

مبدأ عمل المراصد العالمية للكشف عن أمواج الجاذبية وتأثير استخدام السويات المترابطة والمضغوطة الليزرية في تحسينها

أ. د. ابراهيم بلال *

عفاف خضر **

(تاريخ الإيداع 2022 /2/13 – تاريخ النشر 7 /7/ 2022)

□ ملخص □

يعرف البحث أمواج الجاذبية كواحدة من أكثر اكتشافات العلم الحديث أهمية، والتي تتبأ بها أينشتاين منذ ١٩٠٥، ويوضح أهم أسباب تأخر العالم من الوصول للدقة المطلوبة ونشر الأوراق البحثية المتضمنة إثباتات ونتائج رصدها حتى عام ٢٠١٧. والتي شكلت ثورة في علم الفلك. ويدرس البحث أشهر مقاييس التداخل التي ترصد أثر أمواج الجاذبية والمطبقة في عدة بلدان بتمويلٍ دوليٍّ ورعاية أهم المؤسسات العلمية، وهي منظومة (Light LIGO Interferometer Gravitational wave Observatory) وتعني "مرصد أمواج الجاذبية التداخلية الضوئية". من خلال عرض آلية عملها وأهم ما تم نشره من تحسينات على نتائجها. مع التركيز على الدراسة النظرية لأهم عمليات التحسين، المتمثلة في استخدام السويات الليزرية المضغوطة وتأثيرها على هذه المراصد الكلمات المفتاحية: الهزاز الكمي، السويات المترابطة، السويات المضغوطة، أمواج الجاذبية، تجربة مداخل (LIGO).

* أستاذ مدرس - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

** حاصلة على الماجستير - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

The principle of work of global observatories to detect gravitational waves and the effect of using coherent and squeezed states of laser in improving them

prof. Ibrahim Bilal*
Afaf khder**

(Received 13/2/2022.Accepted 7/7/2022)

□ABSTRACT □

Research defines gravitational waves as one of the most important discoveries of modern science. Which was predicted by Einstein since 1905, and explains the most important reasons for the world's delay in reaching the required accuracy and publishing research papers containing evidence and results of their observations until 2017. Which constituted a revolution in astronomy. The research studies the most famous interferometers that observe the effect of gravitational waves and applied in several countries with international funding and sponsorship of the most important scientific institutions, which is the LIGO system (Light Interferometer Gravitational Wave Observatory). By presenting its mechanism of action and the most important improvements that have been published on its results. With a focus on the theoretical study of the most important improvement processes, represented in the use of squeezed states laser and their impact on these observatories.

Keywords: quantum oscillator, coherent state, squeezed states, gravitational waves, LIGO.

* Professor, Department of Physics, Faculty of science, Tishreen University , Lattakia, Syria.

**Master's degree, Department of Physics, Faculty of science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

1- مقدمة:

أمواج الجاذبية هي التنبؤ المركزي والغريب للنظرية النسبية العامة التي اقترحها آينشتاين ويعتبر الكشف عنها الاختبار الرئيسي لصحة نظريته. تعتبر دراسة أمواج الجاذبية حالياً من أهم التحديات الرئيسية في الفيزياء وما زالت تتزاحم الجهود لجمع وتحليل المعلومات ذات الصلة في سباق علمي دولي، لأنها تعتبر إحدى أولى المفاتيح الممكنة لدراسة فهم الكون. جاء وصف أمواج الجاذبية حسب النظرية العامة النسبية بأنها "تموجات" تنتشر في الزمكان وتنشأ عن المنظومات الضخمة وظواهرها و / أو العنيفة، بما فيه الكفاية لحث حقل جاذبية قوي من أصل فيزيائي فلكي وتتضمن هذه الأنظمة:

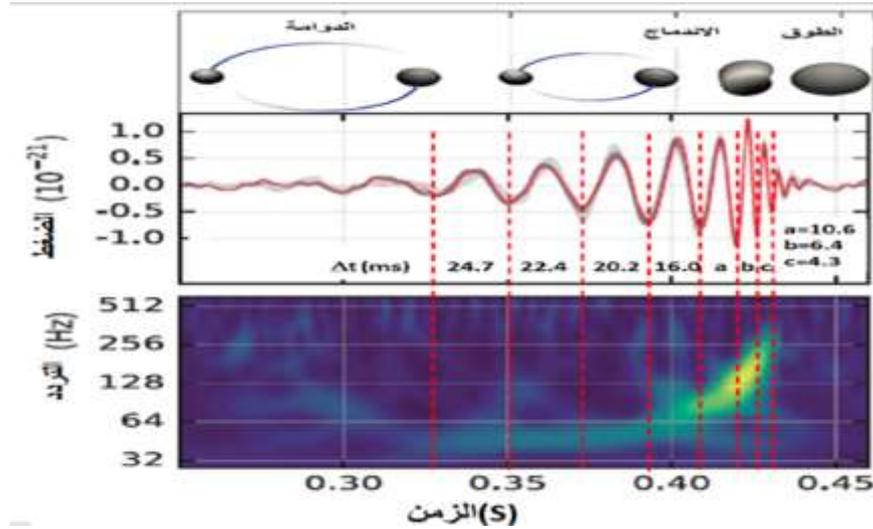
A-الالتحام الثنائي المدمج-Compact Binary Coalescences(CBC): هو فئة من المصادر التي تتكون من جسمين مدمجين، وتنقسم إلى نجوم نيوترونية ثنائية (BNS) Binary Neutron stars، أشهرها النجم الثنائي Hulse-Taylor. أو ثنائية نجم نيوتروني وثقب أسود (BHNS) black holes-Neutron stars أو ثنائية ثقبين أسودين (BBH) Binary black holes. تدور هذه الأجسام حول بعضها بشكل لولبي محدثة تشوه في نسيج الزمكان على شكل أمواج جاذبية (GWs) Gravitational Waves تحمل معها الطاقة والزخم الزاوي بعيداً عن النظام. ويحدث الاندماج وفق ثلاث مراحل:

١-مرحلة الدوامة: عندما يتصادم الجسمان مع بعضهما البعض، فيفقد النظام الطاقة المدارية والزخم الزاوي. ونتيجة لذلك، تزداد سعة وتردد موجات الجاذبية ببطء كتابع للزمن، وهو ما يسمى السقسقة. يمكن أن تبقى المصادر في مرحلة الدوامة لمئات الملايين من السنين، ونظراً لأن أمواج الجاذبية والسرعات ضعيفة فلا يمكن ملاحظتها إلا عبر أجهزة الكشف الأرضية قرب نهاية مرحلة الدوامة.

٢-مرحلة الاندماج: هي مرحلة قصيرة الأجل تتبع مرحلة الدوامة وتحدث عندما يكون الجسمين قريبين من بعضهما البعض، بحيث يبدآن في الاندماج في جسم واحد. فتصبح عندها أمواج الجاذبية شديدة للغاية، بحيث يمكن أن تتجاوز السطوح الكهرومغناطيسي للكون كله.

٣-مرحلة الطوق: بمجرد اندماج الجسمين، فإنهما يدخلان مرحلة الطوق. خلال هذه المرحلة، يحاول الجسم الذي تم تكوينه حديثاً الوصول إلى حالة هادئة بإشعاع تشوهات مرحلة الاندماج [1,3].

ونلخص المراحل الثلاث السابقة في الشكل (1) [2].



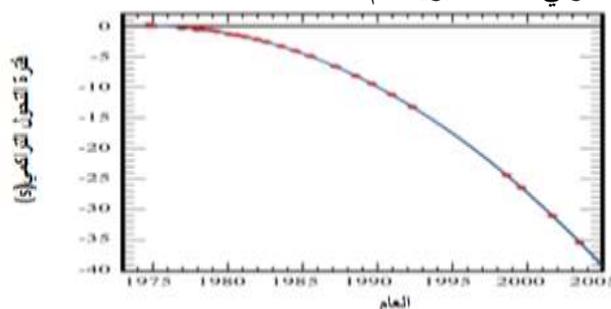
يظهر الشكل (1) قيمة الضغط (الإجهاد) h المنتشر في نسيج الزمكان والتردد F التي لاحظها كاشف هانفورد (Hanford) للمراحل الثلاث، حيث يندمج ثقبان أسودان ليشكلا ثقباً أسوداً جديداً. استخدم الخط المتقطع الرأسي لحساب الفاصل الزمني Δt (ms) بين أقل قيمتين متتاليتين.

B-مصادر الموجة المستمرة-Continuous Wave Sources (CW): هي المصادر التي تنبعث منها GWs الثابتة التردد والسعة تقريباً. المرشح الرئيس لإصدار مثل هذه الإشارات هي Neutron stars (NSs) غير المتناظرة، وعدم التناظر ناتج عن تراكم الضغط في القشرة أو في جوهرها، أو بسبب الإضافة الخارجية لمادتها. مما يجعل سعة أمواج الجاذبية في هذه الحالة أضعف بشكل عام مقارنة بمصادر الالتحام الثنائي المدمج، لذا يلجأ العلماء لأخذ التكامل على طول زمن الرصد مما يحقق نسبة إشارة إلى الضجيج (SNRs) قابلة للكشف.

C-مصادر الانفجار-Burst Sources: ترتبط مصادر الانفجار بالظواهر الفلكية العابرة، مثل المستعرات الأعظمية supernovae، وانفجارات أشعة جاما أو عدم الاستقرار في النجوم النeutرونية عند انهيارها مثلاً. تحدث السوبر نوبا عندما تنهار الأجسام الضخمة تحت تأثير الجاذبية. وفي عملية لاحقة، يتم تكوين NSs أو (BHs) black holes، فتنبعث GWs بسبب التشوه الناتج عن هذه العمليات الديناميكية.

D-النباضات والنجوم النيوترونية الدوارة-Pulsars and other spinning neutron stars: حصل العالمان Russell Hulse and Joseph Taylor [3]، على جائزة نوبل عام 1993، لاكتشافهم ثم دراستهم للنباضات الثنائية. النباض هو نجم نيوتروني دوار قد يكون مفرد وهو ما يعرف بالنوع الأول، ويشير إلى تواجده عبر إرسال سلسلة منتظمة من الأمواج (نبضات) عبر الفضاء. حيث تولد النجوم النيوترونية حارة وتدور بسرعة، قبل أن تبرد مما يجعلها غير مستقرة، ويدفعها لإصدار أمواج جاذبية، ومن المفترض أن تشع النجوم النيوترونية الشابة زخماً زاوياً يكفي لتقليل دورانها وتصبح مستقرة. مما يخفض دوران النجم النيوتروني إلى 100 Hz في غضون عام واحد بعد تكوينه. تمثل الطاقة المنبعثة بهذه الطريقة جزءاً وافياً من طاقة ارتباط النجم. أما النوع الثاني فهو النجوم النيوترونية المتراكمة أو ما يسمى الأنماط- r (والمقصود بهذه الأنظمة نجمين نيوترونيين يدوران حول بعضهما البعض كما أشرنا إلى ذلك في الحالة A لكن بقارق الانتظام في إرسال الأمواج عن الحالة A) ومع اقتراب النجمين النيوترونيين من بعضهما يزداد التردد (التواتر) المداري للأمواج الجاذبية. وقد أظهر رصد مدارات

النجوم الثنائية على مدى السنوات المتعاقبة أن الدور تناقص بنسبة (2.71 ± 0.10) ns نانو ثانية في العام كما هو موضح في الشكل (٢) [6]. وهذا يتفق مع توقعات به النسبية العامة بمعدل تراجع مداري نسبته ns (2.715 ± 0.002) نانو ثانية في العام، وطبعاً يعود السبب لإصدارها أمواج جاذبية. هذا التوافق جعل النظرية أكثر تشويقاً وإعجاباً كما قدم أدلة مقنعة على وجود أمواج جاذبية. أي إن فقدان الطاقة الكامنة للأنظمة المذكورة يسبب إصدار أمواج الجاذبية [5,4,2]. وبسبب هذا الفقدان الذي يساهم في اقتراب النجمين فمن المتوقع اندماج النجمين النترونيين خلال حوالي ٣٠٠ مليون عام.



يوضح الشكل (٢): التراجع المداري لنظام النجم الثنائي $PSR 1913 + 16$ ، النقاط هي بيانات قياس التحول التراكمي تبعاً للفترة الزمنية الموافقة، يظهر منحنى القطع المكافئ نفس الكمية التي توقعتها النسبية العامة.

يترافق إصدار أمواج الجاذبية مع خلفية عشوائية نتيجة تراكم العديد من مصادر GW. وتتقسم هذه

الخلفية إلى فئتين:

(١) الخلفية البدائية: التي تكونت من الإشعاع الصادر مسبقاً عند تشكل الكون، مثل الانفجار العظيم وما

تبعه.

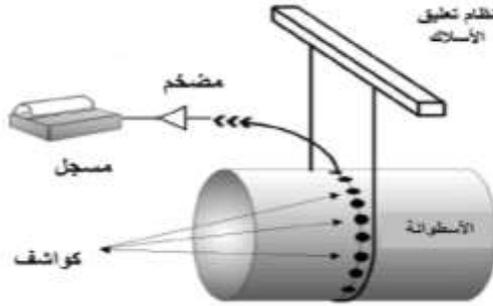
(٢) الخلفية الفيزيائية الفلكية، التي تنتج من إشعاع GW من مصادر الفيزياء الفلكية مثل أنظمة CBC أو عناقيد كونية أو إشعاع النجوم المختلفة بطيف يمتد من أقل من ٢٠٠ Hz في طور الراحة وصولاً لحدود عليا تبعاً للسرعة الزاوية لدوران النجوم.

ورغم أن وبيبر [7] أدعى، منذ عام ١٩٦٨، إنه رصد أمواج الجاذبية، باستخدام أسطوانة من الألمينيوم طولها 1.5 m وقطرها 1m معلقة في الخلاء (انظر الشكل ٣)، تعمل كمستقبل لأمواج جاذبية، عبر تأثير أبعادها الدقيقة بضغط موجة الجاذبية عليها. لكن لم يتم التحقق من ذلك من قبل أي مجموعة بحثية أخرى. حتى طور العالم أشعة الليزر المضغوطة عالي الدقة والذي شكل الشرط الأساسي لعمل المداخل (والذي سنتطرق لدراسته بشكل أدق)؛ وهذا غير مستغرب، لأن الحساسية التي يجب أن تستشعرها الأسطوانة، قيست بالكمية h (نسبة تغير طول الأسطوانة إلى طولها الأصلي):

$$h = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

ويعتبر هذا التغير في المسافة أصغر تغير بالنسبة إلى المسافة بين جسيمات المادة، التي يمكن أن يشعر به الكاشف. هذه القيمة تساوي في حالة نجم متحطم مثلاً بحدود 10^{-17} ، ويمكن ان تصل إلى 10^{-22} أو أقل، بالنسبة للمنباع التي تقع خارج مجرتنا. إن لأعمدة وبيبر حساسية بحدود 10^{-15} ، والنسخ الحديثة التي تعمل عند درجات حرارة منخفضة (لإنقاص الضجيج الحراري للذرات المهتزة)، قد تصل دقتها إلى 10^{-18} . بينما يمكن

لمقاييس التداخل الحديثة قياس ومضات عند مستوى 10^{-20} ، وموجة مستمرة عند 10^{-24} [7]. تفرض هذه الدقة حتمية استخدام الليزر عالي الدقة في عمليات الكشف عن أمواج الجاذبية.



الشكل (٣) رسم تخطيطي لكاشف وبيبر الأسطواني وصورة لجوزيف وبيبر يعمل على التجربة على اليمين، جامعة ميرلاند. هذا وقد تبع ذلك بناء شبكة مداخل ليزرية لكشف أمواج الجاذبية في الألفية الثالثة. أي على مقياس الزمن بضع سنوات، حيث تم وضع العديد من أجهزة الكشف الأرضية قيد العمل وأشهرها منظومة LIGO ومنظومة (Laser Interferometer Space Antenna) وتعني مقياس تداخل ليزري فضائي. ولكن معظم دراستنا يتركز على LIGO.

2- أهمية البحث وأهدافه:

يسلط البحث الضوء على أعمال عالمية لم يتم التطرق لها سابقاً. فكواشف رصد أمواج الجاذبية بمثابة اختراع التلسكوب للمرة الأولى، فهو يفتح لنا نافذة جديدة لنرى منها الكون. فإذا مكننا كل مرصد وتلسكوب في تاريخ الإنسانية من أن نرى الكون (المراصد تلتقطت صور للكون)، فإن كواشف أمواج الجاذبية سمحت لنا الآن بسماعه (شُبهت أمواج الجاذبية بالأمواج الصوتية للكون)، كما لم يحدث قبلاً. وكأن العالم امتلك حاسة جديدة يدرك بها الكون من حولنا، كما وتعطيه القدرة على اكتشاف نوع مختلف تماماً من المعلومات. وكأنها بداية حقبة جديدة من الفيزياء الفلكية. ويفيد هذا البحث في عرض نتائج المراصد الدولية العالمية، التي يصعب تشييدها محلياً نظراً لكلفتها العالية ومتطلباتها الضخمة كالمساحة الكبيرة والتقنيات الحديثة، ويقرب المعلومات للباحثين في هذا المجال والتي يمكن استثمارها في الدراسات النظرية الحالية الفلكية والكونية.

كما ويبسط البحث الشرح الحديث لمبدأ السويات المضغوطة للضوء التي باتت تشكل نموذجاً حديثاً من الدقة والترابط متفوقة على أشعة الليزر المعروفة، والدور التي لعبته في تمكين مراصد أمواج الجاذبية المتقدمة من الوصول للحساسية والتخلص من الضجيج لاستشعار أمواج الجاذبية.

3- مواد وطرائق البحث:

قبل توضيح كيفية الكشف عن أمواج الجاذبية لا بد من إيضاح بعض المفاهيم الضوئية الأساسية.

١- السويات المضغوطة: لا يمكن توضيح مفهوم السويات المضغوطة دون المرور بالدراسة الرياضية التالية

والتي تعد من الدراسات المطولة والعميقة لكن تقصدنا تبسيطها قدر الإمكان لأنها ليست الهدف الرئيسي لبحثنا بل هي وعلى الرغم من أهميتها واحدة من أسباب نجاح مرصد أمواج الجاذبية، ولتوضيح ذلك نبدأ من علاقة حقل موجة أحادية اللون تقليدية مستقطبة خطأً على طول المحور ox داخل مجاوية حجمها V ، بعد اختيار محدد للطور الضوئي، والتي تكتب بشكل عام، بالشكل:

$$E_x(z, t) = E_0 \sin kz \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

حيث E_0 السعة، و $k = 2\pi / \lambda$ متجه الموجة، و ω التردد الزاوي. و φ عامل الطور الذي يعتمد على كيفية

تعريف $t = 0$. وبالاستفادة من مفاهيم المثلثات يمكننا إعادة كتابة الحقل (العلاقة 2) على النحو التالي:

$$\begin{aligned} E_x(z, t) &= E_0 \sin kz (\cos \varphi \sin \omega t + \sin \varphi \cos \omega t) \\ &= E_1 \sin \omega t + E_2 \cos \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

حيث $E_1 = E_0 \sin kz \cos \varphi$ و $E_2 = E_0 \sin kz \sin \varphi$. ويسمى E_1 و E_2 مركبات الحقل

التربيعية (على ترابع). وهي تتوافق مع حقلين كهربائيين متأرجحين يفصلهما فارق طوري قدره 90° (ربع دورة).

يمكن دمج مركبتي الحقل التربيعية في تعبير واحد باستخدام الحساب العقدي. ونكتب في نقطة محددة في

الفضاء، سعة الحقل على النحو التالي:

$$\begin{aligned} E(z) &= E_0(z) e^{i\varphi} \\ &= (E_0(z) \cos \varphi + i E_0(z) \sin \varphi) \\ &= (E_1(z) + i E_2(z)) \end{aligned} \quad (4)$$

حيث $E_0(z) = E_0 \sin kz$. نمثل سعة الحقل العقدي $(E_1 + i E_2)$ كشعاع في الرسم البياني كما هو

مبين في الشكل (a-٤) [8]، حيث يمثل الجزء الحقيقي من E المحور x ، والجزء التخيلي يمثل المحور y . يمثل الحقل

كمتجه طوله E_0 بزاوية φ بالنسبة للمحور x . يسمى هذا النوع من الرسم التخطيطي مخطط الطور. من الملائم في

البصريات الكمومية، العمل في الواحدات التي يكون فيها الحقل بلا أبعاد. لذلك نعيد رسم الحقل الطوري كمتجه طويلته

$E_0 (\epsilon_0 V / 4 \hbar \omega)^{1/2}$ حيث E_0 السعة، و ω التردد الزاوي، و ϵ_0 السماحية الكهربائية للخلاء، و $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ، و V

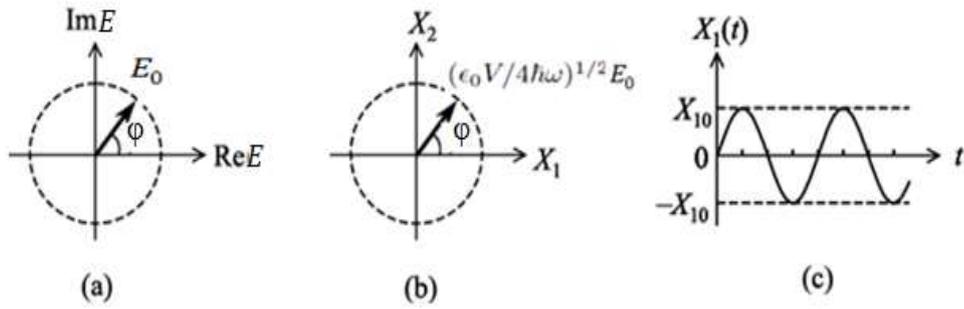
حجم المجاوية التي تمت دراسة الموجة داخلها. كما هو موضح في الشكل (b-4). ويتم تسمية المحاور X_1 و X_2 ،

على التوالي، والتي تمثل المركبات التربيعية للحقل والتي ترتبط مع أجزاء \cos و \sin للحقل الكهربائي التابع

للزمن، وفق العلاقات التالية التي نحصل عليها بعد عدة خطوات رياضية:

$$X_2 = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_0 V}{4 \omega \hbar}\right)} E_0 \cos \omega t \quad (5)$$

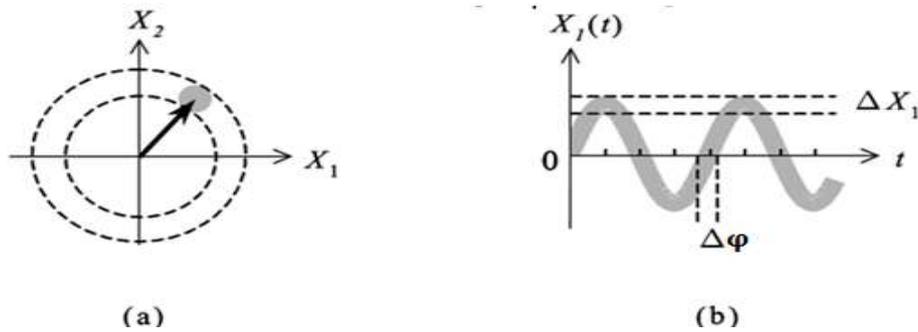
$$X_1 = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_0 V}{4 \omega \hbar}\right)} E_0 \sin \omega t$$



الشكل (٤) (a) مخطط الطور لموجة كلاسيكية سعتها E_0 وطورها φ . (b) المخطط الطوري الكمومي المكافئ. (c) مركبة الحقل التربيعية X_1 تبعاً للزمن. سعتها X_{10} مرتبطة بسعة الحقل الكهربائي E_0 بالعلاقة $(\epsilon_0 V / 4 h \omega)^{1/2} E_0$. يمكننا ماثلة الموجة الضوئية بالهزاز التوافقي، أي تطبيق معرفتنا بالهزاز التوافقي الكمومي على سويات الحقل الكهرومغناطيسي المحددة. هذا يعني إمكانية تطبيق مبدأ الارتياح لهايزنبرغ على المركبات X_1 و X_2 . لذلك نعرف المقدارين ΔX_1 و ΔX_2 المعبرين عن الارتياح بسعات مركبات الحقل بالعلاقة:

$$\Delta X_1 \Delta X_2 = \frac{1}{2\hbar} \Delta x \Delta p_x \quad (6)$$

يشير عدم التعيين الكمي في المركبات التربيعية إلى وجود ارتياح في مقدار واتجاه شعاع الحقل الكهربائي في المخطط الطوري. فإذا افترضنا أن الارتياح في المركبات التربيعية للحقل متساوية، سيظهر عندها مخطط الطور كما هو موضح في الشكل (a-5).

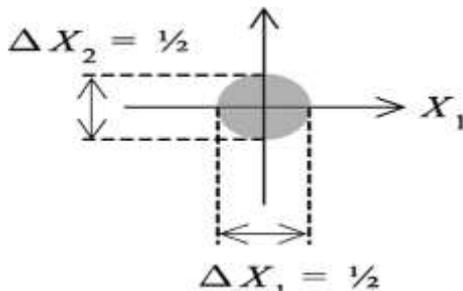


الشكل (٥) (a) مخطط الطور لحقل ضوئي كمومي بدلالة مركبتي الحقل معاً. (b) المركبة التربيعية X_1 فقط للحقل الكهربائي الكمومي تبعاً للزمن.

تمثل الدائرة المظلمة في هذا الشكل (a-5) الارتياح المتساوي في المركبتين التربيعيتين. وهذا يعني إمكانية ظهور الحقل الكهربائي الطوري في أي مكان ضمن دائرة الارتياح هذه. بينما يبين الشكل (b-5) تابعة المركبة التربيعية X_1 للزمن. وأن الارتياح الكمي يظهر في كل من سعة وطور الموجة [9].

في الخلاء لا توجد فوتونات بالحالة المثيجة أي نعوض $n = 0$ في علاقة طاقة الهزاز الكمومي $E_n = (n + \frac{1}{2}) \hbar \omega$. فتصبح $E_n = \frac{1}{2} \hbar \omega$ وهذه الطاقة المغايرة للصفر توصف في ميكانيك الكم القياسي بمصطلح طاقة النقطة الصفرية، وقد فسر ميكانيك الكم وجودها بأنها تنشأ من حقل كهربائي عشوائي التآرجح (يسمى هذا الحقل العشوائي في بعض المراجع بـ **بضجيج الغلق**). وبما أن هذا الحقل موجود في الخلاء، فهو موجود في كل مكان. وعلى الرغم من أن الطاقة مغايرة للصفر في هذه الحالة لكن سعة الحقل الكهربائي صفراً،

لأن السعة تمثل عدد الفوتونات المثيجة والتي عوضاها $n = 0$ ، لذلك تمثل سوية الخلاء في مخطط الطور دائرة ارتياب تتمركز في المبدأ كما هو موضح في الشكل (٦) [10]. تشير المنطقة المظلمة في مخطط الطور إلى حقل الترحج العشوائي للخلاء، نلاحظ أن الارتيايات في المركبتين متطابقة، وكل منها يساوي الحد الأدنى المسموح به:

$$\Delta X_1^{vac} = \Delta X_2^{vac} = \frac{1}{2} \quad (7)$$


الشكل (٦) مخطط الطور لسوية الخلاء. نلاحظ أن هذا الشكل هو في الأساس نفس الشكل (a) باستثناء أن دائرة الارتياب أزيحت إلى المبدأ لحساب الحقل الكلاسيكي الصفري للخلاء.

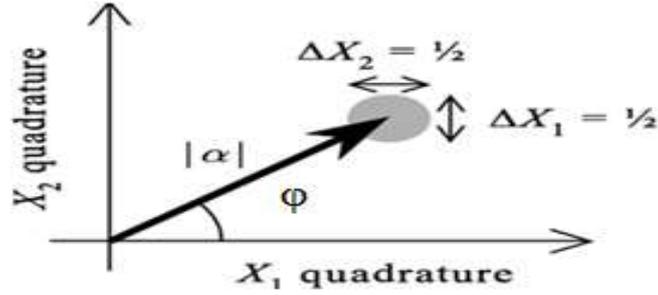
٢-السوية المترابطة: يسمى المقابل الكمي الميكانيكي للموجة الكهرومغناطيسية الكلاسيكية أحادية اللون سوية مترابطة. كما وضحنا تابعة المركبات التربيعية للحقل الكهربائي X_1 و X_2 للزمن. وأن الارتياب الكمي يظهر في كل من سعة وطور كل مركبة. فتكون السوية المترابطة سوية بأدنى ارتياب في طور وسعة كل من المركبتين معاً بحيث لا يوجد أفضلية فعلية لأي من المركبات على الأخرى، وبالتالي قيم الارتياب متطابقة. لذلك لدينا:

$$\Delta X_1 = \Delta X_2 = \frac{1}{2} \quad (8)$$

يمكن بالتالي اعتبار السويات المترابطة مشابهة لسوية الخلاء، بفارق أن دائرة الارتياب مزاحة عن المبدأ بمقدار قيمة شعاع الحقل α (حيث α عدد عقدي بلا أبعاد يميز سعة السوية المترابطة $|\alpha|$ و طورها φ) وسبب الانزياح عن المبدأ الذي يمثل ازدياد السعة هو ازدياد عدد الفوتونات المثيجة في الموجات الكهرومغناطيسية أحادية اللون (السويات المترابطة) عن عدد فوتونات الخلاء والتي تعتبر بالتقريب معدومة. وبالتالي ظهور الطور أيضاً، لذلك يعرف α بالعلاقة التي تتضمن السعة والطور:

$$\alpha = |\alpha|e^{i\varphi} \quad (9)$$

تمثل الدائرة المظلمة ذات القطر $1/2$ في نهاية شعاع الطور في الشكل (٧) هذا الارتياب الكمي.



الشكل (٧) مخطط طوري للسويات المترابطة. تمثل سعتها $|\alpha|$ بطول شعاع المطوار، و يمثل طورها ϕ بزاوية شعاع المطوار بالنسبة لمحور X_1 . تمثل الارتياجات المتساوية في سعتها وطورها بدائرة قطرها $1/2$ في نهاية المطوار (الشعاع الطوري).

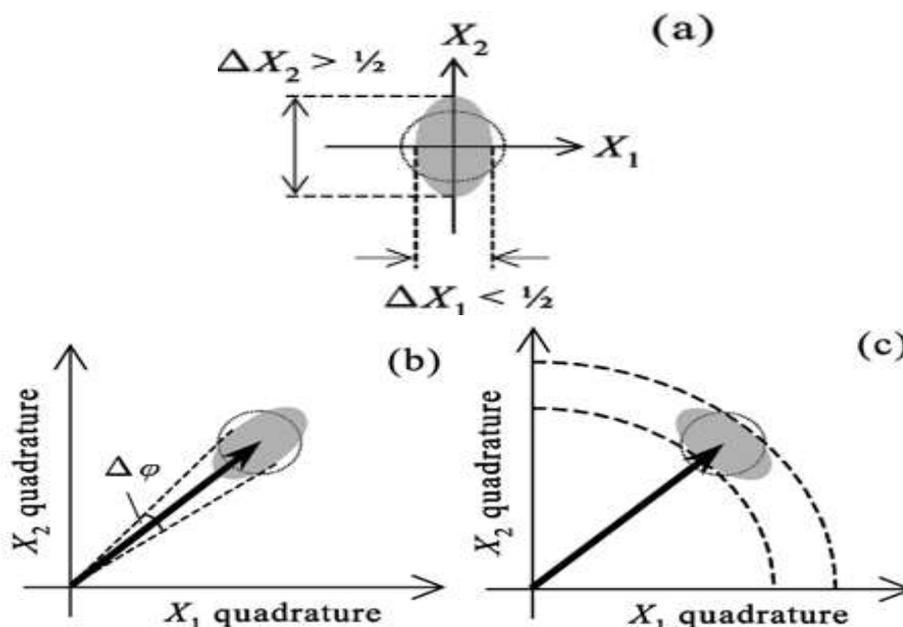
٣- نظرة تحليلية في دراسة السويات المضغوطة: الضوء المضغوط هو حالة غير تقليدية للمجال الكهرومغناطيسي، بسبب اختلاف إحصاءات الفوتون فيها عن إحصاءات الفوتونات في السويات المترابطة. والاختلاف يكمن أن إحصاءات الفوتونات في الضوء المضغوط هي إحصاءات دون بواسونية، والذي يعني انتظام الفاصل بين الفوتون والفوتون الذي يليه في نفس الموجة، وهذا الانتظام يعني انخفاض الترجحات العشوائية للفوتونات وانخفاض الارتياج لتصبح دون مستوى ترجحات الحقل الكهربائي العشوائي في الخلاء الذي دعونه ضجيج الغلق. انخفاض الارتياج يزيد من الدقة الضوئية المطلوبة في العديد من التطبيقات التقنية (رصد أمواج الجاذبية كما سيرد لاحقاً). وتنتج مستوى ضجيج في الكاشف الضوئي أصغر من حد ضجيج الغلق. أي الوصول للدقة المطلوبة للقياس وحجب تشويش الخلاء الذي يمكن أن يشوه رصدنا للأمواج الجاذبية. وهذا يعتبر جوهر فكرة الاعتماد على السويات المضغوطة للكشف عن أمواج الجاذبية [11]. لكن طالما أن سعة وطور الضوء يخضعان لمبدأ الارتياج لهايزنبرغ، نلاحظ أنه إذا تم تخفيض الارتياج في سعة الضوء والذي يتم بتنظيم الفواصل بين الفوتونات، سيزداد الارتياج في الطور والعكس صحيح، فإن تخفيض الارتياج في طور الضوء ويتم بضبط الطور بين الفوتونات، سيزيد الارتياج في السعة. نقصد أن السويات المضغوطة تنتج من "ضغط" أي تخفيض عدم التعيين (الارتياج) لإحدى المركبات (طور أو سعة) على حساب "تمدد" الآخر زيادة عدم التعيين (الارتياج).

يمثل هذا الضغط في المخططات الطورية، بضغط دائرة عدم التعيين لسوية الخلاء أو للسوية المترابطة إلى قطع الناقص له نفس المساحة. وتسمى عندئذ السويات ذات المركبات التربيعية المضغوطة.

ويتضح هذا الضغط بمقارنة الشكل (8-8) الممثل لمخطط الطور لسوية الخلاء المضغوطة [11]. مع الشكل (٦) الممثل لمخطط الطور لسوية الخلاء الأصلية، يوضح هذا الشكل كيف تم ضغط دائرة الارتياج في اتجاهه على حساب الاتجاه الآخر، فتنحول الدائرة لقطع ناقص. يوضح ضغط المركبة التربيعية X_1 من خلال مقارنة القطع الناقص مع الدائرة المنقطعة والتي تمثل حالة الخلاء الأصلية حيث $\Delta X_1 = \Delta X_2 = 0.5$. وتوضح الأشكال (٨)- (b) و (c) نمطين آخرين من الضوء المضغوط.

بمقارنة عدم التعيين للسوية المترابطة الممثل في الشكل (٧) مع الشكل السابق، نلاحظ ضغط دائرة عدم التعيين إلى قطع ناقص له نفس المساحة. يتقلص في الشكل (b) المحور الرئيسي للقطع الناقص مع شعاع الطور للسوية المترابطة، بحيث تكون درجة عدم التعيين في الطور أقل من السوية المترابطة الأصلية (الضوء

المضغوط (الطور)، في الشكل ٨ (c) يتقلص المحور الثانوي لتقليل عدم التعيين في السعة (الضوء المضغوط السعة).



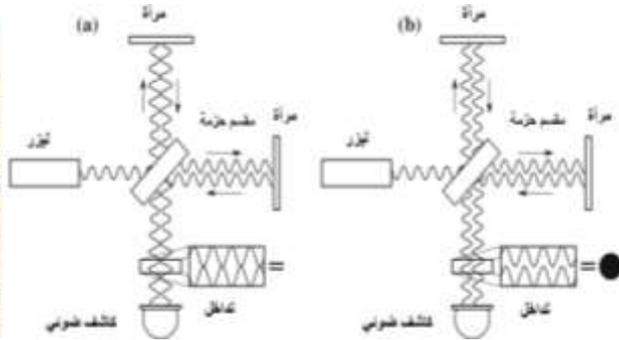
الشكل (٨) ثلاثة أنواع مختلفة من السويات ذات المركبات التربيعية المضغوطة، الشكل ٨ (a) سوية الخلاء المضغوطة، الأشكال (b) و (c) نمطين آخرين من الضوء المضغوط.

تكمّن إحدى طرائق توليد السويات المضغوطة مخبرياً، في استخدام بلورة ذات خصائص بصرية غير خطية تضخ بضوء الليزر على سبيل المثال. مما يولد ارتباطات بين سعة وطور الضوء عند تمريره في هذه البلورات وحدث تفاعلات غير خطية ذات درجات عالية مع الذرات. كما ويوفر وضع البلورة ضمن مجاوبة مزيداً من الانعكاسات والترابط بين الفوتونات للوصول إلى التوزع دون البواسوني للفوتونات المنتظم، بالتالي الحصول على ضغط السويات.

4-دراسة مرصد أمواج الجاذبية:

4-١ مبدأ عمل مرصد أمواج الجاذبية الأرضية: تُرتب مقاييس التداخل الأرضية وفق نظام مايكلسون (على شكل حرف L) كما يوضح الشكل (٩): ويتألف من: ليزر Nd:YAG كمصدر لضوءٍ طول موجته ١٠٦٤nm، ومقسم حزمة، وسلسلة من المرايا والكواشف الضوئية التي تسجل نمط التداخل. يمر شعاع الليزر في مقسم الحزمة فيقسمها إلى حزمتين متطابقتين تنتشران في ذراعي المرصد المتعامدان (بينهما زاوية 90°). ينتهي كل ذراع بمرآة تعكس الشعاع وتعيده إلى مقسم الحزمة لتندمج الحزمتان مرة أخرى في حزمة واحد. تتداخل في عملية "الدمج" هذه، الموجات الضوئية للحزمتين مع بعضهما البعض قبل الوصول إلى الكواشف الضوئية. تُضبط مقاييس التداخل GW في بداية التشغيل بحيث يحصل تداخل هدام (عدم ظهور أهداب التداخل) على الكواشف الضوئية. فيتم الكشف عن أي (ضجيج أو موجة) قد تعبر المرصد من خلال مراقبة تغيرات الكثافة الضوئية ويستدل عليها بتشكيل نمط تداخل مختلف (ظهور أهداب التداخل)، مما يعني أن شيئاً ما (ضجيج أو موجة) قد عبر المرصد وأدى لتغيير المسافة L التي قطعتها إحدى حزمتي الليزر أو كليهما. علاوة على ذلك، يمكننا استخدام نمط التداخل هذا لحساب $\Delta L/L$ بدقة، والذي يعرف

بضغط (سعة) الموجة على الأجسام التي تصادفها. هذه النقطة ذات أهمية أساسية فمقياس التداخل حساس بالنسبة لطور الضغط $h(t)$ وليس لتدفق طاقة GW.



الشكل (٩) على اليمين الشكل العام لكاشف مقياس التداخل. عند غياب GW، يحتفظ مقياس التداخل بتكوين تداخل هدام (a). لكن GW تغير المسافة النسبية بين الذراعين وتسبب تغير خرج المقياس عن التداخل الهدام. تؤخذ هنا شدة الضوء ومعدل تغيرها الزمني كمعيار لآثار أمواج الجاذبية كما في الشكل (b). على اليسار منظر جوي لمراصد LIGO في أمريكا.

يحسب الضغط (الإجهاد) الذي تطبقه موجة الجاذبية على الأجسام الواقعة في طريقها كأذرع المرصد على سبيل المثال والمتناسب مع سعة هذه الموجة من العلاقة (١)، بقسمة Δl وهو تغيير الطول في أذرع الكاشف والتي بلغت تجريبياً في مرصد LIGO $\Delta l = 2.2 \times 10^{-18} m$ على الطول الأصلي. متضمناً تعزيز تقوية المجاوية (ارتداد الليزر ضمن أذرع المرصد يكفي المجاوية)، لذلك ضرب طول ذراع المقياس البالغ 4 km بعدد مرات ارتداد الحزم ٥٠ ضمنه (حيث تعتمد تقنية إعادة تدوير الحزمة باستخدام مرايا عند أطراف أذرع الكاشف لزيادة حساسية مقياس التداخل والسماح بتضييق عرض النطاق الترددي للكشف، والذي قد يكون مهماً في عمليات البحث عن مصادر موجات الجاذبية المستمرة) كما هو الحال في LIGO:

$$h = \frac{2.2 \times 10^{-18} m}{50 \times 4 km} = 1.1 \times 10^{-23}$$

كما تقاس النسبة التي تربط h مع تردد الموجة والمسماة كثافة السعة الطيفية (حساسية) الكاشف بالعلاقة [13]:

$$h(f)/\sqrt{f} \quad (10)$$

وتقاس بوحدة $[1/\sqrt{Hz}]$ لأن البسط لا وحدة له وأما المقام فهو جذر التردد فواحدته \sqrt{Hz} . من أجل مقياس زمني متناسب مع أمواج الجاذبية والذي سيكون من رتبة ms، وعرض نطاق ترددي حوالي 1000 Hz، تحسب الكثافة الطيفية لحساسية السعة في هذه الحالة بقسمة 10^{-22} على $\sqrt{1000}$. أي يجب أن تكون مستويات ضجيج الكاشف ذات كثافة سعة طيفية (حساسية) أقل من $\sim 10^{-23} Hz^{-1/2}$ على مجال تردد الإشارة [13]. وهذه قيم ملفتة بدقتها وصعوبة رصدها.

يكشف عن موجة الجاذبية التي تجتاز المرصد من التغييرات المختلفة في أطوال أذرع الكاشف (بشكل عام، يقصر طول أحد الأذرع بينما يصبح الذراع المتعامد أطول حسب جهة ورودها)، والذي يسبب تغير نمط التداخل، والذي يعتبر إشارة خرج. ركزت الدراسة في البداية فقط على تأثير GW على المرايا في نهاية أذرع الكاشف. لكن في الكاشف الفعلي، لن نرى تأثير GW على المرايا فحسب، بل مساهمات الضجيج بأنواعها المختلفة أيضاً، كحركة المرور البشرية (التي تم التغلب عليها بعزل المرايا عبر تعليقها من خلال نواس بأربع

منصات، تمتص أي حركة ويتم إلغاؤها بالكامل). لذا يجب التنويه إلى الضجيج $n(t)$ المصاحب لموجة الجاذبية المسببة للضغط (الإجهاد) $h(t)$ ، فيكون الناتج الإجمالي للكاشف:

$$s(t) = n(t) + h(t) \quad (11)$$

حيث $s(t)$ الإجهاد الكلي، $n(t)$ إجهاد الضجيج، $h(t)$ إجهاد الضغط. ولنستطيع أن نفصل أثر موجة الجاذبية عن الضجيج المرافق لها، يجب دراسة كل عوامل الضجيج التي يمكن أن تؤثر على نتائج الرصد. وخصوصاً ضجيج الغلق لأن التخلص منه اعتبر الحد الفاصل بين الجيل الأول والجيل الثاني من المراصد المطورة. حيث كان التخلص منه أصعب التحديات التي واجهت تطوير المراصد والسبب أن أحد أذرع المرصد الذي ينتهي بالكواشف فيه فتحة للسماح لموجة الجاذبية بالدخول للمرصد بشكل مباشر والتي لا بد من أنها مصحوبة بالحقل الكهربائي العشوائي التآرجح الموجود في الخلاء (ضجيج الغلق)، وطبعاً ستخرج معها أيضاً من منفذ الخرج فنعتبرها تشويش كمومي على خرج جهاز الكشف الضوئي.

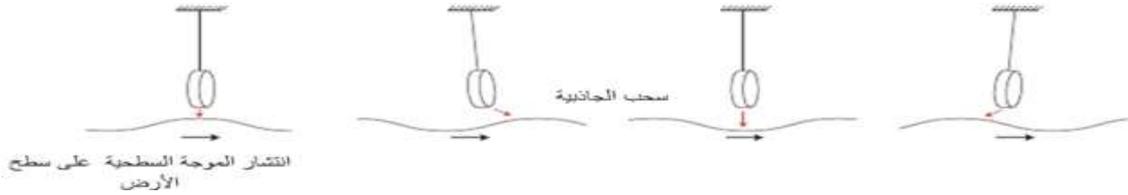
4-٢ الضجيج وأنواعه وآليات التخلص منه:

a) الضجيج الخارجي: يتنافس التغيير الصغير في المسار الضوئي الناتج عن موجة الجاذبية مع الكثير من الاضطرابات التي تسبب الضجيج، ما لم يتم اتخاذ تدابير حاسمة. نذكر منها:

١- إذا كان الشعاع الضوئي ينتشر في الفراغ الحر، فمن شأن ترجحات الإشارة الناجمة عن تذبذب الضغط (ضجيج الصوت والرياح ، ...) أن يولد ضجيجاً سلبياً. وبالتالي يتم إحاطة جميع المسارات الضوئية بنظام تفرغ فائق. ينتقل شعاع الليزر في واحدة من أكبر وأبقى المسارات على الأرض. إن وجود الغبار مثلاً في مسار الليزر، أو الأسوأ من ذلك، وجوده على المرآة يمكن أن يسبب تبعثر الضوء (أي، إعادة انعكاسه بعض الشيء في اتجاه عشوائي بعيد عن مساره). كما أن وجود الهواء ينتج تغيير بقرينة الانكسار والتي يمكن أن تؤثر على المسافة الظاهرية بين المرايا. يتم استخدام العديد من التقنيات لإزالة الهواء والجزيئات الأخرى من الأنابيب المفرغة؛ على سبيل المثال، يتم تسخين الأنابيب (بين ١٥٠° و ١٧٠°) لمدة ٣٠ يوماً لطرد جزيئات الغاز المتبقية وتمتص المضخات التوربينية الجزء الأكبر من الهواء الموجود في الأنابيب. وأخيراً، تحافظ المضخات التي تعمل باستمرار على إفراغ وسحب جزيئات الغاز الفردية المتبقية. يستغرق الأمر حوالي ٤٠ يوماً للإزالة $10^4 m^3$ من الهواء والغازات المتبقية من كل أنبوب من الأنابيب المفرغة، قبل بدء العمل الفيزيائي.

٢- الضجيج الاهتزازي: إذا كانت المرايا متصلة مباشرة بالأرض، فإن اهتزازها الناتج عن النشاط الطبيعي أو البشري يوهن الإشارة. فمقاييس التداخل بالليزر حساسة للغاية لجميع الاهتزازات القريبة (مثل حركة الشاحنات على الطرق القريبة) والبعيدة (الزلازل ، في مكان قريب أو بعيد). يجب أن تكون المرايا الأساسية المعلقة حرة قدر الإمكان، أي معزولة عن أي اهتزازات طبيعية أرضية أو من صنع الإنسان. لهذا السبب، تستخدم أنظمة التخميد النشط والسلبى. يتكون التخميد النشط من نظام مكون من أجهزة استشعار مصممة لالتقاط ترددات حركات الأرض المختلفة. تعمل هذه الحساسات كوحدة متكاملة وترسل الإشارات إلى الحاسوب الذي يولد بنفس الزمن حركة مضادة لإلغاء جميع الاهتزازات. أما نظام التخميد السلبى فإنه يبقي جميع المرايا ساكنة تماماً من خلال نواس بأربع منصات تسمى رباعية، تصنع النواصات في LIGO من ألياف السيليكا الزجاجية قطرها ٤,٥mm. وهكذا تمتص أي حركة ويتم إلغاؤها بالكامل كما ذكرنا [13].

٣- ضجيج تدرج الجاذبية (نيوتونية): ينشأ من اهتزاز الموجات على سطح الأرض القريب من المرايا، ترجحات بكثافة سطح الأرض بالقرب من موقع كتل اختبار مقياس التداخل، كما هو موضح في الشكل (١٠). وللتخلص من الضجيج الناتج عن تدرجات الجاذبية، اقترح العلماء تشغيل الكاشف بعيداً عن تقلبات الكثافة هذه، كأن تطبيق التجربة تحت الأرض ضمن تجايف عملاقة.



الشكل (١٠) تخطيط يوضح الترجحات اللحظية لقوة الجاذبية على كتلة معلقة بسبب انتشار موجة سطحية عبر الأرض.

(b) الضجيج الداخلي:

مصدر الضجيج الأكثر أهمية عند نهاية التردد المنخفض لمجال تشغيل كواشف أمواج الجاذبية الأرضية الأولية (الجيل الأول) هو الضجيج الحراري الذي ينتج من الأثر الحراري لشعاع الليزر، فيسبب الاهتزاز الذري في مادة مرايا الاختبار ومادة تعليقها وخصوصاً المنصة الأخيرة. باعتبار أن كل نمط رنين للمرايا بمثابة هزاز توافقي. تضاف الخسارة الميكانيكية المرتبطة بمادة النابض. بالنسبة للنواس المعلق به الكتل، لذلك تلعب المادة المستخدمة في صناعة أسلاك أو ألياف تعليق المرآة، دوراً مهماً في تقليل نسبة الضجيج [١٤]، لذا يجب أن يعمل الكاشف بتردد تشغيل أقل بكثير من تردد رنين الكتل. مما يسلط الضوء على أهمية التبيد الميكانيكي في مناطق تأثير شعاع الليزر. هذا ما يجمع بين الضجيج الحراري وطبقات الطلاء المتعددة المستخدمة لعزل المرآة، الذي لا غنى عنه لتوفير الانعكاسية العالية، مما دفع الباحثين لترقيق سماكة الطلاء إلى $4,0\mu\text{m}$ فقط. وبالطبع استخدام مواد الطلاء المعروفة بانخفاض الخسارة الميكانيكية، للحفاظ على الضجيج الحراري منخفض قدر الإمكان. مع مراعاة أن تكون كبيرة بما يكفي لتتلاءم مع بقعة شعاع الليزر دون خسائر زائدة في الانعراج، يمنع الحصول على هذه القيم قيوداً كبيرة على اختيار المواد لكتل الاختبار وأليافها المعلقة. لذا تم اللجوء لاستخدام ألياف السيليكا منخفضة الخسارة لتعليق مرايا الاختبار، وهي تقنية تؤهل حساسيات الكاشف بالاقتراب من المستوى المطلوب لأجهزة الجيل الثاني، كما وتستمر دراسة استخدام مواد أخرى مثل الياقوت [١٣].

(C) الضجيج الكومومي: تفرض الطبيعة الكمية للضوء قيوداً أساسياً على حساسية مقياس التداخل ذي المرايا

شبه الحرة، وتظهر هذه الطبيعة في الأليتين الأساسيتين:

١- ضجيج عد الفوتون (ضجيج الغلق): الناشئ عن الترجحات الإحصائية في زمن وصول الفوتونات إلى مخرج مقياس التداخل؛ حيث يتعرض كل فوتون في الحزمة الضوئية لترجحات كمية سببه ترجحات الحقول الكهربائية والمغناطيسية المسماة ترجحات النقطة الصفرية المصاحبة لموجة الجاذبية الموجودة حتى في الخلاء التام. أو الخلاء العادي الذي يملأ أذرع المرصد. وتكون ترجحات "النقطة الصفرية" عشوائية تماماً حيث تسبب ارتياباً يتوزع بالتساوي بين سعة الموجة وطورها كما بينا سابقاً، والتي تغير بدورها زمن وصول الفوتونات بعد رحلة الذهاب والإياب على طول الذراعين. أي تغير طورها (ازدياد الارتياب بالطور) فيتداخل تأثيرها مع تأثير الموجة الجاذبية، مشكلة ما يسمى ضجيج غلق التيارات في الكاشف.

٢-ضجيج ضغط الإشعاع: ينتج عن ارتداد الحزم بعد انقسامها على مقسم الحزمة عن المرايا في نهايات أذرع المرصد، مسبباً الترجحات الكمومية في تدفق الفوتونات. أي يحصل ترتيب إحصائي في كيفية تقسيم فوتونات ضوء الليزر عند مقسم الحزمة [١٥]. حيث ينتج توزيعاً ثنائي الحد (نوع من أنواع الإحصاءات) غير متساوي في عدد الفوتونات N ، في كل ذراع، ويعود السبب الأساسي أيضاً إلى ترجحات الخلاء في مركبة السعة للحقل الكهرومغناطيسي (سعة الحقل أي شدته متناسبة مع عدد الفوتونات). وعليه تزداد شدة ضوء الليزر في أحد الذراعين وتتناقص في الأخرى، مما يؤدي مرة أخرى إلى حدوث اختلافات غير متناسبة في شدة الضوء في كل ذراع. أي تتغير سعتها (ازدياد الارتياح بالسعة).

التغير في شدة الضوء بين الذراعين الناتج عن ضغط الإشعاع أو التغير في طول الذراعين الناتج عن ضجيج الغلق يسبب ظهور نمط تداخل في خرج المرصد. لكن يسعى العلماء لجعل نمط التداخل ناتج عن تأثير موجة الجاذبية فحسب وليس عن ضجيج الغلق وضجيج الإشعاع لذلك يجب حجب تأثير الضجيج الكمومي ليكون ظهور نمط التداخل سببه فقط تأثير موجة الجاذبية. وهذا سبب تسمية الضجيج الكمومي تشويش.

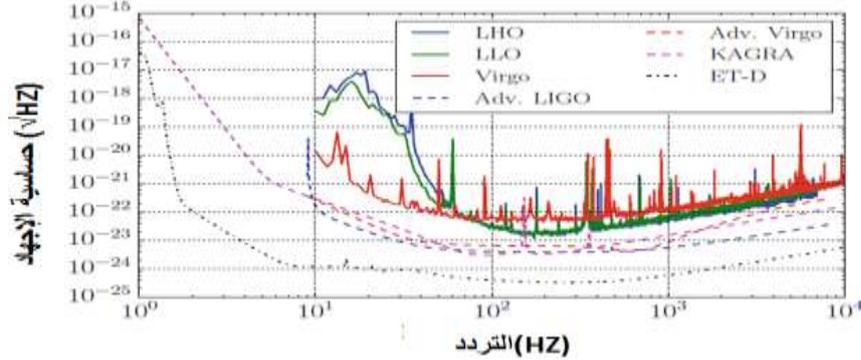
إذن، ينشأ ضجيج الغلق من الارتياح الحاصل في مركبة الطور لحقل الحزمة الليزرية المستخدمة في مقياس التداخل ويتم ملاحظته في الترجحات الكمية في عدد الفوتونات المكتشفة عند خرج مقياس التداخل (أي يظهر ضجيج الغلق المزيد من الارتياح في تطابق الطور بين فوتونات الخلاء التي تدخل المرصد). ويظهر تأثير هذا الارتياح عند الترددات العالية لموجات الجاذبية. أما ضجيج ضغط الإشعاع فينتج من الارتياح الحاصل في مركبة السعة لحقل الحزمة الليزرية المستخدمة في مقياس التداخل (أي يظهر ضجيج الإشعاع المزيد من الارتياح في تطابق تعداد الفوتونات التي تعبر الذراعين بعد انقسامها عند مقسم الحزمة). وهو الأكثر أهمية عند الترددات المنخفضة لموجات الجاذبية. وكلا الضجيجين يؤدي إلى ارتياح يكافئ تغيراً في مواضع مرايا المرصد. مما يؤدي لظهور أهداب التداخل.

حاول العلماء في بداية دخول مرصد أمواج الجاذبية مرحلة العمل لتقليل آثار ترجحات ضغط الإشعاع تجريبياً بعدة طرق، منها زيادة كتلة المرايا، أو تخفيض قوة الليزر على حساب الحساسية المتناقصة عند الترددات الأعلى، أو تعديل معلمات تجويف إعادة تدوير الإشارة. لكن الطرق السابقة لم تؤمن الدقة المطلوبة للتخلص من آثار الضجيج المذكور، حتى توصلت الدراسات الحديثة لاستهدافها مباشرة من خلال العمل على تخفيض ترجحات الخلاء نفسها عبر تطبيق السويات المضغوطة على حقل الخلاء المرافق لموجة الجاذبية الذي يدخل المرصد.

نخلص في ختام هذه الفقرة إلى أن الباحثين تمكنوا من التخلص من مصادر الضجيج الخارجية والداخلية تقنياً، وذلك من خلال اعتماد تصاميم مميزة لمكونات مقياس التداخل. لكن الضجيج الكمومي شكل العائق الرئيسي والصعب، بسبب عدم قدرة تقنيات التصميم التخلص من تأثيره الكبير على عمليات الرصد وأثر التشويش الذي يفرضه على إشارة الخرج. حتى توصل العلماء في عام ٢٠١٧ وبعد العديد من الدراسات العالمية المشتركة لفكرة استخدام السويات المضغوطة كحل أمثل للتخلص من الضجيج الكمومي والوصول للدقة المطلوبة كما أشرنا. وهذا ما جعل عمليات الرصد تتأخر بالتطبيق حتى عام ٢٠١٧.

تتمثل أهمية استخدام السويات المضغوطة في مقاييس التداخل بتحويل ترجحات الخلاء التي تدخل المرصد والمصاحبة لموجة الجاذبية إلى سويات الخلاء المضغوطة ذي الطور الصحيح مما يخفف من الارتياح في مركبة طور الخلاء. بالتالي جعل التغير في الطور بين الحزمتين المندمجتين الذي يسبب ظهور أهداب التداخل

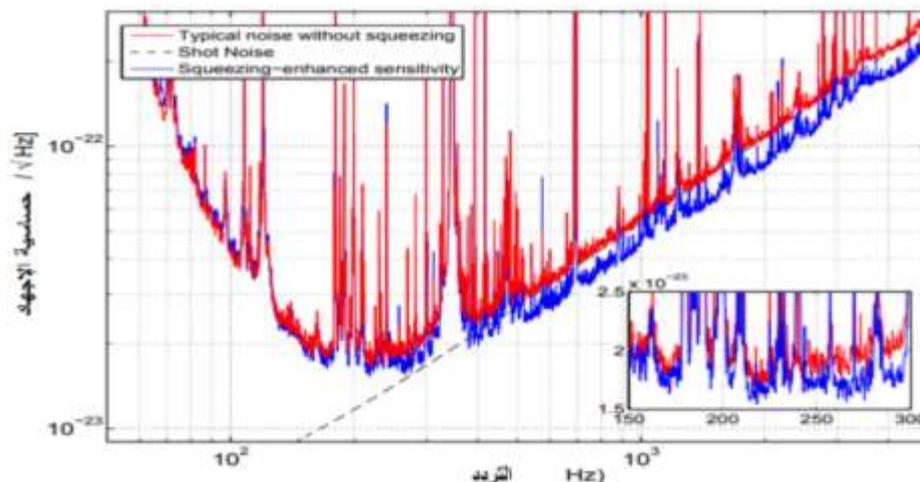
في خرج المرصد سببه فقط إجهاد موجة الجاذبية أي التخلص من الضجيج الكومومي. طبعاً ضغط الطور سيترافق مع زيادة الارتياب في السعة لكن ما يهمنا هو ضغط الطور. يزودنا الشكل (١١) بمزيد من التفصيل عن تخفيض الضجيج الكومومي التي أضافها استخدام السويات المضغوطة على الكواشف المحسنة. في زيادة دقة المرصد (حساسية الإجهاد) [16].



الشكل (١١) تحسن حساسية الإجهاد (دقة المرصد) بدلالة تردد موجة الجاذبية. نلاحظ الاتفاق بالنتائج بين مختلف الكواشف الدولية LIGO في Hanford (LHO)، في Livingston (LLO) و Virgo في Pisa (إيطاليا). المنحنيات المتقطعة تخص الجيل الثاني المتطور للكواشف المذكورة. أما المنحنى المسمى ET-D فهو يخص الجيل الثالث للكواشف - تلسكوب أينشتاين - المحسنة.

5- الاستنتاجات:

يبين مقارنة أداء المرصد مع وبدون استخدام السويات المضغوطة في الشكل (١٢) تحسن حساسية المرصد (دقته) بشكل ملحوظ بنسبة (٢٨٪). يمثل المنحنى العلوي حساسية الإجهاد بدون استخدام السويات المضغوطة أما المنحنى السفلي يبين أثر استخدام السويات المضغوطة في جعل حساسية الإجهاد تتخفف دون مستوى ضجيج الغلق أي التخلص من هذا الضجيج. يتطلب تحقيق نفس التحسين، زيادة الطاقة المخزنة في تجاويف الذراع بنسبة ٦٤٪ عن طريق زيادة عدد مرات ارتداد الحزم على مرايا ذراعي المرصد، لكن هذه الزيادة في الطاقة مصحوبة بقيود كبيرة كالعامل بطاقة عالية [١٧]. وهذا يشرح بشكل جيد أهمية الاعتماد على السويات المضغوطة في مقياس التداخل للوصول للتحسن المطلوب. وبالتالي فإن تخفيض إجمالي الخسائر يتحقق فقط عن طريق أكبر كبح لضجيج الغلق باستخدام السويات المضغوطة.

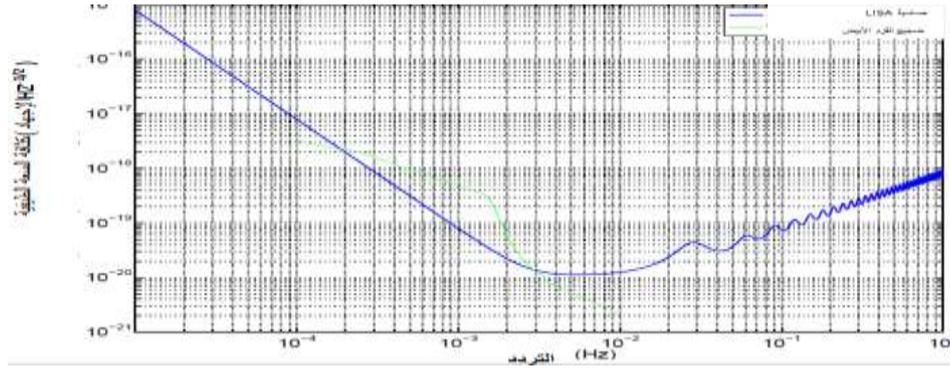


الشكل (١٢) قياس حساسية الإجهاد لمرصد LIGO مع وبدون استخدام السويات المضغوطة. (يمثل الخط المنقط ضجيج الغلق). يُظهر المستطيل في الزاوية السفلية اليمنى تكبير منطقة التردد بين ١٥٠ Hz و ٣٠٠ Hz، مما يدل أن استخدام هذه السويات زاد دقة المرصد ليستطيع كشف تردد أمواج الجاذبية حتى ١٥٠ Hz. والذي يعتبر من ترددات أمواج الجاذبية الدقيقة.

6- التوصيات:

يتخطى تردد بعض إشارات أمواج الجاذبية الأكثر إثارة للاهتمام، الناتجة عن اندماج الثقوب السوداء التي كتلتها الفائقة تتحصر في المجال $(1.06 - 1.03) M_{\odot}$: الكتلة الشمسية وحدة قياس تستعمل في الفيزياء الفلكية وعلم الفلك لقياس كتلة النجوم وغيرها من الأجسام الكونية تساوي بشكل تقريبي $(M_{\odot} \simeq 1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg})$. والخلفيات العشوائية الكونية، المجال الذي تستطيع المراصد الأرضية رصده. لذلك يوصى للبحث عن مثل هذا الإشارات: إطلاق مقياس تداخل ليزر إلى الفضاء، أي إطلاق عدد من المركبات الفضائية الحرة (بدون احتكاك) إلى الفضاء ودراسة أمواج الجاذبية العابرة للمسافات بين المرايا في هذه المركبات باستخدام نفس مبدأ التداخل الليزري المطبق كما ذكرنا في المراصد الأرضية.

ولذلك تم دراسة منظومات تداخل عديدة أشهرها (Laser Interferometer Space : LISA Antenna) وتعني مقياس تداخل ليزر فضائي [18]. والذي يحمل وعود بالتخلص من الضجيج الاهتزازي والضجيج الحراري وضجيج الغلق بالمستوى الأمثل. ويتوقع أن يكون منحنى الحساسية الطيفية لهذا المرصد بالشكل (١٣).



الشكل (١٣) منحنى كثافة السعة الطيفية (الحساسية) في تصميم LISA تم إنشاؤه باستخدام وسائط معيارية برمجياً. يفترض المنحنى أذرع متساوية الطول، حساسية متوسطة لكامل المجال الفضائي وجميع الاستقطابات، و $SNR = 1$. كما تم تضمينه منحنى ضجيج الخلفية المتوقعة من الأنظمة الثنائية القزمة البيضاء المجرية، والتي سوف تغطي على أشكال الضجيج في النطاق $0.1-1 \text{ mHz}$.

References

- [1] GERARD, A.; ERIC, P.(2017) *An Overview of Gravitational Waves Theory: Sources and Detection*, World Scientific, France.
- [2] SPURIO, M.(2017). *Basic on the observations of gravitational waves*. Department of Physics and Astronomy of the University. Italy, Vol. 66, N°. 711.
- [3] TAYLOR, J. H.; FOWLER, L. A.; MCULLOCH, P. M. *Measurements of General Relativistic Effects in the Binary Pulsar PSR 1913+16*. *Nature*, N°. 277,1979, 437-440.
- [4] DAMOUR, T.; ESPOSITO, F. G. *Tensor-Scalar Gravity and Binary-Pulsar Experiments*.(1996). *Physical Review D*, N°. 54, 1474-1491.
- [5] DAMOUR, T.; ESPOSITO, F. G.(1993) *Non perturbative Strong-Field Effects in Tensor-Scalar Theories of Gravitation*. *Physical Review Letters*, N°. 70, 2220-2223.
- [6] RICHLAND LIGO HANFORD. WA. U.S.A. (2019), ٩٩٣٥ .
https://www.ligo.caltech.edu/WA_LIGO_Hanford.
- [7] WEBER, J.(1990).*Detection and Generation of Gravitational Waves*. *Physical Review D*, N°. 117, 306-313.
- [8] BREITENBACH, G.; SCHILLER, S.; MLYNEK, J. .(1997). *Measurement of the quantum states of squeezed light*. *Nature*, N°. 387, 471.
- [9] KNIGHT, P. L.; LOUDON. R.(1987). *Squeezed Light*. *Journal of Modern Optics*, N°. 34, 709-759.
- [10] GUIDRY, A.; MELISSA.(2017).*Exploring the Multi-Mode Structure of Atom-Generated Squeezed light*. College of William and Mary, U.S.A. 2017.
- [11] CIUFOLINI, I.; MOSCHELLA, U.; GORINI, V.; FE, P.(2001). *Gravitational Waves*. Library of Congress. U.S.A.
- [12] NI, W. T.; HANNS, S.; LAEMMERZAHN, C.; MINGYONG, H.; CHENGMING, L.; HE, P. J. (2010) *ASTROD Optimized for Gravitational Wave Detection*. Scientific Assembly.

[13] LAFLEUR, Q.; VAN, D. B.(2020). *Fundamental physics with gravitational waves. LIGO/VIRGO versus Einstein Telescope*. Faculty B etawetenschappen, Netherlands.

[14] KRAUSS, L. M.; DODELSON, S.; MEYER, S.(2010). *Primordial Gravitational Waves and Cosmology*. Science, N°. 328, 989-992.

[15] AASI, J.; ABADIE, B. P., ABBOTT, R.; ABBOTT, T. D.; ABERNATHY, C, et al.(2013). *Enhancing the sensitivity of the LIGO gravitational wave detector by using squeezed states of light*. ArXiv.

[16] YUFENG, L. I.; FAN, X.; GOU, L.(2019). *Constraining the stochastic gravitational wave from string cosmology with current and future high frequency detectors*. astro-ph.

[17] HARRY, G. M. et al.(2010). *Advanced LIGO: the next generation of gravitational wave detectors*. Classical Quant.Grav.27 , 084006.

[18] SATHYAPRAKASH; SCHUTZ, B. F. (2009).*Physics, astrophysics and cosmology with gravitational waves*. Living Rev. Vol. 12, N°. 2.