

# Giulio Racah (1909-1965)

## La théorie des spectres complexes

Jean-Christophe Pain (jean-christophe.pain@cea.fr)

Laboratoire de Physique Atomique des Plasmas, CEA, DAM, DIF, 91297 Arpajon

Giulio Racah est connu des physiciens pour ses techniques mathématiques fondées sur les opérateurs tensoriels et les groupes continus, appliquées principalement au groupe de symétrie par rotation. Ces méthodes ont révolutionné la spectroscopie et sont incontournables en physique atomique, nucléaire, et des particules élémentaires. Il a d'abord développé une procédure systématique pour classer les niveaux d'énergie des atomes (introduisant un nouveau nombre quantique, la « seniorité »), qui demeure la plus utilisée pour les calculs pratiques de structure atomique. Racah a posé les fondations de la physique atomique en Israël et a formé de nombreux physiciens de talent.

### Les années italiennes

Né à Florence, en Italie, le 9 février 1909, Racah effectue ses études de physique peu de temps après la découverte de la Mécanique Quantique, à une époque où la physique moderne était florissante et en pleine expansion en Italie. Sous l'impulsion d'Orso Mario Corbino, des groupes de recherches en étroite collaboration sont formés autour d'Enrico Fermi à Rome et d'Enrico Persico à Florence. La thèse de doctorat de Racah (1930), sous la direction de Persico, porte sur le traitement des phénomènes d'interférences lumineuses par la théorie quantique du rayonnement. Après cela, il exerce une année (1930-31) comme assistant de Fermi à Rome et une autre (1931-32) avec Pauli à Zürich. À son retour en Italie, il enseigne d'abord la physique théorique à Florence (1932-1937). Après avoir été classé second à un concours national pour une chaire de physique théorique à Palerme, il est nommé en 1937 professeur (Professore Straordinario) à Pise, et est le plus jeune à occuper un tel poste.

Le travail de Racah en Italie concerne des domaines nouveaux ouverts par la théorie quantique. Il publie plusieurs articles sur le calcul de l'énergie propre de l'électron, et étend le travail d'Ettore Majorana sur les particules élémentaires et les antiparticules. Ses calculs de sections efficaces de rayonnement de freinage (Bremsstrahlung) et de production de paires électron-positron lors des collisions de particules chargées rapides sont plus connus. Le domaine a déjà été largement exploré, mais Racah trouve des formules analytiques exactes là où les autres n'ont pu obtenir que des approximations. Les résultats sont importants pour les études relatives aux rayons cosmiques. Ces premiers travaux démontrent déjà les



1. Timbre à l'effigie de G. Racah émis par la poste israélienne en 1993.

capacités extraordinaires de Racah en mathématiques, ainsi que son aptitude à mener une étude exhaustive. À cette époque, il calcule également la structure hyperfine et les décalages isotopiques des raies atomiques spectrales, discute les propriétés de symétrie des tenseurs en utilisant la théorie des groupes et se tient toujours au courant des derniers développements en physique nucléaire. Pauli et Fermi l'apprécient profondément.

### La Seconde Guerre mondiale : Racah s'installe en Israël

À la fin des années 30, lorsque les lois anti-sémites entrent en vigueur en Italie, Racah démissionne de son poste de professeur de l'Université de Pise et postule à l'Université Hébraïque de Jérusalem, alors en Palestine sous mandat britannique. Les excellentes lettres de recommandation écrites par Fermi et Pauli constituent des appuis décisifs à sa candidature. Racah indiquera que son choix de Jérusalem a été influencé

© Photo Archives, Division for development and public relations, The Hebrew University of Jerusalem.

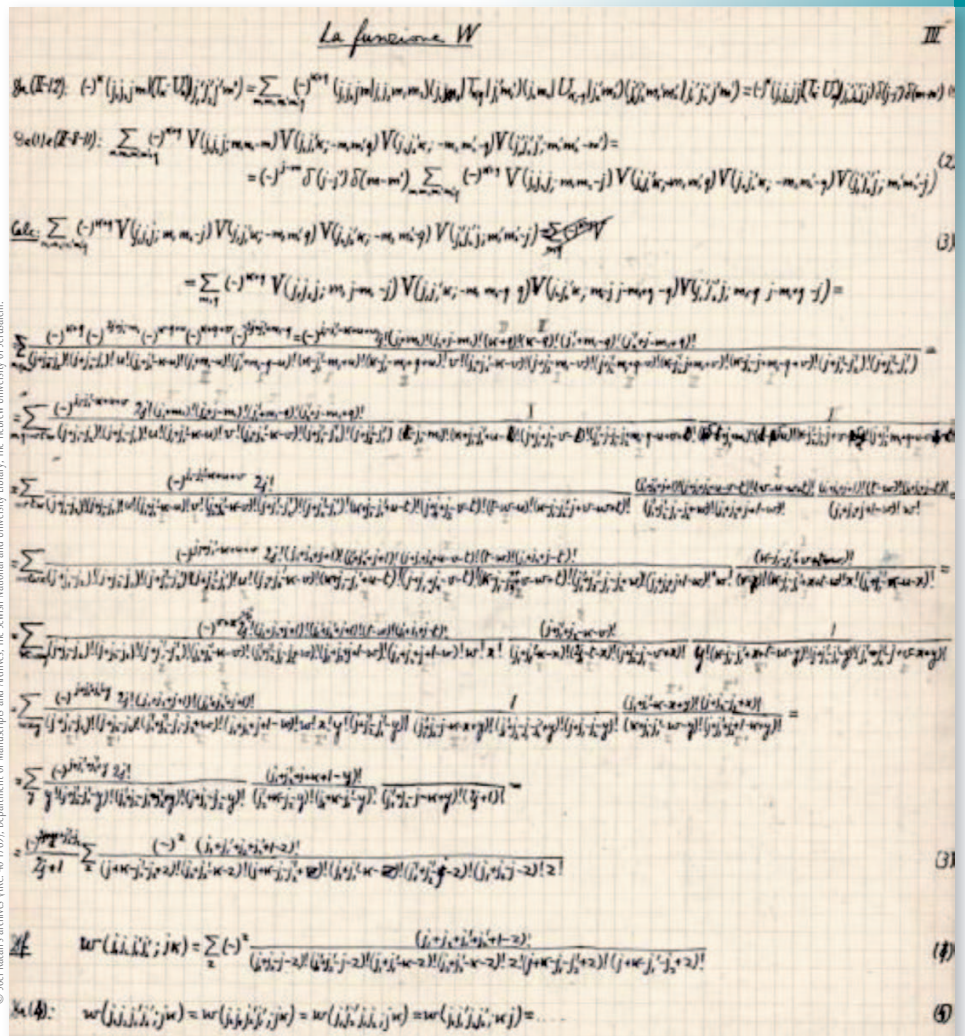
par une discussion avec Augusto Levi, chef de l'organisation sioniste italienne, qui a su le convaincre du défi que représentait le développement de la physique théorique à Jérusalem où elle était quasiment inexistante. Le support et l'encouragement du chef de l'organisation sioniste internationale, Chaim Weizmann, achèvent de le convaincre. Après une année de chômage, il reprend ses activités, « Je suis arrivé à la conclusion que la seule solution au problème juif était de rester en Israël », dira-t-il.

Il est nommé professeur de physique théorique à l'Université Hébraïque de Jérusalem en novembre 1939, et devient le plus jeune titulaire de ce poste. Il immigre avec sa mère, et est déterminé à s'intégrer rapidement au pays et à l'université. Il étudie l'hébreu de manière intensive, et après six mois sa maîtrise de la langue est telle qu'il participe aux réunions du conseil d'administration de l'université. Étant donné que l'enseignement à l'université est dispensé en hébreu, il assiste souvent au cours de physique générale d'un de ses collègues, de manière à se familiariser avec la terminologie technique et scientifique. Une année après son arrivée (1940-41), il assure déjà les enseignements de base en hébreu : mécanique analytique, électromagnétisme et physique quantique, et dirige un séminaire hebdomadaire de physique théorique. Sa charge d'enseignement est nettement plus importante qu'elle ne l'était en Italie.

En septembre 1940, il épouse Zmira Many, une fille du juge de la cour suprême Malchiel Many. Ils auront une fille (1941) et deux garçons (1944, 1949). « L'année 1940 a été la pierre angulaire de ma vie, ajoutera-t-il, parce que je suis venu en Israël, je me suis marié, et j'ai commencé à travailler sur la spectroscopie. »



© Iel Rach's archives (ARC 40 1749). Department of Manuscripts and Archives, The Hebrew University of Jerusalem.



2. Manuscrit de la main de Racah sur les coefficients W.

## ► Les coefficients de Racah

Encadré 1

Considérons deux électrons. La détermination de leur moment angulaire résultant  $J$  implique l'addition de quatre moments angulaires. Deux sont leurs moments cinétiques orbitaux  $l_1$  et  $l_2$ , et les deux autres leurs moments cinétiques de *spin*  $s_1$  et  $s_2$ . Il y a plusieurs manières de déterminer le moment angulaire résultant : par exemple, on peut choisir de coupler ensemble les moments orbitaux, et ensemble les moments de *spin* (c'est le couplage LS) :

$$\begin{cases} \vec{l}_1 + \vec{l}_2 = \vec{L} \\ \vec{s}_1 + \vec{s}_2 = \vec{S} \\ \vec{L} + \vec{S} = \vec{J} \end{cases}$$

Mais on peut également choisir de coupler ensemble le moment orbital et le moment de *spin* pour chaque électron (c'est le couplage jj) :

$$\begin{cases} \vec{l}_1 + \vec{s}_1 = \vec{j}_1 \\ \vec{l}_2 + \vec{s}_2 = \vec{j}_2 \\ \vec{j}_1 + \vec{j}_2 = \vec{J} \end{cases}$$

Ces couplages diffèrent par l'ordre dans lequel les additions sont effectuées (voir figure).

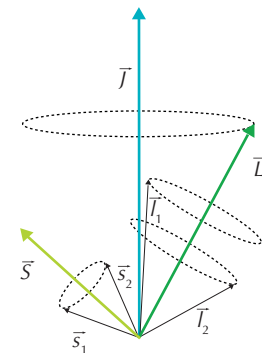


Illustration graphique des couplages LS et jj.

Considérons le cas particulier suivant : soit un atome avec un électron dans une orbitale  $s$  (correspondant à un moment angulaire orbital  $l=0$ ) et un électron dans une orbitale  $p$  (correspondant à  $l=1$ ). Chaque électron a de plus un moment angulaire de *spin*. La transformation entre les fonctions d'onde qui correspondent aux couplages LS et jj fait intervenir un coefficient W de Racah.

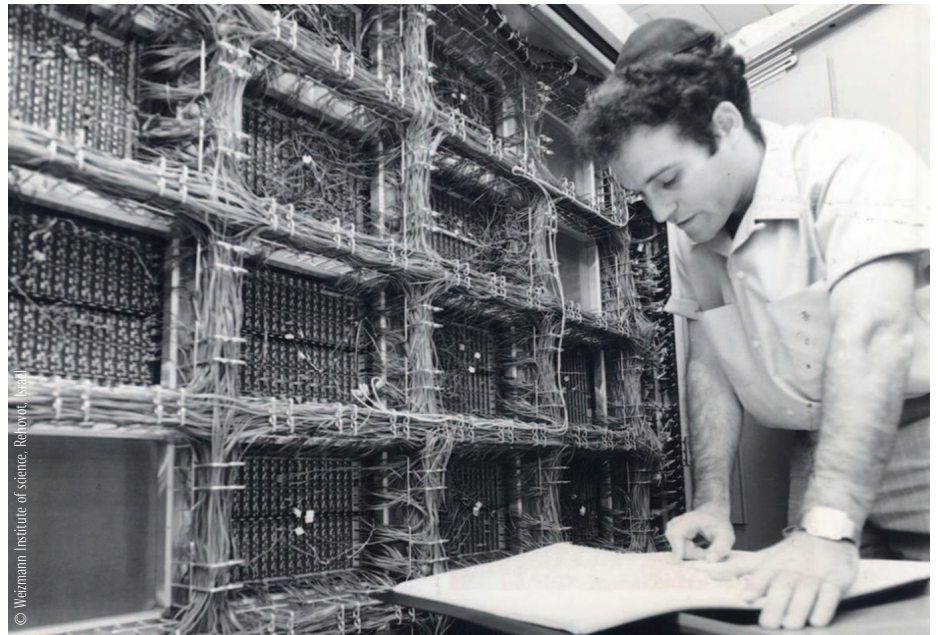




Au début des années 40, alors qu'il adopte sa nouvelle mère patrie, apprend une nouvelle langue et fonde une famille, il commence également à travailler sur son sujet scientifique majeur, la théorie des spectres atomiques complexes. Il publie alors une série de quatre articles intitulés "Theory of Complex Spectra", qui posent les bases de tous les calculs modernes de spectroscopie. Dans ces articles, il établit une technique performante exprimant n'importe quel type d'interaction comme somme de produits scalaires d'opérateurs tensoriels, dont les éléments de matrice sont plus faciles à calculer que par les méthodes antérieures. Il introduit les nouveaux concepts de parenté fractionnaire, un nouveau nombre quantique, la « séniorité », qui aide à la désignation des niveaux d'énergie des configurations ayant plusieurs électrons équivalents (i.e. appartenant à la même sous-couche) et les coefficients W, aujourd'hui appelés coefficients de Racah (voir encadré 1). Les coefficients de Racah interviennent quand on considère trois moments angulaires au moins. Ils sont égaux, à un facteur de phase près, aux coefficients 6j de Wigner, et possèdent des propriétés de symétrie très commodées.

Tous ces concepts sont indispensables à la théorie de la structure nucléaire, mais en 1943 la communauté des physiciens nucléaires n'est pas encore prête à apprivoiser ces techniques. « Mes théories, se plaint-il, sont tombées comme des graines sur un sol aride. » Mais Racah remédie à cela : grâce à son dynamisme, il fait évoluer l'enseignement et forme un certain nombre de physiciens israéliens qui, au début des années cinquante, démontrent l'applicabilité de ses méthodes aux calculs de structure en couches du noyau. Igal Talmi dira : « À la fin des années cinquante j'étais sans arrêt en train de pointer les idées de Racah à des gens qui, refusant de croire qu'un domaine si moderne avait déjà émergé dix ans auparavant, continuaient de répéter le même travail. »

Tout au long des années 40, Racah prend part activement à la vie académique de l'Université Hébraïque (il est membre du conseil d'administration, doyen de la faculté des sciences, et chef du département de physique). En 1945-46, Racah est à la tête du comité d'enseignement, et en 1946-48 il est nommé doyen de la faculté.



3. Le calculateur WEIZAC, l'un des premiers ordinateurs dans le monde. Il fut construit à l'institut Weizmann à Rehovot en 1954-1955, basé sur l'architecture de l'Institute for Advanced Study (IAS) de Princeton mise au point par John von Neumann.

## L'indépendance et la gloire

En 1942, il rejoint l'organisation militaire clandestine Haganah, suit une formation de commandant d'escouade et devient instructeur pour l'utilisation des armes légères. En novembre 1947, à l'issue de la guerre d'indépendance contre les Anglais, il est commandant en chef des forces Haganah du mont Scopus (où se trouvait le campus original de l'Université Hébraïque), qui était alors (et l'est restée jusqu'à la fin de la guerre des Six Jours en 1967) une enclave juive en territoire arabe. De mars 1948 à la fin de la guerre, il officie à la tête d'une unité scientifique à Jérusalem, préparant des munitions pour l'armée (il conçoit des charges creuses coniques).

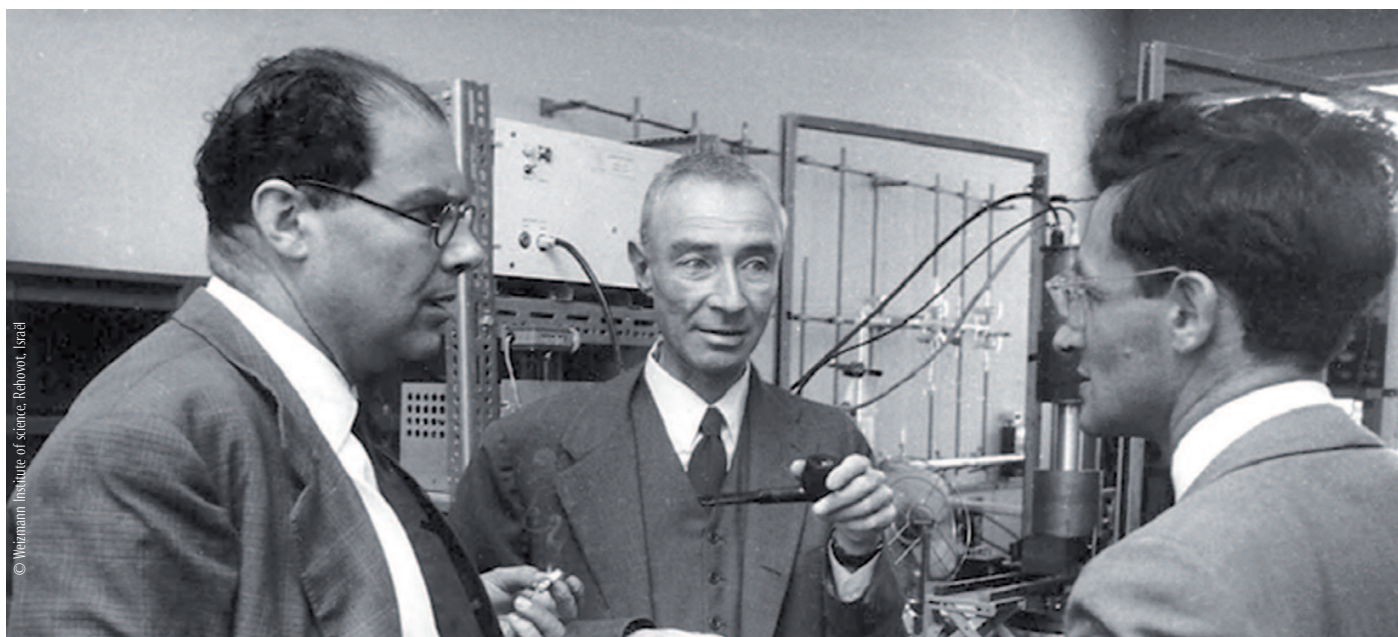
Pendant ce temps Racah ne néglige pas la recherche scientifique, qu'il considère comme sa véritable vocation. Il introduit en 1949 le concept de classement des états

par les représentations des groupes continus ou groupes de Lie (voir encadré 2). Si une quantité physique typique d'un état (comme la projection d'un moment angulaire) est invariante par une représentation d'un groupe continu particulier, cet état est parfaitement caractérisé. Ce concept est si général qu'il a trouvé des applications dans des domaines comme la spectroscopie atomique ou les théories des particules élémentaires. Mais Racah ne croit pas à ce qu'il nomme les « jeux mathématiques » des spécialistes de la théorie des groupes. Au début des années cinquante, il entame son travail sur les spectres des terres rares. Lors d'une visite au National Bureau of Standards (actuel National Institute of Standards and Technology) en 1954, il est introduit à l'utilisation des ordinateurs et réalise immédiatement leur importance en analyse spectroscopique théorique. Il écrit

### ► Les groupes de Lie

Encadré 2

En mathématiques, un groupe est une structure algébrique, qui consiste en un ensemble muni d'une seule opération. Cette opération est associative, admet un élément neutre, et tout élément a un inverse. Une *représentation* d'un groupe est une méthode pour étudier une telle structure. Elle consiste à étudier le groupe comme un ensemble de symétries. Par exemple, le groupe des permutations d'un ensemble à trois éléments se représente comme le groupe des applications linéaires du plan laissant globalement invariant un triangle équilatéral. Un groupe continu, ou groupe de Lie, est un groupe tel que chacun de ses éléments peut être approché d'aussi près que l'on veut par une suite d'autres éléments du groupe (par exemple, le groupe des rotations).



4. De gauche à droite : G. Racah, R. Oppenheimer et S. Cohen, à la conférence internationale de Rehovot sur la physique nucléaire au Weizmann Institute for Science, en 1957.

rapidement un programme sur WEIZAC (WEIZmann Automatic Computer, le premier ordinateur en Israël), destiné à déterminer une liste de raies pour des niveaux d'énergie donnés. À partir de là, les ordinateurs occupent une place importante dans son activité professionnelle. Il perfectionne un certain nombre de codes qui se révéleront très utiles aux spectroscopistes.

En 1958, Racah reçoit le Prix d'Israël qui est décerné par l'État aux citoyens ayant rendu des services exceptionnels. Cette année-là revêt une importance particulière, puisqu'il s'agit du dixième anniversaire du jeune État. Racah est récompensé pour sa contribution à la physique. En 1960, le modèle en couches nucléaires souffre de dégénérescences de désignations : certains états sont représentés par le même jeu de nombres quantiques, ce qui est incompatible avec le principe d'exclusion de Pauli. La séniorité, un nouveau nombre quantique introduit par Racah quelques années auparavant pour la physique atomique, permet d'y remédier. « J'ai été chanceux, aura-t-il coutume de dire, que la séniorité se soit avérée être un bon nombre quantique dans le noyau. » C'est à ce moment-là (1959) qu'il co-rédige, avec son cousin Ugo Fano, une monographie intitulée *Irreducible Tensorial Sets*, un traité sur la théorie des groupes appliquée au couplage des moments angulaires. Ce

livre servira de base à un autre ouvrage que Fano écrira plus tard avec son ancien étudiant Ravi Rau, *Symmetries in Quantum Physics*, publié en 1996. En 1961, Racah est élu recteur de l'Université Hébraïque, un poste qu'il occupera jusqu'à sa mort. En 1962, il sert également comme président de l'université. Dans le cadre d'un accord culturel entre la France et Israël, Racah donne une série de conférences au Collège de France en février 1964, portant notamment sur l'interaction de configurations. Une collaboration se met en place et, à la fin de 1964, Yves Bordarier, étudiant au laboratoire Aimé Cotton à Orsay, passe quelque temps à Jérusalem. Dans les dernières années, Racah travaille sur des approches semi-empiriques, qui ont permis des progrès importants dans l'interprétation des spectres de terres rares.

Racah a ainsi cimenté ses racines en Israël. Il expliquera avoir décliné, avant la fin de la Seconde Guerre mondiale, une offre du gouvernement italien de reconduire sa position à l'université de Pise. Mais chaque été, sur le chemin de conférences scientifiques, après les contraintes de l'année académique à Jérusalem, il fait une halte en Italie, rencontre des amis et reprend des forces. Il meurt à Florence le 28 août 1965, asphyxié à cause d'un chauffage défectueux, dans la maison où il a grandi. Il était en route pour Amsterdam, où il devait assister

à la "Zeeman Centennial Conference". L'exposé qu'il avait l'intention de présenter devait décrire un nouveau programme informatique qu'il avait écrit pour ajuster les niveaux d'énergie calculés aux niveaux d'énergie observés (en prenant en compte les facteurs de Landé).

L'institut de physique de l'Université Hébraïque est nommé "Racah Institute of Physics" en 1970 et, en 1971, le nom de Racah est officiellement attribué à un cratère d'impact sur la Lune par l'Union Astronomique Internationale (UAI). En 1978, J. Wilson introduit des polynômes orthogonaux, qu'il nomme polynômes de Racah, dont les relations d'orthogonalité sont équivalentes aux relations d'orthogonalité des coefficients  $W$  de Racah. ■

### En savoir plus

- N. Zeldes, "Giulio Racah and theoretical physics in Jerusalem", *Arch. Hist. Exact Sci.* **63** (2009) 289-323.
- "Necrology, Giulio Racah", *J. Opt. Phys. Soc. Am.* **56** (1966) 268.
- "Symmetry in Physics", Centenary of Giulio Racah, Jerusalem 2010, Research Workshop of the Israel Science Foundation, [www.phys.huji.ac.il/Racah100/racahpic](http://www.phys.huji.ac.il/Racah100/racahpic)
- G. Racah, "Theory of complex spectra I-IV", *Phys. Rev.* **61** (1942) 186-197, **62** (1942) 438-462, **63** (1943) 367-382, **76** (1949) 1352-1365.
- A. Messiah, *Mécanique Quantique*, volume 2, Dunod (1959).