

# 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 Débuts improbables</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
Consécration . . . . .	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</b>	<b>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</b>	<b>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</b>	<b>1930-1940 : un développement fulgurant</b>	253
<b>1</b>	<b>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</b>	<b>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 Widerøe . . . . .	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'accumulent</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 <i>directes</i></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