

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                    |           |
|----------|----------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Kräfte, die das Universum bestimmen</b>         | <b>1</b>  |
| 1.1      | Die Gravitation                                    | 1         |
| 1.1.1    | Newton und der Apfel                               | 1         |
| 1.1.2    | Wo hört die Schwerkraft auf?                       | 3         |
| 1.1.3    | Wie das Sonnensystem zusammenhält                  | 4         |
| 1.1.4    | Vom Planetensystem zum Universum                   | 5         |
| 1.2      | Die elektromagnetische Kraft                       | 6         |
| 1.2.1    | Ladungen                                           | 6         |
| 1.2.2    | Das Coulombgesetz                                  | 7         |
| 1.2.3    | Atome – Miniaturplanetensysteme                    | 8         |
| 1.2.4    | Elektrizität + Magnetismus = Elektromagnetismus    | 9         |
| 1.2.5    | Plasma – der häufigste Materiezustand im Universum | 10        |
| 1.3      | Die starke und die schwache Kraft                  | 11        |
| 1.3.1    | Was hält Atomkerne zusammen?                       | 11        |
| 1.3.2    | Die schwache Kraft                                 | 11        |
| 1.4      | Elementarteilchen                                  | 12        |
| 1.4.1    | Wechselwirkungen                                   | 12        |
| 1.4.2    | Elementarteilchen – Beschreibung                   | 13        |
| 1.4.3    | Quarks und Hadronen                                | 14        |
| 1.4.4    | Wir bauen ein Universum                            | 14        |
| <b>2</b> | <b>Der Urknall – Wie alles begann</b>              | <b>17</b> |
| 2.1      | Die Galaxienflucht                                 | 18        |
| 2.1.1    | Vermessung des Universums                          | 18        |
| 2.1.2    | Hubble                                             | 19        |
| 2.1.3    | Der Blick in die Vergangenheit                     | 21        |
| 2.1.4    | Galaxienflucht                                     | 22        |
| 2.2      | Die Expansion des Universums                       | 23        |
| 2.2.1    | Sind wir der Mittelpunkt?                          | 23        |
| 2.2.2    | Das Universum dehnt sich aus                       | 24        |
| 2.2.3    | Das Alter des Universums                           | 25        |

|       |                                            |    |
|-------|--------------------------------------------|----|
| 2.3   | Der heiße Urknall                          | 26 |
| 2.3.1 | Das Universum und der Kühlschrank          | 26 |
| 2.3.2 | Die Hintergrundstrahlung                   | 27 |
| 2.3.3 | Hintergrundstrahlung und Rotverschiebung   | 28 |
| 2.3.4 | Temperaturschwankungen im frühen Universum | 30 |
| 2.3.5 | Dunkle Materie                             | 31 |
| 2.4   | Die Entstehung der Elemente                | 33 |
| 2.4.1 | Kernfusion am Anfang                       | 33 |
| 2.4.2 | Elemente schwerer als Helium               | 33 |
| 2.5   | Das frühe Universum                        | 34 |
| 2.5.1 | Die Superkraft                             | 34 |
| 2.5.2 | Das inflationäre Universum                 | 35 |
| 2.6   | Zeitskala                                  | 36 |
| 2.7   | Die Zukunft des Universums                 | 36 |
| 2.7.1 | Masse und Energie                          | 36 |
| 2.7.2 | Das nichtleere Vakuum                      | 40 |
| 2.7.3 | Materie und Raum                           | 41 |
| 2.7.4 | Energie und Masse                          | 43 |
| 2.7.5 | Urknall und Planck-Ära                     | 45 |
| 2.8   | Das Universum und Teilchen                 | 45 |
| 2.8.1 | Bosonen-Ära                                | 45 |
| 2.8.2 | Quark-Ära                                  | 46 |
| 2.8.3 | Hadrönen-Ära                               | 46 |
| 2.8.4 | Leptonen-Ära                               | 46 |
| 2.8.5 | Das Universum wird durchsichtig            | 46 |
| 3     | Die Welt der Planeten                      | 49 |
| 3.1   | Allgemeine Eigenschaften der Planeten      | 50 |
| 3.1.1 | Masse und Radius                           | 50 |
| 3.1.2 | Entfernungen                               | 51 |
| 3.1.3 | Temperaturen, Atmosphären                  | 52 |
| 3.1.4 | Wie sehen wir Planeten am Himmel?          | 53 |
| 3.2   | Die erdähnlichen Planeten                  | 56 |
| 3.2.1 | Erde                                       | 56 |
| 3.2.2 | Merkur                                     | 62 |
| 3.2.3 | Venus                                      | 64 |
| 3.2.4 | Mars                                       | 66 |
| 3.2.5 | Zusammenfassung: Warum so unterschiedlich? | 71 |
| 3.3   | Die Riesenplaneten                         | 72 |
| 3.3.1 | Jupiter                                    | 72 |
| 3.3.2 | Saturn                                     | 75 |
| 3.3.3 | Uranus und Neptun                          | 77 |

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 3.3.4 | Zusammensetzung: Riesenplaneten      | 80  |
| 3.4   | Die Monde der Planeten               | 80  |
| 3.4.1 | Unser Mond                           | 80  |
| 3.4.2 | Die Monde des Mars                   | 83  |
| 3.4.3 | Die Jupitermonde                     | 84  |
| 3.4.4 | Weitere Monde des Jupiters           | 88  |
| 3.4.5 | Saturnmonde                          | 89  |
| 3.4.6 | Die Monde des Uranus und Neptun      | 93  |
| 3.4.7 | Zusammenfassung                      | 94  |
| 4     | <b>Zwergplaneten und Kleinkörper</b> | 95  |
| 4.1   | Asteroidengürtel im Sonnensystem     | 95  |
| 4.1.1 | Asteroidengürtel, Hauptgürtel        | 96  |
| 4.1.2 | Kuipergürtel                         | 97  |
| 4.1.3 | Die Oort'sche Wolke                  | 97  |
| 4.2   | Kleinplaneten, Asteroiden            | 99  |
| 4.2.1 | Beobachtung                          | 99  |
| 4.2.2 | Trojaner                             | 101 |
| 4.2.3 | Erdbahnkreuzer, sind wir in Gefahr?  | 102 |
| 4.3   | Kometen                              | 105 |
| 4.3.1 | Hilfe, der Komet kommt               | 105 |
| 4.3.2 | Periodische Kometen                  | 106 |
| 4.3.3 | Was sind Kometen?                    | 108 |
| 4.3.4 | Kometenimpakte                       | 110 |
| 4.3.5 | Woher kommen die Kometen?            | 110 |
| 4.4   | Zwergplaneten                        | 111 |
| 4.4.1 | Pluto                                | 111 |
| 4.5   | Meteoroiden                          | 113 |
| 4.5.1 | Sternschnuppen                       | 113 |
| 4.5.2 | Meteorströme                         | 114 |
| 5     | <b>Die Mechanik des Himmels</b>      | 117 |
| 5.1   | Die Mondbahn                         | 118 |
| 5.1.1 | Sonnen- und Mondfinsternisse         | 119 |
| 5.2   | Erdachse und Kreisel                 | 121 |
| 5.2.1 | Die Präzession                       | 121 |
| 5.2.2 | Nutation                             | 123 |
| 5.3   | Der Jahreslauf der Sonne             | 123 |
| 5.4   | Planetenbahnen                       | 125 |
| 5.4.1 | Die Keplergesetze                    | 125 |
| 5.4.2 | Stabilität der Planetenbahnen        | 128 |

|          |                                                    |            |
|----------|----------------------------------------------------|------------|
| <b>6</b> | <b>Die Sonne – der Stern, von dem wir leben</b>    | <b>131</b> |
| 6.1      | Die Sonne – Grunddaten                             | 132        |
| 6.1.1    | Die Sonne von der Erde aus                         | 132        |
| 6.1.2    | Masse und Größe der Sonne                          | 132        |
| 6.1.3    | Wie heiß ist es auf der Sonne?                     | 134        |
| 6.1.4    | Beobachtungen der Sonne                            | 136        |
| 6.2      | Die Sonne – das Innere                             | 138        |
| 6.2.1    | Woher nimmt die Sonne ihre Energie?                | 138        |
| 6.2.2    | Sonnenbeben                                        | 140        |
| 6.2.3    | Neutrinos – Geisterteilchen von der Sonne          | 142        |
| 6.3      | Energietransport                                   | 146        |
| 6.3.1    | Energietransport durch Strahlung                   | 146        |
| 6.3.2    | Konvektion                                         | 146        |
| 6.4      | Die Oberfläche der Sonne                           | 147        |
| 6.4.1    | Randverdunklung                                    | 147        |
| 6.4.2    | Sonnenflecken                                      | 148        |
| 6.4.3    | Granulation                                        | 151        |
| 6.4.4    | Fackeln                                            | 151        |
| 6.5      | Die obere Atmosphäre der Sonne                     | 151        |
| 6.5.1    | Das große Rätsel der Sonnenphysik                  | 151        |
| 6.5.2    | Chromosphäre                                       | 152        |
| 6.5.3    | Die Korona                                         | 154        |
| 6.6      | Die veränderliche Sonne                            | 156        |
| 6.6.1    | Der Aktivitätszyklus der Sonne                     | 156        |
| 6.6.2    | Beeinflusst die Sonne unser Wetter?                | 159        |
| 6.6.3    | Sonnenwind und Heliosphäre                         | 160        |
| 6.6.4    | Sonne und Weltraumwetter                           | 161        |
| <b>7</b> | <b>Sterne – Entstehung, Aufbau und Entwicklung</b> | <b>163</b> |
| 7.1      | Was ist ein Stern?                                 | 164        |
| 7.1.1    | Sterne – Braune Zwerge – Planeten                  | 164        |
| 7.1.2    | Physikalische Eigenschaften von Sternen            | 165        |
| 7.2      | Die Helligkeit der Sterne                          | 168        |
| 7.2.1    | Scheinbare Helligkeit                              | 168        |
| 7.2.2    | Absolute Helligkeit                                | 168        |
| 7.3      | Spektralklassen                                    | 169        |
| 7.3.1    | Klassifikation der Sterne                          | 169        |
| 7.3.2    | Riesen und Zwerge                                  | 173        |
| 7.4      | Sternentwicklung                                   | 174        |
| 7.4.1    | Sternhaufen                                        | 174        |
| 7.4.2    | Die Entwicklung unserer Sonne                      | 175        |
| 7.4.3    | Wie lange leben Sterne?                            | 177        |

|       |                                                    |     |
|-------|----------------------------------------------------|-----|
| 7.4.4 | Rote Riesen und Überriesen                         | 178 |
| 7.4.5 | Wolf-Rayet-Sterne                                  | 178 |
| 7.4.6 | Planetarische Nebel                                | 178 |
| 7.4.7 | Weißer Zwerge                                      | 180 |
| 7.5   | Die Entstehung von Sternen                         | 182 |
| 7.5.1 | Das Sonnensystem                                   | 182 |
| 7.5.2 | Molekülwolken                                      | 182 |
| 7.5.3 | Kollaps eines Protosterns                          | 184 |
| 7.5.4 | T-Tauri-Sterne und Sternenwinde                    | 184 |
| 7.5.5 | Bildung von Planetensystemen in Scheiben           | 185 |
| 7.6   | Entwicklung massereicher Sterne                    | 186 |
| 7.6.1 | Kernfusion in massereichen Sternen                 | 186 |
| 7.6.2 | Eine Supernova bricht aus                          | 187 |
| 7.6.3 | Der Crabnebel: ein Supernovaüberrest               | 188 |
| 7.6.4 | Pulsare                                            | 189 |
| 7.6.5 | Magnetar                                           | 191 |
| 7.6.6 | Supernovae Typ I                                   | 191 |
| 7.6.7 | Schwarze Löcher                                    | 192 |
| 8     | Die Welt der Galaxien                              | 197 |
| 8.1   | Unsere kosmische Heimat: die Milchstraße           | 198 |
| 8.1.1 | Was ist die Milchstraße?                           | 198 |
| 8.1.2 | Wie viele Sterne gibt es in der Milchstraße?       | 199 |
| 8.1.3 | Die Rotation der Milchstraße und Dunkle Materie    | 200 |
| 8.1.4 | Der Aufbau der Milchstraße                         | 202 |
| 8.1.5 | Das Monster im Zentrum                             | 204 |
| 8.1.6 | Die Galaxis – eine Spiralgalaxie                   | 206 |
| 8.2   | Galaxien – Bausteine des Universums                | 207 |
| 8.2.1 | Die wahre Natur der Nebel                          | 207 |
| 8.2.2 | Typen von Galaxien                                 | 209 |
| 8.2.3 | Warum gibt es unterschiedliche Arten von Galaxien? | 212 |
| 8.2.4 | Zusammenstoßende Galaxien                          | 213 |
| 8.3   | Aktive Galaxien                                    | 214 |
| 8.3.1 | Seyfertgalaxien                                    | 215 |
| 8.3.2 | Quasare                                            | 215 |
| 8.3.3 | Gravitationslinsen                                 | 218 |
| 8.4   | Galaxienhaufen                                     | 219 |
| 8.4.1 | Die Lokale Gruppe                                  | 219 |
| 8.4.2 | Der Virgo-Haufen                                   | 221 |
| 8.4.3 | Coma-Haufen                                        | 222 |

9    **Leben im Universum?** ..... 223

    9.1    **Was ist Leben?** ..... 224

        9.1.1    **Definition des Lebens** ..... 224

        9.1.2    **Entstehung des Lebens auf der Erde** ..... 224

        9.1.3    **Die Schutzschirme der Erde** ..... 225

    9.2    **Habitable Zonen** ..... 227

        9.2.1    **Was ist eine habitable Zone?** ..... 227

        9.2.2    **Zirkumstellare habitable Zonen** ..... 227

        9.2.3    **Zirkumplanetare habitable Zonen** ..... 227

        9.2.4    **Galaktische habitable Zone** ..... 228

    9.3    **Wie findet man Exoplaneten?** ..... 229

        9.3.1    **Transitmethode** ..... 229

        9.3.2    **Radialgeschwindigkeitsmethode** ..... 229

        9.3.3    **Sterne ändern ihre Position** ..... 230

        9.3.4    **Satellitenmissionen** ..... 230

    9.4    **Sind wir alleine im Universum?** ..... 231

        9.4.1    **Drake-Gleichung** ..... 231

        9.4.2    **SETI und andere Projekte** ..... 234

    9.5    **Die Geschichte des Universums in einem Tag** ..... 234

**Literaturliste** ..... 237

**Sachverzeichnis** ..... 239