

CHAPITRE I

Les quanta s'invitent

*The laws of quantum mechanics are responsible
for the emergence of detail and structure in the universe.*

Programming the Universe,
Seth Lloyd,
Editions Alfred A. Knopf, New York, 2006.

Je me souviens d'avoir été fasciné dans ma jeunesse par la beauté mystérieuse du firmament lorsque, le soir venu, je flânais sur les plages tunisiennes. La profondeur de la nuit sans lune, pure de toute pollution, incitait mon imagination à vagabonder, et je rêvais en regardant la mer faire danser les étoiles dans ses reflets changeants. Plus tard, je devais comprendre que cette obscurité nocturne, toute quotidienne et simple qu'elle fût, cachait une énigme qui intriguait poètes et scientifiques pendant des lustres. C'est le paradoxe d'Olbers.

Bien des hypothèses furent émises par les uns et les autres, mais il semble que la première qui s'avéra la plus perspicace et correcte bien que d'ordre qualitatif seulement, fut celle avancée en 1848 par Edgar Poe, poète américain visionnaire et scientifique amateur, dans son essai intitulé « Eurêka : a prose poem ». Selon lui le noir de la nuit tenait au fait que la lumière en provenance des corps célestes les plus éloignés ne nous était pas encore parvenue, car autrement, a-t-il écrit, « si la succession des étoiles étaient illimitée, l'arrière-plan du ciel nous offrirait une luminosité uniforme, comme celle déployée par la Galaxie, puisqu'il n'y aurait absolument aucun point, dans cet arrière-plan, où n'existât une étoile ». Ainsi conjugait-il la vitesse finie de la lumière et l'âge des étoiles. Plus loin, il ajoutait : « ...les considérations qui, dans cet Essai, nous ont conduit pas à pas, nous permettent de comprendre clairement et immédiatement que l'Espace et la Durée ne sont qu'un ».

Ce qui ne fut que perception intuitive chez Edgar Poe se fit analyse lucide et convaincante chez Lord Kelvin. Pour lui, que le ciel nocturne soit sombre dans un univers statique, transparent et uniformément étoilé, traduisait le fait que la dimension R de l'Univers visible doit être inférieure à la limite de visibilité, c'est-à-dire inférieure au libre parcours moyen λ des photons, ce qui revient à dire que nous ne voyons pas tout l'Univers. L'argument est fondé sur le calcul présenté en 1884 de la fraction α du ciel recouverte par les étoiles uniformément réparties dans un volume sphérique en les supposant toutes de même luminosité que le Soleil. D'un côté, $\alpha = R/\lambda$, et d'un autre, α a même valeur que le rapport de la luminosité du ciel étoilé à la luminosité du disque solaire. Dans cette explication touchant à l'estimation du rayon de l'Univers visible ou à

celle de la limite de visibilité, Kelvin attribuait une durée de vie finie au Soleil et aux étoiles en raison de la dynamique qu'il connaissait et parce qu'il pensait que ces astres tiraient leur énergie lumineuse de leur contraction gravitationnelle. Nous savons aujourd'hui que cette énergie trouve sa source dans la consommation de leur carburant nucléaire, mais à travers ces explications et d'autres considérations abordées par Kelvin, il n'est pas déraisonnable de présumer que dans son idée, l'Univers avait eu un début et n'était pas immuable.

L'Univers n'est pas immuable. Il subit la flèche du temps. Parmi toutes les découvertes scientifiques, celle qui provoqua l'une des plus importantes révolutions intellectuelles du vingtième siècle est celle de l'expansion de l'Univers.

I-1. L'Univers est en constante évolution

Vers le milieu des années 1920 les astronomes se rendirent compte que les galaxies étaient animées d'un mouvement de fuite d'autant plus marqué qu'elles étaient plus distantes de nous. Plusieurs indices attirèrent l'attention sur ce phénomène, les uns d'ordre expérimental, approfondis par des hommes tels que Vesto Slipher de l'observatoire Lowell, Milton Humason avec son télescope de 2,5 mètres de l'observatoire du Mont Wilson, Edwin Hubble du même observatoire, les autres théoriques développés par des physiciens comme Willem de Sitter, Arthur Eddington et surtout le russe Alexandre Friedmann, l'abbé belge Georges Lemaître et l'américain George Gamov, les trois derniers pouvant être regardés comme les pères de la théorie du Big Bang.

En 1929, Hubble systématisa les mesures faites par ses prédécesseurs en procédant à une classification des galaxies. Il étudia notamment les différents spectres de lumière en provenance de diverses galaxies, en particulier de ces phares cosmiques que constituent les céphéïdes, et nota les décalages vers le rouge plus ou moins prononcés des raies caractéristiques de ces spectres pour toutes les galaxies situées au-delà d'une certaine distance. Ce rougissement s'interprète suivant l'effet Doppler-Fizeau comme un éloignement des objets observés. Il est de fait proportionnel à la vitesse d'éloignement. L'examen de tous ces spectres amena Hubble à formuler une double conclusion. D'une part, la vitesse de fuite d'une galaxie est proportionnelle à sa distance – c'est la loi de Hubble – et, d'autre part, ce mouvement de fuite est le même dans toutes les directions.

La figure I-1.1 exhibe une version du diagramme de Hubble, d'après Allen Rex Sandage, sur lequel on constate que la distance des galaxies est proportionnelle à leur décalage z vers le rouge, ce qui implique que leur vitesse est proportionnelle à la distance, tout au moins pour la plage des valeurs indiquée sur le graphique ; z est défini par : $1 + z = \lambda_0 / \lambda_e$ où λ_e désigne la longueur d'onde d'émission d'une raie et λ_0 la

longueur d'onde observée.

Cette seule loi de Hubble nous pousse à penser que l'Univers a effectivement eu un début et que, si l'on inversait le cours du temps, toutes les galaxies qui nous apparaissent en cours de dispersion convergeraient jusqu'à se rencontrer, à un instant donné, en un seul point hors duquel il n'y aurait rien, ni matière, ni espace, ni énergie, ni temps. D'où l'idée d'une explosion initiale et colossale. Cependant, évoquer l'idée d'une explosion primordiale ne doit pas nous conduire à en faire une analogie avec celle d'une

bombe dont les débris seraient projetés dans tous les azimuts. Il faut plutôt se reporter à l'image d'un clafoutis en se souvenant que le mouvement d'éloignement des cerises lors de la cuisson du gâteau vient de ce qu'il prend du volume, gonflement au cours duquel toute cerise voit les autres prendre du champ. La fuite des galaxies est, elle aussi, mutuelle car tout point est centre de l'Univers, celui-ci n'en ayant aucun. C'est là le principe cosmologique. De la même manière il faut se convaincre que l'Univers crée son espace cependant qu'il se déploie et que le décalage cosmologique vers le rouge est dû à cette dilatation de l'espace. D'ailleurs, à supposer que les galaxies ne baignent pas dans un espace dynamique, en portant notre attention sur des galaxies très éloignées, nous les verrions se déplacer plus vite que la lumière.

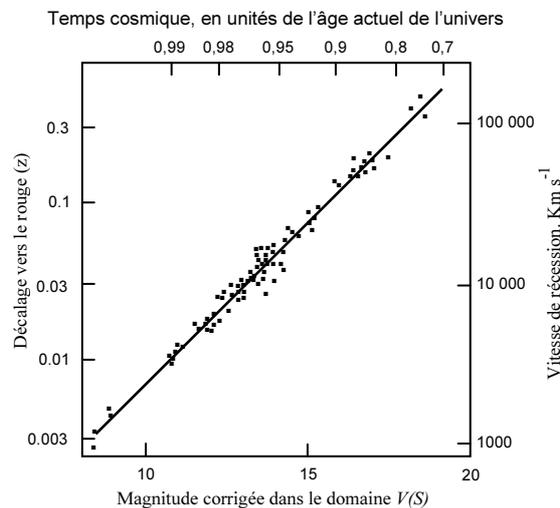


Figure I-1.1. Diagramme de Hubble.

Par exemple, une galaxie située à un milliard d'années-lumière serait animée d'une vitesse égale à cent fois celle de la lumière. Or nul objet, quelles que puissent être les forces auxquelles il est soumis, ne peut être plus vélocé que la lumière. En réalité, les galaxies sont immobiles dans un espace qui ne l'est pas, ou plutôt co-mobiles avec cet espace. Ce fut Albert Einstein qui éclaira la situation en formulant le premier modèle d'un univers relativiste. Il montra que l'espace et le temps ne sont pas, comme on le croyait avant lui, des absolus de la physique newtonnienne, mais doués de propriétés intrinsèques d'élasticité. Einstein ne crut pourtant pas dans l'immédiat aux implications dynamiques de ses équations. Lorsqu'il s'y résolut il déclara que ce fut là « la plus grosse erreur de sa vie ». Il ne fut pas le seul à se montrer réticent à l'idée d'un univers en expansion. Hubble lui-même le fut au tout début. Encore aujourd'hui il reste quelques partisans convaincus du mythe d'un univers stationnaire. Sir Fred Hoyle, par exemple, en fait partie qui inventa par sarcasme le terme « Big Bang » pour faire une distinction qui sautait aux yeux entre sa théorie stationnaire et celle de Friedman, Lemaitre et Gamov.

La récession des galaxies, de par la diminution de leur nombre qu'elle entraîne avec le temps dans un volume donné, a pour conséquence directe la décroissance de la densité de matière cosmique au cours des âges. Ce qui fit dire à Fred Hoyle en 1950 : « sans

création continue, l'Univers doit évoluer vers une agonie où toute la matière sera condensée en un grand nombre d'étoiles mortes [...]. Avec une création continue, au contraire, l'Univers a un futur infini dans lequel toutes les structures à grande échelle aujourd'hui présentes seront perpétuées ». Mais, de fait, à regarder plus loin, donc à regarder plus tôt, les astronomes constatèrent que l'Univers était plus dense dans le passé, de sorte que le cosmos n'est pas identique en tout lieu ni en tout temps. D'ailleurs le télescope spatial Hubble, grâce auquel l'observation des galaxies à quelques milliards d'années-lumière est devenue accessible, permet d'entrevoir l'Univers tel qu'il était lorsque le système solaire prit forme. L'Univers n'est pas statique.

I-2. L'âge de l'Univers

Nombre d'arguments nous poussent à penser aujourd'hui que nous vivons dans un univers issu d'un Big Bang. Pourtant nous ne saurions parler de l'instant initial « zéro ». Nous situerons cet instant initial avec les spécialistes à 10^{-43} seconde. C'est là l'ultime limite temporelle que nos connaissances actuelles ne peuvent nous permettre de franchir faute d'avoir su élaborer une théorie quantique de la gravité. C'est ce que les physiciens et astrophysiciens appellent le temps de Planck, au-delà duquel la gravitation est largement dominante sur la force électro nucléaire, qui contient en elle les forces nucléaires fortes et faibles, et la force électromagnétique.

La loi de Hubble, illustrée par le diagramme de la figure I-1.1, offre un moyen d'évaluer l'âge de l'Univers à partir de la pente H de la droite tracée à travers les points observés. En effet, si l'expansion de l'Univers s'est toujours poursuivie au même rythme qu'aujourd'hui, le rapport $1/H$ donne une mesure de l'âge de l'Univers. H est dite constante de Hubble. Malheureusement la mesure de H présente de très grandes difficultés et s'avère intrinsèquement imprécise. Elle s'appuie en sa partie la plus délicate sur la mesure des distances relatives aux galaxies les plus éloignées, c'est-à-dire celle qui touche à la profondeur cosmique, qui donc remonte d'autant le temps. Elle fait intervenir des procédures en cascade à travers lesquelles les erreurs se propagent et s'accroissent. En définitive, l'incertitude qui pèse sur H est d'un facteur 2. Pour cerner l'âge de l'Univers, les scientifiques se réfèrent à trois sabliers cosmiques *a priori* dépourvus de liens évidents entre eux, et qui confèrent sa validité consensuelle à la théorie du Big Bang.

I-2.1. Le rayonnement fossile témoigne

Le premier sablier, le plus important, n'est autre que le rayonnement fossile fortement isotrope qui emplit l'Univers tout entier. Il provient de l'époque où l'Univers n'avait que 300 000 ans, époque à laquelle se produisit le découplage lumière-matière, époque à laquelle de ce fait l'Univers devint transparent, car désormais les photons pouvaient voyager librement. Ce rayonnement avait été annoncé dès 1946 par George Gamov sur la base des travaux antérieurs d'Alexandre Friedmann et de Georges Lemaître. L'expansion de l'Univers entraîne un refroidissement global du cosmos. C'est dire que dans le passé l'Univers était plus chaud et plus dense. Partant de cette conclusion, Gamov en déduisit que l'Univers était plus lumineux, et même qu'il n'était que lumière, et qu'il devait rester aujourd'hui une trace de ce qui fut cet océan de photons, un fond de rayonnement dont il estima la température à 6 °K en 1948. Ce fond de rayonnement, écho de la création, fut découvert quelque vingt ans plus tard par Arno Penzias et Robert Wilson en 1965 sous forme d'une lueur millimétrique venant de toutes les directions du ciel, détectée par leur radiotélescope.

Dès l'instant initial l'Univers avait entamé son expansion qui, au départ, avait un caractère exponentiel en fonction du temps. Ce fut l'ère dite inflationnaire durant le temps infinitésimale court de 10^{-32} seconde, nourrie par l'injection d'énergie due à la décomposition de la force électrofaible en force électrofaible et force nucléaire forte, brisure de symétrie qui libéra l'énorme énergie du vide quantique peuplé de particules virtuelles. Puis, l'expansion se ralentit et l'Univers entra dans l'ère du rayonnement.

Selon les équations de Friedmann relatives à la décélération de l'Univers, celui-ci se dilatait, durant cette période, proportionnellement à la racine carrée du temps, et la température décroissait comme l'inverse de la distance. La densité de matière décroissait comme l'inverse du volume, soit en $t^{-3/2}$, celle du rayonnement comme l'inverse de la puissance quatrième de la distance, soit en t^{-2} . Dès lors, à mesure que le temps passait, la densité de matière rattrapait celle de rayonnement. Ces deux densités devinrent égales justement vers l'an 300 000. Alors commença l'ère de la matière que nous connaissons aujourd'hui. L'expansion se poursuit de nos jours et connaît même une certaine accélération. La baisse de température continue lentement. Celle-ci n'est plus que de 3 °K, soit -270 °C.

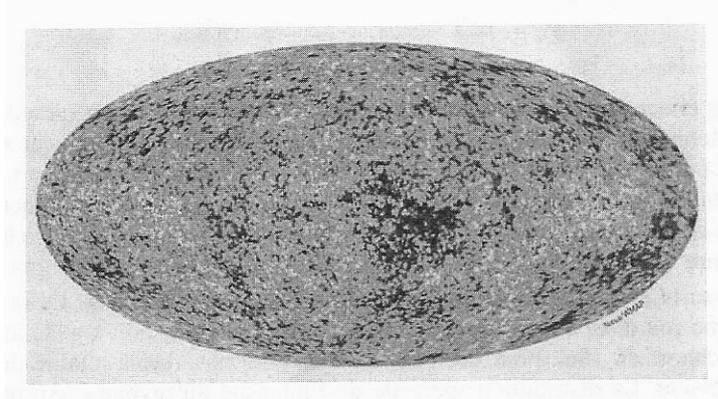


Figure I-2.1. Carte du rayonnement de fond cosmologique établie par le satellite.WMAP.

La toute première image de l'Univers a été enregistrée par le satellite COBE (*COsmic Background Explorer*), lancé en 1989. La résolution en a été grandement améliorée grâce aux données plus précises fournies par le télescope spatial WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*), lancé en 2001. La figure I-2.1 reproduit la carte du rayonnement fossile cosmologique établie par le satellite. Cette carte révèle les infimes différences de températures du rayonnement sur l'ensemble de la sphère céleste étalée sur un plan. Ces variations de température montrent la granularité de la matière cosmique à l'époque de l'émission du rayonnement fossile, c'est-à-dire issue de l'inflation. La mesure de ces grumeaux primordiaux ont permis aux astrophysiciens d'en déduire que l'Univers ne contiendrait que 4 % de matière ordinaire, 24 % de matière noire et 72 % dus à l'énergie sombre qui serait responsable de la lente accélération actuelle de l'expansion de l'Univers, accélération qui dure depuis environ cinq milliards d'années. La matière noire, quant à elle, est une nécessité imposée par le modèle du Big Bang pour justifier la formation des galaxies, mais elle reste introuvable. Pour s'affranchir de cette hypothèse, faudrait-il remettre en cause la loi de la gravitation de Newton ? C'est la conviction intime de l'astrophysicien israélien Mordehai Milgrom qui, dès 1983,

avance sa théorie Mond (*Modified Newton Dynamics*), dans laquelle la force d'attraction entre deux corps séparés par la distance r ne décroît plus en $1/r^2$ au-delà d'une certaine distance mais comme l'inverse de r seulement.

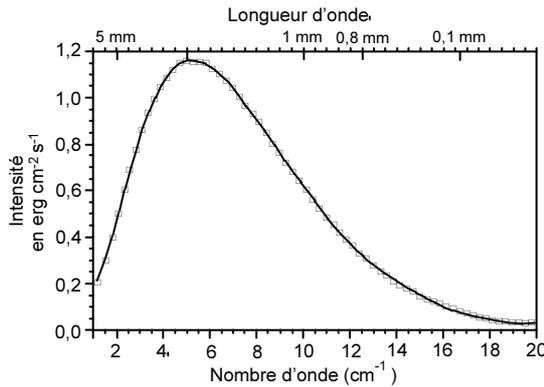


Figure I-2.2. Spectre du rayonnement fossile.

Les mesures effectuées avec les satellites ont permis de tracer avec une grande précision le spectre donnant l'intensité du rayonnement en fonction de la longueur d'onde. La figure I-2.2 présente la courbe expérimentale sous forme de petits carrés qui correspondent à autant de mesures indépendantes. La forme spectrale observée coïncide avec la distribution de Planck spécifique d'un rayonnement émis par une substance isotherme à la température $T = 2,736 \text{ °K}$, c'est-à-dire d'un bain de photons en équilibre thermodynamique avec la matière, tel que prévu par la théorie du Big Bang. Le rayonnement cosmologique suit donc une loi de corps noir. Le terme « corps noir » a été introduit par Gustav Kirchhoff en 1862 pour désigner un corps qui absorbe la totalité du rayonnement qu'il reçoit. La distribution spectrale de l'intensité du rayonnement émis par un corps noir devrait pouvoir se déduire des lois générales de l'interaction entre matière et rayonnement par les méthodes de la thermodynamique statistique. Malheureusement, la théorie se montre en complet désaccord avec l'expérience. En 1900, Planck parvint à lever la discordance en émettant l'hypothèse que les échanges entre matière et rayonnement ne se font pas de manière absolument continue, mais s'effectuent de façon discontinue, par valeurs discrètes, par « quanta ». Il montre que le quantum d'énergie ε_ν est nécessairement proportionnel à la fréquence ν du rayonnement, $\varepsilon_\nu = h\nu$, et rend compte de la distribution expérimentale en ajustant la valeur de la constante h , désormais connue sous le nom de constante de Planck. Cette constante vaut $6,625 \cdot 10^{-34} \text{ js}$. La courbe théorique en trait plein de la figure I-2.2 répond à la formule :

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \cdot \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (\text{I-2.1})$$

où u_ν désigne la densité d'énergie attribuable à la radiation de fréquence ν , c la vitesse de la lumière, k la constante de Boltzmann ($1,380 \cdot 10^{-23} \text{ jK}^{-1}$), T la température absolue (en l'occurrence $2,736 \text{ °K}$). Il s'agissait d'une révolution radicale. C'était introduire une composition granulaire dans un domaine voué jusque là à la continuité. La plupart des

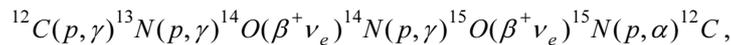
physiciens n’y voyaient qu’un artifice mathématique heureux, mais l’hypothèse de Planck devait être confirmée par différents faits expérimentaux que nous examinerons plus loin.

I-2.2. Les amas globulaires et les quasars confirment

Le mouvement de fuite des galaxies conjugué à la loi de Hubble nous donne une première approximation de l’âge de l’Univers. Celui-ci se situe entre 10 et 20 milliards d’années selon la valeur retenue pour la constante de Hubble. Quoi qu’il en soit, il ne peut être que supérieur à celui de ses constituants car rien dans l’Univers qui englobe tout, ne saurait être plus âgé que lui. Parmi ces constituants, les amas globulaires font figure de parties les plus vieilles. Ils constituent par là même un deuxième sablier cosmique.

Dans la théorie de l’expansion universelle, les galaxies apparaissent tôt dans le temps si bien que les amas globulaires qu’elles contiennent ont été formés dans le premier milliard d’années de l’histoire de l’Univers. Ces amas globulaires comptent typiquement un million d’étoiles groupées en un volume de quelques dizaines d’années-lumière. Cette distribution serrée conduit à penser que les étoiles d’un même amas sont nées en même temps à la suite de l’effondrement d’un nuage interstellaire d’hydrogène et d’hélium.

Pour durer les étoiles consomment leur énergie de nature nucléaire. Ce sont des réacteurs à fusion thermonucléaire naturels fonctionnant grâce à leur confinement gravitationnel. Elles brûlent les atomes d’hydrogène et les transforment en atomes d’hélium selon le processus CNO, explicitement selon le cycle décrit par la suite des six réactions nucléaires



où p désigne le proton noyau de l’hydrogène, γ le rayonnement émis lors de la désintégration, $\beta^+ \nu_e$ la désintégration β avec émission d’un positron et d’un neutrino électronique, α le noyau d’hélium. La période de ce cycle permet de calculer la vitesse à laquelle l’énergie est libérée. La vie des étoiles dure ce que durent leurs réserves en carburant. Bien que mutuellement contemporaines, certaines de ces étoiles sont nées plus massives et plus brillantes que d’autres. Les plus massives consomment avec prodigalité leur réserve d’énergie. Au contraire, les plus légères, moins gourmandes, vivent plus longtemps. Elles arrivent même à subsister des milliards d’années. Le soleil fait partie de ces étoiles économes. Il a déjà vécu 4,5 milliards d’années. Il lui en reste encore autant pour continuer d’exister. Les étoiles plus petites et moins lumineuses que le soleil vivront plus longtemps, et leur durée de vie peut dépasser la dizaine de milliards d’années. Pour être plus précis, de récentes observations réalisées à l’aide du télescope spatial Hubble conduisent à 15 milliards d’années pour l’amas globulaire NGC 6752, communauté compacte d’étoiles qui orbite dans notre galaxie, ce qui placerait l’estimation de l’âge de l’Univers dans la fourchette 16-17 milliards d’années.

Par ailleurs, nous avons vu que le décalage spectral vers le rouge mesurait la profondeur de la plongée dans le passé. Ainsi les galaxies proches présentent un décalage z très faible. En 1960, l’horizon cosmologique correspondait à $z = 0,46$, c’est-à-dire qu’à cette époque les confins de l’Univers observable se situaient à quelque sept milliards d’années-lumière. Ce record était détenu par une radio-source identifiée avec la galaxie la plus brillante d’un amas lointain. En 1963, cette limite fit un bond en avant à la suite

des travaux de l'astronome américano-hollandais Marteen Schmidt qui, à l'observatoire du mont Palomar, mesura le décalage spectral d'un objet assimilable à une étoile faible sur les clichés astronomiques, mais pourtant extraordinairement lumineux pour être visible à la distance considérable qu'on était conduit à lui attribuer au vu de son rougissement important. D'autres objets du même type furent découverts par la suite. Ils furent baptisés quasars, contraction de quasi-stars, nom que leur donna Hong-yea Chin en 1964. L'ère des radiotélescopes s'ouvrait.

En 1960, Allan Rex Sandage entreprend la recherche systématique de l'identification des sources d'ondes radio provenant de régions quasi punctiformes à leur contre partie optique. Les spectres des quasars affichaient des raies dont les positions ne correspondaient à aucune raie connue, comme s'il s'agissait de substances totalement étrangères à l'Univers. L'énigme fut résolue en février 1963 par Marteen Schmidt à propos des six raies d'émission larges et intenses de la radio-source cataloguée sous la nomenclature 3C 273 (273^e objet du troisième catalogue de Cambridge), observée dans la direction de la constellation de la Vierge. En effet, il identifia ces raies inconnues à six raies connues mais fortement décalées de l'ultraviolet vers la plage des plus grandes longueurs d'onde. En 1965, Schmidt observait un décalage $z = 2,01$ pour le quasar 3C 9. Sept ans plus tard, l'horizon cosmologique recula jusqu'à $z = 3,53$. Et en 1988, il se trouva repoussé à une distance correspondant à $z = 4,43$. Aujourd'hui, il campe à $z = 4,92$, soit au loin à environ 14 milliards d'années-lumière.

Durant ce temps on s'aperçut que certaines galaxies participaient du même phénomène que les quasars. Elles sont désormais classées comme tels. Les quasars et les radiogalaxies existaient déjà alors que l'Univers comptait entre un et trois milliards d'années.

À noter cependant qu'il est des astrophysiciens de grande réputation, tels l'Américain Arp, les Britanniques Geoffrey Burbidge et Fred Hoyle, le Français Jean-Claude Pecker, qui récusent le caractère cosmologique des décalages vers le rouge. Ils le font en s'appuyant sur des observations astronomiques précises et non point à partir de réflexions théoriques. Ils ont recensé, surtout Arp, maints exemples de galaxies et de quasars en paires ou en groupes, avec des effets d'interactions, donc situés à la même distance mais avec des décalages vers le rouge très différents. Ces décalages s'interpréteraient non point comme un effet de l'expansion de l'Univers mais comme l'effet d'une explosion suivie d'une éjection. À l'encontre de ce point de vue les tenants du Big Bang font valoir qu'une telle situation devrait entraîner des décalages vers le bleu qu'on n'observe pas.

I-2.3. La radioactivité contresigne

Les atomes ne sont pas tous stables. On peut même dire que les éléments se situant au-delà du bismuth dans la classification périodique des éléments de Dimitri Ivanovitch Mendeleïev ne possèdent pas d'atomes stables. Les atomes instables se désintègrent par émission de rayonnements ou de particules ou de fragments pour donner naissance à d'autres atomes qui, à leur tour, peuvent ne pas être stables. L'exemple le plus connu est celui du carbone 14, noté $^{14}_6C$, dont le noyau est composé de 8 neutrons et de 6 protons, et autour duquel gravite un cortège de 6 électrons. La désintégration de l'isotope du carbone s'effectue par radioactivité β^- selon la réaction

