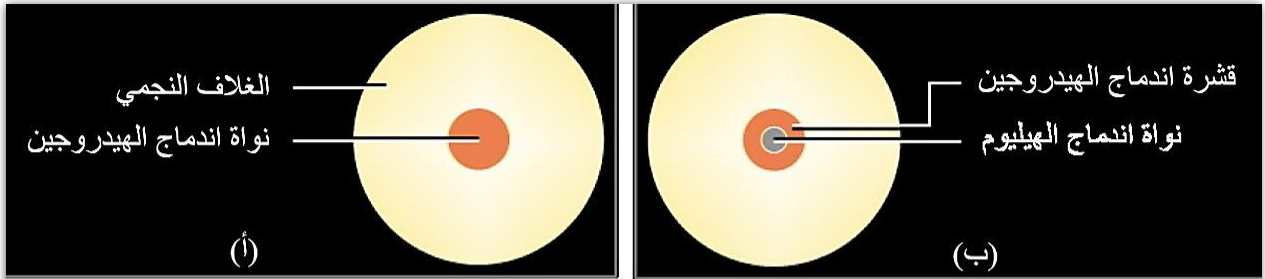


والآن ننتقل من ولادة النجوم إلى بقية قصة حياتها. وهذه ليست مهمة سهلة لأن النجوم تعيش فترة

4-10-1: Red Giants

٤-١٠-١: العملاقة الحمر

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 (بيت القوس) 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، وتنتهي النواة لتشكل قزماً 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، وتنتهي 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 $200,000 \text{ K}$ 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 الانهايار 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 إلى قزم أبيض لابد أن يكون له كتلة في النسق الأساسي تزيد عن $6 M_{\odot}$ ، 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. وتُقدَّر 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. وفق مفاهيم التفاعلات النووية فإنه في كل مرة يندمج فيها إلكترون وبروتون في قلب النجم لتكوين نيوترون، فإن الاندماج يطلق نيوترينو^١ neutrino. وتحمل هذه الجسيمات بعضاً من الطاقة النووية. وإن انطلقها 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.

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

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.

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

الحل :

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

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



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 اللعان الحقيقي للنجوم؟
- (٤) هل إن استجابة عين الإنسان لللعان الضوء تزداد بنفس نسبة زيادة اللعان؟ 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 اللعان 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	١-٤: أقدار النجوم
٢	١-٤: الأقدار الظاهرية
٣	١-٤: الأقدار المطلقة
٦	١-٤: الأقدار الإشعاعية
٦	٢-٤: النورانية
٧	١-٢: علاقة النورانية بالأقدار الإشعاعية
٨	٣-٤: قياس أقطار النجوم
٩	٤-٤: ألوان النجوم ودرجات حرارتها السطحية
٩	٥-٤: الأطياف النجمية
١١	٦-٤: كتلة النجم
١٣	٧-٤: البعد النجمي
١٤	٨-٤: مخطط هيرتزسبرانك - رسل
١٦	٩-٤: أعمار نجوم النسق الأساسي
٢٠	١٠-٤: التطور النجمي (دورة حياة النجم)
٢٣	١٠-١: العملاقة الحمراء
٢٥	١٠-٢: الأقزام البيضاء
٢٦	١٠-٣: خلاصة دورة حياة الشمس المحتملة
٢٦	١٠-٤: النجوم النيوترونية
٢٩	١٠-٥: الثقوب السوداء
٣٢	أسئلة