الحركة الموجية

١- مقدمة

- أنواع الموجات

٢- العلاقة بين التردد و الطول الموجي و سرعة انتشار الموجة

٣- أنواع الموجات الميكانيكية

٤- تراكب و تداخل الموجات

٥- الموجات الموقوفة

٦- الموجات الصوتية

٧- سرعة الموجات الصوتية

٨- شدة الموجة الصوتية

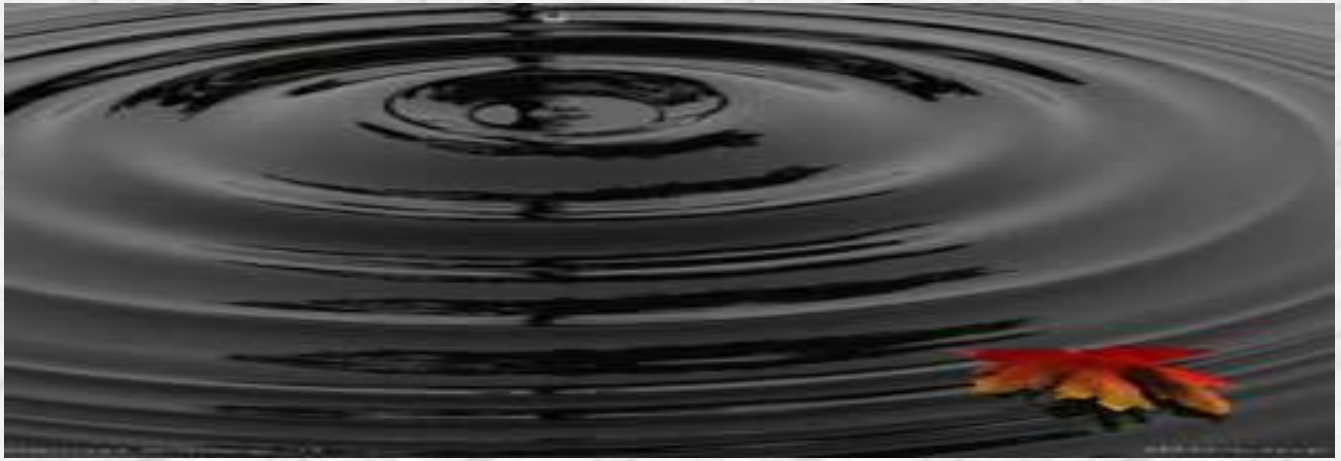
د. ميسون مقل

١- مقدمة :

تعرفنا في الفصل السابق على الحركة الاهتزازية للأجسام المرنة مثل :اهتزاز جسم معلق بالنهاية الحرة لنابض ، اهتزاز الشوكة الرنانة، اهتزاز الأوتار الآلات الموسيقية.....الخ

و سندرس في هذا الفصل كيف تنتقل اهتزازات الجسم من نقطة لأخرى مشكِّلة موجة منتشرة فيه .

و تعتبر أمواج الماء التي تتشكل عند سقوط حجر في بركة ماء ساكنة ، مثلاً بسيطاً و واضحاً للأمواج التي تظهر في مجالات شتى في الطبيعة .



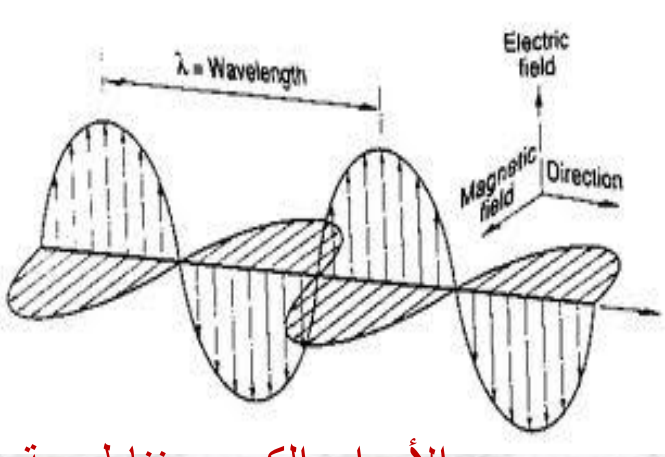
د. ميسون مقل

و موجات الزلازل ، و الموجات الصادرة عن الأوتار الموسيقية ، و الضوء (الأمواج الكهرومغناطيسية) و غيرها من الأمثلة العديدة من حولنا ، في جميع الحالات نجد أن هناك مصدر للموجة ، كيد شخص يهز حبلاً أو يضرب على وتر آلة موسيقية أو راعي ينفخ في قصبة هوائية ، أو حتى اهتزاز الكترون في هوائي محطة إرسال ناقلاً برامج الإذاعة و التلفاز ..... الخ والعالم مليء بالموجات .

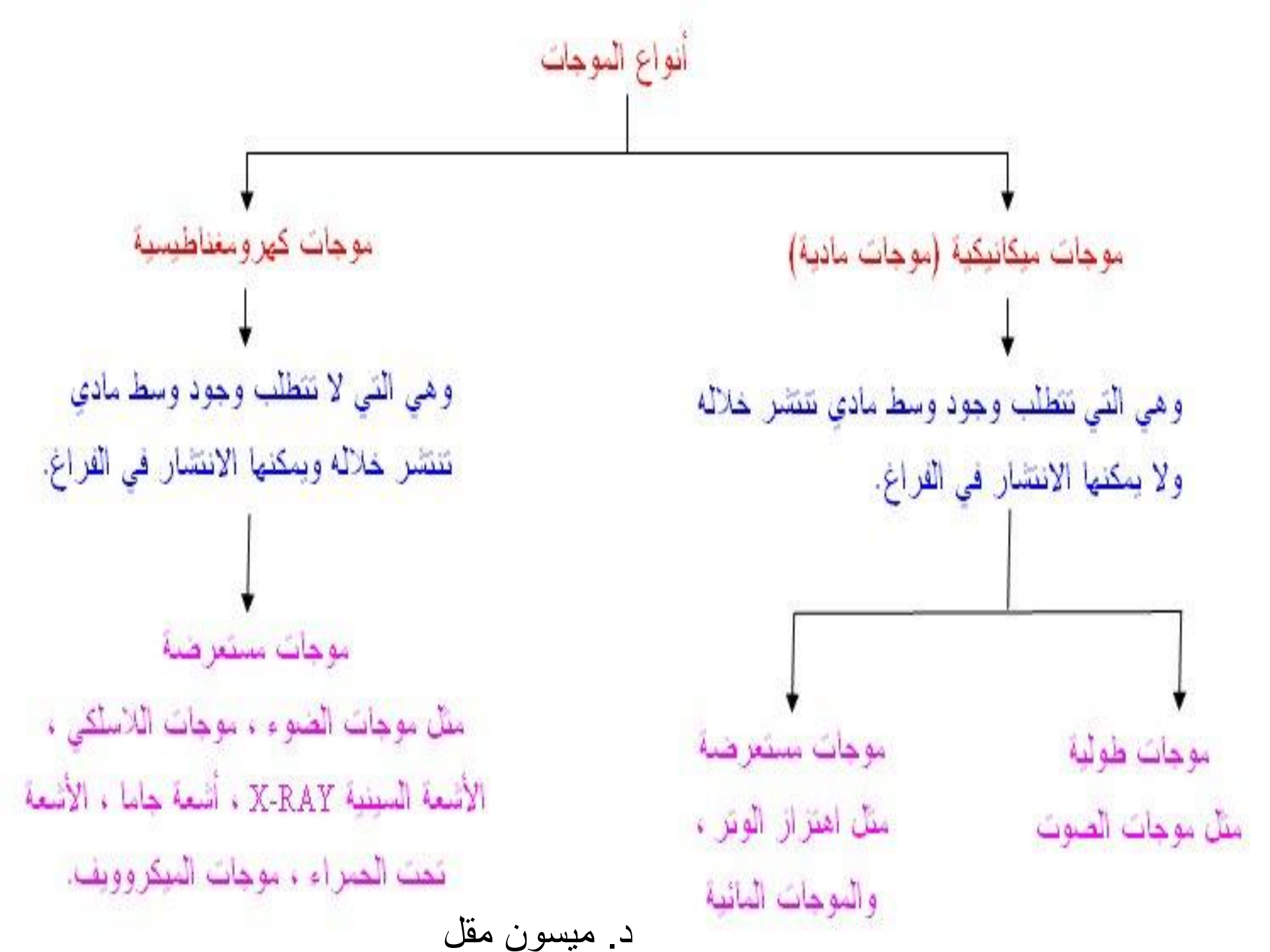
كلها أمواج تنتج عن مصدر للاهتزاز

و لكن هل جميع الموجات تحتاج إلى وسط مادي حتى تنتشر ؟

إن ضرورة وجود وسط مادي (ذرات الهواء أو مادة وتر آلة موسيقية) تنتقل من خلاله الموجة ، هذا يعتمد على نوع الموجة ، فبعضها لا ينتقل إلا إذا توفر لها وسط مادي يحملها من جزيء لآخر و تسمى **بالأمواج الميكانيكية** ،
و هناك أمواج لا تحتاج لوسط مادي و تسمى **بالأمواج الكهرومغناطيسية** (و التي تنتج عن اهتزاز مجال كهربائي و آخر مغناطيسي) (كما في الشكل) ، و هنا سنكتفي بدراسة الأمواج الميكانيكية ، بعد التعرف بايجاز على الفرق بينهما و الموضح في الجدول التالي.



الأمواج الكهرومغناطيسية


أنواع الموجات
موجات ميكانيكية (موجات مادية)
وهي التي تتطلب وجود وسط مادي تنتشر خلاله ولا يمكنها الانتشار في الفراغ.
موجات طولية
مثل موجات الصوت
موجات مستعرضة
مثل اهتزاز الوتر ، والموجات المائية
موجات كهرومغناطيسية
وهي التي لا تتطلب وجود وسط مادي تنتشر خلاله ويمكنها الانتشار في الفراغ.
موجات مستعرضة
مثل موجات الضوء ، موجات اللاسلكي ، الأشعة السينية X-RAY ، أشعة جاما ، الأشعة تحت الحمراء ، موجات الميكروويف.

يتم وصف الموجة الميكانيكية بتحديد مواضع كل نقاط الوسط المضطرب كدالة في الزمن.

و لحصول الموجة الميكانيكية لا بد من توفر الشروط التالية :

١. مصدر للإهتزاز (للإضطراب)
٢. وسط مادي ينتشر من خلاله هذا الإضطراب

تنبيه : في الحركة الموجية نلاحظ اهتزاز جزيئات الوسط دون أن تنتقل من مكانها ، و كما قال آينشتاين : إن الموجة كالإشاعة تبدأ من شخص في مكان ما و تصل بسرعة كبيرة لمكان آخر دون أن يسافر أحد !فمن الذي ينتشر إذاً ؟ إنها الطاقة التي تنتقل من نقطة لأخرى .

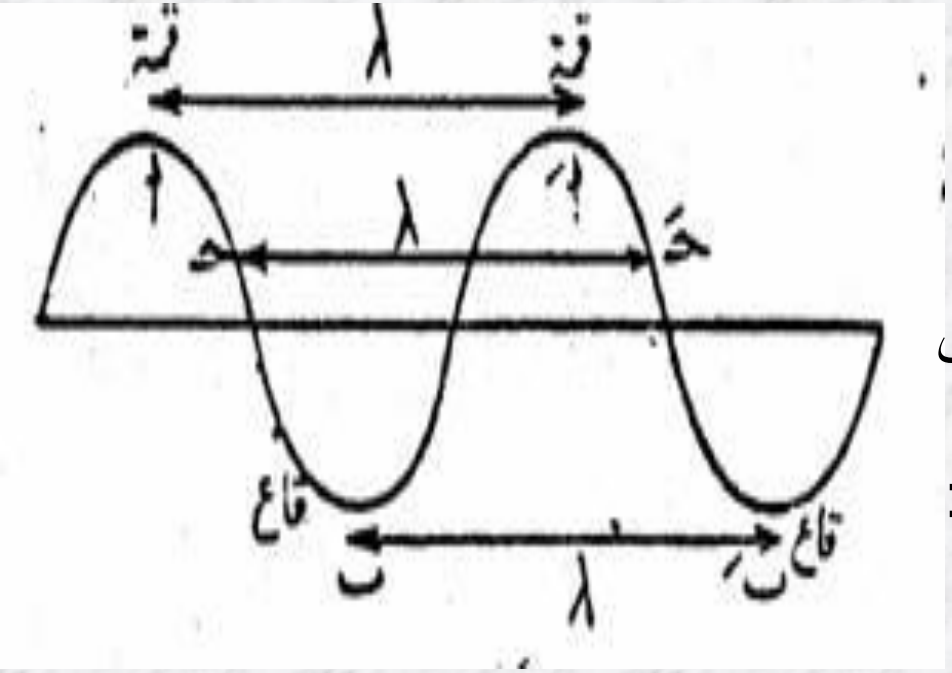
كل الموجات تحمل طاقة ، و لكن كم الطاقة المنتقلة خلال الوسط و أيضاً الطريقة التي يتم بها هذا الانتقال للطاقة يختلف من حالة إلى أخرى .

٢- العلاقة بين الطول الموجي و سرعة انتشار الموجة و التردد :

•**الطول الموجي (λ)** : هو البعد بين نقطتين متتاليتين تتحركان بكيفية واحدة في الوسط المهتز و في اتجاه واحد.كما هو موضح بالشكل أدناه

•**سرعة انتشار الموجة (v)**: هي المسافة التي تقطعها الموجة في الثانية الواحدة

•**التردد (f)**: هو المعدل الزمني الذي يكرر به الاضطراب نفسه



بفرض أن v سرعة انتشار الموجة في الوسط و بفرض أن x هي المسافة التي قطعتها هذه الموجة خلال زمن قدره t ، وفق تعريف السرعة نكتب : $v=x/t$

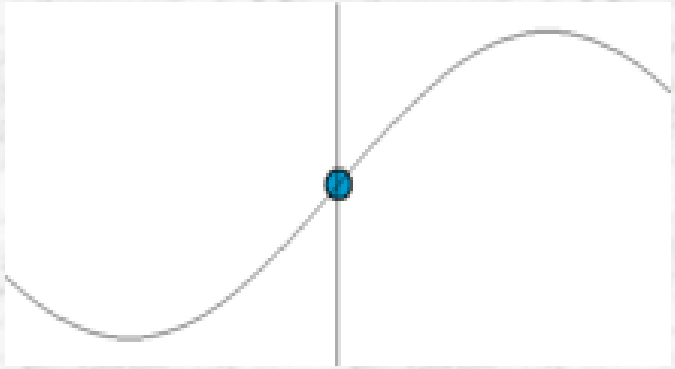
فإذا فرضنا أن المسافة المقطوعة x تساوي طول موجي (λ) فيكون الزمن t مساوياً للزمن الدوري T عندئذ تكتب المعادلة السابقة بالشكل :

$$v=\lambda/T=\lambda.f \quad (1)$$

الطول الموجيλ

٣- أنواع الموجات الميكانيكية:

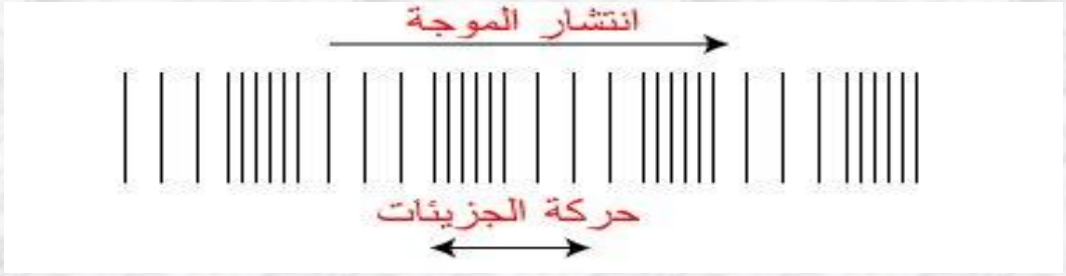
١- **الموجات المستعرضة :** مثل : الموجات التي تنتشر على سطح الماء و الموجات التي تنتشر على طول الحبل



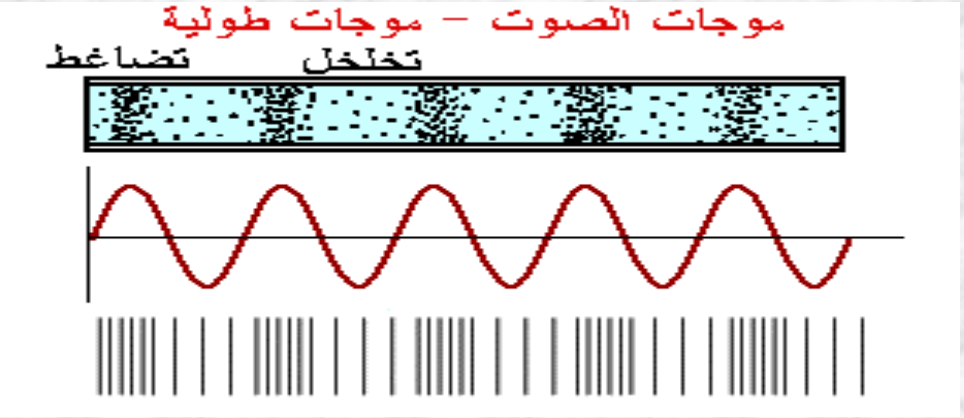
- **تعريفها :** هي الموجة التي تهتز فيها جزيئات الوسط حول مواضع اتزانها في اتجاه عمودي على اتجاه انتشار الموجة .
- **مكوناتها** : تتكون من سلسلة من القمم و القيعان
- **طولها الموجي :** يساوي المسافة الفاصلة بين قمتين متتاليتين أو قاعين متتالين .

٢- الموجات الطولية : مثل : الموجة التي تنتشر على طول النابض و الموجة الصوتية

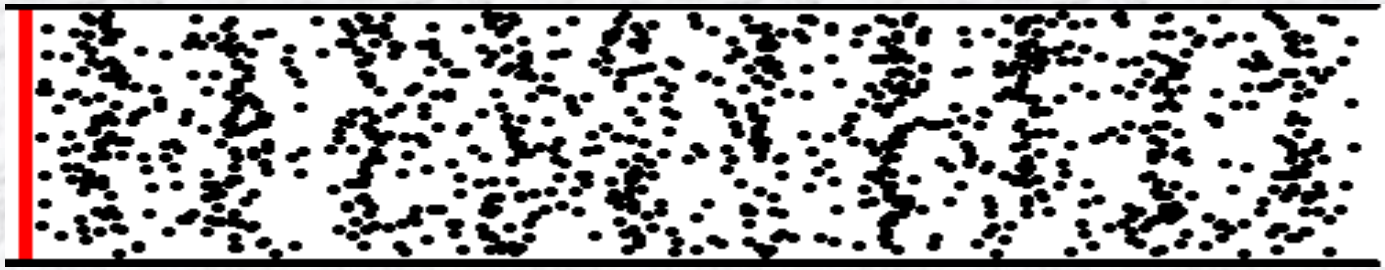
- **تعريفها :** هي الموجة التي تهتز فيها جزيئات الوسط حول مواضع اتزانها في اتجاه موازٍ لإتجاه انتشار الموجة



- **مكوناتها:** تتكون من سلسلة من التضاغطات و التخلخلات .



- **طولها الموجي :** يساوي المسافة الفاصلة بين مركزي تضاغطين متتالين أو بين تخلخلين متتاليين.



د. ميسون مقل

ملاحظة : بعض الموجات قد تكون خليط بين الموجات المستعرضة و الطولية . مثل موجات الماء السطحية

٤- تراكب و تداخل الموجات :

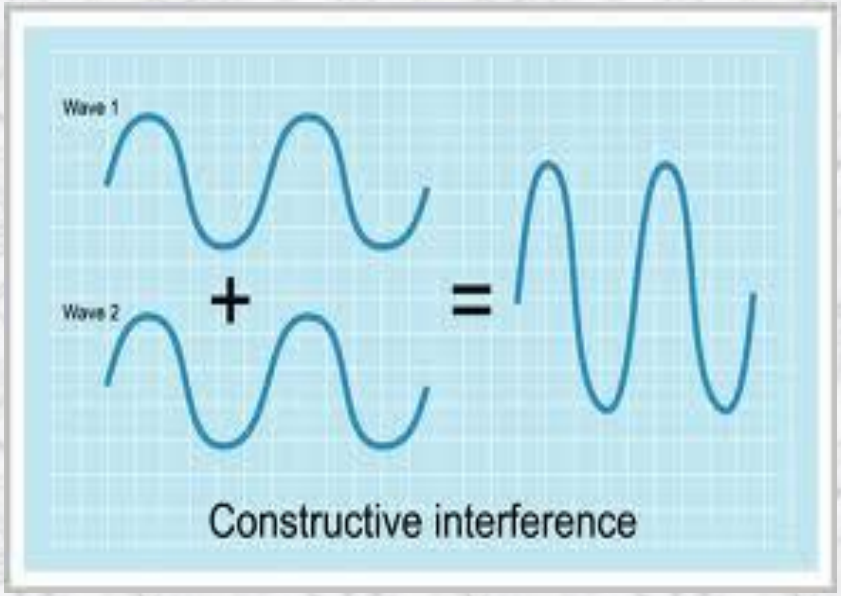
عديد من الظواهر الهامة الموجية في طبيعتها لا يمكن وصفها بواسطة نبضة أو موجة منفردة متحركة ، و لكن بتحليل موجة مركبة بدلالة اتحاد عدد من الموجات المتحركة تجمعت وفق مبدأ يسمى بمبدأ التراكب الموجي ، و الموجات التي تتبع هذا المبدأ تسمى **الموجات الخطية (و هي موجات ذات سعات موجية صغيرة)** .

- **مبدأ التراكب الموجي**: ينص على أن السعة الكلية لنقطة من وسط تنتشر فيه عدة أمواج عرضية فقط (أو طولية فقط) في أي لحظة من الزمن هي حاصل الجمع لسعات الاهتزازات الواصلة إليها من كل موجة .

و في هذا الباب سوف نتناول دراسة الأمواج الخطية فقط

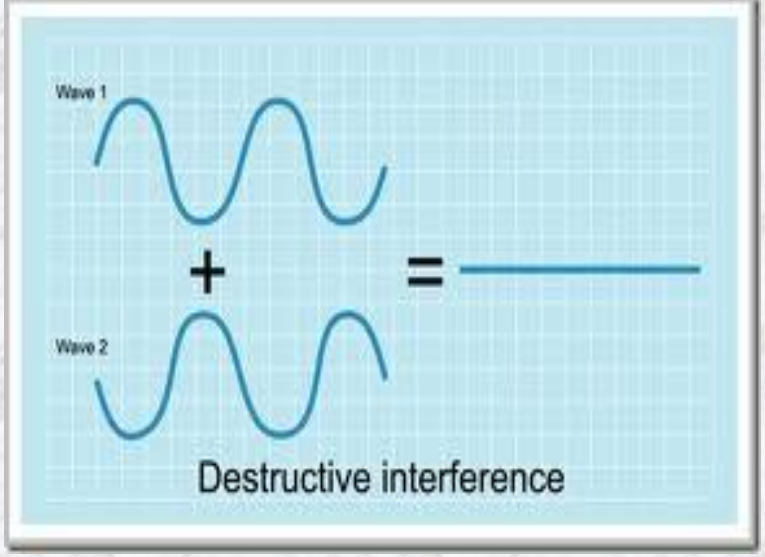
• **ظاهرة التداخل** : هي ظاهرة فيزيائية تحدث بين الموجات نتيجة لتراكب موجتين أو أكثر لها نفس التردد ، مما يؤدي إلى إحدى الحالتين :

أ- إما **تداخل بناء** : حيث تتطابق القمم مع القمم و القيعان مع القيعان (بالنسبة للأمواج المستعرضة)،و التضاغطات مع التضاغطات و التخلخلات مع التخلخلات (بالنسبة للأمواج الطولية) فتعزز الواحدة الأخرى و يشكلان موجة ذات سعة محصلتها تساوي المجموع الجبري لسعات الموجات المتراكبة ، و يكون ذلك عندما تكون متفقة بالطور .



التداخل البناء

$$A=A_1+A_2 \qquad (1)$$

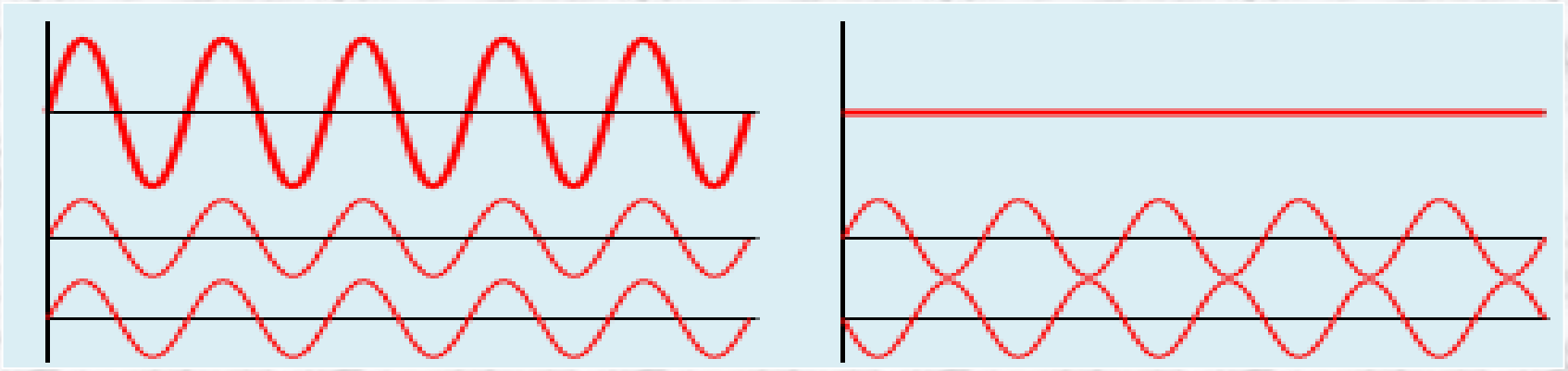


التداخل الهدام

ب- و إما **تداخل هدام** :حيث تتطابق القمم مع القيعان (بالنسبة للأمواج المستعرضة) و التضاغطات مع التخلخلات (بالنسبة للأمواج الطولية) ، فتفني كل واحدة الأخرى ، و يكون هذا عندما يكون فرق الطور بينهما (180°)

$$|A|=A_1-A_2 \qquad (2)$$

- في حالة التداخل البناء و إذا كانت $A_1=A_2$ عندها $A=2A$
- أما في حالة التداخل الهدام فتصبح $A=0$



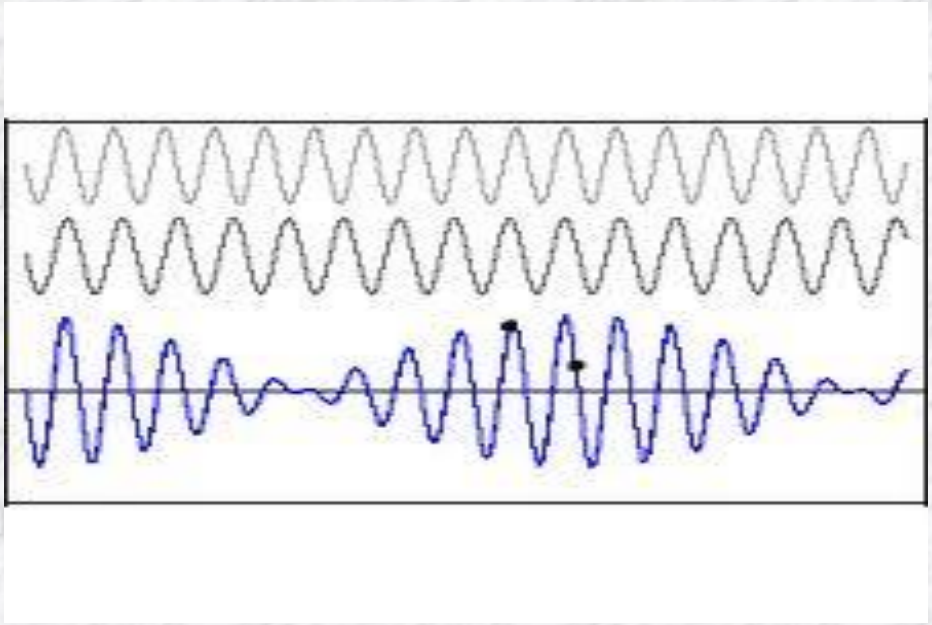
موجتان متوافقتان الطور

فرق الطور بين الموجتين ١٨٠°

- **ظاهرة الضربات :**

أما في حال اختلاف الطور بين الموجات فإننا نحصل على درجات مختلفة من التطابق بين القمم و القيعان وفقاً لفروق الطور بين هذه الموجات .

فإذا كانت شدة الموجة الناتجة عن التداخل ثابتة عند نقطة معينة فهذا يعني أن التأثير ناتج عن " **تداخل مكاني** " بين الموجات ، أما عندما يكون تردد الموجة الأولى قريب جداً من تردد الموجة الثانية فإننا نلاحظ أن الشدة الناتجة للموجة المحصلة عند نقطة معينة تتغير مع الزمن مما يعني أن هناك " **تداخل زمني** " تنتج عنه موجة لها ضربات صوتية منتظمة مختلفة عن تردد الموجتين الأصليتين ، و لذا تسمى هذه الظاهرة **بظاهرة الضربات**



∴ يمكن **تعريف ظاهرة الضربات** بأنها :

ظاهرة تتكون من تداخل موجتين مختلفتين في طول الموجة و متحركتين في نفس الاتجاه و لهما نفس التردد تقريباً.

لنفترض موجتين لهما السعة نفسها و تنتشران في نفس الاتجاه خلال وسط معين ، و لهما الترددان f_1 , f_2 اللذان يختلفان اختلافاً طفيفاً

نكتب سعة اهتزاز الموجة الأولى و الثانية على الترتيب كما يلي :

$$S_1=S_0 \cos 2\pi f_1 t \qquad (3)$$

$$S_2=S_0 \cos 2\pi f_2 t \qquad (4)$$

و باستخدام مبدأ التراكب الموجي فإن سعة اهتزازة الموجة المحصلة تساوي :

$$S=S_1+S_2=S_0(\cos 2\pi f_1 t+ \cos 2\pi f_2 t) \qquad (5)$$

و باستخدام العلاقة المثلثية :

$$\cos\alpha+\cos\beta=2\cos\frac{1}{2}(\alpha-\beta)\cos\frac{1}{2}(\alpha+\beta)$$

و ذلك بجعل $\alpha=2\pi f_1 t$ و $\beta=2\pi f_2 t$ فإننا نكتب العلاقة (5) على النحو التالي :

$$S = \left[2S_0 \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right) t\right] \cos 2\pi \left(\left(\frac{f_1 + f_2}{2}\right) t \quad (6)\right.$$

و هي معادلة موجة توافقية بسيطة ترددها f يساوي

$$f = \frac{f_1 + f_2}{2} \qquad (7)$$

أما سعتها فهي :

$$S = 2S_0 \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right) t \qquad (8)$$

و نلاحظ أن السعة تتغير مع الزمن و أن ترددها f′ هو :

$$\acute{f} = \frac{f_1 - f_2}{2} \qquad (9)$$

يلاحظ من المعادلة(8) أن **السعة القصوى** تتحقق عندما تكون :

$$\cos 2\pi\left(\frac{f_1 - f_2}{2}\right)t = \pm 1 \qquad (10)$$

و هذا يعني أن تردد كل دورة تحتوي على سعتين قصوتين،و لأن السعة تتغير مع التردد وفق $\frac{f_1 - f_2}{2}$، فإن تردد الضربات الناتجة هو ضعف هذا المقدار أي أن :

$$f_{beat} = |f_1 - f_2| \qquad (11)$$

مثال : موجتان تردد الأولى 226Hz و تردد الثانية 230Hz

إن تردد الموجة الصوتية الناتجة هو :

$$\left|\frac{f_1 + f_2}{2}\right| = \left|\frac{230 + 226}{2}\right| = 228Hz$$

مع ضربات صوتية ترددها $|f_1 - f_2| = 230 - 226 = 4Hz$

و بالتالي فإن المستمع في هذه الحالة يسمع موجة صوتية ترددها 228Hz تصل إلى سعتها القصوى أربع مرات في الثانية الواحدة .

من أهم تطبيقات ظاهرة الضربات هي مزج الأصوات ، و التحكم في ترددتها ، و الحصول على أصوات ذات نقاوة عالية مثل توزيع الصوت في قاعات الاحتفالات و المطارات و غيرها

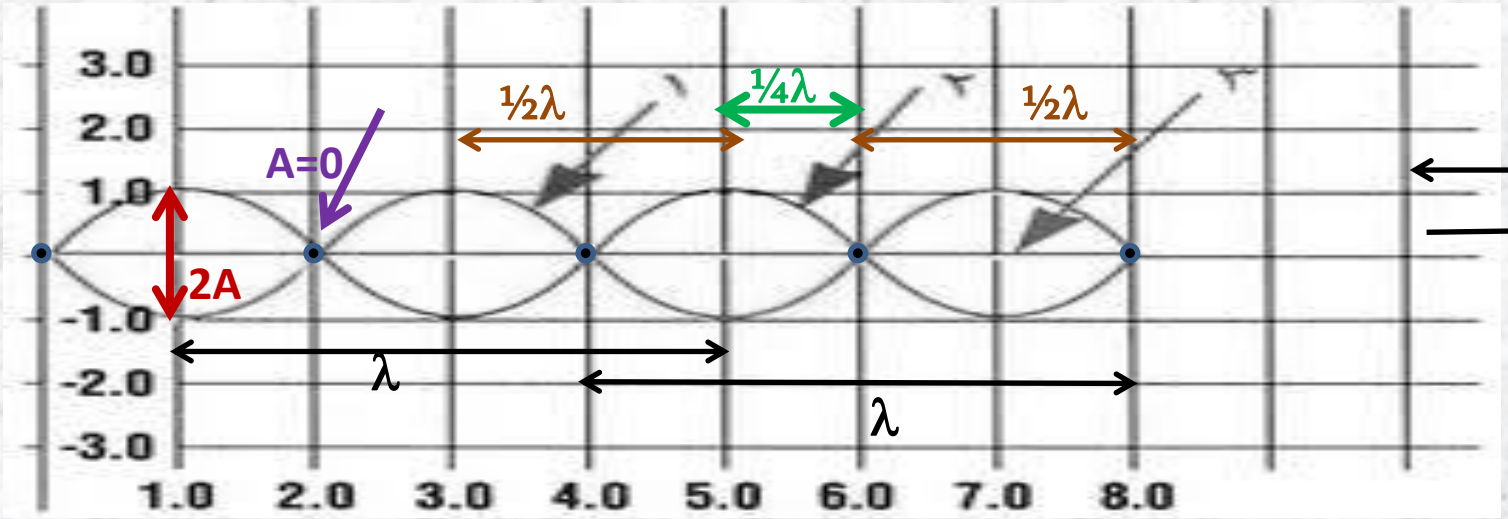
٥- الموجات الموقوفة (المستقرة):

- **تعريفها :** هي الموجة الناتجة من تداخل حركتين موجيتين(الموجة الساقطة و الموجة المنعكسة) ، متساويتين في السعة ، و الطول الموجي ، و التردد ، و منتشرتين في اتجاهين متضادين ، مثل الأمواج المتولدة في الأوتار المشدودة

- **مكوناتها :** تتكون من سلسلة من البطون و العقد حيث تنعدم السعة عند العقد ، بينما تأخذ قيمة عظمى عند البطون و تساوي 2A .

- **طولها الموجي :** يساوي ضعف المسافة الفاصلة بين عقدتين متتاليتين أو بطنين متتالين

∴ المسافة الفاصلة بين عقدتين متتاليتين أو بطنين متتالين تساوي إلى نصف طول موجي .



الموجات الصوتية

٦- الموجات الصوتية:

سوف نهتم بالموجات الصوتية ليس لأنها تزودنا بالمفاهيم و الوسائل اللازمة للتعامل مع الحركة الموجية ، بل لأهميتها التطبيقية أيضاً في مجالات عدة(في أجهزة الفحص و الكشف الطبي ،في تصميم المباني المعمارية الحديثة ،و في البحار ، حيث أصبح علم السمعيات جزءاً من التصميم المعماري لأي مبنى ، و دوره يتنامى في النظم الصوتية المتعددة التطبيقات).

إن الصوت يحيط بنا طوال الوقت ، فقد نصحو في الصباح الباكر على جرس ساعة التنبيه أو على زقزقة العصافير ، وخلال اليوم نسمع إلى كل أنواع الأصوات مثل صلصة أواني المطبخ و ضجيج حركة المرور وأصوات الناس وعندما نتهيأ للنوم ليلاً قد نسمع حفيف الرياح .
إن كل صوت من هذه الأصوات تحدثه اهتزازت جسم ما، فعندما يهتز الجسم فإنه يجعل الهواء المحيط به يهتز و تنتشر الاهتزازات في كل الاتجاهات مبتعدة عن المصدر ، وعندما تدخل الاهتزازات آذاننا تنتقل إلى الدماغ الذي يترجمها إلى أصوات .

الصوت: هو ظاهرة طبيعية تنشأ عن اهتزاز الأجسام و ندركه بحاسة السمع.
و يتمتع الصوت بنفس خصائص و صفات الضوء من ناحية ظواهر الانعكاس و الانكسار و التداخل.

- تصنف الموجات الصوتية – عادة – حسب ترددها :

١- **الموجات المسموعة:** التي تقع في النطاق الموجي الذي تستشعره أذن الإنسان من 20Hz إلى 20000Hz

٢- **الموجات تحت الصوتية:** التي يكون ترددها أقل من النوع السابق(مثل موجات الزلازل) (أقل من 20 Hz)

٣- **الموجات فوق الصوتية:** التي يكون ترددها أكبر من الترددات المسموعة أي أكبرمن (20000 Hz)

ويستطيع الوطواط والكلب وأنواع أخرى من الحيوانات سماع أصوات ترددات أعلى بكثير من ٢٠,٠٠٠ هرتز .
والأصوات المختلفة لها أيضاً ترددات مختلفة على سبيل المثال : تردد صلصلة المفاتيح يتراوح بين ٧٠٠ و ١٥,٠٠٠ هرتز .

٧- سرعة الموجات الصوتية :

بما أن اهتزاز جزيئات الهواء يكون في نفس اتجاه انتشار الموجة ، لذلك فإن موجات الصوت تعتبر موجات طولية تتكون من سلسلة من التضاغطات و التخلخلات .

ينتقل الصوت خلال أي شيء فيما عدا الفراغ وهذا ببساطة يرجع إلى أن جزيئات المادة - - أياً كانت- قادرة على امرار الاهتزازات عبرها ، وبعض المواد يمكنها نقل الموجات الصوتية بصورة أفضل من غيرها .

تعتبر سرعة الموجات الضوئية التي تبلغ ($3\times10^8 m/Sec$) من أكبر السرعات الموجية (أكبر من سرعة الصوت بكثير)، لذلك نرى البرق وبعدها بلحظات نسمع صوت الرعد .

تعتمد سرعة الصوت على عاملين مهمين هما : ١- **الانضغاطية** : قابلية الوسط للانضغاط
٢- **طبيعة الوسط**: صلب ، مائع

- فإذا كان B معامل المرونة الحجمي للوسط ، و ρ كثافة الوسط فإن سرعة الموجة الصوتية في حالة السوائل تعطى بالعلاقة التالية :

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \qquad (3)$$

و كما مرَّ معنا في درس المرونة فإن B تعرَّف بالعلاقة :

$$B = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V_0}$$

حيث V_0 حجم الوسط ، وΔV هي مقدار التغير في الحجم عند تغير الضغط بمقدار ΔP

•أما سرعة الموجة المستعرضة على وتر مشدود فتعطى بالعلاقة :

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \qquad (4)$$

حيث : T الشد في الوتر ، و μ كتلة وحدة الأطوال (Kg/m)

•و عموماً تعطى سرعة انتشار الاضطراب (الموجات الصوتية) في الأوساط المختلفة على النحو التالي:

-في حالة القضبان المعدنية :

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \qquad (5)$$

حيث : Y معامل يونغ

- في حالة الغازات :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot p}{\rho}} \qquad (6)$$

حيث : γ هو الثابت الكظمي

نسمي التغير الكظمي: عندما نسمح للغاز بالتمدد أو الانكماش في عملية لا تنتقل فيها الحرارة منه و إليه فإن هذا التغير يكون كظمياً

و يعرَّف بالعلاقة :

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} \qquad (7)$$

حيث : c_p السعة الحرارية عند ثبات الضغط ،

و c_v السعة الحرارية عند ثبات الحجم

د. ميسون مقل

أيضاً لدرجة الحرارة تأثير كبير على سرعة انتشار الموجة الصوتية ، حيث تزداد السرعة بارتفاع درجة الحرارة و ذلك بسبب زيادة الطاقة الحركية لجزئيات الوسط

درجة الحرارة ($t^{\circ}c$)	السرعة v(m/Sec)
0	331
15	342
30	349
100	386

و سرعة الصوت في المواد الصلب تكون كبيرة ثم في السوائل حيث سرعة الصوت في الماء أكبر بمقدار 4.5 مرة مما هي عليه في الهواء ثم في الغازات .

د. ميسون مقل

٨- شدة الموجة الصوتية :

تُعرَّف شدة الموجة الصوتية (I) بأنها : القدرة المتدفقة عبر وحدة المساحة عمودياً على انتقال الموجة ، و تقاس بوحدة (W/m^2)

- عندما تنتشر موجة صوتية نجد أن شدة الصوت لهذه الموجات المنتشرة تضعف كلما بعدنا عن مصدر الصوت حيث تتوزع الطاقة على مساحة أكبر و شدة الصوت تعتمد على مربع التغير في ضغط الوسط كما تعتمد على مربع سعة الموجة .

- كلما زادت كتلة الهواء المهتز كلما كان الصوت أعلى وأشد فنجد أن سماعة التليفون يمكننا أن نسمع بها بوضع إذا ما قربناها للآذان وذلك يرجع إلى أن الجزء المعدني الدائري بداخل السماعة له مساحة صغيرة مما يؤدى الى اهتزاز كمية الهواء الملاصقة لهذه المساحة فيكون الصوت أشد كلما اقتربنا منها .
في حين أن سماعة الراديو أو التليفزيون يمكننا أن نسمع منها صوتاً أعلى وأشد وذلك يرجع إلى ان السماعة المخروطية الشكل لها مساحة سطح كبيرة نسبياً مما يؤدي الى اهتزاز كمية الهواء بشكل أكبر

•**مستوى الشدة :** من أهم خواص الأذن أنها تستجيب لمختلف مستويات شدة الصوت بشكل يتناسب طردياً مع log I ، و لذا فإن الوحدة المناسبة للقياس على المقياس السمعي للتعبير عن مستوى شدة الصوت هي وحدة الديسيبل (dB) .

و **الديسيبل** : وحدة قياس لغارتمية تستخدم لقياس نسبة

•فإذا فرضنا أن " جهارة الصوت "(مستوى الشدة) هي β ، فإن :

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad (8)$$

حيث : I شدة الصوت المقاس

I_0 هي الشدة الصوتية المرجعية التي تم اختيارها ، و هي أقل شدة للصوت الذي يمكن أن تستشعره الأذن و تساوي $10^{-12} W/m^2$ ، و تقاس β بوحدة " الديسيبل "

•على سبيل المثال : إذا كانت $I=1W/m^2$ ، فإن جهارة الصوت هي :

$$\beta = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 10 \log 10^{12} = 120 \text{ dB}$$

•و بهذه الطريقة يمكن حساب β المسموح بها في الحالات الطبيعية ، و لهذه الحسابات تطبيقات كثيرة و بحوث مختلفة من أهمها " التلوث السمعي " (الضجيج) في المدن حيث يتم تجميع القياسات الميدانية في مناطق و اختناقات محددة على الطرق و بخاصة من المناطق الصناعية و الأحياء المزدحمة ، و لقد وجد أن القيمة المناسبة لـ " جهارة الصوت " التي يمكن للأذن أن تتحملها تساوي 90dB تقريباً

لوحات فنية رائعة من الموجات الصوتية :

جمال فاتن يثبت أن الإبداع يأتي من أشياء قد لا نلقي لها بالاً..... جميلة جداً ..... الذي يراها يبدو له للوهلة الأولى أنها إحدى الفازات الزجاجية الرائعة بألوانها و شكلها ..... لكن عند قراءة الموضوع يتبين أنها بقع من الطلاء و ببراعة المصور خرجت لنا هذه الصور.

هذه الصور الرائعة هي لقطات نادرة – بكاميرات فائقة السرعة - ناتجة عن تأثير الموجات الصوتية من خلال سماعات تشبه تلك التي نضعها في جهاز الحاسب ،حيث قام المصور" ليندن جليد هيل " بوضع هذه السوائل المخلوطة ببقع من الطلاء فوق سماعات صوت ذات طاقة عالية ، ثم قام بايصالها بأجهزة تزامن احترافية (جهاز Stop Shot) لالتقاط الصورة المناسبة في اللحظة المناسبة .

د. ميسون مقل

د. ميسون مقل

د. ميسون مقل

د. ميسون مقل

د. ميسون مقل

د. ميسون مقل