

**Zeitschrift:** Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

**Herausgeber:** Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

**Band:** 125 (1945)

**Rubrik:** Discours d'introduction du Président annuel et Conférences principales

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 13.03.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



## **A.**

### **Partie scientifique**

Discours d'introduction du Président annuel  
et Conférences principales

Communications faites aux séances de sections

---

### **Wissenschaftlicher Teil**

Eröffnungsrede des Jahrespräsidenten  
und Hauptvorträge

Vorträge, gehalten in den Sektionssitzungen

---

### **Partita scientifica**

Discorso inaugurale del Presidente annuale  
e Conferenze principali

Comunicazioni fatte alle sedute delle sezioni



# **Discours d'ouverture du Président annuel de la S. H. S. N.**

devant la 125<sup>me</sup> Assemblée annuelle à Fribourg

**Les concepts mathématiques sont-ils inventés ou découverts?**

Par

SÉVERIN BAYS, Fribourg

Monsieur le président, Mesdames et Messieurs,

Il y a 130 ans, dans les journées des 6, 7 et 8 octobre 1815, naissait la Société Helvétique des Sciences Naturelles, dans la propriété de HENRI-ALBERT GOSSE, sur la commune française de *Mornex*, au sommet d'un contrefort du Petit-Salève, appelé encore aujourd'hui le Mont-Gosse. Les deux initiateurs de la réunion étaient le pharmacien genevois ALBERT GOSSE et le pasteur et professeur bernois SAMUEL WYTENBACH. Une trentaine de naturalistes, professeurs et pasteurs, médecins et pharmaciens, physiciens et chimistes s'y trouvaient réunis, dont 18 de Genève, 7 de Berne, 4 de Vaud et 2 de Neuchâtel. Ce n'est pas le lieu de vous développer ici le programme de cette première réunion, ni de vous retracer la carrière de ces deux fondateurs, ou de ces naturalistes réunis à *Mornex*, hommes pieux et savants, ayant le culte de la science, un amour et un intérêt passionnés pour la nature. On arrêta que l'association porterait le nom de Société Helvétique des Sciences Naturelles qui lui est resté; on adopta le principe de la variation annuelle du lieu de rassemblement et celui d'une seule réunion par an. A cinq années près rien n'a changé, puisque aujourd'hui, après 130 ans, les 1<sup>er</sup>, 2 et 3 septembre 1945, la Société Helvétique des Sciences Naturelles tient sa 125<sup>me</sup> Assemblée annuelle de 3 jours à Fribourg, après avoir été à Sils en 1944, à Schaffhouse en 1943,



à Sion en 1942, etc. Elle tiendra son Assemblée annuelle prochaine de 1946 à Zurich; elle y fêtera le 200<sup>me</sup> anniversaire de la plus ancienne de nos sociétés cantonales d'histoire naturelle, celle de Zurich, fondée en 1746 par le médecin et savant à peu près universel, JOHANNES GESSNER. Là non plus, je ne puis développer plus longuement ici l'histoire de la constitution de ces groupements scientifiques cantonaux; nous avons été précédé d'un siècle à peu près dans les grands pays voisins; la création de la Société royale de Londres date de 1645, celle de l'Académie des curieux de la nature à Schweinfurt, puis Halle, de 1652; en 1657 naît l'Académie florentine del Cimento et enfin en 1666 l'Académie royale des Sciences de Paris.

Les débuts de nos sociétés cantonales furent modestes comme aussi d'ailleurs ceux des grandes académies dont je viens de citer les noms. Après Zurich, vint la société de Bâle en 1751, celle de Berne en 1786, de Genève en 1790, etc. La constitution de la première Société fribourgeoise des Sciences Naturelles est de 1832; elle reçut en 1840, pour la première fois à Fribourg, la Société Helvétique avec le P. GRÉGOIRE GIRARD comme président annuel. Puis cette première société disparut sans laisser de traces, probablement à l'époque du « Sonderbund »; elle ressuscita définitivement en 1871 pour recevoir une seconde fois la S. H. S. N. en 1872, avec le D<sup>r</sup> méd. J.-B. THÜRLER comme président annuel. Depuis elle a fait son chemin modeste, mais pourtant définitivement assuré, grâce principalement aux mérites d'un homme qui fut pendant 25 ans président de la Société fribourgeoise des Sciences Naturelles, reçut deux fois la S. H. S. N. comme président annuel, en 1891 et en 1907, et qui lors de votre cinquième et dernière Assemblée annuelle à Fribourg, en 1926, était notre président d'honneur de la réunion, M. MAURICE MUSY, docteur *honoris causa* de notre Faculté des sciences. M. MUSY est mort depuis, le 18 novembre 1927, un an après sa présidence d'honneur de l'Assemblée annuelle de la Société Helvétique, un an après le charmant discours que lui avait fait, en fin du banquet de clôture, le président central de 1926, M. MAURICE LUGEON, pour établir ses mérites.

Mais je reviens à la Société Helvétique des Sciences Naturelles et à ses cinq quarts de siècle de développement continu. J'ai pensé qu'un jubilé de 130 ans mérite quelques mots, même pour la vie d'une grande société comme la nôtre, destinée à de longues étapes;



j'ai fait aussi ce rappel avec l'intention de présenter en quelques mots cette Société Helvétique à mes compatriotes de Fribourg qui se trouvent ici et qui, jusqu'à ce moment, ne la connaissaient peut-être que de nom. Aujourd'hui la Société Helvétique des Sciences Naturelles compte pour son propre compte près de 1500 membres; elle comprend 15 sociétés de branches affiliées, 25 sociétés cantonales ou locales de sciences naturelles; dans les 15 sections constituées par les sociétés de branches, sont présentées aujourd'hui et demain, dans cette assemblée que nous allons ouvrir, près de 200 communications scientifiques. Et je ne parle pas des publications de la Société dans ses 130 ans d'existence, de ses 125 volumes des Actes annuels de la S. H. S. N., de ses 80 volumes de Mémoires scientifiques particuliers, des nombreuses et diverses commissions qu'elle a créées dans son sein, la plupart directement en vue de la recherche scientifique et dont les travaux sont aussi considérables.

Or, c'est cette Société, ce groupement scientifique suisse, c'est vous tous, Monsieur le Président central, Messieurs les membres du Comité central, Mesdames et Messieurs, que je voudrais saluer ici, me mettant maintenant à la place du Fribourgeois qui vous reçoit, de la Société fribourgeoise des Sciences Naturelles et du Comité annuel qui a organisé cette session. Vous me permettrez de vous accueillir un peu avec les mêmes termes que j'employais, il y a 19 ans, dans notre vieille salle de conférences de la Grenette, faisant allusion à des lieux de réunion antérieurs : Fribourg n'a pour vous recevoir ni les avantages multiples d'une grande ville, ni les attraits d'une cité plus petite coquettement assise au bord d'un de nos lacs bleus. Fribourg n'a pour votre agrément que ses vieilles rues pittoresques et sa Sarine encaissée avec les ponts qui l'enjambent, pour votre science que sa jeune université déjà prospère et son intellectualité un peu à part, mais forte et vivace, pour votre cœur, que sa bonne et franche cordialité, une compréhension égale et une amitié profonde pour ses compatriotes des trois races : Suisses allemands, Suisses français et Suisses italiens.

Est-ce assez pour vous bien recevoir ? Nous l'espérons. Nous pouvons vous assurer du moins que nous avons cherché à mettre tout en œuvre pour que, malgré les restrictions et les temps difficiles, vous soyez accueillis convenablement, que vous puissiez en particulier vous livrer à vos travaux scientifiques dans de bonnes conditions. En des temps meilleurs, dans un an probablement, nous

aurions pu faire mieux; nous vous prions de tenir compte des circonstances exceptionnelles de cette année-ci, sans doute les plus restrictives dans la période tragique qui s'achève lentement, si notre accueil matériel n'est pas aussi large et aussi généreux que nous l'aurions voulu.

J'ai fait allusion, il y a quelques instants, à la vieille salle de conférences où nous vous recevions il y a 19 ans. En effet, dans l'accueil matériel dont je parle, un élément a changé depuis lors. C'est l'auditoire dans lequel nous vous recevons aujourd'hui. Il me paraît juste dans cette partie officielle de mon discours, qui doit constituer l'expression de nos souhaits de bienvenue, de m'arrêter encore sur ce changement et l'importance qu'il comporte. Très souvent le président annuel, dans son discours d'ouverture, fait l'historique du passé de son canton dans l'étude des sciences naturelles. M. Maurice Musy l'a fait en 1907 en nous rappelant la vie et les travaux de nos modestes mathématiciens et naturalistes fribourgeois du passé, principalement du siècle dernier, en tête desquels prend place, évidemment à juste titre, le chanoine CHARLES-ALOYSE FONTAINE, le fondateur de notre Musée d'Histoire naturelle. Or, il a été chez nous quelqu'un, qui sans être un savant, a fait plus pour la science que la recherche individuelle du naturaliste ou du savant des sciences exactes. C'est le fondateur de notre Université, l'homme politique, le conseiller d'Etat et membre des Chambres fédérales, GEORGES PYTHON. J'ai pensé qu'il était juste, devant une assistance distinguée comme la vôtre, dans cette Aula, qui est la réalisation plus complète de son œuvre et que nous devons à son successeur, de rendre hommage en votre nom à son souvenir et au peuple fribourgeois qui l'a suivi.

Pendant trois siècles et demi les catholiques suisses ont cherché à réaliser le rêve d'une université qui leur appartînt en propre. A quantité de reprises, aux diètes particulières des cantons catholiques, le problème de la création de cette université fut posé, discuté, jugé urgent et chaque fois ajourné. C'est à la veille de l'an de grâce 1886 seulement, que GEORGES PYTHON, alors à peine âgé de 30 ans et tout jeune conseiller d'Etat du canton de Fribourg, proposa au Grand Conseil fribourgeois, dans un message adopté par le gouvernement, la fondation d'une université catholique et internationale. A ce moment-là comme aujourd'hui, notre petit parlement fribourgeois était constitué d'une majorité conservatrice



et d'une opposition radicale. Il est presque émouvant, à la lecture des débats de cette session historique des représentants de notre peuple agricole, aux ressources bien modestes, de constater avec quelle unanimité, conservateurs et radicaux, comprennent l'intérêt général d'une telle œuvre et acceptent le message, dont l'article premier affectait, dès ce premier moment, à la création de l'Université, le montant de fr. 2.500.000.—. Le vote des députés eut lieu à l'appel nominal, à l'unanimité complète, et pourtant pour ce débat comme en toute autre circonstance, l'opposition d'alors était forte, et sans doute, comme aujourd'hui, en particulier parmi nos députés du district de Morat, il y avait des protestants à côté des catholiques. Quoi qu'il en soit, le geste de départ était fait. Avec le revenu du capital voté, GEORGES PYTHON réussit à ouvrir en 1889 la Faculté des lettres et la Faculté de droit, en 1891, la Faculté de théologie, grâce à l'appoint supplémentaire d'un don de fr. 500.000.— voté par la Ville de Fribourg.

Restait la quatrième Faculté, celle des sciences qui est celle qui nous intéresse ici particulièrement. Elle s'ouvrit en 1896; entre temps, le gouvernement, sous l'impulsion de son chef, avait acquis et réorganisé l'ancienne entreprise locale des Eaux et Forêts, devenue depuis les Entreprises électriques fribourgeoises et fondé la Banque de l'Etat de Fribourg; une partie des bénéfices de ces deux institutions devait servir à consolider la rente de l'Université et de la nouvelle Faculté.

Ce fut la première étape. Le premier semestre de son existence, l'Université avait 29 étudiants; en 1890, elle en avait 138; en 1903, 418; en 1932, 704; en 1938, 959. Afin de ne pas alourdir le budget de sa fondation, GEORGES PYTHON avait renoncé à construire des bâtiments neufs. Les Facultés des lettres, de droit et de théologie, étaient logées au Lycée, dans le grand bâtiment construit par les Jésuites de 1829 à 1838; pour abriter la Faculté des sciences, on avait transformé l'ancienne fabrique de wagons qui se trouvait à Pérolles. L'insuffisance des locaux devint bientôt manifeste. L'Association des Amis de l'Université, présidée par le directeur de l'instruction publique, M. le conseiller d'Etat PILLER, aujourd'hui président du Conseil d'Etat et ici présent, qui a bien voulu nous faire l'honneur de collaborer au Comité annuel, résolu de prendre en mains la construction de trois nouveaux bâtiments, qui étaient indispensables à la Faculté des sciences. De 1936 à 1938, on édifia

et installa les nouveaux instituts de chimie, de botanique et d'anatomie. Les étudiants en médecine qui, jusque-là, pouvaient faire à notre Faculté des sciences le premier examen propédeutique, purent dès lors y subir les deux premiers examens de leurs études médicales.

Puis, sans désespérer, l'Association des Amis de l'Université, ou plus spécialement son président, qui s'est assuré entre temps l'appui plus concret de nos Evêques et par eux des catholiques suisses, entreprend la construction définitive des bâtiments dans lesquels nous nous trouvons aujourd'hui, pour y placer les trois Facultés, des lettres, de droit et de théologie, qui effectivement, débordent depuis longtemps leurs locaux d'emprunt du bâtiment du Lycée. Le 24 juillet 1938, le nonce apostolique, Mgr BERNARDINI bénit la première pierre; trois ans plus tard, le 20 juillet 1941, on fête à la fois le cinquantenaire de l'*Alma mater* et l'inauguration des nouveaux bâtiments.

Je ne puis être plus long; j'aurais aimé au moins vous citer les noms des disparus, professeurs et chercheurs de cette Faculté des sciences où vous avez siégé ce matin et cet après-midi, où vous poursuivrez vos travaux demain matin. Le temps me fait défaut. J'ai pensé, par contre, ne pouvoir passer sous silence ce court aperçu historique et apporter ainsi le tribut de reconnaissance, que la science suisse doit également, au conseiller d'Etat fondateur de notre Université, GEORGES PYTHON, à son continuateur, M. le conseiller d'Etat PILLER, au peuple fribourgeois qui a assumé sans hésitation les lourdes charges qu'elle entraîne, à nos Evêques et aux catholiques suisses, qui, de plus en plus, participent à l'effort commun et dont l'appui nous est indispensable.

J'en viens maintenant au thème propre de mon discours.

Le développement des sciences mathématiques, dans cette première moitié du XX<sup>me</sup> siècle que nous achèverons bientôt, s'est poursuivi par quantité de travaux dans les différentes parties de l'édifice puissant, aux proportions toujours plus vastes et qui paraissent bien indéfiniment extensibles, que constitue la mathématique moderne. Mais ce développement a été caractérisé aussi par une revue et un essai de consolidation des bases de la construction. Certains mathématiciens ont parlé d'une crise grave des mathéma-



tiques, d'une fêlure profonde dans les fondements; pour eux, l'édifice était à reconstruire entièrement sur des bases nouvelles, plus rigoureuses et plus solides. Pour d'autres, le mal était moins grand que ne le prétendaient les premiers; la fêlure est superficielle; les désaccords qui ont résulté, en particulier des antinomies de la théorie des ensembles, viennent de failles dans le raisonnement; il s'agit de s'entendre exactement sur le sens des termes et des symboles que l'on utilise. Pour d'autres enfin, et c'est sans doute le plus grand nombre, l'édifice est toujours solide; ils ont continué sans trouble leurs recherches et leurs travaux; la mathématique reste pour eux la science offrant à l'esprit humain la certitude la plus grande.

Les Grecs ont construit ce qu'on pourrait appeler le rez-de-chaussée de l'aile principale de l'édifice dont je parle : la géométrie d'Euclide, un modèle de rigueur et de construction mathématique. LEIBNITZ et NEWTON ; leurs devanciers, ARCHIMÈDE, KEPLER et CAVALLIERI ; leurs successeurs surtout, en particulier les BERNOULLI et EULER par l'invention du calcul infinitésimal, ont créé le rez-de-chaussée central du bâtiment; puis avec GAUSS, CAUCHY, DEDEKIND, RIEMANN, WEIERSTRASS, etc., sont venus l'introduction du nombre imaginaire, du nombre irrationnel, le développement de l'analyse moderne qui est le corps central du bâtiment. FERMAT et PASCAL sont à l'origine de la théorie des nombres et du calcul des probabilités; DESCARTES, par l'introduction des coordonnées, fait le départ de la soudure entre la géométrie et l'analyse. La mécanique et la physique mathématique, qui constituent une autre aile du bâtiment, se développent, toujours par le moyen puissant de l'analyse, principalement avec LAGRANGE, LAPLACE, FOURIER, POISSON, AMPÈRE, etc. Puis viennent les étages plus récents ou modernes, les géométries non euclidiennes, la théorie analytique des nombres, la théorie des ensembles, la théorie des groupes, les théories des équations, la géométrie différentielle, la géométrie descriptive, les développements modernes de l'algèbre, la géométrie algébrique, la topologie, le calcul des variations, etc., etc.

Le malaise a commencé peut-être déjà avec les paradoxes de l'infini de BOLZANO, la construction des premières géométries non euclidiennes de LOBATCHEWSKI et de RIEMANN. Il s'est aggravé principalement, avec l'introduction des nombres transfinis de CANTOR et les antinomies de la théorie des ensembles. Le mathématicien a

l'idée parfaitement claire de la suite indéfinie des entiers naturels; c'est une idée claire de l'infini, mais de l'infini *en devenir*, de l'infini en quelque sorte qui n'est jamais atteint. CANTOR, le créateur de la théorie des ensembles, transforme cet infini en un infini *actuel* en le considérant comme réalisé. Il désigne le nombre cardinal de *tous* les entiers naturels par un symbole nouveau alephzéro et par une opération analogue à celle que nous faisons avec l'unité, arrive, partant de alephzéro, aux nombres transfinis successifs, alephun, alephdeux, etc. Aujourd'hui les résultats principaux de CANTOR sont définitivement acquis; sa théorie des ensembles de points ou de nombres est à la base de l'analyse. Alephzéro et alephun correspondent à ce qu'on appelle aussi la *puissance* du *dénombrable* et la *puissance* du *continu*. Théoriquement on peut établir des puissances supérieures à celle du continu, bien qu'il soit difficile de concevoir effectivement des ensembles ayant de telles puissances. Par contre, on ne sait pas s'il existe une puissance intermédiaire entre celle du dénombrable et celle du continu. C'est même probablement dans l'abîme qu'il y a entre ces deux notions, l'ensemble dénombrable, ou si l'on veut le *collectif arithmétique*, et le *continu géométrique* que réside le conflit; les difficultés viennent essentiellement du fait que ces deux notions ne peuvent effectivement pas se ramener l'une à l'autre.

Les efforts considérables qui ont été faits par les mathématiciens, dans ce dernier demi-siècle, pour consolider l'édifice, plus exactement pour placer ses fondements sur un terrain plus solide et plus profond, appartiennent à trois tendances particulières, qui portent aujourd'hui généralement les noms suivants, en y associant le nom du ou des mathématiciens qui en ont été les représentants principaux: l'intuitionnisme ou le néo-intuitionnisme de l'hollandais BROUWER, la logistique des anglais RUSSELL et WHITEHEAD, le formalisme de HILBERT. Je ne puis ici qu'essayer de vous caractériser en deux mots ces tendances, et seulement pour ainsi dire leur côté philosophique et non pas leurs méthodes.

Pour l'intuitionniste nous avons directement l'intuition nette des concepts mathématiques, sans l'intermédiaire du monde sensible. La construction mathématique est produite directement par notre esprit d'une façon entièrement indépendante de l'expérience; même davantage, la mathématique est la partie exacte de notre pensée.

La logistique, au contraire, prétend que la mathématique ne peut pas être fondée intuitivement, par elle seule et en elle seule; elle a besoin de la logique. Chaque formation de concept mathématique est au fond une opération logique; les démonstrations mathématiques appartiennent à un procédé général de la logique. D'une façon plus précise, l'esprit humain n'a pas trouvé quelque chose de nouveau en formulant des théorèmes mathématiques, de contenu géométrique ou arithmétique; il a simplement continué sa voie normale en parvenant à un domaine de connaissances logiques que nous appelons la mathématique. Je citerai seulement ce passage caractéristique de LEIBNITZ, à qui l'on doit faire remonter la logistique moderne : « Tout ce qui a été trouvé par le raisonnement, l'a été par les bonnes règles de la logique, bien que ces règles n'aient pas été toujours expressément formulées ou mises par écrit. »

Enfin, le formalisme, comme l'intuitionnisme, revient à un domaine propre des mathématiques, mais il se distingue de ce dernier dans le fait que, alors que celui-ci tient au contenu intuitif des notions mathématiques et n'admet aucun concept qui n'ait pas une représentation claire dans la pensée, le formalisme, le nom le dit déjà, fait abstraction à priori de toute signification intuitive des concepts et opérations mathématiques. On opère avec des signes et des symboles mathématiques qui n'ont pas besoin d'avoir une signification. Il n'est pas question, par exemple en géométrie, de points, de droites et de plans avec la représentation habituelle que nous en avons; il n'est question que de mots représentant des choses dont la nature propre est sans intérêt, que l'on admet seulement être distinctes et obéir à certaines connexions, tirées d'ailleurs des relations habituelles existantes entre les points, les droites et les plans. En un mot, pour le formalisme, la mathématique est un jeu; la nature *propre* des pions est sans importance; il faut seulement connaître les règles du jeu.

Il est évident maintenant que, à côté des mathématiciens que je vous ai nommés comme représentants de ces tendances, il faudrait en mentionner bien d'autres. Avec BROUWER, il y a WEYL et les intuitionnistes français; avant RUSSELL, il y a FREGE et après lui l'école de Vienne; avec HILBERT, il y a BERNAYS et leurs élèves. Les



mathématiciens suisses ne sont pas non plus restés indifférents à ce problème du fondement des mathématiques. Il me suffit de citer GONSETH et son ouvrage bien connu sur les fondements des mathématiques, les Entretiens de Zurich sur les fondements et la méthode des sciences mathématiques en décembre 1938, présidés par GONSETH, avec les interventions de WAVRE, FINSLER, POLYA, BERNAYS et BURCKHARDT, la série consacrée à la logique mathématique dans le cycle des conférences internationales des Sciences mathématiques, organisées par l'Université de Genève en juin 1934.

C'est précisément, et ce sera là le second point de mon exposé, la lecture de l'une des conférences de cette dernière série, parue dans l'Enseignement mathématique, qui m'a engagé, non à prendre comme sujet, mais plutôt à mettre en exergue du présent discours, la question : *les concepts mathématiques sont-ils inventés ou découverts?* Il s'agit de la conférence de FRAENKEL, de l'Université de Jérusalem, intitulée : « Sur la notion d'existence dans les mathématiques ». Les tendances des efforts faits par les mathématiciens pour consolider les bases de leur édifice tiennent évidemment de près à ce problème plus particulier, mais capital : Quelle est la manière d'*exister* des concepts mathématiques? Le but même de toute philosophie des mathématiques qui cherche à en établir rigoureusement les fondements, doit être en définitive de nous éclairer sur cette question, la notion d'existence dans les mathématiques.

Sur ce problème, d'après FRAENKEL, la différence de vues qui existait entre PLATON et ARISTOTE, peut encore caractériser à elle seule l'essentiel de ce qu'il y a à dire aujourd'hui. Pour PLATON, le monde des mathématiques est un monde indépendant, portant en lui-même ses propres lois et supérieur au physique dans sa façon d'être. L'existence des êtres mathématiques est de ce fait indépendante de la pensée humaine, comme en général, de toute activité extérieure. Pour ARISTOTE, au contraire, il n'y a pas de monde mathématique en soi; si l'on en parle c'est en tant qu'idées *abstraites de l'activité humaine*, à savoir des constructions des mathématiciens créateurs. Pour cette raison aussi ARISTOTE considère les constructions mathématiques comme conduisant seules à une vraie *ἐπιστήμη*, une connaissance des réalités, mais la projection ab-

straite de ces constructions sur un monde en soi, en vérité irréel, ne serait qu'une *doxa*, une science des apparences.

L'opposition entre LEIBNITZ et KANT est voisine de celle entre PLATON et ARISTOTE. LEIBNITZ croit à la possibilité d'une *mathematica universalis* en tant que science mathématique, symbolique et formelle, qui dépasse tout ce qui est à la portée des constructions et intuitions humaines. Pour KANT, au contraire, non seulement la géométrie, mais même l'arithmétique, est liée aux formes de l'intuition humaine : espace et temps. La notion du nombre notamment dépend, d'après lui, essentiellement de la catégorie du temps.

Si nous voulons mettre maintenant les couples PLATON-ARISTOTE et LEIBNITZ-KANT en rapport avec les recherches actuelles sur les fondements des mathématiques, la classification habituelle, que j'ai donnée plus haut, des trois tendances intuitionniste, logisticienne et formaliste, ne convient pas exactement. C'est plutôt l'opposition entre les deux thèses suivantes, tirées des discussions modernes, qui semble à FRAENKEL décisive :

*1<sup>re</sup> thèse.* Pour l'existence des objets mathématiques, la compatibilité dans le sens de la non-contradiction à l'intérieur d'une théorie mathématique est nécessaire et en même temps suffisante. En d'autres termes, en prenant un énoncé de BERNAYS: est existant ce qui peut être sujet, c'est-à-dire peut occuper des places libres dans des fonctions propositionnelles d'une théorie non contradictoire des mathématiques ou d'une de leurs branches particulières.

*2<sup>me</sup> thèse.* La non-contradiction n'est pas suffisante pour l'existence, c'est-à-dire pour la vérité. C'est la possibilité de construire qui est décisive et, pour cette raison, les mathématiques sont un monde de constructions qui s'exécutent dans le temps. Si l'on passait de ces constructions à une théorie dépourvue de l'élément temps, on obtiendrait un empire d'ombres, où les symboles et le langage, c'est-à-dire des éléments effectivement en dehors des mathématiques, joueraient en fin de compte le rôle décisif.

La première de ces conceptions peut s'appeler brièvement le *réalisme platonicien*; la seconde, l'*idéalisme aristotélicien*.

D'une façon grossière on peut classer dans le réalisme les logisticiens et les formalistes, et dans l'idéalisme les intuitionnistes. FRAENKEL consacre la majeure partie de son exposé à justifier en

somme cette répartition. Mais les conceptions chevauchent plusieurs fois. Ainsi POINCARÉ qui, par exemple, dans *Science et Méthode*, identifie formellement l'existence dans les mathématiques avec la non-contradiction, ne peut pas être appelé tout simplement un idéaliste. D'autre part, la position de HILBERT n'est pas non plus aussi rigide qu'on le croit en général.

Permettez-moi de vous citer le passage suivant de FRAENKEL : « La parenté de ces tendances (il s'agit des logisticiens et des formalistes) avec le réalisme platonicien est évidente. D'autre part, il est naturel de rapprocher de l'idéalisme aristotélicien qui regarde les êtres mathématiques comme créations de notre esprit et non indépendants du sujet pensant, le néo-intuitionnisme tel qu'il se manifeste, dans les mathématiques, avec BROUWER, et dans la philosophie de la manière la plus prononcée avec l'anthropologisme de BECKER qui est lié à la métaphysique de HEIDEGGER. »

Enfin je voudrais mentionner encore quelques localisations particulièrement intéressantes de mathématiciens modernes. C'est dans une parole de DEDEKIND, connue seulement depuis peu de temps, qu'on trouve la thèse la plus opposée à la conception anthropologique: nous sommes du genre divin; pour DEDEKIND, les actes scientifiques, qui forment des notions, ont une force créatrice supérieure à toute constructibilité. C'est dans un sens profond le parallèle du *αἰὶ ο Θεὸς ἀποθμυρίζει* de PLATON. Par contre, pour l'école logicienne de Vienne, toutes les propositions de la logique et de la mathématique sont tautologiques et ce n'est que la limitation de l'esprit humain qui nous empêche de les embrasser toutes en même temps et de les considérer seulement comme *changeant la forme* des expressions de la connaissance, sans *créer* des connaissances nouvelles. C'est HAHN, le porte-parole de cette école, qui peut dire en opposition au point de vue de PLATON : Dieu ne fait jamais des mathématiques. HERMITE était un partisan particulièrement fervent de la conception réaliste; il en est de même, parmi les grands mathématiciens contemporains, de HARDY. Par contre BOREL s'approche beaucoup de l'anthropologisme de BECKER, par exemple en liant la possibilité de définir des nombres suffisamment grands à la durée limitée de la vie de l'univers. Cette manière de voir est en accord avec la célèbre phrase de POINCARÉ, dont d'ailleurs, comme je l'ai dit, la position entre les deux camps a varié: « Quand je parle de tous les nombres entiers, je veux dire



tous les nombres entiers qu'on a inventés, et tous ceux que l'on pourra inventer un jour. »

C'est le mot *inventer* qui est caractéristique dans ce propos et j'en viens maintenant au troisième et dernier point de mon exposé. La question débattue, idéalisme ou réalisme, peut aussi s'exprimer par l'alternative: Est-ce que le mathématicien invente ses objets et propositions, ou est-ce qu'il les découvre ? Il *invente* suivant les idéalistes, il *découvre* suivant les réalistes. C'est sans doute la question ainsi posée, qui a engagé notre collègue WAVRE à écrire l'étude parue en 1942, dans le « Jahrbuch » de la Société suisse de philosophie, et intitulée : « Inventer et découvrir ». Le but de WAVRE est manifestement celui-ci; il le déclare d'ailleurs au début de son mémoire: prendre une position intermédiaire. Il y a dans les mathématiques incontestablement la part de l'invention et la part de la découverte. L'étude de cette répartition lui paraît justement apte à préciser les raisons que l'on a d'être idéaliste ou réaliste, non pas dans le sens d'un choix inévitable, mais d'un juste dosage entre ces deux tendances, dans le sens, dit-il, de l'adoption d'une position médiatrice. Et il poursuit ainsi: « En mécanique céleste on n'est sorti de l'alternative entre PTOLEMÉE et COPERNIC qu'en faisant, avec GALILÉE et NEWTON, intervenir la mécanique terrestre. Dans le même sens j'ose espérer qu'un jour les philosophes sortiront de l'alternative, idéalisme ou réalisme, grâce à l'effort des techniciens. »

Et son étude est incontestablement un effort heureux pour faire la distinction entre la part de l'invention et celle de la découverte dans nos concepts mathématiques. Nous sommes tout proche d'être entièrement d'accord avec lui, et chacun qui a pénétré son exposé doit convenir que sa position intermédiaire est juste, sauf peut-être en ce qui concerne les notions premières. Je cite ce qui me paraît marquer le plus nettement ses conclusions : « L'invention en mathématiques est apparue orientée vers l'action; elle réunit un matériel opératoire, une synthèse de moyens; la découverte est un enregistrement de rapports nécessaires. Si nous inventons des opérations et des définitions, on pourrait ajouter „et des notations“, nous découvrons des conséquences qui habituellement s'inscrivent dans les théorèmes. Cette distinction s'atténue s'il s'agit de la prise de conscience d'une notion première. On serait tenté de dire que les notions premières sont des notions

innées; elles préexistent dans l'esprit, donc vous les y découvrez. Vous n'avez pas pu les inventer, elles étaient déjà là. Cet argument de la préexistence nous paraît trompeur. Ces notions ne sont pas dans la pensée avant qu'on y pense, mais elles se cristallisent semblablement dans toutes les intelligences mathématiques. » Et auparavant encore cette phrase, caractéristique pour ce que nous voulons faire entendre : « Je ne sais donc si nous inventons ou découvrons les nombres entiers; la question n'a peut-être plus de sens. Par contre, nous découvrirons sans peine, si l'entier 137 est premier ou décomposable, etc. »

En effet, à notre humble avis, la question de savoir si nous inventons ou découvrons les nombres entiers n'a plus de sens. Nous n'inventons, ni ne découvrons les nombres entiers. Nous les *abstrayons* du monde sensible. Nous pensons, nous sommes même convaincu qu'une intelligence humaine dans un corps privé de tous ses sens, placé donc dès le premier moment de son existence dans la nuit et le silence absolus, et l'absence totale de sensations, ne parviendrait jamais à la notion du nombre entier, pas plus d'ailleurs qu'elle ne parviendrait à un concept d'idée quelconque. Nous ne pensons donc pas comme PLATON que les idées *humaines* existent de toute éternité, au delà du monde sensible, dans un lieu supracéleste qu'aperçoit l'âme, et que la connaissance et le savoir sont de simples réminiscences. Cette manière de voir implique chez PLATON la préexistence de l'âme; dans la philosophie thomiste l'âme est créée au moment où le corps est conçu. L'enfant ne naît pas, ayant même simplement à l'état latent, dans son intelligence, l'idée des nombres 1, 2, 3, 4; il abstrait peu à peu cette notion du monde sensible qui l'entoure; de même que sous les mots papa et maman se forme peu à peu dans son intelligence l'idée de son père et de sa mère, idée d'abord très liée au concret, à la nourriture ou à la caresse qu'on lui donne, puis abstraite peu à peu et de plus en plus avec les années, de même il apprend à compter avec sa mère les objets qui l'entourent; l'idée se forme peu à peu dans son intelligence des ensembles : 2 objets, 3 objets, 4 objets, etc., puis après, peu à peu, du nombre entier cardinal, abstrait, 2, 3, 4, etc.

L'idée du nombre entier n'est pas plus difficile à acquérir, c'est-à-dire à *abstraire*, pour l'enfant, que celle de père et mère, de ce qui est nourriture et de ce qui est jouet, de ce qui est bien et

de ce qui est mal; à mon humble avis, ce sont des idées de même nature. L'intelligence humaine est un instrument merveilleux, dont la puissance d'abstraction croît rapidement avec l'exercice; peu à peu elle se meuble de la somme plus ou moins considérable d'idées que nous avons. Pour beaucoup d'entre elles, il est vrai, nous n'avons pas eu à refaire tout l'effort d'abstraction de nos devanciers; elles nous sont fournies par l'enseignement et l'étude.

Revenons à nos entiers; l'enfant déjà, sinon l'étudiant ou le mathématicien, arrive rapidement à l'abstraction fondamentale qui est venue encore du monde physique : à chaque entier nous pouvons faire suivre l'entier suivant en augmentant le premier d'une unité. Quand POINCARÉ écrit: « Tous les nombres entiers que l'on a inventés et tous ceux que l'on pourra inventer un jour », je pense qu'il veut dire : tous les nombres entiers que l'on a *exprimés* et tous ceux que l'on pourra *exprimer* un jour. Et tant que le nombre entier est *fini*, on peut l'exprimer d'une façon plus ou moins courte; la plus longue sera  $1 + 1 + 1 + \dots$ ; il est vrai que, dans cette expression, le temps intervient et que nous revenons ainsi à l'anthropologisme de Becker et Borel. L'invention intervient alors dans la recherche du procédé le plus court pour exprimer ce nombre entier et dans les opérations auxquelles nous le soumettons; nous découvrons, par contre, les propriétés de la suite des nombres entiers, propriétés qui sont impliquées dans le fait même de la suite. Mais la suite elle-même, nous ne l'inventons, ni ne la découvrons, nous l'abstrayons du monde sensible.

Une autre notion première, abstraite du monde sensible et qui jusqu'ici apparaît bien irréductible à celle du nombre entier, est celle du continu ou de l'étendue géométrique. Elle est plus profonde et vient plus tard. La notion du continu à une dimension nous est fournie par un fil tendu ou non tendu, par l'arête d'une règle, une tige de blé, la trajectoire d'une pierre, la marche d'un rayon lumineux, etc.; celle du continu à deux dimensions, par la surface d'une eau tranquille, les vallonements de la surface terrestre, etc., etc. Il en résulte les notions géométriques de la droite et de la courbe, du plan et de la surface, puis du point comme croisement de courbes, etc. Ce sont des notions sur le contenu desquelles nous sommes tous parfaitement d'accord, ou pour employer le langage de WAVRE précité, elles se cristallisent semblablement dans toutes les intelligences mathématiques ou même

courantes, mais à mon humble avis, elles ne sont pas des faits d'intuition immédiate ou de réminiscences antérieures, elles sont simplement des faits d'abstraction.

Nos sens sont adaptés au monde physique moyen; ils ne sont pas faits pour les dimensions des atomes ou du monde stellaire. Il est probable que si nos sens étaient construits, par exemple, pour l'échelle du monde atomique et non pour celle du monde physique moyen que nous percevons, la première géométrie trouvée n'aurait pas été la géométrie d'Euclide, mais vraisemblablement l'une de nos géométries non euclidiennes.

Un élément primordial de notre intelligence est la faculté de *comparer*; elle sert grandement à opérer l'abstraction. De la comparaison des collections d'objets est venu le fait de les *compter* et l'abstraction du nombre entier; de la comparaison des grandeurs est venu le fait de les *mesurer* et l'abstraction plus précise du continu géométrique; ce continu géométrique, linéaire ou à deux ou trois dimensions, nous vient de notre propre corps et de tout ce qui nous entoure, en repos ou en mouvement. Il est nettement conçu dans les figures ou les formes géométriques et il me paraît être, avec le concept du nombre entier, à la base de tout l'édifice mathématique.

Le nombre rationnel vient du nombre entier et aussi de la mesure; le nombre irrationnel vient sûrement du continu géométrique; la diagonale du carré de côté 1 en a fourni le premier exemplaire. Le nombre complexe, qui est venu sans doute en premier lieu du fait que chaque équation ait une racine, peut paraître une création de l'esprit humain, une création dont les conséquences sont illimitées; mais l'unité imaginaire appartient aussi au monde physique tel que nous le connaissons aujourd'hui et si nos sens, encore une fois, avaient une autre adaptation, il n'est pas dit que la racine carrée de  $-1$ , n'ait pu être une abstraction, aussi bien que l'unité réelle.

Notre faculté de comparer est connexe à celle de faire correspondre; la notion de fonction qui est toute la base de l'analyse vient d'une correspondance établie entre deux suites ou plus normalement entre deux continus géométriques. Mais, encore une fois, dans un corps privé de toute perception du monde physique, cette faculté d'établir une correspondance n'aurait jamais pu



s'exercer, manquant de l'idée abstraite pour le faire. Enfin les notions d'ensembles, de groupes, de corps, etc., sont encore du collectif arithmétique et il nous semble qu'en dernière analyse tout revient effectivement à ces deux abstractions fondamentales, la suite des entiers naturels et l'étendue géométrique.

Par contre, ces deux abstractions paraissent irréductibles l'une à l'autre. L'introduction de la coupure de DEDEKIND et d'autres essais, de WEYL en particulier, sont des tentatives de pont jeté sur l'abîme qui les sépare. Les vieux aphorismes de ZÉNON sur le mouvement sont l'expression même immédiate de cette irréductibilité. Permettez-moi de vous citer encore le passage suivant de FRAENKEL qui correspond là-dessus exactement à notre pensée : « C'est peut-être le plus ancien et en même temps le plus important des problèmes que posent les fondements des mathématiques que de construire un pont au-dessus du précipice qui s'étend entre deux natures : d'une part la nature *discrète, qualitative, combinatoire, individuelle* de l'*arithmétique* et surtout de la suite des nombres naturels (région du dénombrement), et d'autre part la nature *cohérente, quantitative, homogène* du *continu* géométrique et analytique, par exemple, de la totalité des nombres réels (région de la mesure). Ce problème fondamental est à la base des paradoxes connus de ZÉNON d'ELÉE et de certains sophistes. Malgré les efforts des sciences philosophiques, mathématiques et aussi théologiques, nous n'y avons guère avancé pendant plus de 2000 ans. En tout cas nous sommes très loin d'avoir construit un pont satisfaisant entre les nombres, qui représentent des individus aux propriétés caractéristiques pour chacun d'eux, et les points uniformément répartis dans la « bouillie » fluide du continu. »

Je termine, en revenant maintenant au dilemme : inventer ou découvrir. Sur la base des notions premières, il est indubitable alors que le mathématicien invente et découvre. Il invente les notations, les définitions, les opérateurs ; il découvre les théorèmes et les propriétés impliquées dans ses concepts de départ. Il invente chaque fois qu'il a une certaine latitude dans sa recherche ; il découvre quand son résultat est impliqué entièrement dans ses prémisses. Dans l'immense parterre des faits mathématiques, les inventions ou créations du mathématicien sont en quelque sorte les chemins et sentiers d'accès aux différentes régions du parterre. Ces voies d'accès ont pu être ou pourront être tracées de façons

différentes; l'ensemble du parterre n'en reste pas moins le même. S'il existe une intelligence supérieure qui a organisé l'univers, intelligence humaine comprise, ce que nous croyons, le parterre des *vérités* mathématiques existe alors sans doute, je dirai à l'état naturel, dans l'omniscience divine. Dieu n'a pas besoin des voies d'accès que nous y traçons; il a la connaissance immédiate de toutes les propriétés. Nous revenons à HAHN : Dieu ne fait jamais des mathématiques.

Mais j'ai hâte de descendre de ces hauteurs de la philosophie et de la théologie, où le mathématicien est un profane, pour ouvrir modestement cette 125<sup>me</sup> Assemblée générale de la S. H. S. N.

# La libération de l'énergie nucléaire

Par

CHARLES HAENNY, Lausanne

Il est à peine utile de relever ici le rôle immense de l'énergie dans tous les phénomènes. C'est elle que nous apporte le soleil, c'est elle que nous donnent nos aliments. C'est à elle que nous faisons appel aussi bien pour nous chauffer que pour nous mouvoir ou que pour créer tout ce qui nous est utile.

Jusqu'à maintenant, nous nous sommes contentés d'exploiter sur Terre l'énergie moléculaire accumulée dans des produits précieux, tels que le charbon ou le pétrole. Seule la chaleur solaire, énergie précieuse entre toutes, ne paraît pas être d'origine moléculaire, mais plutôt d'origine nucléaire. Jusqu'à il y a quelques années encore, nous ignorions qu'en nous chauffant au soleil, nous bénéficions de l'énergie dégagée par des réactions qui s'accomplissent dans cet astre entre des noyaux atomiques ainsi que le professeur WEIGLE a eu l'occasion de le dire à l'Assemblée annuelle de Schaffhouse. Jusqu'à il y a quelques semaines encore, la plupart d'entre nous ne pouvaient concevoir qu'un jour, des réactions nucléaires pourraient fournir sur cette Terre de l'énergie en quantité utilisable.

Chacun sait que la première manifestation d'une énergie contenue dans le noyau de certains atomes est apparue, il y a cinquante ans, lors de la découverte de la radio-activité. L'énergie dégagée par la désintégration d'un seul gramme de radium a suffisamment frappé tous les esprits. Mais le radium est un produit rare et coûteux, et surtout le débit de l'énergie qu'il peut fournir est infime, inutilisable comme source d'énergie. Autant vaudrait actionner des turbines par la pluie qui tombe, de haut souvent, mais

en gouttes de trop faible masse. Et la désintégration du radium suit un cours qu'il est vain de vouloir accélérer. Il en va de même pour tous les corps radio-actifs, utiles à tant d'emplois, mais qui ne peuvent servir comme source d'énergie.

Un peu plus tard, soit depuis quelques dizaines d'années, la loi d'équivalence entre l'énergie et la matière a pu faire rêver sur la possibilité magnifique de transformer de la matière en énergie. D'après cette relation, peu de matière équivaut à beaucoup d'énergie. En effet, il est facile de calculer que la dématérialisation d'un seul gramme de matière engendrerait 25 millions de kW/h. ce qui représente la chaleur dégagée par la combustion de 2500 tonnes de charbon.

Si cette transformation de la masse en énergie apparaît expérimentalement dans les phénomènes de la radio-activité naturelle, elle est restée longtemps le seul exemple et nous avons vu que ces transformations radio-actives se font en dehors de tout contrôle et en ne livrant qu'une énergie inutilisable.

Il y a lieu de remarquer que toute variation de l'énergie contenue dans un système est accompagnée d'une variation de la masse de celui-ci. Dans les réactions chimiques les plus exothermiques, la quantité de chaleur dégagée est beaucoup trop faible pour que la perte de masse puisse être perceptible. Par exemple :

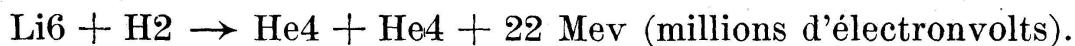


L'électronvolt (ev) est une unité d'énergie très utilisée dans la description des phénomènes nucléaires. C'est la raison pour laquelle nous l'employons ici déjà. Un *électronvolt* est l'énergie que prend un électron lancé dans le vide par une différence de potentiel de un volt.

Il est facile, à partir de l'équation chimique ci-dessus, qui concerne la formation d'une seule molécule de  $CO_2$ , de calculer l'énergie dégagée par la combustion de 1 kg. de carbone. Cette énergie peut être calculée en unité de masse, qui exprimera la perte de masse du système, elle est égale à  $4,3 \times 10^{-4}$  mgr. Chacun sait que cette perte de masse est imperceptible à l'aide des moyens dont on dispose. C'est ainsi que l'on peut considérer à juste titre que le poids moléculaire d'un corps est toujours égal à la somme des poids des atomes constituants.



Par contre, les réactions entre les noyaux des atomes ou réactions nucléaires sont accompagnées d'une libération ou d'une absorption d'énergie beaucoup plus considérable que ce n'est le cas pour les réactions moléculaires. Les variations de masse sont alors mesurables avec une grande précision. Considérons, par exemple, la réaction nucléaire suivante:



Dans cette équation, le symbole chimique représente ici le noyau de l'atome de l'élément considéré, et le nombre qui suit le symbole représente le *nombre de masse* ou, si l'on veut, le poids atomique arrondi. Le Li6 est une des deux espèces de Li stables. C'est ce qu'on appelle un *isotope*. De même, par exemple, pour l'hydrogène, on connaît en plus des atomes les plus courants, dont le nombre de masse atomique est 1, des atomes plus lourds qui sont plus rares aussi, dont le nombre de masse est 2 : hydrogène lourd ou deutérium.

En comparant les énergies libérées dans les deux réactions ci-dessus, on constate que la réaction nucléaire dégage 5,5 millions de fois plus d'énergie que la réaction moléculaire. L'énergie produite par la réaction nucléaire correspond à une perte de masse ou dématérialisation égale à 0,0236 unité de poids atomique, ainsi qu'on le constate dans le bilan des masses établi ci-dessous:

$$\begin{array}{lcl}
 \text{Li6} & + & \text{H2} \rightarrow \text{He4} + \text{He4} + 22 \text{ millions ev} \\
 \text{Poids} & & (22 \text{ Mev}) \\
 \text{atomiques} & & \\
 \text{exacts :} & \underbrace{6,0167 + 2,0147}_{8,0314} & = \underbrace{4,0039 + 4,0039}_{8,0078} + 0,0236 \text{ unité de} \\
 & & \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Perte de masse.}} \\
 & & \text{poids at.}
 \end{array}$$

Il est facile de calculer à partir de ces valeurs la perte de masse qui correspondrait à la réaction se produisant avec 1 kg. de l'isotope Li6, on aboutit alors à une perte de masse de 4 g. Cette dématérialisation, toute théorique, donne une énergie qui équivaut à la chaleur dégagée par la combustion de 10.000 tonnes de C. Mais une semblable réaction est irréalisable sur des masses aussi grandes.

En effet, il est nécessaire d'utiliser 300 millions de noyaux de deutons rapides, ayant chacun une énergie cinétique de 0,2 million d'électronvolts, pour atteindre un seul noyau de Li et le faire réagir.

L'énergie dépensée excède tant l'énergie libérée par la réaction que celle-ci en devient négligeable; autrement dit, l'opération est lourdement déficitaire. Ce rendement déplorable s'explique essentiellement par la répulsion qui existe entre des noyaux chargés d'électricité de même signe. C'est ainsi qu'il est toujours impossible de faire réagir entre eux des noyaux en masse pondérable dans les conditions que nous avons pu réaliser jusqu'à maintenant.

Il existe bien d'autres réactions nucléaires qui ne se produisent pas entre noyaux, mais, par exemple, à l'aide de particules neutres que l'on appelle *neutrons*. Pour eux, il n'y a plus de répulsion électrique, et le rendement de ces réactions peut être excellent, c'est-à-dire qu'il n'est pas difficile de faire réagir tous les neutrons dont on dispose, et l'on pourrait provoquer des réactions nucléaires sur des quantités pondérables de matière si les neutrons étaient abondants. Mais les neutrons ne sont produits que par des réactions nucléaires entre noyaux chargés, ou tout au moins dans des opérations nucléaires dont le rendement est toujours extrêmement bas. Ces neutrons constituent ainsi un réactif rare et très coûteux. La difficulté signalée plus haut, loin d'être résolue, ne se trouve ainsi que déplacée. Dans l'impossibilité de faire réagir des masses pondérables de noyaux dans des conditions avantageuses, toute utilisation de l'énergie nucléaire est longtemps restée exclue.

Jusqu'en 1939, les centaines de réactions nucléaires réalisées étaient du type suivant :



Aucune d'elles n'a pu donner l'espoir de réaliser des réactions en chaîne telles que celles qui permettent la combustion d'hydrogène dans l'oxygène ou la combinaison de l'hydrogène et du chlore. Il a fallu à cette époque la découverte d'un type tout nouveau de réaction, que l'on appelle la réaction de rupture (scission, partition, Spaltung en allemand, fission en anglais), pour que l'on puisse entrevoir la possibilité d'une réaction en chaîne susceptible de rendre utilisable l'énergie nucléaire.

La réaction de rupture se produit avec les noyaux les plus lourds que l'on connaisse et qui sont ceux des derniers éléments du système périodique de Mendéléïeff, noyaux tels que celui de l'uranium. Cette réaction de rupture, dont la découverte est essentiellement due aux travaux de HAHN et STRASSMANN, ainsi qu'à ceux d'IRÈNE JOLIOT-CURIE et SAVITCH, peut se schématiser de la manière suivante :

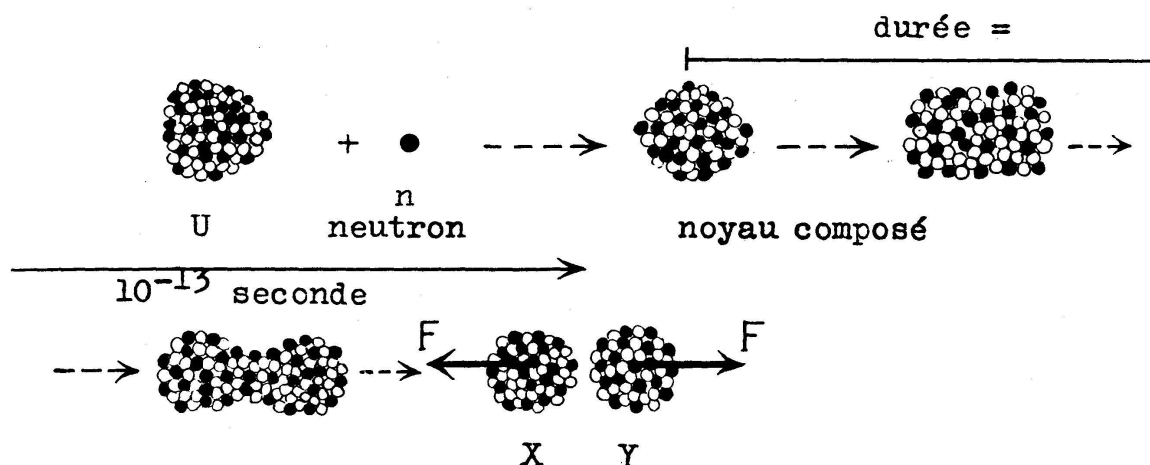


Schéma de la rupture d'un noyau d'uranium par l'action d'un neutron

Fig. 1

Le noyau est constitué de deux espèces de particules :

- 1° de protons ou noyaux d'hydrogène dont la masse dans l'échelle des poids atomiques est égale à 1 et porteurs d'une charge positive;
- 2° de neutrons, de masse à peu près égale à celle des protons, mais sans charge électrique, ainsi que nous l'avons dit précédemment.

Les particules sont animées de mouvements incessants à l'intérieur du noyau. Elles sont liées les unes aux autres par des forces de valence qui peuvent être saturées, comme c'est le cas dans les molécules. Ces forces de valence unissent protons et neutrons, mais leur effet d'attraction diminue rapidement par l'éloignement. On dit que leur effet est de courte portée par rapport aux dimensions nucléaires.

A part ces forces attractives entre neutrons et protons, il existe dans le sein du noyau des forces répulsives qui s'exercent suivant la loi de Coulomb entre les protons, forces qui tendent à disloquer le noyau. Ces forces de Coulomb ne varient pas aussi rapidement avec l'éloignement que les forces de valence.

Tandis que les noyaux légers sont sphériques et peu déformables, les noyaux lourds sont facilement déformés par l'agitation interne des particules moins fortement liées entre elles que dans les noyaux légers. Cette déformation peut devenir critique, lorsque par elles les forces attractives ont trop perdu de leur pouvoir, le noyau, comme une goutte liquide, peut se séparer en deux morceaux de grosseur variable mais voisine. Ces fragments nucléaires sont beaucoup plus lourds que les particules émises dans toutes les réactions nucléaires connues avant la découverte de la réaction de rupture.

Cette rupture peut se produire spontanément, mais le phénomène est rare. Il se fait suivant la même loi de hasard qui régit les transformations radio-actives. C'est ainsi que l'on a pu établir récemment que l'uranium se rompait spontanément avec une période qui est de l'ordre de  $10^{15}$  années.

Cette rupture peut aussi être provoquée par l'accroissement de l'agitation au sein du noyau. C'est ce que l'on réalise en fournissant à celui-ci une énergie suffisante à l'aide de la lumière nucléaire ou radiation gamma qu'il peut absorber, ou en le bombardant par des projectiles chargés, tels que hélions ou particules alpha, deutérons ou protons. On peut le rompre également en faisant réagir le noyau lourd avec des neutrons. C'est ce dernier cas qui nous intéresse plus particulièrement.

En réagissant avec un noyau lourd, celui d'uranium par exemple, le neutron lui apporte tout d'abord l'énergie dégagée par sa combinaison au noyau, qui est de l'ordre de 6 millions d'électronvolts, puis l'énergie cinétique correspondant à sa vitesse au moment de son entrée dans le noyau. Cette seconde énergie est négligeable toutes les fois où les neutrons sont suffisamment ralentis ou lorsqu'ils sont thermiques, c'est-à-dire lorsqu'ils ne possèdent que l'énergie correspondant à l'agitation thermique des molécules qui les entourent.

NIELS BOHR et WHEELER ont calculé l'énergie critique de rupture, qui joue le rôle d'une énergie d'activation, et l'on voit dans le tableau suivant qu'elle grandit si le nombre de masse ou poids atomique du noyau lourd diminue. Ces noyaux sont ainsi d'autant plus difficiles à rompre qu'ils sont plus légers.



| Noyau initial    | Energie d'activation<br>ou énergie critique<br>de rupture |
|------------------|-----------------------------------------------------------|
| W 183 . . . . .  | 14,6 Mev                                                  |
| Pt 195 . . . . . | 12,5 Mev                                                  |
| Hg 201 . . . . . | 11,3 Mev                                                  |
| Pb 207 . . . . . | 10,4 Mev                                                  |
| Th 232 . . . . . | 7,6 Mev                                                   |
| U 238 . . . . .  | 6,8 Mev                                                   |

Le noyau lourd qui capte un neutron forme un noyau que l'on dit composé (Zwischenkern), qui est un produit intermédiaire très instable qui ne dure qu'une fraction de seconde ( $10^{-13}$  seconde). On peut comparer dans le tableau ci-dessous l'énergie nécessaire à rompre les noyaux composés formés à partir des noyaux les plus lourds à l'énergie libérée par la fixation des neutrons ou énergie de liaison.

*Ruptures par neutrons*

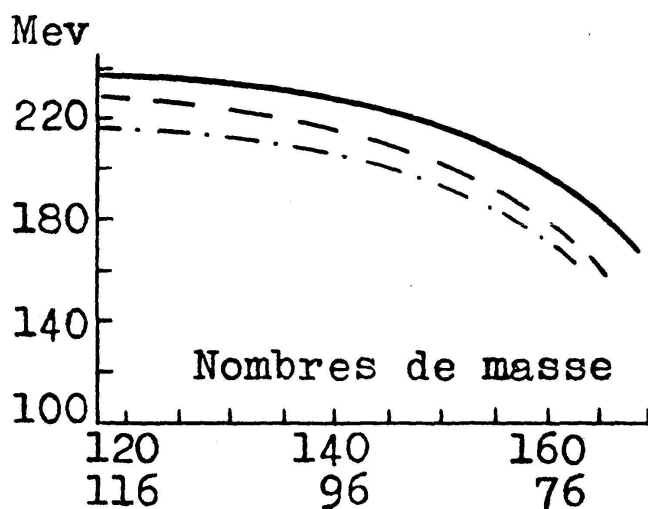
| Noyau<br>composé | Energie           |                               | E — W    |
|------------------|-------------------|-------------------------------|----------|
|                  | d'activation<br>E | de liaison<br>du neutron<br>W |          |
| U 235            | 5,0 Mev           | 5,4 Mev                       | —0,4 Mev |
| U 236            | 5,3 Mev           | 6,4 Mev                       | —1,1 Mev |
| Pa 232           | 5,5 Mev           | 5,4 Mev                       | +0,1 Mev |
| U 239            | 5,9 Mev           | 5,2 Mev                       | +0,7 Mev |
| Th 233           | 6,9 Mev           | 5,2 Mev                       | +1,7 Mev |
| Io 231           | 6,5 Mev           | 5,3 Mev                       | +1,2 Mev |

Si l'énergie de liaison est plus grande que celle nécessaire à déclencher la rupture, la seule fixation d'un neutron thermique, dont l'énergie cinétique est négligeable, suffira à rompre le noyau. C'est effectivement ce qui a lieu pour les noyaux composés U 235, U 236, soit les noyaux composés d'un noyau d'U II 234 et d'un neutron ou d'un noyau AcU 235 et d'un neutron. Par contre, si l'énergie de rupture est plus grande que celle libérée par la liaison du neutron, seuls les neutrons rapides apportant avec eux de l'énergie cinétique pourront produire la rupture. Dans ces cas seulement, il sera nécessaire de bombarder le noyau par un neutron rapide qui sert de projectile. C'est ainsi que l'U I 238 ne se rompt pas sous l'action de neutrons thermiques, mais bien sous l'action de neutrons rapides. Si une énergie d'activation est nécessaire pour provoquer la rupture, celle-ci libère une énergie considérable, beaucoup plus grande que l'énergie d'activation.

Les deux morceaux du noyau lourd constituent eux-mêmes deux nouveaux noyaux chargés de beaucoup d'électricité positive. Une répulsion coulombienne violente leur communique une vitesse voisine de celle de la lumière, vitesse freinée par la matière environnante tout au long d'un parcours qui est d'environ deux centimètres dans l'air aux conditions normales. Par le ralentissement, ces noyaux deviennent des atomes qui appartiennent à des éléments chimiques de poids atomiques moyens, intermédiaires entre le brome et le cérium.

Ce sont les premiers projectiles que l'on connaisse, à la fois si rapides et si lourds. Ils ont donné lieu à des phénomènes inconnus jusqu'alors. Leur trajectoire, rendue visible par condensation de brouillard dans la chambre de WILSON, a naturellement été photographiée et étudiée.

On peut calculer que l'énergie totale libérée par la rupture est la plus grande lorsque les deux fragments sont de masse égale. Cette énergie diminue, ainsi que le montrent les courbes ci-dessous, à mesure que les deux fragments deviennent plus inégaux.



Energie totale libérée par  
rupture du noyau composé U 236  
(calculée d'après différentes  
données)  
W. Jentschke et F. Prankl

Fig. 2

Par ailleurs, l'énergie dégagée par chaque rupture n'est pas constante. Elle varie d'une rupture à l'autre, ce qui permet de tracer une courbe de répartition du nombre des ruptures, en fonction des énergies dégagées par chacune d'elles. La figure ci-après

montre que cette courbe présente une forme en cloche qui rappelle les courbes de répartition classiques de MAXWELL-BOLTZMANN.

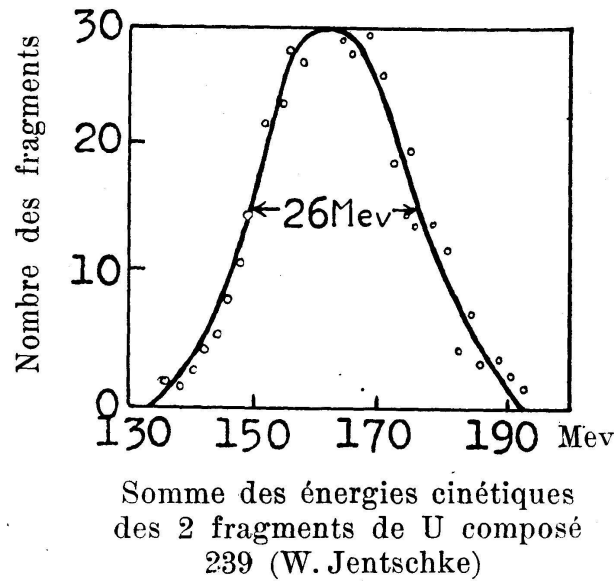
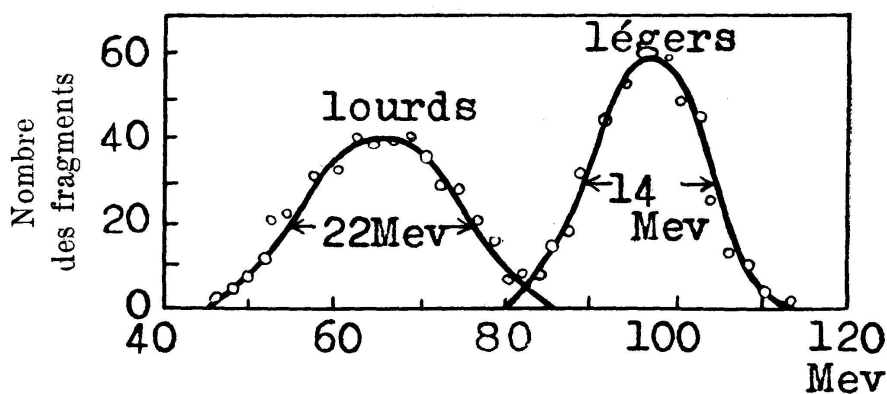


Fig. 3

Les travaux expérimentaux ont permis de constater que les deux fragments de chaque rupture appartiennent à deux groupes. L'un est constitué par des noyaux dont le nombre de masse est compris entre 83 et 95. Ce sont les fragments qui auront la plus grande énergie cinétique, tandis que l'autre groupe est formé de noyaux plus lourds, de nombre de masse compris entre 99 et 140. Ce sont eux qui, lors de la rupture, prennent le moins d'énergie. On peut tracer des courbes de répartition pour chacun de ces groupes, qui ont toutes deux des formes identiques, mais qui diffèrent par leur hauteur et leur étalement.



Répartition de l'énergie cinétique des fragments  
de l'U composé 239

Fig. 4

C'est ainsi que la rupture des noyaux lourds en général, et de l'uranium en particulier, s'effectue en donnant des fragments inégaux.

La répartition du nombre des ruptures en fonction de leur dissymétrie est illustrée dans la figure suivante, où l'abscisse indique les nombres de masse des deux fragments produits à chaque rupture, leur somme étant constamment égale au nombre de masse du noyau composé, qui est ici de 236. On constate que la rupture se fait le plus souvent en donnant des fragments dont les nombres de masse sont de 90 pour le plus léger et de 146 pour le plus lourd.

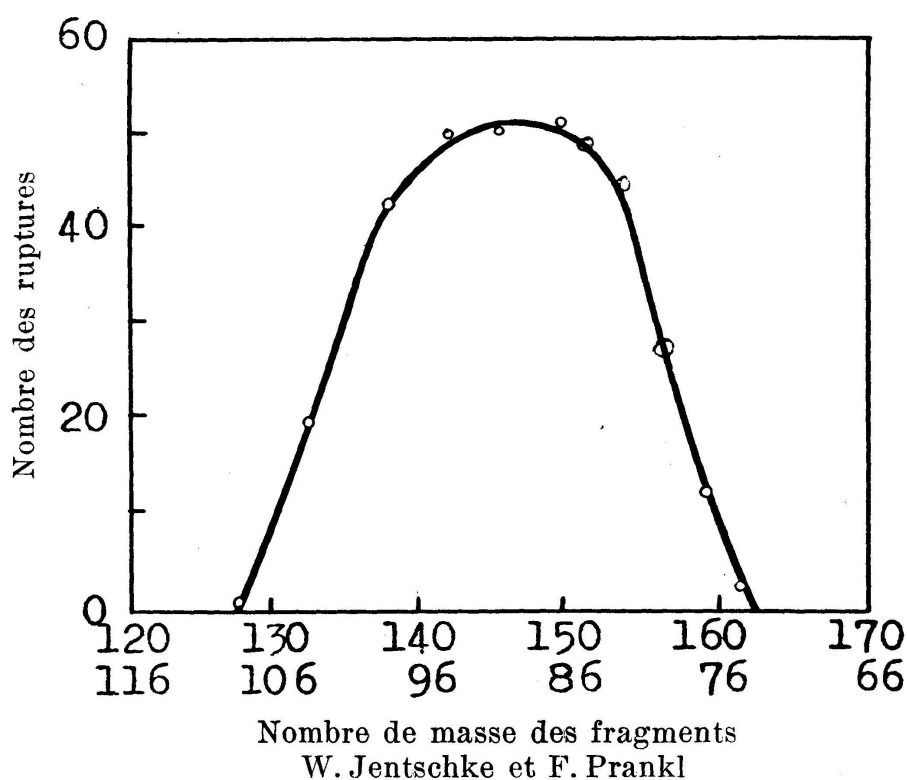


Fig. 5

Les fragments formés par la rupture sont des noyaux profondément instables. En effet, si l'on examine la figure suivante, où l'ensemble des points noirs représente les noyaux stables, on constate que le rapport des neutrons aux protons nucléaires grandit à mesure que l'on considère des noyaux plus lourds. La pente de la courbe tracée par les points noirs s'accroît de plus en plus du côté droit. La rupture donne des noyaux où ce rapport des neutrons aux protons est celui de l'uranium, c'est-à-dire qu'il est

trop élevé pour que ces noyaux puissent être stables, ainsi que le montre sur la figure le trait X—Y, qui indique la composition moyenne des fragments.

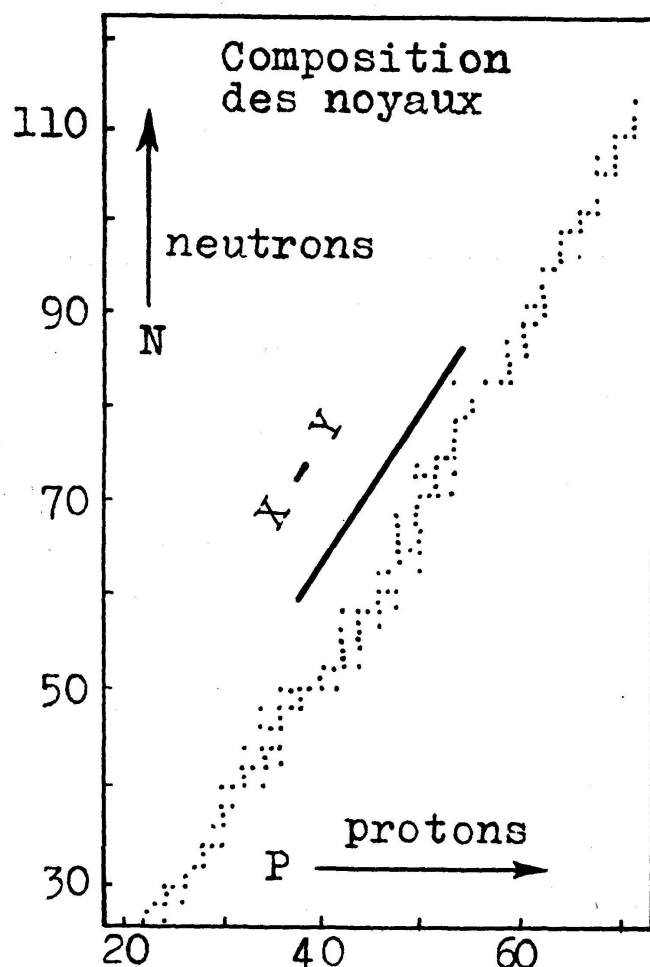


Fig. 6

| Noyaux stables |      |
|----------------|------|
| P              | N/P  |
| 92 (U)         | 1,56 |
| 46             | 1,33 |

Le retour à la stabilité s'effectue de deux manières :

- 1° par l'émission instantanée ou différée de quelques secondes de un ou plusieurs des neutrons en excès;
- 2° par des transformations radio-actives qui correspondent toujours à une émission de rayonnement bêta négatif.

C'est ainsi que pour chaque électron négatif émis, un neutron nucléaire se transforme en un proton, ce qui rétablit totalement ou en partie l'équilibre entre les neutrons et les protons.

Chaque rupture donne donc, d'une part, des neutrons, et d'autre part, des corps radio-actifs dont les périodes peuvent avoir des valeurs très diverses qui s'échelonnent entre les temps les plus courts que l'on puisse observer, et des valeurs qui vont jusqu'à des milliards d'années.



L'énergie libérée instantanément par la rupture est égale à la somme de l'énergie cinétique des fragments (en moyenne, égale à 160 Mev) et de l'énergie des neutrons émis, à laquelle il convient encore d'ajouter l'énergie des transformations radio-actives de très courtes périodes. La totalité de cette énergie a été mesurée par calorimétrie et s'élève à 175 Mev par rupture. Le reste de l'énergie disponible à la suite de cette réaction est libérée lentement au cours des transformations radio-actives de période plus ou moins longue.

La rupture que j'ai décrite ici dans le cas de l'uranium s'effectue de la même manière, quel que soit l'isotope, et l'on peut dire de plus que ces mêmes conclusions restent qualitativement valables pour d'autres noyaux lourds, tels que celui du thorium, qui ont été étudiés à ce point de vue. Si les noyaux les plus lourds sont les plus faciles à rompre, ce ne sont toutefois pas les seuls qui puissent fournir de l'énergie par rupture. Un calcul effectué par BOHR et WHEELER montre que la rupture reste une opération exothermique pour un très grand nombre d'espèces nucléaires, ainsi qu'on peut le constater dans le tableau suivant:

| Noyaux<br>initiaux | Noyaux<br>produits | Energie libérée |           |
|--------------------|--------------------|-----------------|-----------|
|                    |                    | par division    | plus tard |
| Ni 61              | Si 30 et 31        | — 11 Mev        | 2 Mev     |
| Sn 117             | Mn 58 et 59        | + 10 Mev        | 12 Mev    |
| Er 167             | Se 83 et 84        | + 94 Mev        | 13 Mev    |
| Pb 206             | Nb 103 et 103      | +120 Mev        | 32 Mev    |
| U 239              | Pd 119 et 120      | +200 Mev        | 31 Mev    |

La rupture du noyau d'uranium libère donc chaque fois un ou plusieurs neutrons, et s'ils rencontrent sur leur chemin de nouveaux noyaux d'uranium, ils pourront provoquer à leur tour de nouvelles ruptures, lorsque les conditions nécessaires se trouvent réalisées. La présence de l'uranium n'est en effet pas toujours suffisante, car le noyau composé par l'uranium et le neutron ne donne pas lieu inévitablement à la rupture. Le neutron, provisoirement absorbé, peut être réémis, auquel cas il reste disponible. Le noyau composé peut également garder définitivement le neutron après avoir émis un rayonnement gamma. On dit alors qu'il y a capture simple du neutron, qui est ainsi perdu pour toute autre rupture.

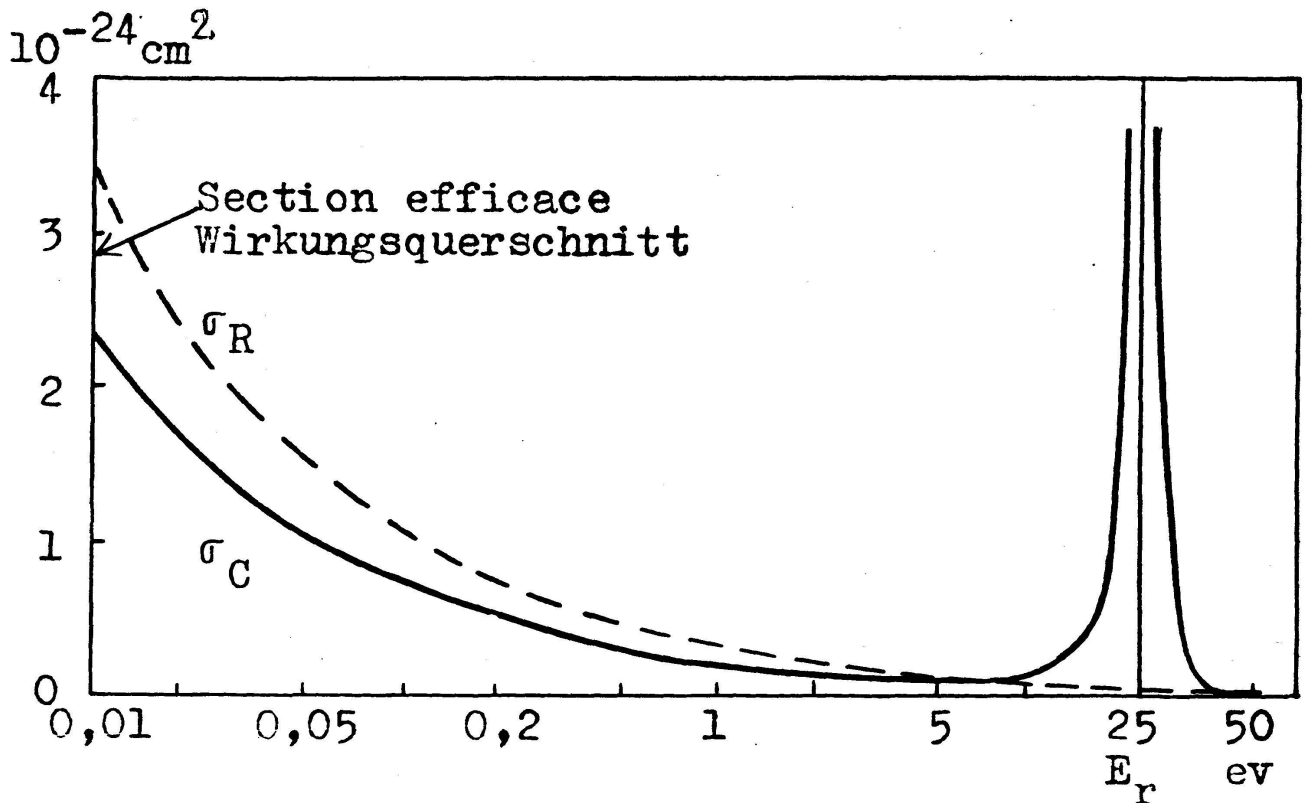
Ce nouveau noyau d'uranium formé a un nombre de masse

de 239. Il est radio-actif en émettant une radiation bêta avec une période de 23 minutes. Il se transforme par cette désintégration radio-active en un élément nouveau, qui est au delà de l'uranium dans la classification périodique, et que l'on appelle l'élément 93 (neptunium), à cause du nombre des protons qu'il contient. Cet élément 93 est encore radio-actif et se transforme par émission d'électrons négatifs en l'élément 94 (plutonium). Cette capture est le seul phénomène qu'il faille envisager entre l'isotope 238 et les neutrons lents, dont l'énergie cinétique est de 25 électronvolts. C'est l'effet d'une résonance réalisée par ces conditions qui exclut tout autre phénomène de réémission, la rupture étant elle-même exclue, ainsi qu'on l'a vu, puisque l'énergie du neutron n'est pas suffisante. La rupture du noyau 238 ne peut intervenir qu'avec des neutrons rapides, dont l'énergie cinétique s'ajoute à celle libérée par sa fixation.

La rupture du noyau 235 peut, du point de vue énergétique, être réalisée aussi bien pour les neutrons lents que pour les neutrons rapides, mais d'autres considérations intervenant, il résulte que seuls les neutrons lents ont beaucoup de chance de provoquer la rupture de l'isotope 235.

On traduit la probabilité globale d'une réaction nucléaire, que ce soit réémission, capture ou rupture, par une grandeur calculée en tenant compte de tous les facteurs, grandeur que l'on dénomme la *section efficace*. Sa valeur est d'autant plus élevée que le phénomène auquel elle se rapporte a davantage de chance de se produire. On dira que les probabilités de rupture sont définies pour une espèce nucléaire et pour un neutron d'une vitesse déterminée par la grandeur de la section efficace, qui s'exprime comme une surface plus ou moins grande. La section efficace de capture ( $\sigma_C$ ) est différente pour le même noyau et pour un neutron de même vitesse, de la section efficace de rupture ( $\sigma_R$ ), différente encore de la section efficace de réémission. Chacune de ces sections efficaces varie d'une part avec la vitesse des neutrons et, d'autre part, avec l'espèce de noyau envisagée. Le graphique suivant indique les variations des sections efficaces de capture et de rupture relatives à l'uranium naturel, constitué par un mélange d'isotope contenant 99,3 % de 238 et 0,7 % de 235. Nous pouvons négliger ici l'uranium 234 dont l'abondance n'est que de 0,006 %.

On retrouve dans ce graphique une section efficace de capture considérable pour les neutrons de 25 électronvolts, propriété qu'il faut attribuer à l'uranium 238 ainsi qu'on l'a vu. Dans l'uranium naturel, constitué des trois isotopes 238, 235 et 234, la section efficace de rupture est petite, à l'exception de celle relative aux électrons lents qui grandit si la vitesse des neutrons diminue, phénomène qui est attribué à l'isotope 235.



Sections efficaces de rupture et de capture simple des neutrons par l'U naturel (Flügge)

$E_r$  = énergie des neutrons

$\sigma_R$  = section efficace de rupture

$\sigma_C$  = section efficace de capture

Fig. 7

Lorsque la section efficace est grande, les neutrons ne parcourent que de petites distances (quelques millimètres ou centimètres) dans la matière avant de réagir, tandis que lorsque les sections efficaces sont petites, le libre parcours des neutrons avant de réagir est beaucoup plus long. La réaction par chaîne se produira d'autant plus rapidement que la section efficace est grande, c'est-à-dire que le libre parcours sera petit. De petites masses pourront déjà permettre à la réaction de s'amplifier. Dans le mélange naturel des isotopes, les neutrons rapides peuvent agir sur

l'uranium 238, la section efficace étant petite dans ce cas, la réaction en chaîne ne pourra libérer des énergies importantes que dans des masses relativement grandes.

C'est sur cette base que M. NOETZLIN a formulé l'hypothèse que de grandes masses de noyaux lourds accumulées en certains points de la croûte terrestre pouvaient donner lieu à des réactions nucléaires en chaînes amorcées spontanément, qui seraient à l'origine des volcans.

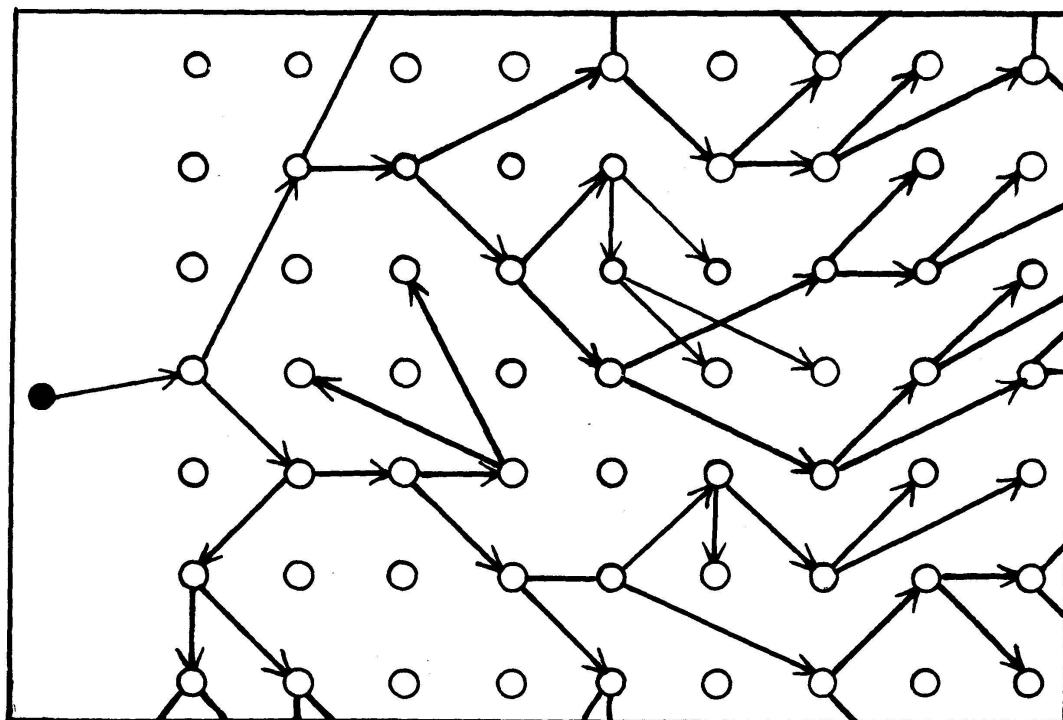


Schéma d'une *réaction en chaînes*  
Chaque noyau qui réagit en fait réagir deux autres  
● neutron initial                      ○ noyau d'uranium

Fig. 8

Pour les besoins pratiques, il est difficile d'envisager toujours l'emploi de quantités aussi grandes d'uranium. Par contre, on réalise facilement que la réaction nucléaire pourra se développer rapidement dans une masse d'uranium qui ne serait constituée que de l'isotope 235. Pour cela, il est nécessaire de ralentir aussi efficacement que possible les neutrons émis par la rupture pour qu'ils puissent avoir de grandes chances de réagir avec des noyaux d'uranium proches. C'est la raison pour laquelle on incorpore à l'uranium 235 des éléments tels que l'hydrogène lourd, le carbone, dont les noyaux légers n'absorbent pas les neutrons, mais les rallen-

tissent rapidement. Des masses relativement petites d'uranium (ou d'un composé de cet élément) sont susceptibles de se désintégrer ainsi entièrement sous l'effet de neutrons initiaux qui amorcent la réaction, comme une étincelle suffit à faire exploser un mélange d'hydrogène et d'oxygène. Ces neutrons initiaux peuvent provenir du rayonnement cosmique ou sont faciles à produire par un peu de corps radio-actif naturel, radium, polonium, radon, intimement mêlés à du glucinium ou béryllium ou à d'autres substances.

La réaction par chaîne peut être schématisée de la manière suivante, si l'on admet que chaque noyau qui réagit en fait réagir deux (voir fig. 8, p. 41).

Les maillons de la chaîne seront naturellement d'autant plus grands que la section efficace sera plus petite, et la masse devra être assez considérable pour que la réaction puisse se développer et produire la désintégration totale. Si la masse est insuffisante, trop de neutrons s'échappent avant d'avoir réagi; la réaction ne peut pas s'amplifier suffisamment pour provoquer la désintégration totale.

Il est facile de calculer que si la rupture d'un noyau d'uranium libère en moyenne 175 millions d'électronvolts, chaque kilo d'uranium détruit par cette désintégration en chaîne provoquée, libérera 20 millions de kW/h., ce qui équivaut à la chaleur dégagée par la combustion de 2000 tonnes de charbon. Cette réaction produit la première transmutation totale que l'on ait réalisée, transmutation qui est accompagnée d'une perte de masse de 8 décigrammes. Il suffirait de 500 kg. d'uranium pour donner autant d'énergie qu'en fournit l'ensemble de nos centrales hydroélectriques pendant un an, énergie qui équivaut à une perte de masse de quelque 400 g.

Si la masse peut être équivalente à de l'énergie et inversement, il n'est guère utile d'attirer ici l'attention sur le fait que la dématérialisation<sup>1</sup> reste une opération exceptionnelle. Elle ne peut se produire en dehors de conditions toujours difficiles à réaliser. Il est évident que la désintégration par chaîne amorcée dans l'uranium ne peut se prolonger en dehors de l'existence de noyaux lourds et l'on ne saurait craindre une contagion qui gagnerait sans distinction tout ce qui nous entoure.

---

<sup>1</sup> Transformation de la totalité de la masse d'une particule (l'électron) en énergie.



Si l'uranium peut exploser par suite du développement instantané de l'effet de chaîne, il est facile de contrôler la réaction par l'usage d'un corps absorbant les neutrons ou neutrophage (bore, cadmium), celui-ci pouvant lui-même dégager de l'énergie par suite de cette absorption. La réaction à laquelle ils donnent lieu peut être désignée du nom de réaction d'arrêt de la chaîne. On peut, par ailleurs, accroître encore la puissance explosive par l'adjonction à l'uranium de corps dont les noyaux atomiques engendrent facilement des neutrons en ralentissant les neutrons rapides émis par la rupture.

La désintégration contrôlée peut se faire sans une émission intense de neutrons et les produits radio-actifs qui prennent naissance ne constituent pas un danger. Par contre, l'explosion de l'uranium laisse après elle une très grande radio-activité. Cette radio-activité des produits de transmutation est probablement moins à craindre que celle qui est engendrée par les neutrons que dégage l'explosif, si l'on a présent à l'esprit que chaque neutron disparaît généralement en créant un noyau radio-actif.

Les réactions de rupture ont donné naissance à des réactions par chaîne qui permettent :

- 1° de libérer une énergie considérable du noyau de l'atome;
- 2° de créer des quantités importantes de corps radio-actifs;
- 3° d'opérer la transmutation massive d'éléments lourds en d'autres de poids atomiques moyens;
- 4° de réaliser des sources de neutrons de grande intensité.

De tous ces résultats, la libération de l'énergie nucléaire est sans doute le plus important.

Les éléments lourds dont la radio-activité naturelle a fourni les moyens extraordinaires, nécessaires à l'étude des phénomènes nucléaires, apparaissent maintenant comme une source d'énergie inestimable, héritage plus dangereux que tout autre, dont l'origine n'est pas géologique, mais cosmique. Peut-être sera-t-il un jour possible d'utiliser d'autres réactions nucléaires qui rappelleront celles qui doivent se produire dans les étoiles. Il suffit en tous cas de se souvenir qu'il est des lois inéluctables interdisant à jamais une partie de nos espoirs et de nos craintes, malgré la richesse certaine des possibilités inconnues.

# Die Ontogenese des Menschen als Problem der Evolutionsforschung

Von

ADOLF PORTMANN, Basel

Das Problem unseres Werdens hat einen wichtigen biologischen Aspekt. Zwar überschreitet die Ursprungsfrage das Gebiet, in dem der Biologe zuständig ist, da sie auch das Rätsel unserer Sprache und unserer Kultur mit einschließt — trotzdem wird die biologische Arbeit immer einen ganz besonderen Anteil an den Versuchen haben, die das Problem unseres Werdens mit den Mitteln der Wissenschaft zu lösen trachten.

Unsere Problemstellung gilt der Ontogenese des Menschen, deren Beziehung zu anderen Entwicklungsweisen wir untersuchen wollen. Das Feld, in dem wir vergleichen, ist der große Verwandtenkreis der höheren Wirbeltiere, die Gruppe der Amnioten, die Reptilien, Vögel und Säuger umfaßt. Der bloße Vergleich mit den Menschenaffen ist ungenügend; erst die Beobachtung in einem viel weiteren Felde läßt die Eigenart unserer Entwicklung deutlich hervortreten.

Jeder Vergleich von Entwicklungsabläufen muß sich stützen auf die Ordnung der erwachsenen Tierformen. Diese ist aber in den Anordnungen des sogenannten « Systems » nur ungenügend dargestellt, da uns das System viel zu wenig sagt über die Differenzierungsunterschiede, welche die einzelnen Organisationsstufen trennen.

Die Biologie arbeitet heute daran, für die schwer zu fassende Tatsache einer zunehmenden Differenzierung objektive Darstellungsweisen zu finden. Eines der Mittel ist die Bestimmung der Zerebralisation, d. h. der steigenden Komplikation des zentralen Nervensystems in den Verwandtschaftslinien der uns interessie-

renden Gruppen. Sie ermöglicht uns, die besondere Dimension des Lebendigen, die « Innerlichkeit » in einer ersten Annäherung auszudrücken <sup>1</sup>.

Wir wenden uns der vergleichenden Prüfung der Ontogenesen zu. Sie gliedert sich zunächst in zwei große Reihen: die der Reptilien und der Vögel einerseits und andererseits die Reihe der Säuger. Die heute lebenden Reptilien und Vögel entwickeln sich nach einem einheitlichen Ontogeneseplan, der durch die Bildung terrestrischer Eier ausgezeichnet ist. Die Reptilien zeigen den einfachsten Zustand: eine längere Eiperiode, schlüpfende Jungtiere, die in Gestalt und Lebensart den Eltern gleichen und die ohne Beziehung zu den Eltern aufwachsen. Wir wollen diesen einfachsten Jugendzustand als « Nestflüchter » bezeichnen. Manche Vogelgruppen schließen sich an diesen Zustand an, wenn auch die Brutfürsorge in allen Fällen größer ist als bei Reptilien. Prüfen wir den Grad der Zerebralisation solcher Vögel, so sind es lauter Gruppen mit geringer Hirndifferenzierung (Indices der Hemisphären von 3—6). Keine einzige Vogelgruppe, deren Hemisphärenindex 10 überschreitet, zeigt diese Form der Ontogenese.

Die höheren Vogelgruppen entwickeln sich ganz anders. Die Ausbildung ihres zentralen Nervenorgans erfordert eine sehr viel größere Differenzierungsarbeit als die der niedrigeren Vögel. Sie umfaßt daher eine längere Periode der Unselbständigkeit, die durch die Einbeziehung der Altvögel in den Entwicklungsgang kompensiert ist. Der Altvogel wird obligatorische Teilfunktion der ganzen Ontogenese. Der Jungvogel ist ein « Nesthocker ».

Die Ontogenese der höheren Vögel ist nicht etwa durch eine umgebaute letzte Strecke der generellen Vogelentwicklung charakterisiert; *der Umbau erstreckt sich auf die gesamte Entwicklungszeit*, und die Einzelheiten werden nur verständlich, wenn man stets die Verschränkung von Alt- und Jungvogel als die besondere Eigenart dieses höheren Entwicklungsganges berücksichtigt.

Prüfen wir nun auch die zweite der großen Differenzierungsreihen, die der Säugetiere. Unsere Aufmerksamkeit gilt der engeren Gruppe der sogenannten Eutheria, d. h. der Säuger mit aus-

---

<sup>1</sup> Über die Methoden siehe *Portmann A.*, Die Ontogenese und das Problem der morphologischen Wertigkeit. *Revue Suisse de Zool.* 1942, S. 169—185.

gesprochener Plazentabildung. Die Stufung nach dem Grade der Zerebralisierung gibt uns die Möglichkeit, zwei extreme Gruppen zu formen, die sich auch im Entwicklungstypus auffällig unterscheiden.

Die niedrige Stufe (Insektenfresser, viele Nager, manche Kleinraubtiere) weist große Zahl und kurze Tragzeit der Jungen auf, damit auch starke Abhängigkeit dieser Jungen von den Eltern. Dem entspricht es, daß wir über die alle Säuger charakterisierende Milchsekretion hinaus bei der niedrigen Säugerstufe auch noch Nestbau finden, Ausfall der elterlichen Bauchhaare zur Wärmung der Jungen, Lecken zur Förderung der Peristaltik des Darms und der Harnentleerung. Die Ontogenese der niederen Eutherien gleicht in vielen Zügen der bei den höher differenzierten Vögeln gefundenen. Sie zeigt einen sehr spezialisierten Zustand von Nesthockerentwicklung.

Wie verhält sich die höhere Differenzierungsstufe, der manche Huftiergruppen, die Robben und Wale und vor allem die Primaten angehören? Verglichen mit dem niedrigen Zustand der Eutherien ist in allen diesen Gruppen eine viel grössere Differenzierungsarbeit zu leisten, um ein Zentralorgan aufzubauen, das einigermaßen dem Reifezustand in seinen Funktionen entspricht, das also relative Selbständigkeit des Jungtieres garantiert. Diese Situation steigert, wie wir das schon für die Vögel feststellten, die Dauer der Abhängigkeit vom Elterntier. Wie wird nun diese neue verlängerte Abhängigkeitsphase gestaltet? Wir finden nicht etwa eine Steigerung der Mittel, die bei den niedrigen Zerebralisationsstufen angewendet werden, sondern eine neue Lösung: Extreme Verringerung der Jungenzahl (meist auf 2 und 1) und Verlängerung der Tragzeit. Es entsteht so ein Jungtier, das im Geburtsmoment schon weitgehend der reifen Form gleicht, das über die artgemässe Haltung und Bewegungsweise verfügt, wie auch über die arttypischen Mittel der Kommunikation.

Dass dieser neue Nestflüchter der höheren Säuger ein sekundärer Formzustand ist, das beweist der Umstand, dass alle diese Jungtiere während der langen Tragzeit ein Stadium durchlaufen, das auf die frühe Geburt der niedrigen Eutherien hinweist: die Sinnesorgane machen im Uterus eine funktionell betrachtet sinnlose Phase des völligen Verschlusses durch, die einige Zeit vor der Geburt bereits zu Ende ist.

Dieser Ontogenesezustand des höheren Säugetiers ist die Ausgangssituation für jede Darstellung der menschlichen Entwicklungsverhältnisse<sup>1</sup>. Die Basis für die Einschätzung unserer Ontogenese aber ist die Beurteilung des Abstandes, der unsere eigene Art von den höchsten Gestaltverwandten, den Anthropoiden son- dert. Ein erster Versuch dazu ist die Bestimmung der Zerebralisa- tion. Wir finden, dass bei gleicher Körpermasse unsere Hirnmasse etwa drei- bis viermal die Gehirnmasse der Anthropoiden über- trifft. Dabei ist dieser Unterschied der Masse nur ein schwacher Ausdruck für die verborgenen Verschiedenheiten der Seinsweisen, die durch das Hirn der Menschenaffen und das des Menschen er- möglicht werden.

Die Differenzierungsarbeit, die im menschlichen Zentralorgan geleistet werden muss, bis es die für uns charakteristische Lebens- art zu lenken imstande ist, übertrifft sehr beträchtlich die jedes höheren Säugers. Mit dem Ausmass dieser Arbeit steigt auch die Dauer der Abhängigkeit und die Intensität der Verschränkung, die Mutter und Kind zu einer überindividuellen Einheit zusammen- fügt. Wie wird diese verlängerte Entwicklungsperiode bewältigt — welches ist die menschliche Weise, die Steigerung der Abhängig- keit zu lösen ?

Der Blick auf die Lösung der höheren Säuger sagt bereits etwas sehr Wichtiges und zu wenig Beachtetes: Unsere Ontogenese ist nicht eine Steigerung der typischen Entwicklungsweise höherer Säugetiere. Wir können uns von einer solchen typischen Säuger- entwicklung im Fall des Menschen ein annäherndes Bild machen: Durch verlängerte Tragzeit müßte ein Jugendzustand im Mutter- körper gebildet werden, der über die menschliche aufrechte Hal- tung, über die Anfänge unseres menschlichen Kommunikations- mittels, die Sprache, verfügen würde. Die für Menschenaffen charakteristische Tragzeit von 253 bis 275 Tagen müßte etwa auf deren 600 verlängert werden. Dieser Weg ist aber in der Mensch- werdung nicht beschritten worden.

Die menschliche Lösung ist ganz anders. Trotz der sehr viel höheren Zerebralisation ist die Dauer der Schwangerschaft nicht über Anthropoidenzustände hinaus gesteigert; es wird ein Jugend- zustand zur Welt gebracht, der in seinem morphologischen Rang

---

<sup>1</sup> Für weitere Einzelheiten und Bibliographie siehe *Portmann Adolf*, Biolog. Fragmente zu einer Lehre vom Menschen, Basel, 1944.



zwar der Nestflüchterstufe entspricht, aber von allem abweicht, was wir sonst bei höheren Säugern gewohnt sind. Der oberflächliche Vergleich erinnert am ehesten an den Nesthockerzustand. Darum muss der Biologe die Unterschiede gegenüber dem Nesthocker der niederen Säuger besonders hervorheben. Der Mensch durchläuft im Mutterleibe die für Nestflüchter typischen Stadien des Verschlusses der Sinnesorgane. Er kommt mit weit entwickelten wachen Sinnen zur Welt, und auch seine motorischen Fähigkeiten sind im Moment der Geburt schon sehr grosse.

Wir haben am Beispiel der Vögel aufzuzeigen versucht, dass die neue Seinsstufe nicht nur einer der bereits bestehenden Ontogenesen eine neue, letzte Etappe anfügt, sondern dass der Entwicklungsgang in seinem ganzen Verlauf abgeändert wird.

Diese Erscheinung ist in unserer eigenen Ontogenese ganz besonders auffällig. Sie sei am Beispiel der Wachstumsphänomene dargestellt, da wir diese bereits etwas besser kennen. Unser Wachstum ist sehr verschieden von dem der Anthropoiden. Nicht nur ist die Wachstumszeit um mehrere Jahre länger als die längste der Menschenaffen, des Orangs — die ganze Wachstumsperiode ist gegenüber der der Menschenaffen durch eine eigenartige Gliederung in verschiedene Etappen ausgezeichnet. Da ist zunächst eine Frühperiode, ausgezeichnet durch besonders starkes Wachstum. Rechnen wir die Tagesleistung der eigentlichen Fötalzeit so aus, dass wir die Massenentwicklung gleichmässig verteilt annehmen, so ergibt sich für einen Makaken 2,6 g, für einen Orang 5,7 g, für den Menschen aber 12,2 g, wobei doch das mütterliche Gewicht bei Mensch und Orang etwa gleich gross ist. In der auf das erste Jahr folgenden Periode nimmt das Gewicht der Menschenaffen gleichmässig zu, bei uns dagegen verlangsamt sich das Wachstum für lange Jahre. Im sogenannten Pubertätsschuss zur Zeit der Geschlechtsreife aber wächst der menschliche Körper nochmals für einige Jahre sehr stark — eine Erscheinung, die nur unserer eigenen Art im Bereich der Amniota zukommt.

Wir wollen aber am Beispiel der Wachstumsunterschiede von Anthropoiden und Menschen auch die Problemstellung der vergleichenden Entwicklungsforschung in ihrer Eigenart etwas deutlicher machen. Wir stehen vor der Aufgabe, die ungewöhnlich lange und auffällig gegliederte Wachstumsperiode des Menschen wissenschaftlich darzustellen; d. h. in umfassendere Zusammen-

hänge einzuordnen. Der eine Weg dazu ist der physiologische, der die verschiedenen Faktoren ermittelt, welche hier am Werke sind.

Doch ist mit der physiologischen Ermittlung der Faktoren, welche unser Wachstum lenken, der Entwicklungsprozess nur von einer Seite her beleuchtet. Der Biologe wird finden, dass die beobachteten Vorgänge erst vollständig dargestellt sind, wenn sie auch in ihrer Bedeutung für die Ausbildung der reifen Tiergestalt erforscht sind. Nicht anders können wir ja die Entwicklung einer Augenblase, eines Ursegmentes im Keim darstellen!

Die Frage nach der Bedeutung eines biologischen Phänomens in einem grösseren Ganzen muss wissenschaftlich gestellt werden, sobald ein umfassendes Beziehungssystem bekannt ist, dem sich der fragliche Tatbestand eingliedern lässt. Die Ergebnisse, die bei solcher Ermittlung der Bedeutung biologischer Sachverhalte gefunden werden, gehören einer anderen Ordnung an als die in der physiologischen Fragestellung hervorgebrachten. *Die zwei Betrachtungsweisen sind komplementär — und nur in der Durchführung beider wird die jeweils mögliche biologische Erhellung eines Tatbestandes wirklich.*

Es sei nochmals betont: Die Bedeutungsfrage kann nur dort wissenschaftlich beantwortet werden, wo ein umfassenderes Beziehungssystem als Objekt der Forschung erkannt werden kann. Im Falle der Wachstumsphänomene ist dieses Beziehungssystem wie für alle ontogenetischen Erscheinungen der gesamte Zustand des erwachsenen Organismus. Damit ist aber auch gesagt, *dass uns die Bedeutungsfrage im Falle der menschlichen Ontogenese auf die ganze menschliche Daseinsart als dem wissenschaftlichen Bezugssystem verweist.*

Die menschliche Daseinsart, die weltoffene Lebensform gegenüber der instinktgebundenen des Tieres, die Möglichkeit einer objektiven Beziehung zu Gegenständen einer Welt verglichen mit der so viel engeren Umweltbindung der höheren Tiere — das ist nun freilich ein Beziehungssystem, das weit über den Rahmen des biologischen Arbeitsfeldes hinausweist. Wir können nicht mit biologischen Methoden allein eine wissenschaftliche Darstellung dieser Lebensform geben. Wir suchen darum nach einem Teilkomplex, der einerseits für die Eigenart der menschlichen Lebenssphäre bezeichnend ist, anderseits aber mit biologischen Methoden fassbar ist. Eine solche Tatsachengruppe bieten uns die Ausdruckserschei-

nungen. Sie sind geeignet, den Blick auf wichtige Unterschiede von Mensch und Tieren zu lenken und sind mit den Mitteln der Biologie darstellbar.

Auch der Mensch besitzt Organe des tierischen spontanen Ausdrucks: der Schrei, der Überraschungslaut, die Drohgebärden, das Stampfen, das Erröten und Erblassen und viele mimische Mittel gehören dieser Sphäre an. Aber die Mittel des spontanen Ausdrucks, also unsere « tierischen » Ausdrucksorgane, spielen im menschlichen Sozialleben eine relativ kleine Rolle — ja der spontanen Äusserung gilt sogar ein heftiger Kampf, der auf eine möglichst weitgehende Herrschaft über diese Darstellungsformen zielt.

Unsere bevorzugten Ausdrucksmittel sind von einer ganz anderen, auf den Menschen beschränkten Art: Sie sind durch Konvention geformte, durch Tradition, nicht durch Vererbung weitergegebene Zeichen, die von den Menschengruppen auf Grund historischer Verhältnisse verschieden gestaltet sind, mögen es nun Wortsprachen oder Gebärdensprachen sein. Wir wollen diese eigenartigen Mittel die « *Organe des beherrschten Ausdrucks* » nennen und wollen uns daran erinnern, wie viele Jahre sozialen Lebens es braucht, um dieses umfangreiche Kulturgut des beherrschten Ausdrucks zu übernehmen, und zwar bei allen uns zugänglichen Menschengruppen der Gegenwart.

Die Zeichen des beherrschten Ausdrucks können nur im sozialen Verkehr erworben werden, sie sind nicht erblich. Der Zeitpunkt für den Beginn dieses Erwerbs ist sehr wichtig und eigenartig: es ist jenes erste Jahr, das ein Säugler von menschenartiger Zerebralisation noch im Mutterkörper verbringen müsste, das bei uns aber bereits dem Sozialleben zugeordnet ist. Der Erwerb des wichtigsten Mittels unseres beherrschten Ausdrucks, der Wortsprache, beginnt um die Mitte dieses ersten Jahres mit der Lallperiode, mit dem freien Gestalten von Lauten, die nicht mehr dem Bereich des spontanen Ausdrucks angehören. Es folgt die nachahmende Bildung gehörter Laute der sozialen Umgebung, und im letzten Vierteljahr sind die ersten Wortbildungen möglich. Mehrere Jahre müssen vergehen, bis die Sprache im sozialen Kontakt sich bereichert und normalisiert hat.

Diese Sprachentwicklung ist aber verbunden mit anderen Entwicklungsschritten, die für die Formung des Menschen von grosser Wichtigkeit sind: mit dem Auftreten des Werkzeuggebrauchs und

mit dem Erwerb der aufrechten Körperhaltung. Für beide Vorgänge fallen die übenden Vorbereitungen wie auch die Zeit des ersten Gelingens mit den Etappen des Spracherwerbs zusammen, und es lässt sich leicht nachweisen, dass für alle diese Vorgänge das gleiche Zusammenspiel von erblichen Anlagen, von spontanem Drang also, von Nachahmung der Umgebung und von sozialer Mit Hilfe durch die Mitmenschen am Werke ist. Wichtig ist uns, dass der Erwerb der spontanen Ausdrucksmittel nicht nur zeitlich, sondern auch qualitativ mit der Genese des aufrechten Ganges und unseres psychischen Verhaltens übereinstimmt.

Die Eigenart der Verbindung erblicher Reaktion und sozialer Nachahmung entspricht der Besonderheit des ersten Lebensjahres, das säugertypisch fern von allem Sozialkontakt im Uterus durchlaufen werden müsste, bei uns aber bereits dem Reichtum der Sozialbeziehungen anvertraut und ausgesetzt wird.

Damit gewinnt auch das eigenartige Wachstum der Fötalperiode und des ersten Lebensjahres einen Sinn: Der viel höhere Zerebralisationsgrad des Menschen bringt eine frühe, starke Entwicklung des zentralen Nervensystems mit sich. Diese wiederum ist eingeordnet in das starke Massenwachstum des Körpers. So kommt es, dass das menschliche Kind im Geburtsmoment mehr als doppelt soviel wiegt wie der neugeborene Anthropoide.

Unser Entwicklungsgang ist nicht einfach verlangsamt, er ist durch und durch eigenartig gegliedert: Er umfasst eine nur dem Menschen eigene Wachstumssteigerung zu Beginn, die bis zum Ende des ersten Lebensjahres anhält, ferner die späte Wachstumsphase des Pubertätsschusses, für die es ebenfalls keine tierische Parallele gibt, und dazwischen eine Periode geringen Wachstums, die der Zeit der menschlichen Daseinsgestaltung im sozialen Lebensraum entspricht.

Mit dem Nachweis der Beziehungen zwischen Ontogenese und Differenzierungshöhe des Tiertypus ist auch der Umfang des Gegenstandes klarer erkennbar, den die Evolutionsforschung darzustellen und zu erklären hat.

Die Evolutionsforschung hat ihre Untersuchungen vorwiegend auf solche Ähnlichkeiten zwischen tierischer und menschlicher Entwicklung gerichtet, deren gemeinsamer Ursprung nicht schwer

nachzuweisen war. Über die Unterschiede aber wurde gerne hinweggesehen. Wir versuchen dagegen die Unterschiede deutlicher zu sehen, die Stellung unseres Ontogenesetypus im Bereich der höheren Wirbeltiere schärfer zu bezeichnen, um so deutlicher zu sehen, was von der Evolutionsforschung eigentlich erklärt werden soll.

Die vergleichende Entwicklungsgeschichte bezeichnet mit vorwiegend statischen Ergebnissen durch Vergleich die ontogenetischen Formen. Sie kann mit diesem statischen Vergleich das Problem der Evolutionsforschung nur stellen, nicht beantworten, wie auch die Paläontologie mit ihren eigenen Mitteln nur Formensukzession feststellen kann.

Die wichtigste wissenschaftliche Arbeitsmethode, welche zur Erforschung des dynamischen Entwicklungsproblems berufen ist, die experimentelle Genetik, ist erst heute in voller Entfaltung begriffen. Sie bietet uns als Grundlage für ein Verständnis der Evolution den sicheren Nachweis erbfester Varianten, der « Mutationen », von denen eine beträchtliche Mannigfaltigkeit bereits bekannt ist. Wieweit der Erklärungswert der heute bekannten Mutationen für das Problem unserer eigenen Herkunft reicht, das ist eine Ermessensfrage, die sehr verschieden beantwortet wird. Die Antwort hängt unter anderem davon ab, welchen Problemkreis man mit einer « Erklärung » zu bewältigen sucht.

Die Lösung des Evolutionsproblems ist sowohl im Falle des Menschen als auch dem der anderen Tiertypen nicht von einer einzigen Forschungsrichtung aus zu leisten; sie kann nur das Werk einer Synthese von verschiedenen biologischen Arbeitsrichtungen sein. Im Hinblick auf eine umfassende wissenschaftliche Theorie der Menschwerdung liefern uns die Fortschritte der Mutationsforschung in den genauer beobachteten Mutationen Modelle für ein künftiges Verständnis der genetischen Zusammenhänge zwischen den lebenden Formen. Unsere Vorstellungen werden sich mit der Erfahrung weiter wandeln.

Darum habe ich auch nicht versucht, diesen Blick über unsere Ontogenese im Sinne einer bestimmten Variante der Evolutionstheorie darzustellen.

Die besondere Dimension des Lebens, die wir als « Innerlichkeit » bezeichnet haben, bot uns auch den Schlüssel für die Interpretation der Ontogenese. Es zeigt sich, *dass mit der Steigerung*



*dieser Intensität der Seinsstufe sich jeweils auch der Ontogenesetypus verändert, und zwar quantitativ wie qualitativ.*

Wenn ein Forschungsgebiet das Problem unseres Ursprungs berührt, so reisst das menschliche Bedürfnis nach Aufschluss gar leicht zu raschen Synthesen hin. Verglichen mit dem, was wir über das Ursprungsproblem zu wissen wünschen, muss jede wissenschaftliche Aussage, die sich auf das objektiv Sagbare beschränkt, äusserst zurückhaltend erscheinen. So muss denn auch das hier Dargestellte mit diesem Kennwort der Zurückhaltung bezeichnet werden. Trotzdem hege ich die Hoffnung, dass nicht dieses enttäuschende Moment zum Schlusse unseres Berichtes überwiegen werde, sondern dass der Blick beim Abschluss dieser Übersicht über ein weit offenes Forschungsfeld hingehe.

# Neuere Ergebnisse auf dem Gebiet der Steroide

Von

L. RUZICKA, Zürich

## A. Systematik der Steroide

Die Steroide sind Verbindungen mit 18 bis 29 Kohlenstoffatomen, in deren Molekel ein Gerüst von 18 Kohlenstoffatomen in der gleichen Anordnung wie im Oestron immer wiederkehrt. Das weibliche Keimdrüsenhormon Oestron ist daher ein Beispiel der einfachsten Steroide.

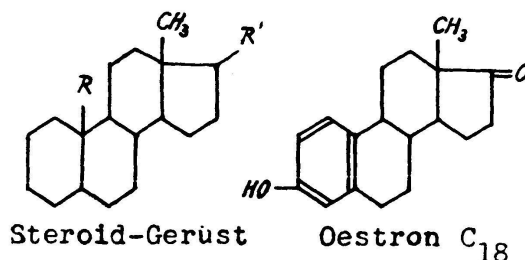


Fig. 1

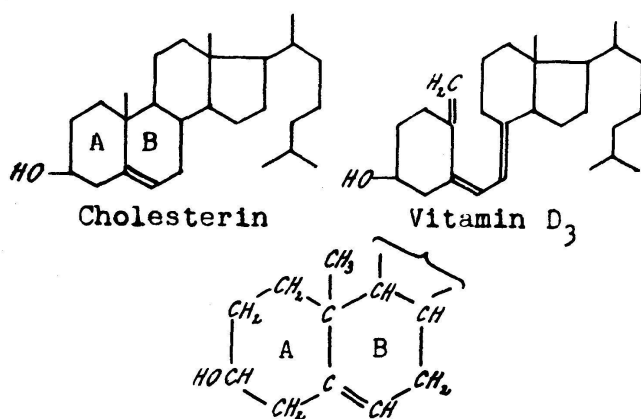
Es sind bisher fast 150 verschiedene Steroide im Tier- und Pflanzenreich sowie in Mikroorganismen aufgefunden worden, die *trotz ihres sehr ähnlichen chemischen Baues grundverschiedene physiologische Eigenschaften* besitzen. Zu den Steroiden gehören Verbindungen wie Sterine, Gallensäuren, Vitamine D, männliche und weibliche Sexualhormone, Nebennierenrindenhormone, herzwirksame Glukoside, Krötengifte, Sapogenine, Anästhetika, Alkaloide und Riechstoffe.

Von den natürlichen Steroiden waren noch vor 15 Jahren nur relativ wenige bekannt. Es handelte sich um Steroide mit 23 bis 29 Kohlenstoffatomen in der Molekel, die in grösseren Mengen in der Natur vorkommen und daher leicht isolierbar sind. Die wich-

tigsten darunter sind das Cholesterin und die Gallensäuren im Tier, das Ergosterin in Pilzen und das Sitosterin sowie die herzwirksamen Glukoside in der Pflanze. Die meisten natürlichen Steroide — es sind dies die mit 18 bis 21 Kohlenstoffatomen in der Molekel — sind nur in sehr kleinen Mengen in den Organismen anwesend und wurden erst während der letzten 15 Jahre isoliert.

|                               |                                            |
|-------------------------------|--------------------------------------------|
| C <sub>18</sub> Oestron       | C <sub>27</sub> Cholesterin                |
| C <sub>19</sub> Testosteron   | C <sub>28</sub> Ergosterin                 |
| C <sub>21</sub> Progesteron   | C <sub>29</sub> Sitosterin                 |
| C <sub>23</sub> Digitoxigenin | C <sub>30</sub> Lanosterin (kein Steroid!) |
| C <sub>24</sub> Gallensäuren  |                                            |

Die langjährige eingehende Untersuchung des Cholesterins und der Gallensäuren, besonders durch WINDAUS und WIELAND, führte 1932 zur vollständigen Konstitutionsaufklärung.



Ringe A und B des Cholesterins

Fig. 2

Im System der Steroide nehmen die Vitamine D eine Ausnahmestellung ein. Das Kohlenstoffgerüst der Vitamine D enthält zwar die Kohlenstoffatome in gleicher Anordnung wie die Sterine, aber der Ring B ist bei den Vitaminen D geöffnet, so dass sie nicht tetrazyklisch, sondern trizyklisch sind.

Die hier benützten Strukturformeln der Steroide sind in üblicher Weise vereinfacht und enthalten ausser der funktionellen Sauerstoffgruppen nur die Kohlenstoffbindungen. Solche Formeln sind übersichtlicher als die vollständigen Formeln, in denen alle Kohlenstoff- und Wasserstoffatome angegeben sind. Oben sind die Ringe A und B des Cholesterins in vollständiger Formulierung wiedergegeben zum Vergleich mit der vereinfachten Formulierung.

Das Gerüst der *Sterine mit 28 bis 29 Kohlenstoffatomen* in der Molekel leitet sich vom Gerüst des Cholesterins durch den Mehrgehalt einer Methylgruppe (beim Ergosterin) oder einer Äthylgruppe (beim Sitosterin) ab. Diese Alkylgruppen sitzen immer an der gleichen Stelle der langen Seitenkette des Steringerüsts.

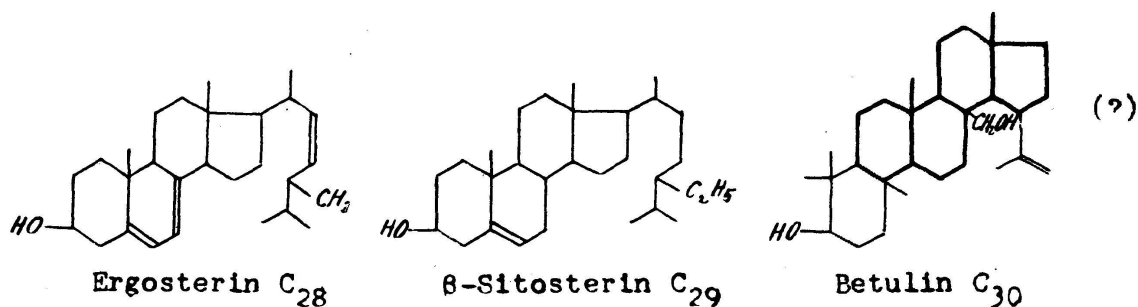


Fig. 3

Es sind auch *den Sterinen ähnliche Verbindungen mit 30 Kohlenstoffatomen* in der Molekel aufgefunden worden, so das Lanosterin der Schafwolle und das damit identische Kryptosterin der Hefe, die aber ein von den Steroiden abweichendes Kohlenstoffgerüst aufweisen und zu den Triterpenen gehören. Aber auch das Kohlenstoffgerüst der *Triterpene* zeigt mit jenem der Steroide eine gewisse Verwandtschaft.

Zur Verdeutlichung haben wir in der oben wiedergegebenen (noch nicht völlig sichergestellten) Formel eines dem Lanosterin wohl nahestehenden Triterpens, des in der Birkenrinde vorkommenden Betulins, *einen Verband von 19 Kohlenstoffatomen besonders hervorgehoben, der mit dem Ringsystem der männlichen Hormone strukturell übereinstimmt.*

Auch die weniger als 27 Kohlenstoffatome enthaltenden Steroide lassen sich von Cholesterin oder einem andern Sterin ableiten, indem man sich die lange Seitenkette des Sterins um eine bestimmte Anzahl von Kohlenstoffatomen verkürzt denkt. So enthalten die *Gallensäuren*, von denen unten die Desoxycholsäure als Beispiel angeführt ist, *24 Kohlenstoffatome*. Gleichviel Kohlenstoffatome enthalten auch die Steroide, die im herzwirksamen Bestandteil der *Meerzwiebel* (vgl. die Formel des Aglykons von Scillaren A) und in den *Krötengiften* vorkommen, während die herzwirksamen Verbindungen der *Digitalis*-Gruppe Steroide mit

23 Kohlenstoffatomen (vgl. die Formel des Digitoxigenins) aufweisen.

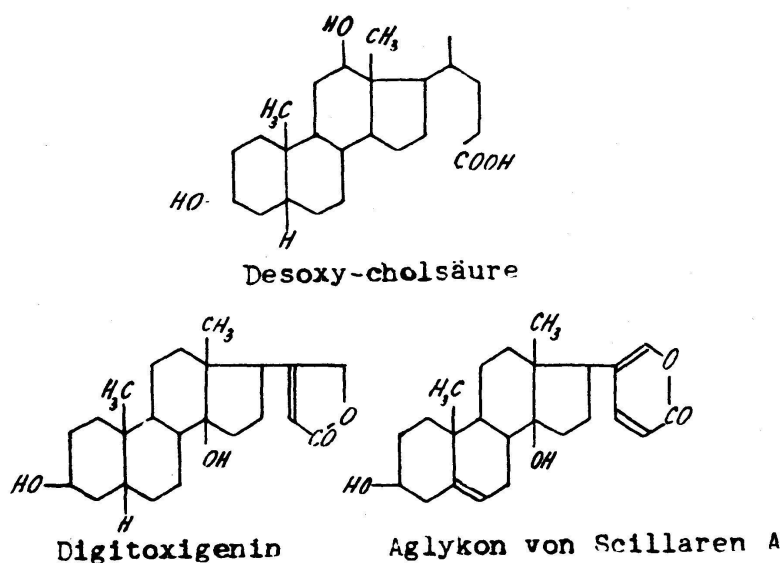


Fig. 4

Nur noch 2 Kohlenstoffatome der langen Seitenkette, also insgesamt 21 Kohlenstoffatome, enthalten die *Hormone der Nebennierenrinde* (vgl. Desoxy-corticosteron) und des *Gelbkörpers* (vgl. Progesteron). Bei den *männlichen Sexualhormonen*, die 19 Kohlenstoffatome aufweisen (vgl. die Formel des Testosterons und auf S. 67 die des Androsterons), fehlt die typische Seitenkette der Sterine vollständig; an deren Stelle findet sich eine Sauerstoffgruppe. Die *weiblichen Sexualhormone* (vgl. das Oestron) enthalten noch eine Methylgruppe weniger als die männlichen.

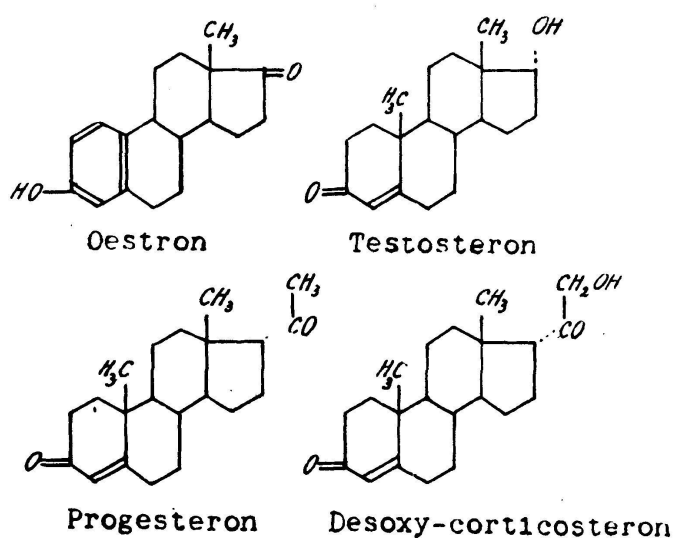


Fig. 5



### B. Gewinnung und Synthese der Steroide

Wir gehen jetzt an die Beantwortung der Frage, woher man die Steroide nimmt, die in der medizinischen Praxis Anwendung finden. Am einfachsten liegen die Verhältnisse beim Vitamin D<sub>3</sub> des Lebertrans, welcher als solcher verwendet wird. Das Vitamin D<sub>2</sub> wird durch UV-Bestrahlung des Ergosterins hergestellt, welches aus Hefe zugänglich ist. Die in den Pflanzen vorkommenden herzwirksamen Glukoside werden in Form von Extrakten oder in chemisch reinem Zustand verwendet.

| Hormon                            | Die Darstellung von 1 kg kristallisiertem Hormon würde erfordern  |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Oestradiol <sup>1</sup>           | 15—20 Milliarden Schweine                                         |
| Progesteron <sup>2</sup>          | 10—13 Millionen Schweine                                          |
| Adrenalin <sup>3</sup>            | 50 000 Rinder                                                     |
| Desoxy-corticosteron <sup>4</sup> | 2,5 Millionen Rinder                                              |
| Thyroxin <sup>5</sup>             | 700 000 Schafe                                                    |
| Testosteron <sup>6</sup>          | 12 Millionen Stiere                                               |
| Insulin <sup>7</sup>              | 160 000 Schweine                                                  |
| Oestron <sup>8</sup>              | 100 000 Liter Harn = Tagesproduktion von 10 000 trächtigen Stuten |
| Androsteron <sup>8</sup>          | 1 Million Liter Harn = Tagesproduktion von 700 000 Männern        |

<sup>1</sup> Aus Ovarien. <sup>2</sup> Aus Corpora lutea. <sup>3</sup> Aus Nebennierenmark.  
<sup>4</sup> Aus Nebennierenrinde. <sup>5</sup> Aus Schilddrüse. <sup>6</sup> Aus Testes. <sup>7</sup> Aus Pankreas. <sup>8</sup> Aus Harn.

Es ist von Interesse, die *Zugänglichkeit der Steroidhormone* mit der Zugänglichkeit anderer Hormone zu vergleichen. Die in relativ grosser Menge in den Drüsen produzierten Hormone können technisch durch Extraktion dieser Drüsen gewonnen werden. Ein Blick auf die beigegefügte Tabelle<sup>1</sup> zeigt, dass Adrenalin, Thyroxin und Insulin, die sich von Aminosäuren ableiten oder Eiweißstoffe vorstellen, relativ leichter zugänglich sind als die meisten Steroidhormone, die in den Drüsen (Follikel, Testes, Corpus luteum, Nebennierenrinde) in viel zu kleinen Mengen enthalten sind, um eine technische Reindarstellung zu erlauben. Für die Herstellung des Oestrone liegt allerdings im Harn trächtiger Stuten ein natürliches Ausgangsmaterial vor, in dem das Oestron in so reichlicher Menge

<sup>1</sup> Entnommen der Hormon-Sondernummer der « Ciba-Zeitschrift » vom Juni 1942.

vorkommt, dass es zu den am bequemsten zugänglichen Hormonen gehört. Das Oestradiol, dessen Herstellung aus Schweineovarien ausserordentlich mühsam ist, wird technisch durch partielle Hydrierung des Oestrans hergestellt. Dem Androsteron kommt keine besondere Bedeutung für medizinische Zwecke zu.

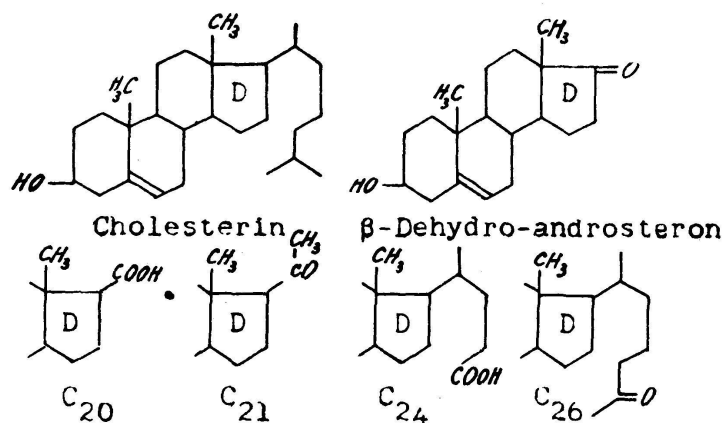


Fig. 6

Die anderen praktisch wichtigen Steroidhormone, das Testosteron, das Progesteron und das Desoxy-corticosteron werden technisch aus Abbauprodukten des Cholesterins bereitet. Cholesterin selbst ist gut zugänglich aus der Marksubstanz der Schlachttiere. Beim Oxydieren des Cholesterinazetats mit Chromsäure wird eine Anzahl von Abbauprodukten erhalten, die durch einen verschiedenen weitgehenden Abbau der langen Seitenkette charakterisiert sind. Es sind dies Verbindungen mit 19, 20, 21, 24 und 26 Kohlenstoffatomen, die hier angeführt sind.

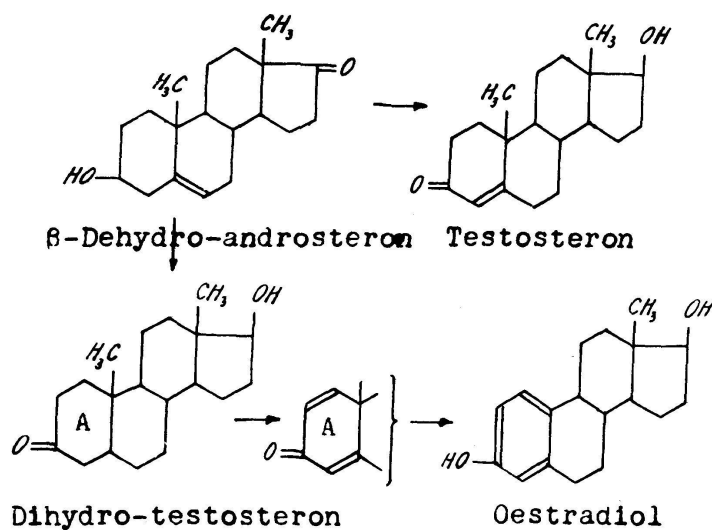


Fig. 7

Aus dem  $C_{19}$ -Keton ( $\beta$ -Dehydro-androsteron) lässt sich relativ leicht das Testosteron (RUZICKA und WETTSTEIN) bereiten. Aus Dihydro-testosteron konnte nach Einführung zweier Doppelbindungen das 19. Kohlenstoffatom durch Erhitzen auf höhere Temperatur entfernt und so Oestradiol gewonnen werden (INHOFFEN). Das so zugängliche Oestradiol ist jedoch mit dem aus Harn gewonnenen kommerziell nicht konkurrenzfähig.

Aus dem  $C_{19}$ -Keton kann durch Anlagerung von Blausäure und weitere Operationen Progesteron (BUTENANDT) hergestellt werden. Das Nebennierenrindenhormon Desoxy-corticosteron (REICHSTEIN) ist technisch aus der  $C_{20}$ -Säure zugänglich. Auch für das zweite wichtige Nebennierenrindenhormon, das Corticosteron, liegt eine wissenschaftlich bemerkenswerte Teilsynthese (REICHSTEIN) aus der Desoxycholsäure vor, die aber für praktische Zwecke zu umständlich ist. Ausgehend von einem Umwandlungsprodukt des Desoxy-corticosterons lässt sich auch die Seitenkette der digitaloiden Aglukone (RUZICKA und REICHSTEIN) einführen. Es ist damit ein Weg zur künstlichen Herstellung der natürlichen herzwirksamen Aglukone geöffnet, dem aber noch keine praktische Bedeutung zukommt.

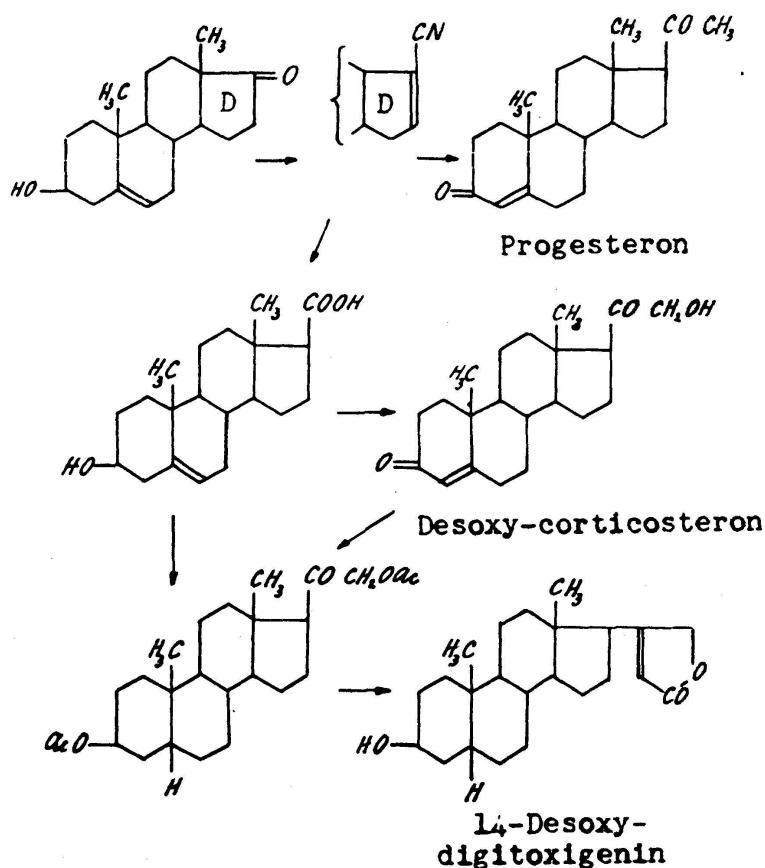


Fig. 8

Ein anderer Weg zur einfachen Gewinnung der Steroidhormone geht von gewissen pflanzlichen Sapogeninen (MARKER) aus. Als Beispiel eines brauchbaren Ausgangsmaterials sei hier das in verschiedenen mexikanischen Grasarten vorkommende Diosgenin erwähnt, das sich über mehrere Zwischenstufen in Progesteron umwandeln lässt.

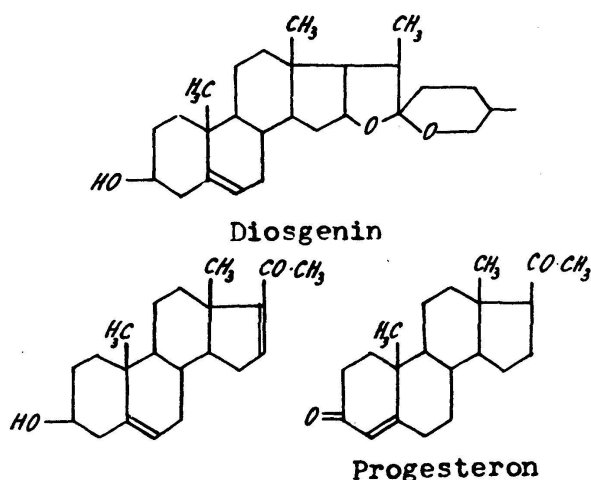


Fig. 9

Das weibliche Keimdrüsenhormon Equilenin, das einen Naphthalinring enthält, kann nach BACHMANN auf Grund einer langwierigen *Totalsynthese* hergestellt werden, der als der ersten Totalsynthese eines Steroids eine ausserordentlich hohe wissenschaftliche, aber keine technische Bedeutung zukommt. Als Ausgangsmaterial dient ein in der Farbenchemie verwendetes Naphthalinderivat, das in mehr als 20 Reaktionsstufen zu Equilenin führt :

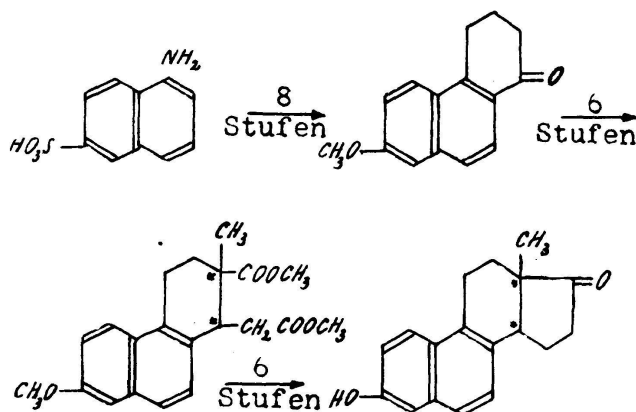


Fig. 10

*C. Chemische Konstitution und physiologische Wirkung  
der Steroide*

Nachdem wir so in kurzen Zügen den heutigen Stand der Systematik und der Gewinnung der natürlichen Steroide kennengelernt haben, wollen wir uns jetzt die Frage nach den Beziehungen zwischen chemischer Konstitution und physiologischer bzw. pharmakologischer Wirkung vorlegen. Man wird dabei zu beachten haben, inwieweit Änderungen, die an der Molekel natürlicher, physiologisch wirksamer Verbindungen, wie bei Hormonen, Vitaminen, herzwirksamen Verbindungen, angebracht werden, die physiologische Wirkung qualitativ und quantitativ beeinflussen. Es wird auch zu prüfen sein, ob man Verbindungen kennt, die keine Steroide sind, aber dennoch gleiche oder ähnliche Wirkungen zeigen wie die Naturprodukte.

Zum Vergleich der physiologischen Wirkung verschiedener chemischer Individuen benützt man Tierteste, d. h. man untersucht bei einer geeigneten Tierart unter bestimmten Bedingungen die Variationen einer meist eng umgrenzten physiologischen Erscheinung, die bei Einwirkung der zu untersuchenden Wirkstoffe eintreten. Es kann vorkommen, dass man bei der Heranziehung verschiedener Tierteste in einer und derselben Wirkstoffgruppe ausgeprägte quantitative Unterschiede der Wirkung einzelner Vertreter findet.

Da weitaus die meisten physiologischen Beobachtungen im Hormongebiet liegen, so möchten wir, um den Fluss dieser Betrachtungen nicht zu unterbrechen, die zwei relativ kleinen Gebiete der Vitamine D und der herzwirksamen Stoffe vorwegnehmen. Die zwei wichtigsten Vertreter der Vitamine D, denen allein praktische Bedeutung zukommt, sind das Vitamin D<sub>2</sub>, das bei der UV-Bestrahlung des Ergosterins entsteht, und das im Lebertran enthaltene Vitamin D<sub>3</sub>, das künstlich durch UV-Bestrahlung des ausgehend von Cholesterin zugänglichen Dehydro-cholesterins bereitet werden kann. Bei den zwei bekanntesten Tiertesten auf Vitamin-D-Wirkung zeigen die Vitamine D<sub>2</sub> und D<sub>3</sub> verschiedene Wirkungsstärke. Das Vitamin D<sub>2</sub> ist wirksamer im Rattentest, und das Vitamin D<sub>3</sub> zeigt wieder stärkere Wirkung bei Kücken.

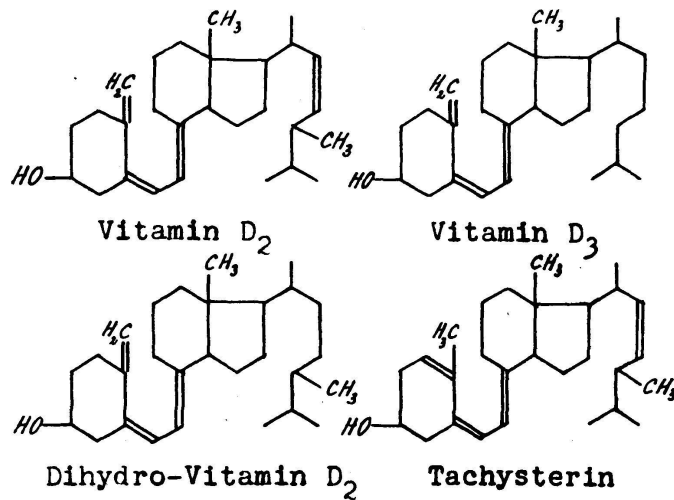


Fig. 11

Während der Unterschied in der Wirkungsstärke zwischen den Vitaminen D<sub>2</sub> und D<sub>3</sub> an sich nicht besonders gross ist, sinkt die Wirkung stark beim Dihydro-Vitamin D<sub>2</sub>, in welchem die Doppelbindung der Seitenkette abgesättigt ist. Die besondere Anordnung der 3 konjugierten Doppelbindungen ist für das Zustandekommen der Vitamin-D-Wirkung wichtig, denn Tachysterin — die Vorstufe des Vitamins D<sub>2</sub> — in welchem die eine der drei konjugierten Doppelbindungen eine andere Lage hat, ist physiologisch unwirksam.

Für die Gruppe der herzwirksamen Verbindungen ist die Anwesenheit der ungesättigten 5gliedrigen (bei der Digitalis-Untergruppe) oder 6gliedrigen (bei der Scilla-Untergruppe) Lacton-Gruppierung wesentlich. In der Digitalis-Untergruppe liegt ein deutlicher Unterschied in der Wirkungsart zwischen den eigentlichen Digitalis-Glykosiden und den Wirkstoffen des Strophantus vor; letztere zeigen eine rascher einsetzende und kürzere Wirkung.

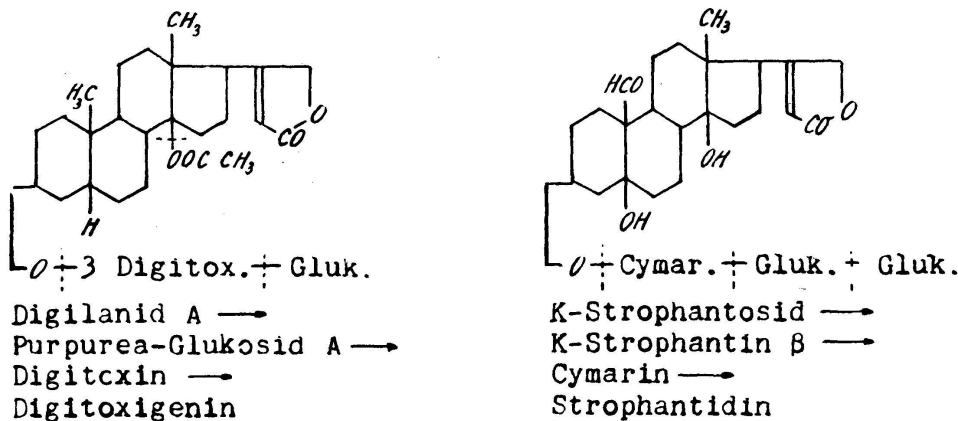


Fig. 12.



Wie weit die Wirkung der herzwirksamen Glykoside von den Einzelheiten der Konstitution und Konfiguration des Steroid-Anteils abhängt, lässt sich auf Grund des vorliegenden Beobachtungsmaterials nicht eindeutig entscheiden, da für die Wirkung auch die Konstitution und die Anzahl der Zucker massgebend ist, worauf besonders ARTHUR STOLL hingewiesen hat, dem die Isolierung nativer herzwirksamer Glykoside gelungen ist.

Das umfangreichste physiologische Beobachtungsmaterial unter allen Steroiden liegt bei den Sexualhormonen vor. Der typische chemische Unterschied zwischen den männlichen und weiblichen Keimdrüsenhormonen besteht im Bau des Ringes A des Steroidgerüsts. Bei den weiblichen Hormonen ist dieser Ring aromatisch und bei den männlichen Hormonen hydroaromatisch.

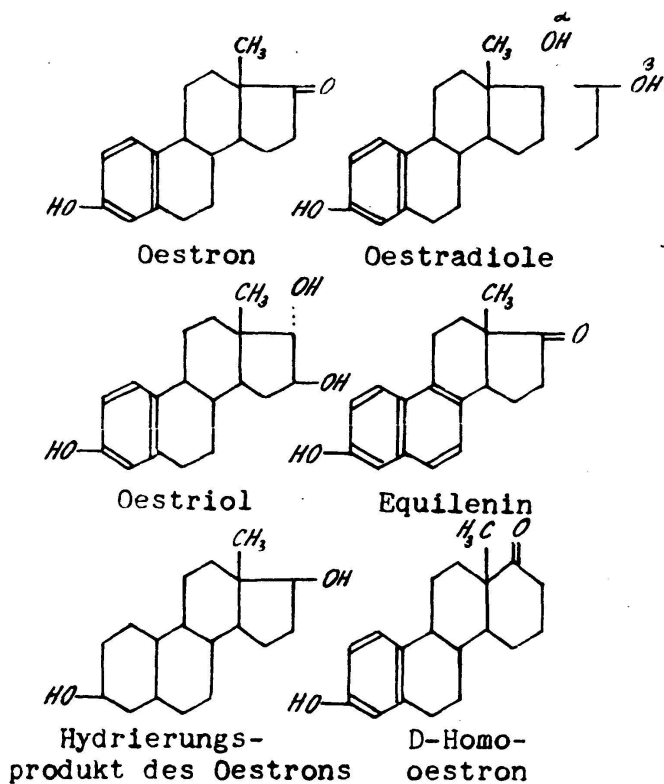


Fig. 13

Bei der vollständigen katalytischen Hydrierung des Oestrons entsteht ein Gemisch stereoisomerer Hydrierungsprodukte von männlichen Hormoneigenschaften. Wie wir schon erwähnten, ist auch die künstliche Überführung eines männlichen Hormons in ein weibliches gelungen. Das wirksamste weibliche Keimdrüsenhormon ist nicht das zuerst aus dem Urin isolierte Oestron, sondern das später in Schweineovarien nachgewiesene Oestradiol, welches

auch durch Reduktion des Oestrone erhalten werden kann. Bei letzterer Operation entstehen 2 in der Stellung 17 stereoisomere Diöle, von denen das mit  $\alpha$  bezeichnete 2mal wirksamer ist als Oestron, während das  $\beta$ -Isomere eine geringere Wirkung zeigt. Die Einführung einer weiteren Hydroxylgruppe führt beim Beispiel des gleichfalls im Harn vorkommenden Oestriols zu starkem Wirkungsabfall. Ebenso deutlich ist der Wirkungsabfall beim Übergang zum Equilenin, das im Stutenharn nachgewiesen wurde und bei welchem die beiden ersten Ringe des Steroidgerüsts aromatisch sind. Auch bei Erweiterung des 5-Ringes des Oestrone zu einem 6-Ring (vgl. D-Homo-oestron) geht die physiologische Wirkung zurück.

Durch den Vergleich der Wirkung verschiedener Oestran-derivate, die teils in der Natur vorkommen, teils künstlich hergestellt werden können, lassen sich gewisse Gesetzmässigkeiten über die Abhängigkeit der physiologischen Wirkung von der chemischen Konstitution erkennen. Man macht dabei die Beobachtung, wie auch bei anderen physiologisch wirksamen chemischen Verbindungsgruppen, dass kleine Änderungen in der Konstitution zu grossen Unterschieden in der Wirkung führen können. Man war daher sehr überrascht, als es nach und nach gelang, eine ganze Anzahl chemischer Verbindungen aufzufinden, die kein Steroidgerüst enthalten, aber doch die typischen Eigenschaften der weiblichen Keimdrüsenhormone aufweisen, ja das wirksamste Oestran-derivat in der Wirkung sogar übertreffen.

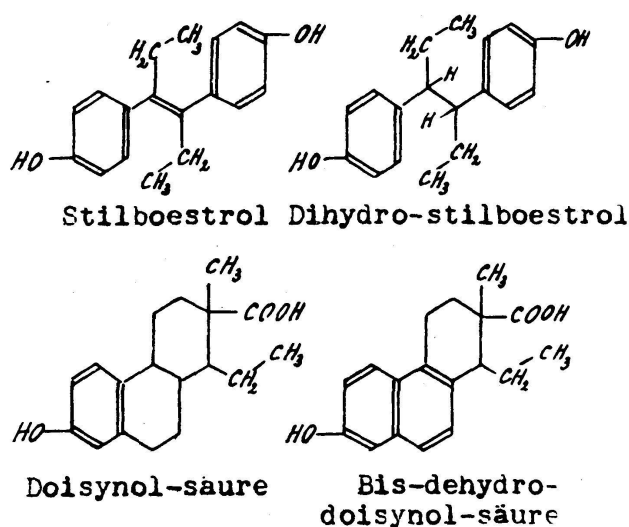


Fig. 14

Es sind bei diesen Kunstprodukten zwei verschiedene Höhepunkte der Wirkung bekannt geworden. Der eine liegt bei dem von DODDS aufgefundenen Stilboestrol und der andere bei den von MIESCHER untersuchten, durch hydrolytische Aufspaltung des 5-Ringes aus Oestron und Equilenin zugänglichen Säuren: der Doisyolsäure und der Bisdehydro-doisyolsäure. Es ist hervorzuheben, dass bei Stilboestrol nur der trans-Form die hohe physiologische Wirkung zukommt. Die entsprechende cis-Form, bei der die beiden Benzolringe auf der gleichen Seite der Äthylenbindung liegen, ist viel weniger wirksam.

Die Übereinstimmung in allen Nuancen der physiologischen Wirkungen beim  $\alpha$ -Oestradiol und Stilboestrol hat vor wenigen Jahren die American Medical Association veranlasst, das billige Stilboestrol als Ersatz für das relativ teure  $\alpha$ -Oestradiol in der medizinischen Praxis frei zu geben.

Die Erscheinung, dass chemisch grundverschiedene Verbindungen die gleiche physiologische Wirkung zeigen, wurde schon oft beobachtet, aber nie als derart überraschend empfunden wie bei den eine so eigenartige Wirkung zeigenden weiblichen Sexualhormonen.

Im Falle der männlichen Keimdrüsenhormone sind bisher Wirkstoffe ausserhalb der Steroidklasse nicht bekannt geworden. Das wirksamste der männlichen Hormone ist das zuerst in Stier- und kürzlich auch in Pferdetestes nachgewiesene Testosteron. Auch hier wurde die gleiche Beobachtung gemacht wie bei  $\alpha$ - und  $\beta$ -Oestradiol, wonach das eine Stereoisomere ( $\alpha$ ), und zwar gerade das in der Natur vorkommende, wesentlich wirksamer ist als das andere. Die im Urin enthaltenen zwei männlichen Hormone, Androsteron und  $\beta$ -Dehydro-androsteron, sind weniger wirksam als Testosteron. Es zeigte sich allgemein, dass die Anwesenheit der Ketogruppe in der Stellung 3 für die Wirkungsstärke wichtiger ist als die benachbarte Doppelbindung. So ist das Dihydro-testosteron ungefähr gleich wirksam wie Testosteron selbst. Bei den epimeren Paaren der 3-Oxyderivate ist immer das eine (das  $\alpha$ -Isomere) wesentlich wirksamer als das andere ( $\beta$ ). So ist das Androsteron wirksamer als sein in der Stellung 3 Epimeres. Von noch grösserer Bedeutung ist die Konfiguration am Kohlenstoffatom 5. Das an dieser Stelle mit Androsteron epimere Steroid zeigt überhaupt keine männliche Hormonwirkung. Im Methyl-

testosteron und im D-Homo-testosteron liegen zwei künstlich hergestellte Homologe des Testosterons vor, die in ihrer Wirkung dem Testosteron nahekommen. Besonders das Methyltestosteron besitzt praktische Bedeutung, da es im Gegensatz zum Testosteron auch per os wirksam und seine Anwendung darnach einfacher ist.

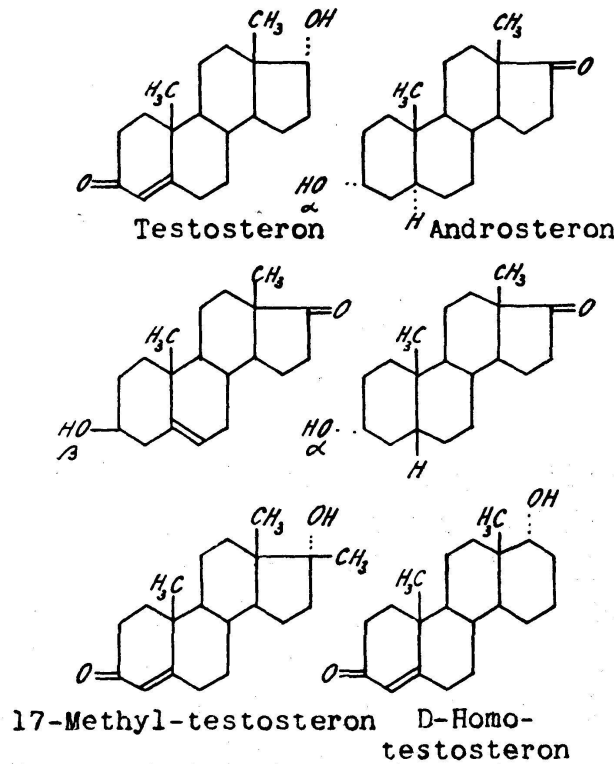


Fig. 15

Während die männlichen und weiblichen Keimdrüsenhormone bekanntlich für die Entwicklung und die Erhaltung der typischen weiblichen und männlichen Eigenschaften verantwortlich sind, liegt im Gelbkörperhormon Progesteron ein weiteres weibliches Hormon vor, dem eine relativ begrenzte, aber wichtige Aufgabe zukommt, nämlich Erhaltung der einmal eingeleiteten Schwangerschaft.

Die gleichen chemischen Änderungen, wie Hydrierung der Doppelbindung (zu Dihydro-progesteron) oder der Ketogruppe, die bei Testosteron ohne wesentlichen Einfluss auf die Hormonwirksamkeit sind, führen bei Progesteron zum vollständigen Verlust der Wirksamkeit. Es war daher einigermassen überraschend, dass im Pregneninolon (Anhydro-oxy-progesteron) eine Verbin-

dung gefunden werden konnte, die deutliche Progesteronwirkung zeigt und im Gegensatz zum Progesteron selbst auch per os wirksam ist.

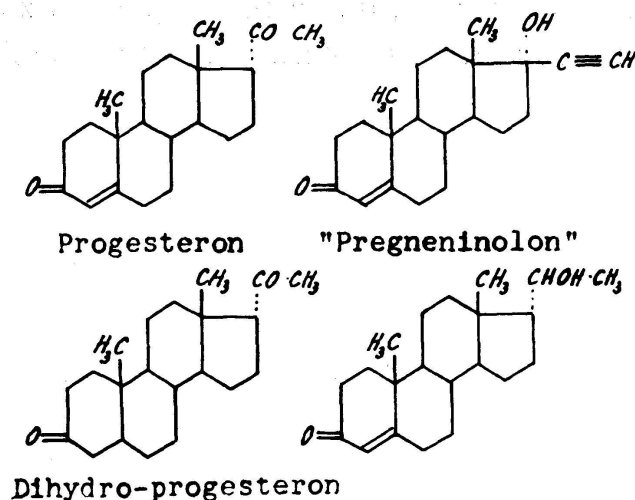


Fig. 16

Zu den Steroiden gehört noch eine weitere Hormongruppe, die Nebennierenrindenhormone (Cortin-Gruppe), die nicht geschlechtsspezifisch sind. Die Nebennierenrinde produziert mindestens 5 verschiedene Hormone, von denen 3 hier angeführt sind. Diese Hormone sind lebenswichtig, denn ihre Abwesenheit führt zum baldigen Tod des Individuums. Sie regulieren u. a. den Kohlehydrat- und den Salz-Stoffwechsel. Bei den Hormonen der Cortinreihe sind die Doppelbindung und die Ketogruppen von ähnlicher Bedeutung wie beim Progesteron. Auch hier führt die Hydrierung dieser Gruppen zum Verlust der Wirkung.

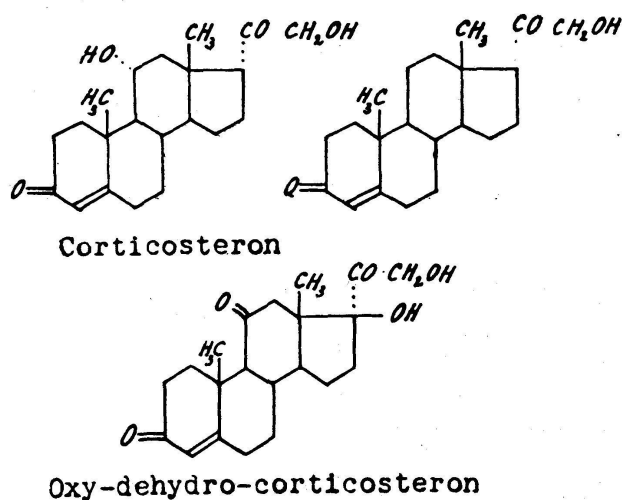


Fig. 17

Für die bessere Ausnützung der kostbaren Steroidhormone war die Beobachtung wichtig, dass die meisten von ihnen in veresterter Form eine länger anhaltende und manchmal auch stärkere Wirkung ausüben.

Eine besondere Methode der Hormonzuführung, welche vielleicht der natürlichen Hormonproduktion in der Drüse näherkommt, beruht darauf, dass man Hormondepots in fester Form unter die Haut bringt und so eine künstliche Hormondrüse anlegt.

#### *D. Systematik der physiologischen Wirkung der Steroidhormone*

Bevor wir zur Diskussion weiterer Einzelheiten der Hormonwirkung übergehen, möchten wir die von SELYE vorgeschlagene Nomenklatur der einzelnen Wirkungsarten einführen. Nach den Hormondrüsen, in welchen die steroiden Hormone entstehen, werden die typischen 4 Wirkungsarten als die follikuloide, testoid, luteoide und corticoide bezeichnet. Für jede dieser Wirkungsarten ist eine grössere Anzahl von besonderen Einzelercheinungen im Organismus charakteristisch. Es wurde die auffallende Feststellung gemacht, dass die Vertreter der testoiden, luteoiden und corticoiden Gruppe eine deutliche, wenn auch z. T. nur geringe follikuloide Wirkung zeigen, während den follikuloiden Wirkstoffen keine andere Hormonwirkung zukommt. Die testoiden, luteoiden und corticoiden Wirkstoffe zeigen dagegen ausser der follikuloiden Wirkung noch eine oder sogar beide der zwei übrigen Hormonwirkungen.

| folliculoid          | testoid     | luteoid              | corticoid            | anästhetisch         |
|----------------------|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Oestradiol           | Testosteron | Progesteron          | Desoxy-corticosteron | Pregnandion          |
| Testosteron          | Progesteron | Desoxy-corticosteron | Progesteron          | Desoxy-corticosteron |
| Progesteron          |             | Testosteron          | Testosteron          | Progesteron          |
| Desoxy-corticosteron |             |                      |                      | Testosteron          |
|                      |             |                      |                      | Oestradiol           |



Anschaulich werden diese Verhältnisse in einer von SELYE angegebenen Tabelle, in welcher ausser den 4 Hormonwirkungen noch die anästhetische Wirkung mitberücksichtigt wird. SELYE selbst hat die Beobachtung gemacht, dass die Vertreter der 4 Hormongruppen sowie auch manche andere hormonal unwirksame Steroide eine anästhetische Wirkung ausüben, die am deutlichsten beim Pregnandion (Dihydro-progesteron, Formel vgl. oben) ausgeprägt ist, dem selbst überhaupt keine Hormonwirkung zukommt. In der ersten horizontalen Reihe der Tabelle sind die wirksamsten Träger der 5 Wirkungsarten in der Reihenfolge ihrer abnehmenden follikuloiden Wirkung angeordnet. In jeder vertikalen Kolonne sind in der Reihenfolge der abnehmenden Wirkung dieselben 5 Wirkstoffe (oder nur einige derselben) aufgeführt. In der 5. Kolonne ist die Reihenfolge der Wirkstoffe umgekehrt als in der ersten.

Zwischen den follikuloiden Wirkstoffen einerseits und den testoiden und corticoiden anderseits besteht noch ein weiterer Unterschied. Während die genauer untersuchten follikuloiden Wirkstoffe (einschliesslich des Stilboestrols) die Einzelercheinungen der follikuloiden Wirkung gleichmässig zeigen, ist dies bei den testoiden und corticoiden Wirkstoffen nicht der Fall. Beispielsweise sei hervorgehoben, dass Testosteron eine besonders ausgeprägte Wirkung auf die Vesikulardrüsen zeigt; Androsteron ist dagegen relativ wirksamer auf die Prostata und auf den Hahnenkamm. In der Reihe der Cortinhormone treten ähnliche Erscheinungen auf: das Corticosteron ist besonders wirksam in der Aufrechterhaltung des Kohlehydratstoffwechsels, während Desoxycorticosteron relativ wirksamer ist in der Aufrechterhaltung des normalen Salzstoffwechsels.

Die Steroidhormone zeigen aber ausser den typischen Hormoneigenschaften auch noch Wirkungen auf viele andere Organe und beeinflussen gewisse physiologische Vorgänge im Organismus. Es sind bisher bei den untersuchten Vertretern der 4 Hormongruppen mindestens 60 verschiedene physiologische Erscheinungen beobachtet worden, die den weiblichen oder männlichen Geschlechts-trakt sowie andere geschlechtliche Merkmale betreffen und ausserdem mindestens 60 nichtgeschlechtliche Wirkungsarten. Das umfangreiche Versuchsmaterial ist in folgender Tabelle zusammengestellt.

| Hormone      | Gewicht von Organen |    | Andere Wirkungen |    | Insgesamt |    |
|--------------|---------------------|----|------------------|----|-----------|----|
|              | +                   | —  | +                | —  | +         | —  |
| Follikuloide | 22                  | 18 | 10               | 5  | 32        | 23 |
| Testoide     | 28                  | 9  | 5                | 2  | 33        | 11 |
| Luteoide     | 6                   | 1  | 4                | 2  | 10        | 3  |
| Corticoide   | 5                   | 3  | 6                | 2  | 11        | 5  |
| Insgesamt    | 61                  | 31 | 25               | 11 | 86        | 42 |

Darin sind die beobachteten Wirkungen in zwei Gruppen unterteilt, einmal Gewichtsveränderungen verschiedener Organe, und zwar sowohl von Geschlechtsorganen wie von anderen Organen, und in einer 2. Gruppe sind andere Wirkungsarten, wie Änderung der Konzentration physiologisch wichtiger Verbindungen und anderer physiologischer Erscheinungen im Organismus zusammengekommen. In jeder Gruppe sind die beobachteten stimulierenden und depressiven Wirkungen getrennt registriert, also die Zunahme oder Abnahme des Gewichtes der betreffenden Organe bzw. von Konzentrationen, sowie Beeinflussung physiologischer Erscheinungen in positivem oder negativem Sinne. Man kann so im Durchschnitt doppelt so viele stimulierende wie depressive Wirkungen feststellen. Die Tabelle bildet einen zahlenmässigen Beleg für die immer wiederkehrende Behauptung, dass insbesondere Sexualhormone in mannigfaltiger Beziehung im Organismus eine anregende Wirkung ausüben. Es ist kaum ein wichtiges Organ im menschlichen und tierischen Organismus bekannt, das durch irgendein Steroidhormon nicht beeinflusst würde.

#### *E. Die Begriffe weiblich und männlich bei den Sexualhormonen*

Unter den vielfältigen physiologischen Wirkungen der Steroidhormone ist u. a. besonders die follikuloide Wirkung mancher männlicher Hormone überraschend. Die typischen follikuloiden Hormone wie Oestron, Oestradiol und Stilboestrol wirken auch auf den männlichen Geschlechtstrakt, aber nur antitestoid, während männliche Hormone auf den weiblichen Geschlechtstrakt nicht nur antifollikuloide, sondern auch typisch follikuloide Wirkungen ausüben. Diese an sich unerwartete Erscheinung findet

sich besonders ausgeprägt beim Androstendiol<sup>1</sup>, das man geradezu als bisexuelles Hormon bezeichnen kann. Die natürliche Zwitterbildung wird jedoch nicht durch bisexuelle Hormone bedingt, sondern durch eine Störung im Hormonstoffwechsel, d. h. eine Verschiebung im Mengenverhältnis zwischen weiblichem und männlichem Hormon im Organismus. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass bei der künstlichen Zuführung männlicher oder weiblicher Hormone in einen in Entwicklung sich befindenden Embryo selbstverständlich keine prinzipielle Abweichung von der vorhandenen Geschlechtsanlage erzielt werden kann, wohl dagegen eine beträchtliche Zwitterbildung.

Die antifollikuloide Wirkung männlicher Hormone findet auch in der gynäkologischen Praxis Verwendung. Die sogenannte paradoxe Behandlung mit Testosteron erwies sich besonders bei der Eindämmung von Blutungen, die infolge Störungen im Ovarium auftreten, erfolgreich.

Man hat anfangs in den männlichen Organismen nach männlichen Hormonen geforscht und sie auch gefunden, sowohl im Harn wie in der Gonade. Im weiblichen Organismus wurden die weiblichen Hormone gesucht und gefunden. Es stellte sich aber bei der Anwendung gleicher Untersuchungsmethoden auf beide Geschlechter heraus, dass sowohl im weiblichen wie im männlichen Harn Träger beider Hormonwirkungen vorkommen. In der männlichen Gonade konnten neben den testoiden auch follikuloide Wirkstoffe physiologisch nachgewiesen und chemisch isoliert werden. Nur in der weiblichen Gonade ist der Nachweis eines testoiden Wirkstoffes nicht gelungen. Das Vorkommen testoider Wirkstoffe im weiblichen Harn kann daher wohl nicht auf die Tätigkeit der Gonade zurückgeführt werden. Einen noch deutlicheren Hinweis darauf, dass die im Harn normaler Individuen vorkommenden Sexualhormone nicht unbedingt aus den Gonaden stammen müssen, bietet die Tatsache, dass auch im Harn kastrierter weiblicher und männlicher Individuen sowohl männliche wie weibliche Wirkstoffe angetroffen werden, und zwar annähernd in der gleichen Grössenordnung wie bei normalen Individuen.

---

<sup>1</sup> Vgl. unten in der nächsten Formelgruppe.

### *F. Genese der Steroide*

Aus weiteren Untersuchungen folgt mit grosser Wahrscheinlichkeit, dass die im Harn vorkommenden Wirkstoffe zum grössten Teil ihren Ursprung in der Tätigkeit der Nebennierenrinde haben. Es ist besonders REICHSTEIN in vorbildlichen Untersuchungen gelungen, aus der Nebennierenrinde über zwei Dutzend Steroide zu isolieren. Neben den typischen Cortinhormonen und Steroiden ohne Hormonwirkung sind in der Nebennierenrinde auch testoide, follikuloide und luteoide Hormone anwesend. Es ist anzunehmen, dass die in der Nebennierenrinde produzierten Steroide entweder als solche oder aber nach weiteren Umwandlungen im Harn abgeschieden werden. Es steht fest, dass die Nebennierenrinde der hauptsächlichste Ort der Bildung von Steroiden der  $C_{19}$ - und  $C_{21}$ -Reihe im Organismus ist.

Über den Mechanismus der biologischen Entstehung der Steroide wurden verschiedene Hypothesen aufgestellt. Die ältere, angeregt durch die künstliche Bereitung der Steroidhormone aus Oxydationsprodukten des Cholesterins nahm an, dass auch im Organismus ein ähnlicher Weg beschritten wird und durch Umwandlung des Cholesterins die Steroidhormone gebildet werden. SCHOENHEIMER und RITTENBERG haben aber bei Mäusen, denen ständig Deuteriumoxyd einverleibt wurde, die Entstehung eines stark deuteriumhaltigen Cholesterins festgestellt. Darnach folgt eindeutig, dass Cholesterin im Organismus aus kleinen Bausteinen aufgebaut wird. Man kann dieses Resultat nach REICHSTEIN auf die Entstehung aller Steroide übertragen und annehmen, dass die Bildung des Cholesterins, der Gallensäuren und anderer Steroide unabhängig voneinander vor sich geht und dass im Gegensatz zur älteren Anschauung die höhermolekularen Steroide vielleicht aus den niedrigeren durch Aufbau entstehen.

Über die Mannigfaltigkeit der aus dem menschlichen und tierischen Organismus isolierten Steroide gibt eine tabellarische Zusammenstellung Auskunft. In dieser Tabelle ist die Anzahl der aus der männlichen und weiblichen Gonade sowie aus männlichem und weiblichem Harn und der Nebenniere isolierten Verbindungen getrennt angeordnet nach der Kohlenstoffzahl. Weitaus die meisten dieser Steroide enthalten 21 Kohlenstoffatome. Die Anzahl von 83 einzelnen einheitlichen chemischen Verbindungen muss noch

vermehrt werden um die Anzahl der Gallensäuren, so dass man zur Zahl von mehr als 90 verschiedenen, im menschlichen und tierischen Organismus nachgewiesenen Steroiden kommt.

| Steroide                                                     | Gonade   |          | Nebenniere | Harn     |          | Insgesamt |
|--------------------------------------------------------------|----------|----------|------------|----------|----------|-----------|
|                                                              | männlich | weiblich |            | männlich | weiblich |           |
| C <sub>18</sub>                                              | 2        | 3        | 1          | 13       | 1        | 13        |
| C <sub>19</sub>                                              | 3        | —        | 3          | 7        | 6        | 15        |
| C <sub>21</sub>                                              | 3        | 2        | 24         | 19       | 5        | 50        |
| C <sub>27</sub>                                              | 5        | 1        | 1          | 1        | 1        | 5         |
| Insgesamt                                                    | 13       | 6        | 29         | 40       | 13       | 83        |
| Insgesamt aus tierischen Organen und Harn $\sim$ 90 Steroide |          |          |            |          |          |           |

### *G. Mannigfaltigkeit der physiologischen Wirkung bei Pregnanderivaten*

Die Pregnanderivate fallen nicht nur durch ihr häufiges Vorkommen auf, sondern auch durch ihre mannigfaltigen physiologischen Wirkungen. Neben der schon erwähnten, anästhetischen Wirkung des Pregnandions sind noch zwei andere, gleichfalls nicht geschlechtliche Wirkungen von Pregnanderivaten hervorzuheben. Es handelt sich um die von LIPSCHÜTZ beobachtete antifibromatogenetische Wirkung des Progesterons, die übrigens auch bei einigen andern 3-Ketosteroiden angetroffen wird, und ferner um die von SELYE beobachtete spermatogenetische Wirkung des Pregnenolons und einiger anderer Steroide. Die antifibromatogenetische Wirkung besteht darin, dass die Entstehung fibroider Geschwulste, die sonst bei Meerschweinchen infolge langdauernder Einwirkung von Follikuloiden im Unterleib gebildet werden, durch die Anwesenheit des Progesterons verhindert wird. Über die in der Literatur wiederholt beschriebene anticancerogene Wirkung gewisser Sexualhormone, z. B. des Stilboestrols bei Prostatakrebs, ist noch kein abschliessendes Urteil möglich. Die spermatogenetische Wirkung äussert sich darin, dass Pregnenolon die Schädigung der Spermatogenese, die durch Follikuloide oder Hypophysektomie bewirkt werden kann, verhindert. Pregnenolon ist also trotz seiner, wenn auch geringen follikuloiden Wirksamkeit in dieser Hinsicht ein Antagonist der eigentlichen follikuloiden Hormone. Erwähnenswert ist

noch, dass Pregnenolon, wenn auch in geringem Umfang, alle vier Hormonwirkungen aufweist wie auch eine anästhetische Wirkung zeigt. Neuerdings wurde in den Forschungsinstituten der USA-Luftwaffe festgestellt, dass Pregnenolon, als sonst unschädliches Mittel, gegen die Ermüdungserscheinungen wirkt, die bei intensiver Beanspruchung des Organismus eintreten. Diese Wirkung ist als eine recht spezifische zu betrachten, da sie durch Cortinhormone und Progesteron nicht erzielt werden konnte.

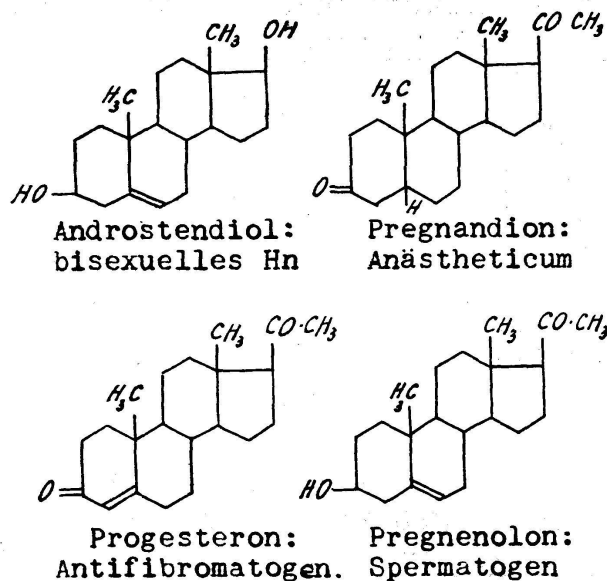


Fig. 18

#### H. Isolierung neuer Steroide aus Testes — Ausblick

Es ist daher von besonderem Interesse, dass es PRELOG gelungen ist, aus Schweinetestes Pregnenolon zu isolieren, dessen Vorkommen in der Natur früher unbekannt war.

Die weitere Entwicklung der physiologischen Chemie der Steroide dürfte noch zu manchen neuen und unerwarteten Ergebnissen führen. Es wird vor allem nötig sein, bei den schon bekannten Steroiden neue Wirkungen zu suchen. Weiter wird es erwünscht sein, die im Laufe der letzten 15 Jahre analysierten Organextrakte einer nochmaligen Bearbeitung zu unterziehen.

Dabei ist zu erwarten, dass mit Hilfe der immer weiter verfeinerten Methodik früher übersehene Steroide aufgefunden werden können. Eine Aufmunterung, in dieser Richtung weiterzufahren, bildet nicht nur die schon erwähnte Isolierung des Pregnenolons in den Testes, sondern die PRELOG im gleichen Ausgangsmaterial kürzlich gelungene Isolierung eines physiologisch interessanten



Geruchträgers, des  $\alpha$ -Androstenols, dem ein ausgeprägter Moschusgeruch eigen ist. Diese Beobachtung führte zur künstlichen Herstellung des Androstenons, das einen ganz eigenartigen, sehr intensiven Geruch aufweist, den man vielleicht als eine Art « Harngeruch » bezeichnen könnte. Der Moschusgeruch beim Androstenol legt den Vergleich mit dem natürlichen Moschusriechstoff Zibeton nahe. Wenn man im Androstenol die 3 Brückenbindungen des Androstangerüsts entfernt, so bleibt ein di-methylierter 17-Ring übrig, in welchem die Doppelbindung und das Sauerstoffatom die gleiche Position einnehmen wie beim Zibeton.

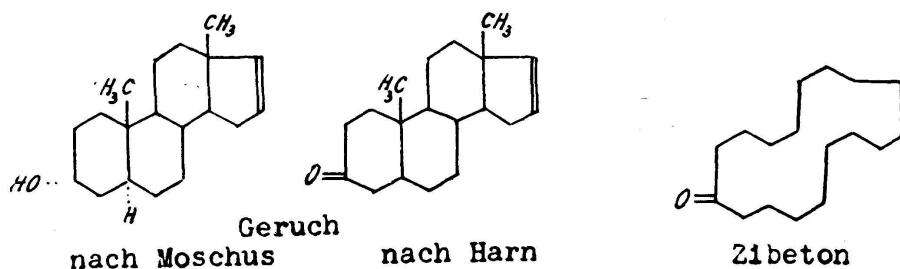


Fig. 19

Zum Schlusse sei noch auf eine andere aussichtsreiche Arbeitsrichtung auf dem Steroidgebiete hingewiesen. In einem bekannten Lehrbuch der chemischen Physiologie steht folgender Satz : « Die aus den Harnen und Hoden verschiedener Tierarten gewonnenen Hormone sind in ihrer Konstitution und ihrer Wirkung identisch, also artunspezifisch » (LEHNARTZ). Als dieser Satz geschrieben wurde, war Testosteron lediglich aus Stiertestes isoliert; vor kurzem kam noch die Isolierung aus Pferdetestes dazu. Es stellte sich ferner heraus, dass die Testesextrakte verschiedener Tierarten in ihrer Zusammensetzung voneinander recht beträchtlich abweichen können.

Es werden also noch viele Tierarten in die Untersuchung einbezogen werden müssen, bevor so allgemein lautende Sätze wie der zitierte berechtigt oder abzuändern sein werden. Wenn auch die Natur beim Aufbau ihrer Wirkstoffe ein gewisses Ökonomieprinzip befolgt, d. h. auf einem chemisch eng umgrenzten Gebiet durch geringe Variationen mannigfaltige physiologische Wirkungen zu erzielen pflegt, so liegt gerade darin ein typischer Zug im Chemismus der Natur, die vielleicht doch in verschiedenen Tierarten chemisch verschiedene, aber physiologisch gleichartig wirkende Hormone produzieren könnte.

# L'hypothèse de l'atome primitif

par

M. le chanoine G. LEMAITRE, professeur à l'Université de Louvain

## *Introduction*

L'hypothèse de l'atome primitif est une hypothèse cosmogonique suivant laquelle le monde actuel a résulté de la désintégration radio-active d'un atome.

J'ai été amené à formuler cette hypothèse, il y a une quinzaine d'années, en me laissant guider par des considérations thermodynamiques qui cherchaient à interpréter la loi de la dégradation de l'énergie dans le cadre des théories quantiques. Depuis lors, la découverte de l'universalité de la radio-activité, montrée par les désintégrations artificiellement provoquées, ainsi que l'établissement de la nature corpusculaire des rayons cosmiques, manifestée par l'action qu'exerce sur ceux-ci le champ magnétique terrestre, ont rendu plus plausible une hypothèse qui assignait une origine radio-active à ces rayons ainsi qu'à toute la matière existante.

Je pense donc que le moment est venu de présenter la théorie sous forme déductive. Je vous montrerai d'abord comment elle échappe aisément à quelques grosses objections qui tendraient à la faire écarter d'emblée. Je m'efforcerai ensuite d'en déduire les conséquences avec assez de détails pour pouvoir montrer qu'elle rend compte, non seulement des rayons cosmiques, mais encore de la structure actuelle de l'univers, formé d'étoiles et de nuées gazeuses organisées en nébuleuses elliptiques ou spirales, qui sont groupées parfois en grands amas de quelques centaines de nébuleuses, mais qui le plus souvent sont constituées de nébuleuses isolées, qui se séparent les unes des autres, suivant le mécanisme connu sous le nom d'expansion de l'univers.

Il est indispensable, pour l'exposé de mon sujet, que je vous rappelle quelques notions géométriques élémentaires, telle que celle de l'espace fermé de Riemann, qui a conduit à celle de l'espace de rayon variable, ainsi que certains aspects de la théorie de la relativité, particulièrement l'introduction de la constante cosmologique et de la répulsion cosmique qui en est la conséquence.

### *L'espace fermé*

Tout espace partiel est un espace ouvert; il est compris à l'intérieur d'une surface, sa frontière, au delà de laquelle il y a une région extérieure. L'habitude que nous avons de telles régions ouvertes nous incite à penser qu'il en est nécessairement ainsi, quelque grandes que soient les régions considérées. C'est à RIEMANN que l'on doit d'avoir montré que l'espace total peut être fermé. Pour expliquer cette notion d'espace fermé, le plus simple est d'en faire une représentation en petit dans un espace ouvert. Imaginons dans un tel espace une sphère, à l'intérieur de laquelle nous allons représenter tout l'espace fermé. Sur la surface de la sphère, chaque point de l'espace fermé sera supposé représenté deux fois, en deux points A et A', qui seront, par exemple, deux points antipodes, c'est-à-dire deux extrémités d'un même diamètre. Si nous joignons ces deux points A et A' par une ligne située à l'intérieur de la sphère, cette ligne doit être considérée comme une ligne fermée, puisque les deux extrémités A et A' sont deux représentations distinctes d'un seul et même point. La situation est tout à fait analogue à ce qui se passe pour la planisphère de Mercator, où les points du 180<sup>me</sup> méridien sont représentés deux fois au bord est et au bord ouest de la carte. On peut donc circuler indéfiniment dans l'espace sans jamais être amené à en sortir.

Il importe de remarquer que les points représentés par la surface de la sphère, à l'intérieur de laquelle nous avons représenté tout l'espace, ne se distinguent par aucune propriété des autres points de l'espace, pas plus que le 180<sup>me</sup> méridien pour la carte géographique. Pour nous en rendre compte, imaginons que nous déplacions la sphère, de telle façon que le point A vienne en B et le point antipode A' vienne en B'. Nous supposons alors que tout le segment AB et tout le segment A'B' sont deux représentations d'un même segment de l'espace fermé. Nous aurons donc une

partie de l'espace qui était déjà représenté à l'intérieur de la sphère initiale qui est maintenant représenté une seconde fois à l'extérieur de celle-ci. Supprimons, comme inutile, la représentation intérieure, il nous restera une représentation complète de l'espace à l'intérieur de la nouvelle sphère. Dans cette représentation, les contours fermés se souderont en un point qui est représenté deux fois, à savoir par les points B et B' mentionnés plus haut, au lieu de se souder comme précédemment aux points A et A'. Ceux-ci ne se distinguent donc par aucune propriété essentielle.

Remarquons que, lorsque nous modifions la sphère extérieure, il peut se faire qu'un contour fermé qui coupait la première sphère ne coupe plus la seconde ou, plus généralement, qu'un contour ne coupe plus la sphère limite en un même nombre de points. Il est pourtant évident que le nombre de points d'intersections ne peut varier que d'un nombre pair. Il y a donc deux sortes de contours fermés qui ne peuvent être déformés l'un dans l'autre par une déformation continue. Les premiers peuvent être réduits à un point, ils ne coupent pas la sphère extérieure ou la coupent en un nombre pair de points; les autres ne peuvent être réduits à un point, nous les appellerons les contours impairs, puisqu'ils coupent la sphère en un nombre impair de points.

Si, dans un espace fermé, nous nous éloignons d'une surface que nous pouvons supposer horizontale, en partant vers le haut, nous pourrons, en parcourant un contour impair, revenir à notre point de départ par la direction opposée, sans avoir dévié ni à droite ni à gauche, ni en avant ou derrière, sans avoir traversé le plan horizontal passant par le point de départ.

### *L'espace elliptique*

Voilà l'essentiel de la topologie de l'espace fermé. Il est possible de compléter ces notions topologiques en y introduisant, comme dans une carte géographique, des échelles variant d'un point à l'autre et d'une direction à l'autre. On peut faire cela de telle façon que tous les points de l'espace et toutes les directions y soient parfaitement équivalentes. On obtient alors l'espace homogène de RIEMANN, ou espace elliptique. La ligne droite est

un contour impair de longueur minimum. Deux points quelconques la divisent en deux segments dont la somme a une longueur, la même pour toute droite, et appelée le tour de l'espace.

Tous les espaces elliptiques sont semblables entre eux. Ils peuvent être décrits par comparaison avec un d'entre eux. On choisit comme espace typique celui où le tour de la droite est égal à  $\pi = 3,1416$ . Dans tout espace elliptique, les distances de deux points sont égales aux distances correspondantes de l'espace typique multipliées par un nombre  $R$  appelé le rayon de l'espace elliptique considéré. Les distances dans l'espace typique, dit espace de rayon un, sont appelées les distances angulaires. Les distances vraies ou distances linéaires sont donc le produit du rayon de l'espace par les distances angulaires.

### *L'espace de rayon variable*

Lorsque le rayon de l'espace varie avec le temps, on obtient un espace de rayon variable. On peut imaginer que des points matériels y sont répartis uniformément et que des observateurs situés sur ces points y font des observations spatio-temporelles. La distance angulaire des divers observateurs demeure invariable, les distances linéaires varient donc proportionnellement au rayon de l'espace. Tous les points de l'espace sont parfaitement équivalents. Par un déplacement d'ensemble, on peut amener un quelconque d'entre eux au centre de la représentation. Les mesures faites par les observateurs sont donc aussi équivalentes, chacun d'eux se fait de l'univers la même représentation.

Si le rayon croît avec le temps, chaque observateur voit tous les points qui l'entourent s'éloigner de lui, et cela avec des vitesses qui sont d'autant plus grandes qu'ils sont plus éloignés. C'est ce qui est observé pour les nébuleuses extra-galactiques qui nous entourent. Le rapport constant de la distance à la vitesse a été déterminé par Hubble et Humason. Il est égal à

$$T_H = 2 \cdot 10^9 \text{ années.}$$

Si on fait un graphique portant en abscisse les valeurs du temps et en ordonnée les valeurs du rayon, on obtient une courbe dont la sous-tangente au point représentant l'instant actuel est précisément égale à  $T_H$ .

### *L'atome primitif*

Voilà les notions géométriques qui nous étaient indispensables. Nous allons maintenant imaginer que l'univers entier a existé sous la forme d'un noyau atomique qui remplissait uniformément un espace elliptique de rayon convenable.

Anticipant sur ce qui va suivre, nous admettrons que lorsque l'univers avait une densité de  $10^{-27}$  gr./cm<sup>3</sup>, le rayon de l'espace était d'un milliard d'années de lumière, c'est-à-dire de  $10^{27}$  cm. La masse de l'univers est donc de  $10^{54}$  grammes. Si cet univers a eu jadis une densité égale à celle de l'eau, son rayon était alors réduit à  $10^{18}$  cm, soit une année lumière. Chaque proton y occupait une sphère d'un ångström environ, soit  $10^{-8}$  cm. Dans un noyau atomique, les protons sont en contact et leur rayon est de  $10^{-13}$  cm, soit donc cent mille fois plus petit. Le rayon de l'univers correspondant est donc  $10^{13}$  cm., c'est-à-dire une unité astronomique.

Il ne faut naturellement pas attacher trop d'importance à cette description de l'atome primitif, description qui devra peut-être être modifiée lorsque nos connaissances des noyaux atomiques seront plus parfaites.

Les théories cosmogoniques se proposent de rechercher des conditions initiales idéalement simples d'où a pu résulter, par le jeu naturel des forces physiques connues, le monde actuel dans toute sa complexité. Il semble difficile de concevoir des conditions plus simples que celles qui régnaient lorsque toute la matière était unifiée en un noyau atomique. L'avenir des théories atomiques nous dira peut-être un jour, jusqu'à quel point un noyau atomique doit être considéré comme un système où des particules associées conservent encore quelque individualité propre. Le fait que des particules peuvent sortir d'un noyau, lors des transformations radio-actives, ne prouve certes pas que ces particules y préexistaient comme telles. Les photons sortent d'un atome dont ils n'étaient pas des constituants, les électrons apparaissent là où ils n'étaient pas et les théoriciens leur déniaient une existence individuelle dans le noyau. Les protons ou les particules alpha y existent sans doute davantage. Lorsqu'ils sortent, leur existence devient pourtant plus indépendante et leurs degrés de liberté plus nombreux. Aussi leur sortie, lors des transformations radio-actives, est-elle un cas typique de dégradation de l'énergie; avec une aug-



mentation du nombre de quanta indépendants ou augmentation de l'entropie.

Que l'entropie augmente avec le nombre des quanta, est évident dans le cas de la radiation électromagnétique en équilibre thermodynamique. Dans la radiation noire, en effet, l'entropie et le nombre total des photons sont l'un et l'autre proportionnels à la troisième puissance de la température. Quand donc on mélange des radiations de températures différentes et qu'on laisse s'établir un nouvel équilibre statistique, le nombre total des photons a augmenté. La dégradation de l'énergie se manifeste comme une pulvérisation de l'énergie. La quantité totale d'énergie se maintient, mais elle se répartit en un nombre de quanta toujours plus grand, elle se brise en fragments toujours plus nombreux.

Si donc, par la pensée, on veut essayer de remonter le cours des temps, on doit s'attendre à trouver jadis l'énergie concentrée en un nombre moindre de quanta. La condition initiale doit être un état de concentration maxima. C'est en essayant de formuler cette condition qu'a germé l'idée de l'atome primitif. Qui sait si l'évolution des théories du noyau ne permettra pas un jour de considérer l'atome primitif comme un quantum unique?

### *Formation de nuées*

Nous imaginons l'atome primitif comme remplissant uniformément l'espace de rayon très petit (astronomiquement parlant). Il n'y a donc pas de place pour des électrons superficiels, l'atome primitif était en quelque sorte un isotope du neutron. Cet atome est conçu comme n'ayant existé qu'un instant; il est en effet instable et, dès son existence, il se brise en morceaux, qui se brisent à leur tour; entre les morceaux jaillissent des électrons, des protons, des particules alpha. Il en résulte une augmentation du volume; la désintégration de l'atome est donc accompagnée d'une augmentation rapide du rayon de l'espace, que les fragments de l'atome primitif remplissent toujours uniformément. Quand les morceaux sont devenus trop petits, ils cessent de se briser; quelques-uns, comme l'uranium, se désintègrent encore maintenant, lentement, avec une vie moyenne de quatre milliards d'années, nous laissant un maigre échantillon de la désintégration universelle de jadis.

Dans cette première phase de l'expansion de l'espace, partant asymptotiquement d'un rayon pratiquement nul, nous avons des particules animées de vitesses énormes (par suite du recul lors de l'émission des rayons) qui sont plongées dans de la radiation, dont l'énergie totale est, sans doute, une fraction notable de l'énergie massique des atomes.

L'effet de l'expansion rapide de l'espace est d'atténuer cette radiation et aussi de diminuer les vitesses relatives des atomes. Ce dernier point demande quelque explication. Imaginons qu'un atome ait, suivant le rayon de la sphère dans laquelle nous nous représentons l'espace fermé, une vitesse radiale plus grande que la vitesse normale pour l'endroit où il se trouve. Alors cet atome s'écartera davantage du centre que la particule matérielle idéale qui a la vitesse normale. L'atome gagnera donc progressivement des régions où sa vitesse est moins anormale, et sa vitesse propre, c'est-à-dire son excès sur la vitesse normale, diminuera. Le calcul montre que la vitesse propre varie ainsi en raison inverse du rayon de l'espace. Nous devons ainsi nous attendre, dans la première période de l'expansion, à une atténuation notable des vitesses relatives des atomes. Il arrivera donc, au moins de temps en temps, par suite de chances favorables, que les chocs entre atomes deviendront assez modérés pour ne plus donner lieu à des transformations atomiques ou des émissions de radiations, mais que ces chocs seront des chocs élastiques réglés par les électrons superficiels et tels que les considère la théorie des gaz. Nous obtiendrons donc, au moins localement, un commencement d'équilibre statistique, c'est-à-dire la formation de nuées gazeuses. Ces nuées gazeuses auront encore, l'une par rapport à l'autre, des vitesses considérables, et ces nuées seront mélangées aux radiations qui ont été elles-mêmes atténuées par l'expansion.

Ce sont ces radiations qui subsisteront jusqu'à nos jours sous forme de rayons cosmiques, tandis que les nuées gazeuses auront donné lieu aux étoiles et aux nébuleuses par un mécanisme qu'il nous reste à expliquer.

### *La répulsion cosmique*

Pour cela, il nous faut dire quelques mots de la théorie de la relativité.

Lorsque EINSTEIN a établi sa théorie de la gravitation, ou théorie généralisée, il a admis, sous le nom de principe d'équivalence, que les notions de la relativité restreinte étaient valables approximativement dans un domaine suffisamment petit. Dans la théorie restreinte l'élément différentiel des mesures spatio-temporelles a pour carré une forme quadratique des quatre coordonnées, dont les coefficients ont des valeurs spéciales constantes. Dans la généralisation, cet élément sera encore la racine carrée d'une forme quadratique, mais les coefficients, désignés collectivement sous le nom de tenseur métrique, varieront de place en place. La géométrie de l'espace-temps est alors la géométrie générale de RIEMANN à trois plus une dimensions. Les espaces de rayons variables sont un cas particulier de cette géométrie générale lorsqu'on y introduit l'hypothèse de l'homogénéité spatiale ou de l'équivalence des observateurs.

Il peut se faire que cette géométrie ne diffère qu'apparemment de celle de la relativité restreinte. C'est ce qui arrive lorsque la forme quadratique peut se transformer, par un simple changement des coordonnées, en une forme à coefficients constants. On dit alors, avec RIEMANN, que la variété correspondante, c'est-à-dire l'espace-temps, est plan. Il faut pour cela que certaines expressions, exprimées par les composantes d'un tenseur à quatre indices appelé le tenseur de RIEMANN, s'annulent toutes en tout point. Lorsqu'il n'en est pas ainsi, le tenseur de RIEMANN exprime l'écart à la planarité. Le tenseur de RIEMANN se calcule au moyen des dérivées secondes du tenseur métrique. A partir du tenseur de RIEMANN à quatre indices, il est aisé d'obtenir un tenseur qui n'a que deux indices comme le tenseur métrique; on l'appelle le tenseur de RIEMANN contracté. On peut aussi obtenir un scalaire, le tenseur de RIEMANN totalement contracté.

En relativité restreinte, un point libre décrit une droite d'un mouvement uniforme, c'est le principe d'inertie. On peut encore dire d'une façon équivalente qu'il décrit une géodésique de l'espace-temps. Dans la généralisation, on suppose encore qu'un point libre décrit une géodésique. Ces géodésiques ne sont plus représentables par un mouvement rectiligne uniforme; elles représentent maintenant le mouvement du point sous l'action des forces de gravitation. Comme le champ de gravitation est causé par la présence de la matière, il faut qu'il y ait une relation entre la densité de répar-

tition de la matière et le tenseur de RIEMANN qui exprime l'écart à la planarité. La densité est elle-même considérée comme la composante principale d'un tenseur à deux indices appelé le tenseur matériel; on obtient ainsi comme expression possible du tenseur matériel  $T_{\mu\nu}$  en fonction du tenseur métrique  $g_{\mu\nu}$  et des deux tenseurs de RIEMANN, contracté  $R_{\mu\nu}$  et totalement contracté  $R$  :

$$T_{\mu\nu} = a R_{\mu\nu} + b R g_{\mu\nu} + c g_{\mu\nu}$$

où  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont trois constantes.

Mais ceci n'est pas tout, il doit exister certaines identités entre les composantes du tenseur matériel et ses dérivées. Ces identités peuvent être interprétées, pour un choix convenable des coordonnées, choix correspondant d'ailleurs aux conditions pratiques des observations, comme exprimant les principes de conservation: celui de l'énergie et celui de la quantité de mouvement. Pour que de telles identités soient satisfaites, il n'est plus possible de choisir arbitrairement les valeurs des trois constantes. Il faut prendre  $b = -a/2$ . Il reste donc seulement deux constantes. La théorie ne peut prévoir ni leur grandeur ni leur signe. C'est à l'observation seule qu'il appartient de les déterminer.

La constante  $a$  est liée à la constante de gravitation. Lorsqu'en effet on applique la théorie aux conditions qui se rencontrent dans les applications (en particulier le fait que les vitesses astronomiques sont faibles en comparaison de la vitesse de la lumière) et qu'on profite de ces conditions pour introduire des coordonnées qui facilitent la comparaison avec l'expérience, on trouve que les géodésiques diffèrent du mouvement rectiligne uniforme par une accélération qui peut s'interpréter comme une attraction en raison inverse du carré des rayons et qui est exercée par les masses représentées par le tenseur matériel. Ceci n'est que l'effet principal prévu par la théorie; celle-ci prévoit de petits écarts qui, dans des cas favorables, ont été confirmés par l'observation.

On obtient un bon accord avec les observations planétaires en négligeant le terme en  $c$ . Cela ne prouve pas que ce terme ne puisse avoir des conséquences expérimentales. En effet, dans les conditions qui ont été employées pour obtenir la loi de Newton comme une approximation de la théorie, le terme en  $c$  fournirait une force variant, non pas en raison inverse du carré de la dis-

tance, mais proportionnellement à celle-ci. Cette force pourrait donc avoir une action marquée pour de très grandes distances, alors que pour les distances des planètes son action serait négligeable. Aussi le rapport  $c/a$ , désigné habituellement par la lettre  $\lambda$ , est-il appelé la constante cosmologique. Lorsque  $\lambda$  est positif, la force additionnelle proportionnelle à la distance est appelée la répulsion cosmique.

La théorie de la relativité a ainsi unifié la théorie de NEWTON. Chez NEWTON, il y avait deux principes posés indépendamment l'un de l'autre : l'attraction universelle et la conservation de la masse. Dans la théorie de la relativité, ces principes prennent une forme quelque peu modifiée, tout en étant pratiquement identiques à ceux de NEWTON dans les cas où ceux-ci avaient été confrontés avec les faits. Mais l'attraction universelle est maintenant une conséquence de la conservation de la masse. La grandeur de la force, c'est-à-dire la constante de la gravitation, est déterminée expérimentalement.

La théorie indique encore que la constance de la masse a pour conséquence, en outre de la force newtonienne de gravitation, une répulsion proportionnelle à la distance, dont la grandeur et même le signe ne peuvent être déterminés que par l'observation, et par l'observation mettant en jeu de grandes distances.

La répulsion cosmique n'est pas une hypothèse spéciale introduite pour éviter des difficultés se présentant dans l'étude de l'univers. Si EINSTEIN l'a réintroduite dans son mémoire cosmologique, c'est parce qu'il se souvenait l'avoir arbitrairement laissé tomber lorsqu'il avait établi les équations de la gravitation. Cette constante s'impose logiquement dans le développement de la théorie. La supprimer revient à la fixer arbitrairement en lui donnant une valeur particulière : zéro.

### *L'univers de Friedmann*

La théorie de la relativité nous permet de compléter notre description de l'univers de rayon variable en y introduisant des considérations dynamiques. Nous nous le représentons comme précédemment à l'intérieur d'une sphère dont le centre est un point que nous pouvons choisir arbitrairement. Cette sphère n'est pas le

bord du système, c'est le bord de la carte ou de la représentation que nous nous en faisons. C'est l'endroit où les deux demi-droites opposées se soudent en une droite fermée. La répulsion cosmique se manifeste comme une force proportionnelle à la distance au centre de la représentation. Quant à l'attraction gravifique, on sait que, dans le cas d'une distribution respectant la symétrie sphérique autour d'un point, et c'est bien le cas dans lequel nous nous trouvons, les régions plus éloignées du centre que le point considéré n'ont aucune influence sur le mouvement de celui-ci; quant aux points intérieurs, ils agissent comme s'ils étaient concentrés au centre. En vertu de l'homogénéité de la répartition de la matière, la densité est constante; la force d'attraction résultante est donc simplement proportionnelle à la distance, tout comme la répulsion cosmique.

Il existe donc une certaine densité, que nous appellerons la densité d'équilibre ou la densité cosmique, pour laquelle les deux forces se font équilibre.

Ces considérations élémentaires permettent de se rendre compte dans une certaine mesure du résultat que donne le calcul et qui est contenu dans l'équation de FRIEDMANN :

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = -1 + \frac{2M}{R} + \frac{R^2}{T^2}.$$

Le dernier terme représente la répulsion cosmique (c'est le double de la fonction des forces de cette répulsion).  $T$  est une constante dépendant de la valeur de la constante cosmologique et pouvant remplacer celle-ci. L'avant-dernier terme est le double du potentiel d'attraction due à la masse intérieure. Le rayon de l'espace  $R$  est la distance à l'origine d'un point de distance angulaire  $\sigma = 1$ . Si on multiplie l'équation par  $\sigma^2$ , on aura l'équation correspondante pour un point à distance quelconque.

Ce qui est remarquable dans l'équation de FRIEDMANN, c'est le premier terme  $-1$  du second membre. Les considérations élémentaires que nous venons d'exposer permettraient de lui donner une valeur quelconque constante : c'est la constante d'énergie dans le mouvement s'effectuant sous l'action des deux forces. La théorie complète fixe cette constante et lie ainsi les propriétés géométriques aux propriétés dynamiques.



### *L'équation d'Einstein*

Lorsque, en vertu des équations, le rayon  $R$  demeure constant, on se trouve dans le cas de l'univers en équilibre ou univers d'EINSTEIN. On déduit aisément de l'équation de FRIEDMANN, les conditions de l'univers en équilibre :

$$R_E = \frac{T}{\sqrt{3}}; \quad \rho_E = \frac{3}{4\pi} \frac{1}{T^2}; \quad M = \frac{T}{\sqrt{3}}.$$

Dans ces formules, les distances sont calculées en temps de lumière, ce qui revient à prendre la vitesse de la lumière  $c$  égale à un; mais en outre, l'unité de masse est choisie de telle façon que la constante de gravitation soit aussi égale à un. Il est facile de passer aux valeurs numériques en C.G.S. en rétablissant dans les formules les constantes  $c$  et  $G$  de façon à satisfaire aux équations de dimension. En particulier, si on prend  $T$  égal à  $2 \cdot 10^9$  années, comme nous le supposons dans un instant, on trouve que la densité  $\rho_E$  est égale à  $10^{-27}$  g./cm<sup>3</sup>.

Ces considérations peuvent s'étendre à une région où la distribution n'est plus homogène, et où même la symétrie sphérique n'est plus vérifiée, pourvu que la région considérée soit de petites dimensions. On sait en effet que dans une petite région, la mécanique newtonienne est toujours une bonne approximation. Il faut naturellement, en appliquant la mécanique newtonienne, tenir compte de la répulsion cosmique; mais, à part cette modification facile, il est parfaitement légitime d'utiliser l'intuition acquise par la pratique de la mécanique classique et son application à des systèmes plus ou moins compliqués. On peut, entre autres, se rendre compte que l'équilibre dont nous venons de parler est instable, et que même l'équilibre peut se rompre de façons opposées dans une région et dans une autre.

Peut-être est-il nécessaire de mentionner ici que l'équation de FRIEDMANN n'est rigoureusement exacte que si la masse  $M$  demeure constante. Lorsqu'on tient compte de la radiation qui circule dans l'espace et aussi des vitesses propres des particules qui s'entre-croisent à la façon des molécules dans un gaz, et donnent lieu, comme dans un gaz, à une pression, il est nécessaire de tenir compte, dans l'évaluation de la masse ou de l'énergie, du travail de cette pression lors de l'expansion de l'espace. Mais il est mani-

feste qu'un tel effet est généralement négligeable, comme d'ailleurs des recherches détaillées l'ont montré.

### *Signification des amas de nébuleuses*

Nous sommes maintenant en état de reprendre la description que nous avons commencée, de l'expansion de l'espace à la suite de la désintégration de l'atome primitif. Nous avons montré comment, dans une première période d'expansion rapide, il avait dû se former des nuées gazeuses animées de grandes vitesses propres. Nous allons maintenant supposer que la masse  $M$  est légèrement plus grande que  $T/\sqrt{3}$ . Le second membre de l'équation de FRIEDMANN pourra donc devenir petit, mais ne pourra pas s'annuler. Nous pourrions donc distinguer dans l'expansion de l'espace trois phases. La première expansion rapide sera suivie d'une période de ralentissement, au cours de laquelle l'attraction et la répulsion se feront sensiblement équilibre. Enfin la répulsion l'emportera définitivement sur l'attraction, et l'univers entrera dans la troisième phase, celle de la reprise de l'expansion sous l'action dominante de la répulsion cosmique.

Considérons plus en détail la phase d'expansion lente. Les nuées gazeuses ne sont sans doute pas réparties d'une façon parfaitement uniforme. Considérons dans une région suffisamment petite, et cela simplement au point de vue de la mécanique classique, le conflit entre la force de répulsion et l'attraction qui se font presque équilibre. Nous voyons aisément que, par suite des fluctuations locales de la densité, il y aura des régions où l'attraction l'emportera finalement sur la répulsion, et cela malgré le fait que nous avons supposé que, pour l'univers dans son ensemble, c'est le contraire qui se produit. Ces régions où l'attraction a prévalu retomberont donc sur elles-mêmes, lorsque l'univers entrera dans la période de reprise de l'expansion. Nous obtiendrons un univers formé de régions de condensations qui se séparent les unes des autres. Ces régions de condensations ne seraient-elles pas les nébuleuses elliptiques ou spirales? Nous reviendrons à cette question dans un instant.

Remarquons qu'il pourra encore se faire, quoique d'une façon plus rare, que de larges régions, où la densité ou la vitesse d'expansion diffère quelque peu de la moyenne, hésitent entre l'expan-

sion et la contraction et demeurent en équilibre, alors que l'univers a repris l'expansion. Ces régions ne pourraient-elles pas être identifiées avec les amas de nébuleuses, qui sont constitués de plusieurs centaines de nébuleuses situées à des distances relatives les unes des autres qui sont une douzaine de fois moindres que celles des nébuleuses isolées? Suivant cette interprétation, ces amas sont constitués de nébuleuses qui se sont attardées dans la phase d'équilibre; ils représentent un échantillon de la répartition de la matière, telle qu'elle était réalisée partout, lorsque le rayon de l'espace était une douzaine de fois plus petit qu'il ne l'est actuellement, lorsque l'univers passait par l'équilibre.

*Remarque de W. DE SITTER*

Cette interprétation donne l'explication d'une coïncidence remarquable, sur laquelle W. DE SITTER a fortement insisté jadis. Calculant le rayon de l'univers dans l'hypothèse qui porte son nom, c'est-à-dire en négligeant la présence de la matière et en introduisant dans les formules la valeur  $T_H$  donnée par l'observation de l'expansion, il obtenait un résultat qui ne diffère guère de ce qu'on obtient, dans l'hypothèse toute différente d'un univers d'EINSTEIN, en introduisant dans les formules la valeur observée de la densité de la matière. L'explication de cette coïncidence est, suivant notre interprétation des amas de nébuleuses, que pour une valeur du rayon qui est une douzaine de fois le rayon d'équilibre, le dernier terme de la formule de FRIEDMANN l'emporte largement sur les autres. La constante  $T$  qui y figure est donc pratiquement égale à la valeur observée  $T_H$ ; mais comme, d'autre part, les amas sont un fragment d'univers d'EINSTEIN, il est légitime d'employer pour eux la relation existant entre la densité et la constante  $T$ . Pour  $T = T_H$ , on trouve, comme nous l'avons vu, que la densité dans les amas doit être  $10^{-27}$  g./cm<sup>3</sup>, qui est la valeur donnée par l'observation. Cette observation est basée sur les comptes de nébuleuses et sur l'estimation de leur masse indiquée par leur vitesse spectroscopique de rotation.

En plus de cet argument d'ordre quantitatif, l'interprétation proposée rend compte de faits, d'ordre qualitatif, importants. Elle explique pourquoi les amas ne présentent pas de condensations centrales marquées et ont des formes vagues, avec des extensions

irrégulières, toutes choses qu'il serait difficile d'expliquer, s'ils formaient des structures dynamiques contrôlées par des forces dominantes, comme c'est manifestement le cas pour les amas d'étoiles ou les nébuleuses elliptiques et spirales. Elle rend compte aussi d'un fait manifeste qui est l'existence de larges fluctuations de densité dans la répartition des nébuleuses, même en dehors des amas. Il doit y avoir, en effet, si l'univers vient de passer par un état d'équilibre instable, toute une gamme de transition, depuis les amas proprement dits qui sont encore en équilibre, en passant par des régions où l'expansion, sans être arrêtée, a pourtant été retardée, de telle façon que ces régions ont une densité supérieure à la moyenne.

Cette interprétation permet de fixer à un milliard d'années la valeur du rayon au moment de l'équilibre et donc à  $10^{10}$  années lumière la valeur actuelle du rayon. Comme les télescopes américains prospectent l'univers jusqu'à une distance d'un demi-milliard d'années-lumière, on voit que cette région observée constitue déjà un échantillon d'une grandeur nullement négligeable comparé à l'espace entier; il est donc légitime d'espérer que les valeurs du coefficient d'expansion  $T_H$  et de la densité, obtenues pour ce domaine restreint, sont représentatives de l'ensemble. La seule indétermination qui subsiste est celle qui est relative au degré d'approximation avec laquelle la situation d'équilibre a été approchée. C'est de cette valeur que dépend l'estimation de la durée de l'expansion. Peut-être sera-t-il possible d'estimer cette valeur par des considérations statistiques sur la fréquence relative des amas, comparés aux nébuleuses isolées.

### *Vitesse propre des nébuleuses*

Il nous faut maintenant revenir à la question de la formation des nébuleuses à partir des régions de condensation.

Nous avons vu que les vitesses propres, ou vitesses relatives, des nuées gazeuses devaient être fort grandes. Lorsque certaines d'entre elles, à cause d'une densité un peu trop grande, forment un noyau de condensation, elles retiendront plus aisément les nuées qui ont à peu près la même vitesse que ce noyau. La vitesse propre de la nébuleuse sera donc déterminée par la vitesse du

noyau de condensation. Les nébuleuses qui se sont formées par un tel mécanisme doivent avoir de grandes vitesses relatives. C'est ce qu'on observe, en effet, dans les amas de nébuleuses. Dans celui qui a pu être le mieux étudié, celui de Virgo, la dispersion des vitesses autour de la vitesse moyenne est de 600 km./sec. Cette vitesse propre a dû être la vitesse propre de toutes les nébuleuses au moment du passage par l'équilibre. Pour les nébuleuses isolées, cette vitesse a été réduite au douzième environ, par suite de l'expansion, par le même mécanisme que nous avons expliqué à propos de la formation des nuées gazeuses.

### *Formation des étoiles*

La densité des nuées est, en moyenne, la densité d'équilibre  $10^{-27}$  g./cm<sup>3</sup>. Pour cette densité de répartition, une masse telle que celle du soleil occuperait une sphère d'une centaine d'années-lumière de rayon. Ces nuées n'ont aucune tendance à se contracter. Pour qu'une contraction due à la gravitation puisse s'y amorcer, il faut que leur densité soit notablement accrue. C'est ce qui pourra arriver si deux nuées viennent à se rencontrer avec de grandes vitesses. Le choc sera alors un choc mou donnant lieu à de l'ionisation et à une émission de radiation. Les deux nuées s'aplatiront l'une sur l'autre en restant en contact, la densité sera facilement doublée et la condensation sera définitivement amorcée. Il est clair qu'une telle condensation peut donner lieu par des mécanismes connus à un système solaire ou une étoile simple ou multiple. Ce qui caractérise le mécanisme auquel nous sommes amenés, c'est l'énormité des dimensions de la nébuleuse gazeuse dont la condensation formera l'étoile. Cette circonstance rend compte de la grandeur du moment angulaire, lequel se conserve durant la condensation, et dont la valeur ne pourrait être nulle ou négligeable que si les circonstances initiales étaient ajustées d'une façon tout à fait invraisemblable. La moindre rotation initiale doit donner naissance à une rotation énergique du système concentré, rotation incompatible avec la présence d'un corps unique, mais supposant, soit des étoiles multiples tournant l'une autour de l'autre, soit simplement une étoile avec une ou plusieurs grosses planètes tournant dans le même sens.

### *Distribution des densités dans les nébuleuses*

Voici comment nous pouvons nous représenter l'évolution des régions de condensations. Les nuées commencent par tomber vers le centre et à décrire un mouvement d'oscillation suivant un diamètre de part et d'autre de ce centre. Au cours de ces oscillations elles se rencontreront avec des vitesses de plusieurs centaines de km./sec. et donneront lieu à des étoiles. En même temps la perte d'énergie, due à ces chocs mous, modifiera la distribution des nuées et des étoiles déjà produites, de telle façon que le système se condensera davantage. Il semble bien que ce phénomène puisse être soumis à l'analyse mathématique. Il faudra naturellement introduire certaines hypothèses de nature à simplifier le modèle de façon à rendre le calcul possible et aussi de façon à éliminer artificiellement des phénomènes secondaires. Il n'y a guère de doute qu'il n'y ait moyen d'obtenir ainsi la loi de répartition finale des étoiles formées par le mécanisme décrit plus haut. Comme la distribution de l'éclat est connue pour les nébuleuses elliptiques et qu'on peut en déduire la distribution des densités dans la nébuleuse, on voit qu'un tel calcul est susceptible de conduire à une vérification décisive de la théorie.

### *Les spirales*

Une des complications auxquelles je faisais allusion à l'instant est la présence éventuelle d'un moment angulaire notable. En l'excluant, nous avons restreint la théorie aux condensations respectant la symétrie sphérique, c'est-à-dire les nébuleuses sphériques ou légèrement elliptiques. Il est facile de voir quelle modification apportera la présence d'un moment angulaire notable. Il est évident qu'on obtiendra, en outre d'une région centrale analogue aux nébuleuses elliptiques, un système plat analogue à l'anneau de Saturne ou aux systèmes planétaires; en d'autres termes quelque chose de semblable aux nébuleuses spirales. Dans cette théorie, le type spiral ou elliptique de la nébuleuse est une question de chance; il dépend de la valeur fortuite du moment angulaire dans la région de condensation. Il ne peut plus y être question d'une évolution d'un type en un autre. Il en est d'ailleurs de même pour les étoiles où le type de l'étoile est fixé par la valeur



accidentelle de sa masse, c'est-à-dire de la somme des masses des deux nuées dont la rencontre a produit l'étoile.

### *Distribution des étoiles super-géantes*

Si les spirales ont cette origine, il doit en résulter que les étoiles se sont formées par rencontre de nuées en deux processus bien distincts. Tout d'abord, et surtout dans la région centrale, les nuées se rencontreront dans leur mouvement radial; c'est le phénomène que nous avons invoqué pour les nébuleuses elliptiques. Le mouvement préférentiel de KAPTEYN en est sans doute une indication. Mais en outre de ce processus relativement rapide, il doit y avoir un processus plus lent de formation d'étoiles, à partir des nuées qui ont échappé à la région centrale par suite de leur moment angulaire. Celles-ci se rencontreront dans un mouvement de va-et-vient de part et d'autre du plan de la spirale. L'existence de ces deux processus d'âges différents est peut-être l'explication du fait qu'on ne rencontre pas d'étoiles super-géantes dans les nébuleuses elliptiques et dans le noyau des spirales, mais qu'on ne les observe que dans la région extérieure des spirales. On sait en effet que les étoiles rayonnent de l'énergie provenant de la transformation de leur hydrogène en hélium. Les étoiles super-géantes rayonnent tant d'énergie qu'elles ne peuvent maintenir ce débit que pendant une centaine de millions d'années. On comprendrait ainsi que pour les étoiles les plus anciennes, les super-géantes se soient éteintes faute de combustible, tandis qu'elles luisent encore là où elles se sont formées récemment.

### *L'uniformité de l'abondance des éléments*

Mais sans doute vaut-il mieux ne pas nous laisser entraîner prématurément à essayer de suivre la théorie dans de tels détails, et de nous borner pour l'instant aux conséquences les plus générales de l'hypothèse de l'atome primitif. Nous avons vu que la théorie rend compte de la formation des étoiles dans les nébuleuses. Elle explique aussi une circonstance fort remarquable qui a pu être mise en évidence par l'analyse des spectres des étoiles. Il s'agit de la composition quantitative de la matière, ou de l'abondance relative des divers éléments chimiques, qui est la même

dans le soleil, dans les étoiles, sur la terre et dans les météorites. Ce fait est une conséquence nécessaire de l'hypothèse de l'atome primitif. Des produits de désintégration d'un atome se trouvent naturellement dans des proportions bien définies, par les lois des transformations radio-actives.

### *Les rayons cosmiques*

Enfin, nous avons dit en débutant que les radiations produites pendant les désintégrations, durant la première période de l'expansion, pouvaient rendre compte des rayons cosmiques. Ces rayons sont doués d'une énergie de plusieurs milliards d'électrons-volts; nous ne connaissons aucun phénomène se réalisant actuellement qui soit capable de tels effets. Ce à quoi ces rayons ressemblent le plus, ce sont les rayons produits lors des désintégrations radio-actives actuelles, mais les énergies individuelles mises en jeu sont énormément plus grandes. Tout cela convient à des rayons d'origine super-radio-active. Mais ce n'est pas seulement par leur qualité que se distinguent ces rayons, c'est aussi par leur quantité totale. En effet, il est facile, à partir de leur intensité observée, qui est donnée en ergs par cm., de déduire leur densité d'énergie en divisant par  $c$ , puis leur densité en g. par cm<sup>3</sup> en divisant encore par  $c^2$ . On trouve ainsi  $10^{-33}$  g./cm<sup>3</sup> soit le millième environ de la densité actuelle de la matière existant sous forme d'étoile. Il semble impossible d'expliquer une telle énergie, qui représente un pour mille de toute l'énergie existante, si ces rayons n'ont pas été produits par un processus qui a mis en jeu toute la matière existante. En fait cette énergie a dû, au moment de sa formation, être plus grande encore, puisqu'une partie a pu être absorbée et que le reste a été réduit par suite de l'expansion de l'espace. On voit ainsi que l'intensité totale observée pour les rayons cosmiques est bien ce à quoi il faut s'attendre.

### *Conclusion*

L'objet d'une théorie cosmologique est de rechercher des conditions initiales idéalement simples, d'où a pu résulter par le jeu des forces physiques connues, le monde actuel dans toute sa complexité.

Je pense vous avoir montré que l'hypothèse de l'atome primitif satisfait aux règles du jeu. Elle ne fait appel à aucune force qui ne soit connue par ailleurs, et elle rend compte de toute la complexité du monde actuel en expliquant par une seule hypothèse l'existence des étoiles et leur arrangement en galaxies, l'expansion de l'univers et l'exception locale à cette expansion présentée par les amas de nébuleuses, et enfin le grandiose phénomène des rayons ultra-pénétrants, véritablement « cosmiques » puisqu'ils sont les témoins de l'activité primitive du Cosmos et nous ont conservé, en se propageant pendant des milliards d'années dans l'espace admirablement vide, le souvenir de l'âge super-radio-actif; comme les fossiles nous témoignent des âges géologiques, ces rayons fossiles nous racontent ce qui s'est passé avant que les étoiles n'aient commencé à se former.

Je ne prétendrai certes pas que cette hypothèse de l'atome primitif soit dès à présent prouvée et je serais déjà fort heureux si elle ne vous apparaissait ni absurde ni invraisemblable. Lorsque les conséquences qui en résultent, spécialement en ce qui concerne la loi de répartition des densités dans les nébuleuses, auront pu être calculées avec assez de détails, il sera sans doute possible de se prononcer définitivement pour ou contre.