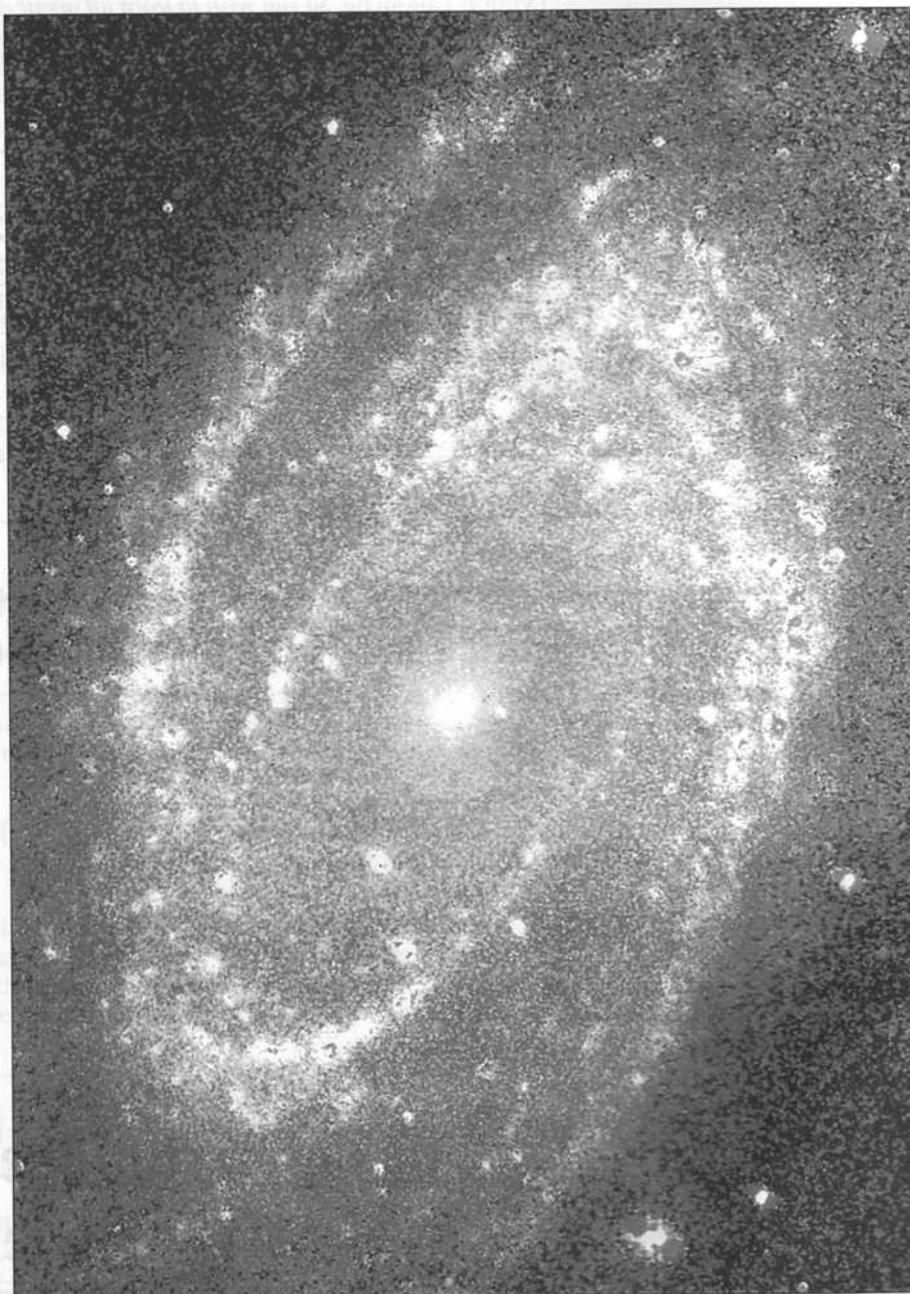


Maria Goeppert-Mayer :

Les « nombres magiques » de la physique nucléaire

Jonathan Tennenbaum

New York, 1942 : en plein milieu de la guerre, un projet secret est lancé à l'université de Columbia, baptisé un an plus tard « Substitute Alloy Materials » (SAM). Son objectif : développer des procédés pour enrichir l'uranium-235, l'isotope difficilement fissile de l'uranium naturel, et le produire sous la forme la plus pure possible. Le SAM fait partie du Projet Manhattan qui devait doter l'Amérique de la bombe atomique. Une chercheuse du SAM mérite une attention particulière : Maria Mayer, née Goeppert, autrefois appelée « la plus belle fille de Göttingen ».



Maria Goeppert-Mayer était une physicienne brillante. A New York, elle dirigeait une équipe d'une vingtaine de physiciens et de chimistes étudiant la séparation photochimique d'isotopes. Après la guerre, elle sera le porte-parole d'un groupe de chercheurs nucléaires en faveur de la « dé-militarisation » de l'énergie atomique et la promotion de son utilisation pacifique. Vingt ans plus tard, Maria Goeppert-Mayer sera la première femme à recevoir le prix Nobel dans le domaine de la physique théorique.

Quand elle était jeune étudiante en physique à Göttingen, elle n'aurait jamais pu imaginer qu'elle serait un jour appelée à travailler sur la mise au point d'une nouvelle arme d'anéantissement destinée à frapper son propre pays. Maria Goeppert grandit dans une famille où la science naturelle était synonyme de la volonté de protéger la vie et de contribuer au bien-être des hommes. Son père, Friedrich Goeppert, était un pédiatre renommé, qui s'investissait totalement pour la vie de ses petits patients. Professeur de pédiatrie à l'université, il y fonda une clinique pour enfants.

Friedrich Goeppert s'occupa de près du développement intellectuel de sa fille. Maria se souvenait de la façon dont il s'efforçait de donner une réponse satisfaisante « à toutes les questions à moitié raisonnables » qu'elle lui posait. A l'âge de trois ou quatre ans par exemple, elle lui demandait déjà pourquoi la lune était parfois pleine, parfois en croissant, et à l'âge de sept ans, elle observa avec lui une éclipse du soleil. Plus tard, ils faisaient souvent des promenades à la campagne, où elle apprit les noms des plantes et des arbres. Ils s'amusaient aussi à rechercher des fossiles dans une carrière.

« Mon père disait toujours que j'aurais dû être un garçon. « Tu ne dois pas devenir une femme » me confiait-il, c'est-à-dire une femme au foyer — comme la plupart de celles qu'il connaissait — ne s'intéressant qu'à jouer avec les enfants et rien d'autre, ce qu'il ne supportait pas. (...) Étais-je choquée par ses réflexions ? Non, pas du tout. Il pouvait me dire ce qu'il voulait. Je me sentis très honorée et

décidai de ne pas devenir une simple femme. »

La mère de Maria avait été institutrice avant son mariage, enseignant surtout le français. Elle était très douée en musique et jouait du piano ou chantait dès qu'une occasion se présentait. Chez les Goeppert, on fêtait souvent, on dansait beaucoup, et Mme Goeppert jouait au piano jusqu'aux petites heures de la nuit. Mais l'influence du père devait s'avérer à bien des égards dominante. Ses conceptions sur l'éducation de l'enfant étaient pour le moins inhabituelles puisque selon l'un de ses principes, « la mère est l'ennemi naturel de l'enfant ». Par cela, il remettait en question, non la mère en tant que personne, mais le rôle maternel traditionnel et notamment la tendance, née de peurs exagérées, à réprimer la curiosité et le sens d'initiative de l'enfant.

En effet, Maria allait devenir une fille exceptionnellement hardie, entreprenante et souvent pas très sage. Ses camarades de classe devenues adultes se rappelaient des mauvais tours qu'elle leur jouait. Elle n'était pas mauvaise élève pour autant, bien au contraire : elle résolvait tous les problèmes avec une rapidité étonnante et était particulièrement douée en langues et en mathématiques.

Après l'école primaire, Maria fréquentait le Frauenstudium, une école pour jeunes filles du mouvement féministe d'alors. Si elle avait toujours eu l'intention de mener des études universitaires, il n'était pas du tout simple pour une femme d'entrer à l'université, à l'époque. Le Frauenstudium avait justement été créé afin de préparer des jeunes filles à réussir le concours d'entrée à l'université. Mais deux ans après l'arrivée de Maria, l'école dû fermer à cause de l'inflation. Alors, plutôt que de continuer un an de plus dans une école de préparation, où elle aurait été la seule jeune fille, Maria décida de passer tout de suite son baccalauréat. Ses camarades n'en revenaient pas.

Et pourtant, elle réussit. Maria Goeppert fut admise à l'âge de 17 ans en mathématiques à l'université de Göttingen.

La vie universitaire dans cette ville était marquée par des personnalités fortes et stimulantes, et Maria aussi devint rapidement une légende. Les étudiants la baptisèrent « la plus belle fille de Göttingen » et sa réputation alla même bien au-delà de la ville universitaire, puisque son futur mari, l'américain Joe Mayer, avait déjà entendu parler de la « lointaine princesse » par des étudiants revenus de Göttingen. Il s'en rappela lorsqu'il vint à Göttingen en 1924 pour étudier la chimie. Après la mort de Friedrich Goeppert, Mme Goeppert avait ouvert une pension pour étudiants. Ce ne fut pas par hasard que Joe Mayer s'y rendit pour chercher une chambre. Une fille ravissante lui ouvrit la porte...

Entre-temps, Maria s'intéressait de plus en plus pour la physique : « Les mathématiques me semblaient être trop énigmatiques. La physique est aussi un jeu d'énigme mais l'énigme est posée par la nature, non par l'homme ». Sa première rencontre avec la physique moderne remonte au temps où elle était encore au Frauenstudium. David Hilbert, qui habitait la maison voisine de celle des Goeppert, tint une série de cours sur les derniers développements de la physique atomique. Il tenait à avoir toujours une femme comme invitée d'honneur et d'ordinaire, c'était « celle dont il s'était momentanément épris ». Mais un jour où il ne savait pas qui inviter, il tomba par hasard sur la fille du voisin et lui demanda si elle ne voulait pas assister au cours. Ce fut un grand honneur pour Maria ! Elle informa ses parents qu'elle n'irait pas à l'école ce jour-là, mais à la présentation de Hilbert. « Comme j'avais mauvais caractère, ils m'ont laissé aller. (...) J'ai beaucoup appris, c'était vraiment très intéressant ».

En peu de temps, Maria rejoignit le cercle d'étudiants du professeur Max Born, l'un des plus grands pionniers de la nouvelle physique quantique. Il était également musicien et grand amateur de poésie. Un jour de l'année 1927, elle rencontra Max Born dans la rue alors qu'il se rendait à un séminaire de physique. « Pourquoi ne pas venir aussi ? », lui proposait-il. Après chaque séminaire, il avait l'ha-

bitude de faire avec ses étudiants une promenade, durant laquelle ils discutaient avec enthousiasme de tous les sujets de physique.

Maria Goeppert avait commencé ses études universitaires à l'époque où Göttingen se trouvait au centre d'une révolution de la physique mathématique. En 1925, le professeur Werner Heisenberg de Göttingen développa la mécanique matricielle, une tentative pour comprendre précisément les phénomènes du domaine microscopique en termes mathématiques.

Le caractère inédit de sa théorie et l'apparente impossibilité de la réconcilier avec les conceptions fondamentales traditionnelles de la physique, menèrent à une profonde crise intellectuelle. D'un côté, la théorie de Heisenberg engloba une masse de données empiriques, de l'autre côté elle n'était qu'une ossature purement mathématique, « *un squelette d'une sécheresse effroyable* » comme le dit Schrödinger, dont les conceptions physiques normales ne pouvaient rien faire. On pouvait presque parler de formule magique.

Toutes les tentatives de rendre cette mécanique quantique plus accessible à l'intuition échouèrent. Certains physiciens comme Niels Bohr pensaient que la difficulté était inévitable et qu'en matière de la compréhension causale des processus physiques, l'esprit humain avait atteint une limite absolue. Dans cet esprit, Heisenberg et Bohr introduisirent dans la physique la notion « d'indétermination » du monde physique, c'est-à-dire l'impossibilité, en principe, de mesurer simultanément certains paramètres physiques. Les travaux de Max Born furent à l'origine de l'« *interprétation probabiliste* » de la mécanique quantique, selon laquelle la théorie ne prévoyait et ne pouvait prévoir que la probabilité relative des différents résultats possibles pour ce qui concerne les incidents microscopiques individuels. Pour Niels Bohr, la capacité de prévoir était limitée non seulement dans le cas de la théorie quantique d'alors, mais pour toutes les théories concevables !



A gauche David Hilbert (1862-1943) fut l'un des plus grands mathématiciens de son époque. A droite, Max Born (1882-1970), pionnier de la physique quantique. C'est auprès de lui que Maria Goeppert acheva son doctorat.

Depuis cette époque, il existe le danger de voir la physique théorique transformée en un jeu magique de mathématiques formelles, sans guère s'intéresser à la question cruciale pour toutes les sciences : « Pourquoi ? ». Einstein et Schrödinger mirent en garde contre ce danger ; ils attribuaient le manque de clarté de la mécanique quantique au fait que l'on n'avait pas sondé suffisamment loin dans le domaine microscopique. Les succès du formalisme mathématique seraient payés trop cher, disaient-ils, si, comme Niels Bohr, on érigeait notre ignorance en un dogme. Mais Einstein et Schrödinger ne surent pas présenter d'alternative adéquate. Ils furent mis en minorité lors de la Conférence de Solvay et traités de dissidents. La physique théorique actuelle a plus ou moins continué sur le chemin emprunté à l'époque.

Maria ne se préoccupait cependant pas beaucoup des problèmes philosophiques de la physique quantique. Elle s'intéressait avant tout aux applications de la nouvelle théorie. Rares furent ceux qui maîtrisèrent si vite et si bien la difficile ossature mathématique de la physique quantique que Maria Goeppert. Son mari Joe devait remarquer plus tard : « Ma-

ria était toujours beaucoup plus forte en théorie. Tout ce que je sais de la physique quantique, je l'ai appris d'elle ». En 1930, elle acheva son doctorat auprès du professeur Born. Sa thèse, qui est encore aujourd'hui considérée comme « *un chef d'œuvre de clarté et de concret* » (d'après Eugène Wigner), défricha un tout nouveau domaine de la physique et l'optique : le traitement théorique des processus multiphotoniques.

Jusque là, la physique quantique s'était intéressée presque exclusivement aux processus simples d'absorption et d'émission d'un quantum de lumière par un atome. Or, Maria Goeppert se mit à étudier, entre autres, le cas où un atome absorbe deux quanta de lumière et réfléchit ensuite l'énergie absorbée par un seul quantum d'une longueur d'onde plus courte. Ce processus devait avoir de vastes implications théoriques et aussi technologiques. Mais à l'époque, on n'était pas suffisamment avancé sur le plan expérimental pour pouvoir observer directement le phénomène qu'elle anticipait, en l'absence d'une source de lumière suffisamment intense. La mise au point du laser a complètement comblé cette lacune. Aujourd'hui, les processus multipho-

toniques sont étudiés avec grand intérêt par de nombreux scientifiques.

C'est avec ces travaux de pionnier que prit fin le séjour de Maria Goepfert à Göttingen. Joe Mayer, son mari depuis peu, terminait ses études de chimie et se vit offrir un poste à l'université Johns Hopkins de Baltimore, aux Etats-Unis. Les jeunes mariés devaient décider s'ils voulaient partir pour l'Amérique. A l'époque, la situation politique n'inquiétait pas encore Maria, mais le souhait de son mari et la difficulté pour une femme d'obtenir un poste dans une université allemande la décidèrent à partir. En Amérique, cela pouvait être plus facile.

Un jour du printemps 1930, la jeune physicienne se tenait sur le pont du bateau et regardait, pleine d'espoir, les côtes de son nouveau pays qui s'approchaient.

Le Projet Manhattan

Pendant ces mêmes années, les Etats-Unis faisaient face à la crise la plus difficile qu'ils avaient affronté depuis la guerre de Sécession. Le fameux « vendredi noir » n'était que le début de la grande dépression économique qui allait sévir dans les années suivantes. Des dizaines de millions de gens étaient au chômage, des millions de familles perdaient leurs moyens de subsistance et leur épargne, des millions de déracinés, jeunes et vieux, sillonnaient le pays à la recherche de nourriture et de travail. La crise — qui fit aussi sombrer la république de Weimar — était globale.

L'accueil à Baltimore ne fut pas, aux yeux de Maria Goepfert-Mayer, particulièrement encourageant. Elle n'obtint pas de poste académique, seulement la possibilité d'aider un membre de l'Institut de Physique à traiter son courrier en langue allemande, pour un salaire de quelques centaines de dollars par an. Dans cette période de crise, pouvait-on espérer plus ? Elle disposait au moins d'une petite pièce sous le toit de l'Institut où elle pouvait travailler. Maria

était d'abord choquée par la vie sociale à l'université : en dépit du « progressisme » américain, il existait à bien des égards une plus forte séparation des sexes qu'à Göttingen. Souvent, seuls les hommes étaient invités aux soirées, et les femmes devaient se contenter de rester à la maison ou de se retrouver dans les « cercles de femmes », où les sujets de discussion se limitaient aux enfants et aux emplettes.

Mais peu à peu, elle développe une collaboration fructueuse avec quelques scientifiques de Johns Hopkins, tout d'abord avec son mari Joe, mais aussi avec le chimiste Karl Herzfeld et l'expérimentateur génial R.W. Wood. Elle approfondit des notions de chimie qui seront décisives dans ses travaux ultérieurs. D'un autre côté, elle était pratiquement la seule personne à l'université à avoir maîtrisé les instruments théoriques de la mécanique quantique. Leur collaboration donna lieu, entre autres, à des recherches sur le comportement de l'hydrogène dans le palladium et d'autres métaux — thème qui, depuis les expériences sur la fusion froide, se trouve à nouveau au centre des débats scientifiques et qui pourrait avoir un rôle important à l'avenir dans le stockage de l'hydrogène. En même temps, par ses recherches sur la physique des matières colorantes, Maria Goepfert-Mayer attire l'attention d'industriels et d'ingénieurs.

Le monde était alors secoué par des événements dramatiques. En 1931, le Creditanstalt de Vienne s'effondre, suivi peu après par la Banque de Darmstadt ; presque tous les pays européens étaient aux prises avec une terrible crise économique. La république de Weimar sombre, et en janvier 1933, Hitler accède au pouvoir. Trois mois plus tard, la tristement célèbre « loi sur le rétablissement du fonctionariat professionnel » est adoptée. Des centaines de professeurs d'origine « non aryenne » sont écartés. Parmi eux le professeur de Maria, Max Born, qui, comme beaucoup d'autres grands scientifiques en Allemagne, était juif. Il quitte aussitôt le pays, suivi de bien d'autres. En Angleterre et en Amérique se créent de nombreux comités d'aide aux sa-

vants émigrés ou persécutés. En dépit de la naissance d'un premier enfant, Maria Mayer contribue activement à la mise sur pied d'un des comités aux Etats-Unis. Sa maison de Baltimore deviendra un lieu de rencontre pour de nombreux émigrés scientifiques qui quitteront l'Europe.

Maria est une mère enthousiaste. Après une petite fille Marianne, elle donnera naissance en 1938, à sa grande joie, à un fils Peter. Malgré les pressions supplémentaires, elle ne veut pas laisser tomber ses recherches. Son mari Joe partage l'avis du père Goepfert selon lequel Maria ne doit pas être une simple femme au foyer. Sa résolution est facilitée par la visite de physiciens exceptionnels, comme Edward Teller, qui stimulent le climat scientifique à Baltimore. Maria Goepfert-Mayer aura l'occasion de donner des cours pour des étudiants en physique avancée. Ses présentations sont très bien organisées et exceptionnellement poussées du point de vue technique. Sa virtuosité en mathématique en étonnera plus d'un. En collaboration avec son mari, Maria écrira un manuel sur la mécanique statistique qui sera l'un des plus utilisés.

Entre-temps, le couple Mayer est presque devenu légendaire parmi les étudiants de Johns Hopkins ; on parle avec un rien de romantisme de « Joe et Maria ». Mais Joe est soudainement renvoyé. Ses amis soupçonnent que la décision est dirigée en grande partie contre Maria. Herzfeld fait remarquer qu'« il y avait parmi quelques membres de l'Institut des préjugés considérables à l'égard des femmes, et on pensait peut-être aussi que trois Allemands — moi-même, James Franck et Maria — faisaient un peu trop déjà. En même temps, certains étudiants se sont plaints des cours de chimie de Joe, considérés comme « trop modernes ». Joe, qui était un pédagogue extraordinaire, exigeait de ses étudiants des connaissances de la physique moderne, comme c'est aujourd'hui indispensable en chimie. » Sur ce dernier point, Joe était certainement influencé par sa femme Maria.

Malgré cela, Joe retrouve une place à l'université de Columbia à New

York. Juste avant de s'y installer, il assiste avec sa femme à un congrès de la physique à Washington où Niels Bohr — qui vient d'arriver d'Europe — présente les dernières nouvelles sur la découverte de la fission atomique par Hahn et Strassmann. Pendant la présentation, quelques physiciens quitteront discrètement la salle pour aller faire leurs propres expériences. Avant la fin du congrès, les Mayer accompagnent leur ami Robert Fowler à Johns Hopkins, où, en très peu de temps, il réussira à confirmer le phénomène de fission dans son propre laboratoire. Cette découverte fit sensation au sein de la communauté scientifique américaine. Mais sur les visages de Bohr et d'autres qui arrivaient d'Europe, on voyait plus d'inquiétude que de joie. Ils voyaient la grande guerre se préparer et se demandaient ce que le déchaînement de l'énergie de l'atome signifierait pour l'avenir.

Après l'aménagement près de New York, Maria fréquentera de plus en plus souvent le milieu des chercheurs nucléaires. A la recherche d'un logement décent, la famille Mayer prendra contact avec Enrico Fermi et sa femme Laura ; ils partageront une maison à Leonia et développeront de forts liens d'amitié. Les Mayer seront également proches du grand chimiste Harold Urey.

Fermi propose à Maria une tâche qui, par rapport à sa confrontation antérieure avec Ida Noddack (voir *Fusion* N°38), n'est pas dépourvue d'ironie : elle devait essayer de prédire sur le plan théorique les propriétés chimiques des éléments transuraniens — non pas les produits de fission que Fermi (en 1934 et 1938), et aussi Hahn, Meitner et Joliot-Curie avaient pris à tort pour des transuraniens — mais des véritables éléments au-delà de l'uranium qu'on n'avait pas encore découverts. Maria s'y consacre avec enthousiasme et parvient, par approximations mathématiques, à une prédiction qui allait s'avérer plus tard d'une exactitude étonnante. C'est ainsi que les éléments transuraniens devaient composer une rangée dans le système périodique, tout comme les « terres rares ». Ce travail ne sera pas sans conséquences

dans le développement de l'énergie nucléaire, puisque le deuxième transuraniens n'est autre que le plutonium.

Jusque là, Maria ne disposait que d'une salle de travail à Columbia, sans avoir de poste rémunéré. Mais peu après l'attaque contre Pearl Harbor, on lui proposa un poste de professeur à mi-temps à l'université Sarah Lawrence pour femmes. Quelques mois plus tard, au printemps 1942, Harold Urey demande à Maria si elle serait prête à travailler dans un groupe dont les recherches pourraient avoir un effet décisif sur l'issue de la guerre : il s'agissait de la mise au point de procédés pour la séparation de l'isotope d'uranium. Maria accepte. Elle participera au Projet Manhattan.

Elle ne doit en parler à personne en dehors du groupe, même pas à son mari. Tout est couvert par le plus grand secret. Elle s'efforcera quand même à faire comprendre une chose à son mari et à ses enfants : « *Je ne travaille pas contre l'Allemagne, mais contre Hitler* ». C'est seulement après la fin de la guerre qu'elle pourra leur expliquer ce qu'elle avait fait pendant trois ans.

Le Projet Manhattan fut une entreprise unique dans l'histoire de la science et la technique.

D'un côté, il s'agissait d'un projet de guerre, d'une question littéralement de vie ou de mort. A cette époque, la guerre totale avait plongé la moitié de la planète dans des horreurs sans nom, des villes et des campagnes étaient dévastées, des millions d'hommes perdaient leur vie sur les champs de bataille d'Europe, d'Afrique du Nord et du Pacifique, la machine de mort nazie tournait à toute vitesse. Plus que jamais, le cours du conflit serait déterminé par les développements techniques accomplis pendant la guerre même. La technique du radar changea radicalement l'issue de la guerre aérienne, de la même manière que le sonar et les sous-marins en ce qui concerne la guerre maritime. Pour la première fois, on déploya des avions à réaction et la première fusée spatiale, le A4, fut lancée de Pennemünde, ouvrant ain-

si la voie au développement de fusées pouvant atteindre des pays lointains en quelques minutes. En Amérique, on craignait qu'une percée technique inattendue, même dans la dernière phase de la guerre, pût faire basculer le conflit. Par conséquent, pour les collaborateurs du Projet Manhattan, c'était une course contre la montre.

D'un autre côté, le Projet Manhattan n'était en rien comparable à aucun autre projet technique de guerre. En effet, il fallait découvrir et maîtriser un processus physique totalement nouveau, dont on ignorait l'existence même quelques années plus tôt. De nombreuses questions scientifiques n'avaient pas encore trouvé de réponse, sans parler de tous les problèmes techniques qu'on ne pouvait guère prévoir au début. En très peu de temps, il fallait créer tout un nouveau domaine de la technique, à partir d'un phénomène exotique sur lequel seule une poignée de physiciens travaillait au début de la guerre.

On comprend dès lors pourquoi une petite partie seulement des travaux portait exclusivement sur la construction d'armes nucléaires. La grande majorité des scientifiques du projet étudiaient des problèmes relatifs à la simple utilisation technique de l'énergie nucléaire : la production et le traitement de l'uranium, la séparation industrielle des isotopes, le comportement des neutrons interagissant avec les matériaux les plus divers, l'examen des propriétés chimiques et radiologiques des produits de fission, le contrôle des réactions en chaîne, le développement des techniques de mesure nucléaires, la manipulation des substances fortement radioactives, la protection biologique contre les rayonnements, ... Toutes ces questions étaient d'une importance cruciale pour l'utilisation du nucléaire civil. En fin de compte, le prédécesseur de tous les réacteurs atomiques fut l'installation construite à Chicago, sous la direction d'Enrico Fermi qui, le 2 décembre 1942, produisit la première réaction en chaîne contrôlée.

De même, les travaux de Maria Goeppert-Mayer dans le groupe

étaient caractérisés pour l'essentiel par des études et des contributions fondamentales au développement de la technique nucléaire moderne. D'abord, elle s'intéressait aux propriétés thermodynamiques de l'hexafluorure d'uranium — cette composante d'uranium qui encore aujourd'hui est le point de départ de la production du combustible nucléaire pour les réacteurs. L'autre grand domaine de ses recherches était la possibilité d'enrichir l'Uranium 235 par des processus photochimiques. Plus tard, on allait abandonner cette option en faveur du procédé de diffusion gazeuse. Si ses travaux dans ce domaine ne servirent pas directement dans la poursuite du Projet Manhattan, ils sont redevenus d'actualité avec le développement des lasers. Depuis plusieurs années, on sait réaliser la séparation des isotopes par laser.

L'équipe portant le nom de code « Substitute Alloy Materials » (SAM — alliages de substitution), dans laquelle travaillait Maria, fut considérablement renforcée en l'espace de quelques mois. Au début, trois scientifiques travaillaient sous sa direction ; ils étaient bientôt vingt, puis plus tard, une centaine de chercheurs participaient directement ou indirectement au SAM. Outre sa participation à mi-temps au SAM — Maria devait continuer à assurer à Sarah Lawrence ses cours de base sur l'ensemble des sciences naturelles — d'autres défis se présentèrent auxquels elle consacrait ses soirées et ses week-ends.

Outre SAM, Edward Teller déploya Maria dans un autre groupe du Projet Manhattan, dénommé « Opacity Project ». On y menait des recherches théoriques fondamentales sur le comportement des matériaux et des rayonnements à très haute température. Ces études dépassaient de très loin le cadre du Projet Manhattan, elles touchaient aux questions fondamentales de l'astrophysique et, avant tout, de la possibilité de maîtriser la fusion nucléaire, la source énergétique des étoiles. Après la guerre, Edward Teller allait devenir le « père de la bombe à hydrogène », cette arme thermonucléaire dans laquelle la réaction de fusion est déclenchée à

Maria Goeppert-Mayer (1906-1972).

En plus de ses travaux sur la technique des réacteurs, elle eut l'occasion de se pencher sur des problèmes fondamentaux de la physique nucléaire. A l'Institut des études nucléaires, où les plus grands physiciens nucléaires s'étaient regroupés, régnait une atmosphère foisonnante d'idées nouvelles et de découvertes. Pendant la guerre, les gens n'avaient ni le temps, ni les loisirs de s'intéresser ou de réfléchir aux conséquences les plus profondes de la connaissance nouvelle du noyau atomique. Maintenant, cela leur était possible et ils considéraient l'univers avec enthousiasme en se demandant quels secrets pouvait-on découvrir avec l'aide de ces nouveaux savoirs.



des températures de plusieurs dizaines de millions de degrés. Aujourd'hui, on investit beaucoup dans le développement d'un réacteur de fusion thermonucléaire pour la production civile.

Maria Goeppert-Mayer n'a participé que marginalement au développement de la bombe même. Elle était tourmentée par l'idée que la bombe atomique puisse être lâchée sur l'Allemagne.

Les « nombres magiques »

Maria Goeppert-Mayer était naturellement destinée à aller à Chicago. Le groupe de Chicago lui dit : « *Nous avons depuis longtemps envisagé de t'offrir un poste, mais nous savions que tu ne viendrais pas sans Joe. Maintenant, Joe est engagé, et toi aussi !* ». Ils tra-

vaileront tous les deux à l'Institut des études nucléaires, mais seul Joe recevra un salaire. Une règle de l'université contre le « népotisme » interdisait que plusieurs membres d'une même famille obtiennent un poste rémunéré. Mais peu après, elle obtiendra tout de même un poste à mi-temps au laboratoire national d'Argonne. Cette période, où elle travaille simultanément à l'université et à Argonne, sera la plus fructueuse de sa vie. C'est là qu'elle fera sa grande contribution à la physique nucléaire qui lui vaudra en 1963, avec Hans Jensen, le prix Nobel.

Outre la recherche fondamentale, le laboratoire Argonne avait pour mission de développer l'utilisation du nucléaire pour la production d'énergie. Là, Maria eut l'occasion d'utiliser ses talents pour résoudre des problèmes mathématiques complexes à partir de la physique appliquée. Entre autres, elle devait calcu-

ler pour la première fois, avec l'aide d'une calculatrice électronique, le comportement d'un réacteur surgénérateur. Pour ce faire, elle programma la première calculatrice électronique du monde — l'ENIAC de John von Neumann.

En plus de ses travaux sur la technique des réacteurs, Maria eut l'occasion de se pencher sur des problèmes fondamentaux de la physique nucléaire. A l'Institut des études nucléaires, où les plus grands physiciens nucléaires s'étaient regroupés, régnait une atmosphère foisonnante d'idées nouvelles et de découvertes. Pendant la guerre, les gens n'avaient ni le temps, ni les loisirs de s'intéresser ou de réfléchir aux conséquences les plus profondes de la connaissance nouvelle du noyau atomique. Maintenant, cela leur était possible et ils considéraient l'univers avec enthousiasme en se demandant quels secrets pouvait-on découvrir avec l'aide de ces nouveaux savoirs. L'Astrophysique était au centre de ces nouvelles connaissances. Quels sont les processus nucléaires qui ont lieu dans les étoiles ? D'où viennent les particules d'énergie cosmique qui irradient la Terre de tous les coins de l'espace ? Comment les amas de galaxies et d'étoiles se forment-ils ? Que se passe-t-il pendant l'explosion d'une Supernova ?

Il y avait une question d'un intérêt tout particulier pour les physiciens de l'Institut d'études nucléaires, surtout pour l'ami de Goepfert-Mayer, Edward Teller. Quelle est l'origine des éléments chimiques sur la Terre et dans le cosmos ? Comment pouvait-on expliquer les courbes de fréquence excessivement compliquées que les Noddack et d'autres avaient établies à l'aide d'investigations sur des minéraux et météorites ? Teller voulait intéresser Goepfert-Mayer à ces travaux. Bientôt, elle fut si passionnée qu'elle ne pouvait plus les lâcher. C'est un problème qui touche le fond de la physique nucléaire.

Depuis le début du XX^{ème} siècle, on supposait, (l'hypothèse de Prout) que tous les éléments découlaient de « l'élément premier », l'hydrogène. Avec la découverte du proton et du

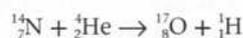
neutron et les travaux d'Heisenberg en 1934, l'on croyait connaître la structure du noyau atomique des éléments chimiques. Selon Heisenberg, le noyau atomique était composé d'un nombre donné de protons, correspondant au nombre ordinal Z du système périodique, et d'un certain nombre de neutrons. La somme totale de neutrons et de protons constitue le nombre de masse A, puisqu'elle est à peu près proportionnelle à la masse du noyau. Le nombre de protons joue un rôle important dans les caractéristiques chimiques de l'élément, puisqu'il détermine la charge électrique du noyau et aussi, de ce fait, le nombre d'électrons dans leurs couches respectives, qui sont à leur tour les principaux acteurs des processus chimiques. On a développé un moyen de notation qui indique la composition du noyau : le nombre de masse est écrit en haut et le nombre ordinal en bas, devant l'élément. Ainsi, par exemple, on peut écrire l'isotope le plus fréquent du carbone : $^{12}_6\text{C}$, ce qui signifie que le noyau contient 6 protons, mais un total de 10 particules ou nucléons, dont $10 - 6 = 4$ neutrons.

On pourrait en conclure que, dans l'univers réel, les éléments chimiques et leurs isotopes se sont vraiment construits suivant la méthode simple que la notation que nous avons adoptée pourrait suggérer : autrement dit, par ajout progressif de protons et de neutrons. Mais cela n'a pas pu être aussi simple. Tout d'abord, parce que le neutron ne peut « vivre en plein air », c'est-à-dire en dehors du noyau, qu'environ 25 minutes en moyenne. Après, la particule se décompose, abandonne un électron, et se transforme en proton. Comme les noyaux atomiques contiennent beaucoup de neutrons, le Créateur aurait dû combiner très vite son stock original de neutrons en éléments, sinon ils auraient été perdus !

En plus de cela, les différents noyaux manifestent de grandes différences en dépit de l'apparente progression équilibrée des protons et des neutrons. Certains sont stables, d'autres sont instables ou radioactifs. Beaucoup de noyaux qu'on peut imaginer de manière purement abstraite

— par exemple un noyau avec deux protons et cinq neutrons — n'existent pas dans la réalité. Les particules ne se combinent pas n'importe comment. En outre, l'énergie de liaison, nécessaire pour dissoudre complètement un noyau, varie beaucoup de d'un noyau à l'autre. Tous ces éléments se reflètent, à première vue, dans une distribution de fréquences irrégulière et apparemment étrange des éléments dans le cosmos. Elles tendent aussi à démentir l'idée de l'origine simple et « sans complication » des éléments chimiques.

Bientôt, les connaissances sur la formation et la transformation des noyaux allaient dépasser le stade schématique. On avait constaté entretemps nombre de processus au cours desquels certains noyaux pouvaient engendrer de nouveaux noyaux. Il s'agissait tout d'abord des modifications accompagnant la radioactivité que Marie Curie avaient déjà étudiées : les transmutations bêta et alpha. Au cours de ce processus, un noyau peut « voyager » graduellement à travers le système des éléments et des isotopes. Plus tard, on constata de multiples réactions de noyaux déclenchées par la collision de deux noyaux à haute énergie. Ces réactions avaient d'abord été observées par Ernst Rutherford en 1919, lorsqu'il bombarda de l'azote avec des particules alpha (noyaux de l'hélium) et vit que les noyaux d'azote se transformèrent en noyaux d'oxygène après avoir lâché un proton. Aujourd'hui on décrit cette réaction ainsi :



Ce fut le premier exemple d'une « réaction de fusion » par laquelle un noyau lourd était formé à partir de deux noyaux plus légers. Les réactions entre isotopes d'hydrogène sont encore plus importantes. Par exemple, un noyau de deutérium et un noyau de tritium vont, après abandon d'un neutron, former un noyau d'hélium. Cette réaction libère une grande quantité d'énergie et pourrait être exploitée dans les futurs réacteurs de fusion. Elle nécessite néanmoins une très grande « énergie d'ignition » et ne fonctionne à une

échelle significative, dans des conditions normales, qu'à partir de températures d'un ordre de grandeur de 100 millions de degrés.

Cependant, pour ce qui nous préoccupe, le plus important, c'est de reconnaître qu'il serait possible, par l'intermédiaire de réactions de fusion successives, en partant de l'hydrogène, de faire la synthèse de tous les éléments connus du système périodique. Au laboratoire d'Argonne et dans de nombreux autres, on étudiait diverses réactions de fusion à l'aide d'accélérateurs de particules. On se demandait bien sûr à quel point une réaction qu'on produit artificiellement dans un accélérateur correspond à un processus réel de la nature. En effet, l'énergie nécessaire pour produire les éléments lourds est énorme ; notre soleil, par exemple, n'aurait jamais été capable de produire des quantités significatives d'éléments au-delà du fer. Une telle synthèse n'aurait été concevable que dans des conditions tout à fait exotiques — celles d'une explosion dite de Supernova. De là vint l'hypothèse (encore soutenue au-jour d'hui) selon laquelle notre système solaire fut formé des restes cosmiques d'une explosion de supernova.

Aux réactions de fusion que l'on a appris à produire dans les accélérateurs depuis les années 20, s'ajoutent les processus qu'on a créés en irradiant divers éléments avec des neutrons, dont bien sûr la « brebis noire » de la physique atomique — la fission nucléaire. Là, la fission d'éléments lourds produit des éléments plus légers, exactement le contraire des réactions de fusion.

Peut-être qu'il existe dans ce domaine encore mal connu, « beaucoup d'autres réactions nucléaires » — pour reprendre l'expression d'Ida Noddack — que nous ne soupçonnons même pas aujourd'hui. Le phénomène de la « fusion froide » semble indiquer que tel soit le cas.

Etant donné la multiplicité si complexe des processus nucléaires, il n'était certainement pas réaliste de vouloir reconstruire globalement les processus de formation des éléments



Edward Teller voulait intéresser Goepfert-Mayer à ces travaux. Bientôt, elle fut si passionnée qu'elle ne pouvait plus les lâcher.

chimiques dans l'univers. Y compris parce qu'on ne pouvait que spéculer sur les contraintes astrophysiques. C'est pourquoi Edward Teller et Maria Goepfert-Mayer choisirent une autre approche. Sans connaître dans le détail les études du couple Noddack, ils suivirent plus ou moins la voie que ceux-ci avaient proposé dans leurs travaux des années 30.

Par conséquent, ils allaient partir de la fréquence de distribution des éléments dans l'espace. Cette distribution présentait, sous forme d'« équilibre gelé », le résultat global des processus nucléaires se produisant dans la nature. Les Noddack mettaient en avant l'hypothèse selon laquelle la distribution des fréquences est une « fonction universelle de la matière » qui reflète la physique du noyau atomique. Autrement dit, malgré la multiplicité extrême des processus nucléaires et de la nature inconnue des contraintes, ce qui apparaît est ce que l'on attendait du point de vue de la physique nucléaire seule. Si cette hypothèse est exacte, il est alors légitime de se baser sur la distribution des fréquences pour conjecturer sur la physique du noyau atomique.

Depuis les années 30, la physique nucléaire avait bien sûr fait beaucoup

de progrès : notamment après la découverte de la fission nucléaire, on avait considérablement développé le modèle de la « gouttelette ». Suivant ce modèle, le noyau — bien que composé d'éléments discrets (protons et neutrons) — se comporte à certains égards comme un goutte liquide, dont les propriétés mécaniques sont influencées dans une large mesure par sa « tension superficielle ». Compte tenu de cette considération, et d'autres encore, on pouvait faire des prédictions quant à la stabilité et l'énergie de liaison de différents noyaux.

Dans le contexte de leurs recherches sur l'origine des éléments, Edward Teller et Maria Goepfert-Mayer mirent au point un modèle atomique plus raffiné et tentèrent de le concilier avec la distribution des fréquences. Pour Goepfert-Mayer, ce fut une raison pour examiner de plus près les données sur la fréquence des éléments. Ils furent alors frappés de voir que certains noyaux sont beaucoup plus fréquents que le modèle ne le prévoyait. Par l'intermédiaire d'une étude intensive des données, Goepfert-Mayer découvrit une autre régularité : certains nombres reviennent constamment en connexion avec des noyaux très stables. C'étaient les nombres qu'on appelle aujourd'hui encore dans la physique nucléaire les « nombres magiques ». Lors de son discours d'acceptation du prix Nobel, Maria allait expliquer :

« Lorsque Teller et moi écrivions sur l'origine des éléments chimiques, je suis tombée sur les nombres magiques. Nous avons trouvé quelques rares noyaux qui possédaient plus d'isotopes ou qui étaient beaucoup plus fréquents que ne pouvaient l'expliquer notre théorie ou une simple théorie du continuum. Puis j'ai découvert que ces noyaux avaient une propriété commune : ils avaient 82 neutrons, quel que soit le nombre de protons, ou bien ils avaient 50 neutrons. 82 et 50 sont les « nombres magiques ». Le fait que ces noyaux se présentent plus souvent, tend à indiquer qu'ils ont une stabilité spéciale qui a dû forcément jouer un rôle dans la formation des éléments.

« J'ai pris connaissance par la suite des travaux d'Elsasser datant de 1933.

[Elsasser avait trouvé des régularités semblables et avait utilisé le terme « nombres magiques ».] Mais en 1948, on en savait beaucoup plus sur les propriétés du noyau atomique qu'à l'époque d'Elsasser. Les nombres magiques ont été non seulement confirmés par les nouvelles connaissances, mais ils se manifestaient de manière bien plus claire dans tous les processus atomiques possibles. Il n'était plus possible de maintenir qu'il s'agissait de rencontres fortuites.

« Les nombres magiques, comme nous le savons aujourd'hui sont 2, 8, 20, 28, 50, 82, et 126.

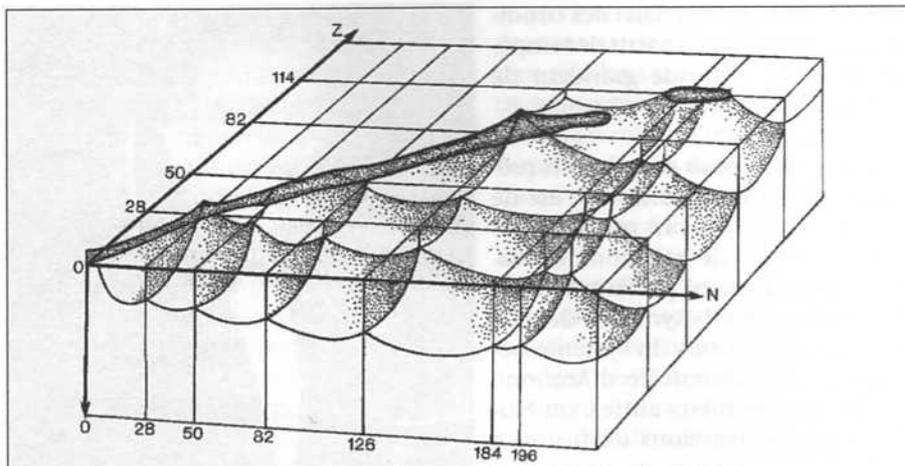
« Zn (zinc), $Z=50$, possède, de tous les éléments, le plus grand nombre d'isotopes stables, 11. Il y a six éléments stables avec 50 neutrons et sept avec 82 neutrons. D'habitude, il existe seulement deux ou trois noyaux possédant le même nombre de neutrons.

« Depuis longtemps, on sait que le noyau d'hélium, qui contient deux neutrons et trois protons, est fortement lié ? Il est impossible de rattacher un autre nucléon à ce noyau, c'est-à-dire que ${}^3\text{Li}$ et ${}^5\text{He}$ n'existent pas. Le nombre 8, nous le rencontrons dans ${}^{16}\text{O}$. Il faut une énergie inhabituelle pour séparer un neutron de son noyau. Par contre, le neuvième neutron se rattache très facilement à la couche 8-8 dans ${}^{17}\text{O}$.

« Avec des noyaux plus lourds que ${}^{40}\text{Ca}$, le nombre de protons est inférieur au nombre de neutrons, et partant de là, il devient clair que la stabilité dépend du proton ou du neutron, et pas seulement de la somme des deux. »

Maria présenta de nombreux autres exemples montrant comment les noyaux ayant des « nombres magiques » de protons et de neutrons se distinguaient de tous les autres noyaux. Il est surtout impressionnant de voir les changements radicaux de l'énergie qui est libérée dans le processus de transmutation lors de la transition entre un « noyau magique » et le noyau voisin.

Le rôle spécial qu'ont des nombres donnés de protons et de neutrons est difficilement cohérent avec le noyau considéré comme une « gouttelette ».



Représentation des éléments très lourds. Le nombre nucléaire Z est montré à l'arrière, le nombre de neutrons N à droite, et l'énergie potentielle en bas. Des noyaux stables se constituent là où des sommets apparaissent sur l'illustration, les nombres magiques.

Car suivant un « modèle continu » de ce type, les propriétés du noyau devraient varier progressivement et continuellement selon le nombre de nucléons dans le noyau. La stabilité dépendrait plutôt du nombre total de particules dans le noyau, et non du nombre de protons ou de neutrons pris séparément. L'existence de « nombres magiques » fait penser à la construction — semblable à l'oignon — des orbites d'électrons dans un atome. C'était l'idée qui fascinait le plus Goeppert-Mayer.

On savait que les orbites d'électrons étaient organisées en couches concentriques qui se remplissaient au fur et à mesure qu'augmentait le nombre d'électrons. Chaque couche contient un nombre maximum d'électrons et lorsqu'une couche est pleine, le prochain élément occupera la couche suivante. De là vient l'étonnante périodicité des propriétés chimiques des éléments que l'on voit dans les schémas de Mendeleev et de Mayer. Ces propriétés dépendent étroitement de la position de la couche extérieure, alors que les couches intérieures, déjà remplies, ont moins d'influence. C'est ainsi qu'au début du « remplissage » d'une nouvelle couche, des propriétés chimiques semblables à celles de la couche précédente se reproduisent. Les atomes dont les couches d'électrons sont entièrement remplies sont particulièrement marquants. On appelle ces éléments les gaz rares : hélium, néon,

argon, krypton, xénon, radon. Ils sont caractérisés par une exceptionnelle stabilité chimique et réagissent mal avec d'autres atomes. A cet égard, les gaz nobles sont à l'opposé des « noyaux magiques ».

Cette observation suggère une approche qui mène plus loin dans les secrets du noyau de l'atome. Maria écrit :

« Les données expérimentales qui justifient la notion des nombres magiques sont très claires et n'auraient guère pu se produire par hasard. Il semble utile de tenter de les expliquer de la même façon que les gaz rares. En effet, on pourrait tenter de copier les traits essentiels de la structure du noyau sur la structure connue de l'atome. »

Ce n'était pas la première fois que des savants se demandaient si le noyau pourrait présenter une certaine similitude avec la « superstructure » électronique de l'atome. Mais les physiciens théoriques se heurtèrent toujours à des difficultés au moment de vouloir comprendre l'analogie sous une forme strictement mathématique.

En première approximation, l'atome ressemble à un petit système solaire, où le noyau — le « soleil » — exerce une influence déterminante sur les électrons orbitant autour de lui. Par contre, on pense qu'il n'y a pas dans le noyau atomique de corps central qui attire mais que tous les

nucléons interagissent avec les autres. Une autre différence réside dans la nature même des forces qui rentrent en jeu. Contrairement aux forces électriques entre le noyau et les électrons, qui agissent sur des distances relativement grandes, les forces du noyau ne semblent avoir de l'effet qu'entre des nucléons directement voisins. De là, on a conclu à l'effet de « tension superficielle » sur lequel repose le modèle de la gouttelette. Cet effet ne semble pas avoir de contrepartie dans la physique des couches électroniques de l'atome. Pour cette raison, entre autres, les « experts » de la physique nucléaire, comme Eugene Wigner, avaient écarté l'idée du modèle en couches.

Des cas de ce type ne sont pas rares dans la recherche scientifique : des percées fondamentales sont réalisées par des « débutants », c'est-à-dire des jeunes chercheurs sans beaucoup d'expérience, ou bien par des spécialistes d'autres domaines ne connaissant pas encore tous les détails. Les nombreuses expériences et déceptions que les plus « anciens » ont accumulées au cours des ans les amènent souvent à adopter une approche trop conservatrice. Ce fut le cas de Wigner et d'autres grands physiciens du nucléaire qui avaient tenté en vain de développer un modèle en couches. Ils en étaient arrivés à penser que la spéculation sur les nombres magiques et les modèles en couches étaient une pure perte de temps. Même Teller se désintéressa de la question, se tournant vers d'autres domaines.

Mais Maria n'en démordit pas. Passionnément, elle continua à étudier les nombres magiques. Elle alla à l'encontre des physiciens de laboratoire, discutant dans les détails avec eux des données, et rassemblant tous les renseignements sur la stabilité et d'autres propriétés du noyau atomique qui pourraient suggérer une « structure d'oignon ». Bientôt le célèbre physicien Wolfgang Pauli la surnomma la « madone de l'oignon ».

Les enfants de Maria ont dû constater avec consternation que leur mère ne s'occupait pas d'eux aussi attentivement qu'avant. Elle était complè-

***Elle alla à l'encontre
des physiciens
de laboratoire,
rassemblant tous les
renseignements sur les
propriétés du noyau
atomique qui
pourraient suggérer une
« structure d'oignon ».
Bientôt le célèbre
physicien Wolfgang
Pauli la surnomma
la « madone de
l'oignon ».***

tement absorbée par les nombres magiques. Lorsque Goepfert-Mayer rentra à la maison, elle ne voulait qu'une seule chose, parler de ses dernières recherches avec son mari. Depuis le début, Joe l'a soutenue, persuadé en bon chimiste, que l'on ne devait pas se laisser trop impressionner par les difficultés que semblait poser l'explication théorique des nombres magiques. Les régularités étaient vraiment présentes dans la réalité, disait-il, et on ne pouvait les nier. Pour tout ce qui existe réellement, d'après Joe, on allait bien finir par trouver une explication raisonnable.

Au cours des premiers mois de 1948, Maria récapitula ses données sur les nombres magiques dans un article publié en 1949, dans le journal technique *Physical Review* (numéro 74, 1948, p. 235-39). Il fut lu avec beaucoup d'intérêt par des physiciens nucléaires à travers le monde. Ainsi, l'existence d'une structure du noyau nucléaire devint un fait reconnu par tous.

Et pourtant, la question-clé restait sans réponse : d'où viennent les nombres magiques 2, 8, 20, 50, 82, 126 ?

Comme il est dit plus haut, la comparaison avec la couche de l'élec-

tron de l'atome, que l'on croit bien comprise par la théorie quantique, était tentante. Mais les nombres magiques, dans le cas des électrons (en fait égaux aux nombres atomiques des gaz rares) sont 2, 10, 18, 36, 54, et 86, c'est-à-dire, à part le premier, des nombres différents.

Voyons, de manière simplifiée, ce qu'avance la théorie quantique sur les orbites possibles d'électrons dans l'atome. En fait, nous agissons, tout à fait comme le faisait Newton, en partant du fait que l'atome est fondamentalement un « système polymorphe », c'est-à-dire qu'il se compose de particules variées (le noyau atomique et les électrons appartenant à l'atome), agissant réciproquement les uns sur les autres. Le calcul mathématique des orbites serait cependant désespérément compliqué, même en mécanique classique. Pour cette raison, on a essayé de simplifier le problème. On considère, du point de vue d'un électron donné, que l'action totale d'un noyau atomique et des autres électrons ressemble grossièrement au mouvement des électrons dans une sorte de « puits de potentiel » de forme donnée. Bien sûr — et c'est la particularité de la mécanique ondulatoire de de Broglie et de Schrödinger — l'électron dans cette figure ne se comporte pas comme une petite sphère qui roule d'avant en arrière du puits. Nous devons plutôt nous représenter un type particulier d'onde qui se jette contre les barrières d'un « puits de potentiel ».

Les orbites stables des électrons correspondent aux moments où la partie de l'onde qui revient est en harmonie parfaite avec celle qui part, de telle sorte qu'une onde stationnaire soit formée. Pour cela, les ondes doivent correspondre exactement avec un certain nombre d'oscillations dans le puits. C'est la raison essentielle pour laquelle il existe un seul choix d'orbites et d'états pour les électrons. Ils sont d'abord déterminés par les fréquences des mouvements ondulatoires, qui correspondent aux énergies possibles des électrons. Mais en plus de la fréquence, il faut tenir compte d'une autre variante : d'une part, le processus se produit en trois dimensions et, d'autre part, l'élec-

tron a une qualité de rotation interne connue sous le nom de « spin », pouvant avoir deux orientations possibles selon le processus général.

Il s'en suit que, pour chaque valeur d'énergie possible, il existe différents états dont les énergies sont égales ou proches de cette valeur. Ainsi, les états se regroupent autour d'une série de niveaux d'énergie clairement déterminés. Chaque « faisceau » correspond à une couche d'électrons. Les états possibles sont « remplis » les uns après les autres par un nombre d'électrons qui augmente. Dans ce cas, les électrons sont tellement identifiés par les mouvements ondulatoires que deux électrons ne peuvent se trouver dans le même état (autrement, ils seraient identiques). Le regroupement des niveaux d'énergie explique pourquoi l'énergie de liaison du dernier électron effectue un « saut » avec un certain nombre d'électrons. Cela se produit après que les états d'un « faisceau » soient tous remplis ; le nouvel électron se trouve donc dans un autre domaine d'énergie. Du moins, c'est l'explication classique, ici très simplifiée.

Nous ne pouvons continuer dans l'explication détaillée de cette mécanique ondulatoire des couches électroniques. Cela nous permet de saisir d'une façon complète l'abondance de données sur les propriétés spectrales et chimiques des atomes. En particulier, les nombres des couches électroniques complètes ressortent clairement. Ils proviennent d'une construction géométrique relativement simple, la division de la surface d'une sphère au moyen de la fonction sphérique de Gauss.

Tout cela est très merveilleux, seulement les « enveloppes d'oignon » dans le noyau atomique donnent des nombres complètement différents ! Pour passer cette difficulté, on a vite perçu que le « puits de potentiel » doit de toute façon apparaître assez différemment dans le noyau atomique que dans les électrons de l'atome. En fait, il y avait déjà des indices pour penser que le profil était plus plat à l'intérieur du noyau. Avec l'hypothèse d'un « puits carré », les séries

de nombres suivants furent calculées : 2, 8, 20, 40, 70, 112.

Selon les études de Goepfert-Mayer, les propriétés véritables du noyau donnent les nombres magiques 2, 8, 50, 82, 126.

Ainsi, il semble que les nombres magiques au-dessus de 20 appartiennent à des séries différentes de celle des nombres au-dessous de 20. C'est là, de toute façon, que les autres scientifiques se sont arrêtés. Goepfert-Mayer raconte :

« Pour expliquer les nombres magiques, Elssasser essaya de prouver que le « puits de potentiel » est différent dans les noyaux plus lourds par rapport à un « puits carré ». Mais une recherche plus poussée montra clairement qu'un changement dans la forme du « puits », même une forme non réaliste, ne pouvait expliquer les nombres. C'était comme un puzzle. Nous possédions de nombreuses pièces (pas seulement les nombres magiques) et nous pouvions voir une certaine image apparaître. Nous avions l'impression que tout allait s'assembler, dès que nous pourrions ajouter une pièce de plus. On a trouvé la pièce, et tout s'expliqua merveilleusement bien.

« A cette époque, Fermi s'intéressait aux nombres magiques, et j'eus le grand avantage de pouvoir travailler avec lui, non seulement au début, mais aussi plus tard. Un jour, au moment où Fermi voulait quitter mon laboratoire, il me demanda : « Existe-t-il des indices quelconques d'un couplage spin-orbite ? » Seul quelqu'un ayant vécu avec les données aussi longtemps que moi pouvait donner la réponse : « Bien sûr, cela expliquerait tout », lui dis-je. Fermi restait sceptique.

« Il me laissa à ma numérogie. En 10 minutes, j'avais expliqué les nombres magiques et, après une semaine, une fois que j'eus couché tous les arguments sur le papier, Fermi n'était plus sceptique. »

L'idée ici est fondamentalement simple. Pour la comprendre schématiquement, nous devons nous repencher sur le problème des électrons dans l'atome. Nous avons déjà fait référence au spin, propriété interne d'un électron. Cette propriété corres-

pond plus ou moins au fait que l'électron possède une certaine orientation dans l'espace, en quelque sorte reliée à la dynamique interne de l'électron en tant que processus. Il est tentant de retrouver la représentation des livres scolaires d'un électron considéré comme une toute petite sphère : il nous faut représenter l'électron qui tourne comme une planète sur son axe (spin). L'axe correspondrait alors, avec l'ampleur du mouvement (ou, plus exactement, le moment angulaire de la petite sphère), au spin de l'électron. Si l'électron se déplace dans une orbite circulaire, on peut parler d'un second axe, c'est-à-dire l'axe de l'orbite qui est perpendiculaire au plan dans lequel l'électron se déplace.

Maintenant la question se pose de savoir comment les deux axes interagissent. Il est intéressant ici de comparer le microcosme de l'atome avec le macrocosme du système solaire. Dans le système solaire, toutes les planètes, sauf deux, tournent autour de leurs axes dans la direction dans laquelle elles tournent autour du soleil. L'axe de rotation des planètes forme ainsi un angle relativement petit par rapport à l'axe du système solaire, pour la Terre environ 23° (cette inclinaison de l'axe de la terre par rapport à l'axe du cercle n'est pas sans conséquences pour nous, puisqu'elle est à l'origine de l'alternance entre l'hiver et l'été.)

Maintenant, venons-en aux deux exceptions : Venus tourne dans la direction opposée à la précédente, et son axe de rotation forme un angle d'environ 180° avec l'axe du système solaire. En dehors de cela, l'axe de rotation de la planète Uranus, patronyme de l'élément uranium, forme un angle de 98°. L'axe de rotation est ainsi presque dans le plan du système solaire. Il serait évidemment très intéressant de savoir comment cela s'est passé.

Si nous retournons maintenant aux électrons dans l'atome, il faut remarquer que la nature de l'électron est différente de ce que l'image d'une petite sphère pourrait nous laisser croire. Un électron, pour autant que nous puissions le considérer comme

un être isolé, indépendant, c'est le résultat d'un processus compliqué, distribué sur l'ensemble de l'espace, et qui possède des propriétés ondulatoires. En outre, selon les expériences les plus diverses, tous les électrons ont, compte tenu des tailles, le même spin. Un moment angulaire précis est indissolublement lié de façon à l'électron ; les électrons ne peuvent « tourner plus lentement » sans cesser d'exister ! Seule la position dans l'espace du spin peut être changée.

Avec le spin des électrons individuels, les orbites électroniques ont aussi généralement une orientation spatiale qui correspond grossièrement à l'axe de rotation des orbites planétaires. Cependant, dans le cas de l'atome, cela n'a rien à voir avec le mouvement dans le sens classique puisque le « processus de l'électron » est depuis le début, distribué dans l'espace tout entier et que « l'orbite » est « reliée », si l'on peut dire avec l'électron même. Les scientifiques parlent, pour cette raison « d'un mouvement orbital » uniquement.

(La réalité dans le domaine microscopique paraît si étonnante que personne n'a trouvé jusqu'à maintenant une représentation intuitive qui ne fasse pas violence à la réalité en quelque point essentiel. Beaucoup de physiciens pensent même qu'une telle représentation est en principe impossible.)

Comme conséquence de la « fusion » déjà citée, le spin de l'électron ne peut se comporter de façon arbitraire par rapport au mouvement orbital, mais les deux axes sont toujours dans le même alignement. En d'autres termes, il n'existe que deux possibilités pour le spin d'un électron : dans la même direction ou dans la direction opposée de celle du mouvement orbital. En Anglais, on parle de « up » et « down ». L'exemple frappant d'Uranus ne pourrait être observé dans le domaine du microscope.

Voici le point décisif ! Si nous « construisons » un atome dans lequel nous « mettons en opération » les états possibles de l'électron, chaque état apparaîtra doublé si nous



Enrico Fermi s'intéressait aussi aux nombres magiques. C'est lui qui demanda à Maria Goepfert-Mayer de voir s'il y avait un couplage d'orbites.

tenons compte des deux orientations du spin. Pour cette raison, les couches fermées ont toujours un nombre égal d'électrons ; les électrons vont par paires, chaque électron avec des orientations de spin trouvées dans une configuration orbitale donnée ce qui est déterminant, c'est que, dans un atome soumis à des conditions normales, les deux orientations de spin ont exactement la même énergie. En d'autres termes, on a besoin du même effort pour arracher un électron donné, que son spin soit parallèle ou opposé au mouvement orbital. De la même façon, les deux états appartiennent au même faisceau.

L'hypothèse pour tenter d'expliquer les nombres magiques montre que les conditions dans le noyau sont, sous ce rapport, très différent de celles qu'on rencontre dans les couches électroniques. Les nucléons, protons et neutrons, à partir desquels le noyau est constitué (selon les idées actuelles) ont aussi un spin. Mais, dans ce cas, on suppose que l'orientation du spin par rapport au mouvement orbital a une influence considérable sur l'énergie, de telle manière que les nucléons dont le spin est dans la

même direction que leur mouvement orbital sont beaucoup plus liés que ceux ayant un spin opposé. Et, plus le mouvement de l'orbite correspondante est grand, plus l'effet est important.

Nous avons déjà fait allusion aux raisons pour lesquelles il fallait manier séparément les protons et les neutrons. Chaque catégorie de particule forme sa propre couche. Considérons l'exemple de la construction de la « couche de protons ».

L'hypothèse de couplage mentionnée plus haut suppose que certains états quittent chacun des faisceaux de valeurs d'énergie, et tombent à des valeurs considérablement plus faibles. Un nouveau « regroupement » d'états peut se créer. Si ces valeurs abaissées par le couplage spin-orbite tombent jusqu'au faisceau précédent, elles sont pour ainsi dire prises par les couches correspondantes ; celles-ci augmentent alors d'un nombre correspondant d'états. C'est ainsi que le nombre de protons dans une couche dévie des valeurs calculées de 2, 8, 40, 70 et 112. Il apparaît que l'effet de couplage est trop faible pour les trois premières couches ; mais dans le cinquième faisceau, il y a dix états qui « tombent » dans le quatrième à cause du couplage spin-orbite. Cela conduit à une couche qui ne se complète plus à 40 protons, mais à $40 + 10 = 50$. De la même façon, les autres nombres magiques s'expliquent facilement.

Goepfert-Mayer a trouvé ces relations en dix minutes. L'énigme était résolue ! Joe Mayer a rapporté plus tard cet épisode ainsi :

« Fermi et Maria parlaient ensemble dans le laboratoire de Maria, quand on leur dit que Fermi avait un coup de fil, à prendre dans son bureau. En allant à la porte, il se tourna une seconde, et demanda à Maria s'il était possible d'envisager un couplage spin-orbite. Quand il revint, après moins de 10 minutes, elle lui donna la solution détaillée du problème. Lorsque Maria est excitée, elle parle terriblement vite, tandis que Fermi voulait toujours une explication lente, progressive. Enrico sourit, et partit : « Demain, lorsque vous serez plus calme, vous me direz tout. »