

Savoir sans Frontières

<http://www.savoir-sans-frontieres.com>

Les Aventures d'Anselme Lanturlu

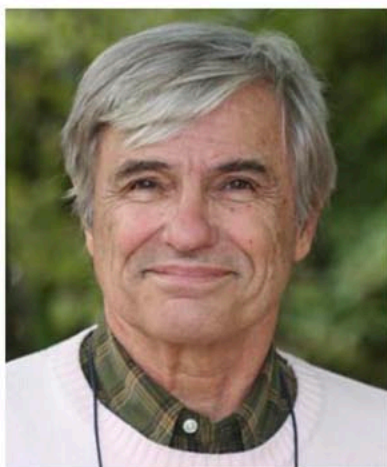
Big Bang

Jean-Pierre Petit



Savoir sans Frontières

Association à but non lucratif créée en 2005 et gérée par deux scientifiques français. But : diffuser des connaissances scientifiques en utilisant la bande dessinée à travers des pdf gratuitement téléchargeables. En 2020 : 565 traductions en 40 langues avaient ainsi été réalisées. avec plus de 500.000 téléchargements.



Jean-Pierre Petit

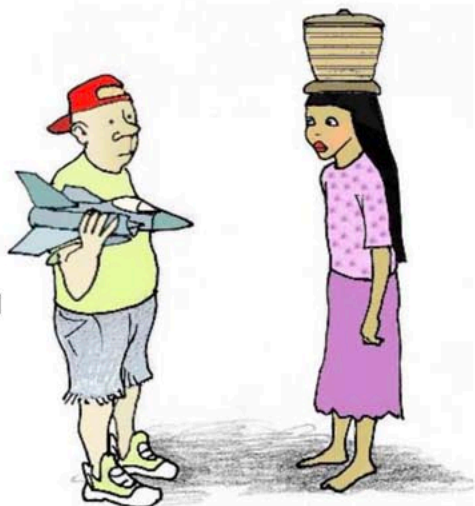


Gilles d'Agostini

L'association est totalement bénévole. L'argent des dons est intégralement reversé aux traducteurs.

Pour faire un don, utilisez le bouton Paypal sur la page d'accueil du site Internet

<http://www.savoir-sans-frontieres.com>



Coordonnées bancaires France ➔ Relevé d'Identité Bancaire (RIB) :

Etablissement	Quichet	N° de Compte	Cle RIB
20041	01008	1822226V029	88

Domiciliation : La banque postale
Centre de Marseille
13900 Marseille CEDEX 20
France

For other countries ➔ International Bank Account Number (IBAN) :

IBAN
FR 16 20041 01008 1822226V029 88

and ➔ Bank Identifier Code (BIC) :

BIC
PSSTFRPPMAR

Les statuts de l'association (en français) sont accessibles sur son site. La comptabilité y est accessible en ligne, en temps réel. L'association ne prélève sur ces dons aucune somme, en dehors des frais de transfert bancaire, de manière que les sommes versées aux traducteurs soient nettes.

L'association ne salarie aucun de ses membres, qui sont tous des bénévoles. Ceux-ci assument eux-mêmes les frais de fonctionnement, en particulier de gestion du site, qui ne sont pas supportés par l'association.

Ainsi, vous pourrez être assurés, dans cette sorte « d'œuvre humanitaire culturelle » que quelle que soit la somme que vous donniez, elle sera *intégralement* consacrée à rétribue les traducteurs.

Nous mettons en ligne en moyenne une dizaine de nouvelles traductions par mois.

PROLOGUE

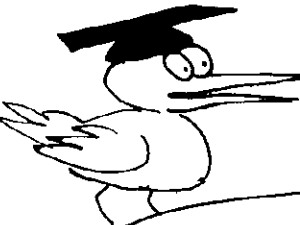


Tu sais, Sophie, souvent
je me demande d'où viennent
les choses, comment s'est fait
l'Univers...

Est-ce que TOUT a
toujours été ainsi ?
la Terre, le ciel ?

Est-ce que le ciel a
toujours été bleu ?

les étoiles ont-elles toujours brillé
sur un fond de ciel noir ?



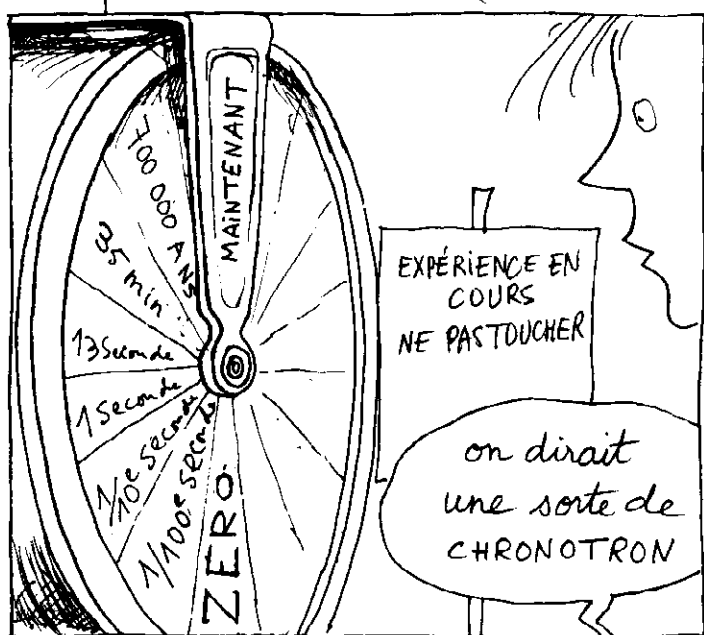
au TOUT COMMENCEMENT, notre Univers
était tout petit et très chaud : un enfer minuscule
et tout a pété ?



oui, mais c'est une très longue
histoire, et pour la raconter il
faut remonter il y a très, très
longtemps.



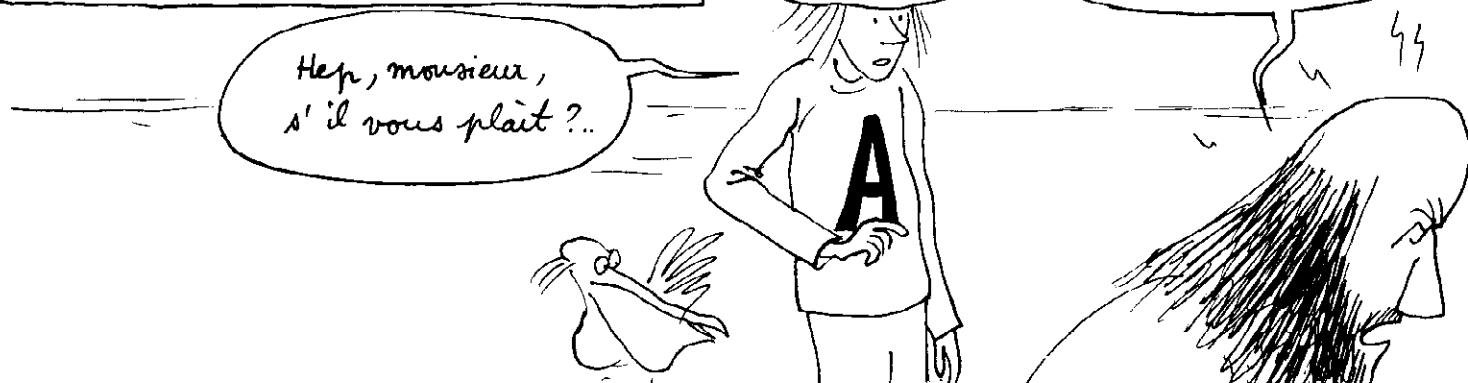
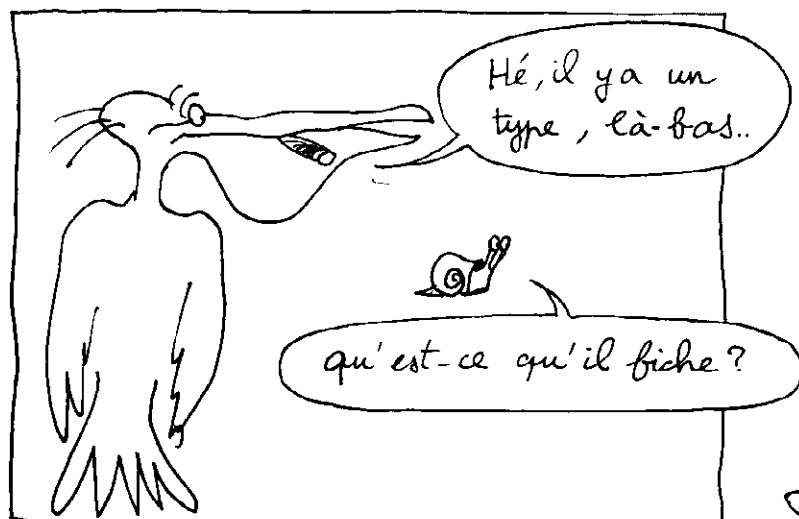
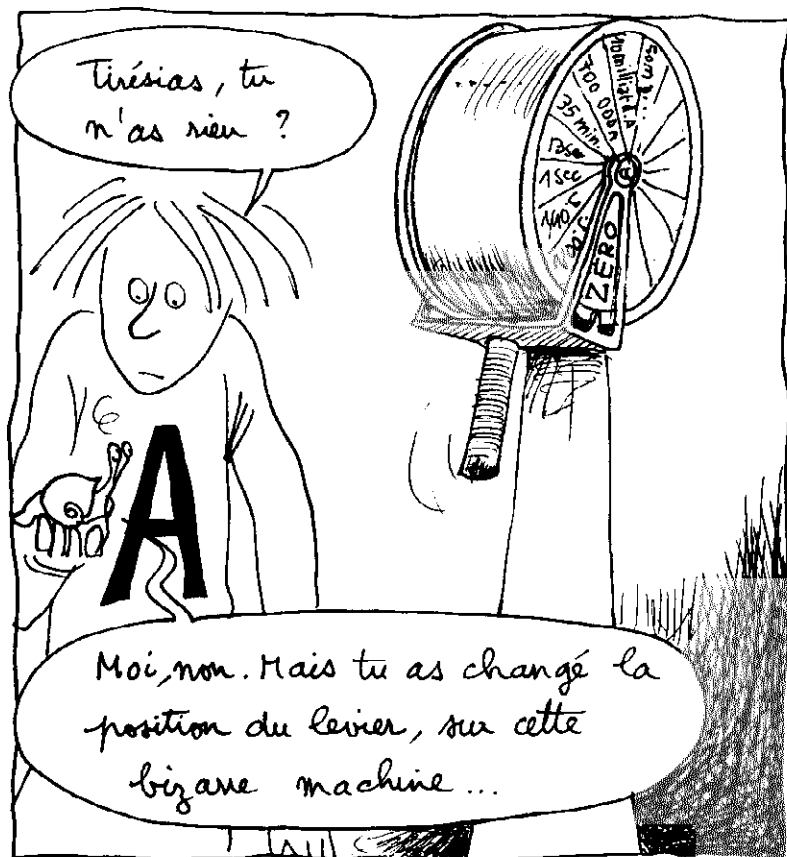
oh, venez voir !



SOUDAIN...



LE COMMENCEMENT DE TOUT

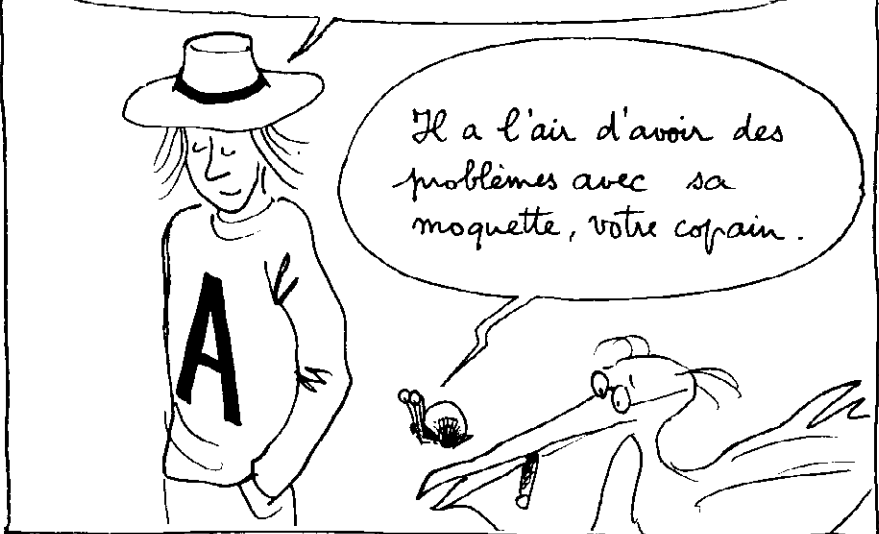


ça y est, c'est encore raté !



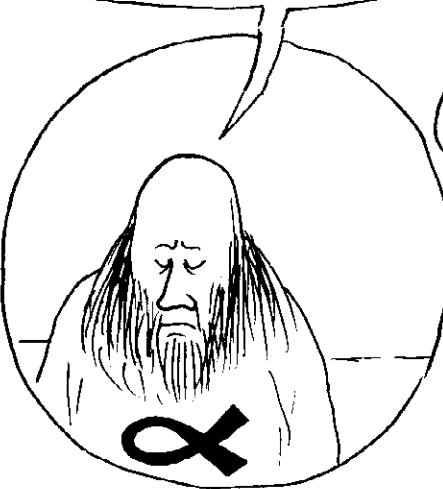
Je me suis fait avoir...

Si c'est de la moquette que vous essayez de poser, vous vous y prenez comme un vrai manche, ça c'est vrai !



Il a l'air d'avoir des problèmes avec sa moquette, votre copain.

quel désastre... des plis partout !..



c'est normal qu'il y ait des plis. Vous avez voulu trop en mettre. La moquette est comprimée...

Tsss.... s'il n'y avait pas de compression il n'y aurait pas d'énergie : il n'y aurait que de l'espace...

Si encore c'était uniformément plissé ! Mais il y a des paquets de plis, qui se promènent anarchiquement, à une vitesse de trois cent mille kilomètres par seconde

c'est quantique... c'est diablement quantique...

c'est quoi?..

Il n'y a pas grand CHOSE
dans cet univers là !

Mais si !
Ici les CHOSSES
sont ces espèces
d'ondulations
baladeuses.

L'univers présenté ici n'a que deux
dimensions, c'est donc une SURFACE dont les
reliefs figurent les particules, les masses, le rayonnement. Si tu appartenais
à cet Univers bidimensionnel, voilà à quoi tu ressemblerais

c'est pas joli
c'est pas joli du tout...

Dans notre monde
tridimensionnel, les particules
sont aussi des variations locales
de la courbure

c'était mieux
avant.

Avant... quoi ! ?

Enfin... j'appellerai ces plis
baladeurs des PHOTONS.

Ah, nom de Dieu de nom de Dieu !
voilà autre chose, maintenant...

quoi ?

mais regardez cela !
il y en a partout !!!!

Non seulement ça floccule,
mais ça turbule. du beau travail !

on dirait des petits tourbillons.
comme quand on fait comme cela
dans un drap de lit

c'est curieux. Il y en a qui tournent
dans un sens, et d'autres dans
le sens inverse

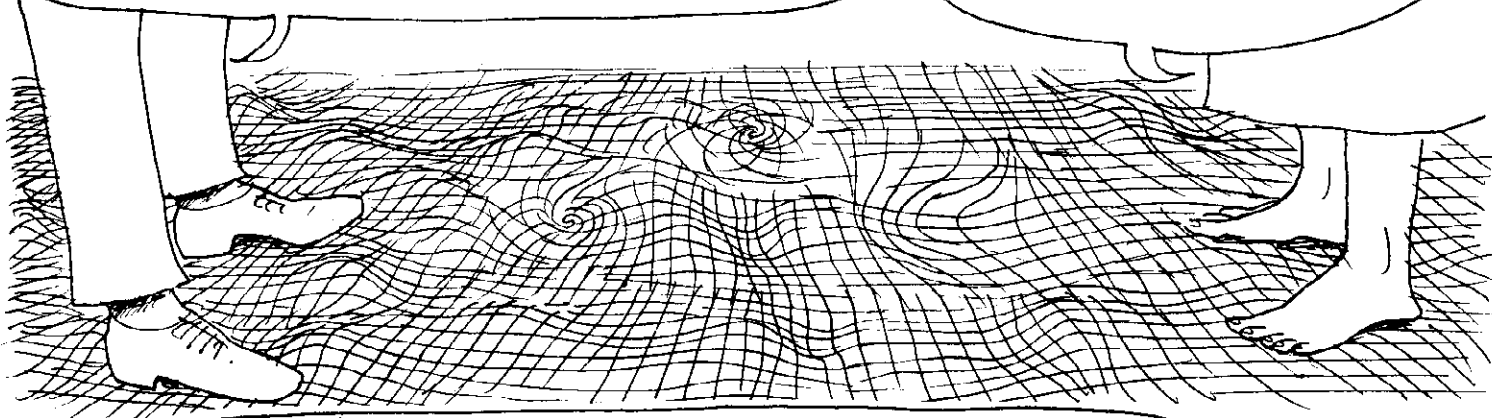
Comme vos photons, ils vont à 300 000 km/s

J'appellerai ces tourbillons baladeurs
NEUTRINOS, quand ils tourneront comme
ceci :

ET ANTINEUTRINOS quand ils tourneront
en sens inverse :

c'est vachement agité. Sur votre moquette,
pas un seul endroit plat, les plis sont
littéralement les uns contre les autres (*)

Cet Univers est très,
très instable. Complètement
raté !...

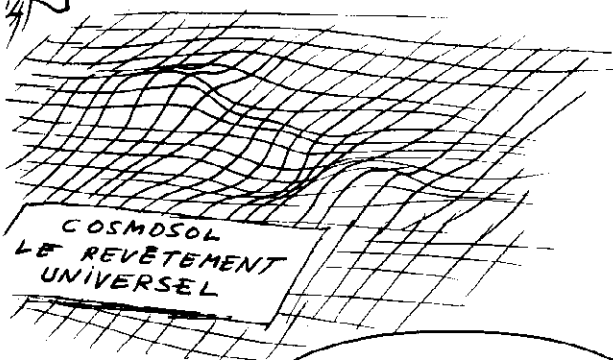


S'il y avait encore un peu d'ordre dans tout cela !
Mais c'est la chienlit. Tout est distribué au hasard !

J'ai honte des jeux de hasard !

Le hasard, mon ami,
c'est le diable !

Ah...



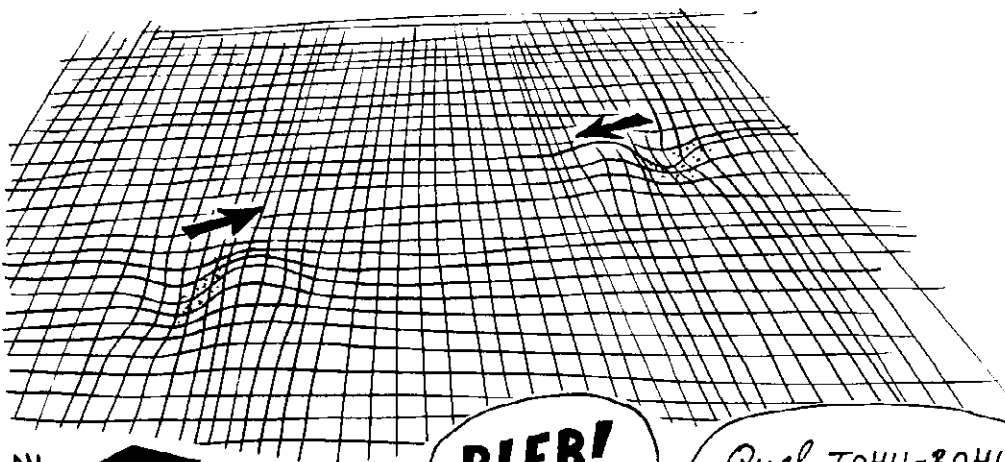
Je ne joue même
pas aux dés...

Oh, regardez ! il se passe
quelque chose par là-bas..



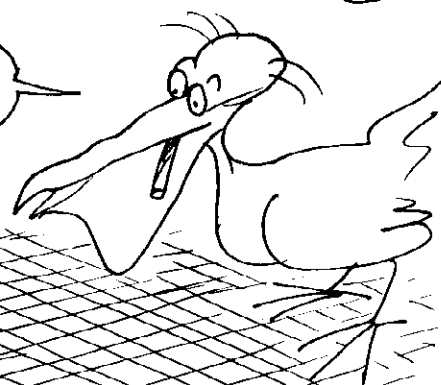
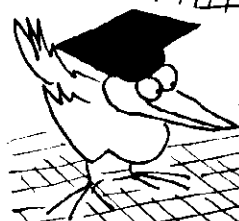
(*) Propriété de ce qu'on appelle le RAYONNEMENT DU CORPS NOIR
(le diable sait pourquoi.....)

Voilà deux plis baladeurs qui vont à la rencontre l'un de l'autre. Ils vont se rentrer dedans.

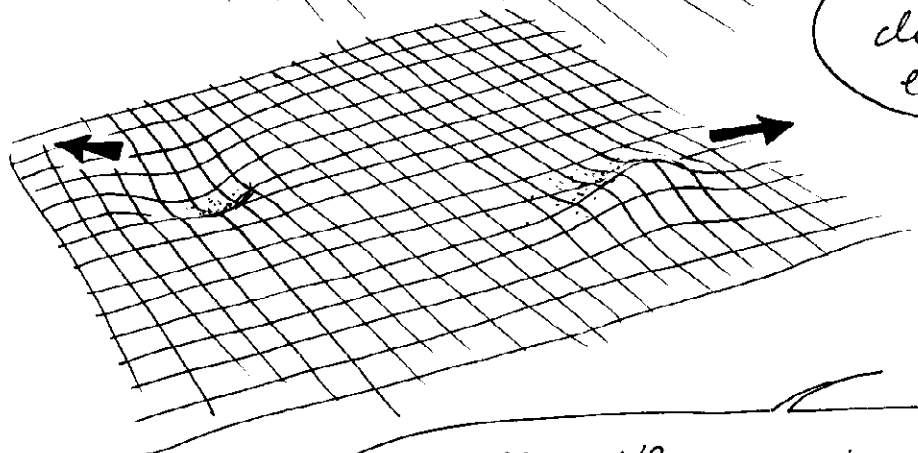


BLEB!

Quel TOHU-BOHU mes amis !

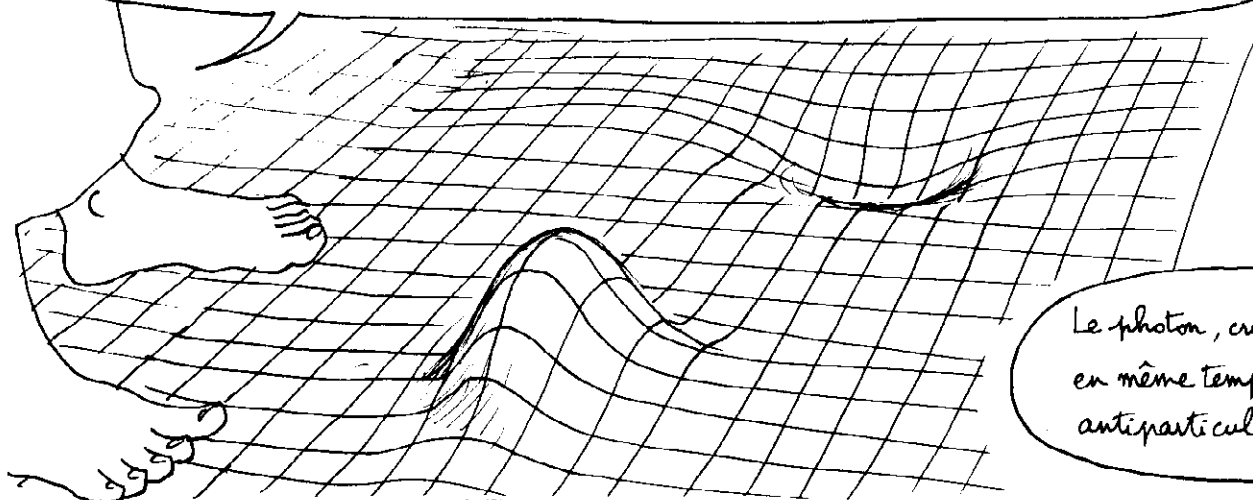


maintenant, cela fait des cloques. l'une vers le haut et l'autre vers le bas.



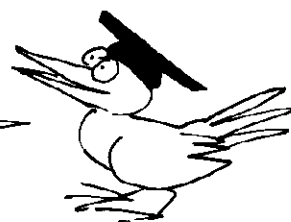
Elles s'éloignent l'une de l'autre à une vitesse qui est proche de 300 000 km/seconde

Bon. J'appellerai les bosses MATIÈRE, et les creux ANTIMATIÈRE. Il y a de la COURBURE, donc de la MASSE.

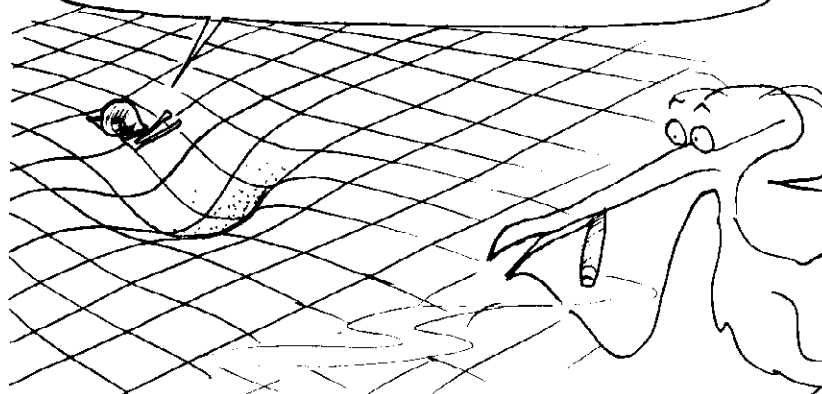


Le photon, creux et bosse tout en même temps, est sa propre antiparticule.

MATIÈRE et ANTIMATIÈRE, nées des collisions entre photons, apparaissent à des vitesses relativistes.

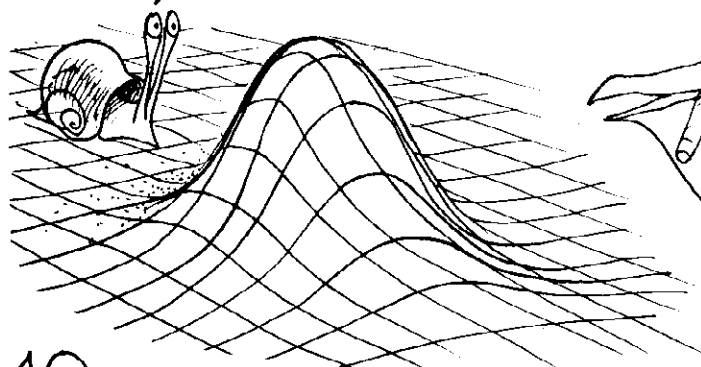


Bosse, creux, tout cela est arbitraire

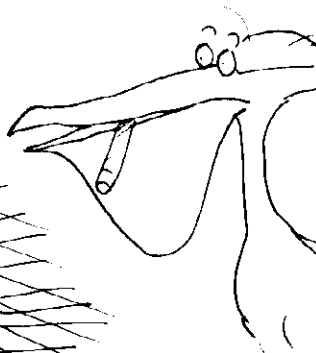


Quel est le sens de cette profonde réflexion, mon cher Tirésias ? Il y a des choses qui apparaissent en creux, et d'autres en bosses. Cela me paraît évident...

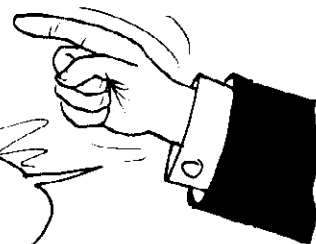
C'est parce que nous sommes de ce côté-ci de la moquette. Si nous étions sur l'autre, les bosses deviendraient des creux et les creux des bosses.



Mais... je ne vois qu'un seul côté !!!



Tirésias !!!



Il n'y a plus moyen
de rigoler un peu ...



Encore
un épistémoflic (*)

?...?

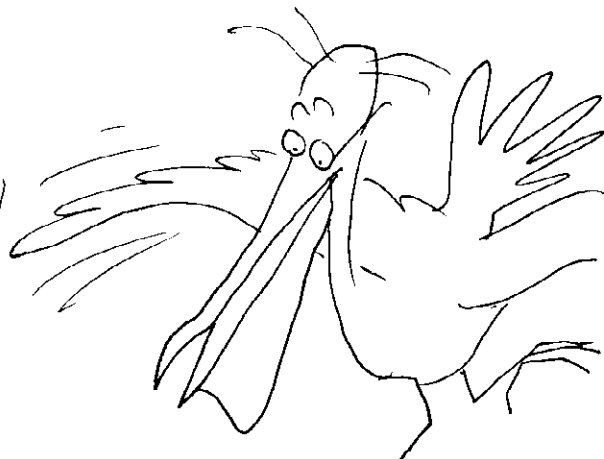
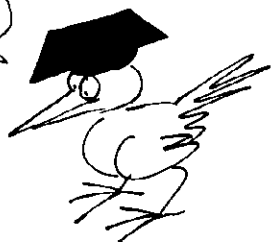
Attendez ! Là ... quand une bosse et un creux se rencontrent assez
lentement, cela redonne deux plis baladeurs. c'est l'opération inverse



Hum... simple ANNIHILATION
d'une particule de matière et
de son antiparticule .
cela redonne deux photons

c'est le TOHU-BOHU

Hmm...



(*) de Épistémé : la science et Flic : Flic

les créations et décréations de particules, à partir de paires de photons, se succèdent à un rythme effréné. Dans ce monde chaotique, ce monde du changement, pas de structures. Seulement un fourmillement serré de photons, de neutrinos, d'anti-neutrinos, et de nombreuses particules et antiparticules, fugaces et variées. C'est le TOHU-BOHU (*)

moi ça me fait
penser aux SEXONS

c'est quoi les SEXONS?

ce sont des particules qui passent
leur temps à se reproduire

Apparemment, il y a des plis baladeurs de
largeurs très diverses, de même qu'il y a des
bosses étroites et hautes ou larges et plates.

(*) Voir LA BIBLE

J'appellerai LONGUEUR D'ONDE λ
cette envergure des plis
baladeurs, les PHOTONS.

Supposons que je crée une
oscillation baladeuse en
secouant cette corde.

Je la secoue d'abord doucement
J'y mets peu d'énergie et
la longueur d'onde λ
est grande.

Si je secoue maintenant plus
sèchement la corde, si je lui communique
plus d'ÉNERGIE, la longueur d'onde λ
sera nettement plus courte.

mi!

De sorte que plus
une onde véhicule d'énergie
et plus sa longueur
d'onde est petite.

Je dirai que l'ÉNERGIE véhiculée
par un PHOTON, un grain de LUMIÈRE,
sera INVERSEMENT PROPORTIONNELLE à sa
LONGUEUR D'ONDE λ : E varie comme $\frac{1}{\lambda}$.

Comme ça, ça ira...

PLUS ON EST PETIT ET PLUS ON EST LOURD

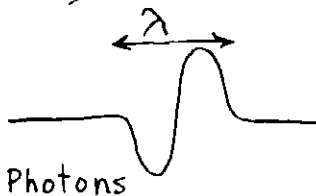
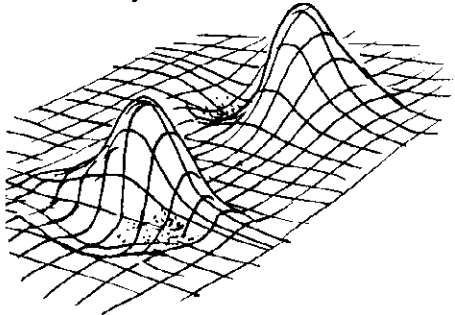


D'accord pour ces plis baladeurs, que vous appelez les PHOTONS. Mais qu'est-ce qui différencie les creux ou les bosses étroites et hauts des creux ou bosses larges et plats ?

Je vais appeler cette largeur des creux et des bosses la LONGUEUR D'ONDE DE COMPTON λ_c ; la MASSE m lui sera INVERSEMENT PROPORTIONNELLE. Soit m variant comme $1/\lambda_c$.

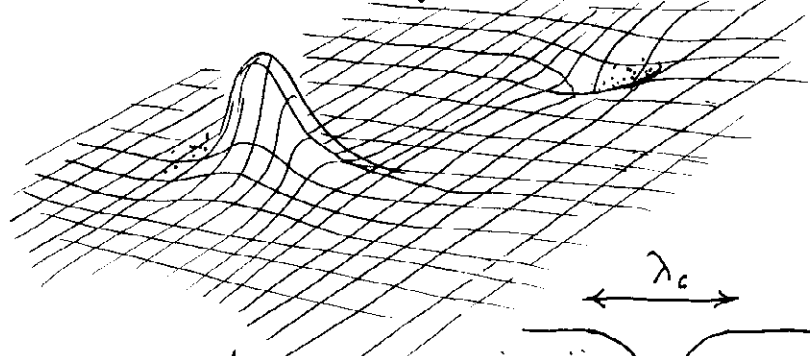
Des photons très énergétiques, de courte longueur d'onde, donneront naissance à des particules (et antiparticules) de masse m élevée, étroite et haute.

λ faible

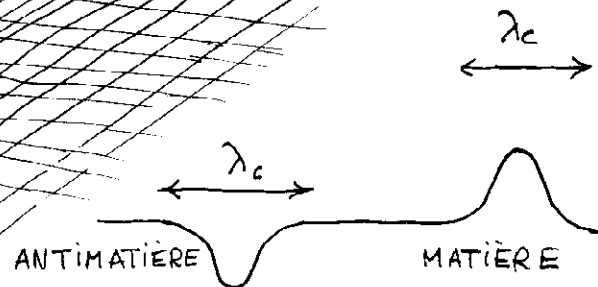


Photons

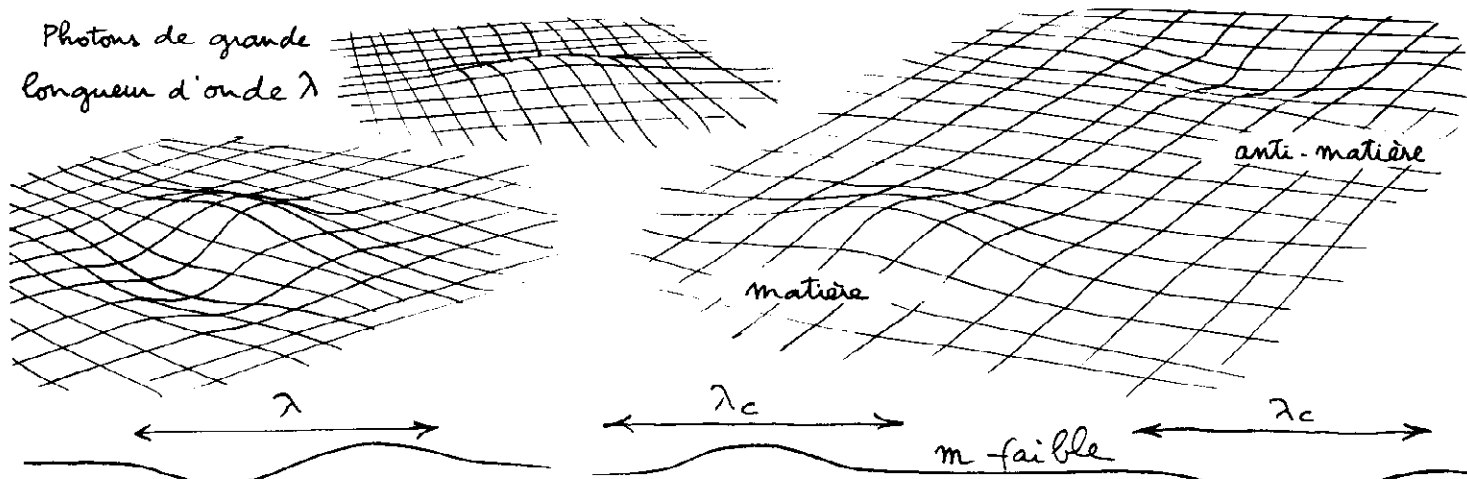
λ_c faible : longueur d'onde de Compton petite



masse m grande



Photons de grande
longueur d'onde λ



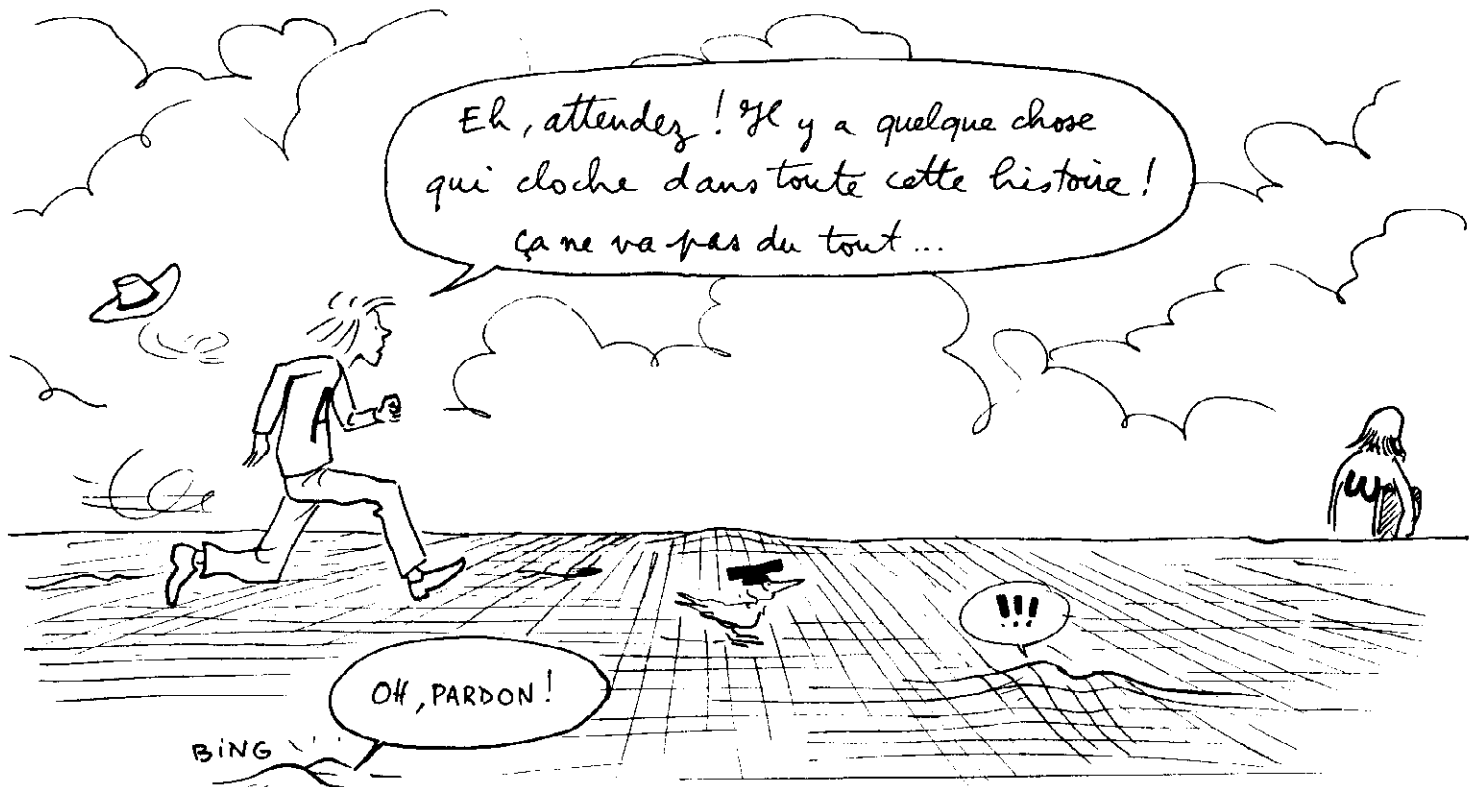
Photons de grande longueur d'onde $\rightarrow$ particules de grande longueur d'onde de Compton

Inversement, des photons relativement peu énergétiques donneront naissance à un couple particule-antiparticule de grande longueur d'onde c'est-à-dire de faible masse: λ_c grand, m faible.

En fait, c'est même beaucoup plus simple.
À ce que je vois $\lambda = \lambda_c^{(*)}$, c'est-à-dire que
les particules (et antiparticules) sont de
même "taille" que les photons qui les créent.

Ce qui fait que lorsqu'on connaît
la MASSE d'une particule quelconque,
on connaît immédiatement la longueur
d'onde du rayonnement qui l'a créée.

(*) On se rappellera que $E(\text{énergie}) = m(\text{masse})$. VOIR TOUT EST RELATIF.



Ah, elle est belle, la
genèse d'aujourd'hui !

qu'est-ce que tu
fabriques ?

Je fabrique un ATOME d'HYDROGÈNE
plus conforme à la réalité. Avec un
gros électron et un minuscule PROTON
constituant son NOYAU.

Nom de dieu de nom de dieu ! quel chaos... enfin ...
Mes enfants, vous allez m'aider à mettre un
peu d'ordre dans ce fatras.

LA TEMPÉRATURE DE RAYONNEMENT T

T_R

Fouchette...

Tous ces photons ont des longueurs d'onde variées, des énergies variées. Mais, sur cette population je vais définir une longueur d'onde moyenne une énergie photonique moyenne.

La TEMPÉRATURE DE RAYONNEMENT T_R sera la mesure de cette énergie moyenne des photons.

quel désastre....

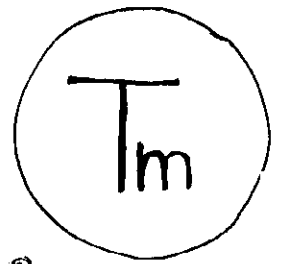
ÉTAT D'ÉQUILIBRE

Alors, un mélange peut avoir plusieurs températures ?!!?

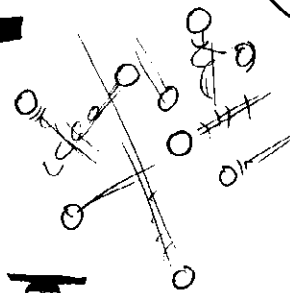
BING!

Oui, mais on verra cela à la page 46. En attendant, les particules échangent de l'énergie, entre elles, ou avec les photons, à travers les collisions. Le mécanisme tend à uniformiser les températures, À LES RENDRE ÉGALES, à mettre le système en état d'ÉQUILIBRE THERMODYNAMIQUE.

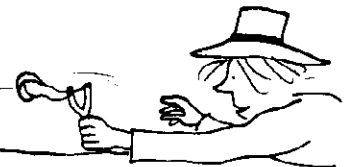
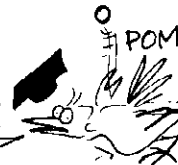
LA TEMPÉRATURE DE LA MATIÈRE



Toutes ces particules MATÉRIELLES ont des masses m et des vitesses V variées. L'ÉNERGIE CINÉTIQUE d'une particule matérielle est $\frac{1}{2}MV^2$. Mais, sur cette population, je peux définir une énergie d'agitation (THERMIQUE) moyenne.



Et la TEMPÉRATURE DE LA MATIÈRE T_m sera la mesure de cette ÉNERGIE MOYENNE D'AGITATION THERMIQUE



THERMODYNAMIQUE

Si une particule a trop d'énergie, si elle est trop rapide, trop "chaude", une collision avec une autre particule la ralentira. Et vice versa si elle est trop lente. Si ce phénomène de couplage énergétique des espèces par collision est suffisamment intense, non seulement les températures seront égales, mais elles le resteront que tu détendes ou que tu comprimes ce mélange.

Hé là...

accélère!

pas si vite!

alors on traîne...



Quelle agitation! les particules et antiparticules naissent et meurent, par paires, à un rythme d'enfer

Quelles sont les conditions de création d'une paire particule-antiparticule?

LA TEMPÉRATURE DE SEUIL

Pour créer une PAIRE particule-antiparticule, de masse commune m , il faut une énergie $2mc^2$, qui est fournie par une paire de photons ayant une énergie supérieure ou égale

Si l'énergie moyenne des photons est inférieure à cette énergie seuil mc^2 , c'est-à-dire si la température de rayonnement T_R est trop basse (au-dessous d'une valeur seuil) ces particules matérielles ne pourront plus être créées.

Ouais...

DE L'ÉVOLUTION DES ESPÈCES

La SURVIE d'une espèce est toujours problématique. Elle peut être assurée par un rythme de production élevé

Ce qui implique que la température de rayonnement T_R soit supérieure à la température de seuil liée à l'espèce.

Si la température T_R est plus basse, plusieurs causes de disparition sont envisageables.

la plus redoutable est l'annihilation avec l'antiparticule

PLOP

Enfin les particules ont leur propre DURÉE DE VIE^(*). Passé ce temps, elles se décomposent spontanément en d'autres particules et en rayonnement.

(*)... leur réserve de CHRONOL
VOIR TOUT EST RELATIF.

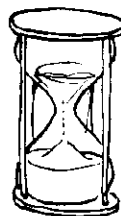


tiens des sexons!



Viennent ensuite des mauvaises rencontres en tous genres

Le Cosmos est un coupe-gorge



Le problème, c'est de durer...





quelle température fait-il ?

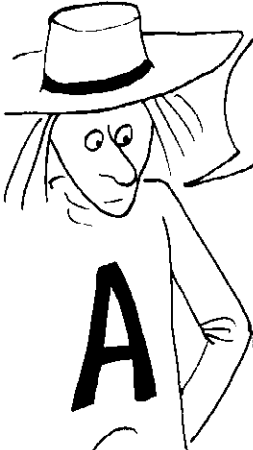
Prends un photon
et mesure sa longueur
d'onde λ !

Bouffe de bouffe, vingt mille milliards de degrés ($2 \cdot 10^{13}$ K)

Il semble y avoir à peu près autant de
photons, de neutrinos, de protons, de neutrons
d'électrons, (et leurs antiparticules).

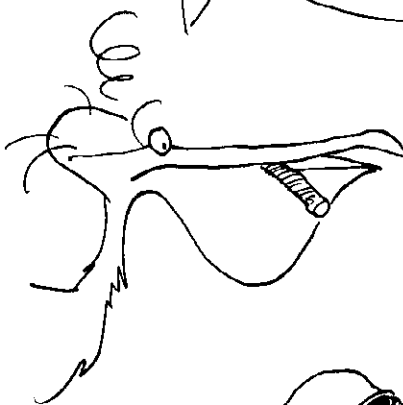
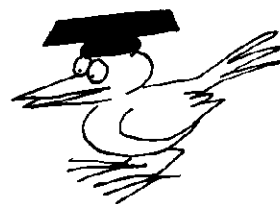
À une température aussi élevée, tout le
monde est RELATIVISTE. Même les particules
matérielles vont à des vitesses proches de
la vitesse de la lumière c .

Dans TOUT EST RELATIF, on avait vu que lorsque la
vitesse d'une particule tend vers la vitesse de la lumière,
son TEMPS PROPRE se fige comme une sauce.



Au fait, ça pose un sacré problème... Si tout le monde se trimballe à la vitesse de la lumière, alors le TEMPS (*) ne s'écoule plus ?!!? Il n'y a personne pour le vivre...

A Personne ne va assez lentement pour avoir un temps s'écoulant de manière significative

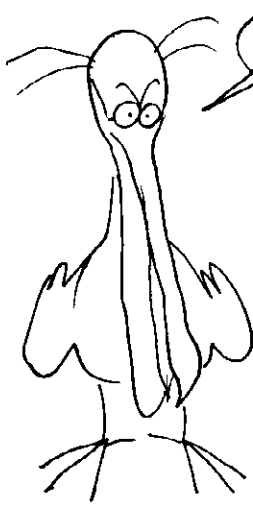


oh!..

Un monde totalement ACHRONIQUE serait dénué de SENS.



Le temps est peut-être un luxe que seuls certains univers peuvent s'offrir?



c'est diabolique!



Bof, avec tout ce que j'ai déjà vu et entendu... L'ESPACE, le TEMPS, L'UNIVERS, tout cela n'est que de la poudre aux yeux

le constituant universel de toute chose?



(*) un temps cosmique qui pourrait être une moyenne des TEMPS PROPRES

LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

Tenez, au lieu de rester les bras ballants, aidez-moi à mettre un peu d'ordre dans ce fouillis de PARTICULES ÉLÉMENTAIRES.



Celles-ci ont des longueurs d'onde de Compton λ_c très petites

Ces particules de très forte masse sont des HYPERONS (*)

Puis viennent les HADRONS. le PROTON et le NEUTRON (de même que l'antiproton et l'antineutron) en font partie. Ils sont susceptibles de s'agencer en NOYAUX. Pour créer ces particules, il faut une température de rayonnement supérieure à 10^{13} K, soit dix mille milliards de degrés.

c'est leur température de seuil

La longueur d'onde de Compton des Protons et des neutrons vaut $1,35 \cdot 10^{-12}$ cm. Un millième de milliardième de cm.

DÉFENSE DE METTRE
SON NEZ DANS UN NEUTRON

(*) Hypothétiques, dans l'état des connaissances actuelles

HADRON, ça vient de HADROS,
qui veut dire balaise, en grec.

Tirésias, vous
savez le grec ?

Il y a évidemment autant
d'ANTI HADRONS que de HADRONS

Enfin, voici les LEPTONS(*)

LEPTON

ANTILEPTON

Pour les créer, une température de rayonnement
de 6 milliards de degrés (température de SEUIL) suffit.

Le plus connu des LEPTONS est l'électron, et son jumeau l'anti-
électron, ou POSITRON. On remarquera que la température de seuil,
de création des électrons, est 1850 fois inférieure à la température
de seuil correspondant au proton et au neutron.

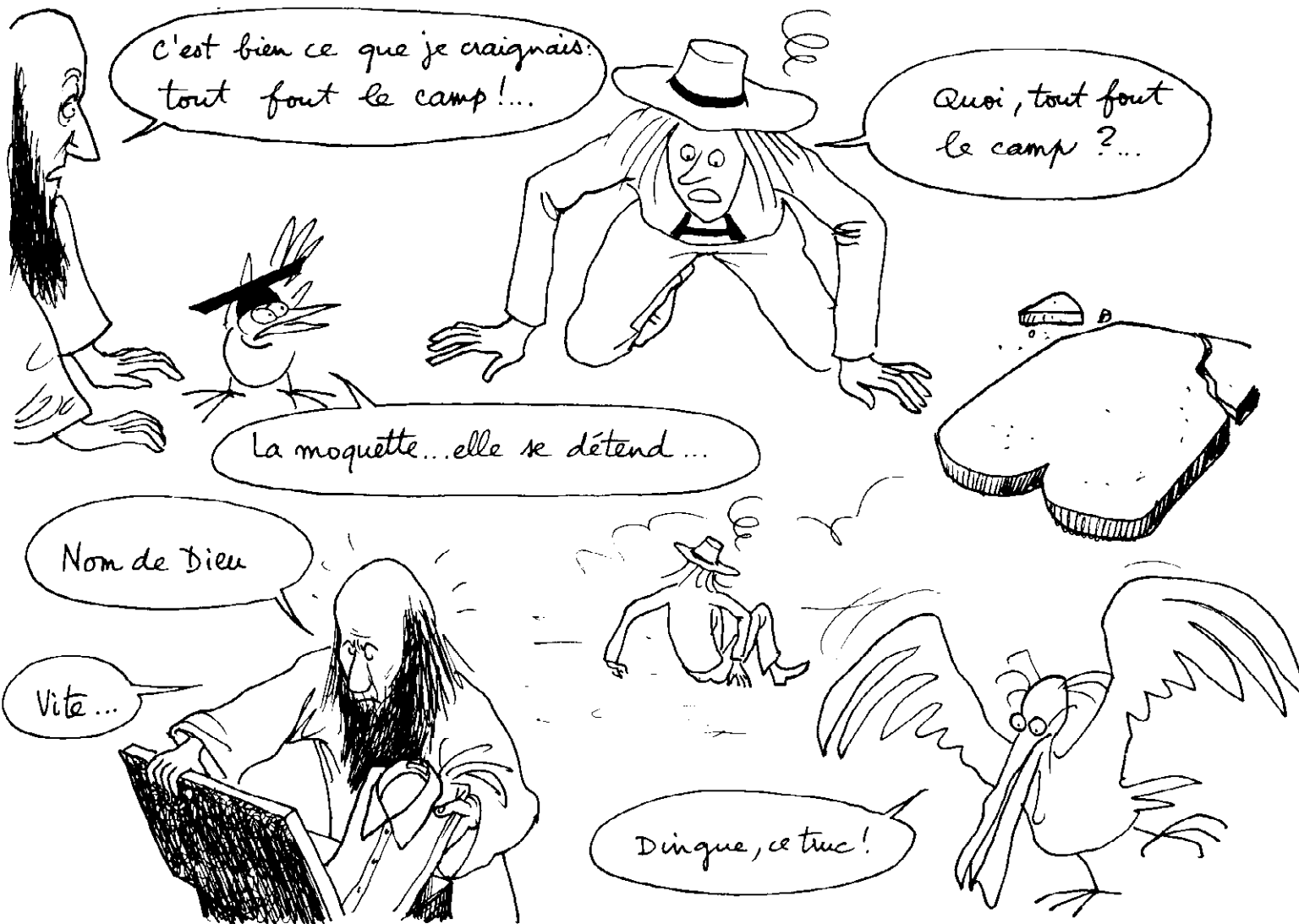
C'est normal puisqu'il faut
1850 fois moins d'énergie
pour créer l'électron que le proton.

(*) du grec LEPTOS, mince

TOUT FOUT LE CAMP

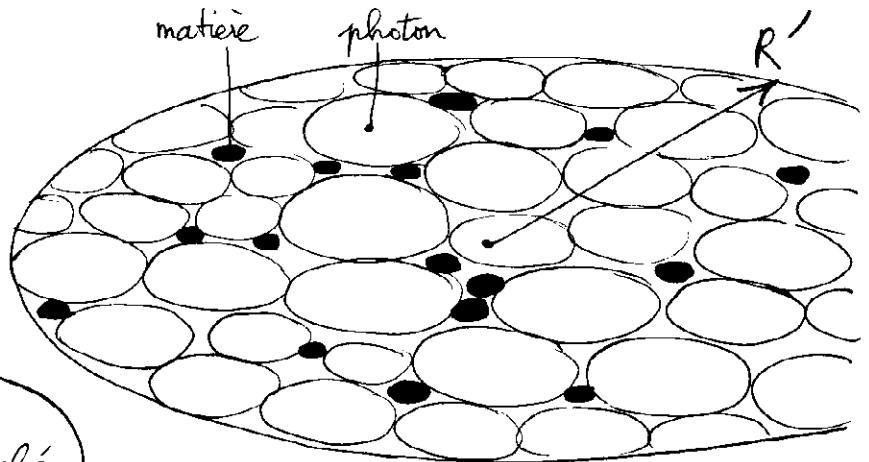
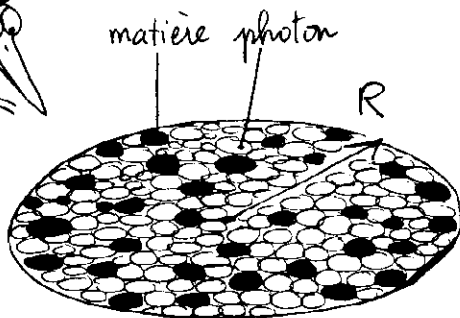


La situation était terriblement chronogène (le temps ne demandait qu'à apparaître) le chronotron se remet en marche et ce fut le premier ÉVÉNEMENT, le premier INSTANT.



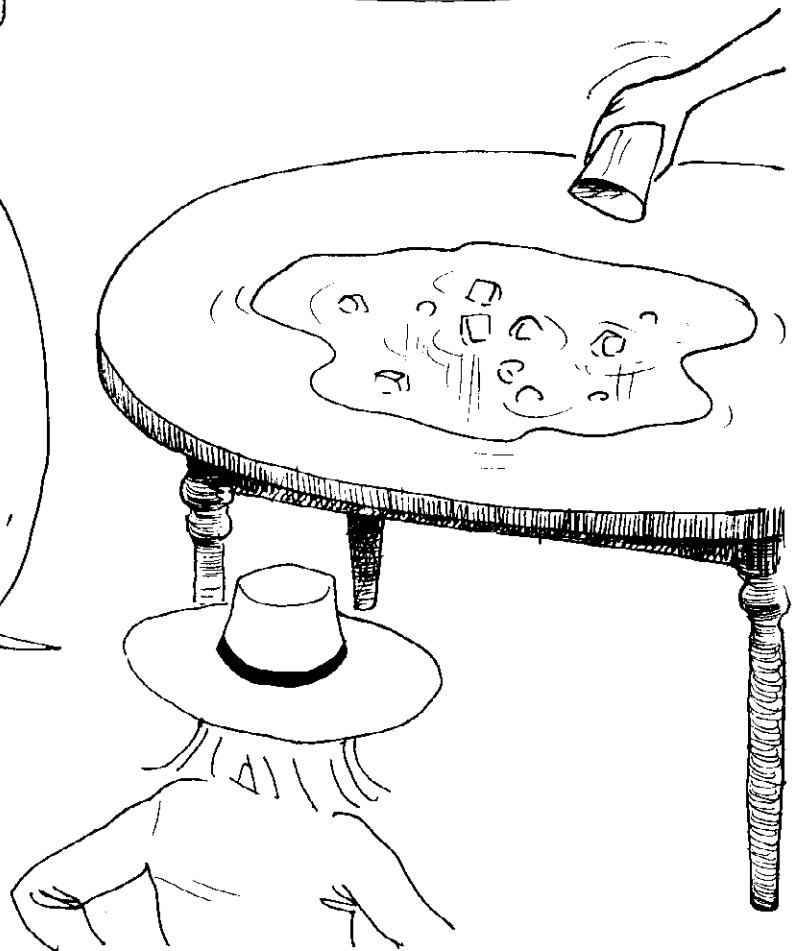
LA CONSERVATION DE LA MASSE

Regardez ce qui se passe : ce sont les photons qui se dilatent. Les particules matérielles, elles, ne se dilatent pas.



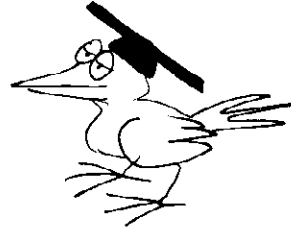
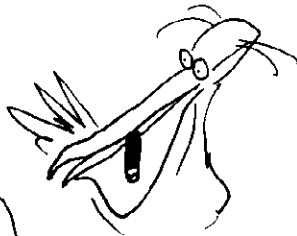
La matière, c'est de l'espace gelé.

Cela fait penser à ce qui se passe quand on renverse sur une table un verre rempli d'eau et de glaçons. La masse d'eau s'étend, se dilate. Les glaçons suivent cette expansion, mais gardent leur dimension.

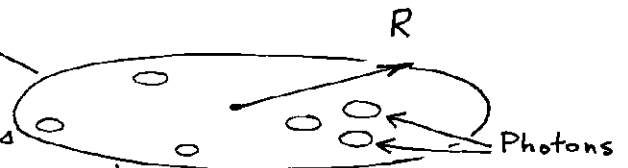


Comme la dimension des particules matérielles est liée à leur masse, j'en déduis que LA MASSE SE CONSERVE

Inversement, l'ensemble des photons (qui se dilatent) perd de l'ÉNERGIE



Si R est le rayon de l'Univers, comme la longueur d'onde λ des photons suit l'expansion (λ varie comme R), j'en déduis que la température de rayonnement, qui varie comme $1/\lambda$, décroît comme $1/R$.



Tout se passe comme si l'univers créait son propre espace, son COSMOTOPE (*) en sécrétant.... le vide...

Matière et lumière ne sont que deux formes différentes d'une même entité : L'ÉNERGIE-MATIÈRE. Les photons gardent leur vitesse de 300 000 km/s mais perdent leur énergie.

(*) de Cosmos : COSMOS et topos : LIEU (l'endroit où se trouve l'Univers.)

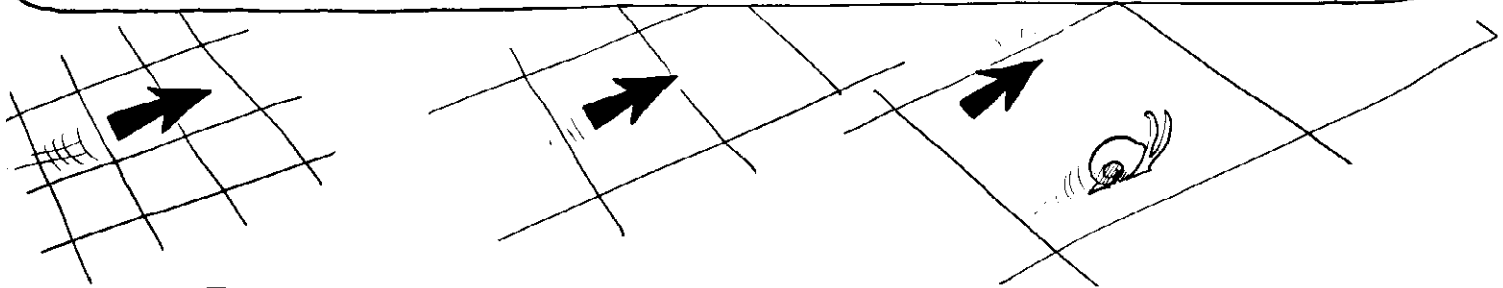


Voilà une image qui décrit bien l'étirement du photon et la perte d'énergie qui en découle.



mais comment la matière se comporte-t-elle dans cette expansion?

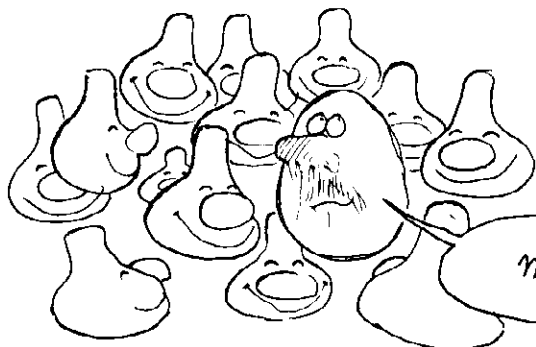
L'Univers sécrète l'espace comme une coquille. Plus le temps passe et plus les particules ont de chemin à parcourir. Quand la taille de l'Univers double, alors la vitesse d'agitation des particules matérielles diminue de moitié. Leur énergie cinétique est donc divisée par 4 : la vitesse d'agitation varie comme l'inverse du rayon R de l'Univers, alors que la température T_m de la matière variera en $1/R^2$.



Ouh...
je fatigue.

Mais... on a vu tout à l'heure que la température de rayonnement T_r variait comme $\frac{1}{R}$. La matière a donc tendance à se refroidir plus vite?

Effectivement. Mais les collisions photons-matière la réchauffent. Très fréquentes, elles maintiennent l'état d'équilibre thermodynamique ($T_R = T_m$), pendant un certain temps.



merci, mes amis

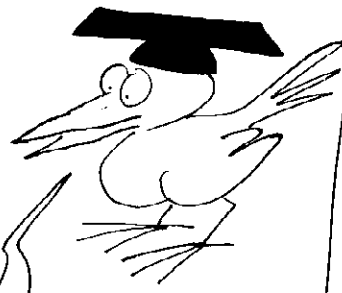
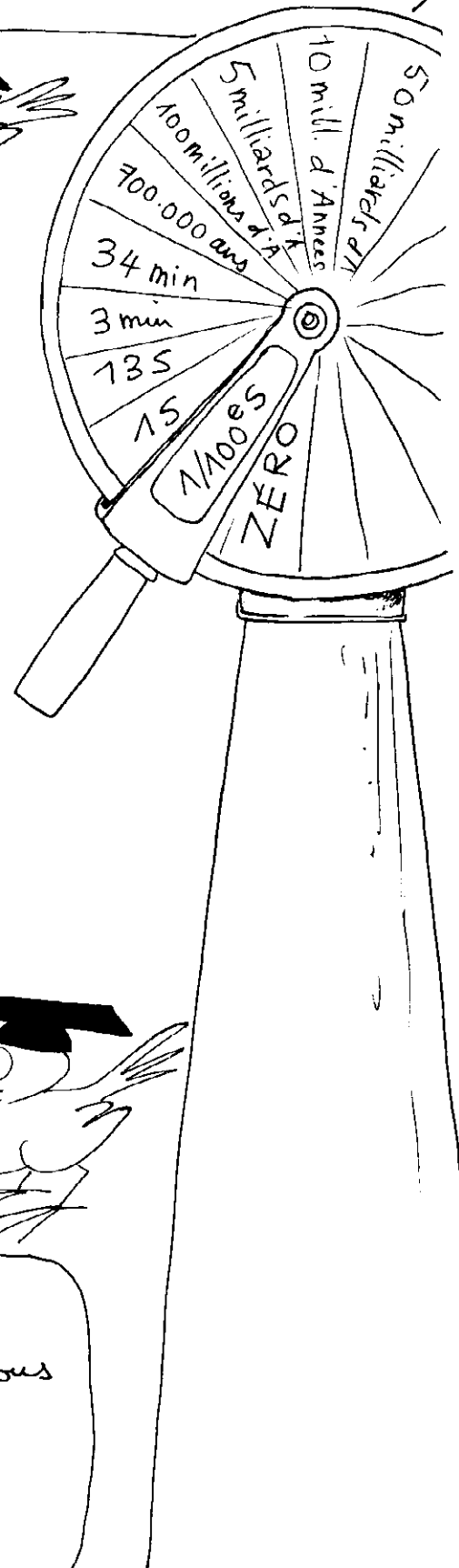
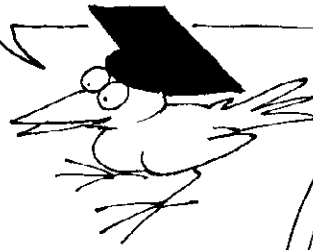
un centième de seconde

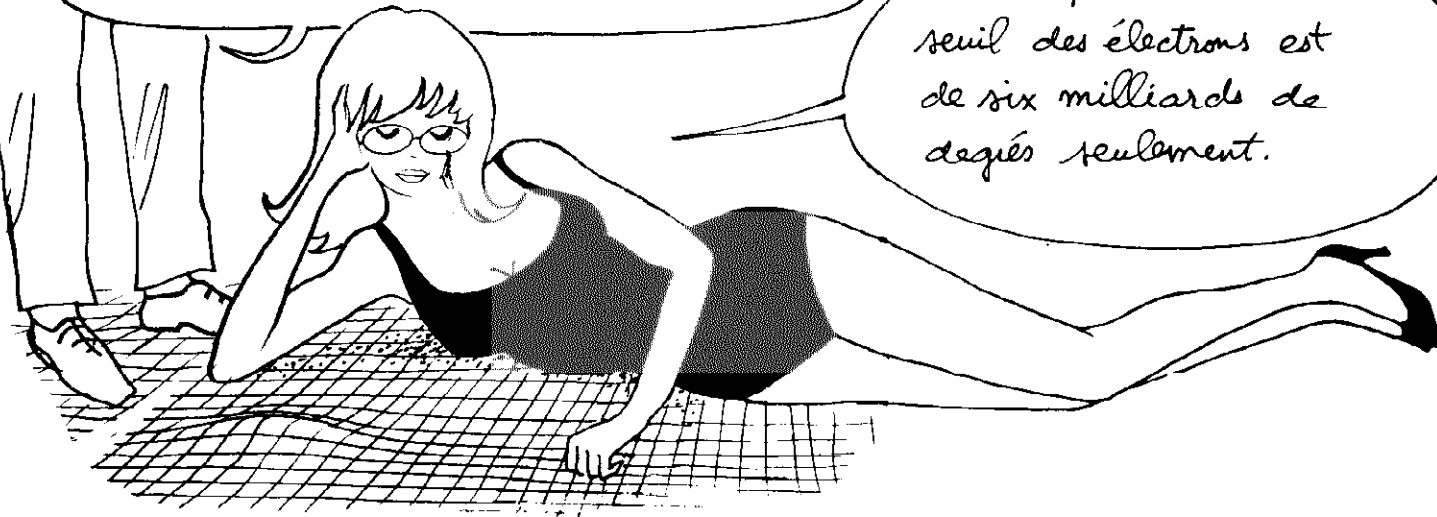


les protons, les neutrons, les antiprotons et les antineutrons ne vont plus qu'à dixième de la vitesse de la lumière c



La température ($T_R = T_m$) est tombée à cent milliards de degrés, c'est-à-dire bien au-dessous de leur température de seuil, qui est de dix mille milliards de degrés. Ils se sont annihilés deux à deux à un rythme effréné et il n'en reste plus qu'une sur un MILLIARD.





Sophie, la plupart des protons, neutrons, antiprotons et antineutrons ont disparu. Mais pourquoi reste-t-il toujours autant d'électrons et de positrons (anti électrons)?

La température de seuil des électrons est de six milliards de degrés seulement.

six milliards de degrés seulement... tu entends?

on dirait que ça fraîchit

Il y a un truc bizarre: la température est de cent milliards de degrés. les protons, neutrons, antiprotons et antineutrons vont au dixième de la vitesse de la lumière. Mais les électrons sont encore relativistes.

oui, pourquoi?

Le milieu est toujours en état d'ÉQUILIBRE THERMODYNAMIQUE : le couplage de toutes les espèces, et du rayonnement, est toujours intense. Les énergies cinétiques des particules matérielles sont, en moyenne, égales : $\frac{1}{2} M_{\text{proton}} (V_{\text{proton}})^2 = \frac{1}{2} M_{\text{électron}} (V_{\text{électron}})^2$.



Attends... comme la masse de l'électron est 1850 fois plus petite que celle du proton alors, nécessairement, pour compenser, à une température donnée, la vitesse d'agitation de l'électron est beaucoup plus élevée.

En fait, comme l'énergie-seuil de création d'une particule de masse m est tout simplement mc^2 , dès que le milieu se refroidit au point que la vitesse d'agitation V devient sensiblement plus petite que c , les créations de ces particules cessent et la dépopulation se fait.

Autrement dit : dès qu'une population de particules matérielles cesse d'être relativiste, elle est décimée.

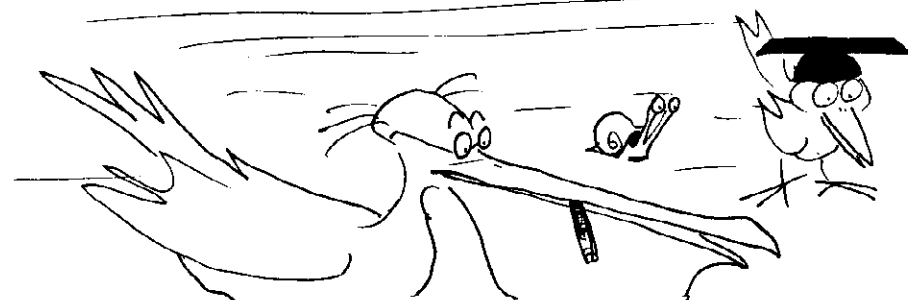




Pour un peu, il ne serait RIEN resté ...
que des photons. Une chance, quoi ...

Il ya peut-être
d'autres Univers qui
ratent, dans l'ailleurs

Un des plus grands mystères de la
cosmologie est de ne pas pouvoir expliquer
pourquoi matière et antimatière ne se sont
pas annihilés mutuellement ...



A ce stade de l'histoire, c'est toujours pareil : il
y a un moment où on escamote le problème
de l'ANTIMATIÈRE. Pfffft! ... dispare, l'antimatière ...

Tirésias, je vous rappelle nos
conventions. Seulement les FAITS!
Pas de spéculations échevelées! (*)

J'en ai marre des
épistémoflics

Pssst!!

(*) Un album sera spécialement consacré aux spéculations échevelées.
"LE CARNAVAL DE LA SCIENCE" : Anthologie des idées à venir.

L'ÈRE RADIATIVE

Il n'y a maintenant plus grand'chose dans cet univers, à part de la lumière.

Des particules, y en a plus des MASSES.

L'ÉNERGIE-MATIÈRE, qui était en parts égales

sous forme de matière, antimatière, photons et neutrinos se retrouve maintenant presque exclusivement sous forme de photons et de neutrinos, c'est-à-dire de rayonnement. Par ailleurs chaque fois que la taille R de l'Univers double, la densité de matière diminue. Simple dilution.

Sur la moquette, quand R double la densité est divisée par $2 \times 2 = 4$. Dans notre univers tridimensionnel, en fait, cette densité est divisée par $2 \times 2 \times 2 = 8$.

La densité de matière varie comme l'inverse du cube de la "taille", du "rayon" R de l'Univers.

Mais, pour nous, les photons, c'est plus dramatique. L'expansion nous "vide" petit à petit de toute notre énergie. La quantité d'énergie-matière que nous véhiculons décroît comme l'inverse du rayon R de l'Univers.

Ce qui fait que la densité d'énergie-matière qui est sous forme de photons varie comme l'inverse de la puissance quatrième de R .

Tant que la matière reste couplée aux photons, ceux-ci la réchauffent en continu. Et ceci jusqu'à ce que leur température (commune: $T_R = T_M$) tombe à 3000 K, c'est-à-dire pendant 700 000 ans



LA NUCLÉOSYNTHESE

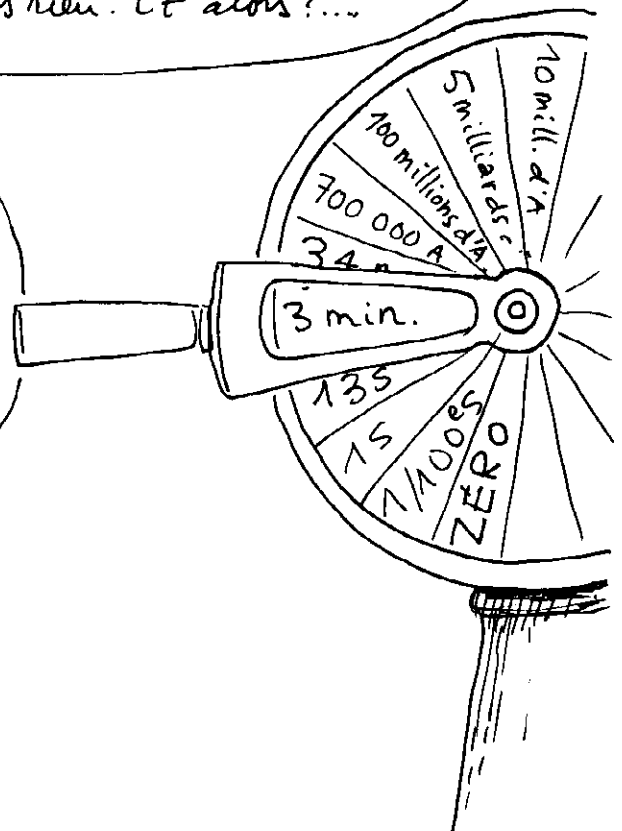


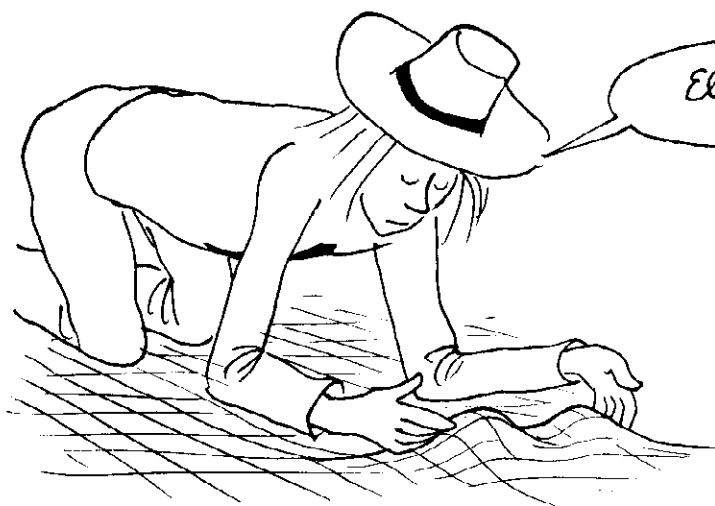
trois minutes

Bon... par rapport à l'état décrit page 31, au premier centième de seconde, la taille de l'Univers R a été multipliée par cent et la température ($T_R = T_M$) est tombée à un milliard de degrés. Il ne reste presque plus rien. Et alors?...



Voilà deux bosses. Si j'essayais de les pousser, de les faire glisser l'une vers l'autre?



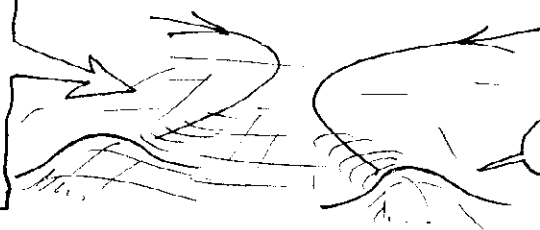


Elles commencent par se repousser



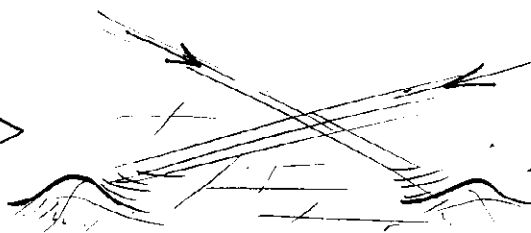
Puis elles s'attirent pour ne former qu'un seul objet.

Quand deux bosses entrent en collision, trois cas se présentent: si elles vont lentement, elles rebondissent l'une contre l'autre.



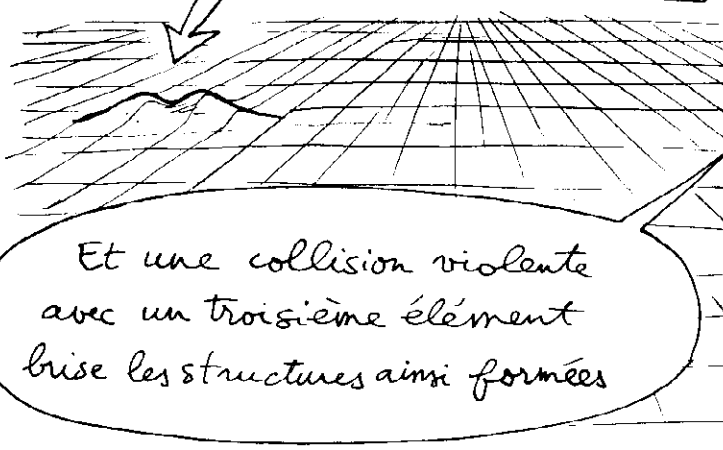
Oh, pardon..

Quand les bosses sont très rapides, elles se croisent si vite qu'elles n'ont pas le temps d'interagir

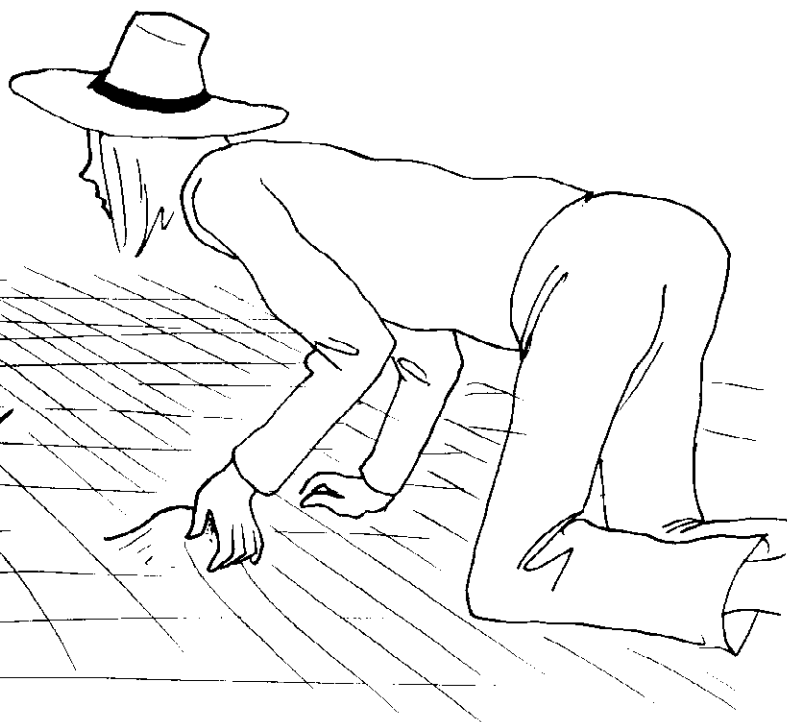


?...

Elles ne peuvent donc s'unir que dans une plage bien définie de vitesse d'agitation, de température



Et une collision violente avec un troisième élément brise les structures ainsi formées

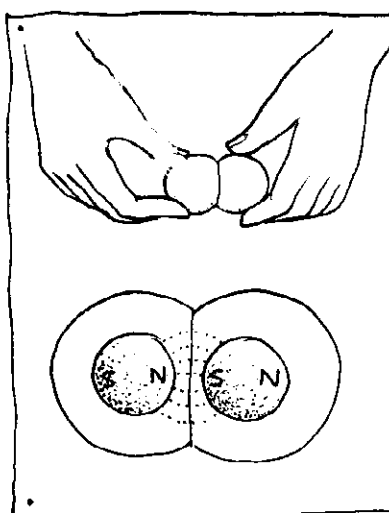




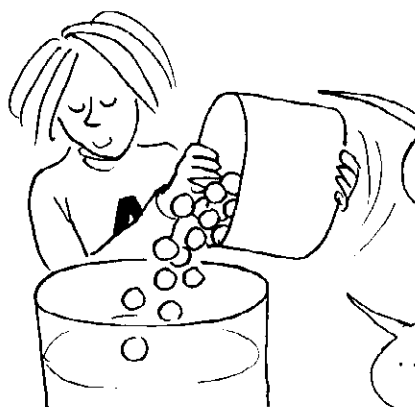
Ces réactions de FUSION donnent les premiers NOYAUX D'ATOMES. Cette MORPHOGENÈSE va faire apparaître les premières FORMES, les premières STRUCTURES de l'Univers.

C'est très amusant, cette affaire-là. Il faut une force attractive et une force répulsive. A grande distance, la force répulsive l'emporte, et à courte distance c'est l'inverse.

Je vais prendre des aimants, que je vais loger dans des sphères de mousse



La mousse s'écrase facilement; si je presse deux sphères l'une contre l'autre, elles restent alors collées l'une à l'autre



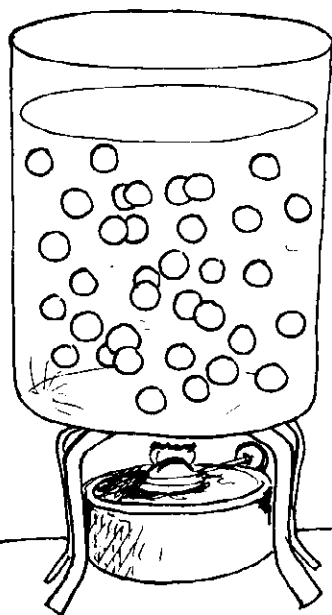
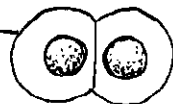
Je vais mettre ces boules dans un grand récipient rempli d'eau...

...pour leur permettre de se mouvoir.

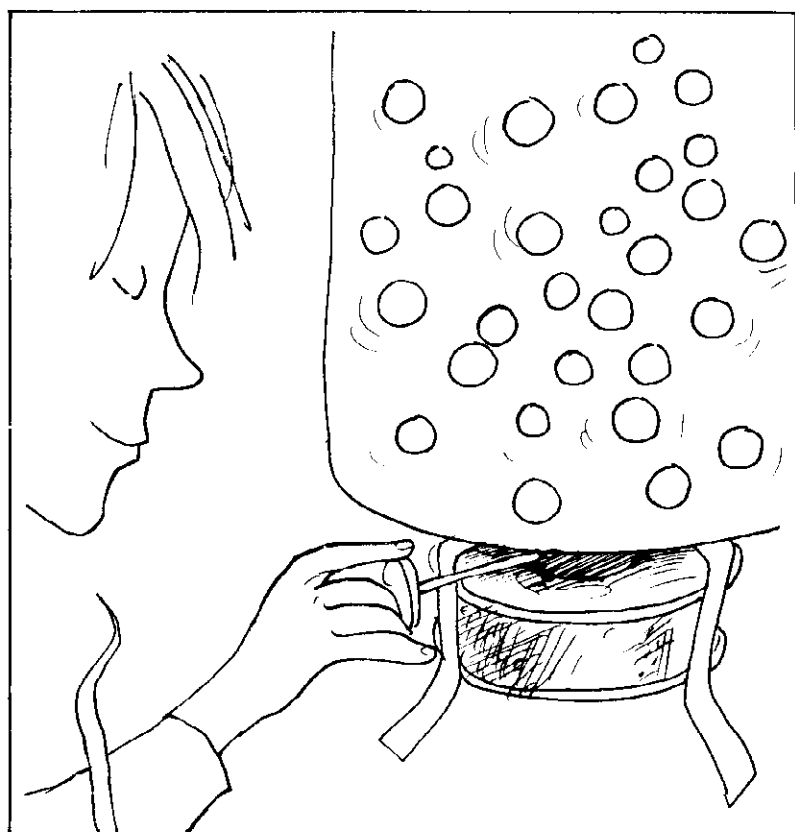
Deux forces interviennent. L'une attractive : les aimants, l'autre répulsive : la mousse quand elle est comprimée. Dès que les boules se touchent, celle-ci intervient. La portée de la force magnétique est ici telle qu'il faut que la mousse soit suffisamment comprimée pour qu'elle entre en jeu. Il existe une position, une configuration où ces forces s'équilibrent.



La mousse donne aux boules une densité pratiquement égale à celle de l'eau. Maintenant je crée un mouvement d'agitation en chauffant.

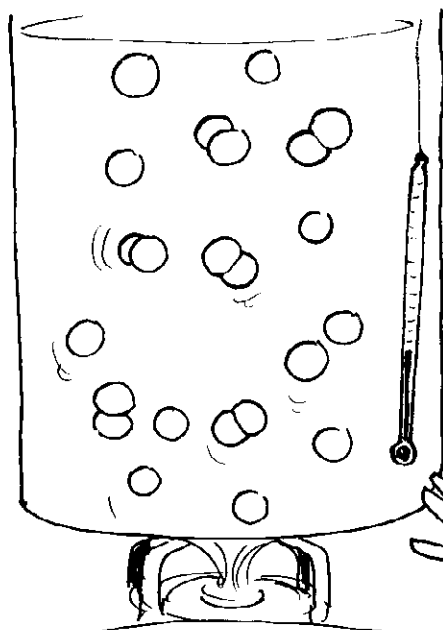


Quand le chauffage est faible, les boules rebondissent doucement les unes contre les autres, et il ne se passe rien du tout. Quand elles se percutent de front, il n'y a pas assez d'énergie pour comprimer la mousse, et permettre à la force magnétique, qui se manifeste à courte distance, d'agir.



Bon, je vais pousser le chauffage.

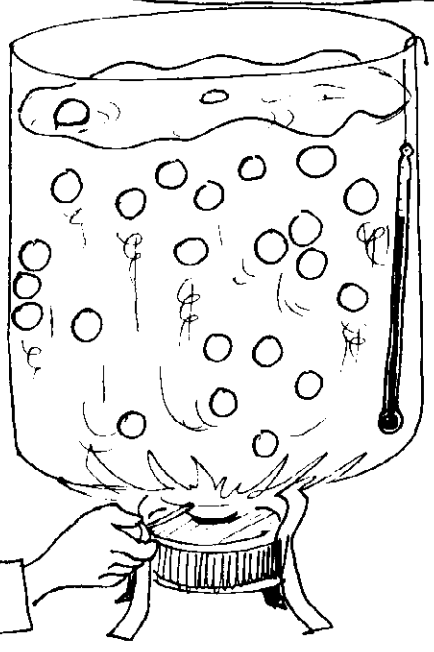




Là, ça marche ! c'est la bonne température (supérieure à la température de SEUIL). le degré d'agitation est suffisant



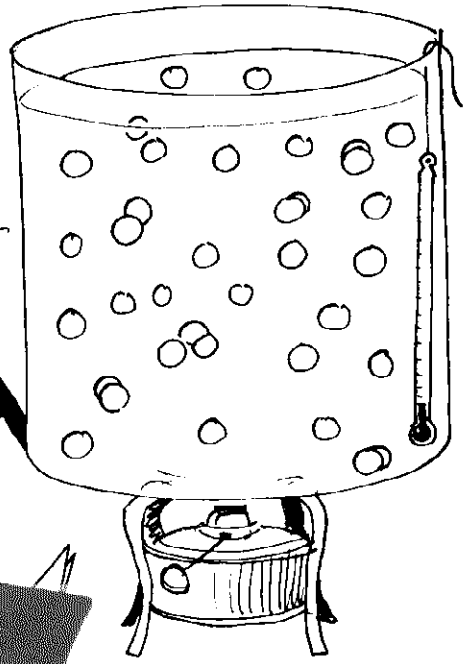
Effectivement, les boules s'assemblent deux à deux.



quand je chauffe trop, ces STRUCTURES sont brisées par l'agitation thermique

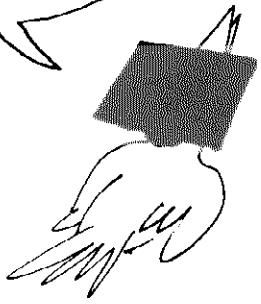
Et si tu refroidissais ?

Anselme laisse l'eau se refroidir. la TURBULENCE baisse. À un certain moment, quelques boules s'accouplent. Mais, la température continuant de baisser, cette NUCLÉOSYNTHE s'arrête.



Plus rien à faire, maintenant. c'est trop froid. les boules ne sont plus assez agitées pour pouvoir se souder entre elles.

on est au-dessous du SEUIL



La même chose se passe quand la température de l'Univers descend au dessous du milliard de degrés. C'est-à-dire au bout de quelques MINUTES. Alors des structures à deux, trois, ou quatre "boules" se forment :

⊕ PROTON

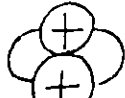
○ NEUTRON



1 PROTON



1 PROTON

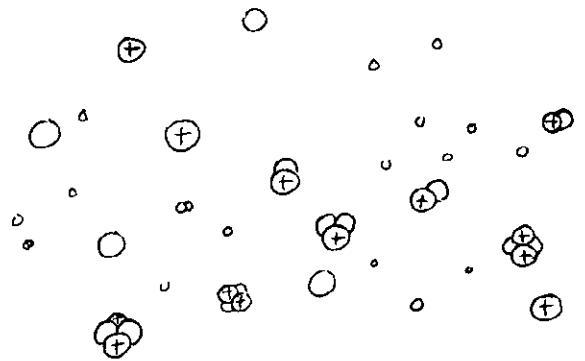


2 PROTONS

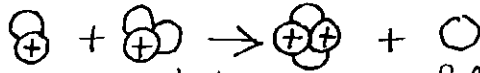
DEUTERIUM

TRITIUM

HELIUM



Mais le DEUTERIUM et le TRITIUM aussitôt formés, vont se combiner suivant la RÉACTION NUCLÉAIRE :

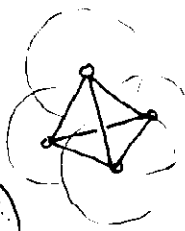
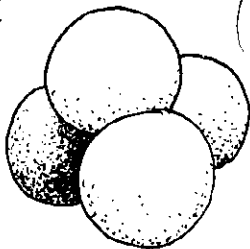


deutérium + tritium donne hélium plus neutron

A ce stade, l'Univers est une BOMBE À HYDROGÈNE.



Alors, tout va se transformer en hélium ?



Le noyau d'hélium est très symétrique, compact et solide. Si la température se maintenait, toute la matière serait convertie en hélium. Mais au bout de 34 minutes, la température tombe à 300 millions de degrés et cette nucléosynthèse va s'arrêter les nucléons n'ont plus

assez de vitesse pour vaincre la répulsion électrostatique (+ repousse +). Tout sera joué

Les derniers neutrons libres se sont désintégrés. Ils sont naturellement instables et se transforment, en 10⁹ secondes, en un couple PROTON-ÉLECTRON

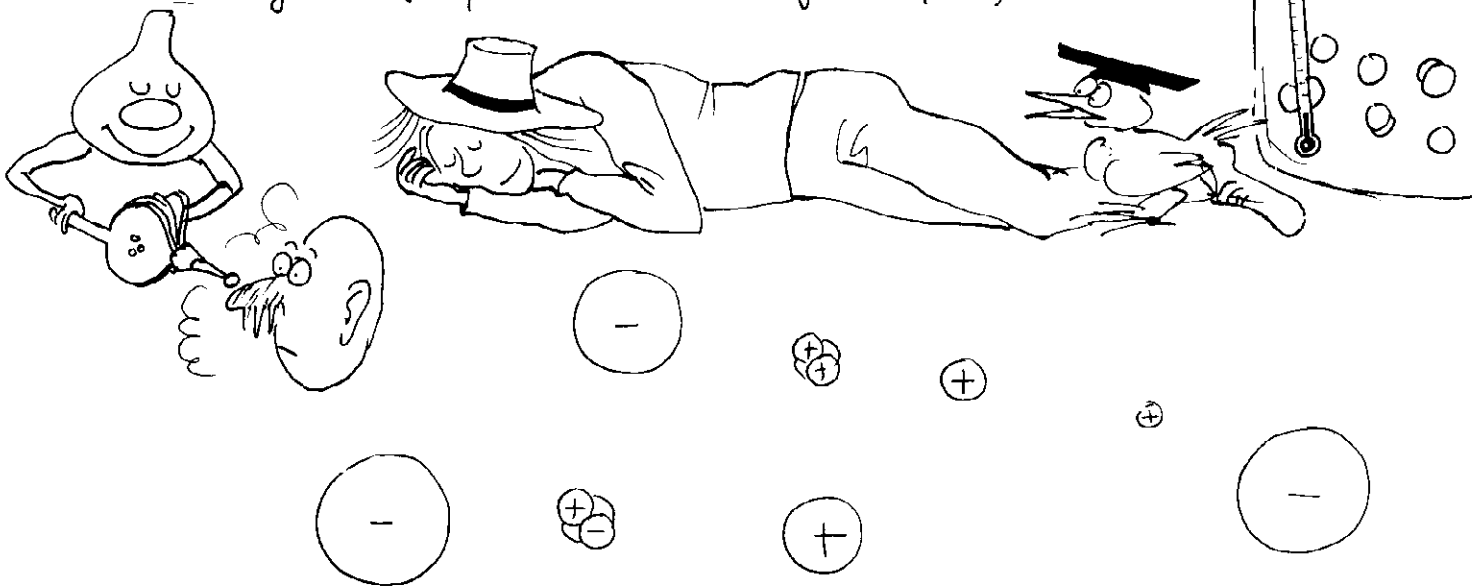
Depuis le début, 34 minutes se sont écoulées

et alors?

À l'issue de cette phase, on a une soupe primitive constituée de PHOTONS, de NEUTRINOS, de PROTONS, d'ÉLECTRONS et de NOYAUX D'HÉLIUM. La matière se répartit, en poids, comme ceci : 25% d'HÉLIUM Contre 75% d'HYDROGÈNE (Protons libres)

HiPs!

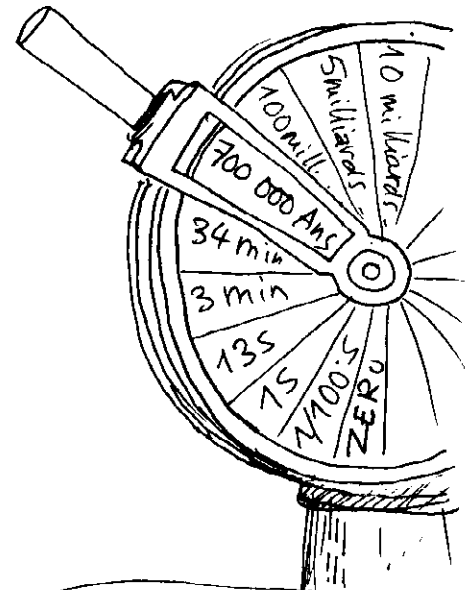
Pendant **700 000 ans** il ne se passe RIEN du tout. L'Univers continue de se détendre, et les photons avec lui. Le gaz de photons continue de fournir de la chaleur à la matière, pour que les deux températures T_R et T_M restent égales (équilibre thermodynamique)



Et la température descend à **3000 Kelvins**

L'UNIVERS TRANSPARENT

Un autre mécanisme MORPHOGENÉTIQUE entre en jeu. Les forces électriques tendent à lier les électrons aux noyaux pour former des atomes. L'agitation thermique a suffisamment baissé pour que ces structures ne soient plus brisées, aussitôt formées, dans les collisions avec un autre atome ou avec d'autres composants du mélange.



Petit à petit, tous les électrons LIBRES sont capturés par les noyaux

ces atomes bizarres... avec leurs gros électrons. moi je ne m'y fais pas!

Et l'univers devient TRANSPARENT

Qu'est-ce que tu veux dire par transparent. Avant, il était opaque ?/!

Avant, les photons interagissaient constamment avec la matière.

Aucun photon n'arrivait à se frayer un chemin dans ce milieu.

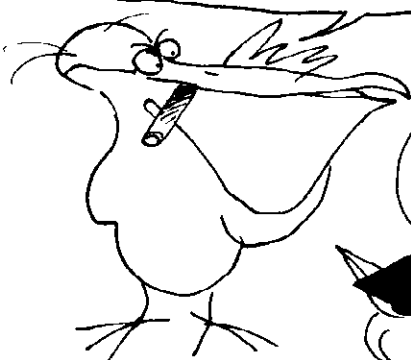
Pffff!

ET LE DÉCOUPLAGE

Maintenant c'est fini, les photons peuvent traverser tout l'Univers sans s'apercevoir que la matière existe: il y a DÉCOUPLAGE. Pour deux raisons. Primo il y a plus de place. Secundo les photons interagissent moins avec la matière neutre (Atomes).



Mais, voyons, les télescopes nous envoient des images qui, en quelque sorte nous parviennent "en direct du passé..."



Oui, mais même avec un télescope fantastiquement puissant, on ne pourra jamais observer un phénomène survenu à une époque où l'Univers avait moins de 700 000 ans



Le passé, le passé très ancien de l'Univers restera nécessairement flou, nébuleux.

Oui, impossible de psychanalyser l'Univers.



La matière et les photons ayant cessé d'interagir, d'échanger de l'énergie L'ÉQUILIBRE THERMODYNAMIQUE EST ROMPU, et la température de la matière T_m se met à chuter plus vite (comme l'inverse du carré du Rayon de l'Univers), que la température T_R des photons, la température de rayonnement, qui décroît seulement comme l'inverse de ce rayon R .

Salut!

maintenant,
c'est chacun pour soi.

Hé! qu'est-ce qui se
passe? On disait que la
nuit tombe. Et il fait
sacrément froid,
tout d'un coup...

L'univers connaît maintenant une sorte de crépuscule. Il continue de se refroidir. Le ciel passe du violet au rouge sombre, puis la nuit tombe comme une chape froide. Il y a toujours un milliard de photons originaux pour chaque atome d'hélium ou d'hydrogène. Mais ces photons, distendus par l'expansion, sont devenus exsangues.

Le BIG BANG, c'est fini. les numéros furent éblouissants. Pour un peu, il ne serait rien resté (une particule sur un milliard!). Il fait noir comme dans un tunnel



Fouchtre, quel
froid de bête !

La longueur d'onde des
photons est de $0,15 \text{ nm}$,
ce qui correspond à une
température de rayonnement
 $T_R = -173^\circ\text{C}$

les atomes, eux, se
promènent à 150 m/s ,
ce qui donne une
température de matière
de -267°C

Bon, je crois que j'ai à peu près compris
comment fonctionne l'Univers

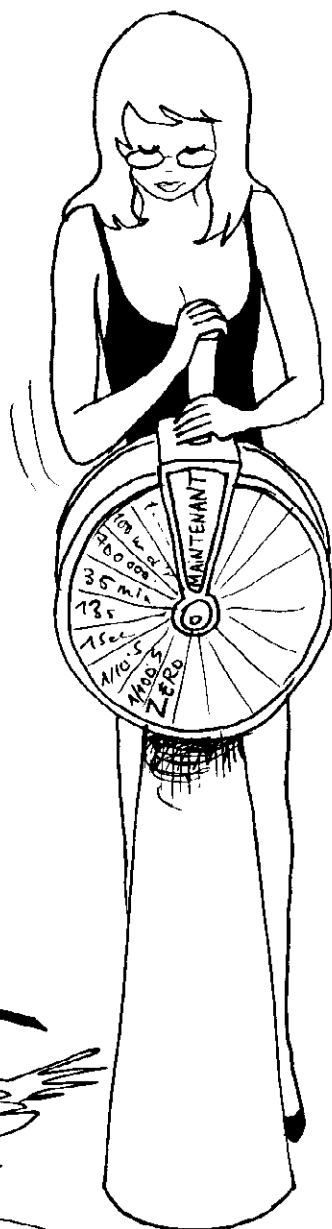
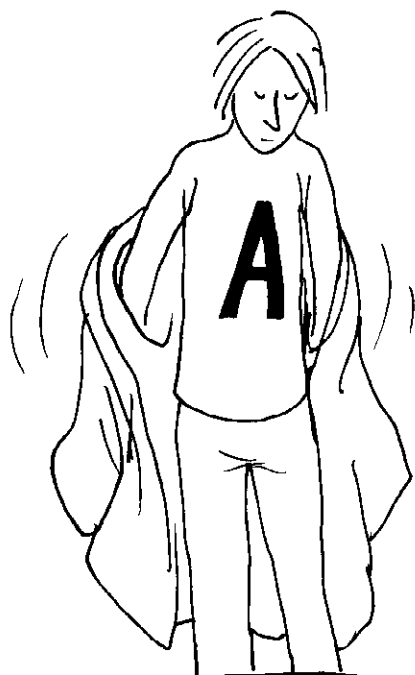
mais il reste une
question importante :
à quoi ça sert ?

oui, Anselme a raison
à quoi cela rime-t-il ?

Était-ce
bien utile ?



Pour répondre à la question de Léon,
quittons cet univers de moquette et
replaçons-nous dans le présent.

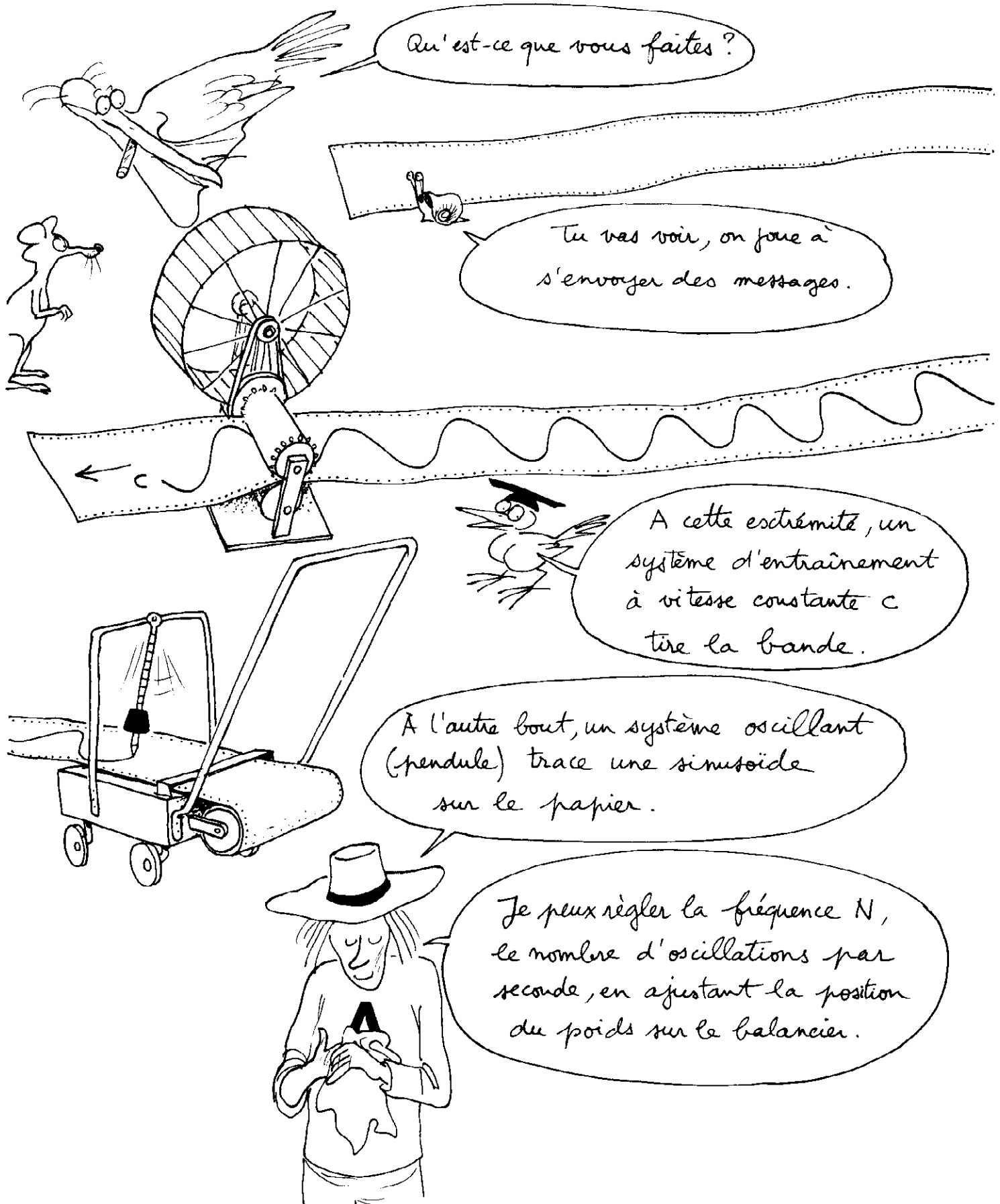


Et tout ce qui suit ?
la formation des galaxies,
des étoiles ?...
on laisse tomber ?...

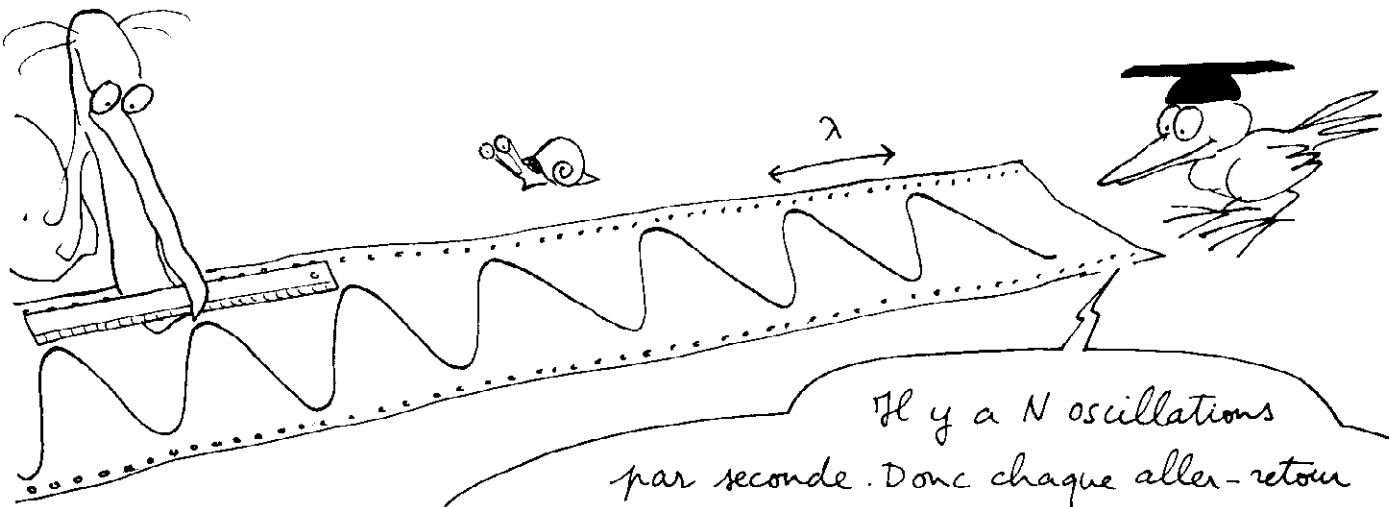


Non, tout cela sera raconté
dans MILLE SOLEILS

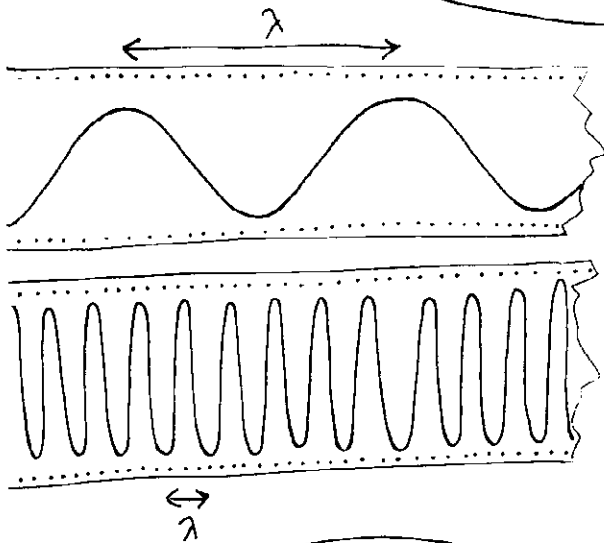
L'EFFET DOPPLER



Ah, d'accord. Et moi je peux mesurer la longueur d'onde à la réception



Il y a N oscillations par seconde. Donc chaque aller-retour du pendule se fait en un $N^{\text{ème}}$ de seconde : c'est la PÉRIODE de l'onde. Pendant ce temps, la bande avance de $\lambda = \frac{C}{N}$ (longueur d'onde)



Basse fréquence, grande période, grande longueur d'onde.
Haute fréquence, courte période, faible longueur d'onde.

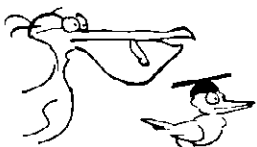
ça permet de communiquer

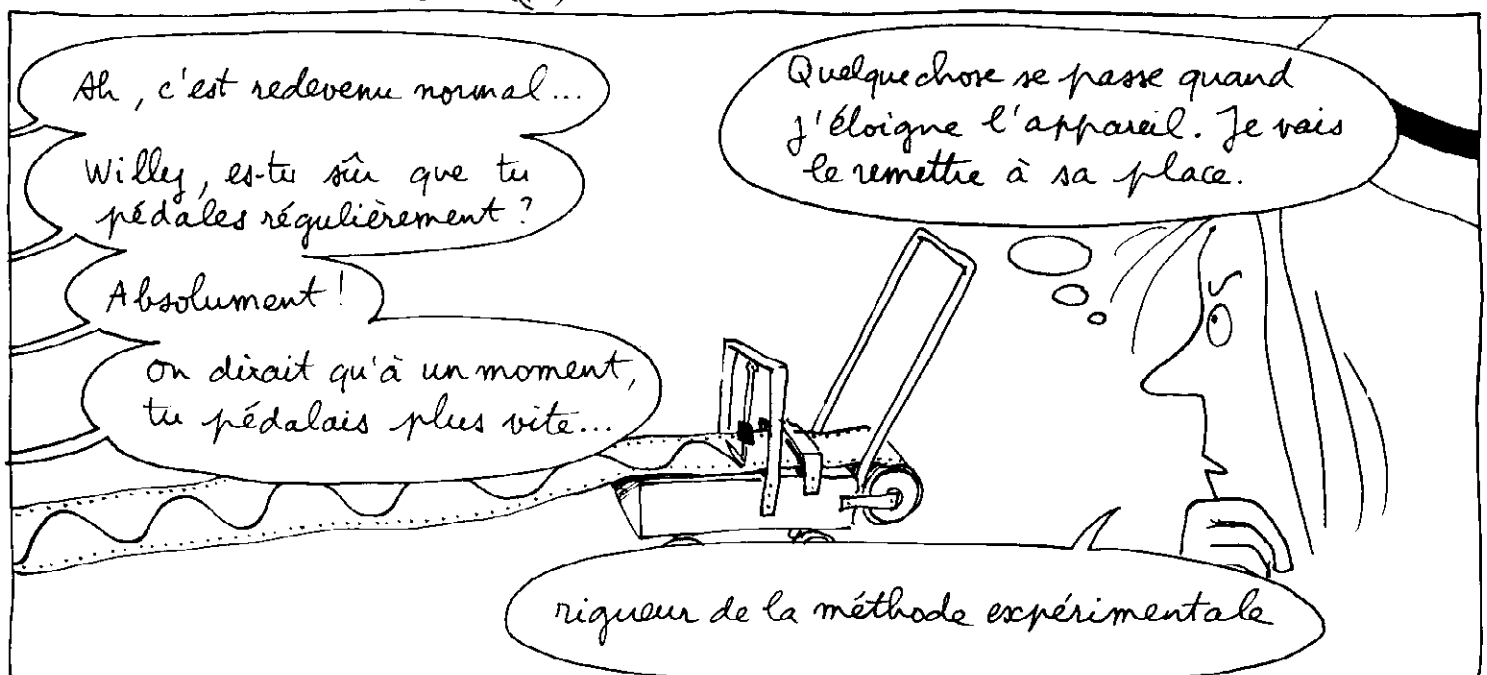
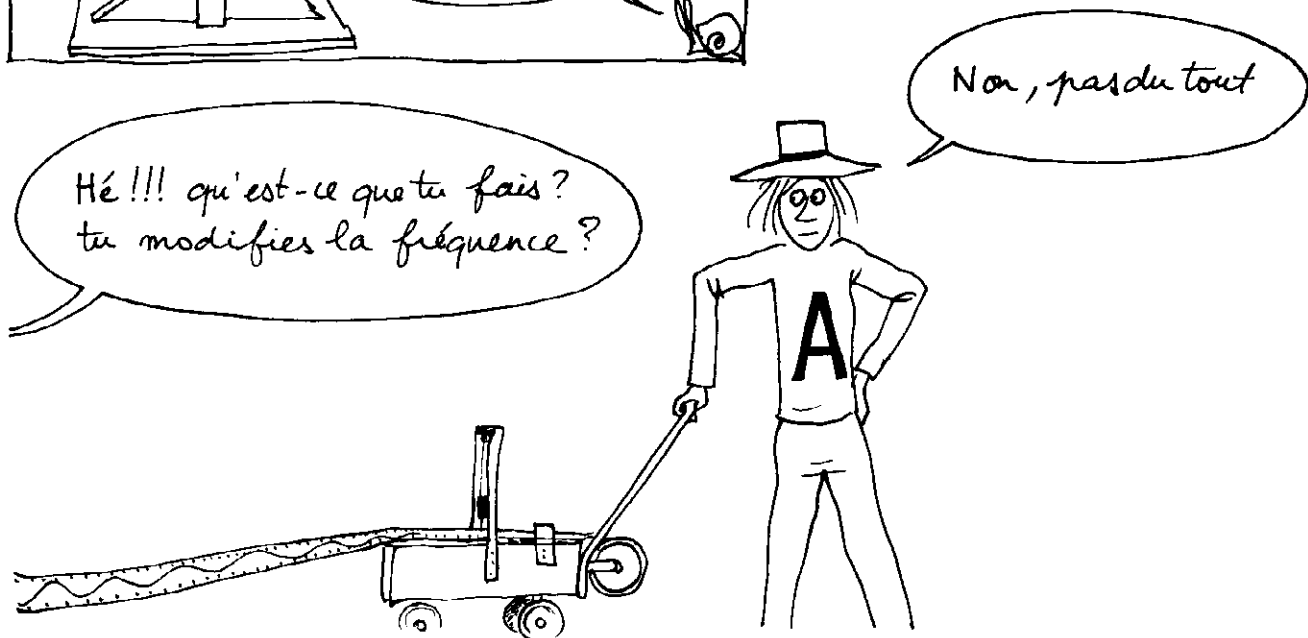
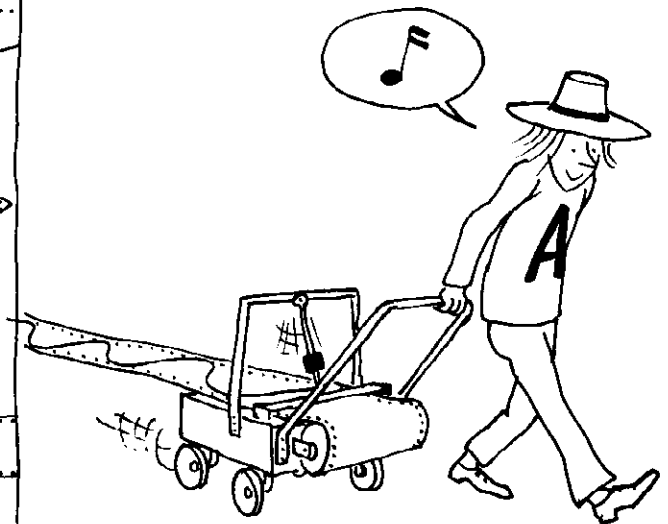
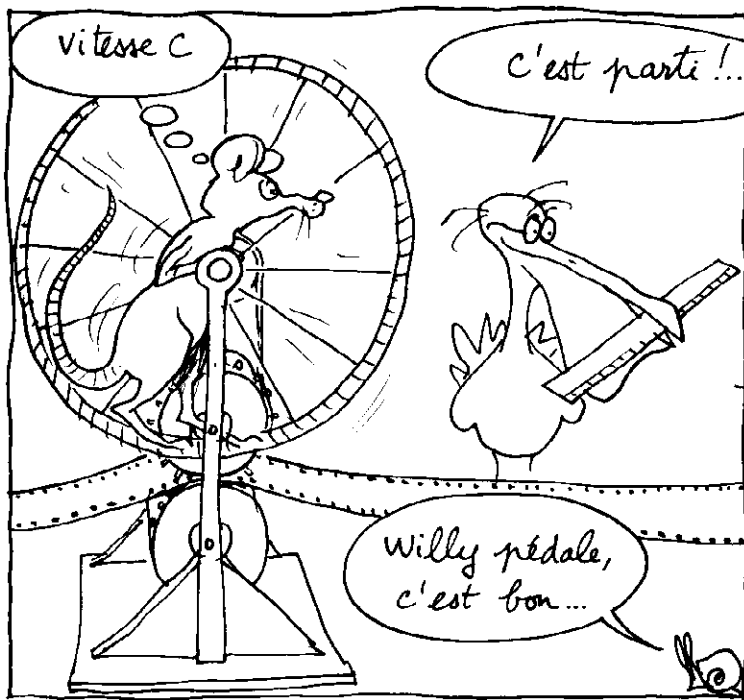
c'est important la communication



Prêts ?

Bon. Je vais faire un essai de transmission à plus grande distance



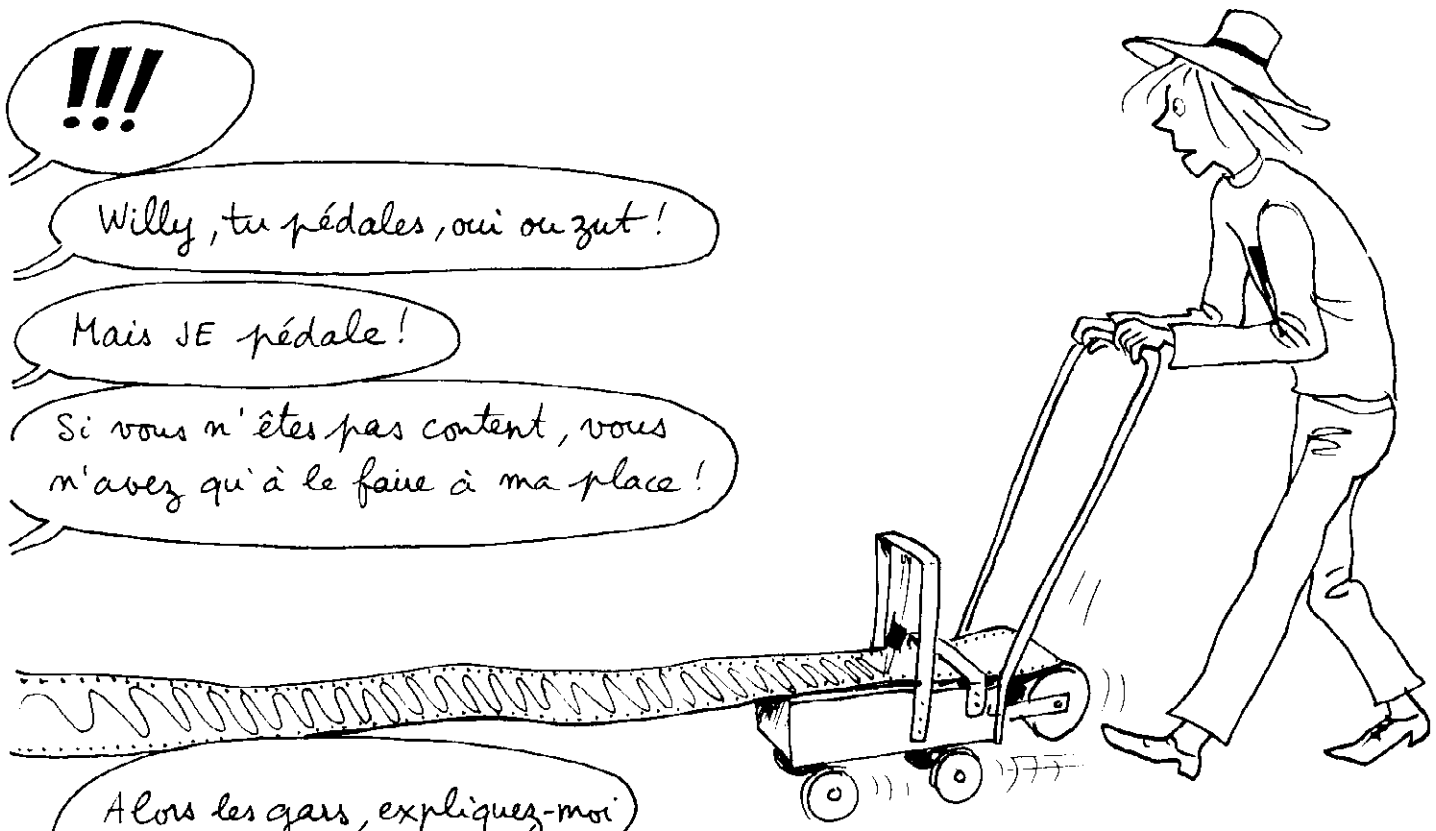


!!!

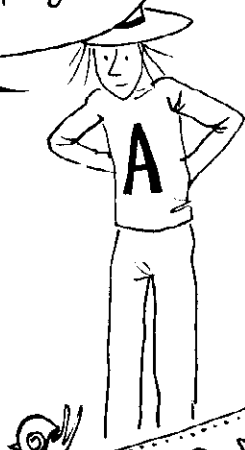
Willy, tu pédales, oui ou zut !

Mais JE pédale !

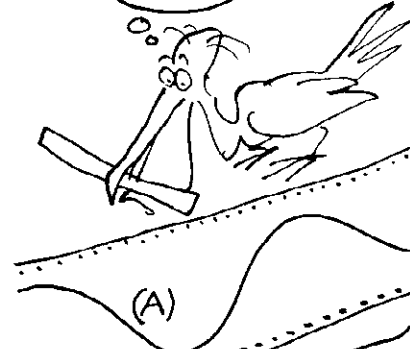
Si vous n'êtes pas content, vous n'avez qu'à le faire à ma place !



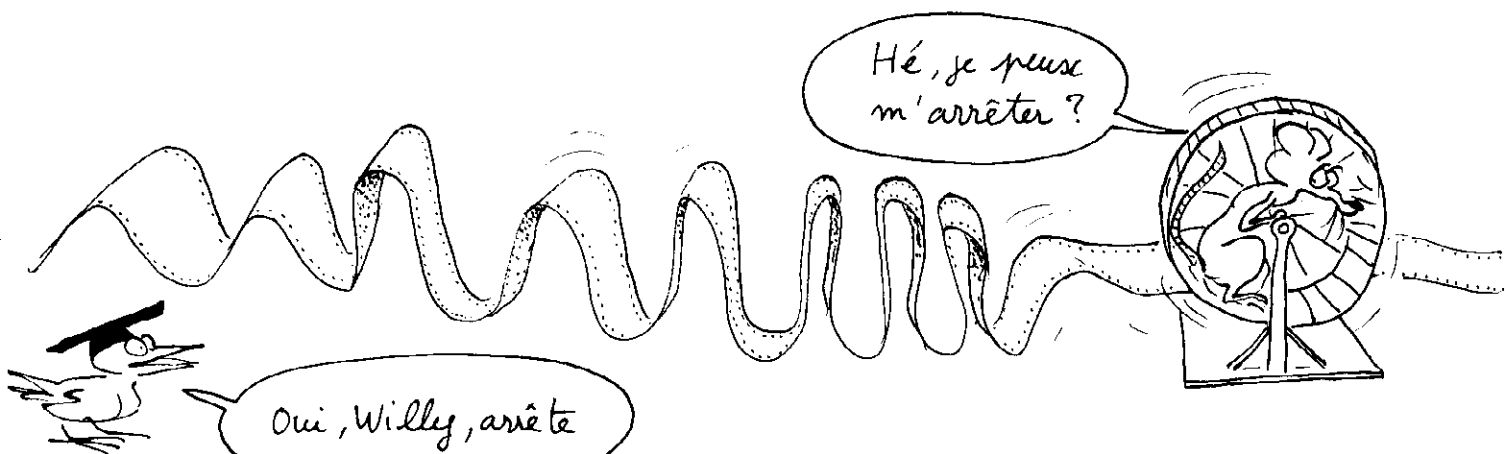
Alors les gars, expliquez-moi votre cas



?



C'est redevenu normal. Mais tout à l'heure il y a eu un accroissement de la longueur d'onde (A), c'est-à-dire une baisse apparente de la fréquence, à la réception. Puis, après un intervalle normal (B), on a eu un accroissement de la fréquence, à la réception, c'est-à-dire un raccourcissement de la longueur d'onde λ .



Oui, Willy, arrête

Willy dit qu'il a tout le temps
pédalé régulièrement

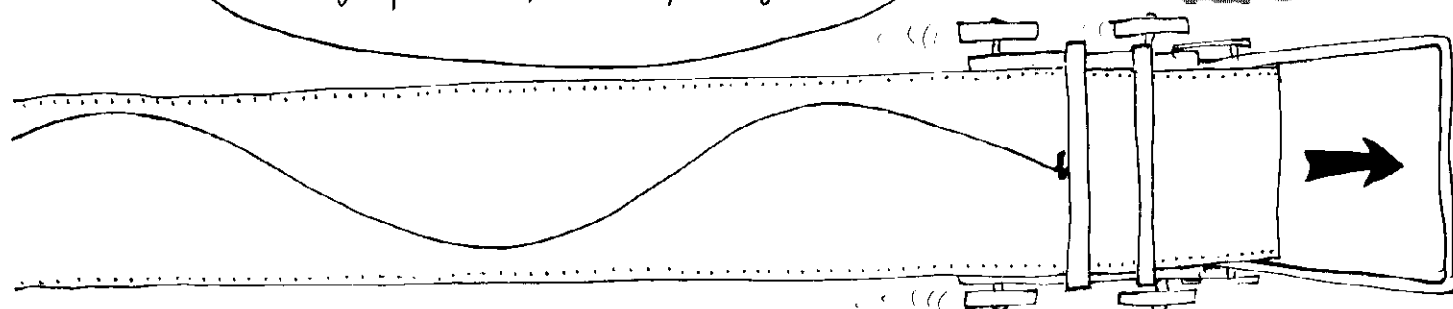
C'est peut-être le papier
qui s'est dilaté ou
contracté ?

Non, Anselme, c'est
l'effet Doppler - Fizeau

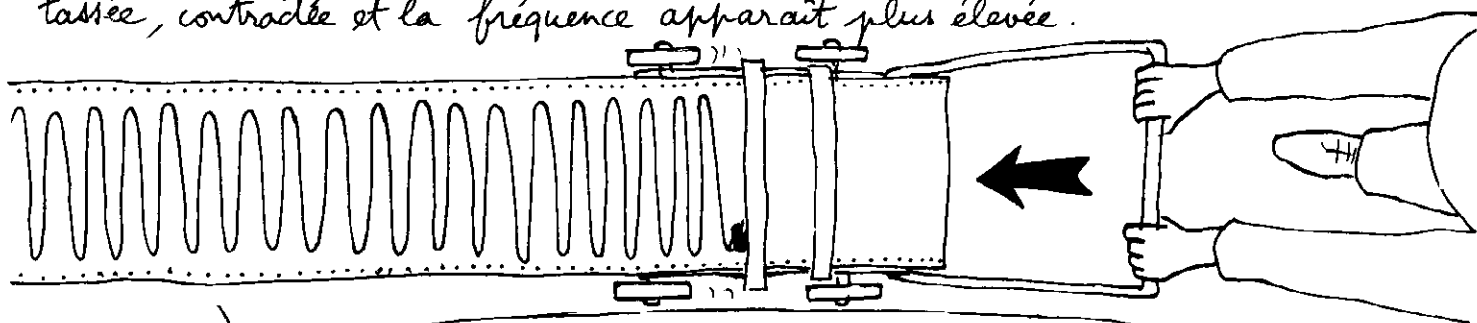
le ... quoi ? ! ?

Quand tu bouges le chariot, cela
change la fréquence apparente.

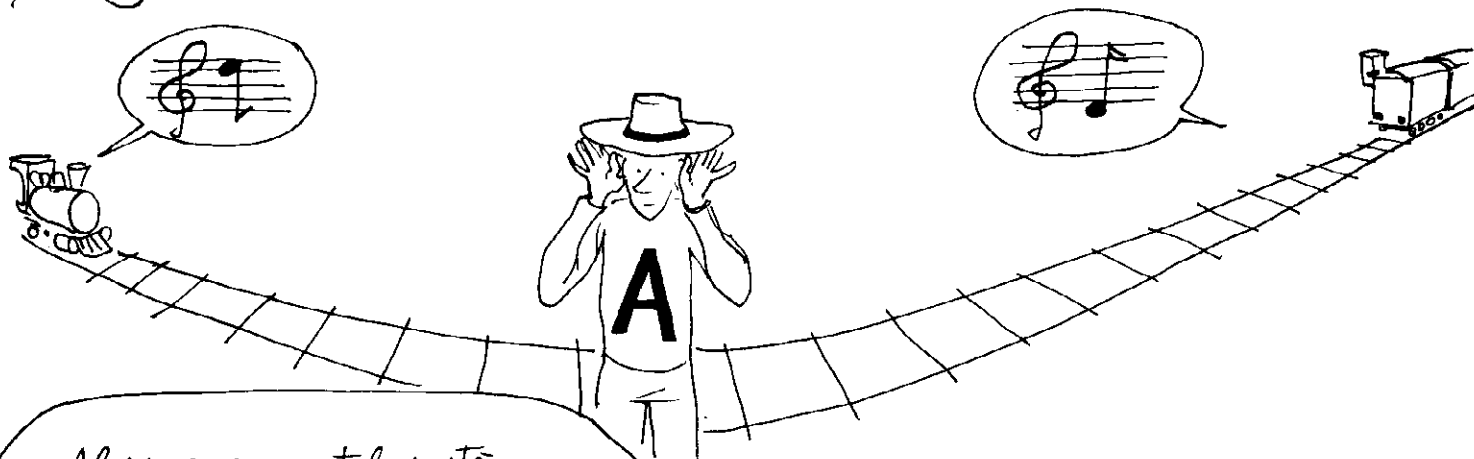
Quand le chariot s'éloigne,
la sinusoïde est étirée et
la fréquence apparaît plus faible.



Quand le chariot se rapproche, avance sur la bande, la sinusoïde est tassée, contractée et la fréquence apparaît plus élevée.



C'est exactement ce qui se passe quand tu entends le sifflet d'un train qui passe à ta hauteur. Quand il se rapproche le son est plus élevé. Quand il s'éloigne le son est plus grave.



Alors, avec un tel système, quand je connais a priori la longueur d'onde du signal qui serait émis par une source immobile, je peux calculer la vitesse de rapprochement ou d'éloignement (récession) de la source.

Et ce qui est valable pour le son l'est également pour la lumière - les objets qui s'éloignent paraissent plus rouges, et ceux qui s'approchent, plus bleus.

Bon, reprenons nos expériences de transmission à distance

Willy, en place

Il a changé la fréquence !?

Où alors il s'éloigne..

Ça recommence comme
tout à l'heure

Oui, c'est ça !
Il doit encore s'éloigner

Mais non, bougres d'andouilles,
je ne m'éloigne pas puisque
je suis LA !...

Et l'oscillateur
est resté là-bas

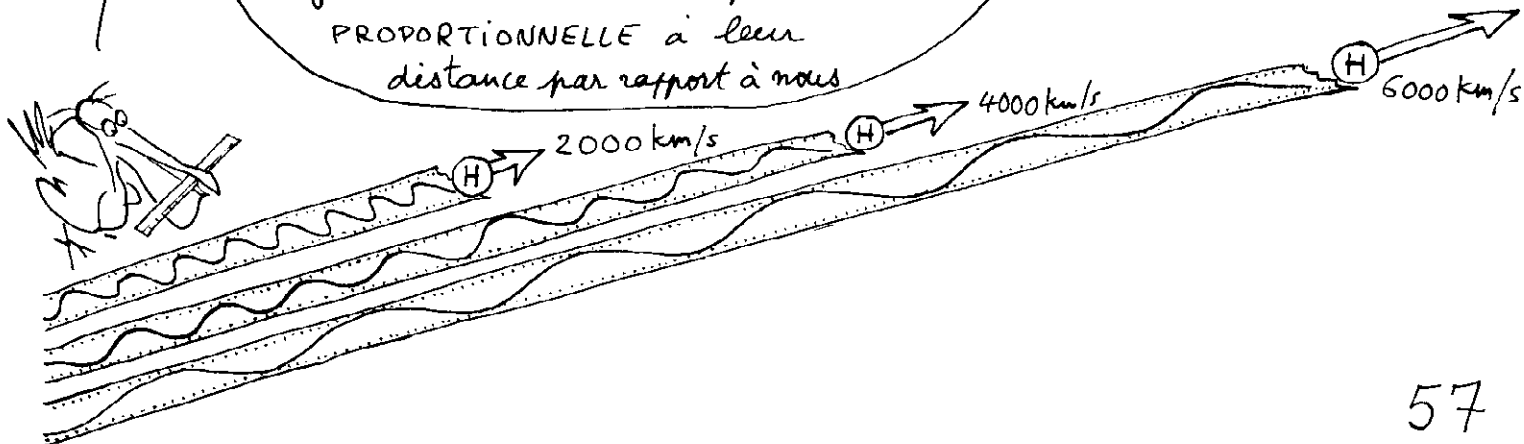
LA FUITE DES GALAXIES



Eh oui, c'est de cette façon qu'en 1930, Edwin Hubble découvrit l'EXPANSION DE L'UNIVERS, en constatant que les galaxies lointaines nous fuient : en raison de de l'effet DOPPLER-FIZEAU, elles sont de plus en plus rouges à mesure qu'elles s'éloignent

Ces atomes d'hydrogène émettent en principe dans une longueur d'onde de 21 cm. L'effet Doppler m'indique des vitesses de fuite de 2000, 4000, 6000 km/s

Hubble put évaluer la distance nous séparant de ces galaxies, en se fondant sur leur luminosité apparente Et il en déduisit que cette vitesse de fuite était tout simplement PROPORTIONNELLE à leur distance par rapport à nous



Attendez, qu'est-ce que cela veut dire ?
les objets accélèrent quand ils
s'éloignent de nous ?

Pas exactement. La moquette se
dilate de tous les côtés. Imagine un
point A qui, au temps $t = 0$, est à
un mètre de toi. Au bout d'une
seconde, il est à 1m20. Sa vitesse de
fuite est donc de 20cm/s.

Dans le même laps de temps, un
point B, situé initialement à 2m
de toi, se retrouvera à 2m40 (en B')
et sa vitesse PAR RAPPORT A TOI
est de 40 cm par seconde

L'effet DOPPLER indique
les VITESSES RELATIVES.

Il n'y a pas de variation de
longueur d'onde quand l'émetteur
et le récepteur vont à la même
vitesse sur des routes parallèles.

Alors, tout notre Univers est en expansion ?

Attendez, moi j'ai une autre idée. Supposons que le temps... s'accélère.

Mais cela... ne veut rien dire !?!

Les oscillations des atomes, comme par exemple des atomes d'hydrogène, sont comme le "pouls" de l'Univers. Imagine un Univers dont le pouls s'accélère. Plus on vieillit, plus ce "pouls" bat vite. Les images du passé nous parviennent comme un film au ralenti. Et l'effet Doppler n'est qu'une illusion.

Bien sûr, Tirésias, on peut tout imaginer, et ce que tu dis revient à dire que les lois de la physique évoluent dans le temps, ce qu'a envisagé Fred Hoyle

LE FOND DU CIEL EST FROID

Mais il existe un autre argument en faveur de l'expansion, et de son corollaire, le BIG BANG

mi!

Tout à l'heure, on avait vu que seul un photon sur un milliard avait pu se transformer en matière

et en antimatière !

Il devrait donc rester une grande quantité de ces photons primitifs, environ 500 par centimètre cube. (et autant de neutrinos, plus problématiques à détecter).

leur longueur d'onde devrait être de cinq millimètres ce qui correspondrait à une température de rayonnement T_R de trois degrés absolus (-270°C)

Ces photons, de très faible énergie, Penzias et Wilson les ont détectés en 1964. Ils sont la vraie cendre du BIG BANG une preuve tangible de cette grande danse cosmique

mi!!!

Hé là...

L'HORIZON COSMOLOGIQUE

Sophie, selon la
Loi DE HUBBLE, la vitesse de fuite des
objets croît avec la distance ...

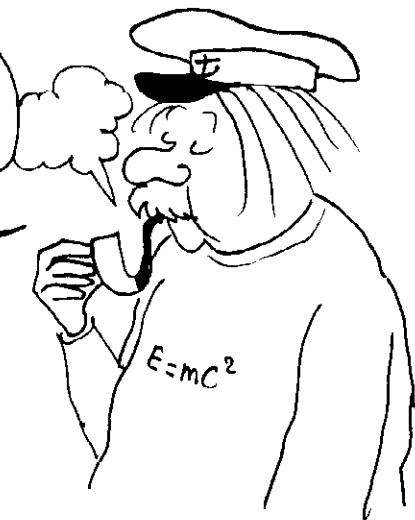
Donc, logiquement, il doit
exister des objets qui s'éloignent
de nous à des vitesses égales ou même
supérieures à la vitesse de la lumière !?

Alors, on ne peut
plus recevoir
cette lumière ?!

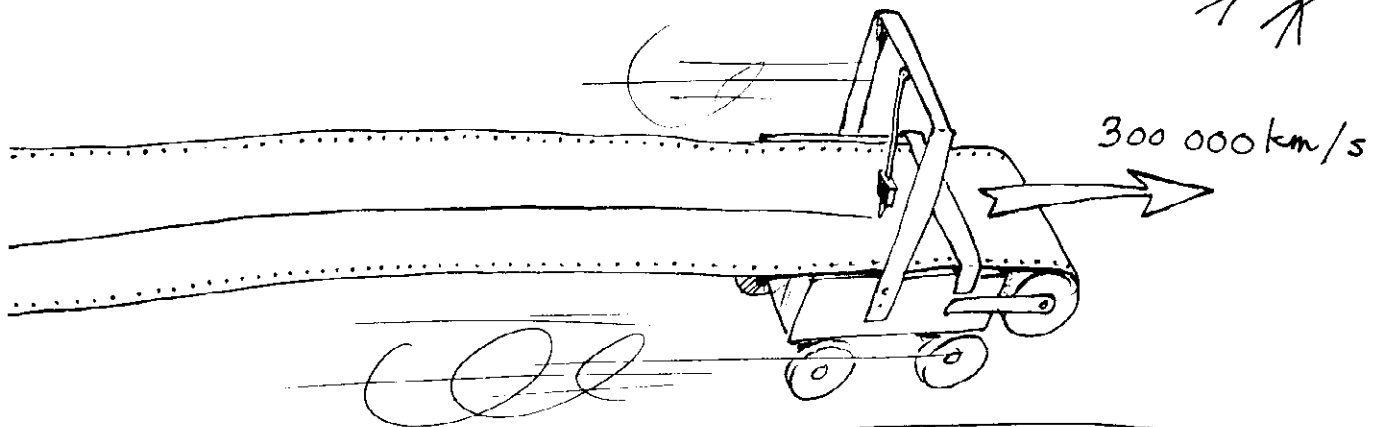
Pourquoi ? si un avion
s'éloigne de moi à une
vitesse supersonique, je peux
quand même entendre le bruit
qu'il produit, non ?

Mes agneaux, ce
n'est pas comme cela
qu'il faut voir
les choses

le fait de se déplacer a une incidence sur le TEMPS (*)
 Un objet qui se déplace à une vitesse s'approchant
 de 300 000 km/s, de la vitesse de la lumière, se trouve,
 par rapport à nous, observateurs, dans une "bulle de temps"
 différente. Nous percevons son message comme
 une sorte de film au ralenti.



Et si cet objet se meut par rapport à nous à la
 vitesse de la lumière, le dérapage temporel
 devient total. Son temps semble se
 figer comme une sauce



À cause de ce glissement, de ce dérapage
 des temps l'un par rapport à l'autre, la
 fréquence des ondes, à la réception, baisse.
 Et ce phénomène, d'essence relativiste, vient
 se superposer, s'ajouter à l'effet DOPPLER
 Quand la vitesse de fuite de l'émetteur, par
 rapport à nous, atteint c , la fréquence
 des ondes reçues tombe à zéro. Plus d'énergie
 Plus d'ondes, plus de messages !

Des vagues à fréquence nulle,
 c'est plus des vagues !

(*) Voir TOUT EST RELATIF, du même auteur, éditions BELIN

Pour les objets qui nous entourent, une vitesse relative égale à 300.000 km/s est atteinte sur une sphère appelée HORIZON. Ce n'est pas la frontière DES CHOSES QUI EXISTENT mais la frontière des CHOSES QUE NOUS POUVONS CONNAÎTRE. L'Univers accessible peut n'être qu'une portion d'un univers plus vaste cet horizon est à une dizaine de milliards d'années-lumière. La portée du plus puissant télescope terrestre actuel, le PALOMAR est d'un milliard d'années-lumière. *La Direction*

Mais que signifiait, tout à l'heure, ce rayon R de l'Univers ?

L'histoire commençait quand l'Univers était âgé d'un centième de seconde. Imagine qu'à ce moment là, on ait tracé un cercle, ou mieux une sphère, de rayon R et qu'on suive l'expansion de cette sphère de référence au cours du temps. C'est tout...

Ce que faisant, on ne préjuge pas du fait que l'espace puisse être fini ou infini (*)

Elle a des yeux ravissants

Hé, vous deux !

Cette bande dessinée n'est pas finie !

HiHiHi

On a encore besoin de vous

(*) Voir à ce sujet. LE GÉOMÉTRICON, même auteur, éditions Belin.

LES MODÈLES DE FRIEDMANN

Sophie, qu'est-ce qui provoque l'expansion de l'Univers ?

Ce sont les forces de **PRESSION**. Tout se passe comme si l'Univers avait **EXPLOSE** comme une bombe

Et rien ne s'oppose à cette expansion ?

Les forces de gravité tendent à faire se condenser l'Univers sur lui-même, à le faire **IMPLOSER**

Est-ce qu'on ne peut pas concevoir un univers où ces forces, de pression et gravitationnelles, s'équilibreraient ?

On peut montrer que l'équilibre est impossible. Au moindre écart par rapport à l'équilibre, cet univers "statique" explose ou implose

EXPLOSION

IMPLOSION

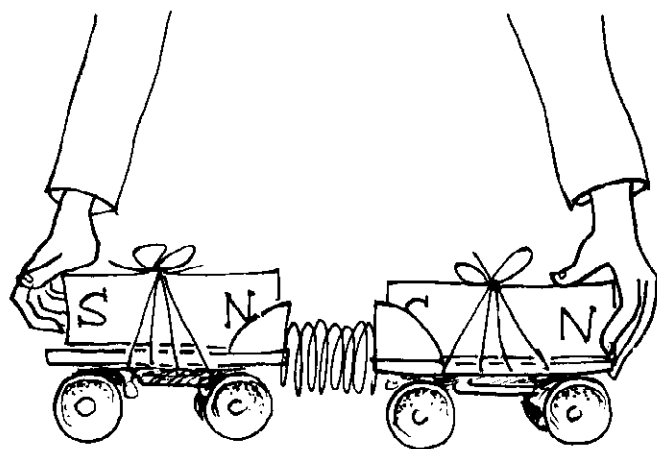
mais alors, dites moi,
notre Univers aurait
pu ... implorer au
lieu d'exploser?

En un sens
c'est une
chance...

qui vous dit, alors, que
le temps, lui, ne serait pas
parti en ... marche arrière..

Tsss!...

qu'est-ce que
tu fabriques?



Anselme a attaché deux aimants sur
des patins à roulettes. Ils s'attirent.
Mais un ressort comprimé tend à
écarter les patins l'un de l'autre.

tu vois, les aimants
représentent les forces
de gravitation, attractives,
cohésives. Le ressort figure
les forces de pression.

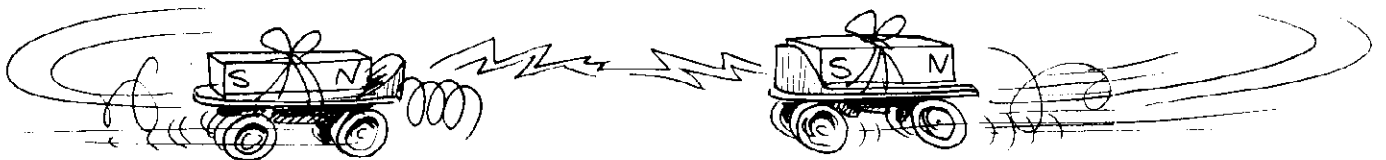




Si les frottements sont inexistantes, les patins finiront par acquérir une VITESSE CONSTANTE.

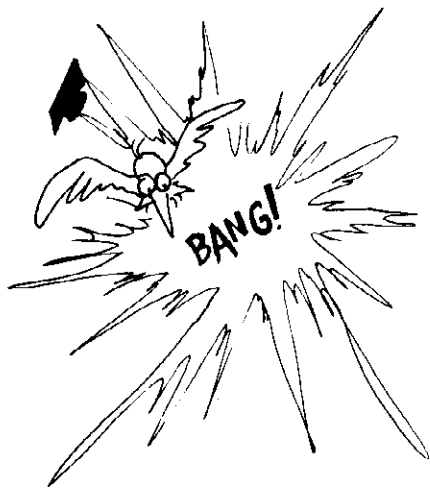


Soit l'impulsion donnée par le ressort est trop faible, ou les aimants trop forts. les patins vont alors revenir, "tomber" l'un vers l'autre, à vitesse croissante.



Ceci évoque deux types d'Univers possibles :

Premier Scénario : L'expansion se poursuit indéfiniment
Quand les dernières étoiles seront éteintes, ce sera la nuit, le froid absolu, la MORT THERMIQUE.



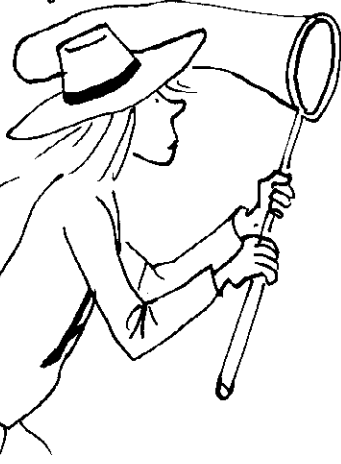
Second scénario : les forces de gravité finissent par l'emporter. Après une situation d'extension maximale, l'Univers "retombe sur lui-même". Toutes les structures, galaxies, étoiles, sont pulvérisées. Les atomes eux-mêmes sont brisés. Et le BIG BANG est vécu comme à rebours, jusqu'à un nouveau rebond de l'Univers, une nouvelle phase d'expansion.

c'est le mathématicien russe FRIEDMANN qui, en 1930, inventa les premiers modèles d'Univers non statiques.



Si j'avais su que l'Univers était instationnaire, j'aurais trouvé avant Friedmann (*)

Monsieur Albert, qui, au prix d'acrobaties mathématiques absolument impossibles, avait bricolé en 1917 son modèle stationnaire, en fut fort dépité. Friedmann lui volait sa victoire. Il bouda alors la relativité générale pendant de longues années.



Selon les modèles de Friedmann, l'Univers est en expansion indéfinie si la densité (actuelle) de matière est inférieure à 5×10^{-30} grammes par centimètre cube. Cet univers aurait par ailleurs un volume, une extension spatiale infinie.

(*) Authentique remarque d'EINSTEIN.

~~LA~~ ^{les} GÉOMÉTRIE DE L'UNIVERS

L'Univers est, pour nous, une hypersurface à quatre dimensions, où se mélangent l'espace et le temps.

Les idées évoquées dans les pages précédentes correspondent chacune à une présentation différente de cette ENTITÉ-UNIVERS qu'est L'ESPACE-TEMPS.

l'Univers.....
quelle FORME
a-t-il ?

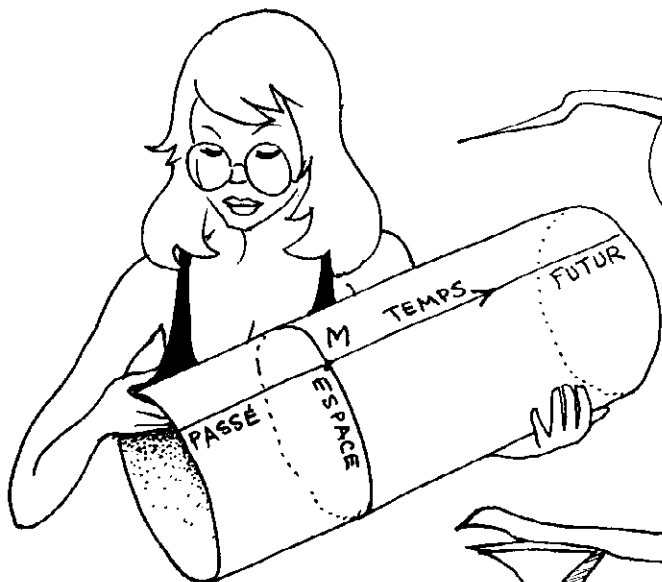
misère...

on rappelle que le nombre de dimensions d'un espace est le nombre de quantités qu'il faut se donner pour y définir la position d'un point.

Rendez vous ^① mardi à onze heures à l'angle de la ^② Sixième avenue et de la ^③ cinquième rue au ^④ troisième étage : quatre quantités

Par le dessin, on ne peut représenter que des espaces à DEUX dimensions, des SURFACES. Nous allons donc étudier des espace-temps à 2 dimensions, l'une étant la position et l'autre, le temps



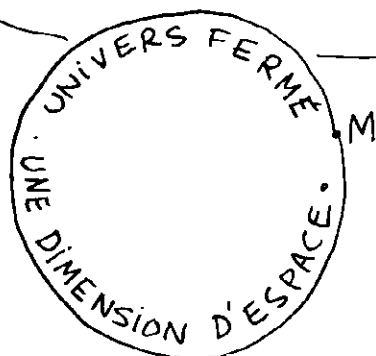


Ainsi le premier modèle d'univers fermé, le modèle statique d'Einstein peut-il se représenter selon un cylindre

Attendez, si je comprends bien, ce cylindre, nous sommes... dedans ?

non, dessus !

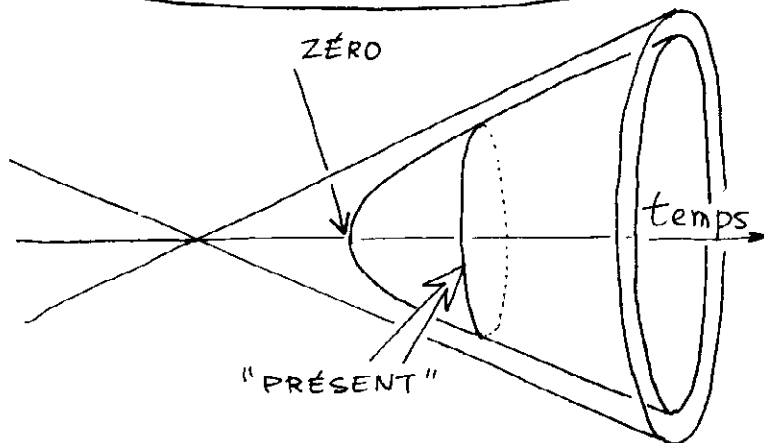
À un instant donné, un objet est ce point M sur la surface, et l'ensemble de l'univers se réduit à ce cercle

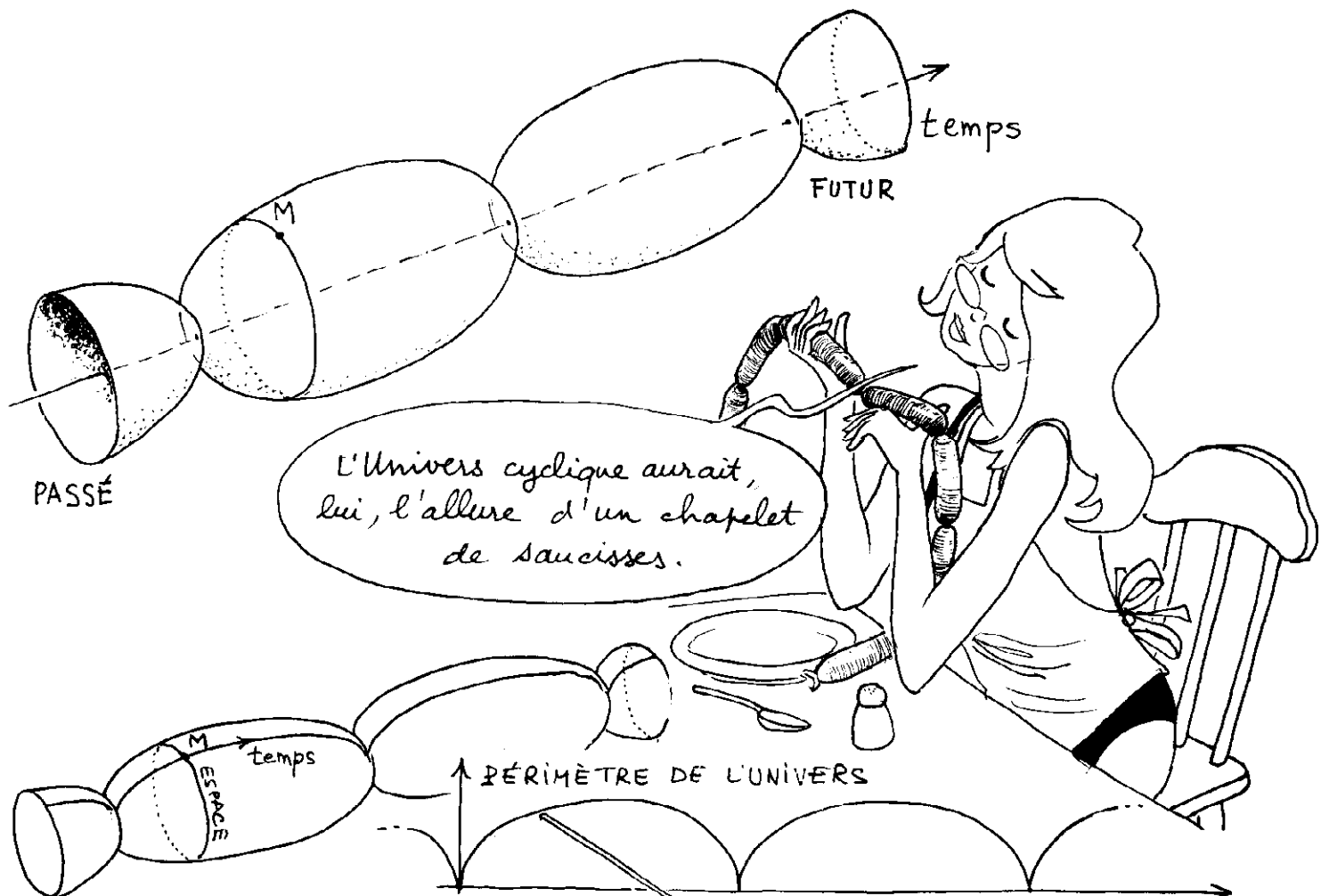


lorsque l'objet est immobile il décrit une génératrice du cylindre, au cours du temps

Il est facile de représenter la dilatation de cet univers fermé en fonction du temps, ce qui donne un modèle d'univers instationnaire.

Voici par exemple l'image à 2 dimensions d'un espace-temps en expansion indéfinie



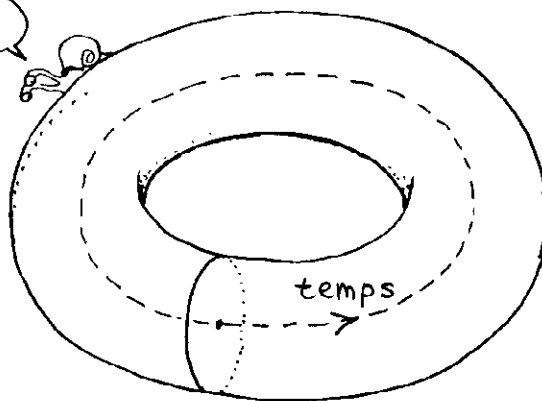


Mais, au fait, pourquoi le temps serait-il nécessairement "OUVERT", c'est-à-dire infini à la fois vers le futur et vers le passé?



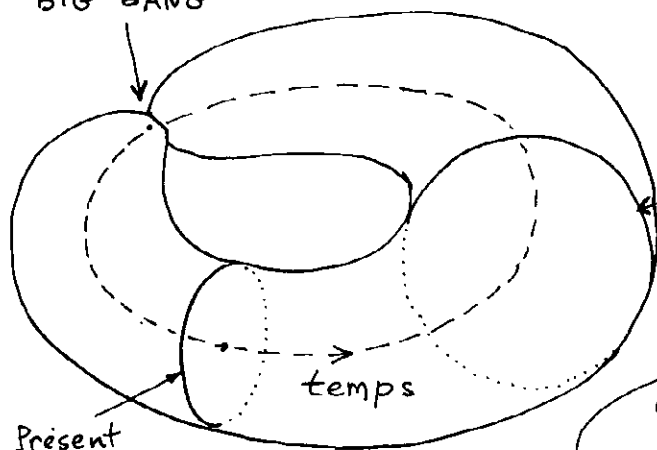
Aucun problème...
si on refermait sur lui-même
le modèle d'Einstein, on
obtiendrait... un TORE

Encore!...



Dans cet ESPACE-TEMPS totalement fermé, les mêmes
événements se reproduisent identiquement au bout d'un
temps T qui est la PÉRIODE de cet étrange univers.

SINGULARITÉ
BIG BANG



on peut aussi boucler sur
lui-même un univers cyclique.

ÉTAT D'EXPANSION
MAXIMALE

Présent

ça devient un chapelet de saucisses, fermé
sur lui-même, avec une seule saucisse!

oh, regardez Léon !!!

Hé a craqué
c'était prévisible...



ÉPILOGUE

Voilà ce qu'on sait sur
le début de l'Univers



Enfin... ce qu'on
CROIT SAVOIR. Ça a changé
de si nombreuses fois
depuis 5000 ans!

" Mais cet effort consenti pour
comprendre l'Univers est l'une
des rares choses qui élèvent la
vie humaine au-dessus de la farce
en lui conférant un peu de
dignité dans la tragédie "

Steven Weinberg

La suite du BIG BANG (formation des
galaxies, des étoiles, etc...)
dans MILLE SOLEILS

FIN

LE COSMODRAME



TEMPS	TEMPÉRATURE	DENSITÉ	PHÉNOMÈNES
AVANT ...	$T \geq 10^{12}$ degrés		?
$\frac{1}{1000}$ e seconde	300 milliards de degrés		SOUPE INDIFFÉRENCIÉE DE PHOTONS, DE NEUTRINOS, D'ANTI-NEUTRINOS (LE PHOTON EST SA PROPRE ANTIPARTICULE.), DE PROTONS, D'ANTI-PROTONS, DE NEUTRONS, D'ANTI-NEUTRONS D'ÉLECTRONS ET D'ANTI-ÉLECTRONS (POSITRONS)
$\frac{1}{100}$ e seconde	100 milliards de degrés	4 milliards de g/cm ³	HÉCATOMBE DE HADRONS (PROTONS, ANTI-PROTONS, NEUTRONS, ANTI-NEUTRONS.) - IL EN RESTERA UN SUR UN MILLIARD. LE RESTE S'EST ANNIHILÉ AVEC LES ANTI-HADRONS PRÉSENTS, POUR REDONNER DES PHOTONS.
$\frac{1}{10}$ e seconde	30 milliards de degrés		RIEN À SIGNALER. TROP CHAUD POUR QUE DES NOYAUX D'ATOMES SE FORMENT.
1 seconde	10 milliards de degrés	380 000 g/cm ³	LES NEUTRINOS "VIVENT LEUR VIE". ILS CESSENT D'INTERAGIR AVEC LA MATIÈRE.
13 secondes	3 milliards de degrés		HÉCATOMBE ÉLECTRONS-ANTIÉLECTRONS. IL EN RESTERA, LÀ-AUSI, UN SUR UN MILLIARD
3 minutes	1 milliard de degrés		NUCLÉOSYNTHESE: FORMATION DES NOYAUX D'HÉLIUM. DISPARITION DES NEUTRONS LIBRES (DURÉE DE VIE: 109 secondes)
35 minutes	300 millions de degrés	1 g/cm ³	LA NUCLÉOSYNTHESE EST ACHÉVÉE: 25% D'HÉLIUM, 75% D'HYDROGÈNE.
400 000 ANS	3000 degrés		APRÈS ANNIHILATION DE PRESQUE TOUTE LA MATIÈRE ET ANTI-MATIÈRE, L'UNIVERS VIT UNE "ÈRE RADIATIVE", OÙ L'ÉNERGIE-MATIÈRE SE TROUVE PRINCIPALEMENT SOUS FORME DE RAYONNEMENT. QUAND LA TEMPÉRATURE DESCEND À 3000°, LES ATOMES NEUTRES SE FORMENT, ET LES PHOTONS CESSENT D'INTERAGIR AVEC LA MATIÈRE: UNIVERS "TRANSPARENT"
100 millions d'années	TR = -173° C TM = -267° C		N'ÉTANT PLUS RÉCHAUFFÉS PAR LES PHOTONS, LES ATOMES NEUTRES D'HYDROGÈNE ET D'HÉLIUM ONT VU LEUR TEMPÉRATURE CHUTER EN FLÈCHE. FORMATION DES GALAXIES, PREMIÈRES ÉTOILES
5 milliards d'années			FORMATION DE LA TERRE
10 milliards d'années	TR = -270° C (3 degrés kelvin)	10 ⁻³⁰ g/cm ³	DÉVELOPPEMENT DE LA VIE.
AUJOURD'HUI			INVENTION DE LA BOMBE ATOMIQUE...

