



HAL
open science

Sur la philosophie de la mécanique quantique de von Weizsäcker

Daniel Parrochia

► **To cite this version:**

Daniel Parrochia. Sur la philosophie de la mécanique quantique de von Weizsäcker. 2021. hal-03164102

HAL Id: hal-03164102

<https://hal.science/hal-03164102v1>

Preprint submitted on 9 Mar 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Sur la philosophie de la mécanique quantique de von Weizsäcker

Daniel Parrochia

Université de Lyon (France)

Résumé. Nous nous intéressons ici au programme de reconstruction de la mécanique quantique du physicien et philosophe allemand Carl Friedrich von Weizsäcker, qui possède encore quelques défenseurs aujourd'hui. Dans la plus grande partie de cet article, nous nous bornons à examiner des questions purement épistémologiques et philosophiques, situant d'abord la théorie des alternatives fondamentales (ou Ur-alternatives) de von Weizsäcker dans la filiation de la théorie kantienne de l'Idéal transcendantal. Nous montrons ensuite que le physicien substitue seulement à la logique classique sur laquelle s'appuyait Kant une logique quantique permettant d'engendrer, à partir des alternatives, via l'isomorphie locale de certains groupes spinoriels et de groupes liés à l'espace-temps, l'ensemble du réel physique auquel nous avons accès. Après l'examen de quelques problèmes, nous montrons pour finir comment cette perspective débouche sur une théorie quantique de l'information.

Mots clés : von Weizsäcker, Heisenberg, alternatives, fondements de la mécanique quantique, Ur-theorie.

1 Introduction

Le physicien et philosophe allemand Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007) est une singularité dans le paysage de la physique germanique. Fils du diplomate Ernst von Weizsäcker (1882-1951) et frère aîné de l'ancien président allemand Richard von Weizsäcker, il est issu d'une famille illustre qui a donné à l'Allemagne des prêtres, des théologiens, des médecins, des scientifiques, des hommes politiques. En tant qu'aîné,

il a hérité, à la mort de son père, du titre de «Freiherr» (baron). Entre 1929 et 1933, von Weizsäcker étudie la physique, les mathématiques et l'astronomie à Berlin, Göttingen et Leipzig, sous l'égide de Werner Heisenberg et Niels Bohr. Son directeur de thèse est Friedrich Hund (1896-1997), un physicien quantique du cercle de Bohr, à l'origine de la fameuse «règle de Hund», une règle empirique utile en spectroscopie pour trouver le terme fondamental d'un atome. Travaillant, en compagnie de Hans Bethe, sur l'énergie de liaison entre nucléons et les processus nucléaires au sein des étoiles, von Weizsäcker découvre une formule décrivant les processus nucléaires stellaires, appelée depuis formule de Bethe-Weizsäcker. Il est aussi, avec Bethe, à l'origine, en 1937, de la compréhension du procédé cyclique de la fusion nucléaire dans les étoiles (processus de Bethe-Weizsäcker (voir [von Weizsäcker 38])). Dès 1938, il travaillera à une théorie de l'accrétion pour expliquer la formation du système solaire à partir de la contraction d'un nuage de gaz et de poussières en rotation (voir [von Weizsäcker 46])). Ses travaux, publiés entre 1944 et 1948, trouveront rapidement un consensus dans la communauté scientifique. Après la guerre, durant laquelle, tout comme Heisenberg, il reste en Allemagne et poursuit ses recherches en physique atomique (y compris en vue de fabriquer l'arme nucléaire), il s'intéressera de plus en plus à des questions épistémologiques et philosophiques, développant une des premières formes de «logique quantique» et mettant en œuvre un programme de reconstruction de la physique quantique. De 1957 à 1969, il occupera le poste de professeur de philosophie à l'université de Hambourg et, dans les années 1970, créera, avec le philosophe indien Gopi Krishna, une fondation «pour les sciences occidentales et la sagesse orientale». Après sa retraite, en 1980, il continuera son travail de redéfinition conceptuelle de la physique quantique et mènera, en même temps, une réflexion éthique et politique, pratiquement jusqu'à sa mort.

2 Orientation générale de la pensée

Von Weizsäcker, semble-t-il, a toujours été philosophe dans l'âme, et n'a fait de la physique à 30 ans – sur le conseil de Heisenberg, d'ailleurs – que pour mieux pratiquer la philosophie à la cinquantaine. Il n'est donc pas étonnant que l'orientation générale de ses travaux, y compris physiques, soit en fait profondément philosophique. Les préférences du physicien s'expriment en faveur de ce qu'on pourrait appeler une sorte de platonisme expérimental, peut-être même un platonisme "transcendantal", comme on le verra plus loin. Ses écrits, en tout cas, manifestent des références multiples à Platon et même à Parménide – dont on pourrait penser que la conséquence directe en physique pourrait être un parti-pris définitif en faveur des idées ou de

la théorie. Ce n'est pourtant pas le cas. Une anecdote révélatrice, à ce sujet, est celle que Von Weizsäcker raconte concernant ce physicien américain¹ qui, en 1935, crut avoir expérimentalement réfuté le principe de conservation de l'énergie : dans le cas des processus atomiques de haute énergie, en effet, il n'était pas, selon lui, strictement vérifié et n'avait donc qu'une valeur statistique. Heisenberg, après avoir lu son article, le rejeta : «Il mesure mal» affirma-t-il. Or, commente von Weizsäcker, le rejet de Heisenberg n'était pas fondé sur un *dédain* de l'expérience, mais, tout au contraire, sur l'idée qu'il se faisait de ce que *devait être* une véritable expérience, et sur le constat corrélatif que celle du physicien en question ne satisfaisait pas les exigences requises. Il en résulte, conclut von Weizsäcker, que savoir ce qu'est une expérience en général n'est pas vraiment clair et nécessite, en réalité, des considérations philosophiques et épistémologiques pour pouvoir être précisé (voir [Drieschner 14²], 30). Sur le fond, l'expérience est nécessaire, mais expérimenter n'est pas comprendre. Et comme, contrairement à Popper, von Weizsäcker a tendance à penser qu'aucune expérience ne peut réfuter une théorie, il rappelle que c'est encore à la beauté et à la simplicité que Heisenberg – à tort ou à raison – se référait pour juger de la pertinence d'une avancée physique².

On ne cherchera pas, cependant, dans les écrits philosophiques de von Weizsäcker, une approche des philosophies passées qui soit irréprochable du point de vue de l'histoire de la philosophie. Ses références aux philosophes grecs ou à des penseurs plus proches de nous sont aimantées par la perspective transcendantale dans laquelle il se place. Très influencé par Kant, en effet, von Weizsäcker voit essentiellement la métaphysique comme une méta-physique, autrement dit, une théorie qui doit énoncer des conditions de possibilité de la physique. Mais il n'entend pas, toutefois, résoudre cette question de façon scientifique ou à la manière du positivisme logique. Von Weizsäcker est non seulement convaincu que la physique est dans l'histoire, mais que le temps est, en réalité, au fondement de l'expérience humaine³. La co-perception d'une différence entre l'objet sensible et l'«eidos», autrement dit la forme, la régularité qui en rendent compte, fait de la philosophie une véritable théorie de l'apparence phénoménale où les positions idéalistes et empiristes n'ont cessé de s'affronter au cours de l'histoire (voir [Drieschner 14²],73). Von Weizsäcker, qui n'hésite pas à rapprocher le "νοῦς"

1. Il est assez amusant que von Weizsäcker préfère mentionner ce physicien – dont il ne cite d'ailleurs pas le nom – plutôt que Bohr qui, dans la théorie BKS, a commis en fait la même erreur.

2. On sait qu'aujourd'hui, c'est précisément une telle position qui est contestée par certains (voir [Hossenfelder 18]).

3. Heidegger qu'il connaissait et auquel il fait référence, l'a certainement aussi influencé, d'autant que la lecture heideggerienne de Kant, insiste sur l'importance du temps dans la *Critique de la Raison Pure*.

(ou esprit) des Hellènes du sujet transdendantal, tente de montrer, à la lumière des philosophes grecs (Platon et Parménide avant tout), que la quête de la physique – y compris quantique – est en fait une nouvelle recherche de formes stables et, au-delà, la quête d'une véritable unité de la nature. Dans ce contexte, Dieu est un autre nom pour l'Un et le *Timée* devient une espèce de modèle de la démarche physique, dont on trouve aussi des équivalents dans d'autres cultures (voir [Drieschner 14²], 119), et cela, même si la modernité s'en écarte beaucoup. Avec quelques adaptations toutefois – ainsi, le quantum d'action peut devenir une sorte de nouvel "Un" – il est possible de réinterpréter la physique moderne en termes philosophiques, en trouvant chez Platon les éléments fondamentaux qu'il convient de combiner, ou chez Aristote une inspiration pour fonder une théorie physique – et non plus mathématique – du continuum. La démarche est d'autant plus impressionnante que von Weizsäcker est probablement l'un des derniers physiciens à connaître le grec ancien et à pouvoir entrer dans le détail de ces textes. Le résultat de cette recherche a été plutôt fructueux : la méditation des hypothèses du *Parménide* ou de celles du *Timée*, est certainement, comme on le verra plus loin, l'une des origines de la théorie des alternatives fondamentales (ou Ur-alternativen) qui doivent être mises, pour le physicien, au fondement d'une nouvelle théorie de la physique⁴.

3 L'idée d'alternative

On sait qu'en logique standard – disons, plus précisément, en calcul des propositions bivalentes (où nous représentons traditionnellement la valeur "vrai" par 1 et la valeur "faux" par 0), l'alternative (\wedge) se distingue de la disjonction (\vee) et peut être définie comme la négation de l'équivalence (\equiv). Étant donné deux proposition p et q , nous avons les tables de vérité suivantes :

p	q	$p \vee q$	$p \wedge q$	$p \equiv q$
1	1	1	1	1
1	0	1	0	0
0	1	1	0	0
0	0	0	0	1

4. Une autre source serait cette tendance de la pensée allemande, depuis Goethe et son *Essai sur la métamorphoses des plantes*, à rechercher des «prototypes idéaux», des «Urformen» ou des «Urphänomenen», autrement dit des configurations originaires capables de contenir en germe les formes ultérieures, de définir l'organisation et d'expliquer le développement de tout ce qui s'ensuit. On la retrouverait encore, dans les sciences humaines, chez Walter Benjamin.

Heisenberg considérait volontiers la symétrie comme un point de départ assez naturel pour un physicien. Même philosophiquement justifié, ce raisonnement laissait cependant von Weizsäcker insatisfait. C'est pourquoi, sans doute, il chercha à s'expliquer l'origine de la symétrie, et il la trouva dans l'existence d'alternatives fondamentales dans notre questionnement de la nature. Un tel raisonnement le conduisit à mettre en place le programme abstrait d'une possible reconstruction de la physique en termes d'alternatives oui-non, qu'il appela par la suite «Ur-théorie».

L'expression – sinon la plus ancienne, du moins la plus concise – de la théorie des alternatives⁵ telle qu'elle a été développée par C. F. von Weizsäcker, apparaît dans le livre que Heisenberg publie en 1969, sous le titre *La Partie et le Tout* (Der Teil und das Ganze). Heisenberg rapporte ainsi les propos de son ancien élève :

«Toute réflexion sur la nature doit s'effectuer inévitablement selon de grands cercles ou des spirales. Car nous ne pouvons comprendre quelque chose, en ce qui concerne la nature, qu'à condition de réfléchir sur elle ; et tout notre comportement, y compris notre pensée, est issu de l'histoire de la nature. En principe, donc, notre réflexion pourrait commencer en un point quelconque. Mais notre pensée est ainsi faite qu'il paraît raisonnable de commencer par le plus simple ; et le plus simple, c'est l'alternative : oui ou non, être ou ne pas être, bien ou mal. Tant que l'on réfléchit sur une telle alternative comme on le fait dans la vie de tous les jours, il n'y a rien de plus à en tirer. Mais nous savons bien, grâce à la théorie quantique, qu'une alternative ne sollicite pas forcément les réponses 'oui' ou 'non', mais qu'il existe encore d'autres réponses – complémentaires vis-à-vis de celles-là – qui consistent à fixer une certaine probabilité pour le 'oui' ou pour le 'non', ayant, elle aussi, valeur de prédiction. Les réponses possibles forment donc un continu. Mathématiquement, il s'agit du groupe continu des transformations linéaires de deux variables complexes. Ce groupe contient déjà le groupe de Lorentz qui est associé à la théorie de la relativité. Donc, si l'on pose la question, à propos de l'une quelconque des réponses possibles, de savoir si elle est juste ou non, il s'agit déjà d'une question à propos d'un espace qui est apparenté au continu d'espace-temps du monde réel.» ([Heisenberg 72], 329-330).

La conversation contient en germe tout le travail passé, présent et futur de Von Weizsäcker. Celui-ci suppose en substance qu'en développant une succession d'alternatives, on pourra rejoindre la structure du groupe sous-jacent à la mécanique quantique, puis, de là, reconstruire l'espace ou l'espace-temps des phénomènes. Comment est-ce possible ?

Mathématiquement, le groupe des transformations linéaires de 2 variables complexes

5. Selon Holger Lyre (voir [Lyre 03]), il semble que l'idée en remonte à 1954.

mentionné par von Weizsäcker est $GL(2, \mathbb{C})$ ou, lorsque les variables sont normées à 1, le groupe spécial linéaire $SL(2, \mathbb{C})$, dont un sous-groupe utile en physique est le groupe $SU(2)$, ou groupe spécial unitaire de degré 2, qui est le groupe des matrices unitaires g à coefficients complexes de dimension 2×2 et de déterminant 1. On a, explicitement :

$$SU(2) = \left\{ g = \begin{pmatrix} \alpha & -\bar{\beta} \\ \beta & \bar{\alpha} \end{pmatrix} \right\}, \alpha, \beta \in \mathbb{C}, |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1.$$

Il se trouve que ce groupe $SU(2)$, qui sert à représenter le spin des particules, est homomorphe au groupe spécial orthogonal $SO(3)$ de l'espace réel à trois dimensions. On sait, en effet, que $SU(2)$ est difféomorphe à la 3-sphère \mathbb{S}^3 par l'application suivante :

$$\begin{aligned} \varphi : S^3 \subset \mathbb{R}^4 &\rightarrow SU(2) \\ (a, b, c, d) &\mapsto \begin{pmatrix} a + ib & -c + id \\ c + id & a - ib \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Le difféomorphisme φ transmet la multiplication de $SU(2)$ à \mathbb{S}^3 , ce qui donne la multiplication des quaternions. $SU(2)$ est donc isomorphe au groupe des quaternions unitaires. Comme les quaternions représentent les rotations dans l'espace à 3 dimensions, il existe un homomorphisme surjectif de groupes de Lie $SU(2) \rightarrow SO(3)$ de noyau $+I, -I$, les matrices suivantes formant une base de l'algèbre de Lie $\mathfrak{su}(2)$:

$$\begin{aligned} i\sigma_x &= \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \\ i\sigma_y &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \\ i\sigma_z &= \begin{pmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{pmatrix} \end{aligned}$$

(où i est « l'unité imaginaire »)

Ces matrices σ (dites « matrices de Pauli ») étant utilisées pour représenter le spin des particules, qui prend toujours la forme d'une alternative fondamentale, on peut donc considérer $SU(2)$ comme un modèle typique des alternatives en question. Maintenant, le fait que $SU(2)$, le groupe de symétrie d'une alternative quantique binaire,

soit localement isomorphe au groupe de rotation tridimensionnel $SO(3)$ dans l'espace euclidien, permet de concevoir que ce dernier puisse être, en quelque sorte, une conséquence des alternatives fondamentales, la connexion s'opérant entre structures spinorielles et structures d'espace-temps.

Cette théorie imaginée par von Weizsäcker dans les années 1960, et rapportée de façon informelle par Heisenberg dans le passage que nous avons cité, a des aspects fascinants.

On notera d'abord que la «circularité» dont il est fait mention dans les premières lignes du texte était déjà évoquée par l'auteur comme une des deux formes possibles de la complémentarité dès son premier article sur "Komplementarität und Logik" (voir [von Weizsäcker 55] et le commentaire de [Jammer 74], 91-104), passage sur lequel nous reviendrons plus loin.

Ensuite, le fait que Von Weizsäcker observe que l'alternative soit présente dans la vie quotidienne sans qu'on puisse en tirer grand-chose est une remarque en apparence anodine, mais en fait lourde de sens. On peut imaginer l'alternative comme présente à tout instant dans la vie d'un individu capable de décision, ce qui fait de toute décision un acte particulier qui s'inscrit dans l'ensemble des décisions possibles répondant à l'ensemble des alternatives possibles sous lesquelles peut apparaître l'univers. En ce sens, le comportement d'un gros organisme est tout aussi énigmatique que celui d'une petite particule. Dans son roman *Cosmos*, l'écrivain polonais Witold Gombrowicz en a fait un objet de méditation, soulignant le piège que de telles alternatives constituent pour la raison humaine – ce qu'avait probablement déjà vu Buridan ou, si ce n'est lui, celui à qui l'on doit l'histoire de l'âne hésitant entre un pré et un seau d'eau :

«Devant moi deux petites pierres, une à droite, une à gauche, et un peu plus loin sur la gauche la tache crémeuse d'un coin de terre que les fourmis avaient retourné (...) J'allais passer entre ces deux pierres, mais au dernier moment je fis un petit écart pour passer entre une des pierres et le petit coin de terre retournée, c'était un écart minime, rien du tout... et pourtant ce très léger écart était injustifié et cela, semble-t-il, me déconcerta... alors, machinalement, je m'écarte à nouveau un tout petit peu pour passer entre les deux pierres, comme j'en avais d'abord l'intention, mais j'éprouve une certaine difficulté, oh très faible, venue de ce que, après ces deux écarts successifs, mon désir de passer entre les pierres a pris désormais le caractère d'une décision, peu importante bien entendu, mais d'une décision quand même. Ce que rien ne justifie car la parfaite neutralité de ces choses dans l'herbe n'autorise pas une décision : quelle différence de passer par ici ou par là ? (...) mais la décision, après les quelques secondes qui viennent de s'écouler, est devenue plus décisive, et

comment décider puisque tout se vaut?... donc je m'arrête à nouveau. Et, furieux, j'avance à nouveau le pied pour passer, comme je le veux désormais, entre la pierre et le coin de terre, mais je constate que si je fais ainsi après deux faux départs, cela ne sera plus une marche normale, mais bien quelque chose d'important... Je choisis donc la route entre le coin de terre et la racine... mais je m'aperçois que ce serait agir comme si j'avais peur, donc je veux à nouveau passer entre la pierre et le coin de terre, mais diable, qu'arrive-t-il, qu'y a-t-il, je ne vais pas m'arrêter ainsi au milieu de la route, quoi donc, lutterais-je contre des fantômes? Qu'y a-t-il, Qu'y a-t-il? (...) je ne bougeais pas. Je restais là, debout. Cette attitude devenait de plus en plus irresponsable et même démente, je n'avais pas le droit de rester là ainsi, IMPOSSIBLE! (...) C'est alors que je bougeai. D'un seul coup, je fis basculer toute cette impossibilité en moi et je passai facilement sans même savoir par où, parce que c'était sans importance, et en pensant à autre chose : que le soleil se couchait plus tôt par ici, à cause des montagnes. Oui, le soleil était déjà assez bas. Je marchai dans la prairie vers la maison, en sifflant, j'allumai une cigarette et il ne me resta qu'un pâle souvenir de la scène, comme un vague résidu.» ([Gombrowicz 12], 174-176)

L'idée qu'après tout, tout pourrait faire sens, donc que toute alternative et toute décision qui la résout pourraient avoir une importance insoupçonnée, est une situation familière qu'on rencontre aussi dans certains jeux régis par un fort déterminisme. Dans un jeu comme le Fan tan, par exemple, où deux joueurs sont en présence de p tas d'allumettes et choisissent à tour de rôle un tas (non vide) pour y retirer le nombre d'allumettes qu'ils souhaitent (au moins une), de telle sorte que le gagnant est celui qui enlève la dernière allumette, la situation est entièrement déterminée dès le départ. On prouve (voir [Berge 73], 300-309) qu'un choix est gagnant si la somme digitale des nombres d'allumettes laissées dans les différents tas est nulle. Dans la variante rendue célèbre par le film d'Alain Robbe-Grillet, *L'Année dernière à Marienbad*, et où, cette fois-ci, c'est celui qui prend la dernière allumette qui perd, tout choix est gagnant, évidemment, si la somme digitale des nombres d'allumettes laissées dans les différents tas est non nulle⁶.

6. La notion de «somme digitale» s'obtient, à partir de l'écriture décimale des nombres, en passant en écriture binaire, puis en remplaçant cette écriture par ce qu'on appelle le «développement binaire» du nombre (on lit le nombre binaire à l'envers, et on sépare ses composantes par des virgules). Par exemple : $3 = 11 = (1, 1)$; $7 = 111 = (1, 1, 1)$. D'où $3 + 7 = (1, 1) \dot{+} (1, 1, 1) = (0, 0, 1) = 100 = 4$. Cette règle découle de la formalisation du jeu en théorie des graphes où les tas sont représentés par des graphes $G_i = (X_i, \Gamma_i)$ successifs dont les sommets x_i représentent chaque fois la position du joueur. Pour tout tas, la méthode repose sur le calcul d'une fonction de Grundy $g(x)$ dont on déduit un noyau $S = \{x \mid g(x) = 0\}$. Le gain est assuré, dans le cas du Fan tan, si on choisit chaque fois une position $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ pour laquelle $g_1(x_1) \dot{+} g_2(x_2) \dot{+} \dots \dot{+} g_n(x_n) = 0$.

La physique quantique nous fait-elle échapper à ce monde des lois déterministes ? C'est un des enjeux de la théorie des alternatives, telle qu'elle va être explicitée par von Weizsäcker dans différents textes. Essayons maintenant de détailler le cheminement de l'auteur dans l'élaboration de sa théorie.

4 La logique quantique de von Weizsäcker

Quoique faisant partie du cercle de Heisenberg et de Bohr, à l'origine de l'interprétation de Göttingen-Copenhague de la mécanique quantique, Von Weizsäcker, dès le milieu des années 1950, a cherché à en développer une compréhension logique qui relevait d'un point de vue un peu différent. Comme le rappelle Max Jammer, sa première formulation apparut à l'occasion du soixante-dixième anniversaire de Niels Bohr (7 octobre 1955) avec le premier de trois articles consacrés à la question.

La logique de la complémentarité de von Weizsäcker se construit comme une modification de la logique des propositions contingentes, en particulier celle des simples alternatives (einfache Alternative) mentionnée plus haut, telle qu'elle se présente dans des expériences comme celle des fentes d'Young, quand la particule passe soit dans la fente 1, soit dans la fente 2. Von Weizsäcker dérive les règles de sa logique de la situation même qui est celle décrite par la mécanique quantique.

Comme on sait, la fonction d'état ψ , derrière le diaphragme constitué par les fentes, est uniquement déterminée par les deux nombres complexes u et v définis par l'équation :

$$\psi = u\phi_1 + v\phi_2$$

où $uu^* + vv^* = 1$, ϕ_1 et ϕ_2 sont normalisés à l'unité et $w_1 = |u|^2$, $w_2 = |v|^2$ sont les probabilités que la particule soit passée par la fente 1 ou par la fente 2, respectivement. À partir de là, on a les situations suivantes :

1. Si $u = 1$, alors $v = 0$ et la proposition a_1 : "La particule est passée par la fente 1" est vraie.
2. Si $v = 1$, alors $u = 0$ et la proposition a_1 : "La particule est passée par la fente 1" est fausse.

En conséquence, si 1 dénote le vrai et 0 le faux, et si nous appelons "élémentaires" ces propositions qui décrivent des cas purs, alors, l'idée d'une logique de la complé-

mentarité peut être résumée, selon von Weizsäcker, de la façon suivante : chaque proposition peut recevoir, en dehors des valeurs 1 et 0, un nombre complexe comme valeur de vérité. Le carré de la valeur absolue – tout comme $|u|^2$ dans le cas mentionné ci-dessus – donne la probabilité que la proposition (avec la valeur de vérité u), si elle est expérimentalement testée, soit prouvée vraie.

Comme le remarque Max Jammer (voir [Jammer 74], 377), la logique de von Weizsäcker est donc une logique infini-valente. Associant le vecteur à deux composante (u, v) avec l'alternative originale (autrement dit, la question de savoir si a_1 est vraie ou a_2 est vraie, de telle manière que $(1, 0)$ corresponde à la valeur de vérité de a_1 et $(0, 1)$ à la valeur de vérité de a_2 , von Weizsäcker pose que, pour chaque vecteur (u, v) , s'il est normalisé comme on l'a dit, il existe une proposition qui est vraie si les propositions de l'alternative originale ont les valeurs u et v . Chaque proposition caractérisée par (u, v) et qui diffère de a_1 et de a_2 est dite "complémentaire de a_1 et a_2 ". La complémentarité prend donc ici un caractère purement logique : si l'une des deux propositions est vraie ou fausse, la complémentaire n'est ni vraie ni fausse.

On trouve une illustration de cette idée dans la théorie quantique des particules de spin- $\frac{1}{2}$, qui semble d'ailleurs l'avoir inspirée. Dans cet exemple, le vecteur (u, v) est simplement le spineur de Pauli à deux composantes. Si un champ magnétique donné est dirigé dans la direction positive z , alors, l'alternative originaire se situe entre les deux propositions :

a_1 : Le spin est dans la direction positive z .

a_2 : Le spin est dans la direction négative $-z$.

À tout spineur (u, v) correspond alors une direction d'orientation de spin qui, si a_1 a la valeur u et a_2 la valeur v , peut être définie, en termes de cosinus directeurs par les formules :

$$\begin{aligned}x &= uv^*vu^*; & y &= i(uv^*vu^*); \\z &= uu^* - vv^*; \\x^2 + y^2 + z^2 &= 1,\end{aligned}$$

et, en termes d'angle polaire θ et d'angle azimuthal ϕ , par les équations :

$$u = \cos\frac{\theta}{2}\exp(-\frac{i\phi}{2}), \quad v = \sin\frac{\theta}{2}\exp(-\frac{i\phi}{2}).$$

Si θ ne vaut ni 0 ni π , alors la proposition "Le spin a la direction (θ, ϕ) " est complémentaire des propositions a_1 et a_2 .

Avec cet assignement de valeurs de vérité, comme von Weizsäcker a pu le montrer, on introduit un niveau logique supérieur, car l'alternative originaire renvoie désormais à une propriété de l'objet physique et nous nous interrogeons alors sur la vérité de l'alternative ou, plus précisément, de la réponse qu'on lui apporte, ce qui est une métaquestion : «quelles sont les valeurs de vérité des réponses possibles?» Et la logique de la complémentarité répond à cette métaquestion de la façon suivante : «les réponses possibles sont les vecteurs normalisés (u, v) ». La logique de la complémentarité a ainsi été introduite dans le langage objet par le biais d'un métalangage qui applique la logique bivalente ordinaire. La différence entre la logique quantique et celle-ci peut alors se formuler de la façon suivante : alors qu'en logique classique, la proposition a_1 est équivalente à la proposition " a_1 est vraie", ce n'est plus le cas en logique de la complémentarité. Bien que la vérité (resp. la fausseté) de a_1 résulte de la vérité (resp. la fausseté) de " a_1 est vraie", la converse ne tient pas. Si la proposition " a_1 est vraie" est fautive, a_1 n'est pas nécessairement vraie ou fautive, et ce, même si " a_1 est vraie" est définitivement fautive.

Dans le reste de l'article et dans ceux qui le suivront quelques années plus tard (voir [von Weizsäcker 58¹]; [von Weizsäcker 58²]), la relation entre langage et métalangage est approfondie, le formalisme de Von Neumann réinterprété en terme de logique de la complémentarité et les quantifications plus élaborées liées à une théorie quantique des champs sont présentées comme des applications dérivées de la théorie ici proposée. Finalement, les antiparticules sont introduites grâce à une généralisation de cette procédure de quantification en prenant, non plus *un* nombre complexe mais plutôt une paire de nombres complexes comme valeur de vérité. À la fin de son troisième article ([von Weizsäcker 58²], 721), von Weizsäcker remarque que, comme l'interaction des champs amène à introduire plusieurs alternatives de base dans la théorie, qui sont néanmoins liées au même espace, il semblerait plus naturel de construire un «champ primordial» (*Urfeld*) au sens des derniers travaux de Heisenberg, en partant d'une alternative de base (*Grundalternative*), dont l'interaction avec elle-même devrait produire tous les champs connus. Cette idée recevra plus tard un grand développement (voir section 6).

Dans les années ultérieures, la logique de von Weizsäcker n'a pas trouvé beaucoup de défenseurs, mis à part ceux qui – comme Georg Süssmann et Erhard Scheibe – avaient participé à son élaboration. Niels Bohr s'y montra hostile (voir [Jammer 74], 379), mais sans qu'on puisse savoir s'il avait vraiment examiné cette tentative de près. Il est à craindre qu'il n'ait pas vu l'intérêt général de la perspective.

Celle-ci nous semble tout entière tenir dans la possibilité de déduire l'ensemble du monde physique (et peut-être du monde tout court) de ces alternatives fondamen-

tales qu'a dévoilées la mécanique quantique, ce qui revient à faire du monde – en tout cas du monde tel qu'il nous apparaît via la mécanique quantique – une gigantesque cascade d'alternatives (en principe infinies) qui, philosophiquement, généralise – même si von Weizsäcker ne l'a jamais exprimé ainsi – la théorie kantienne de l'idéal transcendantal. Nous rappellerons donc d'abord ici l'essentiel de cette théorie.

5 De l'«idéal transcendantal» kantien aux alternatives de von Weizsäcker

Dans la 2^e section du Livre I de la dialectique transcendantale (voir [Kant 65], 415-421), Kant s'efforce de démontrer pas à pas le mécanisme à l'origine de l'illusion en quoi consiste l'idée de Dieu. L'illusion vient du fait que nous attribuons un être à ce qui n'est, en réalité, que l'idée d'un "ensemble de toute possibilité", idée à laquelle nous parvenons à partir du constat que, de même que tout concept est soumis à un *principe de déterminabilité*, qui assure que, de deux prédicats contradictoires, un seul doit lui convenir, de même, toute chose est soumise, quant à sa possibilité, à un *principe de détermination complète* "suivant lequel, de tous les prédicats *possibles des choses*, en tant qu'ils sont comparés à leurs contraires, un seul doit lui convenir"([Kant 65], 415). Et quoique par cet ensemble de toute possibilité, on ne pense rien de plus que l'ensemble de tous les prédicats possibles, cette idée peut encore être précisée au sens où elle ne doit en fait contenir que des prédicats primitifs réellement possibles (autrement dit, en sont exclus les prédicats dérivés comme les prédicats qui seraient auto-contradictaires). D'où une structure mathématique particulière, que nous avons décrite ailleurs comme étant un treillis (voir [Parrochia 93], 148-162).

Toute chose se découpe donc dans cette sorte de *substratum transcendantal* "qui contient pour ainsi dire toute la provision de matière d'où peuvent être tirés tous les prédicats possibles des choses" (voir [Kant 65], 417) et qui n'est autre que "l'idée de toute réalité". Il s'agit donc d'une représentation *idéale* qui sert de fondement à la détermination complète de toute chose et qui est comme "la condition matérielle suprême et parfaite de sa possibilité, condition à laquelle toute pensée des objets en général quant à leur contenu doit être ramenée"(voir [Kant 65], 417). Pour Kant, nous passons indûment de cet ensemble de toute possibilité à l'idée d'un tout de la réalité et, de là, à l'idée métaphysique (et religieuse) d'un être suprême.

Il est alors intéressant de noter la façon dont s'opère selon Kant, et en accord avec

la pensée classique, la détermination logique d'un concept et, si l'on peut dire, la pseudo-détermination transcendantale de l'objet correspondant.

5.1 Détermination logique d'un concept, syllogisme disjonctif et pseudo-détermination transcendantale

La détermination logique d'un concept par la raison, écrit Kant, repose "sur un syllogisme disjonctif" dont la majeure contient une division logique (la division de la sphère d'un concept général), la mineure limite cette sphère à une partie et la conclusion détermine le concept par cette partie" (voir [Kant 65], 417).

Nous avons déjà commenté (voir [Parrochia 93], 117-128) les textes de la *Logique* de Kant où ce dernier explique ce qu'est la "division logique" de la *sphère* d'un concept ou, comme on dirait aujourd'hui, de son *extension*. Rappelons seulement ici que, selon Kant – et la logique classique – "les membres de la division doivent être séparés les uns des autres par opposition contradictoire, et non par simple contrariété" (voir [Kant 70], 157), ce qui signifie que la division est toujours dichotomique, car la dichotomie – contrairement à la polytomie, n'exige pas de référence à une intuition (sensible ou a priori) et n'est fondée que sur le principe de la contradiction (voir [Kant 70], 158). D'où cette note apparemment anodine de la *Critique de la Raison pure* où Kant précise que "la détermination de tout *concept* est soumise à l'UNIVERSALITÉ (*universalitas*) du principe qui exclut tout milieu entre deux prédicats opposés" (voir [Kant 65], 415).

Expliquons alors ce qu'est un "syllogisme disjonctif", au sens de la logique classique. C'est, comme le rappelle Kant, un raisonnement valide dont la majeure est une proposition disjonctive, dont la mineure élimine un des membres de la disjonction et dont la conclusion détermine l'autre. Soit l'exemple simple :

- (1) La porte est ouverte ou (exclusif) la porte est fermée ;
- (2) La porte n'est pas ouverte ;
- (3) Donc la porte est fermée.

On notera que les prédicats "ouverte" et "fermée" sont considérés ici comme des prédicats contradictoirement opposés au sens de la logique classique, c'est-à-dire qu'ils excluent, comme le veut Kant, tout "milieu", c'est-à-dire toute situation intermédiaire (porte entrebâillée, à moitié ouverte, au trois-quart ouverte, etc.).

Dans ces conditions, la succession des déterminations logiques de plus en plus précises des concepts à partir du tout de la possibilité s'opère par une cascade de raisonnements du type A ou B , non B , A .

La pseudo-détermination transcendantale procèdera de même : évidemment, comme le remarque Kant, le concept d'une réalité en général ne peut pas être divisé *a priori* puisque, sans l'expérience, on ne connaît pas d'espèces déterminées de réalités comprises sous le genre : c'est pourquoi nous parlons de pseudo-détermination. Dans ce contexte, cependant, la majeure du syllogisme ne peut être autre chose que la représentation de l'ensemble de toute réalité, qui devient donc le prototype (*prototypon*) d'où toutes les choses sont supposées dériver comme des copies plus ou moins défectueuses. Mais ce qui se cache derrière cet ensemble n'est pas un être originaire ou l'être de tous les êtres, c'est seulement l'idéal transcendantal, c'est-à-dire l'ensemble de tous les prédicats primitifs et non auto-contradictaires qu'on a transformé, illusoirement, en réalité suprême. Comme le philosophe Gilles Deleuze l'a très bien vu (voir [Deleuze 69], 342), Kant réduit donc Dieu – dans ce texte – à l'illusion construite sur le principe du syllogisme disjonctif.

On aura noté que, les disjonctions kantienne étant fondées sur des divisions conceptuelles logiques opposant des prédicats contradictoires, ce sont en réalité des alternatives (ceci, ou bien cela, mais pas les deux à la fois). Mais ce sont des alternatives telles que les conçoit la logique classique, c'est-à-dire, si on passe des prédicats aux propositions prédictives qui leur sont associées, des propositions qui prennent leur valeur de vérité dans une logique bivalente et qui suivent les règles de celle-ci.

La logique de von Weitzäcker va être au contraire – comme on l'a vu plus haut en suivant Max Jammer – un cas particulier de logique infini-valente⁷. Transformant en

7. Comme le montre très bien Grzegorz Malinowski (voir [Malinowski 94]), l'origine des logiques infini-valentes est la généralisation opérée par Łukasiewicz, en 1922, de la logique trivalente à une famille de matrices plurivalentes à nombre de valeurs fini et même infini. Pour les définir rigoureusement, on se donne un langage logique, avec variables, parenthèses, définitions d'expressions bien formées, ainsi qu'un ensemble de connecteurs du type $\neg, \supset, \vee, \wedge, \equiv$, avec les conditions suivantes :

On appellera matrice n -valente de Łukasiewicz (avec $n \in \mathbb{N}, n > 2$, où $n = \aleph_0$, ou $n = \aleph_1$), une matrice telle que l'ensemble des valeurs de vérité soit :

$$\begin{array}{ll} \{0, 1/n - 1, 2/n - 1, \dots, 1\}, & \text{si } n \in \mathbb{N}, n > 2 \text{ (cas fini)} \\ \{s/w : 0 \leq s \leq w; s, w \in \mathbb{N}, w \neq 0\}, & \text{si } n = \aleph_0 \text{ (infini dénombrable)} \\ [0, 1], & \text{si } n = \aleph_1 \text{ (infini continu)} \end{array}$$

Dans une telle logique, les connecteurs sont définis comme suit :

$$\neg x =: 1 - x;$$

$$x \wedge y =: \min(1, 1 - x + y);$$

principe toute alternative en une alternative infinie, elle va singulièrement compliquer le syllogisme disjonctif à l'origine de la détermination complète des concepts ou propriétés fondamentales des choses. Nous allons voir à quoi ressemble une alternative dans une logique infini-valente du type de celle de von Weizsäcker et ce que devient, dans cette logique, le syllogisme disjonctif. Mais auparavant, regardons ce qu'il en est des critiques modernes de la structure kantienne.

5.2 Les critiques modernes de Kant

On l'a vu, l'*idéal transcendantal* kantien comme ensemble des prédicats possibles ou ensemble de toute possibilité est un ensemble de prédicats contradictoires deux à deux qu'on peut représenter aussi sous la forme d'une collection d'alternatives, puisque, chaque fois, un de ces prédicats ou propriétés contradictoires peuvent être attribués à un sujet, donc faire l'objet d'une proposition prédicative. Celui qui saurait tout aurait donc la maîtrise du syllogisme disjonctif, c'est-à-dire, à partir de l'ensemble de toute possibilité, pourrait, à coup sûr, exclure d'un sujet quelconque les prédicats qui ne lui conviennent pas et attribuer, d'une manière générale, les bons prédicats aux bons sujets.

La faiblesse des philosophies contemporaines (French Theory) tient souvent dans le fait que leur remise en cause de la pensée classique ne conduit pas à des théories solides mais débouche sur des univers faibles, si peu organisés que tout y est possible

$$x \vee y =: (x \supset y) \supset y = \max(x, y)$$

$$x \wedge y =: \neg(\neg x \vee \neg y) = \min(x, y)$$

$$x \equiv y =: (x \supset y) \wedge (y \supset x) = 1 - |y - x|$$

On déduit facilement de la dernière ligne la formule pour $x \text{ w } y = \neg(x \equiv y)$, puisque c'est la formule complémentaire de la précédente, soit :

$$x \text{ w } y =: |y - x|.$$

Dans une logique infini-valente, on pourra donc appliquer sans problème le syllogisme disjonctif. Quelles que soient les valeurs de x , de y et de $x \text{ w } y$, on pourra toujours nier d'une disjonction alternative une partie (resp. finie ou infinie) pour obtenir, in fine, son complément (resp. infini ou fini).

Si maintenant nous remplaçons les valeurs x et y par des nombres complexes z et z' identifiés respectivement aux couples (u, v) et (u', v') , on peut définir une valeur de l'alternative au sens de von Weizsäcker par le nombre complexe $|z' - z|$, ce qui fait de sa logique une variante des logiques de Łukasiewicz. Le problème, nous le verrons, est que les lois de la physique quantique la font parfois échapper à la logique ordinaire.

– ce qui n’a évidemment aucun sens du point de vue physique.

Le cas de Gilles Deleuze en est un exemple remarquable. Dans sa critique de la philosophie kantienne, celui-ci avait remarqué qu’on pouvait opposer à cet usage négatif et limitatif de la disjonction exclusive (autrement nommée alternative) une autre forme de disjonction – inclusive et affirmative. L’ensemble des prédicats possibles n’est alors plus limité par les négations des syllogismes disjonctifs successifs, donnant alors lieu – si, comme dans le cas décrit par Kant, on lui attribue abusivement un être – à une tout autre figure que celle de l’être suprême.

Le modèle en est la théorie de Pierre Klossowski. Chez ce dernier auteur, en effet, Dieu, comme Être des êtres, est remplacé par le Baphomet, "prince de toutes les modifications" ou "modification de toutes les modifications" (voir [Deleuze 69], 344).

Cette figure du «diable» ou de l’«Antéchrist» n’est alors plus celle qui exclut les prédicats d’une chose en la déterminant, c’est-à-dire en niant d’elle-même les prédicats qui ne lui conviennent pas, mais celle qui ouvre chaque chose à l’infini des prédicats possibles en l’affirmant.

Le Baphomet lui-même, dans l’iconographie traditionnelle, se présente comme une figure barbue, à tête de bouc et possédant des seins. Autrement dit, il est à la fois un homme, une femme, un animal, etc.⁸. Des prédicats contradictoires lui sont attribués ensemble.

Dans le roman fantastique de Klossowski où les âmes ou «souffles» des morts, qui peuvent se réincarner, manquent finalement de corps pour le faire et tournoient indéfiniment, ils se compénètrent et s’emmêlent si bien que les identités de chacun ne sont plus assignables : "aussi chacun de ces souffles se perdait-il dans les effluves d’un autre, selon cette assimilation immédiate dont chacun était doué, le plus voluptueux comme le plus chaste, le plus criminel comme le plus innocent" (voir [Klossowski 65]).

8. Le célèbre *Dogme et rituel de Haute-Magie d’Eliphas Lévi*, lui donne la forme d’un bouc dressé sur ses pattes de derrière et portant des cornes. Sa main droite désigne, « en haut la lune blanche de Chesed », tandis que l’autre montre « en bas la lune noire de Geburah » et un bras levé porte l’inscription « Solve », l’autre « Coagula ». L’auteur souligne son androgynie en ajoutant : « L’un de ses bras est féminin, l’autre masculin » (voir [Decottignies 79], 8-11). Chez Pierre Klossowski, les effets du Baphomet se bornaient surtout à mélanger les âmes des moines et à pousser un peu loin les lois de l’hospitalité. On restait dans l’humour. Prise au sérieux et menée à ses plus extrêmes conséquences, la possibilité d’une combinatoire infinie des prédicats laisse un peu perplexe : c’est le monde du surréalisme et des "transgenres".

Dans ce monde sans noms – et donc sans identités – manque aussi ce qu’implique habituellement la vertu des noms (l’identité va ordinairement, sur le plan logique, avec la non-contradiction, le tiers exclu, et, sur le plan moral, avec la responsabilité, la culpabilité, etc.). En d’autres termes, là où les sujets et les prédicats sont emmêlés, n’importe quel prédicat peut qualifier n’importe quel sujet.

En lieu et place de l’idéal transcendantal, on a donc ici ce qu’on pourrait appeler un *infernal transcendantal*, dont on ne tire donc plus, par paralogisme, l’idée de Dieu, mais l’illusion symétrique : celle du Baphomet. Encore celui-ci est-il difficilement – Deleuze ne semble pas avoir vu le problème – le «maître» du nouveau syllogisme disjonctif. En effet, un ensemble (infini) de prédicats étant posé, avec la règle que tout prédicat peut être associé à n’importe quel autre sans aucune restriction, la majeure énonçant cette combinatoire peut difficilement s’accompagner d’une mineure différente d’elle-même, sauf à penser qu’on peut soustraire un infini à un infini. Sinon, le soi-disant syllogisme se réduit à une pure tautologie.

Mais on doit faire observer encore ceci : l’ensemble discret des prédicats pouvant être mis en bijection avec l’ensemble \mathbb{N} des entiers naturels ayant la puissance du dénombrable (\aleph_0), l’ensemble de toutes les combinaisons de prédicats ou suites de prédicats possibles s’identifie avec l’ensemble $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$, autrement dit, un ensemble possédant la puissance du continu (\aleph_1)⁹. En d’autres termes, si l’on suit le linguiste mathématicien Solomon Marcus, il a exactement la même puissance que le langage poétique (voir [Marcus 68], 53-54 ; [Marcus 73]). On peut certainement voir le monde de cette façon lorsqu’on est un artiste ou un écrivain, mais ce n’est sûrement pas ainsi que s’est formée la réalité physique, laquelle, malgré ses fantaisies, suppose des contraintes beaucoup plus fermes¹⁰.

9. L’ensemble $\mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ est l’ensemble des suites d’entiers naturels. En attribuant un nombre à chaque prédicat, puis en supposant, comme il a été postulé, qu’on peut former toutes les suites possibles de prédicats, on est conduit à attribuer la puissance du continu à cette combinatoire.

10. La physique quantique a certainement élargi la notion de «réel» en introduisant notamment en elle des aspects nouveaux (superposition d’états, indétermination irréductible, non-localité...). À notre sens, cette extension ne va pas cependant jusqu’à abolir la distinction entre réel et possible (qui est aussi celle de la mathématique et de la physique) et moins encore la distinction entre possible et impossible (qui est celle de l’entendement et de l’imagination). L’abolition de la distinction entre réel et possible revient à soutenir que tout ce qui est mathématique est réel (thèse de Max Tergmark). Quant à l’abolition de la distinction entre possible et impossible, elle revient à soutenir que tout ce qu’on peut imaginer existe en un seul et même sens (thèse de l’univocité de l’être, reprise par Deleuze avec sa combinatoire sans limite des prédicats). On peut facilement réfuter ces deux thèses : en effet, la physique n’utilise qu’une toute petite partie des structures mathématiques ; par ailleurs, quiconque connaît les mathématiques sait qu’il existe des impossibilités objectives (par exemple, des théorèmes de non-existence qui, même présentés de façon positive – ce qui est toujours possible

5.3 L'idéal transcendantal quantique

Dans le cas d'une réflexion transcendantale comme celle de von Weizsäcker¹¹, inspirée par l'expérience quantique et la logique qui en rend compte, la modification de l'idéal transcendantal kantien ne va pas aussi loin que dans le cas klossowskien-deleuzien : tout n'est pas compatible avec tout. L'idéal transcendantal weizsäckerien, si l'on peut ainsi s'exprimer, ne repose plus, sans doute, sur les oppositions classiques, mais il se fonde sur d'authentiques complémentarités, les complémentarités quantiques. Au plan intensionnel, un sujet étant donné, non seulement l'une ou l'autre de deux propriétés contradictoires peut lui être attribuée, mais n'importe quelle proportion de l'une ou de l'autre sans exclusive. Au plan extensionnel, on substitue la logique quantique au calcul des propositions classiques exprimées dans une logique bivalente. L'idéal est donc structuré, nous allons voir comment.

5.3.1 Le cas fini

En se plaçant dans un cas fini, on peut déjà très bien voir la parenté formelle existant entre l'ensemble des objets possibles associé à l'idéal transcendantal kantien et l'ensemble des états possibles d'un système physique classique. On verra par la même la différence formelle existant entre ces deux-là et l'ensemble des états possibles d'un système physique quantique.

Soient 4 prédicats 2 à 2 contradictoires qu'on notera respectivement p et p' , q et q' . Si l'on demande quels sont les objets non contradictoires qu'on peut former en combinant ces prédicats par des opérations de conjonctions ou de disjonctions, nous voyons qu'ils figurent dans un treillis distributif et complété (donc booléen) dont la borne supérieure est l'ensemble des prédicats possibles et la borne inférieure l'ensemble vide (voir Fig. 1.a)¹².

– traduisent cependant ce qu'on pourrait appeler des faits de «solidarité» ou de «rigidité» : par exemple, il n'existe pas de triangles dont les longueurs des côtés soit égales et dont les angles soient inégaux). Ou encore (théorème de Liouville) : il n'existe pas de fonctions entières bornées qui ne soient pas constantes.

11. Le programme de reconstruction de la physique est bien un programme "transcendantal", comme l'indique Gernot Böhme (voir [Böhme 11]), mais ce sont moins les catégories de l'entendement et les intuitions de la sensibilité qui en sont la source que les alternatives fondamentales qui renvoient à l'idéal de la Raison pure.

12. Dans un livre ancien où nous commentons Kant (voir [Parrochia 93], 153), considérant l'ensemble des objets non contradictoires *stricto sensu*, nous avons éliminé la borne supérieure et inférieure du treillis et l'avons réduit à un matroïde : nous n'avons pas, alors, à rapprocher cette

Soit maintenant un système physique, c'est à dire une partie du réel conçue comme existant en dehors du physicien, et suffisamment isolée pour pouvoir être considérée en elle-même. Nous appelons "propositions" les phrases bien formées décrivant les états de ce système en réponse à des questions oui/non. Sur cet ensemble, on définit une relation de préordre $<$ telle que :

$$a < b \text{ signifiera } a \text{ vraie} \Rightarrow b \text{ vraie.}$$

Sous ces hypothèses, on montre (voir [Piron 73], 3) que l'ensemble des propositions d'un système physique (répondant à des questions ayant la forme d'alternatives formulées à son sujet) est un treillis complet, la seule différence entre la situation classique et la situation quantique étant que, dans le premier cas, le treillis est distributif, ce qui n'est pas vrai dans le second. De manière plus précise, en physique classique, " $a \wedge b$ vraie" entraîne toujours " a vraie" et " b vraie", et " $a \vee b$ vraie" implique aussi, par analogie avec la logique, " a vraie" ou " b vraie". Ces relations entraînent automatiquement à leur tour les lois de distributivité suivantes :

$$(a \wedge (b \vee c)) = (a \wedge b) \vee (a \wedge c), \tag{1}$$

$$a \vee (b \wedge c) = (a \vee b) \wedge (a \vee c). \tag{2}$$

Mais si (1) découle des définitions, (2) n'est pas toujours vérifiée – en particulier en physique quantique.

Etant donné un système physique classique simple, avec 4 propositions 2 à 2 contradictoires (a, a', b, b') et telles que $a < b$ d'où $b' < a'$, le système est décrit par un ensemble de propositions non contradictoires du type $a, a' \wedge b, b', a \vee (b \wedge a') = b$, etc. Le treillis associé (Fig. 1.b), distributif et complété, a la même structure que celui de la Fig. 1.a. La borne supérieure du treillis est l'ensemble des affirmations possibles (proposition triviale), la borne inférieure son opposé (proposition contradictoire).

Si nous reprenons maintenant l'exemple des particules de spin 1/2 en considérant deux systèmes S et T non co-mesurables, nous aurons, d'une part, les propositions $a_1, a_2, a_1 \vee a_2 = 1, a_1 \wedge a_2 = 0$ et, d'autre part, les propositions $b_1, b_2, b_1 \vee b_2 = 1, b_1 \wedge b_2 = 0$. En identifiant (respectivement) les 2 bornes supérieures et les 2 bornes inférieures, on peut alors représenter le système sur un seul treillis en forme de "lanterne chinoise" (voir Fig. 1.c).

structure d'un système physique. Mais c'est fondamentalement, à cette différence près, la même structure.

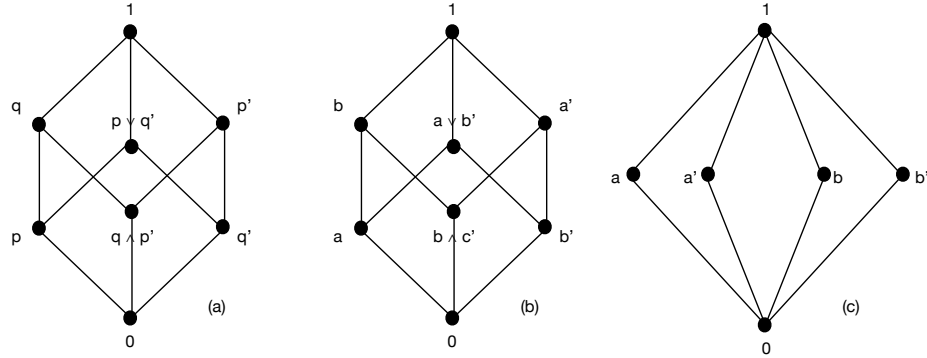


FIGURE 1 – Treillis kantien (a), treillis physique classique (b) et treillis quantique (c)

Dans ce treillis quantique, la loi modulaire $(a \vee b) \wedge c = a \vee (b \wedge c)$ est toujours satisfaite. Aussi peut-on appeler ce treillis, comme le fait Svozil (voir [Svozil 98], 27-28), le treillis MO_2 (M pour "modulaire", O pour "orthocomplémenté", l'indice 2 indiquant qu'il est la réunion de deux algèbres booléennes $L(a)$ et $L(b)$). On peut ainsi le noter :

$$MO_2 = L(a) \oplus L(b)$$

structure qui peut être généralisée en :

$$MO_n = \bigoplus_{i=1}^n L(x^j),$$

si nous considérons un nombre fini n de mesures de directions de spin différentes. La structure résultante est la somme de n algèbres booléennes classiques $L(x^j)$ où x^j indique la mesure de la direction du spin.

5.3.2 Le cas infini

Le passage à l'infini oblige à considérer, comme on l'a dit plus haut, tous les états quantiques possibles, c'est-à-dire à se donner un espace de Hilbert H (espace vectoriel sur les complexes) séparable, de dimension infinie et de base dénombrable. Cet espace est l'analogie de l'ensemble des prédicats possibles de Kant, quand ces prédicats portent sur des réalités physiques.

L'ensemble des observables correspondant aux objets possibles de Kant sera alors formé par l'ensemble des sous-espaces de l'espace de Hilbert, et ceux-ci constituent un

treillis orthocomplémenté qui, selon Constantin Piron, n'est pas, en général, modulaire – contrairement à ce que pensaient Birkhoff et von Neumann –, mais seulement «faiblement modulaire» (voir [Jammer 74], 393).

Enfin, la transposition quantique du syllogisme disjonctif suppose un raisonnement qu'on peut considérer comme la transposition, en calcul des propositions moderne, du syllogisme disjonctif de la logique classique, et qui est du type :

- (1) $p \vee q$,
- (2) $\neg q$, (*)
- (3) p .

Or Heelan (voir [Heelan 70]) a pu montrer que ce schéma d'inférence n'est précisément pas toujours valide en mécanique quantique. Considérons, par exemple, le cas suivant :

p : L'électron a un spin orienté en haut ;

q : L'électron a un spin orienté horizontalement à gauche ;

$p \vee q$ étant vraie, si $\neg q$ est vraie aussi, on devrait, conformément à la logique classique, pouvoir appliquer le schéma précédent (*) et déduire p . Or, la situation quantique amène plutôt à conclure que, dès lors que $\neg q$ est vraie, le spin de l'électron est orienté horizontalement à droite, et non pas en haut. La détermination des objets à partir de l'ensemble des états quantiques ne peut donc pas suivre les règles du syllogisme disjonctif.

Autrement dit, non seulement une infinité d'alternatives «complémentaires» se juxtaposent aux oppositions typiques de la logique classique¹³, mais, selon la sélection des alternatives qu'on a pratiquée, le syllogisme disjonctif *stricto sensu* peut être rendu inapplicable.

Il est assez aisé de voir que l'introduction d'une logique multivalente (y compris infini-valente) ne changera rien à l'affaire, pas plus que celle d'un langage infinitaire (par exemple, au sens de Bell et Slomson (see [?])). Au plan concret, c'est la mesure, provoquant l'"effondrement" de la fonction d'onde, qui finalement déterminera l'objet comme cette portion de possible correspondant au réel. Au plan purement

13. Notons que, même dans le cas kantien où l'on n'a affaire qu'à des alternatives binaires, la structure de l'idéal transcendantal n'est pas simple car la division des concepts va à l'infini. De plus, cette division n'est pas univoque. Un concept peut être co-divisé de plusieurs manières, et cette co-division, selon Kant, va aussi jusqu'à l'infini.

logique, l'idéal transcendantal quantique ne permettra donc pas, ou pas toujours, d'aboutir, par l'application d'un raisonnement disjonctif, à la détermination complète d'un objet quantique. En ce sens, il n'y a pas de «maître» du syllogisme disjonctif quantique et, du même coup, ni dieu ni diable qui, par extrapolation, puissent lui correspondre.

Il ne semble pas que von Weizsäcker ait perçu cet aspect de la question. En tout cas, il tentera de préciser le fondement transcendantal de l'expérience physique en se plaçant dans le fini, ce qui revient en fait à limiter le nombre des états purs fondamentaux.

6 La théorie quantique «revisitée»

C'est dans un texte de 1971, publié en anglais en 1980 ([von Weizsäcker 80], puis repris plus tard dans le recueil de textes majeurs en physique (voir [Drieschner 14¹], 75-109) que von Weizsäcker va développer sa véritable conception de la physique quantique – et même de la physique tout court. Pour lui, en effet, la mécanique quantique doit réaliser l'unification de la physique en la fondant sur une logique particulière (à savoir la logique des propositions circonstanciées) et en la construisant axiomatiquement comme théorie générale de la prédiction d'alternatives empiriquement décidables. Cette construction est finitiste¹⁴ au sens où seul un nombre fini d'alternatives peut être décidé, ce qui suppose, mathématiquement, l'utilisation d'espaces de Hilbert de dimension finie. Ce formalisme permet de donner une structure unifiée à toute la physique, débouchant sur une cosmologie, une théorie des objets élémentaires et une connexion entre les deux.

Von Weizsäcker part de l'interprétation de Copenhague qui, selon lui, est correcte, mais n'a pas été suffisamment clarifiée. L'ensemble de la physique pouvant être reconstitué à partir de la mécanique quantique, il importe de bien préciser ses fondements, et von Weizsäcker, empruntant ces considérations à l'un de ses élèves, Michael Drieschner, propose de poser d'abord les postulats suivants :

A. *Postulat des alternatives* : La physique formule des prédictions probabilistes

14. Evidemment, les tenants d'une perspective holistique contesteront ce point, arguant qu'il existe des possibles qui ne peuvent pas se réduire à des propositions ultimes (voir [Khatam 15]). Mais nous pensons que von Weizsäcker échappe au moins partiellement à cette critique car le nombre d'éléments fondamentaux (Urs), d'ailleurs en croissance, n'est pas vraiment fixé, sinon par un ordre de grandeur.

concernant le résultat des décisions concernant des alternatives empiriquement décidables¹⁵. Une «alternative» au sens de von Weizsäcker peut être définie comme une liste complète de propositions circonstancielles mutuellement exclusives. Ce sont des propositions du type "il pleut à Hambourg" ou "cette particule est dans la position x ", autrement dit, des propositions contingentes, qui peuvent d'ailleurs non seulement porter sur le présent, mais sur le passé ou sur l'avenir. Si une alternative n'en comprend que deux, on parlera alors d'*alternative simple*.

B. *Postulat des objets* : Les réponses à une alternative attribuent des propriétés contingentes à un objet. Logiquement, cela signifie que les réponses à une alternative peuvent être formulées sous forme de «jugements catégoriels», qui attribuent un prédicat à un sujet, appelé ici "objet".

C. *Postulat des propositions ultimes* : Pour tout objet, il existe des propositions ultimes et des alternatives ultimes dont les réponses sont des propositions ultimes. Les propriétés particulières correspondant aux propositions ultimes seront appelées «états» de l'objet. Pour un objet classique, un point dans l'espace des phases représente un état, et l'ensemble de tous ces points représente son alternative ultime (unique). Pour un objet théorique quantique, un sous-espace unidimensionnel de l'espace de Hilbert représente un état et tout système orthonormé complet représente une alternative ultime.

D. *Postulat du finitisme* : Le nombre de réponses à toute alternative pour un objet donné ne dépasse pas un entier positif fixé n qui est caractéristique de cet objet. C'est le postulat par lequel l'approche de Drieschner diffère de la théorie quantique habituelle. Bien entendu, on peut s'attendre à ce qu'en choisissant n suffisamment grand, il soit possible d'éviter des contradictions avec les prédictions de la théorie quantique habituelle.

E. *Postulat de la composition des objets* : Deux objets définissent un objet composite dont ils sont les parties. Le produit direct de deux alternatives ultimes quelconques concernant ces deux parties est une alternative ultime de l'objet composite. Si a_j ($j = 1 \dots m$) et b_k ($k = 1 \dots n$) sont les réponses aux deux alternatives, $a_j \wedge b_k$ (où \wedge signifie «et») sont les réponses à leur produit direct. Ce postulat semble assez naturel ; il a des conséquences considérables en théorie quantique.

F. *Postulat de la fonction de probabilité* : Entre deux états a et b du même objet, une fonction de probabilité $p(a, b)$ est définie, donnant la probabilité de trouver b si

15. On peut considérer que Jauch et Piron avaient déjà développé une telle idée (voir [Jauch 69] et [Piron 73]).

a , c'est-à-dire, à condition que a soit nécessaire.

G. *Postulat d'objectivité* : Si un certain objet existe réellement, une proposition ultime à son sujet est toujours nécessaire. «Un certain objet» est un objet dont on sait décider des alternatives, ou du moins de certaines des alternatives qui le caractérisent. De toute évidence, si un tel objet n'existe pas du tout, alors aucun de ses états ne peut être trouvé et, en conséquence, aucune proposition ultime à son sujet ne peut être considérée comme nécessaire. Supposons maintenant que l'objet existe réellement. Cette affirmation d'existence est une proposition concernant l'objet. Nous supposons que tout objet existant admet des alternatives à k composantes, avec $k > 1$. La proposition selon laquelle l'objet existe n'est pas une proposition ultime, car elle est impliquée par toute réponse à l'une de ces alternatives. Ne seront donc pas acceptées comme des propositions sur un objet celles qui portent sur des objets composites qui ne sont pas le produit d'états purs de leurs éléments composants et qui sont considérés comme n'ayant qu'une existence virtuelle (ceci permet d'exclure le paradoxe EPR). On supposera en outre qu'une théorie capable de faire des prédictions sur le comportement de l'objet en question est possible ; autrement, l'objet ne tomberait pas sous notre concept d'expérience. À partir des propositions ultimes et des connecteurs logiques habituels, on peut alors reconstruire les treillis orthocomplémentés¹⁶ de propositions qui sont ceux du modèle de von Neumann de la mécanique quantique.

À ces postulats, à caractère assez philosophique, s'en ajouteront ensuite deux autres plus précis et plus calculatoires :

H. *Postulat de mesurabilité* : Tout opérateur linéaire dans l'espace vectoriel qui laisse la mesure invariante est un observable.

I. *Postulat de continuité* : Les éventuels changements d'état dans le temps sont décrits par des applications biunivoques, continues dans le temps, de l'ensemble des états de l'objet sur lui-même.

La nouvelle axiomatique de la Mécanique quantique prend alors la forme d'une série d'axiomes plutôt raisonnables :

1. *Axiome d'équivalence* : Si a et b sont des propositions ultimes, $p(a, b) = 1$ équivaut

16. Une orthocomplémentation sur un treillis borné est une fonction qui associe chaque élément a à un "orthocomplément" a^\perp de telle sorte que les axiomes suivants soient satisfaits :

Loi de complémentarité : $a^\perp \vee a = 1$ et $a \wedge a^\perp = 0$.

Loi d'involution : $a^{\perp\perp} = a$.

Loi d'inversion de l'ordre : si $a \leq b$ alors $b^\perp \leq a^\perp$.

à $a = b$.

2. *Axiome des alternatives finies* : Si n propositions ultimes a_i ($i = 1, \dots, n$), mutuellement exclusives, sont données, alors pour toute proposition ultime b :

$$\sum_{j=1}^n p(b, a_j) = 1,$$

ce qui est une version probabiliste du postulat A.

3. *Axiome de décision* : Pour tout A , il existe une alternative $a_1 \dots a_n$ telle que $a_1 \dots a_e$ sont des éléments de A tandis que $a_{e+1} \dots a_n$ sont des éléments de \bar{A} . Il a été supposé, dans le postulat A, que toutes les propositions contingentes sont décidables. On suppose maintenant qu'il existe toujours des alternatives ultimes «adaptées» à toute décision entre A et \bar{A} .

4. a. *Premier axiome de complétude* : Pour tout ensemble de $k < n$ propositions ultimes $a_1 \dots a_k$ s'excluant mutuellement, il existe une proposition ultime a avec $p(a, a_i) = 0$ ($i = 1 \dots k$).

4. b. *Deuxième axiome de complétude* : Pour tout ensemble de $n - 2$ propositions ultimes $a_3 \dots a_n$ et toute proposition ultime b , il existe une proposition ultime a_2 qui exclut tout a_i ($i = 3 \dots n$) et b ; c'est-à-dire qu'on a :

$$p(a_2, a_i) = 0 \quad \text{et} \quad p(a_2, b) = 0.$$

5. *Axiome d'indétermination* : Pour deux propositions ultimes a_1 et a_2 mutuellement exclusives, il existe une proposition ultime b telle que $p(b, a_1) \neq 0$ et $p(b, a_2) \neq 0$.

6. *Axiome d'exclusion* : Pour les propositions ultimes, $p(x, y) = 0$ implique $p(y, x) = 0$. Ceci est lié à la loi de la double négation $\bar{\bar{A}} = A$.

En utilisant ces axiomes, Drieschner – explique von Weizsäcker – a pu montrer que :

- (a) L'ensemble des propositions est un treillis non booléen complet.
- (b) Ce treillis est une géométrie projective à $n - 1$ dimensions.
- (c) Ce treillis est isomorphe à celui des sous-espaces d'un espace vectoriel n -dimensionnel.
- (d) Dans cet espace, les probabilités définissent une métrique.

Après avoir ainsi reconstruit la mécanique quantique, von Weizsäcker tente, dans une deuxième partie de l'article, de fonder l'unité de la physique, ce qui l'amène à introduire trois nouveaux postulats :

J. *Postulat de la cosmologie approximativement stationnaire* : L'univers peut être traité approximativement comme un objet¹⁷. Traiter l'univers comme un objet est exactement ce que font les modèles cosmologiques. Le postulat servira donc un but similaire dans la théorie actuelle en permettant une terminologie convenable.

K. *Postulat des objets ultimes* : Tous les objets sont constitués d'objets ultimes binaires. En allemand, von Weizsäcker les a appelés *Urobjekte*, et leurs alternatives *Ur-alternativen*; par fantaisie, von Weizsäcker déclare avoir proposé l'abréviation «Ur» («ur» sans majuscule en traduction) pour ce genre d'objet. L'auteur reconnaît que ce postulat est trivial tant que l'on ne spécifie pas la loi d'interaction pour les objets ultimes. Un espace de Hilbert à n dimensions peut toujours être décrit comme un sous-espace du produit tensoriel d'au moins r espaces de Hilbert à 2 dimensions, où $2^{r-1} < n < 2^r$; les dimensions inutilisées 2^{r-n} peuvent alors être exclues en imposant une loi d'interaction qui conduit à une règle de super-sélection entre les deux sous-espaces.

L. *Postulat d'interaction* : La théorie de l'interaction des objets ultimes (ou «urs») est invariante dans le même groupe que la théorie des objets ultimes libres. Il s'agit ici d'une hypothèse forte et non triviale, ce qui oblige, avant tout, à étudier les urs libres.

Un ur réduit à lui-même est un objet dans un espace de Hilbert bidimensionnel. Il admet le groupe de transformation $SU(2)$. La signification physique de cet énoncé mathématique primitif est la suivante : La «théorie d'un ur libre» décrit non seulement la variété des états d'un ur, mais aussi sa loi de mouvement. L'équation de mouvement doit être invariante sous $SU(2)$. Il est facile de trouver les solutions d'une telle équation; le vecteur d'état ne peut avoir qu'un facteur de temps $e^{-i\omega t}$ commun avec l'état indépendant ω , d'où le fait que les états eux-mêmes, étant des sous-espaces unidimensionnels, restent inchangés dans le temps. Pourtant, la question est d'expliquer comment nous savons que c'est la condition correcte à imposer à la loi du mouvement pour l'ur libre. C'est la forme sous laquelle se présente maintenant la question souvent posée : pourquoi devrions-nous postuler une symétrie pour l'espace des états? On formule le principe ici impliqué sous forme de postulat :

17. C'est précisément de ce que contestait, probablement à tort, un philosophe comme Gaston Bachelard.

M. *Postulat de symétrie* : Aucun des états d'un seul objet ultime ne se distingue objectivement des autres. Une distinction «objective» est ici une distinction «par loi de la nature», par opposition à une distinction «contingente» telle que, par exemple, «l'état dans lequel cet objet se trouve actuellement»¹⁸ ; la loi du mouvement ne doit donc pas faire de distinction entre les états.

Dans ce contexte, l'espace de Hilbert d'un ur réduit à lui-même est une représentation 2-dimensionnelle du groupe SU(2). Le postulat L implique que l'espace de Hilbert de plusieurs urs doit être un espace de représentation de dimension supérieure du même groupe. Or ce groupe est isomorphe à SO(3), groupe spécial orthogonal de l'espace à trois dimensions. Les postulats posés plus haut obligent donc à supposer que l'espace de position (c'est-à-dire ce que nous appelons habituellement «espace» ou «espace cosmique») est un espace sphérique réel à trois dimensions, ce qui semble suggérer que la tridimensionnalité de l'espace est une conséquence de la théorie quantique des objets ultimes.

Maintenant il est clair que les «particules élémentaires» doivent être constituées de ces objets ultimes (ou urs). Ces urs pourraient être en quelque sorte les éléments d'un *Urfeld* au sens où Heisenberg l'envisageait. La théorie ayant une dimension cosmique, von Weizsäcker n'hésite pas à calculer le nombre total d'urs de l'univers, qu'il déduit de la façon suivante : si nous supposons un rayon du monde $R = 10^{40}$ unités nucléaires de longueur $L = 10^{-13}$ cm (longueur de Planck), soit $R = 10^{40} \times 10^{-13}$ cm, une particule de moment nucléaire ou une particule localisable dans un noyau devrait être associée à environ 10^{40} urs. Le nombre total d'urs dans l'univers pourrait ainsi provisoirement être identifié avec le nombre de bits (ou, comme on dira plus tard, de Qu-bits) d'information possibles dans l'univers. En supposant, par souci de simplicité, qu'il n'y a qu'une sorte de particule élémentaire, disons un nucléon relevant de la statistique de Fermi, on estimerait qu'il y a autant de bits dans le monde qu'il y a de cellules de taille nucléaire, chacune pouvant être occupée ou vide. Sous cette hypothèse, ce nombre serait $N = R^3 = 10^{120}$. Le nombre de dimensions de l'espace de Hilbert de l'univers pourrait alors atteindre $n_u = 2^N$. Si un nucléon est constitué de R urs, il devrait donc y avoir $R^2 = 10^{80}$ nucléons dans le monde, ce qui reste évidemment, vu la grossièreté du calcul, une simple approximation.

Les particules élémentaires dépendant essentiellement des groupes de symétries, il resterait à expliquer en détail comment les particules sont construites à partir des urs. Mais ceci supposerait l'introduction d'un nouveau modèle car le groupe le plus

18. Un tel postulat est celui de toute démarche scientifique visant une certaine universalité. Pour un équivalent en théorie des classifications, voir [Parrochia 14], 29.

généralement accepté en théorie des champs étant le groupe de Lorentz, il faut passer de la présente théorie, qui n'est pas Lorentz-invariante, à une qui le soit. Ceci renvoie au caractère approximatif du postulat J, qui devra être révisé. À cette fin, von Weizsäcker introduit alors le postulat suivant :

N.Postulat d'expansion : En seconde approximation, l'univers peut être décrit comme étant constitué d'objets ultimes dont le nombre augmente avec le temps. Cette formulation tient compte des objections qu'on peut faire au postulat J.

Il peut sembler étrange qu'une théorie bâtie sur des principes de très haute généralité contienne une constante de base dont la valeur est contingente : le nombre N d'urs dans l'univers, avec $N = 10^{120}$. Selon le nouveau postulat, N pourrait être maintenant une mesure de l'âge de l'univers. Si nous mesurons cet âge t par des horloges ordinaires en unités de temps nucléaires, alors, vraisemblablement, on aurait $N = t^3$ et si le rayon du monde était $R = t$, on aurait une théorie où l'expansion de l'univers est nécessairement liée à la création de matière par la formule $N = R^3$, c'est-à-dire une cosmologie proche de celles proposée par Dirac et Jordan.

Concernant la gravitation, on peut remarquer que le lien empirique entre la courbure de l'espace et la densité cosmique de la matière est suffisamment proche de celui exigé par l'équation d'Einstein pour paraître plus qu'accidentel. Comme explication possible, von Weizsäcker suggère que ce n'est pas la courbure de l'espace qui s'adapte à une densité donnée de matière avec une constante de gravitation donnée, mais le contraire : en réalité, c'est cette soi-disant constante qui s'adapte à une densité donnée de matière et à une courbure de l'espace. La fameuse relation d'Eddington dit que la constante de gravitation, mesurée en unités nucléaires, est $g = R^{-1}$. On peut alors s'attendre à ce que la physique élémentaire des particules conduise, parmi d'autres, à un champ se comportant comme le champ gravitationnel (contenant probablement des composantes scalaires et tensorielles), qu'une théorie sémantiquement cohérente couplera au tenseur métrique. La constante gravitationnelle d'Einstein était liée à la dichotomie entre matière et champ métrique et conservait quelque chose d'empirique. On pourrait donc aussi s'attendre à ce que, dans une théorie sémantiquement cohérente, cette constante se réduise à un facteur sans dimension dont la nature est déterminée par la théorie. Dans la théorie proposée, justement, la gravitation serait liée au volume total de l'espace cosmique, mesuré en unités, c'est-à-dire en nombre de bits dans le monde, et ses objets ultimes seraient simplement des bits. On passerait alors aux champs locaux en considérant que la matière se comporte localement comme si elle faisait partie d'un univers homogène, mais avec une métrique déterminée par les valeurs locales du champ. Dans un tel univers, la densité de matière serait donc différente de la moyenne cosmique réelle, et le lien entre le tenseur de masse et

le champ métrique serait exprimé par l'équation d'Einstein qu'on retrouverait ainsi localement.

7 La philosophie des alternatives et ses problèmes

Dans un texte de 1975, repris dans le recueil des textes majeurs de physique – et non de philosophie – de l'auteur, ce qui est tout à fait significatif de l'imbrication des deux disciplines en physique quantique, l'auteur commence par rappeler que la grande tâche de la physique contemporaine et d'unifier les deux grandes théories physiques du XX^e siècle, à savoir la théorie de l'espace et du temps (relativité restreinte et générale, cosmologie) et la théorie des différents états des systèmes physiques et de leur changement au cours du temps (mécanique quantique) dans une troisième théorie qui permettrait de déduire quelles sont les particules élémentaires qui peuvent exister. C'est en effet dans la théorie des particules élémentaires conçue comme théorie quantique des champs que relativité et mécanique quantique doivent simultanément s'appliquer. À l'époque où von Weizsäcker a réfléchi à ces problèmes, la théorie ne concernait encore que les champs simples, la question des interactions n'étant pas encore tranchée. L'unification semblait pouvoir être envisagée à partir de la considération des groupes de symétrie.

La théorie quantique relativiste étant invariante sous le groupe de Poincaré, elle l'est aussi, dans le cas le plus simple où l'on a des masses nulles, sous le groupe conforme $SO(4,2)/\mathbb{C}^2$, un groupe qui semblait avoir gagné en importance à l'époque par l'usage qu'en faisait Segal en cosmologie et Penrose dans sa théorie des twisteurs. D'autre part, l'espace de Hilbert de l'objet quantique le plus simple possible – une *alternative binaire* – admettant le groupe $SU(2)$ qui est, on l'a vu, homomorphe au groupe de rotation euclidienne tridimensionnel $SO(3)$, la combinaison de ces deux objets donnait $SU(2,2)$ ou $SO(4,2)$ comme groupes de symétrie.

La question de l'unification de la relativité et de la mécanique quantique reçoit aujourd'hui des réponses mathématiques extrêmement élaborées – et beaucoup plus, bien entendu qu'à l'époque de von Weizsäcker. Aussi bien sa tentative ne vaut pas tant par ses formalismes que par la réflexion épistémologique qu'il a introduite. La langue usuelle étant celle dans laquelle nous interprétons nos théories physiques, nous devons viser ce qu'il appelle une «consistance sémantique», c'est-à-dire une certaine cohérence entre les formalismes mathématiques et l'interprétation que nous en donnons, celle-là étant surtout un but plus qu'une réalité.

Pour résoudre le défi posé par une théorie à la fois relativiste et quantique des champs, von Weizsäcker a deviné qu'il convenait d'abord de mieux comprendre la physique quantique elle-même. C'est en ce sens qu'il a pu introduire, comme on l'a vu, l'idée d'une «logique circonstancielle» (nous préférons cet adjectif à «temporelle» qui désigne un type de logique bien particulier, différent de celui visé par von Weizsäcker).

La base de toutes les axiomatiques quantiques étant la notion de probabilité, von Weizsäcker a tenté de montrer d'abord que celle-ci n'est qu'un raffinement des modalités logiques du futur dans une logique circonstancielle. En effet, la notion d'*expérience* présuppose une distinction entre passé et futur. En accord avec Aristote, von Weizsäcker définit les propositions concernant le futur – par exemple «il y aura une bataille navale demain» – en termes de modalités du type "possible", "nécessaire" ou "impossible", ce qui signifie – Aristote l'avait déjà remarqué – qu'on ne peut pas leur appliquer la notion de "tiers-exclu". C'est un cas bien différent de la notion de probabilité, qui vaut pour des ensembles d'ensembles.

Or la mécanique quantique n'est rien d'autre qu'une théorie des probabilités. En ce sens, dans une axiomatique quantique, on n'a pas besoin de savoir qu'il existe des moments, des positions, un espace à trois dimension, etc. La seule chose à connaître est qu'il y a des cas singuliers et des statistiques d'ensemble, et que tout cela est susceptible d'évoluer au cours du temps. Cette considération du temps est importante : pour von Weizsäcker, la physique quantique est essentiellement la théorie contenant les règles qui nous permettent de parler des événements futurs d'une manière telle qu'on puisse vérifier expérimentalement ces dires.

Sachant qu'indépendamment de la théorie abstraite, il existe des particules qui sont approximativement localisées dans un espace euclidien à 3 dimensions susceptible d'être unifié avec le temps dans le continuum d'espace-temps de Minkowski (lui-même peut-être tangent à une variété riemannienne), le problème devient de savoir comment déduire ces structures de la théorie quantique. On a déjà vu qu'en partant des alternatives fondamentales ou «urs, il était possible, selon von Weizsäcker, de rejoindre le groupe spécial unitaire $SU(2)$ puis, par homomorphisme, le groupe spécial orthogonal $SO(3)$ des rotations de l'espace tri-dimensionnel. Quels sont, cependant, les problèmes rencontrés dans une telle démarche, et quels sont ceux, en particuliers, qui restent irrésolus ? C'est l'objet de la réflexion de von Weizsäcker dans cet article de 1975.

La première chose à considérer est qu'un "ur" ne s'identifie pas avec une particule, ni d'ailleurs avec un état. Une particule – par exemple un neutrino libre – présente

une série infinie d'états. Mais chacun d'eux correspond à un nombre bien défini d'urs et d'anti-urs, ce nombre différant d'état à état. En conséquence, la plus simple des particules ne correspond pas à un nombre bien défini d'urs : "le nombre des urs ne peut pas être défini par la nature de la particule", écrit von Weizsäcker. Il est défini – si d'aventure il est défini – par l'état particulier de la particule. Mais dans la plupart des états, il restera indéfini car il n'y aura pas de valeurs propres pour l'opérateur définissant le nombre d'urs.

De plus, tant qu'on considère des particules sans masse, on ne peut pas aller très loin et les objets qu'on considère ne sont pas vraiment réels. L'avantage de travailler avec des particules de masse nulle est que 0 est l'unique valeur de masse invariante sous le groupe conforme. L'introduction de particules massives brise la symétrie conforme, ce qui signifie qu'on se place alors dans l'espace tangent en des points particulier où on fixe les valeurs de masse. Cela signifie en fait que le concept de particule est un concept local, et non pas global.

En principe, comme on l'a vu plus haut, le nombre total d'urs dans le monde, selon Von Weizsäcker est approximativement fixé (10^{120}) ainsi que celui des nucléons (10^{80}) et le rayon de l'univers (10^{40} longueurs de Planck). Mais, on sait par ailleurs que l'univers est en expansion. Il faut donc imaginer que de nouveaux urs sont produits à chaque instant. On doit donc supposer une véritable production d'urs dans l'univers, la loi d'interaction ne préservant pas leur nombre. On peut appeler "chronon" l'événement qui produit un urs (ou Qu-bit) supplémentaire. Un problème est alors de rendre compatible cette production indéfinie d'urs et l'invariance caractéristique de toute théorie quantique.

Enfin, un dernier problème se pose avec l'opposition entre le spectre de masse, qui est continu (toute particule pouvant prendre n'importe quelle masse¹⁹) et le constat empirique qu'il existe dans l'univers un petit nombre de masses discrètes. Une réponse possible est qu'on ne doit pas considérer le spectre de masse indépendamment d'une théorie de l'interaction et l'on pourrait faire jouer ici des considérations statistiques analogues à celles qui existent en thermodynamique. Même ainsi, le problème ne sera pas facile à résoudre. Et il faudrait encore tenter d'expliquer l'existence de masses précises de particules stables en lien avec un effet coopératif des 10^{40} ou 10^{120} urs, ce qui lancerait dans une sorte de thermodynamique des urs.

19. Cela pourrait apparaître comme un analogue de la situation décrite par Deleuze dans sa philosophie, quand tout prédicat peut être attribué à n'importe quel sujet, mais, d'une part, dans la théorie quantique de von Weizsäcker, il ne s'agit que de la valeur des masses physiques et, d'autre part, ce n'est qu'une situation temporaire.

8 Au-delà de von Weizsäcker : vers une physique de l'information pure

C. F. von Weizsäcker meurt en 2007, mais en laissant une œuvre – pas seulement scientifique. Co-fondateur de la *Société des savants germaniques* en 1959, connu pour avoir milité contre la possession d'armes nucléaires par l'Allemagne, il a aussi été, dans la dernière partie de sa vie, un philosophe apprécié pour sa réflexion et ses prises de position éthiques sur divers sujets, y compris internationaux. Avec sa personnalité remarquable, c'est peut-être aussi l'une des raisons pour lesquelles sa mémoire continue d'être entretenue grâce à une fondation, la *Fondation Carl Friedrich von Weizsäcker*, qui gère son héritage intellectuel, organise des symposiums et développe des projets sur les principaux défis de la modernité. Outre les recueils d'articles philosophiques et physiques réunis par Michael Drieschner, quelques travaux ont pu récemment montrer que la théorie physique dont il est l'initiateur avait été mieux comprise ces dernières années, et développée plus loin que n'avait pu la mener von Weizsäcker lui-même.

Holger Lyre, par exemple, a lapidairement résumé ainsi le projet de von Weizsäcker et ses deux volets :

Il y a, d'abord, la théorie des alternatives. L'idée centrale est que la physique se réduit à prédire des résultats de mesures. Les résultats des mesures peuvent être reformulés en termes d'alternatives à n composantes empiriquement décidables, chacune d'entre elles pouvant être ramenée à un produit (cartésien) d'alternatives binaires. Les alternatives binaires, à leur tour, peuvent être considérées comme des bits d'information (des Qu-bits quand il s'agit d'alternatives quantiques). Ainsi la physique se réduit à de l'information ou, plus précisément, à de l'information potentielle (voir [Lyre 03], 2).

Ensuite, il y a l'idée que la théorie quantique des alternatives binaires est la théorie des objets dans un espace tridimensionnel. Ce deuxième point a déjà été brièvement exposé dans le commentaire du texte de Heisenberg dont nous sommes partis. Mais on peut encore le formuler ici de façon plus rigoureuse en notant (voir [Lyre 95]) qu'un élément fondamental (ur) est décrit par un vecteur d'état d'un espace complexe à 2 dimensions du type :

$$|u_r\rangle \in \mathbb{C}^2, \quad r = 1, 2. \quad (3)$$

Tout état peut alors être représenté au moyen d'un espace de Hilbert qui est un sous-espace de l'espace du produit tensoriel d'espaces de Hilbert 2-dimensionnels

appartenant aux urs. De sorte qu'on a :

$$V^m \subseteq T^n = \otimes_n \mathbb{C}^2, \quad m \leq 2^n. \quad (4)$$

Le groupe de symétrie Q d'un ur u_r laisse invariant la forme unitaire :

$$\langle u|u \rangle = u_1^* u_1 + u_2^* u_2, \quad (5)$$

et contient les sous-groupes :

$$\text{SU}(2) \times \text{U}(1) \text{ et } K. \quad (6)$$

Les transformations antilinéaires $\hat{K} \in K$ agissent alors comme $\hat{K}|u \rangle = i\hat{\sigma}_2|u^* \rangle$, où $\hat{\sigma}_2$ est la seconde matrice de Pauli et $*$ la conjonction complexe.

Dans cette théorie, l'espace à trois dimensions où se situent les objets est dérivé comme une conséquence de ces conditions mathématiques. Cela peut s'expliquer par l'analyse du concept d'espace. Dans la plupart des cas, la distance spatiale entre les objets peut être comprise comme le paramètre de l'interaction qu'ils ont entre eux. D'autre part, la définition d'un objet physique (par exemple, une particule élémentaire massive) dépend de la plage spatiale qu'il occupe.

En supposant que tous les objets consistent en urs, l'état total de l'univers devrait rester inchangé en transformant tous les urs avec le même opérateur du groupe de symétrie de l'ur, qui est essentiellement $\text{SU}(2)$. Ainsi, l'interaction entre tous les objets doit être invariante et donc l'espace des positions en tant qu'espace de paramètres pour la force d'interaction doit avoir la même structure que l'espace symétrique du groupe de symétrie de l'ur. Dans la théorie de von Weizsäcker, on suppose donc que l'espace des positions s'identifie à l'espace homogène \mathbb{S}^3 du groupe $\text{SU}(2)$. Plus tard, le développement temporel des urs sera décrit par le groupe de transformations de phase $\text{U}(1)$, sachant que :

$$\text{SU}(2) \times \text{U}(1) = \mathbb{S}^3 \times \mathbb{S}^1.$$

$\text{SO}(3)$ donnant accès à l'espace à 3 dimensions, $\text{U}(1)$ devrait mener à des considérations temporelles. Mais, comme le fait remarquer Holger Lyre, il est relativement peu plausible que $\text{U}(1)$ puisse être un modèle du temps cosmique qui, alors, serait cyclique.

En repartant de l'égalité $\text{SU}(2) = \mathbb{S}^3$ comme modèle de l'espace global, on peut alors comprendre les urs comme des fonctions non locales sur $\text{SU}(2)$ représentées par des

dyades de spineurs (composées de spineurs u^A, v^A satisfaisant $u_A v^A = -v_A u^A = 1$). Lyre fait alors remarquer qu'une dyade de spineurs équivaut à une tétrade de vecteurs nuls, où les quatre vecteurs nuls ont la forme spinorielle, mais consistent en des combinaisons mixtes de u_A et v_A . En considérant des combinaisons linéaires appropriées des vecteurs nuls, une telle tétrade nulle peut généralement être écrite sous une forme à valeur réelle $\theta_\mu^\alpha = (\theta_\mu, x_\mu, y_\mu, z_\mu)$, où les vecteurs de type espace x_μ, y_μ, z_μ représentent un triplet spatial tangent à \mathbb{S}^3 avec un vecteur orthogonal temporel θ_μ . Le point intéressant est que, puisque la tétrade est écrite en termes de composantes ur-spinorielles, une (première) quantification des urs induit également une quantification de la tétrade. Une telle ur-tétrade quantifiée, cependant, ne signifie rien d'autre que des coordonnées quantifiées dans le modèle d'espace-temps choisi.

Un effet de la quantification par ur-tétrade est alors que l'opérateur temps \hat{t}_μ est simplement l'opérateur numérique $\hat{n} = (\frac{1}{2} \sum_r \hat{a}_r^+, \hat{a}_r)$ dans l'espace de Fock des urs Bosoniens. Ceci est cohérent avec l'hypothèse de von Weizsäcker selon laquelle la croissance du nombre total d'urs est une mesure de l'évolution cosmique temporelle. Or, puisque l'opérateur numérique a bien pour borne inférieure zéro, le modèle global d'espace-temps $\mathbb{S}^3 \times \mathbb{R}^+$ avec une variété paramètre de temps \mathbb{R}^+ semble ainsi justifié (évitant par là-même des courbes du genre temps globalement fermées comme évoqué plus haut) (voir [Lyre 03]).

Il est, malgré tout, difficile, à partir de là, de décrire la gravité (quantique) dans la théorie des urs. On pourrait bien sûr penser que θ_μ^α peut représenter quatre bosons vectoriels, c'est-à-dire des *gravitons* sans masse de spin 1, et ainsi obtenir une équation d'onde correspondante $\theta_\mu^\alpha(x) = 0$ analogue, par exemple, à celle de Klein-Gordon pour un univers sans masse. Cela pourrait peut-être décrire le champ gravitationnel sous une forme non standard (c'est-à-dire non comme un champ de spin-2) dans sa limite linéarisée. Cependant, ce qui est vraiment recherché est plutôt une recette qui permette de rendre ce champ dynamique et de le coupler à la matière. Sans rentrer ici dans les détails (voir [Lyre 03]), la chose est sûrement beaucoup plus malaisée car il y faudrait une théorie de jauge de la gravité.

Selon Holger Lyre, un bon point de départ pourrait être le fait que l'ur-tétrade quantifiée génère un groupe qui pourrait être utilisé comme un groupe de jauge. En effet, l'algèbre de Lie des opérateurs de l'ur-tétrade est à 12 dimensions et le groupe de Lie correspondant est isomorphe à $SL(2, \mathbb{C}) \times SL(2, \mathbb{C})$. La question de savoir si et comment ce groupe peut être utilisé pour une approche de jauge appropriée reste cependant une question ouverte. Les opérateurs de cette algèbre agissant dans l'espace-temps plat de Minkowski, cela se traduit en théorie des urs par des groupes unimodulaires, plutôt qu'unitaires. Le champ gravitationnel étant ainsi décrit dans

un espace plat, cela semble aussi signifier qu'il s'agit peut-être d'un champ local, tout comme les autres champs de Yang-Mills.

On notera encore comme un dernier problème qu'en ur-théorie, dès lors qu'on part de \mathbb{S}^3 , il est en principe impossible d'aboutir à un modèle global sphérique du cosmos²⁰.

Il reste à voir comment cette Ur-théorie de von Weizsäcker débouche sur une théorie de l'information pure et un univers informationnel.

Les liens entre espace et information s'introduisent désormais à travers la question de l'entropie des trous noirs. Au départ, les trous noirs étaient uniquement caractérisés par trois quantités : la masse, le moment cinétique et la charge. Mais, comme l'a remarqué Jacob Bekenstein en 1973, il existe un certain nombre de similitudes entre la physique des trous noirs et la thermodynamique, la plus frappante étant la parenté des comportements de la zone du trou noir et de l'entropie, les deux quantités ayant tendance à augmenter de manière irréversible (voir [Bekenstein 73]). La surface de l'horizon des événements, notée A , exprimée en unités de Planck, s'est ainsi avérée être une mesure appropriée de la teneur en entropie du trou noir, donnant lieu à la formule très simple :

$$S = \frac{1}{4}A. \tag{7}$$

conduisant du même coup à une deuxième loi généralisée de la thermodynamique. Comme il y a un parallélisme total entre entropie et information (voir [Parrochia 94], cette formule revient à caractériser un objet physique (en l'occurrence, un trou noir) en terme d'information.

Supposons alors que l'univers est une sorte de trou noir. On peut à ce moment-là calculer son contenu informationnel en unités de Planck de la manière suivante. Si on lui suppose une symétrie sphérique, d'où une surface $A = 4\pi R^2$ et un rayon de Schwarzschild $R = 2M$, la formule de Beckenstein devient :

$$S_u = \frac{1}{4}4\pi(2m)^2 = 4\pi m^2. \tag{8}$$

Avec, pour tout l'univers, $M_u = 10^{60}m_0$, on obtient finalement $S_u = 10^{-120}$ bits,

20. Mathématiquement, on peut toujours projeter \mathbb{S}^3 sur \mathbb{S}^2 (fibration de Hopf), mais, physiquement, on ne voit pas ce qui pourrait le justifier.

conformément à ce que von Weizsäcker avait, par une autre voie, déjà obtenu dans les années 1960 et que nous avons rappelé plus haut.

Il semble, au final, que la formule (8) ci-dessus pose une équivalence entre matière-énergie, d'une part, et information, d'autre part. On ne peut pas cependant, à notre sens, y voir autre chose que deux modes de lecture différents de l'univers : l'information n'est pas, à proprement parler, de la matière-énergie. À moins, bien sûr, de voir dans les urs ou alternatives fondamentales de von Weizsäcker, non pas de simples choix théoriques mais des bifurcations concrètes, de véritables modes d'êtres incarnés. Mais il faut alors sortir du point de vue purement transcendantal et retrouver celui de l'ontologie.

Références

- [Bekenstein 73] Bekenstein, J. D., "Black Holes and Entropy", *Phys. Rev.*, D 7, 2333-2346, 1973.
- [Bell 06] Bell, J. L., Slomson, A., *Models and Ultraproducts*, Dover Publications Inc., New York, 2006.
- [Berge 73] Berge, C., *Graphes et Hypergraphes*, Dunod, Paris, 2e éd., 1973.
- [Böhme 11] Böhme, G., "Carl Friedrich von Weizsäcker's Program of a Transcendental Foundation of Physics", *Mind & Matter*; Vol. 9(2), 129-144, 2011.
- [Decottignies 79] Decottignies, J., *L'écriture de la fiction*, P.U.F., Paris, 1979.
- [Deleuze 69] Deleuze, G., *Logique du Sens*, Minuit, Paris, 1969.
- [Drieschner 14¹] Drieschner M. (Ed.) *Carl Friedrich von Weizsäcker : Major Texts in Physics*, Springer, Cham, Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 2014.
- [Drieschner 14²] Drieschner M. (Ed.) *Carl Friedrich von Weizsäcker : Major Texts in Philosophy*, Springer International Publishing, Munich, 2014.
- [Gombrowicz 12] Gombrowicz, W., *Cosmos* (1965), tr. fr. Denoël 1966, rééd., Folio 2012.
- [Heelan 70] Heelan, P., "Quantum and classical logic : Their respective roles", *Synthese*, 21, 1-33, 1970.
- [Heisenberg 72] Heisenberg, W., *La Partie et le Tout*, Le monde de la physique atomique (Souvenirs, 1920-1965), tr. fr. Paris, Albin Michel, 1972.
- [Hossenfelder 18] Hossenfelder, S., *Lost in Math : How Beauty Leads Physics Astray*, Basic Books, New York, 2018.

- [Jammer 74] Jammer, M., *The Philosophy of Quantum Mechanics*, The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective, John Wiley & sons, New York, London, Sydney, Toronto, 1974.
- [Jauch 69] Jauch J. M and Piron C., "On the Structure of Quantal Systems", *Helvetica Physica Acta* 42, 842, 1969.
- [Kant 65] Kant, E., *Critique de la Raison Pure*, tr. fr. Trémesaygues-Pacaud, P. U. F., Paris, 4^e édition, 1965.
- [Kant 70] Kant, E., *Logique*, tr. fr. L. Guillermit, Vrin, Paris, 1970.
- [Khatam 15] Khatam, I., Shafiee, A., "Objective information in the empiricist view of von Weizsäcker", arXiv : 1510.03725 [physique.hist-ph], 2015.
- [Klossowski 65] Klossowski, P., *Le Baphomet*, Mercure de France, Paris, 1965.
- [Lyre 95] Lyre, H., "The Quantum Theory of Ur-Objects as a Theory of Information", *Int. J. Theor. Phys.* 34, 1541, 1995) 154 ;voir aussi : arXiv : quant-ph/9611048v1 ;
- [Lyre 03] Lyre, H., "C. F. von Weizsäcker's Reconstruction of Physics : Yesterday, Today, Tomorrow", in L. Castell and O. Ischebeck (eds.), *Time, Quantum and Information* (Essays in Honor of C. F. von Weizsäcker), 1-10, Springer, Berlin, 2003.
- [Malinowski 94] Malinowski, G., *Many-valued Logics*, Clarendon Press, Oxford, 1994.
- [Marcus 68] Marcus, S., "Poétique mathématique non-probabiliste", *Langages*, 12, 52-55, 1968.
- [Marcus 73] *Mathematische Poetik*, Ed. Academiei, Bukarest-Athenaum Verlag, Frankfurt am Main, 1973
- [Parrochia 93] Parrochia, D., *La Raisons Systématique*, Vrin, Paris, 1993.
- [Parrochia 94] Parrochia, D., *Cosmologie de l'information*, Hermès, Paris, 1994.
- [Parrochia 14] Parrochia, D. et Neuville, P., *Taxinomie et Réalité*, Iste, Londres, 2014.
- [Piron 73] Piron, C., "Axiomatique de la théorie quantique", *Les rencontres physiciens-mathématiciens de Strasbourg - RCP25*, tome 16, « Réédition des conférences les plus demandées contenues dans les volumes épuisés », exp. no 10, 1-13, 1973.
- [Svozil 98] Svozil, K., *Quantum Logic*, Springer, Singapour, 1998.
- [von Weizsäcker 38] von Weizsäcker, C. F., "On Elementary Transmutations in the Interior of Stars. Paper II", in *Physikalische* 39 ; 633-646, 1938/

- [von Weizsäcker 46] von Weizsäcker, C. F., "The Formation of the Planetary System", in *Naturwissenschaften*, 33, 6-14, 1946.
- [von Weizsäcker 55] von Weizsäcker, C. F., "Komplementarität und Logik", in *Die Naturwissenschaften*, 42, 521-529, 545-555, 1955 ; repris dans : von Weizsäcker, C. F., *Zum Weltbild der Physik*, 281-331, S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1976.
- [von Weizsäcker 58¹] von Weizsäcker, C. F., "Die Quantentheorie der einfachen Alternative (Komplementarität und Logik II)", *Zeitschrift für Naturforschung*, 13a, 245-253, 1958.
- [von Weizsäcker 58²] C. F., Scheibe, E., and Süßmann, G., "Komplementarität und Logik III", *Mehrfache Quantelung. Zeitschrift für Naturforschung*, 13a, 705, 1958.
- [von Weizsäcker 75] von Weizsäcker, C. F., "The Philosophy of Alternatives", in *Quantum Theory and the Structures of Time and Space I*, Munich, Hanser, 7-9; 213-229, 1975. Rééd. in M. Drieschner (Ed.), *Carl Friedrich von Weizsäcker : Major Texts in Physics*, 131-145, Springer, Cham, Heidelberg, New York, Dordrech, London, 2014.
- [von Weizsäcker 80] von Weizsäcker, C. F., "Quantum Theory", in *The Unity of Nature*, Farrar Straus Giroux, New York, 1980), traduction anglaise de *Die Einheit der Natur*, Hanser, Munich, 1971.