجة حرارة النجوم إنطلاقًا من كتلتها.

III.2.3. مرحلة النجوم العملاقة

سنتبع الآن نجمًا أثناء إنتقاله من التسلسل الرئيسي إلى مرحلة العملاق، سيكون تسلسل الأحداث إعتمادا على كتلة النجم، في(الشكل رقم13) يمكننا إتباع المسار التطوري للنجم في مخطط H-R، عندما يتم إستنفاد الهيدروجين في القلب فإن قوى الضغط بالتأكيد لم تعد قوية بما يكفي لتحمل قوى الجاذبية، يضيع التوازن الهيدروستاتيكي ويبدأ اللب في الإنكماش خلال تقلص النواة حيث تكون درجة الحرارة عالية بما يكفي لبدأ حرق الهيدروجين على عكس الغلاف (حول اللب) تكون أقل درجة أي ليست كافية حرق الهيليوم، يبدأ نصف قطر النجم في الزيادة بشكل ملحوظ، فيترك التسلسل الرئيسي ويصبح عملاق، وقد زاد اللمعان بشكل طفيف لأن الطاقة المنتجة في الغلاف أكبر من الطاقة المنتجة في النواة، لكن بسبب زيادة نصف قطر النجم، تنخفض درجة حرارة السطح.[18]



الشكل رقم 13 مخطط HR لتطور النجم من التسلسل الرئيسي إلى مرحلة العملاق [18].

يتزايد نصف قطر النجم كثيرا لدرجة أن درجة حرارة السطح تقترب من 2500 كلفن كحد أدنى، فإن الآلية المهيمنة لنقل الطاقة في النجم تتغير من **كونها إشعاع إلى حمل حراري**.

تعتمد الخطوة التالية في التطور على كتلة النجم، بالنسبة للنجوم الأكبر من 2 كتلة شمسية، تكون درجة الحرارة عالية في اللب بما يكفي لبدء عملية ألفا ثلاثية (حرق الهيليوم للكربون) بالإضافة إلى سلاسل أخرى تحرق الهيليوم إلى الأكسجين. في النجوم منخفضة الكتلة قبل بداية إحتراق الهليوم يتقلص اللب وتصبح الكثافة عالية من تأثيرها بميكانيكا الكم(حالة انحلال الإلكترونات)، بحيث لا توجد مساحة إضافية في النواة لمزيد من الإلكترونات، تضع ميكانيك الكم حداً أعلى للعدد من الإلكترونات ضمن حجم معين مع زخم معين، هذا يسمي تنكس الإلكترون، يصبح جوهر الإلكترون متدهورًا، إن النواة المتحللة للإلكترون سيكون لها نوع جديد من الضغط (ضغط التنكس)، وهو القوة الخارجية التي

تحارب قوة الجاذبية الداخلية في معادلة التوازن الهيدروستاتيكي، كما أنه لا يعتمد على درجة الحرارة، عندما تزداد درجة حرارة اللب بشكل كبير، فإنه لا يتوسع ويكون متدهور تقريبًا، وعندما تكون درجة حرارة اللب مرتفعة بما يكفي لبدء حرق الهيليوم، يتم إطلاق كمية هائلة من الطاقة في وقت قصير جدًا مما يتسبب في بداية إنفجارية لمرحلة إحتراق الهليوم وهذا ما يسمى بوميض الهليوم(شرارة الهيليوم)، بعد بضع ثوان يتم حرق جزء كبير من الهيليوم في اللب، تكسر الكميات الهائلة من الطاقة المنبعثة إنحلال الإلكترون ويبدأ الغاز في التصرف بشكل طبيعي، أي أن الضغط يعتمد مرة أخرى على درجة الحرارة التي تسمح للنواة بالتوسع.

وبالتالي فإن النتيجة النهائية لبدء إحتراق الهليوم هي نفسها لكل من النجوم ذات الكتلة المنخفضة والعالية، تمدد اللب يجعل قذائف حرق الهيدروجين تُدفع إلى الخارج إلى أنصاف أقطار أكبر حيث يبرد الغاز وبالتالي يتوقف إحتراق الهيدروجين في أجزاء كبيرة من الغلاف، إن الطاقة المنتجة من حرق الهليوم ليست كافية لإستبدال إنتاج الطاقة في الغلاف **وسيقل لمعان النجم الكلي**.

لوحظ أن بعض النجوم العملاقة تنبض. تم رصد نوعًا واحدًا من النجوم النابضة منها نجوم القيفاوي والتي عثر عليها في نطاقات عمودية ضيقة، تسمى شرائط عدم الاستقرار في مخطط H-R Cepehids وعلى سبيل المثال في شريط عمودي بعرض حوالي K600 حول $T_{eff}\sim 6500K$ تبدأ النبضات أثناء تقلص النواة والتمددات التي تبدأ عندما يغادر النجم التتابع الرئيسي. تدوم لفترة محدودة فقط عندما يمر النجم عبر شريط عدم الإستقرار في مخطط H-R نذّكر انه في Cepheids هناك علاقة بين فترة النبض ولمعان النجم مما يسمح لنا بتحديد المسافة إلى النجم، يمكن أن تكون علاقة اللمعان للنجوم القيفاوية تكتب.

$$< L > \propto P^{1.15} \qquad (76)$$

حيث <L> متوسط اللمعان وP هي فترة النبض، سوف نتطرق إلى هذه العلاقة باستخدام المعادلات الأساسية السابقة.

تعود النبضات إلى موجات الكثافة الهائلة والموجات الصوتية والسفر عبر باطن النجم، يمكننا إيجاد تعبير تقريبي لـفترة نبض النجم من خلال النظر في الوقت الذي تستغرقه الموجة الصوتية للانتقال من أحد طرفي النجم إلى الطرف الآخر ببساطة، سننظر في نجم بنصف قطر R وكثافة ثابتة ρ، فإن فترة النبضP هو الوقت الذي تستغرقه الموجة الصوتية لتقطع مسافة 2R، في الديناميكا الحرارية نعلم أن سرعة الصوت (ما يسمى بسرعة الصوت الحافظة الحرارة) على مسافة معينة r من مركز النجم تعطى بواسطة:

$$v_s(r) = \sqrt{\frac{\gamma P(r)}{\rho}} \qquad (77)$$

حيث γ ثابت إعتمادًا على السعات الحرارية المحددة للغاز، نفترض أن الكثافة ثابتة وبالتالي تحتاج فقط إلى إيجاد الضغط كدالة لـ r، يمكن أن تعطينا معادلة التوازن الهيدروستاتيكي الضغط.

$$\frac{dP}{dr} = -g\rho = -\frac{GM(r)}{r^2}\rho = \frac{4}{3}G\pi r\rho^2 \qquad (78)$$

ندمج هذا التعبير من السطح حيث P = 0 و r = R فنحصل على

$$P(r) = \frac{2}{3}\pi G\rho^2(R^2 - r^2) \tag{79}$$

ومن خلال ما سبق نجد المقادير اللازمة لإيجاد فترة النبضCepheid في الموضع r، حيث تنتقل الموجة الصوتية بسرعة$v_s(r)$ تستغرق وقتًا للسفر dt لمسافة dr لذلك نكتب التعبير التالي:

$$dt = \frac{dr}{v_s(r)} \tag{80}$$

لإيجاد فترة النبض، علينا إيجاد الوقت الإجمالي P الذي تستغرقه الموجة الصوتية لقطع مسافة 2R ومنه نجد:

$$\begin{aligned} P &\approx 2\int_0^R \frac{dr}{v_s(r)} \approx 2\int_0^R \frac{dr}{\sqrt{\frac{2}{3}\gamma\pi G\rho(R^2 - r^2)}} \\ &= \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{3}\pi\gamma G\rho}}\left[-\tan^{-1}\frac{r\sqrt{R^2 - r^2}}{r^2 - R^2}\right]_0^R \end{aligned} \tag{81}$$

بأخذ النهايات في هذا المقدار نجد:

$$P \approx \sqrt{\frac{3\pi}{2\gamma G\rho}} \propto \frac{1}{\sqrt{\rho}} \propto \left(\frac{R^{2/3}}{M^{1/2}}\right) \tag{82}$$

من المعادلة $M \propto T_{eff}^2$ نرى أن $M^{1/2} \propto T_{eff}$ ولكن بما أنCepheids تقع على طول شريط عدم الإستقرار في مخطط H-R، تكون درجات الحرارة الفعالة تقريبا ثابتة، إذا لدينا:

$$P \propto R^{3/2} \tag{83}$$

إن لمعان النجم هو $L = 4\pi R^2\sigma T_{eff}^4$ وباعتبار $T_{eff} \approx c^{te}$ لذلك $L \propto R^2$ أو $R \propto L^{1/2}$ بإدخال التعبير السابق لفترة النبض نجد:

$$\begin{aligned} P &\propto L^{3/4} \\ L &\propto P^{\frac{4}{3}} \propto P^{1.3} \end{aligned} \tag{84}$$

بالمقارنة مع علاقة اللمعان بالفترة الملحوظة، فان هذا التقريب ممتاز مع الأخذ في الإعتبار التبسيط الهائل الذي قمنا به.

III.3.3. الأقزام البيضاء

إن تبعثر سديم كوكبي في الفضاء يخلف وراءه جرما كثيفا لا يتجاوز حجمه حجم الأرض يدعى بالقزم الأبيض، وقد لوحظ أن أسطح الأقزام البيضاء في تكوينها مختلفة تماما عن تكوينها الداخلي، أدت الجاذبية السطحية القوية إلى فصل عناصره، حيث تم العثور على هيدروجين متبقي كطبقة سطحية بينما استقرت جميع العناصر الأثقل في طبقات أعمق، معظم الأقزام البيضاء بغض النظر عن تكوينها الداخلي، تظهر كأنها أطيافًا يهيمن عليها خطوط H تمامًا وتصنف على أنها أقزام بيضاء DA، تظهر أقلية من الأقزام البيضاء خطوط الهيليوم فقط ولديها تصنيف طيفي DB، لقد فقد هذا النوع كل الهيدروجين من طبقاته الخارجية أثناء عملية تكوينه.

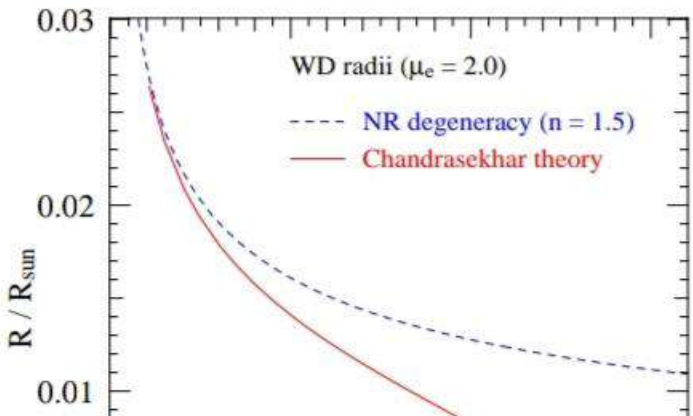
إن حالة المادة المتحللة مستقلة عن درجة الحرارة يعني أن التركيب الميكانيكي للقزم الأبيض مستقل عن خواصه الحرارية، عندما يبرد القزم الأبيض وبالتالي يظل نصف قطره ثابتًا، مثل هذه النجوم تتبع علاقة نصف قطر الكتلة بالشكل $R \propto M^{-1/3}$ ، كما هو موضح في(الشكل14) كخط متقطع، يجب أن تؤخذ النظرية الصحيحة للأقزام البيضاء في إعتبار أن الإلكترونات الأكثر نشاطًا يمكن أن تتحرك بسرعات نسبية، حتى في الأقزام البيضاء ذات الكتلة المنخفضة نسبيًا. هذا يعني أن معادلة الحالة بشكل عام ليست ذات شكل متعدد الاتجاهات، لكن العلاقة $P(\rho)$ لها أس متغير تدريجيًا بين $\frac{4}{3}$ و $\frac{5}{3}$. [21-19]

وضع العالمChandrasekhar علاقة توضح الفرق المتزايد بسبب زيادة الكتلة(زيادة الكثافة) وبيَّن مدى علاقة التغير الكتلي بدلالة نصف القطر كما هو موضح في الخط السميك في (الشكل14). تعطى معادلة Chandrasekhar بالشكل:

$$M_{ch} = 1.459\left(\frac{2}{\mu_e}\right)^2 M_\odot \qquad (85)$$

حيث μ_e الوزن الجزيئي، $M_\odot$ كتلة الشمس. مع اقتراب الكتلة من كتلة Chandrasekhar، يذهب نصف القطر إلى الصفر، تنهار الأقزام البيضاء الأكثر من M_{Ch} لأن ضغط الانحلال النسبي غير كافٍ لموازنة الجاذبية.

تفترض نظرية القزم الأبيض لشاندراسيخار أن الإلكترونات لا تتفاعل مع بعض، بل يجب إجراء بعض التصحيحات على الهيكل، ولا سيما التفاعلات الكهروستاتيكية بين الإلكترونات والأيونات وهذه تعطي تصحيحًا سلبيًا لضغط الإلكترون، مما يؤدي إلى نصف قطر أصغر إلى حد ما عند كتلة معينة.



الشكل رقم 14 مقارنة العلاقة بين نصف القطر والكتلة لنجم متحلل[19]

إن الخصائص الحرارية للأقزام البيضاء متعددة حيث سندرس البعض منها، ففي القزم الأبيض توفر الالكترونات التي في حالة إنحلال موصلية حرارية عالية، يؤدي هذا إلى تدرج درجة حرارة صغير جدًا، وبالخاصة لأن L منخفضة جدًا، وبالتالي يمكن إعتبار أن الدَّاخل النجمي في حالة (إنحلال الإلكترونات) ولديه درجة حرارة ثابتة، أما الطبقات الأبعد من المركز (ذات كثافة أقل) غير منحلة، **هنا يتم توفير نقل الطاقة بواسطة الإشعاع**، ونظرًا للعتامة العالية في هذه الطبقات يكون النقل بالإشعاع أقل فعالية بكثير من التوصيل في الدَّاخل النجمي، وبالتالي تعمل الطبقات الخارجية غير المتحللة على عزل المناطق الداخلية عن الفضاء الخارجي، وهنا يوجد تدرج كبير في درجة الحرارة.

يمكننا الحصول على وصف بسيط بالبدء من غلاف مشع، بإفتراض وجود غاز مثالي وقانون عتامة Kramers $k = k_0\rho T^{-7/2}$ ، وبافتراض P و T يقتربان من الصفر عند السطح نجد:

$$T^{17/2} = BP^2 \text{ مع } \quad B = \frac{17}{4}\frac{3}{16\pi acG}\frac{k_0\mu}{R}\frac{L}{M} \tag{86}$$

نستبدل $P = (R/\mu)\rho T$ حيث لا يكون هناك إنحلال في الغلاف.

$$\rho = B^{-1/2}\frac{\mu}{R}T^{13/4} \tag{87}$$

بفرض أن نقطة الانتقال مع وجود توالد داخلي(انحلال الالكترونات) قد تقع في حالة ضغط الالكترونات المنحلة المساوية إلى ضغط الغاز المثالي لالكترونات المحيطة$P_e = (R/\mu_e)\rho$، بينما في كل الحالات فالأيونات غير متحللة. في هذه الحالة يرمز له بالرمز:

$$\frac{R}{\mu_e}\rho b T_b = K_{NR}\left(\frac{\rho b}{\mu_e}\right)^{5/3} \tag{88}$$

بتعويض قيمة ρ_b

$$T_b^{7/2} = \frac{R^5\mu_e^2}{K_{NR}^3\mu^2}B = \frac{51R^4}{64\pi acGK_{NR}^3}k_0\frac{\mu_e^2}{\mu}\frac{L}{M} \tag{89}$$

نظرًا لأن الجزء الداخلي متدهور ومتساوي الحرارة تقريبًا، فإن T_b هي درجة حرارة الجسم الداخلية بالكامل تقريبًا أو لب القزم الأبيض، وبالتالي يمكننا كتابة $T_c^{7/2} = \alpha L/M$. حيث $\alpha \approx 1.38 \times 10^{29} Z/\mu$ بوحدات cgs

في قزم أبيض نموذجي أغلب طبقاته الغنية بالهيليوم لا يوجد فيها توالد تكون$Z = 0.02$ و $\mu \approx$ 1.34 مع هذا الاعتبار نحصل على العلاقة التالية بين درجة الحرارة، السطوع وكتلة القزم الأبيض.

نستبدل القيم المناسبة لـ k_0 والتركيب (μ و μ_e)، وبافتراض الامتصاص الخالي من القيود و$\mu_e = 2$ في الغلاف، وهو أمر مقبول لأن الظرف مستنفد على شكل حرف H بإستثناء طبقات السطح.

$$T_c \approx 7.7 \times 10^7 K \left(\frac{L/L_\odot}{M/M_\odot}\right)^{2/7} \tag{90}$$

في القزم الأبيض النموذجي $L < 10^{-2} L_\odot$ و$M \approx 0.6 M_\odot$ تعطي باطن بارد بدرجة حرارة$T < 2 \times 10^7 K$

يمكننا إستخدام خصائص الأقزام البيضاء للحصول على نموذج بسيط لتبرير برودتها، يتغير لمعان القزم الأبيض بمرور الوقت، نظرًا لعدم وجود مصادر للطاقة النووية، هذا ما يعلل أن اللمعان المشع يأتي من تناقص الطاقة الداخلية المصدر الوحيد للطاقة المتاحة هي الطاقة الحرارية المخزنة في الأيونات غير المتحللة، التي تشكل الجزء الأكبر من الكتلة.

نظرًا لأن السطح الداخلي متساوي الحرارة T_c، فإن إجمالي الطاقة الحرارية هو

$$E_{in} = c_v M T_c \tag{91}$$

حيث c_v هي الحرارة النوعية لكل وحدة كتلة، بالنسبة للأيونات التي تتصرف كغاز مثالي، لدينا $cv = \frac{3}{2} R/\mu_{ion}$، وهكذا يتم إعطاء اللمعان كالتالي:

$$L = -\frac{dE_{in}}{dt} = -c_v M \frac{dT_c}{dt} \tag{92}$$

حيث L مرتبطة بـ M وT_c.

علما أن لدينا $T_c^{7/2} = \alpha L/M$ نحصل على:

$$T_c^{7/2} = -\alpha c_v \frac{dT_c}{dt} \tag{93}$$

نستطيع بسهولة أخد التكامل بين الزمن الابتدائيt_0 (لحظة تشكل القزم) وزمن آخر t

$$\tau \equiv t - t_0 = \frac{2}{5} \alpha c_v \left(T_c^{-5/2} - T_{c,0}^{-5/2}\right) \tag{94}$$

بمجرد أن يبرد القزم الأبيض بشكل ملحوظ تكون درجة حرارة اللب أصغر بكثير من قيمة درجة الحرارة الابتدائية بحيث $T_c^{5/2}$ يمكن إهمالها، وبالتالي نحصل على **علاقة بين وقت التبريد لـقزم أبيض ودرجة حرارة اللب**، وبالتالي العلاقة بين اللمعان

$$\tau \approx \frac{2}{5} a c_v T_c^{-5/2} = \frac{2}{5} a c_v \alpha^{2/7} \left(\frac{L}{M}\right)^{-5/7} \qquad (95)$$

نعمل نفس الافتراضات في حساب α كما في المعادلة (70)، وإستبدال $c_v = \frac{3}{2} R/\mu_{ion}$، نستطيع أن نكتب هذه العلاقة:

$$\tau \approx \frac{1.05 \times 10^8 yr}{\mu_{ion}} \left(\frac{L/L_0}{M/M_0}\right)^{-5/7} \qquad (96)$$

بإشتقاق قانون التبريد التقريبي، نجد أن الأقزام البيضاء ذات الكتلة الأكبر تتطور بشكل أبطأ، لأن الطاقة الحرارية للأيونات مخزنة في اللب، زيادة متوسط كتلة الأيونات في قزم أبيض من نفس الكتلة تقلل من وقت التبريد، لأن هناك عدد أقل من الأيونات لكل وحدة تخزين حرارية للكتلة.

III.4.3. النجم النيوتروني

كما ذكرنا سابقا بعد حدوث الانفجار الأعظم المعروف بالسوبر نوفا الذي يتكون منه النجم النيوتروني، وتفاعل البروتونات موجبة الشحنة والإلكترونات سالبة الشحنة مع بعض تتكون النيترونات وهي أجسام ذرية عديمة الشحنة، وهو ما يسمى بالنجم النيوتروني.

رأينا أنه بالنسبة للقزم الأبيض طاقة الإلكترون E_e هي من رتبة طاقة فيرمي E_F وطالما أن $E_F < m_e c^2$ يمكن للبنية المستقرة أن تحافظ على نفسها في حالة التوازن الهيدروستاتيكي بقيم نموذجية $M \sim 0.7 M_\odot$ وتفترض هذه البنية أن نصف القطر يتناقص إذا زادت الكتلة وبالتالي زيادة طاقة فيرمي. عندما $R \sim 10^4 km$ يكون التوازن موجودًا فقط عند $E_F > m_e c^2$ للكتلة الحرجة.

عند كتلة Chandrasekhar $M_{ch} \sim 1.4 M_\odot$ تكون النواة النجمية لالكترونات متحللة إلى كتلة أكبر من حد شاندرا (sekhar) يتم إنهيار الجاذبية الذي يدفع المادة إلى حالات أكثر كثافة حسب التفاعل التالي[22-24]

$$e^- + p^+ \rightarrow n + v \qquad (97)$$

في الواقع يمكن أن يحدث هذا التفاعل فقط للطاقات $\Delta E > \Delta m c^2$, مع $\Delta m \approx m_n - m_p \sim 3 m_e$ في ظل الظروف العادية، يكون النيوترون غير مستقر ويعيد إلكترونًا وبروتونًا، يؤدي هذا الانكماش (وبالتالي الزيادة المستمرة في الكثافة) إلى تحييد المادة (تصل طاقة الإلكترونات إلى $m_e c^2$ وتتجاوزها).

تم إقتراح هذا السيناريو في عام 1932 من قبل Baade و Zwicky وبالتالي إظهار الاحتمال النظري لتحييد المادة النجمية المكثفة، وبالتالي تكوين نجم، حيث المكون الأساسي هو النيوترونات. تكون الكثافة الحرجة $\rho_d \approx 4 * 10^{14} kg\, m^{-3}$ حيث تنطلق الأيونات من تلقاء نفسها

(النيوترونات)، وتزيد كثافتها بشكل كبير، يصبح اللب خليط من النيوترونات. ولتصحيح الفكرة عندما يكون $\rho \sim \rho_d$ لا يزان ضغط النيترون مهمل $P \sim P_e \gg P_n$ ويصبح سائدا من اجل $\rho \sim 100\rho_d$ من اجل $P_n \sim 0.8P$, $\rho \sim 10\rho_d$ اجل من $P_n \sim 0.5P$.

صنع أوبنهايمر وفولكو في عام 1939 أول نموذج للبنية الداخلية للنجم النيوتروني من خلال تضمين تأثيرات النسبية العامة، منذ ذلك الحين كان العديد من الباحثين يبحثون من اجل الشكل الصحيح لمعادلة الحالة لهذه المسألة الشائكة. أكتشف جوسلين بيل وهويش في عام 1967 أول نجم نابض راديوي والذي فسره جولد في عام 1968 على أنه نجم نيوتروني بمجال مغناطيسي مائل، فإن كل ممر أمامنا لقطب مغناطيسي مصحوب بانبعاث من الجسيمات التي تبعث في موجات راديوية. وهكذا أعيد اكتشاف النجوم النابضة، و تركت دراسة النجوم النيوترونية جانبًا في مواجهة الصعوبات النظرية. بالنسبة للنماذج متعددة الاتجاهات، تصبح النيوترونات في حال انحلال فتنتج ضغط P_n يعاكس قوة الجاذبية، يمكن تطبيق المنطق المتبع في الأقزام البيضاء كما رأينا سابقا.

سنحاول بناء نموذج نجمي نيوتروني في حالة توازن هيدروستاتيكي، وللتبسيط يفترض أن المادة تتكون فقط من نيوترونات، وتشكل غازًا مثاليًا متحللًا تمامًا.

$$m_e \to m_n \tag{98}$$

$$\mu_e \to 1$$

لدينا أيضًا

$$x = \frac{p_F}{m_n c} \tag{99}$$

وهي قيمة تحدد أهمية الجوانب في البداية تصبح الالكترونات نسبية($x \ll 1$) إلى أن تصل إلى طبقات أعلى وتصبح غير النسبية ($x \gg 1$) حيث p_F هو نبض فيرمي للنيوترونات، نحصل مرة أخرى على الحدين التي تأخذ معادلة الحالة شكلاً متعدد الاتجاهات:

$$P = K\rho^{\Gamma} \tag{100}$$

حيث k مؤشر متعدد الاتجاهات، Γ تعتمد على قيمة x، $\rho = m_n n_n$ هي كثافة النيوترونات هاتان الحالتان المحددتان هما كالتالي

-النيوترونات غير النسبية ($x \ll 1$): والتي توفر

$$K_1 = \frac{1}{20}\left(\frac{3}{\pi}\right)^{2/3} \frac{h^2}{{m_n}^{8/3}} \quad \text{و} \quad \Gamma = \frac{5}{3} \tag{101}$$

-النيوترونات فائقة النسبية $x \gg 1$:

$$\Gamma = \frac{4}{3} \quad و \quad K_2 = \frac{1}{8}\left(\frac{3}{\pi}\right)^{1/3} \frac{hc}{m_n^{4/3}} \tag{102}$$

بهذه القيم وباستخدام المعادلةChandrasekhar

$$M = 4\pi R^{\frac{3-n}{1-n}} \left[\frac{(n+1)K}{4\pi G}\right]^{\frac{n}{n-1}} x_n^{\frac{3-n}{n-1}} x_n^2 \left|\frac{d\varphi}{dx}\right|_{x_n} \tag{103}$$

نحصل على علاقة نصف قطر الكتلة في الحالة غير النسبية بالشكل

$$R = 14.6\left(\frac{\rho_c}{10^{18} kg\ m^{-3}}\right)^{-1/6} Km \tag{104}$$

$$M = \left(\frac{R}{15.1\ km}\right)^{-3} M_\odot$$

نتحصل على نصف قطر توازن أصغر بكثير من نصف قطر الأقزام البيضاء وبنفس الاعتماد على كتلة نصف القطر الذي يميز المادة المتحللة. على سبيل المثال من ناحية أخرى يمكننا تفسير الكتلة أعلاه على أنها الحد الأدنى من الكتلة M_{min} لنجم نيوتروني، وبالتالي تعتمد هذه الكتلة على الكثافة المركزية (التي تفرضها حالة إنحلال الإكترونات غير النسبية) وعلى معادلة الحالة.

لدينا $M_{min} > M_{ch}$

في حالة النسبية الفائقة نحصل على

$$R = 52.1\left(\frac{\rho_c}{10^{18} kg\ m^{-3}}\right)^{-1/3} km \tag{105}$$

$$M = 5.86 M_\odot$$

إذن هناك كتلة حدية أعظمية$M_{max} \approx 5.86 M_\odot$ مستقلة عن نصف القطر الذي لم يعد من الممكن الحصول على حالة توازن هيدروستاتيكي، وفقًا لهذا النموذج البسيط، فإن القلب يتكون من نيوترونات متحللة بكتلة أكبر من الكتلة الحرجة والتي تنهار على نفسها، في هذه الكثافات لا نعرف أي مصدر ضغط آخر قادر على إيقاف الإنهيار وعندها يصبح القلب ثقبًا أسود.

تتمثل أهمية معادلة الحالة في التحديد الدقيق لـ M_{max} والذي من خلاله نستطيع معرفة ما إذا كان هذا النجم الغير مرئي هو ثقب أسود أو نجم نيوتروني، ومع ذلك فإن هذه الكتلة القصوى تعتمد على معادلة الحالة، في الواقع بالنسبة لمعادلة متعددة الاتجاهات للحالة $P \propto \rho^\Gamma$. T، كلما كانت المادة قابلة للضغط يسمح هذا بزيادة M_{max}.

لذلك بدلاً من كتابة العلاقة من النوع $\delta = 5/3$ مع $P \propto \rho^{\delta}$ في الحالة غير النسبية $\delta = 1$ ، وفي الحالة النسبية الفائقة، نلاحظ ان هذا التعبير الأخير يوفر معادلة حالة أكثر ليونة من السابقة وبالتالي يوفر أقصى كتلة عالية ومع ذلك لا يقال أن النيوترونات تصل أبدا إلى الظروف التي يكون فيها $P_n \sim u/3(\delta \sim 1)$ يمكن أن نسلم بوجود كتلة حدية من اعتبار استقرار التوازن الهيدروستاتيكي

$$P \propto \rho \frac{M}{R} \propto \frac{M^2}{R^4} \propto M^{2/3} \rho^{-4/3} \tag{107}$$

بدمج هذا مع معادلة الحالة $P \propto \rho^{\delta}$ نحصل على:

$$M \propto \rho^{\frac{3}{2}(\delta - \frac{4}{3})} \tag{108}$$

في الحد غير النسبي $dM/d\rho > 0$ و $M \propto \rho^{\frac{1}{2}}$ ، $\delta = \frac{5}{3}$ وفي حد النسبية الفائقة $\delta = 1$ ما يؤدي إلى $dM/d\rho < 0$ و $M \propto \rho^{-\frac{1}{2}}$ لذلك هناك بالفعل كتلة قصوى $(dM/d\rho = 0)$.

تستخدم الحسابات الحديثة إصدارات معقدة من معادلة الحالة والتوازن الهيدروستاتيكي في نظام النسبية العامة التي تقدم معادلات الحالة الأكثر حدة وتنتج عنها كتلة قصوى

$$M_{max} \approx 1.5 - 3M_{\odot} \tag{109}$$

III.5.3. الثقوب السوداء

لقد رأينا أن نقاط النهاية للتطور النجمي تزداد غرابة مع زيادة كتلة النجم، سندرس في هذا الجزء من هذا الفصل أغرب نقطة نهاية على الإطلاق، بانهيار أضخم النجوم، حتى تتركز الكتلة عند نقطة التفرد(singularite) محاطة بزمكان ذو اتجاه واحد، يسمى غشاء أفق الحدث الذي يمنع الضوء أو المادة من الهروب، هذه النتيجة الأكثر تطرفا لفيزياء الجاذبية تسمى الثقب الأسود، حيث تظهر كنتيجة طبيعية للنسبية العامة، سنتطرق إلى بعض المفاهيم الأساسية لوصف سلوك الثقب الأسود، حيث تتم دراسة الثقب الأسود من خلال دراسة الأشعة السينية لأقراص التراكم التي تحيط بالثقب الأسود، يقول علماء الفلك إن كل المجرات الموجودة في الكون تحوي في مركزها على ثقوب سوداء عملاقة.

أما هندسة قرص التراكم التي تحيط بالثقب الأسود، تعتمد على أنها أقراص رفيعة ذات بعدين غير ذاتية الجاذبية ومتناظرة محورياً، وذات لزوجة (قطرية). بنية قرص التراكم هذا تتأتى من خلال آلية اللزوجة التي تتم عبر الزخم الزاوي وتحقيق آثار طاقة الجاذبية. في الهيكل العمودي لقرص التراكم، يمكن التعامل مع الهيكل الرأسي كنجم أحادي البعد مع إختلافين أساسيين وهما: *يتم توزيع مصادر الطاقة على كامل محيط القرص، بينما في النجم يقتصر على النواة فقط، أما الاختلاف الثاني هو: يزداد التسارع مع الإرتفاع لأنه يعطى من خلال جاذبية المد والجزر(الإجهاد) للمادة المتراكمة، بينما في النجوم يتناقص كعكس مربع المسافة من المركز. مع أخذ هذه الاختلافات بعين الاعتبار في معادلات البنية النجمية، وضبط هيكل بنية المعادلات التي تصف البنية العمودية للقرص.

التوازن الهيدروستاتيكي: يتم مواجهة قوة الجاذبية بالقوة الناتجة عن تدرج الضغط[23-25]

$$\frac{dp}{dz} = \rho g_z \tag{110}$$

حيث g_z هو تسارع الجاذبية(الإجهاد) معتمد على:

$$g_z \approx \frac{GM}{R^2}\frac{z}{R} \quad (111)$$

معادلة الحفظ الكتلة: في التوازن الهيدروستاتيكي أحادي الأبعاد، الشكل الأتي:

$$\frac{d\varsigma}{dz} = 2\rho \quad (112)$$

معادلة التدرج الحراري:

$$\frac{d\ln T}{dz} = \nabla\frac{d\ln P}{dz} \quad (113)$$

معادلة التدرج الإشعاعي:

$$\nabla_{rad} = \frac{\kappa_R P F_z}{4 P_r c g_z} \quad (114)$$

حيث p_r هو ضغط الإشعاع κ_R عتامة روسلاند من العبارتين السابقتين يعطى التدفق بالعبارة التالية:

$$F_z = -\frac{16}{3}\frac{\sigma T^3}{\kappa_R \rho}\frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{4\sigma}{3\kappa_R \rho}\frac{\partial T^4}{\partial z} \quad (115)$$

من خلال المعادلة السابقة نجد:

$$F_z \approx \frac{4}{3}\frac{\sigma T_c^4}{\kappa_R \rho H} = \frac{8}{3}\frac{\sigma T_c^4}{\kappa_R \Sigma} \quad (116)$$

حيث T_C درجة حرارة القرص في المستوى (المركزي) بإستخدام العمق البصري $\tau = \kappa_R \rho H = (1/2)\kappa_R \Sigma$ نجد:

معادلة الحالة:

$$P = P_r + P_g = \frac{4\sigma}{3c}T^4 + \frac{R}{\mu}\rho T \quad (117)$$

حيث R هو ثابت الغاز μمتوسط الوزن الجزيئي، والمعادلة تصف اعتماد متوسط العتامة على الكثافة ودرجة الحرارة

$$L_{disc} = \frac{1}{2}\frac{GM\dot{M}}{R_{in}} \tag{118}$$

حيث $\dot{M}$ (كتلة/زمن) معدل التراكم.

في القرص تتحرك الجسيمات المشعة على مدارات كبلر ومن ثم فإنها تحتفظ بنصف الطاقة الكامنة إذا كان الجسم المتراكم عبارة عن ثقب أسود، فستفقد هذه الطاقة المتبقية، حيث يتم إطلاق الطاقة المتبقية في الطبقة الحدودية، إن وجدت على سطح التراكم ستشع بعيداً

الخاتمة

الخاتمة العامة:

كانت فكرة التطور النجمي موجودة منذ القرن التاسع عشر وكانت تسمى بنظرية الانكماش لكالفن، كما إخترع التصوير الفوتوغرافي والتحليل الطيفي في القرن التاسع عشر وقد سمح هذا الأمر بدراسة مكونات النجوم وحركاتها من مسافات بعيدة مما ساهم في تطوير علم الفيزياء الفلكية، وفي النصف الأول من القرن العشرين بدأت نظرية البنية الداخلية للنجوم في التطور. وفي عام 1940 أصبح من الواضح أن مصدر طاقة النجوم كان بسبب التفاعلات النووية. إحتوت هذه المذكرة على ثلاثة فصول:

في الفصل الأول: تطرقنا إلى تكوين(ولادة) النجوم، أي قصة حياتها وتطورها على التتابع الرئيسي بحسب كتلتها(سديم كوكبي، قزم ابيض، نجم نيتروني و ثقب اسود).

في الفصل الثاني :حيث إستنتجنا دراسة تركيبة النجوم ومصادر الطاقة النجمية(إنكماش الجاذبية، التفاعلات النووية "سلسلة بروتون-بروتون، دورةCNO، سلسلة ألفا ثلاثية وألفا") وختمنا هذا الفصل بأشكال نقل الطاقة النجمية (الإشعاع، الحمل والتوصيل) لكلٍ من هذه الآليات تدرج درجة حرارة يحدد التدفق.

وفي الفصل الثالث: ختمنا دراستنا هذه بوصف سلوك المعادلات الأساسية (التوازن الهيدروستاتيكي، معادلة الكتلة، اللمعان والتدرج(الحراري والإشعاعي)) لمختلف أطوار التطور النجمي (التسلسل الرئيسي، عملاق احمر، قزم ابيض، نجم نيوتروني و ثقب اسود).

وفي أخير نأمل أن تكون دراستنا هذه نقطة إنطلاق لأعمال أخرى، وإن من أهم التنبؤات المستقبلية التي توصلنا إليها:

- تسخير طاقة الإندماج النووي للحصول على مصدر دائم ورخيص للطاقة النظيفة.
- محاكاة عملية لإنتاج الطاقة من الشمس والنجوم من أجل تحقيق حلم إنتاج طاقة نظيفة.
- إقامة مشروع دولي لتطوير مصدر جديد لطاقة للأغراض سليمة.
- صناعة ألواح تتكيف مع درجات الحرارة العالية تفوق1000MW.

بالرغم من أن الإندماج النووي يبشر بآفاق واسعة في توليد طاقة نظيفة إلا أن تسخيرها والتحكم فيها مازال تحديا، ومن أهم معيقات هذه الدراسة هي:

- تكلفة التكنولوجيا المدروسة.
- مشكلة درجة الحرارة العالية عند إرسال الأقمار صناعية.

قائمة المراجع

قائمة المراجع

[1] Larson,Richard B .," The physics of star formation". Reports on Progress in Physics 66.10(2003).1651

[2] Ferrer ,Efrain J ., et al (Equation of state of a dense and magnetized fermion system Physical Review) C82.6 (2010). 065802

[3] Bahill,A.Terry ,Michael R.Ciark, and Lawrence Stark.(The main sequence, a tool for studying human eye movements.) Mathematical biosciences 24.3-4(1975).191-204

[4] C.J. Hansen, S.D. Kawaler & V. Trimble, *Stellar Interiors*, (2004), Springer-Verlag, ISBN 0-387-20089-4 (Hansen)

[5] Kwok, Sun. "From red giants to planetary nebulae." The Astrophysical Journal 258 (1982). 280-288.

[6] Janka, H-Th, et al. "Theory of core-collapse supernovae." *Physics Reports* 442.1-6 (2007). 38-74.

[7] Mestel, L. "On the theory of white dwarf stars: I. the energy sources of white dwarfs." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 112.6 (1952). 583-597.

[8] Lattimer, James M., and Maddappa Prakash. "The physics of neutron stars." *science* 304.5670 (2004). 536-542.

[9] Lattimer, James M., and David N. Schramm. "Black-hole-neutron-star collisions." *The Astrophysical Journal* 192 (1974). L145-L147.

[10] Ruffini Romo and John A. Wheeler. Introducing the Black Hole. Physics today(1971).

[11] Suyu, Sherry H., et al. "Cosmology from gravitational lens time delays and Planck data." *The Astrophysical Journal Letters* 788.2 (2014). L35.

[12] Bialobrzeski, Tcheslas. "La constitution interne et le rayonnement des étoiles." *J. Phys. Radium* 9.8 (1928). 237-248.

[13] Bradt, Hale. *Astrophysics processes: the physics of astronomical phenomena*. Cambridge University Press,(2008).

[14] Bowman, Dominic M., et al. "Discovery of tidally perturbed pulsations in the eclipsing binary U Gru: a crucial system for tidal asteroseismology." *The Astrophysical Journal Letters* 883.1 (2019). L26.

[15] Chandrasekhar, Subrahmanyan, and Subrahmanyan Chandrasekhar. *An introduction to the study of stellar structure*. Vol. 2. Courier Corporation, (1957).

[16] Ball, Warrick. "Stellar structure and evolution." (2014).

[17] Wright, Edward L., et al. "The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): mission description and initial on-orbit performance." *The Astronomical Journal* 140.6 (2010). 1868.

[18] Schönberner, Detlef. "Late stages of stellar evolution. II-Mass loss and the transition of asymptotic giant branch stars into hot remnants." *The Astrophysical Journal* 272 (1983). 708-714.

[19] Kippenhahn, Rudolf, Alfred Weigert, and Achim Weiss. Stellar structure and evolution.(1990). Vol. 192.

[20] Jones, J. Peter, Bernard Marcos, and Gervais Soucy. "Department: Chemical Engineering at The University of Sherbrooke." *Chemical Engineering Education* 40.3 (2006). 146-153.

[21] Carvalho, G. A., et al. "Stellar equilibrium configurations of white dwarfs in the f (R, T) gravity." *The European Physical Journal C* 77.12 (2017). 1-8.

[22] Ferreira, J. "Les Etoiles: La Vie, La Mort et tous le Bazar." *Lecture notes of Astrophysics given for the Master classes in Physics at the University of Joseph Fourier, France* (2000).

[23] Hameury, Jean-Marie, Andrew R. King, and Jean-Pierre Lasota., "Black hole X-ray transients.", (1990).585-587.

[24] GANDER, Martin J., and Laurence HALPERN., "Méthodes de décomposition de domaines-Notions de base." (2012).

[25] Luminet, Jean-Pierre., "Black holes .A general introduction." *Black holes: Theory and observation*. (1998). 3-34.

ملخص

لقد تطرقنا في موضوعنا هذا إلى دراسة ظاهرة فلكية تسمى "التطور النجمي نقل وإنتاج الطاقة. حيث يعتبر هذا الأخير التغيير الذي يحدث للنجم مع مرور الزمن، ويُمثّل بمراحل تطور النجم، وله مصدر طاقوي من خلال الإندماج النووي، حيث يتم نقل الطاقة المنتجة في قلب النجم عن طريق الآليات (التوصيل والإشعاع والحمل الحراري)، كما يوصف الهيكل الداخلي للنجم بأربع معادلات أساسية توضح الطريقة التي يتم من خلالها دراسة(الكثافة، الضغط، الطاقة الحرارية، درجة الحرارة ونقل الطاقة) عبر مختلف مراحل تطوره.

الكلمات المفتاحية: النجوم، مصدر الطاقة، الإندماج النووي، اللمعان، التوازن الهيدروستاتيكي.

Abstract

In our topic, we discussed the study of an astronomical phenomenon known as "stellar evolution, the transfer and production of energy." Whereas the latter is considered the change that occurs to the star over time and represents the stages of the star's evolution, and it has an energy source through nuclear fusion, where the energy produced in the star's core is transferred through mechanisms (conduction, radiation and convection). The internal structure of the star is also described by four basic equations that show how (density, pressure, thermal energy, temperature, and energy transfer) are studied during the various stages of its development.

Keywords: stars, energy source, nuclear fusion, luminosity,

Résumé

Dans notre sujet, nous avons abordé l'étude d'un phénomène astronomique appelé "l'évolution stellaire, le transfert et la production d'énergie". Alors que ce dernier est considéré comme le changement qui se produit dans l'étoile au fil du temps et représente les étapes de l'évolution de l'étoile, et qu'il a une source d'énergie par la fusion nucléaire, où l'énergie produite dans le noyau de l'étoile est transférée par des mécanismes (conduction, rayonnement et convection). La structure interne de l'étoile est également décrite par quatre équations de base qui montrent comment (densité, pression, énergie thermique, température et transfert d'énergie) sont étudiées au cours des différentes étapes de son développement.

Mots clés : étoiles, source d'énergie, fusion nucléaire, luminosité, bilan