



La belle histoire de la supernova SN1987A

par Maurice Goldman, membre de l'Académie des sciences

1 - Prologue : la désintégration du proton

Le Modèle Standard de la Théorie Quantique des Champs (On ne met jamais assez de majuscules) a connu un succès spectaculaire en ceci que toutes ses prédictions ont été vérifiées en détail. Malgré cela, elle ne contente pas entièrement les théoriciens des champs, pour plusieurs raisons. A savoir, elle nécessite l'introduction d'une vingtaine (environ) de paramètres finement ajustables, elle se compose de trois secteurs non unifiés : les interactions électrofaibles (Unifiant enfin les électromagnétique et faible par la théorie GSW : Glashow, Salam et Weinberg, il n'y a pas si longtemps (Prix Nobel 1979)), les interactions fortes et la gravitation. Sans compter la dernière, dont aucune théorie quantique n'a émergé (encore que les théories de cordes, très théoriques et ésotériques, donnent certains espoirs), beaucoup de théoriciens aspirent à unifier les trois « quantifiées », électrofaibles et forte, parce que c'est une évolution historique établie, que les symétries sous-jacentes sont semblables, et parce que les particules non sujettes aux interactions fortes, les leptons (trois familles : électron-neutrino électronique ; muon-neutrino muonique ; tau-neutrino tau) semblent être un écho des trois familles de membres de droit des interactions fortes, les baryons : quarks up-down (u-d), charm-strange (c-s), top-bottom (t-b) (parfois appelés « Truth and Beauty » par souci de décence).

Les tentatives d'unification ont donné naissance aux théories de Grande Unification (GUT, pour Grand Unification Theories). Ces théories prédisent que les nombres de baryons et de leptons ne sont pas séparément conservés, mais se convertissent les uns dans les autres. En particulier, les états fondamentaux « stables » de quarks, les protons et neutrons, doivent se désintégrer en leptons. Les trois interactions en présence semblent a priori très différentes, à cause de la très grande différence de leurs constantes de couplage : faible, électromagnétique et forte, ce qui est attribué à une brisure spontanée de symétrie (comme le ferromagnétisme, par exemple). Expérimentalement cependant, ces « constantes » dépendent de l'énergie et semblent converger vers une valeur commune où la différence entre interactions disparaît : l'énergie de Grand Unification. Les théories prévoient que le temps de vie des protons est proportionnel à la quatrième puissance de cette énergie (Les neutrons ne comptent pas, car ils peuvent se désintégrer sous l'effet des interactions faibles en proton, positron et antineutrino). Vers les années 1980, cette énergie de grande unification était évaluée à 10^{15} GeV, et compte tenu des incertitudes théoriques, les théoriciens en ont déduit que le temps de vie des protons était dans la fourchette 10^{29} à 10^{32} ans. C'est beaucoup ! Par comparaison, le temps de vie de

l'Univers, depuis le Big Bang, est de $1,38 \cdot 10^{10}$ ans, soit 9 à 12 ordres de grandeur plus faible. Ceci ne découragea pas les physiciens de l'observer en utilisant des cibles de gros volume : une tonne de matière contenant $6 \cdot 10^{29}$ nucléons, il faudrait des cibles de plusieurs centaines ou plusieurs milliers de tonnes pour espérer voir quelques événements par an.

C'est dans cette optique qu'au début des années 80 ont été fabriqués d'énormes détecteurs, enterrés à grande profondeur pour se prémunir des parasites dus aux cosmiques entre autres, et ont été lancées de telles expériences, aux Etats-Unis (IMB dans l'Ohio), au Japon (Kamiokande, suivi de Kamiokande II) et en URSS (Baksan, dans le Caucase), plus un certain nombre d'autres. L'originalité des trois citées est qu'elles étaient directionnelles, c'est à dire sensibles à la direction d'arrivée des particules déclenchant les détections : les deux premiers détecteurs utilisaient l'effet Cerenkov (émission d'un cône de lumière à l'arrière d'une particule chargée se déplaçant dans un milieu d'indice n à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière c/n) et le troisième était un télescope à scintillation. Vers 1984, le bilan était le suivant : malgré quelques événements-candidats, aucun n'était probant, et d'autre part l'énergie de grande unification avait été révisée en hausse d'un facteur 10, ce qui correspondait à une nouvelle fourchette de temps de vie du proton relevée d'un facteur 10^4 , soit 10^{33} à 10^{36} ans.

Dans ces conditions, la réaction « normale » de physiciens « normaux » serait d'attendre au plus dix à quinze ans, on ne sait jamais, puis de laisser tomber. Mais les physiciens des champs ne sont pas « normaux », car les enjeux sont si importants qu'ils n'hésitent pas à jouer au loto, un loto où le Jackpot est une découverte fondamentale. A la mi-2009 le bilan est le suivant. La limite inférieure du temps de vie des protons est de $6,6 \cdot 10^{33}$ ans et $8,8 \cdot 10^{33}$ ans pour deux voies de désintégration différentes explorées, et un théoricien a « calculé » un temps de vie de 10^{36} ans. Mais le jeu continue : il y a plusieurs projets élaborés, dont un comportant un détecteur d'un million de tonnes, et une proposition publiée d'installer une expérience sur la lune, où le bruit de fond serait sensiblement plus faible. Ils espèrent ainsi reculer la limite inférieure du temps de vie à 10^{35} ans. Malgré tout, certains ont prévu des voies de secours. Ainsi, le détecteur Kamiokande a été modifié pour diminuer le seuil d'énergie auquel il est sensible, de façon à pouvoir détecter les neutrinos émis par le soleil, dont la détection depuis 1968 avait révélé des anomalies connues sous le nom de « problème des neutrinos solaires ». Ce problème est depuis peu résolu, grâce en particulier à Kamiokande (en fait son successeur, SuperKamiokande), mais ceci est une autre histoire. La modification de Kamiokande s'est terminée à la fin de 1986.

2 - La supernova

A - L'évènement.

Le 23 Février 1987 au matin (7h 35 TU), trois observatoires destinés à détecter la désintégration des protons enregistrèrent quelques événements, qui furent précisément datés mais analysés seulement par la suite : 11 à Kamiokande II, 8 à IMB et 5 à Baksan. Tous ces événements se produisirent dans un intervalle de 13 secondes, provenaient de la direction du Grand Nuage de Magellan, au voisinage de notre Galaxie à environ 163000 années-lumière (chiffre actuel), et furent interprétés comme des détections de neutrinos d'énergie comprise entre 8 et 40 Mev.

Le lendemain à l'aube, un astrophysicien d'un observatoire du Chili observa à l'œil nu une étoile qui fut identifiée comme correspondant à une étoile moyenne et connue du grand Nuage de Magellan, mais avec une luminosité fortement augmentée. On la retrouva sur un cliché de routine pris la veille, déjà plus que cent fois plus lumineuse que normalement. L'ensemble des observations, neutrinos puis rayonnement après un délai de plusieurs heures, étaient la signature de l'apparition d'une supernova. Elle fut enregistrée sous le nom de SN1987A, pour première Super Nova observée en 1987.

B - D'une étoile à une supernova de type II.

Les supernovae de type II sont produites par effondrement gravitationnel en fin de vie d'étoiles de masse comprise entre 7 et 20 masses solaires. Leur évolution, depuis la condensation gravitationnelle initiale d'un nuage, formé en grand partie d'hydrogène, en protoétoile, est déterminée par la stabilité relative des différents noyaux, c'est-à-dire par leur énergie de liaison par nucléon. Celle-ci est décrite quantitativement par la masse par nucléon $m = M/N$, en vertu de la relation masse-énergie $E = mc^2$. La masse par nucléon décroît de l'hydrogène au Fer 56, l'élément le plus stable, puis augmente à nouveau, à cause de la répulsion électrique entre protons. C'est pourquoi on produit de l'énergie soit par fusion de noyaux légers, soit par fission de noyaux lourds.

Cette évolution est schématiquement la suivante. Par continuation de la condensation gravitationnelle d'un nuage de gaz, la température du cœur (son centre) s'accroît jusqu'à ce que, à la température de quelques 10^7 K, l'énergie thermique l'emporte sur la répulsion électrique et permette la fusion de l'hydrogène en hélium. La production d'énergie correspondante fait s'élever la température, et donc la pression du cœur, qui équilibre la force gravitationnelle. L'énergie produite chemine jusqu'à la surface et rayonne dans l'espace extérieur : l'étoile brille, comme c'est le cas pour le soleil. Pour une étoile massive (disons 10 masses solaires), cette phase dure environ 10^7 ans, après quoi l'hydrogène du cœur est épuisé, et la fusion s'arrête, ainsi que sa production d'énergie. La gravitation l'emporte alors à nouveau et la contraction gravitationnelle reprend, ce qui élève la température, jusqu'à ce qu'une nouvelle réaction de fusion « s'allume ». Le scénario se reproduit un certain nombre de fois, de durées de plus en plus courtes, à des températures de plus en plus élevées, et conduit à la nucléosynthèse de tous les éléments jusqu'au Fer 56, principalement Carbone, Oxygène, Néon, Silicium, et Fer (et Nickel). La dernière fusion, celle du Silicium, dure de un à deux jours.

A ce moment, l'étoile a acquis une structure en « pelure d'oignon », schématisée sur la Figure 1. Cette structure est de courte durée (quelques heures), et comme aucune nouvelle fusion ne peut produire d'énergie, l'étoile subit un effondrement gravitationnel. La température et la pression augmentent jusqu'à ce que le cœur de fer surmonte la « pression de dégénérescence » des électrons (la tenue à distance par le principe d'exclusion de Pauli) et que les électrons pénètrent dans les protons pour les transformer en neutrons, avec expulsion de neutrinos. Ceci arrête la contraction, à cause des interactions fortes entre neutrons et de leur propre pression de dégénérescence. Le noyau neutronique a une masse un peu supérieure à celle du soleil, pour un rayon de l'ordre de 10 km. La chute gravitationnelle du reste de l'étoile sur ce cœur « dur » donne lieu à un rebond et une onde de choc, les couches les plus proches se heurtant à celles qui arrivent, produisant un ensemble de

phénomènes : énorme dégagement d'énergie sous forme, majoritairement de paires neutrino-antineutrino, et en proportion beaucoup plus faible de rayonnement électromagnétique ; énorme flux de neutrons interagissant avec les noyaux pour synthétiser tous les éléments plus lourds que le Fer, jusqu'aux transuraniens (c'est leur seul mécanisme de synthèse), et enfin expulsion dans l'espace de toute la partie de l'étoile extérieure au cœur de neutrons.

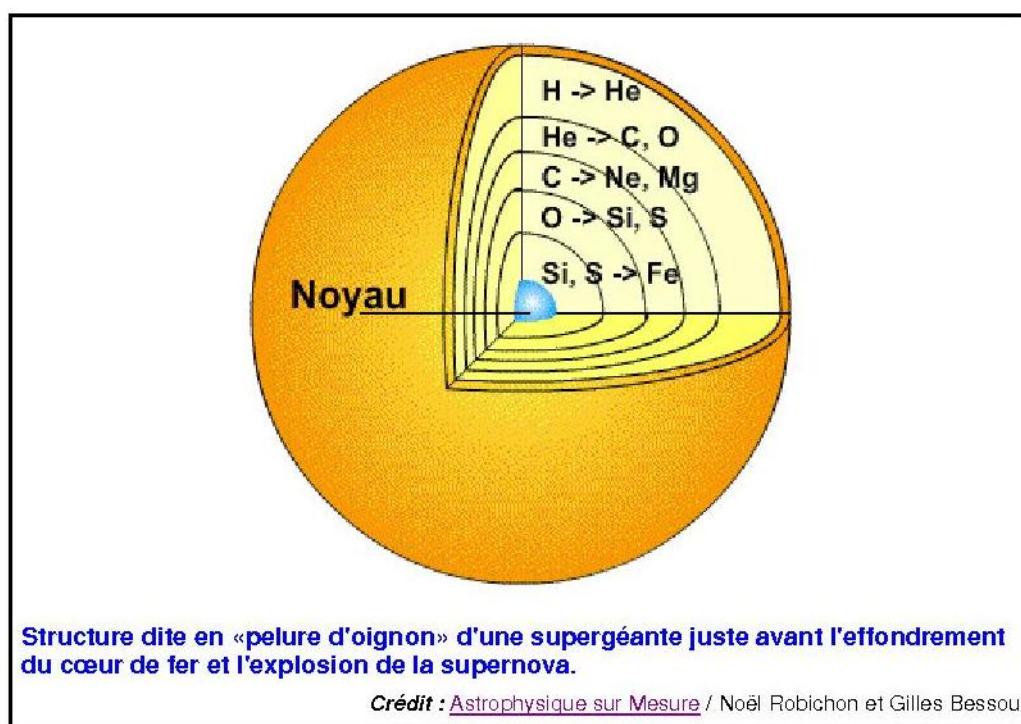


Figure 1- Structure en pelure d'oignon d'une étoile avant effondrement gravitationnel

(Crédit pour libre reproduction : Observatoire de Paris/U.F.E.)

Le nuage de gaz : hydrogène et hélium, accompagné de tous les éléments lourds sera ultérieurement le matériau de formation d'étoiles nouvelles. Quant au cœur de neutrons, il deviendra une étoile à neutrons. L'énergie totale dégagée par l'onde de choc est de l'ordre de 10^{45} J, en grande majorité sous forme de neutrinos (10^{57}). Ceux-ci sont expulsés très peu de temps après la formation du cœur neutronique, tandis que les photons, soumis à des absorptions-émissions par les ions, ne commencent à s'échapper que quelques heures plus tard. La luminosité de la supernova est supérieure à celle de toute la galaxie qui l'abrite. Elle subsiste plusieurs semaines ou plusieurs mois, car elle est constamment « nourrie » par la décroissance de noyaux radioactifs produits par l'onde de choc. La courbe de décroissance de sa luminosité est caractéristique de chaque type de supernova.

C - Retour à la supernova SN1987A.

L'apparition de la supernova SN1987A a créé une véritable sensation chez les astrophysiciens pour plusieurs raisons.

La raison la plus importante est bien sûr que c'était la première dont on observait des neutrinos, et ce, par un coup de chance inespéré, puisque c'était au moyen d'appareillages prévus pour tout autre chose, la désintégration des protons, construits, opérationnels et mis en marche juste au bon moment. Si l'explosion de la supernova avait eu lieu il y a 167980 ans au lieu de 168000 ans (en 1987), ils n'auraient pas été observés, et si elle avait eu lieu il y a 168020 ans, ils n'auraient logiquement pas dû être observés non plus, car les observations auraient dû être arrêtées. Le rapport entre le nombre de neutrinos observés et le flux de rayonnement reçu correspond à peu près à ce que prédisent les modèles théoriques de supernovae de type II. Les astrophysiciens ont salué ces observations comme le début de l'astronomie des neutrinos, mais à ce jour, il n'existe aucune autre détection de neutrinos issus d'une supernova.

Ensuite, c'était la première supernova observée aussi près depuis les SN de Tycho Brahé en 1572 et celle de Kepler en 1604, toutes deux situées dans la galaxie à juste quelques dizaines d'années-lumière, mais vues uniquement à l'œil nu, à une époque où n'existaient ni télescopes ni spectromètres...ni détecteurs de neutrinos. C'est également la première dont on connaît le progéniteur, l'étoile Sanduleak –69°202, géante bleue de masse comprise entre 7 et 20 masses solaires, de température superficielle de l'ordre de 16000 K, et la première dont on a pu et peut suivre l'évolution en direct (disons, en léger différé) .

Un autre élément d'intérêt est apparu quelques mois après l'explosion, inhabituel dans les supernovae et complètement inattendu, une espèce de « cerise sur le gâteau », l'apparition d'un anneau autour des restes de la supernova, et qui mérite un traitement à part.

D - L'anneau autour de la supernova.

Son apparition s'est faite progressivement, commençant environ 80 jours après l'explosion, passant par un maximum d'intensité à 400 jours puis décroissant. Il est centré sur le reliquat de la supernova et sa forme apparente est approximativement elliptique. Il est reproduit sur la Figure 2, sur une photo prise quelques années plus tard par le télescope spatial Hubble.

On peut y voir aussi deux autres anneaux décentrés (et d'autres encore par la suite) dont on ne dira rien.

Pour l'anneau central, un scénario évoqué est le suivant. A l'origine, Sanduleak–69°202 était une étoile double, dont la plus grosse a absorbé son compagnon, il y a environ 20000 ans, ce qui lui a conféré une masse suffisante pour qu'elle continue à évoluer jusqu'à donner naissance à une supernova de type II. Cette phagocytose a donné lieu à une éjection de gaz, soufflé par le champ magnétique de la nouvelle étoile sous forme d'un tore circulaire centré sur l'étoile et qui, par évolution, est devenu froid et invisible. C'est le rayonnement UV éjecté par l'explosion de la supernova qui l'a réchauffé au point de le rendre lumineux, après quoi sa luminosité a décliné par refroidissement du gaz. Dans les années suivantes, il a été rallumé par impact de la matière de l'onde de choc et continue à évoluer. C'est son illumination initiale par les UV qui a permis de transformer l'apparition de l'anneau de phénomène physique en outil de mesure pour la détermination de la distance de la supernova, indépendamment du mécanisme de formation de l'anneau de gaz, et de façon purement géométrique.



Figure 2- Anneau observé en 1994

(Crédit : Dr. Christopher Burrows, ESA/STScI et NASA)

Cette détermination passe par deux étapes : la mesure du rayon de l'anneau à partir du temps de propagation à la vitesse de la lumière du rayonnement UV émis lors de l'explosion jusqu'à l'anneau de gaz qu'il rend lumineux par ionisation, et la mesure du diamètre apparent de cet anneau, d'où un simple calcul trigonométrique fournit la distance de la supernova. La première mesure, celle du rayon de l'anneau, est un peu compliquée par le fait que ce dernier n'est pas perpendiculaire à la ligne de visée, mais est incliné, d'où la forme elliptique de l'image. Il en résulte que, bien que tout l'anneau devienne lumineux en même temps, la lumière met des temps différents à nous parvenir à cause de la différence de distance à nous. La méthode utilisée a consisté à analyser l'évolution temporelle de la luminosité totale observée de l'anneau en fonction du temps écoulé depuis la formation de la supernova, enregistrée à l'époque, avec comme seules hypothèses que l'anneau était circulaire, qu'il était centré sur la supernova, et que le réchauffement initial par le flash UV était suivi d'une recombinaison par refroidissement des différents ions excités à une vitesse dépendant de leur potentiel d'ionisation.

De nombreuses études lui ont été consacrées depuis 1991. Les résultats de la dernière analyse effectuée (1998) ont été :

Inclinaison de l'anneau par rapport au plan normal à la ligne de visée = 42° ,

Durée de transit de la lumière de la supernova à l'anneau = $2,0767 \cdot 10^7$ s,

Rayon de l'anneau $R = (6,23 \pm 0,08) \cdot 10^{15}$ m = 0,658 a.l. (année lumière),

Diamètre apparent de l'anneau $R^* = (808 \pm 17)$ mas (milli arc seconde),

Distance à la supernova = $51,4 \pm 1,2$ kpc (kilo parsec)

= 168000 ± 4000 années lumière.

(1 parsec = 3,2616 années-lumière).

Cette détermination n'était pas faite (uniquement) pour le plaisir esthétique, mais tendait à l'« utilité ». En estimant la distance entre la supernova et le barycentre de LMC (Large Magellanic Cloud, Grand Nuage de Magellan) ils sont arrivés à une distance de ce dernier de $52,0 \pm 1,3$ kpc, soit environ 170000 a.l. à une incertitude peu différente.

Le détail des résultats de l'analyse de l'anneau central autour de la supernova n'est donné que pour illustration du soin, presque de la hantise, des auteurs à la précision de la mesure de distance, pas tant à la supernova qu'au centre de LMC. Pourquoi ? Parce que cette distance à LMC est d'un intérêt fondamental pour l'étude de l'Univers : échelle des distances, vitesse d'expansion, âge, courbure, énergie noire, etc., et a fait (et continue à faire) l'objet de nombreuses études, par toute une panoplie de méthodes différentes, avec des distances toujours « révisées » et « améliorées », différant toujours les unes des autres de plus que les incertitudes estimées. Ceci semble indiquer l'existence d'erreurs systématiques mal comprises, qu'il est hors de question de discuter ici. La valeur moyenne utilisée aujourd'hui est de 50 kpc, soit 163000 a.l., assez proche de la dernière valeur obtenue par l'analyse de l'anneau de SN1987A. Cependant, il semble raisonnable de consacrer un paragraphe à donner une idée de la motivation à connaître la distance à LMC avec la plus grande précision possible.

E - Distance à LMC, céphéides et constante de Hubble.

L'importance de la distance à LMC tient à ce que cet amas sert d'origine à l'étalonnage des distances astronomiques au moyen l'observation des étoiles céphéides variables. Les céphéides sont des étoiles importantes, environ 30000 fois plus lumineuses que le soleil, qui ont la propriété que leur luminosité varie de façon périodique, avec une période comprise entre 1 et 100 jours. C'est en 1912 que l'astronome Américaine Henrietta Swan Leavitt, travaillant à l'observatoire de Harvard, découvrit que la période des céphéides observées dans le SMC (Small Magellanic Cloud, Petit Nuage de Magellan) était proportionnelle à leur luminosité apparente sur des plaques photographiques. Comme la luminosité apparente d'une étoile est inversement proportionnelle au carré de sa distance, et que ce nuage est beaucoup plus petit que sa distance à nous, toutes les distances de ses étoiles à nous varient peu, et la proportionnalité période-luminosité était forcément vraie aussi pour leur luminosité absolue (définie comme ce que serait la luminosité apparente à la distance de 10 parsecs). La mesure de la luminosité apparente d'une céphéide, combinée à celle de sa période permet donc de connaître sa distance relative. Cette découverte a été fondamentale pour permettre à Hubble de découvrir en 1929 que les étoiles s'écartaient de nous à une vitesse proportionnelle à leur distance, ce qui

constitue l'expansion de l'Univers, qui a bouleversé notre conception de l'Univers et modelé l'astrophysique et la cosmologie modernes. Les incertitudes sur la mesure des luminosités et la connaissance des distances n'ont permis jusqu'à une date récente que de contraindre la vitesse d'expansion (la constante de Hubble) entre 50 et 100 km/s/Mpc.

Pour transformer cette proportionnalité en étalonnage absolu de distances, il faut mesurer les relations période-luminosité de céphéides à distance connue. Le « point zéro » de cet étalonnage est aujourd'hui le LMC, où les céphéides sont beaucoup plus nombreuses que dans le SMC, et il sert à élaborer les « chandelles standard » de l'astronomie que sont ces étalons primaires. La précision de ces chandelles repose sur la précision de mesure de leur luminosité apparente, de leur période et de leur distance. C'est ce qui fait l'importance d'une détermination précise de la distance à LMC. La limite de mesure des distances par les étalons primaires que sont les céphéides est d'environ 20 Mpc (soit 65 millions d'années-lumière). Pour aller au-delà, il faut utiliser d'autres indicateurs plus lumineux, appelés étalons secondaires, dont l'étalonnage est réalisé à partir des céphéides dans leur zone de recouvrement. Les plus importants semblent être les supernovae de type Ia (rien à voir avec les types II), qui ont toutes le même pic de luminosité absolue. Ces « chandelles standard » secondaires ont récemment permis d'aller jusqu'à plus de 1 Gpc avec une bonne résolution poussée à plus de 10 Gpc avec une résolution faiblissant notablement.

La vitesse de récession des étoiles et galaxies est obtenue par mesure du « déplacement vers le rouge » (Red Shift) des spectres par effet Doppler, c'est-à-dire une augmentation de leur longueur d'onde. La proportionnalité de ce déplacement à la distance présente d'importantes fluctuations à distance modérée (quelques Mpc), dues aux mouvements propres locaux, mais s'estompe pour des distances supérieures à quelques dizaines de Mpc.

La Figure 3 ci-dessous reproduit les résultats de Hubble (1929) obtenus par étude des céphéides, et la Figure 4 ceux d'une étude des supernovae de type Ia datant de 1996.

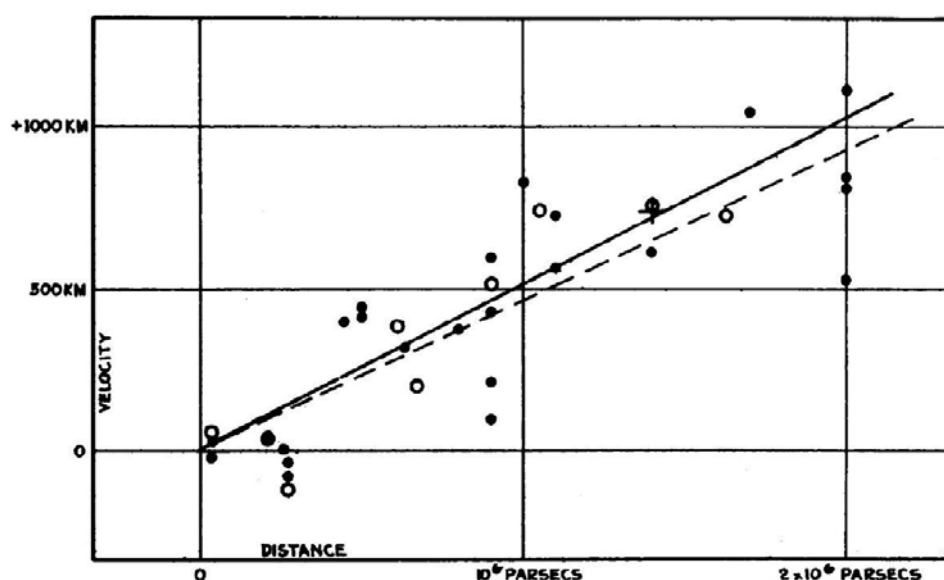


Figure 3- Premiers résultats de Hubble.

(Crédit : Proc. Nat. Acad. Sci., vol.15, 168-173, 1929)

Une vitesse de récession proportionnelle à la distance n'est que très approximative. La droite de meilleur ajustement correspond à une « constante de Hubble », c'est son nom actuel, $H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc}$, ce qui, dans les modèles les plus simples, correspond à un âge de l'Univers de 2 milliards d'années, dont on savait déjà à l'époque que c'était nettement plus court que l'âge des amas globulaires d'étoiles, ainsi que de certaines roches terrestres. On a des idées des sources d'erreurs systématiques de ces résultats, dont Hubble ne pouvait rien connaître, en particulier la mauvaise estimation de la distance aux nuages de Magellan.

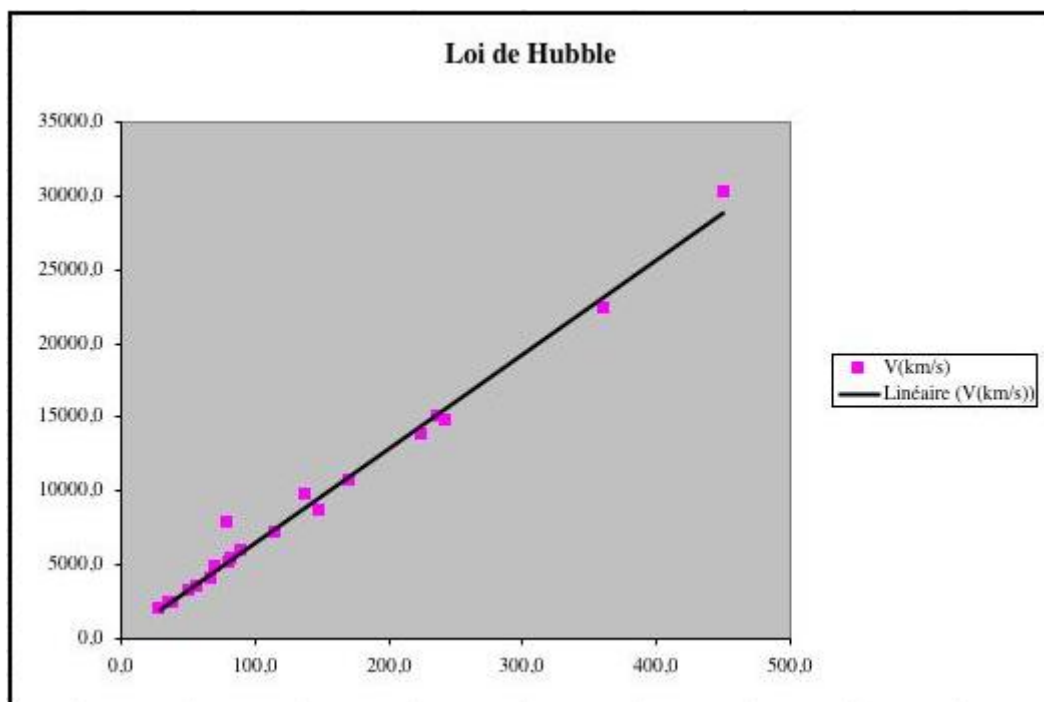


Figure 4 : Résultats cumulés de vitesses radiales de supernovae de Type Ia
(D'après Riess A.G., Press W.H., Kirshner R.P. (1996), Astrophysical Journal vol.473, 88-108, avec l'autorisation de l'AAS.)

La loi de Hubble est manifestement valable. La pente correspond à une constante de Hubble $H_0 = 64 \text{ km/s/Mpc}$, qui ne soulève plus le problème d'un univers plus jeune que les amas globulaires, et qui est de plus peu différente des valeurs obtenues plus récemment, qui vont de :

$$H_0 = 73,8 \text{ à } 67,4 \text{ km/s/Mpc}$$

La figure 4 marque la limite d'utilisation d'une description simple. Au-delà, on ne peut plus ignorer que la géométrie, la cinématique et la dynamique de l'Univers sont régies (tout le prouve jusqu'à présent) par la Relativité Générale, sous une forme il est vrai relativement simple des équations d'Einstein, dans les hypothèses confirmées par l'expérience à grande échelle que l'Univers est homogène et isotrope (enfin, presque). Techniquement, ceci correspond à la métrique dite de Robertson-Walker. Ce modèle implique que deux points de l'espace voient leur distance augmenter au cours du temps (un temps universel, qui est en fait un paramètre) proportionnellement à un paramètre universel a fonction du temps. Il ne s'agit pas d'une explosion, mais d'une dilatation de l'espace temps qui échappe un peu (?) au sens commun. Ainsi, les concepts de distance, de temps, de vitesse relative, d'effet

Doppler sont susceptibles de diverses significations selon le repère choisi, et il devient impératif de le préciser.

Les quantités que l'on mesure sont réinterprétées de la façon suivante.

- La dilatation de l'espace implique également une dilatation des longueurs d'onde. Ainsi, si un corps lointain a émis une lumière au temps t , le rapport de sa longueur d'onde mesurée sur terre au temps présent t_0 , à celle de l'émission (supposée connue s'il s'agit de raies spectrales ou de spectre de SN Ia) est égale au facteur d'expansion de l'Univers pendant la durée de son voyage : $\lambda_{\text{obs}}(t_0) / \lambda_{\text{emis}}(t) = a(t_0)/a(t)$. Cette interprétation remplace celle de l'effet Doppler. On écrit ce rapport sous la forme $\lambda_{\text{obs}}(t_0) / \lambda_{\text{emis}}(t) = 1+z$. Il est facile de voir que dans la limite classique où z est très petit, la quantité cz est identique à la vitesse d'éloignement correspondant à l'effet Doppler non relativiste.

- La « distance » que l'on définit à partir de la luminosité apparente, comparée à la luminosité absolue, par le fait qu'elle est, par convention, inversement proportionnelle au carré de la distance de l'objet lumineux, est appelée « distance de luminosité ». Elle coïncide avec la distance habituelle dans la limite classique, ce qui conserve toute son importance à l'étalonnage des céphéides et la distance au LMC. On peut traduire cette distance de luminosité en temps écoulé depuis le début du Big Bang, mais la relation dépend du repère choisi et du modèle d'Univers adopté. Indépendant du modèle est le fait que plus l'objet est lointain, plus le temps écoulé est long.

Ce que l'on appelle Constante de Hubble est la pente de la fonction cz en fonction de la distance de luminosité au temps présent. Pour des distances de luminosité pas trop grandes, cette pente est constante, mais des mesures récentes ont révélé qu'au-delà de 10 milliards d'années lumière (correspondant à des temps très éloignés), elle diminue. Son interprétation conduit à introduire une densité d'énergie supplémentaire comme composante de l'Univers, l'énergie noire, majoritaire (73% de la densité d'énergie totale), correspondant probablement à une constante cosmologique qu'il faut ajouter dans la métrique décrivant la géométrie de l'univers. Dans un raccourci commode, comme la pente est plus grande actuellement qu'il y a longtemps, on dit que l'expansion de l'Univers s'accélère. Cela a un sens précis pour les cosmologistes, qui savent de quoi il s'agit, et cela plait au grand public.

Tout le reste est de la cosmologie, en dehors du sujet de ce texte.

Qu'a à faire là-dedans la supernova SN1987A?

Dans la mesure où une de ses grandes originalités est l'observation de neutrinos émis lors de sa formation, il était nécessaire de dire d'où venaient les détecteurs qui l'avait rendue possible et la motivation qui les avait fait construire.

Pour ce qui est de la « divine surprise » de l'apparition de l'anneau, de la possibilité qu'il ouvre de mesurer la distance à la supernova, et de là au Grand Nuage de Magellan, et de l'importance de cette mesure pour les étalonnages de distance de luminosité, et par delà pour la détermination de la constante de Hubble et de ses implications quant à la structure et la dynamique de l'Univers, et on ne pouvait éviter de dire quelque chose de ces sujets, même superficiellement. Quant à savoir si l'étude de l'anneau de la supernova a été l'élément clé de ces étalonnages et de leurs conséquences, rien n'est moins sûr, mais elle y a contribué. Ceci n'a pas tellement d'importance, et après tout, ça a été une belle manip.