

Les collisions dans l'Univers

par

Pierre-Alain Duc, chargé de recherche au CNRS

Laboratoire Astrophysique Interactions Multi-Echelles, CEA-Saclay, CNRS, Paris VII

Importance

La contemplation du ciel nocturne donne une vision d'un espace figé et immuable ; il s'agit bien sûr d'une illusion : tout bouge et se transforme dans l'Univers, mais souvent avec des échelles de durée incommensurables avec le temps humain. La gravité entraîne les astres dans une marche organisée, celle des orbites planétaires et galactiques, ou une agitation et un chaos qui prévalent lors de la formation des systèmes planétaires ou des amas de galaxies. Parce que l'Univers, bien que globalement peu dense, est fortement structuré, les collisions entre objets cosmiques sont inévitables et même fréquentes dans certains environnements. Nous verrons au cours de cet exposé qu'elles jouent en fait un rôle fondamental dans notre compréhension actuelle de l'évolution de l'Univers.

Hollywood a maintes fois illustré, à sa manière, les conséquences dramatiques qu'aurait la chute de météorites sur la vie sur Terre et plus égoïstement sur la survie de l'espèce humaine. Des films même caricaturaux comme « Deep Impact » touchent parce que leur scénario initial – la rencontre fortuite avec un astéroïde – n'est pas totalement irréaliste. Notre planète garde de nombreuses cicatrices d'impacts géants, dont l'un d'eux d'ailleurs a probablement causé, il y a soixante-dix millions d'années, l'extinction des dinosaures. Il est peut-être d'ailleurs indirectement à l'origine du développement des mammifères et donc de l'homme.

Qui sait cependant que la Terre pourrait être affectée par un autre type de collision cosmique, bien plus sensationnel : le croisement inéluctable de notre galaxie, la Voie Lactée, avec sa consœur dans le Groupe Local, la galaxie d'Andromède. Selon certains modèles, la rencontre se produira avant même la mort du Soleil et de la destruction concomitante de son cortège de planètes. En effet, le système solaire, et Terre avec lui, sera alors dérouté de son orbite circulaire autour du centre de la Galaxie, et possiblement expulsé hors du disque galactique, en même temps que toutes les étoiles environnantes. Ainsi dans moins de cinq milliards d'années, la traînée blanche qui strie le ciel nocturne prendra une tout autre allure. Son esthétique ravira sûrement les astronomes amateurs, tandis que les professionnels bénéficieront d'une vision extérieure de notre galaxie, ce qui facilitera grandement son étude ! Malheureusement de telles rencontres galactiques s'accompagnent de chocs entre nuages de gaz capables de déclencher des flambées de formation stellaire. Mieux vaut ne pas assister à de tels feux d'artifices car ils engendrent un rayonnement UV intense plutôt malsain.

Les collisions directes et fusions entre étoiles sont rares ; leurs répercussions en sont toutefois phénoménales. Les sursauts de rayonnement gamma qu'ils peuvent produire figurent parmi les processus physiques les plus énergétiques connus dans l'Univers. Certains les rendent responsables des vagues d'extinction massive, comme celle que la Terre a connue il y a 450 millions d'années.

L'importance des collisions en astrophysique dépasse bien sûr le cadre réducteur de la vie sur Terre, même s'il nous concerne indubitablement. Le rôle fondamental qu'elles jouent tant dans les scénarii de formation des planètes que celui des galaxies n'a toutefois qu'assez récemment été mis en avant. Le modèle cosmologique désormais le plus communément adopté, dit de *formation hiérarchique des structures*, indique que les systèmes les plus massifs de l'Univers, tels les amas de galaxies, se sont formés par assemblage successif d'objets parents. Il est représenté par un « arbre de fusion » (Figure 1). À son sommet figurent les fluctuations primordiales apparues dans la soupe cosmique post Big-Bang. En croissant, elles ont donné naissance à des galaxies naines, qui, fusionnant, ont formé des galaxies spirales puis des elliptiques. Se regroupant, les galaxies ont finalement constitué les amas. Ces derniers peuvent eux même fusionner entre eux. Cette théorie s'appuie sur des simulations numériques extrêmement lourdes, inaccessibles aux moyens de calcul disponibles il y a seulement quelques années. Le scénario hiérarchique comporte encore quelques problèmes, notamment parce qu'il considère principalement la composante invisible de la matière, cette fameuse *matière noire* qui représente l'essentiel de la masse de l'Univers mais dont la nature reste inconnue. La confrontation du modèle aux données d'observation occupe de nombreuses équipes et certains résultats corroborent le rôle majeur joué par les collisions de galaxie. Ainsi, plusieurs galaxies naines sur le point d'être absorbées par la Voie Lactée viennent d'être mis à jour dans son halo. Toutefois le cannibalisme galactique se produit rarement dans l'Univers proche mais était beaucoup plus fréquent dans le passé. Ainsi, sur des images profondes obtenues par le Télescope Spatial Hubble, une fraction importante des galaxies distantes (et donc jeunes) montre des signes de collision, tandis que les relevés de galaxies proches ne comportent que très peu d'objets en cours de fusion.

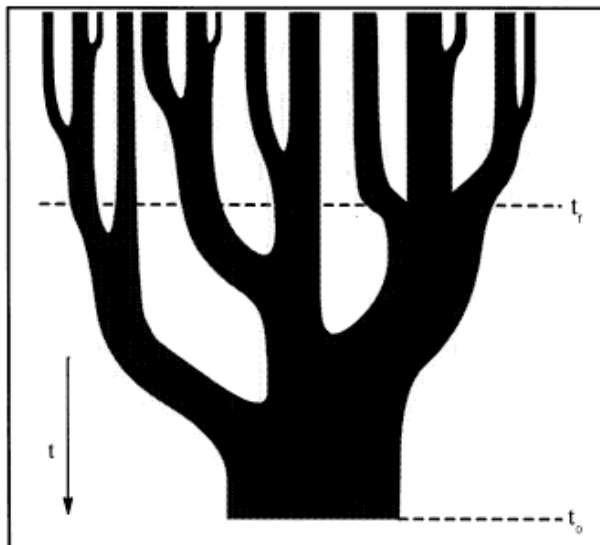


Figure 1, « arbre de fusion »

Ainsi, observations, simulations numériques et théorie s'accordent aujourd'hui pour attribuer aux collisions une place de choix dans l'évolution des objets cosmiques. Bien sûr, entre les heurts entre astéroïdes dans le système solaire et les fusions de galaxies voire d'amas de galaxies, il y a de telles différences d'échelle de grandeur et de temps que leur rapprochement peut à première vue sembler artificiel. Nous verrons au cours de cet exposé que ces divers événements présentent en fait de remarquables similitudes. Les processus physiques mis en jeu et leurs effets peuvent être semblables alors que la nature et la taille des objets n'ont rien à voir.

Signes et stigmates

Nous présenterons dans un premier temps les protagonistes très divers des collisions dans l'Univers et apprendrons à identifier les signes extérieurs puis les stigmates de leurs interactions. Nous commencerons par celles qui se déroulent à plus petite échelle et qui nous sont les plus proches.

Entre corps du système solaire

Parmi les corps du système solaire, les astéroïdes constituent une classe à part. La majorité s'organise en quelques dizaines de familles de plusieurs centaines de membres de couleur identique. Composés de matériaux semblables, ils partageraient la même origine. Ils seraient en fait les vestiges de proto-planètes détruites lors de collisions passées. Sous l'effet de la forte gravité exercée par Jupiter ou suite à des collisions, certains d'entre eux ont ensuite été éjectés de la ceinture principale où ils orbitent habituellement entre Mars et Jupiter et vagabondent dans le système solaire. Parmi eux, les *géocroiseurs* (Near Earth Object en anglais) sont susceptibles de couper l'orbite de la Terre voire de percuter cette dernière. D'autres rejoignent les confins du système solaire où ils peuplent la ceinture de Kuiper, avec les *objets transneptuniens* (Trans Neptunian Objects en anglais) ou plus loin le nuage de Oort.

C'est aussi dans ces régions éloignées que séjournent principalement les comètes. L'excentricité de leurs orbites les conduit toutefois à périodiquement s'approcher de très près du Soleil et parfois même à le heurter. La sonde d'observation du Soleil Soho a ainsi relaté depuis une dizaine d'années plusieurs collisions de ce type (Figure 2). Plus rarement, une comète croise une planète géante. Ainsi en 1994, nous avons eu la chance d'assister en direct¹ à la collision entre Shoemaker-Levy 9 et Jupiter

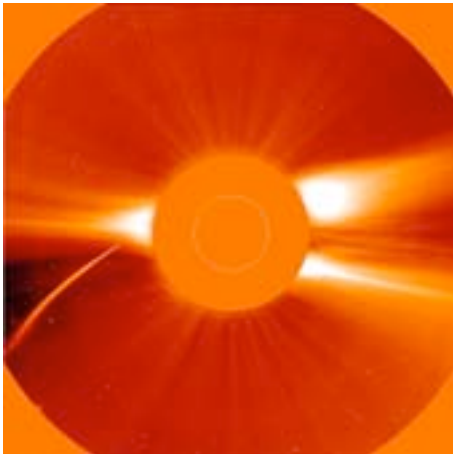


Figure 2 : Image de la couronne solaire prise par le satellite Soho. Sur la droite, une comète sur le point de heurter le Soleil (copyright ESA/NASA).

Les planètes telluriques portent les stigmates d'impacts par des astéroïdes. Les cratères qui couvrent une partie de la surface de la Lune ou de la Terre témoignent d'un bombardement passé intense. Il a culminé environ 700 millions d'années après la formation des planètes, à une époque où les orbites des objets du système solaire auraient été fortement perturbées par un phénomène de résonance entre Jupiter et Saturne, selon un modèle récent publié dans la revue Nature.

¹ ou plutôt en léger différé vu la vitesse finie de la lumière !

Entre étoiles

Plus de la moitié des étoiles possède un compagnon stellaire. Lorsqu'ils sont suffisamment serrés, les deux astres s'échangent de la matière et de l'énergie. Ce transfert est particulièrement violent lorsque l'un d'eux est une étoile « morte », compacte (étoile à neutron ou trou noir). Il se forme alors autour de l'objet compact un disque de matière agglomérée, fortement instable, responsable d'un rayonnement X puissant mais variable. On parle alors de « *binnaire X* » (Figure 3). Ce processus peut aboutir à l'explosion de l'étoile compagnon encore « vivante ». Il s'agit d'une supernova dite de type 1a que l'on distingue des supernovae plus connues du type 2 qui signalent l'explosion d'étoiles massives (plusieurs dizaines de fois la masse du Soleil). Dernier cas de figure : les deux compagnons sont morts et leurs restes fusionnent. Se produirait alors l'un des phénomènes les plus énergétiques de l'univers. Détectable sous forme d'un flash gamma (GRB pour Gamma ray Burst en anglais) suivi d'une postluminescence X et optique intenses, il est visible quelle que soit la distance d'émission.

Les caméras sensibles aux rayons X et γ , embarquées sur des satellites tels Swift ou Integral, détectent en fait deux classes d'éclairs : les longs qui durent quelques secondes et que l'on attribue généralement à l'explosion d'étoiles de très grandes masses, peut-être plus massives encore que les progéniteurs des supernovae de type 2 ; et les courts (quelques dizaines de millisecondes) qui résulteraient de la fusion d'étoiles à neutron.

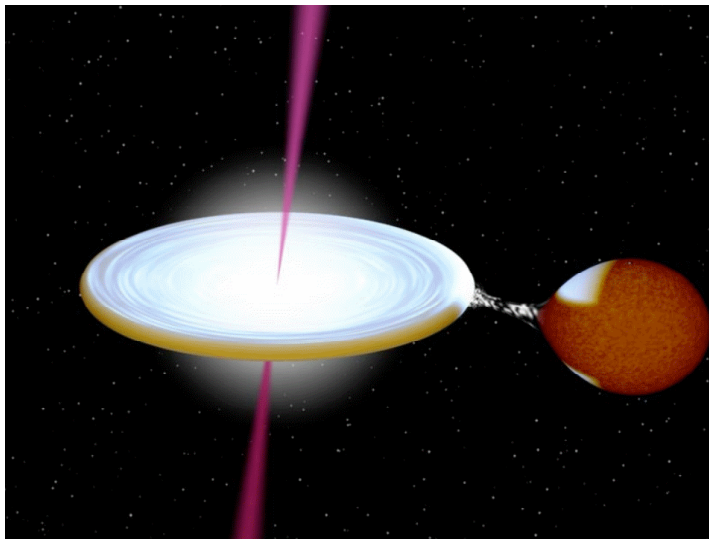


Figure 3 : Image d'artiste d'une étoile absorbée par un trou noir

Ainsi ces bouffées de photons de hautes énergies qui nous parviennent des galaxies les plus lointaines seraient le fait d'une simple interaction entre deux étoiles. Un tel phénomène est toutefois assez rare. Heureusement d'ailleurs car, s'il se produisait dans l'environnement du Soleil, il produirait des dégâts considérables ! De manière générale, les collisions directes entre étoiles constituent des événements peu probables comme nous le verrons pas la suite. Elles peuvent toutefois jouer un rôle particulier dans des environnements spécifiques, comme les amas globulaires où la densité stellaire est telle que les interactions y sont nombreuses.

Entre nuages de gaz

Les étoiles naissent dans les cœurs denses de nuages de gaz moléculaire qui se contractent puis se fragmentent sous l'effet de la gravité. Or les collisions entre nuages qui se produisent dans les bras d'une galaxie spirale ou dans la zone de chevauchement de deux galaxies en interaction créent des instabilités et des chocs. Ceux-ci stimulent l'effondrement des nuages. En résultent des sursauts de formation stellaire, intenses mais difficilement visibles avec les télescopes optiques terrestres. En effet, ces pouponnières d'étoiles se cachent dans un cocon de poussière opaque au rayonnement visible. Les grains de poussière, chauffés par les jeunes étoiles, émettent toutefois une lumière infrarouge que peuvent collecter des télescopes spatiaux dédiés tel ISO ou Spitzer.

Ainsi les collisions entre nuages de gaz se traduisent par des excès de luminosité infrarouge déjà repérés dans de nombreuses galaxies.

Entre galaxies

Dans le bestiaire extragalactique figurent des galaxies inclassables dans la *séquence de Hubble*, ce fameux diagramme en fourche qui distingue les spirales, barrées ou non, les elliptiques et les irrégulières. Ces galaxies pathologiques présentent dans leur proche environnement des anneaux, ponts et autres filaments de matière qui s'étirent dans l'espace intergalactique sur des dizaines de kiloparsec. Dès la fin des années cinquante et la publication d'atlas photographiques complets du ciel, des astronomes tels B. Vorontsov-Velyaminov ou H. Arp ont recensé les objets aux formes étranges. Leur origine a longtemps intrigué les chercheurs. S'agissait-il de phénomènes aussi exotiques que les quasars,

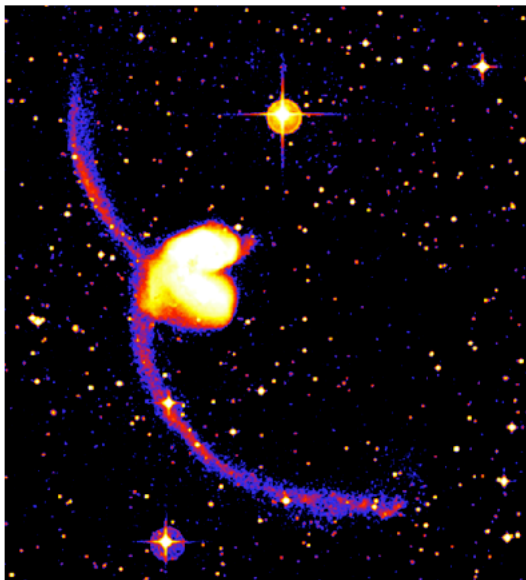


Figure 4 : « Les Antennes » (DSS)



Figure 5 : la Roue de la charette (copyright HST)

découverts à peu près à la même époque et qui, eux aussi, présentent de longs jets issus du « monstre central », un trou noir ultramassif alimenté par la matière accrétée dans un disque? Il a fallu attendre les années soixante-dix pour comprendre que des filaments se formaient plus simplement par des forces essentiellement gravitationnelles qui s'exercent lorsque deux galaxies se rencontrent et perturbent les orbites de leurs étoiles.

Les premières simulations numériques sur ordinateur, réalisées par les frères Toomre, ont constitué une étape décisive dans cette découverte. Depuis, ces objets sont connus sous le terme de *systèmes en interaction*, *galaxies cannibales* ou en *cours de fusion*.

Un prototype de système en interaction est celui constitué par « les Antennes » qui doit son nom à ses deux spectaculaires filaments de matière (Figure 4). Dans le jargon des astrophysiciens, ce sont en fait des « queues de marée » composées d'étoiles et de gaz arrachés à leurs galaxies par des forces dites de marée, de même nature que celles responsables, sur la Terre, des variations périodiques du niveau des océans. L'image des Antennes montre aussi deux disques passablement déformés qui semblent se chevaucher. Il s'agit des restes des deux galaxies spirales (NGC 4038 et NGC 4039) qui viennent de s'accoupler. D'ici quelques centaines de millions d'années, les disques et noyaux de ces galaxies se combineront; seuls les débris de la collision (les queues de marée) autour des galaxies fusionnées attesteront de la collision passée.

Autre spécimen de collision : la « roue de la charrette » (ESO 350-G040) à la morphologie fort évocateur : un anneau relié à une galaxie centrale par des rayons stellaires (Figure 5). Un peu plus loin, une seconde galaxie, plus petite, qui tel un boulet a traversé la première en la déformant.

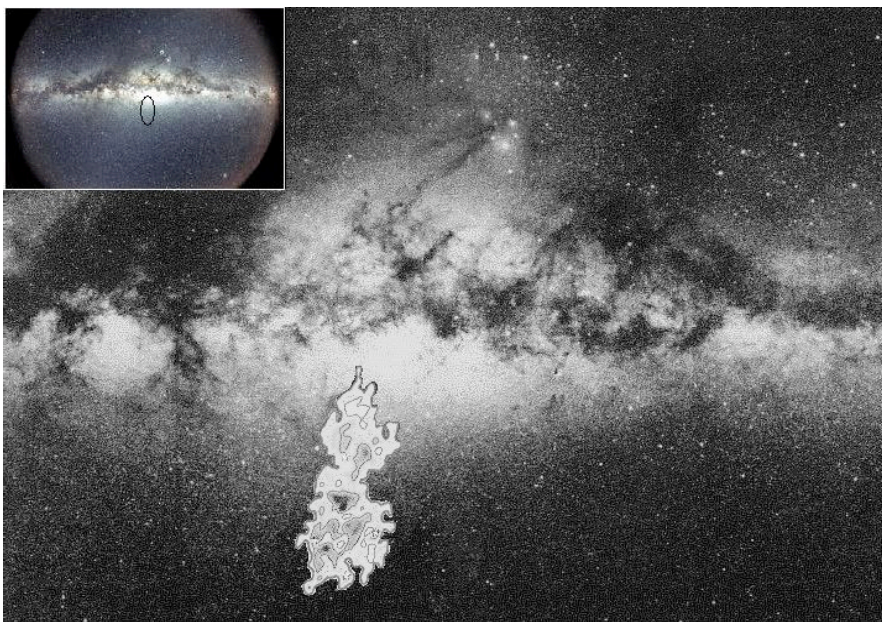


Figure 6 : galaxie naine du sagittaire dans le halo de la Voie Lactée (Courtoisie Ibata)

Des systèmes en interaction aussi spectaculaires que les Antennes sont toutefois relativement rares, du moins dans l'Univers proche. Ils se forment lorsque se percutent à faible vitesse deux galaxies de masse équivalente. Plus fréquente est la collision entre une galaxie spirale ou elliptique et une galaxie naine, au moins dix fois moins massive. Les galaxies naines du Sagittaire (Figure 6) et du Grand Chien, découvertes récemment par des chercheurs de l'observatoire de Strasbourg dans la proche banlieue de la Voie Lactée, illustrent ce type de collisions. Si notre Galaxie n'en ressent que quelques effets mineurs, les naines elles ne survivront pas. Déchiquetées, elles perdront la plupart de leurs étoiles et réserves de gaz qui se mêleront à celles du halo de la Voie Lactée.

La galaxie d'Andromède, l'une des cibles favorites des astronomes amateurs, est connue pour être une spirale classique, de type Sb. Or des observations optiques extrêmement profondes viennent de révéler une morphologie bien plus complexe². Des courants et filaments stellaires, telles les queues de marée des « Antennes », témoignent d'un ou plusieurs impacts vieux de plus de un milliard d'années (Figure 7).

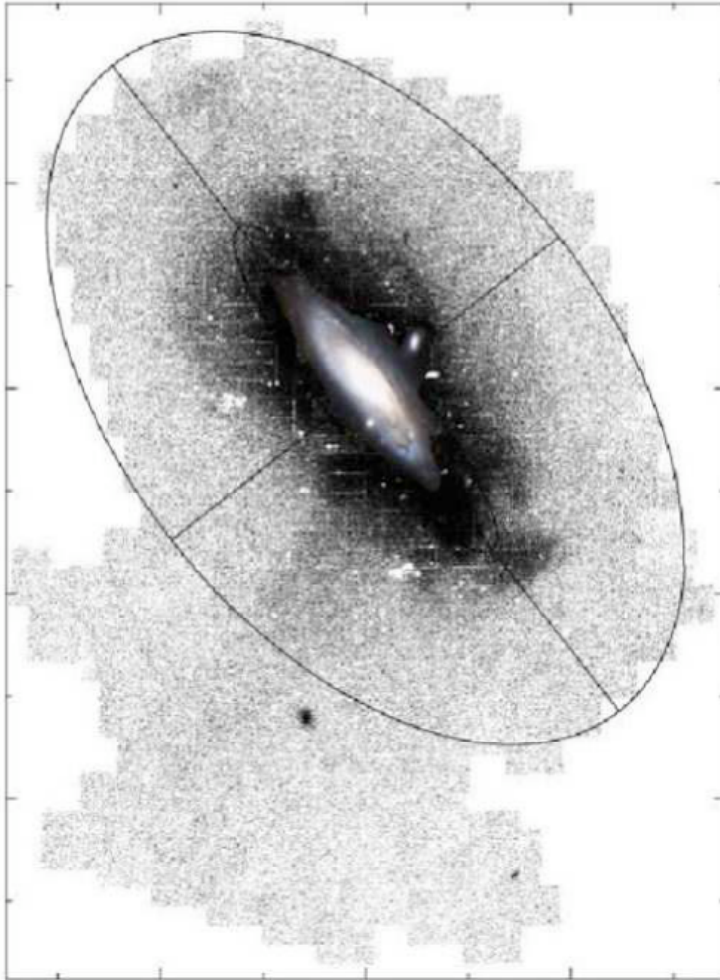


Figure 7 : la galaxie d'Andromède et son proche environnement (DSS + INT, courtoisie R. Ibata)

La fréquence et le type de collisions dépendent fortement du milieu dans lequel évolue les galaxies. Au sein de groupes, elles sont communes et débouchent souvent sur des fusions. Dans les amas, les vitesses relatives des galaxies sont telles - plusieurs milliers de km/s - que les galaxies ne font que se croiser sans jamais se heurter. À chaque rencontre, elles subissent toutefois de petites perturbations qui cumulées pourront contribuer à modifier sérieusement leurs propriétés, en particulier leur capacité à former des étoiles. On parle alors de « harcèlement galactique ».

Si, localement, la fraction des galaxies montrant des signes évidents d'interaction, à l'instar des Antennes ou de la Roue de la charrette, est faible - moins de un pour cent -, à plus grande distance, donc plus tôt dans l'histoire de l'Univers, ce nombre était beaucoup plus important.

² Rodrigo Ibata, chercheur à l'observatoire de Strasbourg, présentera ses travaux sur le sujet durant le festival.

Entre amas de galaxies

Un amas de galaxies, ce sont bien sûr des galaxies cohabitant au sein d'un même halo géant de matière noire, mais aussi une enveloppe de gaz tellement étendue qu'elle contribue à l'essentiel de la masse visible. Il s'agit en fait d'un plasma chaud qui rayonne dans le domaine des longueurs d'onde X. Longtemps, les images d'amas ont montré des formes symétriques, plutôt circulaires, qui laissaient penser que ces structures étaient particulièrement stables, *relaxées* dans le jargon des astronomes. Or avec l'accroissement de la sensibilité des télescopes tels XMM-Newton ou Chandra, tous deux encore en orbite autour de la Terre, des cartes X plus précises et profondes ont été produites ; elles ont révélé la présence de sous-structures qui impriment des taches distinctes sur les images. Chacune d'elle correspond à un groupe ou un amas de galaxies en cours d'accrétion.

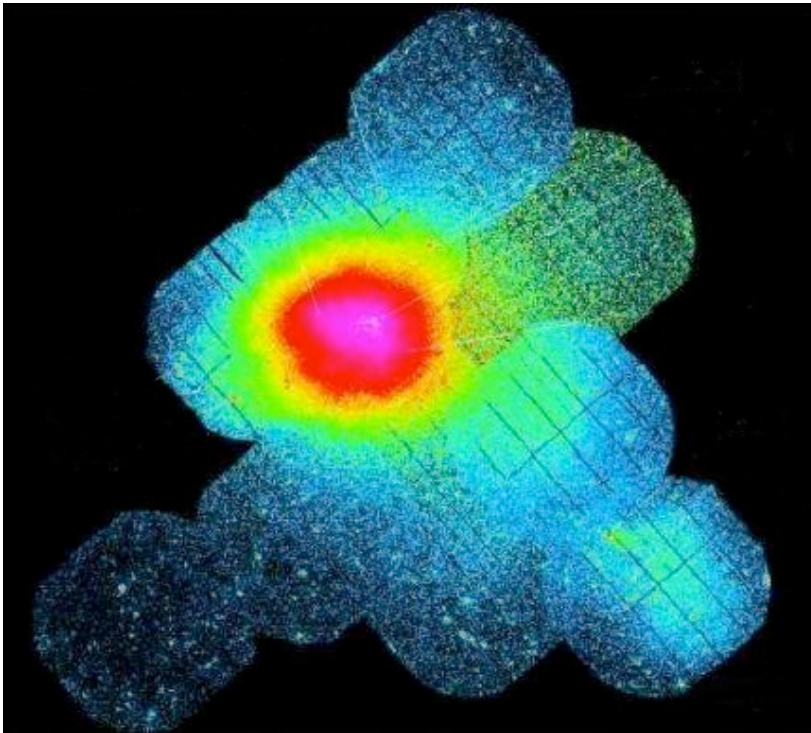


Figure 8 : carte de l'amas de Coma dans les rayons X. En bas, à droite un groupe de galaxies en train d'être avalé (image XMM-Newton, courtoisie D. Neumann)

Même l'amas riche de Coma, très étudié à cause de sa proximité et souvent utilisé comme prototype, présente un compagnon en train d'être absorbé avec son contingent de galaxies (Figure 8). Des cartographies à plus grande échelle indiquent d'ailleurs que Coma se trouve au croisement de filaments de groupes et d'amas de galaxies le long desquels se déroule le processus d'accrétion. De telles observations confortent les modèles cosmologiques de structuration de l'Univers.

Échelles d'espace, de fréquence et de temps

Entre les amas de galaxies dont la taille caractéristique est de l'ordre de quelques megaparsec et les systèmes planétaires dont la grandeur se mesure en unités astronomiques ³, il y a une différence d'échelle d'espace d'un facteur supérieur à cent milliards. Les autres objets de l'Univers dont il a été question se situent à des niveaux intermédiaires : un facteur de cent mille pour les systèmes stellaires et les nuages de gaz et cent million pour les galaxies.

Lorsqu'on s'intéresse aux collisions, en particulier à leur fréquence, il est plus intéressant de comparer la taille des objets à leur distance mutuelle moyenne. Plus leur rapport est élevé, plus la probabilité de collision est importante ou inversement plus grande sera la distance qu'un objet pourra parcourir sans rencontrer un congénère. En physique des particules, on parle de « libre parcours moyen ». Pour les systèmes astrophysiques, cette valeur varie très fortement d'un environnement à l'autre.

Les amas de galaxies se forment au sein de filaments cosmiques dont la dimension leur est commensurable. De même, le diamètre des galaxies n'est pas négligeable par rapport à la taille des groupes qui les hébergent. Ainsi, le disque d'étoiles de la Voie Lactée a un diamètre d'environ 30 kiloparsec, alors que la galaxie la plus proche dans le Groupe Local, le Grand Nuage de Magellan, se trouve à moins de 60 kiloparsec ⁴. Ces nombres sont d'ailleurs trompeurs ; ils correspondent en effet à la taille de l'objet visible et non à celui du halo de matière noire qui l'englobe, et qui, selon les modèles cosmologiques et des observations indirectes, serait au moins dix fois plus étendu. Du coup, lors de la rencontre entre deux galaxies, leurs halos respectifs fusionnent bien avant leurs disques d'étoiles.

Ainsi, tant les amas que les galaxies ont au cours de leur vie une probabilité élevée d'en croiser d'autres. De telles interactions constituent d'ailleurs le catalyseur principal de leur évolution et de leur croissance.

À ce stade, il est utile de rappeler que l'expansion (accélérée) de l'Univers n'entrave pas forcément les rencontres entre galaxies, même si elles étaient plus nombreuses lorsque celui-ci était plus petit. Certes, *globalement*, les galaxies s'éloignent des unes des autres selon le courant de Hubble. Toutefois, au sein des structures – groupes ou amas – auxquelles elles appartiennent, elles se déplacent avec un mouvement qui leur est propre. Autrement dit, *localement*, elles ne ressentent pas le flot général.

Par contre au sein d'une même galaxie, les distances entre étoiles sont telles que la probabilité que deux d'entre elles se percutent est extrêmement faible. Aussi deux galaxies pourront fusionner sans qu'aucune de leurs étoiles respectives ne se heurte. Seules leurs orbites seront modifiées. Quant aux nuages de gaz, ils occupent une surface plus importante dans les disques galactiques – dans le jargon des astronomes, ils possèdent un « facteur de remplissage » significatif -, si bien que les collisions directes entre eux sont possibles. En fait, le milieu interstellaire est constitué d'une gamme de nuages plus ou moins compacts. Seuls les plus diffus d'entre eux, constitués d'hydrogène atomique, se heurtent vraiment.

Dans le système solaire, la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter, ainsi que les anneaux autour des planètes géantes, sont aujourd'hui le lieu privilégié des collisions. Dans le passé, nous avons déjà indiqué que des agencements particuliers des planètes avaient déstabilisé l'équilibre de la mécanique céleste et suscité un accroissement considérable des chocs.

³ Notez que les différences d'échelles de taille sont telles que les astronomes, peu enclins à utiliser le système métrique, se sont sentis obligés d'utiliser plusieurs unités de distance.

⁴ sans considérer la galaxie naine du Sagittaire, cannibalisée par notre Galaxie, et située à seulement 25 kiloparsec du Soleil.

Nous avons vu que les tailles des protagonistes des collisions ainsi que la fréquence de celles-ci occupent un immense spectre. Les échelles de temps en question sont tout aussi disproportionnées. Au sein du système solaire, les hommes ont pu assister en quasi direct à des cas de collisions. 16 juillet 1994 : la comète Shoemaker-Levy 9 heurte Jupiter. La communauté astronomique internationale s'est mobilisée pour observer le phénomène. 4 juillet 2005 : la NASA projette une sonde sur la comète Tempel 1; le choc crée un flash lumineux et un panache de gaz étudiés par plus d'un millier d'astronomes dans le monde. Ces événements qui ont impressionné le public se sont déroulés avec des échelles de temps éminemment humaines : juste quelques secondes. Ils ont causé des perturbations (mineures) sur les astres qui ont perduré quelques semaines. La chute d'un astéroïde tueur sur la Terre pourrait elle modifier fortement son atmosphère et donc les conditions de vie pendant quelques dizaines voire centaines d'années.



Figure 9 : 4 juillet 2005, la comète Tempel 1, une minute après l'impact (mission Deep Impact de la NASA)

Les collisions entre galaxies se produisent sur des échelles de temps infiniment plus grandes, de l'ordre de plusieurs centaines de millions d'années ; les perturbations induites par une fusion, telles les queues de marée, sont visibles pendant au moins un milliard d'années. Dans ces conditions, il est bien sûr hors de question pour les astronomes de suivre en direct le développement de l'interaction entre deux galaxies. Ils l'anticipent toutefois en s'appuyant sur l'analyse statistique d'un grand nombre de systèmes différents observés à plusieurs étapes de leur évolution, ou en utilisant des simulations numériques aussi réalistes que possibles. Quelque cent millions d'années, c'est une durée qui paraît longue à l'échelle humaine, mais finalement modérée si elle est rapportée au temps géologique. Ainsi lorsque la vie est apparue sur Terre il y a plus de 3,5 milliards d'années, sa galaxie hôte, la Voie Lactée ⁵ n'avait probablement pas encore acquis sa taille et sa forme actuelles. Nous avons aussi déjà mentionné que la rencontre avec Andromède risquait de survenir avant même la mort du Soleil.

⁵ alors située à un décalage vers le rouge équivalent à $z=0.3$

Quant aux amas de galaxies, ils mettent quelques milliards d'années pour fusionner, une durée toutefois bien inférieure à celle de l'Univers estimée à 13.7 milliards d'années.

Les disproportions dans les échelles d'espace et de temps relatifs aux différents types de collision pourraient rendre leur étude comparée assez arbitraire. En fait, leur rapprochement se justifie tant par leurs fortes interconnexions que par la similitude des processus physiques qu'ils mettent en jeu.

La table 1 synthétise les différentes classes de collision dans l'Univers abordées jusque-là, ainsi que leurs propriétés :

- séparation moyenne des astres, comparée à leur taille
- échelles de temps caractéristique pour un type de collision donné
- fréquence des rencontres
- vitesse typique d'approche
- principales composantes directement affectées par la collision
- effets à long terme de la collision

Quelques sites web

Mission Deep impact:

<http://deepimpact.jpl.nasa.gov/home/index.html>

Collisions entre astéroïdes :

<http://www.obs-nice.fr/morby/ESA/esa.html>

Collisions entre galaxies :

<http://alpha.uni-sw.gwdg.de/~paduc/>

http://dphs10.saclay.cea.fr/Sap/Actualites/Breves/h2paduc021115/h2paduc_fr.shtml

<http://astro.u-strasbg.fr/Obs/GALAXIES/>

Collisions entre amas de galaxies :

http://www.esa.int/esaSC/SEMskV9DFZD_index_0.html

<http://dphs10.saclay.cea.fr/Sap/Actualites/Breves/doris030401/doris.html>

Echelles de grandeur:

<http://www.matpack.de/Info/Tables/meter.html>

Marées :

<http://villemin.gerard.free.fr/Science/Marees.htm>

Type de collision	Séparation moyenne / Taille	Echelle de temps	Fréquence	Vitesse	Composantes touchées	Effets
Entre amas de galaxies	10 Mpc = 3.0E20 km / 5 Mpc = 1.5E20 km	1 milliard d'années	Importante	quelques 1000 km/s	Contact direct entre plasma chaud intra-amas; perturbation des orbites des galaxies	Echauffement du gaz X; fusion; formation stellaire induite dans les galaxies membres
Entre galaxies	1 Mpc = 3.0E19 km / 50 kpc = 1.5E18 km	100 millions d'années	Modérée à importante selon l'environnement	100 - 1000 km/s, selon l'environnement	Contact direct entre nuages de gaz froid; perturbation des orbites des étoiles	Formation de queues de marée et fusion (vitesse modérée); formation d'un anneau (choc frontal); sursaut de formation stellaire
Entre étoiles	1 pc = 3.0E13 km (4E11 km amas globulaires) / 1E6 - 1E8 km	100 million d'années (temps relaxation des amas globulaires)	Collision directe extrêmement rare	10 km/s (amas globulaires)	Perturbation des orbites des étoiles	Evaporation (Amas globulaires)
Entre étoiles (cas des binaires X)	2E6 - 2E8 km / 1E6 - 1E8 km	Dépend du type de l'étoile compagnon	Depend de la fraction d'étoiles binaires (50%?)	1E-10 - 1E-5 masses solaires par an (vitesse d'accrétion)	Atmosphères	Supernova; sursauts gamma; ondes gravitationnelles
Entre planétésimaux	300 km / 1 km	Entre 100 000 et 1 million d'années pour la formation d'un embryon	environ une collision par 1000 ans, au moment de la formation des systèmes planétaires	10 m/s	Roches (silicates) pour les orbites internes; glace au delà de Jupiter	Destruction ou collage, selon la vitesse; formation d'un embryon de planète

Table 1 : Différents types de collision dans l'Univers

Interconnections

À l'interface

Les collisions entre amas de galaxies n'entraînent pas forcément un accroissement significatif du nombre de télescopes entre leurs ressortissants. Leur fréquence était de toute façon déjà élevée avant même le début de la rencontre ⁶. Par contre, elle provoque, à l'interface des amas en cours de fusion, une augmentation de la densité et de la température du gaz chaud qui compose le milieu intra-amas. Ces modifications locales de l'environnement, en plus des perturbations gravitationnelles induites par l'absorption d'une structure aussi massive qu'un amas, contribuent à déstabiliser les disques de gaz des galaxies situées dans ces régions. Secoués, les nuages s'effondrent plus efficacement et la formation stellaire y est accélérée. Ainsi, de manière statistique, les galaxies situées dans la zone de jonction des amas forment des étoiles à un rythme plus élevé que dans les autres régions.

Lorsque deux galaxies se rencontrent, la zone de chevauchement des disques stellaires est la première affectée. Il s'y produit des chocs entre nuages de gaz, provoquant là aussi une poussée de formation stellaire (Figure 10). Le même phénomène que pour les amas de galaxies, mais à une tout autre échelle... Dans un second temps, une partie des nuages qui n'ont pas participé à cette flambée initiale est canalisée au cœur des galaxies en fusion. Ils s'y condensent, provoquant un nouveau sursaut d'activité stellaire, encore plus important, qui dure jusqu'à ce que les réserves en carburant soient épuisées, typiquement au bout de quelques dizaines de millions d'années.

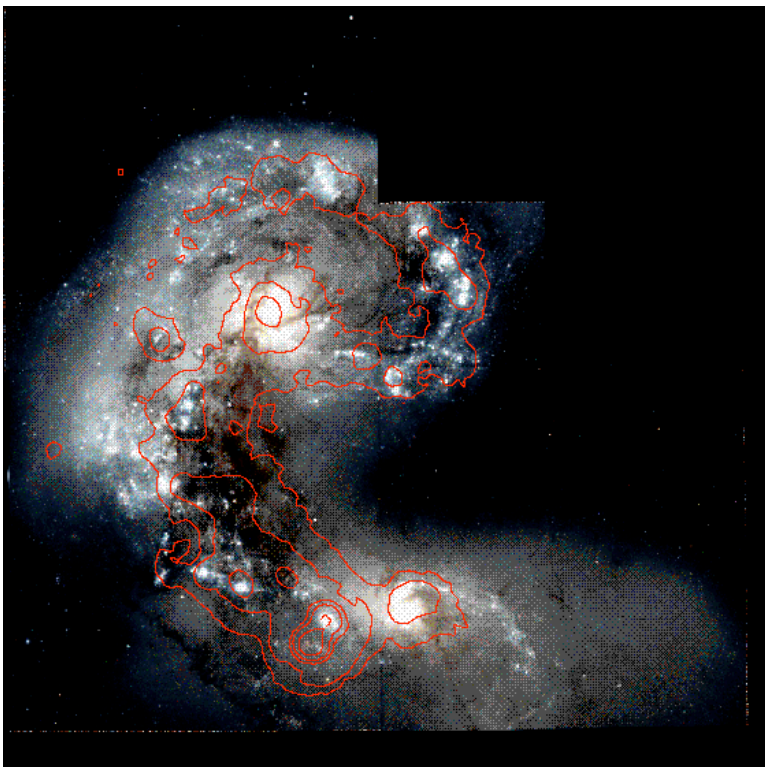


Figure 10 : Les « Antennes » vues par le télescope spatial Hubble. Noter dans la zone d'interface entre les deux disques en collision des zones obscurcies par la poussière. Elles voilent des régions de formation stellaire particulièrement actives dévoilées dans l'infrarouge par le satellite ISO (les contours de l'émission infrarouge sont superposés)

⁶ cf. le harcèlement galactique dont il a déjà été question.

Renaissance cosmique

Les interactions entre galaxies plument leur contenu stellaire et gazeux. Arrachée à leur disque, une fraction parfois importante des étoiles et des nuages de gaz se retrouve dans le milieu intergalactique, formant des structures caractéristiques, à l'instar des queues de marée. Or ces débris de collision vont rapidement se regrouper, à moins qu'ils ne retombent par gravité sur leurs galaxies parents. De nouveaux amas stellaires et des amas globulaires se forment. Dans certaines conditions, les quantités de gaz expulsé dans le milieu intergalactique sont telles qu'elles sont suffisantes pour engendrer un objet aussi massif qu'une galaxie naine. Ainsi naît une seconde génération de bébé galaxies, suite à l'accouplement de leurs galaxies parent (Figure 11). Dans un premier temps reliées à leurs géniteurs par cette sorte de cordon ombilical qu'est la queue de marée, elles prennent ensuite leur indépendance lorsque ce dernier se dissout. Formées à partir de matériaux pollués par les rejets des populations stellaires présentes dans leurs ascendants, elles en conservent une teneur en éléments lourds, comme l'oxygène ou le fer, anormalement élevée pour des naines. Cette anomalie constitue la fiche d'identité génétique des rejetons, qui permet de les distinguer des autres galaxies naines formées beaucoup plus tôt à partir de gaz primordial. Ce mode de reproduction galactique, curieusement proche du vivant, sans en avoir bien sûr l'importance, s'apparente d'ailleurs à la manière dont se forment les générations successives d'étoiles. Les premières, nées dans les premiers âges de l'Univers, étaient pauvres en éléments lourds – *sous métalliques* pour les astronomes – A leur mort, elles ont éjecté dans le milieu interstellaire leur reliquat de gaz ainsi que les atomes qu'elles avaient synthétisés au cours de leur vie. De ces débris se sont formées de nouvelles populations stellaires, plus métalliques, et bien plus tard ... les hommes, « poussières d'étoiles » selon Hubert Reeves.

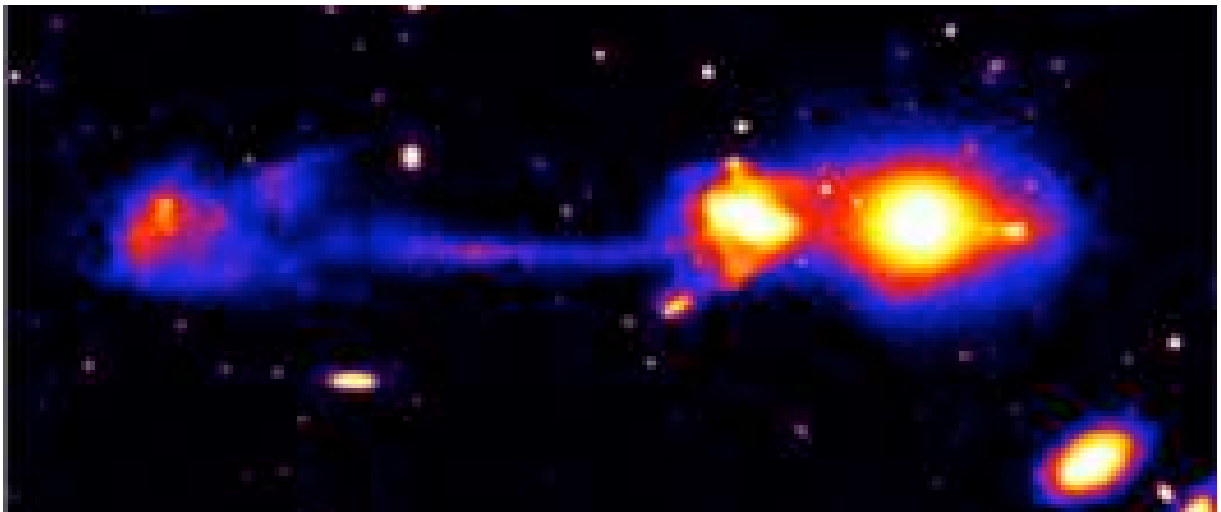


Figure 11 : le système en interaction Arp 105 (« La Guitare »). La galaxie irrégulière, sur la gauche a été formée par de la matière arrachée à la galaxie spirale, au milieu, lors de sa collision avec une galaxie elliptique, à droite (image ESO/ P.-A. Duc)

Transition facile pour retrouver le système solaire et plus particulièrement le couple que forment la Terre avec son satellite, la Lune. Depuis que les astronomes ont été capables d'analyser la composition chimique des roches lunaires, ils ont été intrigués par les similitudes (et par quelques différences) qu'elles présentaient avec les roches terrestres. Elles

contiennent ainsi les mêmes minéraux, mais en proportion différente. En particulier, la teneur en fer y est plus faible. Parmi les scénarii proposés pour expliquer l'origine de notre satellite et rendre compte de ses propriétés, celui d'une collision gigantesque, peu après la formation du système solaire, entre la proto-Terre et une proto-planète de la taille de Mars est le plus à la mode. En s'appuyant sur des simulations numériques, les chercheurs ont proposé que la Lune se soit formée à partir de la matière éjectée lors de cet impact géant. D'où les ressemblances entre les roches lunaires et terrestres. Les débris de la collision, composés des substances les plus légères, proviennent pour l'essentiel de la surface de la planète ... là où la teneur en fer est moindre, puisque cet élément se concentre dans le noyau. D'où les différences de proportions chimiques entre la Lune et la Terre... Ces dissemblances ont d'ailleurs permis d'exclure une autre théorie : l'éjection directe, du fait de la force centrifuge, d'une partie du manteau terrestre à une époque où il était encore liquide et en rotation rapide. Cette matière se serait ensuite agglomérée pour former la Lune.

Ainsi, selon toutes vraisemblances, la Lune serait née d'une collision... comme les galaxies naines de marée dont il a été question plus haut. La composition chimique de ses matériaux l'affilie à la Terre, plus particulièrement à sa surface ... de même que les bébé galaxies ont une teneur en élément lourd plus proche des régions externes de leurs galaxies parent dont elles sont issues que de leurs noyaux caractérisés par une métallicité bien plus élevée.

Un jeu de bowling

Dans un système composé de plusieurs corps solides de différentes masses, les lois de la physique et de la statistique prévoient que les plus légers d'entre eux soient éjectés par suite des interactions gravitationnelles mutuelles. Les différents objets cosmiques n'échappent pas à cette règle. Ainsi les amas globulaires voient peu à peu leur masse et leur taille diminuer au fur et à mesure que leurs étoiles en sont chassées. Par ailleurs, nous avons déjà vu que la plupart des étoiles naissent en groupes. Or selon la taille des nuages proto-stellaires à leur origine et la manière dont ils se sont fragmentés, elles acquièrent des masses différentes. Les plus menues, qui n'ont même pas la masse critique pour allumer les réactions nucléaires propres aux véritables étoiles, sont expulsées par leurs congénères. Ainsi explique-t-on la présence de ces « *planètes vagabondes* » (free floating planets, en anglais) , en fait probablement des « *naines brunes* », repérées à cause de leur mouvement erratique. Des objets compacts, tels des trous noirs stellaires, ont aussi été découverts loin des amas où ils résidaient et dont ils ont été éjectés. Dans le système solaire, la ceinture de Kuiper aurait recueilli certains astéroïdes bannis.

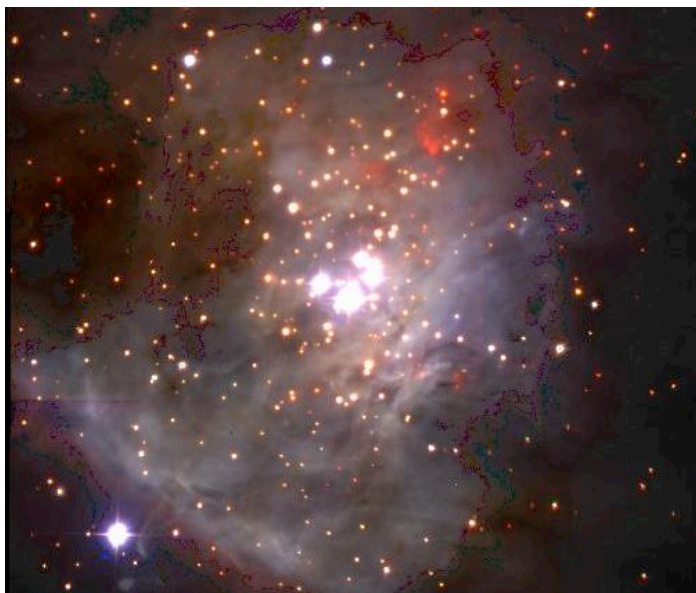


Figure 12 : « *planètes vagabondes* » dans un jeune amas d'étoiles de la nébuleuse d'Orion. Une centaine d'entre elles a été recensée sur cette image infrarouge (Courtoisie P. Lucas/ UKIRT)

Une physique commune

En rapprochant les divers types de collisions, nous ne faisons pas qu'un simple amalgame. En effet, derrière leurs nombreux points communs se cachent des processus physiques communs malgré les différences d'échelle. Nous allons les détailler un peu plus en détail dans ce chapitre.

Rôle de la gravité

Bien sûr, sans la force d'attraction gravitationnelle, il n'y aurait pas de collisions. À l'échelle de l'Univers, la gravité, placée dans le cadre de la relativité générale, est la force dominante ⁷. En fait, le mouvement propre des astres, quelles que soient leur masse et leur taille, est, en première approximation, gouverné par la mécanique newtonienne. Une pomme tombe sur la Terre, soumise à la même loi qu'un groupe de galaxies qui est avalé par un amas.

Effets de marée

Avant même que deux objets ne se heurtent, et d'ailleurs même s'ils ne font que se croiser, ils ressentent leur présence mutuelle et subissent des perturbations causées par des effets dits *de marée*. Ces derniers s'exercent lorsqu'on a est en présence de deux objets massifs (ou plus) en mouvement, sujets simultanément à la force d'attraction gravitationnelle et à la force centrifuge liée à leur rotation. L'exemple le plus connu est la marée océanique causée par l'action conjuguée de la Lune et du Soleil. Sous l'effet des forces de marée, un corps se déforme et ce d'autant plus qu'il est proche de son attracteur ⁸ et qu'il est élastique.

Ainsi, avant de heurter une planète, un astéroïde, constitué de roches solides, prendra une forme légèrement allongée. Dans la même situation, une comète, composée de matériaux moins fermes comme de la glace, s'étendra jusqu'à un point de rupture au-delà duquel elle se brisera. C'est précisément ce qui est arrivé à Shoemaker-Levy ⁹ avant qu'elle ne heurte Jupiter. Les galaxies elles-mêmes sont encore plus sensibles aux effets de marée. Les moins massives, telles les galaxies naines satellites, sont totalement déchirées dès qu'elles pénètrent dans le halo de leur compagnon géant. Les spirales se déforment ; les bras se transforment en gigantesques filaments, les fameuses queues de marée, dont la taille peut atteindre dix fois le rayon initial du disque galactique (Figure 14). Ces forces de marée affectent en premier lieu les composantes en rotation les moins gravitationnellement liées et donc les plus externes. C'est pourquoi le gaz, en particulier l'hydrogène atomique très étendu dans les galaxies, est beaucoup plus facilement arraché que les étoiles. Une galaxie peut ainsi perdre l'essentiel de ses réserves de gaz par ce processus même si, plus tard, elle pourra en récupérer une partie lorsque certains nuages retomberont par gravité. Quant aux galaxies elliptiques, dépourvues d'un disque de gaz, et soudées par le mouvement chaotique de leurs étoiles, elles ne sont guère sensibles aux effets de marée. De même d'ailleurs, et pour les mêmes raisons, que les amas de galaxies (Figure 14).

⁷ si l'on excepte les processus répulsifs qui se cachent derrière le concept d'énergie noire et dont on ignore encore quasiment tout.

⁸ Une force de marée varie comme le cube de la distance, au lieu du carré de la distance pour les forces purement gravitationnelles.

Conditions initiales

Les paramètres clefs sont alors les mêmes quels que soient les types de collision : la vitesse d'approche, la géométrie de l'approche - s'agit-t'il d'une collision directe ou de biais ? -, la valeur du paramètre d'impact, autrement dit, lorsque les deux astres ne se heurtent pas directement, la distance entre eux à l'instant où ils sont les plus proches.

Toutefois, la manière dont ces paramètres influent sur le résultat final dépend de la nature des objets astrophysiques. De faibles vitesses d'approche favoriseront une fusion « en douceur » entre l'impacteur et la cible. Les planétésimaux, corps de la taille du kilomètre formés dans le disque de poussières proto-planétaires, s'agglomèrent en se heurtant mollement à des vitesses de l'ordre de dix mètres par seconde. De collage en collage naissent les embryons de planètes, corps dont la masse avoisine celle de la Lune. Avec des vitesses relatives inférieures au kilomètre par seconde, les embryons pourront eux-mêmes se souder pour former une planète.

De même, deux galaxies qui se télescopent à moins de quelques centaines de kilomètres par seconde⁹ vont irrémédiablement fusionner, après avoir éventuellement spiralé l'une autour de l'autre en étant soumis à des forces de friction.

Par contre, si les vitesses augmentent, les effets seront différents. Dans la ceinture d'astéroïdes, située entre Mars et Jupiter, les vitesses relatives des petits corps atteignent 5 km/s, une valeur bien trop élevée pour qu'un collage soit possible. Ainsi, aujourd'hui, plus aucune proto-planète ne peut se former bien qu'il reste des réserves de planétésimaux. A contrario, la collision à haute vitesse de l'un d'entre eux avec, par exemple, une planète produit des dégâts considérables. Par contre deux galaxies se croisant à plus de 1000 km/s peuvent se traverser puis continuer leur chemin sans être trop perturbées.

Panaches et splash

Ces différences s'expliquent bien sûr par la nature de la cible, solide ou assimilable à un fluide pour les galaxies. Dans le premier cas, l'impact provoque un cratère suivi d'un panache de matière arrachée. La physique en jeu est celle de la résistance des matériaux ; dans le second cas, le choc crée un simple « splash » : une onde de densité circulaire qui se propage vers l'extérieur de la galaxie cible en y déclenchant éventuellement des épisodes de formation stellaire.

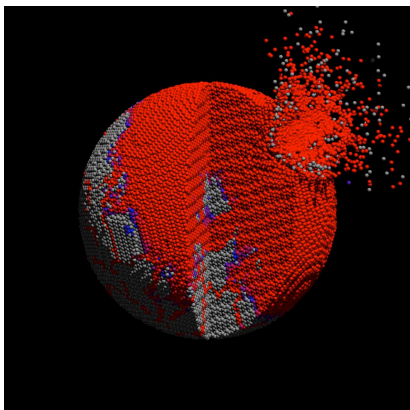


Figure 13 : Panache causé par l'impact d'un astéroïde (simulation numérique, P. Michel)

⁹ des vitesses raisonnables en astrophysique ! Par exemple le Soleil tourne autour du centre de la Voie Lactée à une vitesse orbitale de 200 km/s ; la vitesse orbitale de la Terre autour du Soleil est de 30 km/s, tandis que notre galaxie se rapproche d'Andromède à environ 40 km/s.

Simulations

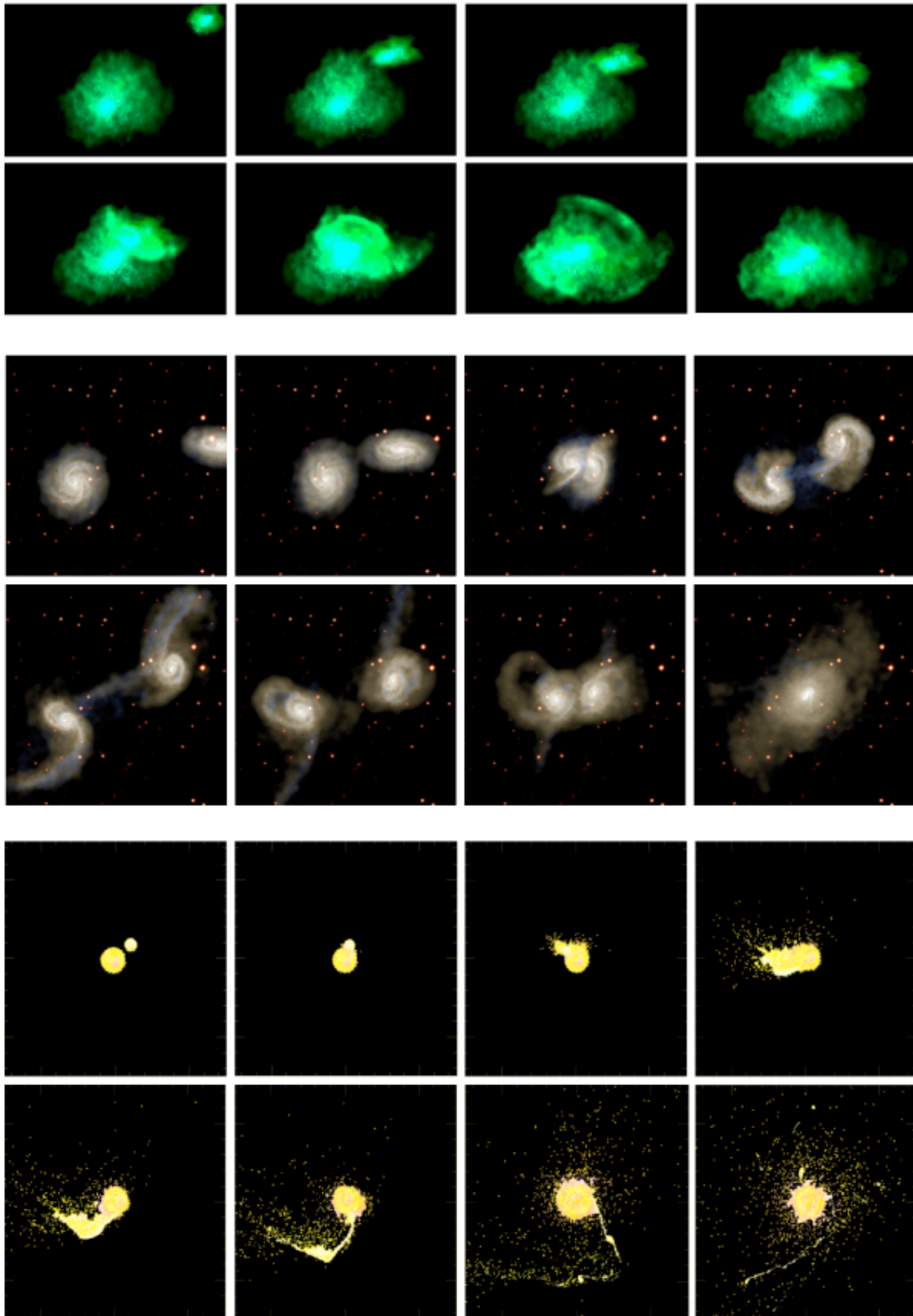


Figure 14 : simulations numériques d'une collision entre deux amas de galaxies (haut), deux galaxies (milieu) et deux proto-planètes (bas). Il s'agit de séquences temporelles, débutant en haut à gauche alors que les deux corps se rapprochent et finissant en bas à droite, alors qu'ils ont fusionné (Courtoisie resp. ESA, V. Springel, R. Canup)

Parce que les processus physiques se ressemblent d'un type de collision à l'autre, les mêmes codes informatiques permettent de les simuler sur ordinateur. D'ailleurs les modélisateurs qui pratiquent les simulations numériques sont habitués à jongler avec les facteurs d'échelles. En effet, ils représentent les objets astrophysiques par des particules tests en interaction gravitationnelle; ils sont obligés d'en restreindre le nombre à cause de la capacité limitée des moyens de calcul. Les simulations les plus ambitieuses en comportent un milliard ; les plus courantes quelques millions, donc bien moins que d'étoiles dans la Galaxie - cent milliards -, de galaxies dans l'Univers ou de planétésimaux dans un disque proto-planétaire... Dans ces conditions, quelle différence pour un ordinateur entre un amas d'étoiles ou de galaxies ? Celui-ci ignore les valeurs absolues de taille, de temps ou de vitesse. Seuls comptent les valeurs relatives et les lois de la physique qui indiquent si l'on peut ou pas appliquer des facteurs d'échelles pour modéliser un processus donné.

Ainsi, il ne faut pas s'étonner que les simulations de collisions de galaxies, et plus particulièrement de l'évolution des queues de marée, ressemblent tant à celles reproduisant les chocs entre proto-planètes, en particulier le comportement des débris de collisions (Figure 14).

Vraiment importantes ?

A travers cet exposé, j'espère avoir montré que l'étude comparée des collisions dans l'Univers, à toutes les échelles, n'était pas un simple exercice de style mais reposait sur des considérations physiques bien comprises. J'ai insisté sur l'importance des collisions dans la formation et l'évolution tant des planètes que des galaxies et amas de galaxies. Parce qu'il est corroboré par la théorie populaire de la structuration hiérarchique de l'Univers¹⁰, le rôle fondamental attribué aux rencontres et fusions entre corps célestes est devenu incontournable, alors qu'il était considéré comme marginal il y a une vingtaine d'années. Toutefois, déjà des voix commencent à s'élever pour le remettre en question. Confrontés aux dernières observations, notamment aux sondages profonds, les modèles hiérarchiques présentent quelques difficultés. On trouverait trop d'elliptiques dans l'Univers lointain, alors que ces galaxies si elles naissaient vraiment de la fusion de spirales, devraient être les dernières formées et donc absentes à grand décalage vers le rouge. Commence alors à se profiler un nouveau paradigme qui se focaliserait plutôt sur le rôle joué par le halo de matière noire. Selon sa masse, la galaxie ou les galaxies qu'il abrite évolueraient de manière différente. Faut-il en conclure pour autant que parce que les étoiles ou les planètes n'en possèdent a priori pas, on n'aurait plus le droit de se prêter au jeu des similitudes ?

L'étude des systèmes planétaires extrasolaires dont le nombre s'est multiplié ces dernières années peut aussi réserver son lot de surprise et bouleverser le modèle standard de formation des planètes, qui jusqu'à peu était uniquement basé sur notre connaissance du système solaire.

Les théories les plus enthousiasmantes se heurtent souvent à la réalité du monde, du moins telle qu'on la perçoit. Elles peuvent en être anéanties ou lorsque le choc est moins rude simplement transformées. Mais de toute manière, c'est de la collision des idées que progresse la connaissance scientifique...

Remerciements

Je tiens à remercier très chaleureusement mes collègues du laboratoire Astrophysique Interaction Multi-Echelles (AIM) qui m'ont apporté une aide précieuse pour rédiger ce document, tout particulièrement Sébastien Charnoz, Sylvain Chaty, Doris Neumann et Romain Teyssier. Merci aussi à Alessandro Morbidelli et Patrick Michel pour leurs simulations de collisions entre astéroïdes.

¹⁰ théorie intimement liée à celle dite du « Cold Dark Matter (CDM)»