

# نوبل الفيزياء ٢٠١٧ وأمواج الجاذبية

د. أحمد عبد الرزاق سلمان

قسم علوم الفلك والفضاء - كلية العلوم-جامعة بغداد

## ما هي أمواج الجاذبية؟

أمواج الجاذبية هي أمواج غير ميكانيكية (أي تختلف عن الأمواج الصوتية جذريا)، وتنتقل خلال الزمن والمكان بسرعة انتقال الضوء (٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية) وتنتج من الحركة العنيفة والمفاجئة للأجسام المادية العملاقة كالنجوم والثقوب السوداء. أول من أعتقد بوجود هذه الأمواج كان اينشتاين في العام ١٩١٦ كنتيجة من نتائج النظرية النسبية العامة، لكن النظرية تشير إلى إن تكون هذه الأمواج سيحتاج إلى تحريك مفاجئ لأجسام ذات كتلة هائلة جدا، وحتى عندما تتكون فهي ستكون بشدة واطئة جدا وهو عائق منع من اكتشاف هذه الأمواج طوال قرن كامل.

أمواج الجاذبية هي اضطراب في فضاء الزمكان وتنتج من تسارع الكتل المادية. توليد أمواج الجاذبية من الكتلة يناظر تولد الأمواج الكهرومغناطيسية من الشحنة فالشحنة الكهربائية (مثلا إلكترون) تمتلك مجال كهربائي خاص بها، وعندما تتعجل الشحنة الكهربائية فسينتج شئتين مهمين: الأول أن المجال الكهربائي المصاحب للشحنة سيتشوه، والثاني أن الشحنة سوف تولد مجال مغناطيسي بسبب تعجلها. والتشوه الحاصل في المجال الكهربائي عندما يتداخل مع المجال المغناطيسي سيتولد الإشعاع الكهرومغناطيسي، وهو الإشعاع الذي ينتج من اضطراب في المجال الكهربائي والمغناطيسي للشحنة وينتقل في الفضاء بسرعة الضوء (٣٠٠ ألف كم\ثا).

القضية مشابهة لتوليد أمواج الجاذبية، ففي العام ١٩١٦ وبعد أن نشر اينشتاين النظرية النسبية العامة، بين اينشتاين أن الجاذبية تنتج من تشوه الفضاء (الزمن والمكان) بفعل المجال المصاحب للكتلة. هذا التشوه في الفضاء يكون أكبر كلما كانت الكتلة أكبر، فالشمس مثلا تسبب تشوه الفضاء المحيط بها بصورة أكبر مما تفعله الأرض، لأن كتلة الشمس أكبر، لهذا جاذبية الشمس تكون أكبر. نظرية اينشتاين توقعت أشياء عديدة، من ضمنها أن تعجيل الكتلة سيسبب توليد أمواج في الفضاء (في الزمكان) وأن هذه الأمواج تنتقل بنفس سرعة الضوء في الفراغ، بالضبط في تناظر كامل مع تعجيل الشحنة الذي يولد أمواج كهرومغناطيسية. وهذه الأمواج غير ميكانيكية وهي أمواج الجاذبية (أو الجاذبية) أو أمواج اينشتاين Gravitational Waves - وهي تختلف عن Gravity Waves وهي الأمواج الميكانيكية التي تنتج في الموائع بسبب تغير الكثافة بين مادتين مائعتين فتتولد قوة معيدة تحاول الوصول إلى مرحلة التوازن مثل المد والجزر أو الأمواج السطحية في البحار أو الأمواج التي تتولد في السحب.

إن أغلب النجوم في الكون تكون على شكل نجوم ثنائية (Binary Stars)، وهي أنظمة تتكون من نجمين يدوران حول بعضهما باستمرار بفعل جاذبيتهما المشتركة. إذا كانت كتلتا النجمين كبيرة، فكل

منهما سيعاني من تعجيل كبير بسبب جاذبية النجم المرافق، وإذا حصلت خسارة كبيرة في الطاقة الميكانيكية للنجمين فسوف يقترب كل منهما من الآخر وستزداد سرعة دورانهما حول بعضهما البعض. اينشتاين توقع أن مثل هذا النظام سيولد أمواج الجاذبية. لهذا عندما نستطيع دراسة ظروف التعجيل الكتلي للنجوم الثنائية فنحن في الواقع نبحت عن دليل على أمواج الجاذبية.

في العام ١٩٦٧ استطاع العالمان البريطانيان (مارتن رايلي Martin Ryle و أنتوني هيويش Antony Hewish) من جامعة كامبردج في المملكة المتحدة من اكتشاف أول دليل على وجود النجوم النابضة (أو نجم نابض Pulsar)، وحصلا على نوبل في الفيزياء بسبب ذلك في العام ١٩٧٤. وبسبب اكتشاف (رايلي و هيويش)، تمكن العالمان الأمريكيان رسل هولس (Russell A. Hulse) و جوزيف تايلور (Joseph Taylor) في العام ١٩٨٩ من دراسة نجم ثنائي مكون من نجم نابض ونجم صغير.

الدراسة التي قام بها (هولس وتايلور) بينت أن النجم النابض يبعث إشعاعا بطاقة عالية وبترددات متغيرة بصورة توافقية، فسرت في حينها على أن سببها هو إزاحة دوبلر. الدراسة نفسها بينت أن إزاحة دوبلر للنجم النابض تتغير بصورة طفيفة بحيث أن معدل التذبذب يزداد مع الزمن. وتلك الملاحظة الدقيقة جدا فسرت على أساس أن هناك فقدان تدريجي للطاقة الميكانيكية للنجمين، مما يسبب ازدياد في معدل دورانهما حول بعضهما، فحسب البحوث التي نشرها العالمان فإن النجم النابض عندما كان يدور حول مرافقه (النجم الآخر الصغير) كان النجم النابض يقترب من الأرض وبتعدد بصورة تكرارية وهذا الأمر يسبب إزاحة دوبلر في تردد الإشعاع وبصورة ثابتة كما يفترض. لكن الإزاحة كانت تزداد بمقدار طفيف كانت تزداد بمقدار طفيف جدا والتفسير المناسب (حسب رأيهما) كان فقدان في الطاقة الميكانيكية للنجم النابض مما تسبب في اقترابه من مرافقه وبالتالي تولد أمواج جاذبية. وهذا التفسير جاء منطبق تماما مع تنبؤ اينشتاين في العام ١٩١٦ الذي طرح قبل نتائجهما بأكثر من ٧٠ سنة، وبسبب ذلك حصل هولس وتايلور على نوبل في الفيزياء للعام ١٩٩٣.

طريقة هولس وتايلور تعتبر طريقة غير مباشرة للكشف عن ودراسة أمواج الجاذبية. لكن بعد التقدم الذي وضعه أصبح من المؤكد أن دراسة تصادم الأجسام الكبيرة الكتلة هو الطريق الوحيد للكشف عن أمواج الجاذبية مباشرة. لكن ما هي الأجهزة التي يمكن أن تستخدم لدراسة تلك الأمواج مباشرة؟

### أجهزة الكشف عن أمواج الجاذبية

هناك ثلاثة أنواع أساسية من الأجهزة التي تستطيع (نظريا) من الكشف عن أمواج الجاذبية وهي:

١. كواشف رنين الكتلة.

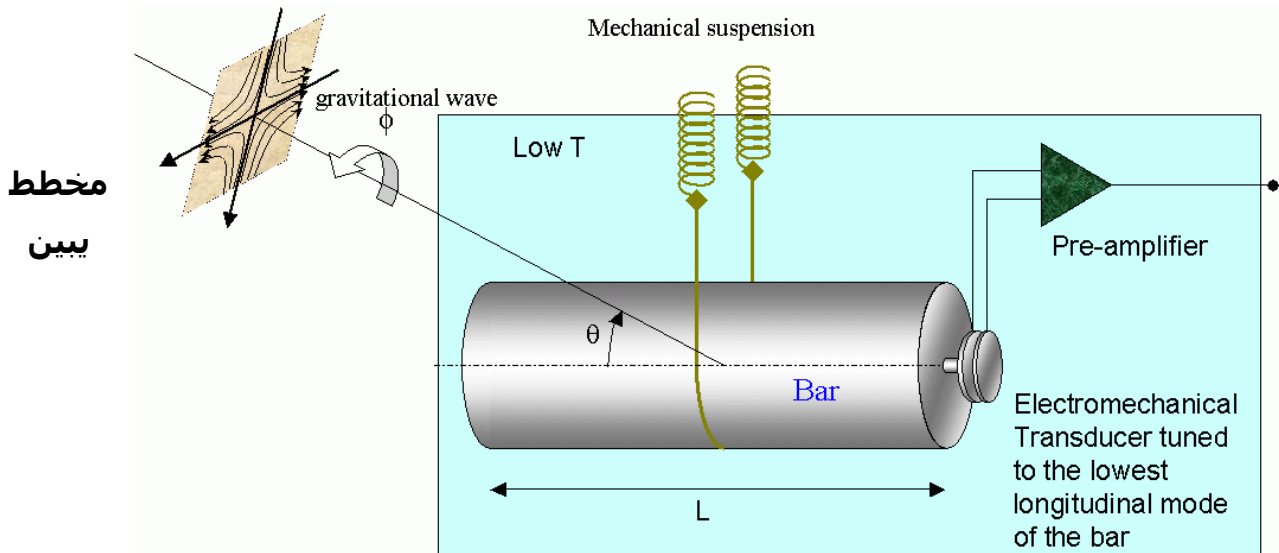
٢. أجهزة التداخل الأرضية.

٣. أجهزة التداخل الفضائية.

وفيما يلي مختصر عن النوعين الأولين.

## ١. كواشف رنين الكتلة Resonant Mass Detectors

كل جسم مادي له تردد خاص به يسمى (التردد الطبيعي) وإذا سلط على الجسم تردد خارجي مقارب أو مطابق لتردده الطبيعي فذلك الجسم سيعاني من الرنين الميكانيكي ويهتز بصورة واضحة. الآن، النظرية تتوقع أن النجم الثنائي الذي يحوي نجما نابضا سيشع أمواج جاذبية بتردد معين هو حوالي ١٦٠٠ هرتز. لهذا يمكن صنع جهاز مكون من كتلة معدنية اسطوانية كبيرة معلقة، طولها بضعة عشرات من الأمتار، وطول الاسطوانة يجري اختياره بحيث إذا اصطدمت بالاسطوانة أمواج جاذبية متولدة من نجم ثنائي فيه نجم نابض، فالاسطوانة سوف تعاني من رنين كتلي يمكن قياسه. ولأن التغير في تذبذب هذه الكتل سيكون ضئيل جدا فقد طورت بوضع مرآة عاكسة عليها وتسلط شعاع ليزر من مسافة كبيرة وقياس التذبذب الحاصل في ذلك الليزر. والصورة أدناه تمثل مخططا لطريقة عمل هذا النوع من الأجهزة.



## كواشف رنين الكتلة Resonant Mass Detectors

وهذا النوع لم يفلح في الكشف عن أمواج الجاذبية لليوم.

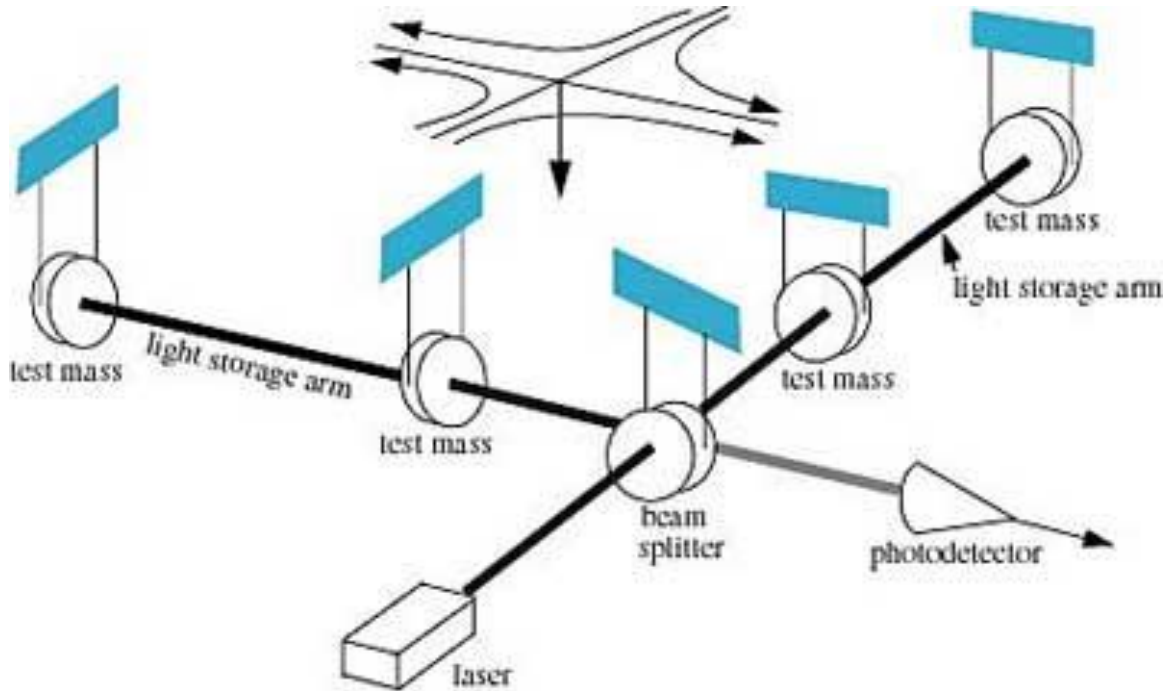
## ٢. أجهزة التداخل الأرضية Ground-based Interferometers

ولغرض زيادة حساسية الكشف عن أمواج الجاذبية والتي هي بالفعل أمواج ذات شدة ضئيلة، وبدل استعمال كتل كبيرة جدا، طورت أجهزة الكشف عن أمواج الجاذبية بوضع كتل أقل (سطوحها تحمل مرايا) وعلى مسافات طويلة جدا وهو مبدأ عمل أجهزة التداخل الأرضية. مبدأ عمل هذه الأجهزة يشبه مبدأ عمل أجهزة التداخل البصرية التي تعرف باسم (جهاز تداخل مايكلسون Michelson Interferometer) ويستعمل ضوء ليزر ذو طاقة وترددات معينة وكافية للانتقال خلال مسافات طويلة.

جهاز التداخل هو جهاز يمتلك أربعة أذرع متعامدة تماما، في إحدى النهايات الأربع هناك مصدر ضوئي أحادي الطول الموجي يوجه نحو مركز الجهاز حيث توجد مرآة وسطية نصف شفافة من جهة وعاكسة

تماما من الجهة الأخرى، أي مرآة تستطيع أن تقسم الضوء الساقط عليها من جهة المصدر إلى جزئين متعامدين لكنها تعكس الضوء الساقط عليها من الخلف بالكامل. كل واحد من الجزأين ينتقل خلال مسافة متساوية إلى مرآة عاكسة ثم يعود إلى المرآة الوسطية، ويعود إلى التداخل مع الجزء الآخر. مبدأ العمل معروف لدى أهل الفيزياء منذ نهاية القرن التاسع عشر ويستخدم هذا الجهاز لملاحظة أهداب التداخل التي إذا تحركت فهذا سيعني أن هناك تغير في طول مسار احد الشعاعين أي أن هناك حركة إضافية عانى منها أحد الشعاعين الضوئيين وليس الآخر.

في هذا النوع من كواشف أمواج الجاذبية يستعمل مصدر لضوء الليزر في جهاز تداخل ضوئي طول أذرع المتعامدة يصل إلى بضعة كيلومترات. هذا الضوء يفصل بمرايا شبه شفافة في مركز الجهاز ثم تعكس من على مرايا ثقيلة وبعيدة لتعود وتتداخل مع بعضها. التغير الحاصل في مواقع أهداب التداخل سيكشف عن وجود أمواج الجاذبية إن وجدت والمخطط أدناه يوضح مبدأ عمل هذا النوع من الكواشف.



### مخطط يبين أجهزة التداخل الأرضية Ground-based Interferometers

هذه الأجهزة تمتاز بحساسية عالية جدا والدقة تزداد مع ازدياد طول أذرع الجهاز.

أجهزة التداخل الفضائية (النوع الثالث) مشابه لهذا النوع لكنه يوضع في الفضاء الخارجي وهو ما لم يتم للآن. أما أجهزة التداخل الأرضية فهناك عدة كواشف تم بناءها بالفعل وهي:

#### أ. ليكو LIGO

والاسم هو مختصر للعنوان (مرصد أمواج الجاذبية بتداخل الليزر The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) وهذا الجهاز يشرف عليه معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا CalTech

و معهد ماستشوسس للتكنولوجيا MIT في الولايات المتحدة الأمريكية. طول كل ذراع من أذرع هذا الجهاز يمتد على مسافة ٤ كيلومتر وبهذا يكون ليكو هو رابع أطول بناية في العالم. يقع ليكو في (موقع هانفورد) في الولايات المتحدة وهو موقع غير مأهول ومعروف بإجراء بعض التجارب النووية خلال الحرب الباردة في القرن الماضي. أنجز بناء ليكو خلال الفترة ١٩٩٤-٢٠٠٢ وجرى تشغيله خلال الفترة من ٢٠٠٢ إلى ٢٠١٠ من دون أي نجاح في الكشف عن أمواج الجاذبية. لكن في فترة التشغيل الطويلة تلك ومع نهاية العام ٢٠٠٤ جرى تطوير الكواشف الخاصة بالجهاز تحت إشراف (باري باريش) وهي مهمة استغرقت عدة سنوات، إلى أن وصل الجهاز إلى دقة كشف كبيرة جدا إذ أن حساسية الجهاز القصوى أصبحت  $1:5 \times 10^{22}$  أي أنه أصبح قادرا على الكشف عن جزء واحد في كل خمسين ألف مليار مليار جزء!

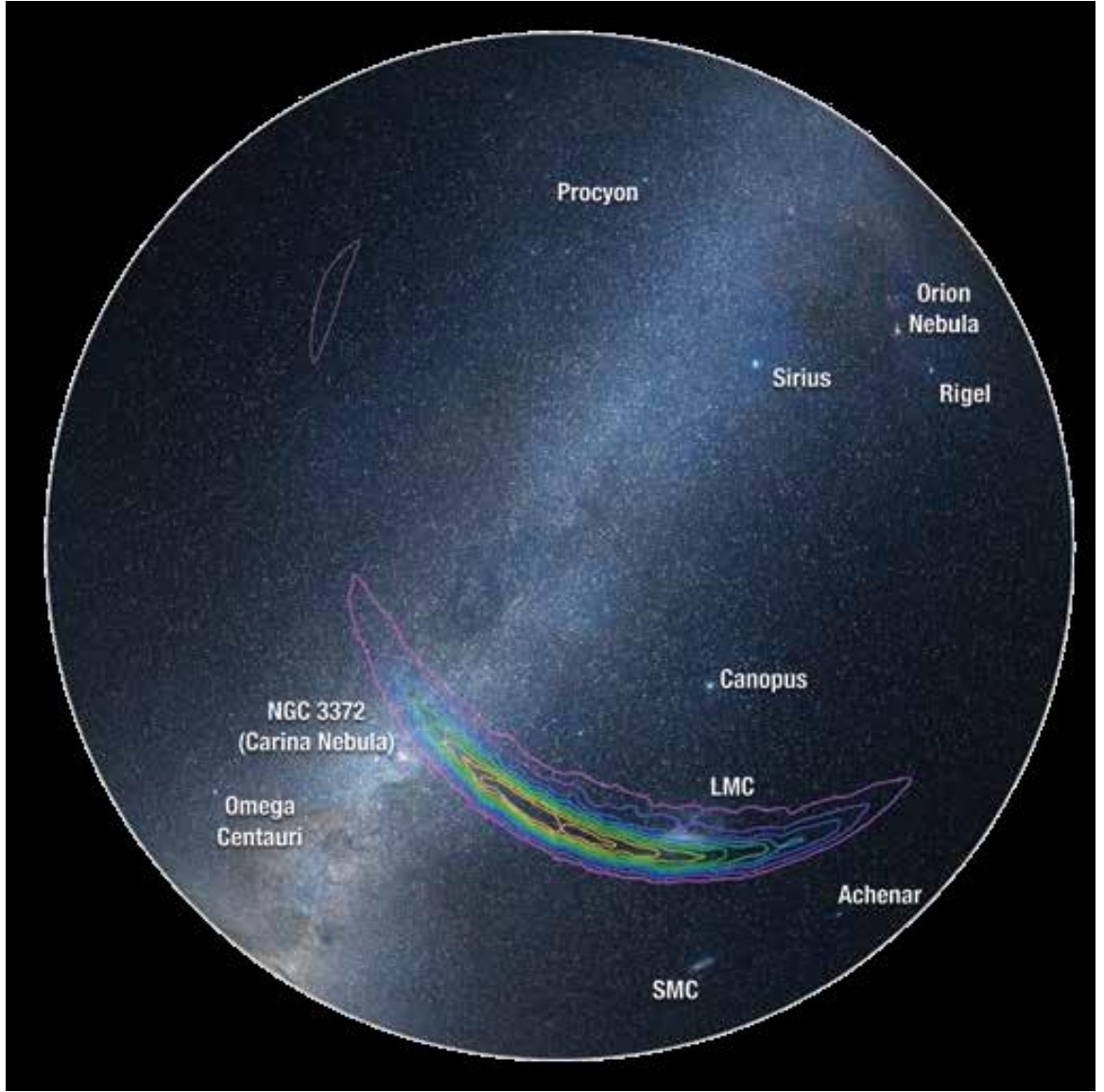
هذه الدقة هائلة جدا، فمن تفسير بسيط للرقم السابق سنرى أن ليكو يستطيع قياس المسافة بين الأرض والشمس (١٥٠ مليون كم) بدقة تصل إلى بيكو متر واحد وهي مسافة اقل من قطر ذرة الهيدروجين بحوالي عشرين مرة! أو يستطيع ليكو قياس المسافة بين الأرض نجم بروكسيميا سنتوري (٤ سنوات ضوئية أو تقريبا ٤٠ تريليون كيلومتر) بدقة تصل إلى سمك شعرة رأس الإنسان. وهذه الدقة غير مسبوقة.

## نجاح ليكو

في أيلول (سبتمبر) من العام ٢٠١٥ أي بعد ما يقرب من مئة سنة من توقع اينشتاين، تمكن العلماء راينر وايس و باري باريش و كيب ثرون وهم المشرفون على المرصد (ليكو) من رصد والكشف عن أمواج الجاذبية لأول مرة في تاريخ العلوم، وكانت تلك الأمواج ناجمة عن تصادم هائل بين ثقبين أسودين حصل قبل أكثر من مليار و٣٠٠ مليون سنة. الجائزة أخذت عن استحقاق كامل، مثلما سبقها السنوات، وهذه المرة كانت الجائزة مميزة لأن الاكتشاف العملي للأمواج الجاذبية لهو حقا من أعظم اكتشافات الفيزياء. فالنظرية النسبية العامة توقعت عدة أمور، كلها أمكن إثباتها عمليا إلا أمواج الجاذبية (التي سميت أيضا أمواج اينشتاين).

الإشارة التي اكتشفت سميت GW150914 ونتجت من تصادم ثقبين أسودين كتلهما هي ٣٦ و ٢٩ (من كتلة الشمس). أما الطاقة التي حملتها الموجة الأصلية فقدت بحوالي ٣ مرات مقدار طاقة الشمسي الكتلية أو  $3M_{\text{sun}}c^2$  وهو مقدار طاقة كبير جدا. والمسافة التي قدرت بين موقع التصادم والأرض فكانت حوالي ٤١٠ مليون فرسخ فلكي أو 1.3 مليار سنة ضوئية. تردد الإشارة التي كشفت كان بين ٣٠ إلى ٣٥٠ هيرتز والحساسية للإشارة المكتشفة كانت جزء لكل ألف مليار مليار جزء ( $1 \times 10^{-21}$ ).

وفي التالي صورة لموقع الإشارة التي حصل عليها ليكو في القبة السماوية.



### موقع الإشارة التي كشفت في أيلول ٢٠١٥ ووفرت دليلا على أمواج الجاذبية.

ومثلما تكون آخر زينة الملوك هي التيجان، هذا الاكتشاف هو التاج الذهبي للنسبية العامة، إذ مع إثبات وجودها أصبحنا متيقنين من تفاصيل مهمة لقوة الجاذبية، وهي من أهم القوى التي نحتاجها لفهم حركة الكون وستكون له آثار كبيرة في تطور الفيزياء والفلك. لكن ما هي الآثار الايجابية لهذا الاكتشاف؟ لنناقش إحدى هذه الآثار.

### المادة المعتمة، والطاقة المعتمة

حسب اعتقا العلماء، فإن المادة التي في الكون تتوزع على نسب مختلفة هي:

٧٠% طاقة ظلماء (أو طاقة معتمة).

٢٥% مادة ظلماء (أو معتمة).

٥% أو اقل مادة اعتيادية.

٥% من الكون التي تمثلها المادة الاعتيادية هي الأشياء الموجودة في الكون والتي يمكن أن ترى أو تقاس بصورة مادية، مثل النجوم والمجرات والكواكب (ومنها كوكب الأرض) والسدم الغبارية والغازية (السديم هو سحابة عملاقة الحجم وكثافته ليست عالية بالضرورة).

المادة المعتمدة هي المادة التي لا ترسل نوعا معروفا من الأشعة، مرئية أو غير مرئية، لكننا نتوقع وجودها بهذه النسبة الكبرى (٣٠% من مادة الكون) عن طريق دراسة حركة المجرات. لكن كيف توقعنا ذلك؟

في بداية العشرينيات من القرن الماضي، وفي حادثة مهمة في تاريخ تطور العلوم، قام العالم الهولندي (جاكوبس كابيتان Jacobus Kapteyn ، 1852-1922) بمحاولة تطبيق قوانين الحركة والجاذبية على إحدى المجرات، وتوصل إلى أن المادة التي في تلك المجرة لا تكفي لتفسير حركة المجرة وتركيبها. وقع ذلك العالم في حيرة بين سؤالين: هل النتائج والقراءات غير صحيحة؟ أم أن المعادلات التي استعملها غير صحيحة؟ وجواب كلا السؤالين كان دوما بالنفي، فالقيم التي رصدها كانت دقيقة بما يكفي لإظهار النتائج، والمعادلات التي استخدمها كانت دقيقة إلى حد كبير أيضا. ولكي يتخلص من حيرته حاول ذلك العالم أن يغير القيم والأعداد التي رصدها، لتصبح النتائج كما تتوقعها المعادلات، فقام بإضافة زيادة إلى كتلة تلك المجرة لتتفق مع المعادلات، ونشر بحثه. ولحسن الحظ، قام العالم البلغاري (فرتر زفيكي Fritz Zwicky 1898-1974 ، بإجراء نفس القياسات على نفس المجرة وتبين له أن القيم التي رصدها أقل من القيم التي نشرها كابيتان بكثير. فالنتيجة التي كانت تحير كابيتان أصبحت تحير المجتمع العلمي العالمي كله: ما السبب الذي يجعل المجرات تبقى متماسكة إن كانت المادة التي فيها لا تكفي، حسب المعادلات والأطر النظرية المعروفة، لتبقى المجرة كذلك؟ زفيكي فسر ذلك بأن هناك مادة في المجرات تسبب الجاذبية وتؤثر على حركة المجرة لكنها مادة لا يمكن أن ترى. وبهذا ظهر مصطلح (المادة الظلماء أو المعتمدة). وتكررت الملاحظة هذه مع مجرات أخرى فأصبح وجود المادة الظلماء شبه مؤكد في التسعينيات من القرن الماضي.

وهناك فكرة مشابهة وأكثر أهمية من حركة المجرات، فسبب علمنا بالمادة المعتمدة هو لتفسير حركة المجرة التي لا تفسر على أساس المادة الاعتيادية حسب المعادلات التي نعرفها. الآن: عندما طبقت نفس المعادلات على حركة الكون كله، اتضح أن المادة الموجودة، مع المادة المعتمدة، لا تكفي! والتقدير الملائم للمادة الذي يجعل من حركته مقبولة حسب القوانين هو أن هناك أكثر من ٧٠% من الكون، في حالة غير معروفة بالمرّة، في حالة غير مادية اعتيادية، ولا مادية معتمدة، فظهر بهذا مصطلح (الطاقة المعتمدة). ولا نكاد نعرف أي شيء عن هذه الطاقة، على الإطلاق.

حاليا هناك ثلاثة اتجاهات لتفسير وجود الطاقة المعتمدة: إما أن فهمنا للكون صحيح لهذا هناك فعلا طاقة لا نعرف عنها شيء للآن وتشكل أكثر من ٧٠% من الكون، أو أن المعادلات التي تصف حركة الكون غير صحيحة، أو أن فهمنا لحركة الكون غير دقيق.

في النتيجة نستطيع القول أننا لليوم لا نزال لا نعلم عن مادة الكون سوى ٥% أو أقل. ولتقريب الصورة عن هذا الجهل الفظيع والمحرج، فلنتخيل أننا لا نعلم عن وجود شيء اسمه الماء مع أننا نعيش على الأرض منذ ملايين السنين، ومع أن هذا الكوكب مغطى بالماء بنسبة ٧٠%!

لهذا نرى أن السبل المتاحة لتفسير حركة الكون هي أما أن فهمنا لطبيعة الكون صحيح ولهذا نتيجتين: لا بد من وجود مادة غير مرئية تشكل غالبية، أو أن هناك أجسام كثيرة مبعثرة في الكون تعوض كتلته؛ أو الاختيار الثالث أن فهمنا للكون غير صحيح وهو ما يثير الشك في وجود الطاقة الظلماء. والسبب وراء هذا التشكيك المنطقي هو أن اينشتاين نفسه توقع بوجود أمواج الجاذبية لكن هذا التوقع لم يثبت عمليا إلى أن نجح ليكو في الكشف عن ذلك، فكان ذلك الاكتشاف هو آخر إثبات يقيني لدقة النسبية العامة وهي النظرية التي تفسر تصرف الجاذبية في الكون. لهذا كان لاكتشاف أمواج الجاذبية دور في إثبات أن فهمنا للكون صحيح جدا إلى الآن، وهو ما يضيف دليلا آخر على وجود المادة الظلماء والطاقة الظلماء؛ وهذه هي إحدى النتائج الكبيرة وغير المباشرة لاكتشاف أمواج الجاذبية.