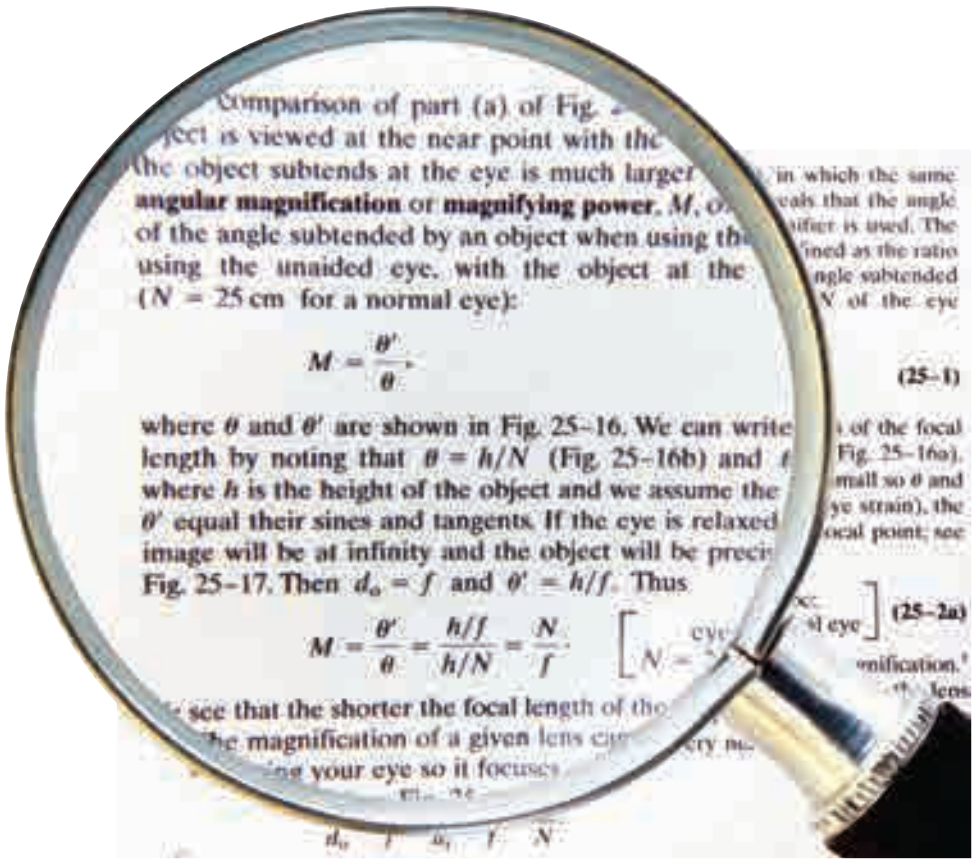
العدسة المكبّرة هي إحدى الأدوات الضّوئيّة التي سنناقشها في هذا الفصل؛ لأنّها أبسطها. وهي هنا تكبّر الصّفحة 705 من هذا الفصل، والتي تصف طريقة عمل العدسة المكبّرة حسب نموذج الأشعّة. كما سنناقش في هذا الفصل أيضًا الكُمرات (آلات التّصوير) ذات الفيلم، والكُمرات الرّقميّة، وعين الإنسان، والمقراب (التلسكوب)، والمجاهر (الميكروسكوبات)، إضافة لقدرة التحليل، وأشعة X-، والماسحات الإلكترونيّة (CT).



الفصل 25

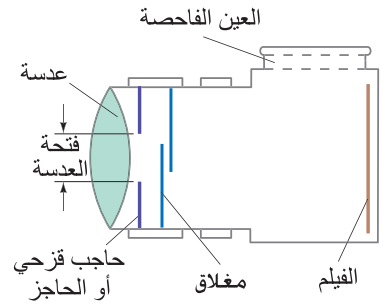
الاجهزة البصرية

في مناقشتنا لسلوك الضّوء في الفصلين السّابقين، وصفنا كذلك عددًا قليلًا من الأجهزة، كمقياس الطّيف وجهاز تداخل ميكلسون. في هذا الفصل، سنتناول بعض الأجهزة الأخرى الأكثر شيوعًا، والتي يستعمل معظمها العدسات، مثل الكاميرا، والمقراب (التلسكوب)، والمجهر، والعين البشريّة. ولوصف عملها؛ سنستخدم مخططات الأشعّة الضّوئيّة. وعلى أيّ حال، فإنّه لفهم بعض مظاهر تشغيلها؛ سنحتاج إلى معرفة الطبيعة الموجية للضّوء.

1-25 الكاميرات الفلمية، والكاميرات الرّقميّة

تتكوَّن العناصر الأساسيّة **للكاميرا** من: العدسة، وصندوق خفيف محكم، ومغلاق يسمح للضوء بالعبور خلال العدسة لفترةٍ وجيزة. وفي الكاميرا التقليديّة قطعةٌ من فيلم (الشّكل 25-1). أو في الكاميرا الرّقميّة مِجَسٌّ إلكترونيٌّ. عند فتح المغلاق، يتم تركيز الضّوء القادم من أجسام خارجية في مجال النّظر عن طريق العدسة كخيال على الفيلم أو المِجَسّ. يحتوي الفيلم مواد كيميائية حساسة للضوء تتغير عندما يسقط الضّوء عليها. وفي عملية تظهير الفيلم، تسبب التفاعلات الكيماوية تحوّل المساحات المتأثرة بالضّوء إلى مناطق معتمة. وبهذا يُسجَّل الخيال على الفيلم.* يمكنك رؤية الخيال بنفسك إذا أزلت غطاء الكاميرا الخلفي، ونظرت من خلال ورقة رقيقة (التي يتكون عليها الخيال) موضوعة حيث يجب أن يكون الفيلم عن فتح المغلاق.

تطبيق الفيزياء
الكاميرا



الشّكل 25-1 الكاميرا البسيطة.

الكاميرا الرّقميّة، مِجَسّات CCD

في **الكاميرا الرّقميّة**، يستعاض عن الفيلم بمجسٍّ شبه موصل يعرف بِـ "أداة مقرونة بالشحنة" **(CCD) (charge-coupled device)**. يتكون مِجَسُّ CCD من ملايين عناصر الصّورة الصغيرة (pixels) – (انظر الشّكل 24 - 49). مِجَسّ 3-MP (مغابيكسل) ** قد يحتوي على نحو 1500 عنصر عموديًّا، و2000 عنصر أفقيًّا في مساحة بحدود 9 mm × 12 mm. إنّ الضّوء الذي يصل أيّ عنصر صورة يحرّر إلكترونات من شبه الموصل. وكلّما كانت شدّة الضّوء أكثر، تراكمت الشحنة خلال زمن التّعرض القصير للضّوء. تحمل الأقطاب شحنة كلّ عنصر (بالتسلسل مع الزّمن، سطرًا بسطر – لذلك سميت "مقرونة بالشحنة") إلى معالج الصّورة الذي يخزِّن السّطوع النسبيّ لعناصر الصّورة، ويسمح بإعادة تكوّن الخيال لاحقًا على شاشة حاسوب أو طابعة.

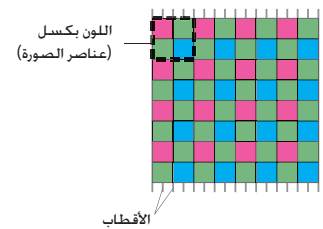
إنّ CCD قابل للاستعمال ثانية؛ فحال انتقال شحنات "عنصر الصّورة" إلى الذاكرة، يمكن التقاط صورة جديدة.

يمكن تحقيق اللون بمرشحات حمراء، وخضراء، وزرقاء فوق عناصر الصّورة المتعاقبة كما هو مبين في (الشّكل 25-2)، مثلما يحدث في أنبوب الأشعّة المهبطية (CRT) الملون، أو شاشة البلورات السّائلة (LCD). يحتوي نوع المِجَسّ المبين في (الشّكل 25-2) من العناصر الخضراء ضعف ما يحتويه من العناصر الحمراء والزرقاء (يُزعم أنّ اللون الأخضر ذو أثر في حدّة الإحساس). واللون الذي يُحلّل بالحاسوب عن كلّ عنصر صورة هو متوسط شدّة ذلك العنصر والألوان الأقرب إليه.

لتقليل مقدار الذاكرة المخصصة لكلّ صورة، فإنّ برامج الضّغط يمكن أن تجد المتوسط لمجموعة عناصر، ولكن ينتج من ذلك ضياع في الحدّة أو "قدرة التحليل".

تطبيق الفيزياء
الكاميرا الرّقميّة

الشّكل 25-2. جزء من مِجَسّ CCD. مجموعة مربعة من أربعة عناصر صورة $\frac{RG}{GB}$ وتدعى أحيانًا "عنصر الصّورة الملونة".

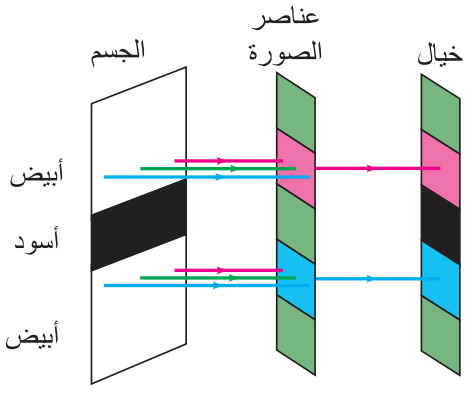


* الكاميرات الرّقميّة

يمكن أن تنتج صورًا تحتوي عيوبًا اصطناعية (الأخطاء في الصّورة غير الموجودة في الأصل). مثال على ذلك باستعمال عناصر الصّورة الفسيفسائية في (الشّكل 25-2) الموصوفة في (الشّكل 25-3). وهناك تقانة (تكنولوجيا) أخرى تستعمل نظام طبقة شبه – شفافة من السليكون شبه الموصل باستغلال الحقيقة العلمية التي تشير إلى أنّ موجات الضّوء المختلفة تخترق السليكون لأعماق مختلفة. وكلّ عنصر pixel هو مجموعة طبقات شبه شفافة، واحدة لكلّ لون. تمتص الطبقةُ العلوية الضّوء الأزرق، ويسمح للأخضر والأحمر بالمرور. أما الطبقة الثانية فتمتص الأخضر، في حين تمتص السفلى الأحمر. وهكذا، فإنّ الألوان الثلاثة تكشف في كلّ عنصر صورة، وبذلك نحصل على تحليل أفضل للألوان، وعيوب طفيفة.

* يدعى هذا بالصّورة السالبة؛ لأنّ المساحات الداكنة تقابل الأجسام المضيئة والعكس صحيح. وتحدث العملية نفسها خلال الطبع لإنتاج صورة بالأسود والأبيض"موجبةٌ من السالبة. ويوجد في الفيلم الملون ثلاث طبقات أصبغة تعود للألوان الأساسية الثلاثة.

** كل لون من ألوان عنصر الصّورة يُعد عنصر صورة مستقل. بالمقابل في شاشة LCD (البند 24-11). كل مجموعة من ثلاث طبقات دون العنصر تعد عنصر صورة مستقل (عد بطريقة محافظة).



الشّكل 25-3. افرض أننا التقطنا صورة تتضمن خطًا أسود (هو الجسم) على خلفية بيضاء. صورة هذا الجسم لها هالة ملونة (أحمر في الأعلى، وأزرق في الأسفل) تعود إلى الترتيب الفسيفسائي لعناصر اللون، كما هو مبين للألوان النافذة. إنّ أخذ المتوسط بوساطة الحاسوب يقلل المشكلات اللونيّة مثل هذه (الأخضر أعلى الصّورة وأسفلها يمكن أن يعدّل مع عناصر الصّورة القريبة للحصول على أبيض أو تقريبًا كذلك)، ونتيجة لذلك، تكون الصّورة ضبابية. أما عنصر اللون الطّبقيّ الموصوف في النّصّ فيمكن أن يتجنب هذا العيب الاصطناعيّ.

ضبط الكاميرا

هناك ثلاثة ضوابط رئيسة في الكاميرات ذات النوعية الجيدة هي: مغلاق السرعة، وعائق f-، والتّعديل البؤريّ (التّبئير). وعلى الرّغم من أنّ معظم الكاميرات في هذه الأيام تقوم بتلك الضوابط آليًّا، إلاّ أنّ فهم هذه الضوابط أمر مهم لاستعمال الكاميرا بفاعلية.

وللقيام بتصوير متميز؛ لا بدّ من الاطلاع على الدليل العمليّ للكاميرا (الشّكل25-4). تعود سرعة المغلاق إلى مدة فتحه، وتعريض الفيلم للضّوء. وقد تتراوح بين ثانية واحدة أو أكثر ("فترة التعريض") إلى $\frac{1}{1000}$ s أو أقلّ. ولتجنب الضّبابية النّاجمة من حركة $\frac{1}{1000}$ s الكاميرا، تستعمل عادة سرعات أكبر من. إذا كان الجسم متحركًا، فإننا نحتاج إلى سرعات مغلاق أسرع "**وقف**" الأداء. وقد يفتح المغلاق "خلف العدسة" أو يغلق كما في (الشّكل 25-1)، أو يكون مغلاق "المستوى البؤريّ" حيث تكون ستارة متحركة مباشرة أمام الفيلم.

تحتوي الكاميرات الرّقميّة "**مغالق إلكترونيّة**" وهي أزمنة التوضيب الوجيزة لتجميع شحنات عناصر الصّورة؛ كما يمكن أن تحتوي مغلاقًا ميكانيكيا يفتح عادة بحيث يمكن رؤية المشهد على شاشة LCD المبينة في الداخل، ولكنّه يغلق قُبيْلَ التقاط الصّورة، يفتح قليلًا لالتقاط الصّورة، ثم يعاد فتحه فيما بعد. الكاميرات الساكنة التي تسج ل مشاهد قصيرة يجب أن يكون لها وقت "نمذجة" سريع، ووقت "إزالة" (الشحنة) كي نلتقط صورًا بمعدل 12 أو 15 إطارًا في الثانية.

يجب ضبط **حاجز** f- مقدار الضّوء الذي يصل الفيلم بحرص شديد لتجنب **دون التعرض** (ضوء قليل فتكون الصّورة معتمة، وتظهر الأجسام اللامعة فقط) أو **فوق التعرض** (ضوء كثير، لذلك تبدو الأجسام اللامعة كلّها متشابهة، ونتيجة ذلك نفقد التمييز، وتكون الصور باهتة). وللتحكم بالتعرض؛ يوضع "حاجز" أو حجاب قزحيّ، وفتحته ذات قطر متغير، خلف العدسة (الشّكل 25-1). يتغير اتساع الفتحة للتعديل في ظروف الضّوء اللامع أو المعتم، حساسية الفيلم* المستعمل، وسرعات المغلاق المختلفة. اتساع الفتحة يميز بما يُسَمّى **عدد** f – أو **حاجز** f –، والذي يعرف كما يلي

$$f\text{-stop} = \frac{f}{D}$$

حيث f البعد البؤريّ للعدسة، و D قطر فتحة العدسة (الشّكل 25-1). مثلًا، عندما يكون لعدسة بعدها البؤريّ 50-mm $D = 25\,\text{mm}$ فتحة، نقول إنها موضوعة عند $f/2$. وإذا وضعت هذه العدسة عند $f/8$، فإنّ الفتحة تكون $(50/6\frac{1}{4} = 8)$، $6\frac{1}{4}\,\text{mm}$. وعند سرعات المغلاق الأكبر، أو الضّوء الخافت، يجب استعمال فتحة عدسة كبيرة للحصول على تعريض صحيح. وهذا يقابل عدد حاجز f- أقلّ. وكلما كان عدد حاجز f- أصغر، كانت الفتحة أكبر، ويمرّ ضوء أكبر عبر العدسة إلى الفيلم. ويُشار إلى أصغر عدد حاجز f- (أكبر فتحة)"سرعة العدسة". أمّا الآن، فيمكن الحصول على عدسات $f/2.0$، بل وأسرع من ذلك. تكمن فائدة العدسة السريعة في أنها تسمح بالتقاط صور تحت ظروف إضاءة ضعيفة. وتتكون العدسات ذات النوعية الجيدة من عناصر متعددة لتقليل العيوب الموجودة في العدسات الرقيقة (البند 25 - 6). علامات عدد الحاجز f – على العدسات الجيدة هي 1.0، 1.4، 2.0، 2.8، 4.0، 5.6، 8، 11، 16، 22، 32 (الشّكل 25 - 4). تعود كلّ من هذه الحواجز إلى تقليل القطر بمعامل نحو $\sqrt{2} = 1.4$. ولأنّ كمية الضّوء التي تصل الفيلم تتناسب مع مساحة الفتحة، ولهذا تتناسب مع مربع القطر، فإنّ كلّ عدد حاجز f – يقابل معامل 2 في شدّة الضّوء التي تصل الفيلم.

مغلاق كاميرا رقميّ

الشّكل 25-4. في هذه الكاميرا، توجد محددات حاجز f- وحلقة التّعديل البؤريّ على عدسة الكاميرا. يتم اختيار سرعات المغلاق على الدولاب الصغير في الجزء العلوي لجسم الكاميرا.

حاجز f-

التّعديل البؤريّ (التّركيز): التّعديل البؤريّ هو عملية وضع العدسة في المكان الصّحيح بالنسبة إلى الفيلم للحصول على صورة أكثر وضوحًا. إنّ البُعدَ الأصغر للصورة (الخيال) يكون للأجسام الواقعة في اللانهاية (الرمز ∞ يستعمل للانهاية) ويساوي البُعدَ البؤريّ. وللأجسام الأقرب، يكون بُعْدُ الصّورة أكبرَ من البُعْدِ البؤريّ. كما يمكن ملاحظة ذلك من معادلة العدسة $1/f = 1/d_o + 1/d_i$ (المعادلة 23-8).

التّعديل البؤريّ

وللتركيز

على الأجسام القريبة؛ يجب تحريك العدسة بعيدًا عن الفيلم، وهذا يمكن عمله في العدسة اليدوية بإدارة حلقة حول العدسة.

* الأفلام المختلفة لها حساسيات مختلفة للضوء، وتُسَمّى "سرعة الفيلم" ويرمز إليها "عدد ASA " أو "عدد ISO ". يكون الفيلم الأسرع أكثر حساسية، ويحتاج إلى ضوء أقلّ للحصول على صورة جيدة. الأفلام السريعة تكون حبيبية، ولذلك تعطي حدّة أقلّ (أقلّ تحليلا) عند تكبيرها. وقد يكون للقمرات الرّقميّة أداة ضبط حساسة "ISO ". ضبط CCD "ليكون أسرع" لضوء قليل ينتج تشويشًا، وهذا يقابل الحبيبية.

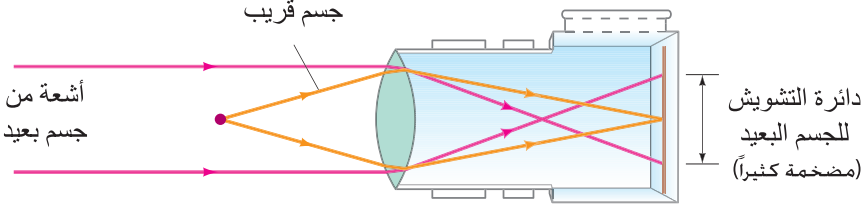
(أ)

(ب)

الشّكل 25-5 صور ملتقطة بكاميرا (أ) مضبوطة على جسم قريب، أمّا الجسم البعيد فيكون ضبابيّا. (ب) صور مضبوطة على جسم أبعد ليكون الجسم القريب ضبابيّا.

إذا ضبطت العدسة على جسم قريب، فسوف يتكون له خيال حادّ. في حين يكون خيال الأجسام البعيدة ضبابيًّا (غير واضح) (الشّكل 25-5). إنّ الأشعّة القادمة من نقطة على جسم بعيد ستكون غير مركزة؛ أي أنّها ستُكوّن دائرة على الفيلم كما يوضّح (بصورة مبالغ فيها) (الشّكل 25-6). وهكذا سوف ينتج الجسم البعيد خيالًا مكوّنًا من دوائر متطابقة، ويكون ضبابيًّا. تُسَمّى هذه الدوائر "دوائر التّشويش". وكي تتضمن الصّورة كلا من الأجسام القريبة والبعيدة؛ يمكنك محاولة وضع العدسة في مكان متوسط. ولضبط مسافة معينة، هناك مدى من المسافات تصبح بعده دوائر التّشويش صغيرة بحيث تكون الصّورة (الخيال) حادة بصورة معقولة. ويسمّى هذا عمقَ المجال. يتغير عمق المجال مع فتحة العدسة. إذا كانت الفتحة أصغر، فإنّ الأشعّة خلال الجزء المركزي من العدسة فقط هي التي تكون مقبولة، وهذه تكوّن دوائر تشويش أصغر لبعد جسم معين. وهكذا، عند فتحات عدسة أصغر، فإنّ مجالا أكبر لأبعاد الأجسام سوف تقع ضمن دائرة التشويش هذه. وهكذا، فإنّ عمق المجال يكون أكبر. ويعتمد عمق المجال للقمرات 35-mm على دائرة تشويش قصوى قطرها 0.03 mm.

بعد الجسم(عمق الميدان)



الشّكل 25-6 عند وضع العدسة لتركز على جسم قريب. النقاط على جسم بعيد تنتج دوائر. لذا، تكون مشوشة. (الأثر موضح بصورة مبالغ فيها).

مثال 25-1 تعديل بؤرة (تركيز) الكاميرا

ما المسافة التي يجب أن تتحرّكها عدسة بعدها البؤريّ 50.0-mm من وضعها اللانهائيّ إلى مكان بحيث تتكوّن صورة واضحة لجسم على بعد 3.00 m؟

النّهج: لجسم في اللانهاية، تتكوَّن الصّورة في البؤرة، وفق التعريف الذي نوقش في (البند 23-7). ولجسم على بعد 3.00 m، نستعمل معادلة العدسة، (معادلة 23-8)، لإيجاد بعد الخيال (بُعْدُ العدسة عن الفيلم أو المِجَسّ).

الحلّ: عند الضبط لجسم في اللانهاية، تكون العدسة على بعد 50.0 mm من الفيلم. وعند ضبط العدسة لبعد جسم $d_o = 3.00\ \text{m}$، يُعطى بعد الخيال بمعادلة العدسة،

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{50.0\ \text{mm}} - \frac{1}{3000\ \text{mm}} = \frac{3000 - 50}{(3000)(50.0)\ \text{mm}} = \frac{2950}{150{,}000\ \text{mm}}$$

ونحلّ لإيجاد d_i حيث $d_i = 50.8\ \text{mm}$. لذا، علينا تحريك العدسة 0.8 mm بعيدًا عن الفيلم أو المِجَسّ الرّقميّ.

تمرين A: إذا كانت العدسة في (المثال 25-1) تساوي 50.4 mm من الفيلم أو المِجَسّ، فجدْ بُعْدَ الجسم للحصول على صورة واضحة.

المثال المفاهيمي 25-2 سرعة المغلاق

لتحسين عمق المجال: يمكنك أن "تخفض" عدسة الكاميرا بخطوتين لعدد حاجز -f من $f/4$ إلى $f/8$. ماذا تعمل سرعة المغلاق للحصول على التعريض نفسه؟

الجواب: تتناسب كمية الضّوء التي تسمح لها العدسة بالمرور مع مساحة فتحة العدسة. تقليل فتحة العدسة بخطوتين من عدد -f يقلّل القطر بعامل 2 والمساحة بعامل 4. وللحصول على التعريض نفسه، فإنّ المغلاق يجب أن يفتح لزمن أربعة أضعاف الزّمن السابق. فلو كانت سرعة المغلاق $\frac{1}{500}$ s فربما عليك زيادتها إلى $\frac{1}{125}$ s.

حِدّة الصّورة

وتعتمد حِدّة الصّورة على حبيبية الفيلم، أو عدد عناصر الصّورة للقمرات الرّقميّة، وليس على تعديل البؤرة الدقيق فقط؛ فالأفلام ذات الحبيبية الناعمة تكون "أبطأ"، وهذا يعني أنّها بحاجة إلى تعريض لمدةٍ أطول لمستوى معين من الضّوء.

تؤثر جودة العدسة بقوة في جودة الصّورة، وسنناقش تحليل العدسة، وأثر الجيود في (البندين 6-25 و 7-25). إنّ الحدّة أو التحليل لعدسة تعطى عادة بعدد الخطوط لكلّ 1 mm، وتقاس بتصوير مجموعة عيارية من الخطوط المتوازية على فيلم ذي حبيبية ناعمة. إنّ أقلّ بعد بين الخطوط التي يمكن تمييزها يعطي التحليل؛ فـ 50 خطًا لكلّ 1 mm يعدّ معقولا، و100 خط لكلّ 1 mm جيد جدًا.

عناصر الصّورة وقوة التّحليل

المثال 25-3 عناصر الصّورة وقوة التّحليل

تنتج كاميرا رقمية عالية الجودة 6-MP (6 ميغابيكسل) قدرةَ تحليل قصوى 2000 × 3000 pixels على مِجَسّ CCD أبعاده 16-mm × 24-mm. ما حدّة العدسة للاستفادة من قدرة التّحليل هذه؟

النّهج: نجد عدد عناصر الصّورة (بيكسل) لكلّ 1 mm، ونرغب أن تكون العدسة بتلك الجودة على الأقل.

الحلّ: يمكننا اختيار ارتفاع الخيال (2000 pixels في 16 mm) أو العرض (3000 pixels في 24 mm):

$$\frac{3000\ \text{pixels}}{24\ \text{mm}} = 125\ \text{pixels/mm}$$

نريد أن تكون العدسة قادرة على تحليل 125 lines/mm على الأقلّ.

إنْ لم نستطع ذلك، فعلينا استعمال عددٍ أقلّ من عناصر الصّورة وذاكرة أصغر.

ملحوظة: إنّ زيادةَ قدرة تحليل العدسة مشكلةٌ أصعب في هذه الأيّام من حشر عناصر صورة أكثر في CCD.

متى تكون الصّورة واضحة المعالم؟

المثال 25-4 صورة فوتوغرافيّة مكبّرة

تبدو الصّورة الفوتوغرافية المكبّرة واضحة المعالم عند مسافات النّظر العادية إذا كانت النّقاط أو الخطوط محللة (مفرّقة) 10 dots/mm تقريبا. هل تبدو الصّورة المكبّرة 8 × 10-inch الملتقطة بوساطة الكاميرا المذكورة في (مثال 25-3) واضحة؟ ما أكبر حجم تستطيع أن تكبر هذه الصّورة 3000-pixel × 2000؟

النّهج: نفرض أنّ الخيال هو 3000 pixels × 2000 على CCD 16 × 24-mm كما في (المثال 25-3)، أو 125 pixels/mm. أي أنّنا نعمل صورة مكبرة 20 cm × 25 cm = 8 × 10-inch.

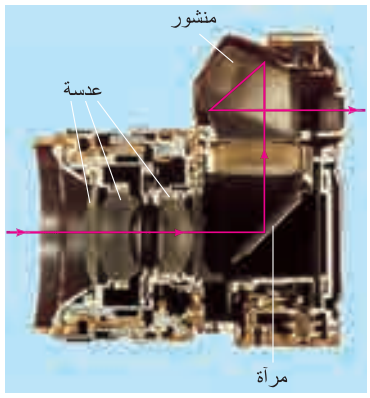
الحلّ: الجانب الأقصر في CCD هو 16 mm = 1.6 cm، وهذا الجانب من الصّورة هو 8 inches أو 20 cm. أي أنّ التكبير هو بمعامل (or 25 cm/2.4 cm ≈ 10×) 20 cm/1.6 cm = 12.5×. وكي نملأ ورقة بأبعاد 8 × 10-inch؛ نفرض أنّ التكبير 12.5×. أي أنّ عناصر الصّورة مكبرة 12.5×؛ أي أنّ عدد عناصر الصّورة 125/mm على CCD تصبح 10/mm على الورقة. لذا، فإنّ 8 × 10-inch على الورقة هي تقريبًا أعلى عدد من عناصر الصّورة للحصول على صورة واضحة المعالم، إذا شعرت أنّ 7 نقاط لكلّ mm هو عدد كافٍ، فيمكنك التكبير إلى نحو 11 × 14 inches.

تصنّف عدسات الكاميرات إلى: عاديّة، ومقرِّبة (تيلفوتو) واسعة الزّاوية وفقًا للبعد البؤريّ وحجم الفيلم. تغطّي **العدسة العادية** الفيلم بمجال رؤية يعادل الرؤية الطبيعية تقريبًا. إنّ العدسة العادية لفيلم 35-mm لها بعد بؤري يقرب من 50 mm*. **العدسات المقرِّبة (تيلفوتو)** تعمل كالمنظار لتكبير الخيال. ولها بعد بؤري أطول من العدسات العادية. وكما رأينا في (الفصل 23) (معادلة 23-9)، فإنّ طول الخيال، لبعد محدد للجسم، يتناسب مع بعد الخيال، وسيكون بعد الخيال أكبر لعدسة ذات بعد بؤري أطول للأجسام البعيدة، وأنّ طول الخيال يتناسب مع البعد البؤريّ تقريبًا. وهكذا، فإنّ عدسة مقربة بعدها البؤريّ 200-mm، وتستعمل في كاميرا 35-mm تنتج تكبيرًا 4× تكبير عدسة عادية 50-mm. أمّا **العدسة ذات الزّاوية الواسعة**، فلها بعدٌ بؤري أصغر من البعد البؤريّ للعدسة العادية. وعليه، فإنّ مجال الرّؤية يكون أوسع، وتبدو الأجسام أصغر. في حين يمكن تغيير البعد البؤريّ **لعدسة (التقريب) الزّوم** كي تتمكن من تصوير الأجسام البعيدة والقريبة.

ويمكن أن يكون للقمرات الرّقميّة "تزويم ضوئيّ" وهذا يعني أنّ العدسة تغيّر بعدها البؤريّ، وتحافظ على قدرة التحليل. أمّا "التّزويم الإلكترونيّ" أو "الرّقميّ" فيكبّر عناصر الصّورة، ولكن الصورة لاتكون واضحة تماما.

وهناك أنواع مختلفة من أنظمة الرّؤية موجودة في الكاميرات الآن. في كثير من الكاميرات، فإنّك تنظر خلال نافذة صغيرة فوق العدسة مباشرة كما في (الشّكل 25-1). في الكاميرا العاكسة ذات العدسة المنفردة (SLR)، فإنك تنظر، في الواقع، من خلال العدسة بوساطة مناشير ومرايا (الشّكل 25-7). هناك مرآة معلقة بزاوية 45° خلف العدسة، وتبتعد عن الطريق قبيل فتح المغلاق. إنّ الميزة الكبيرة لِـ SLR هي أنّك ترى تمامًا ما سينتج على الفيلم. وهذا أيضًا صحيح في شاشات LCD في الكاميرا الرّقميّة إذا كانت جيدة الصنع.

عدسات مقرِّبة وذات زاوية واسعة.



الشّكل 25-7 تبين الكاميرا العاكسة ذات العدسة المنفردة (SLR) كيفية النّظر إلى الخيال عبر العدسة بوساطة مرآة أو منشور متحرك

25-2 العين البشريّة؛ عدسات التّصحيح

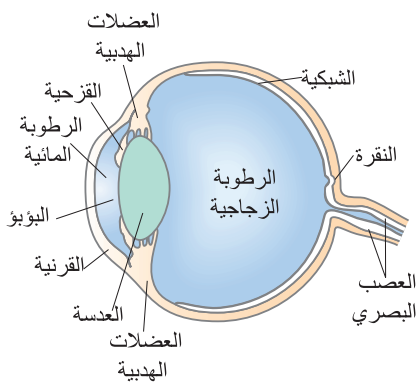
تطبيق الفيزياء
العين

تشبه العين البشريّة الكاميرا في تركيبها الأساسي (الشّكل 25-8)، لكنّها أكثر تعقيدًا. داخل العين مملوء بمادة شفافة تشبه الهلام (جِلّ) تُسَمّى الرّطوبة الزّجاجيّة ومعامل انكسارها $n = 1.337$. يدخل الضّوء هذا الحجم المغلق عبر القرنية والعدسة. ويوجد بين القرنية والعدسة سائل مائي: رطوبة مائية *aqua*، بمعامل انكسار $n = 1.336$. وهناك حاجز يُسَمّى **القزحية** (الجزء الملون من العين) يتكيّف آليّا لضبط كمية الضّوء التي تدخل العين، مثل الكاميرا. الفجوة في القرنية التي يمر الضّوء من خلالها (البؤبؤ) سوداء اللون كي لا يرتد منها الضّوء (إنّه **فجوة**). وقليل جدّا من الضّوء قد ينعكس من الجزء الداخلي للعين. **الشّبكيّة** وهي الجزء الذي يقوم بدور الفيلم، أو المِحَسّ في الكاميرا، تكون على السّطح الخلفي المنحني للعين، وتتكون من ترتيب معقد من الأعصاب والمستقبلات تعرف بالقضبان والمخاريط التي تحوّل طاقة الضّوء إلى إشارات كهربائية تنتقل عبر الأعصاب. أمّا إعادة تشكيل الصّورة من هذه المستقبلات الرقيقة كلّها فيتم عمله في الدّماغ بصورة رئيسة، على الرّغم من أنّ بعض التحليل قد يتم في شبكة الأعصاب المتصلة ببعضها في الشبكة ذاتها. وهناك في مركز الشّبكيّة مساحة صغيرة تُسَمّى **النقرة**، والتي يساوي قطرها 0.25 mm تقريبا، حيث تحزم المخاريط بحيث تكون متقاربة جدّا، وهنا توجد أوضح صورة، وأفضل تمييز للألوان.

وبخلاف الكاميرا، فإنّ العين لا تحتوي مغلاقا؛ فالعملية المكافئة تتم عن طريق النّظام العصبيّ الذي يحلل الإشارات لتكوين الأخيلة بمعدل 30 في الثانية تقريبًا. ويمكن مقارنة ذلك بالصّورة المتحركة، أو قمرات التلفزيون التي تعمل بالنقاط سلسلة من الصور الساكنة بمعدل 24 (في السّينما) أو 30 (التلفزيون الأمريكي) في الثانية. وعرضها السريع على الشاشة هو الذي يعطيها مظهر الحركة.

تعمل عدسة العين ($n = 1.386$ إلى 1.406) القليل بانحناء الأشعّة الضّوئيّة. ويتم معظم الانكسار عند السّطح الأمامي **للقرنية** ($n = 1.376$) وذلك عند التقائها بالهواء ($n = 1.0$) حيث تعمل العدسة على تعديل التركيز بصورة دقيقة عند مسافات مختلفة. ويتحقق ذلك بوساطة العضلات الهدبية (الشّكل 25-8)، التي تغير درجة انحناء العدسة بحيث يتغير البعد البؤريّ.

تشريح العين.



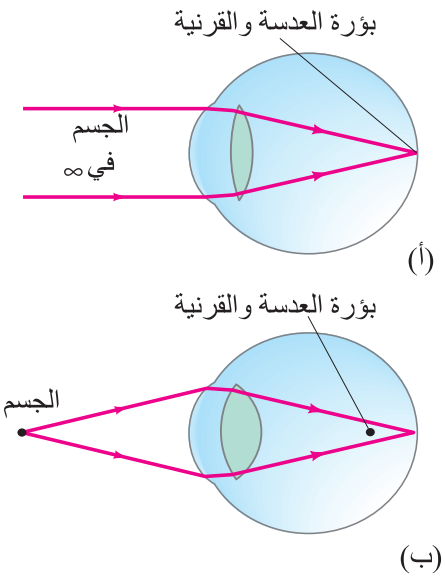
التّعديل البؤريّ للعين

* الكاميرا 35-mm تستعمل فيلمًا عرضة 35-mm. ويجب عدم الخلط بين هذا والبعد البؤريّ.

وللتركيز على جسمٍ بعيد؛ ترتخي العضلات الهدبية في العين، وتصبح العدسة رقيقة، كما هو مبيّن في (الشّكل 25-9أ)، وتتجمع الأشعّة المتوازية في البؤرة (على الشّبكيّة). وللتركيز على جسم قريب؛ تتقلص العضلات مما يؤدي لزيادة سمك مركز العدسة. (الشّكل 9-25ب). وبالتالي، يقل البعدّ البؤريّ. لذا، يمكن تجميع أخيلة الأجسام القريبة على الشّبكيّة، خلف البؤرة الجديدة. تُسَمّى عمليةُ التّعديل البؤريّ هذه **تكيّفَ العين**. أمّا أقربُ مسافة يمكن للعين التّركيز عليها بوضوح فتُسَمّى **النّقطةَ القريبة** للعين. وتكون للشباب عادة 25 cm، على الرّغم من أنّ الأطفال يستطيعون عادة التّركيز على أجسام قريبة بحدود. وكلّما زاد عمر الفرد، قلّت قدرته على التكيّف، وأصبحت النّقطة القريبة أبعد. والنّقطة البعيدة للشخص هي أبعد مسافة يمكن للشخص أن يرى الجسم بوضوح. ولأغراض معينة، من المفيد الحديث عن **عين طبيعية** (المتوسط للأفراد)، تعرف بالعين التي نقطتها القريبة 25 cm، ونقطتها البعيدة في اللانهاية. ولاختبار النّقطة القريبة لعينيك؛ ضع هذا الكتاب قربهما، ثم ابدأ بإبعاده حتى ترى الطباعة واضحة.

العين "الطبيعية" هي عين مثالية. كثير من الناس لهم عيون لا تتكيف ضمن المدى "الطبيعي" 25 cm إلى اللانهاية، أو أنّ فيها عيبا آخر. وهناك عيبان شائعان بين الناس هما قِصَرُ النّظر وطوله، اللذان يمكن تصحيحهما إلى حدّ بعيد بوساطة العدسات؛ إما باستعمال النظارات أو العدسات اللاصقة.

في حالة **قصر النّظر**، أو المويوبيا (الحَسَر)، تستطيع العين التّركيز على الأجسام القريبة فقط. إنّ النّقطة البعيدة ليست اللانهاية، بل هي مسافة ما أقصر. وكذلك لا ترى الأجسام البعيدة بوضوح. ويعزى ذلك إلى أنّ كرة العين تكون طويلة كثيرًا، وفي بعض الأحيان يكون انحناء القرنية كبيرًا. وفي أيّ من الحالتين، تتكون أخيلة الأجسام البعيدة أمام الشّبكيّة كعدسة مفرّقة؛ لأنها تسبب ابتعاد الأشعّة المتوازية، وتسمح لها أن تتركز على الشّبكيّة (الشّكل 25-10أ) وبذلك يُصحّح هذا العيب.

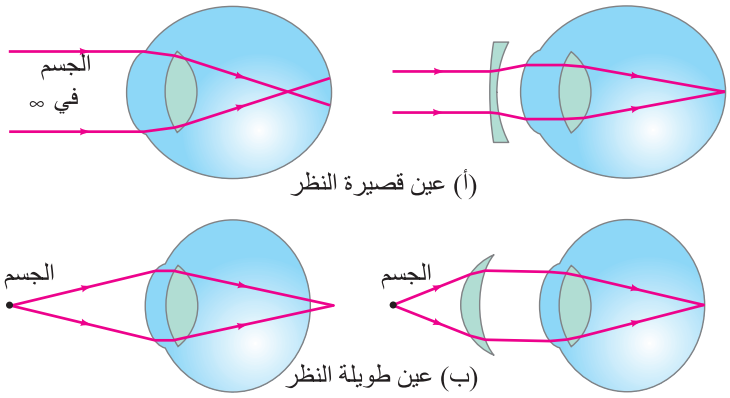


الشّكل 25-9. تكيّف العين الطّبيعيّة: (أ) العدسة مرتخية، مركزة في اللانهاية. (ب) يزداد سمك العدسة، مركزة على جسم قريب.

تطبيق الفيزياء

العدسات المصحّحة

قصر النّظر



الشّكل 25-10 تصحيح عيوب العين بالعدسات. (أ) عين حسيرة (قصيرة النّظر)، لا تركز على الأجسام البعيدة، وتُصَحَّح باستعمال عدسة مفرّقة. (ب) عين طويلة النّظر، لا تركز على الأجسام القريبة بوضوح، وتُصَحَّحُ بعدسات مجمّعة.

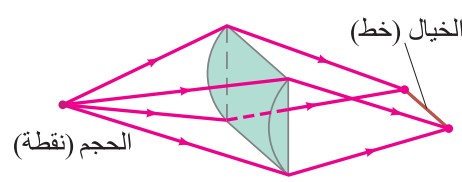
طول النّظر (مَدّ البصر)

أمّا في حالة **طول النّظر**، فإنّ العين لا تستطيع التّركيز على الأجسام القريبة. وعلى الرّغم من أنّ الأجسام البعيدة تُرى عادة بوضوح، فإنّ النّقطة القريبة تكون أبعد بعض الشيء من "الطبيعية" 25 cm، مما يجعل المطالعة أصعب. ينتج هذا العيب عادة من عين بيضوية قصيرة العمق أو (أحيانًا) عدم تحدّب كاف للقرنية. ويتم تصحيح هذا العيب باستعمال عدسة مجمّعة (لامّة). (الشّكل 10-25 ب)، يشبه بصر الشيخوخة طول النّظر الذي يُعزى إلى نقص القدرة على تكيّف العين عندما يتقدّم الفرد في السّن، وتتحرك النّقطة القريبة بعيدًا. لذا، فإنّ العدسات اللامّة تعدّل هذا العيب أيضًا.

اللانقطيّة،

تنتج **اللانقطيّة** عادةً من قرنية غير كروية، أو من العدسة بحيث تتركز الأجسام النقطيّة كخطوط قصيرة، مما يشوّه الخيال، وتكون كما لو أنّ القرنية كروية، ولكن بجزء أسطواني مركب عليها. كما هو مبين في (الشّكل 11-25)، فإنّ عدسة أسطوانية تركز نقطة بصورة خطّ موازٍ لمحورها. العين اللانقطيّة قد تجمع الأشعّة من مستوى واحد، مثل المستوى العموديّ، على بعد أصغر من الأشعّة في المستوى الأفقيّ. تُصحَّح اللانقطيّة، باستعمال عدسة أسطوانية معدّلة. العدسات المستعملة لقصر النّظر أو طوله، أو اللانقطيّة، تقطع عادة بسطوح متراكمة كروية وأسطوانة، كذلك يكون نصف قطر التكور للعدسة المصححة مختلفًا في المستويات المختلفة.

الشّكل 25-11 عدسة أسطوانية تكوّن خيالا خطيًا لجسم نقطيّ لأنها تجمع في مستوى واحد فقط.



المثال 5-25 العين طويلة النّظر

تعاني سهى من طول النّظر بأقرب نقطة للرؤية الواضحة 100 cm. ما قدرة العدسات المطلوبة كي تتمكن من قراءة الصحف الإخبارية عن بعد 25 cm؟ افرض أنّ العدسة قريبة من العين.

النّهج: عند وضع الجسم على بعد 25 cm من العدسة، يجب أن يكون الخيال على بعد 100 cm في الجانب نفسه من العدسة (بحيث يمكن للعين رؤيته)، وبذلك يكون الخيال وهميًّا. (الشّكل 25-12)، و $d_i = -100\ \text{cm}$ سيكون سالبًا. نستعمل معادلة العدسة الرقيقة (المعادلة 23-8) لتحديد البعد البؤريّ اللازم. وصفات المختصين بالإبصار تحدّد قدرة العدسة $P = 1/f$ (المعادلة 23-7) وتعطى بِـ الديوبتر. $(1\ \text{D} = 1\ \text{m}^{-1})$.

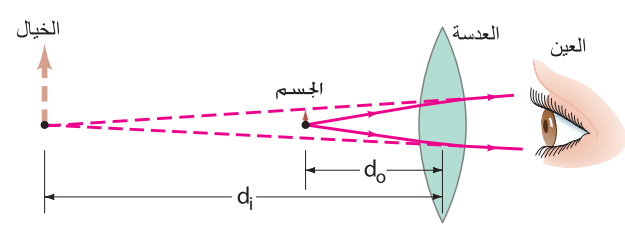
الحلّ: نعرف $d_o = 25\ \text{cm}$، و $d_i = -100\ \text{cm}$، معادلة العدسة الرقيقة تعطي

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{25\ \text{cm}} + \frac{1}{-100\ \text{cm}} = \frac{4-1}{100\ \text{cm}} = \frac{1}{33\ \text{cm}}$$

لذلك، فإنّ $f = 33\ \text{cm} = 0.33\ \text{m}$. قدرة العدسة $P = 1/f = +3.0\ \text{D}$.

تعني الإشارة الموجبة أنّ العدسة مُجمِّعة.

ملحوظة: نختار موضع الخيال بحيث تستطيع العين مشاهدته. تحتاج العدسة إلى وضع الخيال هناك، مع العلم بموقع الجسم (الصحيفة).



الشّكل 25-12. عدسة نظارة القراءة (المثال 25-5).

المثال 6-25 العين الحسيرة (قصيرة النّظر)

عين شخص حسيرة، أقرب نقطة إليها وأبعد نقطة عنها هما 12 cm، و 17 cm على الترتيب. (أ) ما قدرة العدسة اللازمة لهذا الشخص كي يرى الأجسام البعيدة بوضوح؟ (ب) ماذا ستكون عندها أقرب نقطة؟ افرض أنّ العدسة على بعد 2.0 cm من العين.

النّهج: لجسم بعيد $(d_o = \infty)$، يجب أن تضع العدسة الخيال عند النّقطة البعيدة للعين كما يبين (الشّكل 25-13 أ)، 17 cm أمام العدسة. يمكننا استعمال معادلة العدسة الرقيقة لإيجاد البعد البؤريّ لها، ثم نجد قدرتها. يمكن حساب النّقطة القريبة الجديدة (كما يبين الشّكل 25-13ب)، باستعمال معادلة العدسة الرقيقة مرة أخرى.

الحلّ: (أ) لجسم في اللانهاية $(d_o = \infty)$، يجب أن يكون الخيال أمام العدسة، وعلى بعد 17 cm من العين، أو $(17\ \text{cm} - 2\ \text{cm}) = 15\ \text{cm}$ من العدسة. وبالتالي، $d_i = -15\ \text{cm}$. ونستعمل معادلة العدسة الرقيقة لإيجاد البعد البؤريّ اللازم للعدسة.

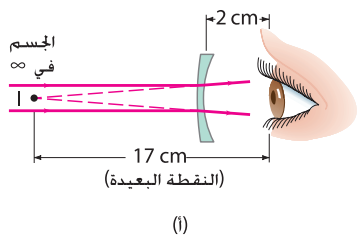
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-15\ \text{cm}} = -\frac{1}{15\ \text{cm}}$$

ولذلك، فإنّ $f = -15\ \text{cm} = -0.15\ \text{m}$. وعليه، فإنّ $P = 1/f = -6.7\ \text{D}$. تعني الإشارة السالبة أنّ العدسة يجب أن تكون مفرّقة للعدسة الحسيرة. (ب) النّقطة القريبة عند استعمال النظارات هي مكان وضع الجسم (d_o). تكوّن العدسة خيالا عن "النّقطة القريبة للعين المجردة"، أي 12 cm من العين. مكان الخيال هو $(12\ \text{cm} - 2\ \text{cm}) = 10\ \text{cm}$ أمام العدسة. لذا، فإنّ $d_i = -0.10\ \text{m}$. ومعادلة العدسة الرقيقة تعطينا

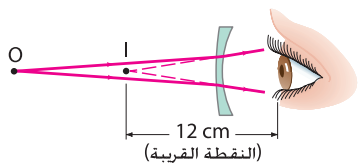
$$\frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} = -\frac{1}{0.15\ \text{m}} + \frac{1}{0.10\ \text{m}} = \frac{-2+3}{0.30\ \text{m}} = \frac{1}{0.30\ \text{m}}$$

أي أنّ $d_o = 30\ \text{cm}$، والذي يعني أنّ أقرب نقطة للرؤية الواضحة بوجود النظارات هي 30 cm أمام العدسة أو 32 cm من العين.

الشّكل 25-13. المثال 6-25.



(أ)



(ب)

العدسات اللاصقة

افرض أنّ عدسات لاصقة استخدمت في (المثال 25-6). بما أنّ العدسات اللاصقة توضع مباشرة على القرنية. لذا، علينا أن نطرح 2.0 cm من مسافات الخيالات.

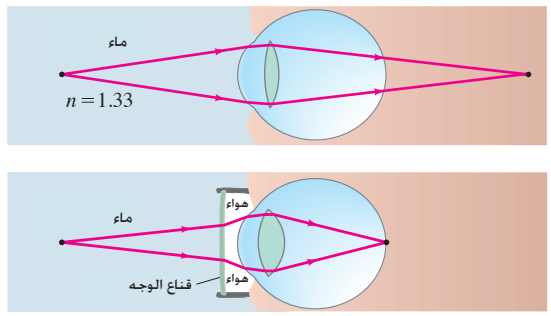
أي أنّه للجسم البعيد $d_i = f = -17\,\text{cm}$. وبالتالي $P = 1/f = -5.9\,\text{D}$. النّقطة القريبة سوف تكون 41 cm وعليه، نرى أنّ العدسات اللاصقة وعدسات النظارة سوف تتطلّب اختلافًا طفيفًا في القدرة أو البعد البؤريّ للعين نفسها نظرًا لاختلاف مواقعها من العين. ونرى أيضًا أنّ عدسات النظارة تعطي نقطة قريبة أفضل من العدسات اللاصقة.

تمرين B: ما قدرة العدسة اللاصقة اللازمة لعين كي ترى الأجسام البعيدة إذا كانت النّقطة البعيدة لها 25 cm؟

الرؤية (الإبصار) تحت الماء

تطبيق الفيزياء
الإبصار تحت الماء

عندما تكون عيناك تحت الماء، لا تظهر الأجسام البعيدة تحت الماء بوضوح؛ لأنّ الفرقَ في معاملي الانكسار عند السّطح الفاصل بين القرنية والماء قليلٌ جدًا: $n = 1.33$ للماء، 1.376 للقرنية. لذلك تنحني الأشعّة قليلا، وتتجمع بعيدًا خلف الشّبكيّة.
(الشّكل 25-14أ). ولكن، إذا استعملت نظارات واقية أو قناعًا للوجه، فإنّك تحتفظ بسطح فاصل بين الهواء والقرنية($n = 1.0$، $n = 1.376$ نسبيًا). وبذلك، يمكن تجميع الأشعّة. (الشّكل 25-14ب)

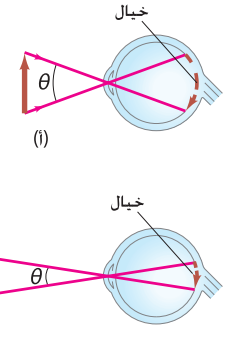


الشّكل 25-14.
(أ) تحت الماء، نرى خيالاً غير واضح؛ لأنّ الأشعّة تنكسر قليلا جدًا من الهواء. (ب) إذا استعملنا نظارات واقية فسيكون لدينا سطح فاصل بين الهواء والقرنية، وعندئذٍ نرى بوضوح.

3-25 العدسة المكبّرة

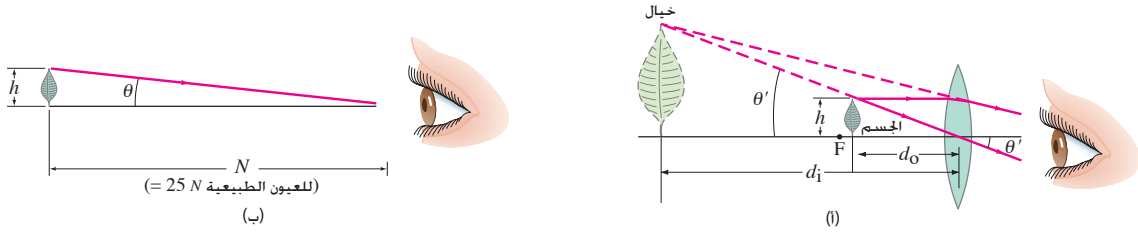
كثير من الجزء المتبقي من هذا الفصل سيتناول أدوات (أجهزة) ضوئية تستعمل للحصول على أخيلة مكبرة للأشياء. نناقش أولا **المكبّر البسيط**، أو **العدسة المكبّرة**، وهي ببساطة عدسة مُجمِّعة (انظر صورة افتتاحية الفصل).

كم سيبدو الجسم كبيرًا، وكم من التفاصيل سوف نرى عليه، يعتمد على حجم الخيال الذي يتكوّن على الشّبكيّة. وهذا بدوره يعتمد على الزّاوية التي يقابلها الجسم عند العين. فمثلا، لو أخذنا قطعة نقود معدنية على بعد 30 cm من العين، فإنّ طولها يبدو ضعفي طولها لو كانت على بعد 60 cm ؛ لأنّ الزّاوية التي تقابلها ضعفها أيضًا (الشّكل 25-15). وعندما نريد فحص التفاصيل في جسم ما، فإننا نضع الجسم قريبًا من العين بحيث يقابل زاوية كبيرة. ولكن باستطاعة أعيننا التّكيّف إلى حدّ ما (النّقطة القريبة)، وسوف نفرض المسافة العيارية
$N = 25\,\text{cm}$ كنقطة قريبة فيما يتبع. إنّ العدسة المكبّرة تسمح لنا بوضع الجسم أقرب إلى العين، وبالتالي يقابل زاوية أكبر. وكما يبين (الشّكل 16-25أ)، يوضع الجسم في البؤرة أو أقرب منها قليلا. عندها تنتج العدسة المجمعة خيالًا وهميًّا، والذي يجب أن يكون على بعد 25 cm من العين على الأقلّ إذا كان عليها رؤيته. أمّا إذا كانت العين مرتخية، فسيكون الخيال في اللانهاية. في حين يكون الجسم في البؤرة تمامًا. (هذا ما تقوم به تمامًا عندما "تركّز" النّظر على الجسم عندما تحرك العدسة المكبّرة.)



الشّكل 25-15 عند النّظر إلى الجسم نفسه عند مسافة أقرب، يكون الخيال على الشّبكيّة أكبر، ولذلك يبدو الجسم أكبر، وعندئذٍ يمكن رؤية تفاصيل أكثر. الزّاوية θ التي يقابلها الجسم في (أ) أكبر من تلك التي في (ب) ملحوظة: ليس هذا تخطيط طبيعي؛ لأننا نبين شعاعًا واحدًا فقط من كلّ نقطة.

الشّكل 25-16. انظر إلى الورقة (أ) خلال عدسة مكبرة. (ب) بالعين المجردة. تعدّل العين النّظر إلى النّقطة في الحالتين.



مقارنة الجزء (أ) بالجزء (ب) من (الشّكل 25-16)، حيث ينظر إلى الجسم نفسه عند النّقطة القريبة بالعين المجردة. وهذا يكشف أنّ الزّاوية التي يقابلها الجسم عند العين أكبر بكثير عند استعمال العدسة المكبّرة. **التكبير الزاوي** أو **قدرة التكبير**، M، للعدسة تعرف بخارج قسمة الزّاوية التي يقابلها الجسم مع استعمال العدسة على الزّاوية التي يقابلها الجسم بالعين المجرّدة، عندما يكون الجسم عند النّقطة القريبة للعين N (للعين الطبيعية: $N = 25\text{ cm}$):

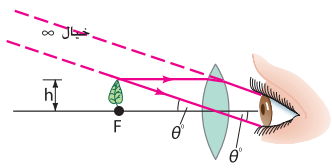
$$M = \frac{\theta'}{\theta} \qquad \textbf{(1-25)}$$

حيث θ، θ' المبيّنة في (الشّكل 25-16). يمكن كتابة M بدلالة البعد البؤريّ عند ملاحظة أنّ $\theta = h/N$ (الشّكل 25-16ب)، و $\theta' = h/d_o$ (الشّكل 25-16أ)، حيث h هو ارتفاع الجسم. ونفرض أنّ الزاويتين صغيرتان، وبذلك تكون الزاويتان θ، θ' مساويتين لجيبهما أو ظلّهما. إذا كانت العين مرتخية، فسيكون الخيال في اللانهاية، ويكون الجسم في البؤرة تمامًا؛ انظر إلى (الشّكل 25-17). وبالتالي، $d_o = f$، و$\theta' = h/f$. وهكذا

نفرض الزوايا صغيرة، ولذلك $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$ (بالراديان)

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{h/f}{h/N} = \frac{N}{f} \qquad [N = 25\text{ cm} \text{ للعين}؛ \infty \text{ العين تركز على}] \qquad \textbf{(2أ -25)}$$

تكبير المكبر البسيط.



الشّكل 25-17 والعين في حالة ارتخاء، يوضع الجسم في البؤرة، والخيال في اللانهاية. قارن مع (الشّكل 25-16أ) حيث الخيال عند النّقطة القريبة للعين.

ونرى أنّه كلّما كان البعد البؤريّ للعدسة أصغر، كان التكبير أكبر.*

يمكن زيادة التكبير لعدسة ما قليلًا بتحريك العدسة، وتكيف العين بحيث تركز النّظر على الخيال عند النّقطة القريبة للعين. في هذه الحالة، $d_i = -N$ (انظر الشّكل 25-16أ) إذا كانت العين قريبة من المكبّر. عندها تُعطى مسافة الجسم بـ d_o

$$\frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} + \frac{1}{N}$$

نرى من هذه المعادلة أنّ $d_o = fN/(f + N) < f$، كما هو مبيّن في (الشّكل 25-16أ)، لأنّ $N/(f + N)$ يجب أن تكون أقلّ من واحد. وباعتبار $\theta' = h/d_o$ يكون التكبير

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{h/d_o}{h/N} = \frac{N}{d_o} = N\left(\frac{1}{f} + \frac{1}{N}\right)$$

أو

$$M = \frac{N}{f} + 1 \qquad [\text{العين مركزة على } \textbf{النقطة القريبة}،\ N = 25\text{ cm}] \qquad \textbf{(2ب -25)}$$

نرى أنّ التكبير أكبر بقليلٍ عندما تركز العين على نقطتها القريبة وليست مرتخية.

المثال 25-7 قرّب عدسة (الجواهري)

عدسة مجمعة بعدها البؤريّ 8-cm تستعمل كعدسة جواهري، وهي عدسة مكبرة. جدُ بالتقريب: (أ) التكبير عندما تكون العين في حالة ارتخاء. (ب) التكبير إذا تمّ تركيز العين على نقطتها القريبة $N = 25\text{ cm}$.

النّهج: يعطى التكبير عندما ترتخي العين (بالمعادلة 25-2أ). وعند تركيز العين على النّقطة القريبة، نستعمل (المعادلة 25-2ب)، ونفرض أنّ العدسة قريبة من العين.

الحلّ: (أ) عند تركيز العين المرتخية على اللانهاية

$$M = \frac{N}{f} = \frac{25\text{ cm}}{8\text{ cm}} \approx 3\times$$

(ب) التكبير عندما تركز العين على نقطتها القريبة ($N = 25\text{ cm}$)، والعدسة قريبة من العين، هو

$$M = 1 + \frac{N}{f} = 1 + \frac{25}{8} \approx 4\times$$

* مكبرات العدسة المنفردة البسيطة محدودة بـ 2 أو 3× أضعاف بسبب التشويه الناتج من الزّيغ الكرويّ (البند 25-6).

4-25 التلسكوبات

يستخدم التّلسكوب لتكبير الأجسام البعيدة جدّا. في معظم الحالات، يمكن اعتبار الجسم موجودًا في اللانهاية.

وعلى الرّغم من أنّ جاليليو لم يكتشف التلسكوب*، إلا أنّه طوّره، وأصبح آلةً مفيدةً ومستعملةً بكثرة. إضافة إلى أنّه أول من تفحَّص السموات به (الشّكل 25-18)، وتوصَّل به إلى اكتشافات هزّت العالم مثل: أقمار المشتري، وأطوار الزهرة، والبقع الشّمسيّة، وتركيب سطح القمر. كما اكتشف أنّ درب التبّانة مكوَّن من عدد هائل من النجوم المنفردة، وغير ذلك.

هناك عدة أنواع من **التلسكوبات الفلكية**، منها النوع الكاسر (من الانكسار) الدارج الذي يدعى أحيانًا بـ **الكبلري (Keplerian)**. ويحتوي هذا النوع عدستين لامتين مثبتتين عند أنبوب طويل، كما في (الشّكل 25-19). تسمّى العدسةُ القريبةُ من الجسم **العدسة الشّيئيّة** (بعدها البؤريّ f_o) وتكوّن خيالا حقيقيّا I_1 للجسم البعيد في مستواها البؤريّ (بعدها البؤريّ F_o) (أو قريبًا منها إن لم يكن الجسم في اللانهاية). وعلى الرّغم من أنّ هذا الخيال I_1 أصغر من الجسم الأصلي، فإنّه يقابل زاوية أكبر، وقريب جدًّا من العدسة الثانية التي تُسَمّى **العينيّة** (بعدها البؤريّ f_e)، والتي تعمل مكبرًا. أي أنّ العينيّة تُكبِّر الخيال الناتج من الشّيئيّة ليُنتج خيال مكبر، I_2، يكون وهميّا ومقلوبًا. إذا كانت عين الناظر مرتخية، فإنّ العينيّة تُضبطُ بحيث يتكون I_2 في اللانهاية. عندئذٍ، يكون الخيال الحقيقيّ I_1 عند البؤرة F'_e للعينية. والبعد بين العدسيتين هو $f_o + f_e$ لجسم في اللانهاية. ولحساب التكبير الكلّيّ لهذا التلسكوب، نلاحظ أنّ الزّاوية التي يقابلها الجسم عند النّظر إليه بالعين المجردة هي الزّاوية θ التي يقابلها الجسم عند الشّيئيّة. ومن (الشّكل 25-19)، نستطيع رؤية أنّ $\theta \approx h/f_o$، حيث h هو طول الخيال I_1، ونفرض أنّ الزّاوية θ صغيرة بحيث $\tan\theta \approx \theta$. لاحظ أيضًا أنّ أسمك شعاع مرسوم في (الشّكل 25-19) موازٍ للمحور قبل أن يصطدم بالعينيّة، ولذلك ينكسر مارًّا ببؤرة العدسة العينيّة F_e عند الطرف البعيد. وهكذا $\theta' \approx h/f_e$، وقوة التكبير الكلية (التكبير الزاوي) لهذا التلسكوب هي

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{(h/f_e)}{(h/f_o)} = -\frac{f_o}{f_e} \qquad (3\text{-}25)$$

حيث أدخلنا إشارة سالبة لتعني أنّ الخيال مقلوب. ولتحقيق تكبير كبير؛ يجب أن يكون البعدُ البؤريّ للشيئية كبيرًا وللعينية صغيرًا.

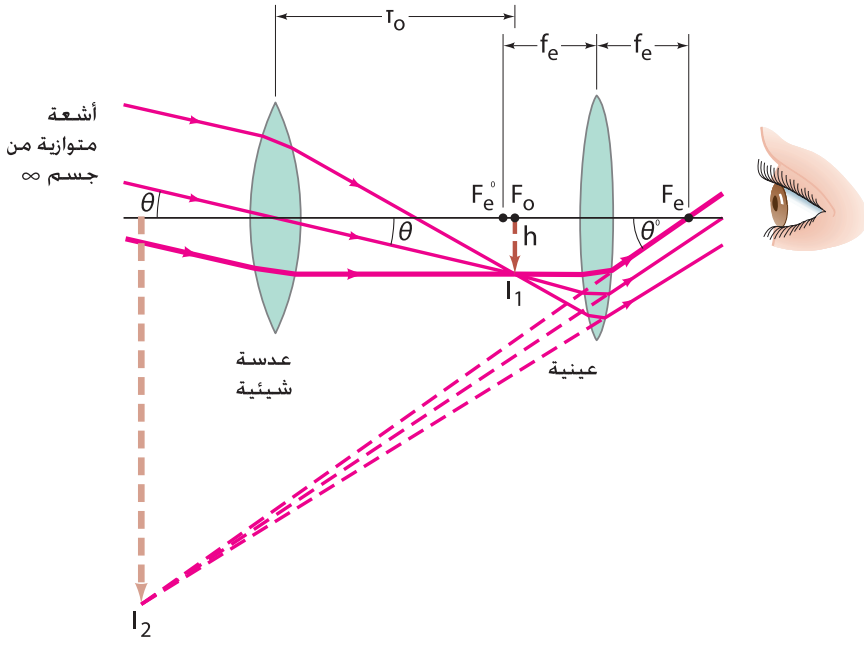
تكبير المنظار

* أنجز جاليليو تلسكوبه الأول عام 1609 بعد أن سمع بوجوده في هولندا. لقد كان تكبير أول تلسكوب ثلاث مرات أو أربع. لكن جاليليو سرعان ما صنع تلسكوبًا قوة تكبيره 30 مرة. ويعود أول تلسكوب هولندي إلى عام 1604، على الرّغم من وجود مرجع يذكر أنّه كان نسخة عن تلسكوب إيطالي صُنع في عام 1590. لقد أعطى كيبلر (انظر الفصل الخامس) وصفا شعاعيّا (في 1611) لتلسكوب كيبلر الذي سمّي نسبة له، حيث وصفه، ولكنه لم يقم بصنعه.

(أ)

(ب)

الشّكل 25-18 (أ) العدسة الشّيئيّة (مثبتة الآن في إطار عاجيّ) حقق جاليليو بوساطته اكتشافات هزت العالم، من ضمنها أقمار المشتري. (ب) التلسكوبات اللاحقة التي صنعها جاليليو.



الشّكل 25-19. التلسكوب (الكاسر). ضوء متواز من نقطة على جسم بعيد $(d_o = \infty)$ نتج في بؤرة العدسة الشّيئيّة. هذا الخيال (I_1) يكبر عن طريق العدسة العينيّة ليكون الخيال النهائي I_2. هناك شعاعان فقط يظهران في دخولهما للشيئية هما الشّعاعان العياريان (2 و3) في (الشّكل 23-34).

المثال 25-8 تكبير التّلسكوب

أضخم تلسكوب كاسر ضوئيّ في العالم موجود في مرصد يركيس في وسكنسون، (الشّكل 25-20). وهو منظار الـ (40-inch)، أي أنّ قطر الشّيئيّة 40 in أو 102 cm. البعد البؤريّ للشيئية هو 19 m، والبعد البؤريّ للعينية 10 cm. احسب: (أ) قوة التكبير الكلية لهذا التلسكوب. (ب) طول هذا التلسكوب على نحو تقريبي.

النّهج: (المعادلة 25-3) تعطي التكبير. طول المنظار هو البعد بين العدستين.

الحلّ: (أ) من (المعادلة 25-3) نجد أنّ

$$M = -\frac{f_o}{f_e} = -\frac{19\text{ m}}{0.10\text{ m}} = -190\times$$

(ب) للعين المرتخية، الخيال I_1 عند البؤرة لكلتا العدستين العينيّة والشّيئيّة. وهكذا تكون المسافة بين العدستين $f_o + f_e \approx 19\text{ m}$، وهي طول التلسكوب بصورة أساسية.

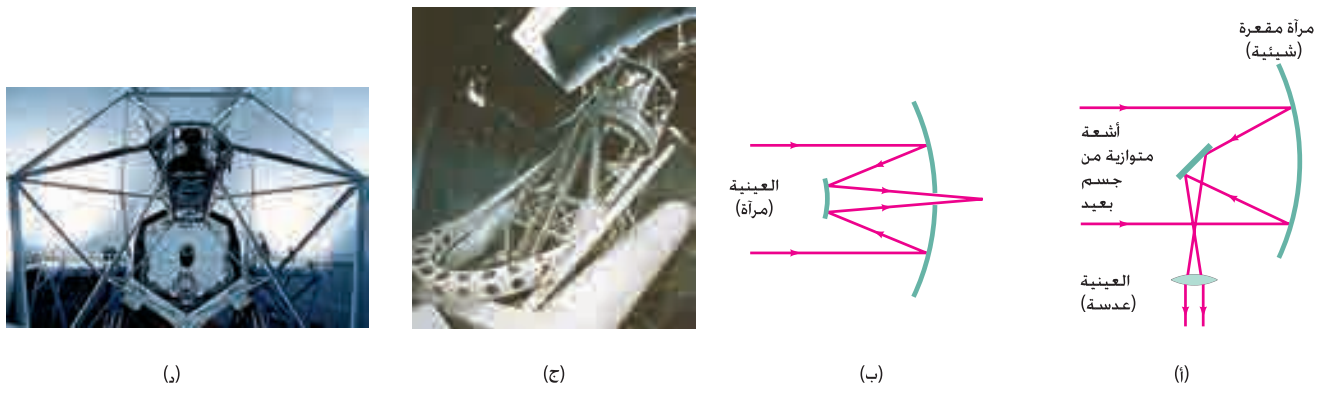
تمرين C: تلسكوب قوة تكبيره 40×، البعد البؤريّ للعينية 1.2-cm. ما البعد البؤريّ للعدسة الشّيئيّة؟

الشّكل 25-20 صُنع هذا التلسكوب الكاسر الكبير في عام 1897 في مرصد يركيس في وسكنسون. العدسة الشّيئيّة قطرها (40 inches) 102 cm وأنبوب المنظار طوله نحو 19 m. (مثال 25-8).

كي تنتج للتلسكوب الفلكي أخيلة واضحة للنجوم البعيدة، يجب أن تكون العدسة الشّيئيّة واسعة لتسمح بدخول أكبر كمية ممكنة من الضّوء. في الواقع، إنَّ قطرَ العدسة الشّيئيّة (وبالتالي قدرتها على تجميع الأشعّة) عاملٌ مهمٌّ في التلسكوب الفلكي. ولهذا، تُسَمّى التلسكوبات الكبيرة استنادًا إلى قطر الشّيئيّة فيها (مثل تلسكوب كيك ذي الـ 10-meter في هاواي). إنّ بناء العدسات الكبيرة وصقلها عملية صعبة جدّا. لذا، فالتلسكوبات الكبيرة هي تلسكوبات عاكسة تستعمل مرآة مقعرة كشيئية، (الشّكل 25-21). المرآة لها سطح واحد بحاجة إلى صقل، ويمكن أن تسند إلى سطحها كلّه† (العدسة الكبيرة، والتي تسند إلى حوافها، قد تتشقق تحت تأثير وزنها). وعادة يمكن إزالة العينيّة (انظر الشّكل 25-21) بحيث يمكن تسجيل الخيال الحقيقي الذي تكونه الشّيئيّة على فيلم أو مِجَسّ CCD (البند 25-1).

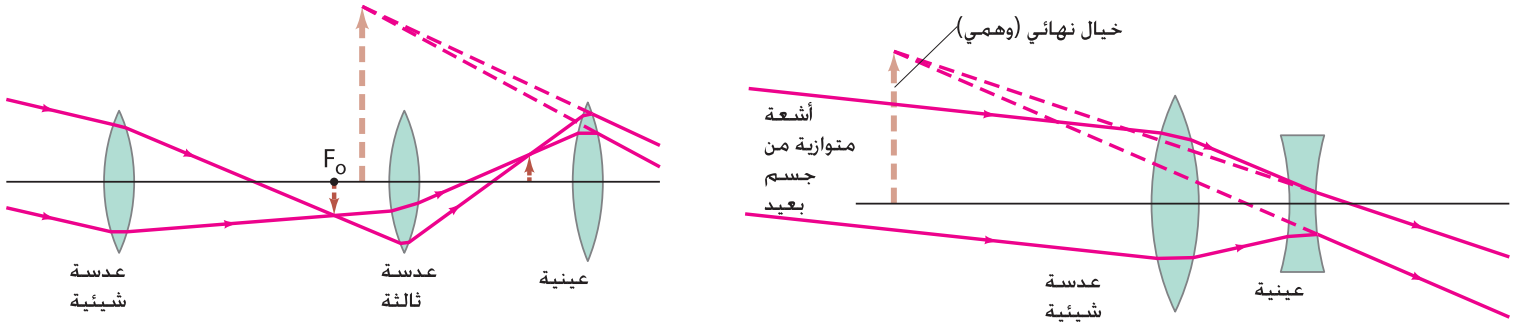
التلسكوبات العاكسة

* هناك ميزة أخرى للمرايا وهي أنّها لا تبدي زيغًا لونيًّا؛ لأنّ الضّوء لا يمر خلالها. ويمكن صقلها في شكل قطع مكافئ لتعديل الزّيغ الكرويّ. (البند 25-6). ولقد كان العالِم نيوتن أول من اقترح التلسكوب العاكس.



(أ) (ب) (ج) (د)

الشّكل 25-21. يمكن استخدام مرآةٍ مقعّرةٍ كشيئيّة للتلسكوب الفلكي. أمّا (أ) عدسة أو (ب) مرآة يمكن استعمالها كعينيّة. الترتيب (أ) يُدعى ترتيب نيوتن. (ب) ترتيب كاسغراني. وهناك ترتيبات أخرى ممكنة. (ج) تلسكوب هالي ذو الـ 200-inch (قطر المرآة) على جبل بالومار في كاليفورنيا. (د) تلسكوب كيك ذو الـ 10-meter في هاواي. وهذا التلسكوب يجمع 36 مرآة 1.8-meter ذات 6 جوانب في عاكس واحد كبير قطره 10 m.



الشّكل 25-22. التلسكوبات الفلكية التي تنتج خيالا معتدلا: (أ) جاليلي؛ (ب) نظارة جاسوس أو عدسة الحقل.

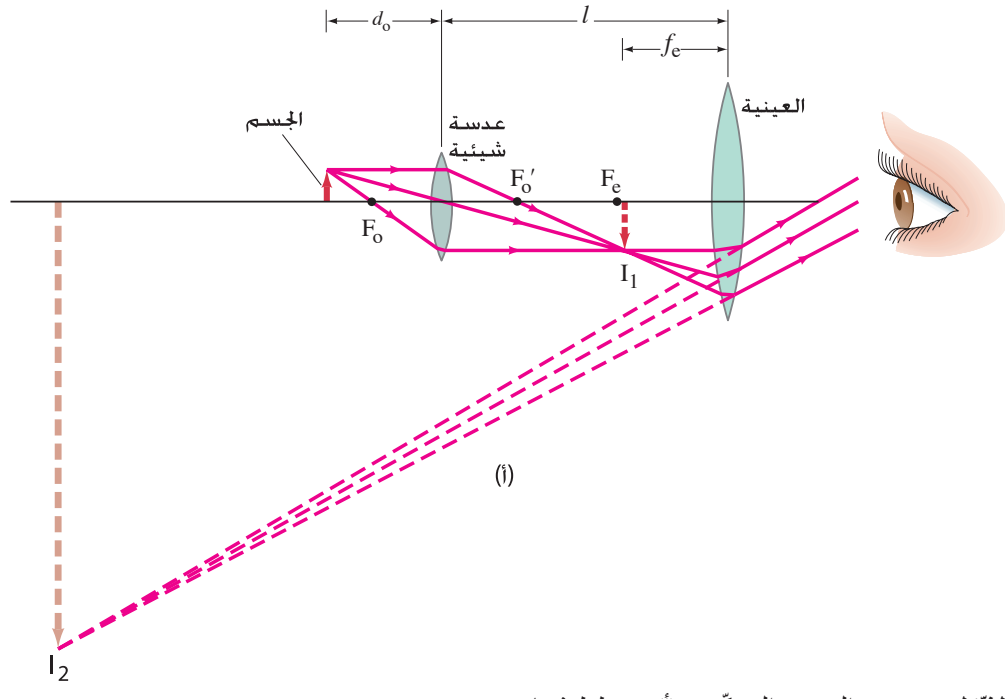
إنّ **التلسكوب الفلكي** لرؤية الأجسام على الأرض، يجب أن يزوّدنا بخيالٍ معتدل؛ رؤية الأجسام العادية مقلوبة سيكون صعبًا. (أقلّ أهمية لمراقبة النجوم). هناك تصميمان في (الشّكل 25-22) هما: 1- **جاليلي**، الذي استعمله جاليليو لاكتشافاته الفلكية الكبيرة، وله عدسة مفرّقة كعدسة عينية تعترض الأشعّة المتجمعة من العدسة الشّيئيّة قبل أن تصل نقطة التجمع، وتعمل للحصول على خيال وهميّ معتدل، (الشّكل 25-22). هذا التصميم يستخدم عادة في نظارات المسارح، حيث يكون الأنبوب فيه صغيرًا، ومجال الرؤية يكون صغيرًا أيضًا. 2- التّصميم المبين في (الشّكل 25-22 ب)، الذي يُسَمّى عادةً **نظارات الجواسيس**. وهذا النوع يستعمل عدسة ثالثة محدّبة تعمل كي يكون الخيال معتدلا. ويجب أن تكون نظارة الحاسوب فيه طويلة. أمّا أكثر تصميم عملي في هذه الأيام فهو التلسكوب الثنائي ذو المنشور المبيّن في (الشّكل 25-23). الشّيئيّة والعينيّة فيه عدستان مجمعتان. تعكس المناشير الأشعّة الضّوئيّة بوساطة الانعكاس الداخلي الكلي، ويقلّل الحجم الفيزيائي للتلسكوب، ويؤدي إلى الحصول على خيال معتدل. أحد المنشورين يعيد قلب الخيال في المستوى العموديّ، والآخر في المستوى الأفقي.

* 5-25 المجهر المركّب

تطبيق الفيزياء
المجاهر.

المجهر المركّب **كالتلسكوب**، له عدسة شيئية وأخرى عينية، (الشّكل 25-23). أمّا تصميمه فيختلف عن تصميم التلسكوب؛ لأنّ المجهر يُستعمل لمشاهدة الأجسام القريبة جدًّا، لذلك يكون بعد الجسم صغيرًا جدّا. يوضع الجسم قليلًا خارج البؤرة للشيئية كما في (الشّكل 25-23 أ). الخيال I_1 الذي تكونه الشّيئيّة حقيقيّ وبعيد عن العدسة بصورة كافية، ومكبر كثيرًا. يكبّر هذا الخيال بوساطة العينيّة إلى خيال وهميّ كبير جدًّا، I_2، حيث يرى بالعين مقلوبًا.

(ب)



الشّكل 25-23. المجهر المركّب: (أ) مخطط شعاعيّ.
(ب) صورة (الإضاءة تأتي من أسفل اليمين، ثم إلى الأعلى خلال الشّريحة التي تحتوي الجسم).

التكبير الكلّيّ للمجهر هو حاصل ضرب التكبيرين الناتجين من العدستين. الخيال I_1 الذي ينتج من الشّيئيّة هو بمعامل m_o أكبر من الجسم نفسه. ومن (الشّكل 25-23أ) و (المعادلة 23-9) لتكبير عدسة بسيطة، نجد أنّ

$$m_o = \frac{h_i}{h_o} = \frac{d_i}{d_o} = \frac{l - f_e}{d_o} \qquad \textbf{(25-4)}$$

حيث d_o، d_i هما بعدًا الجسم والخيال عن العدسة الشّيئيّة. أمّا l فهي المسافة بين العدستين (يساوي طول أنبوبة المجهر). وأهملنا إشارة السالب في (المعادلة 23-9) التي تشير فقط إلى أنّ الخيال مقلوب. نضع $d_i = l - f_e$، وهذا صحيح فقط إذا كانت العين مرتخية، بحيث إنّ الخيال I_1 موجود عند البؤرة F_e للعينية. تعمل العينيّة عمل المجهر البسيط. وإذا فرضنا أنّ العين مرتخية، فإنّ التكبير الزاوي للعينية M_e يكون (من المعادلة 25-2أ).

$$M_e = \frac{N}{f_e} \qquad \textbf{(5-25)}$$

حيث $N = 25\ \text{cm}$ هي النّقطة القريبة للعين الطبيعية. وبما أنّ العينيّة تضخّم الخيال الناتج من الشّيئيّة، فإنّ التكبير الزاوي M هو حاصل ضرب التكبير الخطي للشيئية، m_o، في التكبير الزاوي، M_e، للعدسة العينيّة (المعادلتان 25-4، و 25-5):

التّكبير في المجهر

$$M = M_e m_o = \left(\frac{N}{f_e}\right)\left(\frac{l - f_e}{d_o}\right) \qquad \textbf{(25-6أ)}$$

$$\approx \frac{Nl}{f_e f_o} \qquad [f_o \text{ and } f_e \ll l] \qquad \textbf{(6-52ب)}$$

يكون التقريب في (المعادلة 25-6 ب) دقيقًا عندما يكون f_e، و f_o صغيرين بالنسبة إلى l. ولذلك، $l - f_e \approx l$، و $d_o \approx f_o$ (الشّكل 25-23أ). هذا تقريب جيّد في التكبيرات الكبيرة، والتي تعمل عندما يكون f_o، و f_e صغيرين جدّا (في مقام المعادلة 25-6 ب). ولعمل عدسات ذات بعد بؤري صغير تعمل جيدًا كعدسة شيئية، أي عدسات مركبة تحتوي على عدة عناصر؛ يجب استعمالها كي نتجنب الزّيغ الحقيقي، كما سيناقش في البند التالي.

المثال 25-9 **تكبير التّلسكوب**

يتكون المجهر المركّب من عينية $10\times$ وشيئية $50\times$، البعد بينهما 17.0 cm. احسب: (أ) التكبير الكلّيّ. (ب) البعد البؤريّ لكلّ عدسة. (ج) موقع الجسم عندما يكون الخيال في البؤرة إذا كانت العين مرتخية. افترض عينًا طبيعية. ولذلك، $N = 25\ \text{cm}$.

النّهج: التكبير الكلّيّ هو حاصل ضرب تكبير العينيّة في تكبير الشّيئيّة. البعد البؤريّ للعينية يمكن إيجاده من (المعادلة 25-2أ، أو المعادلة 25-5)، لتكبير مجهر بسيط. أمّا للعدسة الشّيئيّة، فمن الأسهل إيجاد d_o (الفرع ج) باستعمل (المعادلة 25-4) قبل أن نجد f_o.

الحلّ: (أ) التكبير الكلّيّ هو $500\times = (10\times)(50\times)$.

(ب) البعد البؤريّ للعينية هو (المعادلة 25 - 5)

$$f_e = N/M_e = 25\ \text{cm}/10 = 2.5\ \text{cm}$$

ثم نحل (المعادلة 25-4) لإيجاد قيمة d_o ثم نجد

$$d_o = \frac{l - f_e}{m_o} = \frac{(17.0\ \text{cm} - 2.5\ \text{cm})}{50} = 0.29\ \text{cm}$$

من معادلة العدسة الرقيقة للشيئية مع $d_i = l - f_e = 14.5\ \text{cm}$ (انظر الشّكل 25-23أ)

$$\frac{1}{f_o} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{0.29\ \text{cm}} + \frac{1}{14.5\ \text{cm}} = 3.52\ \text{cm}^{-1}$$

لذلك، $f_o = 1/(3.52\ \text{cm}^{-1}) = 0.28\ \text{cm}$

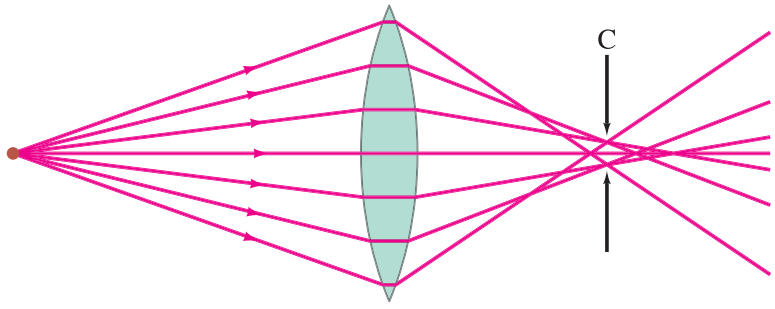
(ج) لقد حسبنا $d_o = 0.29\ \text{cm}$، وهو قريب جدّا من f_o.

* 6-25 عيوب العدسات والمرايا

طوّرنا في (الفصل 23) نظرية تكوين الأخيلة بوساطة عدسة رقيقة. فوجدنا، على سبيل المثال، أنّ الأشعّة كلّها من نقطة واحدة على جسمٍ ما سوف تتجمع في نقطةٍ واحدةٍ كنقطة خيال. تعتمد هذه النّتيجة ونتائج أخرى على بعض التقريبات، كصنع الأشعّة جميعها زوايا صغيرة فيما بينها، ونستطيع استعمال $\sin\theta \approx \theta$. وبسبب هذه التقريبات، نتوقع انحرافات عن النّظرية البسيطة، بما يدعى **عيوب العدسات**. هناك أنواع مختلفة من العيوب، وسنناقش كلّ واحد منها على انفراد، ولكن يمكن تقديمها في الوقت نفسه.

الزّيغ الكرويّ

افترض جسمًا عند أيّ نقطة (حتى في اللانهاية) على محور عدسة. تتجمع الأشعّة من هذه النّقطة التي تمر خلال المناطق البعيدة من العدسة في نقطة تختلف عن نقطة تجمع الأشعّة التي تمر في مركز العدسة، وهذا ما يُعرف **بالزّيغ الكرويّ**، وهو مبيّن على نحو مبالغ فيه في (الشّكل 25-24).



الشّكل 25-24. الزّيغ الكرويّ (بصورة مبالغ فيها). الدائرة أقلّ تشويشًا عند C.

وبالتالي، فإنّ الخيال المرئيّ على قطعة من فيلم (مثلا) سوف لا يكون نقطة، بل دائرة صغيرة من الضّوء. لو وضع الفيلم عند النّقطة C، كما يُشار إليه، فسيكون للدائرة أقلّ قطر، وندعوه بدائرة أقلّ تشويشًا. إنّ الزّيغ الكرويّ موجود طالما نستعمل السّطوح الكرويّة. ويمكن تصحيحها لو استخدمنا سطوحًا غير كروية للعدسة. ومن الجدير بالذكر أنّ قطع مثل هذه السّطوح وصقلها صعب ومكلف. ولكن يمكن تقليل ذلك بالسّطوح الكرويّة باختيار التكورات بحيث تحدث مقادير متساوية من الانحناءات على سطحي العدسة، ويمكن تصميم مثل هذه العدسة لبعد واحد للجسم فقط. إنّ الزّيغ الكرويّ عادة (نعني أننا قللناه إلى حدّ بعيد) باستعمال عدة عدسات كمجموعة، وباستعمال الجزء المركزي فقط من هذه العدسات.

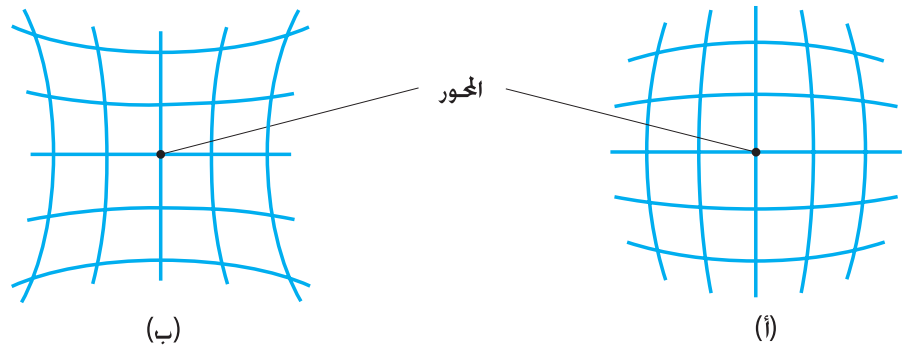
زيغانات غير محورية

وبالنسبة إلى نقاط غير محورية، تحصل زيغانات إضافية. الأشعّة المارة من مناطق مختلفة من العدسة تسبب انتشارًا للخيال يكون غير دائري. وهناك أثران هما: **زيغٌ هاليٌ** (لأنّ خيال النّقطة يظهر كالنجم المذنب وليس كدائرة) و**لا نقطيّة غير محورية***. علاوة على ذلك، فإنّ نقاط الخيال لأجسام خارج المحور وعلى البعد نفسه من العدسة لا تقع على مستوى منبسط، بل على سطح منحنٍ؛ أي أنّ المستوى البؤريّ غير منبسط. (وهذا هو المتوقع؛ لأنّ النقاط على مستوى منبسط، مثل فيلم في كاميرا، ليست على البعد نفسه من العدسة). ويعرف هذا العيب **بانحناء المجال**، وهو مشكلة في الكاميرات والأدوات الأخرى حيث يوضع الفيلم في مستوى منبسط. وفي العين، على أيّ حال، يعدّل هذا الأثر لأنّ الشّبكيّة فيها منحنية.

وهناك عيب آخر يعرف بـ **التّشوّه**، وهو نتيجة اختلاف التكبير عند مسافات مختلفة عن محور العدسة. وهكذا، فإنّ جسما بصورة خط مستقيم على مسافة من محور العدسة يمكن أن يكون خيالا منحنيًا. إنّ شبكة مربعة من الخطوط يمكن أن تتشوه تنتج "تشوّها برميليا" أو "تشوّه مخدة دبوسية" (الشّكل 25-25). وهذا التّشوّه الأخير شائع في العدسات ذات الزّاوية الواسعة.

تحدث الزّيغانات السابقة كلّها للضوء وحيد اللون، ولذلك تدعى الزّيغانات وحيدة اللون. الضّوء العادي ليس وحيد اللون، وسوف يكون هناك زيغ لونيّ. يحدث الزّيغ بسبب التحليل اللونيّ – اختلاف معامل انكسار المواد الشفافة مع اختلاف طول الموجة (البند 24-4). فمثلا، ينحني الضّوء الأزرق أكثر من انحناء الضّوء الأحمر بوساطة الزجاج.

* على الرغم من أنّ الأثر هو نفسه مثل اللانقطيّة في العين (البند 25-2)، ولكن السبب مختلف. اللانقطيّة غير المحورية ليست مشكلة في العين؛ لأنّ الأشياء ترى واضحة فقط على النقرة، على محور العدسة.



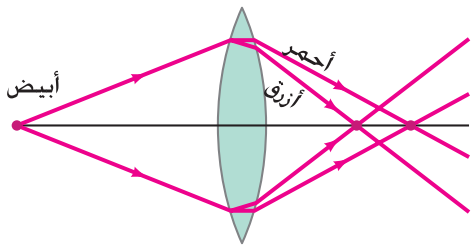
الشّكل 25-25 التّشوّه: يمكن أن تجد العدسات خيالًا لشبكة من الخطوط المتعامدة لإنتاج (أ) تشوّه برميلي أو (ب) تشوّه مخدة دبوسية. هذه التّشوّهات يمكن رؤيتها في (الشّكل 25-29 د).

ولذلك، لو سقط ضوءٌ أبيض على عدسة، فإنّ الألوان المختلفة سوف تتجمع في نقاط مختلفة، (الشّكل 25-26)، وسوف يكون هناك هُدُبٌ ملونة في الخيال. الزّيغ اللونيّ يمكن حذفه لأيّ لونين (وينخفض بصورة كبيرة للألوان الأخرى مجتمعة) باستعمال عدستين مصنوعتين من مادتين مختلفتين بمعاملي انكسار مختلفين، وكذلك قدرة تحليل مختلفة. وفي العادة، تكون إحدى العدستين مجمّعة والأخرى مفرّقة، وتلصقان عادة معًا (الشّكل 25-27). ويُسَمّى مثل هذا الجمع للعدسات **مزدوجةً لا لونيّة** (أو عدسة مصححة لونيًا).

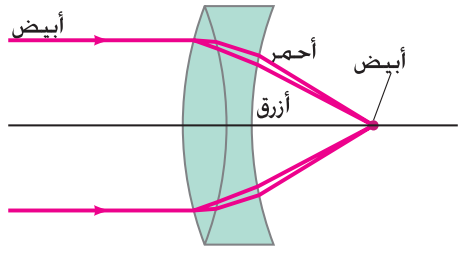
من غير الممكن تصحيح الزّيغانات كلّها. ولكن يمكن التقليل من أثرهما بجمع عدستين أو أكثر معًا. العدسات ذات الجودة العالية والمستعملة في الكاميرات، والمجاهر، والأدوات الأخرى هي **عدسات مركبة** مكونة من عدة عدسات بسيطة (يرجع لها **كعناصر**). وقد تحتوي عدسة الكاميرا ذات الجودة العالية على 6 إلى 8 عناصر (أو أكثر). وللتبسيط، سنشير إلى العدسات في الأشكال كما لو أنها عدسات بسيطة.

العين البشرية كذلك عرضة للزيغانات، لكنها قليلة. فالزّيغان الكرويّ مثلًا يكون قليلًا لأنّ: 1- انحناء القرنية يكون عند الأطراف أقلّ ممّا هو عند المركز. 2- كثافة العدسة عند الأطراف أقلّ منها عند المركز. وكلا الأثرين يسبب انحناء الأشعّة عند الأطراف بصورة أقلّ. لذا، يقلّ الزّيغ الكرويّ. أما الزّيغ اللونيّ فيصحح لأنّ العدسة تمتص الموجات القصيرة بصورة ملموسة، والشّبكيّة أقلّ حساسية لموجات الأزرق والبنفسجي. وهذه هي منطقة الطّيف حيث التحليل اللونيّ – وبالتالي الزّيغ اللونيّ – أكبر ما يمكن (الشّكل 24-14).

يوجد في المرايا الكرويّة (البند 23-3) كذلك مثل هذه الزّيغانات، ومن ضمنها الزّيغ الكرويّ (انظر الشّكل 23-11). يمكن قطع المرايا بشكل قطع مكافئ لتصحيح هذا الزّيغ، إلّا أنّ تصنيع هذا صعب، ومكلف جدًّا. وهذه المرايا لا تبدي الزّيغ اللونيّ؛ لأنّ الضّوء لا يمرّ خلالها (لا يوجد انكسار ولا تحليل لونيّ).



الشّكل 25-26. الزّيغ اللونيّ تتجمع الألوان المختلفة في نقاط مختلفة.



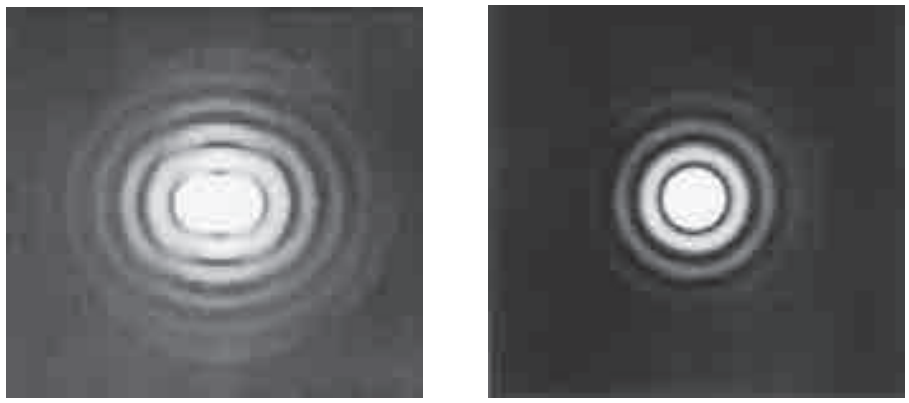
الشّكل 25-27. المزدوجة اللالونيّة.

7-25 حدود التّفريق (التحليل)؛ الفتحات الدائرية

إنّ قدرة العدسة على انتاج خيالين منفصلين لجسم مكوّن من نقطتين قريبتين جدًّا من بعضهما تدعى **التّفريق** (التحليل) للعدسة. كلّما قَرُبَ الخيالان وما زالا منفصلين (وليسا بقعتين متراكبتين) زاد التحليل. ويحدّد تحليل عدسة الكاميرا، مثلًا، بعدد الخطوط لكلّ 1 mm عادة، كما ذكرنا في (البند 25-1).

هناك عاملان يحددان تفريق (تحليل) العدسة؛ الأول هو عيوبها، كما رأينا، بسبب الزّيغ الكرويّ أو غيره من الزّيغانات. فإنّ الجسم النقطيّ ليس نقطة على الخيال، ولكنه بقعة صغيرة. إنّ التصميم الدقيق للعدسات المركّبة يمكن أن يقلل الزّيغانات بصورة ملموسة، ولكن لا يمكن تصحيحها بصورة كاملة. أما العامل الآخر الذي يحدد التحليل فهو الحيود، والذي لا يمكن تصحيحه ضوئيًا؛ لأنه نتيجة طبيعية لطبيعة الضّوء الموجية. وهذا ما سنناقشه الآن.

في (البند 24-5)، رأينا أنه بسبب انتقال الضّوء كموجة، فإنّ الضّوء الصادر من مصدر نقطيّ يمرّ خلال شق، ينتشر نحو الخارج منتجًا نمط حيود (الشّكلان 24-19 و 24-21). ولأنّ للعدسة حوافًا، فهي تتصرّف كالشق. وعندما تكون العدسة خيالًا لمصدر نقطيّ، فإنّ هذا الخيال هو نمط حيود صغير. لذا، سيكون الخيال مشوشًا حتى في غياب الزّيغانات.



(ب) (أ)

الشّكل 25-28. صورتا خيالين (مكبرتان كثيرًا) مكونتين بوساطة عدسة، تبينان نمط الحيود لخيال (أ) جسم نقطيّ منفرد. (ب) جسمين نقطيّين خيالاهما يكادان أن يكونا منفصلين.

في التحليل الذي يتبع، نفرض أنّ العدسة خالية من الزّيغانات. لذا، نستطيع التّركيز على أنماط الحيود، وإلى أيّ حدّ تحدد قوة التحليل للعدسة. في (الشّكل 25-21)، رأينا نمط الحيود المتكوّن من الضّوء المار عبر شقّ مستطيل له هدبة مركزية قصوى حيث يقع معظم الضّوء. تهبط هذه القمّة المركزية إلى أدنى قيمة على الجانبين عند زاوية θ تعطى بـ

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{D}$$

(هذه هي المعادلة 24-3أ)، حيث D هو عرض الفتحة، و λ طول موجة الضّوء المستعمل. θ هي نصف العرض الزاوي للهدبة المركزية، وللزوايا الصغيرة يمكن كتابة

$$\theta \approx \sin\theta = \frac{\lambda}{D}$$

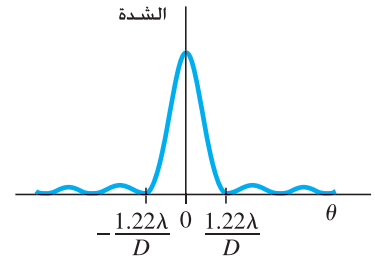
هناك هدب ذات شدّة قليلة على الجانبين. وبالنسبة إلى عدسة أو أيّ فتحةٍ دائرية، فإنّ خيال مصدر نقطيّ سوف يتكوّن من قمة مركزية دائرية (تُسَمّى بقعة الحيود أو قرص آيري) محاطة بهدب دائرية خافتة، كما هو مبين في (الشّكل 25-28أ). القمّة المركزية لها نصف عرض زاوي يعطى بـ

الزّاوية الأصغر تعني تفريقًا أفضل.

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

حيث D هو قطر الفتحة الدائرية.

تختلف هذه العلاقة عن تلك التي للشق المستطيل بالمعامل 1.22 (المعادلة 24-3). ويظهر هذا المعامل لأنّ عرض الفتحة الدائرية غير منتظم (مثل الفتحة المستطيلة) لكنه يتغير من قطرها D إلى صفر. يبين التحليل الرياضي أنّ العرض "المتوسط" هو $D/1.22$. لذلك، نحصل على المعادلة السابقة بدلًا من (المعادلة 24-3). إنّ شدّة الضّوء في نمط الحيود لضوء من مصدر نقطيّ يمرّ خلال فتحة دائرية مبين في (الشّكل 25-29).



الشّكل 25-29 شدّة الضّوء عبر نمط الحيود لفجوة دائرية.

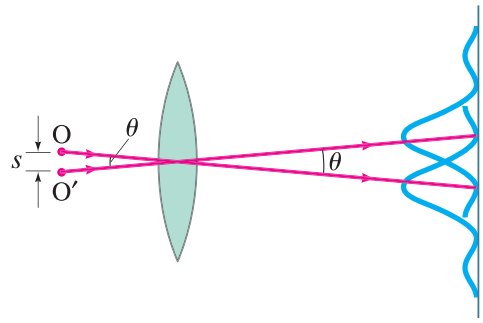
إنّ خيال المصدر غير النقطيّ هو مزيج لتطابق مثل هذه الأنماط. ولمعظم الأغراض نحتاج فقط إلى اعتبار البقعة المركزية؛ لأنّ الحلقات متحدة المركز تكون خافتة جدًّا.

إذا كان هناك مصدران نقطيّان قريبين جدًّا، فسيتطابق نمطًا حيود خياليهما كما في (الشّكل 25-28 ب). وإذا حُرّك المصدران أقرب، فسنصل إلى انفصال بحيث لا يمكن التمييز بوجود خيالين متطابقين أم خيال واحد. إنّ الانفصال الذي يحدث عنده ذلك يمكن الحكم عليه بصورة مختلفة تبعًا لمشاهدين مختلفين. وعلى أيّ حال، هناك معيار متفق عليه اقترحه اللورد رايلي (1842 – 1919). ينصّ **معيار رايلي** على أنّ خياليين يُعدّان منفصلين عندما يكون مركز قرص الحيود لخيال واحد مباشرة فوق النهاية الصغرى الأولى في نمط الحيود للخيال الثاني. وهذا مبين في (الشّكل 25-30). ولكن لأنّ النهاية الصغرى الأولى تكون عند زاوية $\theta = 1.22\lambda/D$ من القيمة المركزية، (الشّكل 25-30) يبقى أن الجسمين يمكن اعتبارهما منفصلين إذا كانا منفصلين، على الأقل، بالزّاوية θ المعطاة بـ

معيار رايلي (حد التّفريق)

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D} \quad [\theta \text{ in radians}] \qquad \textbf{(7-25)}$$

هذا هو الحدّ على التّفريق الذي تفرضه طبيعة الضّوء الموجية بسبب الحيود. وتعني أنّ تحليل الزّاوية الأصغر أفضل. ولهذا، يمكنك عمل أجسام أقرب. ونرى من (المعادلة 25-7) أنه باستعمال طول موجة أقصر تزداد قدرة التّفريق (التحليل).



الشّكل 25-30 معيار رايلي. خيالان يُعدّان منفصلين عندما تقع قمة الحيود المركزية لأحدهما مباشرة على أول قيمة دنيا لنمط حيود الخيال الثاني. الجسمان النقطيّان O، وO′ يقابلان زاوية θ عند العدسة. يرسم شعاع واحد فقط (يمرّ خلال مركز العدسة) لكلّ من الجسمين؛ ليشير إلى مركز نمط الحيود لخياله.

المثال 25-10 تلسكوب هَبل الفضائيّ

تلسكوب هَبل الفضائي (HST) هو تلسكوب عاكس، وضع في المدار فوق مجال الأرض. ولذلك، فإنّ قدرة تحليله لن تتأثر باضطراب جوّ الأرض (الشّكل25-31). قطر شيئيته 2.4 m. بالنسبة للضّوء المرئيّ، مثلًا $\lambda = 550\text{ nm}$، احسب، بالتقريب، تحسين التّفريق الذي يقدمه تلسكوب هَبِلُ فوق التلسكوبات الأرضية، والتي يحدد قدرة تحليلها حركة جوّ الأرض لحوالي نصف ثانية زاويّة. (تقسم كلّ درجة إلى 60 دقيقة، وكلّ واحدة منها تحتوي 60 seconds، لذلك $1^\circ = 3600\text{ arc seconds}$).

النّهج: تعطى قدرة التحليل لتلسكوب هَبِلُ (بالراديان) (بالمعادلة 25-7). قدرة تحليل التلسكوبات الأرضية معلومة، ولذلك نحولها أولا إلى راديان من أجل المقارنة.

الحلّ: التلسكوبات الأرضية محددة من حيث قدرة التحليل بـ

$$\theta = \tfrac{1}{2}\left(\frac{1}{3600}\right)^\circ\left(\frac{2\pi\text{ rad}}{360^\circ}\right) = 2.4 \times 10^{-6}\text{ rad}$$

وبالمقابل، فإنّ منظار هَبل محدد بوساطة الحيود (المعادلة 25-7) حيث بـ $\lambda = 550\text{ nm}$

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D} = \frac{1.22(550 \times 10^{-9}\text{ m})}{2.4\text{ m}} = 2.8 \times 10^{-7}\text{ rad}$$

وهكذا، يعطي قدرة تحليل أفضل بعشر مرات $(2.4 \times 10^{-6}\text{rad}/2.8 \times 10^{-7}\text{rad} \approx 9\times)$ تقريبًا

ملحوظة: يستطيع هَبِلُ ملاحظة الإشعاع في المنطقة القريبة من فوق البنفسجية (بطول موجات تصل إلى 115 nm)، وكذلك تحت الحمراء (طول موجة نحو 1 mm)، وهي حدود الطّيف الذي يحجبه الغلاف الجوي. المجسّ هو CCD، كما في الكاميرا (انظر البند 25-1) بعدد عناصر صورة 16 MP).

الشّكل 25-31. تلسكوب هَبِلُ الفضائيّ حيث الأرض في خلفية الصّورة. الألواح البرتقالية المستوية هي خلايا شمسيّة تجمع الطّاقة من الشّمس.

المثال 25-11 قرّب قدرة تحليل العين

افرض أنّك في طائرة على ارتفاع 10,000 m. إذا نظرت صوب الأسفل نحو الأرض فاحسب، بالتقريب، المسافة الفاصلة s بين الأشياء التي تستطيع تمييزها. اعتبر الحيود فقط، وافرض أنّ قطر البؤبؤ في عينيك 3.0 mm، وطول الموجة $\lambda = 550\text{ nm}$.

النّهج: نستعمل معيار رايلي، (المعادلة 25-7)، لتقدير θ.

البعد s بين الأجسام يساوي بعدها عنك، $L = 10^4\text{ m}$ مضروبة في θ (بالراديان)، حيث θ زاوية صغيرة. لذلك، $s = L\theta$.

الحلّ: في (المعادلة 25-7)، $D = 3.0\text{ mm}$ لفتحة العين

$$s = L\theta = L\frac{1.22\lambda}{D}$$
$$= \frac{(10^4\text{ m})(1.22)(550 \times 10^{-9}\text{ m})}{3.0 \times 10^{-3}\text{ m}} = 2.2\text{ m}$$

تطبيق الفيزياء
مدى جودة رؤية العين

تمرين D يدَّعي أحدهم أنّ كاميرا قمر تجسس تستطيع رؤية عنوان الصفحة الإخبارية الذي طوله 3-cm من على ارتفاع 100 km. إذا كان الحيود هو العامل المحدد الوحيد $(\lambda = 550\text{ nm})$، فاستعمل (المعادلة 25-7) لحساب قطر الكاميرا المقصودة.

8-25 قدرة تحليل المناظير والمجاهر؛ حَد λ

قد تعتقد أنّه يمكن تصميم مجهر أو منظار للحصول على أيّ تكبير مطلوب، اعتمادًا على اختيار الأبعاد البؤريّة وجودة العدسات. ولكن ذلك غير ممكن بسبب الحيود. إنّ زيادة التكبير فوق حدّ معيّن يعمل فقط على تكبير أنماط الحيود. وقد يكون هذا مضلّلًا؛ لأنّه قد نعتقد أنّنا سنرى تفاصيل من الجسم أكثر عندما نزيد تفاصيل الحيود. لفحص هذه المسألة، نطبق معيار رايلي:
جسمان (أو نقطتان متجاورتان على جسم ما) يتفرقان فقط إذا كانت بينهما زاوية θ (الشّكل 25-30) تعطى (بالمعادلة 25-7):

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D}$$

تنطبق هذه المعادلة على مجهر أو منظار؛ حيث D هي قطر العدسة الشّيئيّة. للمنظار، تتحدد قدرة التحليل باعتبار θ معطاة بهذه المعادلة*.
في المجهر، من الملائم تحديد المسافة، s، بين النقطتين اللتين اعتبرتا منفصلتين: انظر (الشّكل 25-30). بما أنّ الأجسام توضع عادة قرب البؤرة الشّيئيّة للمجهر، فالزّاوية التي يقابلها الجسمان هي $\theta = s/f$، أو $s = f\theta$.
إذا جمعنا هذه (بالمعادلة 25-7)، فسنحصل على قدرة تحليل المجهر (**RP**) حيث

$$\text{RP} = s = f\theta = \frac{1.22\lambda f}{D} \qquad (8\text{-}52)$$

قدرة التحليل

حيث f البعد البؤريّ للشيئية، البعد البؤريّ (وليس التردد). تُسَمّى هذه المسافةُ s قدرةَ التحليل للعدسة؛ لأنّها أقلّ مسافة فاصلة بين نقطتين متفرقتين، يفترض أعلى جودة للعدسة لأنّ هذه النهاية تفرضها طبيعة الضّوء الموجية. كلما قلت RP يعني ذلك قدرة تحليل أحسن، وتفاصيل أفضل.

الشّكل 25-32 التلسكوب الراديوي 300-meter في أريسيبو، بورتوريكو، يستعمل موجات المذياع (الشّكل 22-8) بدلا من الضّوء المرئيّ.

المثال 25-12 قدرة تحليل التلسكوب (موجات الرّاديو مقابل الضّوء المرئيّ).

ما الفرق الزاوي الأدنى لنجمين يُعدّان منفصلين بوساطة: (أ) تلسكوب 200-inch على جبل بالومار (الشّكل 25-21 جـ). (ب) تلسكوب راديو أريسيبو (الشّكل 25-32)؛ الذي قطره 300 m ونصف قطر الختاءة 300 m مفترضًا أن $\lambda = 550\text{ nm}$ لتلسكوب الضّوء المرئيّ في الجزء (أ)، و $\lambda = 4\text{ cm}$ (أقلّ طول موجي يعمل عليه تلسكوب الراديو) في الجزء (ب).

النّهج: نطبق معيار رايلي (المعادلة 25-7) لكلّ تلسكوب.

الحلّ: (أ) بما أنّ $D = 200\text{ in}$ أي $D = 5.1\text{ m}$، فسنجد من (المعادلة 25–7) أنّ

$$\theta = \frac{1.22\lambda}{D} = \frac{(1.22)(5.50 \times 10^{-7}\text{ m})}{(5.1\text{ m})} = 1.3 \times 10^{-7}\text{ rad}$$

أو $0.75 \times 10^{-5}\text{ deg}$. (لاحظ أنّ ذلك يكافئ تحليل نقطتين البعد بينهما 1 cm من على بعد 100 km!)
(ب) لموجات المذياع $\lambda = 0.04\text{ m}$، قدرة التحليل هي

$$\theta = \frac{(1.22)(0.04\text{ m})}{(300\text{ m})} = 1.6 \times 10^{-4}\text{ rad}$$

قدرة التحليل أقلّ؛ لأنّ طول الموجة أكبر بكثير، إلا أنّ الشّيئيّة أكبر. وهذا مناسب.

* التلسكوبات الأرضية بشيئية ذات قطر كبير تحدد عادة ليس من الحيود، بل من آثار أخرى مثل اضطرابات الجوّ. وبالمقابل، فإنّ قدرة التحليل لمجهر ذي جودة عالية تتحدد عادة بالحيود. شيئيات المجاهر هي عدسات مركبة تحتوي عناصر كثيرة ذات أقطار صغيرة (لأنّ f صغيرة)؛ وهذا يقلل الزّيغانات.

ملحوظة: في الحالتين، طبقنا الحدّ الذي يفرضه الحيود. إنّ قدرة تحليل تلسكوب أرضيّ في منطقة الضّوء المرئيّ ليست ذات جودة بسبب الزّيغانات، وبصورة أهم، الاضطراب في الغلاف الجوي. وفي الحقيقة، فإنّ الشيئيات ذات الأقطار الكبيرة لاتزيد قدرة التحليل، ولكنّها تجمّع الضّوء بسبب قدرتها العالية؛ أي أنّها تسمح بضوء أكثر للدخول. لذا، يمكن رؤية الأجسام الخافتة. التلسكوبات الراديوية لا يعيقها اضطرابات الجو، وقدرة التحليل في (ب) هي تقدير جيد.

يضع الحيود قيودًا على التفاصيل التي يمكن رؤيتها على أيّ جسم في (المعادلة 25-8) لقدرة التحليل. لا نستطيع عمليًّا جعل البعد البؤريّ أقلّ من (بالتقريب) نصف قطر العدسة، وحتى هذا يعدّ ضعيفًا جدًّا (انظر إلى معادلة صانعي العدسات، المعادلة 23-10). في هذه الحالة المثلى، (المعادلة 25-8) تعطي $f \approx D/2$

$$\mathrm{RP} \approx \frac{\lambda}{2} \qquad \textbf{(9-25)}$$

وبهذا، يمكننا القول، وفي حدود معامل 2 أو ما يقاربه،

قدرة التحليل محدودة بـ λ

أنه لا يمكن تحليل تفاصيل الأشياء الأصغر من طول موجة الضّوء (الإشعاع) المستعمل؛ فهذه قاعدة مهمة ومفيدة.

تصمّم في المجاهر عدسات مركبة جيدة لدرجة أنّ الحدّ الحقيقي على قدرة التحليل هو الحيود؛ أيّ من قبل طول موجة الضّوء المستعمل. وللحصول على تفاصيل أكثر يجب استعمال موجات أقصر. إنّ استعمال الأشعّة UV يمكن أن يزيد قدرة التحليل بمعامل 2 تقريبًا. وأهم من ذلك بكثير، أنّ الاكتشاف في بداية القرن العشرين توصلت إلى أنّ الإلكترونات لها خصائص موجية (الفصل 27) وأنّ أطوالها الموجية صغيرة جدًّا. استغلت الطبيعة الموجية للإلكترونات في المجهر الإلكتروني (البند 27-9)، الذي يمكن أن يكبر 100 إلى 1000 مرة أكبر من المجهر الضّوئيّ المرئيّ بسبب الأطوال الموجية القصيرة. كما أنّ الأشعّة X أيضًا لها أطوال موجية قصيرة جدًّا، وتستعمل كثيرًا في دراسة الأشياء مفصّلة (البند 25-11).

9-25 قدرة تحليل العين البشرية والتكبير المفيد

إنّ قدرة تحليل عين الإنسان محدودة بعوامل عدّة، جميعها تقريبًا في المدى نفسه من حيث المقدار. كما أنّ قدرة التحليل القصوى هي عند البقعة العمياء، حيث المسافات بين المخاريط أقلّ ما يمكن، $3\ \mu\mathrm{m}\ (= 3000\ \mathrm{nm})$ تقريبًا. يتغيّر قطر البؤبؤ من نحو 0.1 cm إلى حوالي 0.8 cm. ولذلك، عند موجة طولها $\lambda = 550\ \mathrm{nm}$ (حيث حساسية العين أكبر ما يمكن)، فإنّ حدّ الحيود هو $\theta \approx 1.22\lambda/D \approx 8 \times 10^{-5}\ \mathrm{rad}$ إلى $6 \times 10^{-4}\ \mathrm{rad}$. حيث طول العين 2 cm تقريبًا، وهذا يعطي قدرة تحليل (المعادلة 25-8) $s \approx (2 \times 10^{-2}\ \mathrm{m})(8 \times 10^{-5}\ \mathrm{rad}) \approx 2\ \mu\mathrm{m}$ في أحسن حال ونحو $15\ \mu\mathrm{m}$ في اسوأ حال حيث يكون (البؤبؤ صغيرًا). كما يحدّد كلّ من الحيود الكروي والزيوغ اللوني القدرة على التحليل لتصبح $10\ \mu\mathrm{m}$ والنتيجة النهائية هي أنّ العين يمكن أن تفرق أشياء تفصلها زاوية مقدارها

أفضل قدرة تحليل للعين

$$5 \times 10^{-4}\ \mathrm{rad}$$

في أحسن الأحوال. وهذا يقابل أشياء تبعد عن بعضها 1 cm وتقع على بعد 20 m تقريبًا.

إنّ أقرب نقطة نموذجية للعين البشرية هي 25 cm. حيث يمكن للعين عند هذه المسافة، أن تفرق أجسامًا تفصلها مسافة $\frac{1}{10}\ \mathrm{mm} = 10^{-4}\ \mathrm{m} \approx (5 \times 10^{-4}\ \mathrm{rad})(25\ \mathrm{cm})$.

وبما أنّ أفضل مجهر لا يمكنه أن يفرق أكثر من 200 nm في أحسن حال (معادلة 9-25 للضوء البنفسجي). حيث $\lambda = 400\ \mathrm{nm}$، لذا يحدد التكبير المفيد بـ [قدرة تحليل العين المجردة/قدرة تحليل المجهر]

أعلى تكبير مفيد للمجهر

$$\frac{10^{-4}\ \mathrm{m}}{200 \times 10^{-9}\ \mathrm{m}} \approx 500\times$$

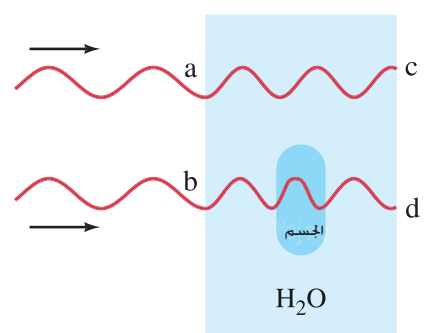
وعمليًّا، ما يستخدم تكبير بحدود 1000× لتقليل إجهاد العين. أن أي تكبير أكثر قد يجعل نمط الحيود الناتج من شيئية المجهر مرئيًّا.

* 10-25 مجاهر الاختصاص والتباين (التمايز)

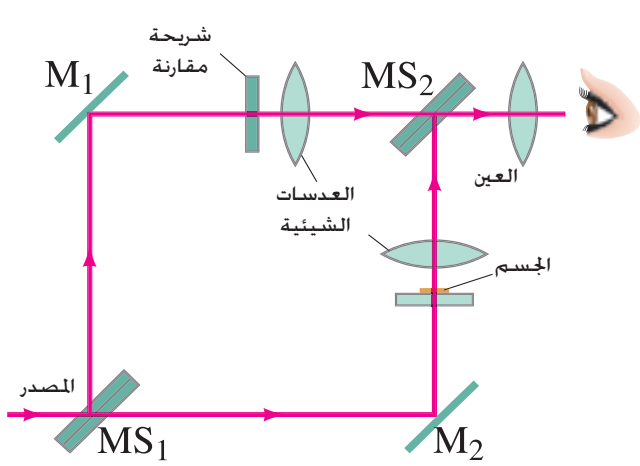
مهما بلغت قدرة التحليل التي قد يحققها المجهر، فلن تكون ذات فائدة إن لم نستطع تمييز الجسم الذي نريد رؤيته عن الخلفية. إنّ الاختلاف في إضاءة خيال جسم ما وخيال ما يحيط به يُسَمّى **التباين** (التمايز)، الذي يعدّ تحقيقه بصورة عالية مسألة مهمّة في المجهر وأشكال التّصوير الأخرى. تنشأ المشكلة في عالم الحياة، مثلًا، لأنّ الخلايا تتكوّن من الماء بشكل كبير. وعليه، تكون شفافة للضوء. الآن، سنناقش بإيجاز نوعين خاصين من المجاهر تستطيع زيادة التباين هما: مجهر التّداخل، ومجهر تباين – الطّور.

يستعمل **مجهر التّداخل** الخصائص الموجية للضّوء بطريقة مباشرة بزيادة التباين في الجسم الشفاف. افترض جسمًا شفافًا، مثلًا، بكتيريا في ماء (الشّكل 25-33). يدخل الضّوء بانتظام من اليسار ويكون مترابطًا (في الطّور) عند النقاط جميعها مثل أ، ب. إذا كان الجسم شفافًا كالماء، فإنّ الشعاع الخارج عند د سيكون لامعًا كالشعاع عند ج. ولن يكون هناك تباين، ولن يُشاهد الجسم. ولكن، إذا كان معامل انكسار الجسم مختلفًا عن محيطة، فسوف يختلف طول الموجة داخل الجسم كما هو مبين. وعليه، سوف تختلف موجات الضّوء بالطّور عند ج و د، إن لم يكن الاختلاف في الاتساع أيضًا. يغير مجهر التداخل هذا الاختلاف في الطّور إلى اختلاف في الاتساع حيث تكشف العين عن ذلك. وبتراكب الضّوء المار خلال الجسم، يتداخل مع شعاع مرجعي لا يمرّ في ذلك الجسم. إحدى طرائق عمل ذلك مبينة في (الشّكل 25-34). الضّوء القادم من المصور يوزع إلى شعاعين متساويين بوساطة مرآة نصف مفضضة، MS_1. يمر أحدّ الشعاعين في الجسم، ويمر الشعاع الثاني بنظام مماثل دون الجسم. يلتقي الشّعاعان ثانية، ثم يتراكبان بوساطة المرآة نصف – المفضضة MS_2 قبل دخولهما إلى العينيّة ثم العين. يعدل طول مسار (والاتساع) شعاع المقارنة بحيث تصبح الخلفية داكنة؛ يحدث تداخل هدّام تام. كما سيتداخل الضّوء المار من الجسم (الشعاع ب د في الشّكل 25-33) أيضًا مع شعاع المرجع. ولكن بسبب اختلاف طوره، فلن يكون التّداخل هدّامًا بصورة تامّة. وهكذا، سوف يظهر أكثر لمعانًا من محيطه. حيث يختلف الجسم بالسمك، وسوف يختلف فرق الطّور بين الشعاعين أجـ و ب د في (الشّكل 25-33)، وهذا يؤثر في مقدار التداخل. لذا، فإنّ التّغيّر في سمك الجسم سوف يظهر كتغير في لمعان الخيال.

تطبيق الفيزياء
مجهر التداخل



الشّكل 25-33 الجسم – مثلا بكتيريا – في محلول مائيّ



الشّكل 25-34. مخطط مجهر التداخل.

يستفيد **مجهر تباين – الطّور** أيضًا من التّداخل وفروق الطّور للحصول على خيال عالي التباين. يتحقّق التّباين بوساطة حلقة صفيحة طور زجاجيّة فيها أخدود (ثَلْم) (أو جزء مرتفع) على شكل حلقة موضوعة بحيث تمرّ أشعة المصور غير المنحرفة من خلالها. أمّا الأشعّة المنحرفة بوساطة الجسم فلا تمرّ من خلال هذه الحلقة؛ لأنّ الأشعّة التي يحرفها الجسم تنتقل خلال سمك مختلف من الزّجاج أكثر من الأشعّة غير المنحرفة. يصبح الشعاعان مختلفين في الطور، ويتداخلان تداخلًا هدّامًا عند مستوى خيال الجسم. وبهذا، يتباين خيال الجسم بصورة واضحة عن الخلفية. إنّ أخيلة مجهر تباين الطّور تميل إلى تكوين "هالات" حولها (كنتيجة للحيود من فتحة صفيحة – الطّور). لذا، علينا الاحتياط والحذر عند تفسير الأخيلة.

تطبيق الفيزياء
مجهر تباين – الطور.

* 11-25 أشعة – X وحيودها

في عام 1895 اكتشف رونتجن (W. C. Roentgen) (1845–1923) أنّه عندما تتسارع الإلكترونات بجهد كهربائي عالٍ في أنبوب مفرغ، ثم يسمح لها أن تصطدم بالزجاج أو سطح فلزيّ داخل الأنبوب، فإنّ معادن متفلورة بعيدة سوف تتوهج، ويتم تعريض الفيلم الفوتوغرافي. عزا رونتجن هذه الآثار إلى نوع جديد من الإشعاع (مختلف عن الأشعّة المهبطية). سُمّيَ **أشعة – X** إشارة للرمز الجبري x، الذي يعني كمية مجهولة. اكتشف بعدها أنّ الأشعّة – X اخترقت بعض المواد أكثر من مواد أخرى، وبعد أسابيع قليلة عرض أول صورة بوساطة أشعة – X (وكانت ليد زوجته).

إنتاج الأشعّة – X حاليًّا يتم عادة في أنبوب (الشّكل 35 – 25) يشبه الأنبوب الذي استعمله رونتجن باستعمال جهود كهربائية تتراوح بين 30 kV و150 kV.

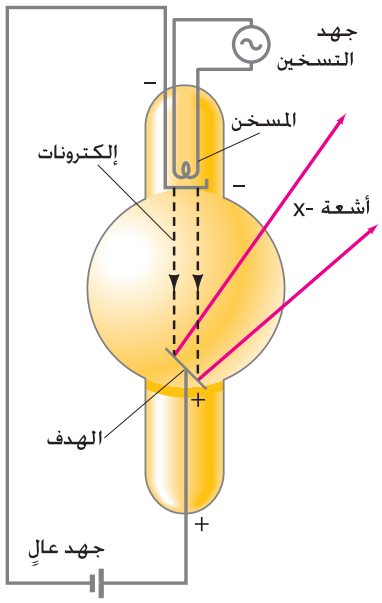
أشار البحث في طبيعة أشعة – X إلى أنها ليست جسيمات مشحونة (مثل الإلكترونات) لأنّها لم تنحرف بوساطة المجالين الكهربائيّ والمغناطيسيّ. وقد اقترح أنها قد تكون شكلاً من الضّوء غير المرئيّ. على أيّ حال، فإنها لم تُعطِ أنماط حيود أو تداخل باستعمال شبكات الحيود العادية. وبالفعل، إذا كانت أطوالها الموجية أصغر بكثير من أبعاد محززات الحيود العادية ($10^{-6}\,\text{m}\,(=10^{3}\,\text{nm})$) فلا تتوقع هذه الآثار. وفي عام 1912 تقريبا، اقترح ماكس فون لاوي (1879 – 1960) أنه إذا رتبت الذرات في بلورة بصفوف منتظمة (انظر الشّكل 13 – 2 أ) فإنّ مثل هذه البلورة ستخدم مثل محززة حيود لأطوال موجية قصيرة جدًّا في حدود الأبعاد بين ذرات البلورة نحو ($10^{-10}\,\text{m}\,(=10^{-1}\,\text{nm})$). وقد أثبتت التجارب مباشرة بعد ذلك أنّ أشعة – X المتشتتة من البلورة أظهرت القمم والوديان لنمط الحيود (الشّكل 36–25).

وهكذا تبين أنّ أشعة – X لها الطبيعة الموجية، وأنّ الذرات تكون مرتبة في شبكية منتظمة في البلورات. وحاليّا، تصنف الأشعّة – X بأنها موجات كهرومغناطيسية بطول موجي نحو $10^{-2}\,\text{nm}$ إلى 10 nm، وهو المدى الذي تم الحصول عليه في أنبوب أشعة – X.

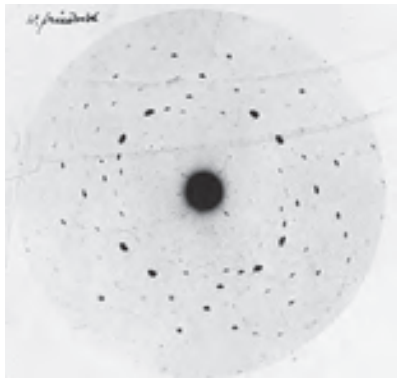
لقد رأينا في (البندين 25–7، و 25–8) أنّ الضّوء ذا طول الموجة الأقصر ينتج قدرة تحليل أعلى عندما نتفحّص جسمًا مجهريًّا. ولأنّ أشعة X لها موجات أقصر من الضّوء المرئيّ، فإنها، من حيث المبدأ، تقدم قدرة تحليل أعلى بكثير. ولكن، يبدو أنه لا توجد مادة فاعلة لتستعمل كعدسة للموجات القصيرة جدًّا لأشعة – X. وبدلا من ذلك، فإنّ الأسلوب الفاعل والمعقد **لحيود أشعة – X (التّصوير البلوري بأشعة–X)** أثبت فاعليته العالية في فحص عالم الذرات والجزيئات المجهرية. في بلورة بسيطة مثل NaCl، تترتب الذرات على شكل مكعب منتظم، (الشّكل 25–37)، وتبتعد مسافة d عن بعضها. لو أسقطنا حزمة من أشعة – X على البلورة بزاوية مع السّطح، وأنّ الشعاعين المبينين انعكسا عن مستويين متتاليين للذرات كما هو مبين، فسوف يتداخل الشعاعان تداخلا بنّاءً إذا كان الفرق بين المسافتين اللتين يقطعهما الشعاعان يساوي عددًا صحيحًا من الأطوال الوجبة. هذه المسافة الفائضة هي $2d\sin\phi$. ولذلك ينتج تداخل بنّاء إذا

$$m\lambda = 2d\sin\phi, \qquad m = 1, 2, 3, \cdots \tag{10-25}$$

حيث m هي أيّ عدد صحيح. (لاحظ أنّ ϕ ليست الزّاوية بالنسبة للعمودي على السّطح). وتُدعى هذه **معادلة براغ** نسبة إلى W. L. Bragg (1890 – 1971)، الذي اشتقها، والذي طوّر مع والده W.H. Bragg (1862 – 1942) نظرية حيود أشعة – X وأسلوبه بالبلورات في الفترة 1912 – 1913. إذا علمنا طول موجة أشعة – X، وقيست الزّاوية ϕ، يمكن عندئذٍ حساب المسافة d بين الذرات. وهذا هو الأساس في تصوير البلورات بالأشعّة – X.

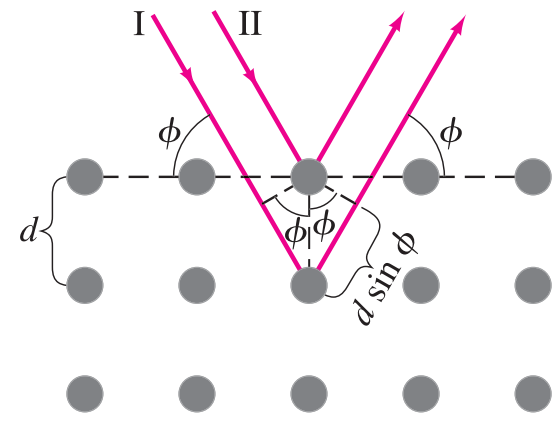


الشّكل 25 - 35. أنبوب أشعة - X. الإلكترونات المنطلقة من فتيل تسخين في أنبوب مفرغ تتسارع بجهد عالٍ. عندما تصطدم بسطح المصعد، "الهدف" تنطلق الأشعّة - X.

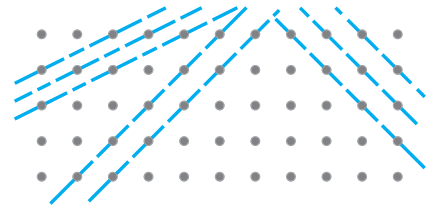


معادلة براغ

الشّكل 25 - 36. نمط حيود أشعة - X في أول مشاهدات ماكس فون لاو 1912 عندما سلّط شعاع أشعة - X على بلورة كبريتيد الزنك. نمط الحيود تم كشفه مباشرة على لوحة تصوير.



الشّكل 25-37. حيود أشعة - X بوساطة البلورات



الشّكل 25-38 يمكن حيود أشعة – X من مستويات كثيرة ضمن البلورة.

إنّ أنماط حيود الأشعّة – X الحقيقية معقدة. وقبل كلّ شيء، فإنّ البلّورة هي جسم ثلاثيّ الأبعاد، والأشعّة– X يمكن أن تحيد من مستويات مختلفة، وبزوايا مختلفة أيضًا ضمن البلورة، كما يبين (الشّكل 25–38). وعلى الرّغم من أنّ التحليل معقد جدًّا، فمن الممكن تعلم أشياء كثيرة عن أيّ مادة بحيث يمكن وضعها في هيئة بلورية. إذا كانت المادة ليست بلورة منفردة، بل مزيجًا من كثير من البلورات الصغيرة؛ كما في الفلز أو المسحوق عندها تنتج سلسلة من الدوائر، (الشّكل 25–9)، فإنّ كلًّا منها يقابل حيودًا برتبة معينة m من مجموعة من المستويات المتوازية، بدلًا من سلسلة من البقع، كما في (الشّكل 36–25).

الشّكل 25-93 (أ) حيود أشعة – X من مادة معقدة التركيب البلوري تنتج مجموعة من الحلقات الدائرية كما في (ب)، وهي لمادة اسيتواسيتات الصوديوم.

الشّكل 25-40 صورة حيود أشعة – X لجزيء DNA التقطت من قِبَل روزاليند فرانكلين في بداية 1950. أشار صليب البقع إلى أنّ DNA عبارة عن لولب.

لقد كان حيود أشعة – X مفيدًا في تحديد تركيب جزيئات حيوية مهمّة، مثل التركيب اللولبي الثنائي لـ DNA، الذي استنتجه جيمس واطسون وفرانسيس كريك في عام 1953. انظر (الشّكل 25–40)، ولنماذج اللولب الثنائي، (الشّكلين 16–44 أ، و 16 – 45). حوالي 1960، التركيب التفصيلي لجزيء البروتين، ميوجلوبين، تم شرحه بمساعدة حيود أشعة – X. وتبع ذلك تركيب أحد مكونات الدم المهمة، الهيموجلوبين، تم عمله، ومنذ ذلك تم تحديد تركيب الكثير من الجزيئات بمساعدة أشعة – X.

* 12-25 تصوير أشعة – X والتّصوير الطّبقيّ لمحوسب (مسح CT)

* خيال أشعة – X العاديّ

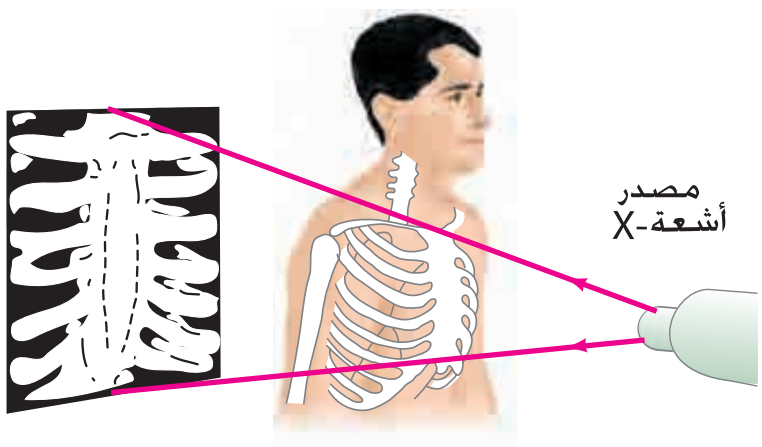
لصورة أشعة – X الطبية أو السِّنِّيّة العادية، الأشعّة – X الخارجة من الأنبوب (الشّكل 25–35) تمر خلال الجسم، ثم يكشف عنها على فيلم تصوير أو شاشة متوهجة، (الشّكل 25 – 41). تسير الأشعّة في خطوط مستقيمة تقريبًا خلال الجسم مع انحراف لا يذكر لأنه عند موجات الأشعّة – X هناك حيود أو انكسار قليل. هناك امتصاص (أو تشتت)، وعلى أيّ حال، فإنّ اختلاف الامتصاص بتراكيب الجسم المختلفة هو الذي يعطي الخيال الناتج من الأشعّة النافذة. كلما كان الامتصاص أقلّ، كان النفاذ أكثر، والفيلم معتمًا. فالخيال هو "ظل" لما مرت به الأشعّة. إنّ خيال أشعة – X لا ينتج من تجميع الأشعّة بالعدسات كما في الأجهزة التي تمّت مناقشتها سابقًا في هذا الفصل.

تطبيق الفيزياء

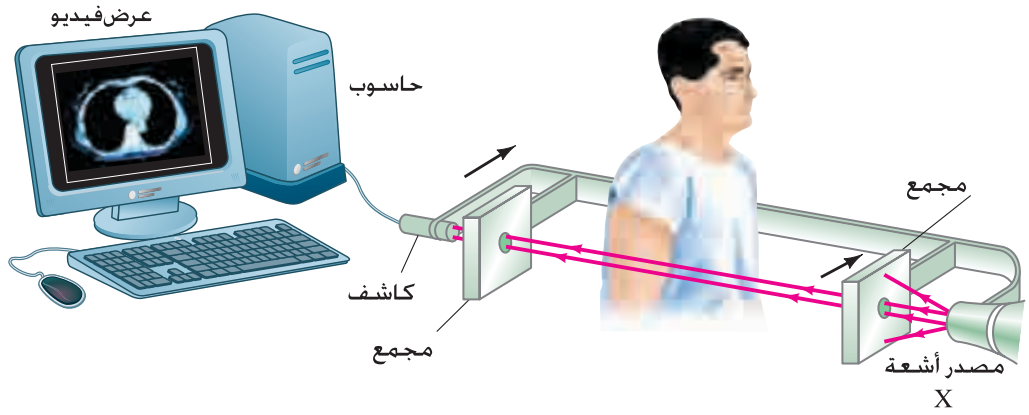
خيال أشعة - العادى

تنويه:

خيالات الأشعّة – X هي ظلال، ليست هناك عدسات.



الشّكل 25-41 تصوير أشعة – X العادي، والذي هو في الواقع تظليل.



الشّكل 42 - 25 التّصوير الطّبقيّ: يتحرك مصدر أشعة - X والكاشف معًا عبر الجسم، تقاس شدّة الأشعّة النافذة عند نقاط متعددة كثيرة. ثم يدار هذا النظام قليلًا (نفرض 1°) ثم نعمل مسحًا جديدًا. تُكرّر العملية هنا لـ 180°. يعيد الحاسوب إنشاء الخيال للشريحة، ثم توضع على جهاز عرض تلفزيونيّ TV.

* خيالات التّصوير الطّبقيّ (CT).

تطبيق الفيزياء

خيالات التّصوير الطّبقيّ المحوسب.

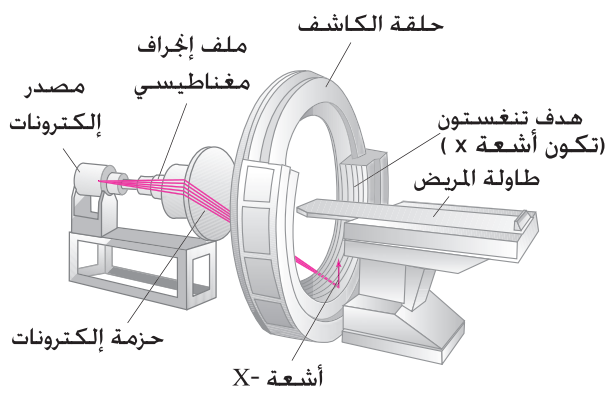
في خيالات أشعة – X العادية، يُسْقط سمك الجسم كاملًا على الفيلم؛ تتطابق التركيبات، وفي كثير من الحالات يصعب تمييزها. في فترة 1970 تمّ تطوير تقنية جديدة للأشعة – X تُسَمّى التّصوير الطّبقيّ المحوسب (CT) الذي ينتج خيالًا لشريحة خلال الجسم. (تأتي كلمة **tomography** من اليونانية *tomos* = طبقة، *graph* = صورة). وأصبح من الممكن رؤية التركيبات والأضرار التي كان يصعب فحصها سابقًا بوضوح. المبدأ الذي يستند إليه CT مبين في (الشّكل 25 – 42): حزمة رفيعة من أشعة – X (معمولة خطية) تمرّ خلال الجسم إلى الكاشف الذي يقيس الشدّة النافذة.

تتمّ الأقيسة على عدد كبير من النقاط حيث يتمّ تحريك المصدر والكاشف معًا فوق الجسم، ثُمَّ يدار النظام قليلاً حول محور الجسم، ومن ثَمَّ يمسح الجسم مرّة ثانية؛ يتمّ تكرار ذلك بمعدل 1° كلّ مرّةٍ حتى تغطية 180°. ترسل شدّة الحزمة النافذة للنقاط الكثيرة في كلّ مسح، ولكلّ زاوية، إلى حاسوب يعيد بدوره بناء خيال الطبقة.

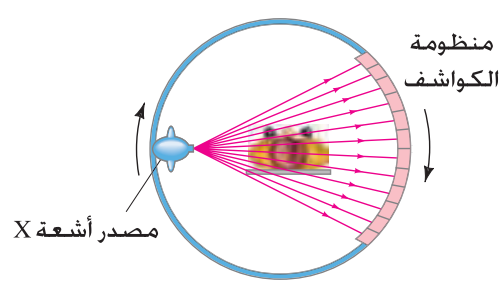
مسوحات CAT

لاحظ أنّ الطبقةَ المصورةَ عموديّةٌ على محور الجسم. لهذا، يُسَمّى CT أحيانًا التّصوير **الطبقيّ المحوري المحوسب** (CAT)، على الرّغم من أنّ الاختصار CT يمكن قراءته كالتالي: التّصوير الطّبقيّ بمساعدة الحاسوب.

يحتاج استعمال كاشف منفرد كما في (الشّكل 25 – 42) إلى دقائق قليلة للعدد الكبير من المسوحات اللازمة لتكوين خيال كامل. وتستعمل الماسحات السريعة حزمة مروحية، (الشّكل 25 – 43أ)، حيث تُكشف الحزمُ المارة في المقطع العرضي للجسم بوساطة كثير من الكواشف في الوقت نفسه. ثم يُدار المصدر والكواشف بعد ذلك حول المريض، وبالتالي يحتاج الخيال إلى ثوان قليلة. وبشكل أسرع، تعدّ مفيدة لمسح القلب، وهي آلات ثابتة المصدر حيث يوجه شعاع من الإلكترونات (بوساطة مجال مغناطيسي) إلى أهداف التنجستون يحيط بالمريض، لتطلق أشعة – X، (انظر الشّكل 25 – 43 ب).

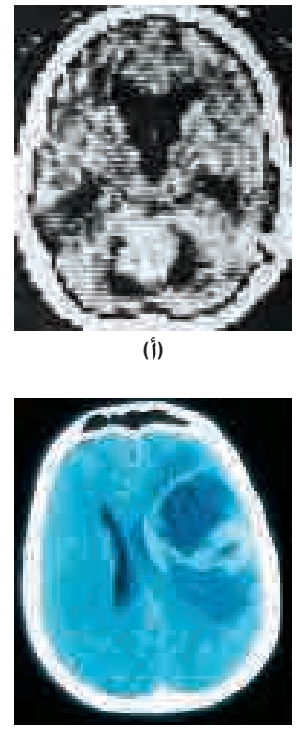


(ب)



(أ)

الشّكل 25 - 43 (أ) ماسح الحزمة المروحية. تقاس الأشعّة النافذة خلال الجسم كلّه آنيًا عند كلّ زاوية. يُدار كلّ من المصدر والكاشف لأخذ أقيسة عند زوايا مختلفة. في نوع آخر من ماسح الحزمة المروحية، هناك كواشف حول 360° للدائرة التي تبقى ثابتة مع دوران المصدر. (ب) في نوع آخر، يوجّه شعاع إلكترونات من المصدر بوساطة مجال مغناطيسي على أهداف من التنجستون تحيط بالمريض.



الشّكل 44 - 25. خيالا CT، بقدرة تحليل مختلفة، يبين كلّ منهما مقطعًا عرضيًا للدماغ. الصّورة (أ) قليلة التحليل. (ب) صورة دقيقة التحليل، تبين ورما سرطانيًا في الدّماغ (المنطقة الداكنة على اليمين).

* تشكيل (تكوين) الخيال

كيف يتشكّل الخيال؟ يمكننا التفكير بالطبقة المراد تصويرها كأنّها مقسّمة إلى صور صغيرة كثيرة (أو عناصر صورة)، يمكن أن تكون مربّعةَ الشّكل. (مثلًا، انظر الشّكل 24 – 49). لـ CT فإنّ عرض كلّ عنصر صورة (بيكسل) يختار وفقا لعرض الكواشف و/ أو عرض حزم الأشعّة – X، وهذا يحدد قدرة تحليل الخيال، والذي يمكن أن يكون 1 mm. يقيس كاشف الأشعّة – X شدّة الحزمة النافذة. وبطرح هذه الكمية من شدّة الحزمة عند المصدر، يعطي الامتصاص الكلي (يدعى المسقط) على امتداد خط الشعاع.

تستعمل طرق رياضية معقدة لتحليل مساقط الامتصاص، للعدد الهائل من مسوحات الحزمة المقيسة (انظر البند التالي). لاستنتاج الامتصاص لكلّ عنصر صورة، وإعطائه "قيمة رمادية" تبعا لمقدار الإشعاع الممتص.

يتكون الخيال من بقع صغيرة (بيكسل) متغيرة الظلال رمادية. عادة، يعطى مقدار الامتصاص رمزًا – لونيّا. الألوان الظاهرة في خيال "اللون – الخطأ" الناتج لا علاقة لها، على أيّ حال، مع اللون الحقيقي للجسم.

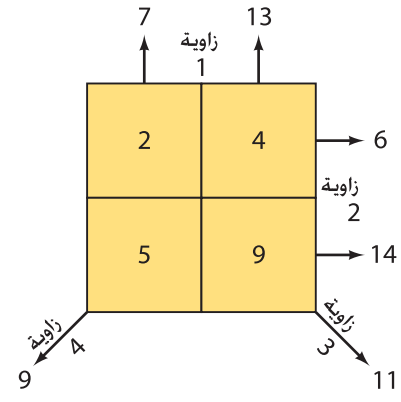
يُظهر (الشّكل 25 – 44) كيف تبدو أخيلة CT الحقيقية. ومن المتفق عليه بصورة عامة أنّ المسح CT قد أحدث ثورة في بعض مجالات الطب بتزويد جهد أقلّ و/ أو تشخيص أقلّ.

ويمكن توظيف التّصوير الطّبقيّ المحوسب أيضًا في التّصوير فوق الصّوتيّ (البند 12 – 9) ولإشعاعات النظائر المشعة، والرّنين المغناطيسيّ النوويّ (البندان 31 – 8، و 31 – 9).

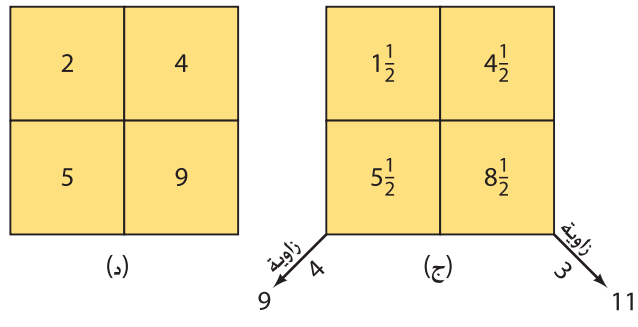
* إعادة بناء خيال التّصوير الطّبقيّ

كيف يمكن تحديد "رمادية" كلّ بيكسل على الرّغم من أنّ كلّ ما نستطيع قياسه هو الامتصاص الكلي على امتداد كلّ خط حزمة في الشّريحة؟ يمكن عمل ذلك فقط باستعمال المسوحات الحزمية الكثيرة والمأخوذة عند زوايا مختلفة كثيرة. افرض أنّ الخيالَ منظومةٌ من 100×100 عنصر بعدد كلّيّ 10^4 بيكسل. إذا كان لدينا 100 زاوية مختلفة، فسنحصل على 10^4 قطعة معلومات. ومن هذه المعلومات يمكن إعادة بناء الخيال، ولكن ليس بدقة. أما إذا قيست زوايا أكثر، فيمكن عندئذٍ إعادة بناء الخيال بدقة أكبر.

ولاقتراح كيفية إعادة البناء الرياضي، نفترض حالة بسيطة جدًّا باستعمال تقنية "الإعادة". افرض أنّ شريحة عينتنا مقسمة إلى 2×2 بيكسل كما هو مبين في (الشّكل 45–25). يمثل العددُ في كلّ بيكسل مقدارَ امتصاص المادة في تلك المساحة (أعشار في المئة): أي أنّ 4 تمثل ضعف الامتصاص الذي تمثله 2. لكننا لا نستطيع قياس هذه القيم مباشرة؛ إنها مجاهيل يجب معرفتها. كلّ ما نستطيع قياسه هي المساقط – الامتصاص الكلي على امتداد خط كلّ حزمة – وهذه تبين في المخطط كمجموع الامتصاصات لعناصر الصّورة على امتداد كلّ خط بأربع زوايا مختلفة. هذه المساقط (معطاة عند رأس كلّ سهم) هي ما نستطيع قياسه، ونريد العمل عكسيًّا منها لنرى إلى أيّ قرب يمكن أن نحصل على الامتصاص الحقيقي لكلّ بيكسل. نبدأ تحليلنا بإعطاء كلّ بيكسل القيمة 0. (الشّكل 46–25 أ). في تقنية الإعادة، نستعمل المساقط لتقدير قيمة الامتصاص في كلّ مربع، ثم نكرّر لكلّ زاوية. حيث مساقط الزّاوية 1 هي 7، و 13. عند تقسيم كلّا منهما بالتساوي بين مربعيهما: يحصل كلّ مربع في العمود الايسر على $3\frac{1}{2}$ (أو 7 انصاف) ويحصل كلّ مربّعٍ في العمود الايمن على $6\frac{1}{2}$ (أو 13 نصف) (نصف 13)؛ انظر (الشّكل 25 – 46 ب). ثم نستعمل المساقط عند الزّاوية 2.



الشّكل 45 - 25 خيال 2×2 يبين قيم الامتصاص الحقيقي والمساقط المقيسة.



الشّكل 46 - 25. إعادة بناء الخيال باستعمال المساقط في عملية الإعادة.

نحسب الفرق بين المساقط المقيسة في الزّاوية 2 (6، و14). والمساقط المعتمدة على التّقريب السّابق (السّطر العلويّ: $6\frac{1}{2} + 3\frac{1}{2} = 10$؛ والشيء ذاته بالنسبة للسّطر السّفليّ). ثم نوزّع هذا الفرق بالتساوي على المربعات في ذلك السّطر. للسّطر العلويّ، لدينا

$$3\frac{1}{2} + \frac{6-10}{2} = 1\frac{1}{2} \quad \text{و} \quad 6\frac{1}{2} + \frac{6-10}{2} = 4\frac{1}{2}$$

وللسّطر السّفليّ

$$3\frac{1}{2} + \frac{14-10}{2} = 5\frac{1}{2} \quad \text{و} \quad 6\frac{1}{2} + \frac{14-10}{2} = 8\frac{1}{2}$$

هذه القيم تُدْخَل كما في (الشّكل 46 – 25 جـ). تاليًا، المساقط عند الزّاوية 3 تعطي:

(يسار فوق) $1\frac{1}{2} + \frac{11-10}{2} = 2$ و (يمين تحت) $8\frac{1}{2} + \frac{11-10}{2} = 9$

وتلك الزّاوية 4 تعطي

(يسار تحت) $5\frac{1}{2} + \frac{9-10}{2} = 5$ و (يمين فوق) $4\frac{1}{2} + \frac{9-10}{2} = 4$

تعود النتيجة المبينة في (الشّكل 46 – 25 د)، بالضبط للقيم الحقيقية. (في المواقف الحقيقية، القيم الصحيحة ليست معلومة، لذلك فهذه الطرق الحاسوبية مطلوبة). وللحصول على هذه الأرقام بالضبط؛ نستعمل 6 قطع للمعلومات (اثنتان عند كلّ من الزاويتين 1، و 2؛ واحدة عند كلّ من الزاويتين 3، 4). ولعدد البيكسل الكبير والمستعمل للأخيلة الحقيقية، فإنّنا لا نصل إلى القيم الدقيقة. لذا، نحتاج إلى عدد كبير من عمليات الإعادة. وتكون الحسابات دقيقة بصورة كافية عندما يكون الفرق بين القيم المحسوبة والمقيسة صغيرًا بدرجة كافية. المثال السابق يظهر الانتقاء" لهذه العملية: إنّ أول عملية إعادة (ب إلى ج في الشّكل 46 – 25) غيرت القيم بـ 2، في حين غيّرت آخر عملية إعادة (ج إلى د) بـ $\frac{1}{2}$ فقط.

ملخص

تكوّن عدسة الكاميرا خيالًا على الفيلم أو على أداة مقرنة بالشحنة في الكاميرا الرّقميّة، عن طريق السماح للضّوء بالعبور خلال المغلاق. يعدّل الوضع البؤريّ للعدسة بتحريكها نسبة إلى الفيلم، ويجب تعديل **حاجز** – f لها (أو فتحة العدسة) تبعًا لإضاءة المشهد، وسرعة المغلاق المنتقاة. تتعدل **العين** البشرية أيضًا تبعًا للإضاءة المتاحة – بفتح القزحية وغلقها. فهي تعدل التبئير ليس بتحريك العدسة، ولكن بتعديل شكلها بحيث تغير بعدها البؤريّ. يتكون الخيال على الشّبكيّة التي تحتوي منظومة من المستقبلات تعرف بالقضبان والمخاريط.

تستعمل نظارة العين المفرّقة أو العدسات اللاصقة لتصحيح العين الحسيرة التي لا تستطيع رؤية الأجسام البعيدة بوضوح. أمّا العدسات اللامة، فتستعمل لتصحيح عيوب العين التي لا ترى الأجسام القريبة بوضوح.

المكبر البسيط هو عدسة محدّبة تكوّن خيالًا وهميًّا لجسم موضوع عند (أو ضمن) البؤرة. **التكبير الزاوي** عندما نرى بعين مرتخية طبيعية هو:

$$M = \frac{N}{f} \qquad \textbf{(25 – 2 أ)}$$

حيث f البعد البؤريّ للعدسة، وN أقرب مسافة للرؤية الواضحة (25 cm "للعين الطبيعية").

يتكون **التلسكوب الفلكيّ** من عدسة شيئية أو مرآة، وعدسة عينية تكبّر الخيال الحقيقيّ المتكوّن **بالشّيئيّة**. **التكبير** يساوي النسبة بين البعد البؤريّ للشيئية إلى البعد البؤريّ للعينية، ويكون الخيال مقلوبًا:

$$M = -\frac{f_o}{f_e} \qquad \textbf{(25 – 3)}$$

[* يستعمل **المجهر المركّب** أيضًا عدستين؛ شيئية وعينية. ويكون الخيال النهائيّ مقلوبًا. التكبير الكليّ هو حاصل ضرب تكبير كلتا العدستين في بعضهما. ويساوي على نحو تقريبيّ

$$M \approx \frac{Nl}{f_e f_o} \qquad \textbf{(25 – 6 ب)}$$

حيث l البعد بين العدستين، أمّا N فبُعد النّقطة القريبة للعين، في حين f_o، وf_e هما البعدان البؤريّان للشيئية والعينيّة على الترتيب.]

المجاهر، والتلسكوبات، والأجهزة الضّوئيّة الأخرى تكون محددة في تشكيل أخيلة حادة بعيوب العدسات. وهذا يتضمن الزّيغان الكرويّ الذي لا تتجمع فيه الأشعّة التي تمرّ خلال حواف العدسة في النّقطة نفسها كالتي تمرّ عند مركز العدسة؛ أمّا الزّيغان اللونيّ، فهو الذي تتجمع الألوان المختلفة فيه في نقاط مختلفة. إنّ العدسات المركّبة، المكونة من عدة عناصر، يمكن أن تصحح العيوب بدرجة كبيرة.

كذلك، فإنّ طبيعة الضّوء الموجية تحدّد حدّة الأخيلة، أو قدرة التحليل. وبسبب الحيود، لا نستطيع إدراك تفاصيل أقلّ من طول موجة الإشعاع المستعمل. وهذا يحدّد قوة تكبير المجهر الضّوئيّ بنحو 500×.

[* **الأشعّة – X** هي نوع من الموجات الكهرومغناطيسية بطول موجة قصير جدًّا. تنتج هذه الأشعّة عندما تصطدم إلكترونات عالية السرعة، تمّ تسريعها بجهد كهربائيّ كبير في أنبوب مفرغ، بهدف زجاجي أو فلزي.]

[* **التّصوير الطّبقيّ المحوسب** (مسوحات CT أو CAT) تستعمل حزم أشعة – X ضيقة خلال مقطع في الجسم لتكوين خيال المقطع.]

أسئلـــة

25 – 1 الكاميرات.

1. لماذا يكون عمق المجال أكبر والخيال أكثر حدّة، عندما تكون عدسة الكاميرا قد "خفضت" إلى عدد – f أكبر؟ أهمل الحيود.

2. صف كيف يؤثر الحيود في نصّ السؤال 1. [مساعدة: انظر المعادلة 3 – 24، أو 7 – 25].

3. لماذا يجب تحريك عدسة الكاميرا بعيدًا عن الفيلم للتركيز على جسم قريب؟

4. لماذا يحتاج كبار السّنّ إلى نظارات ثنائية البؤرة خاصة أكثر من الشباب؟

5. هل سيرى شخص مصاب بقصر النّظر بصورة أوضح تحت الماء عندما يضع النظارة المصححة؟ استعمل مخطّطًا ليبين فيما إذا كان هذا صحيحًا أم لا.

6. تستطيع معرفة الشّخص إن كان مصابًا بقصر النّظر أو طوله عن طريق النّظر إلى عرض وجهه خلال نظارته. إذا ظهر عرض وجه الشخص أضيق خلال النظارات (الشّكل 47 – 25)، فهل هذا الشخص مصاب بقصر النّظر أم طوله ؟

الشّكل 25 - 47 (السّؤال 6)

7. إنّ التّحديق بنصف إغماضة يساعد في رؤية تفاصيل بعيدة. فسّر السّبب.

8. هل الخيال المتكون على شبكية العين البشرية معتدلًا أم مقلوبًا؟ ناقش ما يتضمنه ذلك على إدراكنا للأشياء.

9. تشبه عين الإنسان الكاميرا إلى حدّ بعيد – حتى إذا ترك مغلاق الكاميرا مفتوحًا وحركت الكاميرا فسيتشوه الخيال؛ ولكن عندما تحرك رأسك وعيناك مفتوحتان، فسترى بوضوح. فسّر ذلك.

10. عدسات القراءة هي عدسات لامة. المكبّر البسيط هو أيضًا عدسة لامة. وبالتالي، هل عدسات القراءة مكبّرة؟ ناقش أوجه الشبه والاختلاف بين العدسات اللامة المستعملة في هذين الغرضين.

***11.** المجاهر زهيدة الثمن التي يستعملها الأطفال تنتج عادةً صورًا ملونة عند الحواف. لماذا؟

***12.** يمكن تقليل الزّيغ اللونيّ في العدسة الرقيقة إذا انحنت الأشعّة بالتساوي عند السّطحين. إذا استعملت عدسة مستوية محدبة لتكوين خيال حقيقي لجسم في اللانهاية، فأيّ السّطحين سوف يكون في مقابل الجسم؟ استعمل رسمًا تخطيطيًا لتبين السبب.

***13.** أيّ الزّيغانات الموجودة في عدسة بسيطة ليست موجودة (أو في أقلّ قيمة لها) في عين الإنسان؟

***14.** فسّر سبب حدوث الزّيغ اللونيّ في العدسات الرّقيقة وعدم حدوثه في المرايا.

15. بأيّ معامل يمكنك تحسين قدرة التحليل، مع بقاء الأشياء الأخرى ثابتة، إذا استعملت ضوءًا أزرق ($\lambda = 450\,\text{nm}$) بدلاً من الأحمر ($\lambda = 700\,\text{nm}$)؟

16. اذكر فائدتين على الأقلّ لاستعمال مرايا عاكسة كبيرة في التلسكوبات الفلكية؟

17. ما اللون في الضّوء المرئيّ الذي يعطي أفضل قدرة تحليل في المجهر؟ فسّر ذلك.

18. الذرات ذات قطر $10^{-8}\,\text{cm}$ تقريبا. هل يمكن استعمال الضّوء المرئيّ لرؤية ذرة؟ فسّر ذلك.

مسائـل

25 – 1 الكاميرات

1. (I) عدسة بعدها البؤريّ 55-mm، ولها حاجز – f يتراوح بين $f/1.4$ إلى $f/22$. ما مدى قطر حاجز العدسة المقابل؟

2. (I) عدسة كاميرا تلفزيونية بعدها البؤريّ 14-cm وقطر العدسة 6.0 cm. ما عدد - f لها؟

3. (I) مقياس ضوئيّ يظهر أنّ وضع الكاميرا $\frac{1}{250}\,\text{s}$ عند $f/5.6$ سوف يعطي تعرضا صحيحًا. ولكن المصور يريد استعمال $f/11$ لزيادة عمق المجال. ماذا ستكون سرعة المغلاق؟

4. (I) صورة معرضة بصورة صحيحة أخذت عند $f/16$، و $\frac{1}{60}\,\text{s}$. ما فتحة العدسة المطلوبة إذا كانت سرعة المغلاق $\frac{1}{1000}\,\text{s}$؟

5. (II) صمّمت عدسة تصوير بعدها البؤريّ $f = 135\text{-mm}$ لتغطي أبعاد الجسم من 1.2 m إلى ∞، ما المسافات التي سوف تتحرك خلالها نسبة إلى مستوى الفيلم؟

6. (II) عدسة بعدها البؤريّ 200-mm، يمكن ضبطها بحيث تكون عند 200.0 mm إلى 206.0 mm من الفيلم. ما مدى بُعد الجسم الذي تضبط لأجله؟

7. (II) يرغب مصور مناظر طبيعية تصوير شجرة طولها 28-m من مسافة 58 m. ما البُعد البؤريّ للعدسة المطلوب استعمالها إذا كان على الخيال أن يملأ فيلمًا ارتفاعه 24-mm؟

8. (II) تستعمل كاميرا ذات الثقب فتحةً ضيقة بدلا من العدسة. بيّن باستعمال مخططات شعاعية، كيفية تشكيل أخيلة معقولة الحدّة باستعمال مثل هذه الكاميرا. بشكل خاص، افترض جسمين نقطيّيْن، البُعد بينهما 2.0 cm وعلى بعد 1.0-mm من ثقب الكاميرا الذي قطره 1.0-mm. بيّن أنه لفيلم على بُعد 7.0 cm خلف الثقب يكوّن الجسمان دائرتين منفصلتين لا تتطابقان.

9. (III) افرض أنّ تعرضا صحيحا هو عند $\frac{1}{250}\,\text{s}$ ، و$f/11$. تحت الظروف نفسها، ما وقت التعرض المطلوب لكاميرا ذات الثقب (السّؤال 8) إذا كان قطر الثقب 1.0 mm والفيلم يبعد 7.0 cm من الثقب؟

25 – 2 العين والعدسات المصحِّحة

10. (I) حجرة عين إنسان طولها 2.0 cm، والقطر الأقصى للبؤبؤ نحو 8.0 mm. ما "سرعة" هذه العدسة؟

11. (I) إذا استعمل الشخص المُصابُ بقصرِ النّظرِ في (المثال 25-6) عدساتٍ لاصقةً مصحِّحةً للنقطة البعيدة (∞ =)، فبين أنّ النّقطة القريبة ستكون 41 cm. (هل ستكون النظارات أفضل في هذه الحالة)؟

12. (II) نظارات قراءة، ما قدرتها المطلوبة لشخص، النّقطة القريبة له 115 cm بحيث يمكنه قراءة شاشة حاسوب عند 55 cm؟ افرض أنّ البعد بين العدسة والعين 1.8 cm.

13. (II) شخص له بعد النّقطة البعيدة 14 cm. ما قدرة العدسات اللازمة لتصحيح هذا النّظر إذا وضعت العدسات على بعد 2.0 cm من العين؟ ما قدرة العدسات اللاصقة الموضوعة على العين التي يحتاج إليها هذا الشخص؟

14. (II) يعاني شخص عندما يقرأ، فيمسك الكتاب على طول ذراعه، المسافة على بعد 45 cm (= النّقطة القريبة). ما قدرة عدسات النظارات المناسبة له، على فرض أنها ستكون موضوعة على بُعد 2.0 cm من العين، ويريد القراءة عند النّقطة القريبة الطبيعية 25 cm؟

15. (II) صُحِّحَتِ العينُ اليسرى لشخص بعدسة قدرتها 3.50-diopter−، على بعد 2.0 cm من العين. (أ) هل العين اليسرى لهذا الشخص قصيرة النّظر أم بعيدة النّظر؟ (ب) ما النّقطة البعيدة لهذه العين دون نظارات؟

16. (II) تستطيع العين اليمنى لشخص رؤية الأشياء بوضوح فقط إذا كانت بين 25 cm و 75 cm (أ) ما قدرة العدسة اللاصقة اللازمة بحيث تبدو الأجسام البعيدة واضحة؟ (ب) ماذا ستكون النّقطة القريبة بوجود العدسة في مكانها؟

17. (II) بكم أطول ستكون العين قصيرة النّظر في (المثال 25 – 6) من 2.0 cm للعين الطبيعية؟

18. (II) البعد البؤريّ لعدسة عين شخص قصير النّظر 22.0 cm−، وبعدها عن العين 1.8 cm. إذا استعمل الشخص عدسات ملتصقة بالعين، فماذا سيكون البعد البؤريّ للعدسة اللاصقة؟

19. (II) ما البعد البؤريّ لنظام العين – عدسة عند النّظر إلى: (أ) جسم في اللانهاية؟ (ب) جسم يبعد 33 cm من العين؟ افرض أنّ البعد بين العدسة والقرنية 2.0 cm.

20. (III) شخص قصير النّظر لديه النّقطة القريبة والنّقطة البعيدة على بعد 10.0 و 20.0 cm على الترتيب. إذا استعمل عدسات قدرتها $P = -4.00\ \text{D}$. فما بُعد النقطتين القريبة والبعيدة الجديدتين؟

25 – 3 العدسة المكبّرة

21. (I) ما تكبير عدسة تستعمل لعين مرتخية بعدها البؤريّ 12 cm؟

22. (I) ما البعد البؤريّ لعدسة مكبرة تكبيرها 3.5× لعين طبيعية مرتخية؟

23. (I) عدسة مكبرة تكبيرها 2.5× لعين طبيعية تنظر إلى خيال عند النّقطة القريبة. (أ) ما بعدها البؤريّ؟ (ب) ما بعدها البؤريّ إذا كان التكبير 2.5× لعين مرتخية؟

24. (II) يستعمل شرلوك هولمز عدسة بعدها البؤريّ 9.00-cm كعدسة مكبرة. للحصول على أقصى تكبير، أين يجب وضع الجسم (افرض عينا طبيعية)؟ وكم سيكون التكبير عندئذٍ؟

25. (II) خنفساء عرضها 3.30-mm تشاهد عبر عدسة بعدها البؤريّ 9.50-cm. عين طبيعة تنظر إلى الخيال عند نقطتها القريبة. احسب: (أ) تكبيرها الزاوي. (ب) عرض الخيال. (ج) بعد الجسم عن العدسة.

26. (II) وضعت حشرة صغيرة على بعد 5.55 cm من عدسة بعدها البؤريّ 6.00-cm+. احسب: (أ) موقع الخيال. (ب) التكبير الزاوي.

27. (II) عدسة مكبرة بعدها البؤريّ 8.5 cm استعملت لقراءة مطبوعة موضوعة على بعد 7.5 cm. احسب: (أ) موقع الخيال. (ب) التكبير الزاوي.

28. (II) عدسة مكبرة تكبيرها 3.0× لعين طبيعية مرتخية. ماذا سيكون التكبير لهذه العدسة لعين مرتخية نقطتها القريبة: (أ) 55 cm؟ (ب) 16 cm؟ فسّر الفروق.

25 – 4 التلسكوبات

29. (I) ما تكبير تلسكوب فلكيّ، البعد البؤريّ لشيئيته 76 cm، والبعد البؤريّ لعينيته 2.8 cm؟ ما الطول الكلي له عند ضبطه لعين مرتخية؟

30. يُراد أن يكون التكبيرُ الكلّيُّ لتلسكوب فلكي 25× إذا استُعْمِلَتْ شيئيّةٌ بعدُها البؤريّ 78-cm، فماذا يجب أن يكون البعد البؤريّ للعينية؟ ما الطول الكلي للتلسكوب عند ضبطه لعين مرتخية؟

31. (I) تلسكوبٌ مزدوج قوة تكبيره 8.0×، والبعد البؤريّ لعينيته 2.8-cm. ما هو البعد البؤريّ للشيئية؟

32. (II) تلسكوبٌ فلكيّ له شيئية بعدها البؤريّ 85cm، وعينية قدرتها 35-D+. ما تكبيره الكليّ؟

33. (II) تلسكوب فلكيّ البعد بين عدستيه 75.2 cm. إذا كان البعد البؤريّ لشيئيته 74.5 cm، فما تكبيره؟ افرض أنّ العين مرتخية.

34. (II) ضُبط تلسكوب جاليليو لعين مرتخية فكان طوله 32.8 cm. إذا كان البعد البؤريّ للشيئية 36.0 cm، فما تكبيره؟

35. (II) ما قدرة التكبير لتلسكوب فلكيّ يستخدم مرآة عاكسة نصف قطر تكورها 6.0 m، وعدسة عينية بعدها البؤريّ 3.2 cm؟

36. (II) يبدو خيال القمر مكبّرًا 120× بتلسكوب فلكيّ عاكس البعد البؤريّ لعينيته 3.2 cm. فما البعد البؤريّ ونصف قطر التّكوّر لمرآته الرئيسة (الشّيئيّة)؟

37. (II) تمّ ضبط تلسكوب فلكي تكبيره 170× لعين مرتخية عندما كانت عدستاه على بعد 1.25 m من بعضهما. ما البعد البؤريّ لكلّ عدسة؟

38. (II) تلسكوب عاكس (الشّكل 25 – 21 ب) نصف قطر مرآته الشّيئيّة 3.0 m ونصف قطر تكور مرآته العينيّة 1.50 m−. إذا كان البعد بين المرآتين 0.90 m، فما البعد أمام العينيّة الذي يجب وضع الفيلم عنده لتسجيل خيال نجم؟

25* – 5 المجهر

***39.** (I) يُستعمل مجهر عينية بعدها البؤريّ 1.40 cm. باستعمال عين طبيعية بخيال في اللانهاية، يكون طول الأنبوب 17.5 cm، والبعد البؤريّ للشيئية 0.65 cm. ما تكبير هذا المجهر؟

*40. (I) يُستخدم مجهرٌ قوة تكبيره ×620 شيئية بعدها البؤريّ 0.40-cm. إذا كان طول الأنبوب 17.5 cm، فما البعد البؤريّ للعينية؟ افرض عينا طبيعية والخيال النهائي في اللانهاية.

*41. (I) مجهر طوله 17-cm، البعد البؤريّ لعينيته 2.5 cm ولشيئيته 0.28 cm. ما تكبيره التقريبيّ؟

*42. (II) مجهر، قوة تكبير العينيّة له ×12.0 والشّيئيّة ×59.0 ، والبعد بينهما 20.0 cm. احسب: (أ) التكبير الكلي. (ب) البعد البؤريّ لكلّ عدسة. و أين يجب وضع الجسم لعين طبيعية مرتخية لتراه في البؤرة؟

*43. (II) مجهر، البعد البؤريّ لعينيته 1.8-cm، ولشيئيته 0.80-cm. افرض عينا طبيعية مرتخية، احسب: (أ) موقع الجسم إذا كان البعد بين العدستين 16.0 cm. (ب) التكبير الكلّيّ.

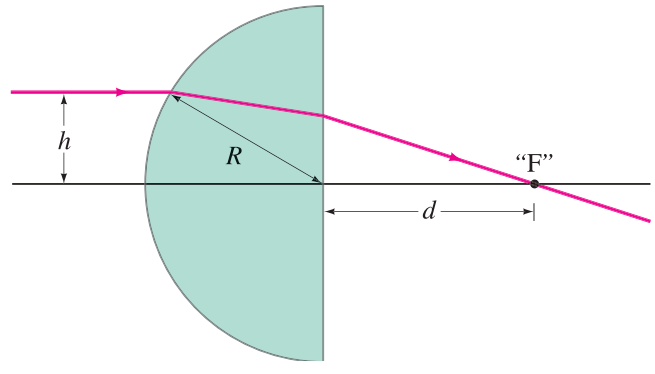
*44. (II) أعد حلّ (المسألة 43) على افتراض أنّ الخيال النهائيّ عند25cm من العينيّة (أقرب نقطة لعين طبيعية).

*45. (II) مجهر مركب، البعد البؤريّ لعينيته 2.70 cm، ولشيئيته $f = 0.740\text{ cm}$. إذا وضع جسم 0.790 cm من العدسة الشّيئيّة، فاحسب: (أ) البعد بين العدستين عندما يضبط المجهر لعين مرتخية (ب) التكبير الكلّيّ.

*25 – 6 الزّيغانات

*46. (II) عدسة عديمة الزّيغ اللونيّ مصنوعة من عدستين رقيقتين متلاصقتين، بعداهما البؤريّان $f_1 = -28\text{ cm}$، و$f_2 = +23\text{ cm}$. (أ) هل التركيب مجمّع أم مفرّق؟ (ب) ما هو البعد البؤريّ الكلّيّ؟

47. (III) دعنا نتفحص الزّيغ الكرويّ في وضع معين. عدسة مستوية محدبة معامل انكسارها 1.50، ونصف قطر تكورها $R = 12.0\text{ cm}$ مبينة في (الشّكل 25 – 48). خذ شعاعًا قادمًا موازيًا للمحور الرّئيس، ويبعد عنه مسافة h كما هو مبين. احسب المسافة d، من السّطح المستوي للعدسة الذي يقطع فيه هذا الشّعاع المحور الرّئيس إذا: (أ) $h = 1.0\text{ cm}$ (ب) $h = 6.0\text{ cm}$ (ج) ما البعد بين هاتين البؤرتين؟ (د) ما نصف قطر "دائرة التشويش الصغرى" الناتجة من شعاع $h = 6.0\text{-cm}$ عند "البؤرة" لـ $h = 1.0\text{ cm}$؟



الشّكل 48 - 25(مسألة 47)

25 – 7 إلى 25 – 9 قدرة التحليل

48. (I) ما حدود قدرة التحليل (بالدرجات) التي يضعها الحيود على منظار ويلسون ذي 100-in (254-cm) قطر المرآة) و ($\lambda = 550\text{ nm}$)؟

49. (II) افرض أنك تريد بناء تلسكوب يمكنه تحليل معالم البعد بينها 7.0 km على القمر الذي يبعد عنا 384,000 km. لديك شيئية بعدها البؤريّ 2.0-m وقطرها 11.0 cm. ما البعد البؤريّ للعينية اللازم إذا كانت عينك تستطيع تحليل أجسام البعد بينها 0.10 mm عند بعد 25 cm؟ ما حدود قدرة التحليل (بالراديان) الذي يضعه حجم العدسة الشّيئيّة (أي بالحيود)؟ استخدم $\lambda = 550\text{ nm}$

50. (II) العدسة العادية في كاميرا 35-mm، بعدها البؤريّ 50.0 mm. قطر فتحتها يتغير من $(f/2)$ 25 mm إلى 3.0 mm $(f/16)$. احسب قدرة التحليل التي يضعها الحيود لِـ $f/2$، و $f/16$. حدّد عدد الخطوط لكلّ 1mm التي تحلل على الفيلم. خذ $\lambda = 550\text{ nm}$.

51. (II) نجمان يبعدان 15 سنة ضوئية أمكن تحليلهما بتلسكوب (قطر المرآة) 55-cm. ما البعد بين النجمين؟ افرض أنّ $\lambda = 550\text{ nm}$، وأنّ التحليل يفرضه الحيود.

52. (II) (أ) على أيّ بعد تستطيع عين الإنسان أن تميز مصباحي سيارة البعد بينهما 2.0 m؟ اعتبر الحيود فقط ، وافرض أنّ قطر بؤبؤ العين 5.0 mm، وطول موجة الضّوء 550 nm. (ب) ما البعد الزّاويّ الأدنى الذي تستطيع العين تحليله عند النّظر إلى نجمين، باعتبار آثار الحيود فقط ؟ في الواقع الجواب نحو $1'$ قوسيَّة. لماذا لا يساوي جوابك في (ب)؟

53. (II) البعد بين الأرض والقمر نحو $400 \times 10^6\text{ m}$. عندما يكون المريخ على بعد $8 \times 10^{10}\text{ m}$ من الأرض، هل يستطيع شخص يقف على المريخ أن يحلل الأرض وقمرها كجسمين منفصلين دون تلسكوب؟ افرض قطر البؤبؤ 5 mm وطول موجة الضّوء $\lambda = 550\text{ nm}$.

*25 – 11 الأشعّة - X

*54. (II) تسقط أشعة – X طول موجتها 0.133 nm على بلورة ذراتها في مستويات البعد بينها 0.280 nm. عند أيّ زاوية ϕ (نسبة إلى السّطح، الشّكل 37 – 25) يجب توجيه الأشعّة – X إذا أردنا رؤية أول قمة حيود؟

*55. (II) أسقطت أشعة – X طول موجتها 0.0973 nm على بلورة مجهولة. قمة الحيود الثانية تظهر عندما تسقط الأشعّة – X بزاوية 23.4° نسبة إلى سطح البلورة. ما البعد بين مستويات البلورة؟

*56. (II) يشاهد حيود براغ ذي الرتبة 1 عند زاوية 25.2° نسبة إلى سطح البلورة، حيث البعد بين الذرات 0.24 nm. (أ) عند أيّ زاوية سوف نشاهد قمة الحيود الثانية؟ (ب) ما طول موجة الأشعّة – X المستعملة؟

*25 – 12 التّصوير الطّبقيّ المحوسب

*57. (II) (أ) افرض لخيال أشعة – X العاديّ أنّ حزمة الأشعّة – X مكونة من أشعة متوازية. ماذا سيكون تكبير الخيال؟ (ب) افرض بدلا من ذلك أنّ الأشعّة قادمة من مصدر نقطيّ (كما في الشّكل 41 – 25) على بعد 15 cm أمام جسم إنسان سمكه 25 cm، وأنّ الفيلم مضغوط على ظهر الشخص، احسب مدى التكبيرات الناتجة وناقشها.

مسائل عامة

58. يضع آدم نظارات 3.50-diopter+ لتصحيح عيب نظره كي يضع النّقطة القريبة على بعد 25 cm. (افرض أنّه يضع العدسات على بعد 2.0 cm من العين). (أ) احسب البعد البؤريّ لعدسات آدم. (ب) احسب النّقطة القريبة لآدم قبل النظارات. (ج) استعمل موسى، الذي عيناه طبيعيتان بأقرب نقطة عند 25 cm، نظارة آدم. احسب اقرب نقطة للرؤية الواضحة لموسى بنظارات آدم.

59. مرّ الصباح الباكر نحو منتصف النهار، وزادت شدّة الضّوء، لاحظت مصورة أنّه إذا حافظت على سرعة المغلاق للكاميرا ثابتة، فإنّ عليها أن تغير العدد-f من $f/5.6$ إلى $f/22$. بأيّ نسبة زادت شدّة ضوء النهار خلال هذا الوقت؟

60. بيّن أنه بالنسبة لأجسام بعيدة جدًّا (في اللانهاية)، يتناسب تكبير عدسة كاميرا مع بعدها البؤريّ.

61. كاميرا مزودة بعدسة، بُعدها البؤريّ 50-mm، ما بُعد الجسم إذا كان طول الخيال مساويًا لطول الجسم؟ ما بعد الجسم عن الفيلم؟

62. تستطيع سيدة أن ترى بوضوح بعينها اليمنى فقط عندما تكون الأجسام بين 45 cm و155 cm بعيدة عن العين. ما القدرتان لعدسة ذات بؤرتين تستعملهما السيدة كي ترى الأجسام البعيدة بوضوح (الجزء العلوي)، وتكون قادرة على قراءة كتاب يبعد 25 cm (الجزء السفلي) بعينها اليمنى؟ افرض أنّ العدسة ستكون على بعد 2.0 cm من العين.

63. النّقطة القريبة لطفل 15 cm. ما أكبر تكبير يستطيع هذا الطفل أن يحققه باستعمال عدسة مكبرة بعدها البؤريّ 8.0-cm؟ ما التكبير الذي تستطيع عين طبيعية وصوله بالعدسة نفسها. أيّ الشخصين يرى تفاصيل أكثر؟

64. ما قدرة التكبير لعدسة +4.0-D عند استعمالها كمكبر؟ افرض عينا مرتخية طبيعية.

65. ضاع فيزيائي في الجبال، وحاول أن يصنع منظارًا باستعمال عدستي نظارته المخصصة للقراءة. لهما قدرة +2.0 D، و+4.5 D على الترتيب. (أ) ما أكبر قوة تكبير للمنظار يمكن الحصول عليها؟ (ب) أيّ العدستين سوف تستعمل عيناه؟

66. يستعمل رجل عمره 50 سنة عدسات قدرتها +2.5-diopter لقراءة الصحيفة الإخبارية على بعد 25 cm. بعد 10 سنوات، يجب عليه أن يمسك الصحيفة على بعد 35 cm ليرى بوضوح باستعمال العدسات نفسها. ما قدرة العدسات اللازمة الآن ليحمل الصحيفة على بعد 25 cm؟ (تقاس المسافات من العدسات).

67. تحلّق طائرات التَّجَسُّس على ارتفاعات شاهقة (25 km) لتجنب الاعتراض. وتستطيع آلات التّصوير فيها الكشف عن معالم صغيرة بحدود 5 cm. ماذا يجب أن تكون أصغر فتحة لعدسة الكاميرا لتعطي قدرة التحليل هذه؟ (استعمل $\lambda = 550\ \text{nm}$).

68. عند التقاط صور على مسافات قريبة جدًّا، يجب زيادة زمن التعريض نظرًا لزيادة المسافة بين العدسة والفيلم. (أ) بيّن أنه عندما يكون الجسم قريب جدًّا من الكاميرا لدرجة أنّ طول الخيال يساوي طول الجسم، يجب أن يكون زمن التعريض أطول بأربع مرات (أو حاجز - $2f$) مما لو كان الجسم على بعد كبير جدًّا (لنقل ∞)، مع الإضاءة نفسها وحاجز-f. (ب) بين أنّه إذا كانت d_o على أقلّ أربع أو خمس مرات من البعد البؤريّ f للعدسة، يزاد زمن التعريض بمقدار أقلّ من نصف حاجز-f نسبة إلى الجسم نفسه عندما يكون على مسافة كبيرة جدًّا.

69. البعد بين الشّيئيّة والعينيّة لتلسكوب هو 85 cm. إذا كانت قدرة العينيّة 23 diopters+، فما التكبير الكلي للتلسكوب؟

70. يستعمل تلسكوب هَبِلْ الفلكي، مع قطر الشّيئيّة 2.4 m، لمراقبة القمر. قدّر أقلّ مسافة بين جسمين على القمر يمكن لـ هَبِلْ أن يميزهما. اعتبر حيود ضوء طول موجته 550 nm. افرض أنّ هَبِلْ قريب من الأرض.

71. عدستان لامتان؛ الأولى لها $f = 4.0\ \text{cm}$، والثانية لها $f = 44\ \text{cm}$، عمل منهما منظار. (أ) ما طول المنظار وتكبيره؟ أيّ العدستين منهما ستكون العينيّة؟ (ب) افرض أنّ العدستين ركبتا لعمل مجهر؛ إذا كان التكبير المطلوب ×25، فكم سيكون طول المجهر؟

72. تلسكوب فلكيّ تكبيره 8.0. إذا كان البعد بين العدستين 28 cm، فحدّد البُعد البؤريّ لكلّ منهما.

73. إذا أردت أن تصمم قمر تجسس لتصور أرقام لوحات إجازة السّير. بغرض أنه من الضروري تحليل نقاط مبتعدة 5 cm بضوء طول موجته 550-nm، وأنّ القمر يدور على ارتفاع 130 km، ما قطر العدسة المطلوب؟

***74.** عدسة Lucite المستوية المحدبة (الشّكل 29 – 23 أ) لها سطح مستوٍ والآخر له $R = 18.4\ \text{cm}$. تستعمل هذه العدسة لمراقبة جسم موضوع على بعد 66.0 cm منها، الجسم مزيج من الأحمر والأصفر. معامل انكسار الزجاج 1.5106 للضوء الأحمر و1.5226 للضوء الأصفر. ما مواضع خيالي الأحمر والأصفر المتكوّنين بوساطة العدسة؟

إجابات التمارين

أ: 6.3 m

ب: $P = -4.0\ \text{D}$

جـ: 48 cm

د: 2 m