المجلد 10، العدد 2، 2017. ص ص. 59-83

المجلة الأردنية للفيزياء

REVIEW ARTICLE

المادة المظلمة: أصولها وفصولها

محمد باسل الطائي
قسم الفيزياء، جامعة اليرموك، إربد، الأردن.

Received on: 3/4/2017; *Accepted on: 16/7/2017*

الملخص: أقدم في هذه المراجعة عرضًا مستفيضاً لفرضية المادة المظلمة Dark Matter مبتدئًا مع أوليات فرضها وتحولات هذا الفرض عبر مصادره المجرية والكونية. ثم أعرض لخصائص المادة المظلمة، ومن خلال ذلك، أدخل إلى المقترحات التي وردت لتشخيص ماهية المادة المظلمة والجهود التي بذلت من أجل التحقق من صحة تلك التشخيصات، وأبرزها الجهود التي بذلت في مشاريع لاكتشاف الجسيمات التي يمكن أن تؤلف مادة مظلمة. تلك الجهود التي فشلت في تحقيق ما يؤكد وجود مثل تلك الجسيمات. ثم أنتقل إلى عرض الفرضيات البديلة التي تحاول تقديم تفسيرات للمظاهر التي دعت أصلاً إلى القول بفرضية المادة المظلمة، وأبرزها هي فرضية الميكانيك النيوتني المحوَّر MOND، مختتماً البحث بفرضية جديدة ربما تكون الأكثر واقعية رغم تعقيدها، وهي فرضية لزوجة الخلاء الديناميكية الناشئة عن تفاعل المادة الباريونية مع الخلاء الكمومي.

الكلمات الدالة: المادة المظلمة، مشروع الزينون الضخم تحت الأرض، ديناميكا نيوتن المحوَّرة، نظريات الجاذبية المحوَّرة.

Dark Matter: Its Origins and Chapters

M. B. Altaie
Physics Department, Yarmouk University, Irbid, Jordan.

Extended Abstract:

In this article, I present an extensive review of the hypothesis of dark matter, starting with the basic observations which provoked the assumption of invisible matter in galaxies and galaxy clusters. Then, I go through the development of the concept of dark matter in cosmology, where the analysis of the fluctuations of the Cosmic Microwave Background Radiation (CMBR) show the necessity of an excess of matter in the universe much more than the observed matter. Dark matter is thought to be non-baryonic, interacting only through gravitational effects which can be tested by gravitational lensing and other means. Investigating the motion of galaxies, specifically the rotation curves, showed that some sizable amount of dark matter might exist mostly in the galactic halo. For this reason, astrophysicists suggested that dark matter might be composed of invisible Massive Astrophysical Compact Halo Objects (MACHO) like black holes, neutron stars, white dwarfs and brown dwarfs. However, astronomical surveys of the sky showed less than 20% of the amount needed to cover the deficit in the mass of the universe. Cosmological observations of the accelerated expansion of the universe suggested that the missing mass in the composition of the universe might be subdivided into dark matter and dark energy. Analysis of the fluctuations of the cosmic microwave background radiation suggests that the amount of dark matter is about 26.8% of the mass of the whole universe and the dark energy should be about 68.3%. The remaining amount which is just about 4.9% is the observable matter.

Several other suggestions were put forward to explain dark matter. During the past three decades, the suggestion of particle physicists dominated the search for dark matter. It is proposed that dark

Corresponding Author: Mohammad B. Altie **Email**: maltaie@yu.edu.jo

matter might be composed of some exotic, very weakly interacting particles called axions and other supersymmetric particles called WIMPS. During these decades, experimentalist were searching enthusiastically to find such particles in deep underground laboratories. For the last ten years, a continuous search was done through the Large Underground Xenon project, some 1500 meters deep underground, whereby some interactions of the exotic particles with xenon atoms occur. In spite of the high sensitivity of the detectors placed in the xenon tank, the search could not confirm the detection of any verifiable signal other than the expected noise.

Several other suggestions for dark matter have been placed. The most promising among them is the suggestion that dark matter could be a sort of scalar field that overwhelms the universe exhibiting the presence of dark matter through some interactions with the baryonic matter composing the stars and the galaxies.

Among other suggestions which show good agreement with observations at the galactic level is the Modified Newtonian Dynamics (MOND) suggested by Mordekhi Milgrom in the early eighties. This suggests that the second law of Newton fails to describe motion under extremely low acceleration of the order of 10^{-10} m/s^2 and proposes an alternative form for the second law of Newtonian mechanics. This proposal has no strong theoretical basis despite four decades of work to publicize it. One reason for being hard to accept it lies in the fact that it can hardly give an explanation to the presence of dark matter on cosmological scale.

Another alternative explanation of dark matter is offered by the Modified Gravity theories. These have different versions and the most prominent one is the non-symmetric theory which claims to be able to explain several aspects of the acclaimed dark matter.

It seems that the presence of dark matter is necessary for the formation of large structures like galactic clusters and superclusters in the universe. However, such a need is model-dependent and it wins to be favored within the present cold-dark matter model including the scenario of inflation.

Despite all the efforts spent to study, analyze and detect dark matter, the mystery remains; what kind of effect would such matter produce? Or, what kind of matter is such an effect provoking us to suggest?

Keywords: Dark matter, Large Underground Xenon project, Modified Newtonian Dynamics, Modified Gravity theories.

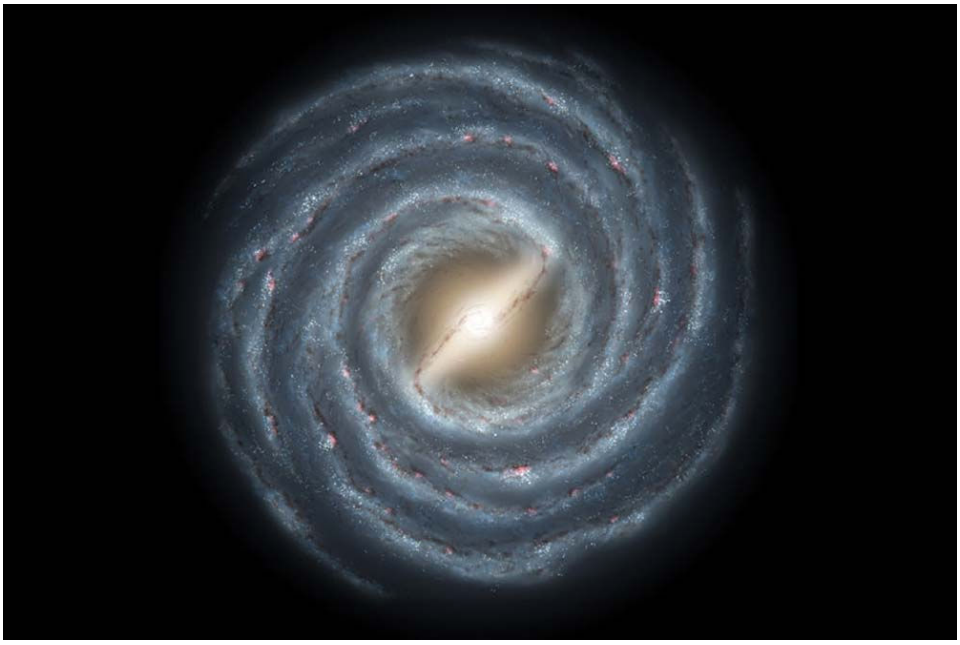
المقدمة

يتألف الكون من مجموعة هائلة من المجرات التي هي تجمعات نجمية كبيرة مختلفة الأشكال والأحجام. وقد قام إدوين هابل بتصنيف هذه المجرات ودراسة حركاتها على نحو مستفيض. ومن خلال تلك الدراسة، تمكن من اكتشاف أن الكون بمجمله هو في حالة توسع مستمر، حيث تتباعد المجرات بسرعات تتناسب تناسبًا طرديًا مع المسافة بينها. وتنتظم أغلب المجرات في عناقيد مجرية تحوي عادة مئات وآلاف المجرات. وهنالك العناقيد العظمى Super Clusters التي تحوي مئات الآلاف بل والملايين من المجرات.

تتألف المجرات من عدد كبير من النجوم يتراوح عادة ما بين 100-400 ألف مليون نجم. وهي على أشكال مختلفة منها الحلزونية Spiral والإهليلجية Elliptical وغير المنتظمة Irregular. وهنالك تصنيفات فرعية أخرى عديدة. وتتألف المجرة من انتفاخ وسطي يسمى Galactic Bulge يحتوي نجومًا بكثافة عالية وأغلبها قديمة، وربما احتوى قلب المجرة على ثقب أسود عظيم. وتنبسط أغلب نجوم المجرة في قرص كبير يسمى قرص المجرة Galactic Disk، وتحيط بالمجرة عادة كرة ذات قطر كبير يبلغ أضعافًا كثيرة من حجم المجرة تسمى الهالة المجرية Galactic Halo، تتألف من غبار وغازات ذات كثافة واطئة، وربما احتوت أيضًا على بعض الأجرام مثل الأقزام البنية Brown Dwarfs. وهنالك بعض المجرات التي يمتد وسطها ليصبح أشبه بقضيب، وتسمى المجرات الحلزونية القضيبية Spiral Barred Galaxies (انظر الشكل 1).

منذ بداية الثلاثينيات من القرن الماضي، ظهرت أمام الفلكيين مظاهر غريبة في تصرف حركة المجرات. هذه المظاهر تنبئ بوجود كمية من المادة غير المرئية في أكناف المجرات والعناقيد المجرية. من جانب آخر، فإن دراسة المنشأ الحراري للكون فيما سمي نظرية الانفجار العظيم Big Bang Theory وانطلاق الكون في حركة تمدد مكاني هائل قد دلت الفلكيين والمتخصصين بعلم الكونيات Cosmology إلى ضرورة أن تكون كمية المادة في الكون

أكبر من كمية المادة المنظورة. وفي ضوء تطور إمكانات قياس انحراف الضوء القادم من المجرات البعيدة بتأثير الجاذبية الكتلية بحسب ما تقرره نظرية النسبية العامة، فإن هنالك مؤشرات مؤكدة على وجود كمية من المادة في التراكيب الكونية أكبر مما هو منظور أو مقدر وجوده في تلك التراكيب. هذه المؤشرات دفعت الفلكيين والكوزمولوجيين إلى القول بوجود كمية كبيرة من مادة غير مرئية تحف التراكيب الكونية من مجرات وعناقيد مجرية. وقد سميت هذه المادة: المادة المظلمة أو المعتمة Dark Matter بالنظر لكونها لا تُصدر ولا تمتص أي نوع من الإشعاعات ولا تؤثر أو تتأثر إلا بالجاذبية الكتلوية فقط.



الشكل (1): مجرة حلزونية قضيبية (المصدر: nasa.gov).

قضية المادة المظلمة إذن قضية شائكة ومتشعبة، لها امتدادات عديدة ومعقدة. فهي في جانب منها قضية مهمة في دراسة وفهم نشأة المجرات والعناقيد المجرية وحركتها وتطورها. وهي في جانب آخر قضية تتعلق بنشأة الكون وتطوره ومصيره؛ إذ إن لها ارتباطًا مباشرًا في التحولات التي جرت على أنماط التوسع الكوني منذ الانفجار العظيم ومنذ العصور الكمومية الأولى التي نشأت فيها أولى بذور المادة والطاقة في الكون وحتى الآن. كما أن لوجود المادة المظلمة دورًا مهمًا في حبك بنية الكون Cosmic Web وتوزيع المادة فيه. بالتالي، فإن لوجود المادة المظلمة وكميتها عواقب مهمة تؤثر في تحديد مصير الكون بمجمله.

في هذه المراجعة، ساعرض لأصول فكرة المادة المظلمة وفصولها وتطورها عبر العقود الماضية. في البند الثاني من هذه المراجعة، سأعرض للأرصاد الأولى التي جرت على العناقيد المجرية وللأرصاد التي كشفت ما سمي مشكلة منحنيات دوران المجرات الحلزونية Spiral Galaxies Rotation Curves Problem، ثم أعرض لأرصاد إشعاع الخلفية المايكروي الكوني وتحليلاته التي كشفت عن نقص كبير في الكتلة الإجمالية للكون. وفي البند الثالث، أعرض لفرضيات المادة المظلمة كما جاءت في الأبحاث المختلفة وما تمخض عن المقترحات التفسيرية التي تبناها الباحثون ومقترحات التجارب التي جرت في سبيل الكشف عن المادة المظلمة. في البند الرابع، أعرض لأهم التجارب التي جرت ونتائجها، وبالأخص تجربة كشاف الزينون LUX التي فشلت في الكشف عن أي جسيمات تؤلف المادة المظلمة. وفي البند الخامس، أعرض لفرضيات أخرى حاولت تفسير المظاهر الأرصادية دون اللجوء إلى اقتراح وجود مادة مظلمة، وفي مقدمتها فرضية موردخاي ميلغروم القائلة بانحراف قانون نيوتن الثاني في حالة التسارع القليل جداً. هذه الفرضية يطلق عليها تعبير موند MOND اختصاراً. في البند الأخير من هذه المراجعة، أقدم مناقشة عامة لفكرة المادة المظلمة ما لها وما عليها في إطار فهمنا الفيزيائي للمادة والطاقة وأسس قوانين الفيزياء، مختتماً هذه المراجعة الشاملة بتقديم بعض الآفاق لمستقبل الأبحاث في هذا الموضوع المهم.

حركة المجرات ودورانها

تاريخياً، يشار إلى أن فرتس زفيكي Fritz Zwicky كان من أوائل الباحثين الذين وظفوا مفهوم المادة المظلمة لتفسير حركة المجرات داخل العنقود المجري Coma Cluster. فقد درس هذا الفلكي في بداية الثلاثينيات من القرن الماضي حركة المجرات التي تقع ضمن هذا العنقود مستخدماً قوانين الميكانيك والجاذبية، ووجد أن سرعاتها داخل العنقود تتطلب وجود كمية كبيرة من المادة تعادل عشرة أضعاف المادة التي تمثلها كتل المجرات الظاهرة للعيان في هذا العنقود المجري [1]. وهكذا يحتمل وجود مادة غير مرئية Invisible سميت لاحقًا المادة المظلمة Dark Matter. وقبل زفيكي، كانت حسابات جيمس جينز [2] التي نشرها عام 1922 قد أشارت إلى أن السرعة العمودية لحركة النجوم القريبة من الشمس تشير إلى وجود كتلة في قرص مجرتنا تعدل ضعف الكتلة التي توفرها النجوم الظاهرة للعيان فيه.

من جانب آخر، بينت دراسة الحركة الدورانية للمجرات الحلزونية التي قامت بها فيرا روبن [3] في مطلع عقد السبعينيات من القرن المنصرم أن سرعة دوران الأطراف الخارجية لمجرة أندروميدا، وهي أقرب مجرة إلينا، هي سرعة ثابتة تقريباً لجميع الأجزاء الخارجية فيها ولا تعتمد على البعد عن المركز. وهذا ما حيَّر الفيزيائيين الفلكيين؛ إذ إنه مخالف للتوقعات التي تقرر ضرورة اعتماد سرعة حركة الأطراف الخارجية للمجرة على بعدها عن مركز المجرة.

من جانب ثالث، أظهرت تحليلات أرصاد إشعاع الخلفية المايكروي الكوني Cosmic Microwave Background Radiation التي قامت بها العديد من المشاريع أن هندسة الكون الشاملة تنبئ عن كونه مسطحًا مكانياً Spatially Flat. وهذا يعني، بحسب التقديرات البنيوية التي تقدمها نظرية النسبية العامة، أن متوسط كثافة المادة والطاقة في الكون بمجمله هو بالضرورة مقدار معين يسمى الكثافة الحرجة Critical Density، وهذا ما لا يحصيل في الواقع؛ إذ إن متوسط الكثافة المقاس من خلال المادة المرئية في الكون والحجم المحسوب للكون يحقق متوسط كثافة المادة والطاقة في الكون بما لا يتجاوز عُشر هذه الكمية، مما يعني ضرورة وجود مادة غير مرئية تعدل 90% من مادة الكون.

هذه المظاهر الثلاثة أسست لفكرة وجود مادة مظلمة تملأ أطراف المجرات وأطراف العناقيد المجرية وتتخلل السدم الغازية العظمى دون أن تكون لها آثار مرئية، لأنها لا تتفاعل مع المادة العادية ولا تصدر أي نوع من الأمواج الكهرمغناطيسية أو الميكانيكية التي تساعدنا في الكشف عنها.

دوافع فرضية وجود المادة المظلمة

من الدوافع التي تجعل الفلكيين والفيزيائيين يتمسكون بوجود المادة المظلمة في الكون والقول إنها تحف بالجزر الكونية الباريونية، أعني المجرات والعناقيد المجرية، هو أن لهذه المادة، فيما يبدو، دور مهم في تشكيل المجرات نفسها. ذلك أن نماذج تشبيهية Simulation Models لمراحل نشأة الكون تضمنت وجود مادة مظلمة باردة أعطت توزيعا مجرياً مماثلاً للواقع الكوني الذي نحصل عليه من الأرصاد [4]، في حين أن وجود مادة مظلمة حارة كان سيؤدي إلى اختفاء المجرات من المشهد الكوني، خلافاً لما هو واقع.

إن النموذج الكوني السائد حالياً يقوم على فرضية أن محتوى الكون من المادة والطاقة يتألف من مادة باريونية عادية بنسبة قدرها 4.9% ومادة مظلمة بنسبة قدرها 26.6% على شكل كتل مجهولة تحف بالمجرات والعناقيد المجرية وطاقة مظلمة بنسبة قدرها 68.5% تساهم في توسع الكون وتباعد مجراته والعناقيد المجرية عن بعضها البعض على نحو متسارع كما كشفت الأرصاد.

أما دوافع الميل إلى ترجيح كونها مؤلفة من جسيمات ثقيلة ضعيفة التفاعل WIMPs، فذلك يعود إلى توافق سيرورة المادة والطاقة في الكون منذ التشكّل الأولي في الانفجار العظيم Big Bang مع سيرة مثل هذه الجسيمات. فعندما كان الكون في مراحل نشوئه الأولى عند درجات حرارة عالية جداً، كانت جسيمات المادة المظلمة تنشأ في أزواج من الجسيمات والجسيمات المضادة، حالها في هذا حال الجسيمات الأخرى. فلما انخفضت درجة حرارة الكون بسبب توسعه، هبط متوسط تشكيل أزواج الجسيمات والجسيمات المضادة ثم توقف بينما بقيت عملية الإفناء قائمة. ويبدو أن نوعًا من اللاتناظر كان موجوداً في موازنة الجسيمات والجسيمات المضادة، فكان أن تمت تصفية جميع الجسيمات المضادة وبقيت الجسيمات لتؤلف المادة الموجودة حاليًا في الكون [5]. ويفترض الباحثون أن عدد جسيمات المادة المظلمة في الكون بقي ثابتاً تقريباً بعد

ذلك [6]. أما الجسيمات التي لها مقطع عرضي تفاعلي Cross-Section كبير، فإنها أخذت وقتاً أطول في عملية الإفناء، وعليه فإن ما تبقى منها كان ذا كثافة عددية أقل من غيرها. وبناءً على التقديرات الحالية لنسبة هذه المادة في الكون، وإذا كانت هذه الجسيمات هي جسيمات المادة المظلمة، فإن المقطع العرضي التفاعلي لجسيمات المادة المظلمة لا يمكن أن يزيد على ما تتمتع به الجسيمات الكتلوية ضعيفة التفاعل [5]. وإذا كان هذا النموذج صحيحاً، فإن خصائص جسيمات المادة المظلمة هي خصائص WIMPs نفسها.

المادة المظلمة في المجرات والعناقيد المجرية

هنالك جملة من الأرصاد الفلكية والكونية شكلت دلائل شبه قطعية على وجود مادة غير مرئية في هذا الكون تحف بالعناقيد المجرية والمجرات.

كما ذكرت آنفاً، فقد لاحظ زفيكي وهو يحلل حركة المجرات في عنقود (كوما) Coma Cluster مستخدماً تقنية الإزاحة الحمراء للأشعة، أن هذه المجرات تتحرك بسرعات أكبر مما ينبغي لها. وبموجب ذلك قدّر زفيكي أن كتلة العنقود المجري هي في الحقيقة أكبر من كتلة المجرات المؤلفة له بعشرة أضعاف في الأقل [1]. وجاءت نتائج تحليلات سميث لعنقود العذراء Virgo Cluster لتؤيد نتائج زفيكي بشأن وجود مادة غير مرئية في العنقود. ثم قام زفيكي بتحليل آخر وتقدير لكتل المجرات والعناقيد المجرية فتأكدت لديه فكرة وجود مادة غير مرئية تحف بالمجرات والعناقيد المجرية [7].

في عام 1959، نشر الباحثان كان وولتجر [8] بحثًا عن حركة مجرتي درب التبانة وأندروميدا القريبة منا، وتبين لهما أن المجرتين مرتبطتان حركياً، فهما تقتربان من بعضهما. ومن خلال ذلك، تمكن الباحثان من تقدير كتلة المجموعة بـ 1.8×10^{12} كتلة شمسية، علماً بأن التقدير الأرصادي يقرر أن كتلتهما هي بحدود 2×10^{11} كتلة شمسية. وهذا جعل الباحثين يفترضان وجود كتل غازية ساخنة في داخل الفضاء تعوض الفرق في الكتلة. من جانب آخر، قام إيناستو وليندن بيل عام 1982 بحسابات أكثر دقة أدت إلى تقدير كتلة المجموعة بما يقارب 4.5×10^{12} كتلة شمسية [9].

مشكلة منحنيات سرع دوران المجرات

عند دراسة الحركة الدورانية للمجرات، يتوقع الفلكيون أن تأتي نتائج أرصادهم متوافقة مع ما يقرره قانون كبلر للحركة الكوكبية. ذلك لأن المجرة مؤلفة أساساً من نجوم تدور حول مركز كبير الكتلة بفعل جاذبية هذا المركز. وعليه، فإن من المتوقع أن تقل سرعة دوران الأطراف الخارجية للمجرة تماماً كما تقل سرع الكواكب الخارجية في النظام الشمسي. لكن الأرصاد التي قام بها بابكوك لمجرة أندروميدا ونشرها عام 1939 [10] بينت أن سرع الأجزاء الخارجية للمجرة أعلى مما يتقرر عن الحركة الكوكبية. كما قام أورت بحساب نسبة الكتلة إلى السطوع الضوئي لمجرة NGC 3115 في أطرافها الخارجية، فوجدها بحدود 250، وهذه نسبة عالية جداً تعني وجود كتلة كبيرة في الأطراف الخارجية للمجرة [11]. كما قام تلميذه فان دي هولست وآخرون بدراسة نسبة الكتلة إلى السطوع في أطراف مجرة أندروميدا ودرس سرعة حركة أجزائها لغاية 30 كيلوبارسك، فوجد أنها تمتلك سرعًا أعلى من السرع التي يقررها قانون كبلر للحركة الكوكبية [12]. وفي عام 1966، نشر مورتن روبرت بحثاً أكد فيه أن سرع الأجزاء الخارجية للمجرات اللولبية تبقى ثابتة تقريباً مؤكداً بذلك تسطح منحنى السرع [13]. وقد نشر باربيج وجماعته جملة من الأبحاث إبتدأت بالبحث [14] جمعوا فيها عدداً من منحنيات السرع للمجرات اللولبية والإهليلجية [15] و[16] و[17]. وقامت فيرا روبن وفورد عام 1970 [3] وروبرتس وروتس عام 1973 [18] برسم منحنى سرع دوران أجزاء مجرة أندروميدا لغاية 30 كيلوبارسك ووجدوا أن سرعة الأجرام تزداد ببط ثم تبقى ثابتة تقريباً لمدى يتراوح من 16 إلى 30 كيلوبارسك.

إن السرعة المتوقعة يجب أن تتناسب تناسبًا عكسياً مع البعد، وهذه يمكن استنتاجها من العلاقة:

$$\frac{m\mathrm{v}^2}{r}=\frac{GmM}{r^2} \qquad (1)$$

أي إن:

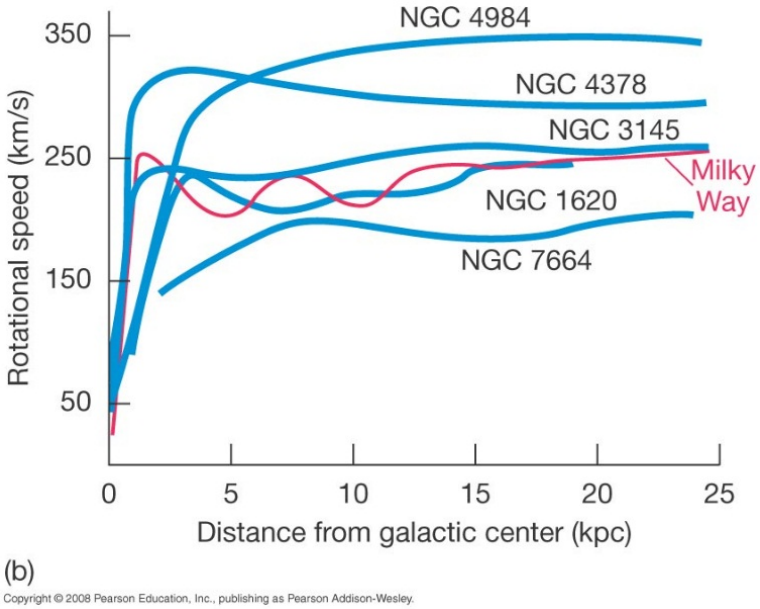
$$\mathrm{v}=\sqrt{\frac{GM}{r}} \qquad (2)$$

لغرض حل مشكلة التناقض بين السرع المتوقعة للأطراف الخارجية للمجرات الحلزونية والسرع المقاسة فعلاً عن طريق الإزاحة الحمراء التي وجد أنها ثابتة تقريباً كما توضح المنحنيات المرسومة في الشكل (2)، وفي ضوء

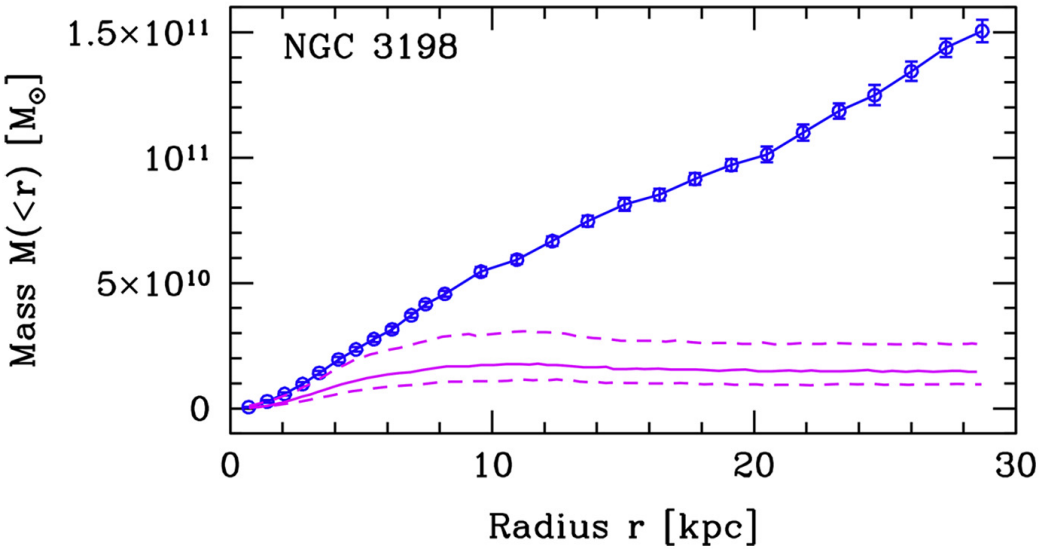
حساب نسبة الكتلة إلى السطوع التي وجد أنها تزداد مع البعد عن مركز المجرة، وضعت فرضية مفادها أن كتلة المجرات تزداد طردياً مع المسافة عن المركز في أطرافها الخارجية، في حين يتصرف مركز المجرة مثل قرص كثيف، فتتناسب سرع الدوران تناسبًا طرديًا مع بعد أجزاء هذا القرص عن المركز [19]؛ أي إن الفرضية هي:

$$M \propto r \qquad (3)$$

وهكذا تصبح السرعة ثابتة للأجزاء الخارجية التي لا تؤلف تكويناً مجتمعاً مثل قرص صلب، في حين نجد أن الأجزاء المركزية للمجرة ذات سرع تتناسب تناسبًا طرديًا مع بعدها عن المركز، لأنها تمثل قرصاً بكونها متراصة. وطبعاً، هنالك مآخذ على هذا الافتراض ستتم مناقشتها في البند الأخير من البحث.



الشكل (2): نماذج من منحنيات سرع المجرات.



الشكل (3): تقديرات الكتلة التي تحويها المجرة NGC 3198 داخل المسافة r عن المركز $M\ (<r)$ بحسب قياس السرع ممثلة باللون الأزرق، بينما تمثل المنحنيات الوردية تقديرات الكتلة بحسب ماهو منظور بالتلسكوبات على مدى جميع الإشعاعات الطيفية المعروفة (المصدر: [20]).

التعدس المايكروي والمادة المظلمة

Microlensing and the Dark Matter

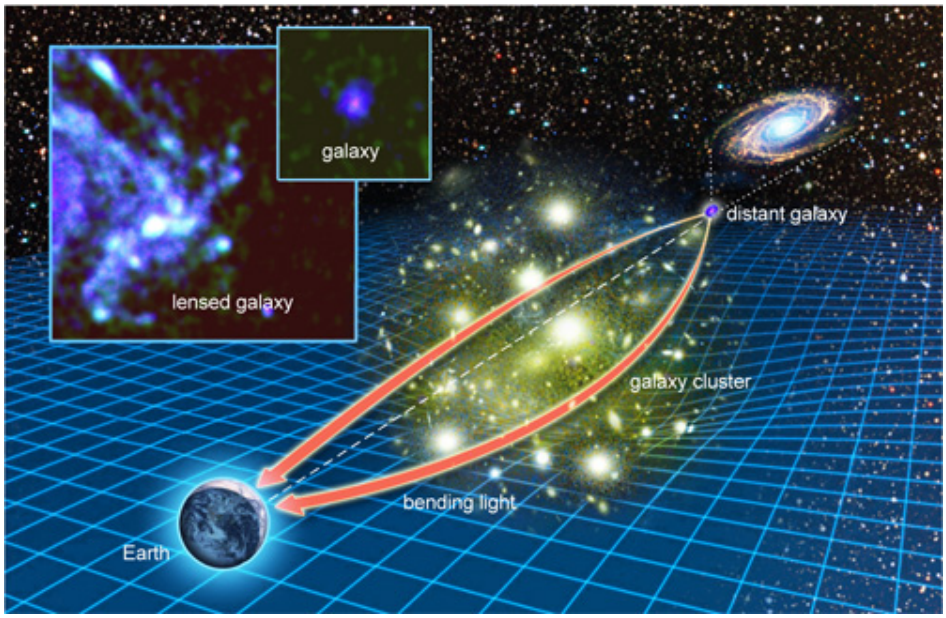
كشفت نظرية النسبية العامة أن المجال الجاذبي للأجرام ذوات الكتل الكبيرة يؤدي إلى انحراف مسار الضوء المار على مقربة منها انحرافاً محسوساً وقابلاً للقياس. فقد حسب ألبرت آينشتاين زاوية الانحراف ووجد أنها تتناسب مع مقدار كتلة الجرم المسبب للانحراف وتعطى حسب العلاقة التالية:

$$\delta = \frac{4GM}{c^2 b} \qquad (4)$$

حيث G ثابت الجاذبية النيوتني، M كتلة الجرم، c سرعة الضوء وb أقرب مسافة بين مركز الجرم ومسار شعاع الضوء وتسمى عامل الأثر Impact Parameter. إن العلاقة (4) هي علاقة تقريبية بعض الشئ ومحسوبة لجرم ساكن وغير مشحون، وتوجد صياغات أخرى عالجت انحراف الضوء بتأثير الأجرام الكتلية الدوارة والمشحونة.

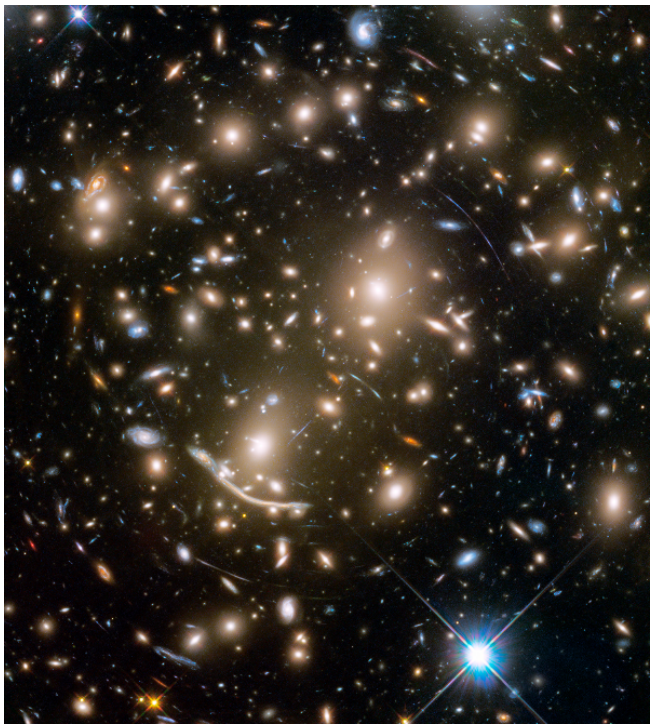
وكان أول من قام بتحقيق هذه الظاهرة عملياً هو السير آرثر إدينجتون وجماعة معه أثناء مراقبتهم للكسوف الكلي للشمس عام 1919 من جنوب إفريقيا [21]. فقد قاموا برصد نجوم مواقعها خلف قرص الشمس يمر شعاعها قريباً من ذلك القرص فتظهر النجوم وقد كانت في الأصل محتجبة عن النظر. وسبب ذلك ان ضوء هذه النجوم ينحرف نحو الشمس فيؤدي إلى مشاهدتها في موقع ظاهري هو غير موقعها الأصلي. وقد وجد إدينجتون وجماعته أن مقدار الانحراف في مسار الضوء المار قرب قرص الشمس يتوافق مع ما توقعه آينشتاين في ورقته التي نشرها عام 1915. وهذا ما عزز الثقة بنظرية النسبية العامة.

من جانب آخر، وجد أن الضوء القادم من أجرام بعيدة يعاني تعديساً عند مروره قرب الكتل الكبيرة، وهذه الظاهرة سميت التعدس الجاذبي Gravitational Lensing، حيث يتصرف الجرم كعدسة، ويتم تبئير focusing الضوء وتزداد شدته، وتعمل تلك الكتل التي يمر بها الضوء عمل العدسات البصرية.



الشكل (4): التعدس الجاذبي (المصدر:www2.ifa.hawaii.edu).

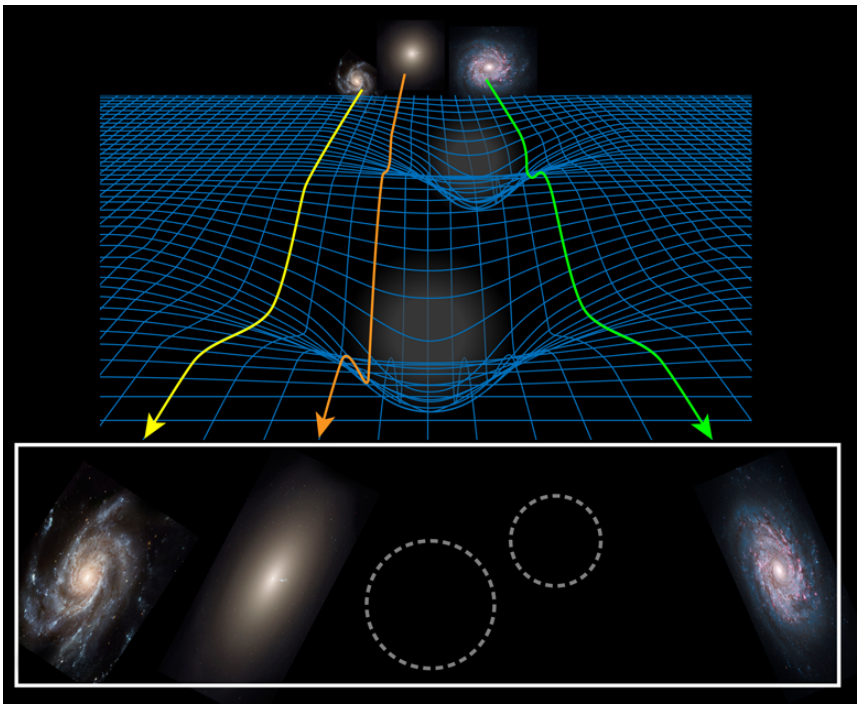
وهذا ما يتسبب في ظهور أكثر من صورة للمصدر نفسه، حتى أنه تظهر للراصد حلقات أو أقواس ضوئية ناتجة عن صور ثانوية متكررة للمصادر التي يأتي منها الضوء، وقد تشكل حلقة تسمى حلقة آينشتاين Einstein Ring، ويتضح هذا في الصورة التي التقطها تلكسكوب هابل.



الشكل (5): حلقات أينشتاين بتصوير تلسكوب هابل (المصدر: NASA/ESA/STScI).

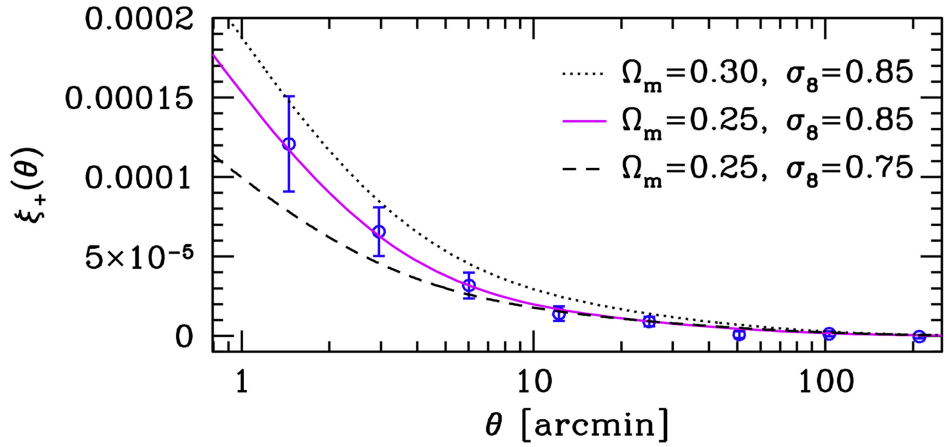
وقد أفاد الفيزيائيون الفلكيون من هذه الظاهرة كثيراً؛ إذ استعانوا بها على تقدير كتل الأجرام المسببة لانحراف الضوء عن مساره المستقيم [22]. كما تم استخدام هذه الظاهرة على نطاق واسع في الكشف عن الكواكب النجمية Exoplanets (كواكب تقع خارج النظام الشمسي وتدور حول نجوم أخرى). وعموماً، وبالنظر للتأثيرات الجاذبية للمادة المظلمة، فإن التعدس الجاذبي يعتبر دليلاً مباشراً على تقدير وجود المادة المظلمة [23].

وتقوم تقنية أرصاد التعدس الجاذبي للكشف عن المادة المظلمة بين المجرات على فكرة أن الكمية الأكبر من المادة المظلمة تؤدي إلى انحراف أكبر في الضوء القادم من مجرات بعيدة، وهذا يؤدي أيضاً إلى تغيير شكل المجرات أحياناً؛ إذ تظهر أكثر إهليلجية مما هي في الأصل. إذن، كيف لنا أن نعرف أن المجرة التي ننظر اليها هي إهليلجية بهذا القدر حقاً وليست كروية؟ والجواب يكمن في رصد مجموعة من المجرات القريبة من تلك المجرة التي هي محط النظر؛ إذ من المعلوم أن كمية المادة المسببة لانحراف الضوء قرب مجرتين قريبتين من بعضهما ستكون هي نفسها. وبتقدير مقدار التوازي بين مجرتين قريبتين من بعضهما ومقارنته مع ما يحصل لمجرة أخرى بعيدة عنهما لكنها تقع في المسار أو الاتجاه نفسه، يتمكن الفلكيون من حساب كمية المادة المظلمة التي تعترض طريق الأشعة القادمة من تلك المجرات البعيدة (أنظر الشكل (6) الذي يوضح هذه التقنية).



الشكل (6): تقنية قياس مقدار اتساق المجرات (المصدر: Kilo-Degree Survey Collaboration).

لقد قام مشروع Kilo-Degree Scan بمسح السماء من أجل قياس مواقع وأشكال أكثر من 15 مليون مجرة. وحصل على نتائج هائلة بخصوص اتساق alignment هيئة هذه المجرات. وتبين من هذه القياسات أن اتساق المجرات القريبة من بعضها يكون عاليًا، في حين يتضاءل الاتساق ويتلاشى في حالة المجرات البعيدة عن بعضها. وهذا يتضح من الشكل (7).



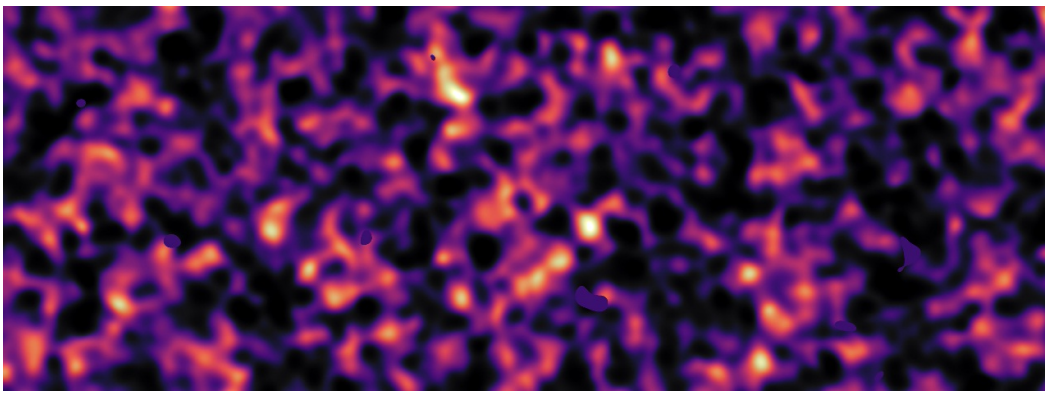
الشكل (7): منحنيات اتساق المجرات بدلالة المسافة الزاوية بينها. كل نقطة على هذه المنحنيات تبين مقدار الاتساق الزاوي بين مجرتين متجاورتين مقاساً بدلالة المسافة بينهما. (المصدر: KiDS Collaboration).

وقد تم تفسير هذه النتائج على أنها تدل على أن الضوء الذي يتم استلامه من مجرتين متباعدتين يعاني تعثرات كثيرة خلال مساره، مما يجعله يقدم صورة متباينة كثيرًا عن الضوء القادم من مجرتين متقاربتين يكون اتساقهما متقارباً.

إن النظر إلى مسافات أبعد في الكون يعني استطلاع أزمنة أقدم؛ فنحن عنما نرصد مجرات على بعد أربعة مليارات سنة ضوئية، فإننا ننظر إلى حالة الكون عندما كان عمره بحدود عشرة مليارات سنة. أما عندما ننظر إلى مجرات تبعد عنا 12 مليار سنة ضوئية، فإننا نرصد الكون

عندما كان عمره ملياري سنة فقط. ولقد قام مشروع KiDS برصد مجرات على بعد 10 مليارات سنة ضوئية، أي عندما كان عمر الكون بحدود 4 مليارات سنة. وعليه، فقد تمكن الباحثون في هذا المشروع من رسم التطور الزمني لتكتل المادة المظلمة في الكون. لكن المفاجأة جاءت مع النتائج التي تبين أن مقدار تكتل المادة المظلمة أقل مما هو متوقع بحسب النموذج الكوني المسطح الذي هو عمدة الحسابات التي استنبطت منها أرصاد التلسكوب الفضائي بلانك [24]. إن عدم التوافق هنا يمكن أن يتسبب عن وجود خلل في النموذج أو في طرائق القياس. وعلى الرغم من التأكيدات التي نسمعها من الباحثين بشأن دقة قياساتهم، فإننا نعلم أن مقادير القياسات الرقمية للتعديس الجاذبي المايكروي تقع تحت التأثيرات البيئية، مما يعني أن هنالك نسبة خطأ عالية قد تحصل على الرغم من أن الباحثين يقومون بطرح هذه التأثيرات البيئية على نحو دقيق. والأمر يشبه تسجيل حديث همس بين شخصين في حفل موسيقي صاخب. فمهما كنا قادرين على طرح تأثيرات الموسيقى الصاخبة لعزلها عن تلك الهمسات التي نريدها، فإن نتائجنا لن تكون دقيقة بالتأكيد.

كما قام مشروع KiDS بعمل محاكاة حاسوبية للنتائج التي توصلت اليها الأرصاد، فكانت النتيجة المبينة في الشكل (8).

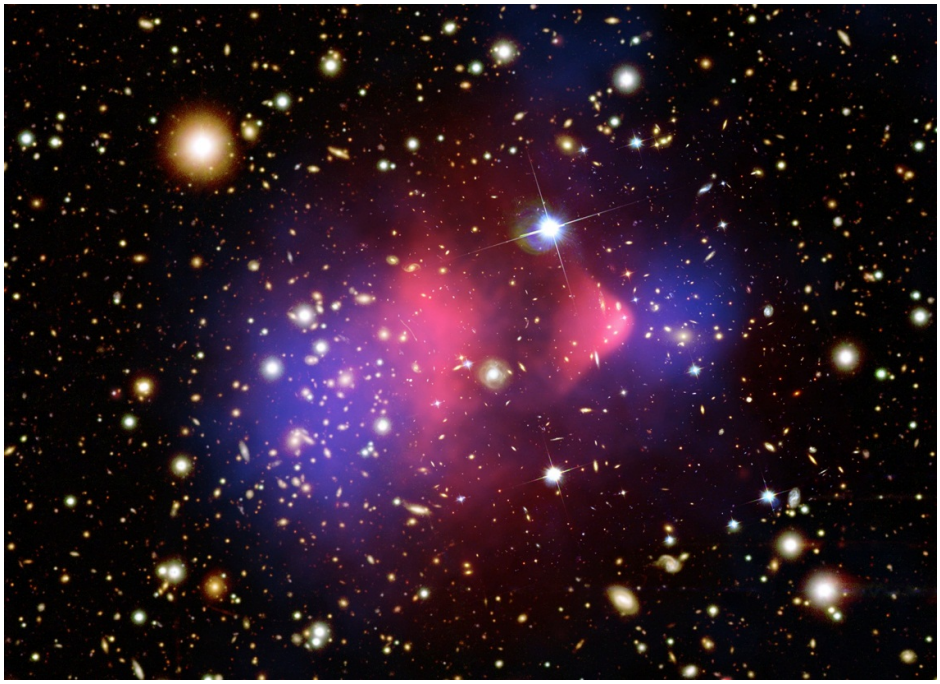


الشكل (8): تصوير تكتلات المادة المظلمة حاسوبياً (المصدر: Kilo-Degree Survey Collaboration).

يُعد الكشف عن المادة المظلمة بدلالة التعدس الجاذبي دليلاً مباشراً يختلف عن الأدلة الأخرى التي تكاد تكون تخمينات تفرضها وقائع حسابية. لكن هنالك بعض الشكوك في حصول التعدس الجاذبي ناتجاً عن وجود المادة المظلمة. وقد أوضحت دراسات عديدة مثل هذه الشكوك [25]. من جانب آخر، فقد قمنا أنا وبعض تلامذتي بدراسة الخواص الجاذبية للمادة المظلمة، ووجدنا أنها أقل مما هو متوقع.

عنقود الرصاصة المجري

يُعد عنقود الرصاصة المجري Bullet Cluster أحد أهم الأدلة التي يتذرع بها القائلون بوجود المادة المظلمة وبكونها لا تتمتع بصفات المادة العادية، وبالأخص كونها عديمة التصادم Collisionless. هذا العنقود يحتوي على آلاف المجرات، ويعتقد أنه نشأ عن تصادم عنقودين مجريين في أزمنة غابرة. هذا العنقود تم تصويره بأشعة X التي تنبعث من المادة الباريونية التي يحتويها، فكانت المنطقة الملونة باللون الوردي في الشكل (9). ثم تمت دراسة العنقود بواسطة تقنية التعدس الجاذبي، فكانت المنطقة التي هي باللون الأزرق. وقد اتضح من هذه الدراسات بعد تحليل النتائج حاسوبياً أن هذا العنقود بالفعل ناتج عن تصادم عنقودين مجريين تداخلا مع بعضهما فكانت هنالك كتلتان للمادة الباريونية وللمادة المظلمة المسببة للتعدس الجاذبي. لكن من الجدير بالملاحظة وجود انفصام واضح بين توزيع المادة الباريونية والمادة المظلمة؛ هذا الانفصام الذي يؤكد عدم تأثر المادة المظلمة بالتصادم، فبقيت تسير في دربها دون إعاقة. إلا أن المادة الباريونية عانت من الإعاقة فتداخلت مع بعضها.



الشكل (9): عنقود الرصاصة المجري حيث يظهر توزيع المادة المظلمة بحسب قياسات التعدس الجاذبي باللون الأزرق، فيما يعبر اللون الوردي عن منطقة وجود المادة الباريونية العادية (المصدر NASA/CXC/ESO/Clowe and Markevitch).

المادة المظلمة في علم الكونيات الحديث

كان إدوين هابل Edwin Hubble خلال العشرينيات من القرن الماضي يرصد من قمة جبل ولسن حركة المجرات القريبة من مجرتنا درب التبانة، فلاحظ أن أغلب المجرات تبدو مبتعدة عن مجرتنا. وعند تدقيق الأرصاد ومراجعتها، تبين له أن هنالك علاقة طردية بين بعد المجرة التي يرصدها وسرعتها؛ فكلما كانت المجرة أبعد كانت سرعتها أكبر[26]. يعني هذا أن الكون في حالة توسع مستمر. ويمكن أن نضع قانون هابل هذا بالصيغة التالية:

$$v = Hr \qquad (5)$$

حيث v هي سرعة المجرة وr بعدها عنا وH ثابت سمي لاحقاً ثابت هابل Hubble Constant. ولما بلغت هذه النتائج الفيزيائي والقس الهولندي جورج لاميتر Lameter قال إن هذا يعني أن الكون بمجمله كان يوماً ما يقبع في حيز صغير سماه البيضة الكونية انبثق عنها هذا القدر العظيم من المادة والطاقة. وكان ألكسندر فريدمان عام 1922 قد نشر بحثاً [27] أشار فيه إلى حلول ممكنة لمعادلات آينشتاين تبين أن الكون بمجمله يمكن أن ينشأ عن فردنة Singularity هي شيء أشبه بنقطة تحتوي مجمل المادة والطاقة التي في الكون، فينطلق عنها الكون في توسع مكاني سريع خلال الزمن دون أن يسبقه وجود فيزيائي من أي نوع. هذه الفكرة تجاوبت مع تصورات لاميتر فصارت فكرة حدوث الكون واقعاً ونتاجاً لنظرية النسبية العامة.

إن معادلات آينشتاين في المجال العام تؤسس لنماذج كونية، حيث تؤول إلى معادلات تفاضلية يدخل فيها نصف قطر الكون a وثابت التحدب k ومتوسط كثافة المادة والطاقة في الكون ρ_{tot}، وهي:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{k}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho_{tot} \qquad (6)$$

وقد كشف فريدمان في بحثه أن هنالك ثلاثة نماذج يمكن أن يكون عليها الكون في تطوره عبر الزمن: الأول يتمثل بكون منبسط مكانياً Spatially Flat؛ بمعنى أن جميع قواعد هندسة إقليدس تكون نافذة فيه وتحدبه k يكون صفراً فهو في التشبيه المكاني ذي البعدين أشبه بورقة مسطحة.

ففي هذه الحالة، تعطينا المعادلة (6):

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho_c \qquad (7)$$

أي إن متوسط كثافة المادة والطاقة هو الكثافة الحرجة Critical density؛ أي بالضبط:

$$\rho_{tot} = \rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G} \quad (8)$$

النموذج الثاني يتمثل بكون مغلق Close Universe ذي تحدب زمكاني موجب، ينشأ عن الفردنة ليتوسع مكانياً، فتزداد المسافة بين المجرات حتى يبلغ الكون في حجمه قدراً أعظم يعود بعدها لينطوي على نفسه في عملية تكوّر جاذبي Gravitational Collapse عظيم، حيث تتناقص المسافة بين المجرات ليعود الكون إلى حالة الفردنة؛ أي يعود إلى النقطة التي انطلق منها. مثل هذا الكون ينبغي أن يحتوي قدرًا كافيًا من المادة والطاقة يؤهله للطي الشامل. هذا القدر ينبغي أن يكون أكبر من الكثافة الحرجة $\rho > \rho_c$.

أما النموذج الثالث للكون بحسب فريدمان، فهو الكون المفتوح Open Universe ذو التحدب السالب الذي ينشأ عن الفردنة ويتوسع بتسارع كبير ويستمر في حالة التوسع حتى يتبدد تماماً. يحصل هذا عندما يكون متوسط كثافة المادة والطاقة في الكون أقل من الكثافة الحرجة $\rho < \rho_c$.

في نهاية الأربعينيات، قام جورج جامو George Gamow بوضع نموذج كوني فيزيائي وفقاً لنظرية النسبية العامة في محاولة لتفسير الوفرة الطبيعية للعناصر الكيميائية الموجودة في الكون. فمن المعروف أن الكون يحتوي على ما يقرب من 76% هيدروجين وحوالي 23% هيليوم و1% عناصر الجدول الدوري الباقية وعددها تسعون عنصراً. ولهذا الغرض، وضع جامو وآخرون مساراً تطورياً للكون عام 1948 نجده في أبحاثه وأبحاث جماعته [28] و[29]، مبتدئًا بكون صغير عمره جزء من عشرة آلاف جزء من الثانية ودرجة حرارته مليون مليون درجة كلفن. وقد وظّف جامو في نموذجه هذا علوم النسبية العامة والجسيمات الأولية المعروفة في عهده والميكانيك الإحصائي. فنتج عن هذا المسار التطوري إنتاج نوى ذرات الهيدروجين والهيليوم خلال الدقائق الثلاثة الأولى من عمر الكون بالنسب الطبيعية تقريباً [30]. لكن بقي موضوع إنتاج العناصر الأخرى غير مفهوم. ثم أدرك جامو أن العناصر الأثقل أي ذوات الأوزان الذرية التي أعلى من الوزن الذري للهيليوم يتم إنتاجها في باطن النجوم التي تنشأ أصلاً من تراكم الهيدروجين والهيليوم فتحرق الهيدروجين ثم الهيليوم لإنتاج العناصر الكيميائية الأثقل في باطنها. وكلما كان النجم أكبر كتلة تمكن من تكوين عناصر أثقل عبر عمليات الاندماج النووي بمراحل مختلفة وسيرورات Processes مختلفة. وهذا ما كان قد كشفت عنه أبحاث جودفري باربيج وفرد هويل في بداية الخمسينيات [31]. ثم توالت الأبحاث في هذا المجال، واستمر الباحثون في تفسير مراحل تكون العناصر الثقيلة في باطن النجوم عظيمة الكتلة وصولاً إلى المستعرات العظمى [32] وتدقيق رؤيتهم لذلك [33].

إشعاع الخلفية المايكروي الكوني The Cosmic Microwave Background Radiation

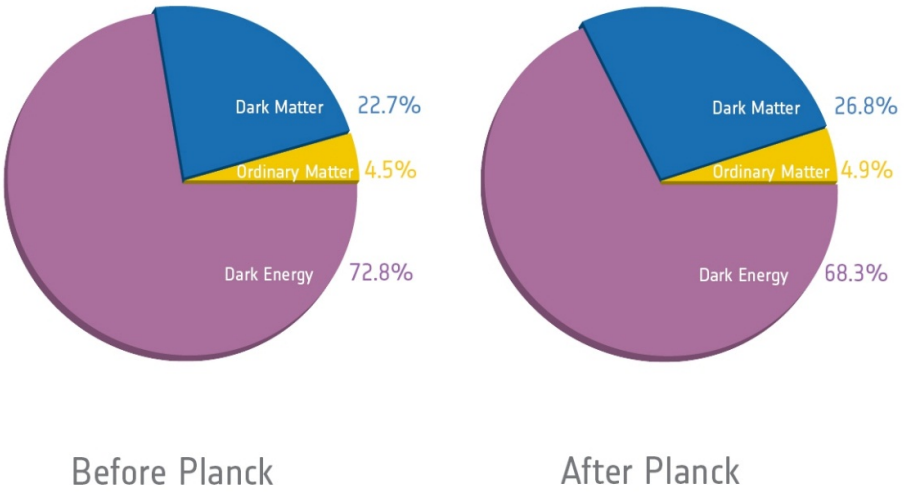
وإذ تتكون النوى الأولى للهيدروجين والهيليوم ونظائرهما وتنخفض درجة حرارة الكون نتيجة لتوسعه، فإن الإلكترونات تصبح قادرة عندئذٍ على الارتباط مع تلك النوى وتكوين ذرات مستقرة حالما تبلغ درجة حرارة الكون قدراً مناسباً لحصول ذلك. ونتيجة لذلك الارتباط، تُطلق الذرات فوتونات ذات طاقة محددة هي طاقة الربط الذرية بين الإلكترونات ونوى الذرات، وتنتشر هذه الطاقة على شكل إشعاع لتملأ الكون الشفاف Transparent بعدما كان معتماً Opaque. فتسير تلك الفوتونات دون عائق تقريباً ويحصل لها انحياز أحمر نتيجة توسع الكون وهبوط درجة حرارته حتى تصل درجة حرارة الكون إلى حدود 5 درجات كلفن في عصرنا هذا بحسب ما وجده جامو وجماعته نظرياً، لتشكل تلك الفوتونات اليوم خلفية موجية حرارية للكون تقع في نطاق الترددات المايكروية ونستطيع رصدها عندما نجري مسحاً للخلفية الكونية.

وهذا ما صار اليه الأمر عندما قام المهندسان آرنو بنزياس وروبرت ولسون من شركة بيل بمسح السماء بحثاً عن مصادر كهرمغناطيسية في نطاق الترددات الماكروية، فعثرا دون قصد على إشعاع الخلفية المايكروي الكوني التي توقعتها نظرية جامو ونالا جائزة نوبل لعام 1978. فقد وجد بنزياس وولسون أن هنالك محيطًا متجانسًا Homogeneous ومتناسقًا Isotropic من الإشعاعات عند طول موجي بحدود 7 سم ودرجة حرارة مكافئة تعدل 3 درجات كلفن [34]. وصار هذا الاكتشاف محور الدراسات المتعلقة بالمراحل الأولى لنشأة وتطور الكون، حيث بيّن روبرت ديكي وجماعته [35] أن هذا الإشعاع هو بالفعل من بقايا الانفجار العظيم الذي نشأ عنه الكون؛ إذ إنه يصدر عن طيف حراري بلانكي مثالي ويتوافق مع ما تتوقعه نظرية الانفجار العظيم. ولقد تم تطوير أجهزة ومعدات لقياس إشعاع الخلفية المايكروي الكوني لإجراء مسح دقيق

للسماء ومعرفة درجة تناسق توزيع هذه الخلفية وحساب درجة الحرارة على نحو أدق. وقد تمكن كوري وولكنسون عام 1976 من الكشف عن وجود شيء من اللاتناسق Anisotropy في الخلفية المايكروية الكونية [36]. وعزز ذلك الفيزيائي الفلكي جورج سموت بقياسات أكثر دقة [37] استخدمت فيها طائرة U2. ثم توالت الأبحاث [38] التي قدمت صورة أوضح لعدم التناسق. وتم إطلاق المسبار الفضائي COBE عام 1992 من قبل وكالة الفضاء الأمريكية NASA لتقديم الصورة الأوضح، حيث تم تحليل النتائج وتبين أن هنالك لاتناسقاً واضحاً يتضمن معلومات مهمة جدًا عن مراحل الخلق الأولى [39].

تكمن أهمية دراسات إشعاع الخلفية المايكروي الكوني في أنها تزودنا بمعلومات مهمة عن هندسة الكون ومقدار كثافة المادة والطاقة فيه وعمر الكون وسرعة توسعه لحظة تكوين الذرات الأولى. وعليه، فإن صورة الخلفية المايكروية الكونية هي شهادة ميلاد الكون الذي نعيش فيه. ولقد توالت الجهود في الكشف الدقيق عن خصائص إشعاع الخلفية المايكروي الكوني، فتم إجراء قياسات في القطب الجنوبي، كما تم إطلاق كاشف فضائي أمريكي آخر هو WMAP، وتلاه المسبار الفضائي الأوروبي بلانك Planck عام 2012.

ما يهمنا هنا هو علاقة نتائج قياس إشعاع الخلفية المايكروي الكوني بالمادة المظلمة. ذلك أن معرفة متوسط الكثافة في الكون عند تشكل الذرات الأولى يمكّننا من معرفة مقدار كتلة الكون [40] و[41]. وبمقارنة هذه المعلومة مع كمية المادة المرصودة فعلاً في الكون، نتمكن من معرفة ما إذا كان هنالك نقص في مادة الكون فضلاً عن معرفتنا لهندسة الكون ومصيره. وبالفعل، فقد أخبرتنا تحليلات الخلفية الكونية التي تحسستها كواشف القمر الصناعي WMAP والقمر الصناعي Planck أن هندسة الفضاء الكوني هي هندسة إقليدية Euclidean إلى حد كبير [42]. وهذا يعني ضمنياً أن متوسط كثافة المادة في الكون لابد من أن تكون مساوية للمقدار الحرج بحسب معادلات فريدمان. إلا أن الأرصاد الفلكية تبين أن ما هو منظور من مادة في الكون أقل كثيراً مما تتطلبه الكثافة الحرجة. وبموجب ذلك، وبحسب الأرصاد التي قامت بها كواشف القمر الصناعي بلانك [42]، فإن نسبة المادة المظلمة في الكون هي بحدود 26.6% ونسبة الطاقة المظلمة هي بحدود 68.5% ونسبة المادة المرئية (الباريونية) هي بحدود 4.9%، في حين أن القياسات السابقة التي قدمتها تحليلات أرصاد WMAP [43] كانت قد بينت أن نسبة المادة المظلمة هي 22.7% ونسبة الطاقة المظلمة هي 72.8%، أما نسبة المادة المرئية فهي 4.5%. وهذه المعلومات موضحة في الشكل (3).

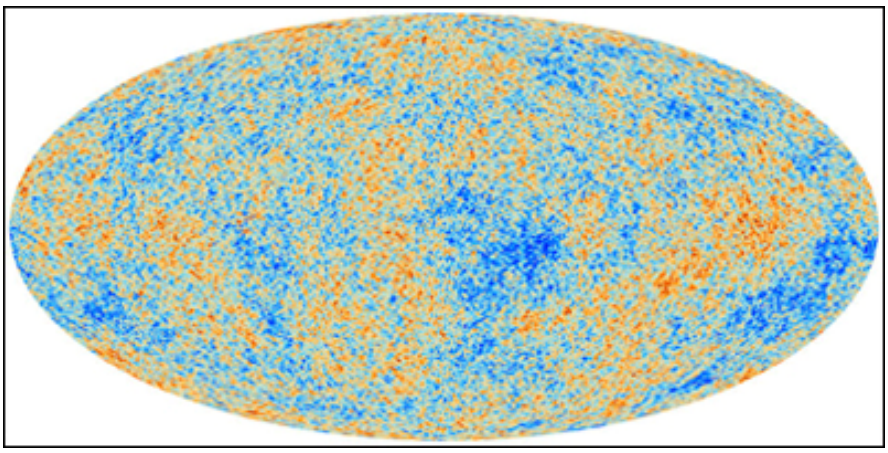


الشكل (10): نتائج مشروع المجس الفضائي الأوروبي بلانك بالمقارنة مع ما قبله [44].

أما بخصوص توزيع اللاتجانس الزاوي الطيفي، فإنه يحسب بدلالة التوافقيات الكروية كما في معادلة التوزيع الحراري:

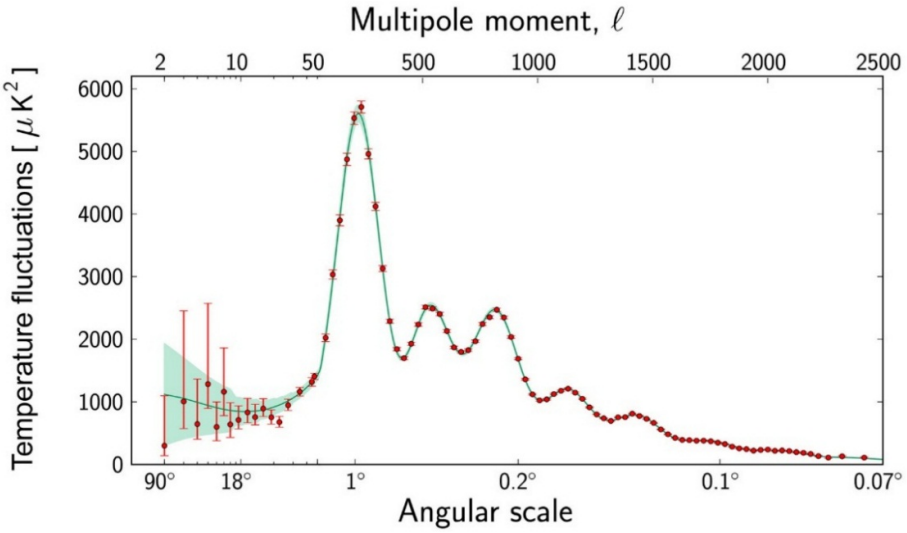
$$\frac{\Delta T}{T} = \sum_{l,m} C_{lm} P_{lm} \qquad (9)$$

حيث C_{lm} هي معاملات التوزيع الزاوي على السطح الكروي الذي يسمى سطح التشتت الأخير Last Scattering Surface لحظة انطلاق الفوتونات من الذرات الأولى. ويبين الشكل (11) صورة التوزيع الحراري للكون بحسب أرصاد بلانك.



الشكل (11): التوزيع الحراري للكون بحسب أرصاد المجس الفضائي بلانك (المصدر: essa.int).

إن التوزيع الزاوي لتفاوت درجات الحرارة الموصوف في الشكل (11) إنما هو إعادة رسم لمعطيات القياسات الكونية للخلفية الكونية المايكروية. وهذه القياسات في واقعها تحسب بدلالة معاملات متعدد الأقطاب Multipole التي تعطى بدلالة العدد الأزيموثي l وتفرعاته (العدد m) كما في المعادلة (9). وكلما كانت زاوية القياس صغيرة كانت قيمة l كبيرة، والعكس صحيح. وقيمة l الكبيرة تعني متعدد حدود عاليًا، مما يتوفر على عدد نقاط كبير.



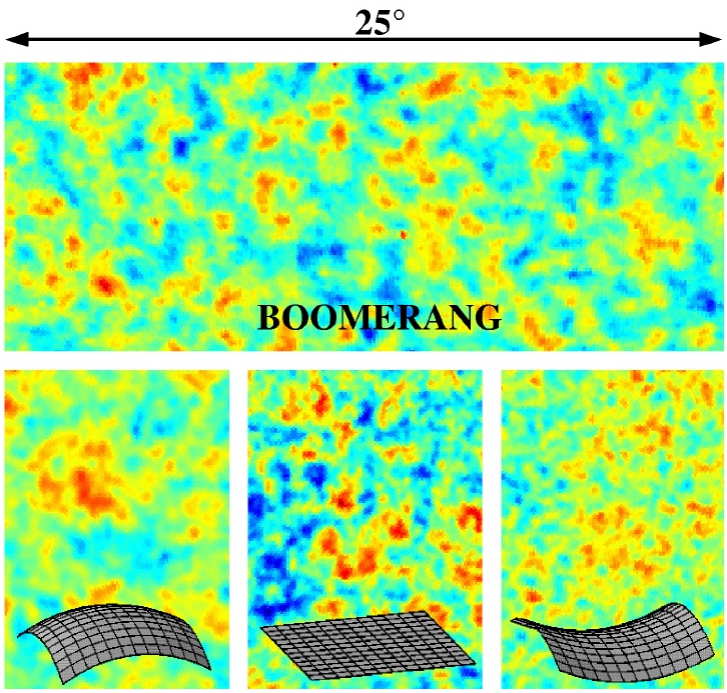
الشكل (12): التوزيع الطيفي لتفاوت درجات الحرارة المكافئة للخلفية الكونية المايكروية [44].

لم يخلُ النموذج الكوني القياسي Standard Model من المشاكل؛ إذ ظهرت إشكالات جدية تتعلق بهندسة الكون وتشكُّل البنى الكبرى فيه كالمجرات والعناقيد المجرية. ويمكن الاطلاع على هذه الإشكالات في المصدر [45].

لكن نظرية أخرى ربما أصبحت الآن جزءاً من النموذج القياسي هي نظرية التضخم الكوني Cosmic Inflation التي بررت وفسرت العديد من هذه المشكلات. هذه النظرية كان قد وضعها عام 1981 الفيزيائي ألان كوث [46]، ثم أدخلت عليها تطويرات كثيرة في مقدمتها ما ساهم به

الفيزيائي أندريه لیندا [47]. ومن الجدير بالذكر أن علماء الكوزمولوجيا يتمسكون بنموذج الانفجار العظيم برغم العيوب الكثيرة التي فيه، وسبب ذلك أنه يقدم تفسيراً لمظاهر عديدة على رأسها تفسير النسبة الطبيعية للعناصر الكيميائية كما أسلفنا وتفسير وجود إشعاع الخلفية المايكروي الكوني ونشوء البنى الكونية الكبرى. ويعتقد في علوم الكوزمولوجيا أن كمية المادة المظلمة في الكون قد تغيرت منذ انطلاقته الأولى على الرغم من مجهولية كيفية نشوء هذه المادة. وفي الواقع، فإن هذه التقديرات تنطلق من الركون إلى متوسط تسارع الكون وربطه بشكل مباشر بمقدار المادة التي يحتويها الكون. وفي الحقيقة، ربما يكون الأمر مختلفاً تماماً عن هذا التصور.

وتشير تحليلات إشعاع الخلفية المايكروي الكوني إلى أن الكون مسطح مكانياً، وهذا ما أكدته أرصاد المجس الفضائي بلانك [42].



الشكل (13): كيفية تقدير هندسة الكون من خلال الأحجام الزاوية للتباين الحراري (المصدر: Boomerang Project).

ومن الجدير بالذكر هنا أن نتائج المسح الكوني التي يقدمها بلانك وأشباهه من المراصد إنما تحظى بموثوقية عالية بخصوص هندسة الكون، لأنها تعبير شبه مباشر عن واقع الحال. فالشهادة بأن الكون مسطح مكانياً هي تعبير عن واقع هندسي مأخوذ بالقياسات المباشرة، إلا أن مقولة أن متوسط الكثافة فيه قائم على حسابات نظرية النسبية العامة، فالنظرية توجب أن يكون الفضاء الكوني المسطح مُلزماً بشرط الكثافة الحرجة كما تبين المعادلة (8). بالتالي، فإن هذا الاستنتاج الأخير قائم على فرض صحة النظرية وكمالها. من جانب آخر، فإن القول بوجود مادة غير مرئية (مظلمة) هو خيار يمليه واقع معلوماتنا عن نسبة كمية المادة المرئية في الكون إلى كمية المادة التي تتطلبها الكثافة الحرجة. وهذا التخمين، أي فرض وجود المادة المظلمة، تدخل فيه عوامل ومتغيرات كثيرة. بالتالي، فإنه يصبح أقل موثوقية كثيراً من القول إن الكون مسطح مكانياً.

ولتأكيد هذه الحقيقة، أقول إن اكتشاف تسارع توسع الكون [48] عام 1998 دفع الكوزمولوجيين إلى القول إن الكون يحتوي على طاقة مظلمة Dark Energy [49]. وجرى هذا على حساب ما كان يُظن أنه مادة مظلمة فقط. فانتزعت نسبة منها جُعلت رصيداً ممولاً للطاقة المظلمة. والطاقة المظلمة هي مصطلح آخر يتداخل مع مشكلة المادة المظلمة، وما زال يفتقر إلى الحسم النظري والمفاهيمي.

تشكّل البنى الكونية العظمى

نقصد بالبنى الكونية العظمى المجرات والعناقيد المجرية. وإذا كانت نظرية الانفجار العظيم صحيحة، حيث تشكل نوى الذرات من عناصر أولية ألّفت الحساء الكوني

الأساسي، وإذا كانت السدم الغازية الكبرى قد تألفت من تلك النوى بعد أن اقتنصت إلكتروناتها وأصبحت ذرات تؤلف سحباً هائلة من غازات الهيدروجين والهيليوم، فكيف تشكّلت من هذ السدم البنى الكونية العظمى؟ والجواب البدهي هو أن هذه البنى لابد من أنها قد تكونت من تراكم الغازات على بعضها في نقاط تكون فيها الكثافة أكبر منها فيما يجاورها. ويعني ذلك أنه لابد من أن الفضاء الكوني كان يتضمن بعض اللاتجانس، وقد شكلت النقاط ذوات الكثافة الأعلى بذوراً نشأت عنها المجرات والعناقيد المجرية. وتشير الحسابات النظرية إلى أن نسبة اللاتجانس في الكثافة اللازمة في حدها الأدنى تقترب من $\frac{\Delta\rho}{\rho}=10^{-3}$.

إلا أن أرصاد إشعاع الخلفية المايكروي الكوني وجدت أن مقدار نسبة اللاتجانس لاتزيد بأي حال من الأحوال على 10^{-5} [50]. وهنا برز السؤال: كيف للتجمعات المجرية الكبرى أن تنشأ في مثل هذه الحال؟ هنا برزت ضرورة وجود كمية كبيرة من المادة اللاباريونية غير المرئية ألفت في تصور الكوزمولوجيين حفراً للطاقة Energy Wells ساهمت في دفع المادة الباريونية إليها لتتراكم على بعضها وتؤلف التجمعات الكونية العظمى [51]. وكان هذا سبباً مضافاً إلى ضرورة وجود المادة المظلمة. لكننا لسنا واثقين تماماً من أن نسبة اللاتجانس المحسوبة في حدها الأدنى نظرياً هي المقدار اللازم بالفعل لتشكل البنى الكونية العظمى، وهنا ثغرة على هذه الحجة.

المادة المظلمة في علم الجسيمات الأولية

دأب فيزيائيو الجسيمات الأولية منذ زمن طويل على تقديم مقترحاتهم لتفسير المادة المظلمة. وقد حرص تقرير المراجعة الذي نشره ينجمان وجماعته عام 1996 على تعزيز اقتراح أن تكون الجسيمات فوق التناظرية Supersymmetric هي الجسيمات المؤلفة للمادة المظلمة [52]. إلا أن دراسة أحدث بينت أن هنالك بدائل أخرى في عالم الجسيمات الأولية [53].

وبحسب النوذج القياسي للجسيمات الأولية، فإن المادة تتألف من فيرميونات، وهي الجسيمات التي لها برم Spin بمقدار نصف عدد صحيح. والفيرميونات Fermions بدورها تنقسم إلى كواركات Quarks (وهي المكونات الأساسية للهادرونات كالبروتونات والنيوترونات) ولبتونات Leptons. أما ما يربط بين الفيرميونات فهي البوزونات Bosons التي تمتلك برومًا بأعداد صحيحة تحمل القوى بين الجسيمات وهي الفوتونات الناقلة للقوى الكهرمغناطيسية وجسيمات $W^{\pm},Z^{0}$ التي تنقل القوى الكهرضعيفة والجلوونات Gluons التي تنقل القوى النووية الشديدة والجرافيتون وهو جسيم افتراضي عديم الكتلة له برم مقداره 2 يقوم بنقل القوى الجاذبية.

تُعرَف تفاعلات الجسيمات الأولية عن طريق الكشف عن التناظرات Symmetries الخاصة بها التي تتمتع بها كزمر Groups، وهذه هي الوسيلة الأفضل. وقد قفز فيزيائيو الجسيمات إلى القول بوجود تناظرات على مستوى البرم النظائري Isotopic Spin، فصار التفكير إلى افتراض وجود جسيمات نظيرة للفيرميونات هي بوزونات وجسيمات نظيرة للبوزونات هي فيرميونات. هذه الجسيمات سميت الجسيمات فوق التناظرية Supersymmetric Particles. وعلى الرغم من البحث المضني في مسارعات الجسيمات، بما في ذلك المصادم الهادروني الكبير، فإن أياً من هذه الجسيمات لم يتم الكشف عنها حتى الآن. نعم هنالك احتمال أن يحتاج توليد هذه الجسيمات قدراً كبيراً من الطاقة لم تبلغه المسارعات المتوفرة حالياً.

مقترحات لتأليف المادة المظلمة

لغرض تغطية النقص الكبير في كتلة المادة المؤلفة للكون ولسد النقص الذي تمثله تلك الكتلة، فقد قدم الباحثون العديد من المقترحات من أهمها:

أجرام الهالة الكتلية المتراصة MACHO

كان هذا أول المقترحات لتعويض المادة المظلمة، حيث ساد الاعتقاد بوجود أجرام جسيمة غير مرئية في الهالات المجرية كونها لا تبعث ضياء يمكن رصده. ومن هذه الأجرام: الثقوب السود والنجوم النيوترونية والأقزام البنية والكواكب السائبة. وعلى الرغم من أن الأقزام البيض والأقزام الحمر تبعث ضياءً خافتاً، فإن بعض الباحثين يضمها أيضاً إلى عائلة أجرام الهالة المجرية [54]. ويمكن الكشف عن مثل هذه الأجرام الجسيمة بواسطة تقنية التعدس الجاذبي المايكروي، حيث يؤدي مرور مثل هذه الأجرام أمام النجوم إلى مضاعفة سطوعها لفترة قصيرة بالتأثير التعديسي للضوء القادم من مصدر بعيد يقع وراء ذلك الجرم. وبالنظر لتطور التقنيات البصرية ودقة القياس العالية لشدة الضوء القادم من النجوم، فقد شرعت فرق بحثية عديدة في ملاحقة هذه الأجرام بالأرصاد للكشف

عنها. ولقد أفادت الأرصاد بعدم توفر أي كمية ذات شأن من الأجرام في مدى الكتلة الذي يقع بين ربع كتلة القمر وحتى 100 كتلة شمسية. إلا أن إحدى المجموعات البحثية أفادت بأنها كشفت عن أجرام ذوات كتل بحدود نصف كتلة الشمس وتعدل مجموع كتلتها ما يوازي 20% من كتلة المادة المظلمة التي تحتاجها مجرتنا [55]. وهذا يعني أن مثل هذه الأجرام ستكون عبارة عن أقزام بيض وأقزام حمر بالضرورة. إلا أن مجموعة بحثية أخرى لم تتمكن من تأكيد تلك الادعاءات على الرغم من أن تقنياتها تتمتع بحساسية لقياس التعديس الجاذبي تبلغ ضعفي ما كان لدى المجموعة الأولى [56]. فضلاً عن ذلك، فإن أرصاد تلسكوب هابل الفضائي أكدت أن 1% من كتلة الهالة المجرية فقط يمكن أن يكون مؤلفاً من عمالقة حمر [57] و[58].

أما فيما يخص إمكانية وجود ثقوب سود بكميات كبيرة في أطراف المجرة، فإن هذا أمر مستبعد لكون هذه الثقوب لو وجدت لكانت مصدرًا لجاذبية شديدة تؤدي إلى اندفاع الغازات والأجرام الأخرى نحوه، مما يؤدي إلى صدور ضياء وإشعاعات يمكن كشفها بواسطة المراصد الفضائية، وربما المراصد الأرضية أيضاً. وهكذا يمكننا القول إن فرضية أجرام الهالة الجسيمة المتراصة لم توفق في إيجاد حل لمشكلة المادة المظلمة.

الجسيمات الأولية المؤلفة للمادة المظلمة

من خلال دراسة كمية المادة المظلمة التي يحتاجها الكون ودراسة أنماط توزيعها، وضع باحثو الجسيمات الأولية نصب أعينهم مجموعة من الجسيمات الأولية التي يمكن أن تؤلف المادة المظلمة واستبعدوا جسيمات أخرى لكونها لا تفي بالمقدار اللازم.

نيوترينوهات النموذج القياسي

حتى عهد قريب، كان الفيزيائيون يعتقدون أن النيوترينوهات يمكن أن تكون مثالية لتأليف المادة المظلمة، وذلك لأنها جسيمات لا تتفاعل إلا بشكل ضعيف مع بقية الجسيمات ولا يختلف على وجودها أحد [59]. وكان اعتماد فيزيائيي الجسيمات في اختيارها لأنها تمتلك كتلة. لكنهم وجدوا بعد تدقيق القيود والشروط التي تفرضها النظرية والأرصاد أن كمية هذه النيوترينوهات لن تكفي لسد النقص الذي نحتاجه في متوسط كثافة المادة في الكون. فالتجارب تبين أن هنالك سقفًا لكتلة النيوترينو هو [60]:

$$m_\nu < 2.0 \text{ eV} \qquad (10)$$

النيوترينوهات العقيمة Sterile Neutrinos

وهي صنف من النيوترينوهات لا يتفاعل إلا من خلال المجال الجاذبي، ولا يتفاعل بموجب تفاعلات النموذج القياسي. وكان دودلسون وودرو [61] قد اقترحا هذا النوع من النيوترينوهات لكي يكون ممثلاً للمادة المظلمة. ويبدو أنه لا يوجد ما يمنع من تمثيل هذه النيوترينوهات العقيمة للمادة المظلمة الساخنة أو الباردة.

الآكسيونات Axions

هي جسيمات افتراضية اقترحها بيسي وكوين عام 1977 لحل مشكلة حفظ التماثل والشحنة في القوى النووية الشديدة [62]. الأكسيونات ليس لها برم، وتفاعلها مع المادة الباريونية ضعيف جداً. ويبدو أن هذه الجسيمات يمكن أن تكون مادة مظلمة بعد استيفاء المتطلبات التي تقررها الشروط الكوزمولوجية كافة، علماً بأن كتلة هذه الجسيمات الافتراضية لا تزيد على 0.01 eV، وهي كتلة صغيرة جداً [63]. وتقوم عملية الكشف عن الآكسيونات على فكرة صدور موجات راديوية عنها حين تتفاعل مع مجال مغناطيسي شديد. ثم يجري حصر هذه الموجات في تجويف أسطواني يقوم بتضخيم الموجات التي تمتلك ترددات خاصة. لذلك تتم تهيئة مجال مغناطيسي بشدة بحدود 100 ألف جاوس يتوقع أن تمر خلاله الآكسيونات المفترضة. وعلى فرض أن كتلة الآكسيون هي 2 مايكرو إلكترون فولت، فإن عدد الآكسيونات التي يتوقع أن تمر خلال الكاشف في الثانية الواحدة هي 10^{30} جسيم.

إذا كانت الأكسيونات موجودة كجزء من تكوين المادة المظلمة، فإنها لابد من أن تتفاعل مع الجسيمات الأولية التي يشملها النموذج المعياري Standard Model [64] و[65]، وعليه، يجب أن تكون قابلة للكشف عن طريق التحلل الناتج عن تصادم فوتونين؛ إذ تظهر هذه العملية كخط انبعاث بصري واحد ذي شدة تتناسب مع كثافة الأكسيونات؛ أي المادة المظلمة. ولقد أفادت طرائق البحث الطيفي عن خط الانبعاث المذكور مما توفر في تقنيات التعدس الجاذبي [66]، وتم تحسين كفاءة الكشف ثلاثة أضعاف مقارنة بدراسات سابقة. وبذلك تم اشتقاق حد أعلى لترابط فوتونين في نطاق الكتلة $4.5 < m < 7.7\,eV$. وهذا جعل الباحثين قادرين على النظر في نطاق محدد لطاقات الجسيمات المتفاعلة لتشخيص خط الانبعاث المزعوم. وفي بند قادم، سنبين التفاصيل التجريبية لهذه العملية.

أما في قائمة الجسيمات فائقة التناظر التي أخذت التسمية WIMPs؛ أي الجسيمات ذات التفاعل الضعيف Weakly Interacting Massive Particles فإن الجسيمات المقترحة هي:

النيوترالينو Neutralino

هو جسيم افتراضي ينتمي إلى عائلة الجسيمات فوق التناظرية، وهو حالة مستقرة تتألف من خليط البوزينو (وهو فوق تناظري جسيمات Z) والفوتينو (وهو فوق تناظري الفوتون) والهجزينو (وهو فوق تناظري الهيجز). وقد اقترح هذا الجسيم ليكون الأوفر حظاً في تشكيل المادة المظلمة [67].

إذا كان النيوترالينو ليؤلف شطراً كبيراً من الهالة المجرية، فإنه سوف يستقر في النهاية في قلب المجرة ولب الشمس ومركز الأرض. ولقد اعتبر بعض الباحثين أن النوع الأخف من هذه الجسيمات بكتلة تتراوح ما بين 10-10000 جيجا إلكترون فولت هو الأكثر احتمالاً لتأليف المادة المظلمة [68]. ويعتقد الباحثون في الجسيمات الأولية أن بالإمكان الكشف عن هذه الجسيمات من خلال قياس توزيعها الزاوي في حركتها نحو الأرض على الرغم من ضعف تفاعلها مع مادة الأرض، إلا أن تشتتها خلال مرورها يمكن أن يعطينا توزيعاً زاوياً يمكننا من الكشف عنها. أما عن طرق اكتشاف النيوترالينو فهنالك طريقتان: الأولى غير مباشرة وهي التي تستخدم مرصد أشعة جاما ومرصد النيوترينوهات وتحاول الكشف عن عمليات فناء أزواج النيوترالينو في قلب المجرة أو لب الشمس [69]. أما الطريقة الثانية فهي التي تستخدم الخزانات الباردة Cryogenic التي تحوي سوائل من مواد تظهر سلسلة تفاعلات مع النيوترالينو مثل تجربة **Large Underground Xenon experiment (LUX)** التي تقبع على عمق 1500 متر تحت الأرض [70]. إحدى هذه التجارب الكبيرة كانت قد فشلت في الكشف المؤكد عن الجسيمات المؤلفة للمادة المظلمة [71]. تبعتها محاولات أخرى كان أشهرها تجربة LUX التي فشلت هي الأخرى في الكشف عن شيء مؤكد من جسيمات WIMPS التي اقترحها أصحاب الجسيمات الأولية. وهذه التجربة هي ما سنتحدث عنه في جزء آخر من هذا البحث.

الهيجزينو Higzino

هذا هو الرفيق فوق التناظري لجسيم الهيجز المؤسس لكتل الجسيمات حسبما يتوقع فيزيائيو الجسيمات الأولية. وهو جسيم فيرميوني أثقل كثيرًا من الهيجز. فمن خلال تفاعلات هذا الجسيم ومتولداته، يتألف أخف جسيم قياسي Lightest Scalar Particle معروف نظرياً. هذا الجسيم الذي يعتقد أنه يؤلف المادة المظلمة. لكن التجارب، وأهمها قياسات المصادم الهادروني الكبير، لم تثبت حتى الآن وجود مثل هذا الجسيم [72].

المادة المظلمة كمجال مقياسي

المجال المقياسي Scalar Field هو مجال كمي لا يمتلك برماً. وقد بنيت تصورات مفادها أن المادة المظلمة يمكن أن تتألف من مجال عددي هو عبارة عن جسيمات ذات كتل قليلة جداً بحدود 10^{30} إلكترون فولت [73]. وهذه كتلة قليلة جداً؛ إذ تقع في حدود التقلبات الكمومية للخلاء. ومن هنا جاءت مفردة *quintessence*، التي تشي بأثيرية هذه الجسيمات، في عناوين الإبحاث التي تضمنت المقترح. وقد بُنيت نماذج كونية تتضمن مثل هذا المقترح [74]. بالتالي، فإن المادة المظلمة في هذه التصورات هي أشبه بالأمواج منها بالمادة. وكانت أبحاث سابقة قد بينت أن الهالات المجرية هي عبارة عن كثيف بوز - آينشتاين Bose-Einstein Condensate لكموم خفيفة جداً [75]. وعليه، تم الحديث في بحث آخر عن النجوم المؤلفة من كثيف البوزونات [76]. ومن الجدير بالذكر هنا أن الآكسيونات التي مر ذكرها هي نوع من الجسيمات العددية الخفيفة عديمة البرم. وعليه، يمكن أن تقع ضمن هذا التصنيف من المادة المظلمة.

الفوتونات المظلمة Dark Photons

في عام 2009، اقترح أكرمان وباحثون آخرون فكرة أن تكون المادة المظلمة هي عبارة عن فوتونات معتمة [77]. هذه الفكرة تقوم على افتراض وجود مجال كهرمغناطيسي يتفاعل مع المادة المظلمة التي يفترض أنها مؤلفة من شحنات موجبة وسالبة. وقد أسهب الباحثون في تفاصيل هذا المقترح حتى بدا أنه أشبه بقصة تحكي فيزياء جديدة خارج التصورات المعهودة مما يجعلها صعبة القبول. إلا أن تجارب عديدة [78] نفت حصول العواقب التي تنبأت بها هذه الفرضية، مما يجعلها غير مناسبة لتفسير المادة المظلمة.

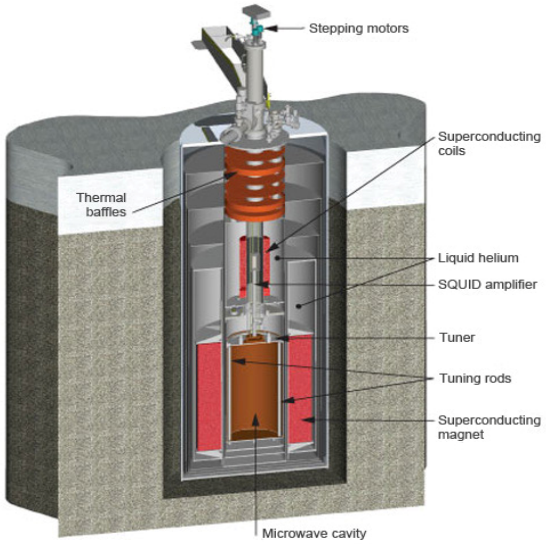
إن مقترحات تفسير المادة المظلمة بفرضية وجود الجسيمات فوق التناظرية قد باء أغلبها بالإحباط بعد أن فشل المصادم الهادروني الكبير بالكشف عن مثل هذه الجسيمات [79] وفشلت تجربة LUX في الكشف عن إشارات مؤكدة عن وجود الجسيمات المتوقعة [80].

طرق الكشف عن الجسيمات ضعيفة التفاعل WIMPs

بالنظر إلى أن هذه الجسيمات لا تتمظهر إلا من خلال تفاعلها مع المجال الجاذبي وتحللها إلى جسيمات أخرى، فإن الكشف عنها يكون في غاية الصعوبة. وهنالك مجموعتان من طرق الكشف: الأولى طرق الكشف المباشر والثانية طرق الكشف غير المباشر.

طرق الكشف غير المباشر

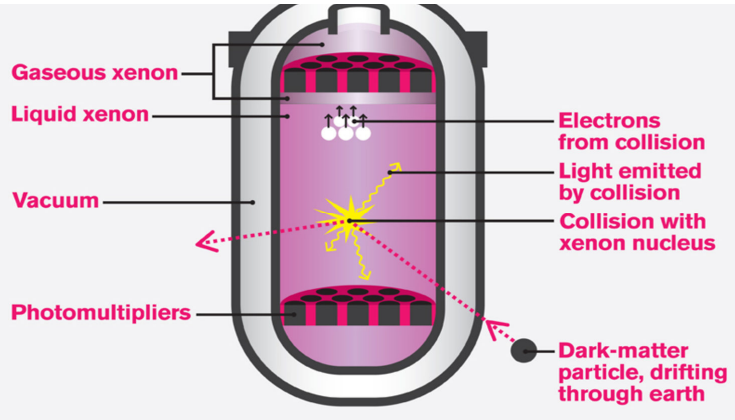
وأهمها ما تم إنشاؤه للكشف عن الآكسيونات. فالأكسيون عندما يصطدم مع فوتون، فإنه ينتج فوتونان طاقتهما تتناسب مع كتلة الآكسيون. وبما أن الآكسيونات لا تتحرك بسرعات كبيرة، فإن الفوتونات المتولدة تكون ذات طاقة قليلة جداً؛ أي إنها تكون موجات راديوية كما أسلفنا. هذه الأمواج الراديوية يتم حصرها في ما يسمى التجويف الرنيني Resonance Cavity حيث تحاط بمجال مغناطيسي شديد يؤدي إلى تضخيمها، ومن ثم يتم تحسس هذه الأمواج الراديوية وقياس طاقتها بمساعدة جهاز التداخل الكمومي فائق التوصيلية Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)، حيث يتم إجراء المسح على الموجات الراديوية المحصورة لالتقاط إشارة تتناغم مع الأمواج الراديوية في التجويف الرنيني. وقد سمي هذا بمشروع ADMX اختصاراً لعبارة Axion Dark Matter Experiment. وقد أجريت التجربة أول مرة عام 1995 في لورنس لايفمور لاب وأجريت تحسينات عليها عام 2008، ولكن الباحثين لم يتمكنوا من الكشف عن أية إشارات موثوقة تؤكد وجود الآكسيونات. وعلى الرغم من ذلك، فإنهم يؤكدون أن الآكسيونات هي الجسيمات الأفضل لتأليف المادة المظلمة [81]. إن التطورات الأحدث تتوجه نحو الكشف عن حقل من الآكسيونات بدلاً من محاولة الكشف عن جسيم واحد منها فقط [82].



الشكل (14): مخطط جهاز تجربة الكشف عن الأكسيونات (Source: ©Lawrence Livermore National Laboratories).

طرق الكشف المباشر

وهي غالباً ما تعنى بكشف الجسيمات الكتلوية ضعيفة النفاعل WIMPs. وهنالك مشاريع عديدة في العالم تعمل للكشف عن هذه الجسيمات. ومن أكثر هذه التجارب شهرة تجربة كاشف الزينون تحت الأرض الكبير Large Underground Xenon detector، ويرمز له (LUX)، وقد تم إنشاؤه داخل منجم قديم للذهب على عمق 1463 متراً في منطقة جنوب داكوتا في الولايات المتحدة الأمريكية. ويتألف الكاشف من أسطوانة تحتوي على 350 كيلوغراماً من الزينون السائل والغازي. ومن خصائص الزينون أنه يصدر وميضاً عندما يصطدم أحد الجسيمات الكتلوية ضعيفة التفاعل بنواة ذرته، كما هو مبيّن في الشكل (15)، فتقوم الكواشف الحساسة جداً بتسجيل هذه الحوادث فوراً. ونظرًا لأن مثل هذه الأحداث يمكن أن تحصل بسبب جسيمات تأتي من المحيط الخارجي ومن مصادر شتى بما فيها الأشعة الكونية فقد تم عزل برميل الزينون على هذا العمق محاطاً بجدار من الرصاص النقي سمكه متر يكفل امتصاص إشعاعات جاما وإكس الصادرة من جدران المنجم. كما تتم إحاطة الكاشف بالماء من كل جانب لضمان عدم تسرب النيوترونات والأشعة الكونية اليه.



الشكل (15): كاشف الزينون الكبير تحت الأرض (Source: ©The LUX Experiment).

توقع الباحثون أن التصادم بين جسيمات WIMPs ونوى الزينون سيؤدي إلى توليد فوتونات بطول موجي مقداره 175 نانومتر مع إلكترونات. الفوتونات سيتم كشفها من خلال المضاعفات الضوئية وعددها 61 في الكاشف. أما الإلكترونات، فيتم سحبها إلى الأعلى نحو غاز الزينون بواسطة مجال كهربائي ثم سحبها ثانية إلى السطح بواسطة مجال كهربائي أكثر شدة. وكان الباحثون قد رتبوا حساباتهم بدقة عالية ليتمكنوا من الكشف عن أي حدث ومعرفة موقعه داخل الكاشف بدقة عالية تصل إلى 1 سنتيمتر.

وعلى الرغم من المراقبة المتواصلة، لم يتم الكشف عن أحداث ذات أهمية خاصة في هذه التجربة. وفي 21 تموز / يوليو 2016، أعلنت مجموعة الباحثين في مشروع LUX عن فشل المشروع في الكشف عن أي إشارة موثوقة للجسيمات الكتلوية ضعيفة التفاعل [83]. وقد ولّد هذا الإعلان إحباطاً كبيرًا لدى الباحثين في هذا المجال. وهذا تأكيد آخر مهم على عدم نجاح مقترح تأليف المادة المظلمة من جسيمات أولية. وهو ما دعا إلى توجيه الأنظار والجهود البحثية إلى نواحٍ وأفكار أخرى.

برنامج ماجيك MAGIC للكشف الفضائي

هذا المشروع يتألف من زوج من التلسكوبات تراقب صدور إشعاعات جاما التي يمكن أن تنتج عن تحول جسيمات المادة المظلمة، إن وجدت، إلى أشعة عبر فناء الجسيمات بلقائها مع جسيمات مضادة. هذه التلسكوبات منصوبة على ارتفاعات عالية بحدود 2200 متر فوق سطح البحر في إحدى الجزر الإسبانية منذ عام 2009، وتعمل ما يزيد على 1500 ساعة سنوياً. وكلمة (MAGIC) هي مختصر لعبارة The Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov. وعلى الرغم من الحساسية العالية التي تتمتع بها كواشف هذه التلسكوبات، فإنها على مدى السنوات الثمان الماضية لم تتمكن من الكشف عن أي أثر صادر عن فناء أزواج الجسيمات التي يعتقد أنها تؤلف المادة المظلمة. وقد أعلن فريق العمل المكلف بهذا المشروع هذه النتيجة مؤخراً في ورقة علمية نشرها مؤخراً على موقع أركايف [84]. وتأتي هذه النتيجة السلبية ضربة أخرى لفرضية تألُّف المادة المظلمة من جسيمات أولية.

تجارب المصادم الهادروني الكبير LHC

توقع بعض الفيزيائيين أن تكشف تجارب المصادم الهادروني الكبير في سيرن عن مؤشرات قوية على وجود المادة المظلمة، وقد أسرع بعضهم بالمجازفة في التصريح بتنبؤات تفصيلية لما يمكن أن يحصل بهذا الصدد [85]. لكن أياً من هذه التنبؤات لم يحصل، ولا توجد مؤشرات واضحة في النتائج التي تم الحصول عليها في تجارب المصادم الهادروني الكبير حتى الآن.

أفكار بديلة لفرضية المادة المظلمة

هنالك عدة أفكار طرحت كبديل لفرضية وجود مادة مظلمة في الكون. هذه الأفكار بعضها موضعي Local يعالج طرفاً من الوقائع الأرصادية التي دفعت باتجاه فرض وجود مادة مظلمة، وبعضها الآخر شمولي Global يعالج الوقائع المختلفة معاً. وقد أصبح الوقت مناسباً على ما يبدو للالتفات إلى هذه الأفكار، وقد عجزت الجهود الحثيثة والتجارب المعقدة التي وظفت أدق التقنيات على مدى العقدين الماضيين عن اكتشاف أي أثر حقيقي للمادة المظلمة.

فرضية موند MOND Hypothesis

موند مختصر لعبارة Modified Newtonian Dynamics، وهذه فرضية اقترحها الفيزيائي موردخاي ميلغروم Mordehai Milgrom. وقد وضعَت أساساً لمعالجة مشكلة منحنيات السرعة للمجرات التي أظهرت تباينا واضحاً مع الأرصاد. وفي هذه الفرضية يقول ميلغروم إن قانون نيوتن الثاني بصيغته العامة لا ينطبق على النظم الحركية ذات التسارع البطيء جداً مثل حركة الأجزاء الخارجية للمجرات، بل لابد من وجود صيغة أخرى تعالج هذه النظم [86]. ولهذا الغرض، يفترض ميلغروم صيغة أخرى للقانون تأخذ بعين الإعتبار حالة التسارعات القليلة جداً، وهذه الصيغة هي:

$$\left.\begin{aligned} &\mathrm{F} = m\,\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)\mathrm{a}, \\ &\text{with } \mu(\mathrm{x} >> 1) = 1 \\ &\text{and} \quad \mu(\mathrm{x} << 1) = \mathrm{x} \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

وبحسب تقديرات ميلغروم، فإن $a_0 \approx 10^{-10}\, ms^{-2}$.

وقد قام ميلغروم بتطبيق القانون أعلاه على منحنيات السرعة للمجرات، فوجد أن هنالك تطابقاً جيداً بين ما تتوقعه هذه الفرضية والأرصاد المسجلة لحركة المجرات. فاستنتج أن لا ضرورة لفرضية المادة المظلمة لتفسير منحنيات السرعة للمجرات [87].

إن فرضية ميلغروم تفتقد الأساس النظري العميق ولا تنبني على نظرية واضحة، بل ربما تكون التوافقات التي حصل عليها ميلغروم صدفية. لذلك حاول ميلغروم بالتعاون مع الفيزيائي بكنشتاين أن يؤسس نظرياً لفرضيته من طرق عديدة [88].

وفيما عدا الافتقار إلى الأساس النظري، فإن فرضية ميلغروم لا تغطي تفسير الحجج الكوزمولوجية لفرضية وجود المادة المظلمة، أعني تلك التي جاءت بها تحليلات إشعاع الخلفية المايكروي الكوني التي سلف الحديث عنها آنفاً، والتي توحي بضرورة وجود المادة المظلمة لتغطية النقص الحاصل في متوسط كثافة المادة المرئية في الكون. وقد اعترض بعض الفلكيين أيضاً بأرصاد تتعلق بما يسمى عنقود الرصاصة Bullet Cluster، حيث بينت الأرصاد [89] و[90] التي اعتمدت تقنيات التعدس الجاذبي أن المادة الساخنة التي تبعث أشعة X -وهي المادة الباريونية- لا تؤلف بمجملها كتلة الغاز الحار، بل هنالك معها على مايبدو كتلة أخرى. وقد ميز الفلكيون ذلك من خلال انحراف الضوء المرصود بعملية التعدس الجاذبي، حيث وجدوا أن مركز كتلة العنقود لا يتطابق مع مركز الكتلة للمادة الباريونية كما ذكرنا آنفاً (انظر الشكل 9).

وكذلك تم الاحتجاج بحالة العنقود المجري CL0024+17 كحالة مماثلة لعنقود الرصاصة، إذ هنالك انفصام واضح بين المادة الباريونية ومركز الكتلة الكلي للعنقود يؤشر إلى وجود مادة غير مرئية تحف بالمادة الباريونية [91].

نظريات الجاذبية المحورة Modified Gravity

وأشهرها نظرية جون موفات John Moffat [92] التي قامت على أساس الجاذبية اللاتناظرية. ويدعي واضعو النظرية أن بإمكانهم تفسير كثير من الوقائع الأرصادية المهمة دون الحاجة إلى افتراض وجود مادة مظلمة. لكن هنالك نقدًا رئيسيًا يوجه إلى هذه النظرية هو أنها لا تغطي متطلبات الحالات المماسية non-Asymptotic؛ أي لا تعطي التصرف المماسي المطلوب [93]. إلا أننا في حقيقة الأمر أمام نظريات ناشئة ربما يكون لها مستقبل واعد؛ إذ لا نجد خلافاً جوهرياً لها مع الأرصاد عموماً مما يجعل رفضها دون أسس عملية قضية ذوق وتفضيل مزاجي وليس قائماً على أساس علمي رصين.

فرضية لزوجة الخلاء Vacuum Viscosity

وهذه ربما تكون أحدث الفرضيات التي تستغني عن وجود مادة مظلمة ولا ترى ضرورة لها. والفرضية تقول إن تفاعل المادة الباريونية مع تقلبات الخلاء الكمومية Vacuum Fluctuations يمكن أن يؤلف تأثيرًا ديناميكيًا كبيرًا يفسر كثيرًا من الظواهر التي أوحت بوجود مادة مظلمة [94]. وقد تم تطبيق هذه الفرضية على منحنيات السرعة لعدد كبير من المجرات الحلزونية، ووجد أنها تتطابق إلى حد كبير مع المنحنيات التي تقدمها الأرصاد الفلكية [95]. إلا أن هذه الفرضية أيضاً بحاجة إلى تأسيس نظري عميق يوضح كيفية ظهور لزوجة الخلاء كتأثير ديناميكي ينشأ عن حركة المادة الباريونية في الخلاء من خلال تفاعلها مع تقلبات الخلاء.

مناقشة وخلاصة

قدمنا في هذه المراجعة عرضاً شاملاً لمشكلة المادة المظلمة في الكون. هذه المشكلة التي أرّقت الكثير من الباحثين والتي ظهرت أساساً على أكثر من مستوى بحثي وفي أكثر من وجه. فهي في أحد وجوهها ظهرت كمشكلة عدم توافق الأرصاد الفلكية لسرعة دوران الأجزاء الخارجية للمجرات مع التوقعات النظرية، وفي مظهر آخر ظهرت كمشكلة فهم حركة تذبذب المجرات داخل العناقيد المجرية. وفي وجه ثالث برزت المشكلة عندما اكتشف الكوزمولوجيون أن الكون مسطح مكانياً مما استوجب لديهم أن يكون متوسط كثافة المادة والطاقة في الكون مساوياً للقيمة الحرجة، في حين أن ما يرونه من مادة كونية لا يتجاوز 5% فقط مما ينبغي أن يوجد. هذا فضلاً عن جوانب أخرى متعلقة بهذه المشكلة أو تلك. وهكذا أصبحت فرضية وجود المادة المظلمة مشكلة كبرى من مشاكل الكوزمولوجيا والفيزياء المعاصرة عموماً. وتفاقمت المشكلة مع إخفاق التجارب العملية في الكشف عن أية آثار لتلك المادة "السيالة" التي لا يمكن الإمساك بها والتي لا تتفاعل مع أي شيء آخر إلا عبر تأثيراتها الجاذبية فقط.

لقد قدمت مقترحات كثيرة لمكونات المادة المظلمة. وقد ساد صوت فيزيائيي الجسيمات الأولية خلال العقدين الماضيين، فانطلوا في وضع تخيلات عديدة لصور هذه المادة الغريبة، وكان أملهم الكبير منعقداً على ما يسمى الجسيمات فائقة التناظر؛ فإنهم إن كشفوها حققوا غايتين: الأولى استكمال ما يسمى النموذج القياسي للجسيمات الأولية بالتحقق من وجود هذه الجسيمات، والثاني الكشف عن تكوين المادة المظلمة ومعرفة خصائصها، وذلك ما كان سيفتح آفاقاً جديدة هائلة لتطوير علم الجسيمات الأولية، ولكن هيهات.

لقد بنيت مشاريع عديدة وأجريت أرصاد كثيرة وأنفقت أموال طائلة خلال العقدين الماضيين دون أي نتيجة إيجابية تشير إلى وجود المادة المظلمة. وقد ذاعت خلال هذه الفترة كثير من الأسماء ولمعت كثير من النجوم في عالم الفيزياء والكوزمولوجيا، لكن أياً من تلك الإضاءات لم تدم طويلاً. فقد فشلت تلك المشاريع وآخرها مشروعا LUX وMAGIC في الكشف عن وجود حقيقي لجسيمات تؤلف المادة المظلمة. وحتى مشروع KiDS لم يثبت أي توافق بين الأرصاد التي تخص اتساق المجرات والتوزيع المجري الذي يقرره نموذج الكون المنبسط [24].

إن فرضية المادة المظلمة على الرغم من هيمنتها وشيوعها في الوسط العلمي كانت وما زالت محفوفة بكثير من الاعتراضات الضمنية. أحد هذه الاعتراضات المهمة يقول: كيف لكتلة غير مرئية أن توجد بنسبة عالية في الهالات المجرية وهي تتمتع بخصائص جاذبية مثل المادة العادية وتبقى صامدة دون أن تهوي إلى مراكز تلك المجرات؟ لا بد من قوة ساندة عندئذ تمنعها من السقوط إلى مركز المجرة. ومن جانب آخر، فقد رأينا كيف أن الكوزمولوجيين فسروا نشوء البنى الكونية العظمى بفرضية وجود مادة مظلمة في المناطق ذات الكثافة العالية نسبياً، مما ساعد في جذب المادة التي كانت حول تلك المناطق وساعد في تراكمها على بعضها لتكوين نوى المجرات والعناقيد المجرية.

ومن الجدير بالذكر هنا القول إن شدة حاذبية المادة المظلمة كانت موضع تساولنا في دراسات بينت أن المادة المظلمة -إن وجدت- فإنها لا تتمتع بنفس خصائص جاذبية المادة العادية. فقد بينت إحدى الدراسات التي استخدمت معلومات عن التعدس الجاذبي للمجرات أن جاذبية المادة المظلمة ربما تكون أقل من جاذبية المادة العادية [96]. فيما بينت دراسة أخرى استخدمت مبرهنة عزم القوة Virial Theorem أن الكتلة الجاذبية Gravitational Mass للمادة المظلمة ربما تختلف عن كتلتها القصورية [97]. وضمنياً يعني هذا تأييداً للدراسة الأولى.

قدمنا في البند الخير لهذه المراجعة على نحو موجز آفاقاً أخرى تطرح بدائل لتفسير الظواهر التي دعت إلى فرض وجود مادة مظلمة. وفي طليعة هذه البدائل التي صارت تأخذ اهتماماً ديناميكا الآن فرضية موند MOND (داينميكا نيوتن المحوّرة)، فقد أصبحت تظهر بعض المقترحات التي تحاول إيجاد تطبيقات عملية تفحص صحة الفرضية من خلال ما تتنبأ به من ظواهر [98]. كما أن لنظريات الجاذبية المحورة (اللاتناظرية) رواجاً في بعض الأوساط العلمية [99]. ويبدو أن بعض هذه البدائل على الرغم مما يلحق بها من إشكالات حالياً ربما ستصمد لتصبح لاحقاً نظريات جديدة مؤهلة لتقديم تفسير للمشكلة. وهذا هو ديدن العلم، والمعرفة العلمية تتطور باستمرار وتنشأ نظريات جديدة تحوي تفاسير جديدة وأفهامًا جديدة على أنقاض النظريات القديمة.

المراجع

1. Zwicky, F., Helvetica Physica Acta, 6 (1933) 110.
2. Jeans, J., MNRAS, 82 (1922) 122.
3. Rubin, V.C. and Ford Jr, W.K., The Astrophysical Journal, 159 (1970) 379.
4. Conroy, C., Wechsler, R.H. and Kravtsov, A.V., The Astrophysical Journal, 647(1) (2006) 201.
5. Kamionkowski, M., arXiv preprint hep-ph/9710467, 1997.
6. Griest, K., Annals of the New York Academy of Sciences, 688(1) (1993) 390.
7. Zwicky, F., The Astrophysical Journal, 86 (1937) 217.
8. Kahn, F. and Woltjer, L., The Astrophysical Journal, 130 (1959) 705.
9. Einasto, J. and Lynden-Bell, D., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 199(1) (1982) 67.
10. Babcock, H.W., Lick Observatory Bulletin, 19 (1939) 41.
11. Oort, J.H., The Astrophysical Journal, 91 (1940) 273.
12. Van de Hulst, H., Raimond, E. and Van Woerden, H., Bulletin of the Astronomical Institute of the Netherlands, 14 (1957) 1.
13. Roberts, M.S., The Astrophysical Journal, 144 (1966) 639.
14. Burbidge, E.M. and Burbidge, G., The Astrophysical Journal, 129 (1959) 271.
15. Burbidge, E.M., Burbidge, G. and Prendergast, K., The Astrophysical Journal, 130 (1959) 739.
16. Burbidge, E.M., Burbidge, G. and Prendergast, K., The Astrophysical Journal, 130 (1959) 26.
17. Burbidge, E.M. and Burbidge, G., The Astrophysical Journal, 130 (1959) 12.
18. Roberts, M. and Rots, A., Astronomy and Astrophysics, 26 (1973) 483.
19. Einasto, J., arXiv preprint arXiv:0901.0632, 2009.
20. Bershady, M.A. et al., The Astrophysical Journal, 716(1) (2010) 198.
21. Dyson, F.W., Eddington, A.S. and Davidson, C., Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 220(571-581) (1920) 291.
22. Bartelmann, M. and Schneider, P., Physics Reports, 340(4) (2001) 291.
23. Moore, B. et al., The Astrophysical Journal Letters, 499(1) (1998) L5.
24. Heymans, C., "The Dark Universe", (IOP Publishing, 2017).
25. Keeton, C.R., The Astrophysical Journal, 561(1) (2001) 46.
26. Hubble, E., Proceedings of the National Academy of Sciences, 15(3) (1929) 168.
27. Friedman, A., Zeitschrift für Physik, 10 (1922) 377.
28. Gamow, G., Physical Review, 70(7-8) (1946) 572.
29. Gamow, G., Nature, 162(4122) (1948) 680.
30. Alpher, R.A., Bethe, H. and Gamow, G., Physical Review, 73(7) (1948) 803.
31. Burbidge, E.M. et al., Reviews of Modern Physics, 29(4) (1957) 547.
32. Hoyle, F. and Fowler, W.A., The Astrophysical Journal, 132 (1960) 565.
33. Wagoner, R.V., Fowler, W.A. and Hoyle, F., The Astrophysical Journal, 148 (1967) 3.
34. Penzias, A.A. and Wilson, R.W., The Astrophysical Journal, 142 (1965) 419.
35. Dicke, R.H. et al., The Astrophysical Journal, 142 (1965) 414.
36. Corey, B. and Wilkinson, D.T., "A measurement of the cosmic microwave background anisotropy at 19 GHz". In: Bulletin of the American Astronomical Society, (1976).
37. Smoot, G.F., Gorenstein, M.V. and Muller, R.A., Physical Review Letters, 39(14) (1977) 898.
38. Cheng, E. et al., The Astrophysical Journal, 232 (1979) L139.

39. White, M., Scott, D. and Silk, J., Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 32(1) (1994) 319.
40. Rubin, V.C., Weighting the universe: dark matter and missing mass. "Bubbles, Voids, and Bumps in Time: The New Cosmology", (1995) 73-104.
41. Jungman, G. et al., Physical Review Letters, 76(7) (1996) 1007.
42. Ade, P. et al., Astronomy & Astrophysics, 594 (2016) A13.
43. Komatsu, E. et al., The Astrophysical Journal Supplement Series, 192(2) (2011) 18.
44. ESA1. 22/2/2017.
45. Coles, P. and Lucchin, F., "Cosmology: The origin and evolution of cosmic structure". (John Wiley & Sons, 2003).
46. Guth, A.H., Physical Review D, 23(2) (1981) 347.
47. Linde, A.D., Physics Letters B, 108(6) (1982) 389.
48. Riess, A.G. et al., The Astronomical Journal, 116(3) (1998) 1009.
49. Frieman, J.A., Turner, M.S. and Huterer, D., Annu. Rev. Astron. Astrophys., 46 (2008) 385.
50. Parijskij, Y., The Large Scale Structure of the Universe, (1978) 315.
51. White, S.D. and Rees, M.J., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 183(3) (1978) 341.
52. Jungman, G., Kamionkowski, M. and Griest, K., Physics Reports, 267(5-6) (1996) 195.
53. Bertone, G., Hooper, D. and Silk, J., Physics Reports, 405(5) (2005) 279.
54. Croswell, K., "The universe at midnight: Observations illuminating the cosmos". (Simon and Schuster, 2002).
55. Alcock, C. et al., The Astrophysical Journal, 542(1) (2000) 281.
56. Tisserand, P. et al., Astronomy & Astrophysics, 469(2) (2007) 387.
57. Graff, D.S. and Freese, K., The Astrophysical Journal Letters, 456(1) (1996) L49.
58. Najita, J.R., Tiede, G.P. and Carr, J.S., The Astrophysical Journal, 541(2) (2000) 977.
59. Bergstrom, L., Rept. Prog. Phys., 63 (2000) 793. arXiv preprint hep-ph/0002126.
60. Weinheimer, C., Nuclear Physics B-Proceedings Supplements, 118 (2003) 279.
61. Dodelson, S. and Widrow, L.M., Physical Review Letters, 72(1) (1994) 17.
62. Peccei, R.D. and Quinn, H.R., Physical Review Letters, 38(25) (1977) 1440.
63. Rosenberg, L.J. and Van Bibber, K.A., Physics Reports, 325(1) (2000) 1.
64. Baluni, V., Physical Review D, 19 (1979) 2227.
65. Crewther, R. et al., Physics Letters B, 88(1-2) (1979) 123.
66. Grin, D. et al., Physical Review D, 75(10) (2007) 105018.
67. Bertone, G., "Particle dark matter: Observations, models and searches". (Cambridge University Press, 2010).
68. Martin, S.P., Adv. Ser. Direct. High Energy Phys., 21(515) (2010) 1.
69. Feng, J.L., Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 48 (2010) 495.
70. Reich, E.S., Nature, 494(7437) (2013) 291.
71. Collaboration, C.I., Science, 327(5973) (2010) 1619.
72. Aaboud, M. et al., Journal of High Energy Physics, 2016(9) (2016) 175.
73. Matos, T. and Urena-Lopez, L.A., Classical and Quantum Gravity, 17(13) (2000) L75.
74. Sahni, V. and Wang, L., Physical Review D, 62(10) (2000) 103517.
75. Sin, S.J., Physical Review D, 50(6) (1994) 3650.
76. Lee, J.W. and Koh, I.-G., Physical Review D, 53(4) (1996) 2236.
77. Ackerman, L. et al., Physical Review D, 79(2) (2009) 023519.

78. Walsh, K.M. Data from RHIC, other experiments nearly rule out role of 'dark photons' as explanation for 'g-2' anomaly 2015; Available at: https://phys.org/news/2015-02-rhic-role-dark-photons-explanation.html.
79. Craig, N., arXiv preprint arXiv:1309.0528, 2013.
80. Fox, P.J. et al., Physical Review D, 89(10) (2014) 103526.
81. Duffy, L.D. and Van Bibber, K., New Journal of Physics, 11(10) (2009) 105008.
82. Graham, P.W. and Rajendran, S., Physical Review D, 88(3) (2013) 035023.
83. Manalaysay, A. and Collaboration, L., "Dark-matter results from 332 new live days of LUX data". Identification of dark matter, (2016).
84. Doro, M., arXiv preprint arXiv:1701.05702, 2017.
85. Arkani-Hamed, N. and Weiner, N., Journal of High Energy Physics, 2008(12) (2008) 104.
86. Milgrom, M., The Astrophysical Journal, 270 (1983) 365.
87. Milgrom, M., The Astrophysical Journal, 270 (1983) 371.
88. Milgrom, M. and Bekenstein, J., "The modified Newtonian dynamics as an alternative to hidden matter". In: Dark Matter in the Universe, (1987).
89. Clowe, D., Gonzalez, A. and Markevitch, M., The Astrophysical Journal, 604(2) (2004) 596.
90. Markevitch, M. et al., The Astrophysical Journal, 606(2) (2004) 819.
91. Jee, M. et al., The Astrophysical Journal, 661(2) (2007) 728.
92. Moffat, J. and Toth, V., arXiv preprint arXiv:0710.0364, 2007.
93. Damour, T., Deser, S. and McCarthy, J., Physical Review D, 47(4) (1993) 1541.
94. Altaie, M.B., "Vacuum Viscosity: An Alternative to Dark Matter", (Yarmouk University, 2016) unpublished.
95. Suliman, N., "The Spiral Galaxies Rotation Curves Problem", (Yarmouk University, 2016).
96. Mustafa, M., "Gravitational Lensing and the Detection of Dark Matter", (Yarmouk University, 2010).
97. Al-Khasawneh, B. and Altaie, M.B., Jordan J. of Phys., 6(2) (2013) 65.
98. Pereira, J.P., Overduin, J.M. and Poyneer, A.J., Physical Review Letters, 117(7) (2016) 071103.
99. Koyama, K., Reports on Progress in Physics, 79(4) (2016) 046902.