



النجم هو جسم كروي مضيء من البلازما، يصدر الإشعاع منه بخلاف الكواكب التي لا يكون إشعاعها ذاتياً، وتتكون طاقته من التفاعلات النووية الاندماجية في باطنه^١. وأحجام النجوم متفاوتة، فبعضها أكبر من شمسنا بمليارات المرات وبعضها أصغر منها بمئات المرات.

يمكن للنجوم أن تشكل أنظمة مدارية مع أجسام فلكية أخرى، كما هو الحال في الأنظمة الكوكبية والأنظمة النجمية التي تحتوي على نجمين أو أكثر. وتُشكل مجاميع هائلة من النجوم ما يسمى بالمجرة galaxy. فمثلاً تحوي مجرتنا درب التبانة لوحدها أكثر من مائة مليار نجم، وهي واحدة من مليارات المجرات في الكون الواسع. ويحتوي الكون المرئي على ما يقدر بـ 10^{22} إلى 10^{24} نجماً. وتشير التقديرات إلى أن ما بين (5000 → 2500) نجم داخل مجرتنا يمكن رؤيتها من الأرض بدون تلسكوب في أفضل الظروف الجوية وبلا تلوث ضوئي. ومع ذلك، في أية لحظة معينة، يكون نصف الكرة الأرضية فقط مرئياً، مما يعني أن الشخص يمكنه رؤية 2500 نجم تقريباً كحد أقصى في السماء الصافية والمظلمة.

تؤدي التفاعلات النووية الاندماجية داخل النجوم أو بقاياها إلى إنشاء جميع العناصر الكيميائية الموجودة بشكل طبيعي تقريباً. ويؤدي فقدان الكتلة النجمية أو انفجارات المستعرات العظمى إلى إعادة المواد إلى الوسط بين النجوم. ثم يتم إعادة تدوير هذه العناصر إلى نجوم جديدة.

4-1: Stellar Magnitudes

٤-١: أقدار النجوم

القَدَر في علم الفلك هو مقياس لسطوع ولمعان النجوم والأجرام السماوية الأخرى. وقد قُسم اللمعان إلى درجات سُميت أقداراً، وهي مقاييس لوغارتمية لللمعان، وتكون النجوم الأكثر لمعاناً أقل قدراً. وهناك ثلاثة أنواع لها هي الأقدار الظاهرية والمطلقة والإشعاعية.

(١) هذا التعريف صحيح لنجوم النسق الأساسي ولا يشمل بالضرورة المراحل الأخيرة من حياة النجم.

٤-١-١: الأقدار الظاهرية

4-1-1: Apparent Magnitudes

السطوع أو اللمعان الظاهري apparent brightness هو مصطلح يستخدم لبيان مدى سطوع النجم بالنسبة لمراقب على الأرض. وتختلف النجوم في لمعانها الظاهري كما يراها الراصد. ولا تستطيع العين المجردة رؤية النجوم التي يفوق قدرها الرقم (+6). ويُعدّ نجم النسر الواقع Vega (الذي له قدر 0) مقياساً وسطياً لأقدار النجوم، فالنجوم الأكثر خفوتاً منه لها أقدار موجبة، والنجوم الأكثر سطوعاً منه لها أقدار سالبة. ويبلغ القدر الظاهري لنجم الشَّعرى اليمانيَّة Sirius (الذي هو ألمع نجوم السماء) المقدار (-1.5)، وقدر الشمس هو (-26.8)، وقدر القمر المكتمل (-12.5). ويعتمد قدر الأجرام الأكثر خفوتاً التي لا تُرى بالعين المجردة على حجم التلسكوب وحساسية الكاشف وزمن التعرض. ويبلغ قدر الأجرام الأكثر خفوتاً المرصودة لحد الآن أكثر من 30.

تجدر الإشارة إلى أن الأقدار الظاهرية لا تعطي نتيجة صحيحة عن اللمعان الحقيقي للنجوم، لأن بعد النجم عن الأرض يكون عاملاً رئيساً في تغيير مقدار اللمعان إلى جانب عوامل أخرى مثل كثافة غبار ما بين النجوم على امتداد خط الرؤية. فالنجم الذي يظهر ساطعاً في السماء يمكن أن يكون نجماً خافتاً بالفعل، ولكنه قريب من شمسنا، والعكس صحيح. ونتيجة لذلك، تسمى هذه المقادير بالظاهرية.

يمكن استخدام الأقدار لمقارنة اللمعان الظاهري لنجمين، حيث إن اللمعان هو طريقة للتعبير عن تدفق الضوء القادم نحونا بوحدة الواط لكل متر مربع. وبالنسبة لنجمين بقدر m_1 و m_2 ولمعان ظاهري b_1 و b_2 على التوالي، لدينا

$$m_2 - m_1 = 2.5 \log \frac{b_1}{b_2} \quad \dots \dots 4.1$$

$$\log \frac{b_1}{b_2} = 0.4(m_2 - m_1) \quad \rightarrow \quad \frac{b_1}{b_2} = 10^{0.4(m_2 - m_1)}$$

$$\frac{b_1}{b_2} \approx 2.512^{(m_2 - m_1)} \quad \dots \dots 4.2$$

ويلاحظ من المعادلة 4.1 أن استجابة عين الإنسان لللمعان الضوء ليست خطية وإنما لوغاريتمية.

الجدول ٤-١: العلاقة بين $(m_2 - m_1)$ و (b_1/b_2) للأجرام السماوية.

$m_2 - m_1$	1	2.5	5	10	20
b_1/b_2	2.512	10	100	10^4	10^8



وبتطبيق المعادلة 4.2 كما في الجدول ٤-١ يلاحظ أن النجم ذا القدر (+1) ألمع من النجم ذي القدر (+6) بـ 100 مرة، ومن النجم ذي القدر (+11) بـ 10^4 مرة.

مثال ٤-١: افترض ثلاثة نجوم هي A و B و C . يبلغ القدر الظاهري للنجم A (+12)، والنجم B ألمع من النجم A بعشرة آلاف مرة. أما النجم C فهو أقل خفوتاً من النجم A بعشرة آلاف مرة، فما هو قدر كل من النجمين B و C ؟

الحل: (أ) استخراج القدر الظاهري للنجم B :

$$b_B = 10^4 b_A$$

$$m_A - m_B = 2.5 \log \frac{b_B}{b_A}$$

$$12 - m_B = 2.5 \log 10^4 = 2.5 \times 4 \log 10 = 2.5 \times 4 \times 1 = 10$$

$$m_B = +2$$

(ب) استخراج القدر الظاهري للنجم C :

$$b_C = 10^{-4} b_A$$

$$m_A - m_C = 2.5 \log \frac{b_C}{b_A}$$

$$12 - m_C = 2.5 \log 10^{-4} = 2.5 \times (-4) = -10$$

$$m_C = +22$$

مثال ٤-٢: ما مدى لمعان نجم من القدر الأول مقارنة بلمعان نجم من القدر الخامس؟

$$\frac{b_1}{b_2} = 2.512^{(m_2 - m_1)} = 2.512^{(5 - 1)} = 2.512^4 = 39.82$$

الحل :

النجم ذو القدر (+1) ألمع من النجم ذي القدر (+5) بـ 39.82 مرة. ويتضح هذا أيضاً من الجدول ٤-١.

٤-١-٢: الأقدار المطلقة

4-1-2: Absolute Magnitudes

لمعرفة اللمعان الحقيقي للنجم (الطاقة المنبعثة من النجم خلال وحدة الزمن) لا بدّ من التخلص من عامل المسافة. فلهذا اتفق علماء الفلك على اعتبار أن النجوم واقعة على بعد واحد من الأرض نظرياً في حالة حساب هذه الطاقة، وهذا البعد المفترض هو عشرة فراسخ فلكية $10 pc$. فلهذا يكون القدر المطلق هو القدر الظاهري للنجم عندما يكون على بعد عشرة فراسخ فلكية، والفرسخ الفلكي يعادل 3.26 سنة ضوئية. والمعروف أن اللمعان يعتمد على بعد النجم عن الراصد حسب قانون التربيع العكسي (أي إن مقدار الطاقة الواصلة من النجم في وحدة الزمن من وحدة المساحة تتناسب عكسياً مع مربع ذلك

البعد). لذا، فإذا كان اللمعان الظاهري لنجم معين هو b_r ، حيث r هو البعد بين النجم والراصد مقاساً بالفرسخ الفلكي، فإنه عند مقارنة هذا النجم مع نجم قياسي آخر على بعد $10 pc$ وشدة لمعانه b_{10} يمكن وضع قانون التربيع العكسي كما يلي:

$$\frac{b_r}{b_{10}} = \frac{10^2}{r^2} \quad \dots \dots 4.3$$

وبأخذ لوغاريتم الطرفين:

$$\log \frac{b_r}{b_{10}} = \log 10^2 - \log r^2 = 2 - 2 \log r \quad \dots \dots 4.4$$

ومن المعادلة 4.1:

$$\log \frac{b_r}{b_{10}} = 0.4(m_{10} - m_r) \quad \dots \dots 4.5$$

حيث $(m_r = m)$: القدر الظاهري، و m_{10} : القدر الظاهري عند البعد $10 pc$ ، أي القدر المطلق M .
ومن المعادلتين 4.4 و 4.5:

$$0.4(M - m) = 2 - 2 \log r \quad \rightarrow \quad M - m = 5 - 5 \log r$$

$$M = m + 5 - 5 \log r \quad \dots \dots 4.6$$

$$\text{or } m = M + 5 \log \frac{r}{10} \quad \dots \dots 4.6'$$

تمثل المعادلة 4.6 علاقة الأقدار المطلقة والظاهرية بالمسافة. ويمكن وضعها بدلالة زاوية اختلاف المنظر (حيث $r = 1/p''$).

$$M = m + 5 + 5 \log p'' \quad \dots \dots 4.7$$

ويمكن من المعادلة 4.6 استنتاج المسافة بالفرسخ الفلكي مباشرة، بشرط أن يكون القدران المطلق والظاهري معروفين،

$$r = 10^{(m-M+5)/5} \quad \dots \dots 4.8$$

وفي الأرصاد الفلكية الدقيقة للنجوم وخاصة الخافتة منها يُجري الفلكيون تصحيحات على المعادلتين السابقتين بسبب تأثير عملية الامتصاص الحاصل من قبل السحب والعوالق الترابية في فضاء ما بين النجوم إضافة إلى الامتصاص الحاصل بواسطة الغلاف الجوي الأرضي، وكما يلي:

$$M = m + 5 - 5 \log r - A \quad \dots \dots 4.9$$

حيث A : الامتصاص الكلي مقاساً بالأقدار المطلقة.



مثال ٤-٣: إذا علمت بأن القدر الظاهري لجرم سماوي معين هو ($m = 5$) وقدره المطلق ($M = 15$)، فجد بعده بالسنين الضوئية وجد زاوية اختلاف منظره. (أهمل تأثير الامتصاص الجوي).

الحل: لإيجاد البعد،

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

$$15 = 5 + 5 - 5 \log r \rightarrow 5 \log r = -5 \rightarrow \log r = -1$$

$$r = 0.1 \text{ pc} = 0.1 \times 3.26 \text{ ly} = 0.326 \text{ ly}$$

$$p'' = \frac{1}{r} = \frac{1}{0.1} = 10''$$

لإيجاد زاوية اختلاف المنظر،

مثال ٤-٤: إذا كان القدر الظاهري للشمس (-26.74) ومعدل بعدها عن الأرض ($1.496 \times 10^8 \text{ km}$)، فجد قدرها المطلق.

الحل:

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

يجب أن يكون البعد في هذه المعادلة بوحدة الفرسخ الفلكي. لذا

$$r = \frac{1.496 \times 10^8 \text{ km}}{3.26 \times 9.467 \times 10^{12} \text{ km/pc}} = 4.848 \times 10^{-6} \text{ pc}$$

$$M = -26.74 + 5 - 5 \log(4.848 \times 10^{-6}) = 4.83$$

مثال ٤-٥: القدر المطلق لنجم في مجرة المرأة المسلسلة Andromeda galaxy يبعد مسافة

690 kpc هو ($M = 5$) قبل انفجاره. ثم انفجر على شكل مستعر أعظم supernova وأصبح أكثر سطوعاً بمليار مرة. ما هو قدره الظاهري والمطلق بعد الانفجار؟

الحل: لإيجاد القدر الظاهري m_i قبل انفجار النجم،

$$M_i = m_i + 5 - 5 \log r$$

$$5 = m_i + 5 - 5 \log 690000 \rightarrow m_i = 29.19$$

لإيجاد القدر الظاهري m_f بعد انفجار النجم،

$$m_f - m_i = 2.5 \log \frac{b_i}{b_f} = -2.5 \log \frac{b_f}{b_i}$$

حيث b_i : لمعان النجم قبل الانفجار، و b_f : لمعان النجم بعد الانفجار.

$$m_f = 29.19 - 2.5 \log 10^9 = 6.69$$

لإيجاد القدر المطلق M_f بعد انفجار النجم،

$$M_f = m_f + 5 - 5 \log r = 6.69 + 5 - 5 \log 690000 = -17.5$$



إن الأقدار الظاهرية والمطلقة تمثل أقدار النجوم في الأطوال الموجية المرئية، ولا تشمل جميع الأطوال الموجية للإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من النجوم. ولمعرفة هذا تُستخدم أقدار تشمل الطاقة الإشعاعية الحرارية الكلية المنبعثة من النجوم، والتي تمثل الأقدار المقاسة بواسطة أجهزة تتحسس جميع الأطوال الموجية القادمة من الأجرام السماوية. ولكن هذه الحالة مثالية. أما من الناحية العملية، فإن هذا يعد أمراً صعباً للغاية نظراً لأن الغلاف الجوي الأرضي يمتص جزءاً من الإشعاع، وكذلك بسبب امتصاص الإشعاع من قبل الغبار بين النجوم. كما تتطلب الأطوال الموجية المختلفة أجهزة كشف مختلفة وليس جهازاً واحداً يتحسسها جميعاً.

ويمكن تعريف القدر الإشعاعي على أساس لمعان النجم. أو درجة الحرارة الفعالة للنجم. ثم يُطبق التصحيح الإشعاعي لتحويل الأقدار المرئية إلى أقدار إشعاعية. وهذا التصحيح يكون كبيراً بالنسبة للنجوم التي تشع معظم طاقتها خارج النطاق المرئي. ولم يتم بعد توحيد مقياس موحد للتصحيح. ويمكن أن يكون القدران البصري والإشعاعي متساويين، وكلما زاد اختلاف توزيع الإشعاع عن توزيع الشمس، كلما زاد التصحيح الإشعاعي.

هي مقدار الطاقة الكهرومغناطيسية المنبعثة من سطح النجم في جميع الأطوال الموجية خلال الثانية الواحدة. وتقاس بوحدة $Watt$ أو $Joule/sec$. وإذا افترضنا أن النجم يبعث الإشعاع كجسم أسود فيمكن حينئذ استعمال قانون ستيفان-بولتزمان Stefan-Boltzmann لحساب النورانية L ، والذي ينص على إن القدرة التي يشعها الجسم الأسود عند كل الأطوال الموجية تتناسب طردياً مع مساحة سطحه $4\pi R^2$ ومع القوة الرابعة لدرجة الحرارة الفعالة T_e :

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4 \quad \dots \dots 4.10$$

حيث σ : ثابت ستيفان-بولتزمان $= (5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4)$.

ويتبين من المعادلة 4.10 أن النورانية تزداد بزيادة حجم النجم ودرجة حرارته. وتقارب درجة الحرارة الفعالة للنجم درجة حرارة القرص النجمي المرئي (أي الغلاف الضوئي photosphere). ونصف قطر النجم هو نصف قطر الغلاف الضوئي، وهو المستوى الذي تصبح فيه الغازات النجمية معتمدة عند الأطوال الموجية المرئية.

مثال ٤-٦: نجمان لهما نفس الحجم ويبعدان بنفس المسافة عنا. وتبلغ درجة الحرارة السطحية للنجم A $6000 K$ ، ودرجة الحرارة السطحية للنجم B ضعف ذلك، أي $12000 K$. ما مقدار نورانية النجم B مقارنة بالنجم A ؟

$$L_A = 4\pi R_A^2 \sigma T_A^4 \quad \text{and} \quad L_B = 4\pi R_B^2 \sigma T_B^4$$

الحل:

بأخذ نسبة نورانية النجم B إلى النجم A :

$$\frac{L_B}{L_A} = \frac{4\pi R_B^2 \sigma T_B^4}{4\pi R_A^2 \sigma T_A^4} = \frac{R_B^2 T_B^4}{R_A^2 T_A^4}$$

وبما أن للنجمين نفس الحجم، فإن $(R_A = R_B)$ ، والناتج سيصبح:

$$\frac{L_B}{L_A} = \frac{T_B^4}{T_A^4} = \frac{(12000 K)^4}{(6000 K)^4} = 2^4 = 16$$

أي إن مضاعفة درجة الحرارة ضعفاً واحداً أدت إلى مضاعفة النورانية 16 مرة.

٤-٢-١: علاقة النورانية بالأقدار الإشعاعية

4-2-1: The Relationship of Luminosity to Bolometric Magnitudes

إذا افترض بأن النجم يقع على بعد قياسي يبلغ عشرة فراسخ فلكية فإن لمعانه حينئذ له علاقة مباشرة بنورانيته. وإذا اعتبرنا أن النجم الآخر هو الشمس فيمكن كتابة المعادلة 4.1 كما يلي:

$$M_{bol\odot} - M_{bol\otimes} = 2.5 \log \frac{L_{\otimes}}{L_{\odot}} \quad \dots \dots 4.11$$

حيث $M_{bol\odot}$: القدر الإشعاعي المطلق للشمس، و $M_{bol\otimes}$: القدر الإشعاعي المطلق للنجم، و $L_{\otimes}$: نورانية النجم، و $L_{\odot}$: نورانية الشمس.

مثال ٤-٧: إذا كان القدران الظاهري والمطلق ودرجة الحرارة السطحية لنجم ما كما يلي:

$$m_{bol\otimes} = +7.2, \quad M_{bol\otimes} = +1.6, \quad T_{e\otimes} = 8700 K$$

فجد: (١) زاوية اختلاف المنظر p'' للنجم وبعده عن الشمس بالسنين الضوئية، (٢) نورانية النجم $L_{\otimes}$ ، (٣) نصف قطره $R_{\otimes}$.

مع العلم بأنه: $(M_{\odot} = +4.8)$ و $(L_{\odot} = 3.85 \times 10^{26} W)$ و $(\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4)$.

الحل: (١) من المعادلة 4.7:

$$M_{bol\otimes} = m_{bol\otimes} + 5 + 5 \log p''$$

$$1.6 = 7.2 + 5 + 5 \log p'' \rightarrow \log p'' = -2.12 \rightarrow p'' = 10^{-2.12} \approx 0.0076''$$



$$r = \frac{1}{p''} = \frac{1}{0.0076} = 131.58 \text{ parsec} = (3.26 \times 131.58) \text{ ly} = 428.95 \text{ ly}$$

$$\log \frac{L_{\otimes}}{L_{\odot}} = 0.4(M_{bol\odot} - M_{bol\otimes}) = 0.4(4.8 - 1.6) = 1.28 \quad (2) \text{ من المعادلة 4.11}$$

$$\frac{L_{\otimes}}{L_{\odot}} = 10^{1.28} = 19.05$$

$$L_{\otimes} = 19.05 L_{\odot} = 19.05 \times 3.85 \times 10^{26} \text{ W} = 7.33 \times 10^{27} \text{ W}$$

$$L_{\otimes} = 4\pi R_{\otimes}^2 \sigma T_{e\otimes}^4 \quad (3) \text{ من المعادلة 4.10}$$

$$R_{\otimes} = \frac{1}{2T_{e\otimes}^2} \sqrt{\frac{L_{\otimes}}{\pi\sigma}} = \frac{1}{2(8700 \text{ K})^2} \sqrt{\frac{7.33 \times 10^{27} \text{ W}}{\pi(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4)}}$$

$$= 1.34 \times 10^9 \text{ m} = 1.925 R_{\odot}$$

٤-٣: قياس أقطار النجوم

4-3: Measuring the Diameters of Stars

بالنسبة لمعظم النجوم، يُحسب نصف القطر باستخدام قانون ستيفان - بولتزمان بعد معرفة درجة الحرارة السطحية للنجم ونورانيته، وذلك وفق المعادلة 4.10:

$$R_{\otimes} = \sqrt{\frac{L_{\otimes}}{4\pi\sigma T_e^4}} \quad \dots \dots 4.12$$

ويُحسب نصف قطر النجم عادةً بدلالة نصف قطر الشمس $R_{\odot}$ للتخلص من الثابت كما في المعادلة التالية:

$$\frac{R_{\otimes}}{R_{\odot}} = \sqrt{\frac{L_{\otimes}}{L_{\odot}} \left(\frac{T_{e\odot}}{T_{e\otimes}} \right)^2} \quad \dots \dots 4.13$$

ومن الطرق الأخرى لقياس أقطار النجوم هي الطريقة المباشرة لقياس القطر الزاوي للنجم، وذلك باستخدام جهاز مقياس التداخل الضوئي optical interferometer، حيث يستخدم هذا الجهاز عادة لقياس الأقطار الزاوية للنجوم الكبيرة نسبياً مثل النجم منكب الجوزاء في كوكبة الجبار وفق العلاقة 2.1 التي مرّت في حساب قطر الشمس $\left(\frac{D}{\theta} = \frac{2\pi r}{360^\circ} \right)$. ويستعمل أحياناً جهاز آخر أكثر تطوراً من جهاز مقياس التداخل يدعى مقياس تداخل الشدة intensity interferometer.

أما بالنسبة للنجوم الثنائية الكسوفية فيمكن استخراج أقطارها بواسطة تحليل منحنياتها الضوئية ومنحنيات سرعتها نصف القطرية، والتي يمكن الحصول عليها بواسطة القياسات الضوئية أو الطيفية.



٤-٤: ألوان النجوم ودرجات حرارتها السطحية

4-4: Star Colors and Surface Temperatures

بما أن اللون في الطبيعة يعتمد على طول موجة الإشعاع الذي يصل حاسة البصر، فإن الأجرام السماوية ذات الدرجات الحرارية المختلفة يتناسب اللون الظاهر منها مع درجة حرارتها السطحية وفقاً لقانون بلانك في الإشعاع (لاحظ الشكل ٢-٢ في الفصل الثاني). ويهيمن اللون الأزرق على النجوم شديدة الحرارة، بينما تبعث النجوم الباردة معظم طاقتها الضوئية المرئية بأطوال موجية حمراء (لاحظ الجدول ٢-٤). ولذلك فإن لون النجم يُعدُّ مقياساً لدرجة حرارة سطحه (بغض النظر عن تأثيرات الاحمرار الناتج عن الغبار بين النجوم). ولا يعتمد اللون على بعد الجرم السماوي بخلاف السطوع الظاهري (القَدَر) الذي يعتمد على البعد. وكمثال، فإن النجم الأزرق يبعث معظم إشعاعه ضمن الأطوال الموجية ($430 \rightarrow 500 \text{ nm}$). أي إن توزيع طاقة النجم في أطوال موجية معينة يعتمد على درجة حرارته السطحية. لذلك فمن معرفة لون النجم يمكن تقدير طول الموجة التي تلازمه. وبدلالة طول الموجة الضوئية يمكن تشخيص حرارته السطحية باستعمال منحني بلانك، وهي نفس الطريقة التي تستخدم في تعيين درجة الحرارة السطحية للشمس. ويمكن أيضاً قياس درجة حرارة سطح النجم باستعمال قانوني فين وستيفان-بولتزمان كما مرّ علينا في موضوع درجة الحرارة السطحية للشمس في الفصل الثاني.

الجدول ٢-٤: أمثلة عن ألوان النجوم ودرجات الحرارة السطحية التقريبية المقابلة لها.

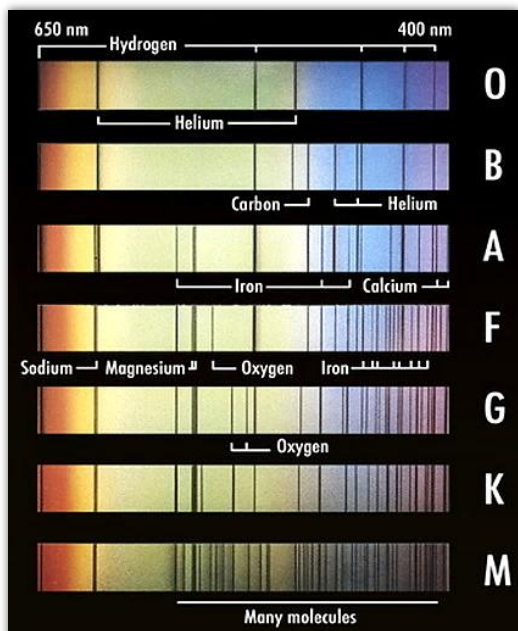
لون النجم	درجة الحرارة	مثال
أزرق	25000 K	السماك الأعزل Spica
أبيض	10000 K	النسر الواقع Vega
أصفر	6000 K	الشمس Sun
برتقالي	4000 K	الدبران Aldebaran
أحمر	3000 K	منكب الجوزاء Betelgeuse

4-5: Stellar Spectrum

٤-٥: الأطياف النجمية

إن جميع معلوماتنا حول الخصائص الفيزيائية للنجوم تأتي بشكل أو بآخر من دراسة أطيافها. ومن خلال دراسة شدة خطوط الامتصاص المختلفة يمكن استنتاج الكتل النجمية ودرجات الحرارة والتركيب النجمي.

يمكن تحليل ضوء النجم إلى طيف عن طريق موشور أو محرز حيود. ويمكن بعد ذلك استخلاص توزيع كثافة تدفق الطاقة لكل تردد. وتتكون أطيف النجوم من طيف مستمر أو سلسلة متصلة ذات خطوط طيفية ضيقة متراكبة على الطيف المستمر. والخطوط في الأطيف النجمية هي



الشكل ٤-١: أطيف النجوم.

في الغالب خطوط امتصاص داكنة، ولكن في بعض الأجرام توجد خطوط انبعاث ساطعة أيضاً. وتمتص الذرات الموجودة في الغلاف الجوي فوق سطح النجم أطوالاً موجية مميزة معينة من الإشعاع المنبعث من النجم، مما يترك فجوات داكنة عند النقاط المقابلة في الطيف مشكّلة خطوط الامتصاص.

يتم تصنيف أطيف النجوم على أساس شدة الخطوط الطيفية. ويستعمل علماء الفلك أنماط الخطوط المرصودة في الأطيف النجمية لتصنيف النجوم ضمن فئات طيفية. ونظراً لأن درجة حرارة النجم تحدد خطوط الامتصاص الموجودة

في طيفه، فإن هذه الفئات الطيفية هي مقياس لدرجة حرارة سطحه. وعلى هذا الأساس اتفق العلماء على تصنيف النجوم إلى مراتب حسب أنواعها الطيفية وألوانها، وقد سُمّي هذا التصنيف بتصنيف هارفرد

Harvard spectral classification، واستعملت فيه حروف من الأبجدية الإنكليزية للتمييز بين هذه النجوم. وقد وُضعت مراتب الأطيف هذه تبعاً لألوانها، من الأكثر سخونة إلى الأكثر برودة، وحسب التسلسل:

O, B, A, F, G, K, M.

وأضاف علماء الفلك مؤخراً ثلاث فئات إضافية للأجسام الأكثر برودة هي (L, T, Y). وكل فئة من هذه الفئات الطيفية، باستثناء فئة Y التي لا تزال قيد التعريف، تنقسم إلى 10 فئات

الجدول ٤-٣ الفئات الطيفية للنجوم.

الفئة الطيفية	اللون	درجة الحرارة الفعالة التقريبية (K)
O	أزرق	> 30,000
B	أزرق - أبيض	10,000 → 30,000
A	أبيض	7500 → 10,000
F	أبيض - أصفر	6000 → 7500
G	أصفر	5200 → 6000
K	برتقالي	3700 → 5200
M	برتقالي - أحمر	2400 → 3700
L	أحمر	1300 → 2400
T	أرجواني	700 → 1300
Y	تحت الأحمر	< 700

فرعية محددة بالأرقام من 0 إلى 9. وكمثال فإن النجم B0 هو النوع الأكثر سخونة في الفئة B، والنجم B9 هو النوع الأبرد فيها، وهو أكثر سخونة قليلاً من فئة النجوم A0. وتُعدّ الشمس من الصنف G2. لذا فهي تقع في الطرف الأكثر سخونة من نجوم الفئة G. وفي الشكل ٤-١ مخطط مبسط لتصنيف أنواع النجوم الرئيسية، وفي الجدول ٤-٣ تلخيص لتسلسل الفئات الطيفية.

4-6: Mass of Star

٤-٦: كتلة النجم

تعد كتلة النجم، أي كمية المادة التي يحتوي عليها، من أهم خصائصه. وإذا عُرِفَت كتلة النجم أمكن تقدير المدة التي سيقى فيها مشعاً ومصيره النهائي. ومع ذلك، فمن الصعب جداً قياس كتلة النجم بشكل مباشر. وقد بينا في الفصل الثاني كيفية استخراج كتلة الشمس بواسطة دراسة تأثير جاذبيتها على الكواكب. ويمكن استعمال نفس الطريقة أحياناً للنجوم. وبما أن ما يُقدَّر بنصف النجوم تقريباً تقع ضمن أنظمة متعددة ثنائية أو أكثر (أي إن نجوم المنظومة ترتبط برباط الجاذبية وتدور حول مركز الثقل المشترك لها)، فيمكن حساب كتلتها باستعمال قانون كبلر الثالث. أما إذا كان النجم منفرداً فيمكن استخراج كتلته إذا كان القدر المطلق له معلوماً لأن لأكثر النجوم علاقة مباشرة بين كتلتها ونورانيته، وهي نجوم النسق الأساسي. في المنظومة الثنائية، تكون المدة T التي يدور النجمان بها حول مركز كتلتها مرتبطتان بالمحور شبه الرئيسي r لمدار أحدهما بالنسبة إلى الآخر وفق قانون كبلر الثالث،

$$r^3 = (M_1 + M_2)T^2 \quad \dots \dots 4.14$$

حيث تقاس r بالوحدات الفلكية، و T بالسنوات الأرضية، و $(M_1 + M_2)$ هو مجموع كتلتي النجمين بوحدات كتلة الشمس. ومن أجل تحديد الكتلة الفردية لكل نجم، سنحتاج إلى معرفة سرعتي النجمين واتجاه المدار بالنسبة لخط رؤيتنا أو نستعمل العلاقة بين الكتلة والنورانية إذا كان النجمان ضمن النسق الأساسي.

مثال ٤-٨: لنجم الشعري اليمانية نجم رقيق قزم أبيض خافت، تبلغ المسافة بينهما ما يقارب 20 AU ، ولهما فترة مدارية تقارب 50 عاماً. احسب مجموع كتلتي النجمين بدلالة كتلة الشمس.

الحل:

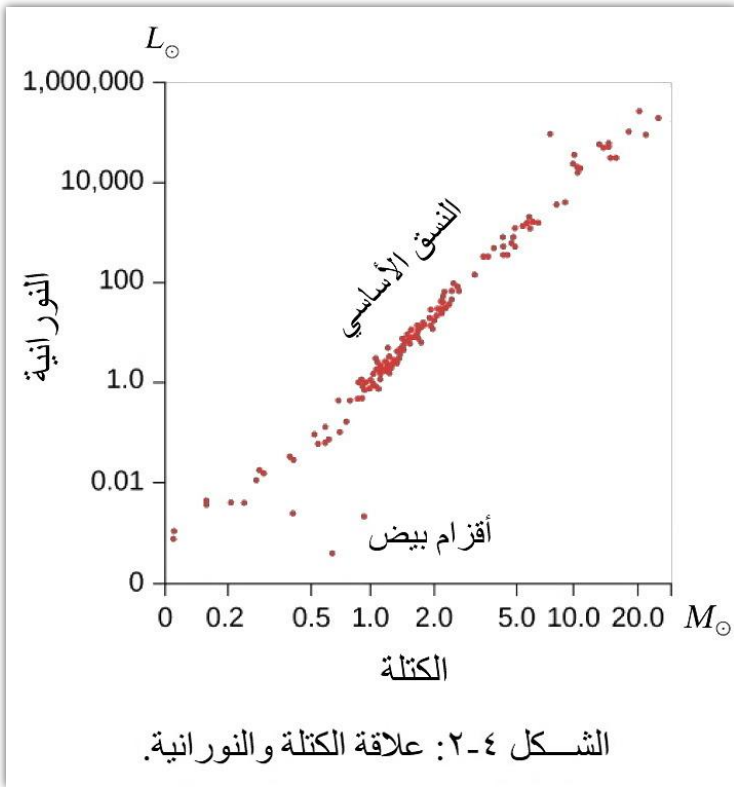
$$r^3 = (M_1 + M_2)T^2$$

$$(20)^3 = (M_1 + M_2)(50)^2 \rightarrow 8000 = (M_1 + M_2)(2500)$$

$$M_1 + M_2 = \frac{8000}{2500} = 3.2 M_{\odot}$$



إن معظم النجوم لها كتل أقل من كتلة الشمس. والنجوم الأثقل من الشمس قليلة بسبب عمرها القصير نسبياً. وقد أدت عمليات البحث على مسافات كبيرة من الشمس إلى اكتشاف عدد قليل من النجوم ذات كتل تصل إلى ما يقارب $100 M_{\odot}$ ، وتوجد نسبة قليلة من النجوم قد تكون كتلتها كبيرة مثل $200 M_{\odot}$. ووفقاً للحسابات النظرية، فإن أصغر كتلة يمكن أن يمتلكها نجم حقيقي هي ما يقارب $1/12$ من كتلة الشمس ($0.08 M_{\odot}$). والمقصود بالنجم «الحقيقي» هو النجم الذي يصبح ساخناً بدرجة كافية لدمج البروتونات لتكوين الهيليوم. والجرم الذي كتلته ($0.01 \rightarrow 0.08 M_{\odot}$) تقريباً قد يُنتج طاقة لفترة وجيزة عن طريق التفاعلات النووية التي تتضمن نظير الهيدروجين المسمى دوتيريوم deuterium، لكنها لا تصبح ساخنة بدرجة كافية لدمج البروتونات.



إن النجوم الأكبر كتلة لها جاذبية أعلى، وهذا يتسبب في ارتفاع درجة الحرارة والضغط في نواة النجم مما يؤدي إلى تسريع تفاعل اندماج الهيدروجين. وتُنتج النجوم الثقيلة المزيد من الطاقة وتكون أكثر سخونة. ونظراً لأن نصف القطر يرتبط باللمعان وأن كتلة النجم تتحكم في معدل إنتاج الطاقة فهناك علاقة تُدعى العلاقة بين الكتلة والنورانية mass-luminosity relation يخضع

لها ما يقارب 90% من النجوم، وهي موضحة في الشكل ٤-٢. وتمثل كل نقطة في الشكل نجماً معروفاً الكتلة واللمعان، ويمثل المحور الأفقي على الرسم البياني كتلة النجم $M_{\otimes}$ بوحدات كتلة الشمس $M_{\odot}$ ، ويمثل المحور العمودي نورانية النجم $L_{\otimes}$ بوحدات نورانية الشمس $L_{\odot}$. ويلاحظ من الشكل أن أغلب النجوم تقع تقريباً على خط مستقيم واحد، وسُميت هذه المجموعة التي تضم الشمس بنجوم النسق الأساسي main sequence stars. وقد وُجد إن أية زيادة في كتلة النجم الذي ينتمي لهذه المجموعة تؤدي إلى زيادة كبيرة في نورانيته. ويمكن تمثيل هذا رياضياً بالعلاقة التقريبية التالية:

$$L_{\otimes} \propto M_{\otimes}^{3.9} \quad \dots \dots 4.15$$

$$L_{\otimes} = \text{constant} \times M_{\otimes}^{3.9} \quad \dots \dots 4.15'$$

ملاحظة: الأس 3.9 في المعادلة 4.15 ليس رقماً ثابتاً وتختلف المصادر الفلكية في قيمته، حيث تظهر الأدلة الرصدية أنه يمكن أن يختلف من 2.5 إلى 5 اعتماداً على كتلة النجم. وبالمقارنة مع الشمس تنتج العلاقة:

$$\frac{L_{\otimes}}{L_{\odot}} = \left(\frac{M_{\otimes}}{M_{\odot}} \right)^{3.9} \quad \dots \dots 4.16$$

$$\log \left(\frac{L_{\otimes}}{L_{\odot}} \right) = 3.9 \log \left(\frac{M_{\otimes}}{M_{\odot}} \right) \quad \dots \dots 4.17$$

وكمثال: إذا كانت كتلة نجم ما هي ضعف كتلة نجم آخر فإن نورانيته تكون أكبر بـ 15 مرة تقريباً من نورانية النجم الأخف، وإذا كانت كتلة النجم أكبر بـ 10 مرات فإن نورانيته أكبر بـ 8000 مرة تقريباً، وإذا كانت كتلته تعادل ربع كتلة النجم الآخر، فستكون نورانيته أقل بما يقارب 223 مرة. وتوجد أعداد قليلة من النجوم لا تخضع لهذه العلاقة مثل مجموعة النجوم العملاقة giants ومجموعة النجوم الأقزام dwarfs.

مثال ٤-٩: في المثال ٤-٨ تم حساب مجموع كتلتي النجمين في نظام الشعرى اليمانية الثنائي باستخدام قانون كبلر الثالث ليكون $3.2 M_{\odot}$. والآن احسب كتلة كل نجم على حدة باستعمال العلاقة بين الكتلة والنورانية إذا علمت أن نورانية نجم الشعرى أكبر من نورانية الشمس بـ 23 مرة تقريباً.

$$3.9 \log \left(\frac{M_{\otimes}}{M_{\odot}} \right) = \log \left(\frac{L_{\otimes}}{L_{\odot}} \right) = \log 23 = 1.3617 \quad \text{الحل :}$$

$$\log \left(\frac{M_{\otimes}}{M_{\odot}} \right) = 0.349 \quad \rightarrow \quad \frac{M_{\otimes}}{M_{\odot}} \approx 2.23 \quad \rightarrow \quad M_{\otimes} \approx 2.23 M_{\odot}$$

كتلة النجم المرافق لنجم الشعرى هي: $3.2 - 2.23 = 0.97 M_{\odot}$

سؤال: ما دام النجم الأصغر في منظومة الشعرى اليمانية قرماً أيضاً فكيف يصح حساب الكتلة باستعمال علاقة الكتلة والنورانية الخاصة بمجموعة النسق الأساسي؟

4-7: Stellar Distance

٤-٧: البعد النجمي

تُستعمل عدة طرق لمعرفة المسافات النجمية مثل:

(١) قياس زاوية اختلاف المنظر، حيث تعتمد هذه الطريقة على الحركة السنوية الظاهرية للنجوم في السماء ذهاباً وإياباً، والتي تسببها الحركة المدارية للأرض كما مرّ علينا في الفصل الأول. فعندما تدور الأرض حول الشمس يبدو للمراقب الأرضي أن النجوم القريبة تغير موقعها في السماء بالنسبة للنجوم الأبعد (انظر الشكل ١-٢٣ في الفصل الأول). وفي الوقت الحاضر، يمكن قياس زوايا اختلاف المنظر بدقة تبلغ $0.001''$. ولذلك، فإن استخدام طريقة اختلاف المنظر لتحديد مسافات النجوم يمكن الاعتماد عليها بالنسبة للنجوم القريبة فقط.

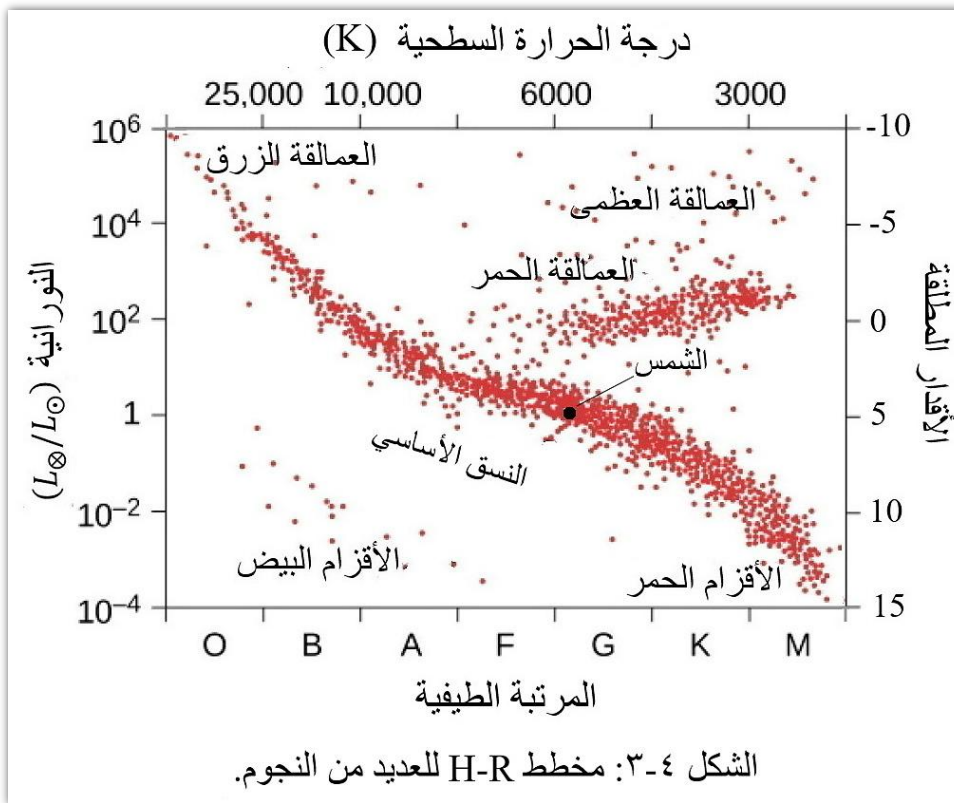
(٢) قانون التربيع العكسي، وقد مرّ علينا تعريفه (ص ٣-٤) والمعادلة 4.3 التي يُحسب من خلالها. ويمكن أيضاً حساب البعد النجمي من المعادلة 4.8.

(٣) قياس السرعة النجمية.

٤-٨: مخطط هيرتزسبرانك - رسل (مخطط H-R)

4-8: Hertzsprung - Russell Diagram

يصف هذا المخطط علاقة الأقدار المطلقة للنجوم المعلومة البعد والمرتبة الطيفية. ويمكن فهمه إذا رسمنا الأقدار البصرية المطلقة (أو النورانية) للنجوم المعلومة البعد على المحور الصادي، والمراتب الطيفية لهذه النجوم (أو درجة حرارتها السطحية) على المحور السيني، ويُعد مخطط H-R هو الرسم



البياني الأكثر فائدة في علم الفلك. وهو حصيلة جهود عالمي الفلك هيرتزسبرانك في عام 1911 ورسل في عام 1913 كل على حدة.

يلاحظ في المخطط أن أعلى درجة حرارة تكون باتجاه يسار المحور

الأفقي، وأبردها باتجاه اليمين. وعلى المحور العمودي، يكون القدر البصري المطلق الأكثر سطوعاً في اتجاه الأعلى، والأكثر خفوتاً في اتجاه الأسفل.

تقع معظم النجوم على طول منحنى يسمى النسق الأساسي كما في الشكل ٤-٣، وتقع الشمس في منتصفه تقريباً. ويمتد بشكل قطري تقريباً من أعلى اليسار (من النجوم العملاقة الزرق blue giants عالية اللمعان والحرارة) إلى أسفل اليمين (إلى النجوم الأقزام الحمر red dwarfs منخفضة اللمعان والحرارة). والنجوم الموجودة في النسق الأساسي هي النوع الأكثر شيوعاً في مجرة درب التبانة، إذ تشكل 90% تقريباً من نجومها. وأن 10% تقريباً هي أقزام بيض، وأقل من 1% هي عملاقة أو عملاقة عظمى. وهذا العدد القليل نسبياً من النجوم الأقزام البيض والعملاقة مقارنةً بعدد النجوم في النسق الأساسي هو بسبب أن النجوم تقضي معظم حياتها في النسق الأساسي، بينما تنتمي نجوم الأقزام البيض والعملاقة إلى أجزاء لاحقة وأقصر عمراً خلال التطور النجمي تمثل مراحل نهائية في أعمار النجوم.

ويوجد في الجزء العلوي الأيمن من المخطط نجوم حمر عملاقة red giants باردة وكبيرة. وتظهر الأقزام البيض white dwarfs الحارة والصغيرة في أسفل اليسار وليست في النسق الأساسي. وهناك أيضاً نجوم عملاقة عظمى supergiants في الجزء العلوي من المخطط.

يصف قانون ستيفان-بولتزمان (المعادلة 4.10) الخصائص العامة لمخطط H-R. ويستفاد منه أنه بالنسبة لنصف قطر ثابت، فإن نورانية النجم تزداد مع القوة الرابعة لدرجة الحرارة الفعالة، ولذلك فإن النجوم الباردة تكون أقل سطوعاً. وهذا هو ما يحدث على طول النسق الأساسي، لأنه على الرغم من أن نصف القطر يتغير بمقدار صغير نسبياً على طول النسق الأساسي^١، فإن اختلاف النورانية يرجع بشكل أساسي إلى تغير درجة الحرارة. وترتبط المعادلة 4.11 العلاقة بين الأقدار المطلقة والنورانية.

أظهرت الملاحظات أمراً مستغرباً للوهلة الأولى في مخطط H-R، حيث يوجد عدد من النجوم في المنطقة العلوية اليمنى فوق النسق الأساسي تمتلك نورانية عالية رغم انخفاض درجات حرارتها. ويمكن تفسير ذلك بأن يكون النجم هائل الحجم، أي إن مساحته السطحية كبيرة بحيث يظل إنتاج الطاقة الكلي كبيراً. وهذا يعني أن هذه النجوم هي من العملاقة أو العملاقة العظمى، وهي نجوم ذات أقطار ضخمة، وهذا يعوض انخفاض درجة الحرارة. إذ يشير قانون ستيفان-بولتزمان إلى أنه عند درجة حرارة ثابتة، تزداد نورانية النجم بزيادة مربع نصف القطر. فمثلاً إذا كان النجم أكثر نورانية بـ 25000 مرة من الشمس وبنفس درجة

(١) لماذا تتغير أنصاف الأقطار بين نجوم النسق الأساسي بمقدار صغير نسبياً وليس كبيراً؟

حرارتها الفعالة، فإن نصف قطره سيكون أكبر بـ 158 مرة من نصف قطر الشمس، أي إن حجمه سيكون أكبر بما يقارب أربعة ملايين مرة.

وتوجد أيضاً بعض النجوم في الزاوية السفلية اليسرى من مخطط H-R تتميز بدرجات حرارة عالية ونورانية منخفضة. فإذا كانت درجة حرارة سطح النجم مرتفعة فإن كل متر مربع منه يضخ الكثير من الطاقة. فكيف يمكن للنجم حينئذ أن يكون خافتاً؟ الجواب هو إن مساحته السطحية الكلية صغيرة جداً، لذا يكون مجموع الطاقة المنبعثة صغيراً نسبياً. وتُعرف هذه النجوم بالأقزام البيضاء (لأنه في درجات الحرارة المرتفعة هذه، تبرز ألوان الإشعاع الكهرومغناطيسي التي تنبعث منها معاً لتجعلها تبدو بيضاء مزرقّة).

مثال ٤-١٠: نجمان لهما نفس زاوية اختلاف المنظر $0.01''$ ونفس المرتبة الطيفية M0. فإلى أية مجموعة من النجوم في مخطط H-R ينتمي كل منهما إذا كان القدر الظاهري للنجم الأول (+2.2) وللنجم الثاني (+14.2).

الحل: من المعادلة 4.7:

$$M = m + 5 + 5 \log p''$$

القدر المطلق للنجم الأول:

$$M = 2.2 + 5 + 5 \log 0.01 = -2.8$$

القدر المطلق للنجم الثاني:

$$M = 14.2 + 5 + 5 \log 0.01 = 9.2$$

وإذا رسمنا مخطط H-R كما في الشكل ٤-٣ فسنجد أن النجم الأول ينتمي إلى مجموعة العمالقة، والنجم الثاني ينتمي إلى مجموعة النسق الأساسي.

٤-٩: أعمار نجوم النسق الأساسي 4-9: Lifetime of main sequence stars

إن علاقة الكتلة والنورانية للنجوم تعطي فكرة عامة عن عمر النجم. فالنجم يبعث إشعاعه إلى الفضاء على شكل طاقة هائلة، ومصدر هذه الطاقة هو باطن النجم. ونتيجة الاستهلاك المتواصل لكتلة النجم بتحويلها إلى طاقة سوف يأتي وقت يعجز فيه النجم عن بعث هذه الطاقة إلى الفضاء، وهذا يمثل إحدى المراحل النهائية لعمر النجم.

إن النجوم تكون مشابهة للشمس نوعاً ما، حيث إن عمليات الانكماش الناتجة عن قوة الجاذبية تؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة المركزية إلى (15 → 10) مليون درجة تقريباً. وعندئذ تبدأ عمليات الاندماج النووي لتوليد الطاقة الهائلة، ويأخذ النجم مكانه في النسق الأساسي من حين ولادته، أي إن النجم يبدأ حياته

المشعة اللامعة في النسق الأساسي. وتعتبر مرحلة النسق الأساسي (مدة تحويل المادة إلى طاقة) أكبر جزء من عمر النجم، لذا فإن معظم النجوم التي يتم رصدها في السماء هي نجوم ضمن النسق الأساسي. ويعتمد طول الفترة الزمنية التي يبقى فيها النجم في النسق الأساسي على كتلته، فالنجوم ذوات الكتل الكبيرة لا تعمر طويلاً. وذلك لأنه بزيادة الكتلة تزداد قوة الجذب الثقالي فيكبر الضغط ودرجة الحرارة داخل النجم، وهذا يعزز سرعة معدل اندماج الهيدروجين واستهلاك الوقود النووي. لذا فإن درجة الحرارة المركزية ومعدل الاندماج النووي يعتمدان على كتلة النجم. وما دام النجم في مرحلة النسق الأساسي فإن قوة الضغط المتجهة من النواة إلى الخارج الناتجة عن الاندماج النووي تبقى متعادلة مع الجاذبية المتجهة من الطبقات العليا إلى الداخل. وهذا التوازن يؤدي إلى استقرار نسبي في نورانية النجم ودرجة حرارته. وفي الواقع فإن النورانية ودرجة الحرارة ليستا ثابتتين تماماً، لكن التغيرات تكون بطيئة وتدرجية خلال فترة النسق الأساسي. ويبين الجدول ٤-٤ مواصفات نجوم النسق الأساسي ذوات الأنواع الطيفية المختلفة.

ولنأخذ مثلاً يوضح تأثير الكتلة، فنفترض أن كتلة النجم A تعادل كتلة الشمس وأن كتلة النجم B تبلغ 10 مرات كتلة الشمس. فعند استخدام علاقة الكتلة والنورانية $[L_{\odot}/L_{\odot} = (M_{\odot}/M_{\odot})^{3.9}]$ نجد أن النجم B أكثر نورانية من النجم A بمقدار 8000 مرة تقريباً. أي إن مقدار الطاقة المنبعثة من النجم B تعادل 8000 مرة الطاقة المنبعثة من النجم A، لذلك يعيش النجم B فترة زمنية أقل بكثير من النجم A تُحسب من العلاقة 4.18 أدناه.

الجدول ٤-٤: مواصفات نجوم النسق الأساسي.

المرتبة الطيفية	درجة الحرارة الفعالة (K)	الكتلة ($M_{\odot}$)	النورانية ($L_{\odot}$)	نصف القطر ($R_{\odot}$)	العمر (years)
O5	44,500	60	790,000	12	3.7×10^5
B0	30,000	17.5	52,000	7.4	1.1×10^7
B5	15,400	5.9	830	3.9	6.5×10^7
A0	9,520	2.9	54	2.4	2.9×10^8
F0	7,200	1.6	6.5	1.5	1.5×10^9
G0	6,030	1.05	1.5	1.1	5.1×10^9
K0	5,250	0.79	0.42	0.85	1.4×10^{10}
M0	3,850	0.51	0.077	0.60	4.8×10^{10}
M5	3,240	0.21	0.011	0.27	1.4×10^{11}



ومن هذا المثال يتضح أن عمر النجم يتناسب طردياً مع مقدار المادة التي يحتويها (أي الكتلة M) وعكسياً مع مقدار الطاقة التي يبعثها (أي النورانية L). ولذلك يمكن وضع علاقة مبسطة لعمر نجم النسق الأساسي τ_{ms} كما يلي:

$$\tau_{ms} \propto M_{ms} \propto \frac{1}{L_{ms}}$$

$$L_{ms} \propto M_{ms}^{3.9}$$

ومن المعادلة 4.15:

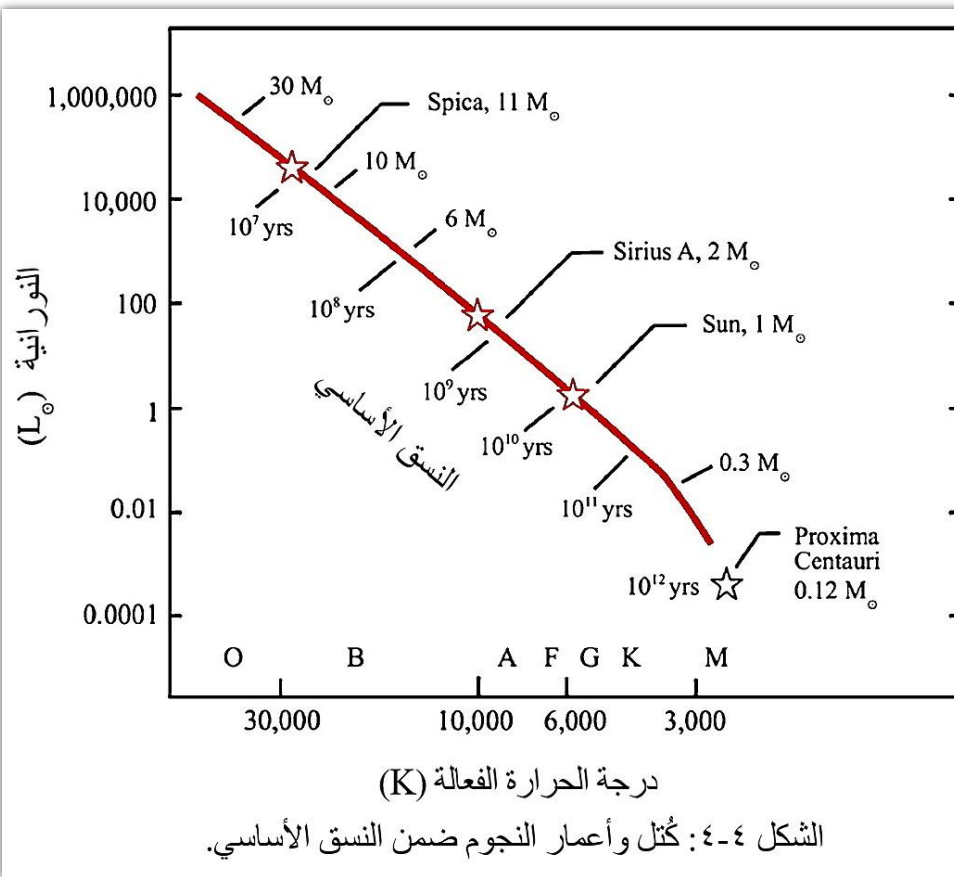
$$\tau_{ms} \propto \frac{M_{ms}}{M_{ms}^{3.9}} \rightarrow \tau_{ms} \propto \frac{1}{M_{ms}^{2.9}}$$

$$\tau_{ms} \propto M_{ms}^{-2.9} \quad \dots \dots 4.18$$

إن المعادلة 4.18 صحيحة تقريباً لمجموعة نجوم النسق الأساسي على فرض أن نورانية النجوم ثابتة

خلال دورة حياتها.

يُقدَّر العمر الذي تقضيه الشمس في النسق الأساسي بعشرة مليارات سنة تقريباً. وإن النجم الذي تبلغ كتلته عشرة أضعاف كتلة الشمس له عمر نسق أساسي يبلغ 12.5 مليون سنة تقريباً فقط. ويبلغ عمر النجم الذي تبلغ كتلته عُشر



كتلة الشمس 8 تريليون سنة تقريباً، أي أكبر من عمر الكون الحالي بكثير جداً.

إن العلاقة 4.18 تفسر وجود العدد القليل من النجوم ذوات الكتل الكبيرة والنورانية العالية والعدد

الكبير من النجوم ذوات الكتل الصغيرة والنورانية الواطئة في المجرة، لأن عمر الأولى قصير وعمر الثانية طويل مقارنة بأعمار النجوم النموذجية.



تتناقص الكتل النجمية متجهة من أعلى اليسار إلى أسفل اليمين في النسق الأساسي كما في الشكل 4-4. وتكون النجوم ذوات الكتل الكبيرة أكثر نورانية من النجوم ذوات الكتل الصغيرة لأن درجات حرارة الأولى أعلى، أي سيكون إشعاعها للطاقة أعلى، فتكون نورانيتها أكبر. وتتناسب النورانية مع القوة الرابعة تقريباً للكتلة وفق العلاقة 4.15. ويمكن لنجوم المرتبة الطيفية O الحارة المضئنة أن تمتلك كتلاً تصل إلى $150 M_{\odot}$ ، في حين أن نجوم M الباردة الخافتة تمتلك كتلاً قليلة قد تقارب $0.08 M_{\odot}$.

كيف يمكننا تحديد طول الفترة الزمنية التي يمكن أن يستمر فيها نجم النسق الرئيسي في الإشعاع عن طريق تحويل البروتونات إلى نوى الهيليوم؟

تقتصر تفاعلات الاندماج النووي هذه على نواة النجم الساخن الكثيف. أما خارج النواة، حيث تكون الكتلة والضغط أقل، يكون الغاز أبرد وأقل كثافة. لذا لا يمكن حدوث اندماج نووي. وعندما يتم تحويل كل الهيدروجين الموجود في القلب إلى هيليوم، يكون النجم قد استنفد إمدادات الوقود النووي ولم يعد بإمكانه البقاء في النسق الأساسي. وقد اكتشف بعض العلماء أنه من المستحيل بناء نماذج يكون فيها أكثر من 12% من كتلة النجم متضمنة في قلب النجم المستنزف. وهذا يعني أن عمر النجم في النسق الأساسي يقتصر على الوقت الذي يستغرقه لتحويل 12% من الهيدروجين الكلي في النجم إلى هيليوم. وكما مر علينا في الفصل الثاني فإن كتلة نواة الهيليوم الناتجة من الاندماج النووي تكون أقل بمقدار 0.71% تقريباً من مجموع كتل نوى الهيدروجين الأربعة التي تتحد لتشكيلها. وكمثال: إذا تحول 0.12 من كتلة الشمس إلى طاقة بهذه الطريقة فإن الطاقة المتحررة خلال فترة بقاء الشمس في النسق الأساسي هي $(E = 0.12 \times 0.0071 M_{\odot} c^2)$ وفق علاقة آينشتاين $(E = mc^2)$. لذا فإن عمر الشمس في النسق الأساسي τ_{ms} اللازم لتحويل 12% من كتلتها إلى هيليوم هو

$$\tau_{ms} = \frac{E}{L_{\odot}} = 0.12(0.0071) \left(\frac{M_{\odot} c^2}{L_{\odot}} \right) = 3.98 \times 10^{17} s = 1.26 \times 10^{10} \text{ years} \quad \dots 4.19$$

حيث إن كتلة الشمس $(M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg})$ ونورانيتها $(L_{\odot} = 3.828 \times 10^{26} \text{ J/s})$ وهذه العلاقة ناتجة عن افتراض أن الطاقة المتحررة من سطح النجم خلال فترة مكثه في النسق الأساسي تمثل نورانية النجم (التي هي طاقة لوحدة الزمن) مضروبة بالزمن.

وبافتراض أن نورانية نجوم النسق الأساسي تزداد مع القوة 3.9 للكتلة كما في العلاقة 4.15، فإن العمر المنقضي في النسق الأساسي من قبل نجم ذي كتلة M_{ms} استناداً إلى العلاقة 4.18 هو:

$$\tau_{ms} = 1.26 \times 10^{10} \left(\frac{M_{ms}}{M_{\odot}} \right)^{-2.9} \text{ years} \quad \dots \dots 4.20$$

مثال ٤-١١: إذا علمت أن عمر الشمس يبلغ عشرة مليارات سنة تقريباً، فما هو عمر نجم من مجموعة النسق الأساسي تعادل كتلته أربع كتل شمسية؟

الحل:

$$M_{ms} = 4M_{\odot}$$

$$\tau_{ms} \propto M_{ms}^{-2.9} \quad \rightarrow \quad \frac{\tau_{ms}}{\tau_{\odot}} = \left(\frac{M_{ms}}{M_{\odot}} \right)^{-2.9} = 4^{-2.9} = 0.0179$$

$$\tau_{ms} = 0.0179 \tau_{\odot} = 0.0179 \times 1 \times 10^{10} = 1.79 \times 10^8 \text{ years} = 179 \text{ Myears}$$

٤-١٠: التطور النجمي (دورة حياة النجم)

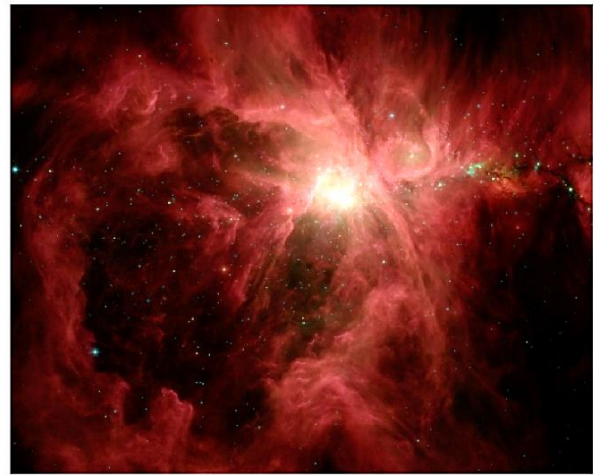
من الوسائل المهمة لفهم دورة حياة النجم هو مخطط H-R، لأن التغير الحاصل في خواص النجم يمثل جزءاً من دورة حياته، فمثلاً إذا كان التغير في الاتجاه الأفقي على المخطط فإنه يمثل تغيراً في مرتبته الطيفية والتي سببها التغير الحاصل في درجة حرارته السطحية. فلو تغير اتجاه موضعه إلى اليسار فمعنى ذلك أن درجة حرارته قد ازدادت، والعكس صحيح. أما التغير العمودي فيمثل تغيراً في نورانيته، فإذا كان في الجزء العلوي فإنه لامع جداً وإذا كان قريباً من القاعدة فإنه خافت جداً، وهكذا. فمن هذه المعلومات يمكن دراسة التطور النجمي. ولا علاقة لتتبع المسار هذا بموقع النجم في السماء وحركته عبر الفضاء، فهذه مجرد طريقة مختصرة للقول بأن درجة حرارته ولمعانه يتغيران مع تطوره.

تشأ أغلب النجوم في سحب جزيئية عملاقة قد تصل كتلة الواحدة منها إلى ثلاثة ملايين كتلة شمسية، وتتميز هذه السحب بجوها الداخلي البارد الذي تبلغ درجات حرارته (10 → 20 K) فقط، وتتولد منها مئات أو آلاف النجوم، وأكثر السحب الجزيئية التي تمت دراستها هو سديم الجبار Orion Nebula في مجرتنا، حيث تحدث عملية تكوين النجوم حالياً، (لاحظ الشكل ٤-٥). ويبعد هذا السديم عنا قرابة 1500 سنة ضوئية ويمتد على مسافة 25 سنة ضوئية تقريباً. ويوجد فيه ما يقارب 2200 نجم حديث الولادة. ولا يتوهج معظم السحابة بالضوء المرئي. لذا فإن دراستها تتم أكثر من خلال الإشعاع الذي ينبعث من الغاز والغبار ضمن الأطوال الموجية تحت الحمراء والراديوية، ويمكن حينئذ رؤية المزيد من التفاصيل داخل السديم الغباري لأن الأشعة تحت الحمراء يمكنها اختراق الغبار بسهولة أكثر من الضوء المرئي. وتبدأ عملية ولادة النجم من تجمع سحب الغازات السائبة والأتربة الكونية في فضاء ما بين النجوم نتيجة الجاذبية، حيث

تتكاثف المادة على شكل كرات غازية كبيرة. ثم تبدأ الغازات والأتربة الكونية بالانكماش والتقلص بسبب الجاذبية الذاتية، وتزداد درجات حرارتها وتكاثف أكثر بمرور الزمن إلى حين تولد نجم نموذجي.



(أ)



(ب)

الشكل ٤-٥: سديم الجبار. (أ) صورة في الضوء المرئي. (ب) صورة باستخدام الأشعة تحت الحمراء القريبة.

إن الغازات غالباً ما تكون في حالة حركة دورانية، فعندما تتجمع الغازات والأتربة الكونية سوف تحافظ على زخمها الزاوي طبقاً لقانون حفظ الزخم الزاوي، وكلما صغر حجمها نتيجة للتقلص والانكماش كلما ازدادت سرعتها الدورانية إلى أن تصل إلى المرحلة التي تصبح فيها نجماً. ثم تبدأ ببث الطاقة الكهرومغناطيسية ومنها الضوء.

الخطوة الأولى في عملية تكوين النجوم هي تكوين نوى كثيفة داخل كتلة من الغاز والغبار. ثم تصبح قوة الجاذبية للغاز المتساقط نحو الداخل قوية بما يكفي للتغلب على الضغط الذي تسطه المادة الباردة التي تشكل النوى الكثيفة. ثم تتعرض المادة لانهايار سريع، وتزداد كثافة النواة بشكل كبير نتيجة لذلك. ويُطلق على الجسم اسم النجم الأولي (أو البدائي) protostar خلال الوقت الذي تنكمش فيه النواة الكثيفة نتيجة الجاذبية المتجهة نحو الداخل بما يُعرف بالانكماش الجذبي gravitational contraction قبل أن يبدأ اندماج البروتونات لإنتاج الهيليوم وتصبح نجماً حقيقياً. وفي البداية، يظل النجم الأولي بارداً إلى حد ما بنصف قطر كبير جداً وكثافة منخفضة جداً. وهو شفاف للأشعة تحت الحمراء. ومع انكماش النجم، تصبح مساحة سطحه أصغر، لذا يقل لمعانه الإجمالي. ويتوقف الانكماش السريع فقط عندما يصبح النجم الأولي كثيفاً ومعتماً بدرجة كافية لحبس الحرارة المنبعثة من الانكماش الجذبي.

وتستمر زيادة درجة حرارة النواة إلى أن تصل إلى ما يقارب (10 ملايين درجة) فتبدأ التفاعلات النووية الاندماجية، حيث تندمج أنوية الهيدروجين مولدة أنوية هيليوم كما مرّ علينا في الفصل الثاني في شرح سلسلة بروتون - بروتون. ويتوقف تقلص النجم وتبدأ مرحلة جديدة من عمره. وهذا يعني أن النجم قد وصل إلى مرحلة النسق الأساسي فأصبح الآن نجماً كاملاً النمو في حالة توازن إلى حد ما، ويبدأ معدل تغيره بشكل كبير لأن 0.0071 فقط من الهيدروجين المستخدم في تفاعلات الاندماج يتحول إلى طاقة، والذي يغير خصائص النجم ببطء الآن هو فقط الاستنزاف التدريجي للهيدروجين أثناء تحوله إلى هيليوم في القلب. وبمجرد أن يصل النجم إلى مرحلة النسق الأساسي من حياته، فإنه يستمد طاقته بالكامل تقريباً من تحويل الهيدروجين إلى هيليوم عبر عملية الاندماج النووي في قلبه. ولأن الهيدروجين هو العنصر الأكثر وفرة في النجوم، فإن هذه العملية يمكن أن تحافظ على توازن النجم لفترة طويلة. لذا تظل جميع النجوم في مرحلة النسق الأساسي معظم حياتها.

تحدّد كتلة النجم مكانه بالضبط في النسق الأساسي. فالنجوم الثقيلة في النسق الأساسي لها درجات حرارة عالية ولمعان مرتفع. أما النجوم ذات الكتل المنخفضة فلديها درجات حرارة منخفضة ولمعان منخفض. إن الأجسام ذات الكتل المنخفضة جداً لا تصل أبداً إلى درجات حرارة مركزية عالية بما يكفي لإشعال التفاعلات النووية. ويتوقف الطرف السفلي من النسق الأساسي عند النقطة التي تمتلك فيها النجوم كتلة تكفي بالكاد لدعم التفاعلات النووية بمعدل كافٍ لوقف الانكماش الجذبي. وتقدر هذه الكتلة الحرجة بما يقارب $0.08 M_{\odot}$. وإن الأجسام التي تقع أسفل هذه الكتلة الحرجة تسمى إما أقزام بنية brown dwarfs إذا كانت كتلة الجرم $(0.01 \rightarrow 0.08 M_{\odot})$ أو كواكب إذا كانت كتلة الجرم أصغر من $0.01 M_{\odot}$. وفي الطرف الآخر، ينتهي الطرف العلوي من النسق الأساسي عند النقطة التي تصبح فيها الطاقة التي يشعها النجم الثقيل حديث التكوين كبيرة جداً بحيث توقف تراكم المادة الإضافية. والحد الأعلى لما يمكن أن تصل إليه كتلة النجم يتراوح بين 100 و 300 كتلة شمسية.

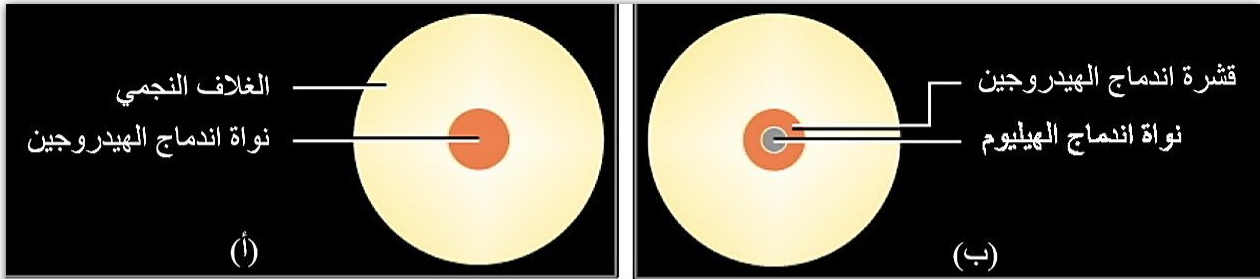
إن المدة التي يستغرقها تشكّل النجم تعتمد على كتلة السحابة الغازية التي تكون منها. والتناسب عكسي بين الكتلة والمدة، فالنجوم ذات الكتل الأعلى كثيراً من كتلة الشمس تصل إلى النسق الأساسي في غضون بضعة آلاف إلى مليون سنة. والنجوم التي لها مثل كتلة الشمس يُقدّر زمن انكماشها بملايين السنين. وتحتاج النجوم ذات الكتلة الأقل إلى عشرات الملايين من السنين لتتطور إلى النسق الأساسي الأدنى.

والآن ننتقل من ولادة النجوم إلى بقية قصة حياتها. وهذه ليست مهمة سهلة لأن النجوم تعيش فترة أطول كثيراً من حياة علماء الفلك. وعلى هذا فلا يمكننا أن نأمل في رؤية قصة حياة أي نجم منفرد تتكشف أمام أعيننا أو أمام تلسكوباتنا. ولكي نتعرف على حياة النجوم، يتعين علينا أن نجري مسحاً أكبر عدد ممكن منها. وحينها يمكن أن نرصد على الأقل عدداً قليلاً منها في كل مرحلة من مراحل حياتها. وكما مرّ علينا، فإن النجوم تتميز بخصائص عديدة مختلفة، وتنشأ الاختلافات أحياناً عن اختلاف كتلتها ودرجات حرارتها ودرجات سطوعها، وأحياناً أخرى عن التغيرات التي تطرأ عليها مع تقدمها في العمر. ومن خلال الجمع بين الملاحظة والحسابات النظرية، نستطيع أن نستخدم هذه الاختلافات في تجميع قصة حياة نجم ما.

4-10-1: Red Giants

٤-١٠-١: العمالقة الحمراء

لا يمكن للشمس والنجوم الأخرى أن تدوم إلى الأبد. ففي نهاية المطاف سوف تستنفد وقودها النووي وتتوقف عن التآلق، ويتم استهلاك كل الهيدروجين الموجود في قلب النجم ويتقلص حجمه. وعندها سيحتوي القلب على الهيليوم فقط، المختلط بنسبة ضئيلة من العناصر الأثقل. إن اندماج الهيليوم لتوليد عناصر أثقل يتطلب درجات حرارة أعلى بكثير مما لاندماج الهيدروجين. وتنتج الحرارة المطلوبة لهذا من تقلص القلب بسبب الجاذبية، فتحول طاقة المادة الساقطة إلى الداخل إلى حرارة. ويتوقف التقلص عندما تبدأ عملية احتراق الهيليوم وتدخل التفاعلات بين العناصر الأخرى الأثقل.



الشكل ٤-٦: الطبقات النجمية أثناء وبعد النسق الأساسي. (أ) أثناء النسق الأساسي، يكون للنجم نواة يحدث فيها الاندماج وغلاف أكبر بكثير تكون درجة حرارته أدنى بكثير من درجة الاندماج. (ب) عندما ينفد الهيدروجين في النواة (المكونة من الهيليوم وليس الهيدروجين) سوف تنكمش بتأثير الجاذبية وتزداد سخونة، وتبدأ الحرارة الإضافية بعملية اندماج الهيدروجين في طبقة خارج النواة مباشرة.

إن الحرارة المتولدة بهذه الطريقة، مثل كل أنواع الحرارة، تتدفق إلى الخارج وتؤدي إلى رفع درجة حرارة طبقة الهيدروجين التي كانت خلال كل فترة النسق الأساسي الطويلة خارج النواة مباشرة، وتصبح ساخنة بما يكفي لبدء اندماج الهيدروجين. وتتدفق الطاقة الجديدة الناتجة عن هذا الاندماج إلى الخارج وتبدأ في تسخين طبقات النجم الأبعد، مما يتسبب في تمددها حتى يصل النجم إلى أبعاد هائلة. وفي الوقت

نفسه، يستمر القلب المكون من الهيليوم في الانكماش، مما ينتج المزيد من الحرارة حوله مباشرة، (لاحظ الشكل ٤-٦). ويتسبب تمدد الطبقات الخارجية للنجم في انخفاض درجة الحرارة على السطح. ومع تبريده، يصبح لون النجم أكثر احمراراً. ومع تضخم سطح النجم يصبح أكثر لمعاناً وبرودة في نفس الوقت. وعلى مخطط H-R، يترك النجم نطاق النسق الأساسي ويتحرك للأعلى (أكثر سطوعاً) وإلى اليمين (درجة حرارة سطح أكثر برودة). وبمرور الوقت، تتحول النجوم الثقيلة إلى عمالقة حمراء فائقة (supergiants)، وتتحول النجوم ذات الكتلة الأقل مثل الشمس إلى عمالقة حمراء.

ما مدى اختلاف النجوم العملاقة الحمراء والنجوم العملاقة العظمية عن نجوم النسق الرئيسي؟ يقارن الجدول ٤-٥ بين الشمس والعملاق الأحمر الفائق منكب الجوزاء (Betelgeuse)، الذي يمكن رؤيته فوق حزام الجبار كنجم أحمر ساطع يميز إبط الصياد. ويتمتع هذا العملاق بنصف قطر أكبر بكثير مما للشمس، وكثافة متوسطة أقل بكثير، وسطح أكثر برودة، ونواة أكثر سخونة بكثير.

الجدول ٤-٥: مقارنة بين الشمس وعمالق فائق.

الصفة	الشمس	منكب الجوزاء
الكتلة ($M_{\odot}$)	1	16
نصف القطر (km)	696,000	500,000,000
درجة حرارة السطح (K)	5800	3600
درجة حرارة النواة (K)	15,000,000	160,000,000
النورانية ($L_{\odot}$)	1	46,000
معدل الكثافة (g/cm^3)	1.41	1.3×10^{-7}
العمر (ملايين السنين)	4,500	10

إن النجوم العملاقة الحمراء قد تصبح ضخمة إلى الحد الذي إذا افترضنا استبدال الشمس بواحد منها فإن غلافها الجوي الخارجي سوف يمتد إلى مدار المريخ أو حتى أبعد من ذلك. وهذه هي المرحلة التالية في حياة النجم عندما ينتقل من فترة "الشباب" الطويلة إلى "الشيخوخة". وإذا نظرنا إلى الأعمار النسبية للشمس ونجم منكب الجوزاء، فسوف ندرك أيضاً أن فكرة "النجوم الأكبر تموت بسرعة أكبر" صحيحة بالفعل هنا. إن عمر نجم منكب الجوزاء لا يتجاوز عشرة ملايين سنة، وهو عمر صغير نسبياً مقارنة بعمر شمسنا الذي يبلغ 4.5 مليار سنة، وهو يقترب بالفعل من سكرات الموت كعمالق أحمر فائق.

تمثل نجوم الأقزام البيض المرحلة النهائية لحياة النجوم الصغيرة أو المتوسطة مثل شمسنا. فبعد أن يتضخم حجم النجوم المتوسطة لتصبح عملاقة سوف تتخلص من معظم مادتها الخارجية لتكوين سديم كوكبي، وتترك وراءها نواة ساخنة من الكربون والأكسجين. ولا يستطيع النجم توليد حرارة إضافية بسبب توقف التفاعلات النووية في القلب المتبقي، وتنهار النواة لتشكّل قرماً أيضاً بكتلة تعادل كتلة الشمس تقريباً وبقطر أصغر بما يقارب مائة مرة قطر الشمس ليصبح بحجم الأرض تقريباً. مما يعني أنه يتمتع بكثافة هائلة قد تصل إلى مليون مرة بقدر كثافة الشمس أو الماء، أي من مرتبة 10^6 gm/cm^3 .

وتطلق هذه التسمية (القزم الأبيض) لأنه أبيض اللون في البداية وصغير الحجم نسبياً. وهذا المصير يشمل معظم نجوم النسق الرئيسي التي تبلغ كتلتها ($0.5 \rightarrow 10 M_{\odot}$) إذا توفر الوقت لها، لأن النجم كلما صغرت كتلته احتاج لوقت أطول كي يستنفد وقوده النووي. ولا تمر النجوم ذات الكتلة الأقل من $0.5 M_{\odot}$ بمرحلة النجوم العملاقة، ولا تصبح ساخنة بالقدر الكافي من الداخل لدمج الهيليوم إلى عناصر أثقل، وتنهار مباشرة إلى أقزام بيض تتكون من الهيليوم.

يمكن أن يكون القزم الأبيض في بدء تكونه ساخناً جداً لأنه كان يمثل القلب الساخن لنجم عملاق. وقد تبلغ درجة حرارته الابتدائية $200,000 K$ بسبب أصله الساخن والانهايار الذي أدى إلى نشوئه، ولكن نظراً لعدم وجود وقود نووي حراري، فلا يتبقى شيء لتسخين القزم الأبيض. وستنخفض درجة حرارته إلى أن يكون أبرد من الشمس، ويصبح أكثر خفوتاً.

وقد وجد عالم الفيزياء الفلكية الهندي چاندراسيخار Chandrasekhar بأن الانهيار الحاصل في القزم يتبع علاقة بين كتلته ونصف قطره. فالنظرية تفترض أنه كلما كانت كتلة القزم عالية كلما تقلص إلى حجم أصغر، فمثلاً إن النجم القزم الذي تبلغ كتلته $0.8 M_{\odot}$ يتقلص نصف قطره إلى $0.01 R_{\odot}$ ، وإن القزم الذي تبلغ كتلته $1.2 M_{\odot}$ يتقلص نصف قطره إلى $0.005 R_{\odot}$ (أي 3500 km تقريباً). وإن أكبر كتلة تصلها الأقزام البيض هي $1.4 M_{\odot}$. لذا يعتمد تحول النجم أو عدم تحوله إلى قزم أبيض على مقدار الكتلة المفقودة في مرحلة العملاق الأحمر والمراحل السابقة من التطور. فأي نجم تقل كتلته عن حد (أو غاية) چاندراسيخار Chandrasekhar limit سوف يتحول إلى قزم أبيض عندما ينفد وقوده، بغض النظر عن الكتلة التي ولد بها. لذا فإن النجم الذي تحول فعلاً إلى قزم أبيض لابد أن كتلته في النسق الأساسي كانت أكبر من $6 M_{\odot}$ ، لأن النجوم ذات الكتل الأقل لم يتح لها الوقت لحد الآن لاستنفاد

مخزونها من الطاقة النووية. لذلك، فإن هذا النجم الذي أصبح قرماً أبيض لزم أن يتخلص قبلها من $4.6 M_{\odot}$ على الأقل من كتلته، بحيث تكون كتلته في وقت توقف توليد الطاقة النووية أقل من $1.4 M_{\odot}$.

٤-١٠-٣: خلاصة دورة حياة الشمس المحتملة

4-10-3: Summary of the Sun's Possible Life Cycle

يمكن تلخيص دورة حياة الشمس بعدة مراحل رئيسة كما يلي:

- (١) السديم النجمي stellar nebula: قبل أن تصبح الشمس نجماً، كانت عبارة عن سحابة من الغاز والغبار (سديم)، انهارت تحت تأثير الجاذبية لتبدأ عملية التكوين النجمي.
- (٢) النجم الأولي protostar: مع استمرار الانهيار، استمر ارتفاع درجة الحرارة والضغط في النواة حتى بدأت التفاعلات النووية الحرارية.
- (٣) النسق الأساسي main sequence: عندما بدأت الشمس في دمج الهيدروجين إلى هيليوم في نواتها، أصبحت نجماً مستقراً ضمن النسق الأساسي على مخطط H-R. والشمس حالياً في هذه المرحلة، وتقع في منتصف المخطط كنجم أصفر فئة G. وتُقدّر فترة بقائها في هذه المرحلة بما يقارب 10 مليارات سنة، مضت منها 5 مليارات.
- (٤) العملاق الأحمر red giant: بعد استهلاك الهيدروجين في النواة في آخر زمن تواجد لها ضمن النسق الأساسي تبدأ الشمس في حرق الهيليوم، مما يؤدي إلى تمدد الطبقات الخارجية بشكل كبير وتحولها إلى عملاق أحمر. وتنتقل الشمس إلى الجزء العلوي الأيمن من مخطط H-R، حيث تكون أكثر سطوعاً ولكن بدرجة حرارة سطحية أقل.
- (٥) السديم الكوكبي planetary nebula: بعد استهلاك الهيليوم، ستفقد الشمس طبقاتها الخارجية مكونة سديماً كوكبياً تاركة وراءها النواة التي ستتحول إلى قزم أبيض.
- (٦) القزم الأبيض white dwarf: تبقى النواة الساخنة بعد فقدان الطبقات الخارجية مكونة قرماً أبيضاً بحجم يقارب حجم الكرة الأرضية. وسينتقل القزم الأبيض في مخطط H-R إلى الجزء السفلي الأيسر، حيث يكون صغير الحجم، عالي الكثافة، ساخناً ولكنه خافت.

4-10-4: Neutron Stars

٤-١٠-٤: النجوم النيوترونية

النجم النيوتروني هو نوع من البقايا النجمية التي تتشكل بعد انهيار نجم ضخم في نهاية حياته، ويحصل هذا عادةً بعد انفجار مستعر أعظم وانتشار الطبقات الخارجية للنجم في الفضاء نتيجة الانفجار.



بعد استنفاد الهيليوم في قلب نجم النسق الأساسي الثقيل الذي تبلغ كتلته ($10 \rightarrow 40 M_{\odot}$) يتخذ تطور النجم مساراً مختلفاً عن تطور النجوم الأقل كتلة. ففي النجم الثقيل، يكفي وزن الطبقات الخارجية لإجبار النواة الكربونية على الانكماش حتى تصبح ساخنة بما يكفي لبدء عمليات الاندماج النووي التي يتحول فيها الكربون إلى نيون، مما يطلق الطاقة. وتكرر هذه الدورة من الانكماش والتسخين واشتعال وقود نووي آخر عدة مرات وإنتاج عناصر أثقل وأثقل، فيتحول النيون إلى أوكسجين، والأوكسجين إلى سيليكون، وأخيراً السيليكون إلى حديد في درجات حرارة عالية جداً. وتمر النجوم الضخمة بهذه المراحل بسرعة كبيرة جداً. وبحلول الوقت الذي يندمج فيه السيليكون إلى حديد، ينفد وقود النجم خلال أيام. وستكون الخطوة التالية هي دمج الحديد إلى عنصر أثقل، لكن القيام بذلك يتطلب طاقة بدلاً من إطلاقها. لذا ينهار القلب لعدم توفر الطاقة الكافية ثم يرتد إلى حجمه الأصلي، مما يخلق موجة صدمة shock wave تنتقل عبر الطبقات الخارجية للنجم. والنتيجة هي انفجار ضخم يسمى المستعر الأعظم. وتنهار نواة النجم على نفسها تحت تأثير الجاذبية الهائلة. مما يؤدي إلى ضغط البروتونات والإلكترونات معاً لتكوين نيوترونات، أي تمتص نواة الذرة إلكتروناتها، فيتشكل نجم مكون من النيوترونات يسمى النجم النيوتروني. ويوجد سيناريو آخر لكيفية حدوث موجة الصدمة هو أنه وفق مفاهيم التفاعلات النووية فإنه في كل مرة يندمج فيها إلكترون وبروتون في قلب النجم لتكوين نيوترون، فإن الاندماج يطلق نيوتريناً^١ neutrino. وتحمل هذه الجسيمات بعضاً من الطاقة النووية. وإن انطلاقها بشكل موجة صدمة هو الذي يطلق الانفجار الكارثي النهائي للنجم، لأن الطاقة الإجمالية التي تحتويها النيوتريونات هائلة. ففي الثانية الأولى من انفجار النجم، تكون القدرة التي تحملها النيوتريونات (10^{46} Watts) أكبر من القدرة التي تنبعث من جميع النجوم في أكثر من مليار مجرة^٢.

إن الحد الأقصى وفق الحسابات لكتلة النجم النيوتروني قد يكون ما يقارب $3 M_{\odot}$ فقط. لذا إذا كانت كتلة القلب المنهار أكبر من ذلك، فلن يكون حتى انحلال النيوترونات قادراً على منع القلب من الانهيار أكثر. وحينئذ ينتهي الأمر بالنجم المحتضر إلى شيء مضغوط بشكل أكبر هو الثقب الأسود. إن الانهيار الذي يحدث عندما تمتص النوى الإلكترونات يكون سريعاً جداً. ففي أقل من ثانية، ينهار قلب كتلته نحو $1 M_{\odot}$ أو أكثر، والذي كان في الأصل بحجم الأرض تقريباً، إلى قطر أقل من 20 km .

(١) النيوترينو هو جسيم دون ذري صغير جداً يكاد يكون عديم الكتلة، ولا يحمل شحنة كهربائية، مما يجعله غير متأثر بالقوة الكهرومغناطيسية، ويتفاعل فقط عبر القوة النووية الضعيفة والجاذبية، لذلك من الصعب جداً اكتشافه.

(٢) هل يمكنك استنتاج الرقم أعلاه؟

وتصل سرعة سقوط المواد إلى الداخل إلى ربع سرعة الضوء. ولا يتوقف الانهيار إلا عندما تتجاوز كثافة القلب كثافة نواة الذرة (وهي الشكل الأكثر كثافة للمادة التي نعرفها).

Properties of a Neutron Star

خصائص النجم النيوتروني

- (١) الكثافة الهائلة: النجم النيوتروني كثيف جداً، حيث تتركز كتلة أكبر من كتلة الشمس في جسم يبلغ قطره $(10 \rightarrow 20 \text{ km})$ فقط. بحيث أن ملعقة صغيرة من مادته قد تزن مئات ملايين الأطنان.
- (٢) التركيب: يتكون النجم النيوتروني بشكل أساسي من النيوترونات، وهي جسيمات متعادلة الشحنة. وهذا بسبب الضغط الهائل الذي يحول البروتونات والإلكترونات إلى نيوترونات.
- (٣) الجاذبية القوية: بسبب كثافته الكبيرة، تمتلك النجوم النيوترونية جاذبية هائلة، أقوى بمئات المليارات من جاذبية الأرض. وقد تزيد سرعة الإفلات منه عن نصف سرعة الضوء.
- (٤) الدوران السريع: غالباً ما تدور النجوم النيوترونية بسرعة كبيرة، حيث يمكن أن تكمل دورة كاملة حول نفسها خلال جزء من الثانية.
- (٥) المجال المغناطيسي: تمتلك النجوم النيوترونية مجالات مغناطيسية قوية جداً، تفوق المجال المغناطيسي للأرض بملايين إلى مليارات المرات.

مثال ٤-١٢: إذا افترضنا أن الشمس انهارت كلها إلى نجم نيوتروني نصف قطره 20 km ، فاحسب معدل كثافة النجم النيوتروني.

$$\rho = \frac{M_{\odot}}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{1.99 \times 10^{30} \text{ kg}}{\frac{4}{3}\pi (20 \times 10^3)^3 \text{ m}^3} = 5.938 \times 10^{16} \text{ kg/m}^3 \quad \text{الحل :}$$

أي إن كتلة سنتيمتر مكعب واحد من هذه المادة هي 60 مليون طن تقريباً.

مثال ٤-١٣: ما هي سرعة الإفلات من نجم نيوتروني كتلته بقدر كتلة الشمس إذا كان نصف قطره 10 km ؟ ثم قارنها مع سرعة الضوء.

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{\frac{2(6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2)(1.99 \times 10^{30} \text{ kg})}{10,000}} \quad \text{الحل :}$$

$$= 1.63 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\frac{v_{esc}}{c} = \frac{1.63 \times 10^8 \text{ m/s}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 0.54 \quad \rightarrow \quad v_{esc} = 0.54c$$



الثقب الأسود هو جسم فلكي يتميز بكثافة شديدة وقوة جذب هائلة لدرجة أنه لا يمكن لأي شيء، ولا حتى الضوء، الهروب منه. وتشكل الثقوب السود عادة عندما ينفجر بشكل مستعر أعظم النجم الضخم الذي تتجاوز كتلته ما يقارب $40 M_{\odot}$ في نهاية دورة حياته وينهار القلب المتبقي تحت تأثير جاذبيته، مما يؤدي إلى تراكم كتلة النجم المتبقية في نقطة صغيرة جداً ذات كثافة هائلة جداً، تُعرف باسم نقطة التفرد singularity، محاطة بمنطقة تسمى أفق الحدث event horizon، وهي الحد الذي أسفله لا يمكن للضوء أو المادة الهروب من الثقب الأسود بسبب الجاذبية القوية.

ويحصل هذا إذا استهلك نجم ضخم كل وقوده النووي، وتجاوزت كتلته نواته بعد الانفجار الحد الأقصى لكتلة النجم النيوتروني، أي $3 M_{\odot}$ تقريباً، وحينئذ ستتغلب قوة الجاذبية على ضغط النيوترونات المنحلة degenerate neutron pressure^١. وعند هذه النقطة، لا توجد قوة طبيعية أخرى يمكنها إيقاف تأثير الجاذبية وانهيار النجم إلى حجم صغير جداً، فيتحوّل إلى جُرم مُعتم يسمى بالنجم الأسود أو الثقب الأسود لأنه يبتلع جميع المواد التي تقترب منه ويحبس الضوء الذي يدخله، فلا يبعث أو يعكس الإشعاع الكهرومغناطيسي سواء كان ضوءاً أو غيره، وتصل سرعة الإفلات منه إلى سرعة الضوء.

بما أن الثقب الأسود لا يبعث أي نوع من الإشعاع الكهرومغناطيسي فلا يمكن رصده بصورة مباشرة، وإنما يُكتشف بطرق غير مباشرة، إحداها من خلال تأثير جاذبيته على حركة نجم مرئي إذا كان في مدار ضيق وقريب منه. وحينئذ سيتسبب الدوران المتبادل للنجم المرئي والثقب الأسود حول مركز ثقلهما في تساقط مادة النجم المرئي باتجاه الثقب الأسود بشكل حلزوني حوله، مما يولد ما يسمى بقرص التراكم accretion disk. وفي الجزء الداخلي من هذا القرص تدور المادة حول الثقب الأسود بسرعة كبيرة لدرجة أن الاحتكاك الداخلي يسخن القرص التراكمي لدرجات عالية تقدر بملايين الدرجات تؤدي إلى انبعاث الأشعة السينية، (لاحظ الشكل ٤-٧).

لذا، فإن طريقة العثور على ثقب أسود نجمي هي البحث عن نجمين في مدار قريب، أحدهما نجم مرئي والآخر غير مرئي تنبعث من حوله أشعة سينية. وبعد معرفة كتلة النجم المرئي وسرعته والفترة المدارية له يمكن استعمال قانون كبلر الثالث لتحديد كتلة شريكه المداري المخفي. وإذا كانت هذه الكتلة أكبر بشكل ملحوظ من الحد الأعلى لكتلة النجم النيوتروني ($3 M_{\odot}$ تقريباً) فإن النجم غير المرئي هو ثقب أسود.

(١) ما هو ضغط النيوترونات المنحلة؟

يمكن تعريف الحافة الخارجية للثقب الأسود بأنها نصف القطر الذي تكون عنده سرعة الإفلات من جاذبيته مساوية لسرعة الضوء، وهو ما يُعرف باسم نصف قطر شوارزچايلد، Schwarzschild radius، أي:



الشكل ٤-٧: رسم فني لنظام Cygnus X-1 الثنائي، يظهر فيه مادة من العملاق الفائق يسحبها الثقب الأسود وتشكل قرص تراكم يحيط بالثقب الأسود قبل سقوطها فيه.

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM_{BH}}{R}} = c \quad \dots \dots 4.21$$

ويُحسب من المعادلة التالية:

$$R_s = \frac{2GM_{BH}}{c^2} \approx 2.95 \left(\frac{M_{BH}}{M_{\odot}} \right) km \quad \dots \dots 4.22$$

حيث R_s : نصف قطر شوارزچايلد، أي الإزاحة بين مركز النجم الأسود والنقطة التي تصبح فيها سرعة الإفلات مساوية إلى سرعة الضوء. و M_{BH} : كتلة الثقب الأسود، و G : ثابت الجذب العام، و c : سرعة الضوء. ويلاحظ من المعادلة 4.22 أن قيمته تعادل بالكيلومترات ما يقارب ثلاث مرات قيمة كتلة النجم الأسود إذا قيسَت بدلالة كتلة الشمس.

Types of Black Holes

أنواع الثقوب السود

تقسم الثقوب السود حسب كتلتها إلى ثلاثة أنواع:

- (١) نجمية الكتلة: تتكون عندما ينفجر نجم ضخم كـ "مستعر أعظم"، ويترك وراءه نواة كثيفة تتراوح كتلتها بين $(3 \rightarrow 100 M_{\odot})$.
- (٢) متوسطة الكتلة: يُعتقد أنها تتشكل من اندماج عدة ثقوب سود نجمية، لكنها لا تزال غامضة بالنسبة للعلماء. وتتراوح كتلتها بين $(10^5 M_{\odot} \rightarrow 100)$.

(٣) فائقة الكتلة: توجد في مراكز المجرات، مثل الثقب الأسود في مركز مجرتنا، ويملك الثقب الأسود الفائق كتلة تعادل ملايين أو حتى مليارات الكتل الشمسية.

مثال ٤-١٤: ما هو نصف قطر نجم منهار كتلته بقدر الشمس إذا كانت سرعة الافلات من سطحه أكبر من سرعة الضوء؟

الحل: تتجاوز سرعة الافلات سرعة الضوء إذا

$$\sqrt{\frac{2GM}{R}} > c \quad \text{or} \quad R < \frac{2GM}{c^2} = R_s$$

$$R_s = \frac{2(6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{s}^{-2} \text{kg}^{-1})(1.99 \times 10^{30} \text{ kg})}{(3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1})^2} = 2950 \text{ m}$$

مثال ٤-١٥: يوجد في مركز مجرتنا ثقب أسود عملاق تبلغ كتلته أربعة ملايين كتلة شمسية تقريباً. احسب نصف قطر شوارزچايلد له.

الحل:

$$R_s = \frac{2GM_{BH}}{c^2} = \frac{2(6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2)(4 \times 10^6)(1.99 \times 10^{30} \text{ kg})}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}$$

$$= 1.18 \times 10^{10} \text{ m} \approx 0.08 \text{ AU}$$

مثال ٤-١٦: يبلغ نصف قطر شوارزچايلد 30 km لثقب أسود ما. كم هي الكتلة المحتواة فيه؟

الحل: من المعادلة 4.22 ينتج:

$$M_{BH} = \frac{R_s c^2}{2G} = \frac{30,000 \text{ m}(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2}{2[6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)]} = 2 \times 10^{31} \text{ kg}$$

هذه الكتلة ($2 \times 10^{31} \text{ kg}$) تمثل عشرة أضعاف كتلة الشمس تقريباً.

أسئلة

- (١) هل يمكن رؤية نجوم في مجرات أخرى بالعين المجردة؟
- (٢) ما هو القدر الظاهري؟ وما هو أدنى حد له يمكن للعين المجردة معه رؤية الجرم السماوي؟
- (٣) لماذا لا تعطي الأقدار الظاهرية نتيجة صحيحة عن اللمعان الحقيقي للنجوم؟
- (٤) هل إن استجابة عين الإنسان لللمعان الضوء تزداد بنفس نسبة زيادة اللمعان؟ أم ماذا؟
- (٥) لماذا يكون النجم ذو القدر (1-) ألمع من النجم ذي القدر (19+) بمائة مليون مرة؟
- (٦) ما هو فرق القدر الإشعاعي عن القدر البصري؟
- (٧) ما هو فرق النورانية عن القدر المطلق؟
- (٨) يزداد اللمعان بزيادة حجم النجم ودرجة حرارته. بين هذا رياضياً وفيزيائياً؟
- (٩) يهيمن اللون الأزرق على النجوم شديدة الحرارة، بينما تبعث النجوم الباردة معظم طاقتها الضوئية المرئية بأطوال موجية حمراء. علل هذا.
- (١٠) كيف يمكن معرفة درجة الحرارة السطحية للنجوم باستعمال منحنيات بلانك أو قانون فين؟
- (١١) هل يمكن معرفة أنواع العناصر الكيميائية الموجودة في الغلاف الجوي للنجم عن طريق خطوط الامتصاص في طيف النجم؟ وكيف؟
- (١٢) لماذا لا يوجد نجم تقل كتلته عن $0.08 M_{\odot}$ ؟
- (١٣) لماذا يوجد حد أعلى للكتلة النجمية؟
- (١٤) ارسم مخطط H-R مؤشراً على أجزائه ومبيناً عليه موقع الشمس.
- (١٥) يوجد عدد من النجوم في المنطقة العلوية اليمنى فوق النسق الأساسي تمتلك نورانية عالية رغم انخفاض درجة حرارتها. علل هذا.
- (١٦) لماذا تبدو النجوم الأقزام البيض بيضاء مزرقة؟
- (١٧) لماذا تتميز النجوم الأقزام البيض بنورانية منخفضة رغم درجة حرارتها العالية؟
- (١٨) لا تعمر النجوم ذوات الكتل الكبيرة طويلاً. علل هذا رياضياً وفيزيائياً.
- (١٩) أيهما أكثر سخونة، النجم الذي تبلغ كتلته $10 M_{\odot}$ أم الذي كتلته $1 M_{\odot}$ ؟ ولماذا؟
- (٢٠) علل اختلاف المصادر العلمية الفلكية في تحديد الأس في المعادلة 4.15 بين 3.9 و 3.8 و 3.5 أو غير هذا.
- (٢١) يزداد عمر النجم طردياً مع مقدار المادة التي يحتويها وعكسياً مع مقدار الطاقة التي يبعثها. بين هذا رياضياً وفيزيائياً.
- (٢٢) ما هو أفق الحدث؟ وهل يوجد أفق حدث حول شمسنا؟
- (٢٣) لنفترض أن كتلة ثقب أسود تضاعفت. هل يتغير أفق الحدث؟ إذا كان الأمر كذلك، فكيف يتغير؟
- (٢٤) ما هي الخصائص التي يجب أن يتمتع بها النجم الثنائي ليكون مرشحاً جيداً لتكوين ثقب أسود؟
- (٢٥) ما هي سرعة الأفلات من نصف قطر شوارزچايلد لثقب أسود كتلته $10^5 M_{\odot}$ ؟
- (٢٦) أيهما أكثر شيوعاً في مجرتنا: الأقزام البيض أم الثقوب السوداء؟ ولماذا؟

مصادر الفصل الرابع

- ١- فيزياء الجو والفضاء ج٢، د. حميد مجول وفياض النجم، 1981.
- 2- 21st century astronomy, Je- Hester et al, 3rd ed, 2010.
- 3- A Problem book in Astronomy and Astrophysics, Aniket Sule, 2013.
- 4- Astronomy Demystified, Stan Giblisco, 2003.
- 5- Astronomy. Andrew Fraknoi, David Morrison and Sidney C. Wolff, 2016.
- 6- Essential Astrophysics, Kenneth R. Lang, 2013.
- 7- Fundamental Astronomy, Hannu Karttunen et al, 5th Edition-2007.
- 8- Introduction to Astronomy and Cosmology-2008
- 9- Schaum's Outline of Astronomy, Stacy E. Palen, 2002.

فهرست الفصل الرابع

الصفحة	الموضوع
١	٤-١: أقدار النجوم
٢	٤-١-١: الأقدار الظاهرية
٣	٤-١-٢: الأقدار المطلقة
٦	٤-١-٣: الأقدار الإشعاعية
٦	٤-٢: النورانية
٧	٤-٢-١: علاقة النورانية بالأقدار الإشعاعية
٨	٤-٣: قياس أقطار النجوم
٩	٤-٤: ألوان النجوم ودرجات حرارتها السطحية
٩	٤-٥: الأطياف النجمية
١١	٤-٦: كتلة النجم
١٣	٤-٧: البعد النجمي
١٤	٤-٨: مخطط هيرتزسبرانك - رسل
١٦	٤-٩: أعمار نجوم النسق الأساسي
٢٠	٤-١٠: التطور النجمي (دورة حياة النجم)
٢٣	٤-١٠-١: العملاقة الحمراء
٢٥	٤-١٠-٢: الأقزام البيضاء
٢٦	٤-١٠-٣: خلاصة دورة حياة الشمس المحتملة
٢٦	٤-١٠-٤: النجوم النيوترونية
٢٩	٤-١٠-٥: الثقوب السوداء
٣٢	أسئلة