

Table des matières

Avant-propos	1
Chapitre 1. Généralités sur le noyau	5
1.1. Découverte de l'électron	7
1.1.1. Expériences de Hittorf et de Crookes	7
1.1.2. Expériences de Perrin et de Thomson	9
1.1.3. Expérience de Millikan	13
1.2. Naissance du noyau	16
1.2.1. Modèles atomiques de Perrin et de Thomson	16
1.2.2. Expérience de Geiger et Marsden	18
1.2.3. Diffusion de Rutherford : modèle planétaire de l'atome	19
1.2.4. Section efficace différentielle de Rutherford	20
1.3. Constitution du noyau.	26
1.3.1. Découverte du proton	26
1.3.2. Découverte du neutron	29
1.3.3. Structure interne des nucléons : quarks <i>u</i> et <i>d</i>	31
1.3.4. Isospin	33
1.3.5. Spin nucléaire	35
1.3.6. Moment magnétique nucléaire	35
1.4. Dimensions du noyau	37
1.4.1. Rayon nucléaire	37
1.4.2. Densité nucléaire, épaisseur de peau.	39
1.5. Nomenclature des nucléides	43
1.5.1. Isotopes, isobares, isotones	43
1.5.2. Noyaux miroirs, noyaux magiques.	47

1.6. Stabilité des noyaux	48
1.6.1. Unité de masse atomique	48
1.6.2. Diagramme de Segré, surface d'énergie nucléaire.	49
1.6.3. Défaut de masse, énergie de liaison	51
1.6.4. Énergie de liaison par nucléon, courbe d'Aston	53
1.6.5. Énergie de séparation d'un nucléon	56
1.6.6. Forces nucléaires	59
1.7. Exercices	59
1.7.1. Exercice 1 – Durée de vie de l'atome planétaire de Rutherford	59
1.7.2. Exercice 2 – Découverte des isotopes	60
1.7.3. Exercice 3 – Spectrographe de masse	61
1.7.4. Exercice 4 – Séparation des isotopes ^{235}U et ^{238}U de l'uranium	62
1.8. Solutions des exercices	64
1.8.1. Solution 1 – Durée de vie de l'atome planétaire de Rutherford	64
1.8.2. Solution 2 – Découverte des isotopes	66
1.8.3. Solution 3 – Spectrographe de masse	67
1.8.4. Solution 4 – Séparation des isotopes ^{235}U et ^{238}U de l'uranium	70

Chapitre 2. Désexcitations nucléaires. 73

2.1. Modèle en couches de nucléons.	76
2.1.1. Généralités sur les modèles nucléaires	76
2.1.2. État individuel d'un nucléon	76
2.1.3. Forme du potentiel harmonique.	78
2.1.4. Structure en couches issues d'un potentiel harmonique	80
2.1.5. Structure en couches issues d'un potentiel Woods-Saxon	87
2.1.5.1. Premier cas : couplage spin-orbite inconnu	87
2.1.5.2. Second cas : prise en compte du couplage	90
2.2. Moment angulaire et parité.	98
2.2.1. Moment angulaire et parité de l'état fondamental	98
2.2.1.1. Cas du noyau d'hélium 4	99
2.2.1.2. Cas du noyau du lithium 6	100
2.2.2. Moment angulaire et parité d'un état excité	101
2.2.2.1. Cas du noyau du lithium 7	102
2.2.2.2. Cas du noyau du néon 18	102
2.3. Désexcitation <i>gamma</i>	104
2.3.1. Définition, énergie de désexcitation	104
2.3.2. Moment angulaire et ordre multipolaire de rayonnement γ	109
2.3.3. Classification des transitions γ ; parité du rayonnement γ	109
2.3.4. Probabilités des transitions γ ; estimations de Weisskopf	111

2.3.5. Conservation du moment angulaire et de la parité.	112
2.3.5.1. Transitions permises	113
2.3.5.2. Probabilités de transitions	114
2.4. Conversion interne	116
2.4.1. Définition.	116
2.4.2. Coefficients de conversion interne	118
2.4.3. Coefficients de conversion partiels.	120
2.4.4. Conversion en couche K	120
2.5. Désexcitation par émission de nucléons	123
2.5.1. Définition.	123
2.5.2. Bilan d'énergie	124
2.5.3. Niveaux liés et niveaux virtuels	125
2.5.4. Étude d'un exemple d'émission de neutron retardé	128
2.6. Formule semi-empirique de masse de Bethe-Weizsäcker.	130
2.6.1. Présentation du modèle de la goutte liquide	130
2.6.2. Formule de Bethe-Weizsäcker, énergie de liaison.	131
2.6.3. Énergie de volume, énergie de surface	131
2.6.4. Énergie coulombienne	132
2.6.5. Énergie d'asymétrie, énergie de paire	134
2.6.6. Principe d'évaluation semi-empirique des coefficients dans la formule de Bethe-Weizsäcker.	136
2.6.6.1. Détermination de a_c et a_a	136
2.6.6.2. Détermination de a_v et a_p	140
2.6.7. Énergie de liaison des isobares, isobare le plus stable	144
2.7. Équation des paraboles de masse pour A impair	147
2.7.1. Expression	147
2.7.2. Détermination de la charge nucléaire de l'isobare le plus stable à partir de l'énergie de désintégration	149
2.7.3. Équation des paraboles de masse pour A pair	153
2.8. Barrière de potentiel nucléaire.	158
2.8.1. Définition, modèle du puits de potentiel rectangulaire	158
2.8.2. Modification du modèle du puits de potentiel rectangulaire	159
2.9. Exercices	160
2.9.1. Exercice 1 – Mesure expérimentale de la période radioactive du vanadium 52	160
2.9.2. Exercice 2 – Structure en couches, J^π de l'état fondamental et des états excités	160
2.9.3. Exercice 3 – Ordre multipolaire, probabilité de désexcitation γ du néon 22	161

2.9.4. Exercice 4 – Énergie de séparation du dernier proton et du dernier neutron du dysprosium 161 (^{161}Dy)	162
2.9.5. Exercice 5 – Détermination de l'énergie coulombienne d'une sphère chargée à partir du potentiel créé par une charge placée au centre du noyau	163
2.9.6. Exercice 6 – Détermination de l'énergie coulombienne d'une sphère chargée à partir de la densité d'énergie électromagnétique	163
2.9.7. Exercice 7 – Détermination de la hauteur de la barrière de potentiel nucléaire : théorie et expérience.	164
2.9.8. Exercice 8 – Détermination expérimentale du coefficient coulombien par la mesure de la variation d'énergie de liaison d'isobares voisins.	165
2.9.9. Exercice 9 – Expressions des estimations de Weisskopf	168
2.10. Solutions des exercices	169
2.10.1. Solution 1 – Mesure expérimentale de la période radioactive du vanadium 52.	169
2.10.2. Solution 2 – Structure en couches, J^π de l'état fondamental et des états excités	170
2.10.3. Solution 3 – Ordre multipolaire, probabilité de désexcitation γ du néon 22	173
2.10.4. Solution 4 – Énergie de séparation du dernier proton et du dernier neutron du dysprosium 161 (^{161}Dy)	174
2.10.5. Solution 5 – Détermination de l'énergie coulombienne d'une sphère chargée à partir du potentiel créé par une charge placée au centre du noyau	176
2.10.6. Solution 6 – Détermination de l'énergie coulombienne d'une sphère chargée à partir de la densité d'énergie électromagnétique	177
2.10.7. Solution 7 – Détermination de la hauteur de la barrière de potentiel nucléaire : théorie et expérience.	179
2.10.8. Solution 8 – Détermination expérimentale du coefficient coulombien par la mesure de la variation d'énergie de liaison d'isobares voisins.	182
2.10.9. Solution 9 – Expressions des estimations de Weisskopf	186
Chapitre 3. Radioactivité α	191
3.1. Faits expérimentaux	193
3.1.1. Observations de Becquerel, radioactivité	193
3.1.2. Découverte de la radioactivité α et de la radioactivité β^-	194

3.1.3. Découverte du positon	195
3.1.4. Découverte du neutrino, expérience de Cowan et Reines	198
3.1.5. Mise en évidence des rayonnements α , β et γ	203
3.2. Décroissance radioactive	205
3.2.1. Loi empirique de Rutherford et Soddy	205
3.2.2. Période radioactive	206
3.2.3. Durée de vie moyenne d'un noyau radioactif	207
3.2.4. Activité d'une source radioactive	208
3.3. Radioactivité α	209
3.3.1. Équation-bilan	209
3.3.2. Perte de masse, énergie de désintégration.	210
3.3.3. Diagramme d'énergie de désintégration.	213
3.3.4. Structure fine des raies α	214
3.3.5. Loi de Geiger-Nuttall.	217
3.3.6. Modèle quantique de l'émission α par effet tunnel	219
3.3.7. Estimation de la période radioactive, facteur de Gamow	222
3.4. Exercices	225
3.4.1. Exercice 1 – Détermination expérimentale de la demi-vie d'un émetteur α	225
3.4.2. Exercice 2 – Désintégration d'un noyau père émetteur α	226
3.4.3. Exercice 3 – Puissance nucléaire produite par la désintégration du plutonium 239.	227
3.5. Solutions des exercices	228
3.5.1. Solution 1 – Détermination expérimentale de la demi-vie d'un émetteur α	228
3.5.2. Solution 2 – Désintégration d'un noyau père émetteur α	230
3.5.3. Solution 3 – Puissance nucléaire produite par la désintégration du plutonium 239.	232

Chapitre 4. Radioactivité bêta, filiation radioactive 235

4.1. Radioactivité <i>bêta</i>	237
4.1.1. Expérience de Frédéric et Irène Joliot-Curie : découverte de la radioactivité artificielle	237
4.1.2. Équation-bilan, énergie de désintégration β	242
4.1.3. Spectre continu de l'émission β	245
4.1.4. Diagramme de Sargent, règles de sélection des transitions β	247
4.1.5. Diagramme d'énergie de désintégration.	250
4.1.6. Condition de l'émission β^+	252
4.1.7. Désintégration par capture électronique.	253

4.1.8. Double désintégration β , rapport d'embranchement	257
4.1.9. Désexcitation atomique, effet Auger.	260
4.2. Filiations radioactives.	265
4.2.1. Définition.	265
4.2.2. Filiation simple à deux corps	266
4.2.3. Filiation à plusieurs corps, équations de Bateman	268
4.2.4. Équilibre séculaire	271
4.3. Production de radionucléides par bombardement nucléaire	274
4.3.1. Généralités	274
4.3.2. Taux de production d'un radionucléide	275
4.3.3. Rendement de production d'un radionucléide	277
4.4. Séries radioactives naturelles	281
4.4.1. Présentation	281
4.4.2. Famille du thorium ($4n$)	282
4.4.3. Famille du neptunium ($4n + 1$)	284
4.4.4. Famille de l'uranium 235 ($4n + 2$)	286
4.4.5. Famille de l'uranium 238 ($4n + 3$)	288
4.5. Exercices	292
4.5.1. Exercice 1 – Détermination de l'énergie maximale du spectre β^+ à partir de la formule semi-empirique de Bethe-Weizsäcker	292
4.5.2. Exercice 2 – Désintégration de l'indium 114 : énergies maximales des spectres β^- et β^+	293
4.5.3. Exercice 3 – Désintégration du vanadium 48 : énergies des photons et des électrons Auger	294
4.5.4. Exercice 4 – Désintégration de l'arsenic 74 : masses de produits formés et énergies maximales des spectres β^- et β^+	295
4.5.5. Exercice 5 – Désintégration du cuivre 64 : détermination de probabilités de désintégration partielles par unité de temps	296
4.5.6. Exercice 6 – Étude des diverses voies de désintégration du potassium 40.	297
4.5.7. Exercice 7 – Accumulation du xénon 131 par irradiation du tellure 130	298
4.6. Solutions des exercices	299
4.6.1. Solution 1 – Détermination de l'énergie maximale du spectre β^+ à partir de la formule semi-empirique de Bethe-Weizsäcker	299
4.6.2. Solution 2 – Désintégration de l'indium 114 : énergies maximales des spectres β^- et β^+	301
4.6.3. Solution 3 – Désintégration du vanadium 48 : énergies des photons et des électrons Auger	303
4.6.4. Solution 4 – Désintégration de l'arsenic 74 : masses de produits formés et énergies maximales des spectres β^- et β^+	308

4.6.5. Solution 5 – Désintégration du cuivre 64 : détermination de probabilités de désintégration partielles par unité de temps	310
4.6.6. Solution 6 – Étude des diverses voies de désintégration du potassium 40.	312
4.6.7. Solution 7 – Accumulation du xénon 131 par irradiation du tellure 130	314
Annexe 1. Énergie quantifiée de l'oscillateur harmonique quantique à trois dimensions	319
Annexe 2. Masses atomiques de quelques nucléides	327
Bibliographie	335
Index	341