تطبيقات فعل دوبلر

Doppler effect applications

تقديم الطالب: باسل الشوارب

بإشراف المدرس: محمود نوح

للعام الدراسي 2015–2016

ملخّص:

يقدم هذا البحث شرح لظاهرة دوبلر و للتطبيقات المختلفة التي تعتمد عليه والتي نستفيد منها كثيراً في حياتنا.

الإشكالية

لطالما نلاحظ عندما يقترب منا قطار، وهو يصدر صوت البوق، أن صوته يزداد حدةً، أما عندما يبتعد عنا فإن صوته يزداد غلظةً.

ما سبب هذه الظاهرة؟ وهل تنطبق أيضاً على الضوء مثلما تنطبق على الصوت؟

هل لهذه الظاهرة البسيطة، والتي نتعرض لها يوميا، أهمية لنستفيد منها بتطبيقات مختلفة في حياتنا؟

المقدمة

معظمنا يلاحظ فعل دوبلر في حياتنا اليومية، لكن لا أحد فينا يدرك سبب هذه الظاهرة أو أهميتها أو حتى فكر في ذلك، إلا أن العالم دوبلر تمكن في أوائل القرن التاسع عشر من تفسير هذه الظاهرة، التي سميت باسمه، على الضوء والصوت، وقد أشار إلى أهمية هذه الظاهرة في دراسة للنجوم المزدوجة. فبدأ العلماء يعتمدون على هذه الفكرة لبناء نظريات الفضاء، وتزايدت التطبيقات حتى بلغت مجالات مهمة في حياتنا.

الفصل الأول: فعل دوبلر، ومعادلاته

الصورة (1) العالم كريستيان دوبلر

من هو دوبلر

العالم كريستيان دوبلر هو فيزيائي ورياضي ولد في مدينة سال زبورك في النمسا، تم تعيينه بروفيسور في الفيزياء والرياضيات في كلية براغ، ثم أصبح مديراً عاماً لمعهد الفيزياء بجامعة فيينا، من أهم إنجازاته اكتشافه لفعل دوبلر.

فعل دوبلر

هو تغير في تواتر موجة صادرة عن منبع صوتي أو ضوئي والتي يتلقاها مراقب نتيجة حركة المنبع والمراقب أو أحدهما، ويمكن ملاحظة هذه الظاهرة في حياتنا عندما تقترب مننا سيارة وهي تصدر صوت البوق فإننا نلاحظ أن الصوت يزداد حدةً ،أما عندما تبتعد عنا فإننا نلاحظ أن الصوت يزداد غلظةً.

تفسير ظاهرة دوبلر[1]

تنتشر الأمواج من مصدر الصوت بشكل كرات متحدة المركز، وللسهولة نمثل هذه الكرات بدوائر.

عندما يكون المنبع الموجي والمراقب ساكنين، يصدر المنبع موجات بتواتر معين ويتلقاها المراقب بنفس التواتر، بمعنى آخر، يتلقى المراقب موجة خلال زمن يساوي الدور، أما عندما يتحرك المنبع الموجي أو المراقب فإن تواتر المنبع يبقى ثابتاً، ولكن التواتر الذي يتلقاه المراقب هو الذي يختلف، فعندما يقترب أحدهما من الآخر يتلقى المراقب الموجات بزمن أقل (أي يقل الدور)، أما عندما يبتعد أحدهما عن الآخر فإن الدور يزداد.

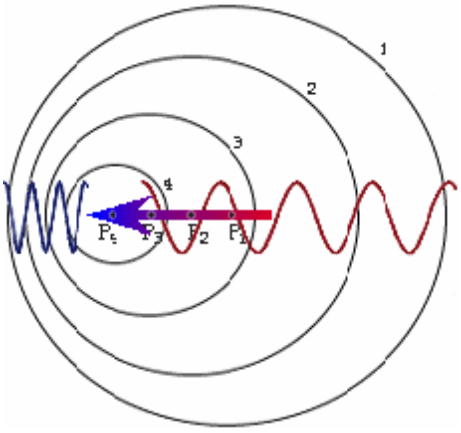
وبالنتيجة، يمكن القول أن التغير في التواتر الذي يتلقاه المراقب يعتمد على سرعة كل من المنبع والمراقب.

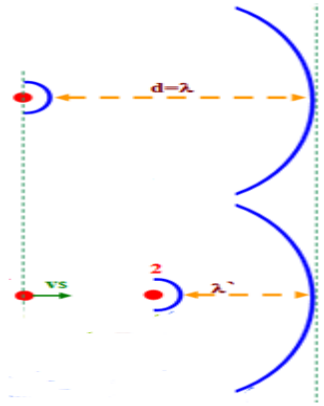
1 ميزرا ,م. ق. (2006). مبادئ الفيزياء الجامعية الميكانيك والمواد. جامعة البحرين.

إزاحة دوبلر[2]

- **المنبع الصوتي متحرك والمراقب ساكن:**

عندما يتحرك المنبع فإن تواتره يبقى ثابتاً، ولكن التواتر الذي يتلقاه المراقب هو الذي يختلف، فعندما يقترب المنبع من المراقب فإن الفاصل الزمني بين وصول كل موجتين متتاليتين يقل (أي يقل الدور الذي يتلقاه المراقب)، أما عندما يبتعد المنبع عن المراقب فإن الدور يزداد.





الصورة (2) شكل توضيحي لانضغاط الأمواج الصوتية والضوئية. **الصورة (3) تغير موضع الأمواج أثناء حركة المنبع.**

عندما يقترب مصدر صوتي من مستمع بسرعة v_s مصدراً صوتاً تواتره f فخلال دور كامل يكون المنبع قد تحرك مسافة $x = v_s T$ ويكون طول الموجة الواصل للمراقب:

$$\lambda' = \lambda - x = \lambda - v_s T = vT - v_s T = T(v - v_s)$$

حيث v هي سرعة الصوت.

ومن ثم يكون التواتر المسموع: $$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{(v - v_s)} f$$

حيث أن $f = \frac{1}{T}$:

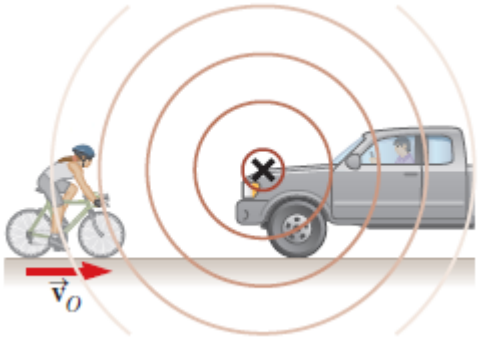
وبنفس الطريقة نستنتج أنه لو كان المنبع يبتعد عن المراقب لكانت المسافة التي يقطعها هي x لكن طول الموجة يصبح:

$$\lambda' = \lambda + x = \lambda + v_s T = vT + v_s T = T(v + v_s)$$

2 Raymond A.Serway, J. W. J., Jr. Physics for scientists and engineers, Mary Finch,Charlie Hartford.

ومن ثم يصبح التواتر المسموع: $$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{(v + v_s)} f$$

- **المنبع الصوتي ساكن والمراقب متحرك:**



الصورة (4) تبين الموجات الصادرة من سيارة ساكنة.

عندما يتحرك المراقب فإن تواتر المنبع يبقى ثابتاً، ولكن التواتر الذي يتلقاه المراقب هو الذي يختلف، فعندما يقترب من السيارة يتلقى المراقب الموجات بزمن أقل (أي يقل الدور)، أما عندما يبتعد المراقب عن السيارة فإن الدور يزداد.

إذا تحرك المراقب بسرعة v_l نحو مصدر صوتي يصدر صوتاً تواتره f فإن سرعة الصوت التي يتلقاها المراقب: $v' = v_l + v$

ويسمع المراقب صوتاً طول موجته λ (أي طول موجة الصوت الصادر نفسها) أما تواتره فيساوي:

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \frac{v_l + v}{\lambda} = \left(\frac{v_l + v}{v}\right) f$$

وإذا تحرك المراقب بعيداً عن المنبع فإنه سيسمع صوتاً تواتره :

$$f' = \left(\frac{v - v_l}{v}\right) f$$

- **المنبع الصوتي متحرك والمراقب متحرك:**

إذا كان المنبع والمراقب يقتربان من بعضهما فإن سرعة الصوت التي يتلقاها المراقب تكون:

$$v' = v_l + v$$

ويكون طول الموجة الواصل للمراقب:

$$\lambda' = T\,(v - v_s)$$

وبالتالي يكون التواتر الذي يتلقاه المراقب:

$$f' = \frac{v'}{\lambda'} = \left(\frac{v_l + v}{v - v_s}\right) f$$

فعل دوبلر النسبي[3]

- **علاقة طول موجة الضوء بتواتره**

يتناسب طول موجة الضوء تناسباً عكسياً مع تواتره بالعلاقة التالية: $f = \frac{C}{\lambda}$.

ويمتلك الضوء الأحمر أقل تواترٍ بين ألوان الطيف المرئي لأن طول موجته هو الأكبر، بينما يمتلك الضوء الأزرق أكبر تواترٍ لأن طول موجته هو الأصغر.

- **فعل دوبلر في الأمواج الكهرطيسية**

إن الأمواج الكهرطيسية هي أمواج تتحرك بسرعة الضوء لذلك فعند التعامل معها لابد من أخذ الآثار النسبية كتمدد الزمن الذي يعطى بالعلاقة: $t = \gamma t_0$ حيث $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$.

فإذا تحرك منبع ضوئي بسرعة v وهو يصدر أمواج ضوئية سرعتها c وتواترها f باتجاه مراقب فإن التواتر الذي يتلقاه المراقب:

$$\mathrm{f}' = \frac{\mathrm{c}}{\lambda'} = \frac{c}{(\mathrm{c}-\mathrm{v})\mathrm{T}}$$

لكن نتيجةً للآثار النسبية يحصل تمدد في الزمن فيكون:

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{T_0 c}{\sqrt{c^2-v^2}}$$

فيكون التواتر الذي يتلقاه المراقب:

$$\mathrm{f}' = \frac{c}{(\mathrm{c}-\mathrm{v})} \cdot \frac{\sqrt{c^2-v^2}}{T_0 c} = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} f$$

ويمكن استنتاج بقية المعادلات بنفس الطريقة السابقة.

3 HUGH D. YOUNG, R. A. F. UNIVERSITY PHYSICS. CALIFORNIA, Jim Smith

الفصل الثاني: تطبيقات فعل دوبلر

الرادار[4]

جهاز إلكتروني يستخدم الموجات الكهرطيسية في الكشف عن الأجسام وتحديد إحداثياتها، وكذلك سرعتها واتجاهها إذا كانت متحركة.

يصدر الرادار الموجات إما بشكل مستمر ويستخدم بذلك هوائيان منفصلان أحدهما للإرسال والآخر للاستقبال، أو يرسل الموجات على شكل نبضات متتالية بشكل دوري، فهو يكون إما في حالة إرسال أو استقبال، ولا يحدث تقاطع للحالتين، ويستخدم هوائي فقط للإرسال والاستقبال، ويسمى هذا النوع بالرادار النبضي وهو النوع الشائع.

الصورة (5) تبين الرادار الذي يعمل بالأمواج المستمرة.

الصورة (6) تبين الرادار الذي يعمل بالأمواج النبضية.

مكونات الرادار

- **الهوائي**

يعمل عند الإرسال على تحويل التيارات الكهربائية عالية التواتر إلى موجات كهرطيسية بنفس التواتر، وعند الاستقبال يحول الموجات المنعكسة إلى جهود كهربائية.

- **المزدوج**

4 الله ,م .م .غ .د .(2006) .مبادئ الرادار .أكاديمية كرري.

يقوم بتمرير إشارة الإرسال إلى المرسل وحجبها عن دوائر المستقبل، بينما يقوم بتمرير الإشارة المستقبلة إلى المستقبل وحجبها عن دوائر المرسل.

- **مولد النبض**

يتحكم بلحظة إرسال النبضة، ويحدد الزمن الفاصل بين كل نبضتين متتاليتين.

- **المبين**

يتلقى إشارته من المستقبل ويعرضها على شاشة بشكل مرئي.

مبدأ عمل الرادار

عند سقوط الموجات الكهرطيسية على جسم ما فإن قسما منها سينعكس عنه، وينتشر جزء من الموجات المنعكسة بالاتجاه المعاكس للموجات الساقطة. وعلى هذا الأساس فإن الرادار يقوم بإرسال موجات كهرطيسية ذات تواتر معين ويستقبل الموجات المنعكسة من الأجسام المادية الموجودة ضمن نطاق عمله، ويقوم بمعالجتها، وتسمى الأجسام التي تم تصميم الرادار لرصدها بالأهداف والتي قد تكون أهدافاً طائرة كالصواريخ والطيارات أو على الأرض كالسفن والمركبات الأرضية.

وإلى جانب استخدامه للكشف عن الأهداف المطلوبة فإنه يستخدم لقياس بعد الهدف المرصود، لذلك فإن الاسم المتداول للرادار جاء من الكشف وقياس البعد بالراديو **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging.

وعندما يكون الجسم المرصود متحركاً فإن هذه الانعكاسات ستعاني تغيراً في طول الموجة والتواتر، ومن هذا التغير يمكن للرادار حساب سرعة هذا الجسم وكذلك تحديد اتجاه حركته.

تمييز الأجسام المتحركة

حتى يعرف الرادار ما إذا كان الجسم متحركاً أم ساكناً، يتم اللجوء إلى كاشف الطور الذي يستخدم لقياس زاوية الطور للموجة المستقبلة مع زاوية الطور للموجة التي تليها، فهو يؤخر الموجة المستقبلة بمقدار دور، أي زمن وصول الموجة الأخرى، ثم يطرح مطالها من مطال الموجة القادمة، فإذا كان الحاصل يساوي الصفر فإن الجسم ساكن أي زاوية الطور ثابتة، وبالتالي يقوم بإلغاء الإشارات الناتجة عن الأهداف الثابتة.

استخدامات الرادار

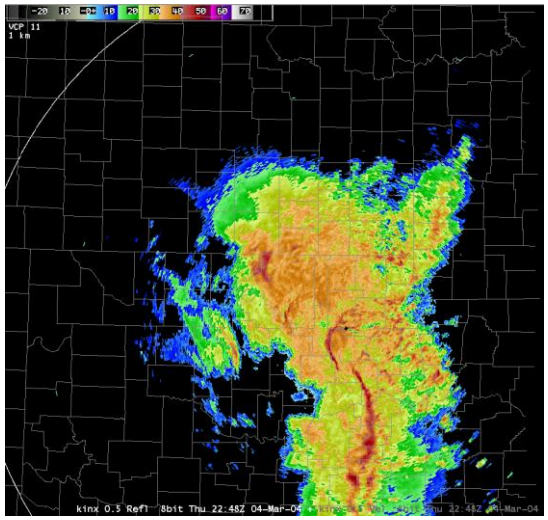
يستخدم الكثير من الدول الرَّادار للحراسة من هجمات فُجائية من طائرات العدوِّ وصواريخه، وكذلك تستخدم شرطة المرور الرادار لقياس سرعة السيارات ومعرفة السيارات المتجاوزة للسرعة القانونية.

ويستخدموه الرياضيون ليقيسوا سرعة الجري بفضل معادلات دوبلر.

الصورة (7) تبين الرادار الذي يستخدم للكشف عن السيارات المخالفة للسرعة القانونية.

الصورة (8) تبين الرادار المستخدم في الرياضة

كما يستخدم الرادار للكشف عن أحوال الطقس فهو يرصد الغيوم في السماء ويحدد ما إذا كانت تبتعد أم تقترب، كما يمكنه تحديد اتجاه حركة العواصف، وقياس سرعة الرياح في مناطق مختلفة لرسم خرائط توزع سرعات الرياح.



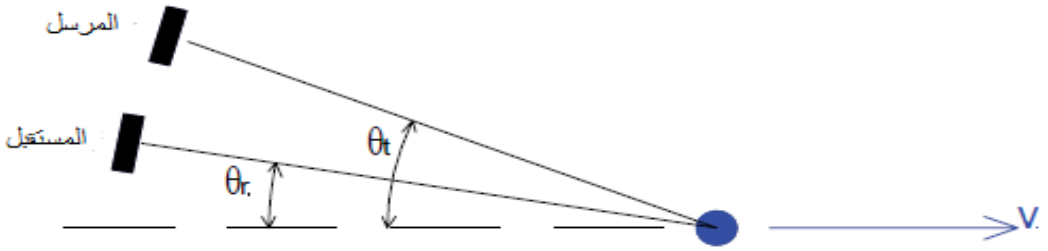
الصورة (9) خرائط رادار الطقس.

إن هذه الاستخدامات المتعددة للرادار تبين مدى أهميته وضرورته للإنسان.

وبشكل عام تعتمد معظم أجهزة قياس السرعات باستخدام فعل دوبلر على نفس مكونات الرادار.

قياس سرعة السوائل[5]

يعتمد المبدأ الأساسي لقياس سرعة السوائل على أن سرعته في نقطة هي نفسها سرعة جسيم منه عند هذه النقطة وذلك باعتبارها صغيرة جداً.



الصورة (10) شكل توضيحي لمسار الأمواج في جهاز قياس سرعة السوائل.

يمكن قياس سرعة السوائل باستخدام الأمواج فوق الصوتية أو باستخدام أشعة الليزر.

يوضع المرسل والمستقبل بحيث تكون الزاوية التي يصنعها كل منهما مع شعاع سرعة الجسيم تقريباً متساوية.

يقوم المرسل بإرسال الموجة باتجاه الجسيم الذي يتحرك بسرعة v، فيتلقى الجسيم الموجة بتواتر آخر نتيجة إزاحة دوبلر لأن المنبع ساكن والجسيم يتحرك، ثم تنعكس الأشعة عن الجسيم، فيصبح جسيم السائل وكأنه مصدر موجي، وبالتالي يتلقى المستقبل الموجة بتواتر مزاح لأن المنبع الذي هو الجسيم يتحرك والمستقبل ساكن.

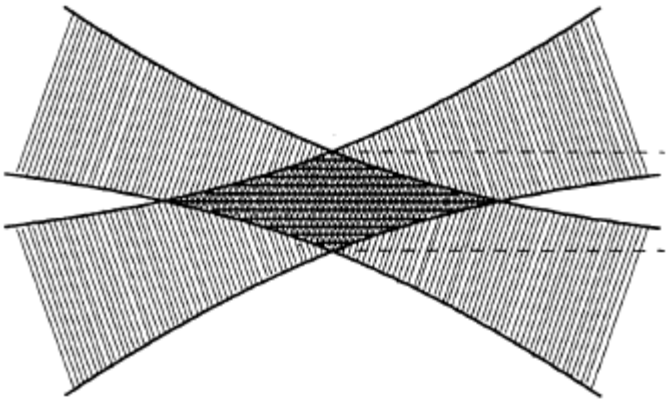
ومن خلال قراءة التواتر الذي يتلقاه المستقبل يمكن معرفة سرعة الجسيم أي سرعة السائل بالعلاقة:

$$f' = 2f\frac{v}{c}\cos\theta$$

حيث θ هي الزاوية بين الموجة وشعاع سرعة السائل.

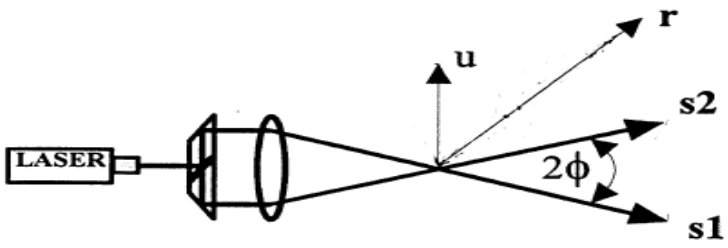
وبذلك يصبح بإمكاننا قياس سرعة السوائل بالاعتماد على فعل دوبلر، لكن هذه الطريقة في القياس تسبب مشكلة كبيرة وهي سقوط الضوء على المستقبل بتواتر عالٍ قد يصل إلى رتبة 10^8 MHz وهو رقم كبير.

5 MEIER, A. H. (2012). Imaging Laser Doppler velocimetry. Switzerland, ETH Zurich



الصورة (11) تبين منطقة تداخل الأمواج.

ولتفادي هذه المشكلة يستخدم شعاع ليزر آخر مع وضع جهاز NDF ليعكس تواتر الموجة ويوجه شعاع الليزر الثاني باتجاه الجسيم بشكل متقاطع مع الشعاع الأول ليشكلا منطقة تداخل، وهي المنطقة التي يمكن قياس سرعة السائل فيها، وعندما يصطدم الشعاعين بالجسيم ينعكس كل منهما ليتجه نحو المستقبل.



الصورة(12) شكل توضيحي لمسار موجتين في جهاز قياس سرعة السوائل.

إن فائدة جهاز NDF تكمن في تقليل قيمة التواتر الساقط على المستقبل لتصبح ما بين (10-100) MHz.

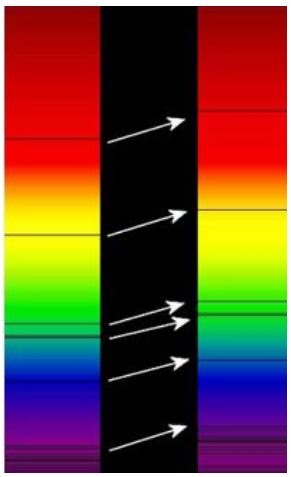
الصورة (13) نجم في الفضاء.

فعل دوبلر في الفضاء[6]

إن فعل دوبلر ينطبق على الضوء مثلما ينطبق على الصوت، لكن مع الأخذ بالآثار النسبية، حيث يزداد تواتره باقتراب المنبع الضوئي من المتلقي ويقل بابتعاده

بالعربي ,ن" .(2015-03-31 ,2015) .الإنزياح نحو الأحمر، وقانون هابل لحساب بُعد الأجسام الكونية6".

عنه، ومن خلال دراسة الضوء الصادر عن النجوم، عن طريق التحليل الطيفي يتبين أن الضوء الذي يتلقاه راصد ينزاح إلى اللون الأزرق إذا كانت المسافة بين النجم والأرض تتناقص (أي أن النجم يقترب)، بينما ينزاح إلى الأحمر إذا كانت المسافة بين النجم والأرض تتزايد.



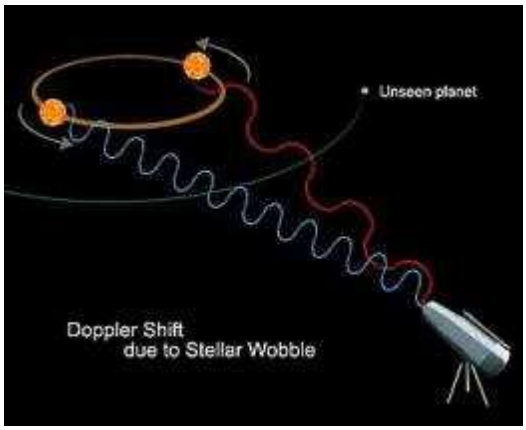
الصورة (14) الانزياح نحو الأحمر.

وفي عام 1929 توصل العالم هابل بالاعتماد على ظاهرة الانزياح الطيفي في أثناء رصده للمجرات إلى أنها تتحرك بعيداً عنا أي أن الكون يتوسع، ووضع قانونه لحساب بعد المجرة عن الأرض: $v = Hd$ حيث H هو ثابت هابل، ولكن لا تزال قيمته غير معروفة بشكل دقيق.

وبالاعتماد على قانون دوبلر يمكننا حساب سرعة النجوم والمجرات ومن ثم تعويضها في قانون هابل لمعرفة بعدها عنا.

ومن إحدى استخدامات فعل دوبلر في النجوم دراسة نجم الكوازار وهو نجم بعيد، ويبتعد عن كوكب الأرض بسرعة كبيرة، ينتج ضوءه عن احتراق غاز الهيدروجين، ويمكن قياس الطول الموجي للطيف الضوئي للهيدروجين بدقة في المخبر، فعند مقارنته بالطول الموجي الصادر عن النجم، وجد أن نسبة التواتر المقاس إلى التواتر الأصلي تساوي 1/3 أي $\frac{f'}{f} = \frac{1}{3} = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$

ومن خلالها تبين أن سرعة النجم تساوي 80% من سرعة الضوء.

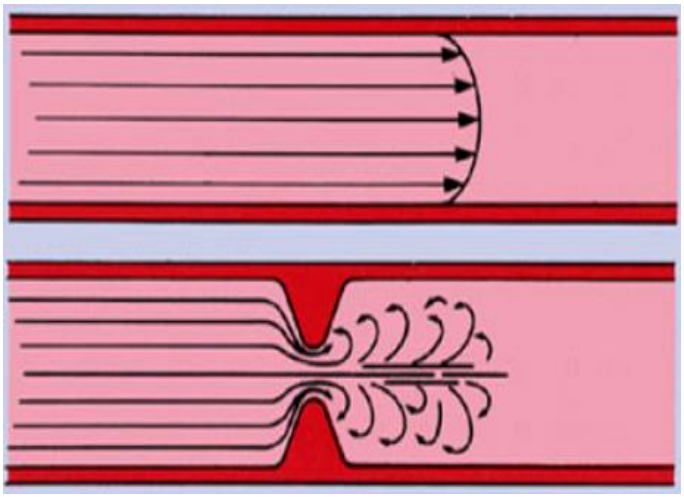


الصورة (15) إزاحة دوبلر في النجوم المزدوجة.

كما يمكن الاستفادة من فعل دوبلر لدراسة النجوم المزدوجة، وهي عبارة عن نجمين يدوران حول مركز كتلتهما، فمن خلال رصد الضوء الصادر عن كل منهما نجد أن أحدهما ينزاح نحو الأحمر والآخر نحو الأزرق وبالتالي يمكن معرفة جهة دوران النجمين.

فعل دوبلر في الطب[7]

الكشف عن الجلطات

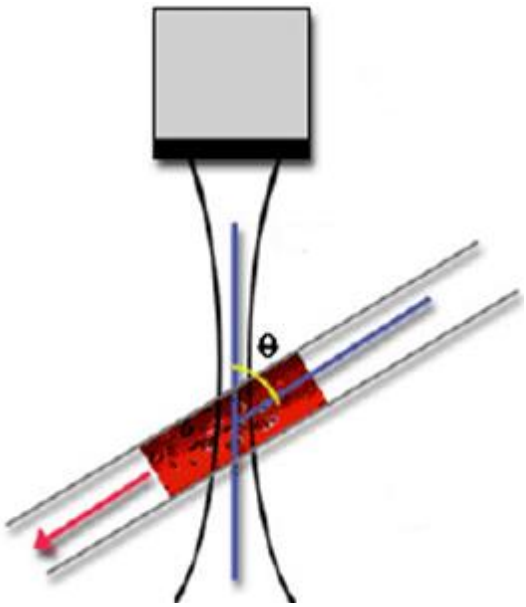


الصورة (16) اضطراب حركة الدم بسبب وجود عائق في الوعاء الدموي.

في الأوعية الدموية السليمة يتحرك الدم بشكل طبقي أي أن كريات الدم الحمراء تتحرك بنفس السرعة على شكل حزم متوازية وفي الاتجاه نفسه ولكن بسبب احتكاك الدم مع جدران الأوعية الدموية فإن الكريات المجاورة للجدار تتحرك بسرعة أقل.

أما إذا وجد عائق في الوعاء الدموي يصبح الجريان جرياناً مضطرباً وفيه تتحرك الكريات بسرعات مختلفة وباتجاهات مختلفة وتكون سرعة الدم عندها أكبر، ومن خلال استخدام الإيكو يمكن معرفة المناطق التي تحتوي على عوائق.

الإيكو



الصورة (17) الإيكو.

هو جهاز يبث أمواج فوق صوتية عبر الجسم، وهذه الأمواج ناتجة عن اهتزاز سريع لنوع من الكريستال يعطي تواترات فوق صوتية، ترسل الأمواج، ويُستقبَل صداها بواسطة قطعة تسمى المسبار، هذا المسبار يجب أن يكون بتماس لصيق مع الجلد، ويدهن الجلد بسائل هلامي عند المنطقة المدروسة لكي تتمكن الأمواج فوق الصوتية من أن تخترق الجلد.

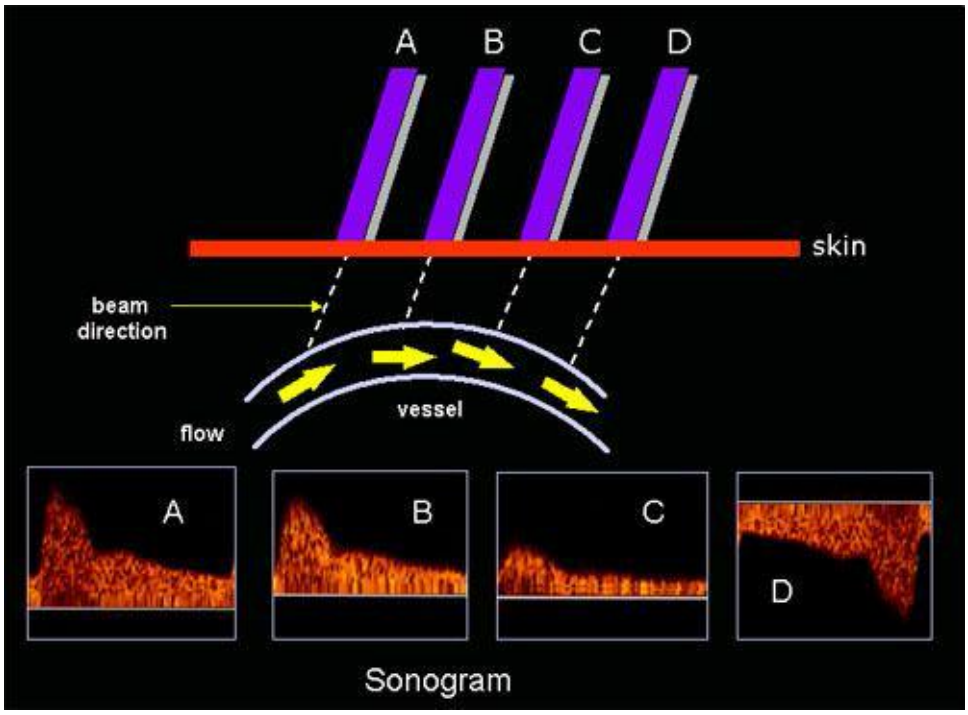
7 kypros nicolaides, g. r., kurt hecher and retano ximenes (2002). doppler in obstetrics.

تعكس الأنسجة الثابتة هذه الأمواج، وتصل إلى المستقبل بنفس التواتر أما عندما تسقط الأمواج على الجسيمات المتحركة فإنها تصل إلى المستقبل بتواتر آخر أي تتعرض لإزاحة دوبلر، فمن خلال توجيه الإيكو على وعاء دموي مثلاً يمكن حساب التواتر، ومن خلال هذا التواتر يمكن معرفة سرعة الدم في الأنبوب وذلك من خلال العلاقة التي ذكرناها سابقاً:

$$f' = 2f \frac{v}{c} \cos\theta$$

الدوبلر الملون

هو جهاز يستخدم لدراسة ضخ الدم من خلال رسمه وتلوينه، وهو يتلقى بياناته من جهاز الإيكو عند توجيهه إلى عدة مناطق في الوعاء الدموي، ويوضح الشكل (17) جهاز الدوبلر الملون، فكما ذكرنا يتعلق التواتر الذي يتلقاه المستقبل بالزاوية بين الأمواج الواردة على الوعاء الدموي وشعاع سرعة جزيئات الدم، فتكون الإشارة عند A ذات تواتر عالٍ لأن الزاوية صغيرة، وتكون عند B ذات تواتر أقل، أما عند C فتكون الزاوية تقريبا قائمة وبالتالي يكون التواتر منخفض، بينما يكون التواتر سالب عند D.



الصورة (18) رسم توضيحي لمبدأ عمل الدوبلر الملون.

الخاتمة

لقد بدأ فعل دوبلر بفكرة بسيطة إلا أن العالم أدرك أهميتها، فعمل على تطويرها لتشغل تطبيقات واسعة، من قياس سرعة النجوم والمجرات، وقياس سرعة السوائل، ورصد الطائرات وتحديد سرعتها عن طريق الرادار، إضافة إلى رسم خرائط المناخ، وكذلك التصوير بالأمواج فوق الصوتية.....

لكن تطبيقات فعل دوبلر لا تنتهي فالمبدأ واحد ولكن يمكننا أن نستفيد منه في أشكال مختلفة.

النتائج

فعل دوبلر هو ظاهرة نتعرض لها يومياً لكن لا أحد فينا يعيرها اهتمامه، فقد انطلقت الفكرة من سماع صوت بوق سيارة تتحرك بالنسبة لمراقب، ثم تطورت لتشمل تطبيقات واسعة في الأمواج الصوتية والضوئية، فكانت فكرة بسيطة إلا أن لها أهمية كبيرة.

الاستنتاجات

لقد تعرفنا على المبدأ الأساسي الذي تعتمد عليه أجهزة دوبلر، لكن ماذا لو حركنا منبع أمواج فوق البنفسجية بسرعة معينة بعيداً عن مراقب، فهل من الممكن عند تغير هذا التواتر أن تتحول هذه الأمواج إلى ضوء مرئي؟

التوصيات

إن تطور العلم يحتاج إلى أي معلومة مهما بلغت بساطتها لأنه من الأفكار البسيطة تنتج تطبيقات هائلة،كما لاحظنا في فعل دوبلر، لذلك علينا أن نهتم بأي فكرة نلاحظها، وأن نعيرها بعض الأهمية، لعلنا نساهم في تطوير العلم بما يفيد حياتنا.

المراجع

المراجع الأجنبية:

1. HUGH D. YOUNG, R. A. F. UNIVERSITY PHYSICS. CALIFORNIA, Jim Smith.
2. kypros nicolaides, g. r., kurt hecher and retano ximenes (2002). doppler in obstetrics.
3. MEIER, A. H. (2012). Imaging Laser Doppler velocimetry. Switzerland, ETH Zurich
4. Raymond A.Serway, J. W. J., Jr. Physics for scientists and engineers, Mary Finch,Charlie Hartford.

المراجع العربية:

1. الله ,م .م .غ .د .(2006) .مبادئ الرادار .أكادمية كرري.
2. بالعربي ,ن" .(2015-03-31 ,2015) .الإنزياح نحو الأحمر، وقانون هابل لحساب بُعد الأجسام الكونية".
3. ميزرا ,م .ق .(2006) .مبادئ الفيزياء الجامعية الميكانيك والمواد جامعة البحرين.

فهرس الصور

الرقم	اسم الصورة	رقم الصفحة
1	العالم كريستيان دوبلر.	4
2	شكل توضيحي لانضغاط الأمواج	5
3	شكل توضيحي لتغير وضع الأمواج أثناء حركة المنبع.	5
4	الموجات الصادرة من سيارة ساكنة	6
5	الرادار الذي يعمل بالأمواج المستمرة.	8
	الرادار الذي يعمل بالأمواج النبضية.	8
	رادار الكشف عن السيارات المتجاوزة للسرعة القانونية.	10
	الرادار المستخدم في الرياضة.	10
	خرائط رادار الطقس.	10
6	شكل توضيحي لمسار الأمواج في جهاز قياس سرعة السوائل.	11
7	منطقة تداخل موجتين .	12
8	شكل توضيحي لمسار موجتين في جهاز قياس سرعة السوائل.	12
13	نجم في الفضاء.	12
14	الانزياح نحو الأحمر.	13
15	إزاحة دوبلر في النجوم المزدوجة.	13
16	اضطراب حركة الدم بسبب وجود عائق في الوعاء الدموي.	14
17	الإيكو.	14
18	رسم توضيحي لمبدأ الدوبلر الملون.	15

الفهرس العام

الإشكالية	**2**
المقدمة	**3**
الفصل الأول:	**فعل دوبلر**
العالم كريستيان دوبلر	**4**
فعل دوبلر.	**4**
تفسير ظاهرة دوبلر.	**4**
إزاحة دوبلر.	**5**
المنبع الصوتي متحرك والمراقب ساكن.	**5**
المنبع الصوتي ساكن والمراقب متحرك.	**6**
المنبع الصوتي متحرك والمراقب متحرك.	**6**
فعل دوبلر النسبي.	**7**
علاقة طول موجة الضوء بتواتره.	**7**
فعل دوبلر في الأمواج الكهرطيسية.	**7**
الفصل الثاني:	**تطبيقات فعل دوبلر**
الرادار.	**8**
مكونا الرادار.	**8**
مبدأ الرادار.	**9**
تمييز الأجسام المتحركة.	**9**
استخدامات الرادار.	**10**
قياس سرعة السوائل.	**11**
فعل دوبلر في الفضاء.	**12**

فعل دوبلر في الطب. **14**
الكشف عن الجلطات. **14**
الإيكو. **14**
الدوبلر الملون. **15**
الخاتمة، والنتائج **16**
الاستنتاجات والتوصيات **17**
المراجع **18**
فهرس الصور **19**