Pierre Paul Curvale

L'ESPACE-TEMPS ÉVOLUTIF

huitième édition
22 août 2004

Depuis sa première édition, datée du 8 décembre 1999, ce document s'était enrichi de multiples notes destinées à préciser des points particuliers. Cette huitième édition simplifie ces explications et les incorpore au texte, de façon à retrouver un exposé continu.

Il sera suivi d'un autre document, consacré plus spécialement aux lois de la gravitation.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

Cette communication comporte trois parties. La première est une réflexion générale sur le décalage spectral de la lumière reçue des galaxies lointaines. Elle amène par induction à formuler l'hypothèse que la « vitesse d'écoulement » du temps n'est pas constante. La seconde partie, qui constitue la partie théorique de l'exposé, explore par déduction les conséquences de cette hypothèse, en montrant que la métrique de l'espace-temps évolue selon une loi qui échappe à l'expérience sensible. Cette loi permet d'expliquer des faits aussi divers que l'irréversibilité des phénomènes physiques, l'entretien de la rotation des gyroscopes et des corps célestes, les mouvements relatifs des corps pesants, etc. De plus elle comporte sa propre vérification. En effet, elle débouche sur une formule originale reliant deux constantes qui ont jusqu'à présent été mesurées indépendamment l'une de l'autre : la vitesse de la lumière et la constante universelle de la gravitation. Le fait que cette formule se vérifie permet de déclarer avec certitude que l'hypothèse formulée est valide. La troisième partie est un retour sur les observations astronomiques, pour constater que l'univers est très différent des représentations que s'en font les cosmologies actuelles.

1

FORMULATION D'UNE HYPOTHÈSE CONCERNANT LE TEMPS

1.1 Deux théories à abandonner : l'expansion de l'espace et la géométrie de Riemann.

L'hypothèse de l'expansion de l'espace a été formulée en 1922 par l'astrophysicien russe Alexandre Friedman en vue d'élaborer un modèle mathématique de l'univers. Bien qu'elle n'ait pas été vérifiée par des expériences reproductibles, elle reste admise de nos jours, mais pour une raison particulière : elle sert à expliquer le décalage observé entre les fréquences des raies spectrales reçues des galaxies lointaines et celles des mêmes raies émises aujourd'hui près de nous.

Ce modèle suppose que les masses matérielles qui se trouvent dans l'espace, s'éloignent les unes des autres depuis un instant appelé le big-bang, au voisinage duquel les paramètres caractérisant cet espace avaient des valeurs très faibles. Il est à la mode de considérer cet instant comme le début du temps. La durée qui s'est écoulée depuis lors est appelée communément l'âge de l'univers. Celui-ci, affirme-t-on, aurait surgi d'on ne sait où, en un bref instant, avec toute son énergie ; il évoluerait maintenant sur sa lancée, soumis seulement au hasard et à des lois déterministes. Cette hypothèse du big-bang est à l'origine d'un problème philosophique frustrant, qui consiste à se demander quelle est la cause efficiente de la mise en route du temps. En effet les causes précèdent toujours leurs effets ; ce qui pose problème, c'est de dater une cause qui se serait produite avant l'origine de toute datation.

Nous pensons que cette question ne se pose pas nécessairement, car le décalage des raies spectrales peut s'expliquer autrement que par le big-bang. Pour le montrer, nous allons présenter une autre hypothèse possible. Il en résultera une nouvelle conception de l'univers, dont nous devons reconnaître qu'elle est tout aussi frustrante du point de vue métaphysique que la précédente. En effet *il nous faudra admettre que le temps a toujours existé, ou tout au moins que son origine est indéfinie :* si loin qu'on remonte par la pensée vers le passé, on peut toujours considérer l'état de l'univers à des dates antérieures. Mais cette théorie nous fournira une compréhension améliorée des phénomènes physiques, en particulier parce qu'elle rendra compte de l'irréversibilité des phénomènes paramétrés par le temps.

Par ailleurs, il faut nous rappeler comment Albert Einstein a introduit, il y aura bientôt un siècle, la notion de « courbure » de l'espace-temps. Cherchant à unifier les forces électromagnétiques et les forces de gravitation, il a songé à utiliser les seuls outils dont il pouvait disposer : les géométries de Riemann et de Minkowski. Cette démarche, qui n'a pas abouti au résultat escompté, a été reprise par de nombreux auteurs. Elle conduit à relier la distribution dans l'espace de tout ce qui est masse ou énergie aux propriétés géométriques de cet espace-temps particulier. Aujourd'hui, nous examinons un nouveau un modèle de l'univers qui présente, en remplacement de la courbure riemannienne, une non-linéarité du temps. Nous ne devons évidemment pas reprendre les déductions de la théorie antérieure ; notamment il faut renoncer à supputer la constante cosmologique. *L'espace n'est pas riemannien.*

1.2 La question du décalage spectral.

Voyons le fait qu'il s'agit d'expliquer : nous observons aujourd'hui sur la terre au moyen de spectromètres des quanta de lumière, appelés photons, qui ont été émis il y a très longtemps dans une galaxie lointaine. Ils ont été produits par des phénomènes connus que nous savons identifier dans les spectres de raies que nous recevons. Chaque photon a été émis lors d'un changement du « niveau énergétique » d'un électron particulier dans un atome. À cette transition électronique correspond par la relation de Planck une valeur bien déterminée, toujours la même, de la fréquence propre f_0 du photon. Nous nous attendons donc à mesurer cette fréquence. Or les photons qui tombent dans nos spectromètres présentent une fréquence f plus faible que f_0. Cette différence entre les photons venus du ciel et ceux qui sont émis sur la terre selon le même phénomène physique est d'autant plus troublante qu'ils sont comparés dans les mêmes conditions par les mêmes spectromètres. Cela suffit à récuser toutes les explications qui s'appuieraient directement et exclusivement sur les transformations de coordonnées de Lorentz-Poincaré. D'après ce jeu d'équations, si l'on observe une région de l'espace par rapport à laquelle on est en mouvement relatif, les durées qui s'y déroulent paraissent dilatées, tandis que les distances radiales paraissent contractées. Mais nous ne sommes pas dans ce cas. Nous n'observons pas directement ce qui se passe dans la galaxie lointaine. Nous nous contentons de mesurer des photons qui parviennent, à la même vitesse c_0 dans notre spectromètre. Notre expérience se déroule dans un seul référentiel, le nôtre.

Faisons l'hypothèse que les lois de la physique sont les mêmes partout et imaginons ce qui s'est passé sur la galaxie lointaine au moment où les photons ont été émis. Il aurait pu se faire qu'ils soient absorbés localement par des atomes d'un autre élément chimique et y produisent un certain effet, par exemple le changement de niveau énergétique d'un électron de ces autres atomes. Cela se serait produit selon l'une quelconque des nombreuses lois que nous connaissons sur la terre, par exemple l'effet photoélectrique. Mais ce n'est pas cela qui s'est passé. Les photons se sont évadés vers l'espace pour réapparaître un beau jour, après une croisière dans l'espace-temps, sur notre terre. Nous nous demandons s'ils vont produire ici l'effet qu'ils auraient pu obtenir au départ. Mais nous constatons avec notre spectromètre que leur fréquence est insuffisante pour cela. S'ils rencontraient maintenant des atomes de l'autre élément, ils ne seraient pas absorbés. Telle est la constatation importante : *les photons qui ont traversé l'espace-temps sont moins performants que ceux qui sont émis sur place.*

Dans cette situation, il semble bien qu'on ne puisse formuler que trois hypothèses :

- ou bien les photons qui ont été émis jadis dans la galaxie lointaine se sont modifiés progressivement au cours de leur trajet vers nous,
- ou bien ils ont subi une transformation brusque, en étant émis et reçus,
- ou bien encore, ils étaient au départ moins performants.

Nous allons voir qu'aucune de ces hypothèses n'est compatible avec les théories scientifiques admises actuellement. La troisième hypothèse nous amènera à postuler que l'échelle de temps n'est pas uniforme.

1.3 L'usure des photons.

Examinons d'abord la première hypothèse, qui n'est à vrai dire soutenue par personne de nos jours, avant de la rejeter au profit des deux autres. Nous allons voir qu'elle entre en contradiction de la physique relativiste.

Pour la physique relativiste, les équations de Maxwell, qui s'appliquent dès lors qu'on néglige les effets de la gravitation, attribuent une fréquence constante aux photons qui se propagent librement. C'est, semble-t-il, le cas de ceux qui sont venus vers la terre en traversant l'espace vide. Pour expliquer la modification de leur fréquence au cours du trajet, il faudrait supposer qu'ils ont été l'objet d'un phénomène physique non encore connu, peut-être une interaction entre la lumière et l'espace, ce qui reviendrait à admettre qu'ils ne se sont pas déplacés librement et que les équations de Maxwell ne s'appliquaient pas à leur cas. Mais supposons un moment qu'un tel phénomène existe et qu'on l'ait découvert. On devrait pouvoir le décrire dans un référentiel lié à ces photons. Or la transformation de Lorentz-Poincaré montre que le temps ne s'écoule pas dans les référentiels en déplacement à la vitesse de la lumière ; les photons voyagent « de leur point de vue » en une durée nulle. *Sitôt émis, sitôt reçus.* Ce phénomène hypothétique présenterait donc une propriété tout à fait inhabituelle : il se produirait en une durée nulle, tout en restant dépendant de la distance parcourue. Cela défie l'entendement.

Pour sortir de ce raisonnement paradoxal, il serait nécessaire d'admettre que le temps s'écoule pour les photons comme pour le reste de l'univers, ce qui leur permettrait d'être modifiés au cours de leur périple. Il faudrait donc renoncer à utiliser la transformation de Lorentz, et abandonner la théorie de la relativité.

Annonçons dès maintenant que *la théorie de l'espace-temps évolutif va se développer sans faire appel à la transformation de Lorentz,* qu'il faudra de toutes façons abandonner. Mais cela ne suffira pas à résoudre le problème, puisque l'essentiel est de découvrir le phénomène physique responsable du décalage de fréquence observé.

Nous abandonnons cette première hypothèse.

1.4 L'effet Doppler.

La deuxième hypothèse consiste à attribuer le décalage de fréquence à l'effet Doppler. La formule mathématique qui décrit ce phénomène a été établie en considérant l'aspect ondulatoire de la lumière. Une onde de fréquence f_T a été émise par une source en déplacement par rapport à nous à la vitesse relative v. La fréquence que nous recevons est :

$$\frac{f_R}{f_T} = \left(\frac{1 - (v/c)}{1 + (v/c)} \right)^{1/2}$$

En fait, on ne sait mesurer les fréquences qu'à l'émission et à la réception. Dans l'espace intermédiaire, on ignore quelle est la fréquence des quanta de lumière, donc leur énergie. On se demande même si l'énergie lumineuse est quantifiée, puisqu'on ne peut observer les photons qu'en les faisant interagir avec des particules matérielles pesantes, donc en interrompant leur voyage. La situation est paradoxale. *Tout se passe comme si les photons disparaissaient lors de leur émission pour réapparaître, porteurs d'une énergie modifiée, lors de leur réception.* Ces explications sont incohérentes.

L'effet Doppler, pour surprenant qu'il soit, est bien connu et vérifié par l'expérience. C'est lui par exemple qui permet de mesurer la vitesse à laquelle la nébuleuse d'Andromède se rapproche de la nôtre, ce qui, cela soit remarqué en passant, se produit en sens inverse de l'expansion présumée de l'espace. C'est lui aussi qui permet de mesurer la vitesse de rotation des nuages d'hydrogène autour des galaxies. Il fournit une représentation très cohérente des mouvements relatifs des corps célestes dans les galaxies et des galaxies elles-mêmes dans les amas. Nous ne le rejetons donc pas, mais nous allons admettre qu'il n'est pas seul à contribuer aux décalages spectraux observés.

1.5 La non-uniformité du temps.

Nous allons maintenant examiner la troisième hypothèse, que nous croyons être la cause prépondérante des décalages de fréquence observés entre les galaxies les plus lointaines et nous : les photons étaient dès leur émission moins performants que les photons émis aujourd'hui.

Nous considérons les photons comme des oscillateurs, que nous pouvons caractériser par leur fréquence, c'est-à-dire par le nombre de périodes par unité de temps. Constater que les photons d'origine lointaine ont une fréquence plus faible que les photons terrestres, revient à affirmer que, lorsqu'ils ont été émis, l'unité de temps était plus longue qu'aujourd'hui. En effet, c'est la même chose d'observer le rayonnement émis par un atome, et de lire une horloge atomique. Rappelons que les étalons de temps et de longueur que nous utilisons sont basés sur cet aspect vibratoire des photons. Notre unité de temps T_0 , la seconde, est un multiple de la période de l'onde associée à un certain niveau de transition dans l'atome de césium 133. De même l'unité de longueur L_0 est liée, par un rapport défini, à la longueur de l'onde associée à un certain niveau de transition dans l'atome de krypton 86. Quant à la raie à 21 centimètres émise par les atomes d'hydrogène, telle qu'elle est observée par les radio-astronomes, on peut la considérer comme le signal d'une horloge qui fonctionnait il y a très longtemps et que nous lisons aujourd'hui.

Le décalage des raies spectrales nous impose d'admettre un fait au premier abord surprenant : *L'unité de temps n'est pas constante.* Elle avait une durée plus longue autrefois, quand les photons ont été émis, qu'aujourd'hui, lorsque nous les recevons.

Telle est du moins l'intuition de départ. L'exploration de cette hypothèse va nous conduire à décrire un espace-temps complexe, dans lequel l'évolution du temps est accompagnée d'une évolution de l'espace qui modifie la lecture de l'horloge lointaine. Ces deux phénomènes se compensent à peu près, mais pas exactement.

2

LE MODÈLE DE L'ESPACE-TEMPS ÉVOLUTIF

2.1 Le choix de la loi d'évolution de l'unité de temps.

Dans la vie courante on attribue au temps une propriété particulière. On suppose qu'il s'écoule à vitesse constante. Autrement dit, on imagine que, s'il était possible de faire coulisser l'échelle de temps sur elle-même, les graduations se superposeraient parfaitement. Les secondes seraient les mêmes à toutes les époques, dans le passé comme dans le futur. Nous allons renoncer à cette uniformité du temps, et définir une nouvelle variable τ qui servira de référence pour évaluer les durées réellement écoulées dans l'univers. C'est elle qui sera uniforme, et c'est par rapport à elle que nous exprimerons le temps t auquel nous sommes habitués.

Il n'y a bien sûr qu'un seul écoulement du temps dans l'univers. L'utilisation de deux variables distinctes pour le représenter ne doit pas nous faire croire qu'il existe plusieurs grandeurs temporelles, comme dans les hypothèses qui on été examinées par Milne, Dirac, Canuto et autres, mais seulement qu'il est commode d'adopter différentes façons de le mesurer suivant les problèmes à résoudre. C'est une manière de faire usuelle dans d'autres domaines. Par exemple, on mesure les puissances acoustiques soit en watts, soit en décibels, selon que l'on s'intéresse à leur production ou à leur effet physiologique. Il n'y a rien d'illogique à cela.

En premier lieu, nous avons donc à définir cette nouvelle variable τ. Pour conserver l'ordre de succession des événements, il faut que $t(\tau)$ dépende de la seule variable τ et qu'elle soit toujours croissante. Si de plus nous faisons en sorte que cette fonction donne pour aujourd'hui la même date $t = \tau = 0$, avec la même vitesse d'écoulement $\mathrm{d}t/\mathrm{d}\tau = 1$, nous ne modifions en rien la physique usuelle.

La vitesse d'écoulement du temps s'exprime par le rapport des fréquences émises autrefois et aujourd'hui par les mêmes phénomènes physiques.

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{f_0}{f}$$

Admettons que le décalage relatif en fréquence est proportionnel à la durée du parcours apparent t de la lumière qui nous provient de la galaxie lointaine, avec un coefficient de proportionnalité a homogène au temps.

$$z = \frac{f - f_0}{f_0} = -\frac{t}{a}$$

Cette loi est choisie arbitrairement, mais c'est la plus simple possible. Elle sera justifiée a posteriori par la pertinence des résultats auxquels la théorie conduira dans la ré-interprétation des lois de la physique. Elle consiste à définir une échelle de temps logarithmique.

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{1 - \frac{t}{a}}$$

et en intégrant :

$$\frac{\tau}{a} = -\log\left(1 - \frac{t}{a}\right)$$

$$\frac{t}{a} = 1 - e^{-\tau / a}$$

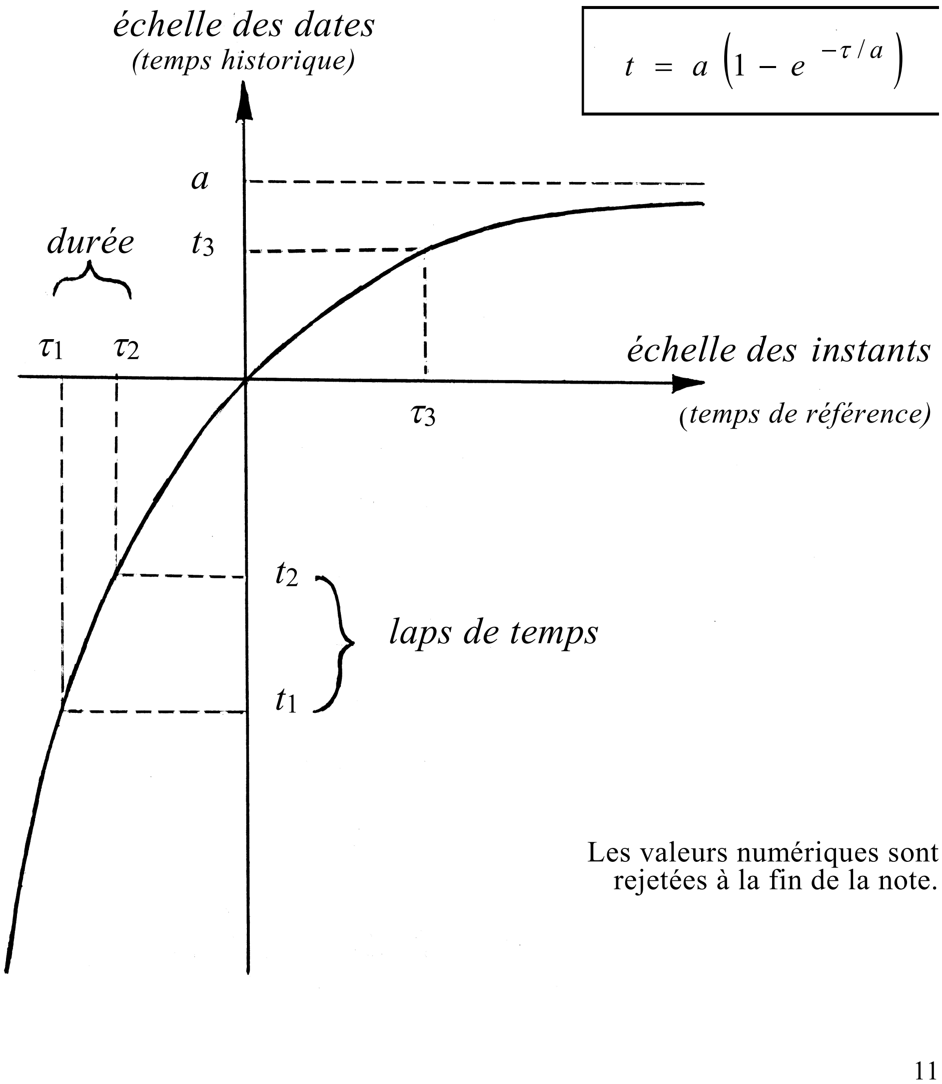
t et τ sont négatifs pour le passé et positifs pour le futur.
a est positif.

L'échelle de temps *t* est le « temps historique » auquel nous sommes habitués. Elle convient pour dater des instants précis, mais pas pour évaluer des durées. La date d'un événement est obtenue par le nombre d'années et de fractions d'années qui ont eu lieu depuis lors. Ce dénombrement a été effectué dans l'échelle de temps t par les hommes qui ont vécu successivement sur la terre, en observant le retour des saisons. *Les années avaient, à leur insu, une durée variable, mais leur nombre est juste.* De même la dendrochronologie fournit la date des événements dans l'échelle t, par le dénombrement des anneaux de croissance annuels dans les troncs d'arbres.

Le paramètre $\boldsymbol{\tau}$ ne peut être utilisé que si l'on se situe par la pensée hors de l'espace et du temps, ce qui est un point de vue théorique, afin d'observer l'univers comme « de l'extérieur ». *Par principe les années ont la même durée, mais leur nombre ne correspond pas au nombre de rotations de la terre autour du soleil.* Les méthodes de mesure du temps basées sur des phénomènes physiques ou chimiques fournissent la durée pendant laquelle ces phénomènes se sont produits. C'est le cas des datations par le carbone 14, qui devraient fournir la valeur de τ, mais la pratique actuelle est de les étalonner sur des échantillons de dates historiques connues.

Précisons notre vocabulaire en examinant la figure ci-dessous qui représente la fonction exponentielle. Surtout ne nous laissons pas troubler par ce que nous venons de dire sur la non-linéarité de l'échelle de temps t. Les graduations des axes du graphique sont linéaires, aussi bien en ordonnée qu'en abscisse, car il s'agit seulement ici de l'étude d'une fonction mathématique. Les valeurs numériques seront précisées plus loin et feront l'objet d'un tableau succinct à la fin du document.

Considérons deux événements passés, qui se sont produits aux *dates* t_1 et t_2. Nous appelons *laps de temps* l'intervalle entre ces dates. À cet intervalle correspond sur l'échelle τ une *durée* limitée par deux *instants* τ_1 et τ_2.



Les valeurs numériques sont rejetées à la fin de la note.

Le taux a de l'exponentielle est le laps de temps qui sépare la date présente de la fin de l'échelle des dates, ce taux étant exprimé avec l'unité de temps actuelle. Mais supposions que nous vivions à une date t_3 du futur, l'unité de temps serait plus courte, en sorte que a aurait la même valeur numérique. C'est une constante universelle.

Convenons de représenter les unités de mesure physiques par des capitales. L'unité de temps T n'est pas constante. En comparaison de l'unité de temps T_0 utilisée pour le présent, elle vaut à la date t :

$$\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{T}_0} = \frac{d\,t}{d\,\tau} = e^{-\tau / a}$$

évolution de l'unité de temps

L'unité de temps évolue ainsi en fonction de la date de l'histoire de l'univers, entraînant l'évolution des unités de mesure des autres grandeurs physiques.

2.2 L'évolution des unités de mesure.

La constatation que les spectres reçus des galaxies lointaines sont les mêmes que ceux émis sur la terre, au décalage de fréquence près, nous incite à faire nôtre l'énoncé que les astrophysiciens appellent *le postulat cosmologique* :

> *Les lois physiques sont les mêmes*
> *en tous les points de l'espace-temps.*

Mais avant de supputer sur ce qui se passe, selon l'expression consacrée, « aux confins de l'univers », nous allons examiner ce que cet énoncé implique pour nos expériences de laboratoire et dans notre vie courante.

Le monde doit nous paraître inchangé d'un jour à l'autre, et c'est bien ce que nous constatons. Le matin notre chambre à coucher est apparemment la même que celle dans laquelle nous nous sommes endormis la veille : le réveil a donné la sonnerie que nous connaissons bien ; le thermostat de chauffage maintient toujours une température agréable ; la lumière du soleil levant qui filtre aux volets a la couleur habituelle ; et le mètre à ruban que nous avions laissé sur notre table fournit les mêmes mesures de nos objets familiers. S'il se trouve que l'univers n'est pas immuable, qu'il soit en expansion ou en régression, comment expliquer que nous ne nous apercevions de rien ? C'est cette question, à laquelle j'ai été confronté dans ma carrière d'ingénieur, qui est à l'origine de ma réflexion sur la cohérence du corpus des lois de la physique.

Un élément de réponse est que les unités de mesure évoluent en fonction du temps comme les grandeurs à mesurer. On peut considérer toute grandeur physique u comme le produit d'une « grandeur unitaire » $i_{\mathrm{u}}(\tau)$ fonction de l'instant τ de la mesure, et d'une valeur scalaire u_0 indépendante de cet instant. La fonction $i_{\mathrm{u}}(\tau)$ est caractéristique de l'évolution de l'univers au regard de la grandeur u ; elle vaut 1 à l'instant présent. La valeur u_0 est celle que l'on observe à l'instant présent ; c'est elle, et elle seule, que nous mesurons dans nos expériences de laboratoire.

$$\boxed{u = i_u(\tau).u_0}$$

Remarquons sur un exemple simple que cette évolution des unités de mesure n'est pas vraiment contradictoire avec l'hypothèse cosmologique. Si l'on procède à une expérience de physique un certain jour, et que l'on renouvelle la même expérience à une date ultérieure, on doit retrouver les mêmes résultats de mesure, mais cela n'impose pas pour autant que les unités doivent toutes rester constantes. Si l'on roule sur une route pendant une heure (mesurée avec un chronomètre) en maintenant une vitesse constante de 60 km/h (mesurée par le tachymètre du tableau de bord) on voit défiler 60 bornes kilométriques. Si l'on recommence ce trajet un autre jour dans les mêmes conditions, il en sera de même. Dans la théorie que je propose l'unité de mesure de la vitesse est inchangée, mais les unités de mesure de la distance et du temps ont évolué. La durée du voyage, si l'on savait la mesurer avec une unité constante, a diminué d'un jour à l'autre. La distance parcourue a diminué dans la même proportion, en sorte que la vitesse, qui est leur rapport, est restée constante. Le nombre de bornes rencontrées est inchangé.

Nous admettons ainsi que l'unité de longueur L évolue en fonction de τ comme l'unité de temps :

$$\frac{\mathrm{L}}{\mathrm{L}_0} = \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{T}_0} = e^{-t/a}$$

évolution
de l'unité de longueur

On peut étendre cette réflexion à toute la physique (tout au moins macroscopique) en utilisant les équations aux dimensions. Pour que les lois physiques restent valables d'un jour à l'autre, il faut que les équations aux dimensions des grandeurs physiques restent les mêmes. Il faut aussi que les valeurs numériques des constantes fondamentales se conservent. C'est le cas de la vitesse de la lumière, de la constante de Planck et de la constante de la gravitation. Cela nous amène à remplacer la formulation du postulat cosmologique par les énoncés suivants qui sont plus commodes à utiliser ;

nouvelle formulation du postulat cosmologique

Les équations aux dimensions des grandeurs physiques sont les mêmes dans tout l'espace-temps.
Les valeurs des constantes fondamentales sont les mêmes dans tout l'espace-temps

Un cas intéressant est la conservation de la constante de Planck h. L'unité d'énergie est proportionnelle à la fréquence des photons, donc inversement proportionnelle à l'unité de temps :

$$\frac{E}{E_0} = \frac{T^{-1}}{T_0^{-1}}$$

Or le produit de l'unité d'énergie par l'unité de temps est l'unité de moment cinétique, qui s'écrit aussi ML^2T^{-1}. Cette grandeur est donc invariante :

$$\frac{M}{M_0}\frac{L^2}{L_0^2}\frac{T^{-1}}{T_0^{-1}} = 1$$

invariance de l'unité de moment cinétique

Par ailleurs, la conservation de la valeur numérique c de la vitesse de la lumière, dans la relation d'Einstein $e = mc^2$, implique que les unités de masse et d'énergie évoluent de la même façon :

$$\frac{E}{E_0}\frac{M^{-1}}{M_0^{-1}} = \left(\frac{L}{L_0}\frac{T^{-1}}{T_0^{-1}}\right)^2 = 1$$

Il en résulte que le produit de la permitivité électrique et de la perméabilité magnétique de l'espace se conserve.

$$\varepsilon_0 \, \mu_0 = \frac{1}{c^2}$$

constant

Pour construire un système cohérent d'unités, nous avons besoin, dans l'état actuel de notre réflexion, de quatre unités indépendantes. Outre les unités de masse M, de longueur L et de temps T, dont l'évolution est définie par les équations ci-dessus, nous devons connaître par exemple l'unité de quantité d'électricité Q. Cette grandeur est pratique, parce que la charge de l'électron, qui intervient dans l'émission et la détection de la lumière, conserve certainement une valeur constante, dans des formules qui restent les mêmes au départ de la source et à l'arrivée sur le détecteur. Son unité est donc indépendante du temps.

L'évolution des unités de mesure est résumée par ces quatre formules :

évolution des unités de mesure

$$\frac{L}{L_0} = e^{-\tau/a} \qquad \frac{M}{M_0} = e^{+\tau/a} \qquad \frac{T}{T_0} = e^{-\tau/a} \qquad \frac{Q}{Q_0} = 1$$

2.3 L'invariance des angles.

Nous cherchons à nous représenter l'espace tel que nous le voyons, avec des objets célestes qui se présentent à des dates t différentes selon leur distance r. Ce n'est qu'une coupe particulière de l'espace-temps, mais c'est la seule que nous connaissions. La lumière qui nous parvient d'une galaxie lointaine a subi une évolution des unités de mesure en traversant cet espace mais, du fait que τ est une variable commune à tout l'univers, cette évolution s'est faite de la même façon pour les rayons que nous recevons et pour ceux qui sont dans leur voisinage. La différence de marche entre des trajets voisins est nulle. Le principe de Fermat reste donc valable : *le trajet de la lumière est celui dont la durée est stationnaire.* Disons cela plus simplement : notre ligne de visée est une ligne sans courbure, tout au moins à distance de toute masse pesante.

Pour représenter l'espace, il est intéressant d'adopter un système de coordonnées polaires. Les angles de visée à partir de l'origine des coordonnées ne seront pas affectés par la non-uniformité de la métrique de l'espace-temps. Seul le rayon vecteur subira une contraction selon la même loi que le temps.

2.4 La mesure des vitesses angulaires et des vitesses de rotation.

La mesure des vitesses de rotation est délicate dans notre système d'unités qui est incohérent. L'unité légale d'angle est le radian. C'est *l'angle, ayant son sommet au centre d'une circonférence, qui intercepte un arc de longueur égale au rayon de cette circonférence.* Tout naturellement on mesure les vitesses angulaires en radians par seconde. Pour cela on utilise comme unité de temps la seconde légale, fournie par des horloges au césium, qui a été ajustée au temps solaire moyen T_L. Par contre on étudie les révolutions des astres, et par extension la plupart des mouvements de rotation, en utilisant l'unité de temps sidéral T_S.

Dans le cadre d'une étude théorique, nous devons faire la distinction entre les *vitesses angulaires $d\theta/dt$* mesurées en utilisant l'unité de temps légale et les *vitesses de rotation ω* mesurées avec l'unité de temps sidérale.

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\omega}{\eta} \qquad \text{avec } \eta = \frac{T_L}{T_S}$$

Le facteur de conversion est le rapport entre la durée du jour solaire moyen et celle du jour sidéral. Il vaut :

$$\eta = \frac{T_L}{T_S} = 1{,}002\,737\,91$$

Cette question des deux unités de temps semble, au départ, ne concerner qu'un problème particulier, celui de l'orbite de la terre autour du soleil. En fait elle affecte tous les domaines scientifiques car les formules qu'on utilise pour décrire les phénomènes physiques ont été établies pour la plupart avec une seule unité de temps, la seconde légale, choisie égale à une subdivision de l'année tropique.

Astronomes mis à part, les physiciens sont peu habitués à utiliser ce facteur de conversion η qui intervient de façon implicite dans leurs calculs. Voyons cela sur un exemple.

Rappelons-nous la formule de nos manuels du lycée, qui donne la période t d'un pendule oscillant avec un débattement très faible, en fonction de sa longueur l et de la pesanteur g :

$$t = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

La masse suspendue au pendule effectue un mouvement de va-et-vient dont la durée est mesurée avec l'unité de temps légale. Mais lorsque ce même pendule tourne en décrivant une trajectoire en ellipse, il effectue un mouvement de rotation dont la période devrait s'exprimer en unités sidérales. Or nous utilisons avec succès une seule unité de temps. Comment cela se fait-il ?

Dans un premier temps, on a utilisé cette formule du pendule, ou quelque autre formule apparentée, pour mesurer l'accélération de la pesanteur g. Or l'expression théorique de cette accélération à la distance r d'un objet de masse m était donnée par la loi de v, qui définissait la *constante universelle de la gravitation* $\mathscr{G}$.

$$g = -\mathscr{G}\,\frac{m}{r^2}$$

On a donc évalué $\mathscr{G}$ à partir de g. C'est alors qu'on a subrepticement introduit le coefficient de conversion η dans la valeur numérique de la constante $\mathscr{G}$. Nous devrons en tenir compte.

2.5 La localisation des objets dans l’espace-temps.

Pour repérer la position des objets dans l’espace-temps, nous pouvons procéder de deux façons.

La première consiste à utiliser pour toutes les mesures le système d’unités M L T Q auquel nous sommes habitués. Ces unités sont variables, mais nous ne nous pouvons pas nous en rendre compte. Observons deux objets liés l'un à l'autre, par exemple deux piquets plantés dans un sol ferme. L'expérience courante nous fait dire qu'ils restent à la même distance l'un de l'autre. En fait ils se rapprochent, mais tout le paysage se rétrécit dans les mêmes proportions, y comprises les règles graduées dont nous disposons pour le mesurer, y compris notre propre corps. Avec ces unités variables, toutes les expressions mathématiques des lois physiques, telles qu’elles figurent dans nos manuels, sont valables. C’est *l’espace-temps apparent* $\mathscr{E}$, celui auquel nous sommes habitués.

La deuxième façon de métrer l’espace-temps consiste à imaginer qu’il est figé dans un état particulier, par exemple dans les dimensions qu’il possède à l’instant présent $\mathrm{t} = t = 0$. Nous utilisons donc les unités $M_0\, L_0\, T_0\, Q_0$. qui sont valables à l’instant présent, même pour repérer les événements passés ou futurs. Nous définissons ainsi un *espace-temps de référence* $\mathscr{E}_0$ qui reste immuable, mais dans lequel les phénomènes physiques obéissent à des lois inhabituelles.

L’*espace apparent* $\mathscr{E}$, qui se contracte, ne peut coïncider avec *l’espace de référence* $\mathscr{E}_0$, immuable, qu’en un seul point O. Nous pouvons choisir arbitrairement ce point qui nous servira d’origine des coordonnées d’espace. Les angles de visée à partir de ce point se conservent. Nous pouvons donc repérer la position des objets au moyen d’un système de coordonnées polaires $r\ q\ f$, en utilisant les mêmes directions des axes dans les deux systèmes d’unités. Seule la mesure du rayon vecteur r diminue en fonction du temps selon la loi exponentielle.

Pour illustrer ces manières de considérer l’espace, repérons un point particulier situé sur le pourtour d’une poulie tournant à une vitesse angulaire constante. Dans l’espace apparent, ce point décrit un cercle de rayon fixe autour du moyeu la poulie : il présente un mouvement circulaire uniforme. Dans l’espace de référence, il décrit une spirale logarithmique, se rapprochant sans cesse du moyeu.

L’espace-temps de référence est utile pour se représenter visuellement la contraction de l’univers, mais les observations ont toujours lieu dans l’espace-temps apparent, et c’est lui que nous conserverons. Nous allons donc maintenant rechercher comment le raccourcissement universel des durées se manifeste dans la physique usuelle.

2.6 Une classification des phénomènes physiques.

Considérons un phénomène physique, de nature quelconque, représentable par une grandeur scalaire ou vectorielle *u(τ)* fonction du temps. Lorsque ce phénomène se déroule librement, sans intervention extérieure, la modification de la grandeur *u(τ)* est due seulement à l'évolution de l'unité de mesure qui lui est applicable. Elle est caractérisée par un nombre *n* qui est un entier négatif, nul ou positif. Nous dirons que la grandeur *u(τ)* est de classe *n*. Le produit de deux fonctions de classes n_1 et n_2 est $n_1 + n_2$. Leur quotient est $n_1 - n_2$.

$$u(\tau) \;=\; u_0 \frac{\mathrm{U}}{\mathrm{U}_0} \;=\; u_0\, e^{n\tau/a}$$

Cela conduit à la classification suivante :

$n = -3$	*grandeur évoluant comme un volume.*
$n = -2$	*grandeur évoluant comme une surface.*
$n = -1$	*grandeur évoluant comme une longueur ou comme une durée.*
$n = 0$	*grandeur indépendante de l'évolution du temps.*
$n = +1$	*grandeur évoluant comme une accélération linéaire ou comme une vitesse de rotation.*
$n = +2$	*grandeur évoluant comme une accélération angulaire.*

Cette classification permet de raisonner rapidement. Examinons par exemple la formule de l'effet Doppler que nous avons citée au début de ce texte. Elle ne fait appel qu'à des vitesses, qui sont de classe 0. Elle a été établie dans le temps usuel *t*, mais elle reste valable pour l'échelle de temps logarithmique *τ*.

2.7 Les constantes universelles.

Les grandeurs de classe 0 ont une unité invariable. Parmi elles, certaines conservent une valeur constante au cours du temps ; ce sont des *constantes universelles* :

– la vitesse de la lumière c

– la perméabilité magnétique de l'espace μ_0

– la permittivité électrique de l'espace ε_0

– la constante de Planck h

Il doit exister aussi une constante thermodynamique, qu'on pourrait définir en s'appuyant sur l'égalité des températures mesurées par le rayonnement du corps noir, représentatif de l'espace-temps, et de celles fournies par le thermomètre à gaz parfait, caractérisant un fluide matériel. Cette étude n'a pas été faite.

2.8 L'irréversibilité des phénomènes physiques.

Considérons à nouveau la grandeur $u(\tau)$. Comme précédemment, nous considérons le cas où aucune influence extérieure ne vient modifier son cours, réglé seulement par l'évolution de l'unité de mesure.

$$u(\tau) = u_0 \, e^{n\tau/a}$$

Appelons *« vitesse du processus »* la dérivée de $u(t)$ par rapport au temps τ :

$$v(\tau) = \frac{du(\tau)}{d\tau} = u_0 \, \frac{n}{a} \, e^{n\tau/a}$$

Voyons ce qui se passe dans l'espace-temps apparent. L'intervalle de temps $dt = d\tau$ est le même au voisinage de l'instant initial, et il revient au même de dériver les fonctions par rapport à t ou à τ. Mais l'évolution de l'unité de temps intervient dans l'évaluation de $u(t)$ à partir de $u(\tau)$ car la même valeur de la fonction se produit à des dates différentes dans les deux échelles de temps :

$$u(t) = u(\tau) \frac{\mathrm{T}_0}{\mathrm{T}} = u_0 \frac{\mathrm{U}}{\mathrm{U}_0} \frac{\mathrm{T}_0}{\mathrm{T}} = u_0 \, e^{(n+1)\,\tau/a}$$

La vitesse apparente du processus est donc :

$$v(t) = \frac{du(t)}{d\tau} = u_0 \, \frac{n+1}{a} \, e^{(n+1)\,\tau/a}$$

La variation relative de la fonction $u(\tau)$, observée dans l'espace-temps apparent, est une constante.

$$\boxed{\frac{v(t)}{u(t)} = \frac{n+1}{a}}$$

La vitesse *v(t)*, qui est une grandeur de classe n+1, évolue elle-même du fait du raccourcissement des durées. Nous pouvons donc reprendre sur elle le raisonnement que nous venons de faire sur *u(t)*. Nous trouverons alors une *« accélération du processus » w(t)* :

$$\boxed{\frac{w(t)}{v(t)} = \frac{n+2}{a}}$$

Ainsi, même en l'absence d'interventions extérieures, il existe une accélération des phénomènes physiques.

La grandeur *w(t)* est surprenante au premier abord : ses effets sont bien observables dans l'espace-temps apparent, et cependant nous ne soupçonnons pas qu'elle existe. En fait le paradoxe est facile à déjouer : il tient au fait que nous nous sommes donnés d'autres explications des phénomènes observés. Nous avons admis des formulations mathématiques dans lesquelles le sens d'écoulement du temps semble n'être qu'une convention arbitraire, les valeurs positives ou négatives attribuées à la variable *t* paraissant jouer un rôle équivalent. Nous découvrons maintenant qu'il existe pour chaque grandeur physique un sens préférentiel en référence à l'écoulement du temps :

$n < -1$ *grandeur diminuant.*
$n = -1$ *grandeur constante.*
$n > -1$ *grandeur augmentant.*

2.9 La composition des accélérations :

La fonction *u(t)* dépend en général de différents paramètres p_i sur lesquels on peut agir pour infléchir les déroulement du processus. Il est commode de caractériser chacune de ces actions par la variation de la *vitesse du processus* qu'on obtiendrait si elle était seule, et si le temps était linéaire, autrement dit par une *accélération du processus* J_i.

Un cas particulier est celui où l'on arrive à choisir des actions J_i indépendantes les unes des autres. Leurs effets s'ajoutent. Si l'une d'elles est absente, le processus se déroule avec la variation de vitesse produite par les autres.

$$w = \sum_i J_i + w_0$$

Mais voyons de plus près la manière de caractériser un phénomène physique particulier pour en arriver à ce résultat. On pourrait essayer au hasard différentes fonctions *u(t)*, parmi celles qu'on sait facilement mesurer, puis choisir expérimentalement celles pour lesquelles la dérivée seconde obéit à la loi de composition. En fait, on peut prévoir le résultat, en partant des actions J_i c'est-à-dire des dérivées secondes. Ce qu'on demande à ces actions, c'est d'être *indépendantes les unes des autres.* Cela implique qu'elles interviennent de la même façon sur la fonction *u(t)*. Et, puisque parmi elles il y a le raccourcissement des durées, il faut que *u(t)* varie comme le temps, qui est de classe -1. Les vitesses de processus appartiennent donc à la classe 0 et les accélérations à la classe + 1.

Les accélérations des processus physiques sont nécessairement des grandeurs de classe +1. Elles se composent selon la loi :

$$\boxed{w = \sum_i J_i + \frac{v_0}{a}}$$

Le terme en v_0/a incite doublement à la réflexion. D'une part, répétons-le, il justifie l'irréversibilité jusqu'à présent inexpliquée des phénomènes physiques évoluant dans le temps. D'autre part, il apparaît dans cette formule, qui est valable en valeur instantanée dans les deux espaces-temps. Nous devons le rencontrer, sous une forme ou une autre, dans les formulations actuelles de la physique. Il s'y trouve effectivement : il représente les effets que l'on attribue habituellement à l'inertie.

On parle communément de la loi de *« l'égalité de l'action et de la réaction »,* en présumant que chaque action J_i entraîne automatiquement la production d'une grandeur inertielle appelée réaction. Les actions dont il s'agit sont nécessairement des grandeurs dont on a constaté qu'elles respectent les règles de combinaison scalaire ou vectorielle. Nous remplaçons cette loi par *« l'égalité de l'évolution de l'espace-temps et de celle de son contenu »,* ce contenu étant nécessairement défini en observant les grandeurs physiques de classe +1. Cela revient au même : notre nouveau point de vue a une valeur explicative pour les lois de la physique. Il ne les change pas.

Voyons quelles sont les grandeurs, qui se combinent ainsi pour organiser les phénomènes physiques auxquels nous sommes habitués. Leur unité varie selon la loi :

$$\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{W}_0} = e^{+\tau/a}$$

Parmi celles qui répondent à cette requête, certaines sont des scalaires, qui se composent par addition algébrique. Ce sont :

- *la masse (et l'énergie),*
- *le potentiel électrique,*
- *la température Kelvin.*

D'autres sont des grandeurs vectorielles, qui se composent vectoriellement à la fois dans l'espace-temps de référence et dans l'espace-temps apparent. Ce sont :

- *la quantité de mouvement,*
- *l'accélération mécanique,*
- *la vitesse de rotation.*

Il y a aussi le couple mécanique, mais nous n'en aurons pas besoin dans le cadre de cette note car notre conception de l'espace-temps ne nécessite plus de faire appel aux notions de force ni de couple pour les objets isolés dans l'espace. Ces grandeurs servent à exprimer les efforts exercés par les objets matériels au contact les uns des autres, en mécanique ou en calcul de résistance des matériaux.

2.10 La représentation du mouvement des objets pesants.

Considérons un mobile P circulant dans l'espace. S'il n'est en contact avec aucun autre objet et si on ne lui applique aucune action en vue de modifier sa vitesse, il se trouve sur ce qu'on appelle habituellement une « trajectoire inertielle ». Nous allons éviter ce terme, car nous n'avons plus besoin de la notion d'inertie ; nous dirons plus simplement qu'il est *en mouvement libre.* Les grandeurs qui caractérisent ce mouvement sont celles qui se composent vectoriellement, les *vitesses de rotation* et les *accélérations linéaires* ; ce sont celles que l'on sait mesurer à bord du mobile, au moyen d'une « plate-forme inertielle » équipée d'accéléromètres et de gyromètres. Elles sont indépendantes de la masse en mouvement. C'est en effet une loi générale, que *les trajectoires des objets en mouvement libre sont indépendantes de leur masse.*

Remarquons d'abord qu'un observateur lié à ce mobile en mouvement libre n'est pas capable de déterminer sa propre trajectoire. C'est le cas d'un spationaute dans sa capsule. Il se trouve en apesanteur et tourne sur lui-même comme un gyroscope. Constatant qu'il n'est soumis à aucune accélération, il ne peut imaginer son déplacement que comme une ligne droite parcourue à vitesse constante, mais il ne dispose d'aucun moyen pour déterminer la direction et la valeur de cette vitesse. Cette question n'a d'ailleurs pas de sens pour lui puisque, en l'absence de repères extérieurs, il ne sait pas par rapport à quoi observer sa vitesse.

Si l'on observe le mouvement de ce mobile depuis un point O extérieur à la trajectoire, on constate que celle-ci n'est pas rectiligne mais courbe. Cela s'explique par la combinaison de deux mouvements :

– le déplacement du point P_0 de l'espace où se trouve le mobile, par rapport à l'observateur O,
– le déplacement propre du mobile P par rapport à la position P_0 qu'il occupe à un instant donné.

Le premier est caractéristique de l'évolution de l'espace-temps ; le deuxième est propre à l'objet physique observé. Nous raisonnons ici sans séparer ces deux phénomènes.

Le mobile P se trouve dans une région de l'espace où existent d'autres objets matériels, certains assimilables à des points, d'autres continus mais décomposables en éléments assimilables à des points. L'ensemble de ces éléments constitue un *système de masses.* La question est de définir un référentiel galiléen dans lequel on puisse caractériser individuellement chacun des éléments pesants P_i du système par sa position $\rho_i \ \theta_i \ \varphi_i$, sa vitesse v_i, ainsi que par un scalaire qui lui est propre, sa masse m_i. Les directions des axes du référentiel peuvent être choisies arbitrairement et repérées précisément par la visée d'astres lointains. Seul le choix du point origine du référentiel pose problème.

La première idée qui vient à l'esprit est de choisir comme origine le barycentre G du système de masses. Ce point, d'après nos livres de physique actuels, est celui pour lequel la somme vectorielle suivante s'annule :

$$\sum m_i r_i \ = \ 0$$

En fait cela ne marche pas, car les grandeurs vectorielles $m_i r_i$ sont de classe 0. Elles ne se combinent pas vectoriellement dans l'espace-temps évolutif.

Les grandeurs à utiliser sont les quantités de mouvement $m_i v_i$ qui sont de classe +1 et qui, par conséquent, se combinent vectoriellement. Elles dépendent évidemment du point O d'où l'on observe les vitesses. La quantité de mouvement de l'ensemble du système de masses est la résultante vectorielle des quantités de mouvement élémentaires. Elle s'applique en un point particulier K, que nous appelons le *centre cinétique* du système de masses.

> *La quantité de mouvement d'un système de masses est égale à celle qu'aurait son centre cinétique* K *si toutes les masses y étaient concentrées.*

$$\boxed{\left(\sum m_i\right) v_K \;=\; \sum m_i v_i}$$

Notre idée est donc de choisir ce centre cinétique K comme origine du référentiel, ce qui aura pour conséquence de lui attribuer une vitesse v_K nulle. Certes ce référentiel sera en mouvement par rapport au reste de l'univers, mais on pourra le considérer comme immobile tant qu'on ne s'intéressera qu'aux objets qui y sont référés. La résultante des quantités de mouvement en ce point est nulle :

$$\sum m_i v_i \;=\; 0$$

Pour ce qui est du mobile P qui nous intéresse, nous pouvons le confronter à l'ensemble de tous les autres objets du système de masses, en l'excluant lui-même de cet ensemble. Sa situation est la même que si tous ces objets étaient remplacés par un objet unique S de masse m_S et de quantité de mouvement vitesse $m_S \vec{v}_S$:

$$m_S \;=\; \sum m_i - m_P$$

$$m_S \vec{v}_S \;=\; -\; m_P v_P$$

Le mouvement est comparable à celui d'une planète P tournant avec son étoile S autour de leur centre cinétique commun. Dans l'espace temps apparent ces deux astres décrivent des coniques homothétiques l'une de l'autre, avec le centre cinétique comme centre d'homothétie. Leurs moments cinétiques par rapport K, c'est-à-dire les moments de leurs quantités de mouvement, sont égaux :

$\kappa_P \;=\; r_P \wedge m_P v_P$	*moment cinétique du mobile* P
$\breve{\kappa}_S \;=\; \vec{r}_S \wedge m_S \vec{v}_P$	*moment cinétique de l'objet* S *simulant toutes les autres masses du système*
$\breve{\kappa}_S \;=\; \breve{\kappa}_P$	*égalité des deux moments cinétiques*

Pour décrire le mouvement de P, il est ainsi utile de considérer l'objet S qui équilibre sa quantité de mouvement par rapport à l'origine K du référentiel. Mais, puisque cet objet n'intervient que par son moment cinétique, on peut le remplacer par n'importe quel objet ayant le même moment. Une astuce de calcul consiste à le remplacer par un objet fictif Q de même masse que P et symétrique de P par rapport à K :

$$r_Q = -r_P \qquad\qquad v_Q = -v_P$$

Il nous arrivera d'utiliser cette géométrie simplifiée pour représenter les mouvements de rotation :

- un objet P en mouvement dans l'espace,
- un objet fictif Q simulant pour P le reste de l'univers,
- le centre cinétique K, milieu du segment PQ.

Résumons comment il est possible de décrire le mouvement d'un objet P au sein d'un système de masses.

- Dans un premier temps on utilise les masses individuelles m_i et les vitesses v_i de tous les objets du système pour déterminer la position de leur centre cinétique K et pour définir un référentiel qui lui est lié.
- Par la suite il suffit de considérer la masse totale du système $\sum m_i$ et non plus les masses individuelles.

Nous décrirons le mouvement de l'objet P autour de K au moyen de deux lois qui remplaceront celles de la physique classique :

- – la *loi d'accélération centrale* (inspirée de la loi de Newton),
- – la *loi des aires* (inspirée de la deuxième loi de Kepler).

2.11 La métrique de l'espace-temps.

Examinons dans le référentiel d'origine K la trajectoire de l'objet P en mouvement libre. Elle se situe dans un plan particulier défini par le moment cinétique de P. Nous savons par la première loi de Kepler que ce plan particulier, qui contient le point K et le vecteur vitesse de P, va se conserver indéfiniment. On l'appelle le *plan de l'orbite.*

Ce plan, défini dans l'espace-temps apparent, reste valable dans l'espace-temps de référence puisque les angles mesurés au point K, sont invariants.

Nous considérons une sphère particulière de rayon r centrée sur K. L'objet P se trouve sur sa surface, ainsi que l'objet fictif Q. On peut la graduer en coordonnées polaires $\theta\,\varphi$. L'angle θ est mesuré dans le plan de la trajectoire, avec l'origine à la date $t = \tau = 0$. L'angle φ est l'inclinaison du rayon vecteur par rapport à ce plan. Ces angles θ et φ sont en quelque sorte la « longitude » et la « latitude » de l'espace, le plan de l'orbite étant l'« équateur ».

Le mouvement radial de l'objet P est décrit par le rayon vecteur r et la vitesse radiale $v = dr/dt$. Mais, pour les besoins de notre exposé, nous allons considérer d'autres grandeurs : le volume $\mathscr{U}(r,t)$ de la sphère de rayon r et la vitesse de variation $\mathscr{V}(r,t)$ de ce volume. Notre souci est de caractériser l'espace par des grandeurs isotropes autour de K.

$$\mathscr{U}(r,t) = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$\mathscr{V}(r,t) = \frac{d\mathscr{U}(r,t)}{dr}\,\frac{dr}{dt} = 4\pi r^2 v$$

$\mathscr{V}(r, t)$ est une grandeur de classe –2 qui s'exprime en $m^3 s^{-1}$

Les mêmes grandeurs $\mathscr{U}$ et $\mathscr{V}$ peuvent être appliquées, non plus à l'objet matériel P, mais à un point quelconque de l'espace sous-jacent. Pour cela, nous devons nous affranchir des valeurs propres de l'objet. Appliquons au rayon vecteur r la méthode que nous avions annoncée au paragraphe 2.2, consistant à considérer toute grandeur physique comme le produit d'une *grandeur unitaire* représentative de l'évolution de l'univers, et d'une *valeur scalaire* caractérisant l'objet physique observé :

$$r = i(\tau).r$$

Nous considérons ainsi un domaine d'espace-temps particulier que nous appelons « sphère unité » », dont le rayon est $r = 1$ *mètre* et dont la surface est animée d'une vitesse radiale $v = 1 \ m\,s^{-1}$. Cela nous conduit à définir un coefficient $\mathscr{V}_0$ dont la valeur est universelle.

$$\mathscr{V}_0 = 4\pi \quad m^3\, s^{-1}$$

En fait, nous cherchons la grandeur qui représente l'interaction entre l'espace-temps et les objets pesants. Ce doit être une grandeur de classe –1 puisqu'elle passe inaperçue dans le temps usuel t. À ce stade de notre exposé, nous avons l'intuition que cela pourrait bien être la fonction $\mathscr{F}(\tau)$, définie comme l'évolution du coefficient $\mathscr{V}_0$. C'est une grandeur de classe –1 qui s'exprime en en $m^3 s^{-2}$. Cette hypothèse sera justifiée a posteriori par la pertinence de la théorie qui en découlera..

$$\mathscr{F}(\tau) \;=\; -\frac{1}{a}\,\mathscr{V}_0\, e^{\tau/a} \;=\; -\frac{4\pi}{a}\, e^{\tau/a}$$

2.12 La constante universelle de la gravitation.

La gravitation est un phénomène isotrope, en sorte que la formule suivante, qui exprime la loi d'accélération centrale, est valable autour du point K dans toutes les directions de l'espace. L'accélération g est la *pesanteur.* Le facteur $\mathscr{G}$ est la *constante universelle de la gravitation.*

$$g \;=\; -\,\mathscr{G}\,\frac{m_{\mathrm{G}}}{r^2}$$

La courbure de la trajectoire est due, selon cette loi, à l'accélération g. Pour expliquer que les planètes ne tombent pas sur l'étoile autour de laquelle elles tournent, on considère habituellement que cette accélération centripète g est équilibrée par une grandeur inertielle de même amplitude, l'accélération centrifuge. Mais nous n'avons pas besoin de faire appel à la notion d'accélération centrifuge. Il nous suffit d'admettre que la planète tombe effectivement sur son étoile et que sa chute accompagne exactement la contraction de l'espace.

La présence du carré de la distance nous incite à nous intéresser au flux Φ de la grandeur g. Ce *flux gravifique* est une grandeur de classe –1 qui s'exprime en $m^3 s^{-2}$:

$$\Phi \;=\; g\, r^2 \;=\; -\, m_{\mathrm{G}}\,\mathscr{G}$$

Notre raisonnement consiste à identifier, dans le cas d'un système dont la masse totale est l'unité, le flux gravifique Φ observé dans l'espace-temps apparent, et la fonction $\mathscr{F}$ définie dans l'espace-temps de référence.

[1] $$\boxed{\Phi = \mathscr{F}(t=0) = -\frac{4\pi}{a}}$$

Pour la masse unité, la valeur numérique de $\mathscr{G}$ est égale à celle de Φ. La formule arithmétique suivante ne porte que sur des nombres, indépendamment des unités.

[1 bis] $$\boxed{\mathscr{G} = \frac{4\pi}{a}}$$ *formule arithmétique*

La constante universelle de la gravitation se déduit de la connaissance de a.

Pour nous qui connaissons déjà la valeur de $\mathscr{G}$, nous allons profiter de cette formule pour calculer a.

Étant donnés $\mathscr{G} = 6{,}672\,041\ 10^{-11}$ $kg^{-1}\ m^3\ s^{-2}$

1 *année tropique* = $3{,}155\,692\,597\,47\ 10^7$ s

On trouve $a = 1{,}883\,437\ 10^{11}$ *secondes*

$$\boxed{a = 5\,968 \textit{ années}}$$

2.13 L'accélération des rotations.

La rotation est la grandeur physique $\omega(\tau)$ qui caractérise le mouvement d'un système tournant sur lui-même. Elle répond aux règles que nous avons définies pour tout processus physique.

Voyons par exemple un gyroscope, qui tourne dans l'espace apparent avec une vitesse de rotation ω_0. Dans l'espace de référence, il existe une accélération de la rotation ζ_0, dont la valeur est ω_0/a.

$$\frac{\zeta_0}{\omega_0} = \frac{1}{a}$$

C'est cette grandeur ζ de classe +2 qui explique l'entretien de la grandeur ω de classe +1. Elle agit sur tous les objets qui tournent sur eux-mêmes ou qui sont en orbite. Elle explique qu'en l'absence de frottements mécaniques ils ne ralentissent pas.

2.14 La composition des rotations.

Considérons à nouveau le mobile P tournant autour du point K en suivant dans l'espace-temps apparent une orbite fermée. Il est accompagné d'un objet fictif Q qui représente pour lui tout le reste de l'univers.

Nous allons considérer trois grandeurs vectorielles, toutes trois portées par le même axe, perpendiculaire au plan de l'orbite : la vitesse aréolaire, la giration et la vitesse de rotation.

C'est la *vitesse aréolaire* A, de classe -1, qui caractérise le mouvement de rotation du mobile P. En mécanique on considère de préférence la constante des aires, qui est le moment du vecteur vitesse v par rapport à l'axe instantané de rotation et dont la valeur est le double de la vitesse aréolaire A. Mais c'est A qui convient à notre raisonnement :

$$\vec{A} = \frac{1}{2} r^2 \frac{\omega}{\eta}$$

En une révolution la surface balayée à la vitesse ηA par le rayon vecteur est la surface de l'orbite, soit πr^2.

La *giration* y est une grandeur de classe 0, qui est mesurée avec la même unité dans l'espace-temps de référence et dans l'espace-temps apparent. C'est la dérivée de la vitesse aréolaire par rapport au module r du rayon vecteur :

$$\vec{y} = \eta \frac{dA}{dr} = r \vec{\omega}$$

La *rotation* ω, de classe +1, est la dérivée seconde de la vitesse aréolaire par rapport au module r du rayon vecteur.

$$\vec{\omega} = \eta \frac{d^2 A}{dr^2}$$

Les rotations se composent vectoriellement, indépendamment de l'axe autour duquel se fait le mouvement : des vecteurs équipollents représentent la même rotation. Parmi elles, il y en a une qui est cachée, celle qui correspond à la giration de l'espace-temps :

$$\vec{\omega} = \sum_i \vec{\omega}_i + \frac{y_0}{\eta a}$$

$$= \vec{\omega}_\mathrm{P} + \frac{\vec{y}_0}{\eta a}$$

Puisque l'objet P dont nous parlons est en mouvement libre, nous pouvons le considérer comme un gyroscope sans mouvement de précession. Comme on le sait il maintient fixe dans l'espace la direction de son axe de rotation propre ω_P. Mais il conserve aussi la direction de la giration y_0 de l'espace-temps, donc l'orientation du plan qui contient ces deux axes. Ainsi tout objet en mouvement libre, que ce soit une simple particule ou un corps céleste, est porteur d'un référentiel dont les axes ont des directions fixes par rapport à l'espace-temps.

2.15 L'évolution de la constante des aires.

La constante des aires, étant une grandeur de classe -1, évolue comme le temps. Nous raisonnons en fait sur la vitesse aréolaire. On peut exprimer la valeur apparente A de son module en fonction d'une valeur de référence α au moyen d'une loi exponentielle qui répond aux mêmes conditions que le temps. À l'instant initial les valeurs de A et de α sont égales et la dérivée $dA/d\alpha$ vaut 1. La raison de l'exponentielle $-1/a$ est la même que celle du temps.

$$A = a\, e^{-\tau/a}$$

A et α sont des vecteurs de même direction. Désignons par i le vecteur unitaire de leur axe.

L'objet P est soumis à deux rotations : la résultante ω_P des rotations qui lui sont appliquées et la rotation cachée de l'espace-temps ω_E. Les aires balayées au cours d'une même durée s'ajoutent vectoriellement :

$$\alpha = \alpha_\mathrm{P} + \alpha_\mathrm{E}$$

Lorsque l'objet est en mouvement libre, la résultante est nulle :

$$0 = \alpha_\mathrm{P} + \alpha_\mathrm{E}$$

Dans l'espace apparent, ce sont les constantes A qu'on observe. La résultante est :

$$\vec{A} = \vec{i}\ a\ e^{-\alpha / a}$$

$$= \vec{i}\ a\ e^{-1/a\left(\alpha_{\mathrm{P}} + \alpha_{\mathrm{E}}\right)}$$

$$= \vec{i}_{\mathrm{P}}\ a\ e^{-\alpha_{\mathrm{P}} / a} \vee \vec{i}_{\mathrm{E}}\ a\ e^{-\alpha_{\mathrm{E}} / a}$$

La résultante est le produit vectoriel :

$$A = A_{\mathrm{P}} \vee A_{\mathrm{E}}$$

Ces trois vecteurs constituent le référentiel local porté par l'objet P. Deux dispositions relatives des axes sont possibles, selon le signe du produit vectoriel.

Lorsque l'objet est en mouvement libre, la résultante est égale à 1 :

$$1 = A_{\mathrm{P}} \,.\, A_{\mathrm{E}}$$

2.16 La rotation de l'espace-temps.

Considérons à nouveau la sphère de rayon r centrée en K avec son système de coordonnées $\rho\ \theta\ \varphi$, notamment l'angle dièdre θ, et raisonnons sur une période de révolution T_{E} de l'objet P.

$$T_{\mathrm{P}} = \frac{2}{\omega_{\mathrm{P}}}$$

Pendant cette durée le demi-plan fermant l'angle dièdre θ balaye le volume de la sphère. Le point Q, qui représente tous les objets de l'univers sauf P, tourne à la même vitesse. Ces deux vitesses de rotation s'ajoutent, en sorte que l'angle dièdre θ balaye le double du volume de la sphère, soit $8/3\,\pi r^3$.

$$2\,\mathscr{U}\left(r\right) = \frac{d}{dt}\left(\frac{8}{3}\pi r^3\right) = 8\pi r^2 \frac{dr}{dt} \qquad \text{avec} \frac{dr}{dt}=1$$

La vitesse aréolaire est la dérivée de 2 $\mathscr{U}(r)$ par rapport au temps :

$$A = \frac{d\left(2\mathscr{U}\right)}{dt} = \frac{8\pi r^2}{\eta\, a}$$

En une période le rayon vecteur balaye la surface de l'orbite, qui vaut πr^2. La période de rotation de l'espace est donc :

$$T_E = \frac{1}{\eta}\frac{\pi}{A} = \frac{a}{8}$$

$$\boxed{T_E = 746 \textit{ années}}$$

période de rotation de l'espace

La contraction des longueurs et des durées au cours d'une période de rotation est dans le rapport :

$$\boxed{e^{-1/8} = 0{,}8825}$$

2.17 La vitesse de la lumière.

Analysons les dispositifs avec lesquels on mesure la vitesse de la lumière, par exemple le dispositif utilisé par Fizeau en 1849. Une roue dentée, située en un point A, module un faisceau de lumière de façon à obtenir des impulsions brèves. Ce faisceau est dirigé vers un point B où un miroir le réfléchit vers A où on l'observe à travers la même roue dentée qu'au départ On ajuste la vitesse du disque pour que la modulation en retour soit synchrone de celle qui est émise. On observe ainsi une durée du trajet t_L. La longueur r du trajet est le double de la distance AB. Les mesures actuelles, avec des modulateurs et des démodulateurs synchrones plus sophistiqués, respectent le même principe, qui consiste à faire interférer deux faisceaux de lumière modulée :

– la modulation reçue, après qu'elle ait parcouru une certaine distance r.
– la modulation « restée sur place », mais décalée d'une période de durée t_L.

La lumière qui s'est déplacée dans l'espace a parcouru la distance r à la vitesse c. Le temps de trajet a été :

$$t_L = \frac{r}{c}$$

L'onde « restée sur place » a vu sa phase « tourner » comme l'angle θ d'un objet qui aurait fait une révolution autour de A à la distance r et qui serait revenu à son point de départ. Raisonnons comme si cet objet P existait, ainsi que l'objet symétrique Q. Nous pouvons reprendre le raisonnement précédent, avec la sphère de rayon r centrée, non plus sur un barycentre, mais sur un point A quelconque. Nous constatons que le volume balayé par le plan passant par P est le double du volume de la sphère :

$$2\mathscr{U}(r) = \frac{d}{dt}\left(\frac{8}{3}\pi r^3\right) = 8\pi r^2 \frac{dr}{dt} \qquad \text{avec } \frac{dr}{dt} = 1$$

La surface $8\pi r^2$ est parcourue pendant la durée t_{L}. La vitesse aréolaire est donc :

$$A_{\mathrm{P}} = 8\pi \frac{rc}{\eta}$$

L'intuition est de caractériser la lumière par la vitesse aréolaire d'un objet fictif tournant à la distance unité. Nous portons donc $r = 1$ dans cette formule :

$$A_{\mathrm{P}} = 8\pi \frac{c}{\eta}$$

Certes il y a une difficulté conceptuelle à assimiler les intensités lumineuses à la vitesse aréolaire d'objets qui semblent ne pas exister. Tout au plus pouvons-nous tenter une amorce d'explication, en remarquant qu'on ne connaît la lumière qu'à l'instant où elle est émise, réfléchie ou détectée par des objets matériels. Or dans la matière, les particules qui sont le siège de ces phénomènes, sont chacune porteuse d'un référentiel, au moyen duquel elles repèrent la rotation locale de l'espace. Reste à connaître la nature de la grandeur physique, présente dans l'espace, à laquelle elles sont sensibles, sans doute une grandeur de nature électrique. L'espace étant isotrope, on peut supposer que toute la surface de la sphère centrée sur K est portée à un même potentiel, dont la dérivée par rapport à r est un champ électrique E dirigé vers G. Elle est comparable à une sphère matérielle isolante portant des charges électriques uniformément réparties. En tournant elle génère des lignes de courant électrique, responsables d'une induction magnétique B en G. Dans cette hypothèse, c'est la rotation de l'espace qui expliquerait les équations de Maxwell, reliant le champ électrique et l'induction magnétique.

Ces considérations restent approximatives, et seul le résultat auquel nous allons aboutir justifiera la forme mathématique de nos formules.

Revenons à la formule qui donne la résultante des vitesses aréolaires d'un objet.

$$\alpha \;=\; \alpha_{\mathrm{P}} + \alpha_{\mathrm{E}}$$

Dans le cas de la lumière nous n'observons aucune rotation : le pinceau lumineux émis dans l'expérience de Fizeau revient sur lui-même suivant un trajet rectiligne. La résultante, observée dans l'espace-temps de référence, est donc nulle. la :

$$0 \;=\; \alpha_{\mathrm{P}} + \alpha_{\mathrm{E}}$$

Dans l'espace-temps apparent le produit des surface aréolaires vaut donc 1 :

$$1 \;=\; A_{\mathrm{P}} \bullet A_{\mathrm{E}}$$

Rapprochons les formules :

$$A_{\mathrm{P}} \;+\; 8\,\pi\,\frac{c}{\eta} \qquad\qquad A_{\mathrm{E}} \;+\; \frac{8\,\pi}{\eta\, a}$$

La vitesse de la lumière se déduit de la connaissance de a :

[2]

$$\boxed{c \;=\; \eta^{2}\,\frac{a}{(8\,\pi)^{2}}}$$

Pour nous qui connaissons déjà la valeur de c , nous allons profiter de cette formule pour calculer a.

Étant donnés $c = 2{,}997\,924\,6\; 10^{8}\quad m\,s^{-1}$

1 *année tropique* = $3{,}155\,692\,597\,47\; 10^{7}\; s$

$h = 1{,}002\,737\,91$

On trouve : $a = 1{,}883\,326\; 10^{11}$ *secondes*

$$\boxed{a = 5\,968 \textit{ années}}$$

Cette valeur diffère de celle calculée plus haut d'environ 60 millionièmes. Cet écart s'explique par l'incertitude sur la valeur de $\mathcal{G}$ dont nous disposons.

2.18 Vérification de la théorie.

Nous avons calculé le taux de contraction du temps a de deux façons différentes et nous avons trouvé la même valeur aux incertitudes près. En éliminant a entre les deux formules numérotées [1bis] et [2], nous obtenons une relation directe entre deux constantes universelles, dont les valeurs ont jusqu'à présent été déterminées indépendamment l'une de l'autre, la vitesse de la lumière et la constante universelle de la gravitation.

$$\boxed{c\,\mathscr{G} = \frac{\eta^2}{16\,\pi}}$$

Le fait que cette relation se vérifie suffit pour déclarer que le modèle d'espace-temps proposé est valable.

3
COSMOLOGIE

3.1 Les distances astronomiques.

Observons dans la galaxie lointaine deux points présentant un écart latéral ℓ. Nous voyons ce segment de longueur ℓ sous un angle $a = \ell/r_A$. Dans l'hypothèse du temps uniforme, on admet que la lumière est parvenue jusqu'à nous à la vitesse constante c et que la distance apparente de la galaxie est $r_A = ct$. Dans notre hypothèse du temps non-uniforme, nous devons attribuer à la galaxie une distance r_V différente de ct et donc corriger systématiquement les mesures de distance faites en application des théories actuelles :

correction des mesures de distance

$$\frac{\text{distance vraie}}{\text{distance apparente}} \qquad \frac{r_V}{r_A} = \frac{c\ \tau}{c\ t} = \frac{-a \log_n \left(1-(t/a)\right)}{t}$$

On sait mesurer la luminosité $\mathscr{L}$ des étoiles, des galaxies et des amas de galaxies jusqu'à une distance de l'ordre de 300 millions d'années-lumière. Pour les étoiles proches on fait directement des mesures photométriques. À plus grande distance, on étalonne d'autres phénomènes, qui sont liés à la luminosité par des lois connues ; on sait par exemple que certaines étoiles à éclat variable, les céphéides, présentent une loi simple entre la période de l'éclat et la luminosité. À plus grande distance encore, on fait la supposition que les populations d'étoiles sont les mêmes dans les galaxies lointaines et dans des galaxies plus proches. Ces évaluations sont bien cohérentes entre elles. Mais un problème apparaît lorsqu'on s'intéresse à la fois à la masse et à la luminosité des étoiles. On a pris l'habitude de caractériser les étoiles par le rapport de leur masse $\mathscr{M}$ et de leur luminosité $\mathscr{L}$, exprimées par rapport à la masse $\mathscr{M}_S$ et la luminosité $\mathscr{L}_S$ du soleil :

$$\frac{\text{masse relative}}{\text{luminosité relative}} = \frac{\mathscr{M}}{\mathscr{L}}\ \frac{\mathscr{L}_S}{\mathscr{M}_S}$$

Ce rapport sans dimensions permet de classer les étoiles en différents types, selon les processus physiques dont elles sont le siège. Les valeurs présentées par deux étoiles de même type sont sensiblement égales car l’énergie émise est proportionnelle au nombre, donc à la masse, des atomes intervenant dans les réactions physiques au sein des deux étoiles. Cette proportionnalité se conserve si l’on n’observe qu’une raie particulière au lieu de tout le spectre. Or on constate un fait troublant : tel que nous le mesurons, le rapport masse/luminosité est fonction de la distance. Entre 15 et 150 années lumière il est sensiblement proportionnel à la distance, avec une valeur de l'ordre de 0,15 à 0,2 pour 1000 années-lumière (0,45 à 0,6 par kiloparsec). Au delà de 150 années-lumière, il s'écarte de cette loi linéaire. On s'accorde généralement à extrapoler la proportionnalité en deçà de 15 années-lumière, ce qui impose, pour aboutir à une valeur nulle à la distance nulle, de considérer non plus le rapport masse/luminosité, mais le paramètre $\mathscr{P}$ ci-dessous. Ce paramètre, qui devrait rester voisin de zéro, atteint des valeurs considérables aux grandes distances. Nous nous doutons qu'il doit y avoir une erreur quelque part.

$$\mathscr{P} = \frac{\mathscr{M}}{\mathscr{L}} \frac{\mathscr{L}_S}{\mathscr{M}_S} - 1$$

Cette erreur provient de la détermination des luminosités à partir des mesures photométriques. Voici comment cela se passe. En premier lieu on mesure l'énergie reçue des différentes étoiles et on consigne les résultats obtenus, sur une échelle logarithmique, l'échelle de Pogson ou échelle des *magnitudes apparentes*. Or l'énergie reçue d’un objet lointain est plus faible que celle d'un objet semblable situé à une distance moindre. Pour caractériser les sources lumineuses par elles-mêmes, indépendamment de leur distance, on décide donc de définir une autre échelle, celle des *magnitudes absolues.* Pour cela on compare la magnitude de chaque étoile à celle d'une étoile identique qui serait située à la distance de 10 parsecs, en supposant connue la loi reliant la luminosité à la distance. Nous ne recevons qu'une part infime de l'énergie émise par une étoile donnée, celle qui est contenu dans l'angle solide sous lequel l'ouverture de notre télescope est vue depuis l'étoile. Le raisonnement simple est de dire que cet angle solide est inversement proportionnel au carré de la distance. On passe donc de la magnitude apparente à la magnitude absolue en ajoutant un terme logarithmique qui revient à multiplier la luminosité par le carré de la distance r_A . C'est là que l’erreur est commise ; on multiplie par le carré de la distance apparente, alors que pour respecter l'angle solide il faudrait le faire par le carré de la distance vraie. Ce qu'exprime le paramètre $\mathscr{P}$, ce n'est donc pas une loi concernant la luminosité, mais l'expression suivante :

$$\mathscr{P} = \left(\frac{\text{distance réelle}}{\text{distance apparente}} \right)^2 - 1$$

$$= \left(\frac{t}{-\log_n \left(1-(t/a)\right)} \right)^2 - 1$$

La valeur a = 5968 ans, à laquelle nous sommes arrivés par des considérations théoriques, conduit à affecter à $\mathscr{P}$ la valeur $0,198$ pour la date $t = -1000$ ans. Cela correspond convenablement à l'expérience qui, il est vrai, n'est guère précise.

Les écarts par rapport à cette loi sont dus à la vitesse relative, calculable par l'effet Doppler. Il est donc possible de départager, pour chaque source, les deux causes du décalage spectral, l'*accélération du temps* et la *vitesse relative*.

3.2 L'ajustement de la théorie aux résultats d'expérience.

La loi donnant le décalage spectral en fonction de la distance pourrait éventuellement être ajustée à l'expérience. Rappelons-nous en effet que nous avons pris une décision arbitraire au début de notre raisonnement, au paragraphe 2.1, en choisissant une loi exponentielle pour représenter l'évolution de l'unité de temps. Cette loi était la plus simple possible, mais elle ne s'imposait pas en toute nécessité. :

$$\frac{dt}{d\tau} = 1 - \frac{t}{a}$$

Nous avons constaté ensuite que cette loi se vérifiait pour les phénomènes physiques qui ont servi à mesurer les constantes universelles. Mais cela ne concernait que des expériences portant sur des durées très brèves, quelques fractions de secondes. Il serait présomptueux de prétendre que la même loi reste valable sur des millions d'années. On sera peut-être amené un jour chercher une loi plus générale, applicable à la fois aux courtes durées et aux très longues durées.

Ce qu'on peut en dire rapidement, c'est que cette loi générale devra s'écarter de l'exponentielle de façon progressive à partir du temps présent. L'exponentielle étant une correction du premier ordre par rapport à l'hypothèse commune du temps linéaire, la nouvelle loi nécessitera une correction du second ordre. Pour cela, on pourra introduire des termes proportionnels aux puissances successives du rapport t/a. Le terme en $(t/a)^2$ suffira sans doute pour représenter les résultats expérimentaux obtenus jusqu'à ce jour.

$$\frac{dt}{d\tau} = 1 - \frac{t}{a} + \chi_2 \frac{t^2}{a^2} + \chi_3 \frac{t^3}{a^3} + \ldots$$

(Je choisis la lettre c pour rappeler *Ð crÒnoj = le temps*)

Les coefficients constants χ pourront être choisis sans autre contrainte que d'ajuster la formule mathématique aux résultats expérimentaux. Il s'agira, comme toujours en science, d'ordonner les observations déjà faites et d'en prévoir de nouvelles. Faisons nôtre la phrase de Copernic dans le prologue de sa théorie sur les révolutions des orbes célestes : *Sufficit si hypotheses calculum observationibus congruentem exhibeant.* Il suffit que les hypothèses produisent un calcul cohérent avec les observations. Si impressionnante que soit cette loi caractéristique du temps, il ne faut pas lui attribuer une signification métaphysique.

3.3 La densification de l'univers.

La théorie de l'espace-temps évolutif décrit un univers dans lequel les grandeurs physiques évoluent en permanence d'une façon cachée. Les distances et les durées se contractent ; les masses et les énergies s'accroissent. L'échelle du temps n'a ni début ni fin.

Cette conception de l'univers paraît inacceptable à nos contemporains, qui se sont habitués à l'idée selon laquelle tout ce qui existe aurait surgi en un très bref laps de temps, il y a quinze milliards d'années. Remarquons que cette façon de concevoir l'origine du monde est très récente dans l'histoire de la pensée des hommes. Nos ancêtres vivaient avec la conscience que le monde avait existé avant eux depuis une date indéterminée et allait durer de même après eux. Nous en sommes revenus au même point qu'eux, dans l'ignorance du passé et du futur lointains. En fait cette théorie du big-bang est soutenue par un désir non formulé de cerner, par tous les moyens possibles, ce qui a bien pu se passer « lorsque l'univers est sorti du néant ». Elle en arrive à s'appuyer sur des lois physiques invérifiables, mettant en jeu des températures irréalisables de nos jours et des densités supérieures à celle de l'entassement au plus serré de toutes les particules de l'univers. Elle doit donc être abandonnée. Et cependant elle nous fournit elle nous fournit un indice précieux sur ce que l'on appelle communément *la création.*

Ce que décrit la théorie du big-bang c'est l'apparition des particules, c'est-à-dire de la masse et de l'énergie. Elle rejoint peu ou prou certains mythes antiques, qui parlaient de séparer la terre du ciel et la lumière des ténèbres. Il est intéressant de remarquer que tout le monde s'intéresse inconsciemment à ces grandeurs de *masse* et d'*énergie* qui sont pour nous des grandeurs de classe +1, qui paraissent immuables à l'observation courante, mais qui subissent en réalité un accroissement caché. On peut sans doute accepter la définition suivante : *La création est l'apparition dans l'univers de la masse et de l'énergie*. On peut aussi la généraliser ainsi :

> *La création est l'apparition dans l'univers des grandeurs de classe°+1 : masse (et énergie),*
> *potentiel électrique,*
> *température Kelvin.*

Soyons précis. Nous écrivons ici le mot création avec une minuscule, parce que nous tenons à rester dans le domaine qui est le nôtre, la physique. Nous n'abordons pas la question métaphysique de la *Création*, avec une majuscule, qui consiste à chercher la cause première du mécanisme de *création* de l'univers. Seul ce mécanisme, qui concerne la métrique de l'espace-temps, peut être découvert à partir des propriétés des objets physiques observables.

Ce que propose la théorie de l'espace-temps évolutif est évidemment moins spectaculaire que le big bang, puisque cela ne s'observe pas directement. Toute portion de l'espace se contracte en volume comme une grandeur de classe -3. La masse et l'énergie qu'elle contient augmentent comme des grandeurs de classe +1. La « densité » croît donc comme une grandeur de classe +4. Cela se passe *hic et nunc*, ici et maintenant. Il est même probable (mais pas encore démontré) que la loi de rayonnement du corps noir, qui est proportionnel à la puissance 4 de la température Kelvin, trahit cette accroissement de la densité. L'apparition de « l'énergie-matière » qui constitue l'aspect visible de l'univers ne serait donc pas si cachée que cela. Ce que l'on est amené à comprendre, c'est ceci :

> *L'univers se développe par une densification*
> *des masses et des énergies déjà existantes*

Ce qui pose problème à certains de mes interlocuteurs, ce n'est pas tant que l'univers soit en évolution, c'est que nous participions nous-mêmes à son évolution, à notre insu, en notre propre corps. Nos cœurs battent plus vite qu'autrefois ; ils sont plus lourds et développent plus d'énergie. Et nous ne nous rendons compte de rien !

C'est pourtant cela, la réalité de la création.

3.4 L'échelle du temps.

Terminons ce document par quelques valeurs numériques, qui compléteront la figure du paragraphe 2.1. Le tableau suivant n'a pas d'autre ambition que de nous familiariser avec les ordres de grandeur. L'origine est située au 1er janvier 2000, et c'est donc l'unité de temps valable à cette date qui est utilisée pour graduer l'échelle *t*. On constate que l'échelle *t* est limitée à l'an 5968, ce qui pourrait faire croire à un lecteur distrait que l'avenir de l'univers est limité à cette date. Il n'en est rien car c'est une limite asymptotique qui ne sera jamais atteinte. Quelle que soit la date historique considérée, la perspective d'avenir restera de 5968 années, mesurées avec l'unité de temps qui sera alors en vigueur, en sorte que l'échelle *t* est illimitée, tant vers l'avenir que vers le passé.

instant de référence *t*	date historique *t*	événement
- 80 000	- 4 milliards	formation de la terre.
- 67 000	- 450 millions	apparition des premiers vertébrés marins.
- 62 000	- 200 millions	apparition des premiers mammifères.
- 33 000	- 1,5 millions	distance de la galaxie d'Andromède
- 12 000	- 40 000	apparition de l'homo sapiens.
- 11 000	- 32 000	distance du centre de la galaxie.
- 5000	- 8000	néolithique (début de la sédentarisation des hommes)
-1725	- 2000	début de l'ère chrétienne.
- 925	- 1000	an mil
0	0	1er janvier 2000 instant origine du Temps Atomique International
+ 1000	+ 921	
+ 10 000	+ 4850	
futur lointain	+ 5968	limite de l'échelle de temps *t*

Pierre Paul Curvale

Verrières le Buisson, le 28 août 2004