

TABLE DES MATIÈRES

Abréviations: SC: Sujet connexe C: Complément

AVANT-PROPOS

VII

PROLOGUE

Le grand tour.....	2
Fenêtre 1: 10^{-14} m, le noyau atomique	2
Fenêtre 2: 10^{-10} m, l'atome	4
Fenêtre 3: 10^{-1} m, l'échelle humaine.....	5
Fenêtre 4: 10^8 m, la planète Terre	6
Fenêtre 5: 10^9 m, le système Terre-Lune.....	6
Fenêtre 6: 10^{13} m, le système solaire.....	7
Fenêtre 7: 10^{17} m, le Soleil et Alpha du Centaure.....	9
Fenêtre 8: 10^{21} m, la Voie lactée.....	9
Fenêtre 9: 10^{25} m, amas de galaxies et vides	10
Termes importants	12
Questions de révision	12

CHAPITRE 0

L'astronomie à l'œil nu.....	13
<i>Les enfants du soleil</i>	13
0.1 Les constellations.....	14
Les noms des étoiles	16
Le système des magnitudes.....	16
0.2 La rotation de la sphère céleste	16
L'étoile Polaire.....	17
Les étoiles circumpolaires et les étoiles invisibles.....	18
0.3 Le mouvement annuel du Soleil.....	20
0.4 Les saisons	21
Le point de vue géocentrique.....	21
Le point de vue héliocentrique	23
0.5 Les phases de la Lune.....	24
0.6 La durée du jour et du mois	26
La rotation de la Terre.....	26
La révolution de la Lune.....	27
0.7 Les éclipses de Lune et de Soleil	28
0.8 La précession des équinoxes	30
0.9 Le calendrier.....	31
0.10 Autres objets célestes visibles à l'œil nu	33
La Voie lactée.....	33
Les nébuleuses	33
Les comètes.....	33
Les astres errants.....	34

SC	L'indice UV.....	35
C0.1	L'altitude de l'étoile Polaire.....	38
C0.2	Les étoiles circumpolaires.....	38
C0.3	L'altitude du Soleil.....	39
C0.4	L'horloge sidérale.....	39
C0.5	La durée d'une éclipse totale de Soleil.....	44
C0.6	La prédiction des éclipses de Soleil.....	44
	Termes importants	47
	Questions de révision	47
	Problèmes	48

PREMIÈRE PARTIE

	<i>La perspective cosmique</i>	51
--	--------------------------------------	----

CHAPITRE 1

	Le système du monde	54
1.1	L'invention de l'astrologie.....	54
1.2	Les observations mésopotamiennes.....	56
	Les caractéristiques du mouvement des astres errants.....	57
1.3	Un Univers géocentrique.....	57
	La perfection du cercle.....	58
1.4	Le système de Ptolémée.....	59
	Des liens inexplicables.....	60
1.5	Le système de Copernic.....	62
	Un premier argument de concordance: l'ordre des planètes.....	63
	Un argument de simplicité: l'explication de la rétrogradation des planètes.....	64
	Un deuxième argument de concordance: la taille relative des rétrogradations.....	65
	Le problème de la préférence zodiacale.....	65
1.6	Les observations de Galilée.....	66
1.7	Un accueil mitigé.....	67
SC	Une critique de l'astrologie.....	69
C1.1	Période sidérale et période synodique.....	72
	Termes importants	74
	Questions de révision	74
	Problèmes	75

CHAPITRE 2

	La profondeur du ciel	76
2.1	Un soleil lointain.....	77
	La méthode d'Aristarque.....	77
2.2	La taille de la Terre.....	79
2.3	La distance de la Terre à la Lune.....	80
2.4	L'échelle du système de Ptolémée.....	80
2.5	L'échelle du système de Copernic.....	81
	La distance des planètes inférieures.....	81
	La distance des planètes supérieures.....	82
	La sphère des étoiles éclatées.....	83

2.6	La détermination de l'unité astronomique	84
2.7	La parallaxe des étoiles.....	85
	La relation parallaxe-distance.....	85
2.8	La relation intensité-luminosité-distance	87
2.9	La luminosité des étoiles	88
	La méthode des étoiles jumelles.....	88
	Les céphéides.....	90
2.10	L'étendue de la Voie lactée.....	91
2.11	Des nébuleuses jusqu'aux confins de l'Univers observable	95
	Les étalons de distance.....	96
C2.1	Distance Terre-Lune : la méthode d'Hipparque.....	99
C2.2	Distance d'une planète supérieure : la méthode de Copernic.....	100
C2.3	La relation intensité-luminosité-distance	101
	Termes importants	102
	Questions de révision	102
	Problèmes	103

DEUXIÈME PARTIE

<i>Sur la Terre comme au ciel</i>	105
---	-----

CHAPITRE 3

La gravitation	108
-----------------------------	-----

3.1	Les observations de Tycho Brahé.....	108
3.2	Les lois de Kepler.....	109
	Première loi de Kepler	110
	Deuxième loi de Kepler	111
3.3	La physique des orbites	112
3.4	La gravitation universelle	114
	La légende de la pomme de Newton... ..	114
	... et la réalité historique.....	115
	L'apesanteur en orbite.....	116
3.5	La masse des objets célestes	116
3.6	Le triomphe de Newton.....	118
3.7	L'origine de la théorie de la relativité	119
	Le mur de la lumière	122
	La relation masse-énergie	123
3.8	La relativité générale.....	123
	Le principe d'équivalence	124
	La courbure de l'espace-temps.....	125
	Les lentilles gravitationnelles.....	126
3.9	Le ralentissement du temps gravitationnel.....	127
C3.1	La vitesse d'une planète à l'aphélie et au périhélie	129
C3.2	De la troisième loi de Kepler à la force en $1/r^2$	131
C3.3	La chute de la Lune	132
C3.4	La loi de la gravitation universelle	133
C3.5	La troisième loi de Kepler généralisée.....	133
C3.6	Ralentissement du temps et contraction des longueurs en relativité restreinte.....	134
C3.7	Champ gravitationnel, vitesse minimale de mise en orbite et vitesse de libération.....	136

Termes importants	139
Questions de révision	139
Problèmes	140

CHAPITRE 4

Les codes de la lumière	143
4.1 La nature de la lumière	143
4.2 Le spectre électromagnétique	144
La spectroscopie	147
4.3 Lumière et température	147
Le spectre du corps noir	148
La luminosité du corps noir	149
4.4 Le photon et l'atome	152
Le spectre de l'hydrogène	153
4.5 Les principaux types de spectres	153
Le spectre d'émission	154
Le spectre thermalisé	154
Le spectre d'absorption	155
Les autres spectres	157
4.6 Opacité et ionisation	157
4.7 Le décalage de la longueur d'onde	159
L'effet Doppler	159
L'effet Doppler relativiste	161
Le décalage vers le rouge gravitationnel	162
Le décalage vers le rouge cosmologique	162
Le paramètre z	163
4.8 D'autres codes	163
La taille maximale d'une source lumineuse variable	163
La mesure du champ magnétique	164
La polarisation de la lumière	165
C4.1 Les magnitudes	166
La magnitude apparente	166
La magnitude absolue et le module de distance	167
La conversion des magnitudes	168
La correction bolométrique	169
C4.2 Le rapport I_b/I_v et la température des étoiles	170
L'indice $B - V$	172
C4.3 Le rayonnement synchrotron	172
C4.4 L'effet Doppler classique	173
Termes importants	175
Questions de révision	175
Problèmes	177

CHAPITRE 5

Les yeux artificiels	179
5.1 Le pouvoir de captation	179
5.2 La limite de résolution	180
L'optique adaptative	182
Limite de résolution et longueur d'onde	182
L'interférométrie	183
5.3 Le facteur de grossissement	184
5.4 Enregistrer la lumière	187

5.5	L'observation en lumière visible.....	188
	Le télescope spatial Hubble.....	191
SC	L'évolution du télescope.....	192
5.6	Les fenêtres de l'atmosphère.....	198
5.7	L'observation en lumière à basse énergie.....	198
	De l'infrarouge aux micro-ondes.....	198
	Les ondes radio.....	200
	L'astronomie radar.....	202
5.8	L'observation en lumière à haute énergie.....	202
SC	La nature de la science et de la technologie.....	205
C5.1	Le grossissement d'un télescope.....	209
	Termes importants	211
	Questions de révision	211
	Problèmes	213



TROISIÈME PARTIE

<i>Le grand jeu des étoiles</i>	215
---------------------------------------	-----

CHAPITRE 6

Les caractéristiques des étoiles	218
---	-----

6.1	Le paradoxe de l'âge du Soleil.....	218
6.2	L'énergie nucléaire.....	220
	La fusion et la fission.....	221
	Le modèle du volcan.....	222
6.3	La durée de vie du Soleil.....	224
6.4	La nucléosynthèse stellaire.....	226
	La transmutation des noyaux.....	227
	La chaîne proton-proton ($T > 10\,000\,000\text{ K}$).....	227
	Le cycle CNO ($T > 15\,000\,000\text{ K}$).....	228
	Le processus triple alpha ($T > 100\,000\,000\text{ K}$).....	229
	La fusion carbone-carbone ($T > 600\,000\,000\text{ K}$).....	230
	La fusion oxygène-oxygène ($T > 1\,500\,000\,000\text{ K}$).....	230
	La fusion du silicium ($T > 3\,000\,000\,000\text{ K}$).....	231
	La formation des autres éléments.....	231
6.5	La structure interne des étoiles.....	231
	La «soupape de sûreté» des étoiles.....	232
	Le transport de l'énergie.....	233
	Sonder l'intérieur du Soleil.....	234
6.6	La surface des étoiles.....	236
	Les taches.....	237
	Les zones actives.....	238
	L'atmosphère.....	239
6.7	La classification des étoiles.....	240
	Comment placer une étoile sur l'axe de température?.....	241
	Comment placer une étoile sur l'axe de luminosité?.....	243
6.8	Le Soleil en perspective.....	244
	Le rayon des étoiles.....	245
6.9	La masse des étoiles.....	246
	La troisième loi de Kepler appliquée aux systèmes d'étoiles doubles.....	247

6.10	L'interprétation du diagramme HR	248
C6.1	Profondeur relative des raies spectrales et température	251
C6.2	La masse des étoiles	253
C6.3	Les binaires spectroscopiques	254
	Termes importants	258
	Questions de révision	258
	Problèmes	261

CHAPITRE 7

	Vie et mort des étoiles	262
7.1	La matière interstellaire.....	262
	Les grains de poussière interstellaire	262
	Le gaz interstellaire.....	263
	Les régions HII.....	264
	Les régions HI.....	265
	Les nuages moléculaires.....	265
	La couleur des nébuleuses	266
7.2	Une étoile est née.....	267
	Les détails de l'effondrement	269
7.3	La vie dans la série principale	270
7.4	L'évolution post-série principale des étoiles de faible masse	273
	La phase géante rouge.....	274
	Le flash de l'hélium et la phase sous-géante.....	275
	La phase supergéante rouge et les nébuleuses planétaires.....	276
	La phase naine blanche	276
	Les étoiles sous-naines.....	279
7.5	L'évolution post-série principale des étoiles massives	280
	La catastrophe du fer.....	281
	Les supernovæ.....	281
	Les étoiles Wolf-Rayet.....	284
	L'énigmatique Eta de la Carène	285
	L'âge des amas d'étoiles	285
7.6	L'évolution des étoiles doubles.....	287
	Les novæ	289
	Les supernovæ de type Ia	290
7.7	Les étoiles à neutrons	291
	Étoiles à neutrons et transfert de masse.....	293
	Les pulsars binaires et les sursauts gamma	293
7.8	Les trous noirs.....	295
	La détection des trous noirs	297
	Une mission vers un trou noir.....	298
SC	La vie du Soleil	301
C7.1	Les régions HII.....	304
	De l'ultraviolet au visible	304
	Les raies interdites	304
C7.2	La structure hyperfine de l'hydrogène	305
C7.3	La dégénérescence et les étoiles.....	306
C7.4	Les étoiles variables.....	308
C7.5	Lobes de Roche et points de Lagrange.....	309
C7.6	L'effet de marée	314
	Termes importants	315
	Questions de révision	315
	Problèmes	317

Les environnements galactiques	319
8.1 L'anatomie de la Voie lactée.....	319
L'origine des bras spiraux.....	321
Les populations d'étoiles.....	324
Un scénario de la formation de la Voie lactée.....	326
La masse de la Voie lactée.....	328
Un voyage au centre de la Voie lactée.....	329
8.2 Les voisines de la Voie lactée.....	331
8.3 La classification des galaxies.....	335
Les propriétés distinctives.....	336
8.4 Galaxies en interaction.....	338
8.5 Les galaxies actives.....	342
8.6 La loi de Hubble.....	345
8.7 La superstructure de l'Univers.....	347
8.8 L'Univers invisible.....	350
C8.1 Les galaxies actives.....	354
Les galaxies Seyfert 1 et 2.....	354
Les radiogalaxies.....	354
Les quasars et les QSO.....	354
Les blazars.....	354
Contraintes physiques.....	355
Une interprétation globale plausible.....	356
C8.2 La masse de la matière invisible.....	357
1. La distribution de la lumière et de la matière.....	357
2. La courbe de rotation du disque.....	358
3. La nécessité de la matière invisible.....	359
4. Le calcul de la masse invisible.....	360
Termes importants	363
Questions de révision	363
Problèmes	365



QUATRIÈME PARTIE

Un cosmos en évolution..... 367

CHAPITRE 9

La théorie du Big Bang	370
9.1 Un Univers fini ou infini?.....	370
Le paradoxe d'Olbers.....	371
9.2 Einstein et la constante cosmologique.....	372
9.3 L'expansion de l'espace.....	373
L'origine de la loi de Hubble.....	375
Le paramètre de Hubble et l'âge de l'Univers.....	376
9.4 Le décalage vers le rouge cosmologique.....	377
9.5 Big Bang!.....	379
Avant le Big Bang.....	380
9.6 Le rayonnement de fond cosmologique.....	381
9.7 La nucléosynthèse primordiale.....	384

Étape 1: Création de la matière ($t = 10^{-32}$ s; $T = 10^{26}$ K; $\rho = 10^{73}$ kg/m ³)	384
Étape 2: Formation des protons et des neutrons ($t = 0,0001$ s; $T = 10^{12}$ K; $\rho = 10^{17}$ kg/m ³)	385
Étape 3: Les neutrons commencent à déperir ($t = 0,01$ s; $T = 10^{11}$ K; $\rho = 10^{13}$ kg/m ³)	385
Étape 4: L'hélium est inaccessible ($t = 1$ s; $T = 10^{10}$ K; $\rho = 10^9$ kg/m ³)	385
Étape 5: Le deutérium devient stable: les neutrons sont sauvés ($t = 100$ s; $T = 10^9$ K; $\rho = 10^5$ kg/m ³)	386
Étape 6: L'hélium reste coincé: les noyaux lourds devront attendre ($t = 12$ jours; $T = 10^7$ K; $\rho = 0,001$ kg/m ³)	386
Nucléosynthèse primordiale et matière invisible	387
9.8 L'émergence de la structure	388
SC La victoire du Big Bang	390
Termes importants	393
Questions de révision	393
Problèmes	394

CHAPITRE 10

Les modèles d'Univers	395
10.1 Les paramètres des modèles d'Univers	395
Le paramètre de Hubble et la masse volumique de la matière	395
La masse volumique du vide	396
La courbure globale de l'espace	396
Les relations entre les paramètres	398
Le modèle original d'Einstein	399
10.2 Les modèles de Friedmann et d'Einstein-de Sitter	399
Le destin de l'Univers	401
10.3 L'expansion de l'espace dans l'Univers d'Einstein-de Sitter	402
La distance des sources de lumière dans l'Univers d'Einstein-de Sitter	405
10.4 Le nouveau modèle standard	409
L'évolution du facteur d'échelle dans le nouveau modèle standard	412
C10.1 Dérivation newtonienne de la relation entre H et ρ_m dans l'Univers d'Einstein-de Sitter	416
C10.2 L'âge de l'Univers dans le modèle d'Einstein-de Sitter	417
C10.3 Distance d'une source de lumière dans l'Univers d'Einstein-de Sitter	417
C10.4 Le trajet des photons du rayonnement de fond cosmologique dans le modèle d'Einstein-de Sitter	418
C10.5 Comparaison des distances et des intensités des objets lointains dans le modèle d'Einstein-de Sitter et dans le nouveau modèle standard	420
C10.6 L'évolution du facteur d'échelle dans les premiers instants de l'Univers	421
Termes importants	428
Questions de révision	428
Problèmes	429



La nouvelle frontière 431

CHAPITRE 11

Le système Terre-Lune 434

- 11.1 La constitution interne de la Terre 434
 - Taille, masse et densité..... 434
 - Les matériaux de base 436
 - Une hiérarchie de densités..... 437
 - Sonder le centre de la Terre 437
 - La chaleur interne 438
- 11.2 L'horloge radioactive et l'âge de la Terre 439
 - L'âge de la Terre 441
- 11.3 Le magnétisme terrestre 442
- 11.4 La dérive des continents 443
 - Les points chauds 445
- 11.5 L'atmosphère de la Terre 445
 - La structure verticale de l'atmosphère..... 446
- 11.6 La température de la Terre 447
 - L'effet de serre..... 448
- 11.7 L'atmosphère fuit-elle?..... 448
- 11.8 L'anatomie de la Lune 450
 - L'évolution de la surface lunaire..... 452
 - Les montagnes lunaires 454
 - De l'eau sur la Lune?..... 454
- 11.9 Les marées 455
- C11.1 La température d'équilibre d'une planète 458
- C11.2 L'effet de marée 459
 - L'origine des deux renflements de marée..... 459
 - Calcul de l'effet de marée..... 459
- Termes importants** 461
- Questions de révision** 461
- Problèmes**..... 463

CHAPITRE 12

Une croisière interplanétaire — Première partie 464

- 12.1 Un inventaire du système solaire 464
- 12.2 L'exploration du système solaire 465
- 12.3 Mercure: le paradis du bronzage..... 467
- 12.4 Vénus: l'enfer voilé 471
 - L'atmosphère de Vénus 472
 - La surface de Vénus..... 473
 - L'évolution de la croûte de Vénus..... 473
 - La rotation rétrograde de Vénus 475
- 12.5 La Terre et la Lune..... 476
- 12.6 Mars: la planète rouillée..... 478
 - Histoires de martiens 479
 - La topographie de Mars..... 480
 - Les réserves de glace 484
 - Un passé plus clément 485
 - L'analyse du sol de Mars et la recherche de la vie 486
 - Les satellites de Mars..... 489

12.7	Les astéroïdes	490
	La distribution des astéroïdes dans la ceinture principale.....	492
C12.1	En voyage dans le système solaire.....	494
	Le chemin le plus économique.....	494
	Les fenêtres de lancement.....	495
C12.2	L'orbite d'une sonde: notions avancées	496
C12.3	L'effet catapulte	498
	Termes importants	502
	Questions de révision	502
	Problèmes	503

CHAPITRE 13

Une croisière interplanétaire – Deuxième partie		504
13.1	Jupiter: une étoile ratée.....	505
	L'atmosphère de Jupiter	506
	Voyage au centre de Jupiter	507
13.2	Les satellites Galiléens.....	509
	Io: la pizza surgelée	509
	Europe: la boule de billard craquelée	513
	Ganymède: une bouteille au congélateur.....	516
	Callisto: la lune de glace	517
13.3	Saturne: le seigneur des anneaux.....	519
	Titan: le royaume du méthane	523
13.4	Uranus: la planète couchée.....	524
13.5	Neptune: la dernière géante.....	527
	Triton: une calotte polaire en ébullition	529
13.6	Pluton: la planète double	531
13.7	Les anneaux planétaires.....	533
	La limite de Roche.....	533
	La nature et l'origine des anneaux	534
	L'anneau de Jupiter.....	535
	Les anneaux de Saturne	535
	Les anneaux d'Uranus et de Neptune.....	536
13.8	Le bestiaire des petits mondes.....	537
	Les mondes intermédiaires: entre 1000 et 2000 km.....	537
	Astéroïdes et satellites de taille comprise entre 250 et 1000 km....	538
13.9	Les comètes	539
	Le noyau de la comète de Halley.....	540
	La queue des comètes.....	541
	Origine et destin des comètes.....	541
	Les étoiles filantes	542
13.10	Lorsque le ciel nous tombe sur la tête... ..	543
	Le danger des météorites	544
C13.1	La limite de Roche.....	548
C13.2	Limite de hauteur des montagnes et sphéricité des objets planétaires.....	548
	Termes importants	550
	Questions de révision	550
	Problèmes	552

CHAPITRE 14

La planétologie	553
14.1 La classification des planètes.....	553
La différenciation des intérieurs planétaires.....	554
14.2 La planétologie comparée.....	555
Une question d'atmosphère.....	555
La comparaison des croûtes.....	557
14.3 L'origine du système solaire.....	559
Les météorites et l'âge du système solaire.....	559
La formation des planètes.....	560
L'origine de la rotation des planètes.....	561
14.4 Les exoplanètes.....	562
Les Jupiters chauds.....	564
Les planètes excentriques.....	566
C14.1 L'atmosphère des planètes telluriques.....	567
SC Les anomalies du système solaire.....	568
Termes importants	572
Questions de révision	572

ÉPILOGUE

Le cosmos et la vie	574
La vie sur Terre.....	574
Les grandes étapes de la vie sur Terre.....	575
Les environnements propices à la vie.....	576
L'hypothèse « optimiste » : une communauté galactique d'êtres intelligents....	578
L'hypothèse « pessimiste » : sommes-nous seuls?.....	581
Termes importants	584
Questions de révision	584

ANNEXES

I La notation scientifique.....	585
II Unités et facteurs de conversion.....	585
III L'alphabet grec.....	588
IV Latitude et longitude.....	589
V Géométrie élémentaire.....	589
VI Les 25 étoiles les plus brillantes dans le ciel de la Terre.....	591
VII Les 25 étoiles les plus proches de la Terre.....	592
VIII Le Soleil et les 16 objets planétaires principaux du système solaire....	593
IX Constantes universelles.....	593
X Le ciel ce soir.....	594
XI Les isotopes principaux de chaque élément chimique.....	596

RÉPONSES AUX PROBLÈMES	597
-------------------------------------	-----

SOURCES DES PHOTOGRAPHIES	601
--	-----

INDEX	605
--------------------	-----