

Inhaltsverzeichnis

1	Das Sonnensystem und die Heliosphäre	1
1.1	Eigenschaften des Sonnensystems	1
1.2	Dynamoprozesse und magnetische Eigenschaften	4
1.3	Der Einfluss der Sonne auf die Heliosphäre	6
1.4	Zur Erforschung des heliosphärischen Weltraumwetters	8
	Weiterführende Literatur	13
2	Erforschung der Sonne und Heliosphäre	15
2.1	Kurze Geschichte magnetischer Phänomene und Prozesse im Sonnensystem	16
2.2	Observatorien im Weltraum und auf der Erde	20
2.2.1	Kurze Geschichte der Weltraummissionen	20
2.2.2	Bodengebundene, ballongetragene und von Raketen aus beobachtende Sonnenteleskope	27
2.3	Menschen und ihre Forschungsmethoden	32
2.4	Einige Messinstrumente und Messtechniken	34
2.4.1	Allgemeine Bemerkungen	34
2.4.2	Messungen von Teilchen	36
2.4.3	Messungen von Feldern	39
2.4.4	Messungen von Photonen	41
2.5	Analytische Modellierung und numerische Simulation	44
	Weiterführende Literatur	47

3 Die magnetisch aktive Sonne	49
3.1 Magnetische Sonnenphänomene	52
3.2 Der innere Aufbau und die Atmosphärenschichten der Sonne	53
3.2.1 Ein Blick in das Sonneninnere	54
3.2.2 Sonnenphänomene in den solaren Atmosphärenschichten	56
3.3 Magnetische Sonnenflecken und solare Aktivitätszyklen	59
3.3.1 Sonnenflecken und Fackelgebiete im photosphärischen Netzwerk	60
3.3.2 Sonnenflecken im chromosphärischen Netzwerk und in der Korona	63
3.3.3 Über die Entstehung der Sonnenflecken	65
3.3.4 Entwicklung der Sonnenfleckenrelativzahl und magnetischer Flussdichten im Verlauf der 11- bzw. 22-jährigen Aktivitätszyklen	70
3.3.5 Die passive und aktive Sonne	73
3.4 Erzeugung solarer Magnetfelder in Dynamoprozessen	75
3.4.1 Das dynamoelektrische Prinzip des Werner von Siemens	75
3.4.2 Zur Realisierung kosmischer Dynamoprozesse	76
3.4.3 Zur Wirkungsweise des Sonnendynamos	77
3.4.4 Das α - Ω -Dynamo-Modell	80
3.4.5 Das Flusstransport-Dynamomodell	82
3.5 Chromosphärisches Netzwerk, Spikulen und Tornados	86
3.5.1 Chromosphärische Spikulen	88
3.5.2 Atmosphärische Heizung durch chromosphärische Tornados	89
3.5.3 Solare Gaswolken über dem Sonnenrand	91
3.6 Protuberanzen und koronale Magnetfeldstrukturen	92
3.6.1 Protuberanzen und Filamente	94
3.6.2 Feldstrukturentwicklungen in Protuberanzen	94
3.6.3 Die instabile Grand-Daddy-Heckenprotuberanz	97
3.7 Flares, solare Eruptionen und koronale Masseauswürfe	98
3.7.1 Freisetzung magnetischer Energien in Flare-Prozessen	99
3.7.2 Eruptionen solarer Protuberanzen	103

3.7.3	Koronale Masseauswürfe	105
3.8	Zur Aufheizung der solaren Atmosphärenschichten	108
	Weiterführende Literatur	113
4	Der Sonnenwind im Weltraum	115
4.1	Historische Bemerkungen	116
4.2	Sonnenwind und Heliosphäre	119
4.2.1	Regionen der Heliosphäre	119
4.2.2	Am Rande von Heliosphäre und Sonnensystem	122
4.3	Eigenschaften des Sonnenwinds und ihre Variationen im Verlauf des Sonnenzyklus	124
4.3.1	Fundamentale Parameter	124
4.3.2	Räumliche Variationen	125
4.3.3	Zeitliche Variationen mit dem Sonnenzyklus	129
4.4	Die Quellen des Sonnenwinds in der Sonnenkorona	130
4.4.1	Großräumige Quellen in der Korona	131
4.4.2	Kleinräumige Quellen im chromosphärischen Netzwerk	135
4.4.3	Kurze Zusammenfassung	138
4.5	Heizung der Korona und Beschleunigung des Sonnenwinds	139
4.5.1	Temperaturen und das Heizungsproblem der Sonnenatmosphäre	139
4.5.2	Zur Beschleunigung des Sonnenwinds	141
4.5.3	Koronale Masseauswürfe	147
4.5.4	Zur Heizung der Sonnenkorona	149
4.5.5	Zur Beschleunigung schwerer Ionen	152
4.6	Die dynamische Heliosphäre	154
4.6.1	Turbulenzen und Wellen im Sonnenwind	154
4.6.2	Stoßwellen und Diskontinuitäten im Sonnenwind	160
4.7	Mikroskopische Prozesse im Sonnenwind	165
4.7.1	Allgemeine Betrachtungen	165
4.7.2	Geschwindigkeitsverteilungen und grundlegende Begriffe	168
4.7.3	Charakteristische Längen und Zeiten im Sonnenwind	170
4.7.4	Verteilungsfunktionen von Elektronen	173
4.7.5	Verteilungsfunktionen der Protonen	176

4.7.6	Plasmamikroinstabilitäten	178
4.7.7	Schwere Ionen im Sonnenwind	182
	Weiterführende Literatur	184
5	Parker Solar Probe und Solar Orbiter	185
5.1	Neue Epoche in der Erforschung der inneren Heliosphäre	185
5.2	Wissenschaftliche Ziele und Instrumente von Parker Solar Probe	189
5.2.1	Wissenschaftliche Fragen	189
5.2.2	Wissenschaftliche Instrumente	191
5.3	Wissenschaftliche Ziele und Instrumente von Solar Orbiter	192
5.3.1	Wissenschaftliche Fragen	192
5.3.2	Wissenschaftliche Instrumente	194
5.4	Erste Ergebnisse der Missionen	196
5.4.1	Sonnenwindaufnahmen mit WISPR	196
5.4.2	Wellen und Turbulenz im Sonnenwind	197
5.4.3	Magnetfeldumkehrungen	198
5.4.4	Lagerfeuer im ultravioletten Licht	202
5.4.5	Ultraviolettes Linienspektrum der Sonnenatmosphäre	202
5.4.6	Bestimmung der Geschwindigkeit des Sonnenwinds	205
5.4.7	Neuigkeiten von PSP und SO	207
	Weiterführende Informationen im Internet	208
6	Hindernisse im Sonnenwind	209
6.1	Bugstoßwellen vor magnetischen Hindernissen	211
6.2	Magnetosphären und Ionosphären der Planeten und Monde als Hindernisse	213
6.3	Asteroiden und Kometen als Hindernisse	216
6.4	Interstellare Teilchen als Hindernisse	218
	Weiterführende Literatur	219
7	Kometen und ihre Schweife	221
7.1	Ausbildung der Kometenkoma	224
7.2	Kometenschweife in großer Sonnennähe	226
7.3	Fragmentation des Kometenkerns und Schweifabrisse	228
7.4	Aktivitäten im Kometenkern	230
	Weiterführende Literatur	232

8 Magnetosphären, Ionosphären und Polarlichter	235
8.1 Historisches	236
8.2 Die Planeten mit dynamogenerierten Magnetosphären	241
8.3 Die Erde im Sonnenwind	247
8.3.1 Erzeugung der erdmagnetosphärischen Felder	249
8.3.2 Funktionsprinzip des Geodynamo	252
8.3.3 Exkursionen und Umpolungen des Erdmagnetfelds	255
8.3.4 Strukturen und Stromsysteme der Erdmagnetosphäre	259
8.3.5 Über die Entstehung der Polarlichter	262
8.3.6 Erdmagnetische Teilstürme	266
8.4 Magnetfeldeigenschaften anderer Planeten	268
8.4.1 Merkurs Magnetfeld in großer Sonnennähe	269
8.4.2 Die induzierte Magnetosphäre der Venus	271
8.4.3 Das Krustenmagnetfeld des Erdmonds	273
8.4.4 Elektrische Ströme und Magnetfelder auf dem Mars	274
8.4.5 Dynamoprozesse im Inneren des Jupiters	276
8.4.6 Einfluss von Magnetfeldern auf die Ringstrukturen des Saturns	278
8.5 Strahlungsgürtel und Polarlichter anderer Planeten	280
8.5.1 Strahlungsgürtel und Polarlichter des Jupiters	280
8.5.2 Polarlichter des Saturns	283
8.5.3 Strahlungsgürtel und Polarlichter durch bzw. auf Monden der Gasplaneten	285
8.5.4 Die Polarlichter der Eisplaneten	288
8.6 Bedeutung der Erforschung planetarer Magnetosphären und Ionosphären	291
8.6.1 Warum die Magnetosphären erforscht werden	291
8.6.2 Über die Bedeutung der Ionosphären	292
Weiterführende Literatur	294
9 Erforschung des Weltraumwetters	295
9.1 Weltraumwetter in der Heliosphäre und Umgebung der Erde	296

XL Inhaltsverzeichnis

9.1.1	Wetter und Klima im Weltraum und auf der Erde	296
9.1.2	Das Weltraumwetter bestimmende Faktoren	297
9.2	Vorstellung exemplarischer Weltraumwetterereignisse	300
9.2.1	Koronale Masseauswürfe	300
9.2.2	Solare energiereiche Teilchen	302
9.2.3	Kosmische Strahlung in der Heliosphäre	304
9.3	Weltraumwetter und Erdmagnetosphäre	307
9.3.1	Erdmagnetische Stürme	308
9.3.2	Strahlenbelastung in den Van-Allen-Gürteln	310
9.4	Auswirkungen des Weltraumwetters	312
9.4.1	Auswirkungen auf das Erdsystem	312
9.4.2	Konsequenzen des Weltraumwetters für unsere technische Umwelt	312
9.4.3	Direkte Konsequenzen des Weltraumwetters für uns Menschen	315
9.5	Aufgaben und konkrete Arbeiten der Weltraumwetter-Vorhersagezentren	317
9.5.1	Vorhersagen zur Entwicklung des Weltraumwetters	317
9.5.2	Bewusstmachung des Zustands unserer Weltraumumgebung	318
9.5.3	Numerische Simulationen des Weltraumwetters	320
9.5.4	Einige Schutzvorkehrungen gegen Auswirkungen des Weltraumwetters	322
9.6	Bemannte Raumfahrt und die Auswirkungen des Weltraumwetters auf Mond und Mars	324
9.6.1	Schutzvorkehrungen für Astronauten auf Raumflügen	324
9.6.2	Gefahren durch das Weltraumwetter auf dem Mond	326
9.7	Heliobiologie – Über den möglichen Einfluss des Weltraumwetters auf die menschliche Gesundheit	327
	Weiterführende Literatur	331

10 Mögliche Auswirkungen des Weltraumwetters auf das Erdklima	333
10.1 Treibhausgase und der Klimawandel	335
10.2 Temperaturschwankungen im Rhythmus der Milanković-Zyklen	337
10.3 Sonne und Erde im Strahlungsgleichgewicht	339
10.4 Über die Vielfalt der Klimafaktoren	342
10.5 Kosmische Klimaeinflussfaktoren	347
Weiterführende Literatur	353
Epilog	355
A Zur Geschichte der Entdeckung solarer und heliosphärischer Prozesse	361
Weiterführende Literatur	399
Glossar	401
Stichwortverzeichnis	415