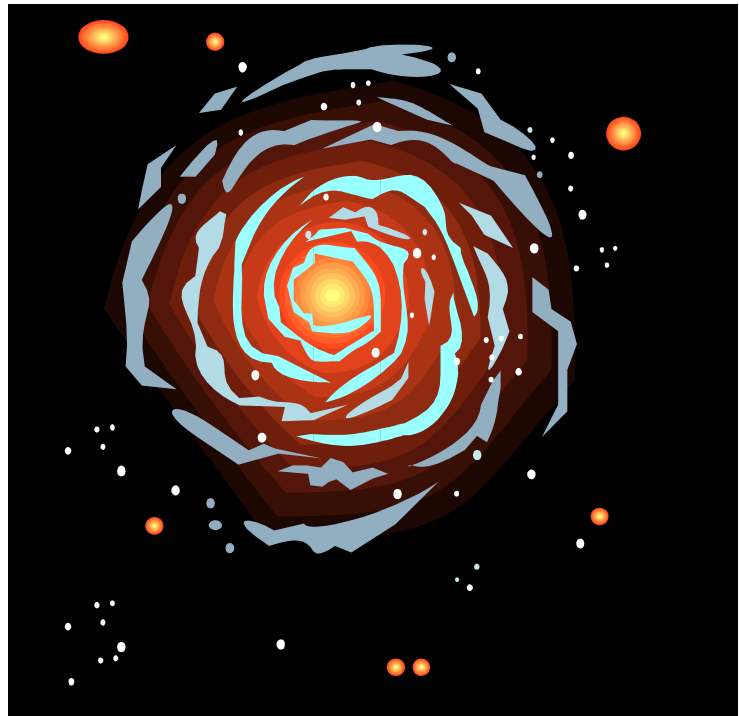


*En Toute simplicité...*

Physique



**L'Univers**

N° P8

Auteur: Alain Bellevergue

[alain.bellevergue@orange.fr](mailto:alain.bellevergue@orange.fr)

Malicia et Neurino sont deux amis qui aiment discuter de sujets les plus variés, notamment de physique. Malicia, un peu plus jeune, est curieuse de tout. Futée, ses questions parfois inattendues permettent d'éclairer les sujets traités sous des angles surprenants. Elle joue le rôle de candide et n'a qu'un souhait : comprendre.

Neurino dispose d'une plus grande expérience et aime transmettre ses connaissances, notamment à son amie Malicia. Il joue le rôle du professeur.

Nos deux compères, en toute simplicité et en toute complicité, nous emmèneront explorer ces sujets de façon ludique et avec passion.

Bien sûr, qui dit physique, dit aussi un peu de mathématiques. J'ai souhaité, pour ce numéro, vulgariser plus que d'habitude et m'attacher à décrire davantage les phénomènes physiques en oubliant quelque peu les équations. Je m'en excuse auprès des matheux.

Partons à la découverte de l'Univers et laissons la parole à Malicia et Neurino.

Après une réflexion, certes physique, mais aux penchants philosophiques, sur l'origine de l'Univers, nos amis tenteront de remonter aux premiers instants de l'Univers.

Pas à pas, avec les premières briques, ils reconstitueront le déroulement de sa construction.



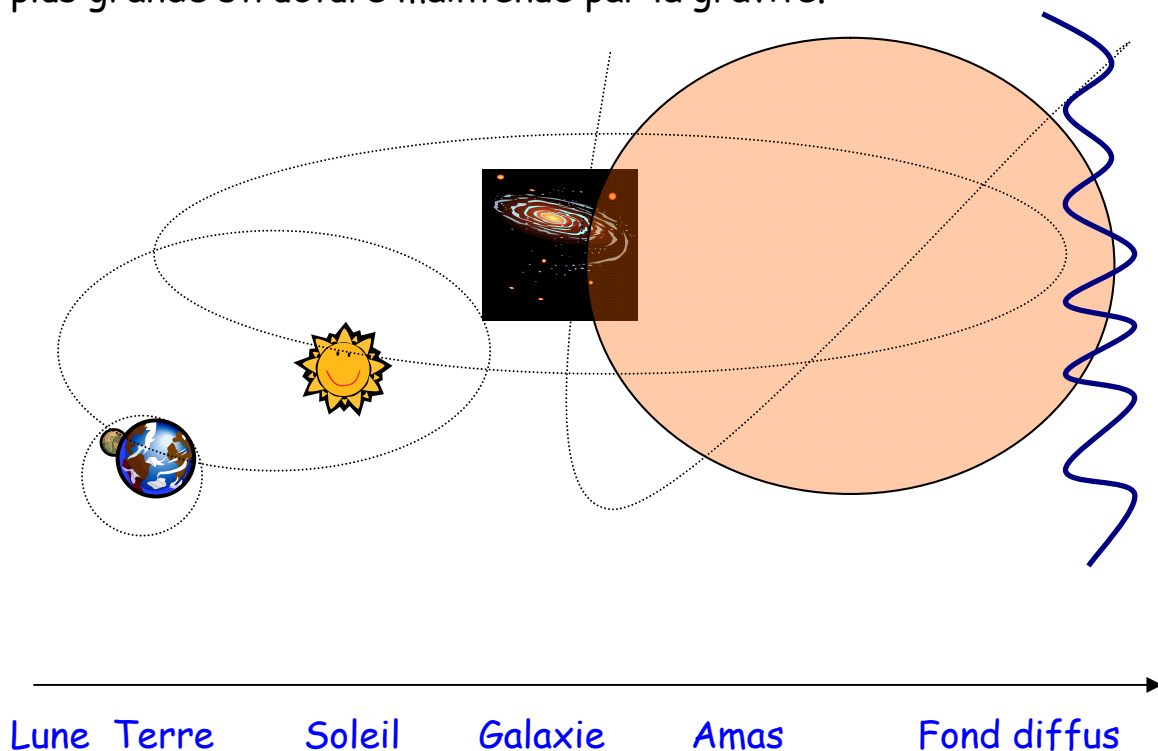
## Plantons le décor.

**Malicia** : Bonsoir Neurino. As-tu vu le splendide ciel étoilé de ce soir ?

**Neurino** : Bonsoir Malicia. Oui, il est merveilleux et pourtant ce que nous voyons ne constitue qu'une infime partie de notre Univers.



**Malicia** : Oui, je sais, nous avons déjà vu cela. Il y a la Lune qui tourne autour de la Terre. La Terre tourne autour du Soleil. Le Soleil qui tourne autour du centre de la voie lactée, notre galaxie. La galaxie tourne autour du centre de notre amas de galaxies. L'amas étant la plus grande structure maintenue par la gravité.

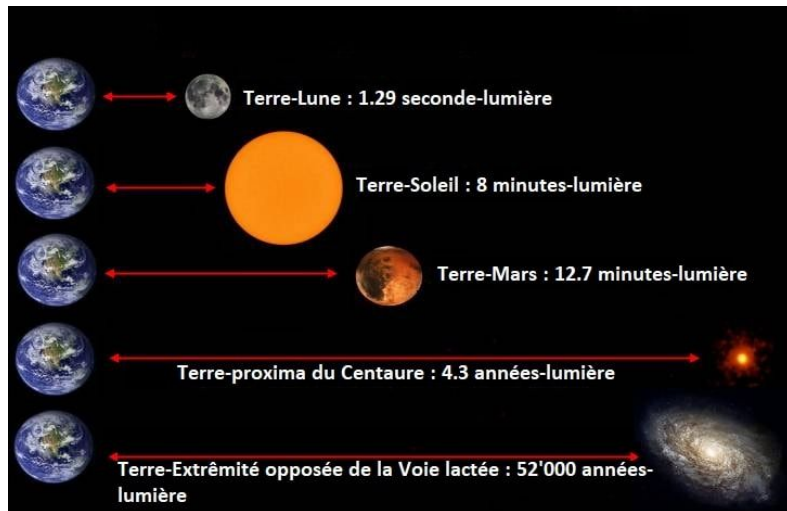


**Neurino** : Je suis content de constater que nos échanges te profitent. Peux-tu donner des ordres de grandeur à ces objets ?

**Malicia** : Oui bien sûr, je crois me souvenir que les amas de galaxies pouvaient mesurer plus de 200 millions d'années-lumière.

**Neurino** : En effet, ce qui est peu par rapport à la distance des objets les plus lointains comme le fond diffus cosmologique, dont nous reparlerons, et qui se situe à 13,7 milliards d'années-lumière, mais immense par rapport à notre galaxie qui mesure, à peine, si s'ose dire, 130 000 années-lumière.

**Malicia** : Une année-lumière étant la distance parcourue par la lumière en une année, celle-ci se déplaçant à 300 000 kms par seconde.



**Neurino** : C'est bien cela, soit près de 10 000 milliards de kms, or il faut encore multiplier cette valeur par 13,7 milliards pour estimer la taille de l'Univers en kms.

**Malicia** : C'est inimaginable.

**Neurino** : Inimaginable est un bon terme, à plusieurs titres. Pour tenter d'appréhender les proportions, je te propose de supposer qu'1 milliard d'années-lumière soit équivalent à une année-lumière.

**Malicia** : Soit de réduire l'Univers à l'échelle du milliardième.

**Neurino** : Tout à fait ! Dans cette équivalence, notre galaxie mesurerait «encore» un peu plus de 11 heures-lumière et notre soleil ne serait «plus» qu'à une minuscule 1/2 microseconde-lumière de nous.

**Malicia** : Alors que l'Univers mesurerait 13.7 années-lumière ce qui est encore absolument considérable !

**Neurino** : C'est effectivement ce que je voulais te faire ressentir : l'immensité de l'Univers !

**Malicia** : Oui, merci, je le ressens bien !  
Je me sens toute, toute petite. Mais une autre question trouble mon esprit.

**Neurino** : Quelle est cette question qui ose perturber ce jeune esprit ?

**Malicia** : Voilà : il commence où l'Univers ?

**Neurino** : Bonne question. Réponse : il n'a pas de commencement, pourtant son origine se trouve partout !



**Malicia** : C'est toujours inimaginable... tu te moques de moi ?

**Neurino** : Effectivement «inimaginable». Je ne me permettrais pas de me moquer, je vais tenter de t'expliquer pourquoi ?

### Pas de commencement !

**Neurino** : Pour commencer «quelque part» il faudrait pouvoir définir ce «quelque part» or cela n'est pas possible, puisque avant la création de l'Univers ce quelque part n'existe pas.

**Malicia** : C'est troublant, en effet, mais logique, donc pas de «où» commence l'Univers.

**Neurino** : Non, l'Univers est forcément à la fois contenu et contenant et ce commencement «quelque part» devient «partout» au fil de l'extension de l'Univers.

**Malicia** : Mais qu'y avait t'il avant l'Univers ?

**Neurino** : Par définition l'Univers contient l'Univers. Avant l'Univers c'est toujours l'Univers. En fait parler d'«avant» l'Univers est un non sens. Il n'y a pas d'«avant».

**Malicia** : Peut-on dire que l'Univers a toujours existé ?

**Neurino** : En quelque sorte dans notre dimension.

**Malicia** : Ce qui explique qu'il n'y ait pas de commencement et pas de «où».

**Neurino** : En effet, mais aussi pas de temps «0», j'y reviendrai. Cela n'empêche pas à l'Univers d'avoir une histoire, un âge, une origine, une évolution et bien des mystères...

**Malicia** : Nous voilà repartis pour une nouvelle aventure. J'adore...

Regarder au loin c'est explorer le passé.

**Neurino** : Nous percevons la réalité de l'Univers au travers de nos sens et de nos dimensions spatio-temporelles.

**Malicia** : Tu veux dire les volumes et le temps.

**Neurino** : Oui. Quand tu regardes le Soleil tu ne vois pas une étoile telle qu'elle est. Mais telle qu'elle était il y a 8 minutes.

**Malicia** : Le temps que met la lumière à venir du Soleil.

**Neurino** : Oui. En fait nous ne regardons pas au loin mais c'est la lumière du passé qui vient vers nous.



**Malicia** : Il est probable que les astres que nous observons ne soient plus du tout aujourd'hui comme nous le montre leur lumière.

**Neurino** : Tu viens de mettre le doigt sur une réalité difficilement «imaginable» encore ! Ce que nous voyons, ce n'est pas l'espace, mais le temps. L'espace et le temps ne coïncident, pour nous, qu'au lieu présent et à l'instant présent.

**Malicia** : Mais s'ils coïncident pour nous ici, ils devraient aussi coïncider pour quelqu'un d'autre ailleurs, dans une autre galaxie par exemple.

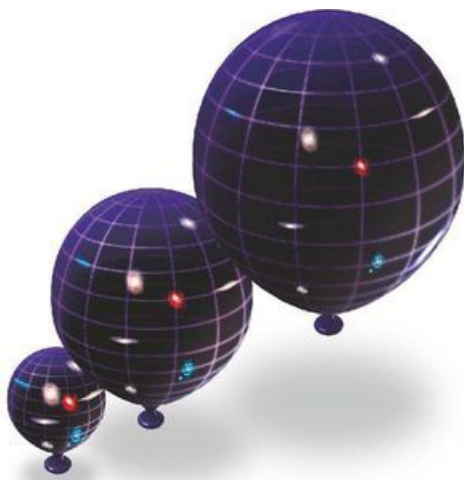
**Neurino** : Parfaitement. De chaque point de l'Univers le temps s'écoule et à l'instant présent chaque point reçoit la lumière du passé de chaque autre point et émet, lui, la lumière de son présent. Il est à la fois origine et extrémité.

**Malicia** : Stop, c'en est trop je décroche.



**Neurino** : Ne t'inquiètes pas, cela dépasse l'image que l'esprit peut s'en faire en 3 dimensions, les seules accessibles pour lui. Il faut admettre que nous vivons dans un espace-temps à 4 dimensions.

-inimaginable- L'espace et le temps étant liés pour nous, nous n'arrivons pas à les séparer mais l'on peut s'en faire une idée en 3 dimensions : 2 dimensions pour l'espace et une dimension pour le temps. En imaginant cette fois que l'Univers est un ballon qui gonfle avec le temps.



**Malicia** : Je vois. La surface du ballon est l'espace proprement dit à 2 dimensions, et le temps sera l'accroissement de son volume donc de la surface du ballon.

**Neurino** : Tu vois, quand on se raccroche à ce que notre esprit peut percevoir, on comprend mieux. Dans ce cas, chaque point de la surface du ballon est équivalent, il est à la fois le centre de la surface du ballon et son extrémité.

**Malicia** : Et le temps s'écoule au départ de chaque point de la surface. Un point «B» le plus éloigné d'un point «A» donné est le plus ancien.

**Neurino** : Pour ce point donné car inversement ce point «A» sera le plus éloigné, ou le plus ancien pour ce point «B». Le temps sera donc représenté par des cercles concentriques autour de chaque point de la surface du ballon.

**Malicia** : Une question m'intrigue : par deux points de la surface d'un ballon on ne peut pas faire passer de ligne droite. L'Univers ne serait-il pas plat ?

**Neurino** : Il faut extrapoler à quatre dimensions en considérant que les espaces à la surface du ballon ne sont pas des surfaces mais des volumes et que le temps n'est pas représenté par des cercles mais

par des sphères concentriques autour de chaque point de l'espace-temps alors, en effet, il semble bien que l'Univers ne soit pas plat. Cela étant, localement, et à très grande échelle, on peut facilement le considérer comme plat.

**Malicia** : Que veux-tu dire par très grande échelle ?

**Neurino** : Qu'étant donnée l'immensité de l'Univers, localement sa courbure devient imperceptible.

### Un Univers en Expansion-Âge de L'Univers

**Malicia** : En reprenant l'image du ballon, il est évident que les objets situés sur sa surface s'éloignent les uns des autres quand le ballon gonfle.

**Neurino** : Oui, donc les amas et les galaxies s'éloignent les uns des autres avec le temps. L'Univers est en expansion.

**Malicia** : Si l'Univers est en expansion, si je remonte le temps, forcément il se contracte. Et à l'origine il est petit et dense.



**Neurino** : Excellente remarque. Effectivement on va remonter le temps de près de 13 milliards et 800 millions d'années.

**Malicia** : Mais comment peut-on être aussi précis ?

**Neurino** : Car on a pu mesurer le taux d'expansion de l'Univers. Pour cela, on observe des galaxies lointaines et on mesure leur vitesse d'éloignement.

**Malicia** : Et ça donne quoi ?

**Neurino** : 67.8 kms par seconde et par Mégaparsec.

**Malicia** : Méga quoi ?



**Neurino** : Parsec : abréviation de «parallaxe-seconde» le parsec vaut environ 3.26 années-lumière.

**Malicia** : Pourquoi faire simple quand on peut faire compliqué !

**Neurino** : Cette unité est très utile en astronomie et permet de simplifier grandement les calculs.

**Malicia** : OK, 67,8 kms par seconde et par Mégaparsec, ça signifie quoi exactement ?

**Neurino** : Que chaque seconde, les galaxies s'éloignent de 67.8 kms de plus tous les 3.26 années-lumière.

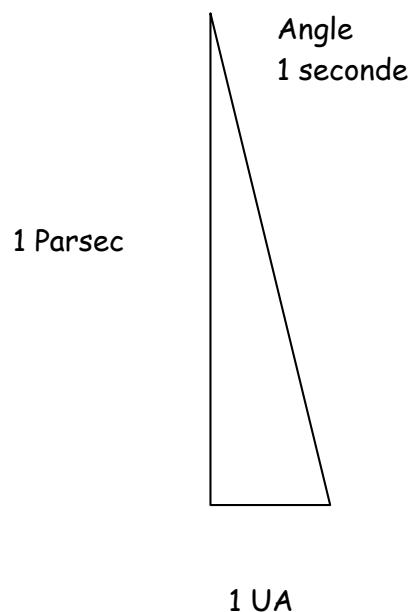
**Malicia** : Ce taux d'extension est constant ?

**Neurino** : Exactement. Ce qui permet donc de calculer l'âge de l'Univers qui est égal à  $13.799 \pm 0.021$  milliards d'années.

L'âge étant l'inverse du taux d'extension, tous calculs et conversions d'unités effectués.

... *Pour les plus curieux*

Le Parsec (Parallaxe-seconde) est la longueur du côté d'un triangle rectangle dont le côté opposé vu sous un angle de une seconde vaut une UA (unité astronomique) soit la distance Terre-Soleil.



## Une Origine - Le Big-bang

**Malicia** : Il y aurait donc un commencement à l'Univers ?

**Neurino** : Pas exactement, pas d'avant, donc toujours pas de commencement mais une histoire et une origine. J'y reviendrai.

**Malicia** : Aurait-on une idée de l'état de l'Univers à l'origine ?

**Neurino** : Plusieurs hypothèses circulent mais une domine. On l'appelle la théorie du Big-bang.

**Malicia** : Big-bang : «Gros Boum» un drôle de nom pour une théorie d'origine de l'Univers.

**Neurino** : En fait ce nom lui fut donné en 1949 par Fred Hoyle, un astronome britannique qui ne croyait pas en cette théorie.



**Malicia** : Il donne ce nom pour se moquer et il est resté, un comble !

**Neurino** : Oui, car la majorité des astrophysiciens admet aujourd'hui la théorie du Big-bang. Les expériences, notamment celles réalisées dans les accélérateurs de particules attestent la plupart des conditions à l'origine.

**Malicia** : Et quelles sont ces conditions à l'origine ?

**Neurino** : Les observations confirment un Univers à l'origine extrêmement petit, chaud et dense.

Un point de départ inatteignable.

**Malicia** : Qui dit très dense, dit masse très importante et un ralentissement du temps... n'est-il pas ?



shutterstock.com · 386581477

**Neurino** : Malicia ! Tu me surprendras toujours. En effet, comme nous l'avons vu en relativité générale, à proximité d'une masse importante le temps se dilate.

**Malicia** : Et pour le coup à l'origine de l'Univers la masse, elle devait être très importante.

**Neurino** : Tu n'imagines pas à quel point ! Je le répète, il est impossible de définir un commencement et encore moins un avant. On s'en approche sans jamais pouvoir l'atteindre. Au plus on s'en approche, plus l'Univers est dense, et plus le temps se dilate.

**Malicia** : Je comprends maintenant pourquoi il ne peut pas y avoir de temps  $t = 0$ .

**Neurino** : Cela étant, nous allons décrire des instants de plus en plus courts, sans jamais remonter au  $t=0$ .

**Malicia** : Courts pour nous, observateur, cependant, des temps propres pour les particules à l'origine, en raison de leur énorme densité énergétique, et de leur vitesse proche de celle de la lumière qui sont beaucoup plus longs.

**Neurino** : Bravo, tu n'as rien oublié des notions de relativité restreinte, félicitations.

**Malicia** : Merci, je suis confuse.

### Une Ère dite de Planck, infiniment petite.

**Neurino** : Le plus petit moment que nous puissions remonter avec la théorie du Big-bang est appelé l'ère de Planck ou mur de Planck, infranchissable, elle vaut  $10^{-43}$  secondes (1/10 suivi de 43 zéros).

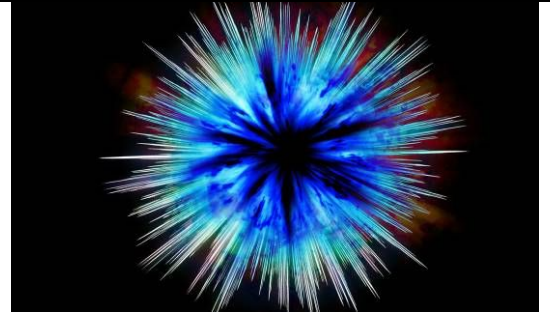
**Malicia** : Fichtre, c'est infiniment petit !

**Neurino** : Certes, mais ce n'est pas 0 et ce ne sera jamais 0. La taille de l'Univers est alors excessivement réduite. Tout l'Univers est comprimé dans un espace bien plus petit que le noyau d'un atome.

**Malicia** : Il doit faire chaud.

**Neurino** : Sa température est de plusieurs milliards de milliards de degrés ( $10^{32}$  degrés Kelvin ;  $1^{\circ}\text{K} = -273^{\circ}\text{Celsius}$ ).

**Malicia** : De quoi est composé cet Univers ?



**Neurino** : Il est composé uniquement d'énergie, des photons, dont émergent des particules et anti particules inconnues qui s'annihilent continuellement. Une seule force, dite *Super force*, règle les interactions. L'espace et le temps tentent d'exister et sont liés, mais sont déformés sans arrêt.

**Malicia** : Comment agit cette super force ?

**Neurino** : On ne sait pas trop. Les lois actuelles de la physique, y comprises celles de la mécanique quantique, trouvent leur limitation. Les valeurs sont si élevées que l'espace-temps semble atteindre une courbure infinie et arrêter le temps.

En principe, une théorie dite «du tout» ou de «gravité quantique» devrait pouvoir expliquer l'union des 4 forces mais rien de vraiment convaincant à ce jour.

**Malicia** : Paradoxal : le temps semble s'arrêter et un âge de Planck infiniment petit.

**Neurino** : Je ne te le fais pas dire .Tu n'es pas au bout des surprises

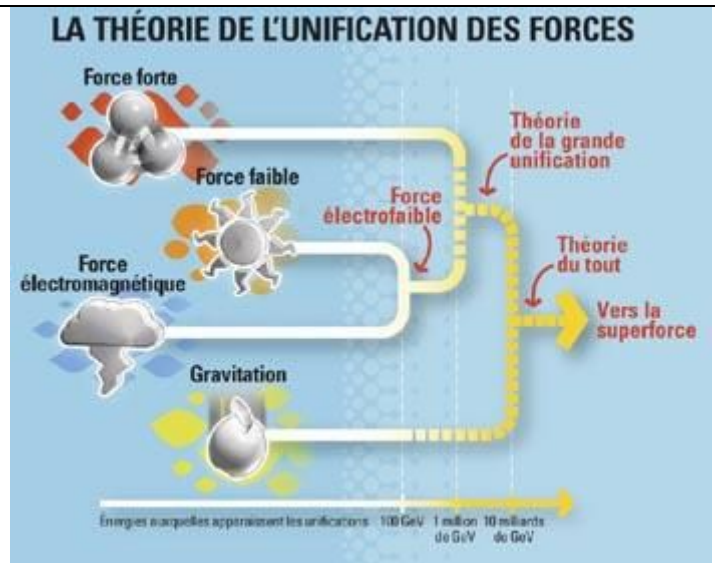
**Malicia** : Chic, j'aime les surprises.

## Séparation de la *super force*.

**Neurino :**

Quasi immédiatement, la *super force* se divise en 2 forces, la *gravitation*, qui sera l'une des 4 forces fondamentales que nous connaissons, et une force que l'on appelle, à ce moment

«*électronucléaire*».



**Malicia :** La gravitation, je connais bien, c'est donc la première des forces fondamentales à prendre son autonomie.

**Neurino :** Oui, la deuxième force unit les 3 autres forces fondamentales. Pour cette raison l'ère qui suit l'ère de Planck est appelée l'ère de la grande unification.

## La grande unification.

**Neurino :** Durant cette ère, des bouleversements extraordinaires vont se produire, engageant irrémédiablement la destinée de l'Univers.

**Malicia :** Une ère aussi très courte je présume.

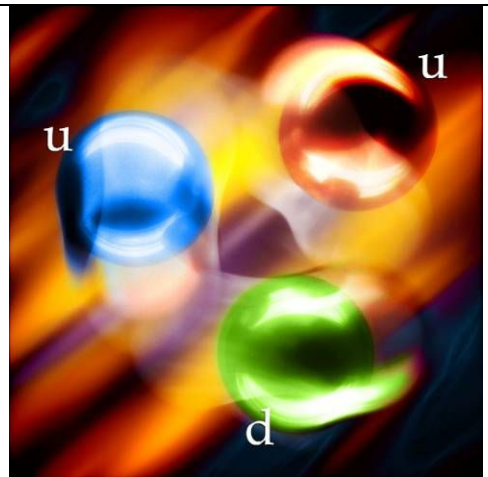
**Neurino :** Tu présumes bien, l'ère de la grande unification s'étale, si j'ose dire, entre  $10^{-43}$  et  $10^{-36}$  secondes.

**Malicia :** Dans quel état est alors l'Univers ?



**Neurino** : Juste après la division de la *super force*, dans un bain de photons qui représentent encore la quasi-totalité de l'énergie, apparaissent alors des particules que nous connaissons : les quarks up et down, les électrons, les neutrinos ainsi que les antiparticules correspondantes.

**Malicia** : Tout cela sous le contrôle de cette fameuse force d'union «*électronucléaire*». Sait-on comment agit cette force ?



**Neurino** : Une théorie dite : symétrie de jauge, basée sur l'équivalence des forces fondamentales à très haute énergie permet de confirmer la théorie de la grande unification.

**Malicia** : Et concrètement ça donne quoi ?

**Neurino** : Dans cet Univers primitif en très forte agitation, les particules et antiparticules naissent et s'annihilent en permanence. Il est très probable que c'est aussi durant cette phase qu'apparaît la matière noire.

**Malicia** : Sur laquelle nous ne connaissons rien !

**Neurino** : Sauf qu'elle interagit avec la gravitation, mais en effet, pas plus. Elle reste un parfait mystère.

Plus de matière que d'antimatière.

**Malicia** : Il y a autant de particules que d'anti particules ?

**Neurino** : Et non et l'avenir de l'Univers va se jouer sur une toute petite différence.

**Malicia** : Les particules sont plus nombreuses.

**Neurino** : Et oui, les particules prennent le dessus sur les antiparticules à raison de seulement, une pour 1 milliard. Ce qui permettra à la matière de dominer l'Univers.

**Malicia** : On a eu chaud !



**Neurino** : Pas forcément. Si cela avait été l'inverse, nous serions simplement composés d'antimatière.

**Malicia** : Vu comme ça...

### Séparation de la force électronucléaire.

**Neurino** : À  $10^{-38}$  s la force électronucléaire se sépare en 2 forces : *l'interaction nucléaire forte* et la *force électro faible*.

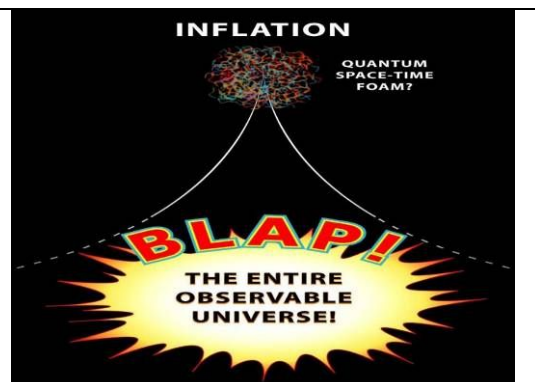
**Malicia** : *L'interaction nucléaire forte* est l'une des 4 forces fondamentales.

**Neurino** : Oui, elle lie les quarks dans le noyau des atomes. Nous y reviendrons. En l'occurrence, l'énergie libérée par la séparation de la *force électronucléaire* va faire grandir l'Univers de façon exponentielle.

### Inflation et Expansion.

**Malicia** : Comme l'expansion ?

**Neurino** : Non, l'Univers va se dilater d'un facteur de  $10^{50}$  voire plus, quasi instantanément. On appelle cela l'inflation, à ne pas confondre avec l'expansion, qui n'est que l'agrandissement de l'espace avec le temps.



**Malicia** : Et après l'inflation que se passe-t-il ?

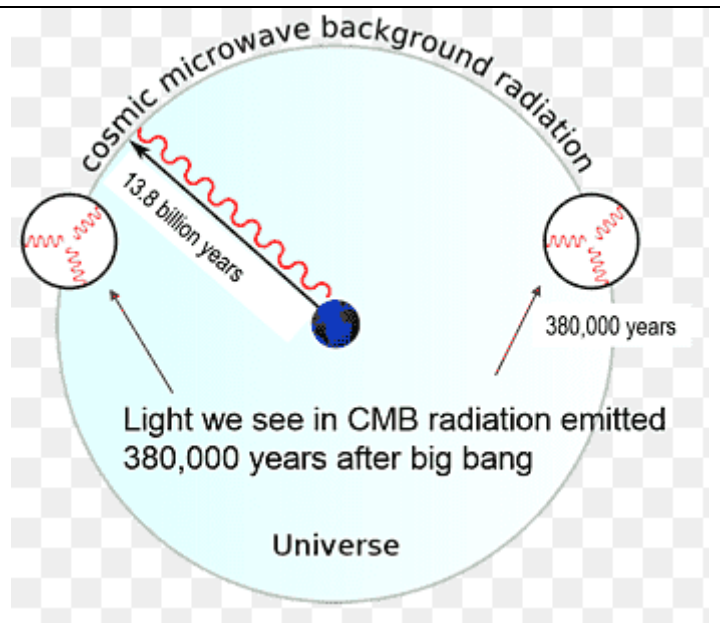
**Neurino** : L'expansion continue et l'Univers poursuivra sa croissance d'un facteur  $10^{27}$ .

En comparant l'Univers à un élastique, l'expansion est son allongement quand on tire sur ses extrémités, l'inflation serait un bout d'élastique que l'on rajoute.

**Malicia** : Pourquoi est-il nécessaire d'ajouter cet épisode d'inflation à l'histoire de l'Univers ?

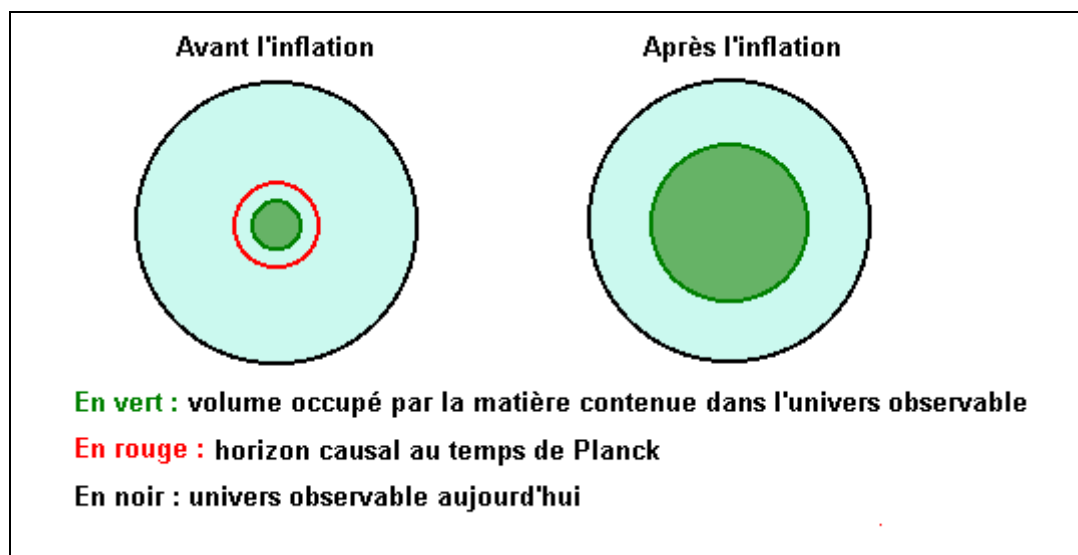
**Neurino** : Tout simplement, quand nous observons le fond diffus cosmologique, sur lequel je reviendrai en détail, qui est une photographie de l'Univers à l'âge de 380 000 ans dans toutes les directions, on s'aperçoit que toutes les zones sont sensiblement à la même température.

**Malicia** : Ces zones ont donc eu un vécu commun.



**Neurino** : Je suis d'accord. Pourtant en traçant des sphères de causalité de rayon 380 000 ans, temps nécessaire pour qu'il y ait cause à effet entre les différentes zones. Il n'y a pas de recouvrement et aucune raison pour trouver cette uniformité.

**Malicia** : Il y aurait donc eu un recouvrement préalable.



**Neurino** : Ce que permet l'hypothèse de l'inflation en élargissant l'horizon observable.

**Malicia** : Je suis cependant très troublée !

**Neurino** : À quelle occasion ?

**Malicia** : Il me semble que cette inflation entraîne un accroissement du volume de l'univers qui se déroule à une vitesse impossible !

**Neurino** : Je vois ce que tu cherches à exprimer : il n'est pas possible de dépasser la vitesse de la lumière. Cela reste vrai.

**Malicia** : Alors comment est-ce possible ?

**Neurino** : Il n'y a pas expansion mais bien apport d'espace supplémentaire. La différence est importante.

**Malicia** : Comme c'est bizarre !

**Neurino** : Bizarre, certes mais cette hypothèse de plus en plus admise permet de répondre, à des questions jusqu'alors sans réponse.

### Ère de l'interaction électrofaible.

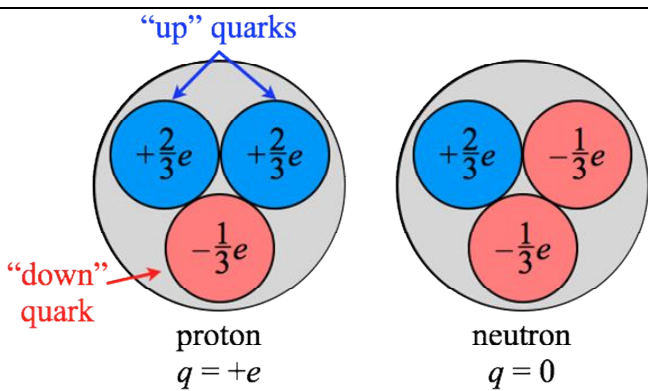
(  $10^{-38}$  à secondes  $10^{-10}$  )

**Neurino** : La baisse de la température ne permet plus aux quarks up et down très massifs d'exister seuls. Sous l'influence de *l'interaction nucléaire forte*, Ils se groupent 3 par 3 pour former les neutrons et les protons.

**Malicia** : Quelle différence y a t'il entre un quark up et un quark down?

**Neurino** : Essentiellement la charge électrique, le quark up est chargé à  $2e/3$  alors que le quark down est chargé à  $-e/3$ .

**Malicia** : e valant  $1.6 \cdot 10^{-19}$  coulombs si ma mémoire est bonne.

<p><b>Neurino</b> : Exact, bonne mémoire, plus fort : avec ces éléments, tu devrais retrouver comment vont se regrouper les quarks</p>	 <p style="text-align: center;"> <span style="color: blue;">“up” quarks</span>  <span style="color: red;">“down” quark</span>              proton <math>q = +e</math>              neutron <math>q = 0</math> </p>
--	--

**Malicia** : Voyons voyons. Un neutron, comme son nom l'indique doit avoir une charge nulle. Je verrais bien  $2e/3 - e/3 - e/3$  donc 1 quark up et 2 quarks down.

**Neurino** : Bravo. Et pour le proton qui doit avoir une charge égale à  $e$ .

**Malicia** : Facile !  $2e/3 + 2e/3 - e/3$  donc 2 quarks up et un quark down.

**Neurino** : Voilà nos "nucléons" constitués. C'est ainsi qu'on appelle les noyaux de nos futurs atomes.

### Séparation des 4 forces fondamentales.

**Malicia** : Il est comment, l'Univers après cette phase ?

**Neurino** : La température a considérablement baissé, mais reste encore très élevée de l'ordre de  $10^{15}$  degrés kelvin.

**Malicia** : Il a bien grossi.

**Neurino** : En effet, l'Univers est devenu une sphère de 300 millions de kms. Nous sommes seulement à  $10^{-10}$  secondes.

**Malicia** : Il s'en passe des choses en si peu de temps !

**Neurino** : Et ce n'est pas fini. La force *électro faible* se sépare maintenant en *interaction faible* et *interaction électromagnétique*.

**Malicia** : Les 4 forces fondamentales sont à présent indépendantes.

**Neurino** : L'interaction faible est la force qui règle les phénomènes de radioactivité.

**Malicia** : Alors que la force électromagnétique régit les phénomènes chimiques et le magnétisme.

**Neurino** : Parfait, mais pour le moment nous sommes à  $10^{-10}$  secondes avec des protons des neutrons des électrons....

**Malicia** : Alors... ne perdons de temps, on avance...



## Ère de la nucléosynthèse

**Neurino :** Entre une micro seconde et une seconde, la température descend encore. À la fin de cette période la totalité des antiquarks a disparu, l'Univers a un rayon d'environ 10 milliards de kms.

**Malicia :** Et dire que tous les phénomènes décrits jusqu'à présent, du mur de Planck à la formation des neutrons, et des protons se sont déroulés en une seule petite seconde, c'est stupéfiant !

**Neurino :** Oui et maintenant commence véritablement la formation de premiers noyaux atomiques.

**Malicia :** La force nucléaire forte va encore montrer ses muscles !

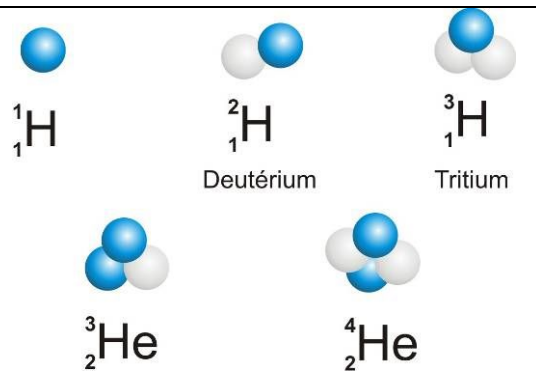
**Neurino :** C'est qu'elle en a, du muscle. On appelle cette période l'ère de la nucléosynthèse primordiale.

**Malicia :** Que se passe t-il durant cette phase?

**Neurino :** Durant cette phase qui dure de ( $10^{-3}$  secondes à 3 minutes), il y a stabilisation et formation des premiers noyaux d'atomes légers à partir des protons et des neutrons.

**Malicia :** C'est un jeu de construction.

**Neurino :** En quelque sorte, 1 proton pour l'atome d'hydrogène, 1 proton-1 neutron pour le deutérium, 1 proton-2 neutrons pour le tritium, 2 protons-1 neutrons pour l'hélium 3, 2 protons-2 neutrons pour l'hélium 4.



**Malicia :** Quel est le résultat à la fin de cette phase ?

**Neurino :** La température tombe à un million de °K. Cette température permet aux protons et aux neutrons de s'assembler de façon stable. L'Univers est alors composé de 75% de noyaux d'hydrogène, de 25% de noyaux d'hélium4, de quelques traces d'autres noyaux légers, d'électrons libres et de neutrinos, toujours dans un bain de photons.

## Un Univers opaque

**Malicia** : Il n'y a que de l'hydrogène et de l'hélium ?

**Neurino** : Effectivement. Des noyaux dont nous serons tous issus.

**Malicia** : Pourquoi que des noyaux ? Pourtant dans un atome il y a des électrons périphériques ?

**Neurino** : Que se passe t-il quand on apporte de l'énergie à un atome ?

**Malicia** : Les électrons changent d'orbites et quittent l'atome.

**Neurino** : Tu as tout compris. La température est encore trop élevée. Cela empêche les électrons libres trop énergétiques de se lier aux noyaux.

**Malicia** : Nous avons donc des électrons libres négatifs et des noyaux d'atomes libres positifs.

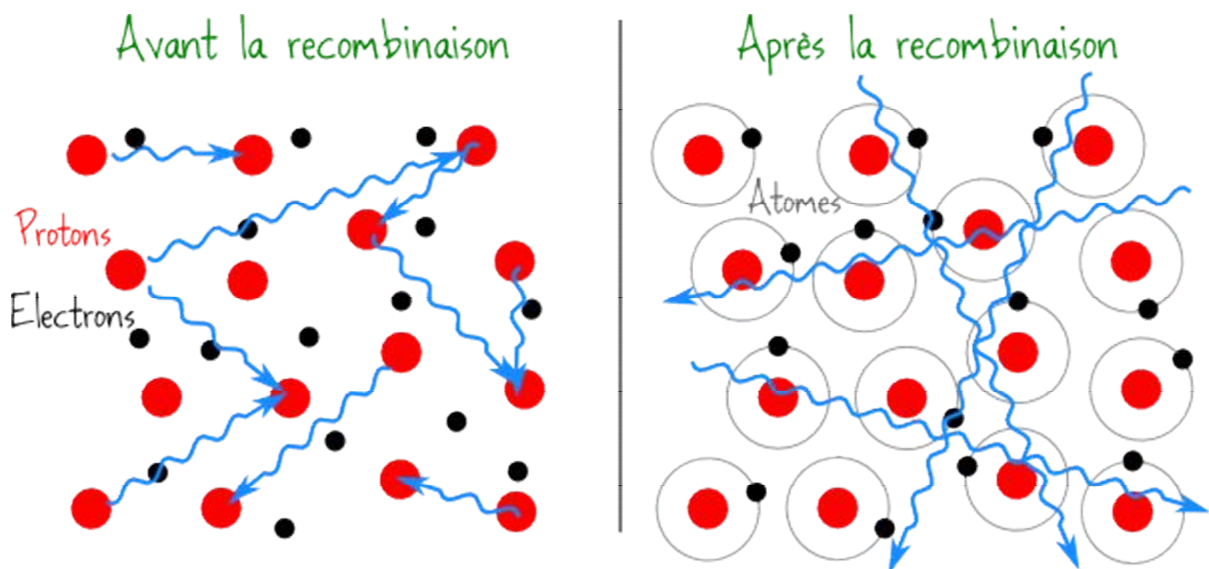
**Neurino** : Donc un Univers ionisé et des photons sensibles à la force électromagnétique qui interagissent, mais prisonniers de la matière.

**Malicia** : Quelles en sont les conséquences ?

**Neurino** : Dans ce plasma, les photons sont absorbés et aussitôt régénérés et n'ont pas le temps de se propager.

**Malicia** : Ce n'est pas très clair !

**Neurino** : Je ne te le fais pas dire. Les photons ne pouvant s'échapper l'Univers est opaque.





Malicia : Que faire ?

Neurino : Attendre la recombinaison.

Malicia : Que les électrons se lient aux noyaux ?

### L'Univers devient transparent - Sa première photo

Neurino : Tout simplement.

Malicia : Quand cela se produit t-il ?

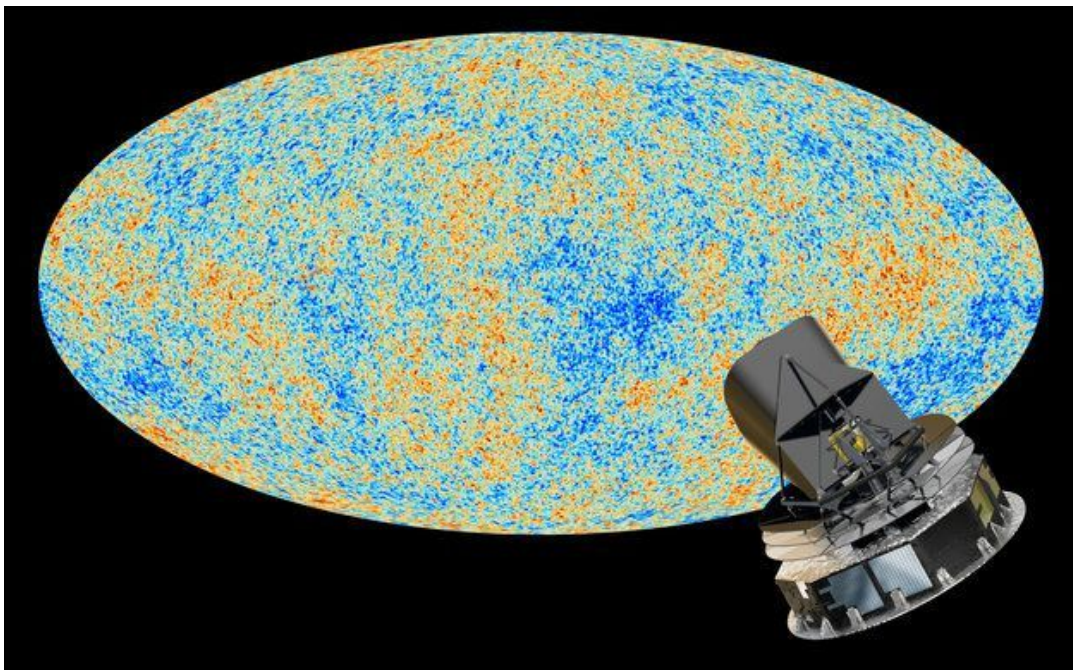
Neurino : À 380 000 ans, la température a chuté à 2700 °Kelvin. Les photons n'ont plus assez d'énergie pour empêcher les électrons de se lier aux noyaux des atomes d'hydrogène et d'hélium.

Cela entraîne deux conséquences majeures.

- Les photons enfin libérés peuvent s'échapper et traverser l'Univers à la vitesse de 300 000 km par seconde, il devient transparent ;
- Nous pouvons observer ces photons qui nous arrivent aujourd'hui, après un voyage de plus de 13,7 milliards d'années, c'est ce que nous appelons le fond diffus cosmologique ;

Malicia : Voilà enfin ce fameux fond diffus cosmologique.

### Le Fond diffus Cosmologique



**Neurino** : Voici en effet la dernière photo des toutes premières lueurs de l'Univers prise par le satellite européen Planck lancé par une fusée Ariane en 2009.

**Malicia** : Il y en avait eu d'autres avant ?

**Neurino** : En 1989 la Nasa avait lancé le satellite COBE, puis en 2003 le satellite WMAP capable de fournir une carte complète des fluctuations de la température de l'Univers à 2.7°K.

**Malicia** : STOP ! Je ne comprends plus !

**Neurino** : Quoi donc ?

**Malicia** : Tu me parles de 2700°K et maintenant de 2.7°K et d'abord comment mesure-t-on une température après plus de 13,7 milliards d'années ?

**Neurino** : Désolé...tu as raison, sur toute la ligne, je vais trop vite.

**Malicia** : Ce n'est pas grave. Tu vas te rattraper comme d'habitude...

**Neurino** : En effet, on ne mesure pas une température, mais une fréquence, donc des photons qui correspondent à une température.

**Malicia** : Par quel mystère ?

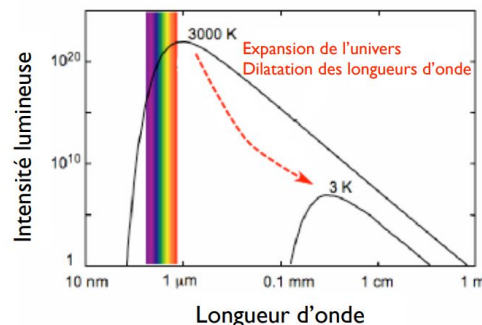
**Neurino** : Aucun. L'Univers se comporte comme un corps noir. Comme tout corps chaud, il émet une onde correspondante à la température de ce corps.

**Malicia** : Formidable ! et les 2700°K devenus 2.7°K

**Neurino** : À cause de l'effet Doppler.

### Fond diffus cosmologique

- Emission d'un fond de photons avec un spectre de corps noir à une température de 2.73 K aujourd'hui, 411 photons/cm<sup>3</sup>



**Malicia** : C'est le même effet connu en acoustique qui fait, par exemple, que le son du moteur d'une formule 1 devient de plus en plus aigu quand elle s'approche de toi puis de plus grave quand elle s'éloigne.

**Neurino** : Exactement, sauf qu'ici c'est l'Univers qui est en expansion et qui s'éloigne, alors la fréquence devient plus grave...

**Malicia** : Tu vois quand tu veux... On s'éloigne alors que l'onde nous poursuit donc sa fréquence diminue... CQFD.

**Neurino** : Tout cela avait été prévu par les théoriciens. En 1964 un groupe d'astronomes cherchait à mesurer ce rayonnement.

**Malicia** : Mais ils n'y arrivaient pas.

**Neurino** : Par contre, 2 autres astronomes, Penzias et Wilson, travaillaient, sur une antenne cornet pour observer la voie lactée. Ils étaient gênés par un bruit de fond qu'ils n'arrivaient pas à éliminer.



**Malicia** : Non ! Ne me dis pas que...

**Neurino** : Et si. Ce bruit, c'était lui le fond diffus, et cela leur a rapporté le prix Nobel.

**Malicia** : Bien. Nous avons donc une carte très précise de la température de l'Univers à l'âge de 380 000 ans. Que pouvons-nous en conclure ?

**Neurino** : Et surtout des fluctuations de température, extrêmement précises, que l'on appelle des «anisotropies».

**Malicia** : À tes souhaits ! Pardon je n'ai pas pu résister.

**Neurino** : Ce n'est pas grave, se détendre est toujours bienvenu. Plus sérieusement, ces minuscules variations de l'ordre de  $0.0001^{\circ}\text{K}$  seraient à l'origine de la formation des futures grandes structures de galaxies et d'amas de galaxies.

**Malicia** : Incroyable ! Nous avons donc avec cette carte les germes du futur espace inter galactique.

### L'âge sombre

**Neurino** : En quelque sorte.

**Malicia** : Et maintenant que va-t-il-se passer ?

**Neurino** : On entre dans l'âge sombre.

**Malicia** : Un Univers transparent mais un âge sombre ! Paradoxal.

**Neurino** : Pendant cette période, de près de 200 millions d'années, il ne se passe rien.

**Malicia** : L'Univers continue à s'étendre.

**Neurino** : Oui bien sûr, et d'immenses nuages d'hydrogène et d'hélium larges de plusieurs centaines d'années-lumière arpentent l'espace. Cependant, il n'y a aucune étoile pour l'illuminer.

**Malicia** : Je comprends maintenant pourquoi on appelle cette période : âge sombre. Et alors, après ?

### Naissance des premières étoiles

**Neurino** : Au sein de ces gigantesques nuages, que l'on appelle des nébuleuses, se forment des tourbillons générant des points de concentration.

**Malicia** : La force de gravité va pouvoir agir.

**Neurino** : En effet, en ces points, la pression, la gravité et la température augmentent considérablement. L'hydrogène finit par fusionner et entraîner une réaction nucléaire.

**Malicia** : J'ai compris, il y a donc naissance des premières étoiles.

**Neurino** : Parfaitement, ces premières étoiles illuminent les nébuleuses. C'est la fin de l'âge sombre.



*Les piliers de la création : Nébuleuse, véritable pouponnière d'étoiles à 7000 années-lumière, photo prise par Hubble dans la direction de la constellation du serpent.*



**Malicia** : Quelles sont les particularités de ces étoiles ?

**Neurino** : Elles sont en général de très grande taille et de vie relativement courte. Elles n'ont pas de planètes, puisqu'il n'y a aucun autre élément que l'hydrogène et l'hélium.

**Malicia** : C'est quoi la fusion nucléaire ?

**Neurino** : Sous certaines conditions de pressions et de températures (plusieurs centaines de millions de °K), 2 atomes légers vont fusionner pour constituer 1 atome plus lourd.

**Malicia** : En l'occurrence 2 atomes d'hydrogène vont fusionner pour générer 1 atome d'hélium.

**Neurino** : Et libérer beaucoup d'énergie...

### Nucléosynthèse stellaire

**Malicia** : Que se passe-t-il quand il n'y a plus d'hydrogène ?

**Neurino** : Excellente question, car après la fusion de l'hydrogène, ces premières étoiles vont générer les autres éléments.

**Malicia** : Tous les éléments même ceux dont "nous" sommes issus ?



**Neurino** : En effet, après la fusion de l'hydrogène et la formation de l'hélium, les étoiles vont générer par fusion nucléaire les atomes de masse atomique croissante, du carbone au fer tels : l'azote, l'oxygène, le sodium, le magnésium, l'aluminium, le silicium, le potassium, le calcium... C'est la nucléosynthèse stellaire.

**Malicia** : Et que deviennent tous ces éléments ?

**Neurino** : À la mort de l'étoile, ces éléments sont expulsés vers les nuages interstellaires et contribueront à la création de nouvelles étoiles de 2e et 3e génération.

**Malicia** : Donc cette fois-ci avec la possibilité de créer aussi des planètes.

**Neurino** : En effet, mais n'allons pas trop vite avec la création des étoiles, le paysage de l'Univers prend forme et les galaxies s'organisent.

### Formation et vie des galaxies

**Malicia** : En principe issues des anisotropies du fond diffus cosmologique...

**Neurino** : Alors là, tu m'épates ! Les premières galaxies effectivement vont se former après 1 milliard d'années, puis évoluer pendant 10 milliards d'années jusqu'à donner la structure que nous observons aujourd'hui.

**Malicia** : Quelle forme peut prendre une galaxie ?

**Neurino** : Une galaxie rassemble plusieurs milliards d'étoiles, de gaz et de poussières. Elles sont sans cesse en mouvement. Il y en a de trois type : les spirales, les elliptiques et les irrégulières.

**Malicia** : Je suppose que ces galaxies évoluent.



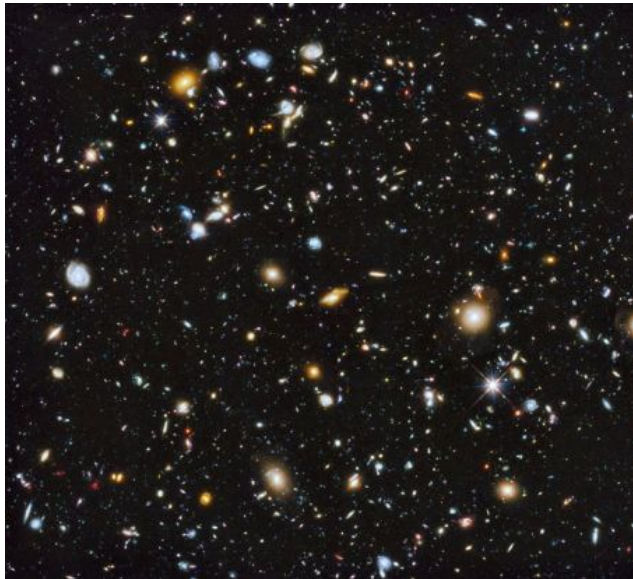
**Neurino** : Assurément, et l'on montre d'ailleurs que loin d'être l'Univers stable que nous dévoile notre firmament, il est au contraire le théâtre de scènes apocalyptiques dépassant même l'imagination de Spielberg.

**Malicia** : que se passe-t-il de si effrayant ?



**Neurino** : Il est courant qu'une galaxie engloutisse une autre galaxie. Notre voie lactée se nourrit actuellement d'une galaxie naine : la galaxie du sagittaire. Il est prévisible que la voie lactée et la galaxie d'Andromède située à 2,2 millions d'années lumière finiront par fusionner en donnant naissance à de nombreuses autres étoiles.

**Malicia** : Un spectacle grandiose que nous ne verrons pas.



**Neurino** : Oh non ! Nous sommes sur une autre échelle des temps.

Si nous ramenions l'âge de l'Univers qui est de 13,7 milliards d'années à 13,7 ans. L'homme moderne n'aurait que 5 minutes.

Et un événement, comme la fusion de galaxies qui prend plusieurs centaines de millions d'années, prendrait encore plusieurs mois.

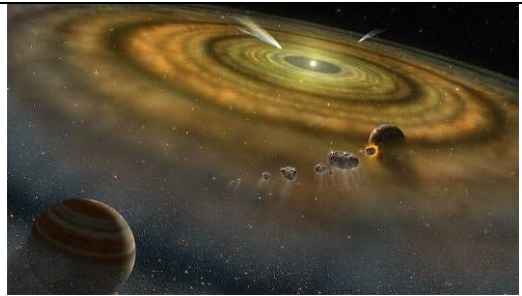
### Naissance de notre Soleil

**Malicia** : C'est bien joli tout cela... des milliards de milliard d'étoiles, des milliards de galaxies et notre Soleil alors ?

**Neurino** : Il y a environ 4.6 milliards d'années, au sein de la nébuleuse protolaire dans le bras d'Orion de notre galaxie, un tourbillon prend naissance et se densifie. Celui-ci, à la différence des étoiles de 1<sup>re</sup> génération, entraîne dans sa course des éléments lourds : le carbone, l'oxygène, le silicium, le fer...

**Malicia** : Des éléments laissés par l'explosion d'anciennes étoiles si je ne m'abuse.

**Neurino** : Tu ne t'abuses toujours pas. Ce tourbillon s'allonge, s'aplatit. Au centre la pression augmente, la gravité s'accroît de façon considérable. L'hydrogène s'accumule, et s'effondre sur lui-même...



**Malicia** : La température augmente et atteint une valeur suffisante pour enclencher une fusion nucléaire. Notre Soleil prend naissance.

**Neurino** : Cependant à la périphérie, il y a les poussières composées d'éléments lourds.

### Le système solaire s'organise

**Malicia** : Est-ce ces poussières qui formeront les futures planètes ?

**Neurino** : On ne peut rien te cacher. En effet, les poussières se percutent, s'agrègent, et finissent par former des grains, puis des cailloux, des blocs... des astéroïdes. Tout ce monde dans sa course folle autour du Soleil s'entrechoque, se percute, s'agglomère pour façonner le système solaire.

**Malicia** : D'accord, mais les planètes, comment se forment-elles ?

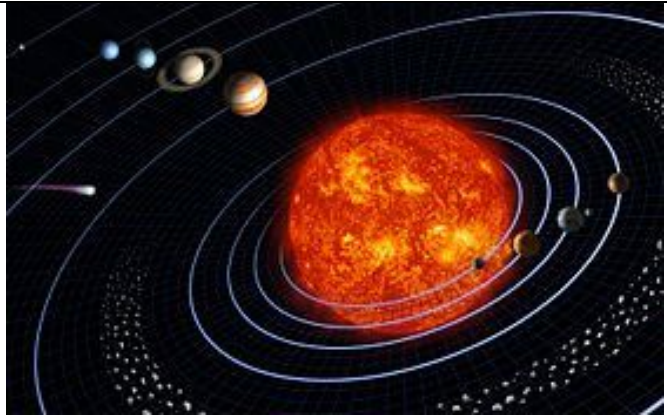
**Neurino** : De l'accrétion de blocs de plus en plus gros émergent des corps plus massifs, plus ronds : les futures planètes, notamment les planètes composées essentiellement de matières, comme Mercure, Venus, La Terre et Mars. Elles sont dites telluriques.

**Malicia** : Comment ce fait-il que les planètes soient sphériques ?

**Neurino** : À partir d'un certain volume et d'une certaine dimension, l'accrétion des éléments s'équilibre sous l'effet de la gravité. On dit qu'il s'établit naturellement un équilibre hydrostatique.

**Malicia** : Et pour les autres planètes ?

**Neurino** : Un peu plus loin, poussées par le vent solaire, stimulées par le tumulte ambiant, et autour de noyaux glacés, des concentrations gazeuses prennent naissance. Elles sont de moins en moins denses plus on s'éloigne du Soleil. Elles ne le sont pas suffisamment pour former des étoiles, mais d'elles émergent les planètes dites gazeuses : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune.



**Notre système solaire** : vue d'artiste. En réalité le Soleil est bien plus grand et les distances plus importantes, il représente plus de 99 % de la masse totale du système solaire. Source NASA/JPL

**Malicia** : Voilà donc notre Soleil et nos 8 planètes. Et Pluton alors ?

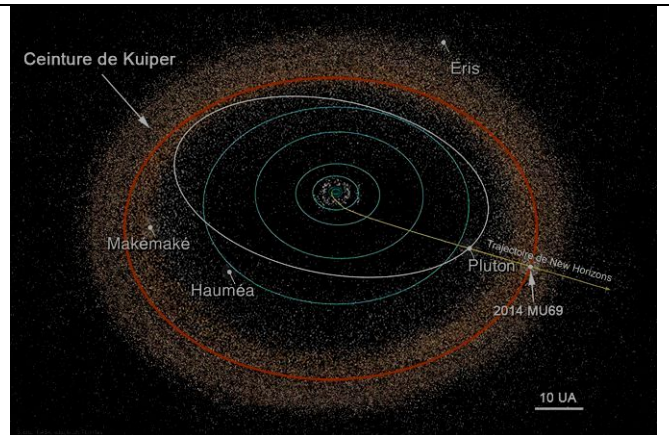
**Neurino** : Pluton n'est plus considérée comme une planète depuis août 2006. Son orbite n'est d'ailleurs pas située dans le même « Plan », (Plan comme planète). Depuis, d'autres astres aussi volumineux ont été localisés et ce ne sont pas des planètes.

**Malicia** : Si ce ne sont pas des planètes, c'est quoi ? Des rochers ?

**Neurino** : J'y arrive. Mais oui, ce sont d'énormes rochers appelés astéroïdes, pour les plus gros. Cent millions d'années après la naissance du système solaire, les planètes actuelles sont quasiment formées. Leurs orbites sont maintenant nettoyées des rochers errants. Il reste cependant des rochers et des astéroïdes qui gravitent encore aujourd'hui autour du Soleil. Ils sont situés entre Mars et Jupiter dans ce qu'on appelle la ceinture d'astéroïdes, et au-delà de Neptune dans la ceinture de Kuiper.

**Malicia** : Dont de très gros comme Pluton.

**Neurino :** Certains sont de dimension telle - de l'ordre de 1000 kms -, qu'on les nomme des planètes naines. Il s'agit de Cérès, dans la ceinture d'astéroïdes, et de notre fameuse Pluton, mais encore de Hauméa, Makémaké et Éris, dans la ceinture de Kuiper.



**Malicia :** Pluton est donc une planète naine et n'est pas la seule !

**Neurino :** Et non, enfin il y a les comètes qui apparaissent également avec la naissance du système solaire. Elles gravitent aussi autour du Soleil sous des orbites extrêmement allongées.

**Malicia :** Comme la comète de Halley qui apparaît tous les 76 ans.

**Neurino :** Exactement. Elles semblent provenir d'un endroit du cosmos appelé le nuage d'Oort. Les périodes sont très variables et peuvent être très importantes.

**Malicia :** Y aurait-il des comètes ne réalisant qu'un seul passage ?

**Neurino :** Oui, la trajectoire est alors hyperbolique.

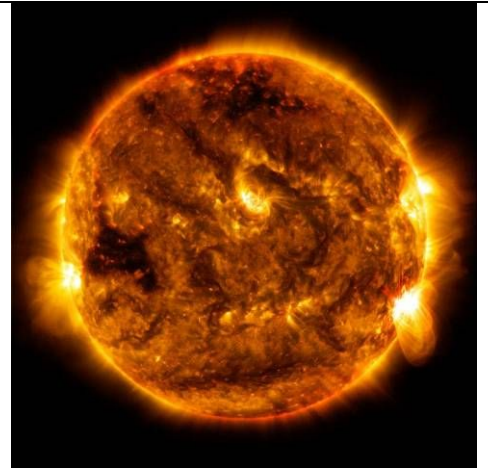
**Comment cela devrait-il finir ?**

**Malicia :** Bon, notre système solaire est installé, si j'ose dire. La vie est apparue sur Terre. Le soleil brille, mais pendant combien de temps encore ?



**Neurino :** Malgré la place immense qu'il occupe dans notre système solaire, notre Soleil n'est qu'une étoile très moyenne parmi les milliards d'étoiles de notre galaxie. On le classe dans la catégorie des naines jaunes.

**Malicia :** Je comprends. Une étoile banale en quelque sorte, mais pour encore combien de temps ?



**Neurino :** Chaque seconde, par réactions nucléaires, le Soleil «fusionne» 700 millions de tonnes d'hydrogène qu'il transforme en 696 millions de tonnes d'hélium. La différence : 4 millions de tonnes de masse est convertie en énergie, soit plus d'énergie que celle produite par 2 milliards de centrales nucléaires en un an !

**Malicia :** Je suis impressionnée, 4 millions de tonnes de masse solaire sont converties chaque seconde... Combien de temps cela peut-il durer ?

**Neurino :** J'y viens... rassure-toi, il reste assez d'hydrogène afin que le Soleil brille environ 5 milliards d'années supplémentaires.

**Malicia :** Ouf, il y a de quoi voir venir.

**Neurino :** Cependant un jour, donc très lointain, l'hydrogène viendra à manquer, alors l'hélium accumulé dans le cœur de notre Soleil prendra la relève et commencera à fusionner en formant du carbone et de l'oxygène.

**Malicia :** Que se passera-t-il alors avec des éléments plus lourds ?

**Neurino :** Les équilibres entre pression et gravité ne seront plus maintenus. Les couches externes de notre Soleil se dilateront progressivement, notre étoile deviendra une géante rouge.



**Malicia** : Le Soleil devrait grossir considérablement.

**Neurino** : En effet, il englobera alors les premières planètes du système solaire, Mercure, Vénus, puis viendra le tour de notre Terre.

**Malicia** : Il est malheureusement probable que l'humanité aura disparu depuis bien longtemps. Mais qu'en est-il de l'Univers ?

**Neurino** : Alors là ! On peut dire que les méninges de nos astronomes tant amateurs que professionnels ont bien chauffé.

**Malicia** : À ce point ?

**Neurino** : Heureusement, le satellite Planck n'a pas mesuré que les anisotropies, mais aussi la polarisation des premières lueurs.

**Malicia** : Ne t'emballe pas... d'abord c'est quoi une polarisation ? Et pourquoi est-ce heureux de la mesurer ?

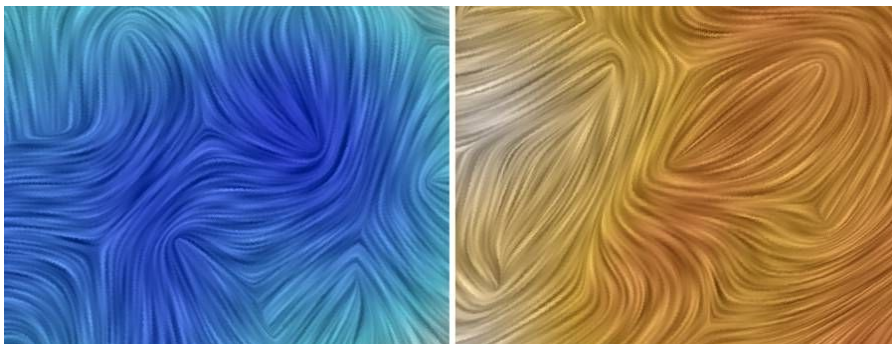
**Neurino** : J'allais y venir. Une onde n'est pas seulement caractérisée par sa fréquence, mais aussi par la direction privilégiée ou non du champ électrique qui la compose.

**Malicia** : Comme mes super lunettes de soleil à verres polarisants.

**Neurino** : Oui, tes lunettes filtrent la lumière du jour, dont le champ électrique tourne dans toutes les directions pour ne conserver que la direction verticale et ainsi éviter les éblouissements.

**Malicia** : Merci. Cela étant, en quoi, est-ce utile de mesurer la polarisation des premières lueurs de l'Univers ?

**Neurino** : Il faut simplement noter que les orientations de polarisation relevées par Planck témoignent des mouvements et du type des matières à l'origine.



Ondes de densité de polarisation relevées par Planck



**Malicia** : Et alors, et alors....

**Neurino** : Après 4 années d'observation, l'on peut confirmer plusieurs paramètres qui sont déterminés avec une bien plus grande précision.

**Malicia** : On peut dire que tu sais ménager le suspense...

**Neurino** : Il est possible, du coup, d'affirmer que l'Univers est composé de 26.8% de matière noire.

**Malicia** : Cette matière invisible, détectée que par ses effets gravitationnels.

**Neurino** : Tout à fait, il est aussi composé de 68.3 % d'énergie noire ou sombre. Dont le rôle est d'accélérer l'expansion de l'Univers.

**Malicia** : Et donc présente dès l'origine.

**Neurino** : En effet. Cette information est capitale. Energie de nature très étrange et qui ne semble pas faiblir au cours du temps.

**Malicia** : Encore un très grand mystère ?

**Neurino** : Parfaitement. Cette énergie sombre est une clé essentielle qui est déterminante pour l'avenir de l'Univers.

**Malicia** : Fichtre, rien que ça ! Mais avant ça s'il te plait :

$100 - 26.8 - 68.3 = 4.9\%$  à quoi correspondent-ils ?

**Neurino** : À la matière ordinaire, à toi, à moi.

**Malicia** : Ça fait peu !

**Neurino** : Je ne te le fais pas dire. Et c'est pourtant tout ce que nous pouvons voir.

**Malicia** : Alors comment nos savants fous ont-ils prévu la fin de l'Univers ?

### Un Univers sans commencement et sans fin.

**Neurino** : Une première remarque : quels que soient les événements à venir, il n'y a aucune raison que le temps s'arrête.

**Malicia** : C'est logique, le fait d'imaginer un après Univers revient à se situer encore dans un espace temporel.

**Neurino** : Et donc toujours dans un Univers.

**Malicia** : En fait après l'Univers, c'est toujours l'Univers.

**Neurino** : Exactement, c'est peut être autant philosophique que physique, mais important, un avant et un après Univers n'ont pas de sens. L'Univers est seul et unique, il a bien une histoire, même, si cette histoire est infinie et quelle qu'elle soit sans début ni fin.

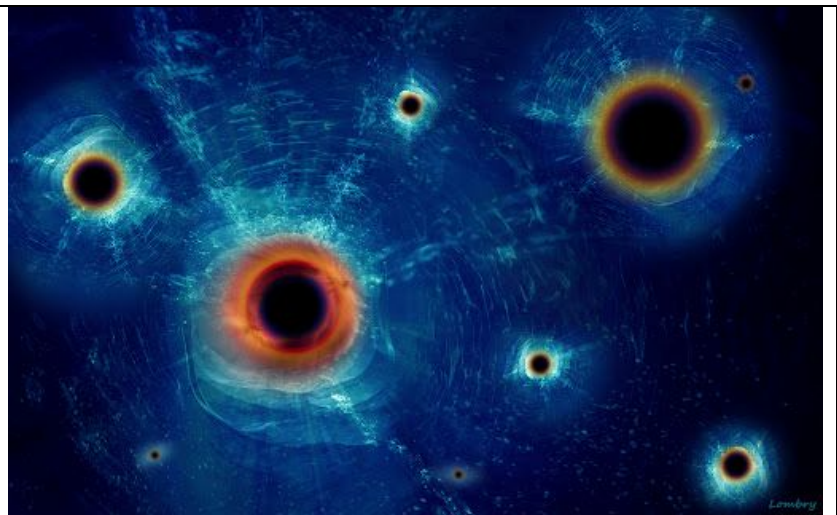
**Malicia** : Que raconte cette histoire ?

**Neurino** : Tant sur le passé que sur l'avenir, les nombreuses observations permettent d'élaborer des hypothèses plus ou moins sérieuses. En ce qui me concerne le scénario de l'avenir, le plus probable me semble être celui dit du « Big-Freeze ».

**Malicia** : Gla-gla...

**Neurino** : Effectivement, en français : «Mort Thermique». L'Univers continue son expansion sans fin. Les galaxies s'éloignent les une des autres. Toutes les étoiles s'éteignent les une après les autres.

**Malicia** : Pourquoi le plus probable ?



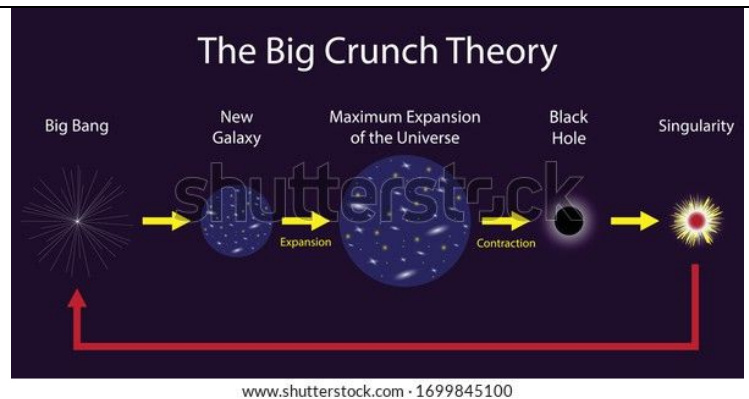
**Neurino** : Car je ne vois pas qui ou quoi viendrait contrarier l'énergie sombre, qui est la cause de l'expansion de l'Univers. Mais tu as raison, il est possible que nous fassions une découverte extraordinaire qui bouleverserait nos certitudes. Donc d'autres scénarios sont possibles dont le «Big-Crunch».

**Malicia** : Encore un «Big».

**Neurino** : Oui, par opposition à l'origine de l'Univers: le «Big-bang». En fait, les hypothèses de l'avenir de l'Univers sont basées sur le comportement futur de l'énergie sombre.

**Malicia** : Alors, comment se comporte cette énergie sombre avec le «Big-Crunch» ?

**Neurino** : « Big-Crunch », littéralement la grande contraction, mais plus couramment nommé, l'effondrement final. Dans ce scénario, l'énergie sombre, après une phase d'expansion ralentirait.



**Malicia** : Tu veux dire que l'Univers arrêterait de grandir ?

**Neurino** : Même davantage, cette énergie sombre diminuant, la gravité reprendrait le dessus...

**Malicia** : Et donc re-concentrerait l'Univers.

**Neurino** : Effectivement, jusqu'à devenir extrêmement dense et chaud. Un Big-bang à l'envers en quelque sorte.

**Malicia** : Cela étant, comme tu disais, aucune raison que cette énergie sombre évolue.

**Neurino** : Notamment depuis les dernières mesures effectuées par le satellite Planck. C'est pourquoi ce scénario n'a plus guère la cote.

**Malicia** : Si certains ont pensé au ralentissement de l'énergie sombre, ne pouvons-nous pas imaginer son accélération ?

**Neurino** : Malicia tu me surprendras toujours !

**Malicia** : J'espère bien !

**Neurino** : Tu viens de redécouvrir le «Big-Rip» La grande déchirure.

**Malicia** : Je suis confuse.

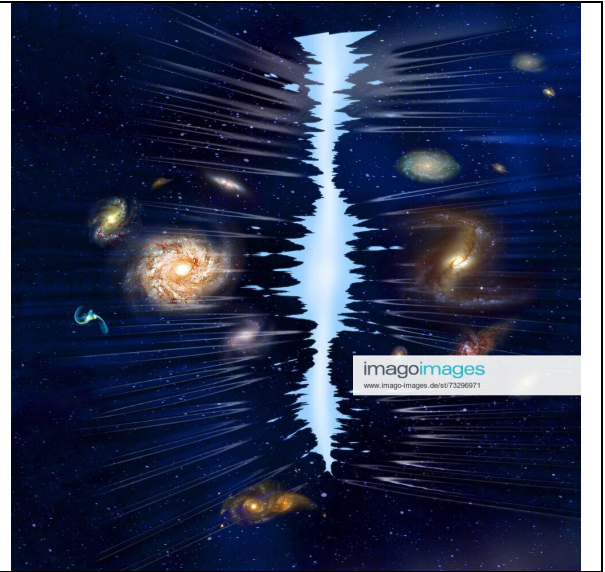
**Neurino** : Dans cette hypothèse, en effet, l'énergie sombre s'emballe. La matière, des amas de galaxies aux particules élémentaires des atomes, est tordue, disloquée, déchirée par cette énergie.

**Malicia** : Et je suppose que l'expansion s'accélère d'autant plus...

**Neurino** : Evidemment, en étendant le vide entre les choses. Ce scénario me paraît encore moins probable que le précédent.

**Malicia** : Nous n'aurons jamais aucune certitude ?

**Neurino** : Sauf à découvrir la véritable nature de l'énergie sombre, cela me paraît difficile.



**Malicia** : Tous les espoirs sont permis.

**Neurino** : Il reste tellement de merveilleuses découvertes en perspective qu'effectivement restons humble, aucune certitude et tout est possible.

**Malicia** : Merci cher ami pour ce parcours entre les étoiles.

**Neurino** : Avec plaisir, et rapidement pour une prochaine aventure.



## Diffusion

J'autorise et j'encourage la diffusion et la reproduction de ces documents.

Je sais qu'ils peuvent rendre service et aider à comprendre des points qui pour certains semblent «nébuleux» et qui pourtant sont en fait relativement simples !

Par contre, je vous remercie de bien vouloir me communiquer en retour vos avis, vos remarques, vos critiques tant positives que négatives afin que je puisse apporter toutes les améliorations possibles. ... Dites-moi quand je vulgarise trop, ou au contraire quand je suis encore trop compliqué

Alain Bellevergue

Adresse mail pour envoyer avis, pour demander à être sur la liste de diffusion ou demander un numéro déjà paru :

[al.bellevergue@orange.fr](mailto:al.bellevergue@orange.fr)

Bibliographie et Illustrations :

Clipart : <http://office.microsoft.com/fr>

Wikipedia : <http://fr.wikipedia.org>

### **Les numéros parus :**

P1 : La gravité

P2 : La lumière en couleurs

P3 : Les ondes électromagnétiques

P5 : La relativité restreinte

P6 : La relativité générale

P8 : L'Univers

P9 : La mécanique quantique