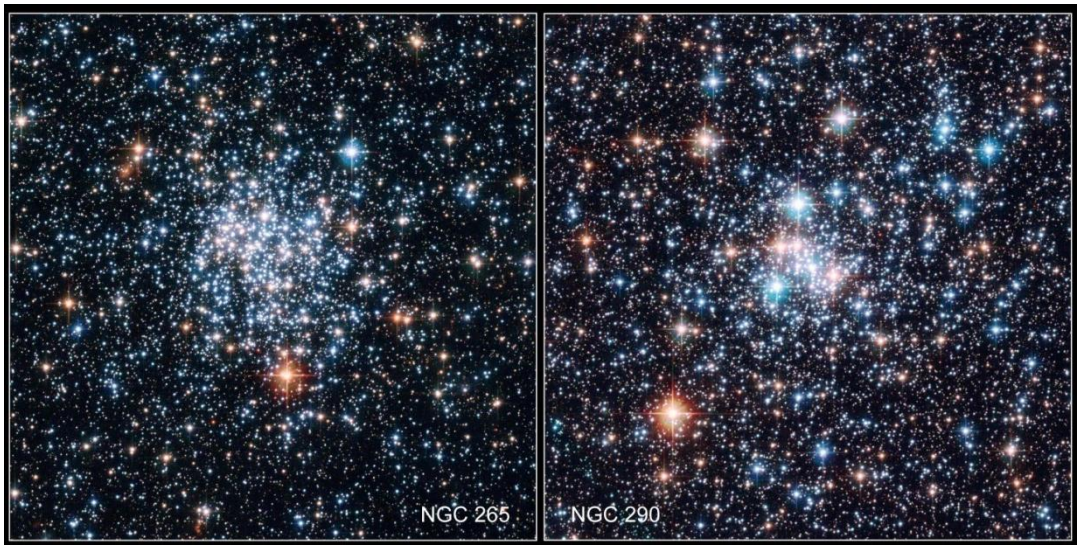
فيزياء النجوم
Physics of stars

تأليف

يتكون هذا الكتاب من جزئين رئيسيين الأول عن النجوم والثاني عن المجرات والكون
ويتكون الجزء الأول من ستة فصول ومقدمة وهي كالتالي:

1- مقدمة عن النجوم في الحضارة الاسلامية
2- فيزياء الشمس
3- خواص أساسية للنجوم وفيه ندرس أنواع النجوم وبعض خصائصها.
4- النجوم المتغيرة والحشود النجمية.
5- تركيب النجوم وتفاعلاتها النووية.
6- مهد النجوم وهي سحب ضخمة بين النجوم يحدث انكماش في أجزاء منها لتتكون النجوم الجديدة.
7- قصة حياة النجوم وهي من المواضيع المثيرة والمليئة بالمعجزات حيث نستعرض تفاصيل حياة الشمس وكيفية تطورها في المستقبل وأخيراً نتعرف على النهاية التي يمكن أن تنتهي إليها النجوم من أقزام بيضاء ونجوم نيوترونية وثقوب سوداء.



حشود من النجوم في سحابة ماجلان الصغرى، يمين: الحشد NGC 290 ويسار: الحشد NGC 265 (ESA)

أما الجزء الثاني فيتكون من أربعة فصول كالتالي:

1- مجرتنا

2- عالم المجرات

3- المجرات النشطة

4- علم الكون

الفصل الثالث

استنتج بالبرهان أن الكواكب تدور حول الشمس بانتظام والقمر يدور حول الأرض. ابن الشاطر (ولد سنة 704 هجرية).

الخواص الفيزيائية الأساسية للنجوم
Main Physical properties of stars

مخرجات التعلم(Intended learning outcomes (ILOs

عندما يدرس الطالب ةهذا الجزء فإنه يكون قادرا علي معرفة كيفية حساب الكثير من الخصائص الفيزيائية للنجوم والتي يمكن تلخيصها فيما يلي :

1- أقدار النجوم ومن ثم لمعانها

2- ابعاد النجوم بأكثر من وسيلة
3- ألوان النجوم والكثافة الإشعاعية
4- الأنواع الطيفية
5- درجات الحرارة وضياء النجوم
6- أنصاف أقطار النجوم وكتلها

الفكرة المركزية للفصل

تمكن الفلكيين من حساب الكثير من الخصائص الفيزيائية للنجوم.

مقدمة:

إن عالم النجوم كبير متنوع مليء بالأسرار والعجائب التي مرت بها البشرية وعلمتنا الكثير عن الكون وأعماقه، وحينما ينظر أحدنا إلى السماء في ليلة صافية وبعيدا عن أضواء المدن فسوف يرى أعدادا كبيرة من النجوم، وإذا نظر من خلال عدسة التلسكوب فإن عدد ما يراه من نجوم سيزيد بشكل هائل. ونحصل على المعلومات المختلفة عن النجوم من خلال تسجيل حركتها (السنوية) أو من خلال دراسة الطيف الصادر عنها والذي نفهم من خلاله الكثير من الخصائص الفيزيائية للنجوم، درجة لمعانها، ودرجة حرارتها، بل وتركيبها أيضاً. توجد ثلاث خصائص رئيسية مهمة نحتاج لتعيينها من خلال الأرصاد هي: بعد النجم، لمعان النجم، وطيف النجم. ومنها يتم تحديد مجوعه من الخصائص كما ستضح فيما بعد. كما يمكن تحديد سرعات النجوم من خلال تحديد الإزاحة الطيفية الناتجة عن الحركة. ستلعب الدراسات الطيفية دورا مهما في معرفة الكثير من خصائص النجوم. ونتج عن الدراسات المستفيضة لعالم النجوم أن تعرفنا على كيفية تطور النجوم . كيف بدات حياتها وكيف تصل للمراحل النهائية من حياتها وكيف تموت النجوم. هذه كلها تمثل حقيقة دامغة أن أهم ما افرزته الأنشطة العلمية في العصر الحديث هو معرفة قصة حياة النجوم وهي قصة مليئة بالآيات العظيمة التي أبهرت البشرية ويجد فيها الدارس الكثير من التشويق والاعتبار.

أقدار النجوم Magnitudes of the stars

قسم أسلافنا النجوم من حيث اللمعان إلى أقدار بحيث تكون النجوم اللامعة من القدر الأول 1 والأقل لمعاناً من القدر الثاني 2 وهكذا حتى أخفت النجوم التي رصدوها كانت من القدر السادس وهي أقصى حدود الرصد بالعين البشرية. وكان العرب يستخدمون النجوم في اختبار القدرة البصرية عند الناس فمن يستطيع أن يرى نجوم القدر السادس فبصره 6 على 6 ومن يرى فقط نجوم القدر الخامس يكون بصره 5 على 6 وهذا التدريج في قدرة البصر أخذناه عنهم. ونلاحظ أن أبو الحسن الصوفي في تصنيفه للنجوم كان يضع تقسيمات فرعية للأقدار الستة المعروفة. وبعد ظهور التلسكوبات أصبح لدى الإنسان القدرة على رصد نجوم خافتة جداً حتى القدر 30 باستخدام تلسكوب هابل. كما تم اعتبار أقدار بالسالب لتعبر عن أجرام أشد لمعاناً، وبهذا فإن القمر يكون من القدر 12.6- وكلما زاد اللمعان كان القدر رقم أصغر كما هو موضح في جدول 10-1.

وضع الفلكيون علاقة بسيطة بين لمعان النجوم وأقدارها وذلك لمعرفة لمعان النجم بدلالة قدره وبالعكس. لقد ارتأى الفلكيين أن يستخدموا النظام العشرى فى وضع مقياس بين القدر (m) واللمعان (b)

والبداية هي أن نفترض أن النسبة بين لمعان نجمين من القدر الأول b_1 إلى القدر السادس b_6 يساوي 100 أي أن:

$$\frac{b_1}{b6} = 100 \qquad (3.1)$$

ومن ثم فإن:

$$\frac{b_1}{b_2} = \sqrt[5]{100} \cong 2.5 \qquad (3.2)$$

لذا يمكن وضع مقياسا لأقدار النجوم بحيث إن نسبة اللمعان لنجمين تساوي 2.5 مرفوعة لأس مساو للفرق بين قدريهما، فلو افترضنا أن القدر واللمعان لكل من الشمس ونجم آخر هما على التوالي: b_1,m_1 & b_2,m_2 فإن نسبة لمعانهما b_1/b_2 تحسب بالعلاقة:

$$\frac{b_1}{b_2} = (2.5)^{m_2 - m_1} \qquad (3.3)$$

هذه هي المعادلة بشكلها العام. ويمكن إعادة صياغتها على الوجه التالي:

$$\frac{b_1}{b_2} = 10^{0.4(m_2 - m_1)} \qquad (3.4)$$

وبأخذ اللوغاريتم للطرفين نحصل على المعادلة التالية:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = 2.5 \log\left(\frac{b_1}{b_2}\right) \qquad (3.5)$$

وبالتالي فإن نجمين لهما نسبة لمعان $(2.5)^4$ فإن الفرق بين قدريهما هو 4 فلو كان النجم الأول من القدر 1 فسيكون الثاني من القدر 5. وبالطريقة نفسها يمكن حساب الأقدار لأي نجم من معرفة درجة لمعانه، أو بمعنى أصح من (قدرته الإشعاعية). والقاعدة أن أقدار النجوم تقل بتزايد لمعانها والعكس صحيح. ويمكن من خلال هذه القاعدة البسيطة أن نلاحظ أنه إذا كان نجما أو مجرة لها فرق قدر عن شمسنا قيمته 10 فإن لمعانها يزيد 10 آلاف مرة، والفارق في القدر بمقدار 15 يقابله فرق في اللمعان مقداره مليون. وبهذه الطريقة نلاحظ أن التغيرات في القدر أرقاما صغيرة يقابله في اللمعان تزايد بشكل كبير. وبشكل عام لأي نجمين x, y يمكن حساب نسبة اللمعان بدلالة قدريهما باستخدام العلاقة

$$\therefore \log\left(\frac{b_x}{b_y}\right) = 0.4(my - mx) \qquad (3.6a)$$

أو

$$m_y - m_x = 2.5 \log\left(\frac{b_x}{b_y}\right)$$

مثال :

القدر الظاهرى للنجم المتغير RR القيثاره يترواح ما بين 7.8 → 7.1 . ما معنى الزيادة النسبية فى اللمعان؟

$$\log\left(\frac{b_{max}}{b_{min}}\right) = 0.4 \times (7.8 - 7.1)$$
$$= 0.28$$

$$\therefore \left(\frac{b_{max}}{b_{min}}\right) = 10^{0.28} = 1.91$$

اى أن النجم RR القيثارة يزداد لمعانه تقريبا للضعف ما بين أقل او أكثر قيم للمعان.

ومن العلاقات المهمة أيضا تلك العلاقة بين اللمعان والبعد. حيث يقل لمعان النجم b مع زيادة بعده عنا r تبعا للعلاقة التالية:

$$b \ \alpha \ \frac{1}{r^2} \qquad (3.7)$$

$$\frac{b_1}{b_2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \qquad (3.8)$$

من المعادلتين (3.5) و (3.8) نحصل على ما يلي:

$$\Delta m = 5 \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \qquad (3.9)$$

المعادلة (3.4) تعطي نسب اللمعان بدلالة فرق الأقدار، أما معادلة (3.8) فتعطي نسب اللمعان بدلالة نسب مربع الأبعاد. ومن المعادلة(3.9) يمكن تحديد الفرق في القدر عندما تتغير المسافة من r_1 إلىr_2 .

القدر الظاهري Apparent magnitude

للنجوم قدر ظاهري وهو الذي نرصده لها، وبالطبع فإن الشمس لها أصغر قدر ظاهري ويساوي 26.7- أي أعلى لمعان ظاهري، ويليها القدر الظاهري للقمر 12.6- ثم الزهرة بقدر 4.4- ثم المريخ والمشتري حوالى 2-، ألمع النجوم هو الشعرى اليمانية وقدره 1.5- أما بلوتو فله قدر ظاهري مقداره 14.9 ، انظر جدول 10-1. والعين البشرية لا تستطيع أن ترى نجوما أعلى من القدر السادس. والإشارة السالبة تعنى لمعانا أصغر بينما الموجبة تعنى لمعانا أكبر. والمفترض أن القدر من الخواص الملازمة للنجوم، فإذا حدث تغير لهذا القدر فهذا يعني أن النجم غير مستقر وأنه من النجوم المتغيرة أو الموجودة في نظام ثنائي. ولكن لا نستطيع من خلال القدر

الظاهري للأجرام أن نحكم على شخصيتها ومدى لمعانها بشكل حقيقي، فقد يكون القدر الظاهري لنجم ما صغير لقربه منا بينما القدر الظاهري كبيرا لنجم بعيد عنا وهو في الأصل لامع. كذلك نلاحظ أن القمر ظاهريا ألمع من كوكب الزهرة رغم أن الزهرة أكبر بكثير من القمر، ولكن لقرب القمر وبعد الزهرة النسبي نرى القمر أكثر لمعانا من الزهرة. ونفس المقارنة يمكن أن نعقدها بين أي من النجوم والقمر مثلا، ولذلك تعارف الفلكيون على قدر آخر أسموه القدر المطلق وفكرته هو البحث عن وسيلة نلغي بها تأثير المسافات على لمعان النجوم.

جدول 3-1 أ: القدر الظاهري لبعض الأجرام

الجرم / قدرة التلسكوب	القدر الظاهري
تلسكوبا Hubble, Keck	30
تلسكوب Hale	28
تلسكوب بقطر 4 أمتار	26
تلسكوب بقطر 1 متر	18
دربيل	10
العين المجردة	6
النجم القطبي	2.5
منكب الجوزاء	0.8
ألفا قنطورس	0.0
الشعرى اليمانية	-1.5
الزهرة (عند أقصى لمعان)	-4.4
القمر بدرا	-12.6
الشمس	-26.7

جدول 3-1 ب: القدر المطلق لبعض الأجرام

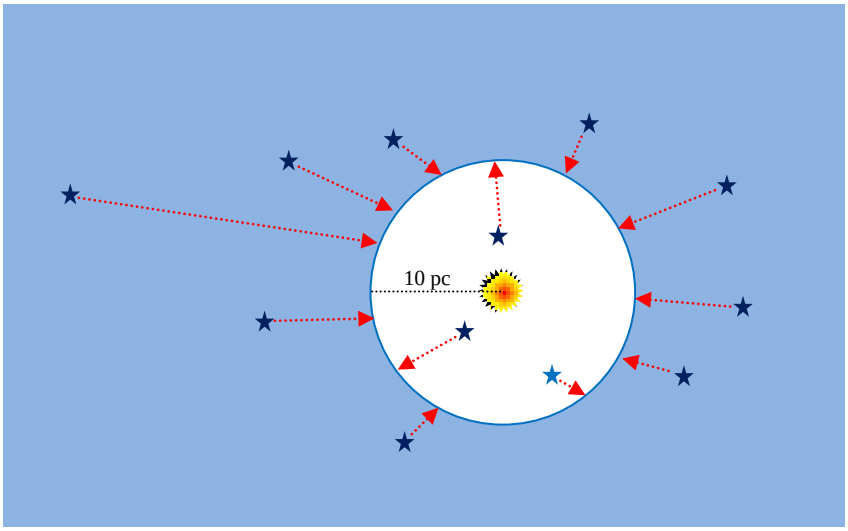
الجرم	القدر المطلق
كوازار	-28
ألمع مجرة	-25
درب التبانة	-20
سوبر نوفا	-19
الشمس	4.8
الزهرة	28
القمر بدرا	32

من النقاط التي تأخذ جهدا وعملا ليس بالسهل هو عملية قياس القدر الظاهري للنجم حيث يتم استخدام القياسات الفوتومترية ومن خلالها القدر الظاهري لأي جرم سماوي. وسنلقي ضوءا على هذه الجزئية في عنوان منفصل.

القدر المطلق Absolute magnitude

إذا تصورنا كرة نصف قطرها 10 بارسك والشمس في مركزها وافترضنا أن كل النجوم قد وضعت على سطح هذه الكرة فإن القدر الذي نرصده لهذه النجوم سوف نسميه القدر المطلق كما هو مبين في شكل 3-1. جدول 3-2 يبين القدر المطلق لمجموعة من الأجرام ونلاحظ أن الشمس إذا وضعت عند مسافة 10 بارسك فإنها تبدو نجما خافتا من القدر الخامس تقريباً. ومن الواضح أن الكوازار هو ألمع أجرام السماء، وهو عبارة عن مجرة حديثة التكوين. والمجرات ألمع من النجوم، فالمجرة تحتوي في المتوسط على حوالى 100 بليون نجم، ورغم ذلك نلاحظ أن السوبرنوفا وهي نجم في حالة انفجار تبدو بلمعان يقرب من لمعان المجرات، وهذا يدل على مدى عنف الانفجار. وكما هو واضح من الجدول أننا إذا وضعنا القمر عند مسافة 10 بارسك فستصبح رؤيته أمرا صعبا حتى بأحدث التلسكوبات وأنه أقل لمعانا من الزهرة. وأن شمسنا نزلت من علياء لمعانها الظاهري لتأخذ موقعها الحقيقي بين أجرام السماء من حيث قدرها المطلق. وهكذا نجح الفلكيون في وضع فرضية القدر المطلق واستخدامها كوسيلة للحكم على اللمعان الحقيقي أو الضياء Luminosity للنجوم وغيرها من الأجرام لمعرفة مدى شدة لمعانها دون تأثير قربها أو بعدها. ولكن كيف يتم حساب القدر المطلق للأجرام؟ لقد توفرت لدينا وسائل عدة لحساب القدر المطلق منها: معرفة بعد النجم، شكل H-R ، النجوم المتغيرة.

شكل 3-1: بافتراض أن كل النجوم قد وضعت على سطح كرة نصف قطرها 10 بارسك والشمس في مركزها، فالقدر الذي يأخذه النجم على هذه الكرة يعرف بالقدر المطلق.



في المعادلة (5) إذا اعتبرنا $m2= M , m1 = m$ وبالتالي فإن:

$b1 = l$, $b2 = L$

حيث :

$l \alpha (1/r^2)$, $L \alpha (1/100)$

وبالتعويض في المعادلة رقم (5) نحصل على العلاقة التالية:

$$M = m + 5 - 5 \log r \qquad (3.10)$$

ومن هذه العلاقة الفلكية الشهيرة , والتي تعرف بمعادلة البعد القياسي distance modulus يمكن حساب القدر المطلق بمعلومية القدر الظاهري وبعد النجم. كما يمكن استخدام نفس العلاقة لحساب البعد إذا توفرت لدينا معلومات عن القدرين الظاهري والمطلق . ولقد لعبت هذه العلاقة دورا مهما في حساب أبعاد الكثير من الأجرام وكذا في حساب القدر المطلق لكثير من النجوم القريبة والتي أمكن حساب أبعادها بطرق فلكية بسيطة.

ومن هذه العلاقة يمكن كتابة علاقة لحساب القدر المطلق بمعلومية ضياء النجم والقدر المطلق للشمس كما يلي:

$$M = 4.85 - 2.5 \log(L/Ls) \qquad (3.11a)$$

كما يمكن حساب لمعان النجم بالنسبة للمعان الشمس من خلال العلاقة التالية:

$$L/Ls = 10^{-0.4(M-4.85)} \qquad (3.11b)$$

أمثلة:

1- **بمعرفة القدر المطلق للشعرى اليمانية sirius M = 1.4 فإنه يمكن حساب لمعانه**

$$L_{\text{الشعري اليمانية}}/Ls = 10^{1.38} = 24$$

2- **نجم برنارد Barnard له قدر مطلق قيمته 13.2 وهذا يعني أن ضياءه**

$$L_B/L_s = 4.5x10^{-4}$$

3- **نجم منكب الجوزاء Betelgeuse له قدر مطلق 5.5 أحسب ضياءه بالمقارنة مع الشمس**

$$L/Ls = 10^{-04(5.5-4.85)} = 14{,}000$$

مسائل:

1- **نجم رجل الجوزاء له قدر ظاهري 0.14 و بعد 240 pc أحسب قدره المطلق وضياؤه.**

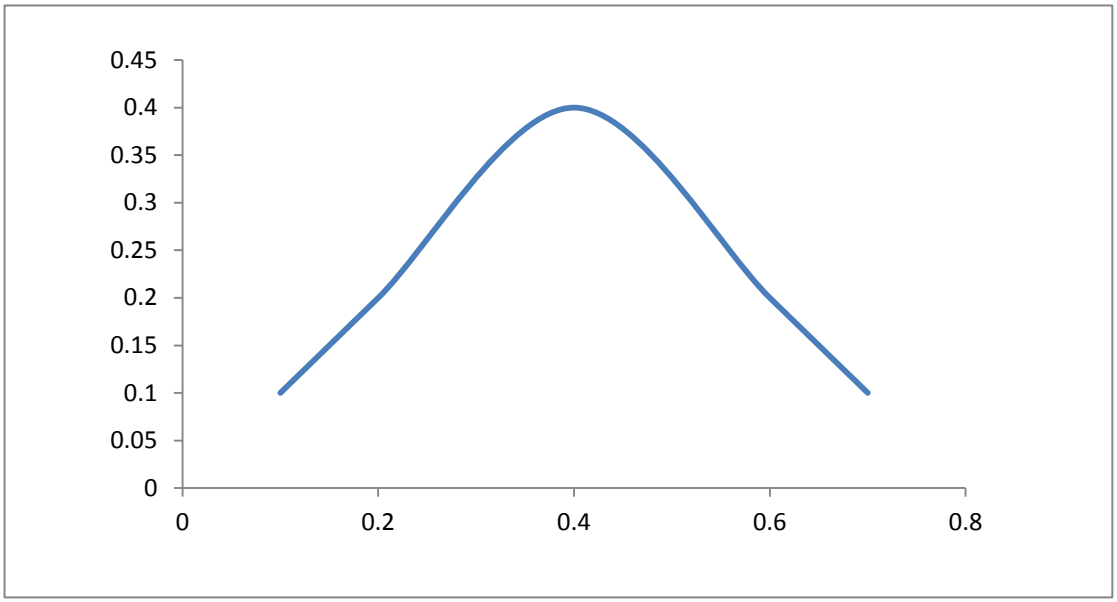
2- **نجم ألفا قنطورس له قدر مطلق 4.4 وقدر ظاهري 0.0 أحسب بعده وضياؤه.**

القياسات الفوتومترية Photometric measurements :

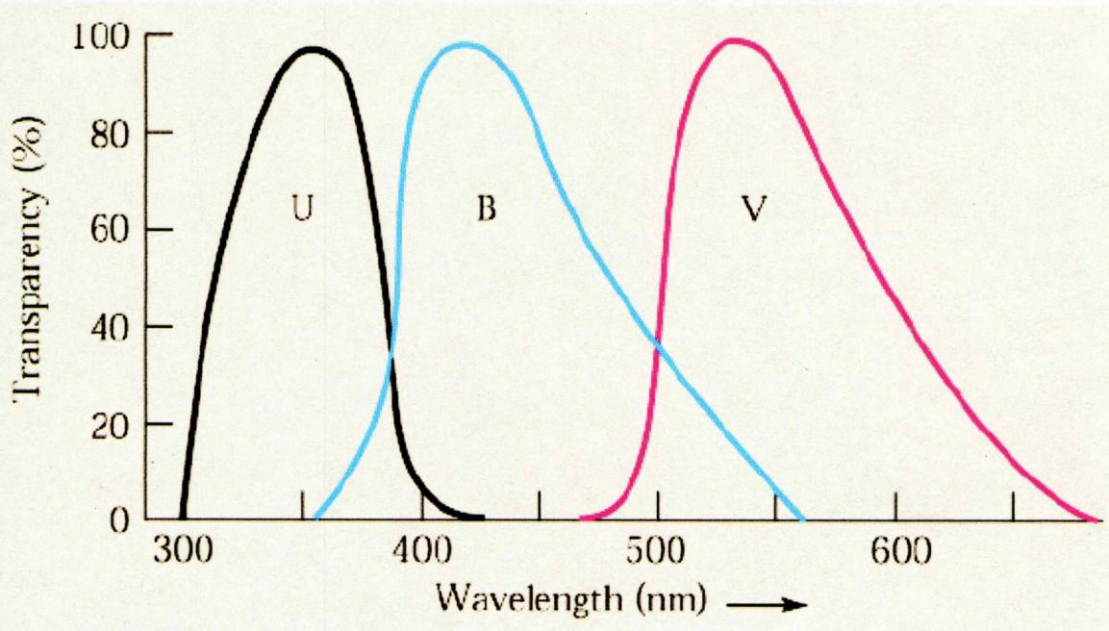
كيف يتم تحديد القدر الظاهرى لأى نجم؟

قدر النجم يعتمد على نظام الأشعة الكهرومغناطيسية الذي تم رصده فيه.فمن يرصد نجم فى الضوء المرئى فيكون الناتج هو القدر الظاهرى للنجم في الضوء المرئي . في حدود الطول الموجي $\lambda = 540\ nm$

من الناحية العملية يحتاج الفلكيين لبذل مجهود كبير في تحديد القدر الظاهري لأي نجم يتم التعرف عليه. وحتى يتم تحديد القدر الظاهرى للنجم يقوم الفلكيون باستخدام فلاتر حساسة لأطوال موجية معينة. من اكثر النظم التى استخدمت بشكل واسع هى UBV وهى تركيبة من فلاتر تقيس فى الأشعة فوق البنفسجية U والازرق B،الضوء المرئى V وهذه الفلاتر مراكزها على التوالى $550\ nm - 440\ nm - 365\ nm$ وفى الشكل التالى توضح حدود الفلاتر الثلاث:



شكل3.2: الخصائص العامه لفلتر تمرير الضوءقمة المنحني تمثل $\boldsymbol{\lambda_o}$ والعرض الكامل عند منتصف القمة $\boldsymbol{\Delta\lambda}$



شكل3.3 : فلاتر UBV. منحنى المرور للفلاتر الثلاث من مصدر بفيض ثابت عند كل الخطواط الضوئية

وفى الوقت الحالى يمكننا أن نقيس القدر فى نطاق الأشعة تحت الحمراء IR وكذلك فى الأشعة فوق البنفسجية UV وذلك باستخدام فلاتر و كواشف (Filters & Reflectors). لكل فلتر طول موجى اساسى (λ_o effective wavelength) وحدود ($\Delta\lambda$ bandpaiss) كما هو موضح فى الجدول التالى:

جدول(3.2)

النطاق	**الطول الموجي الاساسي** λ_o	**الحدود** $\Delta\lambda$
U	365 nm	70 nm
B	440 nm	100 nm
V	550 nm	90 nm
R	640 nm	150 nm
I	790 nm	150 nm
J	1.25 mm	0.12 mm
H	1.66 mm	0.16 mm
K	3.22 mm	0.22 mm
L	3.45 mm	0.35 mm
M	4.65 mm	0.46 mm
N	10.3 mm	1 mm

ونتيجة توفر أرصاد للنجوم فى نطاقات الأشعة تحت الحمراء باستخدام كاميرات CCD تم عمل فلاتر R,I فى أخر حدود الأحمر ثم فلاتر J,H,K,L فى نطاقات تحت الحمراء., كما هو مبين في الجدول (3.2). ويتم استخدام هذه الفلاتر في تحديد القدر الظاهري للنجم في نطاقات عدة ومن خلال هذه القياسات يتم تحديد القدر الظاهري للنجم. حيث يبدأ الراصد بتحديد قيم القدر الظاهري للنجم باستخدام الفلاتر الثلاث U,B,V ثم يتم حساب الدليل اللوني B−V و U−B كما سنبين في العنوان التالي ومن خلال تلك القياسات يمكن تحديد القدر الظاهري للنجم بدقة.

الدليل اللوني (CI)Color index

الدليل اللوني يعرف بالفرق بين القدرين في نطاقين مختلفين، وقد اتفق الفلكيون على ثلاثة ألوان رئيسية تحسب عندها الأقدار وهي: الضوء المرئي والأزرق والبنفسجي. ومن ثم فإن الدليل اللوني بين الضوء المرئي والأزرق يكتب كما يلي:

$$CI = b-v = m_b - m_v \qquad (3.12)$$

حيث m_b, m_v الأقدار في اللونين الأزرق والضوء المرئي. ولو تصورنا نجما لونه مائلا للحمرة فإن قدره المرئي سيكون أقل من قدره الأزرق وبالتالي فإن الدليل اللوني b–v سيكون كمية موجبة. أما إذا كان النجم مائلا للزرقة فسيكون الدليل اللوني له كمية سالبة. ومن هنا يتضح أنه يمكن من خلال الدليل اللوني التعرف على النوع الطيفي للنجم.

وبشكل عام يمكن كتابة معادلة عامة للدليل اللوني كما يلي

$$\mathbf{CI = m_{\lambda 1} - m_{\lambda 2}} \qquad (3.13)$$

ولو عرفنا الفيض flux عند طول موجي معين $\lambda 1$ فإن الدليل اللوني يمكن حسابه من خلال العلاقة التالية:

$$\mathbf{CI = constant - 2.5\ log(\ F(\lambda 1)/F(\lambda 2))} \qquad (3.14)$$

ومن خلال الدراسات الطيفية تم وضع علاقة تجريبية (empirical relation) في نطاق درجات الحرارة $10{,}000\ K < T < 4000\ K$ كالتالي:

$$B - V = -03.865 + 8540/T$$

ومن ثم يمكن حساب درجة الحرارة لسطح النجم بمعرفة الدليل اللوني B–V باستخدام العلاقة التالية:

$$T = \frac{8540}{[(B-V)+0.865)]}$$

وهذه العلاقة وأمثالها تعطي صوره تقريبية وليست دقيقة.

تأثير ماده ما بين النجوم ISM على أرصاد القدر الظاهرى:

الأرصاد التى تتم من المراصد الفلكية الأرضية لابد من عمل تصحيح لها في أمرين:

1- تأثير الغلاف الجوى على الأرض.

2- تأثير سحب ما بين النجوم.

اولا : تأثير الغلاف الجوى:

إذا كان فيض الأشعة القادمة من النجم قبل الدخول في الغلاف الجوى $F_o(\lambda)$ فإن الفيض بعد المرور في الغلاف الجوي من خلال عمق ضوئي (t_λ) optical depth يصبح

$$\mathrm{F}(\lambda) = F_o(\lambda)\mathrm{e}^{-\mathrm{t}\lambda}$$

العمق الضوئي يصبح في حده الادني عند نقطه السمت $\mathrm{t_o}(\lambda)$ وبالتالي لاي زاوية اخري

$$t(\lambda) = t_o(\lambda)\sec(z)$$

حيث z الزاوية بين نقطه السمت ومكان النجم (زاوية الشمس)

ومن ثم إذا كان $m_o(\lambda)$ القدر قبل الغلاف الجوي فإن

$$m(\lambda) - m_o(\lambda) = -2.5\log(e^{-t_\lambda})$$

$$= 1.086\, t_\lambda$$

$$\therefore\ m_o(\lambda) = m(\lambda) - 1.086\, t_\lambda \qquad (1)$$

$$m_o(\lambda) = m(\lambda) - K_o(\lambda)\sec(z) \qquad (3.16)$$

حيث $K_o(\lambda) = 1.086\, t_\lambda$

$K_o(\lambda)$ تعرف عند الفلكيين بمعامل الامتصاص من الدرجة الأولي first order extinction coefficient وبالنسبه للضوء المرئي K_o تاخذ قيم $0.15 - 0.2$ وهي تختلف من ليله لاخري اعتمادا علي الشروط الفيزيائيه للغلاف الجوي .

ثانيا: تأثير ISM على الأرصاد :

تحدث عتامة لضوء النجوم بالقدر :

$$\Delta m(\lambda) = 1.086\ t_\lambda = A(\lambda)$$

وبالتالي فإنه ينبغي عمل تصحيح للمسافه القياسيه Distance Modelus كما يلي

$$\boldsymbol{m - M = -5 + 5\, log\, (r) + A}$$

ولكن تحديد قيمة A قد تكون صعبة لانها تعتمد علي الطول الموجي

وسيكون الدليل اللوني $m_B - m_V = m_B - m_V + A_B - A_V$

ومن تميز النجم $m_B - m_V = (B-V)_o$

نعرف اللون الزائد Color excess $E(B-V) = (B-V) - (B-V)_o$

في ISM قيمة A تحسب كما يلي:

$$A_V = 3E(B-V) \qquad (3.17)$$

$$\therefore\ \boldsymbol{m_V = m_V + 5\log(r) - 5 + A_V} \qquad (3.18)$$

القدر البولومترى Bolometric Magnitudes:

يقاس القدر في جميع ما سبق في الضوء المرئي. أما إذا تم قياس لمعان النجم في جميع الأطوال الموجية فإن القدر الناتج عرفه الفلكيون باسم **القدر البولومتري magnitude** bolometric. ومن البديهي أن القدر البولومتري سيكون أقل من قدره المقاس عند مدى معين من الضوء المرئي، أي أن اللمعان البولومتري سيكون أكبر من اللمعان عند مدى معين من الضوء. الفيض يحسب بالعلاقة.

$$f_{\text{bol}} = \int_0^{\alpha} f(\lambda)\, d\lambda$$

وبالتالي $m_{\text{bol}} = -2.5 \log(f_{bol}) + const.$

وفي الضوء المرئي

$$m_V = -205 \log(f_v) + const.$$

اذا كان الضياء للشمس يحسب بالعلاقة $L_s = 4\pi R_s^2 * T_s^4 \qquad (J/S)$

فأننا نستطيع أن نحسب الفرق فى الأقدار المطلقة بين الشمس والنجم بالعلاقة التالية:

$$M_{\text{bol}}(s) - M_{\text{bol}}(*) = 2.5 \log\left(\frac{L_*}{L_S}\right) M_{\text{bol}}(s) = -4.75$$

$$\mathbf{\log\left(\frac{L_*}{L_s}\right) = 1.9 - 0.4 M_{bol}(*)} \qquad (3.19)$$

ومن الناحية العملية يتم استخدام تصحيح بولومترى **Bolometric correction**

$$BC = m_{\text{bol}} - m_V = 2.5\log(\frac{f_v}{f_{bol}}) \qquad (3.20)$$

ومن ثم يتم حساب القدر المطلق للنجم بأستخدام العلاقة

$$M_{\text{bol}} = M_V + 5 - 5\log(r) + A_V + BC \qquad (3.21)$$

$$= 4.75 - 2..5 \log(\frac{L_{bol}}{L_s}) \qquad (3.22)$$

هذا الضوء الذي نرصده للنجم قبل وبعد 5 مرات من الفلتره من ISM ومن الفلاتر الجوية ثم من فلاتر التليسكوب والكواشف و الاجهزه الضوئية للتليسكوب والغرض هو الوصول للضوء كما يخرج من النجم بشكل مبشر من غلافه الجوي .

مفاهيم فلكية مهمة:

سنشرح فيما يلي مجموع من المفاهيم الفلكية المهمة.

الكثافة الأشعاعية I ، الفيض F ، الضياء L :

1- الضياء L وهو يعبر عن الطاقة الكلية التى يشعها النجم فى ثانية.

$$L = 4\pi \int_0^\infty A\, I(v) dv \qquad (watts)$$

حيث A مساحة سطح النجم ،$I(v)$ الكثافة الأشعاعية عند تردد موجي v (monochromatic intensity)

2- الكثافة الاشعاعية intensity

$$I = \int_0^\infty I(v)$$

وهى تعبر عن الكثافة الأشعاعية للنجم فى جميع الأحوال وهي لا تعتمد على بعد النجم بل هي كمية ثابته للنجم و خاصية من خصائصه.

3- أما الفيض Flux فهو مرتبط بما يمكن قياسه بأستخدام التلسكوب.

$$F = \frac{L}{4\pi R^2} \qquad (w/m^2)$$

$$F = \int_0^{\infty} F(v)$$

حيث $F(v)$ الفيض في التردد الموجي v monochromatic flux

$$F(v) = \int_0^{4\pi} I(v,\theta) cos\theta \, d\Omega$$

حيث θ زاوية دخول الفيض والكثافة الاشعاعية تعتمد علي الاتجاه θ وعلي $\Delta\Omega$ (solid angle)

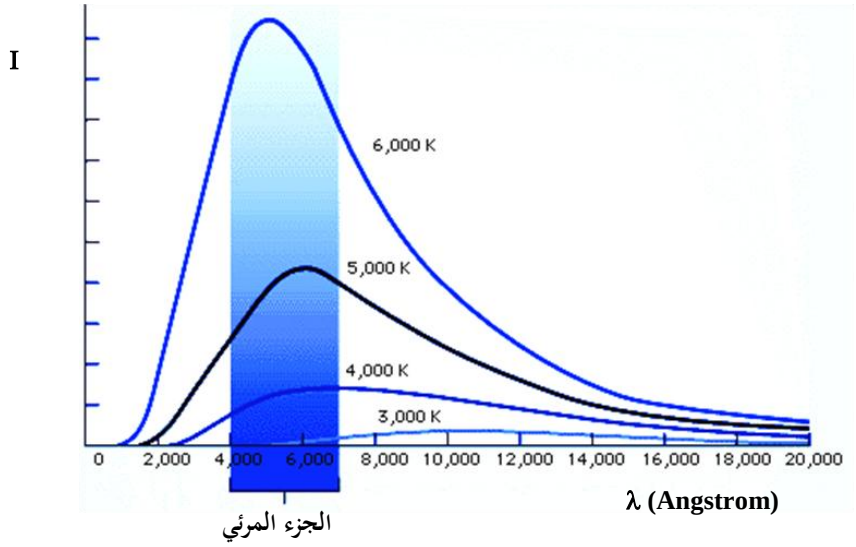
اما الفيض فيعتمد علي الطاقة التي تمر من مساحة ΔA .

قانون بلانك للإشعاعية Planck's law

يصف هذا القانون شدة إشعاع نجم ما من خلال معرفتنا لدرجة حرارة سطحه بالعلاقة التالية:

$$I = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \qquad (3.23)$$

حيث λ الطول الموجي للأشعة التي يبثها النجم و T درجة حرارة سطح النجم و h ثابت بلانك و k ثابت بولتزمان و c سرعة الضوء.



شكل 3.4: منحنيات بلانك لإشعاع النجوم

من خلال رسم العلاقة بين الإشعاعية I على المحور الصادي، والطول الموجي على المحور السيني لنجوم مختلفة في درجات الحرارة نحصل على منحنيات مثل تلك الموجودة بالشكل 10-2 لنجوم درجات حرارتها من 6 آلاف إلى 3 آلاف كالفن. نلاحظ في الشكل أنه كلما ارتفعت درجة حرارة سطح النجم كلما كانت قمة منحنى الإشعاع عند أطوال موجية أقصر وهذا ما يظهره قانون فين للإزاحة

قانون فين للإزاحة:

ينص قانون فين للإزاحة على وجود علاقة عكسية بين درجات الحرارة والطول الموجي لأقصى إشعاعية كما يلي:

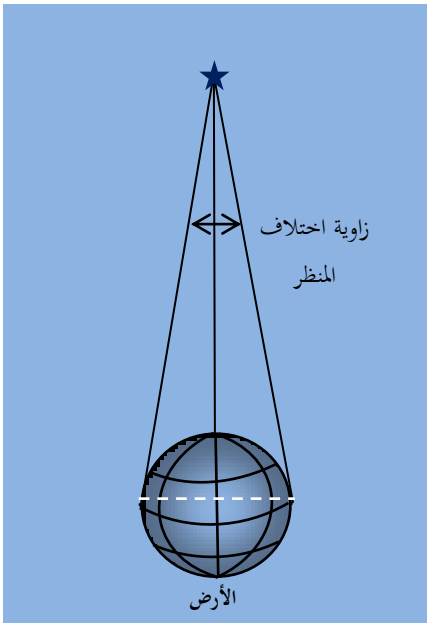
$$\lambda = \frac{0.3}{T} \qquad (3.24)$$

حيث يقاس الطول الموجي بالسنتيمتر ودرجة الحرارة T بالكلفن. وتبعا لقانون فين فإن النجوم الساخنة يكون إشعاعها في الأطوال الموجية الأقصر .

ألوان النجوم: من علاقة فين وكذك من الدليل اللوني يمكن تحديد لون النجم. النجوم الساخنة تميل ألوانها للزرقة حيث أن هذه النجوم تتمتع بدرجات حرارة عالية ممايعني أن الفوتونات التي تبثها هذه النجوم لها سرعات عالية وطاقات عالية أو ما يمكن التعبير عنه بفوتونات زرقاء وبالتالي تتميز هذه النجوم بلون يميل للزرقة. والزرقة هنا تعني أطوالا موجية قصيرة. أما النجوم الباردة فما تشعه من فوتونات ستكون طاقاتها صغيرة مما يعني أن هذه النجوم تشع فوتونات حمراء أو أطوالا موجية طويلة تميل للطيف الأحمر مما يجعل النجوم الباردة تميل للون الأحمر. والشمس لونها ما بين الأبيض والأصفر.

أبعاد النجوم Stellar distances

كيف يمكن حساب أبعاد النجوم ؟ لقد حاول الفلكيون على مر العصور حساب أبعاد النجوم. وإحدى الطرق التي تمخضت عنها تلك الجهود هي باستخدام **اختلاف زاوية المنظر parallax angle** حيث أنها تعتمد على التغير في اتجاه الجسم حينما يشاهد من مكانين مختلفين انظر شكل 10-3 حيث نلاحظ منه أن الزاوية S تكبر مع زيادة المسافة (خط الأساس Baseline) بين الراصدين A, B وتصغر كلما ابتعد الجرم عن الراصدين. بالنسبة للنجوم، فهي أجرام بعيدة عنا للحد الذي لا يمكن أن نقيس معه أي تغير في الزاوية S مهما بعد الراصدان على الأرض عن بعضهما البعض. لم تفلح محاولات قياس زاوية اختلاف المنظر باستخدام أبعاد مختلفة على سطح الأرض؛ لأن أكبر خط أساس على الأرض يساوي قطر الأرض؛ أي 12800 كم، شكل 10-4، وهذه المسافة لا تحقق إلا زاوية صغيرة جدا مقدارها 0.00005 ثانية قوسية لأقرب نجم لنا، وتصغر هذه الزاوية كلما بعد النجم. هذا يعني أن خط الأساس يعتبر صغيرا للغاية بالنسبة لبعد النجم، ويجب البحث عن خط أساس أكبر من قطر الأرض. اتخذ الفلكيون حركة الأرض حول الشمس منطلقا لقياس هذه الزاوية، فمن تتبع الزاوية التي يحدثها نجم من خلال رصده من الأرض أثناء حركتها السنوية مرتين بينهما ستة أشهر، أي من نقطتين متقابلتين على مدار الأرض يفصل بينهما خط أساس مقداره 2 وحدة فلكية استطاع الفلكيون قياس هذه الزاوية، وعرفوا نصفها كزاوية اختلاف المنظر parallactic angle شكل 10-5.



شكل 3.5: التغير في اتجاه الجرم بالنسبة للخلفية كما يشاهد من راصدين متباعدين A , B

كلما بعد النجم الذي نحسب هذه الزاوية له كانت الزاوية أصغر. وهذا يعني أن زاوية اختلاف المنظر p هي دليلنا لمعرفة أبعاد النجوم. من شكل 3.6، يمكن استنتاج علاقة بسيطة بين زاوية اختلاف المنظر وبعد النجم وهي:

$$p = \frac{1}{d} \qquad (3.25)$$

حيث d بعد النجم بالبارسك ، p زاوية اختلاف المنظر وتقاس بالثواني القوسية.

مثال: ألفا قنطورس وهو أقرب نجم لنا له زاوية اختلاف منظر 0.76" إذا:

d = 1/p = 1/0.76 = 1.32 pc

نجم الشعرى اليمانية يبعد عنا 2.5 بارسك إذا:

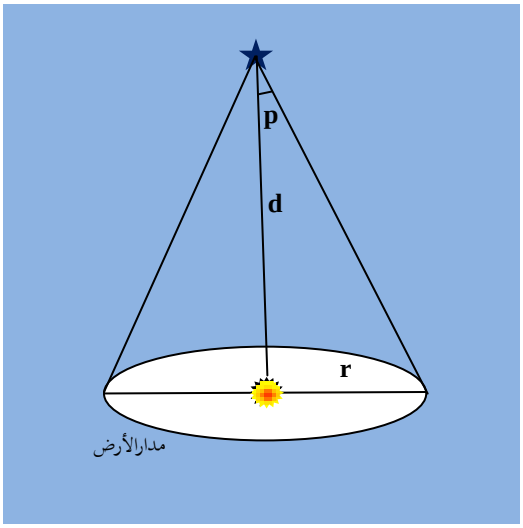
p = 1/d = 1/2.5 = 0.4"

وتمكن الفلكيون من حساب الأبعاد لحوالى ألف نجم في دائرة نصف قطرها 20 بارسك عن طريق قياس زاوية اختلاف المنظر. كما تمكن التلسكوب الفضائي هيبارخوس من تتبع أبعاد ما يقرب من 300 ألف نجم. بالطبع نلاحظ أن قياس زاوية اختلاف المنظر يزداد صعوبة كلما ازدادت

أبعاد النجوم. وبمعرفة أبعاد النجوم يمكن التعرف على كثير من خصائصها الفيزيائية، ومن أهمها أننا يمكن أن نحسب القدر المطلق للنجم إذا عرفنا بعده من خلال العلاقة الشهيرة:

$$m - M = -5 + 5 \log (d)$$

حيث M القدر المطلق ، m القدر الظاهري ، d بعد النجم. كما يمكن استخدام هذه العلاقة في حساب البعد في حالة معرفة القدرين الظاهري والمطلق للنجم.



شكل 3.6: قياس زاوية اختلاف المنظر p وحساب البعد d لنجم، خط الأساس يساوي ضعف متوسط بعد الأرض عن الشمس.

طرق حساب الأبعاد في الكون:

تمكن الفلكيون من استحداث طرق عديدة من أجل حساب الأبعاد في الكون ويمكن تلخيص أهم هذه الوسائل فيما يلي:

1- الرادار: تستخدم أجهزة الرادار لقياس الأبعاد لحدود الوحدة الفلكية وهي تستخدم عادة داخل المجموعة الشمسية وبين الكواكب.

2- زاوية اختلاف المنظر وتقيس حتى مسافات تقدر ب 200 pc

3- اختلاف المنظر الطيفي spectroscopic parallax وتقيس مسافات حتى 10,000 pc

4- النجوم المتغيرة ويمكن استخدامها لقياس مسافات في عمق الكون حتى 25 Mpc كما يمكن استخدام وسائل أخرى عديدة لقياس مسافات مماثلة أو حتى أكبر من ذلك.

5- دوران المجرات الحلزونية (طريقة Tully-fisher) من خلال تتبع الازاحة الطيفية لطرفي المجرة المبتعد والمقترب وهذه الطريقة تقيس لمسافات 200 Mpc كما يمكن استخدام المجرات العملاقة لقياس مسافات أكبر.

6- السوبرنوفا ويمكنها قياس مسافات 1bPc .

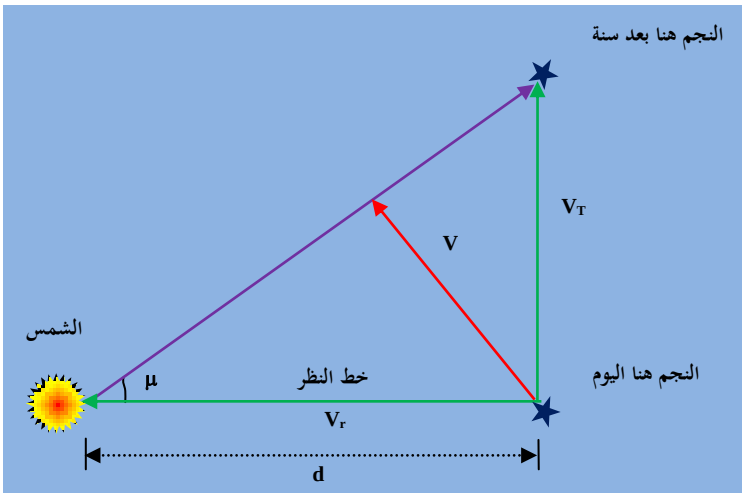
7- قانون هابل ويقيس حتى أطراف الكون كما نشاهده.

سرعات النجوم Stars velocities

يرصد الفلكيون سرعات مختلفة للنجوم، منها ما نسميه **الحركة الذاتية** **proper motion** ويرمز لها بالرمز μ وهي الحركة الظاهرية للنجم خلال سنة واحدة، شكل 10-6. وتقاس من مقارنة صور عديدة لنفس النجم رصدت في أوقات مختلفة لا تقل عن عشرات السنين، وهي من أصعب الخصائص في دراستها لاعتمادها على الوقت الطويل. كما يمكن للفلكيين من خلال تتبع الإزاحة الطيفية للنجوم حساب **السرعة الخطية** **Radial velocity** وهي السرعة في اتجاه خط الرؤية للمشاهد , ويرمز لها بالرمز V_r وهي أسهل السرعات في رصدها حيث أنها تعتمد على قياس الإزاحة الطيفية والتي يمكن تتبعها مهما كان النجم أو المجرة بعيدة. من شكل 10-6، يمكن حساب **السرعة العمودية** **Tangential velocity** V_T بوحدات كم/ث:

$$V_T = 4.74\ \mu\ d \qquad (3.26)$$

البعد d يقاس بالبارسك، ونلاحظ في هذه العلاقة أن حساب السرعة العمودية يعتمد على معرفة الحركة الذاتية.



شكل 3.7: العلاقة بين البعد والحركة الذاتية والسرعة العمودية.

من خلال الحشود النجمية توجد طريقة أبسط في حساب السرعة العمودية بدلالة السرعة الخطية وباستخدام العلاقة البسيطة التالية:

$$V_T = V_r \tan A \qquad (3.27)$$

حيث A زاوية حركة النجوم داخل الحشد النجمي إلى نقطة التقارب.

السرعة الكلية V وتسمى أيضا **السرعة الفضائية** Space velocity وهي سرعة النجم في الفضاء نسبة إلى الشمس، من شكل 10-6، يمكن كتابة V بدلالة مركبتيها وهما V_r ، V_T :

$$V = \sqrt{V_r^2 + V_T^2} \qquad (3.28)$$

الأشعة الكهرومغناطيسية ومصادرها الكونية :

Elctromagnetic radiation and its sources in the Universe

تشمل الأشعة الكهرومغناطيسية أنواعاً كثيرة من الموجات بالإضافة إلى موجات الضوء المرئي الذي تستقبله أعيننا. فهناك من خطوط الطيف ما هو أطول من خطوط طيف الضوء المرئي مثل الموجات الراديوية كما أن هناك موجات قصيرة جداً مثل الأشعة السينية وأشعة جاما. تبث النجوم المستقرة إشعاعاتها بشكل كبير في منطقة الضوء المرئي، ويخرج عن هذه القاعدة النجوم التي وصلت لمراحل متأخرة من حياتها.

تنقسم الأشعة الكهرومغناطيسية إلى النطاقات التالية وهي مرتبة من الأقصر إلى الأطول من حيث الطول الموجي:

1- أشعة جاما γ

2- الأشعة السينية X-ray

3- الأشعة فوق البنفسجية UV-ray

4- الضوء المرئي Visible light

5-الأشعة تحت الحمراء IR

6- الميكروويف وهي من أواخر الأشعة تحت الحمراء وفي أوائل الأشعة الراديوية Microvave

7- الأشعة الراديوية radio waves وجزء منها خاص بنطاقات TV, FM

الأشعة فوق الضوء المرئي لها طاقات عالية وبالطبع تزداد الطاقة كلما كانت الموجات أقصر وفي الجدول التالي أهم المصادر الفلكية لنطاقات الأشعة المختلفة ودرجات حرارتها الأشعة في النطاقات التي تعلوا الضوء المرئي يتم رصدها باستخدام المراصد الفضائية أما الضوء المرئي وما يليه من أشعة (عدا الأشعة تحت الحمراء) فيمكن رصدها في الغالب باستخدام المراصد الأرضية.

جدول(3.3) مصادر الأشعة الكهرومغناطيسية في الكون

نطاق الأشعة	T	المصادر الفلكية
γ	10^8 K ➢	γ BURST – بعض التفاعلات النووية
X	$10^6 – 10^8$ K	الغاز في حشود المجرات –كورونا الشمس – النجم النيوتروني/ الثقب الأسود
UV	$10^5 – 10^6$ K	بقايا السوبرنوفا – النجوم الساخنة
الضوء المرئي	$10^3 – 10^5$ K	النجوم
IR	10 - 10^3 K	السحب الكثيفة – الغبار الكوني – الكواكب– الأقمار
الأشعة الراديوية	10 K <	المجرات الراديوية – أشعة سينكروترون وهي تصدر عن إلكترون يتحرك في مجال مغناطيسي

جدول 3.4: الأشعة الكهرومغناطيسية وإمكانية رصدها من الأرض

نوع الأشعة	الطول الموجي	الترددات (Hz)	امكانية الرصد من سطح الأرض
جاما	أقل من $0.1\ A^0$	10^{23}-10^{20}	X
الأشعة السينية	$0.1 – 100\ A^0$	10^{20}-10^{17}	X
فوق البنفسجية	$100\text{-}4000\ A^0$	10^{17} -10^{15}	X
الضوء المرئي	$4000\text{-}7000\ A^0$	10^{15}	يمكن الرصد
تحت الحمراء	$7000A^0$ – 1mm	10^{15}-10^{12}	X
راديوية	أطول من 1km	أقل من 10^{12}	توجد نافذة للرصد

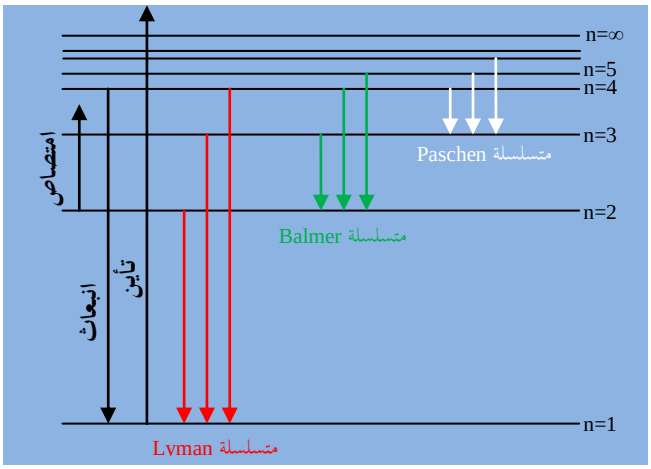
حيث يلعب جزيئا الماء والأكسجين (H_2O, O_2) دورا في امتصاص الأشعة الراديوية الأقصر من 1 cm بينما يلعب بخار الماء و CO2 دورا في أن لهما قدرة عالية في امتصاص الأشعة تحت الحمراء فتمنع وصولها للأرض. أما الأشعة عالية الطاقة (جاما – الأشعة السينية – الأشعة فوق البنفسجية) فيتم امتصاصها في منطقتي الأيونوسفير والأوزون. كما أن الأشعة الراديوية الأطول من 10 m الصادرة من الأرض تنعكس عند طبقة الأيونوسفير وكذلك الآتية من الكون ستنعكس خارجيا عند نفس الطبقة.

أطياف الهيدروجين Hydrogen spectrum

ذرة الهيدروجين هي أبسط الذرات من حيث التركيب مما ساعد على البدء بدراستها فيزيائيا. يوجد بذرة الهيدروجين إلكترونا واحد. يتحرك الإلكترون حول النواة في مستويات للطاقة أقربها للنواة هو أقلها في الطاقة ويعرف بالمستوى الأرضي أو المستوى الأول. وإذا أعطي الإلكترون كمية من الطاقة فسيحدث له إثارة excitation مما ينقله لمستويات أعلى في الطاقة. وعندما يفقد الإلكترون هذه الطاقة في شكل فوتون فإنه يشعها ويعود إلى مستويات الطاقة الأقل. وقد تكون كمية الطاقة التي يمتصها الإلكترون كبيرة بحيث تؤدي لهروبه من الذرة تماما وفي هذه الحالة نقول أن الذرة تأينت أي تحولت إلى أيون موجب. ومن خلال ميكانيكا الكم نستطيع أن نحسب كميات الطاقة التي يمتصها الإلكترون كي ينتقل من مستوى طاقة لآخر أعلى أو يفقدها كي ينتقل إلى مستوى طاقة أقل. نصف قطر ذرة الهيدروجين في حدود 0.5 nm وكتلة الألكترون m_e : $m_e = m_p/2000$ حيث m_p هي كتلة برتون ذرة الهيدروجين.

ومن خلال تتبع انتقال الإلكترون بين مستويات الطاقة في ذرة الهيدروجين تبين أن انتقال الإلكترون من مستوى الطاقة الثاني إلى المستويات الأعلى يتسبب في بث سلسلة من الأشعة أصبحت تعرف بسلسلة بالمر Balmer والتي تُرى في الضوء المرئي. أما إذا حدث انتقال من المستوى الأرضي إلى المستويات الأعلى فما ينتج هو سلسلة ليمان Lyman وهي ذات أطوال موجية أقصر وترى في الأشعة فوق البنفسجية UV. كما توجد كذلك سلسلة باشن Paschen والتي يمكن رصدها في الأشعة تحت الحمراء IR. وسلسة أخرى تدعى سلسلة براكيت Bracktt وهي أيضا يمكن رصدها في IR، شكل 10-7. وقد تكون هذه السلاسل ناتجة عن انبعاث emission إذا كان انتقال الالكترونات نحو المستويات الأقل، وقد تكون أشعة امتصاص absorption إذا كان انتقال الإلكترون نحو المستويات الأعلى. أقوى خطوط سلسلة بالمر خط $H\alpha$ ولونه أحمر. وحيث

أن عمليات رصد النجوم فيما سبق كانت تعتمد على الرصد في الضوء المرئي لذا يمكن أن ندرك أهمية خطوط بالمر على وجه الخصوص.



شكل 3.8: سلاسل الطاقة الناتجة عن انتقال إلكترون ذرة الهيدروجين بين مستويات الطاقة المختلفة

وبشكل عام يمكن تلخيص أهم الأطياف التي تنتج عن انتقال اللكترونات في الذرات كما يلي:

1- انتقال الألكترون من المستويات الأولى لذرتي الهيدروجين والهيليوم تنتج أطياف في نطاقي الضوء المرئي
أو الأشعة فوق البنفسجية.

2- أما انتقال الألكترونات من المستويات العليا لذرتي الهيدروجين والهيليوم فتنتج أطياف في نطاقي الأشعة تحت
الحمراء أو الراديوية.

3- في العناصر الأثقل ينتج انتقال الألكترونات من المستويات الأولى طاقات أعلى في نطاق الأشعة السينية.

أطياف الجزيئات: ينتج عن الجزيئات ثلاثة أنواع من الأطياف:

1- أطياف ناتجة من انتقال الألكترونات بين مستويات الطاقة كما في الذرات

2- أطياف من دوران الجزيئات وهي في نطاق الأشعة الراديوية.

3- أطياف من اهتزاز الجزيئات vibration وهي تكون في نطاق الأشعة تحت الحمراء.

وقد تطورت الدراسات الطيفية للعناصر المختلفة كذرات أو جزيئات وأصبح لدينا مكتبة كبيرة من الأطياف لكل ما نعرفه من ذرات وجزيئات. وتعتمد شدة خطوط الطيف line intensity على عدد الذرات المساهمة في الطيف وعلى درجة الحرارة. وتواجه الدراسات الطيفية مشكلة مهمة وهي مشكلة تضخم الخط line broadening وهذا التضخم يحدث بوسائل عديدة يمكن تلخيصها فيما يلي:

1- طبيعي وهو أقل هذه الوسائل من حيث التأثير على عرض الخط

2- تأثير دوبلر والناتج عن : الدوران أو الحركة.

3- الحركة الحرارية

4- الاضطرابات turbulence

5- الاصطدامات بين الجسيمات

6- المغناطيسية والتي تتسبب في تضخم الطوط كلما زادت شدة المغناطيسية.

تأثير دوبلر Doppler effect:

عند دراسة أطياف الأجرام المتحركة لابد من مراعاة أن أطياف هذه الأجرام المتحركة ستظهر في غير قيمها الأصلية حيث تبين أن الأجرام التي تبتعد عنا يحدث لها انحراف طيفي نحو الأحمر Red shift أما الأجرام التي تقترب منا يحدث لطيفها انحراف نحو الطيف الأزرق Blue shift ويقاس انحراف دوبلر بنوعية بالمعادلة التالية

$$Z = \Delta\lambda/\lambda = v/c \qquad (3.29)$$

حيث Z يمثل معدل الانحراف و $\Delta\lambda$ مقدار الانحراف في الطيف و λ الطول الموجي الأصلي و v سرعة تحرك الجرم و c سرعة الضوء. وفي حالة الأجرام التي تتحرك بسرعة تقترب من سرعة الضوء فإن المعادلة السابقة تصبح أكثر تعقيدا عن الشكل السابق وتعدل للشكل التالي

$$v/c = \frac{(Z+1)^2-1}{(Z+1)^2+1} \qquad (3.30)$$

مثال: الكوازار Pc 1247+3406 ينتج خطوط انبعاث λ_1= 1216 A ولكن هذا الخط يرصد على الأرض بطول موجي λ_2 = 7214 A أحسب مقدار الانحراف نحو الأحمر redshift

$$Z = \Delta\lambda/\lambda = 4.93$$

ومن ثم v/c = 0.93 أي أن الكوازار يتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء وباستخدام معادلة السرعة النسبية تصبح نسبة السرعات v/c = 0.94

الأنواع الطيفية للنجوم Spectral types of stars

من المعروف أن عدد الإلكترونات التي تفقدها الذرة تعتمد على درجة الحرارة وبالتالي فإن النجوم الساخنة سيكون طيفها معبرا عن غاز متأين، بينما النجوم الباردة سيظهر طيفها ليعبر عن غاز تكون نسبة الأيونات فيه قليلة. وتغير مقدر التأين يعني تغير النوع الطيفي للنجوم. ونتيجة للدراسات الطيفية للنجوم تبين أنه يمكن تقسيم النجوم طبقا لطيفها إلى الأنواع: **O B A F G K M** بحيث أن أعلاها حرارة من النوع O وأبردها يكون من النوع M. فالنجوم من النوع الطيفي O يتميز طيفها بخطوط هيليوم متأين وبالتالي فإن درجة الحرارة في غلافها تكون بين 40 إلى 60 ألف كالفن؛ أي أعلى من الشمس بكثير. يليه في الترتيب نجوم النوع الطيفي B والذي يميز غلافه الهيليوم الطبيعي (غير المتأين)، ثم نجوم النوع الطيفي A وتتميز بخطوط الهيدروجين ودرجة حرارة سطحها 10 آلاف كالفن، ثم نجوم النوع الطيفي F وتميزها خطوط الهيدروجين ومعادن متأينة (أيونات: Ca, Fe, Cr) ثم نجوم النوع الطيفي G، والشمس من هذا النوع، وتميزه خطوط المعادن المتأينة، ثم النوع الطيفي K وتميزه معادن غير متأينة، ثم أخيرا النجوم من النوع الطيفي M فهذا ناتج عن معادن غير متأينة وجزيئات TiO ودرجة الحرارة لهذا النجم تكون في حدود 3 آلاف كالفن؛ أي أبرد من الشمس، شكل 10-8. كما تم تقسيم كل نوع طيفي إلى عشرة أقسام داخلية من 0 إلى 9. مثلا: F0 هو أسخن أقسام نجوم

النوع الطيفي F و F9 هو أبرد نجوم النوع الطيفي F. وهكذا بالنسبة لبقية الأنواع الطيفية للنجوم. وشمسنا من النوع الطيفي G2.

سنلاحظ أنه قد تم تحديد الأنواع الطيفية للنجوم بناء على توفر سلسلة بالمر في أطياف النجوم. فالنجوم من النوع الطيفي A تتميز بتوفر سلسلة طيف بالمر الامتصاصية حيث تكون الكترونات ذرة الهيدروجين بهذه النجوم مثارة وأكثر انتشارا في المستوى الثاني للطاقة مما يجعل أكثر الخطوط انتشارا في طيف هذه النجوم هي سلسلة بالمر. وإذا ذهبنا للنجوم الأبرد فستقل نسبة بالمر وتظهر أطيافا أخرى تظهر في درجات الحرارة الأصغر. من المتوقع في النجوم الأبرد أن تكثر نسبة انتشار الألكترونات في المستوى الأول مما يمكن أن ينتج نسبة عالية من أطياف ليمان التي يمكن رصدها في أطياف UV. أما النجوم الأكثر سخونة وهي O, B فإن الحرارة العالية تزيد من تأين الهيدروجين ولذلك تقل سلسلة بالمر في هذه النجوم كذلك وتظهر أطيافا للهيليوم والتي تعتمد على درجات حرارة أعلى. العلاقة بين الطاقة E التي يشعها النجم من كل سم^2 ودرجة حرارته T يمكن وصفها من خلال علاقة ستيفان التالية:

$$E = \sigma T^4 \qquad (3.31)$$

حيث σ ثابت ستيفان.

ومن ثم فإن الطاقة الكلية أو الضياء L التي يبثها الجرم في الثانية تمثل المساحة السطحية للجرم مضروبة في علاقة ستيفان كما يلي:

$$L=4 \pi r^2 E \qquad (3.32a)$$

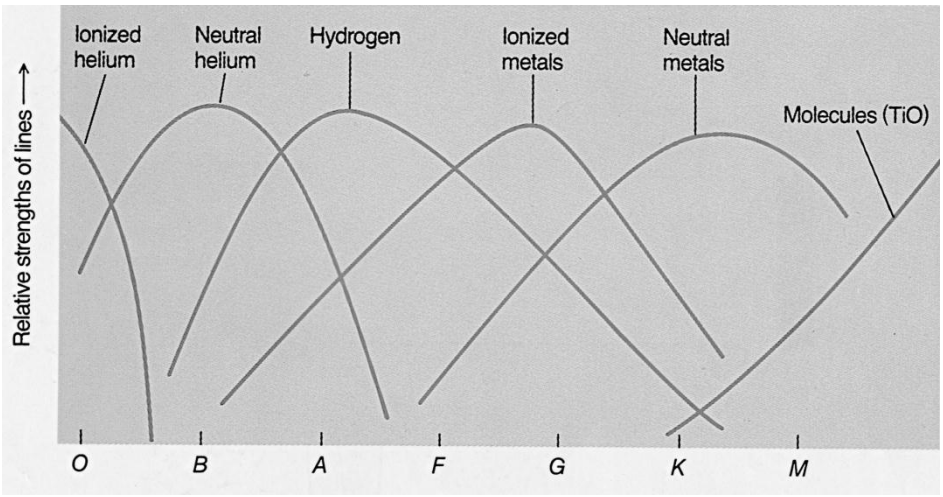
ومن ثم فالعلاقة بين الضياء ودرجة الحرارة تكون كالتالي:

$$L = 4 \pi r^2 \sigma T^4 \qquad J/s \quad (3.32b)$$

العلاقة بين ألوان النجوم وحرارتها Temperature–Color relation

تتغير ألوان النجوم حسب حرارتها ويمكن فهم العلاقة بين لون النجم وحرارته من خلال علاقة فين للإزاحة المعادلة (11)، التي تفيد بأنه كلما زادت درجة الحرارة في غلاف النجم كلما كان أكثر إشعاع النجم في أطياف أقصر في طولها الموجي. وقد لوحظ أن نجوم النوع الطيفي

O الأسخن لونها أزرق أو حتى بنفسجي، بينما نجد أبرد النجوم من النوع الطيفي M لونه أحمر أي أن أكثر إشعاعه يأتي في منطقة الطيف الأحمر. أما الأنواع الطيفية الأخرى فألوانها تتراوح ما بين أقصر موجات الضوء المرئي أي الأزرق وأطولها أي الأحمر. وشمسنا لونها بين الأبيض والأصفر كما هو مبين في جدول 10-2.



شكل 3.9: الأنواع الطيفية للنجوم

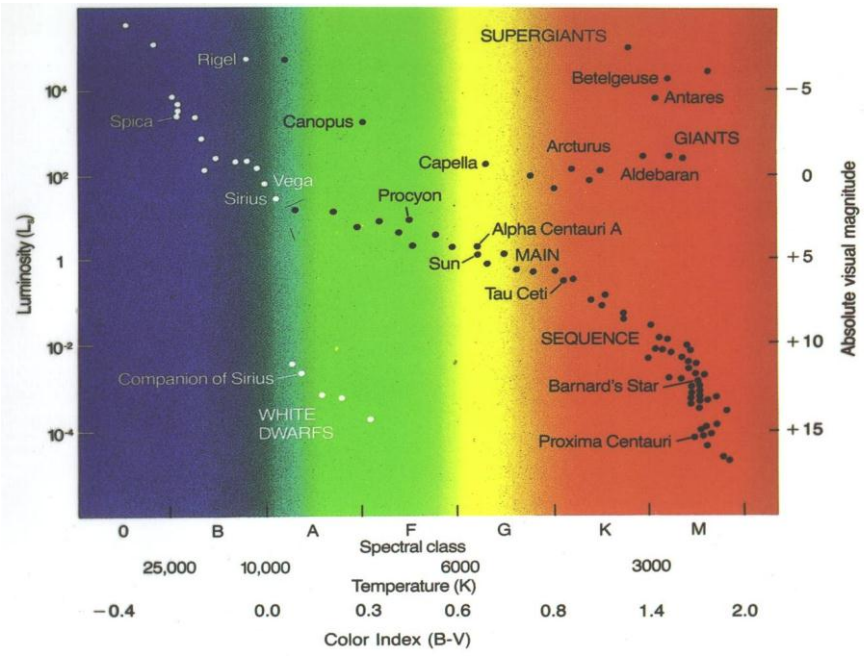
جدول 3.5: مقارنة بين ثلاثة نجوم مختلفة اللمعان

الخاصية	نجم لامع	الشمس	نجم خافت
الطيف	**O**	**G**	**M**
اللون	أزرق	أبيض مصفر	أحمر
درجة الحرارة (كالفن)	**40 إلى 60** ألف	**6000**	**3000**
القدر المطلق	**-5**	**5**	**10**
نصف القطر (قطر شمسي)	**20**	**1**	**0.1**
الكتلة (كتلة شمسية)	**100**	**1**	**0.05**

الشكل H-R

في حوالى عام 1905 استطاع الفلكي إيجنار هرتزسبرنج Ejnar Hertzsprung الحصول على نمط منتظم عند رسم العلاقة بيانيا بين القدر المطلق والدليل اللوني للنجوم، وبعدها بعدة سنوات حصل الفلكي هنري رسل Henry Russell على نفس الانتظام البياني بين القدر المطلق مع نوع الطيف بدلا من الدليل اللوني، وسمي هذا الرسم البياني بشكل H-R تخليدا لواضعيه السابق ذكرهما. يعتبر هذا الشكل من أهم الوسائل التي تساعد في معرفة بعض المعلومات المهمة عن

النجوم. فلو رسمنا القدر المطلق أو الضياء مع النوع الطيفي للنجوم لوجدنا أن غالبية النجوم تنتظم في شريط يمتد من أعلى اليسار إلى أسفل اليمين، بحيث يكون النجم الذي له قدر مطلق صغير أو ضياء عالي من النوع الطيفى O، بينما النجوم الباردة من النوع M لها أكبر قدر مطلق أو أصغر ضياء على هذا الشريط، شكل 10-9. سُمي هذا الشريط **بالتتابع الرئيس Main Sequence**، ونلاحظ أن الشمس تقع عليه، وطيفها من النوع G2. وقد لاحظ الفلكيون أنه توجد نجوم أعلى التتابع الرئيس وتسمى بالنجوم العملاقة وقد تكون عملاقة عادية أو عملاقة ضخمة Super-Giants ومن حيث نصف القطر فإن النجوم على التتابع الرئيس تتراوح أنصاف أقطارها من 0.1 من نصف قطر الشمس للنجوم من النوع M إلى 20 مرة نصف قطر الشمس في النجوم من النوع O، وهذا يعني أن نجوم التتابع الرئيس تتراوح في أحجامها ما بين 0.001 من حجم الشمس إلى عدة آلاف حجم الشمس



شكل 3.10: شكل H-R لمجموعة من مشاهير النجوم.

أما النجوم العملاقة فقد تصل في حجمها لمليون كرة شمسية. وبالنسبة لكتلة النجوم على التتابع الرئيس فتتراوح بين 0.1 إلى 15 كتلة شمسية، شكل 10-3. ويوجد تحت التتابع الرئيس نجوم اقزام بيضاء White Dwarfs، وهي بحق أقزام لأن أحجامها في حدود حجم الأرض. وأما عن كتل النجوم فإنها تتراوح ما بين 0.05 إلى 100 كتلة

شمسية كما هو مبين في جدول 3.5. وبمعرفة كلا من القدرين المطلق والظاهري للنجم يمكن حساب بعد النجم ومعلومات أخرى عنه. وفي محاولة لتتبع بعض مشاهير النجوم في شكل 3.10 سنلاحظ ما يلي:

1) من نجوم التتابع الرئيس: بالقرب من موضع الشمس على التتابع الرئيس سنجد نجوم ألفا قنطورس Alfa Centauri، تاو قيطس Tau Ceti. وفي التتابع من أسفل سنجد نجم برنارد Barnard's Star وبروكسيما قنطورس Proxima Centauri، وعلى التتابع أعلى من الشمس سنجد نجم الشعرى الشامية Procyyon والنسر الواقع Vega والشعرى اليمانية Sirius والسماك الأعزل Spica.
2) من النجوم العملاقة الحمراء: الدبران Aldebaran والسماك الرامح Arcturus وقلب العقرب Antares ومنكب الجوزاء Betelgeuse كما أن رجل الجوزاء Rigel وسهيل Canopus من العمالقة الزرقاء.
3) من الأقزام البيضاء: رفيقا الشعرى اليمانية Companion of Sirius والشامية.

نستطيع من خلال الشكل H-R معرفة الكثير من المعلومات عن خصائص النجوم، فإذا عرفنا أن نجما ما من نجوم التتابع الرئيس وأنه من النوع الطيفي A مثلاً فنستطيع من خلال شكل H-R أن نتعرف على بقية خواصه وهي أن درجة حرارة سطحه تبلغ 10 آلاف كالفن، وقدره المطلق 1، ودرجة لمعانه تزيد عن 100 لمعان شمسي. كما يمكن كذلك من خلال شكل H-R معرفة كتلة النجم وحجمه. وتمثل النجوم الموجودة على التتابع الرئيس أنواعاً حقيقية للنجوم، أما النجوم فوقه فإنها كانت في فترة ما من حياتها موجودة عليه ثم تركته لتدخل في مراحل متقدمة من عمرها كما سنبين ذلك عند شرح قصة حياة النجوم. إن اكتشاف وجود علاقة بسيطة بين القدر المطلق أو الضياء والنوع الطيفي والمتمثلة في شكل H-R كان من أهم الاكتشافات الفلكية التي ساعدت على التعرف على الكثير من خصائص النجوم دون عناء كبير.

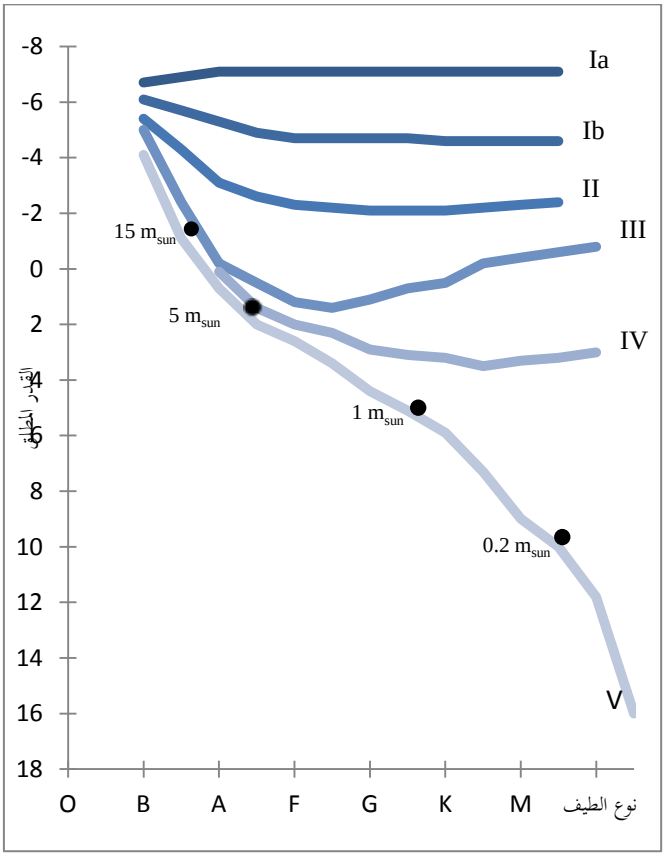
ومن جدول 3.5 توجد بعض الخصائص المهمة لنجم لامع وآخر خافت في مقارنة مع الشمس ونلاحظ منه أننا إذا اتجهنا على التتابع الرئيس نحو النجوم الساخنة فإن لون النجوم يميل إلى الأزرق كما أن درجة الحرارة واللمعان والحجم والكتلة جميعها تتزايد. أما إذا تحركنا في اتجاه النجوم الباردة فإن لون النجوم يميل للحمرة كما أن كلا من درجة الحرارة واللمعان والحجم والكتلة تقل، مع ملاحظة أن هذه المقارنة للنجوم وهي على التتابع الرئيس، أما إذا خرجت عنه

فإن خصائص النجوم تحكمها تفاصيل أخرى تجدها في قصة حياة النجوم. ويتضح مما سبق أن القدر المطلق من الصفات اللازمة والأساسية للنجوم، فإذا كان النجم من النجوم التي دخلت في مرحلة تغير بحيث أصبح من النجوم المتغيرة ففي هذه الحالة يصعب تحديد القدر المطلق للنجم قبل أن يصبح نجماً متغيراً، ولتحديد ذلك لابد من دراسة بعض خواص النجم التي يمكن من خلالها تحديد تاريخه السابق. ويمكن تقسيم النجوم المتغيرة إلى نوعين: نجوم متغيرة بشكل ظاهري ولكنها قد تكون مستقرة في حقيقتها وهي النجوم المزدوجة، ومنها النجوم المزدوجة الكسوفية والطيفية، ونجوم متغيرة حقيقة، حيث تحدث نوعاً من التغير في لمعانها بشكل دوري. ولنبدأ بالتعرف على النجوم المزدوجة أولاً ثم نتبعها بدراسة النجوم المتغيرة.

أقسام الضياء Luminosity classes

لقد تم تقسيم ضياء النجوم كما يلي، شكل 3.11:

1) نجوم التتابع الرئيس ويرمز لها بالرمز V
2) نجوم ما قبل العملاق IV
3) نجوم عملاقة حمراء III
4) نجوم عملاقة لامعةII
5) نجوم فوق عملاق Ib
6) نجوم فوق عملاق لامعة Ia



شكل 3.11: أقسام ضياء النجوم، وكتل النجوم على التتابع الرئيس مقارنة بكتلة الشمس

وهذا التقسيم تبعا للضياء يعطي بعدا مهما لتعريف حالة النجم. في حالة الشمس مثلا نكتب لها الرمز G2 V أي أنها من نجوم النوع الطيفي G ومن نجوم التتابع الرئيس. وإذا رمزنا لنجم F2 III فهذا يعني أنه من النوع الطيفي F2 وأنه في مرحلة العملاق. وقد يكون لدينا نجمان لهما نفس النوع الطيفي ولكنهما مختلفان في الضياء مثلا: A3 III ، A3 Ia سيكون النجم الثاني أكثر ضياءا من الأول، لأن الأول في مرحلة عملاق أحمر بينما الثاني أصبح فوق عملاق لامعا ... وهكذا.

ماذا نتعلم من أطياف النجوم؟

من خلال دراستنا لأطياف النجوم نتعلم الكثير عن خصائصها الفيزيائية وفيما يلي أهم نجح الفلكيين من تعلمه من أطياف النجوم :

1- الأنواع الطيفية للنجوم

2- درجة الحرارة T أو ما يسمى بالحرارة اللونية

3- الضغط

4- التركيب الكيميائي لغلاف النجوم

5- السرعة الخطية للنجوم Vr

6- الدوران حيث ينحرف لون الحافة القريبة نحو الأزرق وينحرف لون الحافة المبتعدة نحو الأحمر.

7- المجال المغناطيسي Zeeman splitting والذي يزداد في النجوم الساخنة

8- الاضطرابات والتي تؤدي لتعرض خطوط الطيف.

9- الغازات المقذوفة من النجم والتي تظهر كخطوط امتصاص أو انبعاث على طيف النجم.

أسئلة :

1- نجم متغير يتغير لمعانه بنسبة 4 أحسب التغير في قدره

2- نجم له : m = -0.4 , p = 0.03 arcsec أحسب: أ- بعده ب- قدره المطلق

3- ما هو بعد نجم له قدر مطلق +6.0 وقدر ظاهري +16.0

4- احسب القدر المطلق للنجوم التالية:

a- m = 5.0 , d = 100 pc

b- m = 10.0, d = 1 pc هل هذا النجم موجود ؟

c- m = 6.5 , d = 250 pc

d- m = -3.0 , d = 5 pc

e- m = -1.0 , d= 500 pc

f- m = 6.5, p = 0.004 arcsec

5- الشمس لها قدر ظاهري قيمته -26.75 أحسب:

أ- القدر المطلق للشمس

ب- القدر الذي يمكن أن تأخذه الشمس إذا كانت في بعد ألفا قنطورس (1.3 pc)

ج- يمكن لتلسكوب بالمر أن يرصد نجوم خافتة حتى القدر +19 كم يجب أن يكون بعد نجم مثل الشمس كي يمكن رصده بتلسكوب بالمر؟

6- حشد كري يتكون من عشرة آلاف نجم مئة منهم لهم M= 0.0 والباقي لهم M= +5.0 أحسب القدر المطلق للحشد.

7- نجمان لهما قدر $m_V = 7.5$ ولكن لهما قدر في الطيف الأزرق $m_{B2} = 8.7$, $m_{B1} = 7.2$ أحسب مايلي:

أ- الدليل اللوني (B-V) لكل نجم

ب- أيهما أكثر لمعانا ؟

8- أحسب الدليل اللوني (B-V) لنجم بعده 150 pc ورصدت له القدرين: $m_B = 2$, $m_V = 7.55$

1-نجمان a , b لهما قدرين ظاهريين 1و 5 احسب نسبة لمعانهما

2- How far away is the star Spica, whose parallax is 0.013”

2- ما بعد نجم الشعرى الشامية إذا علمت أن اختلافة الزاوي ---

3- A star lying 20 pc from the Sun has proper motion of 0.5”/yr. What is its transverse velocity? If the stars spectral lines are observed to be red shifted by 0.01 percent, calculate the magnitude of its velocity.

3- نجم يبعد عن الشمس 20 بارسك وحركتة الذاتية 0.5”/yr احسب السرعة العمودية. وإذا كان طيفه يعاني من إزاحة حمراء مقدارها 0.01 % احسب مقدار سرعته.

3- What is the luminosity of a star having three times the radius of the Sun and a surface temperature of 10,000 K?

4- احسب ضياء نجم له $R = 3R_{sun}$, $T = 10{,}000$ K

4- Two stars A and B of luminosities 0.5 and 4.5 times solar luminosity, respectively. They observed to have the same apparent brightness. Which one is more distant, and how much farther away it than the other?

5- نجمان ا و ب لهما ضياء 4.5 , 0.5 ولهما نفس القدر الظاهري. أيهما أبعد وبأي مقدار.

5- Two stars in an eclipsing spectroscopic binary are observed to have an orbital period of 25 days and orbital separation of 0.3 AU, and that one star is 1.5 times the mass of the other. What are the masses of the stars?

6- نجمان في نظام مزدوج طيفي وكسوفي لهما زمن دوري 25 يوم و$a = 0.3$ AU وكان أحدهما اكبر مرة ونصف عن الأخر. أحسب كتل النجمين.

6- Use the mass-luminosity relation to compute the luminosity range of stars from the observed mass range of 0.085 M_{sun} to 100 M_{sun}.

7- باستخدام العلاقة بين الكتلة والضياء أحسب نسب الضياء للكتل من 100 – 0.085 كتلة شمسية.

7- Estimate the radii of both MV ($L= 10^{-5} L_{sun}$, T= 3000 K) and a red supergiant MI($L=10^{6} L_{sun}$, T = 1000K).

8- احسب أنصاف الأقطار لنجمين أحدهما على التتابع الرئيسي MV ($L= 10^{-5} L_{sun}$, T= 3000 K) والثاني عملاق ضخم من النوع الطيفي MI ($L=10^{6} L_{sun}$, T = 1000K),

9- إذا علمت أن حشد نجمي له m-M = 5.5 أحسب بعد الحشد.

النجوم المزدوجة Binary stars

الكثير من النجوم في السماء موجودة في نظام ثنائي بحيث يتحرك النجمان حول مركز جاذبيتهما والذي يتحدد تبعاً لكتلة النجمين، كما أن هناك من النجوم ما يكون منفرداً مثل الشمس. وإذا كان النجمان من النجوم المزدوجة القريبة فإنه يمكن مشاهدة النجمين أثناء حركتهما حول مركز ثقلهما. أما إذا كان النجمان المزدوجان بعيدان عنا ففي هذه الحالة يمكن استخدام أحد الطرق التالية في التعرف عليهما:

1) من خلال ملاحظة تداخل طيفيهما أو حدوث انحراف في طيف أي منهما نتيجة للحركة النسبية.
2) من خلال ملاحظة حركة النجمين أو أحدهما حول محور مركز الكتلة وقد برزت أهمية هذه الطريقة في التعرف على الثقوب السوداء والنجوم النيوترونية.
3) إذا كان النجمان لهما قدرين مختلفين فيمكن ملاحظتهما من خلال الطريقة التي يتغير بها القدر الذي نشاهده لهما، وذلك حينما يكون الأكثر لمعاناً أمام النجم الأخفت فيظهر النجمان بشكل لامع، بينما إذا كان النجم الخافت أمام اللامع ظهرا بشكل خافت. وإذا كانت حركة

النجمين في النظام المزدوج تجعلهما بالنسبة للمشاهد كنجم واحد متغير، يختفي أحدهما خلف الآخر فيسمى هذا النظام **بالمزدوج الكسوفي** **eclipsing binary** وهو ذو أهمية كبيرة حيث أنه من خلال خسوف أحدهما خلف الآخر يمكن حساب سرعة كل منهما حول مركزهما وبالتالي يسهل تحديد الكتل لهما وأحجامهما كذلك.

تحديد كتل النجوم Stellar masses determination

قبل أن نتعرف على طرق حساب كتل النجوم نبدا أولا بالتعرف على طرق حساب كتلة الشمس. ويتم ذلك من خلال تتبع حركة الأرض أو أي من الكواكب حول الشمس. وسنشرح طريقتين لحساب كتلة الشمس:

الطريقة الأولي لحساب كتلة الشمس: (من خلال حركة الأرض حولها)

تدور الأرض حول الشمس في سرعة قدرها $V_e =$

$$30\ Km/s = 3\ \times\ 10^4\ m/s$$

وبعد الأرض عن الشمس

$$R_{es} \cong 150\ \times\ 10^6\ Km = 1.5\ \times\ 10^{11}\ m$$

ومن خلال المعادلة التالية يمكن حساب كتلة الشمس :

$$M_s = \frac{V_e^2 R_{es}}{G}$$

حيث G ثابت الجذب العام $\mathrm{G} = 6.7 \times 10^{-11}\ \ \frac{m^2}{Kg}\ .\ s^2$

$$\therefore M_s = \frac{(3 \times 10^4)^2\ \times 1.5\ \times 10^{11}}{6.7\ \times\ 10^{-11}}$$

$$\sim 2 \times\ 10^{30}\ Kg$$

الطريقة الثانية لحساب كتلة الشمس: (بإستخدام قانون كبلر الثالث)

يمكن حساب كتلة الشمس بإستخدام المعادلة التالية :

$$M_s = \left(\frac{4\pi^2}{G}\right).\left(\frac{a^3}{p^2}\right)$$

حيث $p = 1\ yr = 365 \times 24 \times 60 \times 60 \sim 3.15 \times 10^7\ s$

البعد المتوسط للأرض عن الشمس $a = 1.496 \times 10^{11}\ m$

ثابت الجزب العام $G = 6.67 \times 10^{-11}\ \ \frac{N.m^2}{Kg^2}$

$$\therefore\ M_s = \left(\frac{4\pi^2}{G}\right) \times \frac{(1.446 \times 10^{11})^3}{(3.156 \times 10^7)^2}$$

$$\sim 1.99 \times 10^{30}\ kg$$

وإذا علمنا أن حجم الشمس يكافئ حجم مليون كرة أرضية فهذا يؤكد أن كثافة الشمس أقل من حوالي ربع كثافة الأرض.

وبنفس الطريقة التي استخدمناها لحساب كتلة الشمس يمكن حساب كتلة الأرض بدلالة حركة القمر حوله وكذا حساب كتلة المريخ من خلال معرفة حركة أحد أقماره حوله ونفس الكلام ينطبق على بقية الكواكب التي لها أقمار.

حساب كتل النجوم المزدوجة القريبة:

إذا تساءلنا كيف يمكن حساب كتل النجوم؟ لا توجد طريقة سهلة ومباشرة لحساب كتل النجوم وأفضل وسيلة ممكنة هي من خلال النجوم المزدوجة، حيث أن قوة الجاذبية بين جسمين تتحدد على أساس كتلتي الجسمين والمسافة بينهما كما ينص قانون الجذب العام. فإذا رصدنا السرعة النسبية لأي من النجمين كنتيجة مباشرة لقوة الجاذبية فإننا بذلك يمكن أن نحدد كتلة النجمين في النظام المزدوج. وفيما يلي طريقة مبسطة يمكن من خلالها حساب كتلة نجمين في نظام **مزدوج قريب visual binary:**

لو تصورنا أن النجمين في النظام المزدوج صنعا مدارا له محور كبير a يمكن رصده كزاوية قوسيه، شكل 10-11 وبدلالة بعد النظام يمكن حساب المحور الكبير كمسافة خطية بالعلاقة:

$$a = d \times a''$$

حيث d تقاس بالبارسك و a بالوحدة الفلكية.

ومن ثم يمكن حساب مجموع كتلتي النجمين في النظام الثنائي باستخدام قانون كبلر المعدل كما يلي:

$$m_1 + m_2 = \frac{(d\ a'')^3}{P^2}$$

d تقاس بالبارسك و a تقاس بالوحدة الفلكية و P تقاس بالسنة والكتل تقاس بالنسبة لكتلة الشمس.

ومن خلال استخدام النجوم المزدوجة بأنواعها المختلفة تمكن الفلكيون من حساب الكتلة لعدد كبير من النجوم.

مثال: نجم الشعرى اليمانية موجود في نظام ثنائي ورفيقه قزم أبيض، فإذا كان:

$a = 7.5''$, $d = 2.67$ pc , $P = 50$ years احسب مجموع كتلتي النجمين، ثم بمعرفة أن مسافتي النجمين من مركز الثقل هما 2:1 احسب كتلة كل منهما.

الحل: باستخدام العلاقة أعلاه:

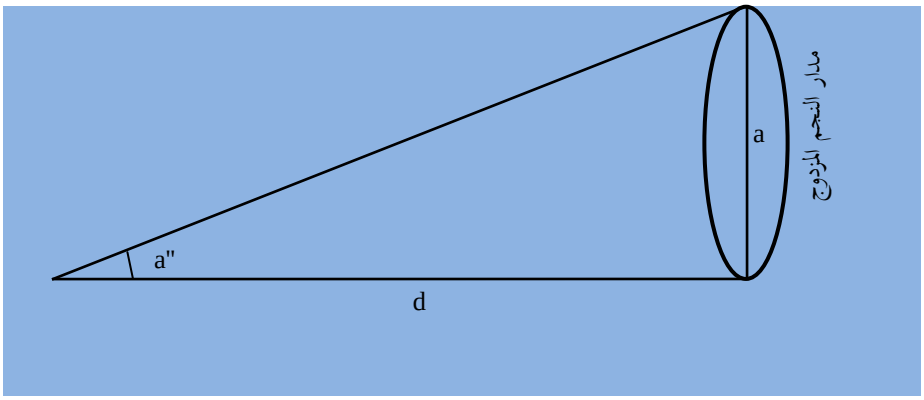
$$m_1 + m_2 = 3.2\ m_{sun}$$

ومن خلال علاقة مركز الثقل:

$$m_1 r_1 = m_2 r_2$$

حيث r_1, r_2 هما بعدي النجمين على التوالي.

فنجد ما يلي: كتلة الشعرى اليمانية = 2.13 كتلة شمسية وكتلة رفيقها القزم الأبيض = 1.07 كتلة شمسية



شكل 10-11: حساب كتلة نجمين في نظام مزدوج

حساب كتل النجوم المزدوجة طيفيا spectroscopic binary :

النجوم المزدوجة طيفيا هي نجوم بعيدة بحيث لا يمكن رصد النجمين منفصلين ولكن يمكن تمييز النجمين من خلال حركة طيفيهما. وبفرض أن السرعة النسبية في المدار V ومدة الدورة P فإن المسافة بين النجمين a يمكن حسابها بالمعادلة التالية:

$$A = (V \times P) / 2\pi$$

ثم نطبق على قانون كبلر

$$m_1 + m_2 = a^3/P^2$$

والوحدات كما يلي: V بوحدة AU/yr و P وحدتها yr و a وحدتها AU و m وحدتها ms أي كتلة شمسية.

مثال: نظام مزدوج طيفي له V = 100 ;m/s = 20 AU/yr,

أحسب كتل النجمين مع العلم بأن P = 17.5 d = 0.048 yr

Va = 25 km/s, Vb = 75 km/s

$$a = (20 \times 0.048)/ 2\pi = 0.153 \text{ AU}$$

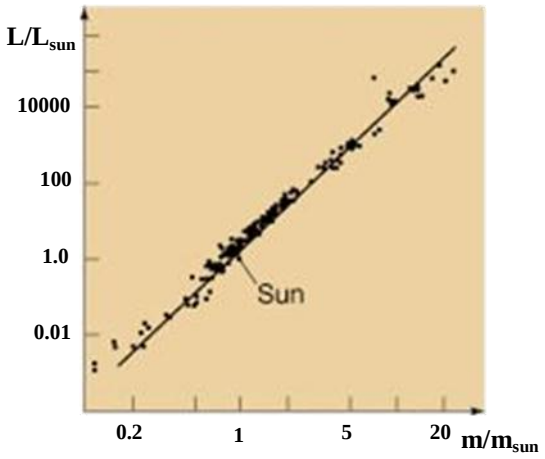
$$m_1 + m_2 = a^3/P^2 = (0.153)^3 / (0.048)^2 = 1.6 M_s$$

وحيث أن $m_a V_a = m_b V_b$ فإنه يمكن كتابة

$$M_a/m_b = V_b/V_a = 3$$

ومن ثم نجد أن : $m_a = 1.2\ M_s$, $m_b = 0.4\ m_s$

ولقد استطاع الفلكيين من خلال النظم المزدوجة حساب كتل الكثير من النجوم فتبين من دراسة نتائج الكتل التي تم حسابها أنه توجد علاقة خطية بين كتل النجوم ولمعانها. ومن خلال رسم علاقة بين الكتلة والضياء للنجوم وجد أنها علاقة خطية بسيطة كما هو مبين بالشكل 10-12. حيث تبين أن الضياء يزداد بزيادة الكتلة.



شكل 10-12: العلاقة بين الكتلة والضياء

ولاحقا من خلال الدراسات العملية والنظرية وضعت علاقة خطية بسيطة بين الكتلة والضياء كما يلي:

$$L \alpha M^x$$

حيث x =2 في النجوم الباردة من النوعين الطيفيين K, M وتساوي 3 في النجوم الطيفية الأخرى، أما الأرصاد الفلكية فتشير إلى أن x في حدود 3.5 ، ومن خلال حساب كتل النجوم سنلاحظ أنها تتراوح ما بين 0.05 إلى 100 كتلة شمسية. الحد الأقصى لكتل النجوم هو 100 كتلة شمسية والكتل الأقل من 0.05 كتلة شمسية هي لكواكب أو لأقزام بنية وليست نجوم.

حساب أقطار النجوم Computation of stellar diameters

توجد وسائل عدة لحساب أحجام النجوم نذكر منها:

1) استخدام النظام المزدوج الكسوفي
2) قياس الحجم الزاوي
3) الاقتران مع القمر أو أي من الكواكب
4) الطرق السابقة لا تتسم بالدقة الكافية، لذا كانت الطريقة المثلى هي تلك التي تعتمد على قانون الإشعاع. من تعريف الضياء L الذي هو الطاقة المنطلقة من كامل سطح الجسم في الثانية الواحدة:

$$L = 4\pi R^2 E$$

بالتعويض عن E في قانون ستيفان:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

حيث T الحرارة و R نصف قطر النجم و σ ثابت ستيفان. ومن خلال مقارنة النجم مع الشمس يمكن حساب قطر النجم بالنسبة للشمس كما يلي:

$$\frac{R*}{R_S} = \sqrt{\left(\frac{L*}{L_S}\right)} \left(\frac{T_S}{T*}\right)^2$$

وبهذه الطريقة نحصل على أدق طريقة لحساب نصف القطر لأي نجم بمعلومية ضياءه ودرجة حرارته.

مثال : نجم له $L = 400\ L_{sun}$ و $T = 3000\ K$. احسب نصف قطر النجم

$$R* = \sqrt{400}\ \left(\frac{6000}{3000}\right)^2 = 80\ R_{sun}$$

من الواضح أن هذا النجم أبرد من الشمس، ولكنه أكبر منها في الحجم مما يؤكد أنه نجم في مرحلة العملاق الأحمر.

وبشكل عام فإننا يمكن أن نجد نجوما تعادل مليون كرة شمسية في حجمها وأخرى في حجم أرضنا أي واحد على مليون من حجم الشمس. نجم قلب العقرب له نصف قطر $300\ R_{sun}$ والسماك الرامح له نصف قطر $23\ R_{sun}$ والعيوق $10\ R_{sun}$ والنسر الواقع $4\ R_{sun}$ والشعرى اليمانية $.2\ R_{sun}$

ويبين الجدول التالي الأنواع الطيفية ومعلومات عن خصائصها الفيزيائية

النوع الطيفي	الكتلة M Ms	الضياء L Ls	درجة الحرارة K T	نصف القطر Rs	الحجم Vs
O5	40	$5x10^5$	40,000	18	6000
B0	16	$2x10^4$	28,000	7	350
A0	3.3	80	10,000	2.5	15
F0	1.7	6	7500	1.4	3
G0	1.1	1.3	6000	1.1	1.3
K0	0.8	0.4	5000	0.8	0.5
M0	0.4	0.03	3000	0.6	0.2

وبشكل عام يمكن أن يتراوح ضياء النجوم من أكثر من مليون(10^6 Ls) في النجوم الساخنة إلى أقل من 10^{-4} Ls للأقزام البيضاء ودرجات الحرارة في أغلفة النجوم تتراوح ما بين $50,000\ K > T < 3000\ K$ وكتل النجوم تتراوح ما بين $100ms > m > 0.05ms$.

الفصل الرابع

النجوم المتغيرة والحشود النجمية

Variable stars and stellar clusters

تعتبر النجوم المتغيرة والحشود النجمية من المجالات الفلكية ذات الأهمية في قصة تطور النجوم، حيث تعتبر النجوم المتغيرة مرحلة من مراحل تطور النجوم، بينما تحتوي الحشود النجمية على نجوم في مراحل عمرية مختلفة. وهاتين الحقيقتين تؤكدان على أن النجوم المتغيرة والحشود النجمية هي من الدلائل الواضحة التي ساعدت على فهم بعض تفاصيل قصة حياة النجوم. وفيما يلي نتحدث أولا عن النجوم المتغيرة ثم نتبعها بالحديث عن الحشود النجمية.

النجوم المتغيرة variable stars

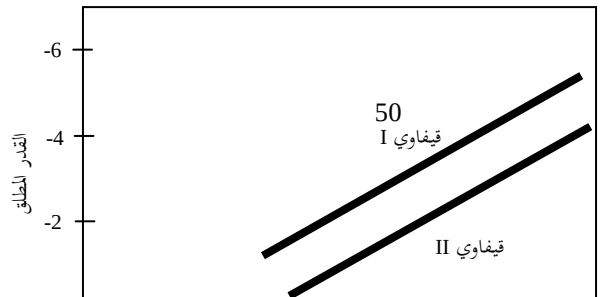
النجوم المتغيرة تمثل مرحلة من المراحل التي يعيشها النجم بحيث يحدث تغير في درجة اللمعان وفي الحجم، وبمعنى آخر يمكننا القول أن النجم المتغير هو نجم دخل في مرحلة من عدم الاتزان الهيدروستاتيكى ولذلك يتغير القدر المطلق لمثل هذه النجوم بشكل دوري من قمة

ضياء إلى أخفت ضياء حيث إن غلاف النجم يتمدد وينكمش. والنجوم المتغيرة تعرف بأنها **نابضة** **pulsating** نتيجة أنها تتغير في شدة لمعانها. وقد يكون أحد النجوم المتغيرة موجوداً في نظام ثنائي مع نجم آخر غير متغير أو نجم عملاق مع آخر قزم أبيض وفي هذه الحالة نشاهد ظواهر فلكية مدهشة. من ذلك أن القزم الأبيض إذا كان موجودا في نظام ثنائي وكان رفيقه عملاق أحمر فإن القزم الأبيض بفعل جاذبيته العالية يمتص من رفيقه العملاق الأحمر جزء من المادة فيحدث انفجار النوفا او حتى السوبرنوفا. تبرز أهمية النجوم المتغيرة لأمرين:

1) أنها تمثل مرحلة في حياة النجوم فهي ليست من أنواع النجوم بقدر ما هي حالة من الاضطراب قد يدخل فيها النجم أثناء مراحل تطوره المتأخرة. لذا فهي قرينة على قصة حياة النجوم.
2) توجد علاقة واضحة بين دورة تغيرها وضيائها لذا يمكن استخدامها في حساب أبعادها ومن ثم النظم التي توجد داخلها.

أنواع النجوم النابضة Types of pulsating stars

النجوم النابضة تشع بدرجات متفاوتة في الأوقات المختلفة فتظهر لذلك كأجسام نابضة. تتغير بشكل دوري من حيث التمدد والانكماش اي تتغير في حجمها ولمعانها ودرجة حرارتها. وهناك أمثلة متعددة للنجوم النابضة ويحتوى جدول 10-3 أهم هذه الأمثلة، وهي مختلفة من حيث الطيف ومن حيث دورة نبضها. **فالنجوم القيفاوية** **Cepheid stars** تتراوح فترات النبض لها من ثلاثة أيام إلى حدود شهرين، و**نجوم السلياق (القيثارة)** **RR Lyrae** تنبض في دورة تستغرق عدة ساعات فقط مما يعنى أنها قصيرة الدورة. النجوم النابضة تعتبر في غاية الأهمية حيث تستخدم كشمعة في التعرف على الأبعاد ، وبصفة خاصة أبعاد المجرات والحشود النجمية التي تكون موجودة بها. وحيث أن خواص هذه النجوم مدروسة بشكل جيد فيمكن التعرف على أي منها؛ وذلك لأن هذه النجوم معلومة القدر المطلق من خلال الدراسات الكثيرة التي تمت على مدار عشرات السنوات ، ويمكن التعرف عليها من خلال دورة تغيرها، فإذا رصدت في حشد فمن قياس القدر الظاهري لها وبمعرفتنا السابقة لقدرها المطلق يمكن حساب بعدها، وبالتالي بعد الحشد الذي توجد داخله. ويبين شكل 10-13 العلاقة بين القدر المطلق (أو الضياء) ومدة التغير في النجوم المتغيرة.



الشكل 10-13: العلاقة بين القدر ومدة تغير اللمعان للنجوم المتغيرة

جدول 10-3: النجوم المتغيرة

نوع النجم	النوع الطيفى	الدورة (يوم)	القدر المطلق
النجوم القيفاوية I	G – F عملاق ضخم	3 إلى 50	-1.5 إلى -5
النجوم القيفاوية II	F – G	5 إلى 30	صفر إلى -3.5
السلياق RR	A – F عملاق أزرق	أقل من يوم	1 إلى صفر

منحنى الضوء light Curve

برسم العلاقة ما بين القدر والزمن نجد منحنى يرسم درجات تغير قدر النجوم مع الوقت ومنها يمكن تحديد دورة تغير النجم المتغير كما في الشكل التالي

شكل ْ ْ++++ المنحنى الضوئي لنجم نابض

العلاقة بين زمن دورة التغير والضياء:

كما ذكرنا آنفا فإن النجوم المتغيرة يتغير لمعانها في دورة تعرف بدورة تغير اللمعان وتوجد علاقة طردية بين زمن دورة التغير P والضياء L لأي نجم نابض كما يلي:

$$P \alpha L$$

ومن هذه العلاقة يتضح أنه كلما إزداد لمعان النجم طالت دورة تغيره. ولذلك نلاحظ أن النجوم القيفاوية الأكثر لمعانا أطول في دورة تغيرها أما نجوم القيثارة وهي أقل في اللمعان وأقصر في دورة لمعانها. ومن ثم فبقياس زمن التغير للنجم المتغير يمكن تحديد ضياءه وبالتالي قدره المطلق . وبالرصد يمكن تحديد قدره الظاهري ثم باستخدام علاقة البعد القياسي:

$$m - M = -5 + 5\log r$$

يمكن حساب بعد النجم وبالتالي بعد النظام الذي يوجد فيه هذا النجم المتغير.

النجوم القيفاوية Cepheid Variables

النجوم القيفاوية سميت على اسم أول نجم يكتشف بهذه الخصائص من التغير وهو نجم δ Cepheids وهو أحد نجوم المجموعة القيفاوية ويوجد في مجرتنا وحدها أكثر من 700 نجم قيفاوي وأغلب هذه النجوم تقع بالقرب من قرص المجرة وهي نجوم عملاقة ضخمة supergiants أو عملاقة براقة bright giants من الأنواع الطيفية F,G ودورة النبض تتراوح ما بين يومين – 60 يوم(شهرين) ويوجد تغير في القدر يتراوح ما بين 1 – 0.5 مع ملاحظة انه ليس كل نجم في مرحلة العملاق البراق او العملاق الضخم يكون متغير قيفاوي. فقد يمر النجم بمرحلة العملاق او العملاق الضخم دون أن يصبح نجما متغيرا قيفاويا. فهناك شروط محددة للنجم العملاق او العملاق الضخم الذي يمر بمرحلة عدم الاستقرار ومن ثم يحدث له تغير في لمعانه ويصبح نجما متغيرا قيفاويا. بعض النجوم القيفاوية تظهر في الحشود النجمية المفتوحة وهي غالبا من القيفاوية I . عند أقصى زمن للتنغير يزداد لمعان النجوم القيفاوية لأكثر من 40,000 Ls أما عند الزمن الدوري الأدنى فإن ضياء النجم قد يكون عدة مئات ضياء شمسي. ويوجد نوعان من النجوم القيفاوية قيفاوية I وقيفاوية II كما هو مبين في الجدول التالي:

جدول ؟؟ : نوعي النجوم القيفاوية

نوع النجوم	قيفاوي I	قيفاوية II
نسبة المواد الثقيلة	عالية (Pop I)	فقيرة (Pop II)
اللمعان	أكثر لمعانا عن النوع الثاني	أقل لمعانا عن النوع الأول

النجم القطبي Polaris :

وهو من النجوم القيفاوية حيث P = 3.9 days وكان من المتوقع أن يحدث تباطؤ لدورة التغير حتى تختفي التغيرات في بداية عام 2000 ولكن الأرصاد أظهرت أن النجم القطبي مازال في دورة تغيرة ولم يحدث التباطؤ الذي كان متوقعا. ؟؟؟؟؟

وتبين الأرصاد أن النجوم القيفاوية يتغير نصف قطرها بنسبة 5–10 % مع نبضها وهذا التغير يمكن رصده من خلال تتبع الإزاحة الطيفية. وتقع النجوم القيفاوية فيما يعرف باسم شريط عدم الاستقرار instability strip وهو الشريط على الشكل H–R الذي يمثل المناطق المحتملة لدخول النجم في عملية التغير التي تعاني منها النجوم المتغيرة وقد لوحظ أن النجوم ذات الكتل العالية وكذلك الصغيرة تمر في شريط عدم الاستقرار في فترة بدء التفاعلات النووية على الهيليوم.

نجوم القيثارة RR Lyrae stars

دورة نبض هذه النوعية من النجوم المتغيرة تأخذ عدة ساعات وأقل من يوم وهي أقل لمعانا من النجوم القيفاوية كما أنها فقيرة في نسبة العناصر الثقيلة. يوجد في مجرتنا وحدها آلاف من نجوم القيثارة RR وهي موجودة في منطقة النواة وفي هالة المجرة حيث توجد الحشود الكرية. لوحظ أن كل الحشود الكرية تحتوي على نجوم القيثارة RR. يحدث تغير في القدر بمقدار واحد وهي نجوم في مرحلة العملاق الأزرق وأغلب ما رصد من نجوم القيثارة RR تقع في الأنواع الطيفيةِ A–F وهي جميعا تقع في منطة شريط عدم الاستقرار.

النجوم الحمراء المتغيرة

وهي نجوم تتسم بدورة طويلة في زمنها من 100 يوم – 2000 يوم. وإذا كانت النجوم القيفاوية والقيثارة متغيرة بشكل اعتيادي فإن هذه النجوم لها دورة تغير غير اعتيادية. المتغيرة الحمراء في مراحل العملاق الأحمر والعملاق الضخم ومن الفصيلين Pop I, Pop II ودرجة ضيائها في حدود 100 ضياء شمسي. وما يميز هذه النجوم أن بها طبقة للتفاعلات النووية وليس لب به تفاعلات نووية. وما يحدث هو وجود طبقة من الهيليوم بها تفاعلات نووية وهي طبقة غير مستقرة مما يحدث نبضات حرارية هي سبب نبض النجم ما بين تمدد وانكماش من خلال طبقة انتقال الحرارة بالحمل.

فيزياء التغير :

ما يحدث في النجوم المتغيرة ناتج عن تغير في درجات الحرارة للطبقات الخارجية للنجم كما يوجد تغير في نبض النجم من حيث تغير حجمه حيث تتمدد طبقات الفوتوسفير وتتكمش . ومن الواضح أن ما يحدث هو نبضات في الطبقات الخارجية للنجم أما لبه فلا يشعر بتلك النبضات بل هو في انكماش مستمر مع تطور النجم في حياته.

النجم النابض يعمل مثل الزنبرج فعندما يكون النجم منكمشا فإن درجة حرارته تكون عالية بدرجة تكفي لتأين الهيليوم والطاقة الزائدة تتحول لطاقة حركة تعمل على تسخين الغاز في غلاف النجم من خلال ازدياد معدل تصادم الجسيمات من تأثير طاقة الحركة. ومع زيادة درجات الحرارة فإن الضغط يزداد على الطبقات الخارجية فتبدأ في التمدد وعندما تنتهي عمليات تأين الهليوم فإن الأشعة يمكنها أن تخرج لخارج النجم بسهولة وبالتالي يفقد النجم جزء من طاقته فيبدأ في البرودة وبالتالي يقل الضغط وتنكمش الطبقات الخارجية مرة أخرى. ومع الانكماش يبدء تزايد الضغط ويحدث أن يلتقط الهيليوم المتأين الكتروناته مرة أخرى يوعود لحالة التعادل. وبهذه الطريقة تتذبذب الطبقات الخارجية بين تمدد وانكماش وتأين في الهليوم وعودتة لحالة التعادل والحرارة ما زيادة ونقص. وقد يتبادر للذهن إذا كانت كل النجوم ليها نسبة من غاز الهيليوم فلم لا تمر كل النجوم بمرحلة التغير هذه؟ لماذا نرى نجوم تتغير وأخرى مستقرة لا تتغير؟ تمر النجوم بشريط عدم الاستقرار ولكن يتغير بعضها ولا يغير البعض الآخر. فلماذا يحدث ذلك وهل يمكن أن يكون لدينا تفسير لذلك؟ وتكمن الإجابة على هذا السؤال في أن النجوم الباردة فإن عمليات تأين الهيليوم تقع في طبقات عميقة بالقرب من اللب وبالتالي فإن عمليات النبض التي يمكن أن تحدث بها يصعب أن تحمل كل ما فوقها من طبقات لتحدث تمدد أو انكماش ملحوظ على النجم لثقل الطبقات فوق تلك الطبقة. أما النجوم الأسخن فإن عمليات تأين الهيليوم فتحدث في طبقات قريبة جدا من خارج النجم وبالتالي فإن ثقل الطبقات التي تعلوها ليست بالثقل الكافي لعمل الانكماش الذي يمكن أن نلاحظه ولذلك فإن النجوم الباردة جدا وكذلك الساخنة جدا لن نلاحظ فيه عمليات التمدد والانكماش.

كما يمكن أن نقول أن شريط عدم الاستقرار هو المنطقة من الشكل H–R التي تكون فيها درجات الحرارة المناسبة تماما لتأين الهيليوم والذي يحدث نبضا في النجم. وتوجد علاقة بين زمن النبض ومتوسط كثافة النجم كما يلي

$$P \alpha \rho^{-1/2}$$

كلما كانت دورة نبض النجم قصيرة كلما كانت كثافته أعلى. أي أن الكثافة المتوسطة في نجوم القيثارة RR أعلى مما في النجوم القيفاوية. وكذلك يمكننا أن نفسر السبب في وجود نوعين للنجوم القيفاوية والفارق الوحيد بينهما هو في نسبة العناصر الثقيلة فهذا الفارق يجعل طبقات النجوم القيفاوية II أقل شفافية من النوع الأول (قيفاوية I) وبالتالي فإن الطاقة يمكنها أن تخرج بشكل أسرع نجوم النوع الثاني مما يجعلها أقل لمعان من النوع الأول.
كما لاحظ الفلكيين أن النجم قد يمر بشريط عدم الاستقرار أكثر من مرة وبالتالي يعاني من عملية التغير أكثر من مرة في حياته.

الحشود النجمية Stars clusters

تتجمع النجوم في حشود، وتوجد الحشود داخل نظم أكبر تعرف بالمجرات، فإذا عرفنا أن الشمس لها نصف قطر حوالى 109 أمثال نصف قطر الأرض، فإن نصف قطر الحشد يتراوح ما بين $4.4x10^8$ إلى $8.8x10^9$ نصف قطر شمسي وبهذا يتضح لنا مدى ضخامة هذه التجمعات النجمية. يوجد نوعين رئيسيين من حشود النجوم وهي: حشود كرية Globular clusters، وحشود مفتوحة Open clusters.

تعتبر حشود النجوم من الأهمية من حيث دراسة خصائصها الفيزيائية والديناميكية. كما يمكن من خلال دراسة ديناميكية الحركة للحشود بمجرتنا أن نتعرف على العديد من خصائص المجرة. وللحشود أهمية أخرى في أنها أحد الأدلة القوية على تطور النجوم، حيث توجد بها نجوما متنوعة في أعمارها ومن خلال أقدم نجومها تتحدد أعمار الحشود نفسها وبالتالي يمكن تحديد أعمار المجرات من خلال أعمار أقدم حشودها وهكذا. وفيما يلي نتعرف على كل نوع من الحشود:

أولا: الحشود الكرية Globular clusters

الحشود الكرية عبارة عن تجمع كبير من النجوم له شكل كروي بحيث تزداد الكثافة العددية للنجوم كلما اتجهنا نحو مركز الحشد، مما يجعل عملية هروب النجوم من الحشد غاية في الصعوبة، وقليل من الحشود يظهر في شكل مفلطح. تحتوى الحشود الكرية على النجوم المتغيرة من نوع القيثارة RR Lyrae، وبعض الحشود بها نجوم من النوعين: النجوم القيفاوية و**نجوم Rv الثور**. وسرعات الحشود الكرية حول مركز المجرة عالية كما أنها تحتوي على نسبة

0.01 إلى 0.1 فقط من العناصر الثقيلة، مما يعنى أن نجومها قديمة، وحيث أنها تحتوي على كثافة عالية من النجوم لذلك فهى مستقرة ومتماسكة. يبلغ عدد نجوم الحشود الكرية ما بين مائة إلى ألف نجم في البارسك المكعب في مركز الحشد، ولكن هذا لا يعني أنه لا توجد فراغات، فلو تصورنا أن الأرض تدور حول أحد نجوم المركز لحشد كروي فإن النجوم المجاورة ستظهر كنقط مضيئة في السماء، ولكن بشكل عام فإن مجرتنا سيصبح تمييزها أمراً صعباً وستكون السماء مظلمة كسمائنا وهي مضاءة بضوء القمر. متوسط عدد النجوم في الحشود الكرية في حدود 100 ألف نجم. تدور الحشود الكرية حول مركز المجرة في مدارات شديدة الاستطالة كمدارات المذنبات حول الشمس، وفي المتوسط فإن الحشد يدور حول نواة المجرة في فترة تبلغ 100 مليون سنة. عدد الحشود الكرية في مجرتنا حوالي 125 حشد وهي تنتشر في هالة المجرة وفي منطقة النواة ، تتميز اطيافها باللون الأحمر ويتراوح قطر الحشد الكري مابين 20 – 100 بارسك.

ثانيا: الحشود المفتوحة Open clusters

كثافة النجوم في هذه الحشود أقل بكثير مما هو في الحشود الكرية، بحيث يمكن تمييز النجوم عن بعضها. توجد هذه الحشود في قرص المجرة ولذلك تسمى أحياناً **بالحشود المجرية galactic clusters** وسرعتها صغيرة، ومن المعتقد أنها نشأت داخل أذرع المجرة، ونجومها من الجمهرة ا (Population I)، لذا تحتوي الحشود المفتوحة على نسبة 1-4% من العناصر الثقيلة، ونتيجة لأنها لا تحتوي على كثافة عالية من النجوم كما هي الحال في الحشود الكرية لذلك فإن النجوم في مركزها مستقرة، أما النجوم التي على أطراف الحشد فإنها من السهل أن تهرب بعيداً عن الحشد حيث إن جاذبية المركز لها تعتبر ضعيفة، وفي جدول 10-4 مقارنة بين نوعي الحشود.

أما الحشود النجمية للتجمعات النجمية الحديثة في العمر والتي تسمى **حشود ائتلافية stellar association**، فهي غير مستقرة البتة، فالنجوم التي تولد معا في سحابة واحدة لا تستقر في مكان ولادتها إنما تنتقل إلى حشود أكثر استقرارا وهذا ما يمكن أن نطلق عليه هجرة النجوم. ونحن لا نعلم أين أخوات الشمس من النجوم والتي نشأت معها فقد تفرقت هذه النجوم. وحيث أن شمسنا ليست مستقرة في أحد الحشود النجمية لذا يمكننا تصور أنها نجم مهاجر يبحث عن حشد ليستقر فيه. تظهر نجوم الحشود المفتوحة متباعدة ولذلك أمكن دراستها بشيء من التفصيل أكثر من نجوم الحشود الكرية. غالباً ما تكون الحشود المفتوحة مصاحبة بسحب ما بين النجوم لأنها موجودة في قرص المجرة، ولقد تم رصد أكثر من ألف حشد مفتوح في مجرتنا وحدها ولكن مازال

العديد من الحشود المفتوحة غير مرصود بسبب السحب الكثيفة، ومن أشهر الحشود المفتوحة حشد الثريا. وهو حشد يحتوي على ما يقرب من 100 نجم ويغلب على طيفه اللون الأزرق لحداثته. وتعتبر الحشود المفتوحة أصغر حجماً و أقل كثافة من الحشود الكرية.

من المعلوم أن النجوم الساخنة O, B ليست موزعة في السماء وإنما تتجمع في حشود ائتلافية ويرمز لها بالرمز O وهي تقع على أذرع المجرة. كما أن النجوم حديثة التكوين T- Tauri يولد العديد منها في سحابة واحدة كبيرة مثل ذلك الحشد النجمي المكون من أربعة نجوم وليدة متراصة على شكل شبه منحرف (Trapezium cluster) في منطقة كوكبة الجبار. ولكن هذه التجمعات للنجوم الوليدة لا تستمر كثيرا في مواقعها حيث تتباعد، مما يعني أن النجوم الوليدة تترك أرحامها التي نشأت فيها لترحل وتستقر في أحد الحشود المستقرة، وبالتالي بعد عدة ملايين من السنين ينتهي وجود تلك التجمعات الصغيرة. ويعتقد الفلكيون أن النجوم الوليدة مازالت في المرحلة الأخيرة من التكوين ولم تصل بعد إلى التتابع الرئيس. كما يمكن ملاحظة أن أخوات الشمس التي ولدت معها من النجوم قد تباعدت عنا ولا نعرف أين هي الآن نتيجة حركة النجوم وعدم استقرارها داخل الحشد الذي ولدت بداخله.

الخواص العامة للحشود بأنواعها المختلفة General properties for clusters

الحشود عبارة عن تجمعات من النجوم تكونت معاً (في الوقت نفسه) ومن المادة نفسها. والاختلاف في مقدار اللمعان في نجوم الحشد الواحد يدل على اختلاف حقيقي في مقدار إشعاع النجم؛ لأن بعد الحشد عنا واحد، وحيث إن نجوم الحشد الواحد لها العمر نفسه، والمادة الابتدائية نفسها، فإن اختلاف مقدار الإشعاع ناشئ عن اختلاف الكتل وبالتالي اختلاف مسار التطور. يمكننا معرفة عمر الحشد من مكان أقدم نجومه على شكل H-R، كما لوحظ وجود مادة ما بين النجوم في الحشد الائتلافي معبرة بذلك عن الجزء الباقي من مادة السحب التي انكمشت وكونت النجوم، أما عن التركيب الكيميائي فإن النجوم تتكون من He, H بالإضافة إلى كمية قليلة جداً من العناصر الثقيلة، وتختلف نسبة هذه العناصر الثقيلة حسب نوع الحشود، كما هو مبين في جدول 10-5، والذي يبين مقارنة بين أنواع الحشود:

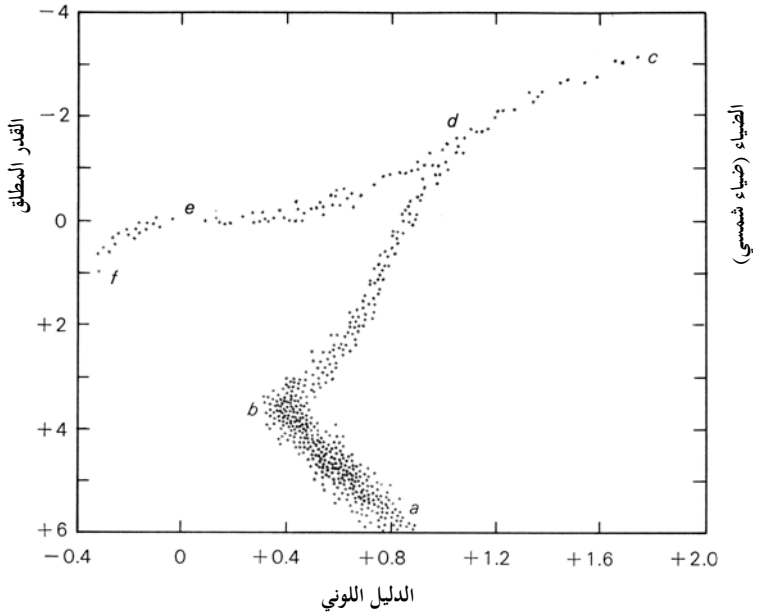
جدول 10-4: نوعا الحشود وصفاتها العامة

الخاصية	الحشود الكرية	الحشود المفتوحة
العدد داخل مجرتنا	125	1125
الموقع داخل المجرة	الهالة والنواة	القرص والأذرع
القطر (بارسك)	20 – 100	أقل من 10
الكتلة (كتلة شمسية)	$10^4 - 10^5$	100 – 1000
عدد النجوم	$10^5 - 10^4$	10^4 - 50
لون ألمع نجم	أحمر	أحمر – أزرق
القدر المطلق	5- إلى 10-	صفر إلى 10-
كثافة النجوم (لكل بارسك مكعب)	0.5 – 1000	0.1 – 10
العمر	قديمة	حديث – قديم
مثال	الجاثي (M 13)	الثريا

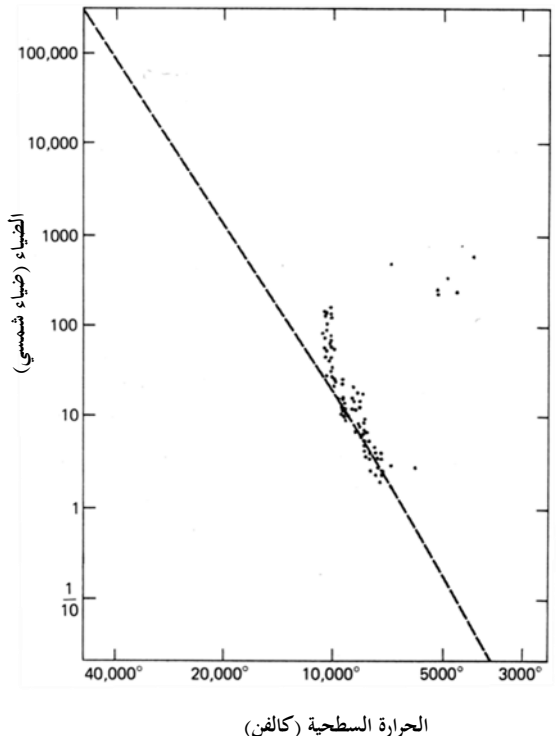
شكل H-R للحشود النجمية H-R diagram for star clusters

كل الحشود الكرية لها شكل H-R متشابه بحيث تمثل المسافة على الشكل 10-14 من a إلى b مرحلة التتابع الرئيس، من b إلى c عبارة عن عملاق أحمر وما قبل العملاق. من d إلى f تمثل الفرع الأفقي في تطور النجوم وهي مرحلة لفظ النجم لطبقاته الخارجية فيما يعرف باسم مرحلة السدم الكوكبية، وتوجد فجوة في الفرع الأفقي عند القدر المطلق , M= 0 (النقطة e)، والنجوم الموجودة في هذه الفجوة عبارة عن نجوم متغيرة من نوع القيثارة RR Lyrae وتعتبر نجوم الحشود الكرية من الجمهرة II.

أما الحشود المفتوحة فإن شكل H-R يختلف من حشد لآخر، ولكن أغلب نجومها توجد على التتابع الرئيس، خاصة الحديث منها، انظر شكل 10-15(أ ، ب)، ونجد قليلا من النجوم قد وصل لمرحلة العملاق وما بعدها. والنجوم في هذه الحشود تعتبر من الجمهرة I، وأهم خواص الجمهرتين مبينة في جدول 10-5 .

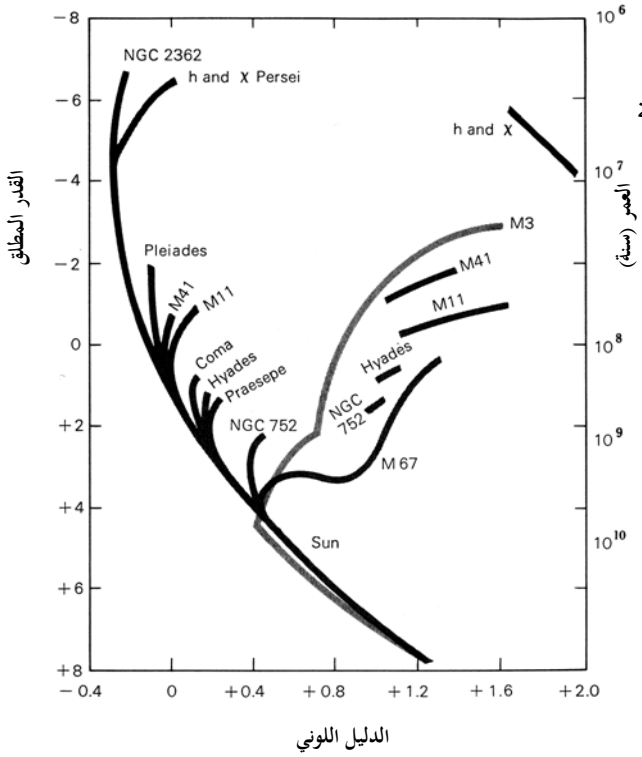


شكل 10-14: علاقة H-R لحشود كرية افتراضية. المنطقة a-b تمثل نجوم التتابع الرئيس، b-d التحول للعملاق الأحمر، d-e-f مرحلة السدم الكوكبية وما بعدها نحو القزم الأبيض (Exploration of the Universe)



شكل 10-15 أ: علاقة H-R لحشد مفتوح حديث

(Exploration of the Universe)



شكل 10-15 ب: علاقة H-R للحشود المفتوحة

(Exploration of the Universe)

جدول 10-5: جمهرتا النجوم الحديثة والقديمة

	الجمهرة I	الجمهرة II
مثال	الشمس	نجوم في هالة المجرة
وقت التكوين	حديثة التكوين	قديمة التكوين
العناصر الثقيلة	1-4%	0.1-0.01 %

أما الحشود الكرية فكثير من نجومها قد تحول إلى مرحلة العملاق الأحمر وما بعدها مما يؤكد أنها حشود قديمة في العمر. ويمكن تحديد عمر الحشد من خلال نقطة التحول عن التتابع الرئيس turn-off point، كلما كانت هذه النقطة على التتابع الرئيس من أعلى كان الحشد حديثا في عمره حيث تكون نجومه الكبيرة فقط هي التي تحولت إلى مرحلة العملاق. أما إذا كانت نقطة التحول على التتابع الرئيس من أسفل فهذا يعني أن الكثير من نجوم الحشد قد تطورت لمرحلة العملاق وما بعدها. ومن ذلك يتضح أن الحشود النجمية تعطي أدلة واضحة ومنسجمة مع نظريات تطور النجوم. وتستخدم الحشود الكرية كأحد الوسائل في تحديد عمر الكون حيث من خلال تحديد أقدم الحشود يمكن تقدير عمر الكون. والدراسات الفلكية الحديثة تحدد عمر الكون ما يقرب من 13 byr .

الفصل الخامس

تركيب النجوم وتفاعلاتها النووية

Stellar structure and nuclear reactions

ما الذي يجعل النجوم مستمرة في الإشعاع لفترات عمرها الطويلة؟ كما بينا سابقاً حينما تكلمنا عن الشمس فإن النجوم عبارة عن كتلة غازية ملتهبة ويوجد في داخلها قلب به تفاعلات نووية، وهذه التفاعلات هي مصدر الطاقة الأساسي للنجوم. كما أن النجوم تظل في حالة اتزان هيدروستاتيكي إذا كانت مستقرة ولها قدر ثابت مثل الشمس فهذا يعني أنها ليست من النجوم المتغيرة، أما إذا كان النجم متغيرا فإنه في هذه الحالة لا يكون في حالة اتزان هيدروستاتيكي بل يتمدد و ينكمش، ويظل في حالة عدم اتزان وعدم استقرار حتى يحدث اتزان بين جميع القوى المؤثرة عليه وبعد ذلك يعود النجم إلى حالة الاتزان الهيدروستاتيكي.

التفاعلات النووية في باطن الشمس:

تعتبر التفاعلات النووية مصدر الطاقة التي تجعل الشمس مستمرة في الإشعاع كما نراه، وتختلف التفاعلات النووية في النجوم حسب كتلها وحسب عمرها. وحيث أن عنصر الهيدروجين هو العنصر الأساسي في الكون وفي الشمس كذلك، لذا فهو يلعب دوراً مهما في إنتاج الطاقة اللازمة لحياة الشمس. والتفاعلات النووية إما أن تكون اندماجية أو انشطارية، وفي الشمس والنجوم تكون التفاعلات النووية اندماجية في أغلبها. والتفاعلات النووية لا تحدث إلا في لب الشمس حيث تكون الظروف من الحرارة والضغط ملائمين لها، ويمكن أن نلخص التفاعلات النووية التي تحدث في لب الشمس فيما يلي:

أ- تتحد نواتا ذرتي هيدروجين لتكونا نواة ديوتيريوم

$$^{1}H + {}^{1}H \longrightarrow {}^{2}H + e^{+} + \upsilon$$

وتخرج أشعة نيوترينو υ وبوزيترون e^{+} والذي يصطدم بدوره مع إلكترون، فيفنى الاثنان ويتحولا إلى أشعة جاما، وبعد 10 مليون سنة تجد هذه الأشعة طريقها إلى سطح الشمس.

ب- يتحد بروتون نواة الهيدروجين مع نواة الديوتيريوم ليكونا نواة ^{3}He تحتوي على بروتونان ونيوترون، وفي هذا التفاعل تخرج كمية أكبر من أشعة جاما.

$$^{2}H + {}^{1}H \longrightarrow {}^{3}He + \upsilon$$

ج– تتحد نواتا ^{3}He لتكونا نواة ذرة ^{4}He (وهو عنصر الهيليوم المستقر الذي نعرفه في حياتنا) على الشكل التالي:

$$^{3}He + {}^{3}He \longrightarrow {}^{4}He + 2^{1}H$$

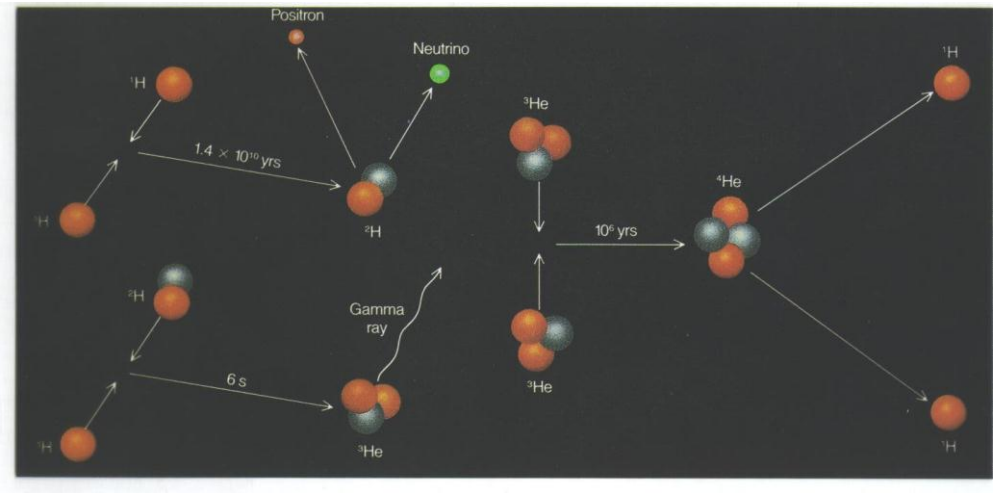
وتدخل نواتا الهيدروجين المتبقيتان في تفاعلات نووية أخرى، ونفهم من الخطوات السابقة أن أربع ذرات هيدروجين تتفاعل لتكون ذرة هيليوم، وكتلة ذرتي الهيدروجين والهيليوم هما 1.007825 ، 4.00268 وحدة كتلة ذرية على التوالي، ولذلك فإن كتلة الأربع ذرات هيدروجين تساوي 4.0313 وحدة كتلة ذرية أي تزيد عن كتلة ذرة الهيليوم بمقدار 0.02862 وحدة كتلة ذرية، وهذا يعني أنه يحدث فقد في الكتلة ومقداره $\frac{0.02862}{4.00268} = 0.00715$ من الكتلة الأصلية، وهذا المقدار المفقود يتحول إلى طاقة تشعها الشمس، فإذا كانت كتلة الشمس تساوي $2x10^{33}$ جرام، وبفرض أن اللب الذي تحدث فيه التفاعلات النووية يبلغ 0.1 كتلة الشمس، فإن كمية الكتلة التي تتحول إلى طاقة في داخل الشمس يبلغ:

$$M= 0.00715 \times 0.1 \times 2x10^{33} = 1.4x10^{30} \text{ gm}$$

ومن قانون أينشتين لتحول الكتلة إلى طاقة نجد أن كمية الطاقة التي يمكن أن تشعها الشمس في فترة تحول الهيدروجين إلى هيليوم تساوي:

$$E = MC^2 = 1.4x10^{30} \times (3x10^{10})^2 = 1.3x10^{51} \text{ erg}$$

وحيث إن الشمس تشع ما مقداره $4x10^{33}$ إرج في الثانية، لذلك فإنها تستطيع أن تستمر في الإشعاع لمدة $3.2x10^{17}$ ثانية أي حوالى 10 بليون سنة تقريباً، وهذا هو العمر المقدر للشمس أن تستمر خلاله تشع بنفس القدر الذي تشع به الآن، شكل 9-13. ويقدر العلماء أن الشمس في منتصف عمرها في الوقت الحالي أي في مرحلة الشباب من حياتها. تسمى دورة التفاعلات النووية التي تحدث في لب الشمس بدورة بروتون– بروتون p–p cycle ، وفي النجوم الساخنة تحدث دورة أخرى للتفاعلات النووية بالإضافة لدورة بروتون–بروتون تسمى دورة الكربون – النيتروجين – الأكسجين وتكتب اختصاراً CNO cycle.



شكل 9-13: التفاعلات النووية التي تحدث في باطن الشمس وينتج عنها تكوين الهيليوم من الهيدروجين.

إن محصلة التفاعلات النووية التي تحدث داخل الشمس أن كل أربع ذرات هيدروجين تتلاحم لتكون ذرة هيليوم، وعلى هذا فالشمس مصنع كوني كبير يصنع الهيليوم من الهيدروجين، وهذه العملية التي تتم في باطن الشمس مازال الإنسان عاجزاً أن يتحكم فيها ويوظفها، وهو حلم جميل يسعى الإنسان أن ينجح في تقليد هذه الآية الكونية العجيبة والتي نسميها النجوم، حيث تندمج نويات العناصر الخفيفة لتكون عناصر أثقل وتنتج عن هذه التفاعلات كميات هائلة من الطاقة لتعيش منها النجوم كمصادر للضوء بلايين السنين. ولو تيسر للإنسان هذا المصدر من الطاقة بطريقة سهلة آمنة، فإن البشرية ستكون قد خطت خطوة كبيرة في عالم التقدم والرفاهية.

سلاسل التفاعلات النووية في أنوية النجوم Nuclear reactions series in stellar interiors

توجد عدة سلاسل للتفاعلات النووية التي تحدث داخل النجوم، منها سلسلة بروتون – بروتون (P–P) ومنها السلسلة المعروفة بدورة C N O ومنها سلسلة ألفا ثلاثية. ومن الملاحظ أن الطاقة المنتجة داخل قلب النجم تنتقل إلى الخارج بطريقتين تعملان في نفس الوقت: إحداهما الإشعاع والثانية الحمل، وفي النجوم التي تكون على النصف الثاني من التتابع الرئيس (أي الأبرد وهي الأنواع M, K, G, F) يحدث الحمل في الطبقة الخارجية والإشعاع في الطبقة الداخلية تماما مثل الشمس، وهذا يعني أن النجوم أسفل التتابع تشبه الشمس في تركيبها الداخلي، أما نجوم أعلى التتابع الرئيس (O, B, A) فإن طبقة الإشعاع تكون خارجية وطبقة انتقال الحرارة

بالحمل هي التي تلي اللب مباشرة. ويمكن تقدير العمر الافتراضي لأي نجم عن طريق تقدير كمية الطاقة التي يمتلكها أو بمعنى أدق التي يمكن أن ينتجها من خلال التفاعلات النووية والطاقة التي يشعها في الثانية الواحدة والتي تعرف بضياء النجم. وبالطبع ستعتمد كمية الطاقة التي يمكن أن ينتجها النجم على كتلته ومن ثم يمكن حساب عمر النجم من خلال المعادلة التالية:

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

حيث t عمر النجم، t_{sun} عمر الشمس، M كتلة النجم بدلالة كتلة الشمس، L الضياء للنجم بدلالة ضياء الشمس. وفيما يلي نعطي أمثلة بسيطة لفهم كيفية حساب عمر النجم.

مثال: كم عمر نجم من النوع M وله كتلة تساوي 0.05 من كتلة الشمس؟

بالرجوع إلى شكل العلاقة بين الضياء والكتلة، أو شكل H–R نجد أن ضياء هذا النجم يساوي 0.0001 من ضياء الشمس، إذا:

$$t = t_{sun} \frac{0.05}{10^{-4}} = 500\, t_{sun}$$

ويقدر عمر الشمس بعشرة بليون سنة.

يبين المثال السابق أن النجوم من النوع الطيفي M سيكون عمره أطول من عمر شمسنا بكثير ، أما إذا أخذنا نجما من النوع O وكتلته 50 كتلة شمسية فإن عمره سيكون في حدود عدد قليل من ملايين السنين، وهذا يعني أنه يكون قصير العمر نسبيا، والسبب في ذلك أن النجوم شديدة اللمعان تفقد طاقتها بسرعة، بينما كلما كان النجم خافتا طال عمره. ولذلك فإن من الحقائق المعروفة أن عدد النجوم الخافتة في السماء أكبر بكثير من عدد النجوم اللامعة. والجدول التالي يبين العمر التقديري للأنواع الطيفية المختلفة للنجوم

جدول ( ) العمر للأنواع الطيفية المختلفة.

العمر على التتابع الرئيسي	الكتلة (كتلة شمسية)	النوع الطيفي
1 Myr	40	O5
10 Myr	16	B0
500 Myr	3.3	A0
2.7 byr	1.7	F0
9 byr	1.1	G0
14 byr	0.8	K0
200 byr	0.4	M0

وقد وجد أن الهيدروجين يتحول بالاندماج النووي إلى هيليوم، والهيليوم يتحول بدوره إلى كربون وتستمر سلسلة التحول إلى عناصر ثقيلة تنتهي بالتحول إلى حديد كما هو مبين في شكل 10-16 . ومعنى ذلك أن التفاعلات النووية داخل النجوم تُكثر من مقادير العناصر الثقيلة في تركيبها، وبذلك تزداد كمية هذه العناصر في الوسط بين النجوم، حيث تلفظ النجوم في المراحل الأخيرة من عمرها جزءاً كبيراً 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 السحيق، وتقدر نسبة العناصر الثقيلة في الشمس بما يزيد عن 4% مما يعني أن الشمس أو بمعنى أدق المجموعة الشمسية قد نشأت داخل سحابة بين نجمية تم تغذيتها ببقايا غازات لفظها نجم سابق أو نجوم سابقة وهي في مرحلة السوبرنوفا، ولذلك يمكننا القول بأن العناصر الثقيلة التي نبحث عنها في تربة الأرض قد تكونت داخل نجم ما أنفجر في الماضي السحيق، ولا نكون قد أخطأنا إذ قلنا إن المادة التي خلق منها الإنسان هي مادة تشكلت داخل النجوم ذاتها. ومن حيث التركيب فإن النجوم الموجودة في أسفل التتابع الرئيس (F, G, K, M) لها تركيب مثل الشمس وبذلك فإنها تحتوي على الطبقات الخارجية المعروفة بالكروموسفير والكورونا. أما النجوم اللامعة (O, B, A) فلا يوجد بها كروموسفير ولا كورونا، أما النجوم العملاقة فقد وجد فيها كروموسفير ولكنه ليس من المؤكد أن يكون بها كورونا.

وعودة إلى التفاعلات النووية نلاحظ أن النجم يتحول من مرحلة اندماج أنوية الهيدروجين لتكوين الهيليوم إلى المرحلة التالية لها وهى مرحلة تكوين الكربون من الهليوم تحت

شرط مهم وهو ارتفاع درجة حرارة لب النجم إلى القدر اللازم لبدء التفاعل النووي الجديد كما هو مبين في الجدول التالي :

جدول( ) مدي التفاعلات النووية في النجوم ذات الكتل المختلفة

العملية	الوقود	الناتج	T (Million K)	M min (M_s)
اندماج H	H	He	20	0.1
اندماج He	He	C	200	1
اندماج C	C	O, Ne, Na, Mg	800	1.4
اندماج Ne	Ne	O, Mg	1500	5
اندماج O	O	Mg – S	2000	10
اندماج Si	Mg – S	الحديد	3000	20

لابد وأن تكون درجة الحرارة في لب النجم تزيد عن 20 مليون كلفن حتى يستطيع عمل اندماج لأنوية الهيدروجين ويصنع منها هليوم. كما أنه في حالة تكوين الكربون من الهليوم يحتاج النجم لدرجة حرارة في لبه تصل إلى 200 مليون كلفن وهكذا ترتفع الحرارة في باطن النجم من مرحلة إلى التي تليها

ويمكن حساب بعض معدلات انتاج الطاقة في المراحل المختلفة كما يلي:

1- معدال انتاج الطاقة من تفاعل P-P

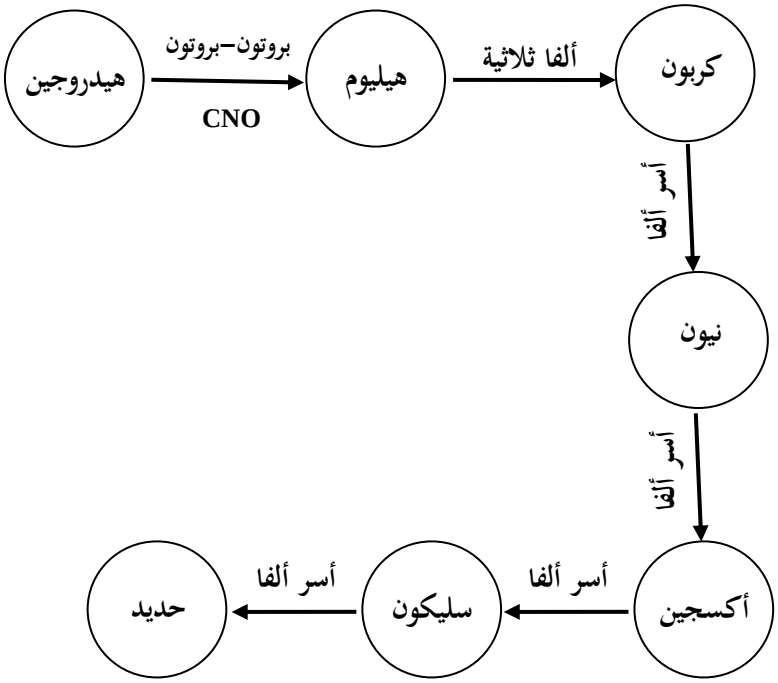
$$\varepsilon_{pp} \ \alpha \ T^4$$

2- معدل انتاج الطاقة من تفاعل CNO

$$\varepsilon_{CNO} \ \alpha \ T^{19.9}$$

3- معدل انتاج الطاقة من تفاعل ألفا ثلاثية triple alpha:

$$E_{triple\ alpha} \ \alpha \ T^{41}$$



شكل 10-16: سلسة التفاعلات النووية

يتضح من خلال معدلات انتاج الطاقة أن كمية الطاقة التي يتم انتاجها بواسطة CNO تكون أعلى بكثير مما يتم انتاجه في سلسلة P–P كما أنها تصبح أكبر بكثير في سلسلة ألفا ثلاثية. ومن خلال معدلات انتاج الطاقة يمكن تفسير قصر أعمار النجوم الكبيرة في الكتلة حيث أنها تفقد مادتها بسرعات عالية بسبب معدلات انتاج الطاقة العالية. يفقد النجم من النوع o ما مقداره كتلة شمسية كل 100 ألف سنة وهذا يعني أنه يفقد أغلب كتلته المقدرة بعشرات من الكتل الشمسية في فترة حياته والمقدرة بعدد قليل من ملايين السنين. وتبين سلسلة التفاعلات أن اللب يكون محتويا على هيدروجين إذا كان النجم في بداية حياته ولكن في نهاية حياته فإن لبه يحتوي على طبقات من عناصر أثقل كالكربون أو المغنيسوم أو الحديد وكل طبقة تتكون من عنصر معين بحيث يمكن تشبيه لب النجم كأنه عبارة عن طبقات مختلفة في تركيبها وكأنها حلقات مثل حلقات حبة البصل. ومع وصول النجوم لمراحل متأخرة من التفاعلات النووية فإن الكثافة تزداد وبصفة خاصة عند الوصول لمرحلة تكوين الحديد في اللب تزداد الكثافة بمقدار كبير جداً ومن

ثم قوة الجاذبية تزداد بشكل كبير مع تطور النجم كلما وصل النجم إلى المراحل الأخيرة من حياته مما يؤدي إلى تزايد انكماش النجم وبالتالي يقل حجمه ليصبح مثل حجم الأرض أو أصغر في حالة القزم الأبيض، كما يقل الحجم إلى أصغر من ذلك بكثير في حالة النجوم النيوترونية (بقطر يبلغ حوالى 10كم فقط) كما نلاحظ أن المراحل المتأخرة من التفاعلات النووية تأخذ أوقاتا أقل بكثير من تلك التي في بداية حياة النجم. مرحلة تحول الهيدروجين لهيليوم تأخذ القسم الأكبر من حياة النجم 85–90 % ثم يليها تحول الهيليوم إلى كربون أما في المراحل الأخيرة التي يتكون فيها الحديد والعناصر الأصغر فقد لا تستغرق سوى ساعات أو أقل في عمر النجم. وهذا يفسر العنف الشديد الذي نلاحظه في المراحل المتأخرة من حياة النجوم نتيجة التغيرات السريعة والشديدة في نفس الوقت.

تصور عن مستقبل الكتل المختلفة :

من خلال دراسة كتل الأجرام المختلفة يمكن تحديد مستقبل أية كتلة جديدة من سحب مادة ما بين النجوم حين تتكمش على نفسها لتكوين نجم جديد كما هو مبين في الجدول التالي .

نهاية حالة التطور	الكتلة البدائية (كتلة شمسية)
كوكب	أقل من 0.01
قزم بني	$0.01< M < 0.08$
قزم أبيض (He)	$0.08 < M < 0.25$
قزم أبيض (C–O)	$0.25 < M < 8$
قزم أبيض (O–Ne–Mg)	$8 < M < 12$
نجم نيوتروني و سوبرنوفا	$12 < M < 30$
ثقب أسود	$30 < M$

ونلاحظ من الجدول عدة ملاحظات:

1– الكتل أقل من 0.01 كتلة شمسية تنتج كوكبا وليس نجما أما الكتل الأكبر فتنتج نجوما

2– الكتل التي تتراوح ما بين 0.08 –0.01 كتلة شمسية تنتج قزم بني وهو لا يري وله خصائص تختلف عن النجوم العادية حيث أنه لا يتمكن من تحويل الهيدروجين إلى هيليوم. والكتل الصغيرة منه ($13\ M_J$ حيث M_J كتلة كوكب المشترى) تعمل اندماج نووي للديوتيريوم أما

الكتل الكبيرة والتي تزيد عن $65\ M_J$ فهي تعمل اندماج نووي لليثيوم وتتوقف بعد ذلك تفاعلاتها النووية.

3- الكتل التي تتراوح ما بين 12 – 0.08 كتلة شمسية تنتج نجوما يمكن أن تتطور ولكن تنتهي حياتها كأقزام بيضاء

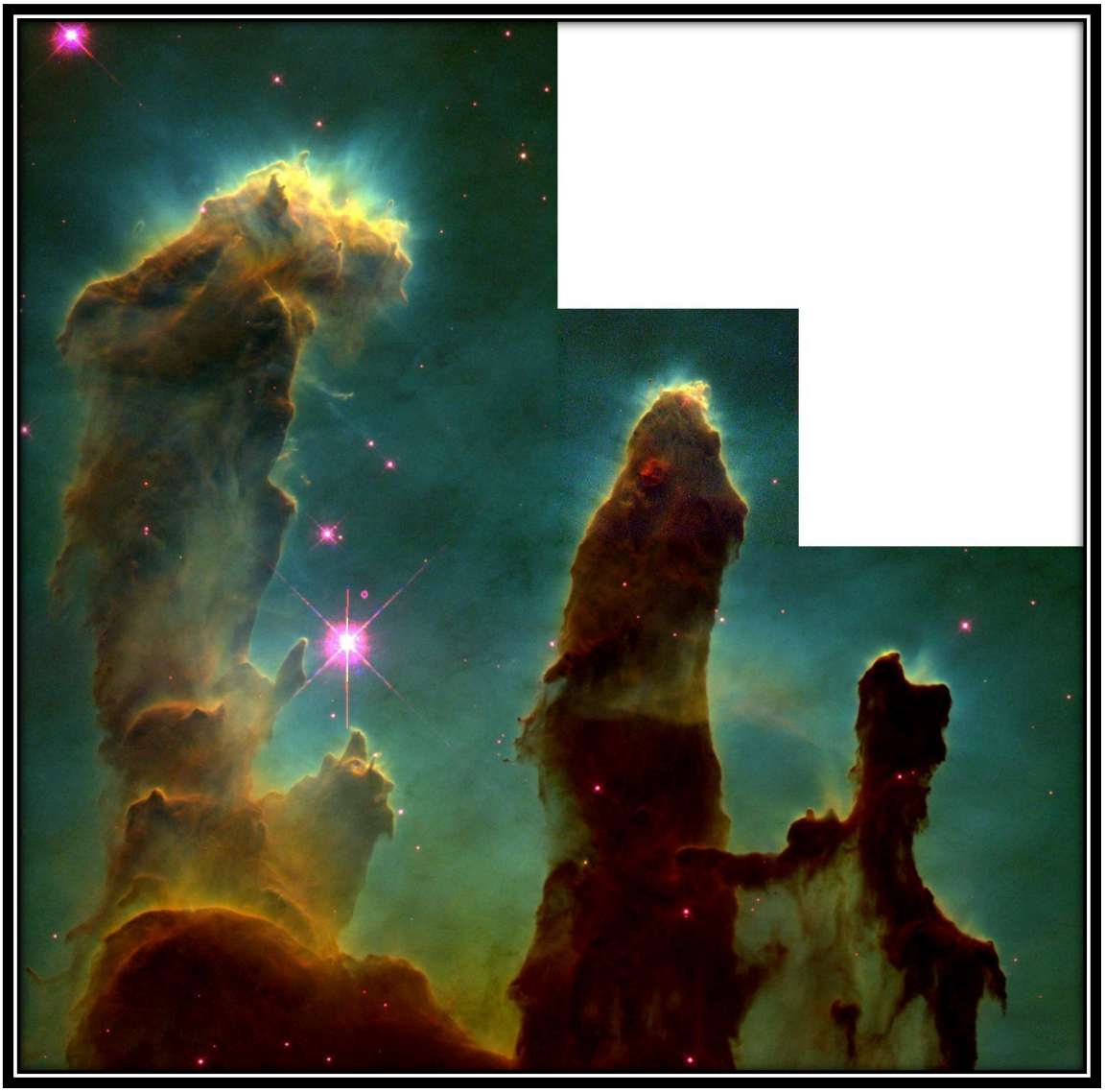
4- الكتل ما بين 30-12 كتلة شمسية تنتج نجوما يمكن أن تشكل في نهاية حياتها انفجارات السوبرنوفا وتصبح في نهاية حياتها نجوما نيوترونية أما الكتل الأكبر من 30 كتلة شمسية فتنتهي حياتها كثقوب سوداء.

وما سبق يشير إلى أن مادة النجوم حين تتكمش على بعضها لتكون النجوم الجديدة فقد تصبح الكتل المتشكلة صغيرة بحيث لا يمكنها تكوين نجوم وانما تكون كواكب فالكتلة المتشكلة من جراء عمليات الانكماش هي التي تحدد مصير الجرم الذي يتكون. كما أن هذا الكلام يؤكد أن الكواكب والنجوم هي أخوات تتشكل في سحب ما بين النجوم وفي نفس الرحم. ومن هنا يمكن أن نقول أن كواكب المجموعة الشمسية وأقمارها من نفس عمر الشمس فهي في الحقيقة أخوات للشمس وتكونت معها في نفس الرحم .

الفصل السادس

سحب ما بين النجوم (مهد النجوم)

Interstellar clouds (stellar maturity)



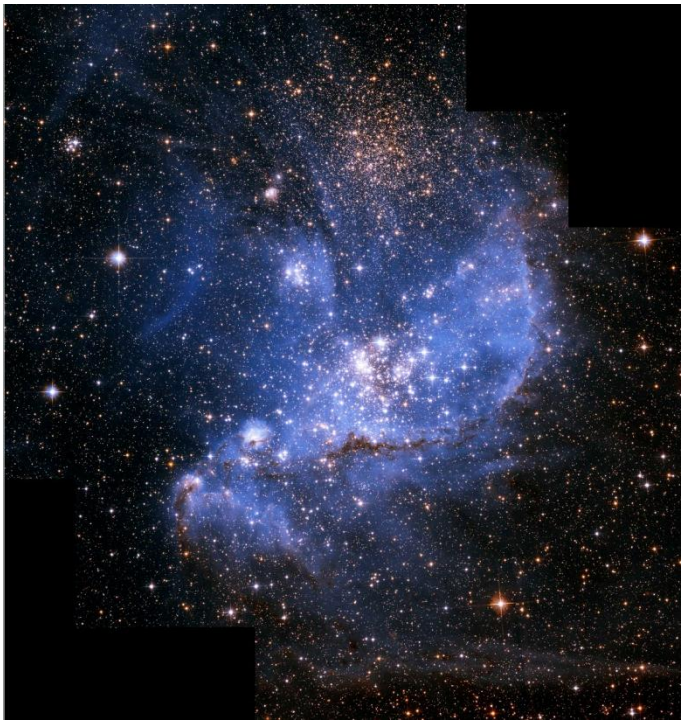
أعمدة الغاز في منطقة تكون نجوم (مهد النجوم) في سديم النسر M16 (HST)

لقد لاحظ الفلكيون وجود مادة من الغازات وبها بعض الأتربة تملأ فراغ ما بين النجوم، وهذه المادة تتجمع في شكل سحب تعرف **بسحب ما بين النجوم Interstellar clouds**، وقد لوحظ أن أغلب هذه السحب تتركز في أذرع المجرات وهي مناطق ضغط عالي، كما توجد النجوم

حديثة الولادة أيضاً في أذرع المجرات بل وفي داخل هذه السحب مما جعل الفلكيون يفكرون في العلاقة بين النجوم وتلك السحب، شكل 10-17. يختفي ضوء النجوم بسبب وجود السحب الكثيفة أو ما تسمى **بالسدم المظلمة**، وتحتوي هذه السدم على حبيبات تمتص الحرارة الصادرة من النجوم ثم تشعها في المجال تحت الأحمر. وتظهر سحب ما بين النجوم بأشكال وألوان مختلفة تبعاً لقربها أو بعدها عن النجوم، فكلما وجدت نجوم قريبة من السحابة أو بالقرب من سطحها ظهرت السحابة لامعة، بينما إذا كانت النجوم تقع خلف سحابة كثيفة فإن السحابة تُخفي معالم النجوم وتظهر السحابة كمنطقة مظلمة شكل 10-18. كما نلاحظ بشكل عام أن ضوء النجوم يقل ويتحول إلى اللون الأحمر، كحمرة قرص الشمس عند الغروب، وتستخدم هذه الظاهرة في التعرف على سحب ما بين النجوم وتسمى ظاهرة احمرار النجوم. وتتكون سحب ما بين النجوم من غاز الهيدروجين وقليل من الهيليوم بالإضافة إلى نسبة ضئيلة جداً من العناصر الثقيلة والأتربة التي تلعب دوراً مهما في تطور سحب ما بين النجوم.

لقد أصبح معروفاً لدى الفلكيين أن النجوم تولد داخل سحب ما بين النجوم، فقد رُصدت بالفعل نجوم حديثة داخل تلك السحب. وتتبع عملية تكوين النجوم يعتبر واحداً من الموضوعات المثيرة حقاً وفيه كثير من التساؤلات الشيقة، ويمكننا القول إنه أصبحت لدينا الآن فكرة واضحة عن العوامل الفيزيائية والكيميائية التي تؤدي إلى تكون النجوم وتاريخ نموها ونشأتها داخل سحب ما بين النجوم. وبطبيعة الحال فإن فهم هذه العملية يحتاج إلى فهم طبيعة تلك السحب لأنها المهد الذي تتكون فيه النجوم.

شكل 10-17 أ: منطقة N11 لتكوين النجوم في سحابة ماجلان الكبرى (HST)



شكل 10-17 ب: نجوم جديثة النشأة NGC 346 في سحابة ماجلان الصغرى (HST)

شكل 10-18 أ: سديم رأس الحصان NGC 2024 وهو من السدم الشهيرة والتي كانت معروفة لدى العرب. سديم رأس الحصان عبارة عن سحابة مظلمة تحجب الضوء المحيط بها. يقع هذا السديم في كوكبة الجبار وعلى بعد 500 بارسك من الشمس، كما يبدو نجم النطاق متوهجا بالقرب من مركز الصورة اليسرى وقريبا من رأس الحصان (Astronomy Today)

شكل 10-18 ب: سديم لامع NGC 1999 (HST)

كيمياء سحب بين النجوم chemistry of interstellar clouds

بالإضافة للغازات والحبيبات فإن هناك نوعاً ثالثاً من الجسيمات توجد في وسط ما بين النجوم ونسيمها **الأشعة الكونية** **cosmic rays** وهي عبارة عن بروتونات و ألكترونات ذات سرعات عالية، تبلغ 0.9 من سرعة الضوء، وهذه الأشعة لها دور مهم في تأيين ذرات الغاز داخل سحب بين النجوم، وتلعب الأيونات بدورها دورا مهما في كيمياء سحب ما بين النجوم. تشغل سحب ما بين النجوم الحجم الأكبر من المجرة، خاصة ما يعرف **بالسحب الجزيئية العملاقة** **Giant Molecular Clouds** (GMC)، وليست النجوم كما قد يتبادر إلى الذهن. وتبلغ كتل هذه السحب بشكل عام ما بين 100 إلى مليون كتلة شمسية، وأقطارها تتراوح بين 15 إلى 60 بارسك، شكل 10-19. وهذه السحب تكون باردة خاصة في مراكزها البعيدة عن النجوم لحوالى 10-20 كالفن. ويمكن التعرف على أماكن انتشار سحب ما بين النجوم باستخدام طيف 21 سم وهو ناتج عن انبعاث من تصادمات بين ذرات الهيدروجين.

خط طيف انبعاث 21 سم:

عندما يكون دوران إلكترون ذرة الهيدروجين حول نفسه(spin) موازي لدوران البروتون حول نفسه نقول أن ذرة الهيدروجين في الحالة العالية للطاقة المغناطيسية (high state of magnetic energy) ونتيجة تصادم ذرات الهيدروجين مع بعضها داخل سحب ما بين النجوم فقد يصبح دوران الألكترون حول نفسه عكس دوران البروتون فتصبح الذرة في أقل وضع للطاقة المغناطيسية وحين يحدث التحول من وضع الطاقة الأعلى للأقل ينبعث من الذرة خط 21 سم من الذرة وهذا الخط يقابل تردد قدره 1.420406 GHZ . وحيث أن عنصر الهيدروجين هو العنصر الغالب على تكوين سحب ما بين النجوم لذا فإن عمليات انبعاث خط 21 سم الراديوي يمكن أن يستخدم كوسيلة فعالة في رصد سحب ما بين النجوم مهما كانت باردة وبعيدة. وهذا يجعل طيف 21 سم الراديوي مهما للغاية في تتبع سحب ما بين النجوم بل وكان لأرصاد طيف 21 سم دورا مهما للغاية في رسم صورة دقيقة لتركيب مجرتنا . وهذا الفهم الفيزيائي لحركة الجسيمات داخل ذرة الهيدروجين لعب دورا مهما في هذا الاكتشاف العظيم.

رسمه ؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟؟

الجزيئات في سحب ما بين النجوم:

وإذا أردنا أن نتعرف على تكوين السحب الجزيئية فإن أرصاد الطيف الصادر منها تشير إلى وجود جزئيات كثيرة مثل H_3^+ CN, CH, CH^+, CO, HCO, وغيرها الكثير بما يزيد عن 120 جزيئاً. وتتفاعل ذرات الهيدروجين والأكسجين والكربون والنيتروجين والكبريت لتكون جزيئات الماء وأول أكسيد الكربون والأمونيا وكبريت الهيدروجين وغيرها من الجزيئات العضوية. بل توجد أيضاً جزيئات معقدة مثل HC_9N, C_2H_5OH, HC_3N, CH_3CHO وكحول الإثيل وغيرها الكثير، ولكن الجزيء الأساس هو بالطبع H_2. ومن طريف القول أن كيمياء سحب ما بين النجوم تختلف بشكل كبير عن الكيمياء التي نعرفها على الأرض، مما يجعل كوكبنا فريدا في خصائصه لم نر له مثيلاً في ظروفه حتى الآن وكأن المولى عز وجل هيأه للحياة البشرية، لذلك يمكننا القول أن الكيمياء التي نعرفها على الأرض تعد شيئاً غريباً لم نر له مثيلاً في الكون المحيط بنا، فمثلاً نجد أن جزيء الأكسجين الموجود بكثرة في غلافنا الجوي نادر في الكون، لدرجة أننا نبحث عن طريقة تكونه في سحب ما بين النجوم، كما أن جزيء الهيدروجين وهو أساسي في الكون نحتاج إلى وسائل

معملية لتكوينه على الأرض، وهناك العديد من الجزيئات المستقرة في الكون بينما هي غير مألوفة وغير مستقرة على الأرض مثل الجزيئين: $HCO,\ H_3^+$.

الاحمرار الناتج عن سحب ما بين النجوم interstellar reddening :

من خلال الأرصاد الفلكية اتضح أن عملية امتصاص الطيف في سحب ما بين النجوم تساوي ثلاثة أضعاف الدليل اللوني

$$A_v \sim 3\ CE$$

حيث A_v معدل الاندثار المرئي visual extinction و CE الدليل اللوني.

وبالتالي فإن معادلة المسافة القياسية distance modulus يمكن أن يعاد كتابتها لمراعاة تاثير سحب ما بين النجوم على ما نرصده من أطياف النجوم كما يلي

$$m = M + 5\log r - 5 + A_v$$

ويمكن حساب معدل الاندثار لأي طيف من خلال المعادلة التالية

$$A_\lambda = 1.086\ \tau_\lambda$$

حيث τ_λ العمق الضوئي optical depth .

شكل 10-19: سديم الجبار (M42 or NGC1976) أحد أشهر السدم اللامعة في السماء، ومن المناطق النشطة لتكوين النجوم، يحوي داخله سحابة جزيئية كتلتها 500 كتلة شمسية. يرى بالعين المجردة كسحابة ضبابية تقع أسفل حزام الجبار، على بعد 500 بارسك من الشمس ويبلغ عرضه حوالى 7 بارسك (HST).

مناطق HII :

رسمة

في الأجزاء من سحب ما بين النجوم القريبة من النجوم الساخنة والمعروفة بمناطق HII حيث يكون الهيدروجين متأين وتكون درجة حرارة الغاز تزيد عن 10^4 K **وذلك بفعل تأثير حرارة النجوم الساخنة والتي تعمل الاشعة فوق البنفسجية الصادرة عن النجوم الساخنة على تأيين الهيدروجين** ومع التحام أيون الهيدروجين H^+ مع الألكترون ليتعادل الهيدروجين ويعود لشكله الذري فإنه يحدث انبعاث لكل سلاسل الأشعة التي تصدر من الهيدروجين ويمكننا رصد أشعة بالمر في الضوء المرئي بسهولة. وبهذه الطريقة يمكننا القول أن أشعة UV من النجم تتحول لضوء مرئي من خلال انبعاث سلسلة بالمر من الهيدروجين. **وتظهر مناطق HII بلون أحمر نتيجة وفرة الأطياف الحمراء من خطوط بالمر. وعمق منطقة HII حول النجم قد تبلغ عدة سنين ضوئية.** وأشتهرت مناطق الهيدروجين المتأين كمناطق مضيئة من الغاز تعرف باسم السدم المضيئة .emission nebulae

منطقة الجوزاء Orion region :

يوجد في كوكبة الجوزاء العديد من السحب الجبارة وأهمها منطقة **سديم الجوزاء الكبير** وهو موجود في حزام الجوزاء. ويحتوي سديم الجوزاء الكبير على منطقة HII تحيط بحشد به ما يزيد عن 500 نجم وليد وهذا الحشد طوله 30 سنة ضوئية وأعمار النجوم داخل الحشد لا تزيد عن مليون سنة فهي حديثة التكوين. وأكبر هذه النجوم من حيث الكتلة نجم كتلته تزيد عن 40 كتلة شمسية ودرجة حرارته حوالي 30,000 K وضياؤه L_s 300,000 < L . ,بمقارنة هذه النجوم مع نجوم غرب كتف الجوزاء والتي تزيد عن 12 مليون سنة ومن خلال تتبع أعمار النجوم في مختلف مناطق كوكبة الجوزاء يمكن أن ندرك أن عمليات تكوين النجوم بدأت في الكتف الغربي ثم تدريجيا تحول نحو جنوب شرق الجوزاء.

كما يوجد في سديم الجوزاء الكبير سحابة كثيفة وداخلها حشد آخر يمكن رصده في الأشعة تحت الحمراء وهو حشد من الأجسام النجمية الوليدة وهذا حشد أكثر حداثة من الحشد السابق ذكره.

ولادة النجوم Birth of stars

إذا أردنا أن نتعرف على **مرحلة جنين النجم** protostar فعلينا أن ننظر إلى السحب الجزيئية العملاقة، وهي ليست منتظمة من حيث توزيع المادة داخلها، بل نجد أن المادة تتجمع وتتركز في بعض الأماكن داخل السحابة مكونة ما يعرف بسحيبات كثيفة من المادة تبلغ درجة حرارتها 10 إلى 50 كالفن، وكثافة مادتها 10^4 إلى 10^5 ذرة لكل سم^3 ، والذي يحدث أن المادة تتكمش تحت تأثير الجاذبية ولكن الضغط الداخلي المتولد من عملية الانكماش يعمل على تمدد السحابة، وطالما أن هاتين القوتين متوازنتان تظل السحابة في حالة اتزان، وإذا تغلبت الجاذبية فستتكمش السحابة لتكون نجما، أما إذا زاد الضغط الداخلي لسبب أو لآخر تمددت السحابة. وأحد الأمثلة الجيدة التي استطاع الفلكيون دراستها بشكل واضح لحالة مهد النجوم تلك السحابة الجزيئية الموجودة في سديم الجبار. تبدأ عملية انكماش السحابة أو اللب الداخلي تحت تأثير قوة الجاذبية الذاتية للسحابة وبمساعدة قوى خارجية أحياناً، وتظل تتكمش وتتطور من سحابة كل مادتها ذرات إلى سحابة جزيئية (بمعنى أن تكون مادتها من الجزيئات)، وتزداد كثافة المادة في مركز السحابة إلى أن تصل إلى مرحلة النجم حيث ترتفع درجة الحرارة من 10 كالفن إلى مليون أو أكثر، وفي نفس الوقت تكون الكثافة قد ارتفعت من 10 جزيئات لكل سم^3 إلى الكثافة الموجودة في النجوم ومقدارها 10^{23} ذرة لكل سم^3. ولقد أصبحت دراسة تطور سحب ما بين النجوم وما يتم فيها من تغيرات فيزيائية وكيميائية محط اهتمام الكثير من الفلكيين، وأصبحت نظرية تكوين النجوم مقبولة بشكل كبير لدى علماء الفلك سواء النظريين منهم أو العاملين في حقل الأرصاد. تستمر عملية الانكماش والتي يحدث في أثنائها تغيرات فيزيائية وكيميائية داخل السحابة المنكمشة بحيث تنمو الحبيبات وتظهر الجزيئات المعقدة، وفي أثناء ذلك كله تخرج الحرارة المتولدة بفعل الانكماش علي شكل أشعة تحت حمراء إلى أن يصل لب السحابة لمرحلة تكون فيها كثافة المادة عالية لدرجة لا تسمح للأشعة تحت الحمراء أن تنفذ منها وعند هذه اللحظة يصبح لب السحابة كمخزن حراري، فترتفع الحرارة بشكل سريع، ومع تزايد درجة الحرارة داخل اللب المنكمش تبدأ التفاعلات النووية لتبدأ بذلك حياة النجم، ومع خروج الأشعة من النجم تطرد هذه الأشعة بقية المادة الغازية المحيطة بالنجم الوليد تماماً كما يلفظ الفرخ الوليد قشرة البيضة ليخرج إلى الحياة. وتعرف مثل هذه المرحلة من حياة النجوم باسم T الثور T Tauri نسبة إلى أول نجم من هذا النوع حيث اكتشف في مجموعة الثور. تتميز هذه المرحلة بعدة خصائص نلخصها فيما يلي:

1) لونها يميل إلى الزرقة.

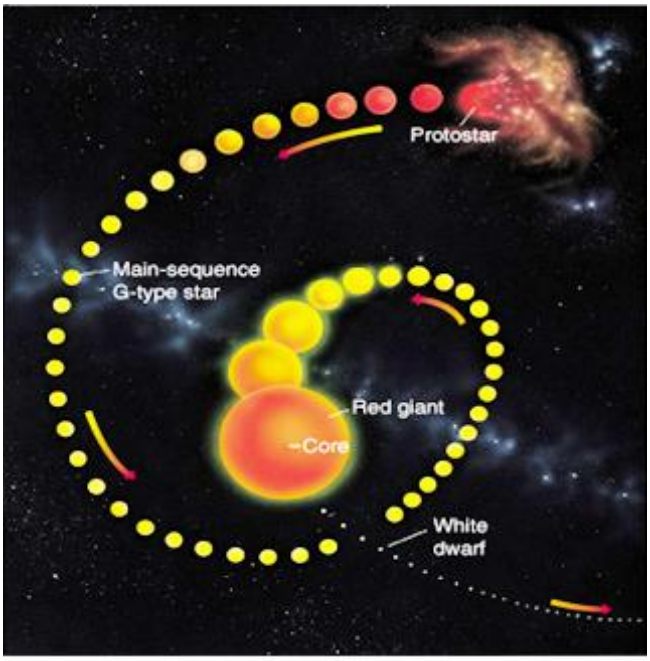
2) شديدة في الضياء والمجال المغناطيسي.
3) يصاحبها سحب تعرف باسم **H-H objects (Herbig-Haro)** وهي عبارة عن سحب يلفظها النجم من حوله.
4) يبدو على النجم في هذه المرحلة عدم الاستقرار.

وحينما يبدأ استقرار النجم فإن مكانه على التتابع الرئيس يتحدد حسب درجة لمعانه ونوعه الطيفي، وهاتان الخاصيتان يحددهما مقدار كتلة النجم. تمكن الفلكيون من فهم بعض مراحل تطور سحب بين النجوم إلى أن تصل إلى مرحلة النجوم، وحينما نرصد النجوم حديثة التكوين نجد أنها موجودة في حشود ائتلافية، ولذلك أصبح التصور السائد في الوقت الحالي أن العديد من النجوم تتكون معا في الوقت نفسه وتحت الظروف نفسها. من الواضح أن السحب الجزيئية العملاقة قد تزيد في كتلتها عن 100 ألف كتلة شمسية ولذلك يبدو من السهل تكون عشرات النجوم داخلها من خلال حدوث انقسام لسحيبات داخل السحابة الأم، وكل سحيبة يمكن أن تكون نجما من النجوم الحديثة. وبعد أن تكونت لدينا صورة واضحة لكيفية ولادة النجم يحق لنا أن نتساءل كيف يتطور هذا النجم بعد ذلك؟ وما بقية قصة حياته؟ كيف يكبر في العمر وما الذي يحدث له من تغيرات؟ هذا ما سنحاول الإجابة عنه في الفصل التالي.

الفصل السابع

قصة حياة النجوم

Life story of the stars

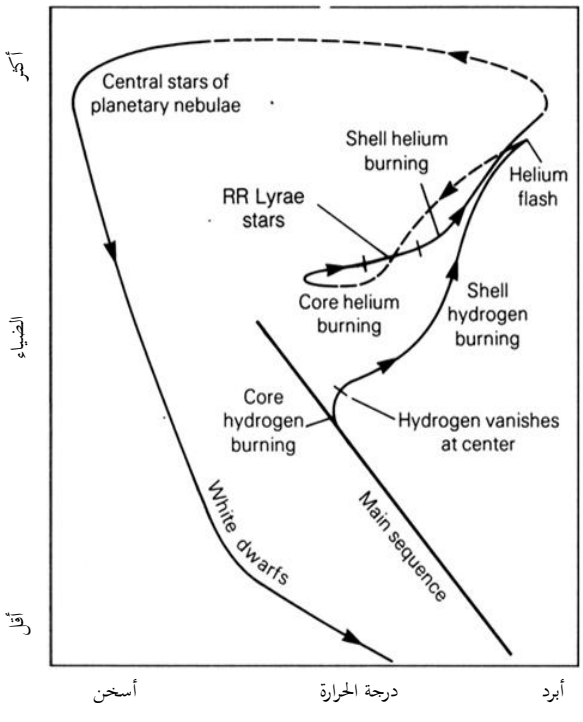


سيناريو قصة حياة النجوم منذ ولادتها وحتى نهاية حياتها

للنجوم قصة حياة غاية في الإثارة ومليئة بالآيات الكونية التي تلهب خيال علماء الفلك منذ حوالى القرن، فقد توصلوا إلى أن النجوم تولد كما شرحنا سالفاً داخل سحب ما بين النجوم وبعد ذلك تتطور في مراحل العمر المختلفة من الطفولة إلى الشباب ثم الشيخوخة فالموت. نعم تموت النجوم وفي نهايتها المحتومة يتوقف نبض قلبها تماماً كما يحدث للإنسان. ولكن ما هو قلب النجم؟ وما هو النبض الذي يتحرك داخله؟ وكيف فهم الفلكيون ذلك؟ وما الذي يدلنا على وصول نجم ما إلى حالة الشيخوخة؟ وكيف عرفوا موت النجوم؟ هذه وغيرها تساؤلات قد تدور في خلد كل منا ويتحرق شوقاً على معرفة الإجابة عنها. إن تاريخ وقصة حياة النجم تعتمد على ظروف متعددة أهمها كتلته في طفولته، ولنبدأ بقصة حياة الشمس لأهميتها بالنسبة لنا ثم ننطلق بعد ذلك للتعرف على قصص حياة النجوم الأخرى ذات الكتل الأكبر.

تطور حياة النجوم على التتابع الرئيس Evolution of main sequence stars

يبدأ النجم حياته على التتابع الرئيس ويظل عليه فترة طويلة تقدر بحوالى 0.90 من عمره حيث يظل تقريباً ثابتاً في قدره ولمعانه، ويبدو كنجم مستقر تحت تغيرات طفيفة نسبياً في نشاطه وإشعاعه، وينتهي طور التتابع الرئيس إذا انتهى الهيدروجين من لب النجم ويصبح اللب مكونا من الهيليوم. 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 إذا زادت قوة جاذبية النجم زادت قدرته على التفاعلات النووية، وكما عرفنا فإن الشمس تستمد طاقتها من خلال التفاعلات النووية التي تحدث في مركزها. وفي هذه التفاعلات يتحول الهيدروجين إلى هيليوم وبالتالي ينكمش الجزء الداخلي من النجم تحت تأثير الجاذبية المتزايد مما يؤدي إلى زيادة الطاقة المشعة L ويتحرك النجم بذلك إلى أعلى قليلاً على شريط التتابع الرئيس في شكل H-R. وهذا يفسر أن التتابع الرئيس ليس خطا إنما هو عبارة عن شريط. ولذلك يمكننا القول إن الحافة السفلى للتتابع الرئيس تمثل النجوم في بداية عمرها Zero age main sequence وعندما يتحول جميع الهيدروجين إلى هيليوم في لب النجم تتوقف التفاعلات النووية في اللب وبالتالي يبرد لب النجم فيزداد انكماشه نحو المركز لتغلّب قوة الجاذبية على الضغط، ومن ثم ترتفع درجة الحرارة في المنطقة المحيطة باللب، والتي تبدأ التفاعلات النووية فيها، 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 الانكماش، وينتج عن تمدد النجم زيادة ضياءه L ويتحرك النجم في شكل H-R إلى أعلى وإلى اليمين، نتيجة نقص درجة الحرارة، وبذلك يزداد نصف قطر النجم من 10 إلى 100 مرة عن نصف قطره الابتدائي ونسميه في هذه المرحلة عملاقا أحمر، وتكون ثلث كتلة النجم موجودة في اللب.



شكل 10-20: مسار التطور لنجم كتلته قريبة من كتلة الشمس (Exploration of the Universe)

تطور الشمس إلى عملاق أحمر Evolution of the sun to a red giant

حينما تتمدد الشمس إلى مرحلة العملاق الأحمر ستصبح نجماً ضخما يصل نصف قطره إلى حوالى 1.1 وحدة فلكية؛ أي أن الشمس ستبتلع أثناء تمددها كلا من عطارد والزهرة والأرض ويصبح المريخ أقرب كوكب للشمس في ذلك الوقت، وقبل أن تُبتلع الأرض في داخل الشمس ستدور بعض الوقت في غلاف الشمس الساخن ولذلك سيتبخر غلافها الجوي، وبعد ذلك تقل سرعة دوران الأرض تدريجياً، وفي غضون 200 عام تُبتلع الأرض بعد أن يكون سطحها قد احترق وكل من عليها من حدائق غناء ونباتات وحياة. ثم تذوب الأرض وتصبح جزءاً من مادة الشمس إلى الأبد. وقد يأتي في ذهن القارئ تساؤلا: هل هذه النهاية تمثل يوم القيامة؟ والإجابة الفورية أن هذا التصور العلمي لنهاية الأرض والحياة عليها مبني على القوانين التي تحكم الكون والنواميس التي وضعها الله في الحياة من حولنا، أما يوم القيامة فله ناموس آخر لا يعلمه إلا الله، ولكن مما لاشك فيه أن هذه القصة تؤكد للإنسان أن كل شيء هالك إلا وجه الله سبحانه وتعالى. ويمكن تلخيص أهم خصائص العملاق الأحمر فيمل يلي:

1- عملاق
2- طيف يميل للحمرة
3- عالى اللمعان والضياء
4- أبرد في الحرارة
5- يزداد نصف قطره ما بين 10-100 مرة عن مرحلة التتابع الرئيسي
6- تزداد كتلة اللب إلى ثلث كتلة النجم

انحلال الإلكترونات Degenerate electrons

من خصائص الالكترونات أنه يوجد حد أدنى للمسافات بينها بحيث لا تقترب أكثر من بعضها البعض بعد هذه الحدود، وبالتالي فإن عملية الانكماش في اللب تتوقف عند الحدود التي تكون عندها الالكترونات قد تزاحمت لدرجة أنها لا تستطيع أن تتقارب من بعضها أكثر من ذلك، وهذه الحالة تعرف بحالة الانحلال degenerate state. وقد سميت تلك الحالة بهذه التسمية نتيجة أن المادة تكون في هذه الحالة خارجة عن قوانين الفيزياء الكلاسيكية حيث تتميز بأن الضغط لا يزداد مع زيادة الحرارة. في ميكانيكا الكم فإن فرضية باولي Pauli exclusion principle تحدثنا أن الألكترونات والبروتونت وكذلك النيوترونات تخضع للفرضية التالية: لا يوجد الأكترونين في نفس المكان يفعلون نفس الشئ في نفس الوقت. كما أن فرضية هايزينبرج لعدم الاحتمالية Heisenberg Uncertainty principle تقول أن

$$\Delta x \, \Delta p \geq h/2\pi$$

حيث h ثابت بلانك و x المسافة و p معدل الحركة momentum . وبموجب هذه المعادلة فإنه لا يوجد ألكترونان في مدار ما من مدارات الذرة يتحركان نفس الحركة في نفس الوقت. بحيث أذا ازدحم الألكترونات في مستويات الذرة المختلفة فإنها تقاوم عملية انكماش المادة أكثر من ذلك . وهذه الحالة تشبه ازدحام السيارات في مواقف ملعب به مباراة مهمة يزدحم فيها الجمهور. لا تستطيع السارات القريبة من الملعب من الحركة حتى تتحرك السيارات التي قبلها ودواليك حتى تتحرك السيارات التي في أطراف المكان. فكذلك الألكترونات في اللب لا تستطيع أن تتحرك نتيجة تزاحمها في مستويات الذرة المختلفة حتى يحدث نوع من التمدد في الذرة. يمكننا أن نطلق على هذه المرحلة أنها تمثل حالة من انكماش الذرة بحيث لا تستطيع الألكترونات من الحركة وبالتالي لا تطيع الضغط الذي يمارس على لب النجم من خارج فنصل لمرحلة انحلال الألكترونات بحيث لا تقبل الضغط عليها من الخارج فيتحول الضغط المباشر على اللب إلى طاقة ترفع درجة الحرارة في المركز بسرعة هائلة بحيث تبدأ تفاعلات الهيليوم وهي ما تعرف **بشرارة الهيليوم**. ويعرف الغاز المنتشر في اللب في هذه المرحلة بغاز من الألكترونات المنحلة. أما مكونات نواة الذرات نفسها فهي تتحرك حركتها العادية ولا تشعر بما يعاني منه الكترونات الذرة.

شرارة الهيليوم Helium flash

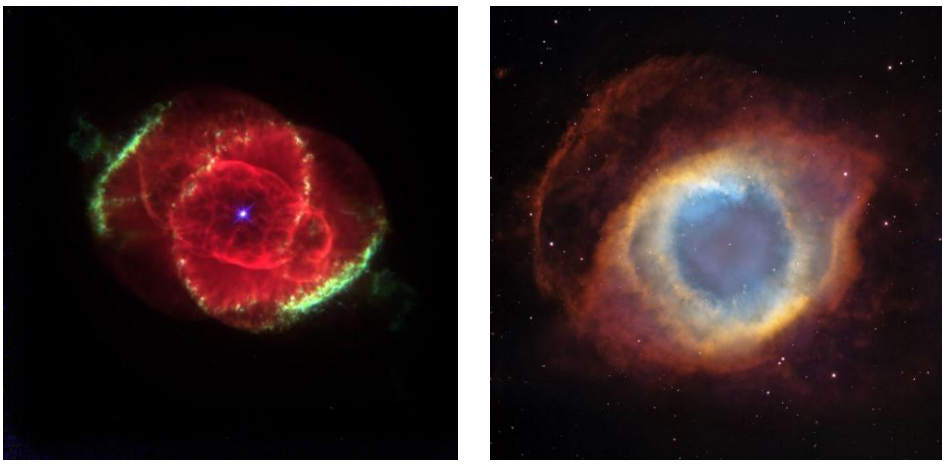
إن عملية بدء التفاعلات النووية للهيليوم تأخذ وقتاً قصيراً جداً قد يكون في عدة دقائق، ومن الصعب أن نرصد هذه المرحلة لأنها تحدث في اللب الداخلي للنجوم. ومع بداية تفاعل الهيليوم وتحوله إلى كربون عن طريق تفاعلات ألفا ثلاثية، تنتهي حالة الانحلال ليعود الغاز في اللب إلى الحالة الطبيعية وهي زيادة الضغط مع زيادة الحرارة حيث يتمدد النجم قليلاً ويصبح لونه أشد زرقة؛ أي أنه يصبح أسخن من ذي قبل ويتحرك بذلك على اليسار في شكل H-R وتعرف هذه المرحلة بمرحلة العملاق الأزرق. ويستمر النجم في تحويل الهيليوم إلى كربون فترة من الوقت حسب كتلته وبالتالي سرعة إشعاعه، كما أن تفاعلات ألفا ثلاثية تتأثر كثيراً بأي تغير طفيف في الحرارة، فمع كل زيادة بسيطة في درجة الحرارة تزداد كمية التفاعلات النووية في اللب ويزداد مقدار الإشعاع، وهكذا فإن النجم يتطور بسرعة في هذه المرحلة أكثر مما كان الحال على التتابع الرئيس. وبعد أن يتحول كل الهيليوم في اللب إلى كربون يدخل النجم في مرحلة جديدة من حياته، حيث تتوقف التفاعلات النووية في اللب وتتكون حوله طبقة يتحول فيها الهيدروجين إلى هيليوم، كما حدث عند توقف تفاعلات الهيدروجين، ينكمش اللب تحت تأثير الجاذبية وبالتالي تزداد الحرارة مرة ثانية فيتمدد النجم مرة أخرى ليصبح عملاقاً أحمر أكثر ضخامة supergiant. ومع انكماش اللب وازدياد درجة الحرارة بسرعة يزداد الضغط حتى تصل الالكترونات إلى حالة الانحلال مرة أخرى وبالتالي يتوقف الانكماش مما يؤدي إلى حدوث صدمة عكسية كرد فعل على عدم انضغاط اللب تؤدي إلى تمدد النجم، وفي هذه المرحلة تحدث تطورات سريعة للنجم لم تتضح معالمها حتى وقتنا هذا ولكن تشير الدراسات النظرية إلى أن النجم سيصبح نجما متغيرا من نوع النجوم القيفاوية بحيث يتمدد النجم وينكمش بشكل دوري إلى أن يصل لمرحلة يقذف فيها النجم طبقاته الخارجية، وهي ما يعرف بمرحلة **السدم الكوكبية** والتى تمثل الفرع الأفقي لخط تطور النجوم على شكل H-R.

السدم الكوكبية Planetary nebulae :

بالطبع لا توجد علاقة بين هذه السدم والكواكب فشكلها يشبه الكواكب ولكنها في حقيقة أمرها عبارة عن نجوم وصلت إلى هذه المرحلة التي يقذف فيها النجم طبقاته الخارجية ببطء كما هو مبين في شكل 10-21 بحيث يمكننا رصدها لفترة طويلة من الزمن تصل إلى 10 آلاف

سنة،. فإذا تم لفظ الطبقات الخارجية للنجم أصبح لباً عارياً وهو ما يعرف بالقزم الأبيض وكتلته 0.70 من الكتلة الأصلية وتكون لذلك درجة حرارة سطح اللب العاري 100 ألف كالفن.

السدم الكوكبية عبارة عن طبقات من الغاز يتم لفظها من العملاق الضخم بشكل تدريجي يستغرق وقتا طويلا مما يتيح لنا تصوير آلاف النجوم في مرحلة السدم الكوكبية. والسديم الكوكبي يكبر آلاف المرات عن المجموعة الشمسية كلها. ولقد تم أكثر من ألف سديم كوكبي في مجرتنا وحدها. وتدل الدراسات الفلكية أنه يوجد في مجرتنا عشرات الآلالف م السدم الكوكبية. كتلة طبقة الغاز التي يلفظها النجم في هذه المرحلة قد تكون 10–20 % من كتلة شمسنا. وسرعة تمدد هذه الطبقة ما بين 10–60 km/s وقد يلفظ النجم الواحدة عدة طبقات من السدم الكوكبية. قطر السديم الكوكبي ما بين 0.1–0.3 pc وعمره قد يصل لحوالي 50,000 yr ويصبح السديم رقيقا للغاية بعد 10^5 yr مرحلة الدسم الكوكبية مرحلة براقة لأنها تمتص الأشعة UV من النجم وتحولها لضوء مرئي. أما النجم المركزي للدسيم الكوكبي فهو لب عاري صغير الحجم عالي الحرارة ($T \gg 20{,}000\,K$). وأطياف السدم الكوكبية تظهر وجود خطوط كلا من C, N, O وذرات وأيونات أخرى. ومما تشير إليه الأرصاد الفلكية أن أسخن النجوم التي تمتلك سدما كوكبية تبلغ حرارتها 200,000 K . ومن أشهر الأمثلة للسدم الكوكبية سديم القيثارة الشهير.



شكل 10–21: يسار: سديم Helix ويمين: سديم عين القط (HST)

القزم الأبيض White Dwarf

تنتهي التفاعلات في النجم الذي له كتلة في حدود كتلة الشمس عند الكربون أو ربما الأكسيجين، فليس لديه من القوة ما يجعله قادراً على أن يستمر في تفاعلات نووية تحتاج إلى

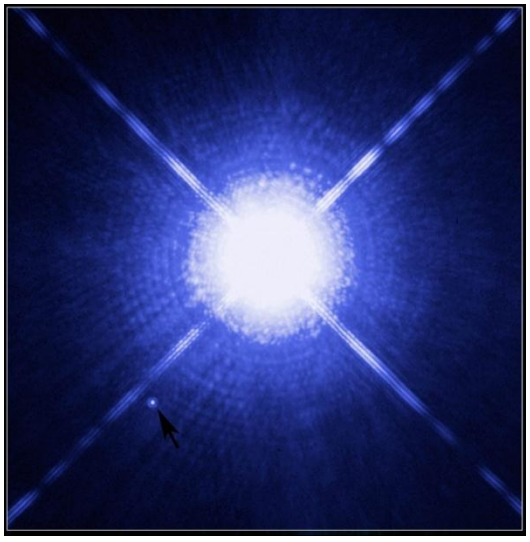
حرارة أعلى لا تتوفر لديه، ومن ثم فإن النجم يبرد حتى يصل إلى حالة استقرار عند أقصى اليسار أسفل التتابع الرئيس في شكل H-R ويعرف النجم في هذه الحالة بالقزم الأبيض، شكل 10-22. فرغم أن درجة حرارته عالية إلا أن قدره المطلق يكون أقل من 11، ويمكن تلخيص أهم خواص القزم الأبيض فيما يلي:

1) يتكون من مادة في حالة انحلال للألكترونات.
2) كتلته في حدود كتلة الشمس وقد تزيد قليلاً عن كتلة الشمس، وحجمه مثل حجم الأرض.
3) كثافة مادته حوالى مليون مرة مثل كثافة الماء؛ أي أن 1 سم^3 من مادته يزن طن على سطح الأرض.
4) تتوقف التفاعلات النووية.
5) يشع النجم ما هو مخزون بداخله من طاقة ويبرد بالتدريج ليصل إلى مثواه الأخير بعد فترة تقدر ببلايين السنين وهو ما يعرف بالقزم الأسود، مع ملاحظة أن القزم الأسود يختلف عن الثقب الأسود، فالفارق بينهما كبير.

ونلاحظ في القزم الأبيض أن ضياءه يزداد مع تغير درجة الحرارة حيث أن مساحة سطحه ثابتة لذا فإن ضياءه يقل بسرعة مع تناقص الحرارة تبعا للعلاقة

$$L \alpha T^4$$

وتشير الحسابات الفلكية أن القزم الأبيض يقل ضياءه إلى 0.01 من قيمته في فترة 10^8 yr .



شكل 10-22: نجم الشعرى ورفيقه B (على رأس السهم) قزم أبيض صغير الحجم ولكنه عالي الجاذبية (HST).

النوفا:

في غضون أيام قليلة يزداد لمعان النوفا بقيمة 10^6 - 50,000 لمعان شمسي وتظل عند قمة الضياء لعدة ساعات. وفي غضون 100 يوم أو أكثر يخفت النجم كما هو مبين في الشكل التالي

Light curve

وفي فترة لمعان النجم فإنه يفقد من كتلته ما تفقده الشمس في 100,000 yr . وفي فترة قمة لمعان النوفا يزداد قطرها 100- 300 R_s . والنوذج الذي يشرح كيفية حدوث النوفا يشير إلى أنه إذا كان القزم الأبيض له رفيق في نظام ثنائي وكان الرفيق في مرحلة العملاق الأحمر فإن القزم الأبيض بفعل جاذبيته العالية سيمتص من ماة العملاق الأحمر من طبقاته الخارجية فتنقص كتلة العملاق الأحمر ولكن المادة التي يمتصها القزم الأبيض لا يستطيع ابتلاعها لأن مادة في حالة انحلال للألكترونات غير قابلة للإنضغاط مما يجعل القزم الأبيض يحدث بتلك المادة الزائدة عليه انفجار النوفا وهي كلمة يونانية تعني نجما جديدا والحقيقة انه ليس نجما جديدا ولكن نجم قزم أبيض وصلته مادة أحدث بها انفجار النوفا. وإذا كانت كمية المادة المضافة كبيرة أحدث انفجارا كبير وهو ما يعرف بالسوبرنوفا وهذا هو النوع الأول من السوبرنوفا Supernova I.أكبر نوفا تم رصدها لها قدر يتراوح ما بين -6 إلى -9 أي أن ضياء يقدر بحوالي 10^5 Ls. وقد يحدث النجم انفجار النوفا عدة مرات.

وكلما كان انفجار النوفا كبير كلما كانت فترة الهدوء أكبر على الأقل ألاف السنين. والتفسير الفيزيائي لحدوث انفجارات النوفا هو أن المادة التي يجمعها القزم الأبيض من الرفيق العملاق الأحمر ترتفع درجة حرارتها حتى تبدأ فيها التفاعلات النووية لتحول الهيدروجين إلى هيليوم باستخدام سلسلتي p-p و CNO . وحيث أن مادة لب القزم الأبيض في حالة الكترونات منحلة فإن التعاعلات النووية التي تحدث في هذه الطبقة الخارجية المحيطة بالقزم الأبيض تؤدي لارتفاع درجة حرارتها إلى 100 مليون كالفن وبالتالي تتمدد هذه الطبقة إلى الفضاء الخارجي في شكل انفجار عنيف وبسرعة من 100-1000 km/s. ومن الأمثة الشهيرة نوفا هرقل 1934 وهي موجودة في نظام ثنائي كسوفي وزمن دورة النظام 4.6 ساعة وكتل النجمان الأول 0.6 M_s والثاني 0.4 M_s . كما توجد نوفا في كوكبة الكوثل وهي كوطبة جنوبية في شراع السفينة nova Puppis.

السوبرنوفا من النوع الثاني supernova II

تبدأ النجوم ذات الكتل الكبيرة، وتحديدا الأكبر من 12 - 15 كتلة شمسية، حياتها على التتابع الرئيس تماما كما تفعل النجوم الصغيرة، وتستمر على التتابع الرئيس أغلب حياتها حيث تحول تفاعلاتها النووية الهيدروجين إلى هيليوم عن طريق سلسلة التفاعلات النووية المعروفة بسلسلة CNO، وسلسلة بروتون–بروتون. تستمر عملية تحول الهيدروجين إلى هيليوم حتى يتكون لب من الهيليوم يمر بالخطوات التي أشرنا إليها في قصة حياة النجوم الشبيهة بالشمس. ولكن تتميز النجوم الأكبر هنا بأنها تتطور بسرعة عالية حتى تصل لمرحلة الكربون، وبعدها قد يتحول النجم إلى نجم متغير ثم نجم مستقر، وقد يتكرر ذلك عدة مرات في تاريخ حياة النجوم الكبيرة، ونتيجة قوة جاذبيتها العالية فإن التفاعلات النووية تستمر بحيث يتحول الكربون إلى أكسجين ثم كبريت وسيليكون وهكذا إلى أن يتكون الحديد في لب النجم، وفي هذه الأثناء يفقد النجم حوالى ثلث مادته. وبعد أن يتكون الحديد في لب النجم فإن العناصر الأثقل تحتاج إلى طاقة أكبر كي تتكون، وفي نفس الوقت تعطي طاقة أقل ولذلك تمتص طاقة النجم تدريجياً ويبرد مما يساعد على انكماش النجم مرة ثانية ولكن بشكل سقوط حر وفي فترة وجيزة (حوالى 10 آلاف ثانية أي أقل من ثلاث ساعات) ولذلك تزداد كثافة اللب بحيث تتكسر الذرات وتتفاعل البروتونات والإلكترونات مكونة نيوترونات،

$$e + p \rightarrow n + \nu \quad ,$$

حيث n نيوترونات و ν أشعة نيوترينو. ينشأ عن ذلك خروج كم هائل من أشعة النيوترينو من النجم وبالتالي تتسارع عملية الانكماش بشكل أقوى نتيجة ازالة الفراغ مالذي كانت تشغله الألكترونات حول النواة وكذلك انكماش الجسيمات داخل النواة بعد تحولها لنيوترونات فقط حتى تصل النيوترونات إلى حالة الانحلال كما حدث سابقاً مع الالكترونات وعندها تتوقف عملية الانكماش. وينبغي أن نلاحظ أن القوة التي تسبب انحلال الالكترونات أقل بكثير من القوة اللازمة لانحلال النيوترونات ذلك لأن كتلة النيوترون أكبر بكثير من كتلة الإلكترون وبالتالي فإن مرحلة الانكماش هنا ستكون أقوى بكثير عما كان الحال في القزم الأبيض. ويصبح اللب الداخلي شديد الصلابة بينما تستمر المادة الخارجية في الدخول بسرعة محيطة باللب، ومع توقف الانكماش نتيجة لانحلال النيوترونات بسرعة تحدث صدمات عكسية تتحرك إلى خارج النجم، ويتزامن خروج أشعة النيوترينو مع الصدمة ليحدث الانفجار المعروف بالسوبرنوفا II، شكل 10-23، 10-24. وفي الجدول التالي مقارنة بين نوعي السوبرنوفا

سوبرنوفا II	سوبرنوفا I
نجم كتلته كبيرة وقديم	نجم قزم أبيض في نظام مزدوج
يقذف 5 كتلة شمسية	يقذف 1 كتلة شمسية
سرعة القذف 5000 km/s	سرعة القذف 10^4 km/s
يرصد H في طيفه	لا يرصد H في طيفه
ينتج نجم نيوتروني	لا ينتج عنه شئ

والجدول التالي يبين انفجارات السوبرنوفا التي تم رصدها في مجرتنا

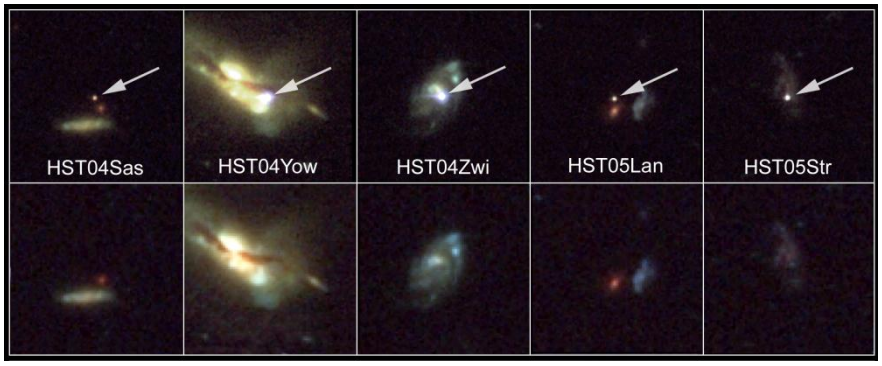
المجموعة النجمية	اللمعان	البعد (klyr)
قنطورس Centaurus	ألمع من الزهرة	8.1
ذات الكرسيCassiopeia	ألمع من المريخ	33
السبع وقد شاهده المسلمون سنة 1006 ميلادي Lupus	ألمع من الزهرة	11
الثور (سديم السرطان) وقد شاهده المسلمون سنة 1054 ميلادي	ألمع من الزهرة	6.5
ذات الكرسي Cassiopeia	في لمعان الزهرة	16
الحواء Ophiuchus	أقل من لمعان المشتري	20

وهذا عدد قليل جدا بالمقارنة مع ما يفترض أنه قد حدث عدد كبير يقدر بالملايين من انفجارات السوبرنوفا. ضياء السوبرنوفا يزيد عن $10\ \text{billion}\ L_s$ والشكل التالي يقارن بين نوعي السوبرنوفا من حيث اللمعان وتغيره مع الزمن.

شكل الفيض والزمن

يفقد النجم اثناء انفجار السوبرنوفا كمية من الطاقة تزيد عما يمكن أن تنتجه الشمس طيلة حياتها. وما يتبقى من النجم بعد الانفجار يمكن رصده في الأشعة الراديوية وأشعة أكس وبعضها يري في الضوء المرئي كما أن كثيرا منها يشع أشعة سينكروترون. ولمعان السوبرنوفا بعد عدة أسابيع قد يكون ناتجا عن تحلل النيكل المشع إلى كوبالت حيث ينتج عن تحلل النيكل أشعة جاما والتي تعمل على تسخين طبقات الغاز المتمدد وتجعلها اكثر بريقا. وتشير الحسابات الفلكية أن النجم قد ينتج ما مقداره 0.07 Ms من النيكل أو ما يوازي 20,000 كتلة أرضية.

ويصبح النجم بعد مرحلة انفجار السوبرنوفا مكونا من النيوترونات ويختفي الشكل الذري تماما، ولذلك يعرف النجم في هذه الحالة بالنجم النيوتروني، شكل 10-25.



شكل 10-23: أسفل: خمس صور لمجرات مختلفة، أعلى: نفس المجرات ولكن بظهور نجم زائر حالا ضيفا على المجرة وهو ما نسميه سوبرنوفا (HST)

النجم النيوتروني أو البلسار Neutron star or Pulsar

تزيد كتلة النجم النيوتروني عن 1.5 كتلة شمسية منكمشة في كرة نصف قطرها 10– 20 كم فقط كما هو مبين في شكل 10-25. وقد تصل كتلة النجم النيوتروني إلى 3 كتلة شمسية، ولذلك تكون كثافة مادته حوالى 10^{14} إلى 10^{15} جم/سم^3؛ أي أن السنتيمتر المكعب من مادته تزن بليون طن. إنها ظاهرة تستحق الدهشة والتعجب الشديدين فهذا أمر يصعب تصوره، كيف يمكن أن تكون في الكون مادة بهذا القدر من الانضغاط؟ وبهذه الصلابة وتلك الكثافة العالية؟ فسبحان من خلق فأبدع. وبالطبع فإن هذا النجم له كثير من الخواص العجيبة، وتوجد داخل مادته من الظواهر ما يدهش الألباب، ويوجد في مجرتنا وحدها العديد من النجوم النيوترونية. ويعرف النجم النيوتروني باسم البلسار نتيجة انه يمكن رصده من خلال نبضات تخرج من قطبية الشمالي والجنوبي. وبالطبع يختلف البلسار هنا عن النجوم النابضة من حيث آليات النبض ومن حيث

الخصائص الفيزيائية. فالبلسار هنا يمثل مرحلة متأخرة من حياة النجوم بينما النجوم النابضة هي مرحلة اضطراب في حياة النجم يصبح عندها النجم متغير في اللمعان والحجم وهي مرحلة تحدث عندما يكون النجم في مرحلة العملاق أو العملاق الضخم.

ومع تحول النجم إلى مرحلة النجم النيوتروني نتيجة للإنكماش السريع فيزداد معدل دورانه حول نفسة ويزداد مجاله المغناطيسي قوة ففي الجدول التالي مقارنة بين شدة المجال المغناطيسي في أجرام عدة ويتضح منها مدى شدة المجال المغناطيسي في النجوم النيوترونية مما جعل الفلكيين يطلقون علي بعضها والذي يتسم بقوة عالية في المجال المغناطيسي مسمى magnetar وهو تعبير يوحي بأن هذا الجسم يمثل مغناطيسا جبارا من حيث قوته. كما أن درجة حرارة سطحة تصل إلى مليون كالفن لذا فهو مصدر كذلك للأشعة السينية. وفيما يلي يمكن أن نرسم نموذجا للنجم النيوتروني من حيث طبقاته المختلفة. حيث يمكن تقسيمه إلى ثلاث طبقات قشرة سطحية سمكها 1 كم وتبلغ كثافتها 10^{16} كثافة الحديد وتليها طبقة سمكها 8 كم سائل من النيوترونات مع وجود بروتونات والكترونات عالية التوصيل واللب عبارة عن طبقة سمكها 1 كم قد يكون في حالة صلبة. ومن الناحية الفيزيائية ليست لدينا معلومات كيف يتصرف الوسط الذي يتكوم من نيوترونات وما هي خواصه الفيزيائية وهي من معضلات النجوم النيوتروني.

الجرم	B (gauss)
الأرض	0.5
الشمس	1
النجم المغناطيسي	10^3
القزم الأبيض	10^6
البلسار	$10^{12} - 10^{16}$

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- الماجنيتار Magnetar والذي يتميز بأعلى قيم للمجال المغناطيسي تتراوح ما بين

10^{8} – 10^{12} Tesla وبالتالي فإن مجاله المغناطيسي القوي هو مصدر طاقته الكهرومغناطيسية.

لقد تم اكتشاف أول بلسار سنة 1967 وفي عام 1974 ظهر اول اكتشاف لبلسار في نظام ثنائي. يرمز للبلسار بالرمز PSR(Pulsation Source of Radio) مصحوبة بالمطلع المستقيم والميل (Right ascension and declination) وكما ذكر سابقا فإن النجم النيوتروني يتميز بقيم عالية للدوران والحرارة والمجال المغناطيسي. ومع الوقت يقل معدل دوران البلسار بسبب ما يفقده من طاقة من خلال الاشعاع الكهرومغناطيسي وعند وصول معدل الدوران لحد معين من البطئ فإن النبضات الراديوية تنتهي بما يعرف بخط الموت ويمكن تقدير عمر البسار بحوالي 10–100 MYr وهذا يؤكد أن هناك الكثير من النجوم النيوترونية التي وصلت لنهاية حياتها إذا ما قارنا عمرها بعمر الكون. أطول بلسار معروفة من حيث معدل الدوران له دورة تأخذ 8.51 ثانية وهو رقم كبير بالمقارنة مع زمن دورة البلسار العادية والتي تقل عن الثانية بكثير. وبلسار الأشعة السينية قد يكون في الأصل بلسار فقد كثير من معدل دورانه وهو موجود في نظام ثنائي وبدأ يأخذ من مادة رفيقه مما يزيد من طاقته الدورانية ليتحول إلى ما يعرف ببلسار المللي ثانية millisecond pulsar حيث يكون معدل دورانه يقاس بمللي ثانية(10^{-3} s) ويكون مجاله المغناطيسي أضعف من القيمة المتوسطة للمجال الغناطيسي للبسار

$$B_{\text{millisecond pulsar}} = 10^{-3} - 10^{-4}\, B_{\text{pulsar}}$$

وهذا المجال المغناطيسي الضعيف يطيل من عمر بلسار المللي ثانية لبلايين السنين وهذا يعين أن بلسارات المللي ثانية هي أقدم البلسارات المعروفة. وهي ترى في الحشود النجمية الكرية والتي في الغالب توقف فيها تكون نجوم نيوترونية جديدة منذ بلايين السنين.

الماجنيتار Magnetar :

يتميز الماجنيتار بقوة مجاله المغناطيسي كما أشرنا من قبل كما يتميز ببطئ في معدل دورانه حيث يتم دورانه كل 1–10 ثواني وهو بالتالي أبطأ بكثير من البسار العادي. أما نجوم البلسار الماجنيتار فهي تبث أشعة كهرومغناطيسية عالية الطاقة وبصفة خاصة الأشعة السينية وأشعة جاما وأصبح الماجنيتار معبرا عن المصدر لكلا من SGRs(soft gamma repearters) التي

تبث أشعة جاما و AXPs (anomalous X-ray pulsars) التي تبث أشعة سينية. ونتيجة بثه لإشعاعات قوية فإن حياته النشطة تعتبر قصيرة بالمقارنة مع البلسارات العادية حيث يقدر عمر الماجنيتار بحوالي 10 آلاف سنة وبعدها يتوقف بثها لتلك الأشعة عالية الطاقة. وحتى الآن يعتبر الماجنيتار هو أقوى الأجسام التي رصدت في الكون من حيث قوة مجاله المغناطيسي.

وعند رسم العلاقة بين دورة تغير البلسار مع الزمن تلاحظ وجود ما يعرف ب Glitches وهي عبارة عن تغيرات مفاجئة في دورة البلسار

رسمة الدورة للبلسار مع الزمن

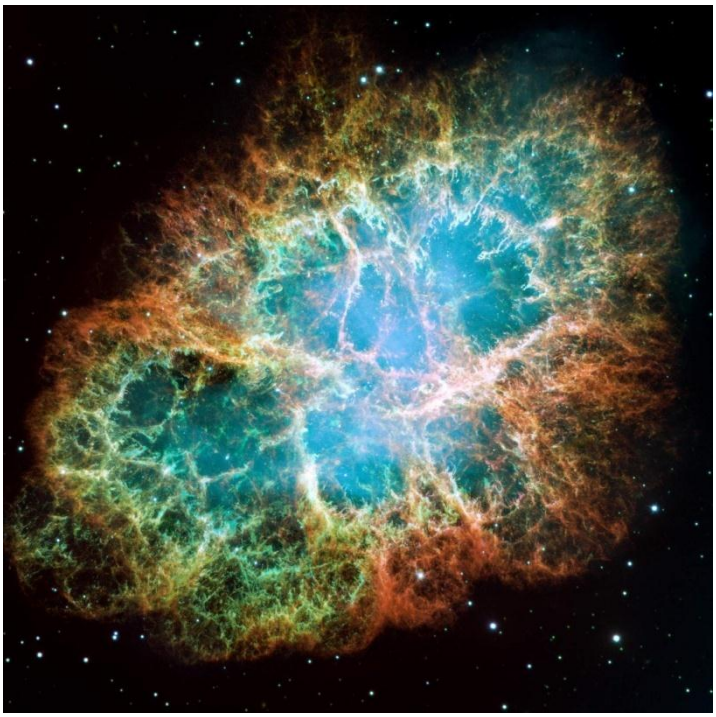
ويمكن تفسير هذه ال glitches بأنها ناتجة عن زلزال نجمي ينتج عنه انكماش أو أن السائل في داخل النجم النيوتروني يخزن الحركة الزاوية بحيث يحدث نوع من التبطيئ لنقل الطاقة الناتجة عن الحركة الزاوية من الداخل إلى سطح النجم.

ويمكن استخدام الأشعة الصادرة من النجوم النيوترونية كوسيلة لدراسة مادة ما بين النجوم حيث تعمل مادة ما بين النجوم على تشتيت تلك الأشعة حيث تتأخر الأشعة الراديوية ذات الترددات الأقصر عن تلك التي لها ترددات أعلى فيحدث تأخر في وصول النبضات إلينا وهو ما يعرف مقياس التشتت Dispersion measure

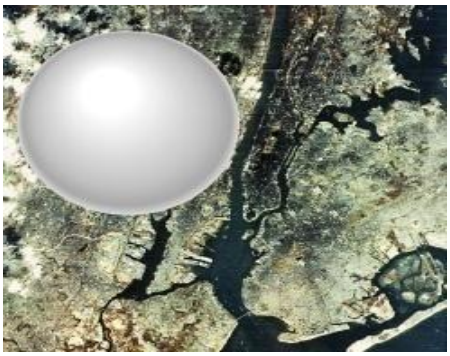
$$\mathrm{DM} = \int_0^D ne(s)ds$$

حيث D بعد البلسار و ne كثافة الألكترونات في مادة ما بين النجوم . وبالتالي يمكن من خلال هذه العلاقة يمكن التعرف على توزيعات الألكترونات في مجرتنا.

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، وذلك لأن قوة الجاذبية ترغم الأشعة على العودة إليه ولذلك يبدو كثقب أسود. وتطور النجم النيوتروني إلى ثقب أسود لا يستغرق سوى 30\1 من الثانية. ولكن ليس من المعروف بالضبط أي الكتل تنتهي بحالة الثقب الأسود فإن ذلك يعتمد فيما يبدو على بعض الظروف للنجم مثل مقدار ما يفقده من مادة أثناء تطوره وكذلك سرعة دورانه. ولكن يمكن القول إن الكتل التي تزيد عن 30 إلى 40 كتلة شمسية يمكن أن تنتهي كثقوب سوداء.



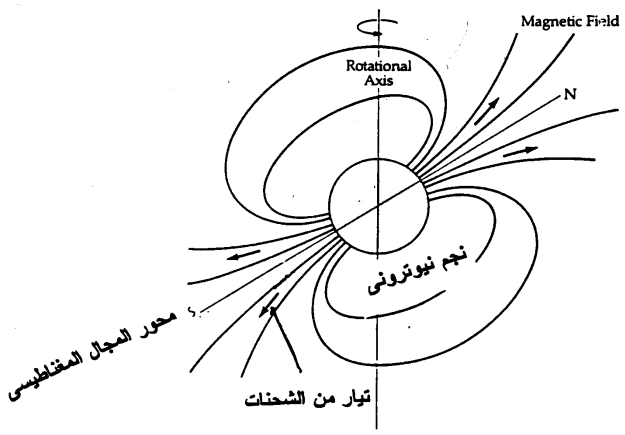
شكل 10-24: دون الفلكيون في عام 1054م مشاهدتهم لنجم زائر شديد اللمعان لدرجة أمكن مشاهدته نهارا ولعدة أسابيع، كان هذا النجم هو سوبرنوفا وما خلفه من انفجار هو ما نعرفه اليوم بسديم السرطان (HST)



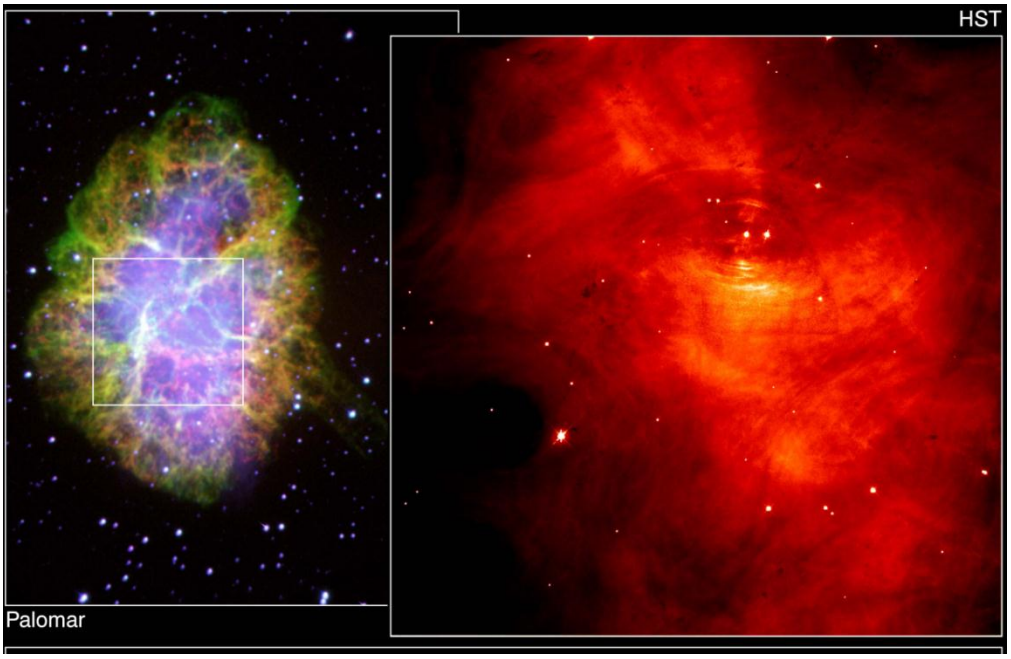
شكل 10-25: النجم النيوتروني في حجم مدينة على سطح الأرض رغم كبركتلته.

أهم خواص النجم النيوتروني Main properties of Neutron star

كما بينا سابقاً، يتكون النجم النيوتروني من نيوترونات في حالة انحلال، كما يحتوي القزم الأبيض على إلكترونات في حالة انحلال، ولكن الضغط الناشئ في حالة النجوم النيوترونية يكون أشد بالطبع عما يكون في حالة الإلكترونات المنحلة، وقد تكون كتلة النجم النيوتروني بين 1.5 إلى 3 كتلة شمسية. وإذا كان نصف قطر القزم الأبيض مثل نصف قطر الأرض فإن النجم النيوتروني لا يزيد نصف قطره عن 10 كم، وقوة الجاذبية على سطحه عالية جداً كما هو بين في جدول 10-6. سمك الغلاف الجوي للنجم النيتروني لا يتعدى عدة سنتيمترات، بينما يكون سمك الغلاف الجوي في الأقزام البيضاء حوالى 50كم، ودرجة حرارة النجم النيوتروني عالية جداً، ولكن لصغر حجمه يبدو معتماً، كما أن مجاله المغناطيسي أشد مما على القزم الأبيض. وتسمى النجوم النيوترونية بالنجوم النابضة Pulsar حيث تخرج منها أشعة النيوترينو من عند قطبي المجال المغناطيسي، ونتيجة للفه الرهيب؛ فإن أشعة النيوترينو تبدو كوميض يخرج من النجم عندما يواجه الأرض بأحد قطبيه شكل 10-26. وإذا اعتبرنا أن النجم النيوتروني في حالة نبضه بأنه النجم الطارق والمذكور في سورة الطارق: "والسماء والطارق، وما أدراك ما الطارق، النجم الثاقب"، فهو يطرق السماء من حوله بقوة نبضه كما أنه يثقب ما حوله بإشعاعه النافذ أو بانفجاره الهائل في مرحلة السوبرنوفا، وفي الحقيقة فهو آية كونية عظمية تستحق الاعتبار والتصديق بما أُنزل من قرآن. وقد رصد نجم نابض في سديم السرطان يصدر 885 نبضة في الثانية وهذا أمر مدهش للغاية أن ينبض نجم بهذه السرعة العالية، شكل 10-27.



شكل 10-26: نموذج للنجم النيوتروني ومجاله المغناطيسي حيث تخرج الشحنات مع خطوط المجال عند قطبي المجال المغناطيسي. وهذه الشحنات هي التي ترى كومضات للنجم النيوتروني ومن ثم جاءت تسميته بالبلسار.



شكل 10-27: يسار: سديم السرطان كما صوره مرصد Palomar، يمين: صورة فضائية رائعة لوسط السديم ونجم بلسار داخله (HST)

جدول 10-6: خواص كل من الشمس والقزم الأبيض والنجم النيوتروني

الخاصية	الشمس	القزم الأبيض	النجم النيوتروني
الكتلة (كتلة شمسية)	1	< 1.4 كتلة شمسية	1.5
حرارة السطح (كالفن)	5780	10 000	200 بليون
القطر	1	قطر الأرض	10 كم
الكثافة (جم/سم^3)	1.4	10^6	10^{14}
وزن 1سم^3	أكبر قليلا مما	1طن من تربة	بليون طن من تربة

	على الأرض	الأرض	الأرض
الجاذبية (جاذبية أرضية)	28	130 000	$7x10^9$
معدل الطاقة المشعة (إرج/ ثانية)	$3.8x10^{33}$	$2x10^{31}$	
القدر المطلق	4.7	11	
المجال المغناطيسي (مجال أرضي)	1	$10^8 - 10^6$	10^{12} مجال أرضي

قصة حياة السوبرنوفا Life of supernovae 1987A

هذا السوبرنوفا رصد عام 1987 في سديم ما جيلان الكبير. وبعد دراسته بالتفصيل استطاع الفلكيون أن يرسموا الخطوط العريضة لقصة حياته كما يلى:

1) وُلد منذ 10 مليون سنة، وقد كانت كتلته آنذاك 20 كتلة شمسية، وقد قضى 0.90 من عمره على التتابع الرئيس كنجم عادي وفي حالة استقرار، وكان يشع 60 ألف مرة مثل الشمس ودرجة حرارة لبه في هذا الوقت كانت 40 مليون كالفن وكثافته 5 جم/سم^3.
2) بعد فترة، تكون لب من الهيليوم كتلته 6 أمثال كتلة الشمس، ثم ارتفعت الكثافة إلى 900 جم/سم^3 وأصبحت درجة حرارة اللب 170 مليون كالفن، حيث تبدأ تفاعلات الهيليوم لتكوين كربون ثم أكسجين. وفي ذلك الوقت تمدد النجم إلى ما يعادل المسافة بين الأرض والشمس، كما ازداد اللمعان إلى 100 ألف مرة مثل الشمس ليصبح بذلك عملاقا أحمرا ضخما، وفي هذا الوقت يفقد النجم جزءاً من مادته في شكل رياح نجمية.
3) بعد مليون سنة من بدء تفاعلات الهيليوم، تكون لب من الكربون والأكسجين وتوقفت التفاعلات مرة ثانية، وبالتالي انكمش النجم وأصبح عملاقا أزرقا لامعاً.
4) عندما وصلت الحرارة إلى 700 مليون كالفن، والكثافة إلى 100 ألف جم/سم^3 بدأ تحول الكربون إلى نيون وصوديوم ومغنيسيوم، وهذا الطور استمر فقط ألف سنة.
5) بعد تكون لب جديد من النيون والصوديوم والمغنيسيوم، توقفت التفاعلات وانكمش النجم حتى وصلت الكثافة إلى 10 أطنان لكل سم^3 وارتفعت درجة الحرارة إلى 1.5 بليون كالفن في لب النجم، وهذا الطور استمر عدة سنوات.
6) عندما وصلت الحرارة إلى 3.5 بليون كالفن تكون الحديد في اللب، وبعد ذلك انكمش النجم لتتفتت الذرات وتتفاعل الالكترونات والبروتونات وتتكون نيوترونات تقبل الضغط لحدود

الانحلال، وبعدها توقف الانكماش في مركز اللب فحدثت صدمة عكسية كرد فعل على توقف الانكماش، مما أدى لحدوث الانفجار المعروف بالسوبرنوفا وهي الحالة التي شوهدت عليها السوبرنوفا شكل 10-28. وهذا الطور يأخذ عشرات الثوانى فقط. بعدها يتحول إلى نجم نيوتروني حيث تصل الكثافة فيه إلى أكثر من بليون طن لكل سم مكعب ودرجة الحرارة تكون في حدود 200 بليون كالفن .

مرحلة تكوين الحديد في لب النجم:

مرحلة تكوين الحديد تمثل مرحلة خطيرة في حياة النجوم وهذا يشير لمعني مهم من معاني بأس الحديد في قوله تعالي : (وأنزلنا الحديد فيه بأس شديد ومنافع للناس) .

العلاقة بين طاقة الربط والعدد الذري

من الشكل السابق يتضح أن الحديد له أعلى طاقة ربط نووي وبالتالي فإن عملية تكوين الحديد في النجوم تعطي طاقة أقل مما تحتاجه وبالتالي ينتج عن تكوين الحديد وكذلك العناصر الأثقل منه برودة في لب النجم لذا ينكمش اللب وينتج عن الانكماش حرارة تصل للطبقات المحيطة باللب فتتسبب في تفاعلات نووية للعناصر الأخف والتي تنتج بدورها كميات من الحديد فتزداد كتلة اللب من الحديد لحدود كرة قطرها 500 km والانكماش لمرحلة انحلال النيوترونات بعد ذلك تحتاج لعدة آلاف من الثواني أي حوالي ساعة زمنية. أنه مصنع جبار في امكانياته حيث يمكنه تصنيع هذه الكمية الرهيبة من الحديد في هذا الزمن القياسي الصغير فسبحان من خلق فأبدع.

تطور البلسار

يحتوي البلسار الجديد مجال مغناطيسي قوي ويدور حول نفسه بسرعة رهيبة وهو يستطيع أن يرسل كميات هائلة من الأشعة. في سديم السرطان Crab nebula توجد أحدث بلسار نعرفه حيث يبث أشعة راديوية وأشعة IR, x, γ وضوء مرئي. ومن المتوقع أن نجد البلسارات الحديثة داخل بقايا السوبرنوفا . ولكن الأرصاد تبين أنه لا يوجد بلسار داخل كل بقايا السوبرنوفا كما أنه ليس من اللازم أن نجد كل بلسار داخل بقايا سوبرنوفا فلماذا؟ وتفسير ذلك أن بعض البلسارات تصاحبها حزمة غير موجهة ناحيتنا فلا نراها أو أن البلسار قد ترك بقايا السوبرنوفا الذي تكون داخله بسرعة حيث أن عمر بقايا السوبرنوفا لا يستمر أكثر من خمسون ألف سنة بينما متوسط عكمر البلسار يصل إلى 2 مليون سنة مما يؤكد أن البلسار القديم قد ترك بقايا السوبرنوفا الذي تكون داخله. ومع تقدم البلسار في العمر فإنه يفقد بعضا من طاقته ويتباطئ في دورانه حول نفسه وجاله المغناطيسي يضعف مع الوقت أما البلسارات ذات الدوران في المللي ثانية millisecond pulsars فهي استثناء من هذه القاعدة. حيث تستغرق دورتها مللي ثانية أي واحد على ألف من الثانية رغم انها من نوع البلسارات القديمة مثل بلسار PSR 1937+21 وأغلب بلسارات المللي ثانية توجد في الحشود النجمية الكرية وهذا يؤكد قدمها. ولكن كيف نفسر دورانها السريع؟ يبدو أن البلسار مللي ثانية انتج في نظام نجمي مزدوج أحد نجومه البلسار والذي يأخذ من مادة رفيقه وعندما تدور هذه المادة حول البلسار وتسقط عليه تدريجيا يمكنها أن تضيف إليه angular momentum تزيد من سرعة دورانه حول نفسه.

نظام مزدوج من نجوم البلسار Binary pulsars

في مجموعة الساقي وعلى بعد 15 ألف سنة ضوئية يوجد نظام مزدوج من نجوم البلسار تحت مسمى PSR

1913+16 وكتلة النجمين 2.8 Ms وزمن دورة النجمين 7.75 hours وتم رصده باستخدام الإزاحة

الطيفية. وفي هذا النظام فإن عمليات تعجيل المادة سوف يؤدي لإشعاع طاقة في شكل موجات الجاذبية وهذا ما يدعم نظرية النسبية. حيث يزداد طول الدورة مع صغر في المدار حيث يتقارب النجمان المترافقان من بعضهما تدريجيا ويفقدان جزءا من طاقة حركتهما ويتحركان بحركة لولبية مع اقترابهما من بعض وهذا التناقص في الطاقة يثبت نظرية النسبية العامة حيث ان الطاقة المفقودة تحملها موجات الجاذبية.

قاذفات أشعة سينية x ray bursters

قاذفة الأشعة السينية 4U1820−30 في الحشد الكري NGC6624 عبارة عن نجم نيوتروني في نظام مزدوج يشفط مادة من رفيقه القزم الأبيض حيث يتجمع الهيليوم من القزم الأبيض في قرص حول البلسار وتسخن مادة القرص لدرجة حرارة 100,000 K وتبدأ في بث أشعة سينية وعندما يتجمع الهيليوم على سطح النجم النيوتروني لعمق متر واحد فإنه يتحول لكربون وينتج ومضات من الأشعة السينية

قاذفات أشعة جاما Gamma ray burster

استطاع مرصد أشعة جاما الفضائي GRO من رصد عدد كبير من قاذفات أشعة جاما وهذه القاذفات تستمر لفترات تتراوح ما بين مللي ثانية إلى 30 ثانية. كنه القاذفات غير معلوم ولكن أحد الفروض التي يمكن أن تفسر هذه الظاهرة هي وجود نجمين من نجوم البلسار في نظام مزدوج ومع اقتراب النجمين من بعضهما فإنهما في النهاية سيندمجان ليتكون منهما ثقب أسود وعند لحظة الاندماج تخرج منهما كمية هائلة من أشعة جاما كمقذوف. وإذا كانت هذه الفرضية صحيحة فهذا يعني أن كل مقذوف نرصده من أشعة جاما يكون دليلا لاندماج نجمين من البلسار وانتهاء وجود نظامهما المزدوج ليحل محلهما ثقبا أسود.

الثقب الأسود Black hole

بالرغم من أننا لم نر ثقباً أسود حتى الآن، إلا أنه من الصعب علينا أن نتخيل عدم وجوده، حيث إنه يعتبر أفضل الطرق لتفسير تطور النجوم ذات الكتل العالية على حالة ما بعد النجوم النيوترونية، بالإضافة إلى تفسير ما هو موجود داخل مركز المجرات أو النقص الملحوظ في كتلة الكون المرئي، وهناك العديد من النجوم يرشحها العلماء على أنها من الثقوب السوداء. وبمنتهى البساطة فإن فكرة الثقوب السوداء تعني أن قوة الجاذبية تعمل على ارتداد الأشعة التي تصدر من النجم يحث ترغمها على العودة إلى النجم مرة ثانية وبالتالي لا يرى منه شيء ولذلك لا يمكن أن نرى الثقب الأسود، ولكن علينا أن نتعرف عليه من خلال تأثير جاذبيته على الوسط المحيط به. وقد لوحظ انحراف الضوء المار قريباً من الشمس مما يدل على تأثير قوة الجاذبية للشمس على الضوء شكل 10-29، ولذلك يمكننا القول بأن قوة الجاذبية الهائلة التي يمتلكها الثقب الأسود قد انتصرت على القوى الأخرى وتمنع الضوء من الخروج من النجم، وتعتبر هذه المرحلة

مرحلة انتصار الجاذبية. وإذا كانت كتلة النجم النيوتروني تزيد عن 3 كتلة شمسية فإن هذا النجم ستكون لدية قوة جاذبية تستطيع أن تتغلب على القوة بين النيوترونات المنحلة وبالتالي لن تتوقف عملية الانكماش عند مرحلة انحلال النيوترونات ولكنها ستتقدم في عملية الانكماش لمرحلة الثقب الأسود. ستصبح سرعة الهروب من الثقب الأسود مساوية لسرعة الضوء و بالتالي لن تستطيع الأشعة أي أشعة أن تخرج من الثقب الأسود ومن هنا أصبح من غير الممكن أن نراه لعدم خروج أشعة منه. وبالتالي فإن أعماق الثقب الأسود لا يمكن رصدها ويعرف السطح الفاصل بين جسد الثقب الأسود والعالم الخارجي المحيط به أفق الحدث event horizon ومن المتوقع أن يكون الثقب الأسود متعادل كهربيا وأنه يمتلك تعجيل زاوي نتيجة الدوران. خارج أفق الحدث وبعيدا عن الثقب الأسود فإن المادة تشعر بانجذاب dizzy وفي داخل دائرة الإيرجوسفير ergosphere فإن المادة تشعر بأن الثقب الأسود يسحبها ولكنها ما زالت لها الفرصة في الهروب وهذه المادة أثناء هروبها يمكن أن تنقص من طاقة الدوران للثقب الأسود. أما داخل أفق الحدث فإن المادة لايمكن أن تهرب إلى خارج الثقب الأسود وإذا كان الثقب الأسود موجود في نظام ثنائي ويمتص مادة من رفيقه فإن المادة المتجمعة نحوه تسخن وترسل أشعة سينية تماما كما يحدث في حال النجوم النيوتروني. وهذه تعتبر أحد الوسائل التي يمكن من خلالها الاستدلال على وجود ثقب أسود من خلال وجود الأشعة السينية وإمكانية تقدير كتلة النجم نفسه فإذا كانت كتلته تزيد عن 3 كتلة شمسية فهو ثقب أسود وإن كانت أقل من ذلك فهو يمكن أن يكون نجم نيوتروني.

شكل الثقب الأسود

يمكن حساب سرعة الهروب من الثقب الأسود باستخدام المعادلة التالية

$$V = (2GM/R)^{½}$$

وحيث 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 قطر Schwarzschild وهي تعتمد على كتلة النجم فقط. وتدل الحسابات على أن نجما في حجم الشمس حينما يصبح ثقبا أسود لابد وأن ينكمش حتى يصبح نصف قطره حوالى 3 كم فقط كما هو مبين في جدول 10-7.

تقول نظرية النسبية العامة: لابد أن يتأثر الفضاء المحيط بالثقب الأسود بحيث يحدث له انحناء في اتجاه الثقب الأسود، ويعتقد الفلكيون أن الثقب الأسود إذا كان عضوا في نظام ثنائي فإنه كما كان الحال في النجوم النيوترونية، تنتقل المادة من النجم المصاحب إلى الثقب الأسود فتدور حوله مكونة حلقة من المادة التي ترتفع درجة حرارتها إلى أكثر من مليون كالفن ولذلك تكون مصدراً للأشعة السينية، وبالتالي يمكن لكل من النجوم النيوترونية والثقوب السوداء أن تكون مصدراً للأشعة السينية. وهناك محاولات لمعرفة قوة الجاذبية للثقب الأسود عن طريق تأثيره على النجم المصاحب والذي يمكن رؤيته وحساب سرعته في مداره، أو عن طريق انحراف الضوء المار بالقرب منه.

جدول 10-7: حجم الثقب الأسود

الجرم	الشمس	الأرض	المشتري	نجم كتلته 150 كتلة شمسية	حشد نجمى	نواة المجرة
نصف القطر كثقب أسود	3 كم	0.9 سم	2.9 سم	150 كم	50 ألف كم	1 – 100 مليون كم

ويبين الجدول التالي الإزاحة الطيفية في الثقب الأسود بالمقارنة مع أجرام أخرى ويتضح أن الثقوب السوداء تمتلك إزاحة طيفية عالية جدا.

جدول ؟؟ : الإزاحة الطيفية في الشمس ونهايات النجوم

الجرم	الازاحة الطيفية (%)
الشمس	0.0002
القزم الأبيض	0.01
النجم النيوتروني	20
الثقب الأسود	∞

وفيما يلي أهم خواص الثقب الأسود:

1- جسم متناهي في الصغر ونصف قطره 3 كم

2- كتلته تزيد عن 3 كتلة شمسية

3- لا تخرج منه أشعة إطلاقا لذا فهو لن يرى

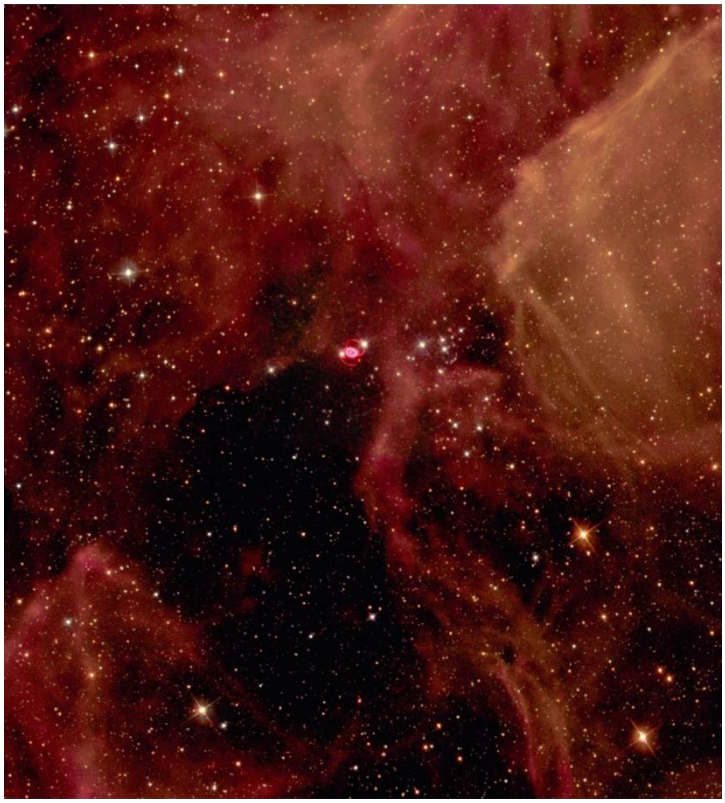
4- يصدر أشعة سينية من أي مادة تدور حوله من النجم الرفيق

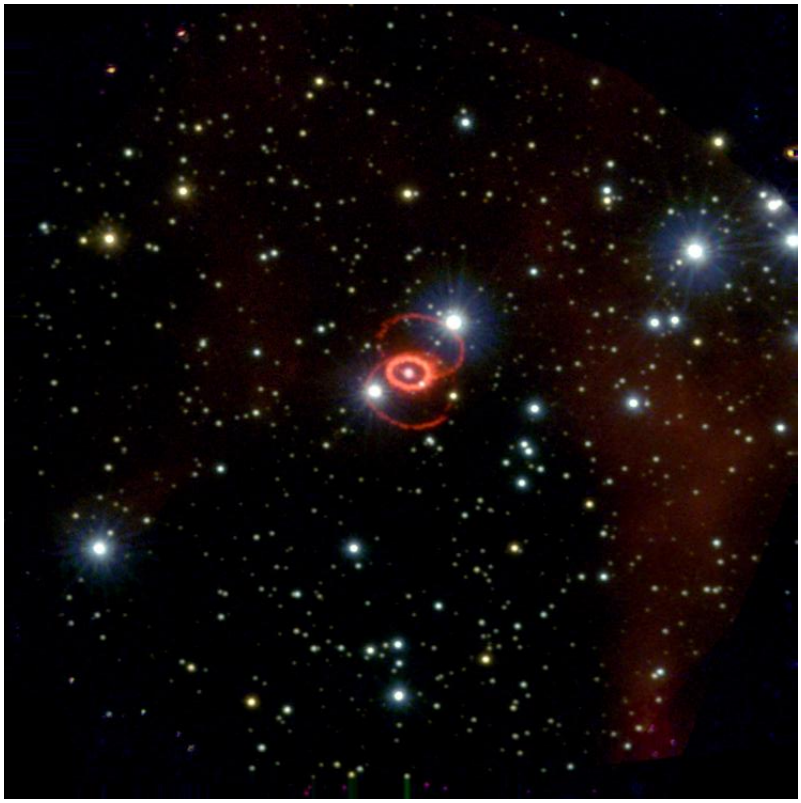
5- ينحني الفراغ نحوه بسبب جاذبيته العالية

6- ينحرف الضوء نحوه

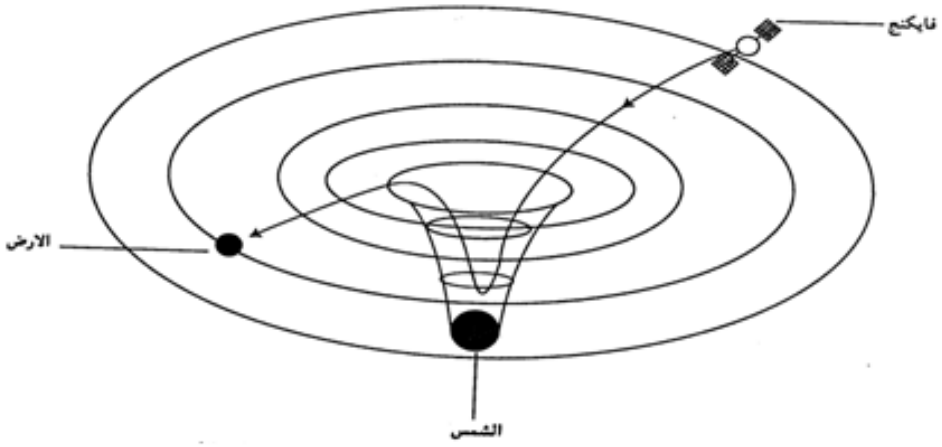
7- يبتلع ما يقترب منه من مادة إذا دخلت في منطقة حرجة قريبة منه

8- يتميز بإزاحة طيفية تزيد عن 20.





شكل 10-28: في وسط الصورة العليا سوبر نوفا 1987A في سحابة ماجلان الكبرى، الأسفل: صورة مكبرة للسوبرنوفا (HST)



شكل 10-29: تجربة مثيرة قامت بها مركبة فايكنج. حيث أرسلت إشارة راديوية إلى الأض بحيث تمر بالقرب من الشمس وهي في طريقها نحو الأرض. انحرف الضوء نحو الشمس مما أدى لتأخر وصوله للأرض وهذا يؤكد أن جاذبية الشمس لعبت دورا في انحناء الضوء، وحيث أن الثقوب السوداء تتمتع بجاذبية قصوى لذا فإن دورها في انحناء الضوء سيكون كبيرا جدا.

البحث عن الثقوب السوداء

ملخص Summary

1) تزداد نسبة اللمعان لنجمين بزيادة فارق الأقدار بينهما.
2) الأنواع الطيفية للنجوم هي O, B, A, F, G, K, M.
3) القدر الظاهري هو القدر الذي نرصده للنجوم.
4) القدر المطلق هو القدر الذي يأخذه النجم إذا كان على بعد 10 بارسك.
5) القدر المطلق للنجوم يعبر عن اللمعان الحقيقي للنجوم.
6) يمكن استخدام الشكل H-R في التعرف على خصائص النجوم.
7) تنتظم أغلب النجوم في خواصها على شريط التتابع الرئيس وتظل عليه أغلب حياتها.
8) النجوم الساخنة تكون على شريط التتابع الرئيس من أعلى.
9) النجوم الباردة تكون على شريط التتابع الرئيس من أسفل.
10) الشمس من نجوم التتابع الرئيس وهي من النوع الطيفي G2.

11) النجوم العمالقة الحمراء تكون فوق التتابع الرئيس، أما الأقزام البيضاء فتكون تحت التتابع الرئيس.

12) يمكن حساب بعد النجم بمعلومية القدرين الظاهري والمطلق.

13) توجد الكثير من النجوم في نظام مزدوج بحيث يدور النجمان حول مركز جاذبيتهما.

14) للنجوم المزدوجة أهمية كبيرة في حساب كتل النجوم والتعرف على بعض خواصها.

15) النجوم المتغيرة هي نجوم غير ثابتة في مقدار لمعانها وحجمها، وهي تمثل حالة من الاضطراب تحدث للنجم في بعض مراحل حياته. فإذا دخل النجم في مرحلة اضطراب فإنه يتمدد أو ينكمش بشكل دورى فيظهر كنجم نابض أو منفجر.

16) تعتبر النجوم المتغيرة وسيلة هامة في التعرف على أبعاد حشود النجوم والمجرات.

17) تولد النجوم في الحشود الائتلافية.

18) نجوم الحشود المفتوحة والائتلافية من الجمهرة الحديثة.

19) الحشود الائتلافية هي أقل الحشود استقرارا.

20) أكثر الحشود شيوعا في مجرتنا هي الحشود المفتوحة.

21) تنتقل النجوم الحديثة الولادة من الحشود الائتلافية إلى الحشود المفتوحة تدريجياً.

22) نجوم الحشد الواحد غالباً ما تكون من نفس العمر.

23) الشكل H-R للحشود الكرية متشابه.

24) يختلف الشكل H-R في الحشود المفتوحة المختلفة

25) النجوم أعلى التتابع الرئيس تختلف عن الشمس في التركيب بينما النجوم أسفل التتابع الرئيس فإنها تشبه الشمس في التركيب.

26) يمكن من خلال سلسة التفاعلات النووية معرفة المراحل التي يمر بها النجم في مسار حياته وبالتالي يمكن تقدير عمره ومستقبل تطوره.

ويمكننا أن نلخص قصة حياة النجوم في الخطوات التالية:

1) تتكون النجوم داخل سحب ما بين النجوم بكتل مختلفة، ويتحدد نوع النجم حسب كتلته ويختلف مسار حياته تبعاً لذلك.

2) يقضي النجم معظم حياته على التتابع الرئيس كنجم في حالة اتزان هيدروستاتيكي، ويكون مصدر الطاقة هو تحول الهيدروجين إلى هيليوم في تفاعلات نووية اندماجية.

3) عندما يتكون لب من الهيليوم فإن النجم يبرد وينكمش لبه مما يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة فتتمدد طبقات النجم الخارجية ليصبح النجم عملاقا أحمرا، وبالتالى يتحرك النجم إلى أعلى وإلى اليمين في الشكل H-R وهذا يدل على أن لمعان النجم قد زاد بينما انخفضت درجة حرارته، وفي نفس الوقت الذي تتمدد الطبقات الخارجية للنجم فإن اللب يستمر في الانكماش حتى يصل إلى حالة تحلل الإلكترونات، وعندها تتزايد الحرارة بشكل تسارعي حتى تبدأ تفاعلات الهيليوم النووية مرة أخرى.

4) مع بدء شرارة الهيليوم، يتمدد اللب لتختفي حالة تحلل الإلكترونات ويصبح النجم أكثر لمعاناً ويعود إلى الاتزان الهيدروستاتيكي.

5) تستمر تفاعلات الهيليوم حتى يتكون لب من الكربون فيبرد النجم وينكمش مما يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة فتتمدد الطبقات الخارجية للنجم ليصبح عملاقا أحمرا مرة ثانية وفي نفس الوقت يستمر انكماش اللب حتى تتحلل الإلكترونات تماماً كما شرحنا في الخطوة الثالثة.

6) تحدث بعد ذلك تغيرات سريعة يصعب تحديدها نظرياً وعملياً ولكن تشير الدراسات النظرية إلى أن النجم يتحول إلى نجم متغير حيث يبدأ في التمدد والانكماش بشكل دوري (فى حالة الشمس ستتحول في الغالب لنجم متغير من النجوم القيفاوية) ثم يصل النجم لمرحلة يقذف فيها جزء من مادته (طبقاته الخارجية) مشكلا ما يعرف بالسديم الكوكبي، وبانتهاء هذه الفترة يصبح النجم عبارة عن لب عار درجة حرارته تبلغ 100 ألف كالفن.

7) تتوقف التفاعلات النووية حيث يبرد النجم ويصبح في الحالة المعروفة بالقزم الأبيض والذي يبرد بدوره ليصبح قزماً أسود لا نستطيع أن نراه.

8) إذا كانت كتلة النجم تزيد عن 5 – 12 كتلة شمسية فإنها ستنتهي أيضاً بقزم أبيض ولكن مقدار القذف سيكون أكبر وبالتالي فإن مقدار ما يفقده النجم من كتلة سيزداد، كما أن التفاعلات النووية ستستمر إلى ما بعد الكربون.

9) النجم الذي له كتلة تزيد عن 10 كتلة شمسية لابد وأن يفقد 0.90 من كتلته حتى يتحول إلى قزم أبيض.

10) فى كل مرة يتكون لب من المادة الأثقل تتوقف التفاعلات فينكمش النجم ويتمدد وقد يحدث أثناء ذلك أن يدخل النجم في مرحلة من التغير ليصبح نجماً متغيراً.

11) قد يتحرك نبض القزم الأبيض مرة ثانية إذا كان في نظام مزدوج وكان النجم المصاحب عملاقاً أحمر، حيث تنتقل المادة من العملاق الأحمر إلى القزم الأبيض فيحدث النجم ما يعرف بالنوفا أو السوبرنوفا حسب ما يبتلعه من مادة.

12) إذا كانت كتلة النجم الأصلية تزيد عن 12 كتلة شمسية فإن النجم سيكون أسرع في التطور وستنتهي حياته كنجم نيوترونى كتلته لا تزيد عن 3 كتلة شمسية.

13) إذا كانت كتلة النجم في بداية حياته تزيد عن 30 – 40 كتلة شمسية فإنه يستمر في التطور إلى أن يصبح ثقباً أسودا.

أسئلة وصفية:

1) عرف كلاً من : القدر الظاهري والقدر المطلق للنجوم.
2) يمكن تمييز النجوم إلى أنواع حسب طيفها. بين ذلك مع شرح شكل H-R.
3) ما الفرق بين النجوم المتغيرة وغير المتغيرة؟
4) نجمان O, M . هل يمكن أن يكونا من عمر واحد؟ أيهما يمكن أن يكون أطول عمراً؟
5) أذكر ما تعرفه عن سلسلة التفاعلات النووية في النجوم.
6) تزداد نسبة العناصر الثقيلة في الكون. بين ذلك.
7) قارن بين : الشمس و نجم خافت وآخر لامع.
8) أذكر قصة حياة الشمس باختصار.
9) ما ظروف تحول نجم إلى سوبرنوفا؟
10) ما ظروف تحول نجم إلى نجم نيوتروني؟
11) الثقوب السوداء أجسام لا نراها. فما الذي يدل على وجودها أصلاً؟
12) ماذا تعرف عن السحب ما بين النجوم؟ وهل هي تشبه السحب في غلافنا الجوي؟
13) ماذا تعرف عن: النجوم النابضة – النجوم المستعرة – السوبرنوفا– النوفا – البلسار؟

علل ما يلي

1) حدوث انفجار السوبرنوفا.
2) رغم أننا لم نر ثقباً أسود إلا أن الدلائل تشير إلى وجوده.
3) يصغر حجم النجم إذا دخل في مرحلة القزم الأبيض أو النجم النيوتروني.
4) النجم النيوتروني قد يكون مصدراً للأشعة السينية.
5) لا يتكون حديد في لب الشمس.

مسائل حسابية

1–احسب بعد نجم له زاوية اختلاف منظر قدرها 0.76 ثانية قوسية.

2– لديك ثلاثة نجوم a,b,c لهم القدر المطلق لكل منها يساوي 1 والقدر الظاهري: ma= 3 , mb= 5, mc= 10

أ– أيهم أبعد ؟ ب– أيهم ألمع؟ ج– احسب بعد كل منهم.

3- نجم له $M=2$, $L=10$ احسب عمره.

4- نجم له : $T= 10000$ K, $L= 500$ L_{sun} احسب نصف قطره.

5- نجمان لهما فرق في الأقدار يساوي 4 . احسب نسبة لمعانهما.

6- في أطياف الهيدروجين أي السلاسل ترى في الضوء المرئي؟

7- نجم أغلب طيفه في الطول الموجي 5000 انجستروم. احسب درجة الحرارة على سطحه.

8- لديك ثلاثة نجوم أطيافها: G2III, G1I, B2V أيها ألمع؟ ب- أيها على التتابع الرئيس؟ ج- أيها عملاق أحمر؟