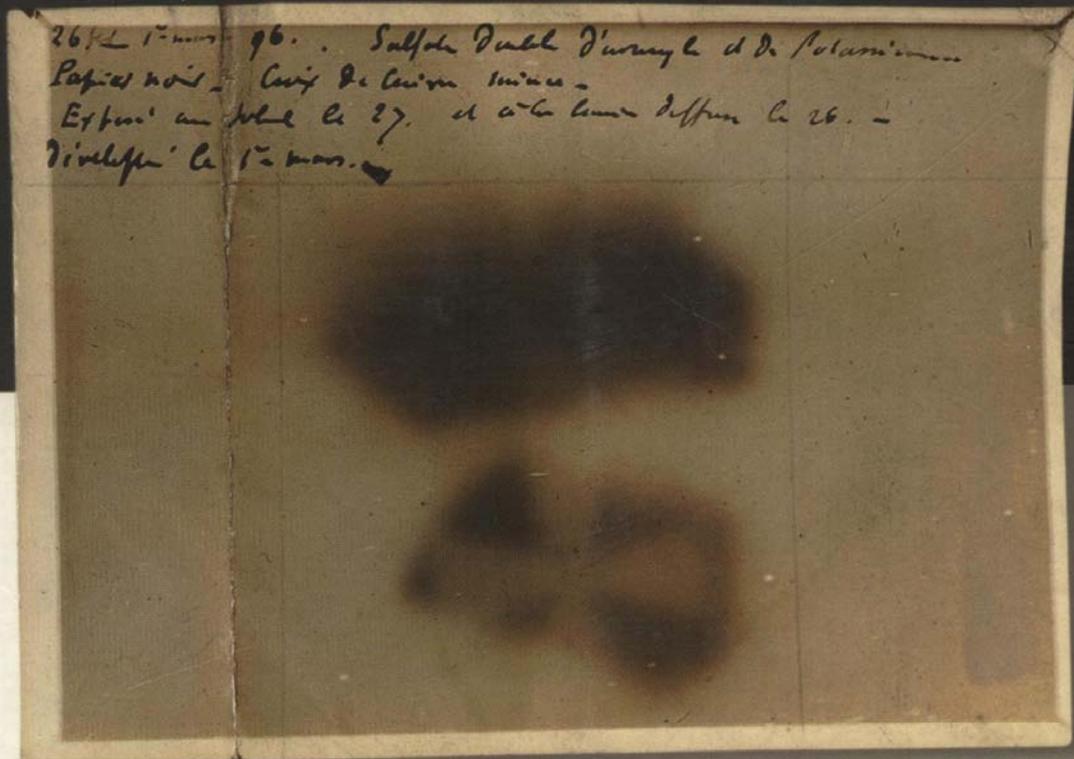


Bernard Fernandez

# De l'atome au noyau

Une approche historique de la physique atomique  
et de la physique nucléaire



**ellipses**

9-39-1

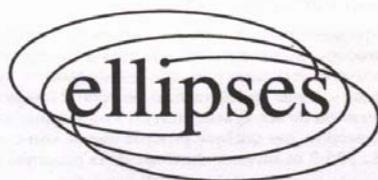
2-539-39-1



# DE L'ATOME AU NOYAU

Une approche historique  
de la physique atomique  
et de la physique nucléaire

Bernard FERNANDEZ



# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	v
<b>I La Radioactivité, premières énigmes</b>	1
<b>1 Henri Becquerel: les « rayons uraniques »</b>	3
La découverte . . . . .	4
Vous avez dit phosphorescence? . . . . .	6
Quelle est la nature de ces radiations? . . . . .	7
Un impact scientifique et public limité . . . . .	8
Une découverte « par hasard »? . . . . .	9
<b>2 La physique à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle</b>	11
Une promenade à grandes enjambées . . . . .	12
Optique et spectroscopie . . . . .	12
Thermodynamique . . . . .	12
Électricité, magnétisme, électromagnétisme . . . . .	13
Quelques avancées techniques cruciales . . . . .	14
Décharges électriques dans les gaz, rayons cathodiques, l'électron . . . . .	15

« Rayons canaux », ou rayons d'électricité positive . . . . .	17
Lothar Meyer et Dmitrij Mendeleev : le tableau périodique des éléments . . . . .	18
Une organisation de la Recherche en pleine évolution . . . . .	18
L'arrière-plan politique, industriel et social : espoirs et inquiétudes	20
<b>3 Le polonium et le radium</b>	23
Marya Skłodowska . . . . .	23
Pierre Curie . . . . .	24
Le polonium et le radium : Pierre et Marie Curie inventent la ra- diochimie . . . . .	25
Énigmes . . . . .	28
<b>4 L'émanation du thorium</b>	31
Ernest Rutherford . . . . .	31
Rutherford aborde la radioactivité : rayons $\alpha$ et $\beta$ . . . . .	33
Les rayons $\beta$ sont des électrons . . . . .	33
Rutherford à Montréal : l'émanation du thorium, la décroissance exponentielle . . . . .	34
Radioactivité « induite », radioactivité « provoquée » . . . . .	35
Elster et Geitel : la radioactivité de l'air et de la terre . . . . .	37
Une troisième sorte de rayons : les rayons $\gamma$ . . . . .	38
L'émanation du thorium est un gaz de la famille de l'argon . . . . .	38
Tout se complique : la multiplication des « X » . . . . .	39
« Une énigme, un sujet d'étonnement profond » . . . . .	40
<b>5 L'écheveau démêlé</b>	41
Les rayons $\alpha$ revisités . . . . .	43
La radioactivité est une désintégration atomique . . . . .	44
L'écheveau démêlé : les familles radioactives . . . . .	45
D'où provient l'énergie de la radioactivité ? l'hypothèse de Rutherford	46
La preuve concrète de la transmutation . . . . .	49
La radioactivité établie. Les familles radioactives . . . . .	50
<b>6 Consécérations, deuils : la fin d'une époque</b>	53
1903 : le prix Nobel pour Henri Becquerel, Pierre et Marie Curie . . . . .	54
La mort de Pierre Curie . . . . .	56
1908 : Le prix Nobel de chimie pour Rutherford . . . . .	56
La mort d'Henri Becquerel . . . . .	56
<b>II Un noyau au cœur de l'atome</b>	59
<b>1 Préhistoire de l'atome</b>	61
Au XVIII <sup>e</sup> siècle : l'abbé Nollet . . . . .	62
Au début du XIX <sup>e</sup> siècle : John Dalton, William Prout, Gay-Lussac, Avogadro, Ampère . . . . .	62
Mais les atomes existent-ils réellement ? . . . . .	64
1865 : Loschmidt estime la taille des molécules de l'air . . . . .	65

Les spectres de raies, premiers témoins de la structure interne des atomes . . . . .	65
Jean Perrin, avocat de la réalité des atomes . . . . .	65
<b>2 1897 : les électrons sont dans l'atome</b>	69
L'atome selon Philipp Lenard : les « dynamides » . . . . .	70
Tentatives « numérologiques » pour décrire les spectres de raies : Balmer, Rydberg . . . . .	70
Premier modèle de J. J. Thomson : un atome entièrement fait d'électrons . . . . .	71
Une spéculation de Jean Perrin : l'atome comme système solaire en miniature . . . . .	72
Un atome « saturnien » : Hantaro Nagaoka . . . . .	73
L'atome « plum pudding » de J. J. Thomson . . . . .	74
Charles Barkla mesure le nombre d'électrons de l'atome . . . . .	75
<b>3 La « diffusion » des particules <math>\alpha</math> permet de voir un noyau dans l'atome</b>	79
William Henry Bragg : le freinage des particules $\alpha$ dans la matière . . . . .	80
La « diffusion » des particules $\alpha$ . . . . .	81
La nature de la particule $\alpha$ , une question en suspens . . . . .	83
Le premier compteur « Geiger » . . . . .	83
La nature de la particule $\alpha$ . . . . .	86
Une autre méthode de comptage : les scintillations . . . . .	86
Retour sur la diffusion des particules $\alpha$ . . . . .	88
Les expériences de Geiger et Marsden . . . . .	89
Les grandes déviations sont-elles dues à de multiples petites déviations ? . . . . .	90
Rutherford invente le noyau . . . . .	90
<b>4 Dernière touche : Moseley mesure la charge du noyau</b>	93
Barkla crée la spectroscopie X . . . . .	93
La diffraction des rayons X : Max von Laue, William Henry et William Lawrence Bragg . . . . .	94
Henry Moseley mesure la charge des noyaux . . . . .	95
Paradoxe . . . . .	97
<b>III Mécanique quantique, le passage obligé</b>	99
<b>1 Bifurcation</b>	101
<b>2 Début improbable</b>	103
Un problème qui résiste . . . . .	104
1900 : Max Planck invente le « quantum d'action » . . . . .	107
Le quantum d'action . . . . .	109
Einstein et les quanta de lumière . . . . .	109
La chaleur spécifique des solides . . . . .	112
Le premier Conseil Solvay et la théorie des quanta . . . . .	113

<b>3 Niels Bohr : les quanta sont dans l'atome</b>	117
Bohr introduit les quanta dans la théorie atomique . . . . .	118
« Sur la constitution des atomes et des molécules » . . . . .	120
Les deux autres articles de la « trilogie » de 1913 . . . . .	122
<b>4 1913-1923 : victoires et déboires</b>	125
Confirmation : l'expérience de Franck et Hertz . . . . .	126
La multiplication des raies : effets Zeeman et Stark . . . . .	126
Arnold Sommerfeld : orbites elliptiques, nouveaux nombres quan- tiques . . . . .	127
Les corrections relativistes et la <i>constante de structure fine</i> . . . .	128
Un canular ! . . . . .	129
Nouvelle intervention d'Einstein : l'interaction rayonnement-matière	129
Une victoire de la théorie des quanta : l'effet Stark . . . . .	130
Le « principe de correspondance » . . . . .	131
Bohr et le tableau de Mendeleev . . . . .	132
Le cas des terres rares . . . . .	134
1918, 1921 et 1922 : trois prix Nobel pour les quanta . . . . .	135
<b>5 1925 : le principe de Pauli, le spin</b>	137
Wolfgang Pauli . . . . .	137
Max Born . . . . .	138
L'expérience de Stern et Gerlach . . . . .	140
L'effet Compton . . . . .	141
Une explication étrange de l'effet Zeeman . . . . .	141
Le principe d'exclusion de Pauli . . . . .	142
Le « spin » de l'électron . . . . .	144
<b>6 La mécanique quantique</b>	147
Louis de Broglie . . . . .	147
Heisenberg et la mécanique des matrices . . . . .	149
Une physique d'un type nouveau . . . . .	152
Pauli applique la nouvelle mécanique quantique au spectre de l'hy- drogène . . . . .	153
L'équation de Schrödinger . . . . .	153
Heisenberg et Schrödinger, bonnet blanc et blanc bonnet . . . . .	155
L'interprétation probabiliste de Max Born et l'abandon du déter- minisme . . . . .	155
Les matrices de Pauli . . . . .	157
Des particules indiscernables : la « statistique » de Bose-Einstein .	158
Enrico Fermi : une nouvelle « statistique » . . . . .	159
Paul Adrien Maurice Dirac . . . . .	161
« Bosons » et « fermions » . . . . .	164
Les « relations d'incertitude » de Heisenberg . . . . .	165
Consécérations . . . . .	170
Cinquième Conseil Solvay : le point sur la nouvelle mécanique . . .	170
Langue allemande, langue de la mécanique quantique . . . . .	172
Une bibliographie succincte . . . . .	173

<b>IV Une enfance discrète</b>	177
<b>1 Le noyau de l'atome en 1913</b>	179
<b>2 La découverte des isotopes et la mesure des masses des noyaux</b>	181
Frederick Soddy . . . . .	182
Les isotopes . . . . .	182
La première méthode physique de mesure des masses des atomes .	184
Francis Aston : le premier « spectromètre de masse » . . . . .	185
La loi des nombres entiers et la vieille hypothèse de Prout . . . . .	187
L'exception de l'hydrogène . . . . .	188
Le prix Nobel pour la règle des nombres entiers . . . . .	191
De nouveaux spectromètres de masse . . . . .	192
La connaissance des masses des noyaux en 1932. L'énergie de liaison des noyaux . . . . .	192
<b>3 Une enquête à rebondissements : la radioactivité <math>\beta</math></b>	195
Lise Meitner . . . . .	198
Hahn et Meitner et la radioactivité $\beta$ . . . . .	200
Le premier « spectromètre $\beta$ » . . . . .	201
Le <i>Kaiser Wilhelm Institut</i> . . . . .	203
Des nuages s'amoncellent . . . . .	203
James Chadwick : un spectre continu ! . . . . .	204
Un spectre continu, vraiment ? . . . . .	206
À Berlin, la guerre . . . . .	207
Lise Meitner reprend l'étude de la radioactivité $\beta$ . . . . .	208
L'expérience décisive de Charles Ellis . . . . .	209
Scandale : l'énergie ne serait pas conservée ! . . . . .	210
Geiger et Bothe : une expérience de « coïncidences » . . . . .	211
L'idée de Wolfgang Pauli . . . . .	212
Mais alors pourquoi toutes ces raies ? la clé du mystère . . . . .	213
<b>4 Premières réactions nucléaires</b>	215
La première réaction nucléaire . . . . .	216
Sir Ernest Rutherford, <i>Cavendish Professor of Physics</i> . . . . .	218
Nouvelles réactions nucléaires . . . . .	219
Une polémique entre Vienne et Cambridge . . . . .	220
Comment se passent ces transmutations ? . . . . .	222
<b>5 Le noyau en 1920 selon Rutherford</b>	225
Dimensions du noyau . . . . .	226
La constitution du noyau et des isotopes . . . . .	227
Rutherford visionnaire : le neutron . . . . .	227
Chadwick à la recherche de nouvelles forces . . . . .	228

<b>6 L'essor des moyens expérimentaux</b>	231
Fin de la méthode des scintillations . . . . .	232
Le compteur à pointe . . . . .	232
Le compteur Geiger-Müller . . . . .	233
Une digression : naissance et développement de la T. S. F. . . . .	234
La chambre à ionisation à amplification électronique . . . . .	236
Le développement des mesures « en coïncidence » . . . . .	238
La mesure de l'énergie du rayonnement $\gamma$ . . . . .	240
Mesures d'absorption . . . . .	240
Diffraction sur des cristaux . . . . .	240
L'effet photoélectrique . . . . .	241
Les électrons de conversion . . . . .	241
Un détecteur à nul autre pareil : la chambre à brouillard de	
C. T. R. Wilson . . . . .	241
Charles Thomas Rees Wilson et les nuages . . . . .	241
Un détecteur hors du commun . . . . .	243
L'effet Compton vu dans la chambre à brouillard . . . . .	244
Voir une réaction nucléaire . . . . .	244
<b>7 Le noyau de l'atome en 1930</b>	247
Des certitudes, et un casse-tête . . . . .	249
Une évidence . . . . .	249
. . . et une énigme : le noyau d'azote 14 . . . . .	249
Faut-il envisager une solution radicale ? . . . . .	251
Au début de 1932 : toujours l'énigme . . . . .	251
<b>V 1930-1940 : un développement fulgurant</b>	253
<b>1 Le noyau, nouvelle frontière</b>	255
La mécanique quantique dans le noyau . . . . .	255
George Gamow . . . . .	255
Salomon Rosenblum et la structure fine de la radioactivité $\alpha$ . . . . .	258
1931 : premier congrès international de physique nucléaire . . . . .	260
Goudsmit et le moment magnétique des noyaux . . . . .	261
Walther Bothe : le mystère du rayonnement pénétrant . . . . .	262
Georges Gamow : le noyau comme une goutte liquide . . . . .	262
Découverte d'un isotope exceptionnel : le deuton . . . . .	264
Bataille pour un nom . . . . .	265
Le spin du deuton . . . . .	265
<b>2 La découverte du neutron</b>	267
Frédéric et Irène Joliot-Curie . . . . .	268
Une projection de protons . . . . .	270
Le neutron dévoilé . . . . .	271
La question de la masse du neutron . . . . .	273

<b>3 La théorie du noyau après la découverte du neutron</b>	277
Werner Heisenberg	278
L'interaction d'« échange » de Heisenberg	279
Le neutron, particule « élémentaire » : un argument de plus	281
Neutrons et protons se repoussent-ils à très courte distance?	281
Ettore Majorana	282
Eugene P. Wigner	285
Les protons et neutrons sont-ils disposés en couches dans le noyau,	
comme les électrons dans l'atome?	286
Avant la découverte du neutron : William Harkins	286
James Bartlett	287
Walter Elsasser et Kurt Guggenheimer	287
Heisenberg et la méthode de Hartree	290
Wigner et Feenberg, la méthode de Hartree-Fock	291
Friedrich Hund	292
Le modèle des couches, une idée d'avenir?	293
<b>4 Une nouvelle particule: le positon</b>	295
Les rayons cosmiques	295
Blackett et Occhialini	297
Carl Anderson découvre l'électron positif	299
L'électron positif d'Anderson et celui de Dirac	300
Irène et Frédéric Joliot-Curie	303
<b>5 Naissance des accélérateurs de particules</b>	305
L'accélération directe, une course aux hautes tensions	306
La foudre, le générateur à impulsion	307
La bobine de Tesla	307
John Cockcroft et Ernest Walton : la première réaction nu-	
cléaire provoquée avec un accélérateur	308
Robert van de Graaff	310
Accélérer en plusieurs fois	311
Gustaf Ising	311
Rolf Wideröe	312
Une idée d'Ernest O. Lawrence	312
David Sloan : un accélérateur linéaire pour ions lourds	315
Stanley Livingston : le cyclotron	315
<b>6 L'indépendance de charge de la force nucléaire</b>	319
<b>7 La découverte de la radioactivité artificielle</b>	321
Les Joliot-Curie après le Conseil Solvay	323
« Un nouveau type de radioactivité »	324
La preuve chimique	326
Comme une traînée de poudre	327
L'importance de la découverte	328
De nouvelles perspectives pour les indicateurs radioactifs	329
En marge de la découverte, la mort de Marie Curie	330

Les prix Nobel 1935 : Chadwick et les Joliot-Curie . . . . .	331
<b>8 L'École de Rome</b> . . . . .	333
La théorie de la radioactivité $\beta$ . . . . .	334
La physique des neutrons à Rome . . . . .	337
Des radioéléments par dizaines . . . . .	337
Des transuraniens? . . . . .	339
Les neutrons « lents » . . . . .	340
Une nouvelle branche de la physique nucléaire . . . . .	342
Les résonances . . . . .	343
Le prix Nobel pour Fermi et la disparition de l'équipe de Rome . . . . .	344
<b>9 Le grand exode des savants juifs sous le nazisme</b> . . . . .	347
<b>10 Foisonnement théorique: Yukawa, Breit et Wigner, Bohr</b> . . . . .	351
Hideki Yukawa . . . . .	352
La théorie de Yukawa . . . . .	352
Est-il possible d'observer ce « quantum hypothétique »? . . . . .	354
Les forces fondamentales de la nature . . . . .	354
Le nom de la bête . . . . .	355
Premières théories des réactions nucléaires . . . . .	355
Breit et Wigner . . . . .	356
Niels Bohr et la théorie des réactions nucléaires . . . . .	357
La structure du noyau selon Bohr en 1937 . . . . .	359
<b>11 Mort d'un géant: Ernest Rutherford</b> . . . . .	361
<b>12 Hans Bethe fait le point en 1936-1937</b> . . . . .	363
Hans Albrecht Bethe . . . . .	364
La structure des noyaux . . . . .	364
Taille des noyaux . . . . .	364
Masse et énergie de liaison : la formule de Weizsäcker . . . . .	365
Forces nucléaires . . . . .	366
Structure du noyau . . . . .	366
Les moments angulaires ou <i>spins</i> des noyaux . . . . .	367
Les moments magnétiques des noyaux . . . . .	367
Certains noyaux sont-ils déformés? les « moments quadrupolaires » . . . . .	367
Les réactions nucléaires . . . . .	368
<b>13 La fission de l'uranium</b> . . . . .	369
Une découverte <i>molle</i> : les « transuraniens » . . . . .	369
Des « transuraniens » à la pelle . . . . .	372
À l'Institut du Radium . . . . .	374
Lise Meitner fuit l'Allemagne nazie . . . . .	379
Otto Hahn et Fritz Strassmann se remettent au travail . . . . .	379
Des résultats de plus en plus déconcertants . . . . .	381
Le mot de l'énigme . . . . .	383
La nouvelle se répand aux États-Unis . . . . .	385

Confirmations . . . . .	386
Niels Bohr : la théorie de la fission, l'uranium 235 . . . . .	389
La multiplication des neutrons . . . . .	390
Leo Szilard . . . . .	391
La réaction en chaîne est-elle possible? . . . . .	392
Dernières publications avant le début de la guerre . . . . .	395
Francis Perrin et la masse critique . . . . .	398
Les brevets français . . . . .	399
<b>VI Les bouleversements de la guerre</b>	<b>401</b>
<b>1 Une chronologie</b>	<b>403</b>
<b>2 Après la guerre, le nouveau visage de la physique</b>	<b>411</b>
La physique à grande échelle, dite <i>big science</i> . . . . .	412
Un travail en équipe . . . . .	413
Les enjeux politiques et militaires, la bombe H . . . . .	414
Suprématie américaine . . . . .	415
Europe et Japon après la guerre . . . . .	416
La Grande Bretagne . . . . .	416
La France . . . . .	416
L'Allemagne . . . . .	418
Le Japon . . . . .	420
La <i>big science</i> est-elle vraiment l'enfant de la guerre? . . . . .	420
<b>VII Le temps de la maturité</b>	<b>423</b>
<b>1 Les nouveaux moyens expérimentaux</b>	<b>425</b>
Nouveaux accélérateurs, envolée des énergies . . . . .	426
Le synchro-cyclotron . . . . .	426
Le synchrotron à protons . . . . .	427
L'accélération des électrons . . . . .	428
Les accélérateurs électrostatiques . . . . .	429
Nouveaux détecteurs, nouveaux appareils de mesure . . . . .	431
Le compteur à étincelles et à plaques parallèles . . . . .	431
Le retour des scintillations par la grâce du <i>photomultiplicateur</i> . . . . .	432
L'invention du transistor et de la <i>jonction p-n</i> . . . . .	433
Présence grandissante de l'électronique . . . . .	435
Un cas à part : les émulsions photographiques . . . . .	436
<b>2 Les données s'accablent</b>	<b>439</b>
Les articles de Bethe . . . . .	439
Les véritables transuraniens . . . . .	440
Le neptunium . . . . .	440
Le plutonium . . . . .	441

Les actinides . . . . .	442
L'espérance de vie du neutron . . . . .	443
La diffusion des électrons et la distribution de la charge dans le noyau . . . . .	444
<b>3 La structure « en couches » du noyau</b>	447
Un modèle à particules quasi-indépendantes? . . . . .	448
Wigner et Feenberg : symétries et supermultiplets . . . . .	448
Les arguments de Maria Goeppert Mayer . . . . .	449
L'interaction spin-orbite . . . . .	451
Johannes Hans Daniel Jensen . . . . .	451
Un modèle paradoxal . . . . .	452
<b>4 Le modèle optique</b>	457
Le noyau comme boule de cristal semi-opaque . . . . .	458
Tentatives « optiques » . . . . .	459
Le potentiel « optique » de Woods et Saxon . . . . .	459
L'ordinateur, instrument décisif . . . . .	461
<b>5 Les réactions nucléaires directes</b>	463
Le « stripping » du deuton . . . . .	464
À Berkeley : comment « déshabiller » le deuton . . . . .	464
Birmingham : les distributions angulaires, Stuart Butler . . . . .	465
Succès et développement de la théorie de Butler . . . . .	466
La DWBA et l'ordinateur, une union indissoluble . . . . .	468
Réactions directes, réactions par formation de noyau composé . . . . .	470
<b>6 Un comportement collectif</b>	473
Réactions photonucléaires . . . . .	473
Les résonances géantes . . . . .	475
Les noyaux sont-ils tous sphériques? . . . . .	476
Un témoin de la déformation : le moment quadrupolaire . . . . .	476
James Rainwater et Aage Bohr . . . . .	477
Aage Bohr, du paradoxe à l'unification . . . . .	478
<b>7 Aage Bohr et Ben Mottelson : un modèle unifié du noyau</b>	481
Ben Mottelson . . . . .	481
Nouvelles données, nouvelles confirmations . . . . .	482
Bohr et Mottelson, ou la clé des spectres nucléaires . . . . .	483
Une spectroscopie nucléaire . . . . .	485
Les « orbites de Nilsson » . . . . .	485
L'excitation coulombienne . . . . .	485
La véritable naissance de la spectroscopie nucléaire . . . . .	486
Couronnements . . . . .	487
<b>8 La force nucléaire</b>	489
La découverte du méson $\pi$ . . . . .	490
Le méson $\pi^0$ complète le trio des <i>pions</i> . . . . .	491
Le cœur dur . . . . .	491

<i>Table des matières</i>	597
<b>9 La matière nucléaire</b>	495
Le défi . . . . .	495
Keith Brueckner, Jeffrey Goldstone, Hans Bethe et quelques autres	496
Des bases enfin solides . . . . .	498
L'objection de Niels Bohr est-elle oubliée? . . . . .	498
Trois conférences internationales . . . . .	499
Fin d'une époque . . . . .	499
 <b>Suspension</b>	 501
 <b>Notes</b>	 505
 <b>Bibliographie des ouvrages cités</b>	 549
 <b>Glossaire</b>	 557
 <b>Index</b>	 578

**I**L était temps de retracer l'histoire de la physique nucléaire. Bernard Fernandez vous prend par la main pour vous guider à travers les méandres d'une science compliquée mais passionnante. Utilisant la langue française ordinaire, sans jargon scientifique ni formules mathématiques, il s'adresse à la fois aux lecteurs spécialisés, à qui il offre une perspective historique de leur science, et à l'honnête homme, qui désire s'informer sans posséder de connaissances scientifiques particulières. Dans ce récit toujours vivant se mêlent personnages connus et moins connus, théories élaborées dans l'enthousiasme et parfois démolies ensuite, protocoles d'expériences et descriptions minutieuses d'instruments. Une idée-force du livre est en effet que jamais la théorie ne doit s'affranchir de la réalité expérimentale. Quelques bombes éclatent. Des bombes intellectuelles, excitantes pour l'esprit, mais aussi des bombes matérielles, destructrices et terrifiantes. Sous les yeux du lecteur s'élabore le paysage tourmenté d'une science qui a su attirer à elle des serviteurs passionnés et désintéressés, qui fut choyée par des hommes politiques tout à fait intéressés, qui a offert aux savants, devenus ensuite plus modestement des chercheurs, l'occasion d'éclaircir quelques-uns des mystères de la nature. Devenir adulte, c'est renoncer à certaines illusions. Adulte, la physique nucléaire a dû perdre l'illusion de pouvoir énoncer en une théorie simple et élégante la structure de la matière nucléaire, et accepter la définitive complexité de la réalité matérielle. Pour écrire ce livre l'auteur a dépouillé des centaines d'articles, lus dans leur langue originale. Ce retour aux sources, qui n'a jamais été fait auparavant, donne au livre un cachet d'authenticité qui le fera apprécier de ceux qui refusent les images d'Épinal et les idées reçues.

Photo de couverture : Reproduction de la plaque photographique impressionnée par les radiations de l'uranium, et développée par Becquerel le 1<sup>er</sup> mars 1896 dans son laboratoire.

© Bibliothèque centrale M.N.H.N. Paris.