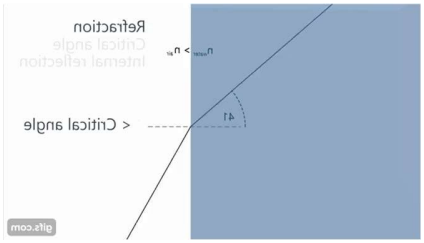
لانكسارِ الضوءِ تطبيقاتٌ عدّةٌ في حياتِنا، فلا يكادُ جهازٌ بصريٌّ يخلو من دخولِ انكسارِ الضوءِ في مبدأِ عملِه، وتتعدّدُ الظواهرُ البصريّةُ الضوئيّةُ(التي تحدثُ في) الطبيعةِ التي تنشأُ بسببِ انكسارِ الضوءِ، وفي ما يأتي استعراضٌ لبعضِ التطبيقاتِ والظواهرِ البصريّةِ.



الانعكاسُ الكليُّ الداخليُّ والزاويةُ الحرجةُ

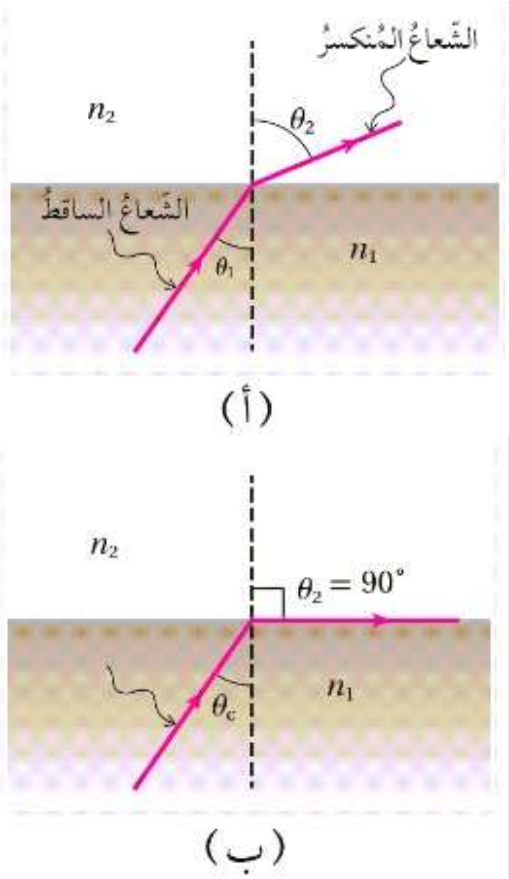
Total Internal Reflection and the Critical Angle

الزاويةُ الحرجةُ Critical Angle

تعلّمتُ في الدرسِ السابقِ أنَّه عندَما ينتقلُ من وسطٍ شفّافٍ شعاعٌ ضوئيٌّ معاملُ انكسارِه كبيرٌ إلى وسطٍ آخرَ معاملُ انكسارِه صغيرٌ فإنَّه ينكسرُ مبتعدًا عن العمودِ، أيْ تكونُ زاويةُ انكسارِ الشعاع الضوئيِّ أكبرَ من زاويةِ سقوطِه، على نحوِ ما يظهرُ في الشكلِ (٥/أ)، ووفقًا لقانونِ سنِل:

(sin ?1 ?1 = sin ?2 ?2)

يمكنُ ملاحظةُ أنَّه بزيادةِ زاويةِ تزدادُ زاويةُ (θ_1) السقوطِ ، ذلكَ أنَّ (θ_2) الانكسارِ معاملي ثابتانِ (n_1 ،n_2) الانكسارِ للوسطينِ الشفّافينِ. أكبرُ ($\theta 2$) ونظرًا إلى أنَّ دائمًا ، فإنَّه عندَ زاويةِ (θ_1) من سقوطٍ معيَّنةٍ تكونُ زاويةُ الانكسارِ (90°) عندَما يكونُ الشعاعُ الضوئيُّ المنكسِرُ ملامسًا للحدِّ الفاصلِ بينَ الوسطينِ الشفّافينِ، على نحوِ ما يظهرُ في الشكلِ (٥/ب).



الشكل (5):
أ. زاوية السقوطِ أقلُّ منَ الزاويةِ الحرجةِ.
ب. زاويةُ السقوطِ تساوي الزاويةَ الحرجةَ.

ويُطلقُ على زاويةِ سقوطِ الشعاع الضوئيِّ التي تقابلُها زاويةُ

انكسارٍ

الزاويةِ اسمَ: **(90°) مقدارُها**

الحرجةِ

Critical angle ، ويُرمزُ

إليها بالرمزِ (θ_c).

وبتعويض ($\theta_2 = 90^\circ$)

و ($\theta_1 = \theta_c$)

في قانونِ سنِل ينتجُ:

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ$$

ومنها:

sin ?? = ?2 ?1

أُلاحظُ منَ المعادلةِ السابقةِ أنَّ:

($n_1 > n_2$) دائمًا، لأنَّ أكبرَ

قيمةٍ

لجيبِ الزاويةِ يساوي واحدًا،

وهذا

يعني أنَّهُ يمكنُ الحصولُ

على الزاويةِ

الحرجةِ فقطْ عندما ينتقلُ

الشعاعُ
الضوئيُّ من الوسطِ
الذي معاملُ
انكسارِه كبيرٌ إلى الوسطِ الذي
معاملُ انكسارِه صغيرٌ. وإذا
انتقلَ
الضوءُ من وسطٍ شفّافٍ إلى
الفراغ
(الهواءِ)، على أنْ تكونَ زاويةُ
سقوطِه
في الوسطِ الشفّافِ تساوي
الزاويةَ
الحرجةَ، فإنَّ الحرجةَ، ($n_2 = 1$ ،
وتكونُ ($n_1 = n$
(θ_c) الزاويةَ الحرجةَ عندَها
للوسطِ
الشفّافِ، أيْ إنَّ:
$\sin \theta_c = 1$
n: معاملُ انكسارِ الوسطِ
الشفّافِ.

مثال

أَحسبُ الزاويةَ الحرجةَ للماءِ، علمًا أنَّ معاملَ انكسارِ الماءِ (1.33).

الحل

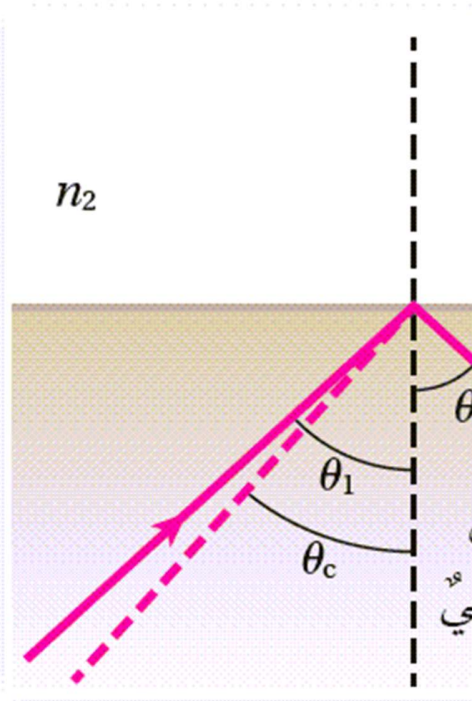
sin ⬚ =1⬚
sin ⬚=11.33=0.75
⬚ = 48.6°

تمرين

أَحسبُ الزاويةَ الحرجةَ لقالبٍ منَ الزجاج معاملُ انكسارِه (1.5).

الانعكاسُ الكليُّ الداخليُّ
Total Internal Reflection

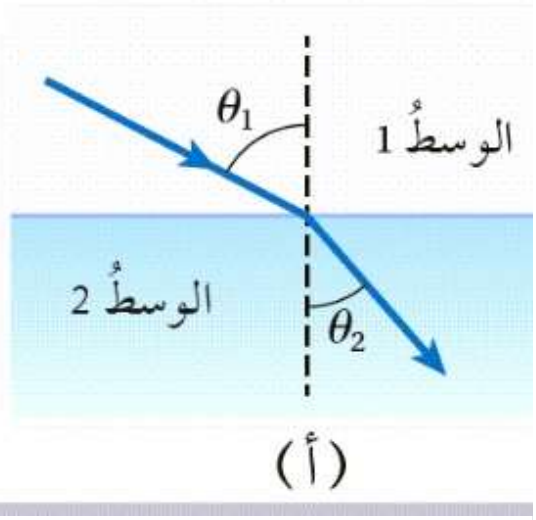
عندما ينتقلُ شعاعٌ ضوئيٌّ من وسطٍ
معاملُ انكسارِه كبيرٌ إلى وسطٍ معاملُ
انكسارِه صغيرٌ، وكانتْ زاويةُ سقوطِ
الشعاع الضوئيّ أكبرَ
منَ الزاويةِ الحرجةِ،
فإنَّ الشعاعَ ينعكسُ كليًّا في الوسطِ
الذي سقطَ فيه،
وتكونُ زاويةُ السقوطِ مساويةً لزاويةِ
الانعكاسِ، وفقًا لقانونِ
الانعكاسِ
الذي دُرِّسَ في صفٍّ سابقٍ،
على نحوِ



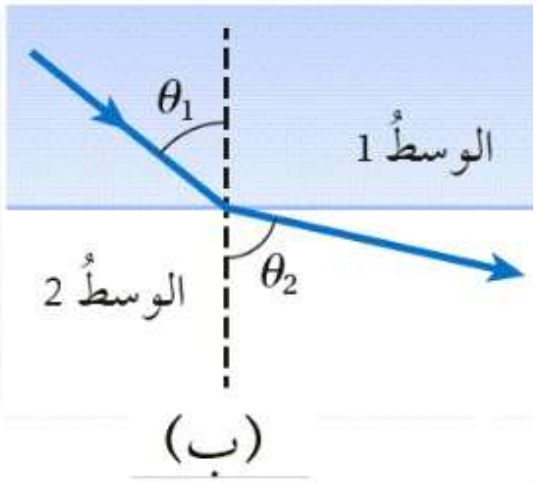
اوية سقوطِ الشعاعِ
من الزاويةِ الحرجةِ.

ما يظهرُ في الشكلِ
ويُطلقُ على .(6)
العمليّةِ التي تنعكسُ فيها
الأشعّةُ
الضوئيّةُ كُليًّا في الوسطِ الذي
سقطتْ
فيه اسمَ: الانعكاسِ الكلّيِّ
الداخليِّ
.Total Internal
Reflection

مثال
أ) أُبيّنُ أيُّ الشكلينِ (أ، ب)
يمكنُ أنْ
يُحقّقَ شروطَحدوثِ انعكاسٍ



(أ)



كلّيّ
داخليّ عندَما تسقطُ الأشعّةُ الضوئيّةُ
في الوسطِ الأولِ.
ب) إذا كانَ مُعامِلا الانكسارِ للوسطينِ
الأولِ والثاني على الترتيبِ للشكلِ (ب):
فأَحسبُ الزاويةَ ، ١,٣ ، 1.8
الحرجةَ في
الوسطِ الأولِ.

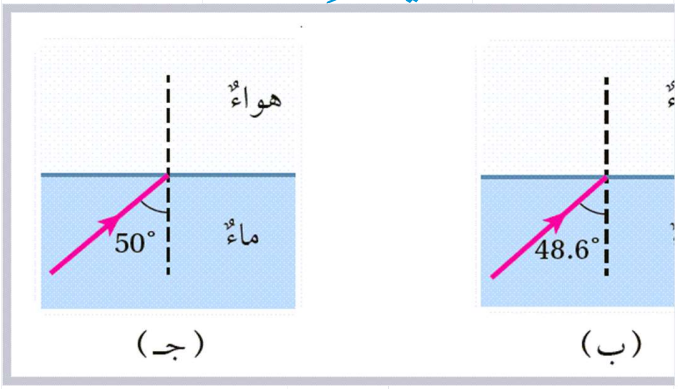
الحل

أ) الشكلُ (ب)، لأنَّ ($\theta_1 <$ θ_2) وهذا
يدُلُّ بحسبِ قانونِ سنِل على
أنَّ:
، أيْ أنَّ الضوءَ ($n_1 > n_2$)
ينتقلُ
منَ الوسطِ ذي معاملِ الانكسارِ
الأكبرِ إلى الوسطِ ذي معاملِ

الانكسارِ
الأصغرِ، وحتى تنعكسَ
الأشعّةُ الضوئيّةُ
انعكاسًا كليًّا داخليًّا في الوسطِ
الأولِ،
يجبُ أنْ تسقطَ بزاويةٍ أكبرَ منَ
الزاويةِ
الحرجةِ.
ب)
sin ?? = ?2?1
= 1.31.8
= 0.72
?? = 46.2°
حتى يحدثَ انعكاسٌ كلّيٌّ
داخليٌّ يجبُ أن
تزيدَ زاويةُ السقوطِ في الوسطِ
الأولِ
على (46.2°).

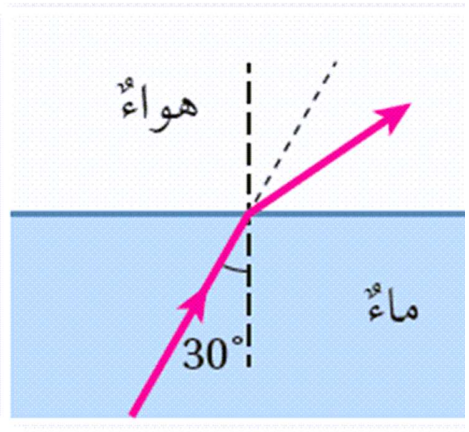
مثال

أُكملُ مساراتِ الأشعّةِ في الأشكالِ الآتيةِ لتوضيحِ مسارِ الضوءِ في كلِّ حالةٍ.



الحل

للشكلِ (أ): زاويةُ السقوطِ أقلُّ منَ الزاويةِ الحرجةِ للماءِ، والشعاعُ الضوئيُّ يتّجهُ من وسطٍ شفّافٍ معاملُ انكسارِه كبيرٌ إلى وسطٍ معاملُ انكسارِه



(أ)

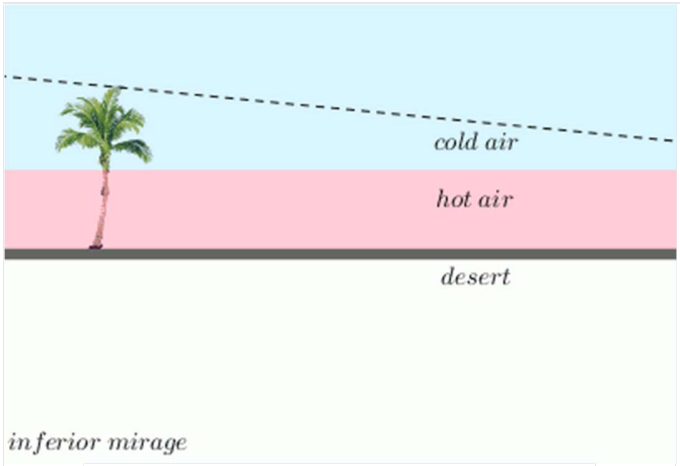
Mirage السّرابُ

عادةً Mirage يُشيرُ السّرابُ إلى الخداع البصريّ الذي يراهُ مراقبٌ في الصحراءِ، حيثُ يرى صورةَ جسمٍ بعيدٍ على أنَّه بركةُ ماءٍ، على نحوِ ما يظهرُ في الشكلِ (٧/أ).

(ب)

الشكلُ (٧): السّرابُ كما يظهرُ:

أ . في الصحراءِ. ب. على الطرقاتِ.



ويُرى السّرابُ أيضًا في مناطقَ أُخرى في أيامِ الصيفِ الحارّةِ، ولاسيّما على الطرقاتِ، على نحوِ ما يظهرُ في الشكلِ (٧/ب). ويُشارُ إلى هذا النوع منَ السّرابِ باسمِ: السّرابِ الصحراويِّ (السُّفليِّ) Inferior Mirage. على عكسِ نوع آخرَ مختلفٍ من السّرابِ يُسمّى: السّرابَ القطبيَّ (العُلويَّ) Superior Mirage ، الذي يُشاهَدُ في المناطقِ القطبيّةِ الباردةِ.

فالسّرابُ عمومًا، ظاهرةٌ طبيعيةٌ تحدثُ نتيجةَ انكساراتٍ متتاليةٍ للضوءِ خلالَ طبقاتِ الهواءِ القريبةِ من سطحِ الأرضِ. وفي ما يأتي توضيحٌ لسببِ تكوّنِ نوعي السّرابِ، الصحراويّ والقطبيّ:

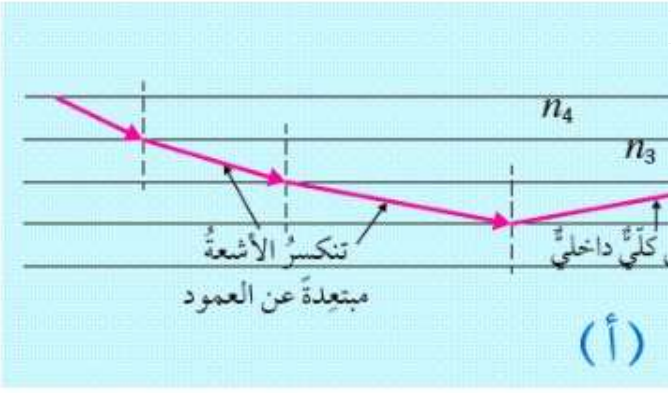
السَّرابُ الصحراويُّ

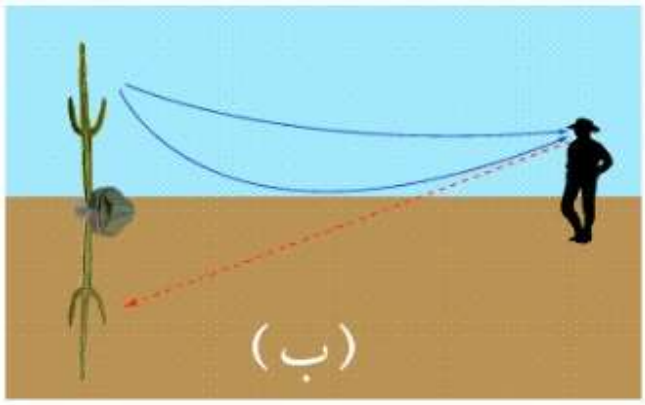
Inferior Mirage

في أيامِ الصيفِ الحارّةِ، يكونُ الهواءُ الملامسُ لسطحِ الأرضِ وقتَ الظهيرةِ ساخنًا جدًّا، وتقلُّ سخونتُه بالابتعادِ عن سطحِ الأرضِ، أيْ إنَّ درجةَ الحرارةِ تتناقصُ معَ الارتفاعِ.

ومنَ المعلومِ أنَّ معاملَ انكسارِ الهواءِ يزدادُ

بنقصانِ درجةِ حرارتِه، لذا يزدادُ معاملُ الانكسارِ معَ الارتفاعِ عن سطحِ الأرضِ. فالأشعّةُ الضوئيةُ القادمةُ من جسمٍ مرتفع بعيدٍ نسبيًّا يحدثُ لها انكساراتٌ متتاليةٌ عندَ انتقالِها خلالَ الهواءِ، التي تختلف في معاملِ الانكسارِ، حيثُ تنكسرُ مبتعدةً عن العمودِ، بحسبِ قانونِ سنِل، على نحو ما يظهرُ في الشكلِ (٨/أ).





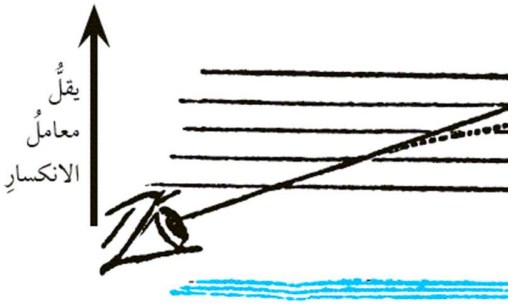
الشكلُ (٨): أ. الانكساراتُ المتتاليةُ للأشعةِ الضوئيةِ خلالَ طبقاتِ الهواءِ.
ب. مخطّطٌ يبيّنُ تشكُّلَ السرابِ الصحراويِّ
وعندَ حدٍّ معيّنٍ تزيدُ فيه زاويةُ السقوطِ عنِ الزاويةِ الحرجةِ، تنعكسُ الأشعّةُ الضوئيّةُ انعكاسًا ، انعكاساً كلياً قم تستمر في الانحناءِ إلى أعلى حيثُ تظهرُ صورةٌ مقلوبةٌ على امتدادِ آخرِ للجسم شُعاع يصلُ إلى عينِ المراقبِ، على نحوِ ما يظهرُ

في الشكلِ (٨/ب).

السَّرابُ القطبيُّ Superior Mirage

على عكسِ السّرابِ ففي المناطقِ الصحراويّ، يكونُ الهواءُ القطبيةِ الباردةِ الملامسُ لسطح الأرضِ أكثرَ برودةً من الذي فوقَه،حيثُ تزيدُ درجةُ حرارةِ الهواءِ كلَّماتّجهْنا بعيدًا عن سطح الأرضِ، أيْ أنَّ معاملَ الانكسارِ يقلُّ معَ الارتفاع.

وللأشعّةِ الضوئيّةِ القادمةِ جسمٍ بعيدٍ وقريبٍ من الأرضِ يحدثُ لها من سطح متتاليةٌ انكساراتٌ خلالَ طبقاتِ الهواءِ، وعندَما تصبحُ زاويةُالسقوطِ أكبرَ منَ الزاويةِ الحرجةِ عندَ

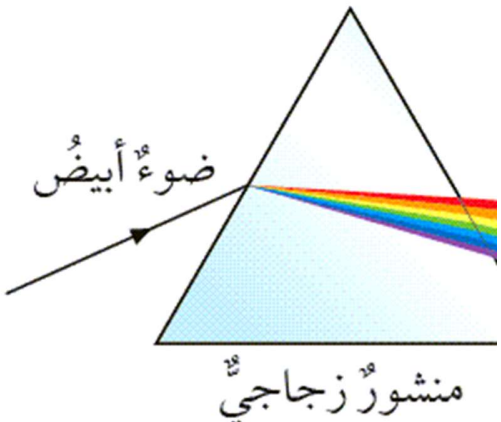


الشكلُ (٩): مخطّطٌ يبيّنُ صورة مقلوبة تشكُّلَ السرابِ القطبيّ.

الفاصلِ بينَ الحدِّ
منَ الهواءِ، طبقتينِ متجاورتينِ
فإنَّ الأشعةَ
انعكاسًاكليًّا داخليًّا، تنعكسُ
في ويرى المراقبُ
الأعلى صورةً مقلوبةً
على امتدادِ آخرِ للجسمِ
على شعاع يصلُ إلى عينِه،
نحوِ ما يظهرُ في
الشكلِ (9).

Rainbow قوسُ المطرِ

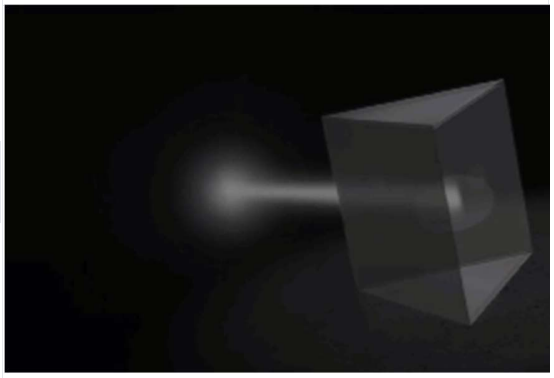
يتكوّنُ الضوءُ الأبيضُ (مثلَ
الشمسِ أو ضوءِ
من (ضوءِمصباح التنغستون
سبعةِ ألوانٍ يُطلقُ
ألوانَ الطّيفِ عليها عادةً
المرئيِّ، ويمكنُ رؤيتُها
باستخدامِ منشورٍ
أوجهِ زجاجيٍّ، بتوجيهِ أحدِ



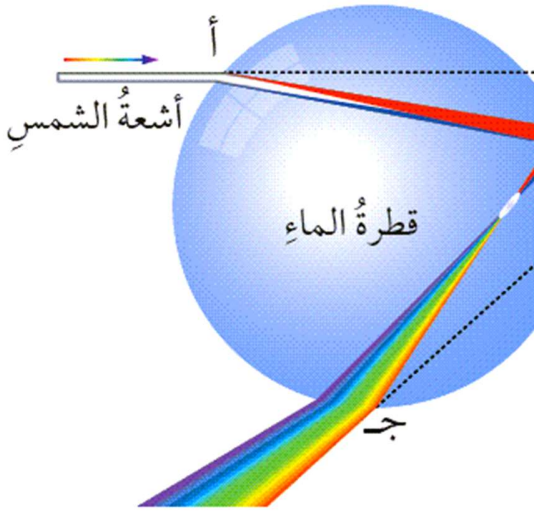
الشكلُ (١٠): تحليلُ الضوءِ الأبيضِ إلى ألوانِ الطيفِ

.السبعةِ باستخدامِ المنشورِ	المنشورِ نحوَ واستقبالِ ألوانِ الطيفِ الشمسِ، بيضاءَ توضعُ في على ورقةٍ الجهةِ المقابلةِ للشمسِ على نحوِ ما يظهرُ (10). فيالشكلِ وتقومُ فكرةُ تحليلِ المنشورِ الطيفِ على أنَّ لألوانِ المنشورِ (أو أيِّ معاملَ انكسارِ مادّةٍ شفّافةٍ) يَختلِفُ باختِلافِ لونِ الساقطِ عليه، فلكلِّ الضوءِ ألوانِ الطيفِ معاملُ لونٍ من مختلفٌ عنِ انكسارٍ الآخرِ، فأكبرُها البنفسجيِّ وأقلُّها للّونِ للّونِ الأحمرِ، لذا تكونُ زاويةُ انكسارِ البنفسجيِّ بِحسبِ اللونِ أكبرَ ما يمكنُ، يليهِ قانونِ سنِل

النيليُّ، ... وهكذا
دَوالَيْكَ. ولذا تظهرُ ألوانُ
الطيفِ مرتَّبةً بِحسبِ
معامِلاتِ الانكسارِ أو
أيِّ مادّةٍ شفّافةٍ
للضوءُ يَعبُرها.



وهذا ما يحدثُ تمامًا عندَ
مرورِ ضوءِ الشمسِ عبرَ
قطراتِ الماءِ المعلَّقةِ في الهواءِ
في فصلِ الشتاءِ، فالشكلُ (١١)
يوضّحُ
سقوطَ أشعةٍ ضوئيّةٍ منَ
الشمسِ
على قطرةِ مطرٍ معلّقةٍ في
الهواءِ
بزاويةٍ تحقّقُ شروطَ
حدوثِ انعكاسٍ
كلّيٍّ داخليٍّ، حيثُ تنكسرُ عندَ
النقطةِ



الشكلُ (١١): تحلّلُ
ضوءِ

الشمسِ خلالَ قطرةِ مطرٍ.

(ب)

الشكلُ (١٢): أ . مخطّطٌ يبيّنُ تشكّلَ قوسِ المطرِ على نحوِ ما يراهُ مشاهدٌ على الأرضِ.

ب. صورةٌ لقوسِ المطرِ

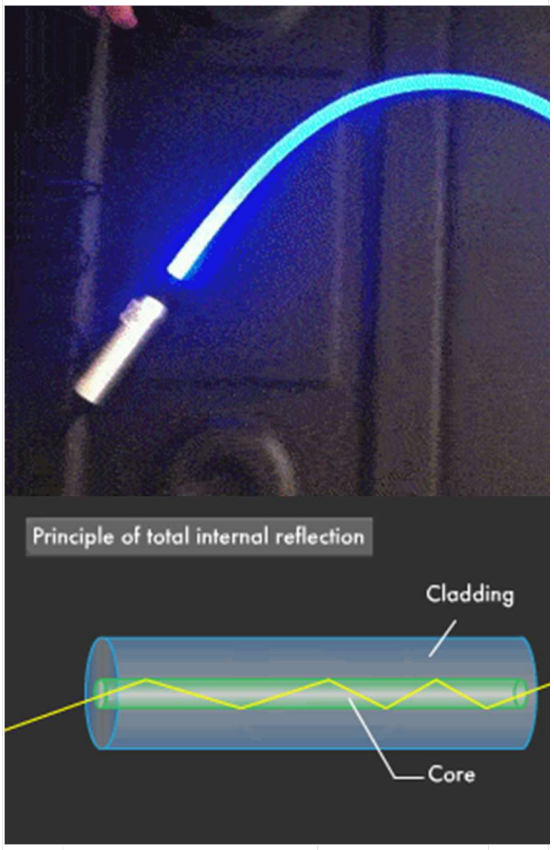
(أ) من سطحِ القطرةِ مقتربةً منَ العمودِ بزوايا تختلفُ باختلافِ لونِ الضوءِ، ثمَّ تسقطُ على السطحِ الداخليِّ للقطرةِ عندَ النقطةِ (ب)، فتنعكسُ انعكاسًا كليًّا داخلَ القطرةِ، إذْ تكونُ زاويةُ سقوطِها عندَ النقطةِ (ب) أكبرَ من الزاويةِ الحرجةِ للماءِ، ثمَّ تسقطُ عندَ نقطةٍ أخرى (ج) منَ السطحِ الداخليِّ للقطرةِ، فتنكسرُ مبتعدةً عنِ العمودِ بزوايا مختلفةٍ، وتتابعُ مسيرَها خارجَ قطرةِ

المطرِ.
وتتكرّرُ هذهِ العمليةُ في قطراتِ
المطرِ المتجاورةِ، الشكلُ (١٢
/أ)،
لتشكّلَ في النهايةِ حلقةً دائريةً
من
ألوانِ الطيفِ المرئيّ يظهرُ
منها
قَوسٌ فقطْ لِمُشاهدٍ على سطحِ
الأرضِ يقفُ متوجهًا لجهةٍ
معاكسةٍ
للشمسِ، وهذا القوسُ
يُعرفُ باسمِ
قوسِ المطرِ أو قوسِ قُزحَ،
على نحوِ
ما يظهرُ في الشكلِ (١٢/ب).

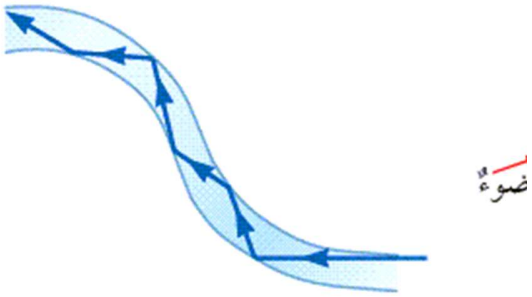
الأليافُ الضوئيةَ Optical Fibers

تُعدُّ الألياف الضوئيّةُ أحدَ أكثرِ التطبيقاتِ شيوعًا على الانعكاسِ الكلّيِّ الداخليِّ التي تُستخدمُ على نطاقٍ واسع، لاسيّما في الطبِّ والاتصالاتِ.والألياف الضوئيةُ عبارةٌ عن Optical Fibers أنابيبَ رفيعةٍ وشفافةٍ، تُصنعُ عادةً من الزجاج أو البلاستيك، وتُستخدمُ لنقلِ الضوءِ.

ويتكوّنُ اللّيفُ الضوئيُّ من أنبوبينِ متداخلينِ من مادّتينِ شفّافتينِ مختلفتينِ:



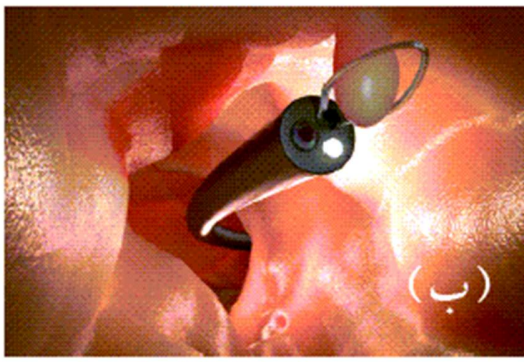
الشكلُ (١٣): مقطع لأحد الألياف الضوئيةِ.



الشكلُ (١٤): انتقالُ

الضوءِ .في ليفٍ ضوئيٍّ منحنٍ	**القلبُ** ويتراوحُ قطرُه - .من (٥٠-١٠) ميكرومتر ويبلغُ قطرُه **الغلافُ** - ميكرومتر (125) نحوَ ويكونُ معاملُ انكسارِ مادّةِ الغلافِ أقلَّ منهُ لمادّةِ القلبِ ليبقى الضوءُ داخلَ قلبِ اللّيف الضوئيّ. إذْ عندَما يدخلُ الضوءُ إلى قلبِ اللّيفِ الضوئيّ، ونظرًا إلى أنَّ قُطرَه صغيرٌ جدّا، فإنَّ الضوءَ يسقطُ دائمًا على الحدِّ الفاصلِ بينَ القلبِ والغلافِ بزاويةٍ أكبرَ منَ الزاويةِ الحرجةِ، فيحدثُ لهُ انعكاسٌ كلّيٌّ داخليٌّ، على نحوِ ما يظهرُ في الشكلِ

، وبهذا يحافظُ الليفُ (13)
الضوئيُّ على
الطاقةِ الضوئيةِ وينقلُها إلى
مسافاتٍ
بعيدةٍ دونَ ضياع يُذكرُ للطاقةِ.
وتمتازُ
الأليافُ الضوئيةُ بمرونتِها
العاليةِ، إذْ
يمكنُ ثَنيُها، على نحوِ ما يظهرُ
في
الشكلِ (١٤) دونَ أنْ يؤثّرَ ذلكَ
في
كفاءتِها على نقلِ الضوءِ.



الشكلُ (15):
أ . تنظيرُ القولونِ

وللألياف الضوئيةِ تطبيقاتٌ
الطبِّ عدّةٌ في
والاتصالاتِ. ففي
أحدثتِ الألياف الطبِّ،
الضوئيّةُ
التقنياتِ الجراحيّةِ ثورةً في
وعملياتِ التنظيرِ

باستخدامِ .منظارٍ ثلاثيِّ الأبعادِ ب.منظارٌ ثلاثيُّ الأبعادِ يُزيلُ ورمَ القولونِ بحلقةٍ .سلكيةٍ	التشخيصيّةِ والعلاجيّةِ الأجزاءِ الداخليّةِ، وتصويرِ الذي تُعدُّ إذْ يُستخدمُ المِنظارُ، الأليافُ الضوئيّةُ الرئيسَ منه، الجزءَ لاستكشافِ الأعضاءِ الداخليّةِ المختلفةِ بصريّا دونَ إذْ تسمحُ مرونةُ جراحةٍ، للأطباءِ الأليافِ الضوئيةِ بالتنقُّلِ داخلَ مناطقَ الأمعاءِ والقلبِ والأوعيّةِ مثلُ والمفاصلِ، الدمويّةِ على نحوِ ما يظهرُ ويمكنُ أيضًا .الشكلِ(١٥/أ) في مثلُ إجراءُ عملياتٍ جراحيّةٍ، الجراحةِ بالمنظارِ على الركبةِ أو الكَتِفِ، مَفْصِلِ اللحميّةِ أو إزالةِ الزوائدِ والأورامِ باستخدامِ القَطعِ المُلحقةِ أدواتِ

ما يظهرُ بالمنظارِ على نحوِ
في الشكلِ (١٥/ب).
وفي مجالِ الاتصالاتِ،
الأليافُ الضوئيّةُ تُستخدمُ
المحادثاتِ لنقلِ إشاراتِ
الهاتفيةِ واتصالاتِ
بكفاءةٍ عاليةٍ جدًّا، من الإنترنتِ
حيثُ الحفاظُ على
سرّيّةِ البياناتِ،
للتشويشِ، وحجمُ ومقاومتُها
تُنقلُ مقارنةً المعلوماتِ التي
بالأسلاكِ النحاسيّةِ.
إذْ يمكنُ لِليفٍ زجاجيٍّ واحدٍ
شعرةِ بسمكِ
الإنسانِ أنْ ينقلَ
صوتيةً أو فيديو معلوماتٍ
مكالمةٍ (32000) تكافئُ
صوتيةٍ في آنٍ واحدٍ.