جـــــــــامعة قاصدي مربـــــــــــــــاح ورقـــلة

كلـــــية الرياضـــيات وعلــــــوم المادة

قسم الفـــيزيـــــــــــــاء

مذكرة تـخرج لنيل شهـادة ماستر أكـــاديمي

مجـــــال: علــــوم المـــادة

تخصص: فيزيـــاء نظرية

من إعداد الطـــالبتين: هبـــال عائشة-درويش منصـــورة

بعنــــــوان

أهم تطبيقات نظرية النسبيّة العامة في تفسير سلوك بعض الظواهر الفلكية

نوقشت يوم:2022/06/15

أمام لجنة المناقشة المكونة من:

بن الزاير هجيرة	أستاذ تعليم عالي	جامعة ورقلة	رئيسا
خوجة الأمين	أستاذ تعليم عالي	جامعة ورقلة	مناقشا
بلغيثار الحاج بالشراير	أستاذ محاضر (أ)	جامعة ورقلة	مشرفا
مالكي زهيدة	أستاذة مؤقت(ة)	جامعة ورقلة	مساعد_مشرف

الموسم الجامعي: 2022/2021

شكر وعرفان

الشكر لله تعالى عز وجل الذي بفضله تمكنّا من إنجاز هذه المذكرة

الشكر والعرفان إلى الأستاذ الفاضل المشرف الحاج بشراير بلغيثار لمساعدته وتوجيهاته طيلة فترة مشوارنا في عمل المذكرة.

الشكر الجزيل للأستاذة العزيزة المساعدة مالكي زهيدة التي كانت خير عون لنا بتقديم المعلومات البنّاءة وتوضيح سيرورة العمل مع تقديم النصائح والتوجيهات.

الشكروالعرفان للّجْنة المناقشة للأستاذ خوجة الأمين وكذلك الأستاذة بن الزاير هجيرة لموافقتهم على مناقشة موضوعنا.

كما نتوجه بخالص الشكر لكافة أساتذتنا بكلية الرياضيات وعلوم المادة، خاصة أساتذتنا في قسم الفيزياء نظرية جامعة على ما قدّموه لنا طيلة فترة تكوِيننا في مسِيرتنا الجامعية.

الشكر الخالص لكل من ساهم في إنجاز هذا العمل من قريب أو بعيد.

الطالبة هبال عائشة.

الطالبة درويش منصورة.

الإهداء

وفَى أمّا بعد: الحمد لله وكفى والصلاة والسلام على الحبيب المصطفى وأهله ومنْ

الحمد لله الذي وفّقنا لِتَثْمِين هذه الخُطوة في مَسيرتنا الدراسية بمذكرتنا هذه ثَمرة الجُهد والكفاح بفضله تعالى مُهْداة

إلى من وضع المولى عز وجل الجنة تحت قدميها ووقّرها في كتابه العزيز

الى رمز الحب وبلسم الشفاء الي القلب الناصع بالبياض

أمي الحبيبة نور عيني ونِبْرَاس دربي " مرضية" التي رسمت لي طريق الحياة بقلم الحنان

إلى سندي في الحياة أبي الغالي " محمد "

إلى كافة إخوتي خاصة "يوسف ونسمة ورشيدة وسمية" عُزْوَتِي وقوتي في هذه الحياة

إلىَ أحبة قلبي وفرحته " رقية، محمد، رزان، رؤيا، ميسان، قطرالندى"

إلى أصدقائي ومعارفي الذين أُجِلهم وأحترمهم

الى زميلتي ورفيقتي في المذكرة درويش منصورة

إلى أساتذتي في كلية الرياضيات وعلوم المادة

الإهداء

مِنْ بَعد فَضل اللهِ عَليَّ أُهدي عَملي هَذا، إِلى مَن أَنارت دَربي وجَعلَت كُل الصُّعُوبات يَسِيرة أَمَامي إِلى حَبيبة قلبي وَنُور عَيْني أُمِّي الغَالِية (عايدة) الَّتي رَبَّت وشَقت وكانت سعادتُها وُصولي إِلَى أَعْلى المَراتب، وإِلَى مَن أسعدتني وساعدتني في كُل خُطوات حَياتي حَبِيبَتِي وَرَفِيقَتِي خَالَتي(منوبية) و إِلى والديَّا الكَرِيمَين(ماليكة وأحمد) اللَّذان تَعِبَا مِنْ أَجْلي وبِهما فُتِحَت لِي أَبواب الخَير وبِفَضل دُعائهما سَهُلَتْ أُمُوري ، إِلَى زَوجَة خَالي (حليمة) التي سَهرت على تعليمي وتَدْرِيسِي وبِفَضْلِهَا رُفِع رَأسي ,إِلَى رَفيق دَرْبِي زَوجِي الغَالِي الَّذي كان دعما وسندًا لي في كل خطواتي وإلى أَعَزُّ ما لديَّ فِي الوُجود وَبهم تحلو حياتي وتزيد سعادتي أولادي قُرَّة عَيني إسماعيل و فاطمة ثواب ومُحَمَّد لُؤَي إلى إِخْوَتي فَخْرِي وعِزوتي (فايزة محمد الهاشمي وصفاء وخضيروفاطمة) وإلى أُمَّهاتُ أولادي(زهرة وفاطمة) وإلى أُمُّ زَوْجي جَدَّةُ أَولادي(فطيمة) التي كانت عونًا لي ومصدر إصراري وإلى كل عائلتي (درويش وأكشيش وبصالح وبن يزة) ,كما أُهدي هذه الثمرة خصيصًا إلى عمي (عبد القادر) الذي شجعني ودعمني وإلى صديقتي ومساعدتي في المذكرة (هبال عائشة) جزاها الله خيرا وإلى صديقاتي وجميع أحبتي وَكُلْ مَنْ ساندني وساهم في نجاحي .

أَتَمَنَّى التَّوْفيق لأَولادي وللجميع وَكُل مَنْ أراد بِي خيرًا بَعِيدًا أو قَرِيبًا ونسألُ الله الصَّلاح والثَّبات والنفع به.

وَفي الأَخير أَحمَدُ الله على مَا أعطاني ورزقني, لَهُ الحَمدُ وَلَهُ الشُّكر وَلَهُ الثَّناء الحَسن وَصَلَّى الله عَلى سَيِّد الخلق مُحمّد رَسول الله صَلَّى الله عليه وسلَّم .

العالم	الإسم باللغة الأجنبية
إدوارد مورلي	**Edward Morely(1830-1923).**
آرثر أدينغتون	**Arther Adington**
إقليدس	**Euclid**
إسحاق نيوتن	**Isaac Newton(1643-1727).**
آلبرت آينشتاين	**Albert Einstine(1879-1955)**
آلبرت مايكلسون	**Michaelson Albert (1852-1931)**
ألفريد بوشير	**Alfred boucher(1850-1934)**
برنارد ريمان	**Bernhard Riemann(1826-1866)**
جاليلو جاليلي	**Galelio Galilei(1564-1642)**
دوبلر	**Johann Doppler (1803-1853)**
دي سيتر	**De Sitter (1872-1934)**
ريتشي غويغوريو	**Gregorio Ricci (1853-1925)**
روبرت باوند	**Robert Pound**
كافمان	**Kafman**
كارل فريديريش	**Carl Friedrich(1855-1777)**
كارل شوارتزشيلد	**Carl Schwartzschild (1873- 1916)**
إلوين برونو كريستوفل	**(Elwin Bruno Christofel)**
كالوزا كلاين	**Kaluza Klayn**

Robertson Walker	ربرتسون واكر
Glin Rebka	غلن ريبكا
Handrik Lorentez(1853-1928)	هانريك لورانتز
Leibiz Gotfried(1646-1716)	ليبنتز غوتفريد
Cimon Pwasson (1781-1840)	سيمون بواسون
Hermann Minkoweski (1864-1909)	هيرمان منكوفسكي
Michel Fraday(1791-1867)	مايكل فراداي
Hertz Heinrich(1857-1894)	هرتز هينريش

الفهرس

II) البنية الرياضية للنظرية النسبية العامة

III) نتائج النسبية العامة وسلوكها في بعض الظواهرالفلكية

مقدمة عامة

مقدمة عامة:

النظرية النّسبيّة من أهم النظريات الفيزيائية الحديثة، نَقَدَتْ الفيزياء الكلاسيكية خاصة فرضية الأثير ومطْلَقِيَة المكان والزمان وغَيَّرَت مفهوم الكتلة والطاقة حيث أنّ فشل نظرية الأثير مَهَّدَ الطريق إلى ظهور النظرية النسبية الخاصة من قِبَلْ العالم ألبرت آينشتاين التي نَاقَضَتْ قانون السرعة النّسبية منْ خلال شرحها لحركة الأجسام في السُرعات العالية التي تقترب من سرعة الضوء. مُوضِحة بذلك عَدَمْ إمكانية أيّ جِسم الإنتقال بسرعة أكبر من سرعة الضوء. فَقَدَمَ آينشتاين مفهوما جديدا للجاذبية ضِمن النظرية النّسبية العامة، وقد غَيَّرتْ هذه الأخيرة المَفاهِيم السَابقة عن المكان والزمان تماما كما فعلت مِنْ قَبْلِهَا النّسبية الخاصة. فالمكان والزمان لا يتأثران فقط بحركة المُشاهد بل يُمكنهما الإنْحِراف والإلتواء تِبَعًا لِوجُود المادة والطاقة في طريقهما. وتؤدي هذه التشوهات في نسيج المكان والزمان إلى إنتقال قوى الجاذبية من مكان إلى آخر، فلا يمكن إعتبار المكان والزمان بَعْدَ ذلك مُجرد خَلْفِية خَاملة تُجْرَى عليها أحداثُ العَالم. فضلا عن أهمية النظرية النسبيّة التي يمكن لها أن تعطينا نظرة واسعة عن الكون وما يحدث فيه. ونظرا لإرتباطها الجذري بتخصّصنا (فيزياء نظرية)، قمنا بالغوص فيها أكثر من خلال إنجاز بحث بعنوان (أهم تطبيقات نظرية النسبية العامة في تفسير سلوك بعض الظواهر الكونية). والخطة المتّبعة في هذا البحث ملائمة لطبيعة موضوع بحثنا ويمكن حصرها في الخطوات التالية:

تقسيم البحث إلى ثلاثة فصول عنونا الفصل الأول بمفاهيم أساسية حول النظرية النسبية، حيث سنقف في أول محطة فيه على مكتشف النظرية النسبية ونظريته الخاصة وذلك بتوضيح أهمّ صعوبة أدت إلى ظهورها والمتمثلة في تجربة (Michaelson-Morley)، والمبادئ الأساسية التي بُنيت عليها. بالإضافة إلى الزمكان وهندسته فيها كما قمنا بدراسة تحويلات لورنتز وإظهار بعض نتائجها مثل قصر طول الجسم بإتجاه حركته، تمدد الزمن وتكافؤ الكتلة والطاقة. ثم تطرقنا إلى النظرية النسبية العامة بصورة واسعةَ وبَيَّنَا فيها هندسة الجاذبية النيوتينية إضافة إلى أهمّ المبادئ التي بُنيت عليها النظرية النسبية العامة المتمثلة في مبدأي (التكافؤ والتوافق).

أمّا الفصل الثاني المُعنون بالبنية الرياضية للنظرية النسبية العامة، الذي سنتطرق فيه إلى الجاذبية بين (نيوتن وآينشتاين) بالإضافة إلى إظهار الفضاء المتري والكمية الممتدة (Tenseur)، وتحويلاته بين المراجع القصورية ورمز كريستوفل (Simbole Christophle) وقياس درجة التحدب من خلال فكرة ريمان وتنسور ريتشي (Teenseur Ricci).أمّا الفصل الثالث سنختتم بأهّم نتائج النسبيّة العامة وتطبيقاتها.

الفصل الأول

مفاهيم حول النظرية النسبية

مقدمة:

تُعدّ النّظرية النِّسْبِية إِنْجَازًا لِثَوْرةٍ حقيقية في طريقة تصوُّرِنا لِلْكون، حيث أنَّ جزءًا من النّظرية النِّسْبِية الخاصة جاء إستجابة لتجربة " Michaelson-Morley "، إِنْهَارتْ فكرة المكان والزمان العام اللّا متغير. نظرًا لِرُؤية شيْءٍ قابل لِلْإنحناء والتغيُّر فيهما يَتَمدد ويتقلص تِبعا لِلْحَركات النِّسْبية للرَّاصِد والمَرْصُود، وهذا مُخالِفٌ لِلْبَدَاهَة في حياتنا اليومية، فالجانب الوحيد الذي لا يَتَغَيّر من الكون هو سرعة الضوء. هكذا ظهرت النّسْبِيَتينْ الخاصة والعامة، فما هي هاتين النَّظريتين؟

I-1. النظرية النّسبية الخاصة:

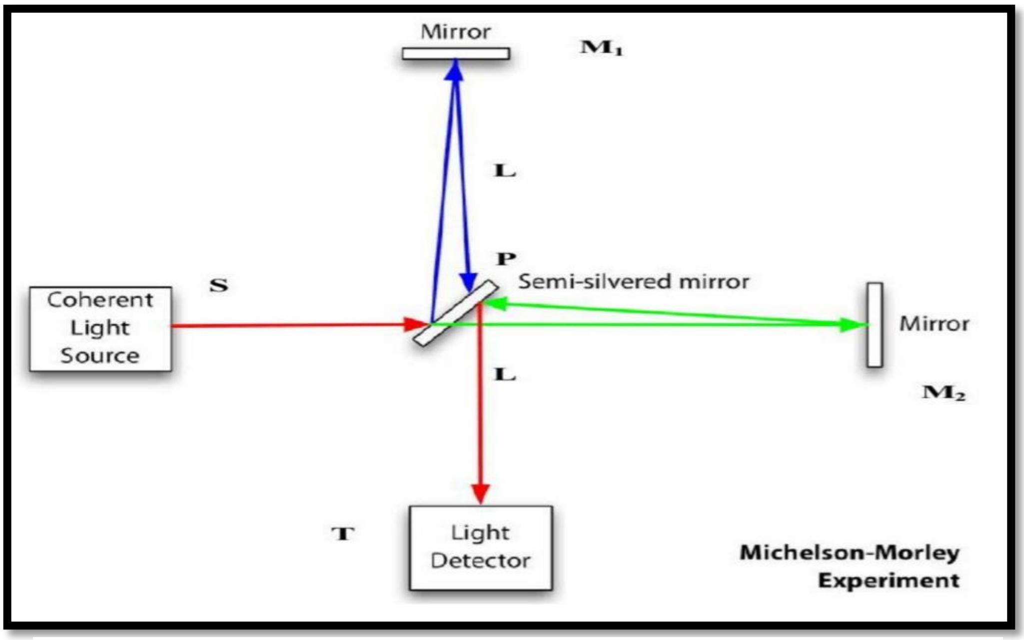
I-1-1. أهم الصعوبات التي أدّت إلى ظهور النسبية الخاصة:

- **تجربة مايكلسون- مورلي (michelson_morly particles)**:

تجربة مايْكِلْسُون_مُورلي (Michelson- Morley) أهمُ تجربة في تاريخ العلم ونقطة تحوله العظمى، فقد كانت من الصعوبات التي أدّت إلى ظهور النّظرية النّسبية لأينشتاين وتُعَدُ الحَجَر الأَسَاس لها. تَوافَقت مع قوانين ماكسويل " Maxwell ". أُجْرِيت هذه التجربة في عام 1881 م من طرف العالمان أَلْبرت مَايْكِلْسُون "Albert Michelson " وإِدْوَارد مُورْلي " Eduard Morley ". حيث صُمِّمَتْ لِقياس الضوء أو لِإثبات حَركة الأرض في الأثِير، أُسْتُخْدِمَ لهذه التجربة مقياس تداخل مايكلسون الموضح في (الشكل I-1.). حيث وُجِّه الذراع 2 على إمتداد إتجاه حركة الأرض في الفضاء، تتحرك الأرض عبر الأثير بسرعة v وهي نفس السرعة التي يتحرك بها الأثير بالنّسبة للأرض في إتجاه مُعاكس للسرعة v. تَهبُّ رياح الأثير في إتجاهٍ يُعاكسُ إتجاهَ حركة الأرض ممّا يَجعل قِياس سرعة الضوء في إطار الأرض هو (c-v) عندما يَقْتَرب الضوء من المرآة M_2 ويكون (c+v) بعد الإنعكاس عنها حيث c هي سرعة الضوء في محور إسناد الأثير. ينعكس شعاعي الضوء عن المرآتين M_1 و M_2 فيتّحِدان، وينْتُج عنْهُما أَهْدَاب تداخُل يتِم رصدُها أثناء دوران الأرض بزاوية 90°، يعمل هذا الدوران على تغيير سرعة الريّاح الأثيرية بين ذِرَاعَيْ مِقْيَاس التَّداخُل، وكان منَ المُتَوقَعْ أنْ يُسَبِبَ إِزَاحَة خفيفة لِأهْداب التَّداخُل بعد أنْ يَحْدُث تَغَيُّر في مِقدار وإتجاه

رياح الأثير مع دوران الأرض، لكنَ النَتائج كانت نَفْسُها فلم يَحْدُث أي تَغَيُّر، ولم يحدث أي إنزياح في أهداب التّداخل كمَا كانَ مُتوقَعًا. فشِلت القياسات في إظهار أيْ تغيّر في مجموعة التّداخل، وهذه النتائجُ

السِّلْبية لِلتجربة لم تناقض فرضية الأثير فقط، ولكنّها أظهرت أيضا أنّه من المُستحيل قِياسُ السُرْعَةِ المُطْلَقة لِلأرض بالنّسبة لِمحور إسْناد الأثير. في 1905 م عرض آينشتاين فَرْض لِنَظَرِيتِه النّسبية الخاصة التي وَضَعت تفسير مُخْتَلِف إلى حَدٍ بَعيد لهذه النتائج السِّلْبِيَة. في السّنوات اللاّحقة عِنْدما عُرف أَكْثَر عن طبيعة الضوء، نُبِذَتْ فِكرة الأثير الذي يتخلل كُلَ مكان فأصْبحَ مفهومُ الضوء عبارة عن موجة كهرومغناطيسية، لا تتطلب وجود وسط لإنتشارها. ونتيجة لذلك أصبحت فكرةَ الأثير الذي تنتقل فيه تلك الموجات فكره غير ضرورية. [3]



الشكل I–1: مقياس مايكلسون للتداخل الذي استخدم لرصد رياح الأثير[2]

وصفت النظرية النّسبية الخاصة طريقة لتفسير وقائع الكهرومغناطيسية، ففي القرن الثامن عشر وأوائل القرن التاسع عشر كانت نظرية الكهرباء تسُودها المماثلة النيوتينية سيادة تامّة فالشحنتان الكهربائيتان تجْذِبُ إحداهُما الأُخرى، إذَا كان كلّ مِنْهُما من نَوعٍ مُختلف و تتنافران إذا كانتا من نفسِ النَّوع، و في كلِّ حالة تختلف القوّة وِفقا لعكس مربع المسافة كما هي الحال في الجاذبية، وكان تصوُّر هذه القوة على أنّها فِعل عن بُعد حتى أثبَت فرداي " Faraday " بِعَدَدٍ منَ التَّجَارُب البَارِعة تأثير الوسط بينَهُما.

ثم أعطى كلارك ماكسويل" Clark Maxwel " شكلاً رياضيا للنتائج التي تُوحي إليها تجارب فرداي (Faraday)، وفَضْلاً عنْ ذلك أضاف أُسُسًا للتَّفكير بأنّ الضوء ظاهرةٌ كهرومغناطيسية تتألف منْ

موجات كهرومغناطيسية، مِنَ المُمْكِنِ إذًا أنْ يُؤْخَذ الوسط الّذي تنتقلُ فيه المُؤثرات الكهرومغناطيسية على أنّه الأثير الّذي أُفْتُرِضَ مُنْذُ عهْدٍ بعيد على أنّه المَجالَ الّذي ينتقل فيهِ الضوء. وثَبَتَتْ صِحَة نظرية ماكسويل عنْ الضوء بواسطة تجارب هرتس " Hertz ". ومن هنا واجهت الفيزياء مُشْكِلات جديدة على الرغمِ منْ أنَّ نظرية الكم قد وُجِدَت بصورتها الحالية ثلاثين عاما ووُجِدَت نظرية الّنسبية الخاصة خمسين عاما، فإنّ التَقَدُم الجَوْهَرِي في الربطِ بينهما لم يتم إلاّ في وقتٍ حديثٍ جدا، كما جعلت التطوُّرات الحديثة في نظرية الكم أكثرُ إتِّسَاقًا مع النّسبية فَسَاعَدتْ هذهِ التَحسِينات على فَهمِ الجُسَيْمات الذريّة الثانوية إلى حدٍ كبير غيْرَ أنّ كثيرا مِنَ الصُعوبَات ما زالت قائمة. [2]

I-1-2. المبادئ الأساسية التي بُنِيت عليها النظرية النسبية الخاصة:

بعد إستحالة قياس سرعة الأثير بالنسبة للأرض، وفشل معادلة جاليليو " Galilée " لتحويل السرعة في حالة الضوء. قَدَّمَ أينشتاين نظريتهُ كَحَلاً جريئا أزال هذه الصّعوبات وفي نفس الوقت غير مفاهِيمِنا للمكان وبُنيت النّظرية النّسبية الخاصة على الفرضيتين التاليتين:

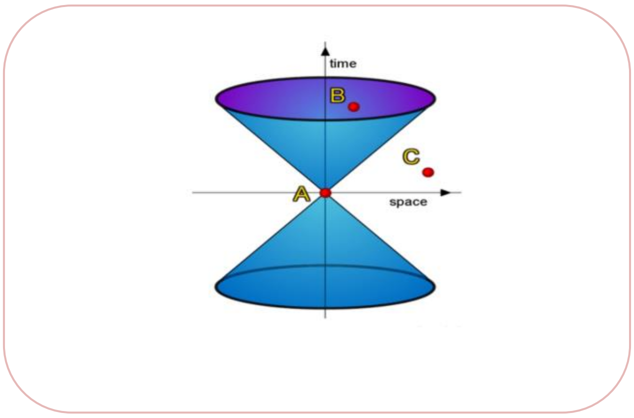
- **ثبات سرعة الضوء:** سرعة الضوء في الفراغ لها نفس القيمة $C = 3 \times 10^8$ m/s في كل محاور الإسناد القصورية، بغض النّظر عن سرعة المراقب أو سرعة المصدر الباعث للضوء.
- **مبدأ النسبية:** قوانين الفيزياء يجب أن تكون نفسها في كل محاور الإسناد المرجعية أي أنّ القوانين الطبيعية واحدة في جميع المجموعات الإحداثية المتحركة بسرعة منتظمة بالنّسبة لبعضها البعض. حيث أنّ آينشتاين لم يستطع تطبيق هذه النظرية على حركة الكواكب والنجوم لأنّها تتحرك بتسارع في مسارات دائرية أو بيضاوية. [1]

I-1-3. الزمكان في النّسبية الخاصة:

بفرض أنّ الضوء الصادر عن حدث معين في نقطة ما من الفضاء ينتشر بسرعته الثابتة c فهذا يعني أنّه يغطي كرات تحيط بهذا الحدث وهذه الكرات تتوسع بزيادة قطرها مع الزمن حسب سرعة الضوء المنتشر. بصعوبة تمثيل فضاء رباعي الأبعاد سوف نضطر لحذف أحد الأبعاد المكانية مُكتفين ببعدين

مكانيين وبُعد زمني شاقولي، فتأخذ كرات الضوء المتوسعة شكل دوائر تتوسع مع تزايد الزمن أي مع الإرتفاع على المحور الشاقولي وبهذا يمثل انتشار الضوء المخروط المتشكل من الدوائر المتوسعة.

في الحقيقة يمكن تخيل مَخرُوطَي ضوء لكل حدث مخروط متجه نحو الأعلى يدعى مخروط الضوء المستقبلي ويمثل مجموعة النقاط التي يمكن وصول الضوء من الحدث المعني إليها(هذه النقاط في الفضاء الرباعي الأبعاد تمثلها أربعة أرقام هي الإحداثيات المكانية الثلاثية فهي تحدد النقطة الفراغية مع زمن وصول الضوء عليها) أما خارج المخروط فهي النقاط التي لا يمكن وصول الضوء إليها(هذه النقاط تمثل نقاط فراغية من زمن يستحيل وصول الضوء خلاله لأنه يستلزم انتشاره بسرعة تفوق (c)) وهو أمر مستحيل حسب النسبية).



شكل I-2 : يوضح مخروط ضوئي [23]

المخروط المتجه نحو الأسفل يدعى مخروط الضوء الماضي (Paste light cone) ويمثل مجموعة الحوادث التي يمكن أن يصل منها شعاع ضوئي إلى الحدث في الشكل الأيسر نفترض وجود حدثين (A) و(B) في نفس الجملة المرجعية. وفي نفس المكان ضمن هذه الجملة لكن بفاصل زمني (يشتركان بالموقع المكاني ويختلفان بالاحداثي الزمني) كما نفترض وجود حدثين (B) و(C) ضمن جملة مرجعية واحدة بحيث يحدثان آنيا أي في وقت واحد لكنّهما يقعان في موقعين مختلفين (يشتركان بالإحداثي الزمني ويختلفان بالإحداثي المكاني) في الجملة المرجعية الأولى يمكن ل(A) أن يسبق (B) في كل الجمل المرجعية ومن الممكن للمادة أن تنتقل من (A) إلى (B) بحيث نعتبر (A) السبب و(B) النتيجة، فتكون هناك علاقة سببية بين (A) و(B) في الواقع لا وجود لأي جملة مرجعية تقلب هذا الترتيب السببي . لكن هذه الحالة لا تنطبق على الحدثين (A) و(C) حيث (C) يقع خارج المخروط الضوئي ل (A) كما هو مُوضح في الشكل 2) حيث توجد جمل مرجعية تَرى حدوث (A) قبل (C) وجُمل مرجعية تَرى حُدوث

(C) قبل (A). لكن هذا لا يكسر قانون السّببية لأنّه يستحيل نقل المعلومات بين (A) و(C) أو بين (C) و(A) لأنّ هذا يستدعي سرعة أكبر من سرعة الضوء أي يمكن لبعض الجمل المرجعية أن ترى الأحداث

بترتيب مختلف لكن لا يمكن لهذه الجمل أن تتواصل فيما بينها لأنّها تحتاج إشارات أسرع من الضوء، وهكذا يحفظ مبدأ سرعة ثبات الضوء في النسبية قانون السببية ويحمينا من مفارقات العودة في الزمن.[25]

I-1-4. هندسة الزَّمكان في النِّسبية الخاصة:

الفضاء الزَّمكاني في النظرية النّسبية الخاصة هو فضاء منكوفسكي رباعي الأبعاد وهو فضاء يشابه الفضاء الإقليدي الثلاثي الأبعاد المُعْتَمَد في الميكانيك النيوتني من حيث سُكُونِيَتِهِ فالخاصيّة الحركية سَتُدخلها فيما بعد نظرية النّسبية العامة لتحول الزمكان من فضاء رباعي الأبعاد سكوني إلى فضاء رباعي الأبعاد حركي. بالرغم من البعد الرابع فإنّ مشابهته للفضاء الإقليدي من الناحية السكونية تجعله سهل التعامل فمعظم قواعد الفضاء الإقليدي تُطبق هنا ذاتها بَعد إضافة الحد الموافق للإحداثي الرابع (الزمن). يعطى تفاضل للمسافة(ds) في فضاء ثلاثي الأبعاد بالعلاقة التالية:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 \qquad (I-1)$$

حيث (dx_1^2 ، dx_2^2 ، dx_3^2) هي الأبعاد الفراغية الثلاثة. أمّا في الفضاء الزمكاني للنّسبية الخاصة فَنُظيف إحداثي رابع زماني فتكون المعادلة التفاضلية للأبعاد الأربعة :

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + C^2dt^2 \qquad (I-2)$$

في العديد من الحالات يكون من الأنسب معاملة الإحداثي الزمني كعدد تخيلي وفي هذه الحالة يُسْتَبْدَل (t) في المعادلة السابقة ب (i.t')

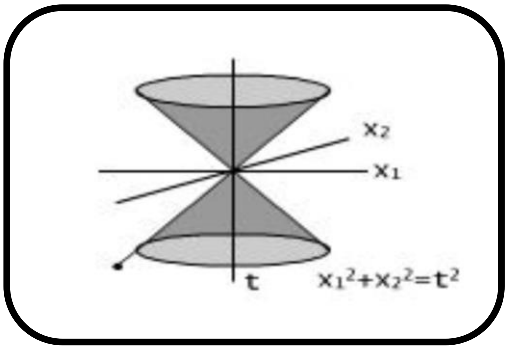
$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + C^2(dt')^2 \qquad (I-3)$$

في حالات أخرى نقوم باختزال الحالات المكانية إلى إثنين ونتعامل عندئذ مع فضاء ثلاثي الأبعاد ببعدين مكانيين وآخر زماني:

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 - C^2(dt)^2 \qquad (I-4)$$

يمكننا أنْ نلاحظ الخط الجيوديسي الصفري على المخروط

الثنائي لأيّ حدث في الصورة المقابلة.



الشكل I–3: خط جيوديسي صفري على مخروط

ويمكن تعريفه بالمعادلة التالية:

$$ds^2 = 0 = dx_1^2 + dx_2^2 - C^2(dt)^2 \qquad (I-5)$$

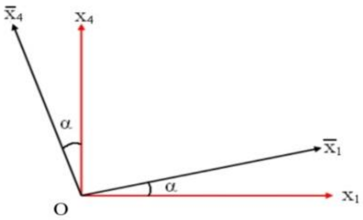
أو

$$dx_1^2 + dx_2^2 = C^2(dt)^2 \qquad (I-6)$$

وهي معادلة دائرة ذات قطر $r = cdt$. [25]

I-1-5. تحويلات لورنتز:

تحويلات لورنتز هي عبارة عن روابط تربط بين إحداثيات مرجعين، الهدف منها الحصول على علاقات تحويل بين المراجع العطالية عند حركة إحداهما بالنسبة للأخرى وهذا يعني تَقْيِيم مُراقب في إحدى الإحداثيات لما يحدث في إطار الإسناد الآخر(المعلم الآخر). من أجل إستنتاج تلك الروابط نقوم بدوران محور $\bar{x}_1$ بقيمة α بالنسبة إلى المحور x_1 وبموازاة الصفحة x_4 x_1 وفي هذا الدوران، المحوران x_2 وx_3 ثابتان كذلك مركز الاحداثي ثابت.



$$\begin{cases} \bar{x}_1 = x_1 \cos\alpha + x_4 \sin\alpha \\ \bar{x}_4 = x_1 \sin\alpha + x_4 \cos\alpha \\ \bar{x}_2 = x_2 \\ \bar{x}_3 = x_3 \end{cases}$$

بإستخدام طريقة منكوفسكي نستبدل t زمان كل حادثة في المرجع s بإحداثية خيالية x_4 = ict

حيث: $i = \sqrt{-1}$ ومنه تكون إحداثيات الفضاء (x , y, z) كالتالي:

$$\text{ict} = x_4 \quad \text{و} \quad z = x_3 \quad \text{و} \quad y = x_2 \quad \text{و} \quad x = x$$

أي هناك أربع إحداثيات لكل حدث، ومنه يمكن كتابة معادلات الدوران بهذا الشكل:

$$\begin{cases} \bar{x} = x\cos\alpha + ict\sin\alpha \\ \text{ict} = -x\sin\alpha + ict\cos\alpha \\ \bar{y} = y \\ \bar{z} = z \end{cases}$$

تعبر هذه المعادلة عن صفحة ساكنة في المرجع $\bar{s}$ ولجميع مقادير $\bar{t}$ معادلة هذه الصفحة هي:

$$\overline{ax} + \bar{b}\,\bar{y} + \bar{c}\,\bar{z} + \bar{d} = 0 \qquad (I-7)$$

معادلة هذه الصفحة في المرجع s في أي لحظة t بهذا الشكل:

$$(\bar{a}\cos\alpha)\,x + \bar{b}\,y + \bar{c}\,z + \bar{d} + ict\,\bar{a}\sin\alpha \qquad (I-8)$$

إذا كان: $\bar{a} = b = \bar{d} = 0$ فهذا سطح صفحة الإحداثي $\bar{o}\ \ \bar{x}\ \ \bar{y}$

معادلتها في المرجع s هي z = 0 هذا هو سطح الصفحة o x y إذا كان $\bar{a} = b = \bar{d} = 0$

في سطح الصفحة $\overline{xy}\ \ \bar{o}$ و معادلتها في المرجع s هي:

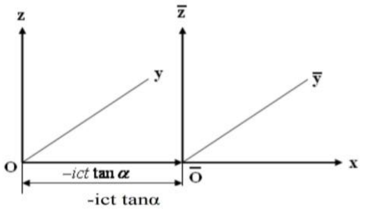
$$x = -ict\tan\alpha \qquad (I-9)$$

وهي موازية للصفحة o y x بمقدار ict tanα - تم إنتقالها في إمتداد المحور ox

نستنتج من هذا أنّ معادلات لورانتز هي حالة خاصة

من إحداثيات المرجع، ناتجة من إنتقال المرجع s

على المحور xo و بفاصلة ict tanα - في كل لحظة t.



إذا كانت سرعة إنتقال المرجع تساوي uu إذن: u = - ict tanα

من هذه المعادلة نستنتج أن الزاوية α زاوية فرضية وترتبط بسرعة إنتقال الإحداثي أي:

بإستخدام التحويلات المثلثية التالية $\left(\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+\tan^2\alpha}}\right)$ نصل إلى:

$$\tan\alpha = \frac{iu}{c}$$

$$\cos\alpha = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

$$\sin\alpha = \frac{\frac{iu}{c}}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

نضع هذه الروابط في المعادلات:

$$\begin{cases} \bar{x} = x\cos\alpha + ict\sin\alpha \\ ic\bar{t} = -x\sin\alpha + ict\cos\alpha \\ \bar{y} = y \\ \bar{z} = z \end{cases} \qquad (I-10)$$

النتيجة النهائية لتحويلات لورنتز هي:

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{x-ut}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \\ \bar{y} = y \\ \bar{z} = z \\ \bar{t} = \frac{t-\frac{ux}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \end{cases} \qquad (I-11)$$

إذا كانت قيمة u بالنسبة إلى c صغيرة جدا تصبح هذه المعادلات تقريبا:

$$\begin{cases} \bar{x} = x - ut \\ \bar{y} = y \\ \bar{z} = z \\ \bar{t} = t \end{cases} \qquad (I-12)$$

هذه المجموعة من المعادلات تُعْرَف بتحويلات جاليليو ويستعان بها في الفيزياء الكلاسيكية بربط حوادث ووقائع حادثين لمرجعين مختلفين، فالفيزياء الكلاسيكية لن تطرح الرابطة $\bar{t} = t$ وذلك لأنّها بديهية لأنّ الزمان في الفضاء الكلاسيكي مطلق. [19]

I-1-6. بعض نتائج النظرية النّسبية الخاصة:

❖ **زيادة كتلة الجسم مع زيادة كتلة سرعته:**

إذا افترضنا أنّ كتلة جسم في حالة السكون هي m_0 إذا تحرك جسم بسرعة مقدارها u فإنّ كتلته الجديدة m تعرف بالعلاقة:

$$m = \frac{m_\circ}{\sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)2}} \qquad (I-13)$$

حيث c هي سرعة الضوء في الفراغ.

يتّضح هنا أنّ كتلة الجسم تزداد مع زيادة السرعة وعندما تصل سرعة الجسم إلى سرعة الضوء، فإنّ كتلة الجسم تصبح ما لانهائية، ولذلك تتطلب قوة لانهائية لإكْسَابِهِ سرعة تتساوى مع سرعة الضوء، من هذا نستنتج أنّه لا يوجد جسم يتسارع حتى تصل سرعته إلى سرعة الضوء، وتكون هذه الأخيرة هي النهاية العظمى للسرعة.

❖ **قِصَر طول الجسم في اتجاه حركته:**

يعرف طول جسم متحرك بأنّه المسافة بين موضعي بِدايتِه ونهايته إذا إفترضنا أنّ الطول الحقيقي لجسم في حركة السكون هو " L_0 " إذا تحرك الجسم بسرعة مقدارها " u " في إتجاه المحور السيني فرضا، فإنّ طوله الجديد " L " في اتجاه حركته بالمحور السيني يعرف

بالعلاقة:

$$L = \frac{L_\circ}{\sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)2}} \qquad (I-14)$$

نلاحظ هنا أن طول الجسم المتحرك والمقاس بواسطة ملاحظ خارجي، يتقلص مع زيادة السرعة في إتجاه حركته فقط وليس في أيّ إتجاه آخر، وعندما تصل سرعته إلى سرعة الضوء فإنّ طوله ينعدم. [4] بفرض أنّه إذا تحركت عصا طولها متر مثلا في إتجاه طولها، فإنّ العصا تتكمش ظاهريا فيصير طولها أقل من متر، يجب أن نلاحظ أنّ السرعات اللاّزمة لإحداث إنكماش محسوس في طول العصا، يجب أن تكون سرعات محسوسة إذا قيست بسرعة الضوء، حيث أنّ هذه الأخيرة تساوي 3×10^8 km/s. فإنّ سرعاتنا الأرضية بل والسرعات الفلكية في المجموعة الشمسية تتضاءل إلى جانب هذه السرعة الهائلة،

فأكبر سرعة لجسم أرضي متحرك لاتصل إلى 1000 km/h، وسرعة الأرض في حركتها حول الشمس هو نحو 30 km/s ، أي جزء من 10000 جزء من سرعة الضوء. إذا طبقنا قانون الإنكماش المذكور أعلاه، فإنّ الإنكماش في قطر الأرض الناشئ عن حركتها حول الشمس لا يصل إلى 7 سنتيمترات، ومع أنّه ضئيل في الأحوال العادية التي نعرفها إلا أنَّ القول بحدوث الإنكماش يستدعي النّظر، معناه أنّ أطوال الأجسام تختلف مقاديرها بإختلاف السرعة النسبية بينها وبين من ينظر إليها، بعبارة أخرى فإنّ طول العصا ليس حقيقة مجردة، بل هي مسألة نسبية، فطول العصا في نظرنا وطول نفس العصا في نظر رَائي غَيْرنا، كميتان مختلفتان يتوقف الفرق بينها على السرعة النسبية بينا وبين الرائي الآخر. [5]

❖ **تمدد الزمن:**

إتضح أنّ فرق الزمن "Δt" في إطار يتحرك بسرعة مقدارها " u " بالنسبة إلى فرق الزمن " $\Delta t_{\circ}$ " بإطار ثابت تتعين بالمعادلة التالية:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\circ}}{\sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)2}} \qquad (I-15)$$

لهذا نجدُ أنَّ فرق الزمن المُقاس في إطار متحرك يظهر بِه بعضُ التأخير عن فرق الزمن المقاس بإطار ثابت يسمى هذا بتمدد الزمن، ونتيجة لظاهرة تمدد الزمن ظهرت مفارقة التوأمين (twin paradox)، ولم تُحل إلاّ بظهور النّسبية العامة التي إنبثقت عن النظرية النّسبية الخاصة. في هذه المسألة يظهر الفرق بين عُمري التوأمين، أحدُهما فضل الجلوس بالأرض يشاهد أخاه يَرْتَحِل في الفضاء بسرعة عالية تقترب من سرعة الضوء، وعندما يعود الأخ المسافر يجد أنّه أصغرُ عُمْرًا من أخاه الّذي بقي على الأرض، ذلك بسبب ظاهرة تمدد الزمن حيث ينقضي الزمن بصورة أبطأ في سفينة الفضاء وأنّ الفارق الزمني بين عُمْرَي التوأمين عند إلتقاءهما على سطح الأرض يتوقف على سرعة السفينة في الفضاء، والمسافة التي تقطعها السفينة في رحلتها. المعضلة هنا أنّنا يمكننا إعتبار الشخص القاطن بالأرض هو الذي يتحرك بالنسبة للأخ المسافر وبالتالي فهو يعتبر الأصغر عمرا. وقد إنحلت عقدة هذه المفارقة في النسبية العامة. [4] لا يقف الخلاف بيننا وبين صديقنا على الكوكب الآخر عند حد الأطوال، بل يتعدى ذلك إلى قياس الزمن، فهو سينسب إلى حركاتنا بطأ لا نعترف له به فساعتنا تؤخر في نظره إذا قيست بساعته فيتحرك عقرباها حركة بطيئة، بحيث يدور عقرب الدقائق دورة كاملة في ساعتين بدل من ساعة واحدة، أمّا نحن

فننسب إليه نفس الشيء فنقر بتباطئه وتأخر ساعته، فتباطؤ الزمن كانكماش الطول تبادلي بيننا وبينه على حدٍ سواء. [5]

❖ **تكافؤ الكتلة والطاقة:**

تعتبر العلاقة بين الكتلة والطاقة أساس التحويلات والتفاعلات النّووية ، وتطلق عدة تسميات على هذه العلاقة منها تكافؤ المادة والطاقة. هما مفهومين غير مستقلين قابلين لتحويل إحداهما للأخرى. ففي طاقة الحركة في النظرية النّسبية الخاصة نجد تناسبا مطلقا، بين الكتلة والطاقة فالطاقة تساوي الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء ويُعَبَّرُ عنها بمعادلة الطاقة المشهورة التالية $E = mc^2$، حيث E هي الطاقة وm هي الكتلة وc سرعة الضوء في الفراغ. كما يتضح من المعادلة أن الطاقة يمكن أنْ تتحول إلى كتلة و العكس من هنا نجد أنّ كمية هائلة من الطاقة تتولد من تحويل كمية ضئيلة من المادة وذلك نتيجة لمربع سرعة الضوء في المعادلة. [4] لذلك كان من الطبيعي أنْ يقول آينشتاين بأنّ الطاقة والكتلة مقياسان لشيء واحد، فالجسم الذي كتلته غرام يحتوي على طاقة تقدر ب 25 kwh مليون، وعنصر الراديوم الذي تنبعث منه طاقة بمعدل نحو 30000 cal عن كل غرام ذري منه (أي عن كل 226 g من مادته) تُفْنَى مادته، وبالتّالي ينقُص وزنه بمعدل 1.2 mg في كل مئة سنة. [9] وبالمقارنة بما يحدث في الشمس، نجد أنّه تتولد كميات هائلة من الطاقة بسبب عمليات الإندماج النووي بين نُويات الهيدروجين ″ H " لِتُكَوِن نُوَيات الهليوم″ He "، وفي هذه العملية يتبقى مقدار ضئيل جدا من المادة "Δm" يتحول إلى طاقة. ونتيجة للإندماج النووي نجد أنّ معدل فقدان الشمس لكتلتها لكي تحتفظ بحرارتها العالية هي كمية لا تذكر بالنسبة لكتلتها الحقيقية، لذلك فإنّ باستطاعة الشمس أنْ تعيش مئات الملايين من السنين بهذا النشاط النووي. [4]

❖ **ظاهرة دوبلر والزيغ الفلكي:**

النظرية النّسبية الخاصة تُفسر قانون فِرينل تفسيرا كميًا مضبوطا، وتفسر كلا من ظاهرة "دوبلر" وظاهرة " الزيغ الفلكي " ففي كلٍ من هاتين الظاهرتين توجد مجموعتان بينهما، سرعة نسبية إحداهما المجموعة التي يصدر عنها الضوء والأخرى مجموعة المشاهد الذي يتلقى الضوء. ووجود حركة نسبية بين هاتين المجموعتين ينشأ عنه إختلاف على معنى الطول، ومعنى الزمن وبالتّالي ينشأ عنه إختلاف على طول الموجة وعدد الذبذبات في الثانية الواحدة، وإتجاه حركة الأمواج. .

I-1-7. النّسبية الخاصة وقوانين حركة الأجسام:

إنّ العالم " إسحاق نيوتن " أول من صاغ القوانين الأساسية لعلم الديناميكا أو حركة الأجسام صياغة منطقية ومضبوطة، ووضَع نيوتن ثلاث قوانين للحركة وهي:

- **القانون الأول:** يبقى كل جسم على حالة سكونه أو حركته المنتظمة في خط مستقيم إلا بالقدر الذي يُجْبَر به على تغيير هذه الحالة بتأثير قوى خارجية عليه.
- **القانون الثاني:** التغيُّر في الحَرَكَة مُتَنَاسِب مع القِوِى المُحركة المُؤثرة في الجسم ويَحدث في الخط المستقيم الذي تؤثر فيه هذه القوة.
- **القانون الثالث:** لِكُلِ فِعْل رَدْ فِعْل مُسَاوٍ لَهُ في المِقْدار ومُضَادٍ له في الإتجاه.

وضع نيوتن هذه القوانين كأساس لعلم الديناميكا، وبقيت دِينَامِيكِية نِيوتن بَعيدة عنْ كل شك إلى أوائل القرن الحالي. وبِظهور النظرية النّسبية الخاصة لم يتأثر قانونا نيوتن الأول والثالث فلم تمسهما النظرية النّسبية ولم تتطلب تعديلا فِيهما، وأمّا القانون الثاني فَتَأَثَرَ بالنّسبية الخاصة وَإنْ كانَ هذا التأثُر لا يَنْصَبُ على صِيغة القانون، بل على مَعْناه فَمعنى القانون الثاني أنّ معدل التَّغَيُر في كمية الحركة يتناسب مع القوة المُحركة، وباختيار وحدات مُلاَئِمة لِقِياس القوة يتحول القانون إلى أنّ معدل التّغير في كمية الحركة مُساوٍ للقوة المُحَركة، ويُعَرِّف نيوتن كمية الحركة بأنّها حاصل ضرب كتلة الجسم في سرعته وإلى هذا الحد لا تتطلب النّسبية الخاصة أيّ تعديل في آراء نيوتن إلا أنّ نيوتن يذهب إلى أبعد مما تقدم، فيفترض أنّ لكل جسم كتلة ثابتة لا تتوقف على حركته، وهذا الفرض الذي تتطلب النسبية الخاصة تعديله، فالكتلة في نظر نيوتن هي كميّة المادة التي يحتوي عليها الجسم ولذلك فهو لم يتصوّر ولم يكن من المعقول في عصره أن يتصوّر أنّ الكتلة بهذا المعنى قد تتغير بتغيُر حركة الجسم.

النظرية النّسبية تُسَلِم بأنّ لكلِ جسم كتلة خاصة به مادام الجسم ساكن غير متحرك، أمّا إذا تحرك فإنّ كتلته تختلف عنها في حالة السكون، بعبارة أخرى تجعل النظرية النّسبية كتلة الجسم كمية نسبية شأنها شأن طولِها، وكما أنّ طُوله يختلف باختلاف سرعتِه بالنسبة إلى المجموعة التي يشاهد منها فكذلك كتلته تختلف باختلاف هذه السرعة وخلاصة القول أنّ النظرية النّسبية الخاصة تترك القوانين الثلاثة لنيوتن كما هي، ولكنّها تخالف ديناميكية نيوتن في أنّ لكل جسم كتلة ثابتة فتجعل الكتلة صفة نسبية للجسم يتوقف مقدارها على سرعة الجسم بالنّسبة إلى المجموعة التي يشاهد منها والسرعات اللازمة.

لإحداث تغير محسوس في مقدار الكتلة يجب أن تكون سرعات محسوسة إذا قيست بسرعة الضوء. قد سبق القول بأنّ سرعاتنا الأرضية بل والسرعات الفلكية في المجموعة الشمسية تكاد لا تذكر إذا قيست بسرعة الضوء، وهذا الكلام صحيح من ناحية إنطباقه على الأجسام العادية التي نراها ونشاهدها حولنا إلا أنّ هناك أجساما من نوع آخر لها سرعات محسوسة المقدار إذا قِيست بسرعة الضوء وهذه الأجسام هي الإلكترونات التي تدخل في تركيب المادة والتي تنبعث من المواد ذات النشاط الإشعاعي كاليورانيوم والراديوم، فهذه الإلكترونات هي عبارة عن جسيمات صغيرة مشحونة شحنة كهربائية تنطلق من ذرات المواد بسرعات تصل إلى عشرات الاف من الكيلومترات في الثانية الواحدة. ولَمَّا كانت هذه السرعات محسوسة إذا قِيست بسرعة الضوء فقد كان من الطبيعي أن تُجرى التجارب على هذه الجسيمات في قياس أثر هذه السرعات في كتلتها. قام العالمان الفيزيائيان الألمانيان كافمان " kafman" وألفريد بوشيرر " Alfred Bucherer " عام 1909 م بإجراء تجارب دقيقة لقياس كتل الإلكترونات المتحركة لهذه السرعات العظيمة مقارنة هذه الكتل بكتل الإلكترونات الساكنة، فجاءت تجاربَهُما مُعَزِّزَة لِأراء " لورنتز و آينشتاين ". فالكتلة إذن صفة نسبية تزداد قيمتها بازدياد السرعة وهذا القول ليس مجرد فرض فلسفي بل هو حقيقة واقعة تُعززها التجارب العلمية، حيثُ أثبت آينشتاين عام 1905 م تغير الكتلة بتغير السرعة .[5]

2-I. النظرية النسبية العامة:

النظرية النّسبية العامة هي نظرية وضعها العالم ألبرت آينشتاين نشرت عام 1915 م. تُعدّ تَعْميما للنظرية النّسبية الخاصة، التي غيّرت مفهوم النّسبية في قياس الكميات الفيزيائية الثلاثة الطول، العرض والإرتفاع ليُصْبِح نظامًا مُعْتَمِدًا على أربعة أبعاد يكون الزمن البُعد الرابع فيها، وبذلك أطاحت بالإنفصال التقليدي بين مفهومي الزمان والمكان. يُعد الفيزيائي منكوسكي " Minkowski " من رُوَاد معالجة العالم ذو الأبعاد الأربعة وهذا ما فعله آينشتاين حين طرح المتصل الزماني_المكاني الرباعي الأبعاد وإتخذ من هندسة ريمان ذات السطوح المنحنية هندسة تطبيقية بدلا من هندسة إقليدس بسطوحها المستوية، والتي عمل نيوتن بها حيث أنّها لا تصلح لتفسير ظواهر الكون جميعا. نقض آينشتاين المُطلق النيوتيني وفي ذلك يقول: (يمكن وصف عالم الأحداث وصفا ديناميكيا عن طريق تَصَوُر يتغير عبر الزمان في إطار خلفية من الفضاء ثلاثية الأبعاد. ويمكن أيضا وصف الأحداث عن طريق تصور ستاتيكي في إطار خلفية من المتصل الزمكاني رباعي الأبعاد. من منظور الفيزياء الكلاسيكية التصوران متكافئان. ولكن من منظور النسبية التصور الستاتيكي أكثر ملائمة وأكثر موضوعية. حتى في إطار النظرية النسبية مازلنا

نستطيع إستخدام التّصور الديناميكي إذا كنّا نفضل هذا، فالقسمة التي تفصل بين الزمان والمكان ليس لها أي معنى موضوعي ما دام الزمان لم يَعد مطلقا) فالنقطة كانت تمثل في مستوى ثلاثي الأبعاد بالشكل الآتي:

$$R = (X^2 + Y^2 + Z^2) \qquad (I-16)$$

أمّا النقطة في مستوى رباعي الأبعاد حسب هندسة منكوسكي، تعرف بالفترة الزماكانية (S) فتمثل وفق المعادلة التالية:

$$dS^2 = dX^2 + dY^2 + dZ^2 \qquad (I-17)$$

$$dS^2 = (C^2.T^2) - (X^2 + Y^2 + Z^2) \qquad (I-18)$$

حيث S تمثل الفترة الزمكانية(Interval)، و$C^2.\ T^2$: تمثل الإسقاط الزماني، و $(X^2 + Y^2 + Z^2)$: تمثل الإسقاط المكاني.

يمكن تسمية النظرية النّسبية العامة بنظرية آينشتاين في الجاذبية، فحقل الجاذبية النّاشئ عن وُجود أجسام ذات كُتل كبيرة تُغير هندسة الزمان والمكان و تجعله منحنيا_محدبا، وتجعل الكون تسري عليه هندسة ريمان_السطح المحدب أي أنّ الكون مكان محدب ذو شكل كروي، هذا الإنحناء يؤدي بدوره إلى السيطرة على الحركات الطبيعية للأجسام. فالمادة تخبر الزمكان كيف ينحني وهو يخبرها كيف تتحرك، أي أنّ الأجسام تتخذ من حركتها الطبيعية مسارات جيوديسية، أي يتخذ الجسم أقرب مسافة للإنتقال بين نقطتين، وهو المنحني ويمثل جزءا من دائرة كبرى والتي يكون مركزها مركز الكرة مثل خط الإستواء أو دائرة خط الطول. فالكوكب خلال حركته في مداره حول الشمس يكون في حالة سقوط حر مُتَّبِعًا خطا جيوديسيا في الزمكان، حيث أنّه يسلك الطريق الطبيعي في الزمكان المنحني الذي يُحيط بالشمس وهكذا ترى النّسبية أنّ الجاذبية عبارة عن إنحناء الزمكان.[10] تُحدثه الكتلة في جوارها، على هذا الأساس يمكننا تفسير دوران جسم حول الأرض بأنّه سَيْر للجسم بشكل مستقيم على الخط المحيطي " الجيوديسي" للزمان والمكان المحيط بالأرض تماما كما يسير الإنسان بشكل مستقيم على الأرض على طول الخط الجيوديسي لها. على ما يبدو أنّ الكتلة لها خاصيتين مختلفتين، تجاذب جذبي للكتل الأخرى وخاصية قصورية التي تمثل مقاومة التسارع، لتعيين هاتين الخاصيتين نستخدم الدليلين السفليين g و i

ونكتب مايلي:

الخاصية الجذبية $F_g = m_g\, g$

الخاصية القصورية $\sum F = m_i\, a$

قيمة ثابت الجذب G أُختيرت لتجعل قيمة m_g و m_i متساويين عدديا، بغض النظر عن كيفية اختيار G كيفما كان فإن التناسب الصارم بين m_g و m_i قد تم إثباته لدرجة عالية للغاية. [3]

أنّ وصف أينشتاين لمفهوم الجاذبية يفسر العديد من التأثيرات، التي لا يفسرها قانون نيوتن، مثل الإنحرافات الدقيقة التي في مدارات عطارد والكواكب الأخرى. تتنبأ النسبية العامة أيضا بتأثيرات جديدة للجاذبية، مثل موجات الجاذبية، وعدسة الجاذبية، وتأثير الجاذبية على الوقت المعروف بإسم تمدد زمن الجاذبية. تم تأكيد العديد من هذه التنبؤات عن طريق التجربة أو الملاحظة، بينما يخضع البعض الآخر للبحث المستمر. تطورت النّسبية العامة إلى أداة أساسية في الفيزياء الفلكية الحديثة، حيث وفَّرت الأساس لِلْفهم الحالي للثقوب السوداء . [7]

I-2-1. هندسة الجاذبية النيوتنية:

حسب قواعد الميكانيك الكلاسيكي، فإنّ حركة الجسم توصف بدرجات الحرية وبأنّها مكونة من حركة حرة (أو حركة مقصورة) أو (العطالة)، ومقدار إنحرافه عن هذه الحركة الحرة. على سبيل المثال القوى الخارجية المطبَقة على جسم متحرك وِفق قانون نيوتن الثاني والذي ينص على أنّ مجموع

القِوى الخارجية بشكل شعاعي المطبقة على جسم يساوي إلى جُداء كتلة (العطالة) الجسم بالقيمة الشعاعية للتسارع. ترتبط الحركة المقصورة بهندسة الزمان والمكان، ففي الإطار المرجعي التقليدي للميكانيك الكلاسيكي فإنّ الجسم ذو الحركة الحرة يتحرك على طول خط مستقيم وفق سرعة ثابتة أمّا وِفق المصطلح الجديد فإنّ المسار هو مسار جيوديسي فهو خطوط مستقيمة ضمن فضاء منحني. [8]

I-2-2. المبادئ الأساسية التي بنيت عليها النظرية النسبية العامة:

- **مبدأ التكافؤ:**

نُميّز في الفيزياء بين مراجع عطالية (جمل مرجعية عطالية) (Inertial reference systems) ومراجع غير عطالية (non_inertial)، حيث يمكن لأيّ جسم أنْ يحافظ على حركته المنتظمة في الجمل العطالية ما لم يخضع لقوة ما أو يتأثر بجسم آخر ضمن نفس الجملة، في حين تكتسب الأجسام في الجمل غير العطالية تسارعا ناتجا عن حركة الجملة نفسها وتسارعها وليس نتيجة تأثير جسم داخلي

ضمن الجملة. يتم تفسير مقاومة هذا التسارع بقوة إفتراضية ندعوها قِوى العطالة(inertial force) في حالة الحركة المستقيمة للجمل المرجعية أو قِوى العطالة النَّابِذة في حالة الحركة الدورانية

(movement rotational) للجمل المرجعية هذه القِوى تُعْتَبرُ قِوى إفتراضية غير فيزيائية في الميكانيك الكلاسيكي النيوتيني، لكن في النّسبية العامة ليس هناك مجال لمثل هذا التمييز حسب مبدأ التكافؤ وليس هناك من قوة ثقالية ضمن المعلم المرجعي في حالة السقوط الحر (الحركة المتسارعة) عدا القِوى المَدّيَة للثقالة التي تُشَوّهُ الأجسام دون التأثير على حركتها وسرعتها (دون تسارع) وحتى محاولات الكشف عن الأمواج الثقالية تعتمد على هذه القِوى المَدّية (tidal forces). [8] [9]

قد إستند آينشتاين في الواقع على حقيقة معروفة منذ غاليليو ألا وهي تماثل الكتلتين الثقالية والعطالية للأجسام، ممّا يؤكد أنّ التسارع الحركي والثقالة (gravity) هي مظاهر لأمر واحد ويفترض أنّه لا وجود لأي تجربة يمكن أنْ تُميّز بين حقل ثقالي _ جاذبية_ تسارع منتظم، وسرعان ما وسَّع آينشتاين مبدأ التكافؤ في نظريته ليشمل مفهوما إضافيا هو استحالة تحديد حالة الحركة لجملة مرجعية غير متسارعة عن طريق أي قياس فيزيائي، وعلى هذا فلا يمكن إيجاد أي تغيير في الثوابت الفيزيائية

الأساسية مثل كتلة السكون (في حالة السكون) أو الشحن الكهربائية للجسيمات الأولية، وإلا فإنّ أي تغيير في هذه الثوابت يطعن في صحة النسبية العامة. وجدنا أنّ مبدأ التكافؤ ينص على عمومية السقوط الحر، بمعنى أنّ جميع الأجسام تسقط بنفس المعدّل في مجال الجاذبية بغض النظر عن كتلتها وتركيبتها

المادية، وهو مبدأ إستقرائي مبني على الملاحظات التجريبية وليست النظرية. يمكن وضع هذا المبدأ بصيغ مختلفة منها:

- ✓ لا توجد أي طريقة يستطيع بها مراقب في غرفة مغلقة أن يُميّز بها حركة الغرفة.
- ✓ أنّ الكتلة القصورية والكتلة التثاقلية متكافئتان، ولا يمكن التمييز بينهما.
- ✓ أنّ القِوى التثاقلية (الجاذبة) تكافئ القِوى القصورية.
- ✓ أنّ الإطار المتسارع يكافئ الإطار التثاقلي.

لقد لُوحظ أنّ الجاذبية تتسبب في تسارع الأجسام المتساقطة، ولكن لوحظ أيضا من تطبيقات النظرية الخاصة أنّ الحركة تؤدي إلى تقلص الطول وتمدد الزمن ولذلك فقد حاول آينشتاين أنْ يبرهن أنّ الجاذبية أيضا يجب أنْ تؤثر على الزمكان.

- **مبدأ التوافق (Principle of covariance):**

القوانين الفيزيائية يجب أن تتوافق ولا ترتبط بتغيير نوع الإحداثيات الزمانية والمكانية المستخدمة. نعلم من النظرية النّسبية الخاصة أنّ القوانين التي تصف الظواهر الفيزيائية في الفراغ، يجب أن تكون مستقلة عن سرعة المراقب الذي يدوّن القياسات، ويجب أيضا أن تكون لها نفس الشكل والمكونات وذلك عندما نرجعها إلى إحداثيات كارتيزية أخرى تتحرك بسرعة منتظمة. وفي النظرية النّسبية العامة يجب أن توضع هذه القوانين بصورة عامة ومستقلة عن إختيارنا لأي إحداثيات خاصة، زمنية أو مكانية. لهذا فقد إقترح آينشتاين بأنّه يجب وضع القوانين الفيزيائية بمعادلات لا تعتمد على إحداثيات خاصة، وهذه الخاصية لا تأتي إلا عن طريق إستخدامنا لحساب الممتدات (Tensor calcules) وذلك لأنّ صياغة القوانين بصيغة الممتدات لها نفس الشكل والتركيبة بجميع نظم الإحداثيات الأخرى.[4]

I-2-3. إستنتاجات من مبدأ النسبية العامة:

تنتشر أشعة الضوء بوجه عام في خطوط منحنية في المجال الجاذبي. ولهذه النتيجة وجهان على جانب كبير من الأهمية هما:

<u>أولا:</u> أنّه يمكن التحقق منها عمليا على الرغم من أنّ الدراسة النظرية التفصيلية أظهرت أنّ إنحناء الضوء الذي تستوجبه أو تكشف عنه نظرية النسبية ضئيل جدا بالنسبة إلى مجالات الجاذبية التي في متناول الأيدي عمليا، و لكن مقداره بالنسبة للشعاع الذي يمر ملامسا للشمس يبلغ 1.7 ثانية من القوس و هذا يمكن الاستدلال عليه من خلال بعض النجوم الثابتة التي تبدوا لمن يرصدها من فوق الأرض مجاورة للشمس، وعلى ذلك يمكن رصدها في أثناء الكسوف الكلي للشمس وفي مثل هذه الفترات يجب أنْ تبدو

هذه النجوم كأنّها إبتعدت عن الشمس بالقدر السابق ذكره بالمقارنة مع موضعها الظاهري حينما تكون الشمس في مكان آخر من السّماء والتحقق من صحة أو خطأ هذا الإستنتاج هي مسألة على جانب كبير من الأهمية وحَلُّها العاجل منوط بالفلكيين.

<u>ثانيا:</u> تثبت هذه النتيجة أنّه تِبعًا للنظرية العامة للنّسبية لا يمكن أن تكون صحة قانون ثبوت سرعة إنتشار الضوء في الفراغ (وهو أحد الفرضين الأساسيين في نظرية النّسبية الخاصة). بلا حدود لأنّ إنحناء أشعة الضوء لا يمكن أنْ يحدث إلا إذا تغيّرت سرعة إنتشاره مع موقعه والآن قد نتوهم أنّه تِبعا لذلك تكون نظرية النسبية الخاصة ومعها نظرية النسبية بأكملها قد تمرغت في التراب مع أنّ هذا في الواقع ليس صحيحا إلا أنّ صحة النّسبية الخاصة محدودة الأفق و نتائجها صحيحة فيما يتعلق بالظواهر التي يمكن أنْ تُهمل أثر المَجال الجاذبي فيها وحدها (أي الضوء).

لما كان كثير من المعارضين للنظرية النّسبية يحتجون بأنّ النظرية النسبية العامة تتعارض مع نظرية النّسبية الخاصة، فإنّه من المفيد توضيح حقائق هذا الموضوع أنْ نضرب لذلك مثلا مناسبا، لقد كنّا قبل تقدم الديناميكا الكهربائية ننظر إلى قوانين الكهرباء والاستاتيكية على أنها قوانين الكهرباء عموما ولكنّنا الآن نعلم جميعا أنّ المجالات الكهربائية يمكن إشتقاقها إشتقاقا صحيحا من الإعتبارات الاستاتيكية في حالة واحدة فقط وهي حالة لا تتحقق أبدا تماما وهي تلك التي تكون الكتل الكهربائية فيها ساكنة بالنسبة إلى بعضها البعض. [12]

الفصل الثاني

البنية الرياضية لمعادلة آينشتاين

مقدمة :

إستخدَم آينشتاين في معادلاته إطَار نَظري رِياضياتِي يَتم مِن خِلاله صِياغة هَذه القَوانين وَ العَلاقات, وَ هِي تَكافُؤ الكتلة والطَّاقة عَن طَريق حِساب التُّنسُورات (tensors) أَو المُمتدات، وَيُطلق عَليها المُؤثرات الَّتي تَظهر كَثيرًا فِي رِياضيات النِّسبية العَامة، عَلى شَكل تَعبيرات مِثل رُموز كرِيستوفل أَو الجُيودسيات، تُنسور إنحناء رَيمان، تُنسور رِيتشي أَو تُنسور آينشتاين، وَكُل هَذه التَّعبيرات تَعتمد فِي الوَاقع عَلى المُؤثرات. فَما هِي هَذه التُّنسُورات ؟ وَمَا هُو إطَارها النَّظري الرِّياضيَاتي؟

II-1. الجَاذبية بَين نيُوتن وَ آينشتاين:

عِند وُجود شُحنتان تَقعان عَلى بُعد مَسافة مُعينة مِن بَعضهِما البَعض، وَ إذا كَان هُناك تَأثير مُتبادل بَين الشُّحنتين، فَهذا يَعني أَنَّ هُناكَ سيط بَينهُما وَهِي القُوة الكَهرومِغناطِيسية أَو الضَّوء والَّتي تُوصف بِمعادلات مَاكسويل التَّالية:

$$\begin{cases} \nabla . \vec{E} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = - \dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla . \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{B} = \dfrac{1}{C^2} \dfrac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{cases} \qquad (II - 1)$$

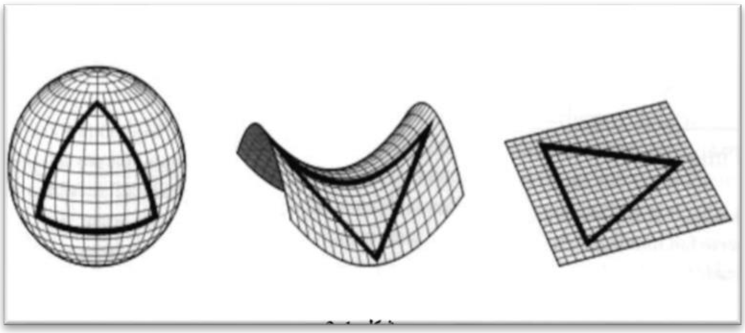
II-2 .البُنية الرِّياضية لِلنَّظرية النِّسبية العَامة:

II-2- 1.الفَضاء المِتري (مُلحق) :

المسافة بين نقطتين أو حدثين في الزمكان تدعى بالفترة الزمكانية وهي تعميم لنظرية فيثاغورس الشهيرة في الهندسة المستوية والتي تنص على أن مربع طول الوتر مساوية لحاصل جمع مربع الطول

للمقابل$(x_1 - x_2)^2$ مع مربع طول المجاور $(y_1 - y_2)^2$، وقد تبيّن أنّ المسافة الزمكانية بين نقطتين في ثلاث أبعاد مكانية وبُعد زمني واحد تُعطى حسب المعادلة التالية:

$$ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dZ^2 \qquad (II-2)$$



الشكل II -1: فضاءات أسطح مختلفة [20]

نظرية فيثاغورس تُطبَّق على فضاء مسطح فقط حيث أنّ مجموع زوايا المثلث المرسوم على سطح مستوي (كما في الشكل II -1 على اليمين) يساوي 180 درجة لكن لو رسم نفس المثلث على كرة كما في الشكل نفسه على اليسار لا يمكننا تطبيق هذه النظرية و الهندسة الإقليدية عليه، حيث أنّ هذه الأخيرة تعد هندسة لكل الأسطح المستوية فمجموع زوايا المثلث القائم تساوي 180 درجة دوما لكن إذا كان هذا المثلث مرسوم على كرة (الشكل II -1 على اليسار) يعطي ناتج أكبر من 180 درجة ومجموع زوايا نفس المثلث مرسوم على سطح محدد مثل السطح الأوسط في الشكل نفسه يعطي ناتج اقل من 180 درجة.

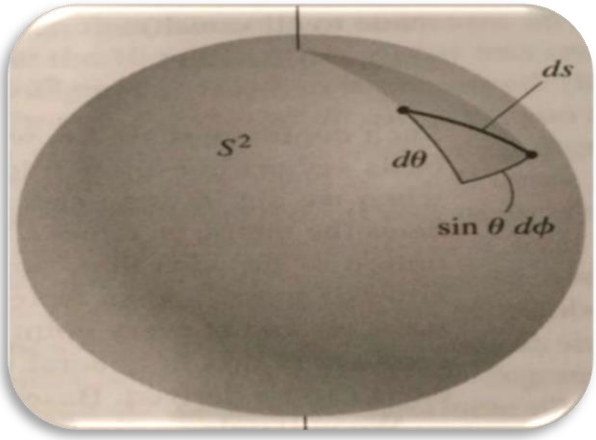
في عام 1828 لاحظ عالم الرياضيات (كارل فريدرش جاوس) أن المعادلة (II – 3) تُعطِي المسافة الزمكانية بين نقطتين وهي:

$$ds^2 = dxdx + dydy + dzdz + dxdy + dydx + dxdz + dzdy + dydz \qquad (II-3)$$

من أجل الحصول على المعادلة (II – 3) يجب أن تكون الرموز المختلفة مثل dxdy وdydx تساوي الصفر، ممّا يعني أنّ المُعامِل الموجود بجوارها يساوي الصفر في حين أنّ المعامل الموجود بجانب الرموز المتشابهة يساوي واحد.

المعادلة (II – 3) تُعْطِي المسافة بين نقطتين في الإحداثي الكارتيزي (x,y,z)، لكن نفس المسافة بين نقطتين على الإحداثي الكروي (r، ϕ، θ) مع إهمال بُعد الزمن تُعْطَى حسب (الشكل II – 2) كالتالي:

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 d\phi^2 \qquad (II-4)$$



الشكل II – 2: المسافة بين نقطتين على الاحداثي الكروي [20]

يمكن كتابة المعادلة التي تَصِفُ المسافة بين نقطتين على أيّ سطح بشكل عام كالتّالي:

$$ds^2 = \sum_{\mu\nu} g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \qquad (II-5)$$

حيث:

$\sum$ رمز التجميع، $g_{\mu\nu}$ هو فضاء متري يصف المكان أو السطح المنحني حيث يمكن التعبير عن كلّ قيم مُرَكِبَات المتري كمصفوفة (مُلحق):

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{pmatrix} \qquad (II-6)$$

بالتّالي تكون قيم مركبات المتري للمعادلة

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dZ^2 \qquad (II-7)$$

هي:

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (II-8)$$

أما مركبات المتري للمعادلة $(II-3)$ في بعد الزمن تكون:

$$g_{\mu\nu}=\begin{pmatrix} g_{tt} & g_{tx} & g_{ty} & g_{tz} \\ g_{xt} & g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yt} & g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zt} & g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \qquad (II-9)$$

II-2 − 2.الكَمية المُمتدة (التُّنسور) (مُلحق):

جميع الحقول في الفيزياء مثل الحقل الجاذبي والكهرومغناطيسي والنّووي وغيرهما تُوصف بالمتّجهات التي تُعَدُّ حالة خاصة لشيء أكثر عمومية وهو ما يسمى بالكمية الممتدة أو التنسور (Tenseur). نعتبر النظام مُكوَّن من متجهين أحدهما متّجه القوة f والآخر متّجه الإزاحة d، بحيث هناك ثلاث مركبات لكل متّجه في إتجاه (x،y،z) أي منَ الممكن أَن تُؤثر مركبة القوة في إتجاه المحور y والتي يرمز لها f_y على مركبة الإزاحة في إتجاه x والذي يرمز له بالرمز d_x وهكذا تكون الإحتمالات الممكنة لتفاعل مركبات المتجهين كالتّالي:

$$\begin{matrix} F_{xx} & F_{xy} & F_{xz} \\ F_{yx} & F_{yy} & F_{yz} \\ F_{zx} & F_{zy} & F_{zz} \end{matrix}$$

بما أنّ مركبات كلا المتّجهين القوة والإزاحة لها ثلاث مركبات مكانية وواحدة زمانية فإنّه يمكن كتابة أي متّجه كما يلي: $F^m(x)$

حيث أنّ m مركبة زمنية تأخذ القيم 0،1،2،3. لمتّجه القوة في المرجع القصوري المسمى x تكتب مركباته في أربعة أبعاد كالتالي: (F^0, F^1, F^2, F^3)

كما يُمكن كتابة مُتّجه الإزاحة في نفس المرجع القصوري x بالشكل: $(x^n(x))$ في حين إذا كُتب في مرجع مُختلف فيجِب إستخدام رمز مختلف مثل y أي $(x^n(y))$. بما أنّ التنسور خليط مُتّجهين أو أكثر فإنّه يُكْتب كما يلي:

$$T^{mn}(x) = F^m(x)x^n(x) \qquad (II-10)$$

أمّا في بعدين تكون هناك أربع مركبات للتنسور أي: $T^{mn} = T^{2*2} = T^{4}$

وفي ثلاثة أبعاد تكون تسعة مركبات: $T^{mn} = T^{3*3} = T^{9}$

وعندما تكون $mn = 1$ تصبح: $T^{mn} = T^{1*1} = T^{1}$ وهو المتّجه العادي الذي يُعدّ حالة خاصة من التنسور، أمّا $mn = 0$ تكون كمية عددية فقط دون إتجاه .[20]

بصورة عامة حل معادلة آينشتاين يُعطي المُمتد المتري و هو تلك الدالة التي تعرِّف طول الفترة في الزمكان وهناك إحتمالان:

أولا :

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (II-11)$$

إذا كان الممتد المتري دالة ثابتة لا تعتمد على متغيرات الزمكان (t, x, y, z) فإنّ الفضاء يكون مستويًا ولا يوجد به إنحناء, وعليه لا توجد جاذبية .

ثانيا:

$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -\left(1-\frac{rs}{r}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\left(1-\frac{rs}{r}\right)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r^2 sin^2\theta \end{pmatrix} \qquad (II-12)$$

إذا كان الممتد المتري دالة تعتمد على متغيرات الزمكان، فإن الفضاء يكون منحنيا، ويوجدِ جذب كوني مثل مترية شوارزشيلد وحل شوارزشيلد يصف الفضاء المتجانس المتماثل وموحد الخواص حول جسم كروي غير دوّار وغير مشحون حيث مربع عنصر الطول فيه أو الفاصل الزمكاني هو: [19]

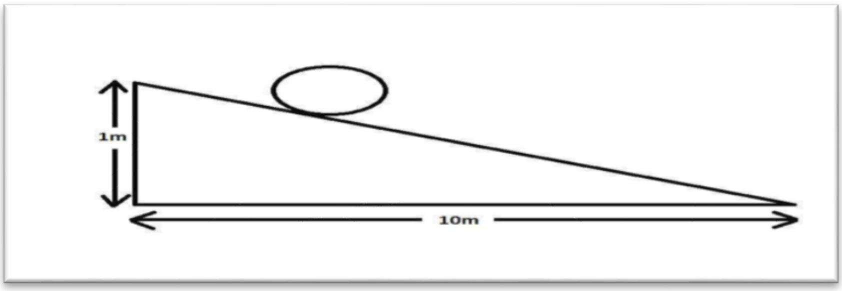
$$ds^2 = -c^2 d\tau^2 = -\left(1-\frac{rs}{r}\right)c^2 d\tau^2 + \frac{dr^2}{1-\frac{rs}{r}} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \qquad (II-13)$$

حيث rs نصف قطر شوارزشيلد

II-3-2 .تَحويلات التُّنسُور بين المراجع القصورية:

من أجل حساب معدل تغير الجهد أو الحقل الجاذبي $d\phi$ (مُلحق) الذي يُدعى بالتدرج لكرة تتدحرج على سطح غاليليو منحني يُكتب هذا التغير (في بعد واحد x) كالتّالي:

$$d\phi = \frac{d\phi}{dx} dx \qquad (II-14)$$



الشكل II –3: سطح جاليليو المنحني

من (الشكلII –3) نجد طول المسار الكُلِّي يساوي 10 أمتار والإرتفاع يساوي 1 متر, وبفرض أن الكرة قد تحركت مسافة 5 أمتار يُصبح مُعدل تغيُّر الجهد مساويًا:

$$d\phi = \frac{d\phi}{dx} dx = \frac{1}{10} 5 = \frac{1}{2} m \qquad (II-15)$$

أمّا التغيّر في ثلاثة أبعاد يكون:

$$d\phi = \frac{d\phi}{dx} dx + \frac{d\phi}{dy} dy + \frac{d\phi}{dz} dz \qquad (II-16)$$

وُضعت المشتقة الجزئية(∂) لوُجود دالة الجُهد الجاذبي (ϕ) لها ثلاث متغيرات (x, y, z) ومنه تُكتب المعادلة السابقة كالتَّالي:

$$d\phi = \sum n \frac{\partial\phi}{\partial x^n} dx^n \Rightarrow d\phi = \frac{\partial\phi}{\partial x^n} dx^n \qquad (II-17)$$

وهذا في أي مرجع قصوري x .

من أجل كتابة المعادلة (II – 17) بدلالة مرجع قصوري آخر y نقوم بإجراء هذه العملية بإستخدام قاعدة السلسلة (chain rule) (مُلحق) كالتالي:

$$\frac{\partial \phi}{\partial y^1} = \frac{\partial \phi}{\partial x^1}\frac{\partial x^1}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial x^2}\frac{\partial x^2}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial x^3}\frac{\partial x^3}{\partial y} \qquad (II - 18)$$

أو

$$\frac{\partial \phi}{\partial y^n} = \frac{\partial \phi}{\partial x^m}\frac{\partial x^m}{\partial y^n} \qquad (II - 19)$$

n عدد المركبات وm تدل على أنّ عملية التجميع سارية.

المعادلة (19– II) تعني بشكل عام أنّه من الممكن كتابة مُتَّجه في مرجع قصوري معين $V^n(x)$ بدلالة مُتَّجه في مرجع قصوري آخر $V^n(y)$ وذلك من خلال إشتقاق أحدهما بالنسبة للآخر أي يمكن كتابة

$$v^n(y) = \frac{\partial y^m}{\partial x^m} v^m(x) \qquad (II - 20)$$

يُكتب التُنسور في مرجع قصوري آخر كما يلي :

$$v^m(y)v^n(y) = \sum_r \frac{\partial y^m}{\partial x^r} v^r(x) \sum_s \frac{\partial y^n}{\partial x^s} v^s(x) \qquad (II - 21)$$

حيث: $T^{mn}(y) = V^m(y)\, V^n(y)$ و $T^{rs}(x) = V^r(x)V^s(x)$

يُكْتَب كذلك التنسور أو مُتَّجَهَاتِه ب (contravariant) (أي أنّ العوامل m،n،r،s موجودة في أعلى التنسور) بهذا الشكل:

$$T^{mn}(y) = \frac{\partial y^m}{\partial x^r}\ \frac{\partial y^n}{\partial x^s} T^{rs}(x) \qquad (II - 22)$$

ويُسمى التنسور أو مُتَّجهاته ب(covariant)(أي أنّ العوامل m،n، r،s موجودة في أسفل التنسور) كالتالي:

$$T_{mn}(y) = \frac{\partial x^r}{\partial x^m}\frac{\partial y^s}{\partial y^n} T_{rs}(x) \qquad (II - 23)$$

II-2-4. رمز كريستوفل (christoffel symbol)(مُلحق):

يُكتب التُنسور كمشتقة متجه كالتالي:

$$T_{rs}(x) = \frac{\partial V^{r}(x)}{\partial x^{s}} \qquad (II-24)$$

و

$$T_{mn}(y) = \frac{\partial\, V^{m}(y)}{\partial x^{nn}} \qquad (II-25)$$

بتعويض المعادلة $(II-24)$ و$(II-25)$ في المعادلة $(II-8)$ نجد:

$$\frac{\partial V^{m}(y)}{\partial x^{n}} = \frac{\partial x^{r}}{\partial y^{m}}\frac{\partial x^{s}}{\partial y^{n}}\frac{\partial V^{r}(x)}{\partial x^{s}} \qquad (II-26)$$

نحذف ∂x^{s} من الطرف الأيمن للمعادلة$(II-26)$ نجد:

$$T_{mn}(y) = \frac{\partial V^{m}(y)}{\partial x^{n}} = \frac{\partial x^{r}}{\partial y^{m}}\frac{\partial V^{r}(x)}{\partial y^{n}} \qquad (II-27)$$

بتعويض قيمة $v^{m}(y)$ من المعادلة $(II-20)$ نحصل على:

$$T_{mn}(y) = \frac{\partial}{\partial y^{n}}\left(\frac{\partial x^{r}}{\partial y^{m}} v^{r}(x)\right) \qquad (II-28)$$

بتطبيق قاعدة ليبنتز(Leibniz's rule)(مُلحق) على المعادلة $(II-28)$ نحصل على:

$$\frac{\partial v^{m}(y)}{\partial y^{n}} = \frac{\partial x^{r}}{\partial y^{m}}\frac{\partial v^{r}(x)}{\partial y^{n}} + \frac{\partial}{\partial y^{n}}\frac{\partial x^{r}}{\partial y^{m}} v^{r}(x) \qquad (II-29)$$

ومنه يُكتب رمز كريستوفل كما يلي:

$$\Gamma^{r}_{nm}\frac{\partial}{\partial y^{n}}\frac{\partial x^{r}}{\partial y^{m}} \qquad (II-30)$$

نظرا لتوزع العوامل r S, m ,n مع وجودها على المشتقات سيكون هناك عدة قيم لهذا الرمز لذلك تسمى برموز كريستوفل، إذا كمية التنسور لا تحافظ على شكلها عند الانتقال بين المراجع القصورية، أي أنّ $T^{mn} \neq \frac{\partial V^{m}}{\partial y^{n}}$ نظرا لوجود حد إضافي حيث تكتب المعادلة كاملة كالتّالي:

$$T_{mn} = \frac{\partial V^m}{\partial y^n} + \Gamma^r_{nm} v^r = \nabla_n v^m \qquad (II-31)$$

تُسمى ∇_n (covariant dérivative) للمتجه V^m وهي تعميم للمشتقة الجزئية $\frac{\partial}{\partial y^n}$ ويُمكن كتابتها لأي متجه كما يلي:

$$\nabla_n V^m = \frac{\partial V^m}{\partial y^n} + \Gamma^r_{nm} V^r \qquad (II-32)$$

يُمكن تطبيق ∇_n على التُّنسور T_{mn} بأكمله كما يلي:

$$\nabla_p T_{mn} = \frac{\partial T_{mn}}{\partial T^p} - \Gamma^r_{pm} T_{rn} - \Gamma^r_{pn} T_{mr} \qquad (II-33)$$

وقد ظهر رمز كريستوفل مرّتين, لأنَّ التنسور يُعتَبر خليط لمتجهين أو أكثر.

∇_n) covariant dérivative) تساوي الصفر لكل الأسطح المستوية,أي بإِشتقاق الفضاء المتري $g_{\mu\nu}$ (تنسور) نحصل على صفر:

$$\nabla_p g_{mn} = \frac{\partial g_{mn}}{\partial y^p} - \Gamma^r_{pm} g_{rn} - \Gamma^r_{pn} g_{mr} = 0 \qquad (II-34)$$

بحل المعادلة السابقة (II – 34) نجد قيمة رمز كريستوفل:

$$\Gamma^a_{bc} = \frac{1}{2} g^{ad} \left(\frac{\partial g_{cd}}{\partial x^b} + \frac{\partial g_{ab}}{\partial x^c} - \frac{\partial g_{bc}}{\partial x^d} \right) \qquad (II-35)$$

سنتطرق إلى هندسة ريمان والَّتي تُعتَبَر عمليات إشتقاق لرموز كريستوفل.

II –2–5. قياس درجة التحدب: (تنسور ريمان وتنسور ريتشي)

II –2–5–1. تنسور ريمان:

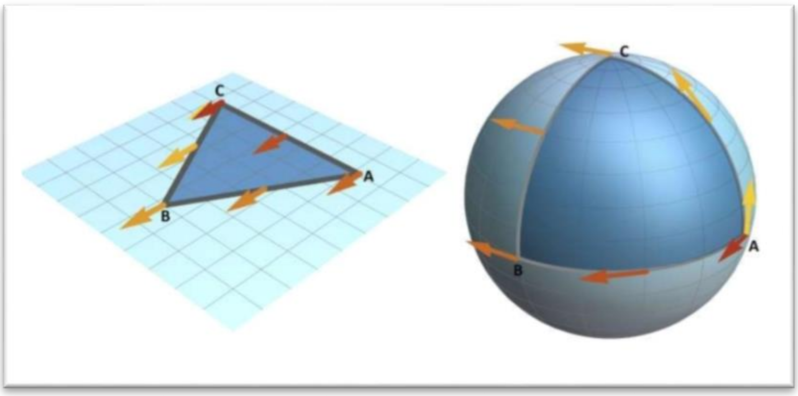
قام برنارد ريمان (Bernhard Riemann) بفكرة مُثلث مرسوم على سطح مستو عادي ووضع متجه يبدأ عند النقطة a كما في (الشكل 4 على اليسار) وجعله يدور حول المثلث عبر النقاط A ثم B ثم C ومن ثم يعود إلى نفس النقطة A , بشرط أن ينتقل المتجه بشكل موازي لنفسه دائما بحيث يبقى ذيله دائما على المثلث كما نلاحظ في (الشكلII–4)، وتُسمى هذه العملية بعملية الإنتقال المُوازي (Parallèle transport) فوجد أن المتجه عاد كما بدأ بالضبط و قام بنفس العملية على مثلث منحني مرسوم على كرة ثلاثية الأبعاد كما في (الشكلII–4 على اليمين) فحدث شيء مختلف هنا، فالمثلث لم يعد كما بدأ بل وصل مُختَلِف عنه بزاوية قائمة.

إخترع ريمان فكرة لحساب مُعدل تَغير المُتجه عندما ينتقل من نقطة إلى أخرى على سطح أحدب حيث وجد أنّ معدّل التغير δ الذي يحدث للمتجه يعطى كالتالي:

$$\delta_{Vp} = R_{\mu\nu\rho\sigma} V^{\sigma} A^{\mu} B^{\nu} \qquad (II-36)$$

حيث:

(A^{μ} $^{\nu}$) عبارة عن متجهين متناهيي الصغر (Infinity small) . الكمية $R_{\mu\nu\rho\sigma}$ تُسمى تنسور ريمان وهي الأساس الّذي يقيس درجة التحدب من نقطة لأخرى على سطح المنحني.



(الشكلII-4) : فكرة ريمان عن النقل الموازي لقياس درجة تحدب الأسطح المنحنية

تُنسُور ريمان يُكتب بِالشَّكل التَّالي:

$$R_{\mu\nu\rho\sigma} = \frac{\partial \Gamma_{\nu\sigma\mu}}{\partial x^{\rho}} - \frac{\partial \Gamma_{\nu\rho\mu}}{\partial x^{c}} + \Gamma_{\mu\sigma\lambda}\Gamma^{\lambda}_{\nu\rho} - \Gamma_{\mu\rho\lambda}\Gamma^{\lambda}_{\nu\sigma} \qquad (\mathrm{II}-37)$$

العلاقة بين رمزي كريستوفل المختلفين هي كالتالي: $\Gamma^{\rho}_{\mu\nu} = g^{\rho\lambda}\Gamma_{\lambda\mu\nu}$

بما أَنَّ رُموز كريستوفل هي مُشتقات للمتري g كما في المعادلة (20– II) فإِنَّه يُمكن كتابة تُنسور ريمان كالتالي:

$$\mathrm{R}_{\mu\nu\rho\sigma} = \left(\frac{\partial^2 g_{\mu\sigma}}{\partial x^{\nu}\,\partial^{\rho}} + \frac{\partial^2 g_{\mu\rho}}{\partial x^{\mu}\,\partial x^{\sigma}} - \frac{\partial^2 g_{\mu\rho}}{\partial x^{\nu}\,\partial x^{\sigma}} - \frac{\partial^2 g_{\nu\sigma}}{\partial x^{\mu}\,\partial x^{\rho}}\right) + \Gamma_{\mu\sigma\lambda}\Gamma^{\lambda}_{\nu\rho} - \Gamma_{\mu\rho\lambda}\Gamma^{\lambda}_{\nu\sigma} \qquad (\mathrm{II}-38)$$

II –2–5–2. تُنسُور رِيتْشِي (Ricci tonsor):

سُمِّي تُنسُور رِيتْشي نِسبَةً إِلى عَالِم الرِّياضِيَات الإيطالي (Grigoryo Ricci)، وما هو إلاَّ تُنسُور ريمان Rymen مكتوب كما يلي:

$$R_{\mu\nu} = R^{\lambda}_{\mu\lambda\nu} \qquad (\mathrm{II}-39)$$

جَمع مُرَكَّبات تُنسور ريمان المُحتملَة فِي عَدَدٍ مُعَيَّن مِنَ الأَبعاد هِي مَا تُسمَّى بِكمِّيَة رِيتْشِي أَوْ كَمِيَة تَحَدُّبْ رِيتشِي وَالتِي تُعْطَى كَجَمْع لِمُرَكَّبَات تُنْسُور رِيتْشِي كَالتَّالِي:

$$R = R^{\mu}_{\mu} = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu} \qquad (\mathrm{II}-40)$$

II – 2–6. مُعَادَلَةُ الحَرَكَة عَلَى سَطْح أَحْدَب (مُعادلة الجُيوديسيا):

عِندَ وُجُود جِسم يَتحرَّك عَلَى سَطْح مُنْحني كَمُتَّجَه يَتَحرك بِشَكل مُوَازِي مِن خَط الإستواء إِلَى خَط الشَّمال مِثْلَ المَسَارين A وB فِي (الشكلII – 4 على اليمين) يَتبينُ أنَّ عَملية الحَركة بِشكل مُوازي هِي الفكرة التي إِستَخدمها ريمَان لِحساب مَدى التَّحدُّب فِي كُل نُقطة عَلى السَّطح المُنحني مَع بَقاء الُمتَّجه مُوازيَا لِنفسه دائمًا عَلَى طُول خَط إِنتقالِه مَا يَعني أَنَّ هَذا الأَخير هُو مُتَّجه المَمَاس الَّذي يُغيِّر مَوقِعه بِاستِمرار عِند إِنتقالِه عَلى ذَلك المَسار أَي أَنه مُعدَّل تَغيُّر المَسَافة بِالنِّسبةِ للزَمن $\frac{d x^{\mu}}{d\tau}$.

تُجدِر الإشارةِ هُنا أنَّ الزَّمن τ هُو الزَّمن الأَصلي أو اللاَّمُتغير ولا يُساوِي الزمن الَّذي يَختلف مِن مَرجع قُصُوري لِآخر حيثُ أنَّه يُساوي:

$$ds^2 = -(c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2) = -d\tau^2 \qquad (\mathrm{II}-41)$$

مَع العِلم أنَّ ds كَمية لاَ مُتغيرة يَكونُ الزَّمن $d\tau^2$ كَمية لاَ مُتغيرة أَيضًا ولِكي يُحافظ المُتَّجه المَماسي عَلَى إنتِقاله المُوازي يَجِب أنْ تَكون مُشتقتُه $\frac{dx^\mu}{d\tau}$ عَلَى طُول خَط إنتقاله علَى السَّطح المُنحنِي تُسَاوي الصِّفر

أيْ:

$$\frac{d}{d\tau}\frac{dx^\mu}{d\tau} = \frac{d^2x^\mu}{d\tau^2} = 0 \qquad (\mathrm{II}-42)$$

هِي المُشتقة الثَّانية بِالنِّسبة لِلزَّمن (التَّسارُع)، وهِي تُمثل مُعادلة الحَركة علَى خَط مُستقِيم أمَّا مِن أَجل الحُصُول علَى مُعادلة الحَركة علَى خَط مُنحنِي فَنستخدم المُشتقة الأَكثر عُمُومية (II –32). مِن أَجل الحُصول عَلى القِيمة التَّالية: $\nabla_n(\frac{dx^\mu}{d\tau})$ يَجب تَطبِيقها علَى مُتَّجه الممَاس $(\frac{dx^\mu}{d\tau})$ و منه الوُصول إلَى مُعادلة تَصف الحَركة علَى خَط مُنحَني وتُسمَّى مُعادلة الجُيوديسيا المُوضحة كالتالي:

$$\frac{d^2x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma^r_{nm}\frac{dx^n}{d\tau}\frac{dx^m}{d\tau} = 0 \qquad (\mathrm{II}-43)$$

عِندما تَدور الأَرض أو أَي كَوكب آخر في مُنحنى زمكان الشمس المقوس دائما ما تتخذ الأرض أو ذلك الكوكب أقصر مسافة ممكنة بين نقطتين على سطح منحني يسمى الخط الجيوديسي، مع العلم أن رمز كريستوفل عبارة عن مشتقات للمتري g وقيم المتري ثابتة في الزمكان المسطح أي مشتقاتها كلها تساوي الصفر.

II –2–7. مُعادلات آينشتاين لِلمجال:

يَنُص قَانُون نيوتَن فِي الجَذب العَام عَلى وُجود قُوة جَذب بَين أَي جِسمين فِي الكَون تَتناسب طَرديا مَع حَاصل ضَرب كُتلتيهِما وعكسيًا مَع مُربع المَسافة بَينهما ويُكتَب كَالتّالي:

$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

حَيثُ: F قُوة الجَذب بَين جِسمين، m كُتلة القَمر الصِّناعي، M كُتلة الأَرض، r المَسافة بَينهُما و G ثَابِت الجَذب العَام.

بِمَا أَنَّه يُمكن إِهمَال كُتلة الجِسم الصَّغير مُقارنةً بِالكَبير فَإنَّه يُمكن إِهمال كُتلة القَمر الصِّناعي m فِي المُعادلة السَّابقة وَ إِبقاء كُتلة الأَرض M فَقط بِحيثُ تُصبِح المُعادلة كَما يَلِي:

$$F = -G\frac{M}{r^2} \qquad (II - 44)$$

حيثُ أَنَّ الإِشارة السَّالِبة تَعني فَقط أَخذ الصُّورة الإِتِّجاهية لِشكل القَانُون.

كَوكب الأَرض عِبارة عَن كُرة كُتلتها M مُحاطَة بِكُرة نِصفُ قُطرِها r كَما هُو مُوضَّح فِي (الشكلII – 5) .

الشكل II–5: مدى تأثير المجال الجاذبي للأرض[20]

هَذه الكُرة تُمثل مَدى تَأثِير المَجال الجَاذبي لِلأَرض فَكُل شَيءٍ يَقع دَاخل هَذه الكُرة سَيتأثر بِمجال الجَاذبية لِلأرض، مِن أَجل حِساب مَدى تَأثير قُوة مَجال الجَاذبية دَاخل هَذهِ الكُرة يَجب تَكامُل قَانُون القُوة (II –44):

$$\int F.dA = -\int \frac{GM}{r^2}.dA = -\frac{GM}{r^2}4\pi r^2 = -4\pi GM \qquad (II - 45)$$

حيثُ dA تُمثِّل مِساحة سَطح الكُرة.

لدينا نظرية (divergence theorem)(مُلحق) التالية:

$$\int F.dA = \int_{volum} \nabla F.dv \qquad (II - 46)$$

تُعطَى العلاقة بين الكَثافة، الُكتلة والحَجم كالتالي:

$$\rho = \frac{M}{V} \Rightarrow \int \rho dv \qquad (II-47)$$

نعوض قيمة المعادلة (45– II) في الطرف الأيسرمن المعادلة (46– II) وبإستخدام M من معادلة (47– II) نجد:

$$-4\pi GM = -4\pi G \int \rho . dv = \int \nabla F . dv \qquad (II-48)$$

بإلغاء تكامل الحجم من طرفي المعادلة نحصل على:

$$\nabla F = -4\pi G\rho \qquad (II-49)$$

قِيمة F لِعدة أبعاد تُعطَى كما يلي:

$$F = -\nabla \Phi = \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}\right) \qquad (II-50)$$

وبتعويض هذه القيمة في المعادلة (49– II) نحصل على:

$$\nabla F = -\nabla . \nabla \Phi = -4\pi G\rho$$

$$\nabla^2 = 4\pi G\rho \qquad (II-51)$$

حيث ∇^2 هو لابلاسيان Laplacian.

تُسمَّى المُعادلة (50– II) مُعادلة بْواسُون Boisson لِجهد نيُوتن، تَحسب مَدى قُوة تَأثير المَجال لِجسم مَا كُتلته M عَلى جِسم آخر يَقع داخل الكُرة المَجالية لهذا الجِسم كمَا في (الشكل II–5)، ويُكافئ قَانون نيُوتن الشَّهير فِي الجَذب العام . وهُو أهَم عُنصر فِي فِكرةِ الزَّمكان المُنحني وَالَبديل عَن الجُهد النيُوتيني فالكُرة المَوجودة في (الشكل II–5) سَيتم إستبدالها بِفكرة إنحناء الزَّمكان أو المِتري, g الَّذي يَصف الإنحناء رِياضيا لِذلك يَجب إستبدال الجُهد الجَاذبي Φ فِي المُعادلة (50– II) بالمتري $g_{\mu\nu}$، بإستِخدام المعادلة

(II –38) وأيضًا إستِبدال الكَثافة ρ بتُنسُور الطاقة $T_{\mu\nu}$، بإستِخدام المُعادلة (II –50) نَحصُل علَى مُعادلة تُنسُورية جَديدة تُكتَب مِنَ الشَّكل:

$$\nabla^2 g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \qquad (II-52)$$

بإستِخدام تُنسُور رِيتشي تُكتَب مُعادلة المَجال كالتَّالي:

$$R_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \qquad (II-53)$$

بإعتبار أنَّ قانون حفظ الطاقة ينص على أن مشتقة الطاقة يجب أن لا تتغير، أي تُنسور الطاقة يجب أن يساوي الصفر:

$$\frac{\partial T_{\mu\nu}}{\partial x^{\rho}} = 0 \qquad (II-54)$$

بما أنّ هذه المُشتقة جُزئية و تصلح فقط للأسطح المستوية يجب علينا إستخدام مُشتقة Covariant الموجودة في المعادلة (II –32) من أجل الحصول على مُعادلة على سطح منحني

$$\nabla T_{\mu\nu} = 0 \qquad (II-55)$$

لكن مشتقة covariant لتنسور ريتشي$R_{\mu\nu}$ لا تساوي الصفر أي:

$$\nabla R_{\mu\nu} = \frac{1}{2}\nabla R g_{\mu\nu} \qquad (II-56)$$

وبنقل الطرفين إلى طرف تصبح المعادلة (II –56) كالتالي :

$$\nabla\left(R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu}\right) = 0 \qquad (II-57)$$

إذن الكَمية ($R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu}$) أوْ مَا تُسمَّى تُنسور آينشتاين $g_{\mu\nu}$ هِي مِن تَطابق $T_{\mu\nu}$ فِي المُعادلة (II –53) وذلِك لأَنَّ مُشتقة Covariant لكلاَهما تُساوي الصِفر وَبِالتالي نَضع تُنسور آينشتاين فِي الطَّرف الأَيمن مِن المُعادلة(II –53) لنَحصل على:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \qquad (II-58)$$

أو

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \qquad (II-59)$$

الطَّرف الأَيسَر لِهذه المُعادلة يَصف مَدى تَقوُّس الزَّمكان الَّذي يُحدِثه الطَّرف الأَيمن وَبِالتالي يُبيِّن الزَّمكان المُنحني لِلمادة كَيف تَتحرك فِيه، فَالمَنطقة الَّتي تُوجد خَارج المَجال المُتقوس الَّذي تُحدِثه الشَّمس أوْ كَوكَب مَا أو سَحابة غَازية خَارج مَجال الَّتقوُّس يَكون الزَّمكان تَقريبا مُسطَّح لاَ تُوجد كُتلة أو طَاقة فَضاء فَارغ فَقط لِذلك يَكون تُنسور الطَّاقة$T_{\mu\nu}$ يُساوي تَقريبًا الصِّفر وَبذلك تُكتب مُعادلة آينشتاين كَالتالِي: [20]

$$R_{\mu\nu} = 0$$

مُعَادلات آينشتاين مُعادلات تَفاضلية جُزئية لاخَطية وَ لِهذا يَصعُب حَلُّها بِدقة، إكتشف آينشتاين أنَّ مَصادر الكُتل والطَّاقة فِي الكَون تتَسبب فِي إنحناء نَسيج الزَّمكان وَ كُلما زَادت الكُتلة والطَّاقة زَاد الإنحناء وَيُمكن وَصف ذَلك رِياضيًا بِالعلاقة التَّالية.

حيث يَتناسب الإنحناء طَردِيًا مَع الكُتلة $G = KT$ كما يلي:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R \qquad (\mathrm{II} - 60)$$

G: مُؤثر آينشتاين

T: مُؤثر زخم الطاقة– الإجهاد

$R_{\mu\nu}$: مؤثر إنحناء ريتشي

R : إنْحِناء قِياسِي

$g_{\mu\nu}$: مُوتر مُوتري

II -2-7-1. الثَّابِت الكَونِي:

الثَّابت الكوني هو ثَابِت فِيزيائِي يُرمز لَهُ غَالبًا بِالرَّمز Λ وَضَعَهُ العَالم أَلْبِرت آينشتَاين حَتَّى تَتفِقَ مُعَادلاته مَع مَفْهُوم أَنَّ الكَون ثَابِت وسَاكِن غَير مُمْتَد , وَتَقْترِح بَعض القِياسَات لِهذا الثَّابِت قِيمة غَير صِفْرِية 0.

قَام آينشتاين بِتعديل مُعادلاته الأَصلية لِلمجال كَي تَتضمن حدًّا كَونيًا مُتناسبًا مَع المِترية.

$$G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \qquad (\mathrm{II} - 61)$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + g_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \qquad (II-62)$$

وَ هِي العَلاقة بَين مُحتوَى الطَّاقة والمَادة مِن الزَّمكان , يُمثل الطَّرف الأَيمن $T_{\mu\nu}$ تنُسور إِجهاد–الطَّاقة

(Stress-energy tensor) , وَالطَّرف الأَيسر إِنحنَاء (تَقوُّس) الزَّمكان الَّذي يُمثله تُنسور آينشتاين.

بِما أَنَّ Λ يُعدُّ ثَابتًا فَلن يَتأثر مَبدأ إِنحفاظ الطَّاقة، فَقد قَدم آينشتاين ثَابت الحَد الكَوني لِوصف كَون دِيناميكي.

كانَ آينشتاين يَعتقد أَنَّ الثَّابت الكَوني وَسِيط مُستقل، لَكن حَده فِي المُعادلة يُمكن أَن يَنقل إِلَى الطَّرف الآخَر جِبريًا، المَكتوب كَجُزءِ مِن مُؤثر الإِجهاد وَ الطَّاقة.[14]

$$T_{\mu\nu}^{(vac)} = -\frac{c^4}{8\pi G} g_{\mu\nu} \Lambda \qquad (II-63)$$

تُعتبَر طَاقة الفَراغ ثَابتة بالعلاقة:

$$\rho_{vac} = -\frac{c^4}{8\pi G} \Lambda \qquad (II-64)$$

بِالتَّالي فإِنَّ وُجود ثَابت كَوني ذَات طاقة فراغ غير معدومة (لا تُساوي0)، حيثُ تُستعمل الحدود فِي النِّسبية العَامة بِشكل تَبادلي.

حَيثُ يَتم التَّعبِير عَنهما بِالعلاقة التالية: [15]

$$D_b T^{ab} = T^{ab}_{;b} = 0$$

تُستَعمل مُعادلات حَقل آينشتاين (EFE) لإِيجاد الهَندسة الفَضائية للزَّمكان فِي وُجود الكُتلة و الطَّاقة وَكَميةُ التَّحرُّك الخَطي كَما تَسمح العَلاقة بَين التُّنسور المِتري وَتُنسور آينشتاين:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} \qquad (II-65)$$

تُكتَب مُعادلات آينشتاين كَمجمُوعة مِن مُعادلات تَفاضُلية لاَ خَطية، وَ ند إِستِخدامها بِهذه الطَّريقة فإِنَّ حُلول مُعادلات حَقل آينشتاين (EFE) تُمثِّل مُركّبات التُّنسُور المِتري. حَيثُ تَمت دِراسةُ هَذه المُعادلة فِي أربَعةُ أبعَاد لِذا يَتم كِتابةُ الُتنسُور كالآتي:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{bmatrix} = \frac{4\pi G}{C^{4}} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} \end{bmatrix}$$

التَّماثُل فِي الُّتنسُور مَعناه:

$$G_{\mu\nu} = G_{\nu\mu}$$

$$T_{\mu\nu} = T_{\nu\mu}$$

مِن المُفترَض أنَّ كُل مُعادلة يَتم كِتابتُها كَالآتي:

- $G_{11} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{11}$
- $G_{12} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{12}$ هذه المعادلة ستكافئ معادلة أخرى هي : $G_{21} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{21}$
- $G_{13} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{13}$ تكافئ $G_{31} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{31}$
- $G_{14} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{14}$ تكافئ $G_{41} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{41}$
- $G_{22} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{22}$
- $G_{23} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{23}$ تكافئ $G_{32} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{32}$
- $G_{24} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{24}$ تكافئ $G_{42} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{42}$
- $G_{33} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{33}$
- $G_{34} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{34}$ تكافئ $G_{43} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{43}$
- $G_{44} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{44}$

الآن يُوجد عَشر مُعادلات تَفاضلية جُزئية فَقط:

- $G_{11} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{11}$
- $G_{12} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{12}$
- $G_{13} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{13}$
- $G_{14} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{14}$
- $G_{22} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{22}$
- $G_{23} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{23}$
- $G_{24} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{24}$
- $G_{33} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{33}$

- $G_{34} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{34}$
- $G_{44} = \frac{4\pi G}{c^4} T_{44}$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + g_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \qquad (II - 66)$$

تَنقسم هذه المُعادلة إلى جُزئين، الطَّرف الأَيسر يُشير إِلَى الزَّمكان (the curvature of spacetime) وَالطَّرف الأيَمن مِن المُعادلة يَتعلق بالكُتلة وَكُل أَنواع الطَّاقة (masse and energy), تَصف التَّأثر الأَساسِي فِي الجَاذبية جَرَّاء تَقوس الزَّمكان مَع كُل مِن المَادة وَالطَّاقة إِضافةً لإِمتثَالها لِقوانين بَقاء كَمية الحَركة وَالطَّاقة. تَنخفض (EFE) إلَى قَانُون الجَذب العَام لِنيُوتن حيثُ مَا يَكونُ المَجال الثِّقالي ضَعيفًا وَ السُّرعات أَقَل بِكثير مِن سُرعة الضَّوء.

تَتضمَّن مُعادلات آينشتاين لِلمجال تَبسيط الفَرضِيات مِثل التَّماثُل، وَتُستَعمل هَذه المُعادلات لِدراسة ظَواهر مِثل المَوجات الثِّقالية.

مُعادلة آينشتاين لِلحقل فِي الوَاقع سِتَّةَ عَشر مُعادلة وَبِإختزَال الحُدود المُتكررة تُصبح عَشر مُعادلات وَهِي مُعادلات المَجال حيثُ نَجد أَنَّ vμ تَظهر فِي مَواضع مُختلفة فِي المُعادلة حَيثُ تُمثل أَرقام الأَبعاد الأربعَة وَهِي ثَلاثةُ لِلأَبعاد المَكانيةُ وَالبُعد الرَّابع هُو البُعد الزَّمني بِأربَع قِيَم مُختلفة فِي الفَضاء رُباعِي الأبعَاد0،1، 2، 3 حَيثُ يُرمَز 0 لِلزمن (t)، 1 لِلمحوَر (x)، 2 لِلمحوَر (y)، 3 لِلمحوَر (z). وَتَكون المُعادلات كالآتي:

$$R_{00} - \frac{1}{2} g_{00} R + g_{00} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{00}$$

$$R_{01} - \frac{1}{2} g_{01} R + g_{01} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{01}$$

$$R_{02} - \frac{1}{2} g_{02} R + g_{02} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{02}$$

$$R_{03} - \frac{1}{2} g_{03} R + g_{03} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{03}$$

$$R_{10} - \frac{1}{2} g_{10} R + g_{10} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{10}$$

$$R_{11} - \frac{1}{2} g_{11} R + g_{11} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{11}$$

$$R_{12} - \frac{1}{2} g_{12} R + g_{12} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{12}$$

قَامَ بَعض النَّظريين بِتوسيع نَتائج مُعادلات آينشتاين لِلمَجال إلَى n بُعد مِن خِلال نَظرية رُباعية الأبعَاد,أمَّا خَارج النِّسبية العَامة يُشار إليها بِمُعادلات آينشتاين لِلمجال أَي ذَات الفَضاءات المُتعددة ،مِثل مُعادلات كالوزا كلاين kaloza klein فِي خَمسة أَبعاد .

تَقُوم مُعادلات مَجال الَفراغ بِتَعريف تَشُعبات آينشتاين لمَّا تُنسُور (الإجهاد–الطاقة = صفر), تَبدُو المُعادَلات بَسِيطة إلاَّ أنَّها مُعقدة فِي الوَاقع.

إذا عُرِف تَوزيع مُعيَّن لِلمَادة وَالطَّاقة علَى هَيئة مُؤثر الإجهاد وَالطَّاقة فإنَّ (EFE) تَعني مُعادلات المُوتر المِتري $g_{\mu\nu}$ لمُؤتر رِيتشي وَالإنحنَاء القِياسِي , مُعتمدةً علَى المِتري بِطريقة لاَ خَطية مُعقدة، وَعِند كِتابتها كُليًا فإنَّ (EFE) تُمثِّل عَشرة مُعادلات تَفاضلية جُزئية مُرتبِطةً لاَ خَطية.

يُمكن كِتابة (EFE) بِصُورة أَكثر إندِماجية بِتعرِيف مُوتر آينشتاين:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} \qquad (II-67)$$

وهو تُنسور تَماثلي من الرُّتبة الثانية بشكل دالة في المتري يمكن كتابته كما يلي:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \qquad (II-68)$$

حيث تم إختزال الحد الكوني إلى مؤثر إجهاد– طاقة في طاقة مظلمة وبإستخدام الوحدات الهندسية:

$$1 = \hbar = C = G = K_B = K_e = \frac{1}{4}\pi\varepsilon_0$$

سنستخدم العلاقات C =1 ،G =1، تصبح معادلة آينشتاين كما يلي:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu} \qquad (II-69)$$

الطرف الأيسر يمثل تقوس الفضاء والزمان (الزمكان) الذي يتم إيجاده من المتري بينما الطرف الأيمن يمثل محتوى الطاقة والمادة من الزمكان، بالتالي يمكن تفسير (EFE) كمجموعة من المعادلات مع المعادلة الجيوديسية. تشكل نواة الصيغة الرياضية في النسبية العامة.[6]

II -2-7-2. إصْطِلاَح الإشَارة:

يُمثِّل الشَّكل السَّابق مِن مُعَادلات آينشـتاين للحقل المعيـار الَّـذي تَـم تَأْسيسـه فِـي(كِتـاب مِسْنَر Misner و ثُورْن Thoren و وِيلَرْ Wilar)، حَيثُ قام المُؤَلِّفون بتَحلِيل جَميـع الإصـطلاحات المَوجُودة و صَنفها وِفقًا للإشارات الثَّلاَثَة التَّالية S1، S2، S3:

$$\eta_{\mu\nu} = [S1] \times diag(-1,+1,+1,+1) \qquad (\text{II} - 70)$$

$$R^{\mu}_{\alpha\beta\gamma} = [S2] * \left(\Gamma^{\mu}_{\alpha\gamma.\beta} - \Gamma^{\mu}_{\alpha\beta.\gamma} + \Gamma^{\mu}_{\sigma\beta}\Gamma^{\sigma}_{\gamma\alpha} - \Gamma^{\mu}_{\sigma\gamma}\Gamma^{\sigma}_{\beta\alpha}\right) \qquad (\text{II} - 71)$$

$$G_{\mu\nu} = [S3]\frac{8\pi G}{C^4}T_{\mu\nu} \qquad (\text{II} - 72)$$

الإشَارة الثَّالِثَة أعْلاه تَتعلَّق بإخْتيار الإصطِلاح لِمُوتر رِيتشِي:

$$R_{\mu\nu} = [S2] \times [S3] \times R^{\alpha}_{\mu\alpha\nu} \qquad (\text{II} - 73)$$

إستخدَم البَاحثُون بِما فِيهم آينشتاين إشارة مُختلفة فِي تَعْريفهم لِمُوتر رِيتشِي الَّذي نَتَجَ عَنه إشَارة الثَّابت السَّالبة عَلَى الطَّرَف الأَيمَن:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - g_{\mu\nu}\Lambda = -\frac{8\pi G}{C^4}T_{\mu\nu} \qquad (\text{II} - 74)$$

إذاً نَستعمل هُنا إصطلاحًا للإشارة المِترية {+،+،+،−}.[13]

II -2-7-3. الصِّيغ المُكافئة:

يُمكن كِتابة مُعادلات آينشتاين لِلمجال بِالشَّكل المُكافئ التَّالي:

$$R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu}\Lambda = -\frac{8\pi G}{C^4}\left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Tg_{\mu\nu}\right) \qquad (\text{II} - 75)$$

يُمكن أَن تَكون مُلائمة جدًا ، (مَثلاً عِند حَد المَجال الضَّعيف يُمكن إبدال $g_{\mu\nu}$ فِي الطَّرف الأَيمن بِمُوتر مِينكُوفسكي).

الفصل الثالث

نتائج النسبية العامة وسلوكها في بعض الظواهر الفلكية

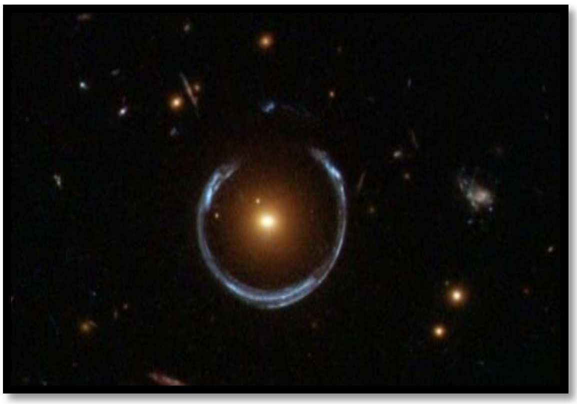
مقدمة:

النظرية النّسبية من أكثر التطورات نجاحا في تاريخ العلم، وذلك من خلال النتائج الجديدة التي قدمتها على صعيد المفاهيم والظواهر الفيزيائية وخصوصا الفلكية منها، فالتجارب والملاحظات بيَّنت أنّ وصف آينشتاين للجاذبية يفسّر العديد من التأثيرات، كالحالات الشاذّة في مدارات عُطارد والكواكب الأخرى، ونتج عن هذا الوصف للجاذبية آثار جديدة مثل الموجات الثقالية، التعدس الجاذبي وتمدد الزمن الثقالي، كما تُعتبر الأساس الذي يقوم عليه الفهم الحالي للثقوب السوداء. فما هي نتائج النّسبية العامة؟ وما سلوكها في تفسير بعض الظواهر الفلكية؟

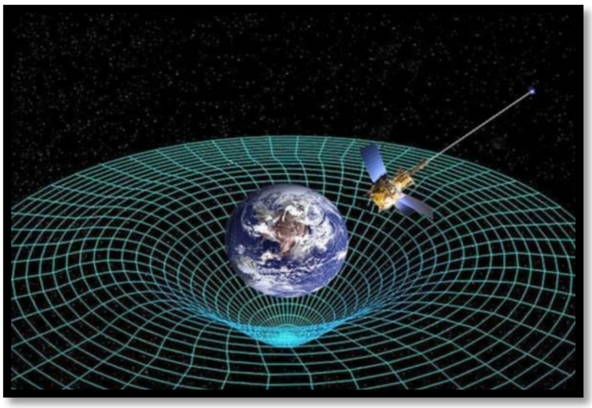
إنّ المبدأ الأساسي الثاني في النظرية النّسبية العامة ينصُ على أنّ وجود المادة أو الكتلة يؤدي إلى إنحناء الفضاء، ووفقا لآينشتاين فإنّ الجاذبية عبارة عن إنحناء في الزمكان ينتج عن وجود جسم فائق الكتلة، حيث أنّ حركته بجوار جسم ضخم يؤدي إلى تكوين مجال حوله وذلك من خلال إحداثه إضطرابا في صفات الفضاء فتكون الحركة وفق ذلك المجال، ونتائج النسبية العامة عديدة سنتطرق في هذا الفصل إلى البعض منها.

III-1. إنحناء الزمكان:

الزمان والمكان يشكلان نسيجا واحدا في النسبية العامة، يدعى الزمكان وهو المجال الذي تدور فيه كل الحركات الكونية، عندما يقوم جسم ما بالتحرك بجوار جسم ضخم سيظهر وكأنّه يُسْحَبُ نحوه، لكن الجسم يتحرك على طول نفس الخط المستقيم في الفضاء، في حين أنّ هذه الخطوط المستقيمة ستظهر منحنية جراء قيام الجاذبية بحني استمرارية الزمكان. [21]



الشكل III-2.: حلقة اينشتاين المعروفة بحذاء الحصان[27]



الشكل III-1. : وصف رباعي الأبعاد للكون(نسيج الزمكان). [17]

يمثل (الشكل.III-2.) المُبَيَّن أعلاه حلقة آينشتاين وهي شريحة ثنائية الأبعاد في فضاء ثلاثي الأبعاد، تُظْهِر إنحناء الفضاء الذي تسبب به جسم كروي الشكل، حسب آينشتاين تَتَّبِع الكواكب الانحناء الموجود في الفضاء حول الشمس (كما أنّها تُنْتِجُ مقدارا صغيرا من الإنحناءات الخاصة بها) [14]. يُعْتَبَر وصف هذا الإنحناء في الفضاء من المفاهيم الرياضية المهمة والصعبة في النظرية النّسبية العامة، التي تصف كيفية إنحناء الفضاء بواسطة المادة، حيث تُحدد النسبيّة العامة حقل الجاذبية كحل في معادلات آينشتاين للمجال:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{C^4} T_{\mu\nu} \qquad (1 - \mathrm{III})$$

حيث: $T_{\mu\nu}$ موتر إجهاد الطاقة، $G_{\mu\nu}$ موتر آينشتاين وC سرعة الضوء وG ثابت الجاذبية

تعتمد تلك المعادلات في النسبية العامة على توزيع المادة والطاقة في نسيج زمكاني، طِبقا لها فإنّ حقل الجاذبية مكون من زمكان رباعي الأحداث، ولذلك يتأثر الزمكان بوجود الكتلة أو الطاقة مما يؤدي لإنحنائه.

في النظرية النسبية العامة تنْظّمُ إليها معاملات في هيئة دوال تعتمد على المكان فيظهر فيها إنحناء الزمكان أو ما يسمى إنحناء (مترية ريمان)، عند التعامل مع (زمكان منبسط) تكون حركة الجسم في خط مستقيم. أمّا في حالة إنحناء الزمكان تكون الحركة طبقا للخط الجيوديسي، الذي تصفه معادلات الحقل لأينشتاين (تصف إنحناء الزمكان بحيث تكون الحركة المنتظمة عبر خط الجيوديسي).[21]

III-2. التمدد الثقالي للزمن:

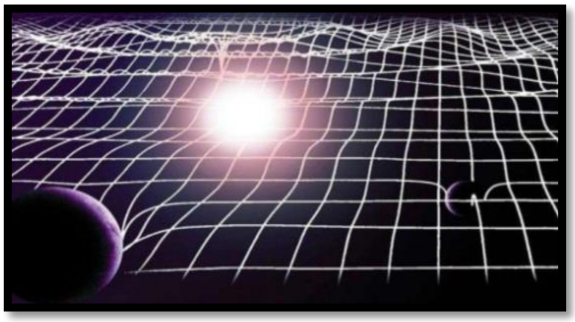
هو شكل من أشكال تمدد الزمن حيث يتمدد الزمن ويحدث فرق فعلي في الزمن الفاصل بين حدثين عندما يتم قياس هذا الزمن بواسطة مراقبين يَرون الحدث من مسافات مختلفة عن الكتلة ذات الجاذبية (كلما كانت الساعة أقرب إلى مصدر الجاذبية) زاد بطئ مرور الزمن وكلما إبتعدت الساعة عن مصدر الجاذبية زادت سرعة مرور الزمن. [23]

تُبَطِّئ حقول الجاذبية القوية من حركة الزمن، بينما يَصِف مفهوم نيوتن الزمن بأنّه قيمة مطلقة تتدفق بشكل مُوحّد في جميع أرجاء الكون، أمّا آنشتاين فأظهر أنّ قياس الزمن هو أمر نسبي يتوقف على الإطار المرجعي للشخص الذي يُجري عملية الحساب أو القياس. أثبتت النظرية النّسبية الخاصة أنّ أجهزة ضبط الوقت في الحركة تقيس أوقاتا وأزمنة مختلفة للحدث وفقا للإطارات المرجعية الخاصة بكل واحد منهم، حيث يُمكن شرح هذا الأمر بالقول أنّ الشخص في حالة سكون والذي يقيس زمن حدث ما في إطار مرجعي يتحرك بسرعة فائقة سيستغرق وقتا أطول مما سيستغرقه شخص أخر يتحرك جنبا إلى جنب مع هذا الحدث. تمّ تأكيد وجود هذا التمدد النّسبي في الزمن من خلال مُسرّع الجُسيمات عالية الطاقة والتي تنتقل عبره الجُسيمات بسرعة قريبة من سرعة الضوء، تحدث نفس العملية في وجود حقول الجاذبية القوية حيث يقيس الشخص الذي يضبط الوقت في حقل جاذبية قوي زمنا أبطأ من الشخص الذي يقيسه في غياب الجاذبية.

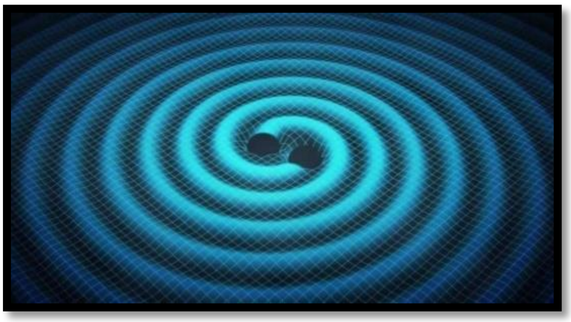
من أهم تطبيقات تباطؤ الزمن في الحقول الجاذبية نظام تحديد المواقع العالمي (G P S)، يمتلك ضبطا لتمدد الوقت بحيث تتواصل الأجهزة الأرضية مع الأقمار الصناعية، إذ تُبرمج هذه المعلومات لتعويض الفارق الزمني إعتمادا على سرعتها وتأثير الجاذبية.

III-3. الأمواج الثقالية:

هي أمواج سريعة جدا غير مرئية تتموج في الفضاء وتنتقل بسرعة الضوء اي ما يعادل 186000 ميل في الثانية وهي قادرة على إحداث إضطراب عند مرورها في نسيج الزمكان (كما في الشكل III-3)، عُرفت هذه الأمواج منذ أكثر من مئة عام عندما قدمت النسبية العامة الأفكار الجديدة عن الفضاء والجاذبية.



الشكل III–3 : اهتزاز و إنحناء نسيج الزمكان.[20]



الشكل III–4 : الموجات الجاذبية.

III-3-1. مصدر الأمواج الثقالية وأنواعها:

إنّ أي كتلة تنتقل بسرعة، ويشمل ذلك الأجسام التي تدور أيضا، ينتج عنها أمواج ثقالية كما أنّها تنتج عن حركة الأجسام وغيرها إلا أنّها تكون أصغر من أن تُرصد، ولذلك يُعد الفضاء أفضل مكان لدراسة هذه الأمواج بسبب العدد الكبير للأجسام الضخمة التي تخضع لحركات سريعة، كالأزواج المدارية للثقوب السوداء (الشكل) والنجوم النيوترونية أو الأمواج الثقالية إلى فئات (LIGO) إنفجار النجوم وقد صنفها العلماء حسب مصدر نشأتها، وهذه الفئات هي:

- **الأمواج الثقالية المتتابعة:**

تنتج عن جسم ضخم يدور حول محوره كالنجم النيوتروني

- **الدوامات الثنائية المزدوجة:**

تنتج عن دوران أنظمة ثنائية ضخمة كالنجوم القزمة والثقوب السوداء والنجوم النيوترونية ويمكن لهذه الثنائيات أن تكون على الشكل التالي:

- ✓ ثنائية نجم نيوتروني
- ✓ ثنائية ثقب أسود
- ✓ ثنائية نجم نيوتروني–ثقب أسود

- **الأمواج الثقالية العشوائية:**

يفترض العلماء وجود أمواج ثقالية صغير تنتقل عبر الفضاء طول الوقت وأنّها مختلطة ببعضها بشكل عشوائي.

- **الأمواج الثقالية المندفعة:**

محاولة رصد هذه الأمواج أشبه بالبحث عن اللامُتوقع بسبب عدم رصدها حتى الآن ووجود الكثير من الأشياء غير المعروفة والتي لايُمكن وضع توقعات عنها بعد، كعدم وجود معرفة كافية لفيزيائية نظام ما للتّمكن من توقع كيفية ظهور أمواج ثقالية من ذلك المصدر.

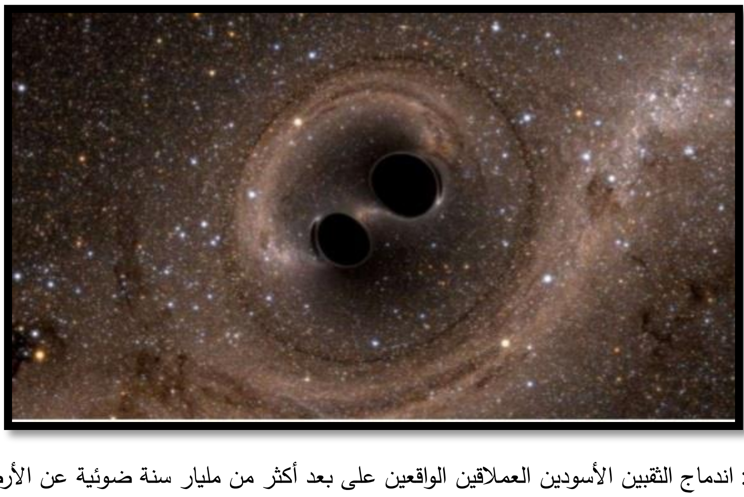
يصدر عند كل من هذه الأمواج إشارة إهتزازية مميزة يستطيع مصدر (LIGO) تحسسها

- **أهمية رصد هذه الأمواج:**

لقد مكّن العلماء رصد الأمواج الثقالية من إكتشاف الكون بطريقة جديدة وأعطى مفهوما أكثر عُمقا للأحداث الكارثية في الكون، ونتج عنه إكتشافات مثيرة في الفيزياء وعلم الفلك.

لقد إعتمد العلماء في السابق بشكل كامل في دراستهم للكون على أمواج x كالضوء المرئي وأشعة (EM) الإلكترومغناطيسية الراديوية، حيث زودت كل من هذه المصادر المختلفة العلماء بمعلومات متممة لبعضها عن الكون، لكن الأمواج الثقالية مختلفة تمام الإختلاف عن إشعاعات (EM)، فهي مرسل معلومات عن أحداث كونية فريد من نوعه، ومكّنت علماء الفلك من دراسة أحداث غير مرئية بالإعتماد على إشعاعات (EM) المتصادمة كالثقوب السوداء.

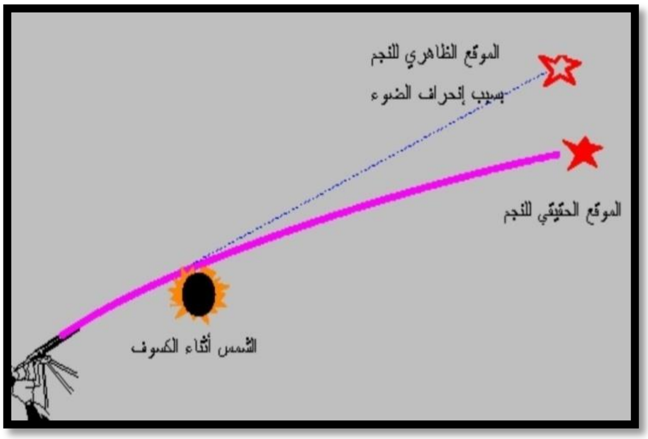
أهم ما يُميز هذه الأمواج هي أنّ تفاعلها مع المادة ضئيل جدا فهي تسافر عبر الكون دون عائق تقريبا على عكس إشعاعات (EM)، وتحمل هذه الأمواج معلومات عن أصول تكونها دون أن يحدث بها أي إضطراب أو إهتزاز كما هو الحال في أشعة (EM) بين المجرات.



الشكل III–5: اندماج الثقبين الأسودين العملاقين الواقعين على بعد أكثر من مليار سنة ضوئية عن الأرض. [20]

III-4. إنحراف الضوء بفعل الجاذبية:

بما أنّ الجاذبية عبارة عن تحدّب للزمكان، يتّبع الضوء في الفضاء المعارج الزمكانية التي يَخُطُّها تحدُّب الفضاء حول الكتل حيث يُعتبر الضوء مجال كهرومغناطيسي يتّبع ما يُسمى بالمعارج الصفرية (Null Geodecics) **(ملحق)** التي تُعدّ مسارات له (الضوء) وهي نفسها خطوط الزمكان، فيصبح بالإمكان معرفة طوبوغرافية الزمكان حول أيّ كتلة إذا تمّ تتبع مسارات أشعة الضوء حولها. ينعرج الضوء حول الكتل الكبيرة فيبدو ذلك واضحا لأنّ تحدّب الزمكان حولها فائق، أي عندما يمر شعاع ضوئي قادم من نجم يقع خلف الشمس، فإنّ تحدّب الزمكان حولها سيجعل هذا الشعاع ينعرج مقتربا منها (الشمس)، وبالتّالي ينحرف إتجاهه قليلا عمّا كان عليه كما هو مبيّن في (الشكل 2). [23]



الشكل III-6: انحراف الضوء بتأثير الجاذبية. [23]

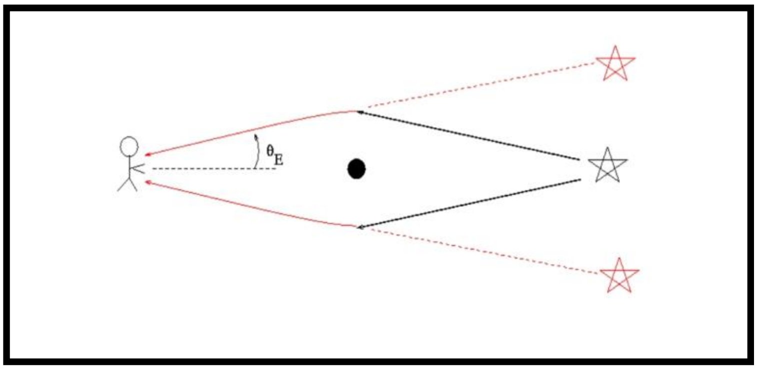
قام أينشتاين بحساب مقدار الضوء الذي ينحرف نتيجة مروره بالقرب من الشمس مرتين، حيث إستخدم في عملية الحساب الأولى كُلا من مبدأ التكافؤ (الطاقة_الكتلة) للفتونات المرئية أو الضوئية، بينما في عملية الحساب الثانية التي نُشرت في عام 1916 م إستخدم مقاييس الزمكان التي تصف الانحناء الذي تسببت به الثقالة في كل من الزمان والمكان فكانت النتيجة التي توصل إليها تبلغ ضعف عملية الحساب الأولى. ويتوقع الحساب الثاني أن الضوء القادم من نجم بعيد الذي يمر بالقرب من الشمس سوف ينحرف بنسبة 1.75 ثانية قوسية (اقل من 1/2000 من الدرجة جاءت أول فرصة لاختبار الحساب لأينشتاين عند حدوث الكسوف الشمسي سنة 1919 م، حيث قام عالم الفلك البريطاني (آرثر ادينغتون Arthur Eddington) برصد انزياح نجوم عنقود القلاص (Hyades cluster stars) عن مكانها وراء الشمس المحجوبة. وعلى الرغم من أنّ قياسات (أدينغتون) ليست دقيقة تماما إلا أنها أظهرت بوضوح

وجود انحراف ورُجحت بأن يكون ذا قيمة أكبر وأعلى كما أصبح من الممكن الآن إجراء هذا الاختبار بدقة أعلى بكثير من السابق، حيث أنّه في كل سنة يتم حجب الجسم المسمى (3C279) الذي يُعَدُّ مصدر للأشعة الراديوية بواسطة الشمس ولا يحتاج علماء الفلك الذين يدرسون هذه الأشعة إنتظار حدوث كسوف وذلك لأنّها (أي الشمس) تعتبر باعثا معتدلا للأشعة الراديوية وقد أكد تداخل الإشعاع الراديوي المنبعث من (3C279) عند عبوره وراء الشمس صحة حساب أينشتاين بأكثر من 1%.

قدمت لنا فكرة انحناء الضوء بفعل الثقالة (الجاذبية) تنبؤا مثيرا تم التحقق منه مؤخرا وهو وجود عدسات الجاذبية والتي تعتبر بمثابة عدسات ضوئية تعمل على تركيز إنحناء الضوء نتيجة لتغير سرعته بسبب عبوره في وسيط مسبب للانحناء و باعتبار أن الثقالة قادرة على جعل الضوء ينحني فإن الأجسام السماوية فائقة الكتلة تؤدي دور العدسات حيث تعمل على تركيز وتضخيم الأجسام البعيدة في الفضاء. تتمتع عدسات الجاذبية (الثقالة) بعدة خصائص تميزها عن العدسات العادية من بينها القدرة على إنتاج صور متعددة. [26]

III-5. عدسة الجاذبية:

نتيجة لانحراف الضوء بتاثير الجاذبية يمكن أن تعمل الكتل الكبيرة المتمركزة في نطاق ضيق، على تركيز الضوء في بؤرة، كما تُركز العدسة البصرية أشعة الضوء وهذا التأثير يؤدي الى ظهور صور عديدة للمصدر الواحد هذا مايسمى بالتعدس الجاذبي (Gravitational Lensing).



الشكل III-7: التعدس الجاذبي[23]

إن التعدس الجاذبي يؤدي الى ظهور صور للمجرات البعيدة والأجرام الموزعة على محيط دائرة تدعى حلقة آينشتاين(Einstein Ring)، يتم الكشف عن الاجرام المخفية ذات الكتل الكبيرة التي لاتصدر اشعاعات والمادة المظلمة في الكون بواسطة ظاهرة التعدس الجاذبي. [23]

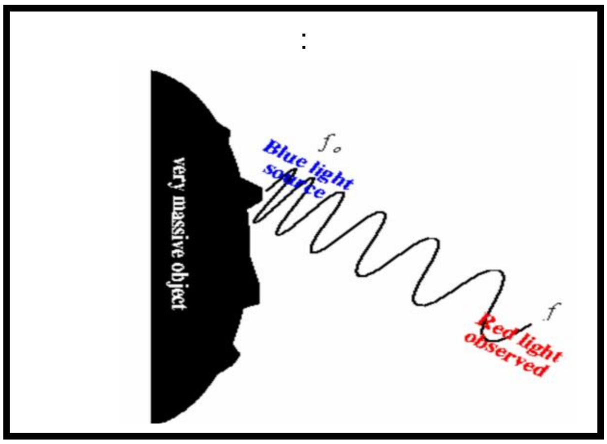
الشكل III- 8: صورة من تلسكوب هابل للتعدس الجاذبي (صليب آينشتاين). [23]

III-6. الإنزياح نحو الأحمر:

يصدر الجسم المعتم الساخن طيف ضوئي، تتعلق شدة هذا الطيف بدرجة حرارة هذا الجسم. لا تستثنى نجوم السّماء من هذه الخاصية فكل نجم يصدر طيف ضوئي خاص به وبمكوناته وبدرجة حرارته، وعند دراسة بعض المتخصصين في هذا المجال للطيف الصادر من بعض النجوم في مجرة درب التبانة، شاهدوا فقدان بعض ألوان الطيف لهاته النجوم وإنزياح ألوان الطيف نحو الأحمر. وبمراجعة ظاهرة دوبلر في إختلاف تواتر الأمواج الصادرة من منبع موجي متحرك نجد ارتفاع تونر الأمواج القادم نحونا وانخفاض تونر الأمواج المبتعد عنا. هذه الظاهرة لجميع الأمواج سواء الصوتية، الضوئية أو كهرومغناطيسية، إذا كان منبع الضوء يبتعد فهو ذو تونر منخفض، أي طيف هذا المنبع الضوئي منزاح نحو الأحمر وإذا كان منبع الضوء يقترب فطيفه بتوتر عالي، أي منزاح نحو الأزرق أو البنفسجي، وإذا كان الكون في حالة سكون فإنّ مجموع الإنزياحات نحو الأحمر تساوي مجموع الانزياحات نحو الأزرق. عمليا سجلت الأرصاد الفلكية أن طيف جميع المجرات منزاح نحو الأحمر ونسبة هذا الإنزياح تتناسب طرديا مع بعد المجرة عن الأرض، وهذا يؤيّد فكرة الكون المتسع. لم تفسر نظرية نيوتن علة الانزياح نحو الأحمر في الطيف الصادر من النجوم حتى فسرت النسبية العامة هذه الظاهرة، وأرجعت السبب إلى حقل الجاذبية. نسبيا أُطلقت على هذه الظاهرة " الانزياح نحو الأحمر بالجاذبية "، وهي لو أنّ نجما ذو حقل جاذبية قوي يصدر شعاع ضوئي، تردده قرب هذا النجم نتيجة هذا الحقل عالي جدا، إذن هو مزاح نحو

البنفسجي، لكن كلما ابتعد هذا الشعاع الضوئي عن هذا النجم قل أثر حقل الجاذبية عليه، وبالتالي ينخفض تردده. يؤدي هذا الانخفاض إلى إنزياح لونه نحو الأحمر. ساعة المرجع التي يقاس بها الزمن يمكن أن تكون أي وسيلة ذات حركة تناوبية منتظمة. [19]

بما أنّ جاذبية الأجسام تؤثر على الزمن وتبطئه، فعلى سبيل المثال الساعة بالدور الأرضي لمبنى قريبة من الجاذبية تكون دقاتها أبطأ من دقات الساعة بالأدوار العلوية، والإحساس بهذا التغيّر يكون منعدما نظرا للتغير الطفيف جدا لقيم الجاذبية القريبة من الأرض، بالمقارنة فإنّ تردد موجات الضوء تعمل عمل دقات الساعة حيث أنّنا نستطيع حساب عدد ذبذبات الضوء المار بالثانية لذلك فإنّ الشعاع الضوئي ذو التردد الثابت f_0 اللون الأزرق كما في (الشكل III-9) والمنطلق بالقرب من مركز الجاذبية سوف يقل تردده بالإتجاه بعيدا عن مركز الجاذبية ويصبح (f) حيث: $(f < f_0)$ وبالتالي يزداد طوله الموجي، اللون الأحمر كما في (الشكل III-9) ولأن الزيادة في الطول الموجي هي الإزاحة الحمراء لذلك سميت الإزاحة الجاذبية الحمراء أو الإزاحة الحمراء لأينشتاين. وقد تم قياس هذا التأثير عام 1960 بواسطة العالمين باوند وريبكا (Robert Pound end Rebka) وذلك باستخدام أشعة جاما. والإزاحة المقاسة عمليا بواسطتهما تعتبر صغيرة بالمقارنة مع الإزاحات الناتجة من طيف النجوم عالية الكثافة مثل نجوم الأقزام البيضاء (White dwarfs).



الشكل III-9: الإزاحة الحمراء والزرقاء.

ملاحظة مهمة هي يجب عدم الخلط بين إزاحة الجاذبية الحمراء وإزاحة دوبلر، حيث أنّ الأخيرة تتطلب حركة مصدر الضوء قريبا أو بعيدا من المراقب وعلى العكس تماما فإن إزاحة الجاذبية الحمراء تتسبب من تمدد الزمن ولا تتطلب أي حركة من المصدر أو المراقب.

الإثبات النظري للزاحة الحمراء:

من نظرية هيزن بارغ (Heisen Berg) الإزدواجية للطاقة والمادة نجد أن علاقة الطاقة الكلية (E) لجسيم مثل الفتون تردده f_0 وكتلته m تعطى بالمعادلة:

$$E = mc^2 = hf_0 \qquad (3-\mathrm{III})$$

من العلاقة الأخيرة نجد أنّ طاقة الوضع لجسيم كتلته m من جسيم آخر كتلته M تحسب كالتالي:

$$U = -G\frac{Mm}{r} = -G\frac{Mh}{rc^2}f_0 \qquad (4-\mathrm{III})$$

عند هروب الفتون من مجال الجاذبية يكتسب تردد مختلف يأتي من العلاقة :

$$hf = hf_0\left[1 - G\frac{M}{rc^2}\right] \Rightarrow \frac{f-f_0}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} = -G\,\frac{M}{rc^2} \qquad (5-\mathrm{III})$$

حيث أنّ الإزاحة باتجاه التردد الأقل تسمى إزاحة الجاذبية الحمراء، وهذا في حالة الضوء أو الفتون عندما يترك مجال الجاذبية. أمّا إذا سقط الضوء في مجال الجاذبية فإنّ الإزاحة تعطى بالعلاقة:

$$hf = hf_0\left[1 + G\frac{M}{rc^2}\right] \Rightarrow \frac{f-f_0}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} = +G\,\frac{M}{rc^2} \qquad (6-\mathrm{III})$$

وتُسمى الإزاحة الجاذبية الزرقاء، والصورة العامة للقانون هي:

$$f = f_0\left[1 \pm G\frac{M}{rc^2}\right] \qquad (7-\mathrm{II}$$

حيث أنّ الإشارة السالبة (-) للضوء الهارب من مجال جاذبية النجم، والإشارة الموجبة (+) للضوء الساقط في مجال جاذبية النجم.[11]

III-7. زحزحة مدارات الكواكب ومدار عطارد:

وِفق هذا المفهوم تبيّن أنّ مدارات الكواكب غير مُستقرة، بمعنى أنّ الكوكب لا يعود إلى موضع حضِيضه الأول عند إكماله دورته. فطبق آينشتاين نظريته النسبيّة العامة على حركة كوكب عطارد، فاكتشف وجود قوة جذب كبيرة تجعل من الكوكب يتحرك بشكل أبعد قليلا في كل مرة يدور فيها حول الشمس.

تُعطى معادلة مدار الكواكب في الميكانيك الكلاسيكي بالشكل التالي:

$$\frac{d^2u}{d\phi^2} + u = \frac{GM}{h^2} \qquad (8 - \mathrm{III})$$

حيث أنّ M كُتلة الجِسم الجاذب و h سُرعة عَزم الكواكب بِالنِّسبَة لِمِحور الجَاذِبيَة أي:

$$\mathrm{r}^2 \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = h \qquad (9 - \mathrm{III})$$

امّا في النسبيه العامه تعْطى كما يلي:

$$\left(w = \frac{d\phi}{ds} = \frac{\alpha}{r^2}\right) \qquad (10 - \mathrm{III})$$

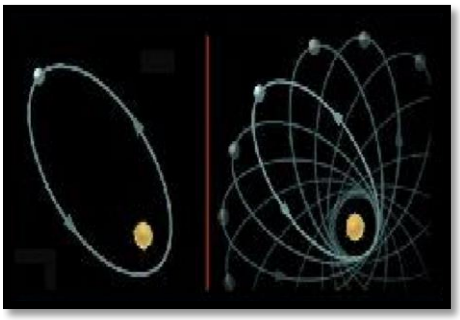
حيث α هي نصف قطر مدار الكوكب حول الشمس (القطر الأطول)

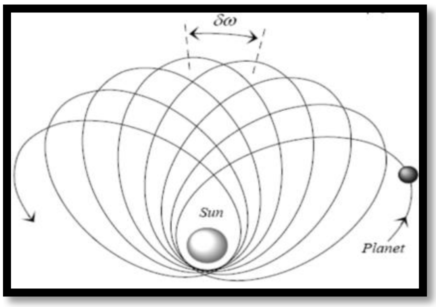
نقطة الحضيض لمدار الكواكب عامة هي:

$$\delta\omega = \frac{6\pi \mathrm{GM}}{\mathrm{c}^2(1-\mathrm{e}^2)\, a} \qquad (11 - \mathrm{III})$$

أمّا نقطة الحضيض لكوكب عطارد :

$$\delta\omega = 5.019775 \times 10^{-7} \text{ radian}$$





الشكل III-9: مدار عطارد. [26]

الشكل III-10 : نقطة حضيض عطارد.[23]

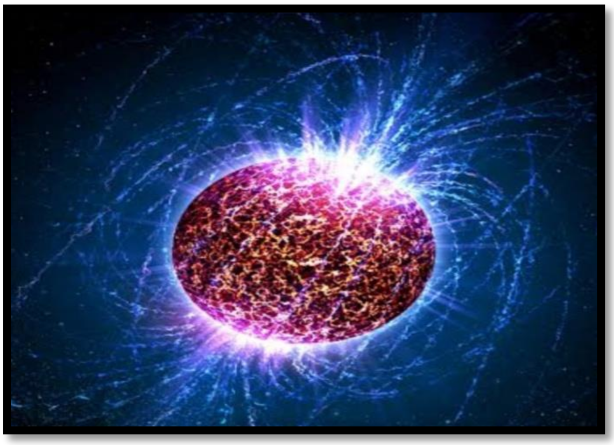
III-8. النجوم النيوترونية:

النّجوم النيوترونية أو البلازارات واحدة من بين أكثر الأشياء عنفا وغرابة في الكون، حيث أنّها نوى ذرية عملاقة يبلغ قطرها بضعة كيلومترات فقط، لكنّها ثقيلة مثل النّجوم وهي أحد النهايات المحتملة للنّجوم الضخمة فائقة الكتلة. عندما تنفجر تلك النّجوم في شكل مستعر أعظم مخلفة وراءها جسم صغير فائق الكثافة يتم ضغط كل كتلته التي تصل إلى ضعف كتلة الشمس في نجم يبلغ عرضه حوالي 25 كلم، كثافة مادته عالية جدا حيث أنّ السنتمتر مكعب من مادته يزن على الأرض بليون طن، تبلغ كتلة النجم النيوتروني حوالي 1.5 كتلة شمسية أو أكثر، له مجال مغناطيسي قوي يدور حول نفسه بسرعة كبيرة جدا كما يمكنه إرسال كميات هائلة من الأشعة.

الشكل III-11 : خصائص النجم النيوتروني[30]

III-8-1. تشكل النّجوم النيوترونية:

عند سحب الجاذبية لكتلة فائقة جدا من البلازما إلى الداخل، تنضغط المواد بقوة هائلة لدرجة تنصهر معها النوى، فيندمج الهيدروجين ليتحول إلى هيليوم تنتج من خلاله طاقة تندفع للخارج محاولة الإفلات بعكس الجاذبية لذلك تبقى النّجوم مستقرة لحدّ ما، فتعيش النّجوم نتيجة محافظتها على التوازن الدقيق بين الجاذبية التي تضغط إلى الدّاخل والطاقة النّاتجة عن الإندماج النّووي في قلب النّجم التي تدفع للخارج.

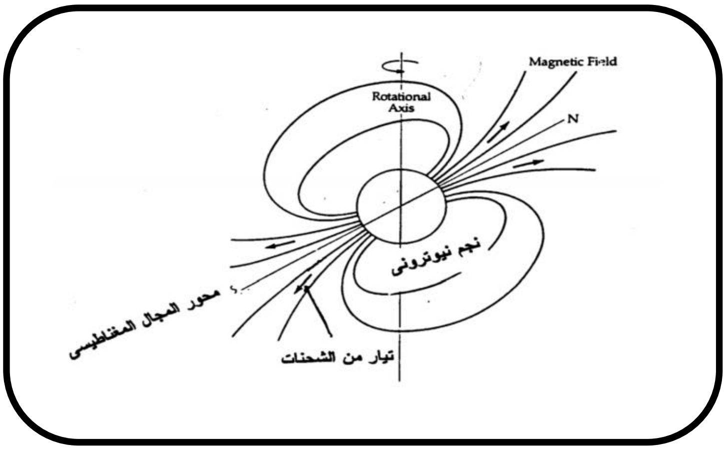


الشكل III-12: نجم نيوتروني معزول [31]

عندما ينفذ الهيدروجين في النّجوم التي تبلغ كتلتها أضعاف كتلة الشمس يختل التوازن فيها حيث تضغط الجاذبية على النّجم بقوة أشد من ذي قبل، فتتضاعف سرعة إختراق النواة ودرجة حرارتها في وقت تتضخم فيه الطبقات الخارجية للنّجم مئات المرات لتنصهر مشكلة عناصر أثقل بكثير فيحترق الكربون ليتحول إلى نيون الذي يتحول بدوره إلى أكسجين ثم إلى سيلكون فيتحول هذا الأخير إلى حديد وهنا يموت النّجم حيث لا يستطيع تشكيل عناصر أخرى فيتوقف الإنصهار فجأة لتختفي الطاقة التي تدفع للخارج بعكس الجاذبية، هنا تُضْغَط كرة حديدية بحجم الأرض ليصبح قوامها مادة نوويّة فقط، حيث أنّ الإنهيار لا يقتصر فقط على النواة فالنّجم ينهار بأكمله حيث تسحب الجاذبية الطبقات الخارجية باتّجاه الداخل بسرعة تعادل ربع سرعة الضوء فَيَرْتَدُ هذا الإنهيار عن النّواة الحديدية فتنتج عنه صدمة تنفجر بإتجاه الخارج وتقذف ما تبقى من النّجم في الفضاء وهذا ما يطلق عليه إنفجار السوبرنوفا الذي يطغى بريقه على بريق مجرات بأكملها وما تبقى من النّجم هو نجم نيوتروني.

III-8-2. تسمية النجم النيتروني أو البلازار:

ضغط النّجم المنهار هائل جدا لدرجة أنّ إلكتروناته وبروتوناته تندمج متحولة إلى نيوترونات وهكذا يحصل النجم النيوتروني على اسمه من خلال تركيبته، كما يُعْرَف أيضا بالبلاازار نتيجة أنّه يمكن رصده من خلال نبضات تخرج من القطب الشمالي والقطب الجنوبي حيث تخرج منها أشعة النيوترينو من عند قطبي المجال المغناطيسي، ونتيجة لفه الرهيب فإنّ أشعته تبدو كوميض يخرج من النجم عندا يواجه الأرض بأحد قطبيه كما يوضحه الشكل(19).



الشكل III-13 : بلازار يصدر أشعة تبدو كوميض نتيجة

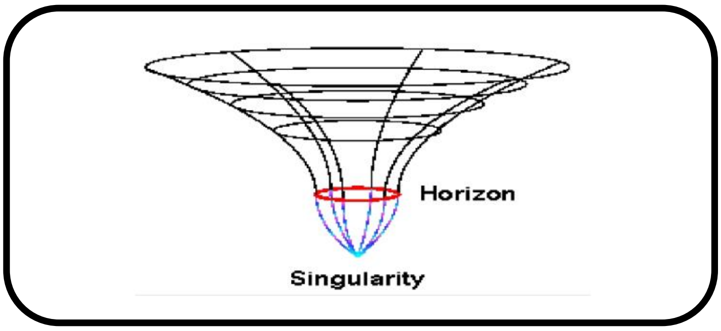
III-8-3. وصف داخلي للنجم النيوتروني

جاذبية النّجم النيوتروني هي الأقوى في الكون باستثناء جاذبية الثقوب السوداء، حيث ينحني الضوء حوله وهذا يعني أنّه يمكن رؤية الجزء الأمامي والأجزاء الخلفية منه. تصل درجة الحرارة على سطحه إلى مليون درجة مئوية، وعلى الرغم من أنّ هذه النوى الذرية العملاقة نجوم فإنّها تشبه الكواكب في نواحي كثيرة لوجود طبقة قشرة صلبة فوق النواة السائلة. عند عمق أكبر داخل النجم النيتروني تضغط الجاذبية على النواة بشكل قوي، فَتَقِل البروتونات حيث يندمج معظمها إلى نيوترونات حتى تصل إلى قاعدة القشرة، هنا يتمّ ضغط الأنوية معا بشدة لدرجة أنّها تبدأ في التلامس فيُعاد ترتيب البروتونات والنيوترونات، لتُشكل أُسطوانات طويلة وألواح نوى هائلة بها ملايين البروتونات والنيوترونات وهي كثيفة لدرجة أنّها قد تكون أقوى مادة في الكون غير قابلة للكسر كما لا يُوَّلِد النّجم النيوتروني أي ضوء أو حرارة خاصة به. [24]

الشكل III–14: التركيب الداخلي لنجم نيوتروني.[29]

III–9. الثقوب السوداء:

هو جسم مضغوط بدرجة كبيرة بحيث لا يستطيع أي شيء بما في ذلك الضوء الهروب من جاذبيته. يُعَرَّفُ الثقب الأسود بالمفاهيم الرياضية بأنّه جسم يبلغ حجمه صفر أمّا كثافته فهي لانهائية وكتلته متناهية، أظهر حساب شوارزشيلد أنّ نصف القطر الثقالي والمسمى أيضا بنصف قطر شوارزشيلد أو أفق الحدث، يوفّر حجما فعالا للثقب الأسود لأنّه لا يوجد شيء يمكنه الهرب من الشعاع الثقالي، كما لا يمكن وجود أي تواصل بين الأجسام الموجودة داخل نصف القطر الثقالي وبين العالم الخارجي.



الشكل III-15: الزمكان المنحني حول الثقب الأسود.[26]

تتكون الثقوب السوداء بفعل النّجوم فائقة الكتلة كجزء طبيعي من عملية التطور النجمي. حيث يتمتع الثقب الأسود النّاتج عن انفجار نواة نجمية بكتلة تقدر بأكثر من ثلاث كتل شمسية.[26]

تعتبر الثقوب السوداء من أفضل الطرق التي تفسر تطور النّجوم ذات الكتل العالية في حالة ما بعد النجوم النيوترونية، بالإضافة إلى تفسير ما هو موجود داخل مركز المجرات أو النقص الملحوظ في كتلة الكون المرئي، وهناك العديد من النّجوم التي يرشحها العلماء على أنّها ثقوب سوداء. فكرة الثقوب السوداء تعني أنّ قوة الجاذبية تعمل على إرتاداد الأشعة التي تصدر من النّجم بحيث ترغمها على العودة إليه مرة ثانية وبالتالي لا يُرى منه شيء، لذلك لا يمكن رؤية الثقوب السوداء، لكن يمكن التعرف عليه من خلال تأثير جاذبته على الوسط المحيط به. قد لوحظ إنحراف الضوء المار بالقرب من الشمس مما يدّل على قوة تأثير الجاذبية للشمس على الضوء كما في (الشكل6)، لذلك فإنّ قوة الجاذبية الهائلة التي يمتلكها الثقب الأسود تعد الأقوى، فتمنع خروج الضوء من النّجم. في هذه المرحلة إذا كانت كتلة النجم النيتروني تزيد عن ثلاث كتل شمسية فإنّ هذا النجم ستكون لديه قوة جاذبية تستطيع أن تتغلب على القوة بين النيوترونات المنحلة وبالتالي لن تتوقف عملية الانكماش عند مرحلة انحلال النيوترونات، ولكنّها ستتقدم في عملية الانكماش لمرحلة الثقب الأسود. تصبح سرعة الهروب من الثقب الأسود مساوية لسرعة الضوء، وبالتالي لن تستطيع أي أشعة أن تخرج من الثقب الأسود، ومن هنا أصبح من غير الممكن أن نراه لعدم خروج الأشعة منه، بالتالي فإنّ أعماق الثقب الأسود لا يمكن رصدها. ويعرف السطح الفاصل بين الثقب الأسود والعالم الخارجي المحيط به أفق الحدث (Event Horizon)، ومن المتوقع أن يكون الثقب الأسود متعادل كهربائيا وأنّه يمتلك تسارع زاوي نتيجة الدوران. خارج أفق الحدث وبعيدا عن الثقب الأسود فإنّ المادة تشعر بانجذاب (Dizzy) وفي داخل دائرة الإيرجوسفير (Ergosphere) فإن المادة تشعر بأن الثقب الأسود يسحبها مع بقاء إمكانية هروبها، فتنقص المادة أثناء هروبها من طاقة الدوران للثقب الأسود. أمّا داخل أفق الحدث في نظام ثنائي ويمتص مادة من رفيقه، فإنّ المادة المتجمدة نحوه تسخن وترسل أشعة سينية تماما كما يحدث في النجم النيوتروني وهذه تعتبر أحد الوسائل التي يمكن من خلالها الاستدلال على وجود الثقب الأسود من خلال وجود الأشعة السينية وإمكانية تقدير كتلة النجم نفسه، فإذا كانت كتلته تزيد عن ثلاث كتل شمسية فهو ثقب أسود وإن كانت أقل من ذلك يمكن أن يكون نجم نيوتروني.[22]

III-9-1. شكل الثقب الأسود:

يمكن حساب سرعة الهروب من الثقب الأسود باستخدام المعادلة التالية:

$$V = \left(\frac{2GM}{R}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (12 - \mathrm{III})$$

حيث أنّ سرعة الهروب من الثقب الأسود تساوي سرعة الضوء فإنّ نصف قطر الثقب الأسود يمكن حسابه من المعادلة التالية:

$$R = \frac{2GM}{C^2} \qquad (13 - \mathrm{III})$$

هذه المعادلة تعرف بمعادلة نصف قطر شوارتزشيلد (Schwartzchild) وهي تعتمد على كتلة النجم فقط وتدّل الحسابات على أنّ نجما بحجم الشمس عندما يصبح ثقبا أسودا لابد أن ينكمش حتى يصبح نصف قطره حوالي 3 كم فقط كما هو مبيّن في الجدول التالي :

الجرم	الشمس	الأرض	المشتري	نجم كتلته 150 كتلة شمسية	حشد نجمي	نواة المجرة
نصف القطر كثقب أسود	3 كم	0.9 سم	2.9 سم	150 كم	50 ألف كم	1-100 مليون كم

الجدول III−1: حجم الثقب الأسود بالنسبة للأجرام السماوية [22]

حسب النظرية النّسبية العامة، لابد أن يتأثر الفضاء المحيط بالثقب الأسود بحيث يحدث له إنحناء في إتجاه الثقب الأسود. يعتقد الفلكيون أنّ الثقب الأسود إذا كان ضمن نظام ثنائي فإنّ انتقال المادة يكون من النجم المصاحب إلى الثقب الأسود فتدور حوله مكونة حلقة من المادة التي ترتفع درجة حرارتها إلى أكثر من مليون كالفن ولذلك تكون مصدرا للأشعة السينية.

يبيّن الجدول التالي الإزاحة الطيفية للثقب الأسود بالمقارنة مع أجرام أخرى، ويتضح أنّ الثقوب السوداء تمتلك إزاحة طيفية عالية جدا.

الجرم	الإزاحة الطيفية (%)
الشمس	0.0002
القزم الأبيض	0.01
النجم النيوتروني	20
الثقب الأسود	∞

الجدول III–2: الإزاحة الطيفية في الشمس ونهايات النجوم[22]

للثقوب السوداء عدة خصائص أهمها :

- جسم متناهي الصغر نصف قطره 3 كم.
- كتلته تزيد عن ثلاث كتل شمسية.
- لا تخرج منه أشعة إطلاقا، لذلك لا يمكن رؤيته.
- يصدر أشعة سينية من أي مادة تدور حوله من النجم المرافق.
- ينحني الفراغ نحوه بسبب جاذبيته العالية.
- ينحرف الضوء نحوه.
- يبتلع ما يقترب منه من مادة إذا دخلت في منطقة حرجة قريبة منه.[22]

III-9-2. أنواع الثقوب السوداء :

تتباين الثقوب السوداء من حيث حجمها، فمنها الكبيرة ومنها ذات الحجم الصغير الذي لايتجاوز حجم الذّرة ولكن كتلتها ضخمة جدا، صنّف العلماء الثقوب السوداء إلى ثلاثة أنواع رئيسية هي:

- **الثقوب السوداء النجمية (bhack holes stellar):**

يتشكل هذا النوع من انهيار نجوم كبيرة الحجم، تنضغط بعد انهيارها حتى تشكل ثقبا أسود، أماّ عند تعرض النجوم الأصغر التي تصل كتلتها إلى ثلاثة أضعاف الكتلة الشمسية للإنهيار فإنّ مركزها لايتحول إلى ثقب أسود بل يصبح نواة جديدة تسمى النجم النيوتروني أو قزم أبيض.

- **الثقوب السوداء الهائلة (supermassive black holes):**

إنّ الثقوب السوداء الهائلة كبيرة جدا، إذ تتراوح كتلتها بين ملايين إلى مليارات أضعاف كتلة الشمس، على الرغم من أنّ كتلتها كبيرة إلا أنّ حجمها مساوٍ لحجم الشمس، إذ أنّ نصف قطر كل منهما متماثل ويُعتقد أنّ هذه الثقوب موجودة في قلب كل مجرّة في الكون، وقد فسّر العلماء وجودها بعدّة نظريات منها:

- ✓ إندماج عدد كبير منها يصل إلى مئات أو آلاف من الثقوب السوداء النجمية معا.
- ✓ إنهيار مجموعة من النجوم في وقت واحد، وتجمّعها لتكوّن هذه القوى الهائلة

- **الثقوب السوداء المتوسطة (Intermediate black holes):**

أُكْتُشف هذا النوع مؤخرا حيث أنّه ينتج عن إصطدام مجموعة من النجوم في تفاعل متسلسل، حيث أنّه إذا وُجِد العديد منها في منطقة واحدة فقد تنتهي معا في مركز المجرّة مُكونة ثقبا أسود هائلا، أُكتشف هذا النوع مؤخرا في 2014 م حيث عُثِر على ثقب أسود متوسط الكتلة في ذراع مجرة حلزونية.

III-9-3. نهاية الثقب الأسود:

يبقى الثقب الأسود على قيد الحياة داخل المجرات ما دام قادرا على جذب النجوم، الغبار، والغازات بفعل الجاذبية المميزة له، وتَستمر هذه العملية بالتراكم ويُذكر أنّ عملية الإندماج مع ثقب أسود آخر تُساهم في بقائه فيزداد حجمه وكتلته. مع مرور الزمن ونفاذ المواد حول الثقب الأسود تزداد عملية التبخر ويزداد معدل الجسيمات الهاربة، فيدخل الثقب الأسود في حالة السكون، ويبدأ نموه بالتراجع فتقل كتلته وتتناقص طاقته نتيجة فقدان كمية من الطاقة. بالإضافة إلى ذلك فإنّ ميكانيكا الكم تُبيّن أنّ طاقة الفراغ تتغير بمرور الزمن، وتبدو هذه التغيرات على عينة جسيم وجسيم مضاد، أحدهما موجب والآخر سالب والتي عادة ما تدمر بعضها البعض، وعند ظهورها قرب أُفق الحدث (Event horizon) للثقب الأسود يسقط الجُسيم ذو الطاقة الموجبة منه. ذلك يؤدي إلى تقلص الثقب الأسود في النهاية، حيث في نهايته تحدث مجموعة من الإنفجارات الهائلة بداخله تؤدي إلى إختفائه بعد مرور وقت طويل يُقدّر بحوالي 10100 سنة.[28]

خاتمة عامة

النظرية النسبية غيرت الكثير من المفاهيم الأساسية في الفيزياء كالمكان والزمان والكتلة والطاقة، أحدثت نقلة نوعية في الفيزياء النظرية وفيزياء الفضاء. حيث نشر ألبرت آينشتاين نظريته النسبية الخاصة في عام 1905م، وهي توافق بين قوانين نيوتن للحركة والديناميكا الكهربائية. قدمت النسبيّة الخاصة إطارا جديدا للفيزياء بإقتراحها مفاهيم جديدة للزمان والمكان، كان هناك عدم توافق بين هذا الإطار الجديد ونظرية نيوتن للجاذبية التي تصف التجاذب المتبادل بين الاجسام بفعل كتلتها، فنشر آينشتاين النظرية النسبية العامة في عام 1915م وافق فيها بين قانون الجاذبية لنيوتن والنسبية الخاصة حيث أثبتت أنّها متوافقة مع التجارب والملاحظات. وختاما لبحثنا هذا الذي تعرفنا في فصله الأول على مفاهيم حول النظرية النسبية الخاصة والعامة، أماّ الخاصة وجدنا أنّها غيّرت مفهوم الحركة لنيوتن الذي ينص على أنّ كل الحركة نسبية، ومفهوم الزمن من كونه ثابت ومحدد إلى كونه بُعد آخر غير مكاني فجعلت الزمان والمكان شيئا واحد يُدعى الزمكان. أمّا النسبية العامة فقد نصت على أنّ التأثير الملحوظ للجاذبية بين الكُتل ناتج عن إنحناء للزمكان بفعل هذه الكُتل، ومن أجل داسة النسبية العامة وفهمها لابد من دراسة السطوح الريمانية و العمليات الحسابية على التينسور، والدخول في هذه المفاهيم يُدخلنا إلى علوم الرياضيات من أوسع أبوابه. هذا ماتطرقنا له في الفصل الثاني بعنوان البنية الرياضية لمعادلات آينشتاين حيث توصلنا فيها إلى أنّ الإنحناء الجيوديسي من أهم النظرية النسبية العامة، فالمادة تُقوس الفضاء لتصبح أقصر فاصلة بين نقطتين تقع على خط منجني وليس مستقيم. كما أنّ فحوى النظرية النسبية هو دراسة حركة الأجسام التي تتحرك بسرعة سواء متسارعة أو متباطئة، فوجدنا أنّه من خلال معادلات النظرية النسبية العامة يمكن حساب إنحراف الضوء عند مروره قرب كتلة ضخمة كانت هذه من بين نتائج النسبية العامة التي توصانا إليها في الفصل الثالث بعنوان نتائج النسبية العامة وسلوكها في بعض الظواهر الفيزيائية. حيث تعرفنا على بعضها كإنحناء الزمكان التي تستجيب فيه الأجسام للجاذبية بإتباعها لإنحناء الفضاء بالقرب من الكتل الكبيرة جدا والتمدد الثقالي للزمن وعدسة الجاذبية.

قائمة المراجع:

أولا) المراجع باللغة العربية :

[1]- د. فلاح سكيك، النظرية النسبية، ترجمة الفصل39 من كتابة سيرويه، إصدارات المركز العلمي للترجمة،2008.

[2]- برتراند راسل، ترجمة: فؤاد كامل،كتاب ألف باء النسبية, مكتبة الأسرة، 2002.

[3]- مروة إبراهيم، النسبية Relativity إصدارات المركز العلمي للترجمة،.2009.08.26 م

[4]- د. إبراهيم محمود أحمد ناصر،د. إبراهيم عبد الرحمن، النظرية الخاصة، الكون والنظرية النسبية، .2007

[5]- د. علي مصطفى مشرفة بك، كتاب النظرية الخاصة، القاهرة، مطبعة لجنة التأليف والترجمة والنشر، 1945.

[6]- محمد أبو زيد، كتاب محاضرات في النسبية الخاصة والعامة، 3 فبراير 2015.

[7]- ألبرت أينشتاين، محاضرة نوبل عام 1921.

[8]- د. طالب ناهي الخفاجي، النسبية بين نيوتن وأينشتاين، دار القلم بيروت،1978.

[11]- أ.د. إبراهيم ناصر، النظرية النسبية، نظرة عامة ، قسم الفيزياء، كلية العلوم جامعة الملك للبترول والمعدن.

[12]- ألبرت أينشتاين, النسبية، النظرية الخاصة والعامة.

[15]- مالكي أحمد، مذكرة تخرج ماجيستير علم الكون الديناميكي في الفضاء، الزمكان غير ريماني والطاقة المظلمة، جامعة قسنطينة، كلية العلوم،قسم الفيزياء، تخصص فيزياء فلكية، 2011/07/16.

[16]- أينشتاين، النظرية النسبية، معادلات اللاخطية، دار القلم، بيروت، 1981.

[19]- جلال الحاج عبد، نظرية النسبية العامة لأينشتاين، 17 اكتوبر 2010.

[20]- يوسف البناي، البنية الواسعة للزمان و المكان، مقدمة إلى النظرية النسبية العامة، ط 1، 2016.

[23]- الأستاذ محمد باسل الطائي, الكون والعدم، بحث في صيرورة العالم، تطوره وغايته.

ثانيا) المراجع باللغة الأجنبية:

[9] Spagnou, Pierre. "Le principe d’équivalence et l’effet Einstein." Bibnum. Textes fondateurs de la science (2015).

[10] Kenyon, Ian R. Relativité générale .1990.

[13] Thorne, Kip S., Charles W. Misner, and John Archibald Wheeler. Gravitation. San Francisco: Freeman, 2000.

[14] Raffestin, Claude. "Espace, temps, frontière." Cahiers de géographie du Québec (1974).

[17] NASA .

[18] Flores, Francisco. "L'équivalence de la masse et de l'énergie." Encyclopédie de philosophie de Stanford (2009).

[21] Encyclopaedia of Physics, R.G. L. Trigg, 2nd Edition, VHC Poblishers, Hans Warlimont, Spinger, 2005.

[22] The physics of star, RB Larson- Reports on Progress in Physics,2003.

[24] Regimbau, Tania. Etoiles à neutrons et ondes gravitationnelles. Diss. Université Nice Sophia Antipolis, 2001.

[25] Tsamparlis, Michael. Special relativity. Berlin: Springer, 2010.

[26] Gene Smith’s , Astronomy Toutorial, General Relativity end Black Holes, Univercity of California, San Diego centre for Astrophysics End Space Sciences.

[27] ESA.HUBBLE and NASA.

[28] The Beginning to the End of the Universe, How black holes die,Astronomy,Retrievd 27/9/2021.

[29] Adapted from NASA Goddard SVS.

[30] Article, aljazzira Net

[31] Casey Reed- Penn State Univercity.

الملاحق:

الزمكان (Espace-temps): هو دمج لمفهومي الزمان والمكان وهو الفضاء بأبعاده الأربعة المكانية (الطول، العرض، الارتفاع) والزمن كبعد رابع.

نظرية الكم (Mécanique quantique): هي مجموعة نظريات فيزيائية مرتبطة ببعضها ظهرت في القرن العشرين، لتفسير الظواهر على مستوى الذرة والجسيمات.

الأثير (Éther): وجود وسط أو مادة، أو مجال يملأ الفضاء، يعتقد أنه ضروري كوسيط لنقل الموجات الكهرومغناطيسية.

أهداب التداخل(Interference fring): ظاهرة فيزيائية تحدث بين الموجات المقترنة فيحدث بينها تداخل نتيجة صدورها من مصدر واحد، أو تقاربها في قيمة التردد.

الكهرومغناطيسية(Électromagnétisme): هي الحركة المغناطيسية الكهربائية، حيث يؤثر مجال مغناطيسي على الشحنة الكهربائية.

فضاء منكوفسكي (Espace de Minkowski): هو البناء الرياضي الذي تستند إليه النظرية النسبية الخاصة لأينشتاين وهو يعني الفضاء ذي الأبعاد الأربعة التي تدمج لتشكل الزمكان.

الفضاء الإقليدي (Espace euclidien): هو الفضاء الرئيسي للهندسة الكلاسيكية، هو فضاء متجهي E معرف على حقل الأعداد الحقيقية مزود بجداء سلمي وبعده منته.

مكان مطلق(Temps newtonien): يمكن قياس الحركة المطلقة لجسم ما من مكان مطلق إلى مكان آخر والمكان المطلق من حيث طبيعته الخاصة ودون التأثير بأي شيء خارجي يبقى دائما ساكنا بلا حركة.

محور الإسناد (Axis of reference): هو المكان الذي يقوم فيه شخص ما برصد حدث ما، والشخص هنا يسمى المراقب لأنه يرصد الحدث ويقوم بالقياسات.

الجيوديسيا (Géodésie): علم المساحة التطبيقية أو وقد يعرف أيضًا بعلم تقسيم الأرض وعلم شكل الأرض ومساحتها ، هو علم يبحث في كثير من الموضوعات التي تتصل بحجم الأرض وشكلها وأبعادها وباطنها و مجالها المغناطيسي وحرارة باطنها. الدراسة تتم بواسطة القياسات المباشرة ويهتم بموضوعات تتعلق بدراسة القشرة الأرضية وحركتها.

مخروط الضوء (Cône de lumière): يجسد فعاليات الزمان والمكان يتألف من بعدين مكانيين وبعد ثالث زماني محوره العمودي يمثل محور الزمن ومحوره الأفقي يمثل محور المكان الخطين المائلين بزاوية 45° يتساوى عندهما الزمان والمكان ونقطة تقاطع المحورين تمثل نقطة الحاضر المخروط العلوي هو حوادث المستقبل والمخروط السفلي يمثل حوادث الماضي.

كوسمولوجيا (Cosmologie) : الكونيات أو علم الكون , هو العلم الذي يدرس أصل ونشأة وتاريخ ومحتويات وتطور الكون، ودراسة البنية الواسعة للفضاء، بكل ما فيه من مادة وطاقة. ورغم حداثة هذا العلم من حيث تداخله مع الفيزياء الحديثة فإن جذوره تمتد إلى العصور القديمة بمعالجاتها الفلسفية والدينية والأسطورية الغيبية لموضوع أصل الكون.

الفضاء المتري(Espace métrique): في الرياضيات، الفضاء المتري هو مجموعة تعرف فيها مفهوم المسافة بين عناصر المجموعة. الفضاء المتري هو المصطلح الذي يطلق على الفضاء الثلاثي الأبعاد أو الفضاء الإقليدي. حيث أن المترية الإقليدية تعرف المسافة بين نقطتين على أنها خط مستقيم يصل بينهما

الكمية الممتدة (التنسور) (Tenseur) : المُوَتِّر أو المُمْتَدّ في الرياضيات، أحد الدوال الرياضية بجانب الأعداد أو الكميات المطلقة 'generalized'quantity' التي لا تتميز بوحدات للقياس. يتميز الموتّر بأنه يحتوي في خواصه خواص الأعداد المطلقة scalar، والمتجهات، والمؤثرات الخطية linear operator.

الممتد المتري (**metric tenseur**): هو نوع من الاقترانات التي تأخذ المُدخل كزوج من المتجهات المماسية v و wعند نقطة سطح أو متشعب قابل للتفاضل ذو أبعاد عالية منتجًا عددًا حقيقيًا قياسيًا g(v, w) بطريقةٍ تُعممُ العديدَ من الخصائص المألوفة في الضرب النقطي للمتجهات في الفضاء الإقليدي، كما أن الموترات المترية تمتلك نفس هدف الضرب النقطي حيث تُستخدم لتحديد طول المتجهات والزاوية بينهما، ومن خلال التكامل فإن الموتر المتري يسمح بتحديد وحساب طول المنحنيات في المتشعب.

الحقل الجاذبي(Champ gravitionnel): حقل الجاذبية أو مجال جاذبية هو نموذج علمي يستخدم في الفيزياء لتفسير وجود جاذبية. الجاذبية هي قوة جاذبة بين كتلتين. وخاصية الجاذبية هي إحدى القوى الأساسية الأربعة المتحكمة في تكوين العالم والكون.وهي قوة الجاذبية تتعلق بالكتلة فقط وتخص جميع الأجسام، سواء كانت ذرات أو حبيبات أو كرات بلياردو أو كواكب ونجوم .

قاعدة السلسلة(Chain rule): في التفاضل والتكامل؛ قاعدة السلسلة هي صيغة رياضية من أجل حساب مشتق دالتين مركبتين أو أكثر. تنص قاعدة السلسلة على أن مشتق دالة مركبة من دالتين f و g يساوي جداء مشتق الدالة f للدالة g و مشتق الدالة g، بتعبير رياضي: {\displaystyle'=f'\times g'}

رمز كريستوفل(Symboles de Christoffel): رموز كرستوفيل.في الرياضيات والفيزياء، هي عبارة عن مجموعة من الأرقام تصف اتصال متري. وبعبارة أخرى هي معاملات معينة تمثل دوال خاصة ومشتقاتها الأولية وهذه الدوال تعتبر معاملات الصيغة التربيعية.

قاعدة ليبنتز(General Leibniz rule): في علم التفاضل والتكامل تعمل قاعدة لايبنيز العامة والتي أعطيت اسمها تيمنًا بمؤسسها غوتفريد لايبنتس على تعميم قاعدة الضرب. حيث تلعب مشتقات الاقترانات دورًا أساسيًا في حساب التفاضل والتكامل وتطبيقاتها.

مصفوفات(Matrice): في الرياضيات، المصفوفة هي مجموعة مستطيلة من الأعداد أو من الرموز أو من التعبيرات منتظمة بشكل أعمدة وصفوف. يُدعى كل عنصر من هذا المجموعة بعنصرٍ أو مدخلٍ للمصفوفة .

نظرية التشعب(Théorie des bifurcations): التشعب في الرياضيات هي التغير النوعي في سلوك نظام ديناميكي ما نتيجة تغيير أحد معاملاته parameter.

أفق الحدث(Horizon): في نظرية النسبية العامة، يستعمل مصطلح أفق الحدث باعتباره حد موجود في الزمكان، كمنطقة تحيط بالثقب الأسود أو الثقب الدودي، ضمنه لا تؤثر الحوادث بالملاحظ الخارجي. السبب ببساطة أن الضوء المنبعث من داخل أفق الحدث لا يمكن له أن يتجاوز هذا الحد للوصول إلى الراصد الخارجي بسبب الثقالة والجاذبية القوية للثقب الأسود.

ملخص

لقد إنتهجنا في موضوعنا هذا الذي كان بعنوان (تطبيقات نظرية النسبيّة العامة في تفسير سلوك بعض الظواهر الفلكية)، وفيه توصلنا إلى أنّ آينشتاين غيّر مَجْرى العالم بأكمله وذلك من خلال نشره للنظريتان النسبيّتان الخاصة والعامة، حيث تعرفنا على المفاهيم العامة للنظرية النسبية وتطرقنا إلى دراسة البنية الرياضية للنسبية العامة وهذه الأخيرة لها تطبيقات عديدة ومهم*ة في الفيزياء الفلكية كالتمدد الثقالي للزمن والأمواج الثقالية والثقوب السوداء...

الكلمات المفتاحية: النسبية الخاصة، النسبية العامة، الجاذبية ، الزمكان، التمدد الثقال للزمن.

Abstract

In this topic, we discussed the study of (the applications of the general theory of relativity in explaining the behavior of some astronomical phenomena), we concluded that Einstein's publication of the special and general theories of relativity altered the course of history. We studied the mathematical structure of general relativity, which has many and important applications in astrophysics such as gravitational expansion of time, gravitational waves, and black holes...

Keywords: special relativity, general relativity, gravity, space-time, gravity expansion of time.

Résumé

Dans ce sujet, nous avons discuté de l'étude de (les applications de la théorie de la relativité générale pour expliquer le comportement de certains phénomènes astronomiques), nous avons conclu que la publication par Einstein des théories de la relativité restreinte et générale a modifié le cours de l'histoire. Nous avons étudié la structure mathématique de la relativité générale, qui a de nombreuses et importantes applications en astrophysique telles que l'expansion gravitationnelle du temps, les ondes gravitationnelles et les trous noirs...

Mots clés : relativité restreinte, relativité générale, gravité, espace-temps, expansion gravitationnelle du temps.