

À LA RECHERCHE DE LA MATIÈRE PERDUE*

J.-M. Gérard

Institut de Physique Théorique,

Université catholique de Louvain, 1348 Louvain-la-Neuve

* Thème de la Chaire Francqui au titre belge 2004-2005

Abstract

Recent observations carried out using increasingly powerful telescopes reveal that our representation of the Universe is far from being complete : 95% of the Cosmos would consist of substances other than the matter made of our good old atoms. Taking as discussion thread our Sun and asking about it some elementary but vital questions, we set out in search of short-lived matter, dark matter and dark energy. These exotic substances would respectively determine the past, the present and the future of our Universe...

Introduction

2005 a été déclarée « Année Internationale de la Physique » par l'UNESCO. L'objectif est de promouvoir cette discipline souvent mal appréciée de nos jours, mais qui, faut-il le rappeler, joua et joue un rôle essentiel non seulement dans le développement de la technologie moderne, mais aussi dans le progrès de la chimie, de la biologie et de la géographie... Nous commémorons en fait l'année « miraculeuse » **1905** de celui qui fut récemment désigné « Homme du XX^e siècle » par le magazine Time ! En quelques mois cette année-là, Albert Einstein :

- établit la nature quantique de la lumière (18 mars, théorie de l'effet photoélectrique) ;
- propose un moyen de prouver définitivement la réalité des atomes (11 mai, théorie du mouvement brownien) ;
- bouleverse notre conception de l'espace-temps (30 juin, théorie de la relativité restreinte) ;

et, cerise sur le gâteau,

- relie l'inertie d'un corps à son contenu en énergie dans la formule la plus célèbre de la physique (27 septembre).

Ces quatre contributions majeures publiées dans les prestigieuses « *Annalen der Physik* »¹ reposent d'une part sur des observations simples : (la danse chaotique de grains de pollen en suspension dans l'eau observée par le botaniste Robert Brown en **1827**,...) et, d'autre part, sur une cohérence mathématique naturelle (constance de la vitesse de la lumière dans tout référentiel inertiel,...).

Aujourd'hui, des observations basées sur des télescopes ultra-sensibles suggèrent que la destinée de notre Univers résulterait de la lutte impitoyable opposant une matière sombre attractive et une énergie sombre répulsive. Toute description mathématique cohérente de ce combat qui remonte à la « nuit des temps » requiert à la fois une théorie quantique des champs (\hbar, c) qui régit le monde subatomique et une théorie relativiste de la gravitation (c, G) qui gouverne le Cosmos.

En fait, la confrontation directe de ces deux cadres théoriques établis par Einstein mène invariablement à des *questions générales* sur la nature de la théorie ultime, l'origine du temps, les frontières de l'espace, l'unicité de l'Univers,... qui ne donnent jusqu'à présent que des *réponses* scientifiques très *limitées*. Nous allons plutôt adopter la démarche inverse qui consiste à poser des *questions limitées* dans l'espoir de trouver des *réponses suffisamment générales*...

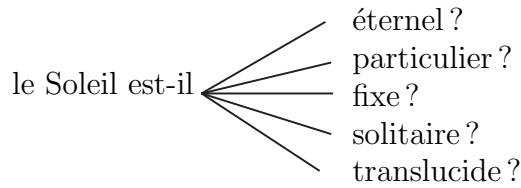
Cet exposé évitera donc les aspects *mathématiques* sophistiqués inhérents à notre discipline.

Par ailleurs, il ne se veut pas non plus *historique*, bien qu'il soit parfois utile de rappeler que, lors de ces 400 dernières années, c'est-à-dire depuis Galilée, nous avons construit une science passionnante en réfléchissant bien souvent à de petits problèmes que nous avons une chance, a priori, de résoudre ! Nous verrons ainsi que des mesures simples de conductivité et de signaux radio ont permis la découverte de nouveaux mondes, jusque là invisibles.

Je vais donc prendre comme *fil conducteur* un objet qui nous est très familier et poser

¹Pour une traduction française, voir le numéro spécial de *Physicalia Magazine*, vol. 27, nr. 1 (Mars 2005).

à son sujet *cinq questions limitées* :



Les cinq réponses nous mèneront à la découverte de cinq substances de nature différente, à savoir

- la matière ordinaire,
- l’anti-matière,
- la matière extraordinaire,
- la matière sombre,
- l’énergie sombre.

Je me permettrai également quelques références au tableau de Mendeleev qui a survécu et mûri lors des révolutions conceptuelles initiées par Einstein durant l’« annus mirabilis », à savoir la relativité et la mécanique quantique.

Partons précisément de ce tableau périodique génial pour répondre à la première question.

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS																													
1 IA											13 IIIA	14 IVA	15 VA	16 VIA	17 VIIA	18 VIIIA													
1 H Hydrogen 1.00794											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797													
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182											11 Na Sodium 22.989770	12 Mg Magnesium 24.3050											13 Al Aluminum 26.981538	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosph. 30.973761	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955910	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938049	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933200	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge German. 72.61	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80												
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybd. 95.94	43 Tc Technet. (97.907215)	44 Ru Ruthen. 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29												
55 Cs Cesium 132.90545	56 Ba Barium 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.078	79 Au Gold 196.96655	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98038	84 Po Polonium (208.982415)	85 At Astatine (209.987131)	86 Rn Radon (222.017570)												
87 Fr Francium (223.019731)	88 Ra Radium (226.025402)	89-103 Actinides	104 Rf Rutherford. (261.1089)	105 Db Dubnium (262.1144)	106 Sg Seaborg. (263.1186)	107 Bh Bohrium (262.1231)	108 Hs Hassium (265.1306)	109 Mt Meitner. (266.1378)	110 Ds Darmstadt. (269.271)	111 [272]																			

Lanthanide series	57 La Lanthan. 138.9055	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodym. 140.90765	60 Nd Neodym. 144.24	61 Pm Prometh. (144.912745)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolin. 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dyspros. 162.50	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
Actinide series	89 Ac Actinium (227.027747)	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactin. 231.03588	92 U Uranium 238.0289	93 Np Neptunium (237.048186)	94 Pu Plutonium (244.064197)	95 Am Americ. (243.061372)	96 Cm Curium (247.070346)	97 Bk Berkelium (247.070298)	98 Cf Californ. (251.079579)	99 Es Einstein. (252.08297)	100 Fm Fermium (257.095096)	101 Md Mendelev. (258.098427)	102 No Nobelium (259.1011)	103 Lr Lawrenc. (262.1098)

1. Le Soleil brille

Les 92 premiers *éléments chimiques* du tableau périodique de Mendeleev (**1869**) sont naturels, c'est-à-dire observés sur Terre (une exception étant l'élément 43 : le technétium, comme son nom l'indique, fut produit artificiellement en **1937** en bombardant du molybdène avec des deutérons accélérés). En particulier, les éléments tels que le carbone, l'azote et l'oxygène sont intimement liés au monde végétal tandis que le silicium et le fer sont présents au niveau minéral.

Il y a plus de cent ans (**1897**), J.J. Thomson découvrait selon ses propres termes « la substance à partir de laquelle les éléments chimiques sont construits », à savoir l'*électron*. Cette découverte majeure confirmait ainsi l'hypothèse des atomes bien avant la preuve de leur existence (Einstein, **1905_b**), mais démontrait par la même occasion que ceux-ci ne pouvaient être les constituants indivisibles de la *matière ordinaire*...

Un atome est en effet constitué d'un noyau central autour duquel « gravitent » des électrons. Ce noyau est lui-même constitué de *protons* et de *neutrons*, de telle sorte que la périodicité des propriétés chimiques (lignes horizontales) mise en évidence par Mendeleev ne dépend pas de la masse atomique relative A_r , proche mais différente du nombre de nucléons car la masse n'est pas additive. Cette périodicité est en fait déterminée par le nombre atomique Z , égal au nombre de protons car les atomes sont électriquement neutres. Ceci entraînera une réorganisation de quelques éléments tels que

$$\left[\begin{array}{ll} \text{iode : } A_r = 126.9 & Z = 53 \\ \text{tellure : } A_r = 127.6 & Z = 52 \end{array} \right.$$

Les noyaux n'étant pas élémentaires, ils ont une certaine taille. Si nous les identifions à une balle de tennis (5 cm), alors les électrons se « situent » à une distance de 5 km.

Le tableau des éléments chimiques s'explique donc en termes de trois particules :

le proton

le neutron

l'électron

qui semblent constituer ainsi l'ensemble de la matière ordinaire nous entourant...

Cependant, notre existence dépend crucialement du Soleil qui rend possible la photosynthèse et autorise en fin de compte toute structure organisée sur Terre, en accord avec le deuxième principe de la thermodynamique (augmentation inexorable de l'entropie avec

le temps). Mais d'où tire-t-il son énergie qui s'avère, comme nous allons le voir, colossale ? En plein jour sur Terre, sa luminosité apparente est quasi équivalente à l'éclairage d'une lampe de mille watts par mètre carré :

$$\ell_{\odot} \sim 1.4 \cdot 10^3 W/m^2.$$

Mais nous ne sommes pas des êtres privilégiés (Copernic). Par conséquent le Soleil émet de l'énergie dans toutes les directions de telle sorte que la luminosité totale vaut

$$L_{\odot} = 4\pi r_{TS}^2 \ell_{\odot} \sim 4 \cdot 10^{26} W (J/s).$$

La distance Terre-Soleil ($r_{TS} \approx 150$ millions de kilomètres) définit habituellement l'unité astronomique (UA) de distance. Elle est cependant équivalente à environ 8 minutes-lumière. Ces dernières unités cosmologiques nous rappellent, si besoin en est, que voir loin dans l'espace est équivalent à voir tôt dans le temps... car la vitesse de la lumière c est une constante universelle (Einstein, **1905_c**).

Connaissant la consommation d'énergie par unité de temps (L_{\odot}), nous pouvons en principe calculer la durée de vie (τ_{\odot}) à condition bien entendu de connaître l'énergie totale E disponible :

$$E \approx L_{\odot} \tau_{\odot}.$$

Une première estimation de la durée de vie du Soleil fut avancée par Kelvin à la fin du XIX^e siècle. Se basant sur l'hypothèse d'une énergie d'origine purement gravitationnelle (force de Newton attractive!), il obtient

$$\tau_{\odot}^{\min} \simeq 30 \text{ millions d'années}$$

soit un facteur 10 de suppression par rapport à l'estimation avancée par Darwin sur base de l'érosion observée dans une grande vallée (« The Weald ») située au sud de l'Angleterre. Ce résultat suscite une vive polémique entre Kelvin et les défenseurs de la « Théorie de l'évolution » (**1859**). L'âge du Soleil et l'origine de son énergie étaient donc déjà des questions vitales non seulement pour les *physiciens*, mais également pour les *géologues* et les *biologistes*!

Aujourd'hui, nous devons reconnaître que Kelvin avait tort. En effet, l'analyse de la concentration en uranium et en plomb dans les météorites montre que notre système solaire a environ 4.6 milliards d'années d'âge. Où était donc l'erreur dans l'argument de Kelvin ?

En fait l'origine de l'énergie solaire n'est pas gravitationnelle mais essentiellement nucléaire! La fameuse équation (Einstein 1905_d)

$$E_0 = mc^2$$

offre ainsi la possibilité d'avoir une grande quantité d'énergie en convertissant une petite quantité de masse. Supposons un instant que toute la masse du Soleil ($m_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ kg) puisse être transformée en énergie. Nous obtenons dans ce cas une énergie totale de l'ordre de $2 \cdot 10^{47}$ Joules, c'est-à-dire une durée de vie théorique maximale d'environ

$$\tau_{\odot}^{\max} \approx 15 \cdot 10^{12} \text{ années.}$$

La valeur numérique minimale avancée par Kelvin s'explique alors aisément. En effet, l'énergie gravitationnelle est liée à l'énergie de masse par

$$E_{gr} \simeq \frac{Gm_{\odot}^2}{r_{\odot}} = \frac{Gm_{\odot}}{r_{\odot}c^2} E_0.$$

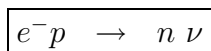
Cette relation fait intervenir le rayon fictif ($\frac{2Gm_{\odot}}{c^2} = 3$ km) en-dessous duquel le Soleil serait un trou noir d'où ne pourraient s'échapper les grains de lumière et son rayon réel ($r_{\odot} = 700.000$ km) qui l'empêcherait de passer entre la Terre et la Lune.

En réalité, une conversion totale de la masse en énergie est irréalisable et la gravitation joue un rôle important. Il n'est donc pas étonnant de trouver une valeur intermédiaire :

$$\tau_{\odot} \simeq 10 \text{ milliards d'années.}$$

Examinons brièvement les raisons de cette suppression d'un facteur mille par rapport à la durée de vie maximale estimée ci-dessus.

D'une part, « brûler » du carburant signifie, dans le cas du Soleil, transformer de l'hydrogène constitué d'un proton en hélium constitué de deux protons et deux neutrons. Cette transmutation thermonucléaire permet en principe de convertir 0.7% de sa masse en énergie car 4 atomes d'hydrogène ($A_r = 1.008$) « pèsent » plus lourd qu'un atome d'hélium ($A_r = 4.003$). Ce processus de nucléosynthèse demande cependant la conversion de protons ($Q = +1$) en neutrons ($Q = 0$). Schématiquement ceci est possible grâce à la réaction suivante :



la présence de l'électron étant nécessaire pour la conservation de la charge électrique Q , celle du *neutrino* étant alors indispensable pour la conservation de la quantité de mouvement.

Au grand dam de certains philosophes, les neutrinos sont donc des particules tout-à-fait ordinaires. De fait ils arrivent en abondance sur Terre, environ 100 milliards par cm^2 et par seconde, de jour comme de nuit ! Leur détection est cependant très difficile car ils sont neutres et de très petite masse. La question simple que nous nous étions posée mène donc à la conclusion que la matière ordinaire est constituée

	de protons	$(Q = +1)$
	de neutrons	$(Q = 0)$
	d'électrons	$(Q = -1)$
ET	de neutrinos	$(Q = 0)$

D'autre part, « brûler » tout l'hydrogène contenu dans le Soleil s'avère impossible car une lutte acharnée entre la *pression gravitationnelle* et la *pression thermique* va s'établir au cours du temps. Dans 4.8 milliards d'années, les réserves centrales d'hydrogène seront pratiquement épuisées et le cœur du Soleil ne contiendra plus que de l'hélium. Il s'en suivra alors un effondrement gravitationnel qui va provoquer des hausses de la température. L'augmentation de la température centrale va finalement permettre la fusion de l'hélium en éléments plus lourds, tout en dilatant les couches périphériques d'hydrogène refroidies à 3000 K, grillant ainsi la Terre au passage. Le Soleil sera une *géante rouge* incapable de générer des températures nécessaires pour fusionner le carbone. Il va dès lors se recontracter pour prendre l'aspect d'une *naine blanche* de la taille de la Terre, mais de densité un million de fois celle de la matière ordinaire. Une fois sa chaleur dissipée dans l'espace, le cœur se refroidira graduellement pour finalement devenir un corps sombre et inerte dont la masse n'excèdera plus $0.6m_{\odot}$.

Voyons maintenant comment notre Soleil aurait pu avoir une fin plus glorieuse en répondant à la seconde question...

2. Le Soleil est une étoile

Que se passerait-il si le Soleil était dix fois plus massif au départ, si la fusion thermonucléaire pouvait continuer au-delà du carbone, jusqu'au fer ? Aujourd'hui nous pouvons répondre à cette question car le Soleil n'est après tout qu'une étoile ordinaire parmi des milliards de milliards d'étoiles. La durée de vie moyenne τ_* de ces étoiles symbolisées par

* doit être semblable à celle du Soleil sinon notre ciel serait aussi éblouissant (et chaud) que la surface du Soleil, même la nuit ! En effet, toute droite imaginaire partant de notre œil aboutirait nécessairement sur l'une d'entre elles et une lumière stellaire de même nature que celle du Soleil nous parviendrait ainsi de tout point du Ciel. Or nous observons une nuit noire (et froide) ! En fait, la lumière des étoiles lointaines ne nous a pas encore atteints car un horizon de taille $c\tau_*$ résulte du caractère fini de la vitesse de la lumière.

Restreignons-nous aux étoiles proches, i.e. appartenant à la Voie Lactée. Cette dernière, vue de l'extérieur, a la forme d'une galaxie spirale typique de 100.000 années-lumière de diamètre. Les étoiles sont cependant concentrées dans le bulbe central qui fait quant à lui environ 25.000 années-lumière de diamètre. Si nous prenons la distance entre le Soleil et Proxima du Centaure (4 années-lumière) comme distance caractéristique entre deux étoiles, nous obtenons que le nombre d'étoiles hébergées vaut approximativement

$$N_*^{VL} \sim \left(\frac{25.000 \text{ a.l.}}{4 \text{ a.l.}} \right)^3 \sim 200 \text{ milliards.}$$

S'il devait en dénombrer un milliard, un homme y passerait trente-trois années de sa vie, quasiment la moitié de son existence. Ce nombre astronomique d'étoiles implique une moyenne de deux « supernovae » par siècle dans notre galaxie. Ces bombes thermonucléaires naturelles sont la conséquence irrémédiable de la victoire finale de la gravitation. En l'absence de la pression thermique qui régit la matière chaude dans les étoiles ordinaires, seuls des électrons « agoraphobes » peuvent éventuellement contrecarrer la pression gravitationnelle. Mais si celle-ci s'avère trop forte, les électrons préfèrent (dans un geste désespéré pour sauver le principe d'exclusion de Pauli) se jeter sur les protons et produire des neutrons et des neutrinos : $e^-p \rightarrow n\nu$. Ces derniers s'échappent alors, laissant derrière eux une boule de neutrons également agoraphobes. Nous passons ainsi brutalement d'une structure atomique à une structure nucléaire, soit un changement d'échelle par un facteur 100.000 (souvenez-vous de la balle de tennis...). Cet effondrement provoque une onde de choc qui rebondit sur le cœur de neutrons avant de disloquer complètement l'enveloppe de l'étoile quelques heures plus tard. La lueur de cette boule de feu en expansion atteint un éclat maximum puis décline. Les éléments lourds nucléosynthétisés durant des milliards d'années vont alors essaimer, faisant ainsi de tout homme un « fils d'étoiles »...

Trois événements supernova proches de nous vont confirmer ce scénario menant à la formation d'étoiles à neutrons. Le premier date de **1054** : observé par des astronomes

chinois, il permet la découverte en **1968** d'une étoile pulsante au centre géométrique de la nébuleuse du Crabe située à 6.000 années-lumière de nous. Ce pulsar résulte de l'accroissement par un facteur 10^{10} du champ magnétique et de la vitesse de rotation intrinsèques lors de l'effondrement (tous deux étant inversement proportionnels au carré du rayon, par conservation des lignes d'induction et du moment angulaire respectivement). En effet, pour une étoile massive ayant au départ les caractéristiques du Soleil, à savoir un rayon de 700.000 km, un champ magnétique de 1 Gauss et une période de rotation de 25 jours, l'étoile à neutrons résultante dont la masse est concentrée sur une dizaine de kilomètres acquiert un champ de 10^{10} Gauss et une période inférieure à la milliseconde ! Ce champ magnétique intense accélère des particules chargées qui vont alors rayonner dans la direction de l'axe magnétique. Si ce dernier ne coïncide pas avec l'axe de rotation (cfr. notre Terre), seules des ondes radio courtes vont nous parvenir de ce véritable phare de l'espace.

Le second, observé par Kepler en **1604**, nous permet de reconstruire et d'analyser sa courbe de luminosité caractéristique. Le 28 octobre, soit trois semaines après sa première détection à l'œil nu, la supernova paraît plus brillante que Jupiter. Ensuite, sa luminosité va progressivement décroître pour être définitivement perdue de vue le 7 octobre **1605**, c'est-à-dire 4 ans avant l'avènement de la lunette de Galilée.

Nous avons eu beaucoup plus de chance avec le dernier observé en **1987** dans la périphérie de la Voie Lactée, c'est-à-dire dans le Grand Nuage de Magellan (~ 160.000 années-lumière). En effet, émise alors que nous nous battions encore à coups de gourdins, une bouffée de neutrinos furtifs (signes avant-coureurs de la supernova) est détectée dans un laboratoire japonais dont la mise en service datait de quelques mois seulement ! Une nouvelle fois l'existence des neutrinos s'avère cruciale pour la vie humaine... justifiant par là leur appartenance à la matière ordinaire, au même titre que l'électron !

Ces événements spectaculaires qui rapprochent l'astrophysique de la physique des particules vont nous apporter d'autres surprises. Véritables accélérateurs naturels, grâce à leurs ondes de choc en expansion, ils propulsent des protons très stables à travers l'espace, avec des énergies pouvant atteindre 10 milliards de giga-electronvolts (10^{10} GeV) !

Ces protons entrent finalement en collision avec la matière ordinaire de notre atmosphère pour produire des gerbes de rayonnements cosmiques. L'analyse de ces rayonnements dans les années '30 va bouleverser notre vision de la matière et mener à une véritable théorie de celle-ci.

Il est peut-être bon ici de rappeler que la découverte des rayons cosmiques illustre parfaitement le fait que des progrès inimaginables peuvent émerger de questions simples (voir Introduction). C'est ainsi que Victor Hess découvrit accidentellement ces radiations d'origine extra-terrestre en **1912**, en observant que la décharge d'un électroscope devenait plus rapide lorsqu'on s'élevait en ballon.

Aujourd'hui ces agents ionisants polluent à ce point la vie courante qu'ils furent même invoqués par des experts pour expliquer comment un candidat avait pu obtenir plus de voix de préférence que le nombre total de voix de sa liste lors des élections de **2003**...

Mais revenons à nos accélérateurs naturels que sont les supernovae! Ceux-ci vont nous révéler coup sur coup un monde «miroir», avec la découverte de l'anti-électron (e^+) ou positron (**1933**), et un monde «étrange», avec la découverte du muon μ^- (**1937**). Ces mondes *éphémères* allaient par la suite être sondés à l'aide d'accélérateurs artificiels permettant ainsi le passage de l'observation aléatoire à l'expérimentation systématique avec, entre autre, la découverte de l'anti-proton dès **1955**. Durant les cinquante années suivantes, des accélérateurs proton-proton, électron-positron (LEP) et proton-antiproton (TEVATRON) allaient balayer un domaine d'énergie allant d'un GeV à mille GeV's. Ils révélaient ainsi une structure de la matière totalement inattendue qui forme à présent ce qui est appelé la «théorie standard» de la matière. Cette théorie va s'établir en deux étapes.

D'une part, les nucléons s'avèrent être eux-mêmes constitués de particules plus élémentaires, les quarks u et d : le proton est composé de deux quarks u et d'un quark d tandis que le neutron est composé de deux quarks d et d'un quark u . Le fait que les atomes soient neutres nécessite que la charge électrique Q de ces quarks soit respectivement $+2/3$ et $-1/3$. Quatre particules, 2 quarks et 2 leptons (l'électron et le neutrino), suffisent donc pour construire toute forme de matière ordinaire :

$$\boxed{\boxed{u \quad d \quad e^- \quad \nu_e}}$$

Parallèlement, quatre anti-particules, de masse identique mais de charge opposée,

$$\boxed{\boxed{\bar{u} \quad \bar{d} \quad e^+ \quad \bar{\nu}_e}}$$

sont les briques de l'antimatière qui ne peut survivre dans notre monde hostile. Aussitôt synthétisés (CERN, **1995**), les atomes d'anti-hydrogène disparaissent dans un éclair de

pure énergie. Les anti-électrons (e^+) permettent néanmoins une imagerie médicale efficace pour la détection de certains cancers, grâce à la technique de Tomographie par Emission de Positrons (« TEP »). Un radiopharmaceutique émetteur de positrons est administré au patient. Une fois émis, ceux-ci s'annihilent rapidement avec les électrons du corps pour libérer deux photons. La détection de ces derniers permet de localiser très précisément le point d'annihilation, c'est-à-dire la position exacte du radiopharmaceutique. De même, la détection récente (**2005**) d'anti-neutrinos ($\bar{\nu}_e$) émis par l'uranium et le thorium naturels pourrait d'ici peu fournir une image tomographique de l'intérieur de la Terre et ouvrir ainsi un nouveau domaine de la géophysique.

D'autre part, une seconde, puis une troisième *génération*, toutes deux en apparence futiles, surgissent du néant pour compléter un nouveau tableau périodique de la matière ordinaire (I) et extraordinaire (II, III) :

	+2/3	-1/3	-1	0
I	u	d	e^-	ν_e
II	c	s	μ^-	ν_μ
III	t	b	τ^-	ν_τ

Constitué de quatre familles (verticales) se distinguant par leur charge électrique Q , ce tableau très symétrique est l'aboutissement de plus d'un siècle d'efforts (**1897** → **2000**) tant au niveau expérimental qu'au niveau théorique. En effet, sa périodicité au sein d'une génération (horizontale) est requise par la théorie quantique des champs qui établit une connexion très étroite entre quarks et leptons : les quarks apparaissent chacun sous trois types différents (charge « chromatique ») de telle sorte que la somme des charges électriques Q (+2/3, -1/3, -1, 0) portées par les membres d'une même génération est nulle. Cette connexion a permis de prédire l'existence et les propriétés du quark t et du neutrino ν_τ , tout comme Mendeleev avait pu prédire l'existence et les propriétés de nouveaux éléments chimiques tels que le gallium ou le germanium, bien avant leur découverte en laboratoire. Elle mènera en fin de compte aux théories de Grande Unification des interactions électromagnétique et nucléaires. Ces théories prédisent une instabilité relative du proton via une transmutation de quarks en leptons ($ud \rightarrow \bar{u}e^+$) conservant de nouveau la charge électrique...

L'analogie avec le tableau de Mendeleev semble cependant s'arrêter à ce niveau car vous pouvez en principe empiler des protons et des neutrons en nombre quelconque

($Z=110$ pour l'instant) pour obtenir de nouveaux noyaux. (Finalement ceux-ci deviennent instables, mais ceci est une autre histoire). Autrement dit, des états liés apparaissent généralement en nombres infinis. Bien sûr, le quark t est pratiquement aussi lourd qu'un atome d'or, mais des mesures de haute précision suggèrent que les quarks et leptons n'ont pas de structure et que le tableau des particules élémentaires est complet.

Nous sommes donc en présence de la première théorie *cohérente* de la matière! Selon cette théorie, le fait que l'électron est important dans la vie quotidienne (électricité, télévision, . . .) reflète simplement le fait qu'il est le plus léger de la famille $Q = -1$ des leptons et qu'il est par conséquent stable grâce à la conservation de la charge. Le muon, produit par le rayonnement cosmique, a une masse environ 200 fois plus grande que l'électron et peut se transformer en ce dernier après seulement un millionième de seconde (10^{-6} s.). Le lepton τ de la troisième génération, créé en laboratoire, est encore 20 fois plus lourd et s'esquive quant à lui en moins d'un mille milliardième de seconde (10^{-12} s.). En d'autres termes, *la matière extraordinaire disparaît en raison de sa masse élevée*

$$M_{III} \gg M_{II} \gg M_I.$$

Mais pourquoi précisément trois générations? Le lepton τ se désintègre en électron soit directement, soit via le muon. De manière générale, la hiérarchie de masse entre les membres d'une même famille autorise les transitions

$$\begin{array}{ccc} III & \rightarrow & I \\ & \searrow & \nearrow \\ & & II \end{array}$$

Cette alternative nous indique en fait la voie très subtile (que nous ne pouvons développer ici) à suivre pour comprendre de manière dynamique pourquoi notre monde présent est dominé par la matière et non par l'anti-matière, par le yin et non par le yang, alors qu'elles coexistaient en quantités égales aux premiers instants de l'Univers. Il est en effet possible que pour chaque milliard d'antiparticules, une particule ait survécu à l'annihilation. *La disparition de l'anti-matière serait ainsi également sur le point d'être élucidée grâce à la structure en familles*

$$Q_{III} = Q_{II} = Q_I.$$

Revenons une dernière fois sur le tableau de Mendeleev. Celui-ci a été construit à partir des éléments chimiques découverts par des chimistes. Or les éléments découverts par les

chimistes sont des éléments qui ont des réactions chimiques. Par conséquent, Mendeleev ne savait rien sur les gaz rares que sont l'hélium, le néon, l'argon, le krypton, le xenon et le radon. Cette famille (colonne de droite) est dite noble en ce sens que leurs membres restent relativement distants des autres membres ; ils réagissent rarement pour former des composés. Ces éléments inattendus ne furent en effet découverts en laboratoire qu'entre **1894** et **1900**. Mais sans eux, nous n'aurions pas pu deviner ce qui se cachait réellement derrière cette table périodique établie de manière empirique, à savoir l'arrangement des électrons dans la couche externe de l'atome. En particulier, les gaz nobles possèdent tous une couche extérieure complète, en accord avec le caractère agoraphobe des électrons. Faudra-t-il aussi tenir compte d'hypothétiques particules nobles, c'est-à-dire interagissant très peu avec la matière ordinaire, pour enfin comprendre ce qui se cache réellement derrière le tableau actuel des particules élémentaires ? Ce rôle est-il déjà assuré par la famille $Q = 0$ des neutrinos (colonne de droite), ou existe-t-il des particules très massives appelées « WIMPS » (Weakly Interacting Massive Particles) et donc inaccessibles aux accélérateurs tels que le LEP ? Sous la forme de neutrinos lourds, elles pourraient accroître le nombre de générations. Le tableau périodique des briques de la matière (extra-) ordinaire possède-t-il en réalité des cases disponibles pour des découvertes à venir ? Le nouveau collisionneur proton-proton (LHC) en construction au CERN sera capable de répondre à cette question dès **2007**. Disposant d'une énergie de 14.000 GeV, celui-ci devrait également apporter un éclairage nouveau sur ce qui différencie fondamentalement les générations, à savoir le spectre de masse, si la particule de Higgs surgit du vide telle une vague sur l'océan calme...

En attendant, tournons-nous à nouveau vers le Soleil car si le mystère de la matière éphémère est sur le point d'être élucidé, celui associé à la matière sombre s'épaissit...

3. Le Soleil tourne

Le Soleil, une étoile ordinaire située à 30.000 années-lumière du centre de notre galaxie, possède un mouvement de rotation qui l'empêche ainsi de « tomber » sous l'effet attractif de la gravitation. Sa vitesse de rotation $v = \left(\frac{GM}{r}\right)^{1/2} \simeq 220 \text{ km s}^{-1}$ est très simplement déduite de la quantité de matière ($M \sim 10^{31} m_{\odot}$) intercalée. Pour des étoiles

situées à la périphérie de la galaxie spirale, la mécanique de Newton stipule que la vitesse en orbite circulaire décroît avec l'augmentation du rayon. C'est précisément ce qui se passe dans le Système solaire où l'essentiel de la masse est contenu dans le Soleil :

Mercury (0.39 UA)	,	$v \simeq 48 \text{ km s}^{-1}$
Terre (1.00 UA)	,	$v \simeq 30 \text{ km s}^{-1}$
Jupiter (5.20 UA)	,	$v \simeq 13 \text{ km s}^{-1}$
Uranus (19.18 UA)	,	$v \simeq 7 \text{ km s}^{-1}$
Pluton (39.44 UA)	,	$v \simeq 5 \text{ km s}^{-1}$.

La vitesse des étoiles situées dans les bras spiraux devrait également suivre une loi décroissante. Mais il n'en est rien. Les observations montrent en effet que cette vitesse reste quasi constante lorsqu'on s'éloigne du bulbe central. Existe-t-il par conséquent une matière abondante ($\pm 90\%$), non lumineuse, répartie autour de la partie visible de notre galaxie ?

Ce comportement anormal vis-à-vis de la dynamique de Newton avait en fait déjà été mis en exergue au niveau du mouvement des galaxies dans les amas par Zwicky en **1933**, soit l'année pendant laquelle Anderson découvrit l'anti-matière dans le rayonnement cosmique. Autant la communauté des physiciens des particules était prête à reconnaître cette dernière, suite aux travaux géniaux de Dirac, autant elle exprima son grand scepticisme vis-à-vis de l'observation émanant d'une discipline alors considérée comme annexe, où l'on était « souvent dans l'erreur, jamais dans le doute » !

Pourrait-il s'agir d'une violation de la loi de la gravitation de Newton ? La relativité générale d'Einstein qui l'a supplantée est aujourd'hui testée avec une précision remarquable (10^{-5}) grâce à la sonde Cassini (**2004**), lors de son périple très médiatisé vers Saturne et son satellite Titan. Cette théorie relativiste de la gravitation peut expliquer l'anomalie infime ($\sim \frac{v^2}{c^2}$) dans le mouvement orbital de Mercure autour du Soleil, au grand soulagement de son mythique inventeur, mais pas l'anomalie spectaculaire associée à la vitesse orbitale des étoiles à l'échelle galactique. Nous reste alors la possibilité d'une modification de la seconde loi de Newton

$$F = ma \rightsquigarrow F = m \frac{a^2}{a_0}$$

pour des accélérations inférieures à $a_0 = 10^{-10} \text{ ms}^{-2}$. Pour être testée dans notre Système solaire, cette hypothèse nécessiterait l'envoi d'une sonde spatiale à une distance de 10.000

UA alors que Pioneer 10 lancé en **1972** n'est encore qu'à environ 100 UA...

Pourrait-il s'agir de corps compacts (Massive And Compact Halo Objects) tels que des naines blanches (étoiles mortes) ou des Jupiters (étoiles avortées)? Après tout, Le Verrier (et Adams) avaient pu prédire l'existence de Neptune la sombre sur seule base des irrégularités dans le mouvement orbital d'Uranus! Mais de nouveau la relativité générale d'Einstein apporte une réponse négative car des expériences de microlentilles gravitationnelles donnent une limite supérieure de 20% sur l'abondance de ce type de matière sombre macroscopique dans le halo de notre galaxie. La possibilité d'une matière sombre microscopique d'un type inconnu va dès lors attirer toute l'attention des physiciens des particules...

Trois quantités caractérisent une particule de matière (ainsi qu'un trou noir!). Nous avons déjà mentionné deux de celles-ci, à savoir sa charge Q qui la distingue de l'anti-matière et sa masse M qui structure les deux générations de matière extraordinaire. La troisième grandeur intrinsèque est son moment angulaire, ou « spin » demi-entier, cause première de l'agoraphobie déjà invoquée pour la stabilité d'une naine blanche et la noblesse des gaz rares. Dans le cadre de la théorie quantique des champs relativistes, toutes les forces sont également transmises par des particules semblables au photon. Or le messenger des interactions électromagnétiques possède une charge et une masse nulle, mais un spin entier, double de celui des particules constituant la matière.

Le pas suivant dans notre quête d'une grande unification consiste donc naturellement au concept de supersymétrie qui associe à chaque particule de matière une particule d'interaction, et réciproquement. En d'autres termes, nous tentons une unification de la matière et des interactions en les traitant sur le même pied. Par conséquent le photon se voit attribuer un partenaire supersymétrique, le photino. Cette nouvelle particule de matière est appelée de manière plus générique « neutralino » car elle ressemble à un neutrino très lourd tout en étant, par définition, la particule supersymétrique la plus légère. Pour cette raison, elle est stable comme l'électron, se positionne aujourd'hui comme un candidat sérieux au titre de WIMP et constitue un objectif majeur pour les accélérateurs du Fermilab (Tevatron $p\bar{p}$) et du CERN (LHC pp). La découverte d'une telle particule supersymétrique multiplierait par deux le nombre de particules élémentaires car aucune particule connue n'est pour l'instant superpartenaire d'une autre particule connue... En

attendant, la *mise en évidence* de matière sombre dans notre galaxie se poursuit à l'aide de détecteurs plus modestes en taille. . .

Une première méthode, directe, consiste à mesurer l'échauffement (de l'ordre de 10^{-6} degré Kelvin) consécutif au recul des noyaux, ainsi que l'ionisation de la matière sur le chemin parcouru par ce noyau après la collision avec un hypothétique neutralino. Une seconde méthode, indirecte celle-ci, consiste à détecter des photons très énergétiques issus de l'annihilation de deux neutralinos. . .

La supersymétrie reste pour l'instant un concept abstrait né de l'imagination fertile des théoriciens. Cette symétrie maximale pourrait n'avoir de sens qu'à des échelles d'énergie totalement inaccessibles en laboratoire. Elle a cependant permis à deux communautés de se parler. Dorénavant, la physique des particules ne peut plus ignorer le problème de la matière sombre soulevé par l'astrophysique. Cette conclusion va être renforcée par de nouvelles observations et de nouvelles synergies entre la physique des particules, l'astrophysique et la cosmologie. . .

4. Le Soleil est seul

De nombreuses étoiles ont un compagnon et forment ainsi ce que l'on appelle un système binaire. C'est le cas de l'étoile polaire, de Sirius . . . ou du système de Vinéa cher à Yoko Tsuno. Plus sérieusement, un système binaire situé à 16.000 années-lumière a permis la mise en évidence des ondes gravitationnelles se propageant à la vitesse de la lumière, en parfait accord avec la théorie générale de la relativité. Ces ondes peuvent être décrites comme une déformation de la géométrie de l'espace variant dans le temps, un peu à la manière des vagues.

Supposons donc un instant que le Soleil ne soit pas seul. Une fois devenu naine blanche après avoir brûlé son hydrogène et son hélium, il pourrait être réactivé par simple accréation de matière volée à sa compagne massive et atteindre ainsi la masse critique de 1.4 masse solaire. La pression gravitationnelle provoquerait alors une supernova dite de type Ia, n'éjectant que des éléments lourds. Ce phénomène tout-à-fait générique offre donc de véritables « chandelles de l'espace » qui dégagent toujours la même quantité d'énergie

(L_{SN})! Calibrées une fois pour toute, elles permettent en effet une mesure fiable de la distance qui nous sépare d'elles sur seule base de leur luminosité apparente (ℓ_{SN}).

Avec les événements spectaculaires observés en **1006** (durant 3 ans) et en **1572** (durant 18 mois), notre Voie Lactée semble pour l'instant respecter à la lettre la statistique moyenne de deux supernovae de type Ia par galaxie et par millénaire. Nous ne pouvons cependant pas nous permettre d'attendre la prochaine... Heureusement de nouvelles technologies basées sur des télescopes munis de caméra CCD (charge-coupled device) à grand champ permettent de comparer près de 100 images digitalisées, chacune contenant 1000 galaxies lointaines, dans un intervalle de trois semaines. Sur base de quelques centaines de photons heurtant le miroir d'un télescope installé au Chili, une bonne vingtaine de chandelles standards peuvent ainsi être détectées en une seule série d'observations! Aussi lumineuses que la galaxie qui les héberge, pendant cette durée caractéristique de trois semaines, elles vont faire l'effet d'une bombe dans le milieu de la cosmologie en **1998** : les supernovae de type Ia situées à des distances supérieures à 10^9 années-lumière apparaissent systématiquement plus pâles que la théorie ne le prévoyait. En d'autres termes, elles sont plus lointaines que ce qui est attendu d'un Univers homogène dont l'expansion serait progressivement ralentie sous l'effet de la gravitation attractive de Newton

$$F_M = -\frac{GMm}{r^2}.$$

Une nouvelle force répulsive,

$$F_\Lambda = +\frac{\Lambda c^2 m r}{3}$$

déjà introduite par Einstein en **1917** dans l'espoir de maintenir l'Univers statique et puis défendue en vain par Lemaître dans le cadre de sa théorie classique du Big Bang, semble plutôt accélérer la fuite des galaxies lointaines...

Dans le cadre théorique de la relativité générale (Einstein, **1915**), cette force mystérieuse proportionnelle à la fameuse constante cosmologique Λ s'interprète simplement comme un fluide cosmique invisible dont la densité d'énergie reste constante malgré l'expansion adiabatique de l'Univers. Pour le distinguer de la matière M (visible ou sombre) caractérisée quant à elle par une densité qui diminue rapidement avec l'expansion à l'échelle cosmologique (i.e. pour des distances telles que les galaxies ne sont plus que des poussières), ce fluide est naïvement appelé « énergie sombre ». On ne sait en réalité

rien sur sa nature. Mais uniformément répartie dans l'espace, elle déterminerait *in fine* le destin ultime de l'Univers.

L'observation d'une expansion accélérée sur base des supernovae lointaines n'est manifestement pas suffisante pour déterminer de manière univoque ce qui nous intéresse ici, à savoir le contenu en matière dans l'Univers. Accroître simultanément l'abondance en énergie sombre (Λ) répulsive et en matière (M) attractive peut en effet donner la même accélération. Cette ambiguïté va être levée grâce à une mesure *directe* de la géométrie de l'espace qui, selon la relativité générale, dépend uniquement du contenu total en énergie car la gravitation agit aussi bien sur des photons de masse nulle (déflexion de la lumière) que sur des corps compacts (mouvement des planètes). Cette mesure révolutionnaire résulte une fois encore d'une question limitée au départ à la mesure de l'intensité des ondes radio émises par notre galaxie, hors du plan de la Voie Lactée,...

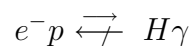
Les premières mesures des radio-astronomes Penzias et Wilson (**1965**) donnent en effet un bruit parasite totalement inattendu. Après avoir minutieusement démonté et nettoyé l'antenne, ils doivent finalement conclure que ce bruit millimétrique totalement isotrope ne peut provenir de la Voie Lactée mais du Cosmos. Ce bruit de fond cosmique nous apporte la preuve irréfutable que l'Univers en expansion fut jadis plus dense et par conséquent plus chaud. Pour bien comprendre ce qui est mesuré aujourd'hui, tournons-nous une dernière fois vers le Soleil.

5. Le Soleil est opaque

Le Soleil est une boule de feu tellement chaude qu'il faut près de 10 millions d'années à un photon pour s'en échapper. Produit au cœur de celui-ci par fusion thermonucléaire, il subit en effet de multiples diffusions et absorptions par des électrons. De ce fait, il perd énormément d'énergie et l'information qu'il apporte sur Terre quelque 8 minutes après ne concerne plus que la physique atomique en action sur les couches externes du Soleil. Ce photon dont l'énergie est alors de l'ordre de l'électronvolt peut provoquer des réactions chimiques essentielles à la vie, telles que la photosynthèse, mais il a tout oublié de la nucléosynthèse qui l'a créé. Autrement dit, nous ne pouvons pas « voir » l'intérieur du Soleil, si ce n'est au moyen des neutrinos furtifs qui eux s'en échappent en moins de deux

secondes !

Il en est de même en ce qui concerne l'Univers primordial. Ce dernier était tellement chaud (et dense) qu'il était constitué de toutes les particules élémentaires dont nous avons parlé jusqu'à présent (matière ordinaire, matière extraordinaire, anti-matière, matière sombre, ...). Naturellement nous ne pouvons pas « voir » ces particules éphémères car il faut attendre 400.000 ans et le refroidissement à 3000 K de cet Univers en expansion rapide pour que les noyaux et les électrons forment des atomes neutres. Les photons γ enfin libérés de la matière ionisée et, en particulier, des électrons :

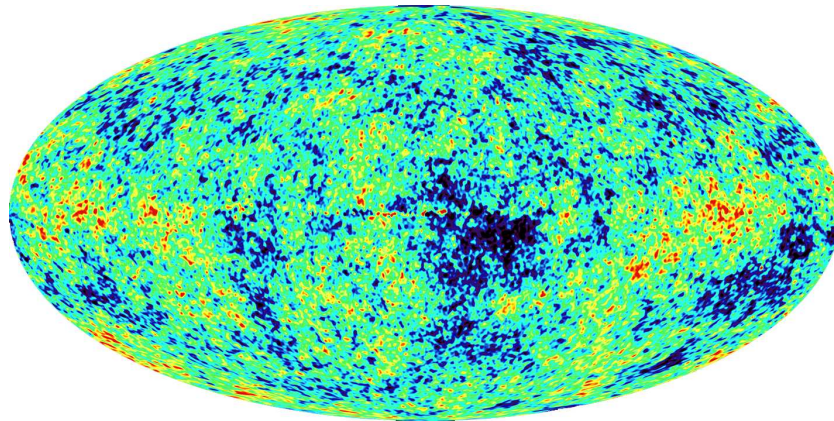


peuvent alors entamer un très long périple de près de 14 milliards d'années. Mais contrairement à ce qui se passe entre le Soleil et la Terre, ce voyage dans un espace en expansion continue les amènera finalement à l'antenne de Penzias et Wilson avec une longueur d'onde étirée en proportion de la taille de l'Univers. La mesure accidentelle d'un signal radio dont la longueur d'onde optimale est de 0.1 cm signifie que la température moyenne de l'Univers présent n'est plus que de 3 K. En effet, l'énergie associée à un photon est inversement proportionnelle à sa longueur d'onde (Einstein **1905_a**) et un photon typique de la lumière émise par la surface du Soleil chauffée à 6000 K possède une longueur d'onde 2.000 fois plus courte, soit 5000 Å. Nous obtenons donc bien une « image radio » et non visible de l'Univers dans sa prime enfance.

Notons au passage une autre différence fondamentale entre l'observation du Soleil (astrophysique) et celle de l'Univers (cosmologie). Ce dernier ne pouvant être observé que de l'intérieur, nous devons travailler avec des préjugés (ou principes), le tout premier étant que l'Univers existe en tant que tel, avec une histoire que nous pouvons comprendre...

Cependant nous disposons aujourd'hui d'une première histoire de l'Univers qui sera toujours d'actualité dans mille ans. En effet, les observations de ce rayonnement « fossile » vont s'améliorer à un point tel que des fluctuations de température de quelques millièmes de degré peuvent à présent être visualisées (en fausses couleurs) sur une projection préservant les aires (K. Mollweide, **1805**). Ces écarts infimes par rapport à un signal isotrope correspondent à de petites variations de densité dans l'Univers alors « âgé » de seulement 400.000 ans, soit un jour par rapport à une vie de 80 années ! Semblables aux taches solaires plus froides, elles sont les germes de futures galaxies qui se formeront ça

et là par condensation gravitationnelle.



La taille *apparente* de chacune de ces taches « causales », ou plus exactement leur ouverture angulaire $\Delta\theta$, va dépendre du chemin le plus « court » (géodésique) suivi par le rayonnement fossile, c'est-à-dire de la géométrie spatiale de l'Univers. Si celui-ci est fermé, telle la surface d'une sphère, les rayons lumineux convergent (à la manière des méridiens terrestres vers le pôle) et les taches nous paraissent plus grosses. Inversément, un Univers ouvert génère des taches qui paraissent plus petites car les rayons lumineux divergent. Les dernières mesures très précises de la sonde WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, **2003**) montrent que le rayonnement fossile s'est déplacé en ligne droite et donc que l'Univers dans son ensemble est « plat », c'est-à-dire obéit aux axiomes bien connus de la géométrie euclidienne. Un calcul trigonométrique élémentaire, tenant compte du fait que l'Univers visible était mille fois plus chaud et donc mille fois plus petit au moment de la perte de contact entre le rayonnement et la matière, donne en effet

$$\Delta\theta \sim \frac{4 \cdot 10^5 \text{ a.l} \times 10^3}{14 \cdot 10^9 \text{ a.l}} \sim 1^\circ$$

en excellent accord avec l'observation.

Si nous combinons ce résultat remarquable avec celui des supernovae, nous obtenons alors un Univers actuellement dominé à **70%** par une énergie sombre mystérieuse. Une étude plus fine de ces fluctuations de température (leurs corrélations) permet également d'extraire le contenu en matière ordinaire, soit **5%**. Ceci entraîne alors que près de **25%** de notre Univers est constitué d'une matière sombre non détectée en laboratoire car la contribution totale des neutrinos légers est quant à elle supérieure à 0.1% mais inférieure à 1.5%.

Les expériences terrestres avaient établi une théorie de la matière (ordinaire, anti et extra) confirmée de manière remarquable par l'accélérateur electron-positron du LEP.

Aujourd'hui, les observations astrophysiques et cosmologiques de plus en plus précises suggèrent une nouvelle révolution copernicienne. Nous attendons dès lors avec une grande impatience le nouveau tandem complémentaire européen LHC + Planck Surveyor pour en savoir plus sur la *nature* de cette énergie sombre qui détermine le destin de notre Univers. Si, en accord avec la relativité générale d'Einstein, l'Univers est dominé par une *énergie du vide* de densité constante alors le futur observationnel s'annonce plutôt morose : dans 100 milliards d'années, toutes les galaxies lointaines auront disparu de notre horizon. Sinon,

- dominé par une *quintessence* dont la densité décroît à mesure que l'Univers s'étend, ce dernier pourra se dévoiler progressivement ;
- dominé par une *énergie fantôme* dont la densité augmente avec le temps, l'Univers subira une hyper-accélération qui pulvérisera toutes les galaxies, la Voie Lactée comprise ...

Conclusion

Énergie du vide, quintessence, énergie fantôme, ... autant d'expressions imagées qui reflètent notre ignorance sur l'origine et la nature du budget énergétique actuel du Cosmos.

Selon l'anthropologue américain Ralph Linton (1893-1953), la dernière chose qu'un poisson pourrait remarquer est l'eau dans laquelle il est toujours plongé. La dernière substance que l'homme pourra identifier sera-t-elle l'énergie sombre dans laquelle il semble immergé ?

[...] Je pose la tasse et me tourne vers mon esprit. C'est à lui de trouver la vérité. Mais comment ? Grave incertitude, toutes les fois que l'esprit se sent dépassé par lui-même ; quand lui, le chercheur, est tout ensemble le pays obscur où il doit chercher et où tout son bagage ne lui sera de rien. Chercher ? Pas seulement : créer. [...]

« À la recherche du temps perdu », M. Proust.