الانفجارات الغاموية

يسين رحماني
باحث في علم الفلك والفيزياء الفلكية
رئيس فريق البحث في الفيزياء الفلكية ذات الطاقات العالية
قسم الفيزياء الفلكية والطاقات العالية
مركز البحث في علم الفلك والفيزياء الفلكية والجيوفيزياء، بوزريعة، الجزائر
yassine.rahmani@craag.edu.dz

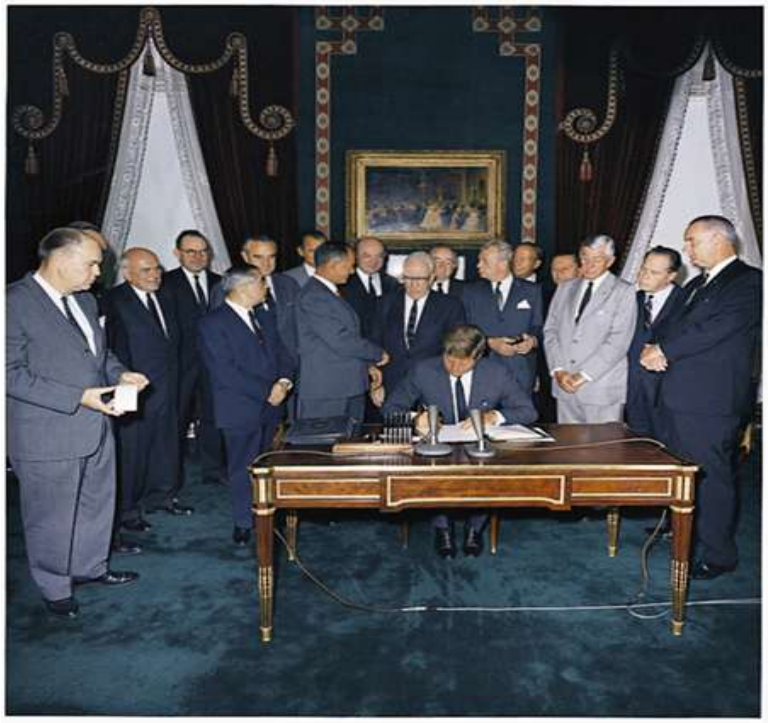
تُعَدُّ الانفجارات الغاموية من أكثر الظواهر الكونية طاقةً وإثارةً، وهي تنتج عن نهاية حياة النجوم فائقة الكتلة أو اندماج أنظمة ثنائية مضغوطة. تُصدر هذه الانفجارات إشعاعات غاما كثيفة تستمر من ملي ثانية إلى ساعات، ويتبعها وهيج ضوئي متعدد الأطوال الموجية. وتساهم هذه الظاهرة في فهم تطور النجوم، وتكوين العناصر الثقيلة، والخصائص الفيزيائية للكون المبكر. يناقش المقال تاريخ الاكتشافات والتطورات التكنولوجية المرتبطة بها، إضافةً إلى النماذج النظرية لفهم هذه الظواهر المبهرة.

1. السياق التاريخي: توطئة لاكتشاف الظاهرة ومحاولات فهمها

لا يمكن الحديث عن الانفجارات الغاموية وماهيتها دون التطرق إلى السياق التاريخي الذي أدّى إلى ظهور هذا العلم إلى الوجود منذ أكثر من خمسة عقود خلت. إن الطريقة التي ظهر بها هذا العلم تُشبه إلى حدٍّ كبير طرق ظهور علوم أخرى، أو اكتشاف قوانين أو ظواهر طبيعية أو كونية، كما في حال اكتشاف أرخميدس دافعته. وهنا أتحدث عن الصدفة، نعم، الصدفة؛ إذ إن ظاهرة الانفجارات الغاموية قد اكتشفت صدفةً.

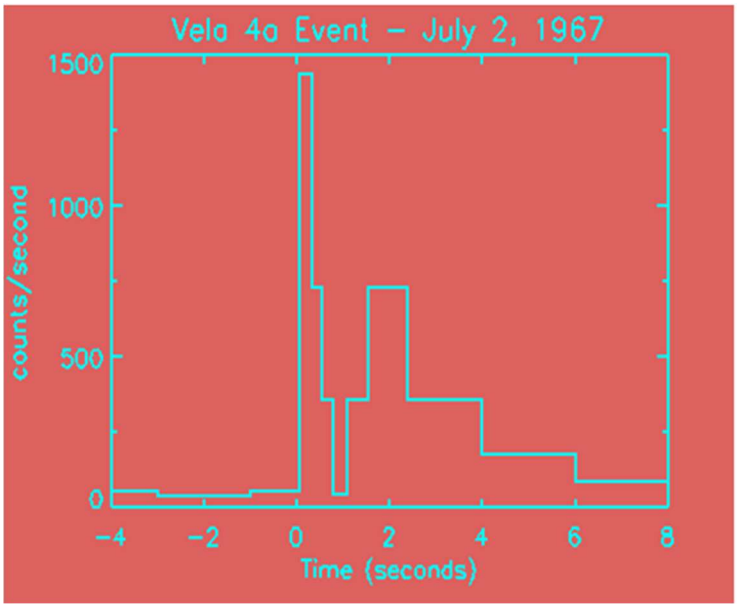
لنَعد بآلة الزمن إلى فترة الحرب الباردة، وتحديدًا إلى ما بعد حادثة منصة الصواريخ المعروفة تاريخيًا بأزمة كوبا عام 1962، والتي تبعتها محادثات ومفاوضات دبلوماسية بين زعيمي القطبين: الرئيس كينيدي (Kennedy) وزعيم الاتحاد السوفياتي خروتشوف (Khrouchtchev). وقد تُوّج هذا التحرك الديبلوماسي بتوقيع أول اتفاقية دولية للحدّ الجزئي من انتشار الأسلحة النووية (الصورة رقم 1)، والتي تنص مادتها الأولى على أن كل طرف من الأطراف الموقعة على الاتفاقية الالتزام بحظر استعمال الأسلحة النووية في المناطق التي تخضع لسيطرته، وفي الفضاء بأكمله، وهنا كانت البداية.

قامت الولايات المتحدة الأمريكية، من أجل التحقق من التزام الطرف الآخر ببنود الاتفاقية، بإرسال مجموعة أقمار اصطناعية تُعرف باسم "فيلا"، وذلك ابتداءً من سنة 1963، واستمر تشغيلها حتى سنة 1984. لم تقم هذه الأقمار برصد أي نشاط نووي، لكن في المقابل تم رصد لأشعة غاما، لم يكن مصدرها الأرض ولا حتى الشمس. وهنا بدأت المغامرة.



الصورة1: الرئيس الأمريكي أثناء إمضائه الاتفاقية في موسكو 1963

تُظهر الصورة رقم 2 أول منحنى ضوئي للظاهرة التي تم رصدها يوم 2 جويلية 1967، والمعروفة علميًا باسم (GRB670702)[1]. ويُلاحَظ من خلال مقياس الزمن أن مدة الظاهرة المرصودة قصيرة الأمد زمنيًا، في حين أنه على محور التراتيب، يمكن رؤية بنيتين تدلان على شدة الظاهرة طاقويًا. وإن دلّ ذلك على شيء، فإنه يدل على أننا أمام ظاهرة فلكية قصيرة الأمد زمنيًا لكنها شديدة طاقويًا. وهذا يعني أننا أمام حدث جديد ما سمعنا به في معارف علمائنا الأولين.



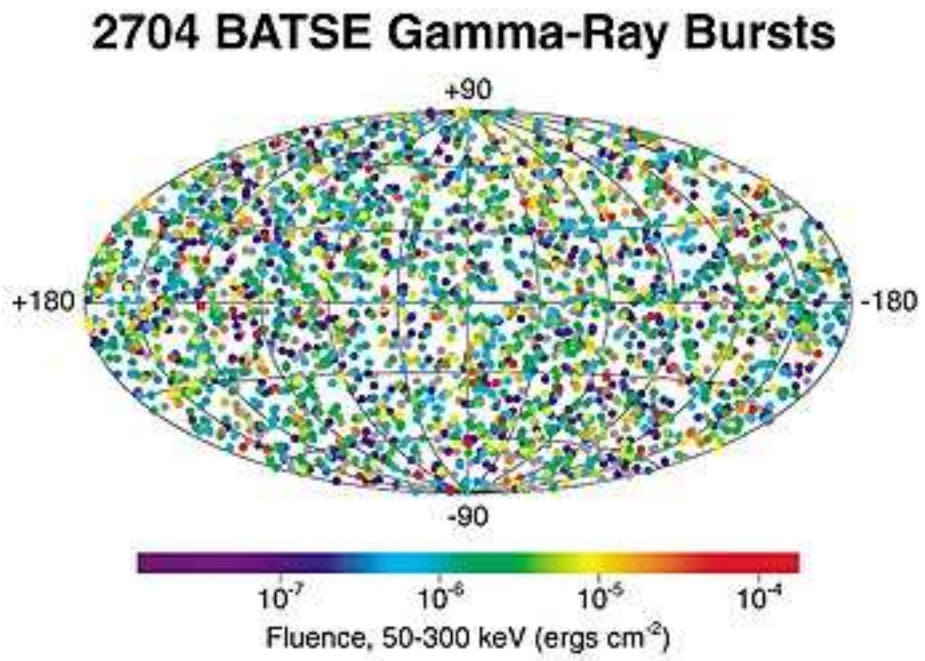
الصورة 2: المنحنى الأول لانفجار غاما الذي تم رصده 2 جويلية 1967

[1] تُسمّى الأحداث الغاموية المرصودة اعتمادًا على تاريخ اكتشافها، وذلك بعد المختصر GRB، وهو اختصار للانفجارات الغاموية باللغة الإنكليزية. فعلى سبيل المثال، يشير GRB670702 إلى انفجار غاموي تم رصده في اليوم 2 من الشهر السابع، أي جويلية، سنة 1967.

اتجهت الأنظار بعد ذلك نحو محاولة فهم أعمق للظاهرة، إذ لا يمكن صياغة أنموذج رياضي لتفسيرها دون معرفة المسافة الحقيقية بيننا وبين موقع حدوث الانفجار. ويُعدّ هذا عاملًا حاسمًا في تحديد أصل الانفجار والظواهر المسببة له. لذلك، تكاثفت الجهود من خلال إطلاق عدة أقمار مخصصة للاستطلاع والرصد، بهدف تحديد الموقع الدقيق لحدوث الانفجار.

من بين المهمات الفضائية التي ساهمت في تعميق فهمنا للظاهرة، مهمة Burst and Transient Source Experiment أو اختصارًا BATSE، التي كان هدفها الرئيس دراسة طبيعة هذه الانفجارات بشكل دقيق. وقد كانت نتائجها الأولية مبشّرة؛ إذ تم الكشف لأول مرة عن ارتباط هذه الظاهرة بموت النجوم الكبيرة جدًا، وكذلك عن نشوء ثقوب سوداء نتيجة اندماج أنظمة ثنائية، مثل نجمين نترونيين، وهذا ما رجّح الفرضية القائلة إن أصل هذه الظواهر لا يكمن في مجرتنا، بل في أعماق الكون السحيق.

توالت النتائج، خاصة بعد مهمة بيبو-ساكس[2] (BeppoSAX)، والتي أظهرت، كما يتضح في الصورة رقم 3، أن توزيع هذه الظواهر في السماء منتظم ومتجانس. وهذا ما يدعم القول إن أصلها هو الكون السحيق.



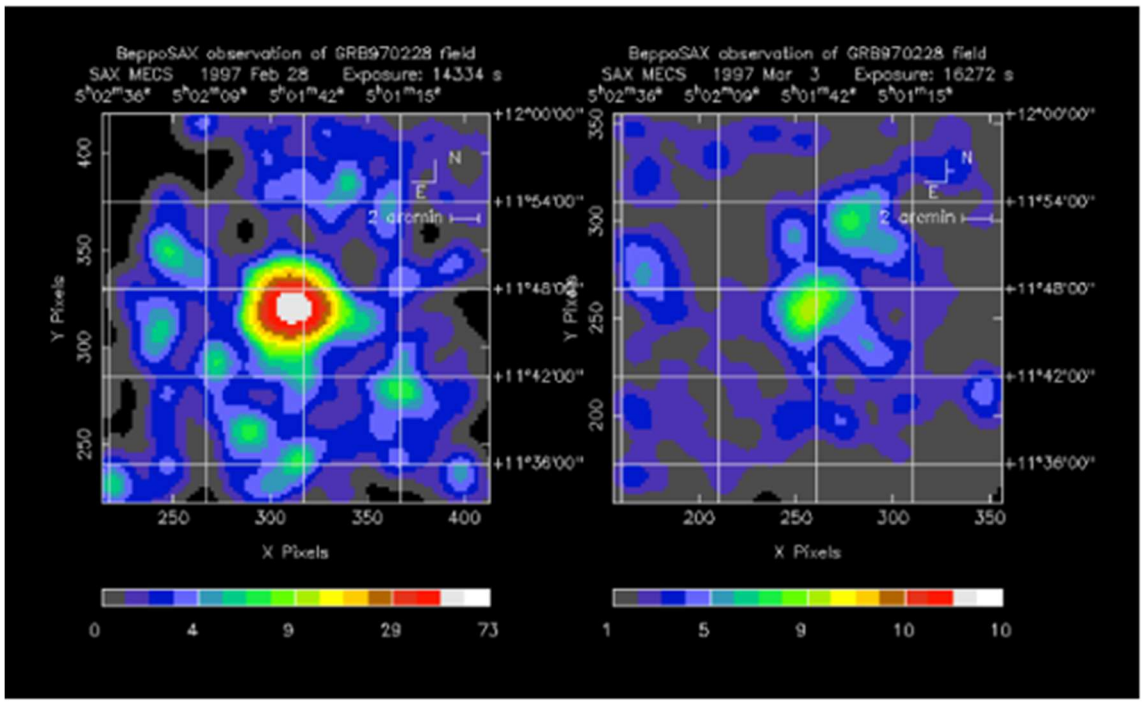
الصورة 3: مواقع جميع انفجارات أشعة غاما في السماء اكتشفت أثناء البعثة BATSE. التوزيع متساوي في الكون، ولا يوجد تركيز في اتجاه مجرة درب التبانة التي تمتد أفقيًا عبر الصورة. الصورة مُعارة من: G. فيشمان وآخرون، BATSE، CGRO، ناسا.

والسؤال الذي ظل مطروحًا لعقود بعد اكتشاف انفجارات أشعة غاما كان: ما هو الجرم السماوي الذي تحدث فيه مثل هذه الانفجارات؟ أي جرم سماوي يتوافق موقعه مع موضع انفجار من هذا النوع؟ وقد شملت الفرضيات كلًا من الأقزام البيضاء، والنجوم النابضة، والمستعرات العظمى، غير أن أيًا منها لم يُقدِّم تفسيرًا حاسمًا، وبقيت المسألة دون حل.

[2] سُمّي هذا القمر الاصطناعي نسبةً إلى عالم الفلك الإيطالي جيسبي أوكيليني (Giuseppe Occhialini) والمعروف بين أصدقائه باسم بيبو.

أما فيما يخص الآليات الفيزيائية التي قد تؤدي إلى إصدار تلك الأشعة عالية الطاقة، فقد افترض العالِم بشينسكي (Paczyński) أن مثل هذا الانفجار لا بد وأن تعقبه إشعاعات ذات طول موجة أكبر، تختفي رويدًا رويدًا نتيجة اصطدام أشعة غاما الأصلية بالوسط الغازي بين النجوم. لم تُكلَّل المحاولات الأولى لقياس ما يُعرف بـ "الوهيج المتعقّب" (Afterglow) بالنجاح، وذلك لصعوبة تحديد موقع الجرم السماوي الذي تصدر منه.

لكن النجاح جاء في فبراير 1997، عندما رصد المرصد الفضائي بيبو-ساكس انفجار أشعة غاما 970228، كما هو موضح في الصورة 4. وعندما وُجهت كاميرا تقيس أشعة إكس في اتجاه الانفجار سجلت وهج أشعة إكس وهو يضعف تدريجيًا. كما تمكّن مرصد وليام هرشل من رصد ضوء خافت يضعف تدريجيًا في نطاق الضوء المرئي وذلك لمدة 20 يومًا بعد الانفجار. وبعد انحسار الضوء الآتي من مصدر الانفجار، أمكن تصوير المجرة التي تأوي هذا الانفجار.

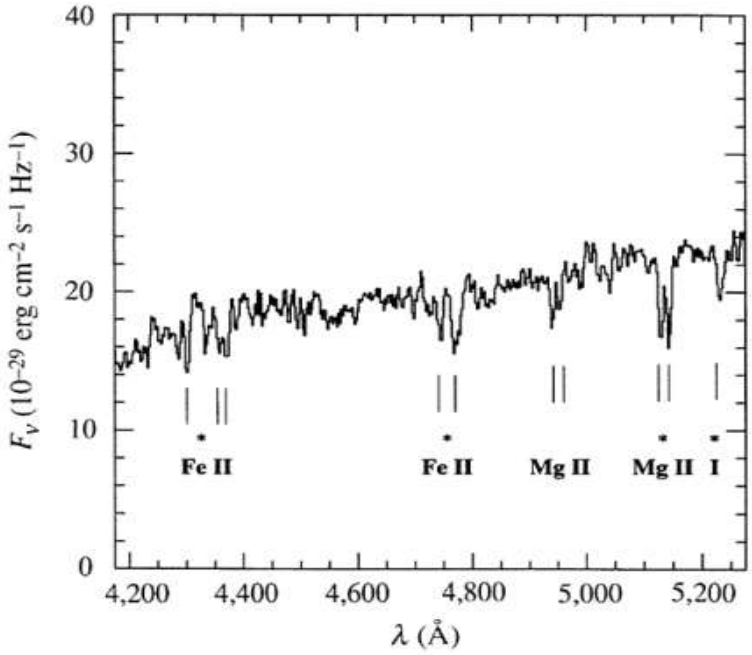


الصورة 4: تصوير بيبو-ساكس للوهيج المتعقب لانفجار أشعة غاما 970228، حيث نرى على اليسار أشعة إكس وهو يضعف تدريجيًا كما تبينه الصورة على اليمين.

تمكّن مسبار بيبو-ساكس من رصد حدث آخر، هو انفجار أشعة غاما 970508، حيث تم تحديد موقع الانفجار خلال أربع ساعات فقط من وقوعه، مما أتاح للعلماء فرصة متابعة الظاهرة بسرعة ورصد تطورها. وأسفرت هذه المشاهدات عن تسجيل طيف الامتصاص الخاص بالجرم السماوي، مما مكّن من قياس انزياحه الأحمر بقيمة $z = 0.835$، أي أن الانفجار وقع على بعد نحو 6 مليارات سنة ضوئية من الأرض. وقد شكّل هذا القياس في حينه أدق تحديد لبعد انفجار أشعة غاما، كما أتاح تحديد المجرة المضيفة له، مؤكدًا أن هذه الظواهر تحدث في مناطق بعيدة جدًا عن مجرتنا.

وخلال الأشهر اللاحقة، ساهمت هذه الاكتشافات في حل مشكلة تحديد المسافات، وهي المسألة التي لطالما أثارت الجدل في الأوساط العلمية، فقد أصبح من الواضح أن انفجارات أشعة غاما تحدث في مجرات بعيدة جدًا، وهو ما يفسّر صعوبة رصد ضوئها المرئي. وفي العام التالي، جاء اكتشاف انفجار أشعة غاما 980425، الذي رُصد معه انفجار المستعر الأعظم SN 1998bw، كاشفًا عن علاقة وثيقة بين انفجارات أشعة غاما وموت النجوم الضخمة. وقد وفّر هذا

الحدث دليلًا قويًا يدعم الفرضيات التي تربط بين انهيار النجوم فائقة الكتلة وانبعاثات أشعة غاما، مما ساعد في تعميق فهمنا لطبيعة الأنظمة الفيزيائية المسؤولة عن هذه الانفجارات الكونية العنيفة.



الصورة 5: صورة طيف الانفجار 970508 مع تبيان أطياف الامتصاص وهذا للتمكن من قياس الانزياح نحو الأحمر.

واصل مرصد بيبو-ساكس عمله حتى عام 2002، غير أن التطورات الكبيرة في دراسة انفجارات أشعة غاما أدت إلى تطوير أدوات ومهمات فضائية صُمّمت خصيصًا لاستكشاف طبيعتها، خصوصًا في اللحظات الأولى التي تلي الانفجار. وفي هذا السياق، تم إطلاق عدة مهمات، من بينها هيت-2 (HETE-2)، التي امتدت بين عامي 2002 و2006، وأسهمت في تعميق فهمنا لهذه الظاهرة، خاصة فيما يتعلق بانفجارات أشعة غاما قصيرة المدى (التي تدوم أقل من ثانيتين). وقد أظهرت القياسات أن هذه الانفجارات تنتج عن اندماج نجمين نيوترونيين، وليست مرتبطة بالمستعرات العظمى.

إلى جانب ذلك، ساهمت ولا تزال تساهم مهمات أخرى بشكل كبير في تفسير ونمذجة انفجارات أشعة غاما. ومن أبرز هذه المهمات: سويفت (SWIFT) وفيرمي (FERMI) وسفوم (SVOM)، التي صُممت خصيصًا لدراسة هذه الظاهرة، ولا سيما مرحلة التوهج المتعقب، الذي تم رصده لأول مرة عام 1997. وقد أسهمت هذه الدراسات في تحليل الخصائص الفيزيائية للانفجارات، مما عزّز فهمنا لآليات تشكُّلها وتطورها في الكون.

2. أنواع انفجارات أشعة غاما

أ- انفجارات أشعة غاما الطويلة

تتميز معظم انفجارات أشعة غاما بمدة تتراوح بين 2 إلى 30 ثانية، مما يصنفها ضمن فئة الانفجارات الطويلة. هذه الأحداث تُمثّل النسبة الأكبر من انفجارات أشعة غاما، وعادةً ما تنتج عنها أشعة لاحقة (Afterglow) شديدة السطوع. وقد تمت دراسة خصائص هذه الانفجارات بالتفصيل، ومقارنتها مع نظيراتها القصيرة. تشير الأبحاث إلى أن تقريبًا جميع انفجارات أشعة غاما الطويلة مرتبطة بمناطق نشطة لتكوين النجوم، كما أنها ترتبط ارتباطًا وثيقًا بالمستعرات العظمى. ويحدث هذا النوع من الانفجارات عند انهيار النجوم الضخمة، التي تفوق كتلتها مئات المرات كتلة الشمس، في نهاية دورة حياتها.

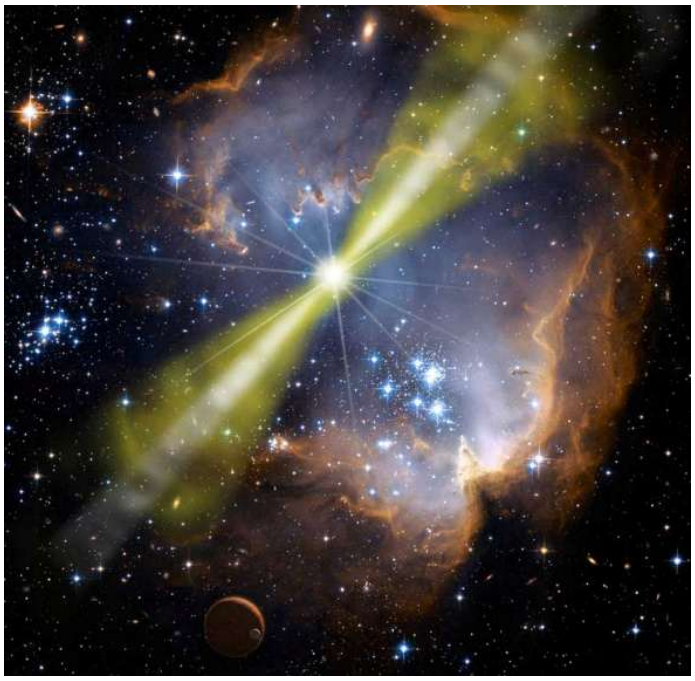
ب- انفجارات أشعة غاما القصيرة

أما الانفجارات التي تستمر أقل من ثانيتين فتُصنّف ضمن فئة انفجارات أشعة غاما القصيرة. حتى عام 2005، كان عدد هذه الانفجارات المكتشفة محدودًا، وكانت طبيعتها غير مفهومة على نحو كامل. وقد تم رصدها في مجرات مختلفة، بما في ذلك المجرات الإهليليجية الكبيرة والمتوسطة، مما يشير إلى أن منشأها يختلف عن تلك الطويلة. ونظرًا لعدم ارتباطها بالنجوم الضخمة، يُعتقد أن الانفجارات القصيرة تنجم عن عمليات في أنظمة نجمية ثنائية، مثل اندماج نجم نيوتروني مع نجم آخر أو مع ثقب أسود. وتُشير بعض النظريات إلى أن هذه الانفجارات قد تكون ناتجة عن تحوّل نجم عادي الكتلة، كالشمس، إلى نجم نيوتروني بعد استهلاكه لوقوده النووي.

3. نفاثات انطلاق الطاقة في انفجارات أشعة غاما

تُعد انفجارات أشعة غاما من بين أكثر الأحداث الكونية عنفًا وإشراقًا، إذ يمكن رصدها من الأرض رغم المسافات الشاسعة التي تفصلنا عنها، والتي قد تبلغ مليارات السنين الضوئية. وتتميز هذه الانفجارات بإطلاق كميات هائلة من الطاقة على شكل أشعة غاما خلال فترة قصيرة تتراوح بين بضع ثوانٍ و30 ثانية، يليها انبعاث متتابع لموجات كهرومغناطيسية أخرى، تشمل الأشعة السينية، والأشعة فوق البنفسجية، والضوء المرئي، والأشعة تحت الحمراء، والموجات الراديوية، والتي قد تستمر من دقائق معدودة إلى عدة أيام. على سبيل المثال، في حالة انفجار أشعة غاما GRB 080319B، تبعه وهج لاحق بلغ ذروته عند قدر ظاهري مقداره 5.8، مما جعله، مؤقتًا، براقًا بما يكفي ليُرى بالعين المجردة، على الرغم من وقوعه على بعد 7.5 مليار سنة ضوئية من الأرض.

إن تسجيل هذا السطوع الهائل من أماكن بعيدة جدًا يتطلب مصدرًا طاقويًا بالغ الشدة. فإذا كان النجم المتسبب في الانفجار يُشع طاقته بشكل متساوٍ في جميع الاتجاهات، فإن الطاقة اللازمة لتفسير ظاهرة مثل GRB 080319B تعادل تحوّل كتلة بحجم الشمس إلى طاقة خلال دقائق معدودة، وهو أمر لا تفسّره أي عملية فيزيائية معروفة.



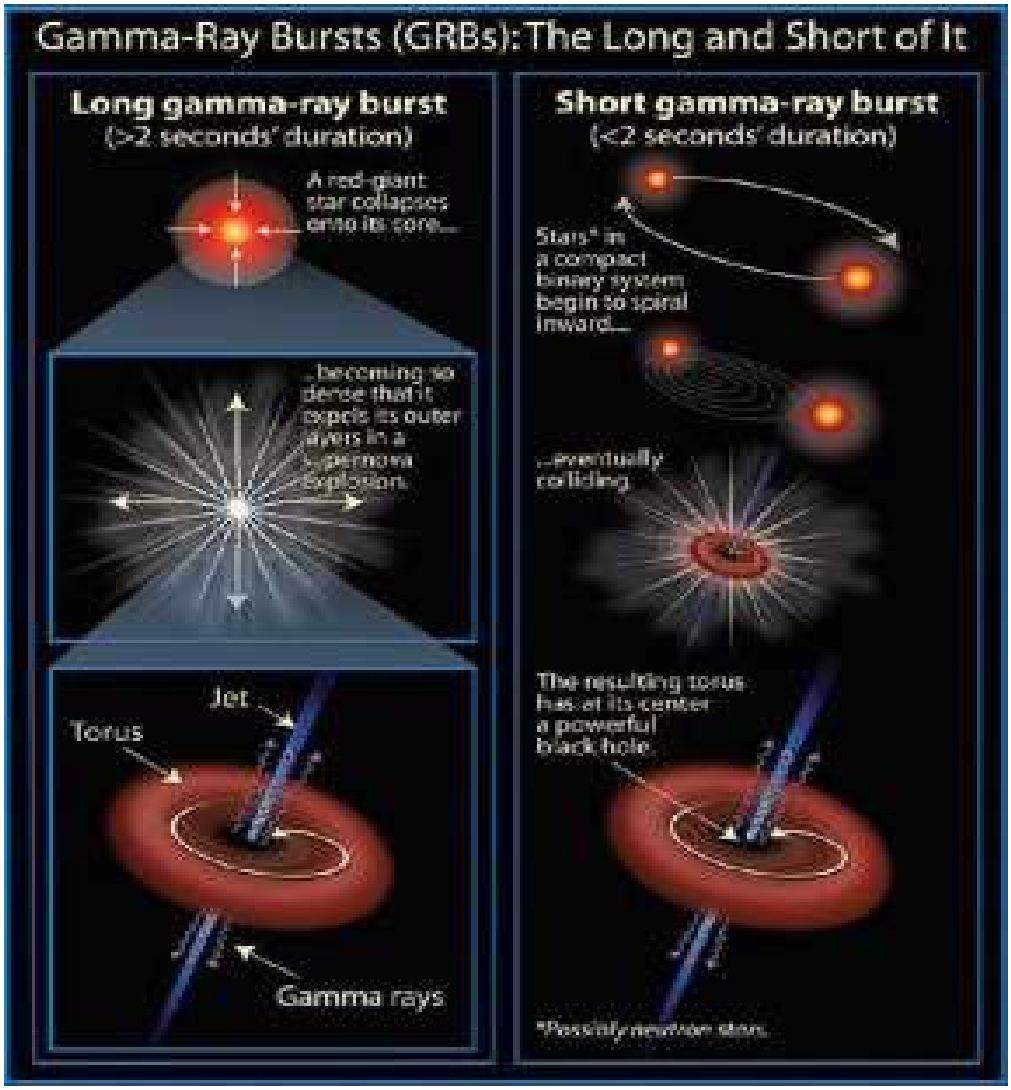
الصورة 6: رسم فنان تخيلي لانفجار أشعة غاما يحدث في نجم ضخم. تنطلق الطاقة الناجمة عن الانفجار أحيانًا في نفاثتين متضادتين عبر محور الدوران. الصورة مُعارة من: ناسا / سويفت / ماري بات Hrybyk - كيث وجون جونز.

لهذا، يُعتقَد أن انبعاث أشعة غاما لا يتم بشكل متجانس في جميع الاتجاهات، بل يكون موجّهًا في نفاثتين ضيقتين تنطلقان بسرعات قريبة من سرعة الضوء. يمكن تحديد زاوية فتح النفاثة عبر تحليل المنحنى الضوئي للوهج المتعقب، حيث يُلاحَظ انخفاض مفاجئ في اللمعان بعد تناقص تدريجي، وهو ما يرتبط بتباطؤ سرعة النفاثة إلى حدٍّ أقل بكثير من سرعة الضوء. تُشير المشاهدات إلى أن زاوية مخروط النفاثة تتراوح عادةً بين 2 و20 درجة، وهو ما يفسّر السطوع الشديد للانفجارات التي تصادف أن تكون نفاثاتها موجهة نحو الأرض.

عند أخذ هذه الخاصية في الاعتبار، يمكن تقدير الطاقة الفعلية المنبعثة بحوالي 10^{44} جول، أي ما يعادل نحو 2000/1 من كتلة الشمس المحوّلة إلى طاقة. وهذه الطاقة تُقارن بالطاقة الناتجة عن المستعرات العظمى من النوعين Ib وIc، والتي غالبًا ما ترتبط بانفجارات أشعة غاما.

4. الأسلاف النجمية لانفجارات أشعة غاما

نظرًا للمسافات الشاسعة التي تفصلنا عن مصادر انفجارات أشعة غاما (GRBs)، فإن تحديد الأنظمة النجمية التي تؤدي إلى حدوثها يُعدّ تحديًا كبيرًا. تشير الدراسات إلى أن معظم الانفجارات الطويلة تنتج عن انهيار نجوم فائقة الكتلة، تتراوح كتلها بين 20 و100 مرة قدر كتلة الشمس. ويُعزز هذا السيناريو ملاحظات ربطت انفجارات أشعة غاما الطويلة بالمستعرات العظمى، خاصة في المجرات التي تتميز بمعدلات عالية لتكوين النجوم.



الصورة 7: رسم فنان تخيلي يبين الأسلاف النجمية لانفجارات أشعة غاما

يُعدّ نموذج الكولابسار (Collapsar Model) أحد النماذج الرائدة لتفسير هذه الظاهرة، إذ ينص على أن نجمًا ضخمًا، سريع الدوران ومنخفض المعدنية، ينهار في نهاية دورة حياته ليشكّل ثقبًا أسودًا. وتؤدي المادة الساقطة باتجاه الثقب الأسود إلى تكوين قرص تراكم دوّامي، ينتج عنه نفاثات نسبية تخترق غلاف النجم وتُصدر أشعة غاما. في بعض النماذج البديلة، يُقترح أن مصدر الانفجار قد يكون نجمًا مغناطيسيًا (Magnetar) عوضًا عن ثقب أسود، مع الاحتفاظ بآلية إطلاق النفاثات ذاتها.

أما انفجارات أشعة غاما القصيرة، فتُعزى في الغالب إلى اندماج نجمين نيوترونيين، إذ يؤدي اقترابهما التدريجي بسبب إشعاعهما الجاذبي إلى التحامهما وانهيارهما في ثقب أسود، مما يولد نفاثات عالية الطاقة مشابهة لتلك الناتجة عن الكولابسار.

5. آليات إنتاج أشعة غاما

لا تزال عملية تحويل الطاقة الحركية للنفاثات إلى إشعاع غير مفهومة بشكل كامل، غير أن عدّة آليات طُرحت لتفسير هذه الظاهرة، من بين أبرزها:

- آلية كومبتون العكسية (Inverse Compton Scattering)، حيث تقوم الإلكترونات النسبية بتبعثر الفوتونات منخفضة الطاقة وزيادة طاقتها إلى نطاق أشعة غاما.
- الإشعاع السنكروتروني، الناتج عن تسارع الإلكترونات في الحقول المغناطيسية ضمن موجات الصدمة.

ينتج الوهج المتعقب (afterglow) للطيف الممتد من الأشعة السينية إلى الراديوية نتيجة اصطدام النفاثة بالمادة المحيطة، مما يؤدي إلى تشكل موجات صدمة أمامية وخلفية تعمل على تسريع الجسيمات وإنتاج إشعاع يستمر لفترات تمتد من ساعات إلى أيام بعد الانفجار.

6. معدلات حدوثها وتأثيرها المحتمل على الحياة

تكشف الملاحظات عن معدل يومي لرصد انفجارات أشعة غاما في الكون المرصود، ومع ذلك فإن معدل حدوثها في مجرتنا يُقدّر بانفجار واحد كل 100,000 إلى 1,000,000 سنة. ونظرًا لأن هذه النفاثات موجهة، فإن نسبة صغيرة جدًا منها تكون موجهة نحو الأرض.

في حال وقوع انفجار أشعة غاما قريب نسبيًا من الأرض (ضمن حدود فرسخ فلكي واحد)، فإن التأثيرات المحتملة قد تشمل تحلل طبقة الأوزون بفعل التفاعلات الكيميائية التي تنتجها أشعة غاما، مما يؤدي إلى زيادة الأشعة فوق البنفسجية الضارة الواصلة إلى سطح الأرض. اقترحت بعض الدراسات أن حدثًا كهذا قد يكون أحد الأسباب المحتملة لانقراض الأوردوفيشي-السيلوري (Ordovician–Silurian extinction) الذي وقع قبل حوالي 450 مليون سنة.

7. خاتمة

تُعدّ انفجارات أشعة غاما واحدة من أكثر الظواهر الكونية تطرفًا، وهي تُمثّل نافذة فريدة لدراسة الفيزياء الفلكية في الظروف القصوى. وعلى الرغم من التقدم الكبير في فهم مصادر هذه الانفجارات وآلياتها، لا تزال العديد من الأسئلة مفتوحة، خاصة فيما يتعلق بتفاصيل إنتاج النفاثات وكفاءة تحويل الطاقة. مع استمرار تطور التكنولوجيا وتحسين قدرات الرصد، ستظل هذه الظاهرة محط اهتمام العلماء في العقود القادمة.