



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. 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 كلها داخل مجرتنا يمكن رؤيتها من الأرض بدون تلسكوب اعتماداً على الموقع وظروف المشاهدة.

تؤدي التفاعلات النووية الاندماجية داخل النجوم أو بقاياها إلى إنشاء جميع العناصر الكيميائية الموجودة بشكل طبيعي تقريباً والتي تكون أثقل من الليثيوم. 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 سطوع أو لمعان نجم أو جرم سماوي آخر. وقد قُسم اللمعان إلى درجات سُميت أقداراً magnitudes، وهي مقاييس لوغارتمية لللمعان، وتكون النجوم الأكثر لمعاناً أقل قدرأً. وهناك ثلاثة أنواع لها هي الأقدار الظاهرية والمطلقة والإشعاعية.

4-1-1: Apparent Magnitudes

٤-١-١: الأقدار الظاهرية

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).

النجم فيگا Vega له قدر 0، والنجوم الخافتة لها أقدار أكبر، والنجوم الأكثر سطوعاً لها أقدار أصغر. لذا فالنجوم الأكثر خفوتاً من فيگا لها قدر موجب، والنجوم الأكثر سطوعاً منه لها أقدار سالبة. ويبلغ القدر الظاهري لنجم الشَّعْرَى 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 يتم ملاحظتها على حجم التلسكوب وحساسية الكاشف وزمن التعرض. وحالياً، يبلغ قدر الأجرام المرصودة الأكثر خفوتاً 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 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 قريباً من شمسنا، والعكس صحيح. ونتيجة لذلك، تسمى هذه المقادير بالظاهرية.

يمكن استخدام الأقدار لمقارنة السطوع الظاهري لنجمين، حيث إن السطوع هو طريقة للتعبير عن تدفق الضوء القادم نحونا بوحدة الواط لكل متر مربع. وبالنسبة لنجمين بقدر m_1 و m_2 و سطوع 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 للمعان الضوء ليست خطية وإنما لوغاريتمية.

وبتطبيق المعادلة 4.2 يمكن ملاحظة العلاقة بين $(m_2 - m_1)$ والنسبة (b_1/b_2) كما في الجدول التالي الذي يلاحظ فيه أن النجم ذا القدر (+1) ألمع من النجم ذي القدر (+6) بـ 100 مرة، ومن النجم ذي القدر (+11) بـ 10^4 مرة.

الجدول ٤-١: العلاقة بين $(m_2 - m_1)$ والنسبة (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

مثال ٤-١: ثلاثة نجوم 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؟

الحل :

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

النجم ذو القدر (+1) ألمع من النجم ذي القدر (+5) بـ 39.82 مرة.



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. 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: جد بعد جرم سماوي ما بالسنين الضوئية وزاوية اختلاف منظره إذا علمت بأن قدره الظاهري ($m = 5$) وقدره المطلق ($M = 15$). (أهمل تأثير الامتصاص الجوي).

الحل :

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

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

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

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

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 بوحدة الفرسخ الفلكي:

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

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

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 :

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



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

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

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

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

4-1-3: Bolometric Magnitudes

٤-١-٣: الأقدار الإشعاعية

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.

4-2: Luminosity

٤-٢: النورانية

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 $= (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4)$.

ويتبين من المعادلة 4.10 أن اللعمان يزداد بزيادة حجم النجم ودرجة حرارته. وتُعرف درجة الحرارة الفعالة للنجم effective temperature بأنها درجة حرارة الجسم الأسود الذي يشع بنفس مقدار النورانية المرصودة للنجم، وهي تقارب 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. ويعرف الجسم الأسود بأنه النظام المثالي الذي يمتص كل الإشعاع الكهرومغناطيسي الساقط عليه بغض النظر عن تردده ولا يعكس منه شيئاً، ولهذا يظهر باللون الأسود. ويسمى الإشعاع الكهرومغناطيسي المنبعث من الجسم الأسود إشعاع الجسم الأسود.

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

الحل:

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

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:

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

أي إن مضاعفة درجة الحرارة مرة واحدة أدت إلى مضاعفة النورانية 16 مرة.

٤-٢-١: علاقة النورانية بالأقدار الإشعاعية

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

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

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

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

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

$$M_{bol\otimes} = m_{bol\otimes} + 5 + 5 \log p'' \quad \text{الحل: (١) من المعادلة 4.7:}$$

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

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

(٢) من المعادلة 4.11:

$$\log \frac{L_{\otimes}}{L_{\odot}} = 0.4(M_{bol\odot} - M_{bol\otimes}) = 0.4(4.8 - 1.6) = 1.28$$

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

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

$$L_{\otimes} = 4\pi R_{\otimes}^2 \sigma T_{e\otimes}^4 \quad \text{(٣) من المعادلة 4.10:}$$

$$R_{\otimes} = \frac{1}{2T_{e\otimes}^2} \sqrt{\frac{L_{\otimes}}{\pi\sigma}} = \frac{1}{2(8700 \text{ K})^2} \sqrt{\frac{7.33 \times 10^{27} \text{ W}}{\pi(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4)}} \\ = 1.34 \times 10^9 \text{ m} = 1.925 R_{\odot}$$

٣-٤: قياس أقطار النجوم

بالنسبة لمعظم النجوم، يُحسب نصف القطر من خلال اللمعان ودرجة الحرارة 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 الثوابت كما في المعادلة التالية:

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

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. ويهيمن اللون الأزرق على النجوم شديدة الحرارة، بينما تبعث النجوم الباردة معظم طاقتها الضوئية المرئية بأطوال موجية حمراء (لاحظ الجدول ٤-٢). 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 التي تتراوح بين $(430 - 500 \text{ nm})$. أي إن توزيع طاقة النجم في أطوال موجية معينة تعتمد على درجة حرارته السطحية. لذلك فمن معرفة لون النجم يمكن تقدير طول الموجة التي تلازمه. وبدلالة طول الموجة الضوئية يمكن تشخيص حرارته السطحية باستعمال منحنى 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 ٤-٢: أمثلة عن ألوان النجوم ودرجات الحرارة التقريبية المقابلة لها.

لون النجم	درجة الحرارة التقريبية	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

٤-٥: الأطياف النجمية

4-5: Stellar Spectrum

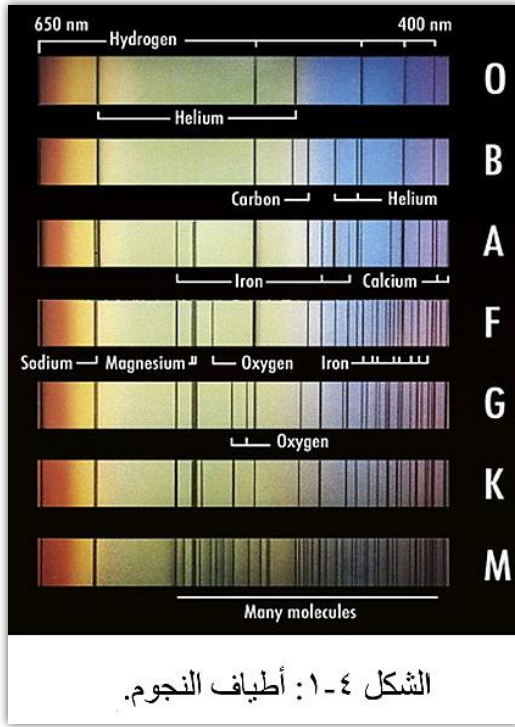
إن جميع معلوماتنا حول الخصائص الفيزيائية للنجوم تأتي بشكل أو بآخر من دراسة أطيافها، ومن خلال دراسة شدة خطوط الامتصاص المختلفة يمكن استنتاج الكتل النجمية ودرجات الحرارة والتركيب النجمي.

يمكن تحليل ضوء النجم إلى طيف عن طريق موشور أو محرز حيود. ويمكن بعد ذلك استخلاص توزيع كثافة تدفق الطاقة لكل تردد. وتتكون أطياف النجوم من طيف مستمر أو سلسلة متصلة ذات خطوط طيفية ضيقة متراكبة على الطيف المستمر. والخطوط في الأطياف النجمية هي في الغالب خطوط امتصاص داكنة، ولكن في بعض الأجسام توجد خطوط انبعاث ساطعة أيضاً. وتمتص الذرات الموجودة في الغلاف الجوي فوق سطح النجم أطوالاً موجية مميزة معينة من الإشعاع المنبعث، مما يترك فجوات داكنة عند النقاط المقابلة في الطيف.

يتم تصنيف أطياف النجوم على أساس شدة الخطوط الطيفية. ويستعمل علماء الفلك أنماط الخطوط المرصودة في الأطياف 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 سُمي هذا التصنيف بتصنيف هارفرد Harvard spectral classification، واستعملت فيه حروف من الأبجدية الإنكليزية للتمييز بين هذه النجوم. وقد وُضعت مراتب الأطياف هذه تبعاً لألوانها، من الأكثر سخونة إلى الأكثر برودة، أي مع انخفاض درجة الحرارة نحو اليمين يكون التسلسل:

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





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

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

4-6: Mass of Star

٤-٦: كتلة النجم

تعد كتلة النجم، أي كمية المادة التي يحتوي عليها، من أهم خصائصه. وإذا عرفنا كتلة النجم يمكننا تقدير المدة التي سيقى فيها مشعاً وما سيكون مصيره النهائي. ومع ذلك، من 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 ثنائية (نجمان يدوران حول بعضهما البعض ويرتبطان معاً برباط الجاذبية) أو أنظمة متعددة، فيمكن حساب كتلتها باستعمال قانون كبلر الثالث. أما إذا كان النجم منفرداً فيمكن استخراج كتلته إذا كان القدر المطلق له معلوماً لأن لبعض النجوم علاقة مباشرة بين كتلتها ولمعانها. 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.

مثال ٤-٨: لنجم الشعري اليمانية رفيق خافت جداً، تبلغ الفاصلة بينهما ما يقارب $20 AU$ ، ولهما فترة مدارية تقارب 50 عاماً. احسب مجموع كتلتي النجمين بدلالة كتلة الشمس.

الحل:

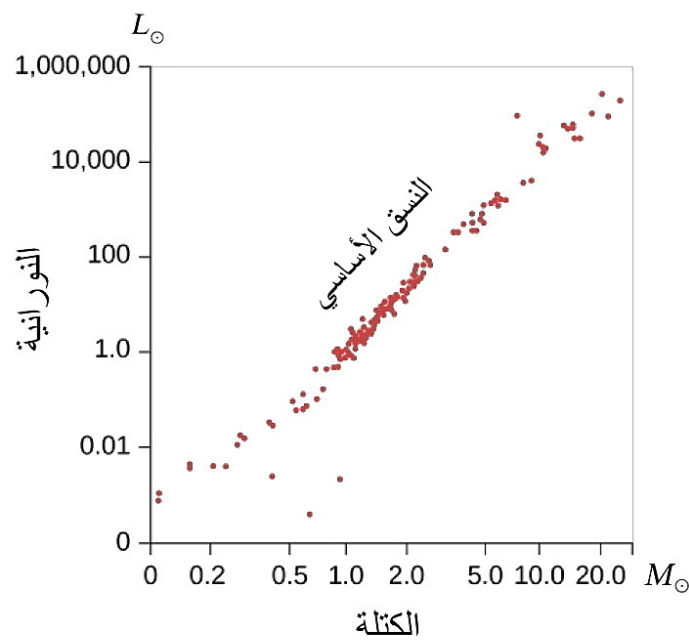
$$r^3 = (M_1 + M_2)T^2$$

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

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

إن معظم النجوم لها كتل أقل من كتلة الشمس. والنجوم الأثقل من الشمس نادرة. 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 (عدد قليل من عدة مليارات) قد تكون كتلتها كبيرة مثل $250 M_{\odot}$. 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 ($0.01 M_{\odot} \rightarrow 0.08 M_{\odot}$) 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.





الشكل ٢-٤: علاقة الكتلة والنورانية. وتوضح النقاط المرسومة الكتلة النجمية ودرجة السطوع. والنقاط الثلاث الواقعة أسفل النقاط المتسلسلة تمثل نجوماً قزمة بيضاء.

إن النجوم الأكثر كتلة من غيرها لها جاذبية أعلى، وهذا يتسبب في ارتفاع درجة الحرارة والضغط في نواة النجم مما يؤدي إلى تسريع تفاعل اندماج الهيدروجين. وتنتج النجوم الثقيلة المزيد من الطاقة وتكون أكثر سخونة. ونظراً لأن نصف القطر يرتبط باللمعان وأن كتلة النجم تتحكم في معدل إنتاج الطاقة فهناك علاقة بين الكتلة والنورانية mass-luminosity relation يخضع لها ما يقارب 90% من النجوم، وهي موضحة في الشكل ٢-٤. وتمثل كل نقطة في الشكل نجماً معروفاً بالكتلة 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 نجم ينتمي لهذه المجموعة تؤدي إلى زيادة كبيرة في نورانيته. ويمكن تمثيل هذا رياضياً بالعلاقة التقريبية التالية^١:

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

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

وبالمقارنة مع الشمس تنتج العلاقة:

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

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

(١) 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.

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 كتلة أحد النجوم تساوي ربع كتلة نجم آخر، 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 حسبنا مجموع كتلتي النجمين في نظام الشعرى اليمانية الثنائي (نجم الشعرى ورفيقه الخافت) باستخدام قانون كبلر الثالث ليكون $3.2 M_{\odot}$. والآن احسب كتلة كل نجم على حدة باستعمال العلاقة بين الكتلة واللمعان 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: $3.2 - 2.23 = 0.97 M_{\otimes}$

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). وفي الوقت الحاضر، يمكن قياس زوايا اختلاف المنظر بدقة تبلغ $0.001''$ ولذلك، فإن استخدام طريقة اختلاف المنظر لتحديد مسافات النجوم يمكن الاعتماد عليه بالنسبة للنجوم القريبة فقط.

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

(٣) قياس السرعة النجمية.



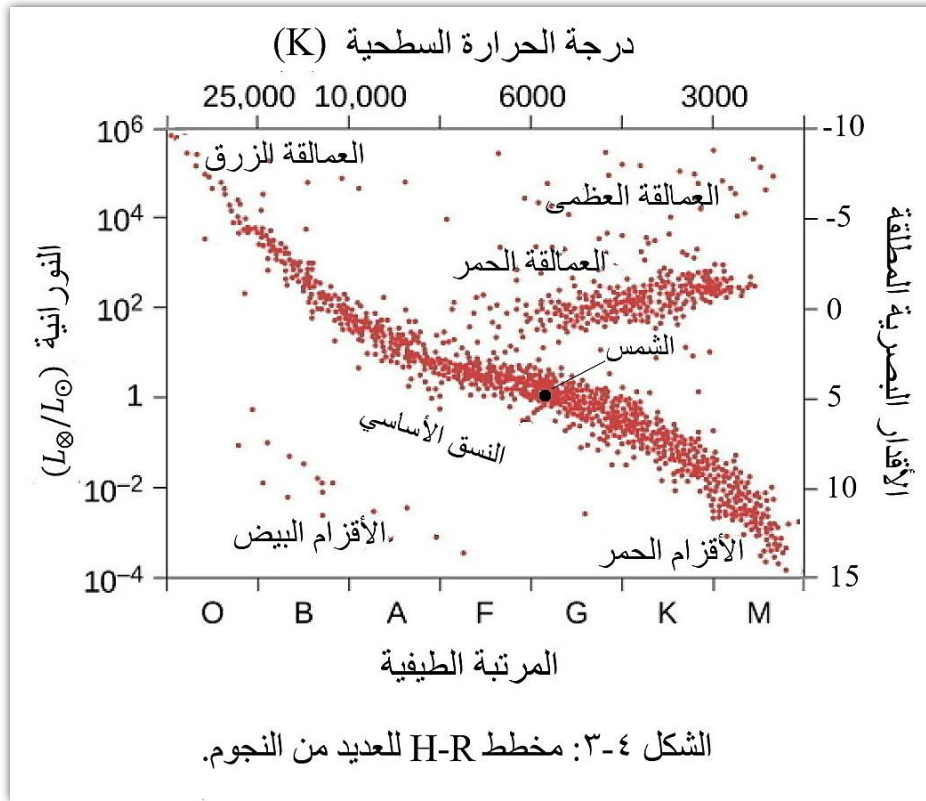
٤-٨: مخطط هيرتزسبرانك - رسل (مخطط H-R)

4-8: Hertzsprung - Russell Diagram

يصف هذا المخطط علاقة الأقدار المطلقة للنجوم المعلومة البعد والمرتبة الطيفية. ويمكن فهمه إذا رسمنا الأقدار المطلقة (أو النورانية) للنجوم المعلومة البعد على المحور الصادي، والمراتب الطيفية لهذه النجوم (أو درجة حرارتها السطحية) على المحور السيني، ويعد 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 نجوم العملاقة الزرق blue giants عالية اللعان والحرارة) إلى أسفل اليمين (إلى النجوم الأقزام الحمر red dwarfs منخفضة اللعان 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 نجوم 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 تطور النجم تمثل مراحل نهائية في أعمار النجوم.

ويوجد في الجزء العلوي الأيمن من المخطط نجوم عملاقة حمراء 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. ويُستفاد منه أنه بالنسبة لنصف قطر ثابت، فإن لمعان النجم يزداد 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، فإن اختلاف اللعان يرجع بشكل أساسي إلى التغير في 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 درجة حرارتها. ويمكن تفسير ذلك بأن يكون النجم هائل الحجم، أي يحتوي على الكثير من الأمتار المربعة على سطحه 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 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 بدرجة حرارة عالية ونورانية منخفضة. فإذا كانت درجات حرارة سطحها مرتفعة، فإن كل متر مربع على ذلك النجم يضخ الكثير من الطاقة. فكيف يمكن للنجم حينئذ أن يكون خافتاً؟ الجواب هو: يجب أن تكون مساحته السطحية الكلية صغيرة جداً، وتُعرف هذه النجوم بالأقزام البيض (لأنه في درجات الحرارة المرتفعة هذه، تمتزج ألوان الإشعاع الكهرومغناطيسي التي تنبعث منها معاً لتجعلها تبدو بيضاء مزرقة).

مثال ٤-١٠: وُجد أن زاوية اختلاف المنظر لنجم هي $0.01''$ وأن مرتبته الطيفية M0. فإلى أية مجموعة من النجوم ينتمي هذا النجم في مخطط H-R في كل من الحالتين التاليتين:

(١) إذا كان القدر الظاهري للنجم $(+2.2)$ ، (٢) إذا كان القدر الظاهري للنجم $(+14.2)$.

الحل: (١) من المعادلة 4.7: $M = m + 5 + 5 \log p''$



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

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

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 للشمس مشابهة نوعاً ما، حيث إن عمليات الانكماش نتيجة لقوى الجاذبية العامة تؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة المركزية إلى أن يصل مقدارها إلى ما يقارب 10 إلى 15 مليون درجة، 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 عندما تكون الكتلة أكبر تزداد الجاذبية ويكون الضغط ودرجة الحرارة داخل النجم أعلى، مما يعزز معدل اندماج الهيدروجين واستهلاك الوقود النووي بسرعة. وتحدد الكتلة درجة الحرارة المركزية ومعدل الاندماج النووي الذي يظل عنده التوازن بين الضغط الخارجي وقوة الجاذبية الداخلية خلال مرحلة النسق الأساسي. وفي الجدول ٤-٤ درجة حرارة السطح الفعالة والكتلة والنورانية ونصف القطر وعمر نجوم النسق الأساسي ذات الأنواع الطيفية المختلفة.

ولنأخذ مثلاً يوضح ذلك، فنفترض أن كتلة النجم A تعادل كتلة الشمس وأن كتلة النجم B تبلغ 10 مرات كتلة الشمس. فعند استخدام علاقة الكتلة والنورانية $[L_{\otimes}/L_{\odot} = (M_{\otimes}/M_{\odot})^{3.9}]$ 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 A فترة زمنية تقارب 8000 مرة بقدر عمر النجم B.

الجدول ٤-٤: مواصفات نجوم النسق الأساسي.

المرتببة 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:

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

ومن المعادلة 4.15:

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

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

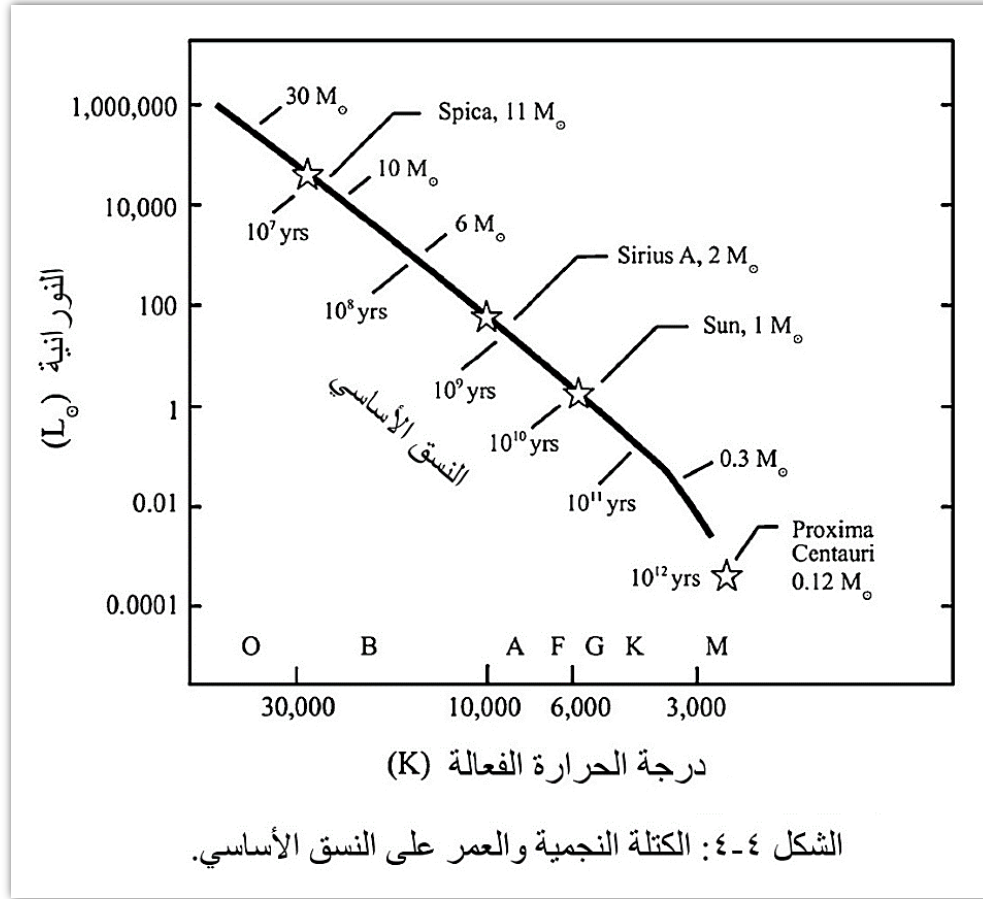
$$\tau_{ms} \propto M_{ms}^{-2.9} \dots \dots 4.18$$

إن المعادلة 4.18 صحيحة تقريباً لمجموعة نجوم النسق الأساسي على فرض أن نورانية النجوم ثابتة تقريباً خلال دورة حياتها.

يقدر عمر النسق الأساسي للشمس 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 0.1 مرة 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 (الشكل ٤-٤). وتكون النجوم ذوات الكتل الكبيرة أكثر نورانية من النجوم ذوات الكتل الصغيرة لأن درجات الحرارة المركزية للأولى أعلى. ويمكن لنجوم

O الحارة المضيئة أن تمتلك كتلاً تصل إلى 150 مرة بقدر كتلة الشمس، في حين أن نجوم M الباردة الخافتة في النسق الأساسي قد تمتلك كتلة قليلة تقارب 0.08 كتلة شمسية.

النجم الأثقل يكون أكثر سخونة في مركزه من النجم الأخف، ولهذا يجب أن يكون أكثر نورانية. وقد اتضح أن إمدادات الطاقة النووية للنجم تتناسب مع الكتلة كما تشير معادلة أينشتاين ($E = mc^2$). ويزداد معدل إشعاع الطاقة (النورانية) أيضاً مع الكتلة، ولكن باعتباره القوة الرابعة تقريباً للكتلة وفق العلاقة ($L_{\odot} \propto M_{\odot}^{3.9}$).

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 قلب النجم الساخن الكثيف. أما خارج النواة، حيث يكون الوزن الزائد والضغط أقل، يكون الغاز أبرد

وأرق، 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 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. وإذا تحول 0.12 من كتلة الشمس إلى طاقة بهذه الطريقة فإن الطاقة المتحررة هي $(E = 0.12 \times 0.0071 M_{\odot} c^2)$ حيث إن كتلة الشمس $(M_{\odot} = 1.989 \times 10^{30} \text{ kg})$. لذا فإن عمر الشمس في النسق الأساسي τ_{ms} اللازم لتحويل 12% من كتلتها إلى هيليوم وفق علاقة آينشتاين $(E = mc^2)$ هو

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

حيث إن نورانية الشمس هي $(L_{\odot} = 3.828 \times 10^{26} \text{ J/s})$ و $(1 \text{ year} = 3.156 \times 10^7 \text{ s})$. وبافتراض أن نورانية نجوم النسق الأساسي تزداد مع القوة 3.9 للكتلة كما في العلاقة 4.15 فإن عمر النسق الأساسي لنجم ذي كتلة M_{ms} 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: $M_{ms} = 4M_{\odot}$

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

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



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) ارسم مخطط H-R مؤشراً على أجزائه ومبيناً عليه موقع الشمس.
- (١٤) يوجد عدد من النجوم في المنطقة العلوية اليمنى فوق النسق الأساسي تمتلك نورانية عالية رغم انخفاض درجة حرارتها. علل هذا.
- (١٥) لماذا تبدو النجوم الأقزام البيض بيضاء مزرقة؟
- (١٦) لماذا تتميز النجوم الأقزام البيض بنورانية منخفضة رغم درجة حرارتها العالية؟
- (١٧) لا تعمر النجوم ذوات الكتل الكبيرة طويلاً. علل هذا رياضياً وفيزيائياً.
- (١٨) أيهما أكثر سخونة، النجم الذي تبلغ كتلته $10 M_{\odot}$ أم الذي كتلته $1 M_{\odot}$ ؟ ولماذا؟
- (١٩) علل اختلاف المصادر العلمية الفلكية في تحديد الأس في المعادلة 4.15 بين 3.9 و 3.8 و 3.5 أو غير هذا.
- (٢٠) يزداد عمر النجم طردياً مع مقدار المادة التي يحتويها وعكسياً مع مقدار الطاقة التي يبعثها. بين هذا رياضياً وفيزيائياً.

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- Astronomy Demystified, Stan Giblisco, 2003.
- 4- Astronomy. Andrew Fraknoi, David Morrison and Sidney C. Wolff, 2016.
- 5- Essential Astrophysics, Kenneth R. Lang, 2013.
- 6- Fundamental Astronomy, Hannu Karttunen et al, 5th Edition-2007.
- 7- Introduction to Astronomy and Cosmology-2008
- 8- Schaum's Outline of Astronomy, Stacy E. Palen, 2002.

فهرست الفصل الرابع

الصفحة	الموضوع
٢	١-٤: أقدار النجوم
٢	١-٤-١: الأقدار الظاهرية
٤	١-٤-٢: الأقدار المطلقة
٦	١-٤-٣: الأقدار الإشعاعية
٦	١-٤-٢: النورانية
٧	١-٤-٢: علاقة النورانية بالأقدار الإشعاعية
٨	١-٤-٣: قياس أقطار النجوم
٩	١-٤-٤: ألوان النجوم ودرجات حرارتها السطحية
١٠	١-٤-٥: الأطياف النجمية
١١	١-٤-٦: كتلة النجم
١٤	١-٤-٧: البعد النجمي
١٥	١-٤-٨: مخطط هيرتزسبرانك - رسل
١٧	١-٤-٩: أعمار نجوم النسق الأساسي
٢١	أسئلة