جامعـــــــــة قاصـــــــدي مربـــاح ورقـــلـــــة

كلـــــية الرياضـــيات وعـــلوم المـــــادة

قســـــــم الفيزيـــــــاء

مذكـرة تخـرج لنيـــل شـــهادة ماســـتر أكاديـــمي

مجـــــال: العـــــلوم المـــــادة

الفـــــرع: فيزيـــــــاء

تخـــــصص: فيزيـــــاء طاقويـــة وطاقـــات متجـــددة

من إعـــداد الطـــالبتين: مروة سعود و بايزيد فاطمة الزهراء

بعنـــــــــــوان:

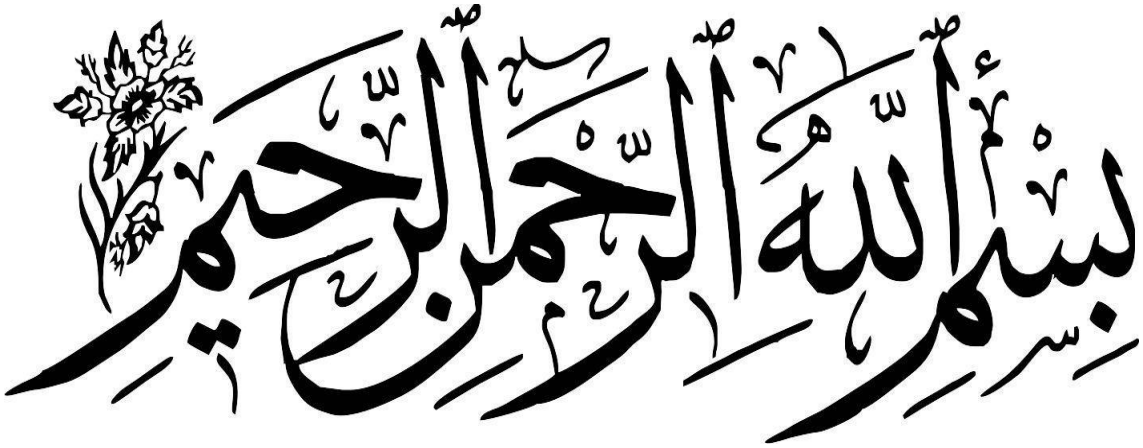
التوازن الحراري لأقراص التراكم وسلوك معادلات الطاقة

نوقشـــت يـــوم: 21/ 2023/06

أمـام اللجـــنة المنـــاقشة المكـــونة مـــن:

الزين عبد الله	أستاذ مســاعد(أ)	جامعة ورقلة	رئيسا
سوداني محمد البار	أستاذ محاضر(أ)	جامعة ورقلة	مناقشا
بالغيثار الحاج بالشراير	أستاذ محاضر(أ)	جامعة ورقلة	مشرفا
مالكي زهيدة	أســـتاذ مؤقت(ة)	جامعة ورقة	مساعد

الموسم الجامعي ٢٠٢٢/٢٠٢٣


بسم الله الرحمن الرحيم

إهداء

إذا كان أول الطريق ألم فإن آخره تحقيق حلم، وإذا كانت أول الانطلاقة دمعة فإن نهايتها بسمة، وكل بداية لابد لها من نهاية وها هي السنوات قد مرت والحلم يتحقق فاللهم لك الحمد قبل أن ترضى ولك الحمد إذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا لأنك وفقتني لإتمام على هذا العمل. أهدي هذا العمل الى:

- الى من كلله الله بالهيبة والوقار ...الى من علمني العطاء بدون انتظار ...إلى من احملُ اسمه بكل فخر...وأطال الله في عمره أبي الغالي سعود مبروك.
- الى ملاكي في هذه الحياة ...الى معنى الحب والى معنى الحنان والتفائي ...إلى بسمة إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها جراحي إلى أغلى الحبايب امي حبيبة عائشة سعود.
- الى من ترعرعت بينهم فتعلمت معنى الأخوة وتذوقت حلاوة المحبة والصدق والوفاء أخواتي : شيماء، مزدلفة، زينب واسيل إخوتي: مهدي وزيد.
- كما لا يفوتني ان اخص إهدائي بذكر جدي شفاه الله واطال الله في عمريه وللأنسى كل :

- افراد عائلتي الكبير كلن باسمه
- الى من نشرو بيننا المحبة وسعادة ابنائي اختي سراج الاسلام وسرين
- الى رفيق الدرب وصديق الأيام جميعا بحلوها ومرها ....تعتبر له شكري لدعمه المستمر الى من كان الأول دوما في تشجيعي ومساندتي خطيبي عزيز ميلود مقداد
- والى صديقة التي شاركتني بهذا العمل ،الى أغلى وأعز من جسدت معنى الصداقة فاطمة الزهراء بايزيد والى كل افراد عائلتها الكريمة
- الى من كان دائما قريب منى وشركني أصعب واجمل اللحظات في مشواري الدراسي صديقاتي (إكرام ن، ريان، شريفة، رميصاء، سارة، مروة، اية، اكرام ب، رحاب، سلسبيل، فتحية، مريم، منال،....

مروة

إهداء

بداية أحمد الله عز وجل الذي وفقني لي اتمام هدا البحث العلمي

سائلة الله تعالى التوفيق و السداد في بقية مشوار حياتي

فالحمد لله حمدا كثيرا طيبا مبارك فيه

الى من كلله الله بالهيبة والوقار ...الى من علمني العطاء بدون انتظار ...

إلى من احملُ اسمه بكل فخر ...وأطال الله في عمره أبي الغالي { محمد الصادق }

الى ملاكي في هذه الحياة ...الى معنى الحب والى معنى الحنان و التفائي ...

إلى بسمة إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها جراحي

إلى أغلى الحبايب امي حبيبة { فوزية غريسي}

الى من ترعرعت بينهم فتعلمت معنى الأخوة وتذوقت حلاوة المحبة والصدق والوفاء

إخوتي وسندي : (شعيب وخالد وعبد القادر رحمه الله ويوسف وعبد والمنعم

وحسين) وزوجاتهم الكريمات حفضهم الله (فهيمة و خولة وسولاف)

إلى من كنت لهم نعمة العمة (لينا و سيدرة وصبرنال وسيم وشفاء

واحمد ياسين وسادن)

الى أخوتي الطيبة التي لم تبخل علي بشيء وكانت سندي في كل خطوة (هناء)

أسأل الله أن يرزقها من حيث لا تحتسب بدرية الصالحة

الى رفيق الدرب وصديق الايام بحلوها و مرها تعبيرا له عن شكري لدعمي

وتشجيعي المستمر خطيبي وكل عائلته الكريمة وخاصة امي الثانية سعاد

كما لا يفوتني ان اخص إهدائي بذكر كل افراد عائلتي الكبير كلن باسمه

والى صديقة التي شاركتني بهذا العمل، الى أغلى وأعز من جسدت معنى

الصداقة سعود مروة والى كل افراد عائلتها الكريمة

الى صديقاتي الحبيبات (منار وحسناء وسرين ومنال وأسماء ونصيرة

وليندة وأسماء وإزدهار وأمينة وأماني وإسلام ورحاب

فاطمة

الزهراء

قال تعالى (رَبِّ أَوْزِعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ وَأَدْخِلْنِي بِرَحْمَتِكَ فِي عِبَادِكَ الصَّالِحِينَ) سورة النمل الآية (19)

بداية الحمد لله الذي أنعم علينا بتوفيقه و أعاننا على إتمام هذا العمل راجين منه أن يكون الإنجاز منفعة لغير.

كما أتقدم بأسمى عبارات الشكر والعرفان إلى أستاذنا الفاضل الحاج بالشراير بالغيثار على قبوله إشرافنا في هذه المذكرة وتوجيهاته القيمة و نصائحه ومساعدته لنا في كل خطوة من بداية العمل إلى آخر نقطة فيه.

كما نتقدم بأسمى عبارات التقدير والاحترام الأستاذ المساعد زهيدة مالكي

كما أتوجه بتحية احترام وتقدير وجزيل الشكر وعظيم الامتنان

الى كافة أعضاء اللجنة المناقشة الذين تولوا تقييم هاته المذكرة

لما بذلوه من جهد ووقت

كما أشكر كل من ساهم من قريب أو بعيد في مساعدتي على انجاز

هاته المذكرة من أساتذة وطلبة وطاقم الإدارة

ولا يفوتني التوجه بالشكر الجزيل لكل أساتذة قسم الفيزياء و زملائي

في الماستر خاصة دفعة فيزياء الطاقوية وطاقات متجدد ومن كل

قلبي سعدت بالدراسة برفقتكم.

أتمنى لكم كل التوفيق في حياتكم العلمية و العملية مستقبلا

فهـــــرس المحتــويات

إهداء.....I
شكـــــروعـــرفان.....III
فهرس المحتويات..... VII
قائمة الأشكال.....X
الرموز والاختصارات.....XI
مقدمة عامة:..... ١

الفصل الأول: عموميات حول التراكم

I.1. مقدمة:..... ٣
I .2 ظاهرة التراكم: ٣
I . 2 .1 التراكم الكروي:..... ٤
I. 2 .2 حد إدينجتون ومعدل الترا كم..... ٤
I. 2 .3 التراكم فص روش..... ٥
I. 3 أقراص التراكم..... ٦
I . 2 . 1 الأجسام المدمجة..... ٦
I. 3 . 2 القرص الكبلري..... ٩
I . 4 . ماهي قرص التراكم..... ١٠
I . 4 . 1 الزخم الزاوي ١١
I . 4 . 2 اللزوجة..... ١٣
I . 4 . 3 نماذج عن أقراص التراكم في الكون..... ١٤
I . 4 . 3 . 1 الأنظمة الثنائية..... ١٤
I . 4 . 3 . 2 نواة المجرة النشطة (AGN)..... ١٥

الفصل الثاني: معادلات البنية النجمية واليات نقل الطاقة

II . 1 مقدمة ١٧
II . 2 المعادلات الاساسية ١٧
II . 2 . 1 معادلة التوازن الهيدروستاتيكي..... ١٧
II . 2 . 2 معادلة توزيع الكتلة..... ١٩
II. 2 . 3 معادلة توزيع اللمعان..... ١٩
II . 3 الانتقال الحراري ٢٠
II . 3 . 1 الانتقال الحراري بالتوصيل..... ٢١
II . 3 . 2 نقل الطاقة بالإشعاع..... ٢٢
II . 3 . 2 . 1 النقل بالإشعاع في حالة النجمية..... ٢٣
II . 3 . 3 انتقال الحراري بالحمل ٢٥
II. 3 . 3 . 1 النقل الحراري بالحمل في الغازات ٢٦
II. 3 . 3 . 2 شرط النقل بالحمل..... ٢٦
II . 3 . 3 . 3 تدرج درجة الحرارة الكظوم ٢٨
الفصل الثالث: سلوك معادلات واليات نقل الطاقة لقرص تراكم حول ثقب أسود
III . 1 مقدمة ٣٠
III . 2 المعادلات الأساسية ٣٠
III . 2 . 1 معادلة الاستمرارية (حفظ الكتلة)..... ٣٠
III . 2 . 2 معادلة الاستمرارية (حفظ الزخم الزاوي)..... ٣١
III . 2 . 3 معادلات حفظ الطاقة..... ٣٢
III . 3 نتائج وتحاليل..... ٣٢
III . 5 تحليل المنحنيات..... ٣٤

الملاحـــــــــق..... ٣٥
الخلاصة العامة..... ٤٠
قائمة المراجع..... ٤١

قائمة الأشكال

الشكل (I . 1) يظهر نظام الحد إدينجتون.....٤

الشكل (I . 2) قسم من السطوح متساوية الجهد لإمكانات روش في المستوى المداري، يستمر تبديد الطاقة من L1 إلى L5.....٥

الشكل(I . 3) صورة لثقب اسود يجذب إليه المادة من نجم مجاور.....٧

الشكل(I. 4) صورة لنجم نيوتروني.....٨

الشكل (I . 5) قزم أبيض.....٩

الشكل(I. 6) هندسة القرص الكبليري.....١٠

الشكل(II. 1) : عنصر حجم dV على مسافة r داخل نجم في حالة توازن هيدروستاتيكي.....١٨

الشكل :(**II . 2**) قشرة كروية من الكتلة النجمية.....١٩

الشكل (II . 3): توضح طرق الإنتقال الحراري.....٢١

الشكل (II . 4) يوضح قانون فوري للتوصيل الحراري.....٢٢

الشكل (II . 5) نقل الطاقة بالإشعاع في الحالة النجمية.....٢٤

الشكل (II . 6) : رسم تخطيطي يوضح عرضًا مثاليًا لعدة طبقات من حلقات الحمل الحراري في منطقة الحمل الحراري من الشمس.....٢٦

الشكل (II . 7) الآن ندع الفقاعة تضطرب للأعلى (للخارج إلى r_2) إلى مستوى أبرد قليلاً في النجم، بينما تظل في توازن الضغط مع محيطها.....٢٧

الشكل (III . 1) منحنى بياني يوضح معدل تبريد في حالة الحمل الحراري.....٣٣

الشكل (III . 2) منحنى بياني يوضح معدل تبريد في حالة الإشعاع الحراري.....٣٣

الرموز والاختصارات

قائمة الرموز

الرمز	التعريف	الوحدة
$\boldsymbol{\rho}(r)$	كثافة الكتلة	$(kg / m^3$
P	هو الضغط	(N / m^2)
A	مساحة سطح الجسم الاسود (متر مربع)	m^2
T	درجة الحرارة بالكلفن	K
σ	ثابت ستيفان بولتزمان	$5,67x\ 10^{-8}\ W/m^2.K^4$
κ	هي العتامة	(m^2 / kg)
Q	التيار الحراري	(w)
T_f	درجة حرارة المائع	k
T_S	درجة حرارة سطح الشريحة	k
$\gamma \equiv \frac{C_P}{C_V}$	نسبة درجات الحرارة النوعية لتغيرات الحالة	$(JK^{-1}mole^{-1})$
$\boldsymbol{\mu}$	متوسط الوزن الجزيئي	0.617
$M\odot$	الكتلة الشمسية	G
$\Re$	ثابت الغاز	$erg\ g^{-1}\ K^{-1}$
K	ثابت بول تزمان	$\mathrm{erg\ K^{-1}}$
h	هو معامل انتقال الحرارة بالحمل	(W/Km^2)

مقدمة عامة

مقدمة عامة:

إن علم الفلك هو العلم الذي يرغب الناس في تعلمه و الخوض في تفصيله و معرفة المزيد منه، فهوَ العلم الذي يختصّ بدراسة الأفلاك السماويّة والأجرام المُختلفة كذلك دراسة المجرّات والتجمّعات الكونيّة العملاقة سواءً النُجوم أو الكواكب والأقمار التابعة لها، والظواهر الفيزيائية المُحيطة بها.

في الآونة الأخيرة تطور علم الفلكُ وبشكل سريع خُصوصا مع تطوّر التكنولوجيا الحديثة؛ والذي كان في السابق يعتمد على دراسة القدماء للقُبّة السماويّة ومحُاولة إدراك الظواهر الكونيّة بواسطة العين المُجرّدة والأجهزة البسيطة المصنوعة بشكل يتناسب مع علوم ذلك العصر، ولكن عندَ ظُهور التلسكوبات العِملاقة اليوم أصبحَت بعض أجزاء الكون على مرأى من العُلماء وهذاما وصلت إليه هذهِ الأجهزة الحديثة.فالتلسكوبات على اختلاف أنواعها قد سبرت أغوار الكون بشكلٍ كبير فقد بيّنت لنا وُجود الكواكب البعيدِة والنُجوم الشاسعة و الأحوال التي تمر بها والتي لا يمُكن الإحاطة بها من خِلال التلسكوبات التقليديّة البسيطة، ومن هذه لتلسكوبات نجد مثلاً تلسكوب هبل وهوَ تلسكوب فضائي يُرسل صوراً جويّة بشكلٍ مُستمرّ عن الكون ونجُومه ومجرّاته تلسكوبات الراديو التي تحُلّل لنا مكوّنات الفضاء الخارجي من خِلال ما يصل إلينا من تردّدات صوتيّة يتم تحليلها ومعرفة مصادرها . فعِلم الفلك ينقسم بشكلٍ رئيسيّ إلى قسمين هما : علم الفلك القائم على الرصد الفلكيّ، وعِلم الفلك النظريّ؛ حيث يهتمّ الأوّل برصد النُجوم والمجرّات من خِلال التلسكوبات أو المسارات التي تمّ إطلاقها في الفضاء والرحلات الفضائية التي انطلقت
عبر تاريخ العصر الحديث في غزو الفضاء، وهذا القسم من العِلم هوَ الذي يضع لنا الكون بمنظور حقيقيّ وضمن الإطار المحسوس. أمّا عِلم الفلك النظريّ فهوَ العِلم الذي يضع الفرضيّات والاحتمالات والنظريات الفلكيّة التي تتم مُطابقتها مع الواقع للخُروج بحقائق علميّة تدعم عِلم الفلك بشكلٍ عامّ، وهو يستخدم النظريات الفيزيائية في تفسير ظواهر الكون ومحُاولة إيجاد تفسير عِلمي نظري مقبول.

تطرقنا في مذكرتنا المعنونة ب **التوازن الحراري لأقراص التراكم و سلوك معادلات الطاقة** التعرف على عموميات حول التراكم وكان هذا في الفصل الأول، وتناولنا في الفصل الثاني معادلات البنية النجمية واليات نقل الطاقة وكذلك تعرفنا على نتائج سلوك المعدلات واليات نقل طاقة لقرص تراكم حول ثقب أسود في الفصل الثالث.

الفصل الأول
عموميات حول التراكم

I. 1 مقدمة:

في الآونة الأخيرة، كان هناك اهتمام متجدد لدراسة بنية وتطور أقراص التراكم (Accretion disks) حيث يتم العثور عليها بتواجد مطلق حول مجموعات متنوعة من النظم الفيزيائية الفلكية، النجم الفتية YSOالثقوب السوداء الهائلة في نوى المجرات النشطة AGNالأنظمة الثنائيةBS وكذا في حلقات زحل وغيرها، ويمكن اعتبار أيضا الأقراص المتواجدة بالمجرة حالات خاصة من أقراص التراكم.

على العموم فهي تلعب دورا هامّا للغاية، على سبيل المثال، قرص التراكم حول النجوم المزدوجة يحدد الانبعاثات الإشعاعية للأجسام (مثل: مصادر أشعة السينية) وفي حالة YSO يمثل مواقع الكواكب المتشكلة

I. 2 ظاهرة التراكم:

في الفيزياء الفلكية، التراكم يعني تدفق المادة على جرم سماوي وهذا ما ينطبق على تراكم الجاذبية لهذا الجسم. عملية التراكم هيا الأكثر فعالية لاستخراج الطاقة من المادة العادية، وهذه العملية أكثر مصدر للطاقة كفاءة من الاندماج النووي.

إذا كان لدينا جسيم ذو كتلة dm يسقط من اللانهاية ويتراكم على قرص التراكم في المدار الدائري ذو نصف قطر R حول نجم ذو كتلة M عند تحقق التوازن نتحصل حسب قانون الأول لنيوتن فإن مجموع القوى(قوة الطرد المركزي ،قوة الجذب العام) تساوي الشعاع المعدوم ولدينا

$$\frac{\nu^2 \mathrm{dm}}{\mathrm{R}} = \frac{\mathrm{GMdm}}{\mathrm{R}^2} \qquad (1 .\mathrm{I})$$

إذن تراكم الطاقة الناتج عن الجسيمات هو

$$dE_{acc} = dE_{\infty} - dE_R = \frac{GMdm}{R} \qquad (2 .\mathrm{I})$$

حيث: E_{acc} طاقة التراكم.

تراكم السطوع هو تراكم المادة في وحدة الزمن:

$$\mathrm{Lacc} = \frac{\mathrm{dEacc}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{GM}}{\mathrm{R}} \frac{\mathrm{dm}}{\mathrm{dt}} \qquad (3 .\mathrm{I})$$

حيث:Lacc تراكم السطوع.

حسب هذه النتيجة للسطوع نستطيع كتابة:

$$\mathrm{L_{acc}} = \frac{\mathrm{GM}}{\mathrm{R}} \dot{M} \qquad (4 .\mathrm{I})$$

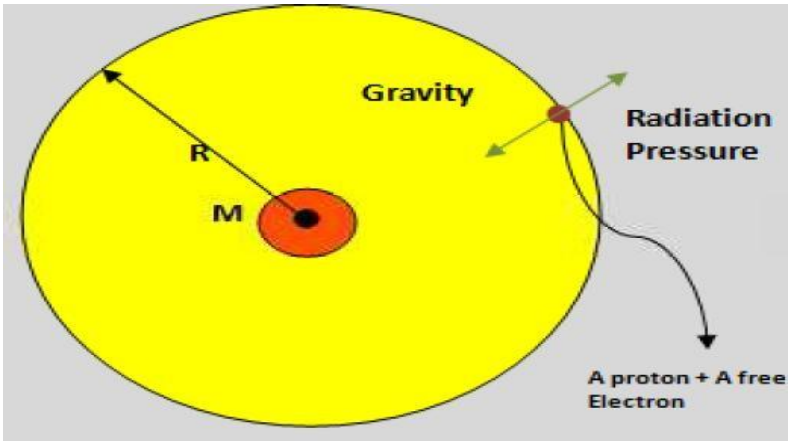
حيث $[. s^{-1}]$ $\dot{M}$ هي معدل التراكم[1]

I. 2 .1 التراكم الكروي:

التراكم الكروي أو المتماسك هو أبسط نوع من تدفقات التراكم للمعالجة لأن الضغط الحراري هو القوة الوحيدة المضادة للجاذبية. في حالة، نجم يحيط به وسط غازي ثابت وموحد تتراكم الكتلة من محيطه، والعزم الزاوي للغاز لا يكاد يذكربشكل عام، التراكم ليس بالكروي، لأن نقل العزم الزاوي إلى الخارج يمكن أن يحدث[1].

I. 2 . 2 حد إدينجتون ومعدل الترا كم:

ضياء إدينجتون أوحد إدينجتون هو الحد الأقصى للمعان الذي يمكن للجسم أن يصدره من دون أن يتلاشى تلقائيا، وهو النقطة التي تتوازن فيها قوى الجاذبية من الخارج إلى الداخل في النجم مع ضغط الإشعاع من الداخل إلى الخارج، مع اعتبار أن مادة النجم في حالة كروية وينطبق عليها التوازن الهيدروستاتيكي ولكن هناك عدة أجسام التي يمكنها أن تتجاوز هذا الحد، مثل انفجار أشعة غاما، المستعرات والمستعرات العظمى. ولكن إذا كان لمعان نجم يتجاوز ضياء إدينجتون، الإشعاع يتغلب على الجاذبية ويدفع بعيدا المادة الساقطة من قرص التراكم مما يؤدي إلى توقف عملية التراكم، يتخلص النجم من غلافه الخارجي على شكل رياح نجمية .



الشكل (I . 1) يظهر نظام الحد إدينجتون

لحساب هذا الحد، نعتبر حجم من الهيدروجين المتأين تماما مع تراكم كروي ثابت، أي بمعنى، المادة تسقط شعاعيا أو بشكل موحد على الجسم وقوة الجاذبية هي:

$$f_g = \frac{GMm_p}{R^2} \qquad (8 - I)$$

والقوة التي يسببها ضغط الإشعاع تعطى بـ

$$f_r = \frac{L\sigma_T}{4\pi R^2 C} \qquad (9 - I)$$

حيث L هو لمعان الجسم و σ_T هو مقطع طومسون العرضي للإنتشار.

وبالمساواة بين هاتين القوتين (I - 8) و (I - 9) نجد

$$L_{edd} = \frac{4\pi G M_{mp} c}{\sigma_T} \simeq 1.3 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_\odot}\right) erg.\, s^{-1} \qquad (10 . I)$$

ويمكننا أيضا أن نكتب:

$$L_{edd} = \frac{GM\dot{M}}{R_0} \qquad (11 . I)$$

حيث $\dot{M}_E$ هو معدل إدينجتون للتراكم محددة بـ

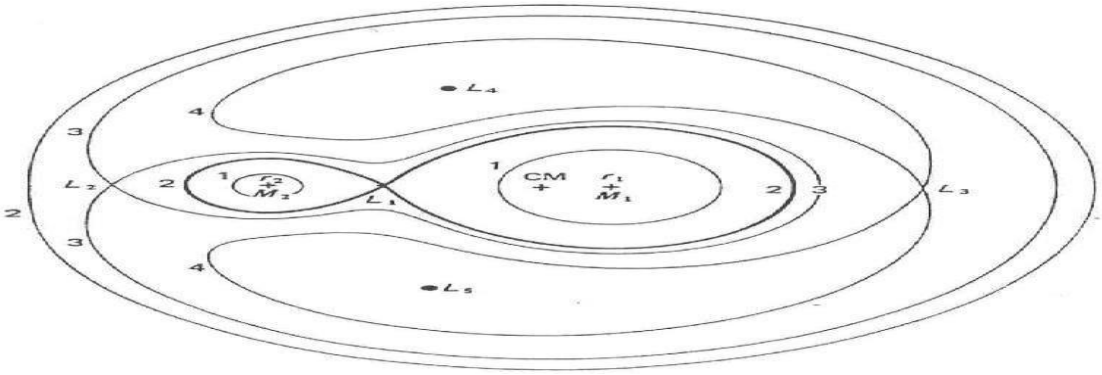
$$\dot{M}_E = 4\pi r_0 \frac{m_p C}{\sigma_T} \simeq 9.5 \times 10^{11} R_0 g s^{-1} \qquad (12 . I)$$

R_0هو نصف القطر الأعمق، $\dot{M}_E$ هو معدل التراكم الأعظمي لا تعني الأعظمية، لأنه لا وجود للأعظمية في معدل التراكم.

I. 2. 3 التراكم فص روش:

عندما نعتبر نجمين في مدار ثنائي كتلة نقطية هناك مناطق تساوي جهد الجاذبية يشعر فيها الجسم بجاذبية متساوية من كلا النجمين هذه المنطقة تسمى بمجال روش، فإذا ازداد حجم النجم وانتفخ بحيث يتعدى تلك المنطقة فإن المادة تحرير من قوة الجاذبية فتنتشر في الفضاء إما اذا كان النجم في النظام الثنائي فإن المادة تسقط على أحدهما عبرى نقطة لاغرونج.

ويتم تحديد مجال روش من خلال كتلة النجمين



الشكل (I . 2) قسم من السطوح متساوية الجهد لإمكانات روش في المستوى المداري،

يستمر تبديد الطاقة من L1 إلى L5

تعطى معادلة التالية:

$$\emptyset_R(\vec{r}) = {-GM_1}/{|\vec{r} - \vec{r_1}|} \; {-GM_2}/{|\vec{r} - \vec{r_2}|} - \frac{|\vec{\Omega} \times \vec{r}|}{2} \qquad (7.I)$$

حيث

- r_2 و r_1 موضع النجمين في الإطار المرجعي الدوار يقاسان جميع المسافات بالنسبة لمركز كتلة النظام.
- $q \equiv M_2/M_1$ نسبة الكتلة تقاس من خلالها أشكال الاسطح متساوية الجهد $\left(\text{حيث} R = \text{ثابت}\right)$
- الاسطح متساوية الجهد في نظام ثنائي $M_2/M_1 = 0.2$
- $r \gg a$ تكون المسافات كبيرة جدا، وتكون الأسطح متساوية الجهد كرويا تقريبا وتتركز على مركز كتلة النظام، وتتمحور حول النجمين.
- على مسافات متوسطة، تأخذ الأسطح متساوية الجهد أشكالا مثيرة للاهتمام، يتميز "السطح الحرج" بأهمية خاصة في نطاق التراكم، ويتكون من فصين روش واحد لكل نجم، متصلان في نقطة لاغرونج الداخلية $\mathrm{L1}$
- إذا تمدد النجم العادي أثناء عملية التراكم التطور النجمي ليملأ فص روش، فسيتم دفع الغاز عند النقطة$\mathrm{L1}$ بضغط الغاز الداخلي من مجال روش للنجم العاديM_2 إلى المجال من النجم الضغوط(M_1)[1] .

.

I . 3 أقراص التراكم:

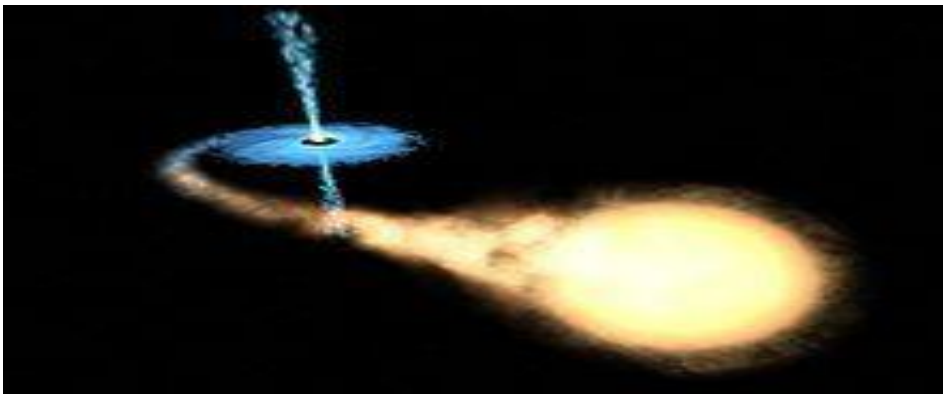
أقراص التراكم هي الهياكل العامة المرتبطة بالأجسام المضغوطة (تُعتبر ثقوبًا سوداء ونجوم نيوتروني وأقزام بيضاء) مدعومة بتراكم المادة عليها. يشكل الزخم الزاوي للمادة المتفاعلة جاذبيًا حاجزًا طردًا مركزيًا لعصمة هذه المادة إلى مركز كتلتها. بالنسبة للمادة الغازية، يُعتقد أن هذا الحاجز يؤدي إلى تكوين بنية قرصية مرتبطة بالجاذبية. إذا استمر الغاز في التطور من خلال إشعاع زخمه الزاوي والسقوط على مركز الكتلة، فإن النظام يسمى قرص التراكم. يعد قرص التراكم عنصرًا مركزيًا في نظريات تكوين النجوم والثنائيات المتفاعلة ونواة المجرة النشطة[1].

I . 3. 1 الأجسام المدمجة:

- **الثقوب الأسود:**

الثقب الأسود هو تجمع كوني ذو جاذبية هائلة، والتي تقوم بسحب كل شيء حولها حتى الضوء، ويتشكل الثقب الأسود عند فناء نجم ضخم، ويحدث ذلك عندما يستنفذ النجم جميع وقوده النووي الحراري الداخلي في آخر مراحل حياته، ليصل إلى ما يسمى بالتفرد، والتي يكون حجمه فيها صفر، وكثافته لا متناهية، وعلى الرغم من أنه لا يمكن رؤية الثقوب السوداء، إلى أنها تمثل حوالي 90%من محتوى الكون، ليصبح ضوء النجم نفسه محصورا في مداره، لذلك يعرف هذا النجم الداكن بالثقب الأسود . تسحب الثقوب السوداء الكواكب، أو

الضوء، أو أي جسم كوني آخر في حال مر بالقرب منها، فتصل هذه الأجسام بعدها إلى نقطة العودة، وذلك يعني أنها دخلت في حالة الأفق، وهي الحالة التي يكون من المستحيل لهذه المادة الهروب من الثقب الأسود، لأن ذلك يتطلب أن تكون سرعة تحرك هذا الجسم أسرع من سرعة الضوء للهروب منه[3] [1]



الشكل(**I . 3**) صورة لثقب اسود يجذب إليه المادة من نجم مجاور

- **النجوم النيوترونية:**

النجم النيوتروني هو نواة ذرية كبيرة تتكون من 10^{60}نيوكليون، وكتله حوالي 1.5 كتلة شمسية، وقد تصل كتلة النجم النيوتروني إلى 3 كتلة شمسية إذا تجاوزها الانهيار النجم، لذلك تكون كثافة مادته حواليسم/ جم10^{15}إلى10^{14} اتضح أن هيكلها الداخلي النظري معقد نسبيًا ومضارب تمامًا مع وصول النجم إلى مرحلة النجم النيوتروني نتيجة للإنكماش السريع فيزداد معدل دورانه حول نفسه ويزداد مجاله المغناطيسي قوة، تم اكتشاف أن الثقوب السوداء الفلكية تحتوي على نجوم نيوترونية متراكمة. كانت الاكتشافات كدليل قوية على وجود النجوم النيوترونية ودورها في الظواهر الفلكية. يتكون النجم النتروني من 3 طبقات أساسية **(غلاف غازي، قشرة صلبة، عبوة سائلة)** [3] [1] .

الشكل(I. 4) صورة لنجم نيوتروني

- **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 الناجي الوحيد من هذه العملية، يُصبح هذا القلب قزماً أيضا ساخناً جدا، درجة حرارته تزيد عن $100000\ K$، إذا لم يتم جمع المادة من نجم قريب، فإن القزم الأبيض يبرد خلال مليار عام أو ما يُقارب ذلكَ فيتحول إلى قزم أسود ثم يختفي في الفضاء. تبلغ كتلة القزم الأبيض حوالي نصف كتلةً الشمس، وهو أكبر حجما 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 ، لايتجاوزه في هذا الأمر إلا النجوم النيوترونية [3][1] .

الشكل (I . 5) **قزم أبيض**

I. 3. 2 القرص الكبلري :

من المفترض أن القرص رقيق جدًا ويوجد في المستوى الاستوائي للنظام، كما هو محدد بواسطة محور دوران النجم المركزي، وأن كتله (M ∗) أكبر بكثير من كتلة القرص، وبالتالي مجال الجاذبية GM ∗ / r2 بالنسبة لنظام نجمي للقرص $T_i \quad aur$، لدينا M ∗ ≈ Mوكتلة القرص $M \sim 10^{-2}$، لذلك التقريب له ما يبرره.

بافتراض وجود تكوين ثابت (∂ / t) والعمل في إحداثيات أسطوانية $(s ، \varphi ، z)$ مع محور z- محاذاة مع محور الدوران، (في هذه الفقرة تعني نفس الشيء مثل r) نفترض أن العناصر السائلة تدور على مسارات دائرية، أي $u = u\varphi\,(s,z)\,\widehat{e_\emptyset}$ والقرص رقيق جدًا (بمعنى أن سمكه $h << r$).

يمكننا صياغة الديناميكيات فقط في المستوى الاستوائي بافتراض الثبات z عندا القرص نفسه، مما يعني أن u_φ تعتمد فقط على s، و$(\partial/ \partial t) = 0$. في مثل هذه الحالة، تقتصر الديناميكية على المكون s في معادلة أولر، والتي في حالة عدم وجود مكون زاوي يتم تقليلها إلى التعبير عن التوازن بين الجاذبية وقوة الطرد المركزي:

$$GM * / s^2 = u_Q^2 / s = \Omega_S^2 \qquad (13.I)$$

من حيث نشتق على الفور تغير السرعة الزاوية كدالة في نصف القطر الأسطواني S

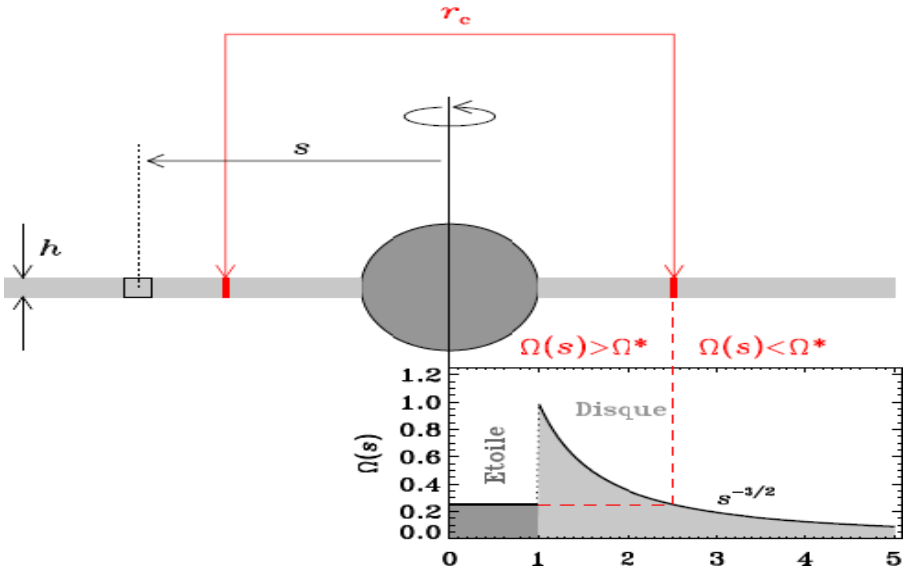
$$\Omega\,(s) = \frac{(GM* s^{3/2})1}{2rads^{-1}} \qquad (14.\ I)$$

تم رسم هذا الملف الشخصي على الشكل التالي (**I** - 3). من الواضح أن الاعتماد في $s^{3/2}$ هو الذي يميز مدارات كبلر.

المفهوم الذي سيصبح مهمًا لاحقًا هو نصف قطر الدوران، أي نصف القطر (RC) الذي تكون فيه السرعة الزاوية لدوران القرص مساوية للنجم المركزي:

$$\Omega\,(rc) = \Omega* \rightarrow rc = (GM*/\Omega_*^2)^{1/3} \qquad (15 .I).$$

يشار إلى موضع شعاع الدوران المشترك باللون الأحمر في الشكل التالي (Paul Charbonneau 2015) السرعة الزاوية للقرص هي Ω $\Omega*$ لـ $s < r_c$ ، والعكس بالعكس Ω $\Omega*$ لـ $s > r_c$ بشكل عام يدور النجم المركزي أبطأ بكثير من حافة القرص الذي يتلامس معه، وبالتالي وجدا أن نصف قطر الدوران المشترك يقع على بعد عدة r_* من النجم



الشكل(I . 6) هندسة القرص الكبليري

يوضح الشكل هندسة قرص كبلر، حيث يدور النجم المركزي لنصف القطر r_* والكتلة $M*$ بسرعة الزاوية $\Omega*$. قرص بسمك h يحتل المستوى الاستوائي، ويتم تحديد سرعة دوران البلازما من خلال التوازن بين الجاذبية وقوة الطرد المركزي (انظر النص).

إذا كانت كتلة القرص أصغر بكثير من كتلة الجسم المركزي، فإن السرعة الزاوية في القرص تختلف في $3/2$ عند نصف قطر الدوران المشترك RC، تكون السرعة الزاوية للقرص مساوية للنجم (الخطوط الحمراء) [1].

I . 4. ماهي قرص التراكم:

قرص التراكم هو غاز وغبار يدور حول جرم سماوي مركزي، يتشكل من تدفق أو تراكم المادة ويتم سحب هذه الأخيرة داخل قرص التراكم ويتشكل بسبب تساقط المواد على الجسم المركزي ودائما ما يكون لها عزوم زاوية، لذلك فان المادة تستقر فيصبح الدوران على شكل قرص، بعد الاستقرار داخل القرص، تكون التراكمات من الدرجة الأولى ناتجة عن إعادة

توزيع العزم الزاوي لذلك فان هذه المواد تقترب من الجسم المركزي وتسقط على سطحه وتتخلى عن عزمها الزاوي إلى الأجزاء الخارجية من القرص. خلال هذه العملية يعمل القرص على الانتشار، إنا كمية صغيرة من المادة يجب أن تتخلى في نهاية المطاف عن عزمها الزاوي إلى الخارج. في حين ان كل كتلة تفقد عزمها الزاوي تقع على النجم.

عادة الأقراص تخضع لمختلف عوامل عدم الاستقرار مثل: الجاذبية، تمغنط الدوران (MIR) عدم الاستقرار الهيدروديناميكية والحمل الحراري الذي يتسبب في الإضطراب داخل الأقراص الذي يضمن نقل العزم الزاوي إلى الخارج، وفعل الإضطراب في نقل العزم الزاوي يمكن أن نصفه بما يسمى اللزوجة المضطربة، الإضطراب يلعب دورا مزدوجا هنا، أولا هو المسؤول عن نقل العزم الزاوي إلى الخارج وهذا ضروري لتطور التراكم، عدم الاستقرار ناتج عن تطور داخل نظام مضطرب ينتج عنه عوم دوران قوي يؤثر على القرص قادرا على إعادة توزيع العزم الزاوي إلى نصف قطر كبير، ثانيا يعمل على توفير مسار لتحويل طاقة الجاذبية مثل كتلة تقع على نجم على شكل طاقة حرارية، الطاقة تبدد، وبدوره يساهم في الانبعاث الإشعاعات التي يمكن ملاحظتها وقياسه.

المادة المتراكمة تشع طاقات في مجال الأشعة تحت الحمراء، مرئي الأشعة فوق البنفسجية، وضوء الأشعة السينية، وهذا ما أكتشفه علماء الفلك واستخدامه لدراسة كل من قرص التراكم والجسم المركزي، التراكم لديه كفاءة كبيرة لتحويل طاقة الجاذبية إلى إشعاع أو طاقة حرارية، في حالة النجوم النيوترونية، كفاءة التحويل يمكن أن تتجاوز 10%من معادلة الطاقة الكامنة للكتلة بينما أقصى قدر من الكفاءة يمكن أن يتحقق بفعل الدوران حول جسم أسود أكثر من40%.[2]

I . 4 . 1 الزخم الزاوي:

يشع عدد من الأجسام في مجرتنا بشكل أساسي بسبب التراكم. حيث تنقسم هذه بشكل عام إلى فئتين، النجوم الثنائية والنجوم المفردة، في الفئة الأولى، يكتسب النجم المضغوط المادة من رفيق ثنائي، إما عن طريق الفص الصخري أو بواسطة الرياح النجمية. في الفئة الثانية، يحدث التراكم خلال مراحل تشكل النجوم. تتشابه عمليات التراكم في كليهما على الرغم من أن الثنائيات التراكمية تشع طاقات أعلى بكثير وتتطور بشكل عام على نطاقات زمنية أقصر بكثير. الأهم من ذلك، أن الغاز المتراكم في كلتا الحالتين سيكون له قدر كبير من الحركة الزاوية، والتي يجب أن يسكبها الغاز من أجل التحرك إلى الداخل. يعمل الزخم الزاوي الأولي للغاز المتراكم على إبطاء معدل التراكم على النجم ما لم يكن وقت التراكم قصيرًا جدًا

مقارنة بوقت تبريد الغاز. سوف يبرد الغاز بسرعة أثناء دورانه حول النجم. نظرًا لأن تدفق التراكم هو مركز الضغط، فسوف يسقط الغاز في قرص متماثل المحور يدور حول النجم، بمقياس ارتفاع الضغط $h / r << 1$. سيتم الاحتفاظ بهذه الحالة بشكل عام، وسيبدأ التراكم من قرص تراكم. يدور الغاز في القرص في مدارات قريبة من كبلر، ويتراكم ببطء نحو الداخل.

للاندماج في النجم، يجب نقل الزخم الزاوي إلى القرص، مما يتطلب تفاعل الغاز في المدارات المجاورة بشكل لزج. عندما تتقلص الغيوم الجزيئية لتشكل نجمًا بسبب وجود الزخم الزاوي، فلن يكون الانكماش كرويًا بالكامل. بينما تتطور مادة غلاف النجم الأولي بشكل كروي، يميل الجزء الخارجي من السحابة إلى التوزيع بشكل أساسي في قرص بسبب تأثير قوى الطرد المركزي والجاذبية.

في وجود الدوران، يكون مدار الطاقة الأقل دائريًا. بحيث تدور المادة الموجودة في القرص بحركة كبلرية حول النجم المركزي.

تُعطى السرعة الزاوية الكبلرية لجسيم يدور في القرص من خلال تمثيل تخطيطي للزخم الزاوي والنقل الجماعي داخل قرص تراكم كما هو موصوف في (Lynden-Bell and Pringle 1974)، بينما تزداد الحركة الزاوية المحددة للخارج (الزخم الزاوي المحدد هو الزخم الزاوي لكل وحدة كتلة). إذا كان القرص لزجًا مع دوران الأجزاء الداخلية بشكل أسرع من الأجزاء الخارجية، يتم نقل الزخم الزاوي من الجزء الداخلي إلى الجزء الخارجي (Lynden-Bell and Pringle 1974). يوضح توازن الطاقة البسيط أن القرص اللزج يمكنه خفض طاقته عن طريق النقل الجماعي إلى نصف القطر السفلي والزخم الزاوي إلى نصف القطر الأكبر. لذلك فإن الأقراص الكبلرية المحيطة بالنجوم الفتية هي على الأرجح نتيجة تراكم الكتلة من الأجزاء الخارجية إلى الأجزاء الداخلية للقرص، بينما يتم إخلاء الزخم الزاوي باتجاه الجزء الخارجي من القرص. يتطلب تراكم الغاز نحو الجسم المركزي عملية فيزيائية قادرة على استخراج الزخم الزاوي من المادة الدوارة، من أجل كسر التوازن بين الجاذبية وقوة الطرد المركزي. وبطبيعة الحال، يمكن أن تلعب لزوجة السائل هذا الدور.

ومع ذلك، فإن حساب اللزوجة الجزيئية والاصطدامات للسائل يظهر أن الأخير منخفض جدًا من حيث الحجم بحيث لا يتمكن من تفسير الظواهر المرصودة، ولا سيما أوقات التطور المميزة. لذلك من الضروري إيجاد عملية بديلة واحدة (أو أكثر) لاستخراج الزخم الزاوي [1]

I . 4 . 2 اللزوجة:

للاندماج في النجم يجب نقل الزخم الزاوي إلى القرص، مما يتطلب تفاعل الغاز في المدارات المجاورة بشكل لزج. بحيث يكون حجم اللزوجة اللازمة لمراقبة ظاهرة التراكم أكبر بكثير من اللزوجة الجزيئية للغاز.

حتى بدون معرفة المصدر الدقيق للزوجة الفعالة في قرص التراكم، لا يزال الباحثون قادرين على اتخاذ خطوات كبيرة في فهم فيزياء الظواهر التراكمية. وبالتالي عندما نتحدث عن اللزوجة (اللزوجة الحركية) في قرص، فإن اللزوجة الجزيئية التقليدية ليست كثيرة جدًا. يُفترض عمومًا أن اللزوجة الناتجة عن الاضطراب أهم بكثير من اللزوجة الجزيئية، ولكن يمكن التعامل معها بنفس المعادلات. نادرا ما يتم حساب اللزوجة بشكل ثابت. إن زيادة وقت الحساب لن يوفر بالضرورة مزيدًا من الدقة نظرًا للعديد من أوجه عدم اليقين بشأن الغبار والاقتران والمجال المغناطيسي. بمجرد أن يهتم الباحث ببنية القرص، على سبيل المثال درجة الحرارة في المستوى المتوسط أو كمية المادة المتاحة من أجل الاقتراب من تكوين الكواكب، تصبح معرفة اللزوجة ضرورية. تشكل طبيعة اللزوجة مشكلة في الواقع ، فإن القرص الذي يحتوي على لزوجة جزيئية بمفرده سيظهر عددًا مرتفعًا جدًا من رينولدز، مما يشير إلى حدوث اضطراب، ومن ثم فهي مسؤولة عن اللزوجة. بناءً على التجارب العملية على التدفقات الأسطوانية المستوية (Lynden-Bell and Pringle 1974؛ Richard and Zahn 1999) اقترح وصفة بديلة حيث تكون اللزوجة متناسبة مع زخم زاوي محدد $\nu = \beta\Omega r2$ ، مع $\beta \leq 1$ ثابت على الكل القرص .أظهر (Huré et al 2001) أن هذه العلاقة قدمت تنبؤات مختلفة تمامًا عن تلك الناتجة عن علاقة α على وجه الخصوص ملف تعريف شعاعي أقل حدة لكثافة العمود وقرص أكثر ضخامة [1].

I . 4 . 3 نماذج عن أقراص التراكم في الكون:

توجد عدة نماذج للأقراص التراكم من بينها نموذج أقراص النجوم والكواكب الأولية الذي سنقوم بدراسته خلل بحثنا هذا.

I . 4 . 3 . 1 الأنظمة الثنائية:

تشير الملاحظات أن الغالبية العظمى من النجوم تتشكل في الأنظمة الثنائية أو أنظمة متعددة. عادة ما تتشكل هذه الأنظمة نتيجة دوران الشظايا في السحابة خلل المرحلة المتجانسة من الانهيار إذا كان النظام الثنائي يتضمن نجم ضخم بما فيه الكفاية($M_{\odot} > 2$) والنجوم الأخرى قد لتزال في مرحلة التسلسل الرئيسي لتطور النجوم، النجم الإبتدائي يفقد إستقراره وينهار للوصول إلى نهاية حياته كجسم من ضغط، قزم أبيض، نجم نيوتروني أو ثقب أسود. عندما يحدث هذا، فإن مجال الجاذبية القوي للجسم المنضغط يقود النجم العادي لتجاوز سطح كمونه الحرج أو حيز روش ومادته تسقط على النجم المنضغط. عندما تكون النجوم قريبة بما فيه الكفاية لبعضها البعض، تصبح قوة الطرد المركزي مماثلة لقوى الجاذبية، وتبدأ المادة المتراكمة بالحركة في المدار الدائري لتشكيل قرص التراكم حول الجسم المنضغط، فإنها تفقد تدريجيا العزم الزاوي من خلل عدة آليات تنتقل من خللها بطريقة لولبية إلى الداخل وتقع على الجسم المنضغط. نميز نوعين من التفاعل للنجوم الثنائية وهما:

- **المتغيرات الكارثية (CV)**

المتغيرات الكارثية هي أنظمة ثنائية تتكون من قزم أبيض أساسي والثانوي نجم في مرحلة التسلسل الرئيسي أو نجم عملاق أحمر. يتميز هذا النوع بتدفق الكتلة من النجم الثانوي نحو الأساسي ويتشكل قرص التراكم حول القزم الأبيض. الدور لهذا الثنائي يتغير عموما من 80دقيقة إلى 15ساعة. هذه الحركة تكون بسرعة أقل من سرعة الصوت,تحول ما يقارب نصف كتلة القزم الأبيض إلى حديد، مما يؤدي إلى تعطل تام في النجم فيتسبب هذا في إنفجاره على شكل مستعر أعظمي من الفئة الأولى، أما إذا كانت $\dot{M}$ أكبر من 10^{-6}يمكننا ملاحظة حطام الانفجار لأن القزم الأبيض ضمن مغلف كبير.

- **ثنائيات الأشعة السينية (XRB)**

ثنائيات الأشعة السينية هي أنظمة ثنائية تتكون من نجم نيوتروني أساسي أو ثقب أسود والثانوي عبارة عن نجم خللا التسلسل الرئيسي أو نجم عملاق أحمر. تنتقل المادة من النجم الثانوي إلى النجم الأساسي ويتشكل قرص تراكم حوله. المواد المتراكمة تصبح حارة جّدا وتحرر طاقة الجاذبية الكامنة وتزداد إلى أن تصل عشرات المرات مما كانت تمتلكها الكتلة بأشعة السينية.

XRB هي مصادر لمعان الأشعة السينية في مجرتنا وتتميز حسب حالة المتغيرات في السطوع على فترات زمنية تتراوح بين ميلي ثانية لأشهر وسنوات. يتراكم الهيدروجين على سطح النجم الأولي، مع ارتفاع في الكثافة ودرجة الحرارة وعندما تزدادان بما فيه الكفاية يحدث انفجار على سطح النجم الأساسي. هناك نوعان من ثنائيات الأشعة السينية:

• **ثنائيات الأشعة السينية ذات الكتلة المنخفضة (LMXB)**: النجم الثانوي ذو كتلة أصغر من أو تساوي كتلة الشمس، يحدث التراكم مع تجاوز حيز روش.

• **ثنائيات الأشعة السينية ذات الكتلة المرتفعة (HMXB):** هذه الثنائيات قوية الأشعة السينية حيث النجم الثانوي ضخم ذو كتلة. $M \geq 10M_{\odot}$هذا النجم يدفع المادة على شكل رياح في الفضاء، إذن جزء منها يسقط على النجم الأولي لبدء عملية التراكم حوله [1].

I . 4 . 3 . 2 نواة المجرة النشطة (AGN):

ومن المسلم به على نطاق واسع الآن أن مركز معظم أو جميع المجرات عبارة عن ثقب أسود هائل (تصل كتلته إلى بضعة ملايين كتلة الشمس).كتلة ضخمة من هذه الأجسام تنمو، مما يعني أن المجرات تكون نشطة من وقت الآخر. و AGNهي ألمع الأجسام في الكون، التي تظهر في كل الطيف الكهرومغناطيسي وغالبا ما يكون هناك قمة ممتدة من الراديو إلى أشعة غاما. إضافة إلى إنتاج قوة هائلة مقدرة بعدة ملايين مرة من لمعان الشمس، ولكن كما أن الثقب الأسود لا يصدر شيء، وبالتالي فإنه يعتقد أن الإشعاع من AGNناتج من مواد تسخينها إلى عدة ملايين درجة، وهذه المادة قريبة من مركز الثقب الأسود تشكل قرص تراكم قبل وقوعها في الثقب الأسود[2].

الفصل الثاني

معادلات البنية النجمية واليات نقل الطاقة

II. 1 مقدمة:

النجوم يصعب فحص جزئها الداخلي لتحديد خواصها الفيزيائية وتغيرها بسبب درجات الحرارة المرتفعة والمسافات الهائلة من الأرض. لذا فإن السؤال هو: كيف نحدد البنية الداخلية للنجم؟

يبني علماء الفيزياء الفلكية نماذج نظرية للنجوم ويقارنون تنبؤاتهم بالمشاهدات. لتسهيل الدراسة النظرية، ومن أجل هذا يتم وضع الافتراضات التالية:

النجم متماثل كرويًا: أنت تعلم أن النجوم لها حركة دورانية تغير شكلها الكروي. نظرًا لأن الحركة الدورانية بطيئة في معظم الحالات، فليس لها تأثير ملموس على شكل النجوم. وبالتالي، فإن التناظر الكروي هو افتراض صحيح

النجم في حالة توازن ديناميكي: التوازن الديناميكي يعني أن الطاقة التي يشعها النجم تساوي الطاقة التي يتم توفيرها من لبه، ويبدو هذا الافتراض صحيحًا لأن لمعان النجوم لوحظ أنه ثابت على مدى فترة زمنية طويلة.

النجم في حالة ثبات حراريً: هذا يعني أن درجة الحرارة في كل نقطة داخل النجم ثابتة على مدى فترة زمنية طويلة، إن هذا الافتراض لا يعني أن الجزء الداخلي للنجم بأكمله بنفس درجة الحرارة.

في ظل هذه الافتراضات، تتم دراسة بنية النجم بالاعتماد على أربعة معادلات أساسية للبنية النجمية، وهي معادلات توزيع الكتلة واللمعان، معادلة التوازن الهيدروستاتيكي وكذا معادلة النقل الإشعاعي (أو الحمل الحراري) جنبًا إلى جنب مع معادلة الحالة (EOS) (كما هو موضح في الملحق) بالإضافة إلى العديد من المعادلات الثانوية، هذه المعادلات الفيزيائية توضح سلوك الفيزياء الاساسية لبنية النجم على نطاق واسع، ويتم التعرض باختصار إلى الطريقة التي تؤدي بها هذه المعادلات النموذج الحقيقي للنجوم وكيفية تطورها، وتركز هذه الدراسة على النجوم التي انزاحت على شريط التتابع الرئيسي لتقدير أحجامها وكتلها القصوى.

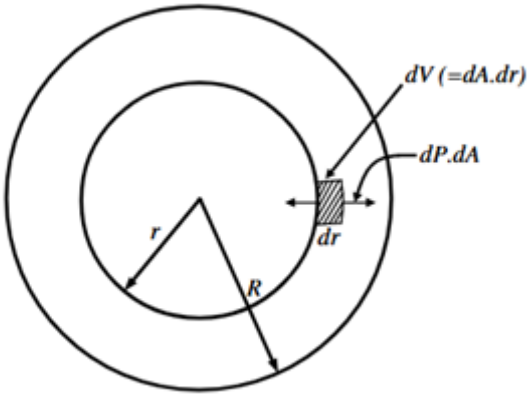
II . 2 المعادلات الاساسية:

سنتعرض الان الى المعادلات الأساسية الأربعة للبنية النجمية وما يرافقها من معادلات ثانوية لدراسة النموذج النجمي، إحدى هذه المعادلات الأساسية لها شكلين تحددهما كيفية نقل الطاقة عبر الطبقات الداخلية للنجم، اما المعادلات الثانوية تتعلق بحالة الغاز النجمي: أولاً، دعونا نفكر في مبدأ التوازن الهيدروستاتيكي.

II . 2 . 1 معادلة التوازن الهيدروستاتيكي:

أول المعادلات الأساسية هي معادلة التوازن الهيدروستاتيكي.

$$\frac{G\mathfrak{M}(r)}{r^2}\rho(r)dV$$



الشكل(II. 1) : عنصر حجم dV على مسافة rداخل نجم في حالة توازن هيدروستاتيكي

في ضوء التناظر الكروي للنجم، يمكن اعتبار الضغط والكثافة ودرجة الحرارة متطابقة في جميع النقاط على السطح الكروي لنصف القطر r. لذلك، يمكن كتابة القوة الهيدروستاتيكية الصافية المؤثرة على عنصر الحجم dV ودفعها للخارج على النحو التالي:

$$dP.dA$$

حيث dA هي مساحة عنصر الحجم dV العمودي على r و dP هو فرق الضغط بين جانبي عنصر الحجم على طول نصف القطر.

لتحقيق التوازن الهيدروستاتيكي، يجب أن تكون قوة الجاذبية مساوية ومعاكسة للقوة الهيدروستاتيكية. وهكذا على أساس المعادلات.(III . 1) و (III . 2)، يمكننا أن نكتب:

$$\frac{G\mathfrak{M}(r)}{r^2}\rho(r)dV = -dP.dA \qquad (1\,.\,\mathrm{II})$$

$$\mathrm{dV} = \mathrm{dA}\,. \qquad (2\,.\,\mathrm{II})$$

$$\mathrm{dV} = \mathrm{dA}\,.\,\mathrm{dr} \qquad (3\,.\,II)$$

فتصبح المعادلة (3 . III) كما يلي

$$\frac{\mathrm{G}\mathfrak{M}(\mathrm{r})}{\mathrm{r}^2}\rho(\mathrm{r})\mathrm{dV} = -\frac{\mathrm{dP}}{\mathrm{dr}}\,\mathrm{dV} \qquad (4\,.\,\mathrm{II})$$

فتكتب معادلة التوازن الهيدروستاتيكي كما يلي:

$$\frac{\mathrm{dP}}{\mathrm{dr}} = -\frac{\mathrm{G}\mathfrak{M}(\mathrm{r})}{\mathrm{r}^2}\rho(\mathrm{r}) \qquad (5\,.\,II)$$

يمكننا ايضا كتابة معادلة كما يلي

$$\frac{\mathrm{dP(r)}}{\mathrm{dr}} = -\rho(\mathrm{r})\mathrm{g(r)} \qquad (6\,.\,II)$$

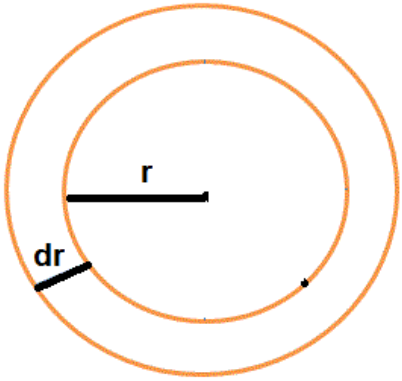
حيث $g(r)$ هو التسارع الناتج عن الجاذبية بواسطة

$$g(r) = \frac{G\mathfrak{M}(r)}{r^2} \qquad (7\,.\,II)$$

هذه المعادلة تصف أنه في أي نقطة في النجم، يجب أن يكون صافي القوة المؤثرة على عنصر حجم الغاز صفرًا، اما بالنسبة ل: g فهي الجاذبية الارضية P (N / kg) $g(r)$ (r)عند نصف قطر r في النجم، $\boldsymbol{\rho}$(r) كثافة الكتلة (kg / m^3) ، و $\mathfrak{M}$ (r) الكتلة الداخلية عند نصف قطر r. توضح الإشارة السالبة أن الضغط يتناقص مع زيادة نصف القطر داخل النجم[6].

II . 2 . 2 معادلة توزيع الكتلة:

نعتبر قشرة كروية من المادة النجمية بنصف قطر r وسُمك dr والتغيير المرتبط بالكتلة يعطى بالعلاقة $d\mathfrak{M}(r) = 4\pi r^2 \rho\, dr$. وبالقسمة على dr نتحصل على :



الشكل :(2 . II) قشرة كروية من الكتلة النجمية

الكثافة = $\frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}}$ ، $\rho = \frac{d\mathfrak{M}}{dr}$

لدينا الحجم $4\pi r^2$

$$\rho = \frac{d\mathfrak{M}}{4\pi r^2 dr} \longrightarrow d\mathfrak{M} = \rho\, 4\pi r^2 dr \qquad (8 . II)$$

نقسم على

$$\frac{d\mathfrak{M}(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad \text{(توزيع الكتلة)} \qquad (9 . II)$$

وهي المعادلة الأساسية الثانية التي تصف توزيع الكتلة داخل النجم[7].

II . 2 . 3 معادلة توزيع اللمعان:

نعتبر تدفق الطاقة من مركز النجم إلى سطحه.

اللمعان $\mathfrak{L}(r)$ عند نصف القطر r يعرف على انه الاستطاعة (W) التي تعبر من خلال السطح الكروي. وفقًا لهذا التعريف، فإن اللمعان النجمي لسطح الخارجي لنجم عند نصف القطر R هو $L = \mathfrak{L}(R)$.

في كل موقع داخل النجم يتواجد إمكانية توليد الطاقة من خلال التفاعلات النووية. يتم وصف ذلك بدالة توليد الطاقة $\epsilon\,(T, \rho)$ ، التي تعطي الطاقة المولدة لكل كيلوغرام

$(W\ /\ kg)$. نظرًا لأن ρ و T كلاهما دالتان لنصف قطر النجمr ، فإنه يمكن وصف دالة توليد الطاقة بدلالة r أي.ϵ(r)

فإن التغير في اللمعان $d\mathfrak{L}(r)$ الذي يعبر الغلاف الكروي بسمك dr يعطى بالعلاقة التالية.

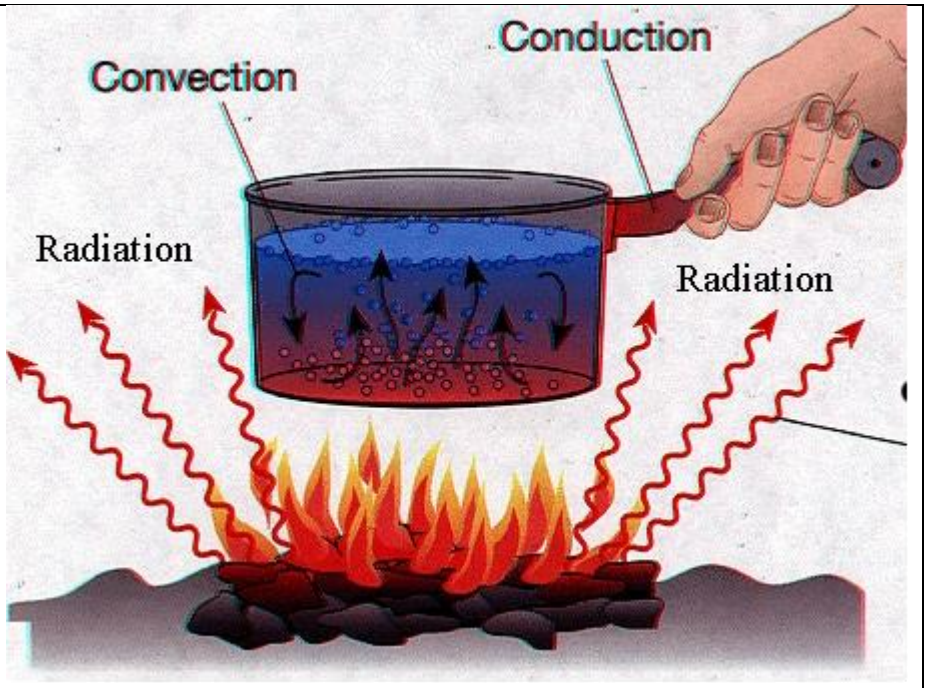
$$\frac{d\mathfrak{L}(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)\epsilon(r) \quad \text{(توزيع اللمعان)} \qquad (10\ .\ II)$$

هده المعادلة هي شكل اخر من معادلات حفظ الطاقة، وهي ثالث المعادلات الأساسية الأربع [7].

II . 3 الانتقال الحراري :

تعتبر الحرارة شكل من أشكال الطاقة تعبر على مدى حركية الذرات داخل جسم ما، وهي غير مرئية لكن يمكن الإحساس بها من حولنا عند تماس جسمان مختلفان في درجة الحرارة يلاحظ أن الفرق بين درجتي الحرارة فيهما يتناقص مع مرور الزمن حتى ينعدم، فيقال إن الحرارة قد انتقلت من الجسم الأعلى حرارة إلى الجسم الأقل حرارة. ويحدث مثل ذلك في الجسم الواحد إذا كان جزآن منه في درجتين من الحرارة مختلفتين فتنتقل الحرارة من الجزء الساخن إلى الجزء البارد.من الأمثلة على ذلك، عند وضع قطع ثلج (الحرارة لها تكون صفر مئوية أو أقل) إلى داخل وعاء به ماء بدرجة حرارة30°C يبدأ الثلج بالذوبان إلى أن يصبح للماء داخل الوعاء درجة حرارة واحدة، ذوبان الثلج ينتج عن اكتساب جزيئات الماء المتجمدة حرارة وتحصل عليها من الماء المحيط.هنا يجب التأكيد على أن الطاقة الحرارية مرتبطة بانتقال الطاقة بين الأجسام وليست مقياساً لدرجة حرارة الأجسام، لذا يجب التفريق بين الطاقة الحرارية لجسم ما ودرجة حرارته. وثلاث طرق رئيسية الانتقال الحرارة[8]

- التوصيل الحراري Conduction: انتقال الحرارة في الأجسام الصلبة حيث تنتقل الحرارة من جزيء الى جزيء آخر.
- الحمل الحراري Convection: يحدث هذا النوع في السوائل والغازات حيث أن القدرة الحرارية تنتقل مع المواد المنقولة.
- الإشعاع الحراري Radiation: يحصل الإشعاع الحراري في الأجسام الصلبة والسائلة والغازية حيث أن لها القدرة على إصدار طاقة حرارية على شكل موجات كهرومغناطيسية وبالعكس يمكنها أن تمتص مثل هذه القدرة الشعاعية [9].



شكل (II . 3): توضح طرق الإنتقال الحراري[10].

II . 3 . 1 الانتقال الحراري بالتوصيل:

عُرف على أنه الانتقال التلقائي للطاقة الحرارية عبر المادة من منطقة ذات درجة حرارة مرتفعة إلى منطقة أخرى ذات درجة حرارة أقل من سابقتها سعياً وراء الوصول إلى تجانس حراري. ففي الأجسام الصلبة رديئة التوصيل الكهربائي (العوازل) يتم انتقال الحرارة بفضل قوى المرونة التي تربط بين الذرات التي تهتز حول أوضاع توازنها، فالأمر هنا يقتصر على انتقال الطاقة الاهتزازية عبر الشبكة البلورية للجسم الصلب بشكل فوتونات.

أما في الموائع (السوائل والغازات) فيتم انتقال الحرارة بفضل اصطدام الجزيئات الأكثر حركية بأقلها طاقة، إذ يتم نقل طاقة الذرات المهتزة إلى الذرات الأكثر برودة القريبة عن طريق الاصطدامات ونقل الطاقة من خلال التوصيل يعمل بشكل أفضل في المواد الصلبة وليس في الغازات. إن التوصيل مسؤول عن نقل الطاقة في بعض النجوم مثل الأقزام البيضاء التي يكون باطنها في شكل متبلور بكثافة $\sim 10^6\ g\ cm^{-3}$ غير أن عملية التوصيل ليست لها أهمية في معظم النجوم الغازية الأخرى.

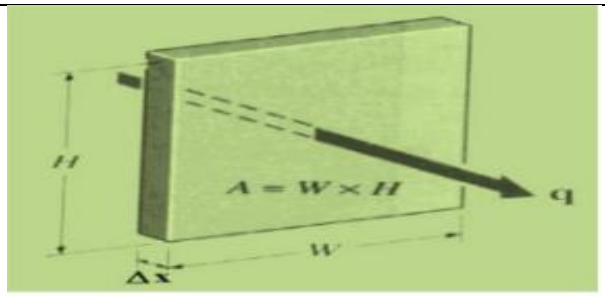
وفي الأجسام الصلبة جيدة التوصيل الكهربائي (المعادن) يتم انتقال الحرارة بفضل عاملين هما: قوى المرونة التي أشير إليها في حالة الأجسام الرديئة التوصيل الكهربائي، والإلكترونات الحرة وهي إلكترونات حرة في المعادن وتسلك سلوك الجزيئات في الغازات، وتنتشر خلال المعدن من المنطقة الأكثر حرارة إلى أقلها حرارة ناقلة الطاقة[8].

ونعتمد في الانتقال الحراري بالتوصيل على قانون فورييه

قانون فوريه للانتقال الحراري

أثبت التجارب انه وبمجرد وجود فرق بين سطحين في درجة الحرارة فإن هناك انتقالات في الطاقة الحرارية بينهما، وتنتقل هذه من السطح الساخن إلى السطح البارد، وقد استنتج الفيزيائي فوريه أن معدل التدفق الحراري عبر سطح مادة ما يتناسب مع الفرق في درجة الحرارة ومع مساحة السطح القائم الذي يعبره، وقد سمي بقانون فوررية للتوصيل الحراري يمكن توضيحه بالمعادلة كما سيأتي

لدينا الشكل التالي:



الشكل (II . 4) يوضح قانون فوررية للتوصيل الحراري

مسافة بين نقطتين 2 و1 $\Delta X = L$

مساحة السطح المتبادل A

سطح 1 عند الدرجة T_1

سطحه 2 عند الدرجة T_2

بحيث $T_1 > T_2$ $(T_1 = cte\,.T_2 = cte)$

تم قياس التيار الحراري q(w) الذي يعبر الجدار فلاحظ ما يلي

q تتناسب مع السطح A $q \propto A$

q تتناسب مع السطح ΔT $q \propto \Delta T$

q تتناسب مع السطح ΔX $q \propto \frac{1}{\Delta X}$

معنى دلك انه يمكن كتابة

$$q = -KA\frac{\Delta T}{\Delta X} \qquad (11\,.\,II)$$

K معامل التوصيل الحراري للجسم

وهي علاقة معادلة فوريه للتوصيل الحراري المستقر

$\left(\frac{\Delta T}{\Delta X}\right)$ تمثل تدرج درجة الحرارة سطح

وضع العلامة السالبة للحصول على كمية موجبة للتيار الحراري ودالك لان الحرارة تتسرب من الدرجة المرتفعة الى الدرجة المنخفضة($\Delta T > 0$) [8] .

II . 3 . 2 نقل الطاقة بالإشعاع:

يتم انتقال الحرارة بالإشعاع بين الأجسام والسطوح والموائع البعيدة عن بعضها والمختلفة في درجات حرارتها في صورة موجات كهرومغناطيسيه سرعتها تساوى تقريبا سرعة الضوء (3×10^8 m/s)، لذا فانتقال الحرارة بالإشعاع يعتبر أسرع طرق انتقال الحرارة.

عند دراسة عملية انتقال الحرارة بالإشعاع، يجب دراسة ومعرفة خواص الإشعاع الحراري وأيضاً دراسة ومعرفة قانون إستيفان بولتزمان للأجسام السوداء، وأخيراً فإن عملية انتقال الحرارة بالإشعاع بين الأجسام أو الأسطح المختلفة في درجة حرارتها تتوقف على شكل مقطع السطح أو الجسم المشع للحرارة والمسافة بين الأجسام وبعضها، كذلك يجب أن نعلم أن الإشعاع الحراري المنبعث من جسم ما لا يصل بالكامل إلى الجسم الآخر الذى يتبادل معه الحرارة بل يُفقد جزء منه، كل هذه العوامل يحكمها معامل يسمى معامل شكل الإشعاع

- قانون ستيفان بولتزمان:

لقد وضع هذا العالم الشهير قانوناً يوضح مقدار الطاقة الكلية المنبعثة من السطح الأسود اللون لأن هذا النوع من السطوح وكما نعلم يمتص الأشعة بنسبة عالية جدا وفى نفس الوقت يبعث الاشعة التي امتصها بنسبة عالية أيضاً. وقد وجد هذا العالم أن الطاقة الكلية المنبعثة من السطح الأسود بالنسبة لوحدة المساحة تتناسب تناسباً طردياً مع درجة الحرارة المطلقة لهذا الجسم مرفوعة للأس الرابع.

$$\frac{q}{A} \propto T^4$$

$$\frac{q}{A} = \sigma T^4$$

$$Q = \sigma A T^4 \qquad (12 . II)$$

حيث:

- Q: الطاقة المنبعثة الكلية من الجسم الاسود (واط) W
- A: مساحة سطح الجسم الاسود (متر مربع) m^2
- T : درجة الحرارة (بالكلفن) K
- σ :ثابت ستيفان بولتزمان $5{,}67 \times 10^{-8}$ $W/m^2.K^4$ [9].

II . 3 . 2 . 1 النقل بالإشعاع في الحالة النجمية:

المعادلة الأساسية الرابعة هي تعبير عن التدرج الشعاعي لدرجة الحرارة $T(r)$، أي $dT(r) / dr$. يعتمد محتوى هذه المعادلة على ما إذا كان نقل الطاقة نحو السطح يتم عن طريق نقل الإشعاع (الفوتونات) أو عن طريق الحمل الحراري.

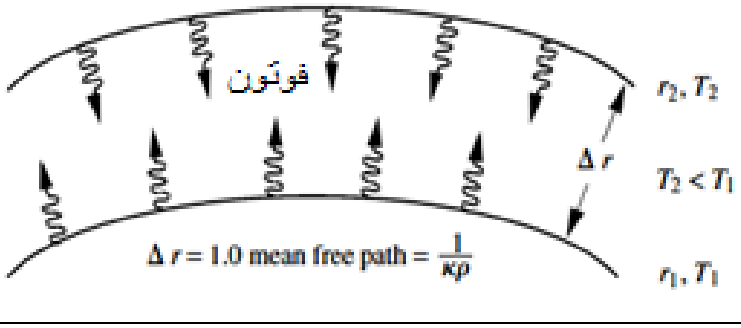
يحدث النقل بالإشعاع من خلال العديد من عمليات الامتصاص وإعادة الانبعاث حيث تعمل الفوتونات في طريقها نحو السطح النجمي، والحمل الحراري من خلال الحركات الضخمة للغاز.

باعتبار وجود تدفقات من سطحين كرويين مفصولين بمسار حر، $\Delta r = (\kappa\rho)^{-1}$، حيث κ هي العتامة. (m^2 / kg) أحد السطحين في الموضع r والآخر عند $r + \Delta r$.

كلاهما لهما درجات حرارة مختلفة قليلاً، الخارجي يكون أكثر برودة، ويشعان تجاه بعضهما البعض كأجسام سوداء بتدفقات $\mathcal{F} = \sigma T^4$.

يتم امتصاص أو تناثر التدفقات التي تصل إلى كل طبقة، لأن الطبقتين منفصلتان بمسار حر Δr، تستقبل الطبقة السفلية الأكثر سخونة تدفقات اعلى من الطبقة العلوية الأكثر برودة، ولكن ليس كل القوة التي تشعها

ان السطح الداخلي أكثر سخونة من السطح الخارجي (كما في النجم)، فهناك صافي تدفق للإشعاع في الاتجاه الخارجي[7].



الشكل (II . 5) نقل الطاقة بالإشعاع في الحالة النجمية

وبالتالي، يبقى هناك تدفق صافي للطاقة إلى الخارج من الطبقة السفلية، $r = r1$. صافي التدفق الخارجي من اجل مساحة مقطع $1m^2$ عند نصف قطر r هو

$$\mathcal{F}_{net} = \sigma T_1^4 - \sigma T_2^4 \qquad (13 . II)$$

ويكون التدفق فوق السطح الكروي بأكمله مساويا اللمعان عند نصف القطر r

$$L_{rad}(r) = \mathfrak{L}_{rad}(r) = -4\pi r^2(\sigma T_2^4 - \sigma T_1^4) \qquad (14 . II)$$

نستطيع كتابة هذه المعادلة بالشكل التفاضلي كتالي

$$\mathfrak{L}_{rad}(r) \approx -4\pi r^2 \frac{d(\sigma T^4)}{dr}\Delta r \qquad (15 . II)$$

حيث $r\Delta$ هي المسافة بين الأسطح. هذا الاشتقاق أكثر وضوح إلى حد ما(ويتم التعبير عنه بشكل صحيح في الإحداثيات الكروية). إذا حددنا اللمعان من حيث تدرج التدفق،

$$\mathfrak{L}_{rad}(r) \approx -4\pi r^2|\nabla\mathcal{F}|\Delta r, \mathcal{F} = \sigma T^4 \qquad (16 . II)$$

بتعوّيض $r = (\kappa\rho)^{-1}\Delta$ في العبارة السابقة، و بأخذ المشتق والحل من اجل التدرج الحراري نتحصل على

$$\left(\frac{dT(r)}{dr}\right)_{rad} = -\frac{3}{64\pi\sigma}\frac{\kappa(r)\rho(r)}{(T(r))^3 r^2}\mathfrak{L}(r), (K/m) \quad (17 . II)$$

وهذه العلاقة تعبر على الانتقال بالإشعاع أين $\sigma = 5{,}67.10^{-8}\ W/m^2 K^4$ هو ثابت بولتزمان، وκ هو التعتيم، وهو المقطع العرضي للامتصاص، والتشتت لكل كيلوغرام (kg/m^2) أو كليهما.

توضح معادلة النقل الإشعاعي أنه من اجل لمعان معتبر $\mathfrak{L}$ (r) عند نصف قطر r يتطلب تدرجًا كبيرًا في درجة الحرارة لدفع الطاقة عبر الطبقة Δr.

تؤدي العتامة العالية κ أيضًا إلى تدرج كبير في درجة الحرارة عند لمعان معين[7].

II . 3 . 3 انتقال الحراري بالحمل:

اختلاف الكتلة الحجمية للمائع من منطقة إلى أخرى بسبب اختلاف درجة الحرارة، إذ ان ازدياد درجة الحرارة يرافقه نقصان في الكتلة الحجمية لمعظم الموائع(السوائل والغازات)، فإذا زُوِّد المائع بالحرارة من الأسفل ارتفع المائع الأقل كثافة وحل محله الأكبر كثافة، فتحدث تيارات الحمل لنقل الطاقة الحرارية. ويوصف الحمل حينئذ بأنه طبيعي. اما إذا استعملت لنقل الحرارة مروحة أو مضخة لتوليد تيارات الحمل والمحافظة عليها كما هي الحال في التدفئة المركزية عادة حينئذ يعتبر هنا الانتقال بالحمل قسري.

للتعبير عن انتقال الحرارة بالحمل بين سطح ما ومائع يسري حوله نستخدم قانون نيوتن للتبريد، نفرض أن لدينا مائعاً (سائلاً أو غازاً) يتحرك فوق سطح ساخن فأننا نجد طبقة رقيقة film من المائع ملامسة للجدار الساخن لا تتحرك ويقل سمك هذه الطبقة إذا كان جريان المائع على السطح جرياناً اضطرابياً Turbulent Flow وفي كلتا الحالتين من انتقال التيار الحراري (يتم انتقال التيار الحراري بالحمل الطبيعي أو القسري) يتركز انتقال الحرارة على الطبقة الرقيقة التي لا تتحرك والملامسة للسطح حيث يتأثر النقل الحراري في هذه الطبقة الرقيقة من شدة التوصيل الحراري والحمل الحراري معاً حيث تنتقل الحرارة من السطح الى المائع بالتوصيل أما خلال المائع نفسه فتنتقل بالحمل.

إن جميع السوائل والغازات محاطة في مناطق التماس أو الحدود مع الجدران الصلبة التي تحويها بطبقة رقيقة من هذا السائل أو الغاز ولقد أثبت أن انتقال الحرارة يتم في هذه الطبقة الرقيقة جداً بعملية التوصيل Conduction وليس من السهل قياس سمك هذه الطبقة التي هي في الواقع تمثل مقاومة لانتقال الحرارة ولغرض ايجاد صيغة للتعبير عن هذه المقاومة فقد عبر عنها بدلالة مقلوب معامل إنتقال الحرارة 1/h. ولمجرد اعطاء فكرة عن سمك الطبقات المقاومة للحرارة في الموائع فقد وجد بشكل عام أن سمك طبقات الغاز يبلغ حوالي 0.1 من AUG، وللبخار المتكاثف على أنبوب يبلغ حوالي0.0001 من

AUG. وبذلك يكون عامل الحمل الحراري متأثراً بسمك هذه الطبقة الرقيقة وسمك هذه الطبقة يتأثر بدوره بنوعية الجريان على السطح.

إذا اردنا حساب كمية الحرارة المنتقلة خلال وحدة الزمن (التيار الحراري) من السطح الى المائع تستخدم المعادلة التالية:

$$Q = hA(T_S - T_f) \qquad (18 . II)$$

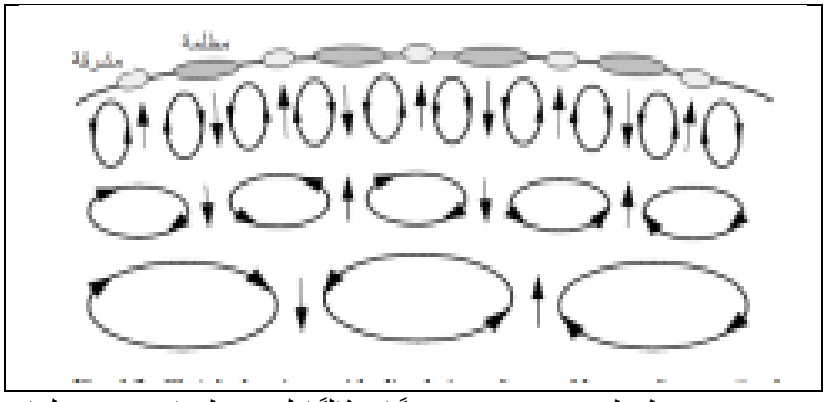
و تدعى هذه المعادلة بقانون نيوتن للتبريد

حيث:

- Q :التيار الحراري (w)
- h:هو معامل انتقال الحرارة بالحمل (.W/Km²)
- A:هي مساحة سطح الشريحة التي تنتقل خلالها الحرارة (m²)
- T_S:درجة حرارة سطح الشريحة
- T_f:درجة حرارة المائع [8].

II. 3 . 1 . 3 النقل الحراري بالحمل في الغازات:

إن آلية نقل الطاقة بالحمل الحراري تتم بنقل الطاقة عن طريق تصاعد فقاعات الغاز الساخن. عند الوصول إلى السطح، تبرد الفقاعات بسرعة ثم تنخفض إلى مستويات أقل، حيث تمتص الحرارة مرة أخرى وترتفع مرة أخرى. وهذا يؤدي إلى دورات مثل تلك الموضحة في الشكل التالي، والتي تنتج مناطق ساخنة وباردة على السطح. تظهر خلايا الحمل الحراري في صور عالية الدقة لسطح الشمس

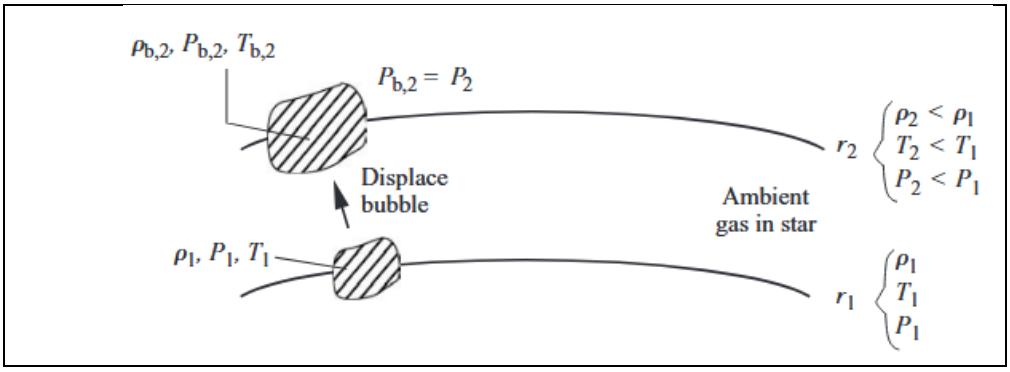


الشكل (6 . II) : رسم تخطيطي يوضح عرضًا مثاليًا لعدة طبقات من حلقات الحمل الحراري في منطقة الحمل الحراري من الشمس.

يشع الغاز الطاقة بسرعة عند وصوله إلى السطح. لذلك يُظهر السطح مناطق ساخنة واخرى أبرد في مواضع الغاز الصاعد والهابط على التوالي. تظهر هذه المناطق على شكل حبيبات مشرقة ومظلمة في الصور[7].

II . 3 . 3 . 2 شرط النقل بالحمل:

لنفترض أن نجمًا يحكمه انتقال الإشعاع حيث تنخفض درجة الحرارة مع الارتفاع (نصف القطر r)- أي (dT / dr <0 rad). باعتبار حجمًا صغيرًا ("فقاعة") من الغاز عند نصف قطر r_1. نجعله في حالة توازن مع محيطه بنفس كثافة الكتلة ρ_1 ودرجة الحرارة T_1.



الشكل (II . 7) الآن ندع الفقاعة تضطرب للأعلى (للخارج إلى r_2) إلى مستوى أبرد قليلاً في النجم، بينما تظل في توازن الضغط مع محيطها.

عندما يرتفع إلى مستوى ضغط منخفض، فإن الغاز سوف يتمدد ويبرد. إذا كان الارتفاع سريعًا بما فيه الكفاية، فإن حرارة ضئيلة ستغادرها أو تدخلها وسيحدث بذلك التمدد. ويحدث توازن اديابتيكي dQ = 0.

تكون الفقاعة ومحيطها أكثر برودة عند المستوى الأعلى مما كانت عليه في المستوى الأدنى. يعتمد مصير الفقاعة على أيهما أكثر برودة في المستوى الأعلى - الفقاعة أو المحيطة. إذا كانت الفقاعة أكثر برودة من محيطها، فستكون هي الأكثر كثافة (الضغوط تكون متساوية) وهذا ما يوافق حالة غير التوالد لمعادلة الحالة (EOS)، $P \propto \rho T$

نظرًا لكونها أكثر كثافة، فإنها ستعود إلى وضع التوازن، ولن يحدث الحمل الحراري من ناحية أخرى، إذا كانت درجة حرارة الفقاعة عند المستوى r2 أكبر من درجة حرارة محيطها، فستكون أقل كثافة وستستمر في الطفو لأعلى، ويحدث بذلك الحمل بالتالي، فإن من شروط الحمل الحراري يوافق بانخفاض بدرجة اقل في درجة حرارة الغاز في الفقاعة كلما زاد نصف قطر النجم في ظل تمدد كاظومي أكثر من المحيط.

علما ان المحيط يخضع للمعادلة النقل بالإشعاعي السابقة، فإن شرط النقل بالحمل الحراري المذكور سابقا هو (شرط الحمل)

$$\left|\frac{dT}{dr}\right|_{rad} > \left|\frac{dT}{dr}\right|_{adiab} \qquad (19 . II)$$

إن تدرج درجة الحرارة الثابتة مستقل عن اللمعان، و في المقابل يزداد التدرج الإشعاعي بزيادة اللمعان.

وفقًا لهذه المعادلة وقراءتها من اليسار إلى اليمين، فإن الحمل الحراري سيحدث إذا كان اللمعان $\mathfrak{L}(r)$ الذي يتم دفعه عبر النجم عند نصف قطرr، كبيرًا جدًا يتطلب تدرجًا إشعاعيًا في درجة الحرارة أكبر من التدرج الأديباتيكي الحمل الحراري هو عملية أكثر كفاءة لنقل الطاقة من نقل الإشعاع.

وبالتالي فإن علاقة شرط الحمل عند نصف قطر معين r، يجعل من النقل بالحمل الحراري آلية نقل الطاقة السائدة في تلك المنطقة، وعندها يكون للتدرج الحراري قيمة ثابتة اديبتيكيا.

في الواقع، اتضح أن التدرج بالقرب من أسطح النجوم مثل الشمس، ومع وجود الحمل الحراري في أجزائها الخارجية، يمكن أن يتجاوز التدرج في الواقع قيمة ثابتة اديبتيكيا[7].

II . 3 . 3 تدرج درجة الحرارة الكظوم :

نحسب هنا تدرج درجة الحرارة لفقاعة الغاز الصاعدة التي تمر بمرحلة تمدد كظوم عندا ضغط ثابت مع محيطها. ويتوافق هذا الضغط مع التوازن الهيدروستاتيكي.

يمكن صياغة تدرج درجة الحرارة dT / dr على النحو التالي

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_{adiab} = \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_{adiab}\frac{dP}{dr} + \left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_{adiab}\frac{dS}{dr}\left(\frac{dT}{dP}\right)_{adiab}\frac{dP}{dr} \qquad (20.\text{II})$$

حيث S هو متغير حالة آخر، وهو الإنتروبي. تعريف التغيير هو dS ≡ δQ / T، والشرط الكظوم السابق هو δQ = 0. وبالتالي فإن الجزء الموجود في أقصى اليمين هو صفر، $(dS / dr)_{adiab} = 0$.

هذا الحالة توحي في الحقيقة ان T هي دالة لمتغير حالة واحد فقط، وهو P، والآخر تم التخلص منه بواسطة الشرط الكظوم، $PV^{\gamma} = cons$. وبالتالي المشتق الجزئي ∂T / ∂P يكافئ المشتق التام dT / dP، كما هو موضح في المعادلة.

نقوم الآن بتقييم الحد $(dT / dP)_{adiab}$

يمكن إثبات أن عينة من غاز التي تتوسع أو تتقلص بدون إعتبار الشرط dQ = 0 تخضع للقيد (شرط الكظوم)

$$PV^{\gamma} = C_1 \quad , \quad \gamma \equiv \frac{C_P}{C_V} \qquad (21.\text{II})$$

حيث c_1 ثابت و γ هي نسبة درجات الحرارة النوعية لتغيرات الحالة مع الضغط الثابت والحجم الثابت

$$C_P = \left|\frac{\delta Q}{dT}\right|_P \quad , \quad C_V \equiv \left|\frac{\delta Q}{dT}\right|_V \qquad (22.\text{II})$$

وهي تعريفات درجة الحرارة النوعية ووحدتها ($JK^{-1}mole^{-1}$)

نتخلص من V *في علاقة شرط الكظوم* *قانون الغاز المثالي* *لمول واحد،* $PV = n\,RT$ *خذ مشتق* $dT\,/\,dP$ *، ثم احذف* c_1 *مع لإيجاد*

$$\left(\frac{dT}{dP}\right)_{adiab} = \left(1-\frac{1}{\gamma}\right)\frac{T}{P} \qquad (23\,.\,II)$$

المصطلح $dP\,/\,dr$ في له قيمة التوازن الهيدروستاتيكي، استبدلها وفي لإيجاد معادلة النقل الحراري،

$$\left(\frac{dT(r)}{dr}\right)_{adiab} = -\left(1-\frac{1}{\gamma}\right)\frac{T}{P}\frac{Gm(r)\rho(r)}{r^2}, \qquad (23\,.\,II)$$

$$= -\left(1-\frac{1}{\gamma}\right)\frac{m_{av}}{k}g(r) \quad (Convective\ transport) \qquad (25\,.\,II)$$

حيث γ هي نسبة درجات الحرارة المحددة، تم التخلص من المنتج ρ T بقانون الغاز المثالي، $P = \rho\,kT\,/\,mav$، وتم استدعاء تسارع الجاذبية $g\,(r) \equiv Gm\,/\,r^2$ هذا هو التدرج اللوني الذي يجب مقارنته مع انتقال الإشعاع في تحديد طبيعة نقل الطاقة. كما هو متوقع في المناقشة بعد، فهي مستقلة عن اللمعان.

قد يتم استيفاء شرط الحمل الحراري في بعض مناطق النجم وليس في مناطق أخرى.

على سبيل المثال، يكون نقل الطاقة في الشمس إشعاعيًا في $0.7\ R_\odot$ الداخلي والحمل الحراري في $0.3\ R_\odot$ الخارجي. في الأجزاء الخارجية من الشمس، حيث لا يوجد احتراق نووي، لا تختلف $\Omega\,(r)$ باختلاف نصف القطر ولكن درجة الحرارة تتناقص. الاعتماد، $\propto T^{-3}$ من التدرج الإشعاعي لدرجة الحرارة (24 . II) يدفعها إلى أعلى من التدرج الثابت للحرارة (25 . II)، ويتم استيفاء حالة الحمل الحراري[7]. .

الفصل الثالث

سلوك معادلات واليات نقل الطاقة لقرص تراكم حول ثقب أسود

III . 1 مقدمة:

يعد فهم أقراص التراكم حول الثقوب السوداء أمرًا مثيرًا للاهتمام في حد ذاته بسبب الفيزياء المعقدة، ولكنه أيضًا أساسي لفهم التطور المزدوج للمجرات وثقوبها السوداء النووية، أي أساسي لفهم نمو الهياكل في الكون. إن تدفقات المادة نحو الثقوب السوداء شعاعية تمامًا، وهو النموذج المعتمد عليه عند دراسة هذه الثقوب، نظرًا لصغر حجم الثقوب السوداء النجمية، فإن أحجام أقراص التراكم حولها تمتد على عدة مدرات من حيث الحجم من قربها من أفق الحدث، فتكون اكبر من 100.000 وتصل الى 1.000.00 من نصف قطر الثقب الأسود.

إن درجة الحرارة في القرص حول ثقب أسود ذو كتلة نجمية تتراوح من 10^7 K بالقرب من سطحه إلى 10^3 K عند الحافة الخارجية للقرص، والتي تبعد تقريبا 10^5 K نصف قطر الثقب الأسود.

في هذا الجزء سنركز درستنا على حالة التوازن الحراري لتدفقات التراكم حول الثقب الأسود من خلال وصف جديد لسلوك معادلات الاستمرارية والحفظ[12].

III. 2 المعادلات الأساسية:

لوصف المعادلات الأساسية نأخذ بعين الاعتبار أن تدفق التراكم يكون محوري في الحالة المستقرة، ونستخدم عبارة شبه الكمون $\Phi = -M_{BH} / (R - Rs)$، حيث M_{BH} هي كتلة الثقب الأسود و R_s هي نصف قطر *Schwarzschild* . ارتفاع المقياس الرأسي للتدفق ه $H = Cs / \Omega_K$ ، حيث Ω_K هي السرعة الزاوية الكبلرية و $Cs = (P / \rho)^{1/2}$ هي سرعة الصوت عند ثبوت الحرارة، أما P وρ فهما الضغط وكثافة الكتلة على التوالي. يتم التعبير عن معامل اللزوجة بالعلاقة

$\upsilon = \alpha CsH$ ، حيث α هي ثابت اللزوجة.

تحتوي المعادلات الأساسية التي تصف التدفق على معادلات الاستمرارية والزخم الشعاعي والزخم السمتي ومعادلات الطاقة[12].

III . 2 . 1 معادلة الاستمرارية (حفظ الكتلة):

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = -\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}(R\Sigma V_R) + \frac{S(R,t)}{2\pi R} \qquad (1 .\text{III})$$

حيث $S\ (R\ ،\ t)$هو حد مصدر المادة.

في حالة وجود قرص تراكم في نظام ثنائي

$$S(R,t) = \frac{\partial \dot{M}_{ext}(R,t)}{\partial R} \qquad (2 .III)$$

يمثل هذا الحد كمية المادة المتراكمة حول القرص التي عبرت من خلال فص روش، و هو معدل نقل الكتلة من النجم المصاحب غالبًا ما يفترض أن تدفق النقل يحصل بالضبط عند حافة القرص الخارجي

وسلوك هذه المعادلة في الحالة المستقرة يأخذ الشكل التالي

$$\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}(R\Sigma V_R)+\frac{1}{2\pi R}\frac{d\dot{M}}{dR}=0 \qquad (3\ .\ III)$$

حيث Σ هي كثافة السطح المحددة بـ $\Sigma = 2\boldsymbol{\rho H}$ ، و V_R هي السرعة الشعاعية والتي يتم تعريفها بأنها سالبة عندما يكون التدفق إلى الداخل.

ومعدل فقدان الكتلة للتدفق الخارجي $\dot{M}$ هو [13]

$$\dot{M}(R)=\int_{R_{in}}^{R}4\pi R'\dot{m}\ (R')dR' \qquad (4\ .\ III)$$

يشير R_{in} إلى نصف القطر عند الحافة الداخلية للقرص $\dot{m}$ هو معدل فقدان الكتلة لكل وحدة مساحة من كل وجه قرص.

نفترض أن مؤشر قانون الطاقة p يتناسب مع H/R للقرص، أي $p = \lambda\ (H/R)$ حيث λ ثابت، ويعد هذا الافتراض أكثر ملاءمة من القيمة الثابتة لـ p لنماذج التراكم المختلفة

وعليه نستطيع صياغة العبارة التالية [12]

$$\dot{m}=\frac{\dot{M}p}{4\pi R^2} \qquad (5\ .\ III)$$

III . 2 . 2 معادلة الاستمرارية (حفظ الزخم الزاوي)

$$\frac{\partial \Sigma l}{\partial t}=-\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}(R\Sigma l v_r)+\frac{1}{R}\frac{\partial}{\partial R}\left(R^3\Sigma v\frac{d\Omega}{dR}\right)+\frac{S_j(R,t)}{2\pi R} \qquad (6\ .\ III)$$

ان الزخم الزاوي ينتقل عبر القرص بواسطة إجهاد لزج $\tau_{r\varphi}=R\Sigma\nu d\Omega/dR$. بالنسبة للأنظمة الثنائية الشبه المنفصلة، يوجد مصدران (الزخم الزاوي الذي يجلبه نقل المادة من الرفيق النجمي) والثاني (تفاعل المد والجزر الذي يعيد الزخم الزاوي إلى المدار.

و لدينا ايضا:

$$S_j(R,t)=\frac{l_k}{2\pi R}\frac{\partial \dot{M}_{ext}}{\partial R}-\frac{T_{tid}(R)}{2\pi R} \qquad (7\ .\ III)$$

بافتراض $\Omega=\Omega_K$ ، يمكن استنتاج معادلة انتشار لكثافة السطح Σ

$l_k = R^2\Omega_K$ هو الزخم الزاوي الخاص بكبلر

$$T_{tid}(R)=cwR\boldsymbol{\upsilon\Sigma}\left(\frac{\boldsymbol{R}}{\boldsymbol{a}}\right)^{\mathbf{5}}$$

T_{tid}: العزم المتبادل (المد والجزر)

C : معامل ثابت.

a : الفاصل المداري للنظام الثنائي.

وسلوك معادلة الزخم الشعاعي والمعادلة السمتية في الحالة المستقرة يأخذ الشكل التالي

$$\frac{1}{R}\frac{d}{dR}(R^3 \Sigma V_R \Omega\ ) + \frac{1}{R}\frac{d}{dR}\left(R^3 v\Sigma \frac{d\Omega}{dR}\right) - \frac{(lR)^2\Omega}{2\pi R}\frac{d\dot{M}}{dR} = 0 \qquad (8\ .\ III)$$

$$V_R \frac{dV_R}{dR} + (\Omega_K^2 - \Omega^2) + \frac{1}{\rho}\frac{dP}{dR} = 0 \qquad (9\ .\ III)$$

الضغط P هو مجموع ضغط الغاز والإشعاع:

$$P = \frac{\rho k_B}{\mu m_\rho}(T_i + T_e) + \frac{Q_{rad}}{4c}\left(\tau + \frac{2}{\sqrt{3}}\right) \qquad (10\ .\ III)$$

حيث T_i و T_e هما درجة حرارة الأيونات ودرجة الحرارة الالكترونات،

$T_e = min(T_i, 6.10^9 K)$ و $\boldsymbol{\mu} = 0.617$ هو متوسط الوزن الجزيئي،

و $\boldsymbol{\rho H}$ $\tau = (\kappa_{es} + K_{abs})$ هو إجمالي العمق البصري و $\kappa_{es}=0.34cm^2/g$

$K_{abs} = 0{,}27 \times 10^{25}\rho T_e^{-3{,}5} c\, m^2/g$[14]

III . 3 . 2 معادلات حفظ الطاقة:

تتم كتابة معادلة الطاقة كتالي

$$Q_{Vis} = Q_{adv} + Q_{rad} + Q_W \qquad (11\ .\ III)$$

حيث Q_{vis} و Q_{adv} و Q_{rad} هي معدل التسخين اللزج ومعدل التبريد الأفقي ومعدل التبريد الإشعاعي وعبارتهم تعطى على الشكل التالي .

$$Q_{adv} = \frac{1}{4\pi}\frac{\dot{M}C_S^2}{R^2} \qquad (12\ .\ III)$$

$$Q_{rad} = 8\sigma T_e^4 \left(\frac{3\tau}{2} + \sqrt{3} + \frac{8\sigma T_e^4}{Q_{br}^-}\right)^{-1} \qquad (13\ .\ III)$$

يتم إعطاء تبريد Q_{br}^- بواسطة [15]

$$Q_{br}^- = 1{,}24 \times 10^{21} H\rho^2 T_e^{1/2} erg\ s^{-1} cm^{-2}$$

تمثل Q_w الطاقة المأخوذة بعيدًا عن التدفقات الخارجة ، والتي يتم التعبير عنها كـ

$$Q_w = \frac{f\eta p\dot{M}\,\Omega_K^2}{2\pi} \qquad (14\ .\ III)$$

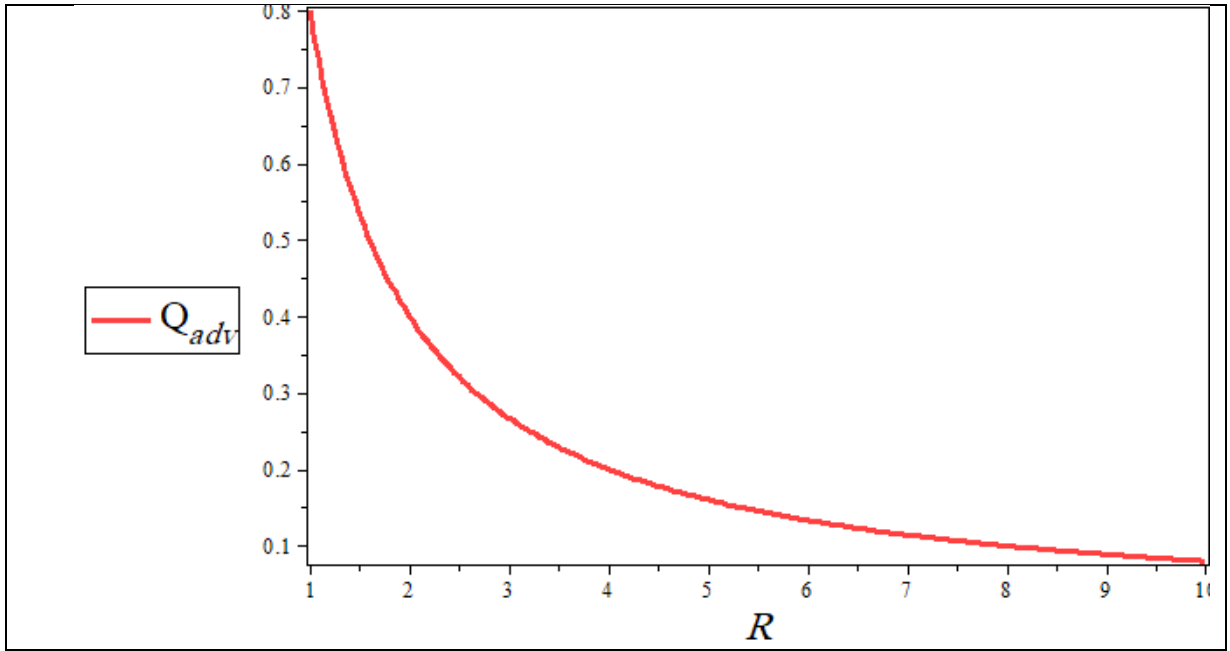
علما أن $f = 1 - [\Omega(3R_g)/\Omega(R)]\ (3R_g/R)^{P+2}$ و η هي معامل طاقة التدفق الخارجي

III . 3 نتائج وتحاليل:

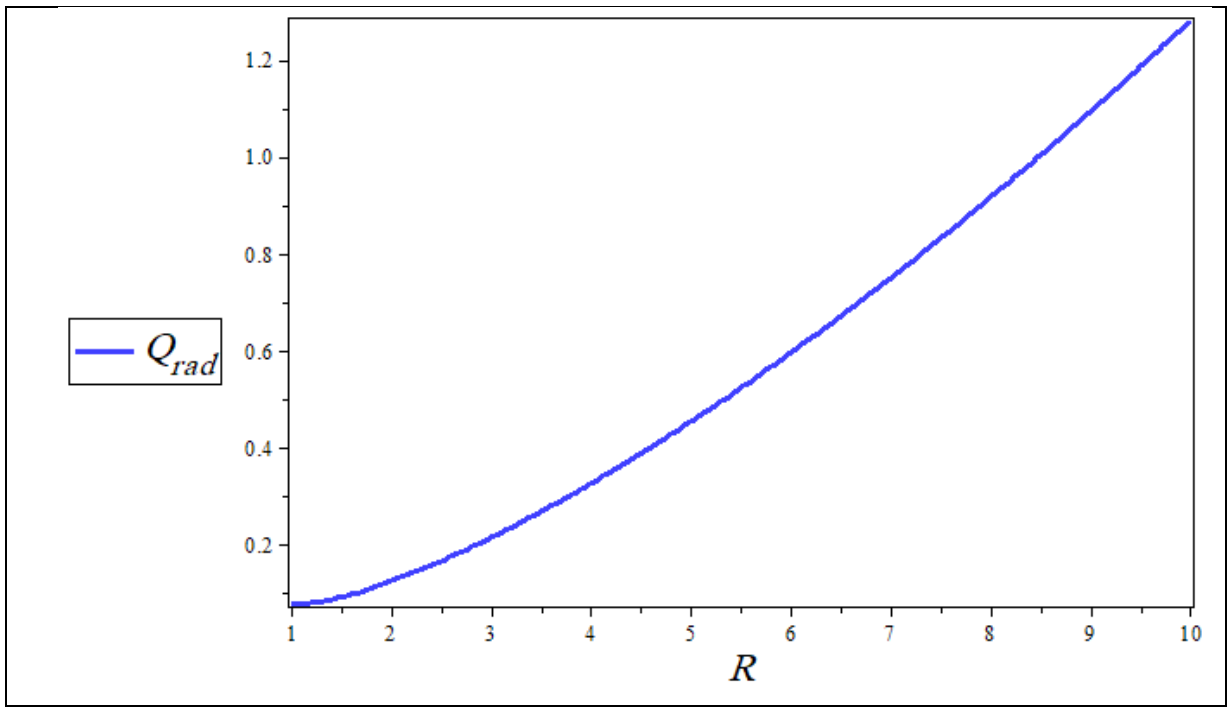
إن نقل الطاقة المتراكمة في حالة الاقراص حول الثقوب السوداء تعنى بدراسة سلوك معادلات نقل الطاقة بالحمل ونقل الطاقة ب الاشعاع ، نعتبر أن

$M_{BH} = 10M_{\odot}, \alpha = 0.1$ و $l = 1$.

تحصلنا على المنحنيات البيانية التالية



الشكل (III . 1) **منحنى بياني يوضح معدل تبريد في حالة الحمل الحراري**



الشكل (III . 2) منحنى بياني يوضح معدل تبريد في حالة الإشعاع الحراري

III . 5 تحليل المنحنيات:

يعتبر الحمل و الاشعاع الحراري طرق لنقل الطاقة بين النجم (الثقب الاسود) و القرص :

يوضح الشكل (III. 1) معدل التبريد بالحمل Q_{adv} حول ثقب الأسود بدلالة نصف القطر حيث يكون سلوك نقل الطاقة بالحمل الحراري أكثر وضوحا داخل القرص

يوضح الشكل (III . 2) معدل التبريد بالإشعاع Q_{rda} حول ثقب الأسود بدلالة نصف القطر حيث يكون سلوك نقل الطاقة بالحمل الحراري أكثر وضوحا خارج القرص

الملحق 1

معادلة الحالة لمكسويل بولتزمان EOS

معادلة EOSهي رابع معادلات الأساسية للبنية النجمية تستخدم لوصف سلوك الغازات في الفيزياء الإحصائية وتعتمد على توزيع مكسويل بولتزمان لسرعات الجزيئات في الغاز. تعبّر عنها بالشكل التالي:

$$PV = NkT$$

حيث:

- P : هو الضغط (Pressure) بوحدة باسكال (Pa) أو أي وحدة أخرى معتمدة للضغط.
- V : هو الحجم (Volume) بوحدة متر مكعب (m^3) أو أي وحدة أخرى معتمدة للحجم.
- N : هو عدد الجزيئات (Number of particles) في الغاز.

k: هو ثابت بولتزمان (Boltzmann constant) وقيمته تعتمد على الوحدات المستخدمة في الضغط والحجم ودرجة الحرارة. قيمة k في وحدة الضغط الباسكال والحجم المتر المكعب ودرجة الحرارة الكلفن (Kelvin) هي حوالي

$$1.38\ 810_23\ J\ /.\ K$$

الملاحق 2

المعادلات الاساسية لدراسة التراكم حول ثقب الاسود

نصف قطر شوارزشيلد (نصف قطر ثقب أسود غير دوار) هو

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} = 2.95 \times 10^5 \frac{M}{M\odot} cm$$

سرعة الضوءCكتلة الجاذبية و M حيث

يعطى بالعلاقة التالية **إنديجتون معدل تراكم**

$$\dot{M_{Edd}} = \frac{L_{Edd}}{\eta c^2} = \frac{1}{\eta}\frac{4\pi GM}{c\kappa_{es}} = \frac{1}{\eta}\frac{2\pi cR_s}{\kappa_{es}}$$
$$= 1.6 \times 10^{18} \eta_{0.1}^{-1} \frac{M}{M_\odot} g\ s^{-1}$$

κ هي عتامة تشتت $_{es}$هي الكفاءة الإشعاعية للتراكم، و $_{0.1}$ η =0.1η حيث الإلكترون (طومسون). غالبًا ما نستخدم معدل التراكم المقاس بوحدات معدل إدينجتون: تراكم

$$\dot{m} = \frac{\dot{M}}{\dot{M_{Edd}}}$$

α – prescription هي وصف مبسط إلى حد ما لفيزياء القرص التراكمي ولكن قبل أن يتم تقديم خيارات أفضل وأكثر موثوقية من الناحية المادية تجعل بساطتها أفضل خيار ممكن وكانت المصدر الرئيسي للتقدم في وصف أقراص

نضع في اعتبارنا أن اللزوجة الدافعة التراكمية من أصل مغناطيسي، ولكن نستخدم موتر الإجهاد الهيدروديناميكي هو.وصفًا هيدروديناميكي فعالًا لتدفق التراكم

$$\tau_{\tau\varphi} = \rho v \frac{\partial \vartheta_{\varphi}}{\partial R} = \rho \frac{d\Omega}{d \ln R}$$

سرعة الدوران الزاوية $\vartheta\varphi$معامل اللزوجة الحركية و νهي الكثافة ، ρ حيث $(\vartheta\varphi = R\Omega)$

اقترح شاكورا وسونيايف الطريقة المعمول به الى حد الان 1973في عام

$$\tau_{r\varphi} = \alpha p$$

هذا يؤدي إلى . $\alpha \leq 1$ هو الضغط الحراري الكلي و P حيث

$$v = \alpha c_s^2 \left[\frac{d\Omega}{d \ln R}\right]^{-1}$$

هي سرعة الصوت متساوي الحرارة و ρ الكثافة. $c_s = \sqrt{P/\rho}$ حيث

بالنسبة للسرعة الزاوية الكبلرية

$$\Omega = \Omega_{\mathrm{K}} = \left(\frac{GM}{R^3}\right)^{1/2}$$

يصبح هذا

$$v = \frac{2}{3} \alpha c_s^2 / \Omega_K$$

يكون معدل التسخين اللزج لكل وحدة حجم

$$q^+ = -\tau_{\tau Q} \frac{d\Omega}{dlnR}$$

$$2\pi R\Sigma vR\frac{d\Omega}{d\ln R}$$

أي

$$\Sigma=\int_{-\infty}^{+\infty}\rho dz$$

لقرص كبلر

$$\Omega=3\pi\Sigma v\ell_K$$

$\ell_K = R^2\Omega_K$ هو الزخم الزاوي الخاص الكبلري.

$\tau_{\tau\varphi}$ ($d\Omega/dR$) يتناسب التسخين اللزج مع

باستخدام المعادل التوازن الهيدروستاتيكي التقريبي يمكن كتابة هذا على النحو التالي

$$v=\frac{2}{3}\alpha c_s H$$

والمتوسط على ارتفاع القرص (2πR)قرص بضرب قيم المعادلة في نصف قطر (الإجمالي) نتحصل على التعبير عن عزم الدوران الكلي

$$\Omega=2\pi R\Sigma vR\frac{d\Omega}{d\ln R}$$

الخلاصة العامة

الخلاصة العامة

قمنا في هذا العمل بدراسة مبسطة لـ التوازن الحراري لأقراص التراكم وسلوك معادلات الطاقة، لأجل هذا قدمنا هذا العمل في ثلاثة فصول على النحو التالي.

الفصل الأول: تطرقنا فيه الى تعريف ظاهرة التراكم و ماهية ظاهرة التراكم وثم قمنا بدراسة وصفية لقرص التراكم الذي هو تجمع كثيف من غاز و الغبار يدور حول جرم سماوي وكيفية تشكلها و نماذجه .

الفصل الثاني: تطرقنا الي معدلات الاربعة الاساسية للبنية النجمية والتعرف على اليات نقل الطاقة داخل النجم التي لها ثلاث اشكال: انتقال الحرارة بـ (التوصيل، الاشعاع، الحمل) و هي رابع معدلات الاساسية .

الفصل الثالث: ختمنا درستنا هده ب سلوك معدلات واليات نقل الطاقة لقرص تراكم حول ثقب أسود حيث وضحنا معدلات الاستمرارية للحفض و رسم وتحليل المنحنيات لنقل الطاقة حول ثقب الاسود للحمل والاشعاع.

وفي أخير نأمل أن تكون دراستنا هذه نقطة انطلاق جيدة الى طرح اقتراحات و أفكار قد تكون منطلقات لأعمال اخرى .

- ماهي حلول التوازن الحراري لتدفقات تراكم الثقب الاسود ؟
- مادة يحدث لسلوك معدل تبريد التدفقات الخارجة ؟

قائمة المراجع:

[1] Belghitar (E. B) (Etude théorique d'un disque d'accrétion stellaire) Thèse de Doctorat , Université Kasdi Merbah Ouargla 22/10/2020.

[2] Martin Harwit, Astrophysical concepts, Springer, 2006

[3] Guillaume TRAP, (Étude du Trou Noir Massif Central de la Galaxie et de son environnement), Thèse de Doctorat, Université Denis Diderot, 21 septembre 201.

[4] Marion Cadolle Bel,(Étude des émissions à haute énergie des trous noirs stellaires accrétants), Thèse de Doctorat, Université Paris 7, 13 septembre 2006.

[5] Maxime VIALLET,(Irradiation del'environnement et instabilités du disque d'accrétion dans les systèmes binaires et les noyaux actifs de galaxies), Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg, 21 septembre 2008.

[6]http://hdl.handle.net/123456789/19470, UNIT 8 STELLAR STRUCTURE, 2017.

[7] www.cambridge.org/9780521846561.

,H A L E B R A D T) ASTROPHYSICS PROCESSES(Massachusetts Institute of Technology.

[8] https://zoom-teach.blogspot.com › الديناميكا الحرارية .

[9] https://faqr.stafpu.bu.edu.eq انتقال الحرارة

[10] https://faqr.stafpu.bu.edu.eqcrs -10552 الفصل الخامس انتقال الحرارة بالإشعاع

[11] Jean-Pierre Lasota. Black hole accretion discs, UPMC Universit´e Paris 06, 20 Jun 2016.

Thermal ([12] Wen-Biao Wu, Wei-Min Gu , and Mouyuan Sun, Equilibrium Solutions of Black Hole Accretion Flows: Outflows versus ,Xiamen University, 2022 May 10)Advection

[13] Blandford, R. D., & Begelman, M. C. 1999, MNRAS, 303, L1

[14] Abramowicz, M. A., Chen, X. M., Granath, M., & Lasota, J. P. 471, 762،1996, ApJ

[15] Abramowicz, M. A., Chen, X., Kato, S., Lasota, J.-P., & Regev, ApJL, 438, L37،O. 1995

ملخص:

يعد قرص التراكم الآن النموذج المقبول لوصف العديد من الظواهر النشطة، تتكون أقراص التراكم من حبيبات غاز وغبار ، وتدور حول جسم مركزي مثل نجم فتي ، قزم أبيض ، نجم نيوتروني أو ثقب أسود ، درجة حرارة سطح القرص التي تحدد مقدار الطاقة التي يفقدها الإشعاع ، تحكمها في المقام الأول معدل تبديد الطاقة في القرص ، والذي يُعطى بدوره من خلال معدل التراكم و القانون الأول للديناميكا الحرارية تختلف درجة الحرارة الداخلية للقرص تماما وتعتمد على آلية نقل الطاقة إلى السطح. يمكن إيجاد تقريب لدرجة الحرارة في القرص عند عمل عدد من الافتراضات الإضافية، وبافتراض التوازن الحراري يتم إعطاء بنية أقراص التراكم.

ـ **الكلمات الدالة :** قرص التراكم التوازن الحراري، جسم مركزي، آلية نقل الطاق

résumé:

Le disque d'accrétion est maintenant le modèle accepté pour décrire de nombreux phénomènes énergétiques. Les disques d'accrétion sont composés de grains de gaz et de poussière, et orbitent autour d'un corps central tel qu'une jeune étoile, une naine blanche, une étoile à neutrons ou un trou noir. La température de surface de Le disque, qui détermine la quantité d'énergie perdue par rayonnement, est régi par En premier lieu, le taux de dissipation d'énergie dans le disque, qui à son tour est donné par le taux d'accumulation et la première loi de la thermodynamique. du disque est assez différente et dépend du mécanisme de transfert d'énergie vers la surface. Une approximation de la température dans le disque peut être trouvée lorsqu'un certain nombre d'hypothèses supplémentaires sont faites, et en supposant l'équilibre thermique, la structure des disques d'accrétion est donnée.

Mots clés : disque accumulateur, équilibre thermique, corps central, mécanisme de transfert d'énergie

summary:

The accretion disk is now the accepted model for describing many energetic phenomena. Accretion disks are composed of grains of gas and dust, and orbit around a central body such as a young star, white dwarf, neutron star or black hole. The surface temperature of the disk, which determines the amount of energy lost by radiation, is governed by In the first place is the rate of energy dissipation in the disk, which in turn is given by the rate of accumulation and the first law of thermodynamics. The internal temperature of the disk varies completely and depends on the mechanism of energy transfer to the surface. An approximation of the temperature in the disk can be found when a number of additional assumptions are made, and assuming thermal equilibrium the structure of the accretion disks is given.

Keywords: accumulator disc, thermal equilibrium, central body, energy transfer mechanism