

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 56 (1998)
Heft: 287

Artikel: Einblick in die Spektralklassifikation : Studentenprojekt mit dem neuen Spektrographen der Beobachtungsstation Metzerlen
Autor: Prohaska, Marcel / Wenger, Erich / Trefzger, Charles
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-897504>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Einblick in die Spektralklassifikation

Studentenprojekt mit dem neuen Spektrographen der Beobachtungsstation Metzerlen

MARCEL PROHASKA, ERICH WENGER UND CHARLES TREFZGER

Alljährlich werden in der 17 km südwestlich von Basel gelegenen Sternwarte Metzerlen Beobachtungskurse für Astronomiestudenten der Universität Basel durchgeführt. Das Ziel besteht darin, den Teilnehmern einen Einblick zu geben in die praktische Durchführung und Auswertung von astronomischen Beobachtungen, dies als Ergänzung zum theoretischen Vorlesungsangebot. Thema des Kurses im Jahre 1996 war die Spektralklassifikation. Die Teilnehmer waren diesmal Studenten der Universität Bern. Der vorliegende erste Beitrag gibt eine historische Einführung in das Thema; der später folgende zweite Teil fasst die Erfahrungen und Ergebnisse des Beobachtungskurses zusammen.

Teil 1 – Zur Geschichte und Physik der Spektralklassifikation

Einleitung

Um es gleich vorwegzunehmen: die *spektrale Klassifikation* ist nicht das Werkzeug, das es erlaubt, einen einzelnen Stern in seiner ganzen Einzigartigkeit erfassen zu können. Dies zu tun, obliegt alleine der *Spektroskopie*. Die Klassifikation eines Sternes nach Merkmalen, die in seinem *Spektrum*, d.h. seinem Licht, gefunden werden können, erlaubt es, diesen einer Gruppe von Sternen zuzuordnen. Die charakteristischen Merkmale dieser Gruppen sind nicht willkürlich, sondern sie sollen eine Aussage über gewisse Zustandsgrößen, wie etwa die Oberflächentemperatur des Sternes, ermöglichen. So würde z.B. das alleinige Ordnen nach der scheinbaren Helligkeit keine weiteren Aussagen über die Natur der Sterne erlauben und ist somit in unserem Sinne gänzlich ungeeignet.

Die Entwicklung einer aussagekräftigen Klassifikation war weder eine Sache von ein paar Jahren, noch ist sie gar abgeschlossen. Vielmehr folgt sie der Entwicklung von Technik und Wissenschaft, wobei die Ergebnisse ihrerseits wiederum zu einem Aufblühen von Optik, Physik und Chemie beitragen.

Die Anfänge

So darf hier als der mehr oder minder willkürlich gewählte Anfang in der Entwicklung der Spektralklassifikation sicherlich das im Jahre 1621 vom holländischen Mathematiker WILLEBRORD SNELLIUS

(1591-1626) formulierte Brechungsgesetz genannt werden. Dessen Aussage, dass ein Lichtstrahl beim Übergang von einem Medium in ein anderes gebrochen, d.h. aus seiner ursprünglichen Richtung ausgelenkt wird, bildet in seiner mathematischen Formulierung das Grundgesetz in der technischen Optik. Die Entdeckung der Beugung durch FRANCESCO MARIA GRIMALDI (1618-1663) – Licht «benimmt» sich an einer Kante nicht wie ein fliegendes Materieteilchen, sondern wie eine Welle – und das Ausbreitungsgesetz von CHRISTIAAN HUYGENS (1629-1695) – jeder Ort im Strahl kann als Ausgangspunkt einer neuen Kugelwelle betrachtet werden – bildeten wichtige Prinzipien, welche später die Formulierung einer Lichttheorie erlaubten.

Nicht unerwähnt soll aber dennoch die sogenannte *Emissionstheorie* von ISAAC NEWTON (1643-1727) bleiben, die den Lichtstrahl als einen Strom von Lichtteilchen beschreibt. Die «Dualität des Lichtes», d.h. die Beschreibung einzelner Phänomene des Lichtes mit Hilfe einer Wellentheorie, anderer Phänomene

mit einer Teilchentheorie, mag verwirren, aber es ist Ausdruck unseres Verständnisses der Natur¹.

Newtons Untersuchungen der Dispersion des Lichtes an Linsen, anhand der von ROBERT HOOKE (1635-1664) entdeckten sogenannten «Newtonschen Ringe», d.h. der Aufspaltung von weissem Licht in seine spektralen Farben, bilden den Anfang aller spektroskopischen Arbeiten.

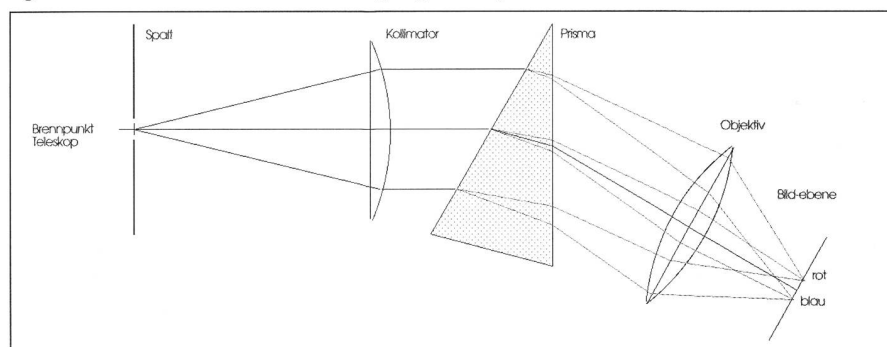
Erste Erfolge

Der Grundstein schien zwar gelegt, aber dennoch finden wir die Anfänge der Spektralklassifikation erst zu Beginn des 19. Jahrhunderts. Jene Zeit, geprägt durch die Herrschaft NAPOLEONS und die folgende Neuordnung Europas durch den dritten Wiener Friedenskongress, ermöglichte den Beginn einer grossen technischen und wissenschaftlichen Umwälzung in unserer Gesellschaft.

Als ersten Schritt darf sicherlich die Untersuchungen von WILLIAM HYDE WOLLASTON (1766-1828) erwähnt werden. Mittels eines vor seinem Prisma aufgebauten Spaltes entdeckte er 1802 im so gewonnenen Spektrum der Sonne einige wenige dunkle Linien. Diese hielt er – zu unrecht, wie FRAUNHOFER später zu zeigen vermochte – für die natürlichen Grenzen der reinen Farben. Warum WOLLASTON seine Arbeiten nicht durch eine Verbesserung der Geräte weiterführte, bleibt dahingestellt. Sicher ist, dass erst JOSEPH VON FRAUNHOFER (1787-1826), der wohl erfolgreichste deutsche Optiker und Instrumentenbauer seiner Zeit, die begonnene Methode erfolgreich anzuwenden verstand. Figur 1 zeigt schematisch den Versuchsaufbau zur Erzeugung eines Spektrums.

Doch es war nicht die Frage nach der Natur von Sonne, Planeten und Fixsternen, die FRAUNHOFER vorantrieb. Vielmehr war es sein Streben nach Vervollkommnung der von ihm zu bauenden Instrumente. Zu diesem Zweck untersuchte er in den Jahren 1812 bis 1814 gezielt das Brechungsverhalten von optischen

Fig. 1: Schematischer Aufbau zur Erzeugung eines Spektrums



¹ Für Interessierte hier nur eine kurze Literatur-Empfehlung: «RICHARD P. FEYNMAN, QED – Die seltsame Theorie des Lichtes und der Materie, Piper 1988».

Gläsern bei verschiedenen Wellenlängen. Um das hierfür notwendige monochromatische Licht, d.h. Licht lediglich einer einzigen Wellenlänge, erhalten zu können, benutzte er das Licht einer einzigen (gelben) Linie aus dem Spektrum von Flammen.

Vielleicht aus reiner Neugierde, vielleicht aber auch aus der Kenntnis der Versuche von WOLLASTON, verglich FRAUNHOFER nun das Spektrum seiner Flamme mit demjenigen der Sonne. Dank seiner wohl bedeutend besseren Apparatur gelang ihm einerseits die Identifikation von nicht weniger als 475 einzelnen Linien im Sonnenspektrum, andererseits die Feststellung, dass einige der hellen Linien im Flammenspektrum exakt mit einzelnen dunklen Linien im Spektrum der Sonne übereinstimmen, und dass diese somit keine Farbgrenzen markieren. Figur 2 zeigt das Spektrum der Sonne nach FRAUNHOFER, wobei die lateinischen Buchstaben die hellsten Linien entsprechend ihrer Wellenlänge bezeichnen.

Im Folgenden dehnte FRAUNHOFER seine Untersuchungen auch auf Mond, Venus, Mars und einige Sterne der ersten Grössenklasse aus. Damit gelang ihm die weitere Feststellung, dass die Spektren von Mond, Mars und Venus, abgesehen von deren Helligkeit und Deutlichkeit, exakt mit dem Spektrum der Sonne übereinstimmen. Die Untersuchung von Sirius, Castor und Pollux, Capella, Beteigeuze und Prokyon zeigten dagegen deutliche Unterschiede untereinander und keine Übereinstimmung im Vergleich zum Sonnenspektrum. Eine von FRAUNHOFER selber angeregte Überprüfung mit grösserer Auflösung zeigt die grundsätzliche Richtigkeit seiner Aussagen.

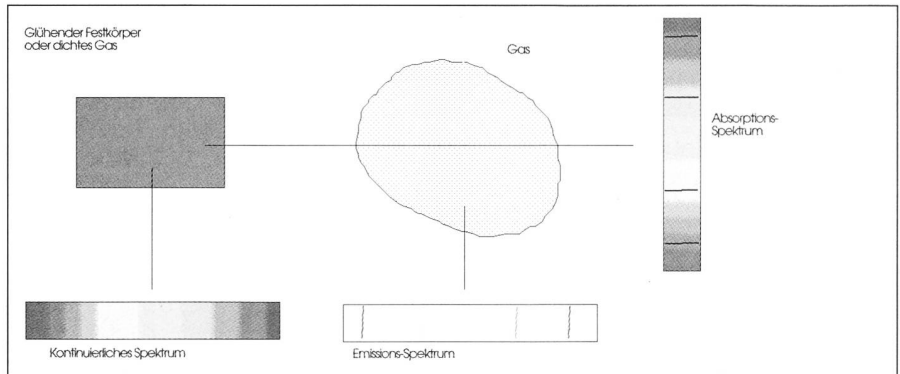


Fig. 3: Schematischer Aufbau zur Erzeugung von Absorptions- und Emissionsspektren

Beginn der Astrophysik

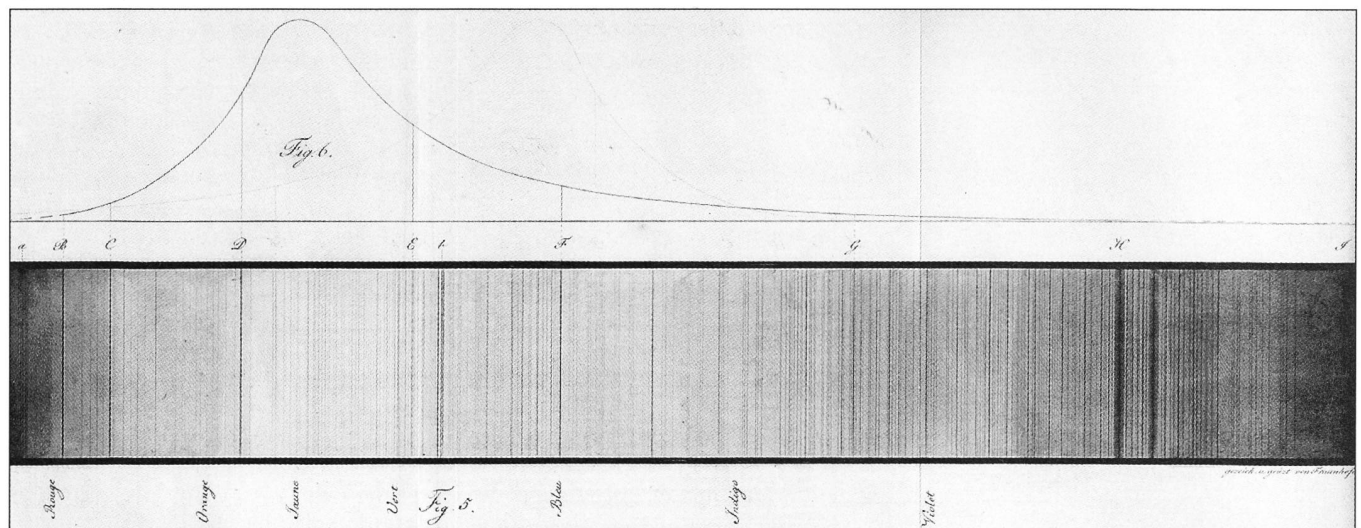
Der Durchbruch in der Entwicklung der Spektralanalyse gelang 1859 den beiden deutschen Physikern ROBERT WILHELM BUNSEN (1811-1899) und GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1824-1887). Ihre Vermutung, dass die dunklen Fraunhofer-Linien im Spektrum der Sonne mittels der entsprechenden Linien aus einer Flamme aufgehellt werden können, liess sie mit ihrem Spektroskop durch eine Flamme hindurch auf die Sonne blicken. Doch zu ihrer Überraschung schlug dieser Versuch fehl: die Linien wurden noch dunkler! Die Aussage KIRCHHOFF'S, «Dies ist entweder Unsinn oder eine ganz grosse Sache», klärte er am nächsten Tag gleich selber. Er schlug vor, dass die Natrium-Dämpfe dieselben Farben absorbieren, wie sie auszusenden vermögen. Diese Theorie belegte er durch Versuche an insgesamt 70 verschiedenen Linien. 1861 erschien die klassische Arbeit von KIRCHHOFF und BUNSEN mit dem Titel «Chemische Analysen durch Spectralbeobachtungen». Figur 3 zeigt schematisch das Entstehen eines Absorptions- und eines Emissionsspektrums.

Vielleicht als einer der ersten, der die Möglichkeiten der Spektroskopie erkannte, schlug JOHANN KARL FRIEDRICH ZÖLLNER (1834-1882) den Namen «Astrophysik» als Bezeichnung für diesen neuen Zweig der Astronomie vor – und erntete von BESSEL nur Ablehnung.

Es ist wohl eine Frage des eigenen Standpunktes, um festzulegen, womit sich eine Wissenschaft zu beschäftigen hat. Dass aus der Frage nach den Bewegungen der Planeten die Grundlage zur heutigen theoretischen Physik und der mathematischen Analysis gelegt wurde, verdanken wir dem Erkenntnisdrang von Menschen wie JOHANNES KEPLER, LEONHARD EULER und ISAAC NEWTON. Aus diesen Erfolgen nun aber die alleinigen astronomischen Interessen in die Bestimmung von Position und Bewegung der Körper am Himmel festlegen zu wollen, erscheint, zumindest aus heutiger Sicht, doch eher übertrieben.

FRIEDRICH WILHELM BESSEL (1784-1846), Direktor der Sternwarte zu Königsberg im damaligen Ostpreussen, sah die alleinige Aufgabe der Astronomie darin, die «Regeln für die Bewegung jedes Gestirns zu finden, aus welchem

Fig. 2: Das Spektrum der Sonne von JOSEPH VON FRAUNHOFER. Aus: Schumacher, H.C.; Astronomische Abhandlungen, 2. Heft, Taf. II, Altona 1823.



sein Ort für jede beliebige Zeit folgt». Jede weitere Information zu den Gestirnen erschien ihm «zwar der Aufmerksamkeit nicht unwert, aber doch das eigentlich astronomische Interesse nicht berührend».

Vielleicht lag der Grund für dessen Ablehnung der Astrophysik einfach im Erfolg, den er als «klassischer» Astronom feierte. Nach einer Messzeit von nur gut 13 Monaten gelang ihm das bis anhin Unmögliche: er mass die Distanz zu einem Fixstern. 61 Cygni, mit einer scheinbaren Helligkeit von 5.2 Magnituden und der sehr grossen Eigenbewegung von 5.20 Bogensekunden pro Jahr, liess zwar einen geringen Abstand zur Erde vermuten, aber dennoch bedurfte es eines Heliometers aus der Werkstatt FRAUNHOFERS und einer mustergültigen Sorgfalt bei Messung und Auswertung, um Ende Oktober 1838 das Ziel erreichen zu können (siehe hierzu ORION 273, S. 97-102).

Erste Klassifikationen

Die Unterschiede in den Spektren von verschiedenen Fixsternen waren, wie bereits erwähnt, JOSEPH VON FRAUNHOFER und anderen, so auch dem Engländer WILLIAM HUGGINS (1824-1910), aufgefallen. Dennoch war es 1862 der Amerikaner LEWIS MORRIS RUTHERFURD (1816-1892), der den ersten Vorschlag zur Einteilung von Sternen in Klassen von verschiedenen Spektren machte. Dabei unterschied er zwischen den in Tabelle 1 dargestellten drei Spektralklassen:

Tab. 1: Vorschlag zur Spektralen Klassifikation nach LEWIS M. RUTHERFURD, ergänzt durch die heutigen Klassifikationen der Leitsterne.

a) Spektren mit vielen Linien und Bändern, grosse Ähnlichkeit zum Spektrum der Sonne, alles rötliche oder goldfarbene Sterne. Als Beispiele gelten:		
Capella	α Aur	G5 IIIe
Pollux	β Gem	K0 IIIvar
Beteigeuze	α Ori	M2 Ib
Aldebaran	α Tau	K5 III
Algieba	γ Leo	K0 III / G7 III
Arctur	α Boo	K2 IIIp
Scheat	β Peg	M2 II-IIIvar
b) Spektren gänzlich anders als dasjenige der Sonne, weisse Sterne. Als Beispiel gilt:		
Sirius	α CMa	A1 V
c) Spektren ohne Linien, weisse Sterne. Als Beispiele gelten:		
Spica	α Vir	B1 V
Rigel	β Ori	B8 Ia

Kurz darauf wurde 1866 die erste allgemeingültige Spektralklassifikation vom Jesuitenpater ANGELO SECCHI (1818-1878) eingeführt. Ausgehend von Messungen an mehreren hundert Sternen bis zur scheinbaren Helligkeit der 8. Grössenklasse, der Leistungsfähigkeit seines Instrumentes, machte er die folgenden Feststellungen:

1. Alle Sterne können anhand ihres Spektrums in vier Gruppen eingeteilt werden, wobei für jede Gruppe der Typ des Spektrums recht verschieden ist.

Sirius	α CMa	A1 V
Wega	α Lyr	A0 Vvar

2. Der erste Typ wird durch die Sterne und allen weissen Sternen, wie

Altair	α Aql	A7 IV-V
Regulus	α Leo	B7 V
Castor	α Gem	A2 Vm

verkörpert. Ihr Spektrum besteht aus sehr gleichförmigen prismatischen Farben und enthält nur vier sehr starke Wasserstofflinien.

3. Der zweite Typ wird durch gelbe Sterne, wie

Capella	α Aur	G5 IIIe
Pollux	β Gem	K0 IIIvar
Arctur	α Boo	K2 IIIp
Aldebaran	α Tau	K5 III
Dubhe	α UMa	K0 lab

verkörpert. Ihre Spektren entsprechen demjenigen der Sonne, d.h. dass sie unzählige sehr feine Linien enthalten. Diese Sterne können sogar ohne Spektrum, alleine durch ihre gelbe Farbe, erkannt werden.

4. Der dritte und sehr bemerkenswerte Typ wird durch die orangefarbenen oder rötlichen Sterne, wie

Ras Algethi	α Her	M5 Ib-II
Beteigeuze	α Ori	M2 Ib
Antares	α Sco	M1.5 lab
Mira	α Cet	M2 Ib
Scheat	β Peg	M2 II-IIIvar

verkörpert.

5. Der vierte Typ ist nicht weniger bemerkenswert und wird durch die roten teleskopischen Sterne verkörpert.

Beachtenswert an den Leistungen von RUTHERFURD und Pater SECCHI ist sicherlich, dass sie beide die typische Charakteristik einer Klasse erkannten und damit Einteilungen vornahmen, die die nächsten Arbeiten stark beeinflus-

sten. Zeitgleich zu diesen Arbeiten gelang 1869 DIMITRI IWANOWITSCH MENDELEJEV (1834-1907) und JULIUS LOTHAR MEYER (1830-1895) die Klassifikation der chemischen Elemente im Periodensystem. Zusammen mit der Erkenntnis von BUNSEN und KIRCHHOFF, dass jedes chemische Element sein charakteristisches Spektrum erzeugt, war der Grundstein für die Spektroskopie, d.h. der spektroskopischen Analyse von Stoffen, gelegt.

Die Physik der Spektrallinien

Die wohl wichtigste Erkenntnis in der Analyse der elektromagnetischen Strahlung war das 1879 von JOSEF STEFAN (1835-1893) und unabhängig davon auch 1884 von LUDWIG BOLTZMANN (1864-1928) gefundene Strahlungsgesetz. Es besagt, dass die integrale Energiedichte eines idealen, sogenannten *schwarzen Strahlers*, direkt proportional zur vierten Potenz seiner Temperatur ist. Damit konnte zum ersten Mal der Zusammenhang zwischen der empfangenen Strahlung mit einer Zustandsgrösse des Sterns – nämlich dessen Temperatur – errahnt werden! Der Basler Gymnasiallehrer JOHANN JAKOB BALMER (1825-1898) gelang 1885 die Beschreibung einiger der Spektrallinien des Wasserstoffs. Er konnte zeigen, dass diese Linien nicht willkürlich im Spektrum auftreten, sondern dass sie in ganz bestimmten Abständen aufeinander folgen.

Die Beschreibung einer Ordnung in der Vielfalt der Linien im Spektrum konnte nicht erklären, warum ein chemisches Element eine Linie erzeugt – dies gelang erst nach der Beschreibung der atomaren Vorgänge durch die Quantentheorie – aber sie zeigte klar, welche Linien vom Wasserstoff stammen. Dass für BALMER dies eine reine Zahlenspielerie war, indem er nur den rein mathematischen Zusammenhang zwischen den gemessenen Wellenlängen der Spektrallinien herstellte, sei hier zwar erwähnt, soll aber dessen Leistung in keiner Weise schmälern.

Doch was sind sie nun, diese Spektrallinien? Heute wissen wir, dass ein gebundenes System von atomaren Teilchen beim Übergang von einem Energieniveau zu einem anderen Strahlung aussenden (Emission) oder aufnehmen (Absorption) kann. So führt der Sprung eines Elektrons von einer höheren Umlaufbahn zu einer näher am Atomkern liegenden Bahn zu einem Aussenden eines Lichtquanten, eines sogenannten Photons. Ein Aufnehmen eines Photons vermag dagegen ein Elektron von einer tieferen auf eine höhere Bahn «zu heben». Da andererseits nur Bahnen von ganz bestimmten Grössen existieren, ergibt dies, dass nur Photonen mit ganz bestimmten Energien ausgesandt oder

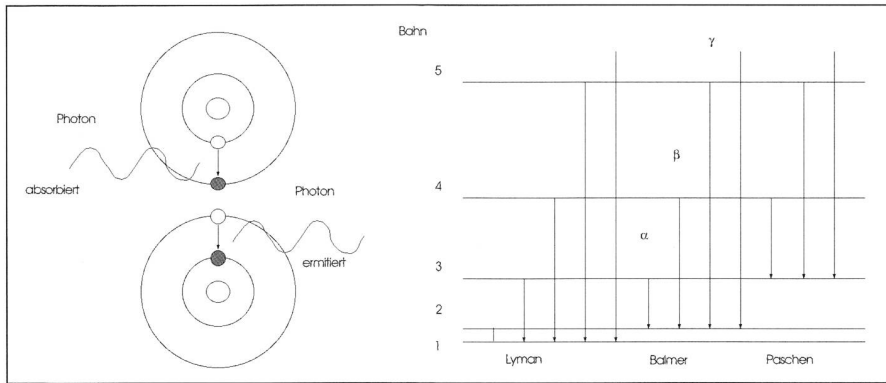


Fig. 4: Schematische Darstellung zur Entstehung der Spektrallinien von WASSERSTOFF

absorbiert werden können. Da sich die Energie eines Photons wiederum direkt in der Wellenlänge (Frequenz) der beobachteten Strahlung zeigt, erklärt, warum ein Element nur ganz bestimmte Spektrallinien erzeugen kann. Figur 4 zeigt schematisch einige der wichtigsten Spektrallinien des Wasserstoffes.

Jene Linien, die BALMER beschrieb und heute noch nach ihm benannt sind, zeigen sich im sichtbaren Bereich des Spektrums und stammen von Bahnsprüngen, die alle auf der zweiten Bahn enden. Doch nicht nur Sprünge der Elektronen, sondern alle Arten von Änderungen im Zustand der beteiligten Teilchen äussern sich in Emission und Absorption von Photonen. So stellt z.B. die in der Radioastronomie beobachtete 21,1 cm Linie des Wasserstoffes den Übergang von einem parallelen Rotationszustand von Kern und Elektron zu einem nicht parallelen dar...

Das Harvard-System

Ab dem Jahre 1885 wurden am Harvard College unter der Leitung von EDWARD CHARLES PICKERING (1846-1919) die Arbeiten am «Henry Draper Memorial» aufgenommen. Die Spektren von tausenden von Sternen, die mittels Objektiven in Flagstaff (Arizona) und in Arequipa (Peru) entstanden, wurden von PICKERING und einer Gruppe von gesamthaft etwa 40 Assistentinnen, dem sogenannten «Harem», in Harvard ausgewertet. Jede dieser Frauen hatte als «Rechnerin» für ein paar Cents pro Stunde die Rechenarbeit der Klassifikation zu erledigen.

Unter diesen «Computern» befanden sich so äusserst begabte Frauen wie etwa WILLIAMINE P. FLEMMING (1857-1911), ANTONIA CAETANA MAURY (1866-1952), ANNIE JUMP CANNON (1863-1941) und HENRIETTA SWAN LEAVITT (1868-1921). Ihr gemeinsames Schicksal war, dass sie als Frauen keinen Zugang zu einem Hochschulstudium erhielten! Nur als einfache Assistentinnen angestellt, waren es dennoch einige von ihnen, welche die Spektralklassifikation

entscheidend beeinflussten und zu prägen vermochten. Dass es ihnen zum Teil erst im hohen Alter vergönnt wurde, aus dem Schatten PICKERINGS treten zu dürfen, stellt eine traurige Tatsache in der Geschichte der Wissenschaft dar. Stellvertretend für ihre Leistungen sei hier die Entdeckung der Cepheiden durch HENRIETTA LEAVITT erwähnt.

Die Tabelle 2 gibt einen Überblick über das erste Klassifikationssystem: des Henry-Draper-Kataloges (HD-Katalog):

Klasse	Beschreibung
A	starke, breite Wasserstofflinien
B	wie A, plus neutrales Helium
C	doppelte Wasserstofflinien
D	mit Emissionslinien
E	Fraunhofer H & K, sowie Balmer b
F	ähnlich E, alle Wasserstofflinien sichtbar
G	wie F, plus zusätzliche Linien
H	wie F, Helligkeitsabfall im Blauen
I	wie H, plus zusätzliche Linien
K	Molekülbanden
L	Sonderformen & Abwandlungen von K
M	Secchis dritter Typ
N	Secchis vierter Typ
O	Emissionslinien
P	Planetarische Nebel
Q	alle anderen

Tab. 2: Erste spektrale Klassifikation des HD-Kataloges

D, L, I	beseitigt
K, G	angenähert
E, F	vertauscht
C	beseitigt (schlechte Platten)

Tab. 3: Erste Anpassung des HD-Kataloges

B, A	vertauscht
O	ganz an den Anfang

Tab. 4: Weitere Anpassung des HD-Kataloges

Im Jahre 1896 konnte WILHELM CARL WERNER WIEN (1864-1928) zeigen, dass der im Stefan-Boltzmann-Gesetz erkannte Zusammenhang zwischen Temperatur

und Strahlung sich direkt in der Farbe des beobachteten Lichtes äussert – die Wellenlänge, oder einfach die Farbe, der maximalen Strahlung ist umgekehrt proportional zur Temperatur des Strahlers, das heisst des Sterns. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die Sequenz der Sternspektren nach der Temperatur des Sterns ordnen zu können. So erfolgte 1896 die in Tabelle 3 gezeigte erste Anpassung und 1897 die in Tabelle 4 dargestellte weitere Anpassung, nun an das eigene System von ANTONIA MAURY:

Der wohl wichtigste Schritt in der vollständigen Beschreibung eines idealen Strahlers, und zugleich der erste Schritt in der Entwicklung der Quantentheorie, gelang 1900 MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK (1858-1947). Sein Strahlungsgesetz beschreibt die Verteilung der Energie gegenüber der Wellenlänge. Damit kann in allen Details die Verbindung zwischen der beobachteten Strahlung – das Spektrum fächert ja das Licht in seiner Wellenlänge auf – und der Temperatur des Sterns hergestellt werden.

So erreichte 1901 die Spektralklassifikation, wie sie im Henry-Draper-Katalog definiert und angewandt wurde, ihre endgültige Formulierung. Diese enthält des weiteren noch die Zusätze aus dem Maury-System zwecks Kennzeichnung von Besonderheiten an den beobachteten Linien und ist abschliessend in Tabelle 5 gezeigt. Zum einfacheren Merken dieser nicht alphabetischen Sequenz hat sich übrigens die folgende englische «Eselsbrücke» eingebürgert: «Oh, be a fine girl, kiss me» – oder in deutscher Direktheit: «Offenbar benutzen Astronomen furchtbar gerne komische Merksätze»...

1918 begann die Publikation des Henry-Draper-Kataloges, und bereits 1922 wurde dessen Klassifikationsverfahren von der Internationalen Astronomischen Union (IAU) übernommen und zur Regel erklärt. Der Henry-Draper-Katalog wurde 1924 mit total 225'300 aufgenommenen und klassifizierten Sternen abgeschlossen, wobei 1948 die Henry-Draper-Erweiterung die Gesamtzahl auf 359'082 Sterne erhöhte. Diese

Tab. 5: Klassifikation des Henry-Draper-Kataloges

Klasse	Unterteilungen
O	a,b,c,d,e
B	1,2,3,5,8,9
A	0,2,3,5
F	0,2,5,8
G	0,5
K	0,2,5
M	a,b,c,d

aussergewöhnliche Leistung wurde alleine durch den unermüdlichen Einsatz von Menschen erreicht, ohne jede Hilfe von heutigen Computern und CCDs!

Das HR-Diagramm

Dem dänischen Astronomen EJNAR HERTZSPRUNG (1873-1967) gelang 1905 die Zusammenführung der Daten aus dem HD-Katalog und dem Doppelsternkatalog von ROBERT AITKEN. Die damit gewonnenen absoluten Helligkeiten von Sternen, das heisst ihre auf einheitliche Distanzen reduzierte Helligkeiten, dargestellt gegen ihre spektrale Klassifikation, ergibt die in Figur 5 gezeigte Verteilung. Infolge dessen, dass der Amerikaner HENRY NORRIS RUSSELL (1877-1957) 1909 unabhängig davon zum gleichen Resultat gelangt war, hat sich für diese Form der Darstellung die Bezeichnung «Hertzsprung-Russell-Diagramm», oder kurz *HRD*, eingebürgert.

Die eindeutig erkennbare Gruppierung der Sterne zeigt, dass ein Stern einer bestimmten absoluten Helligkeit nicht zu einem beliebigen spektralen Typ zugeordnet werden kann. Begriffe wie Hauptreihe, Riesen oder Weiße Zwerge sind hier zu finden und die Frage, ob und wie sich Sterne im Laufe ihres Lebens im HRD bewegen, wird in der *Sternentwicklung* erforscht. Einen Überblick hierzu gibt zum Beispiel die Artikelreihe «L'Univers, dis moi ce que c'est?» von FABIO BARBLAN, erschienen in den letzten ORION-Ausgaben.

Die zweite Dimension

Im Jahre 1914 gelang am Mt. Wilson Observatorium durch WALTER SIDNEY ADAMS (1876-1956) und ARNOLD KOHL-SCHÜTTER (1883-1969) die Entdeckung von charakteristischen Merkmalen im Spektrum, dank deren eine direkte Bestimmung der absoluten Helligkeit ermöglicht wird. Der Beweis hierfür, d.h. dass nicht nur das Auftreten, sondern auch die *Stärke* einzelner Linien im Spektrum eine Aussage über den Aufbau eines Sterns ermöglichen, konnte 1920 durch die theoretischen Arbeiten des indischen Astrophysikers MEGHNAD SAHA (1894-1956) erbracht werden. Aus der Kenntnis der absoluten und der scheinbaren Helligkeit folgt nun bekanntermassen die Distanz zum Stern, die so gewonnen als «Spektroskopische Parallaxe» bezeichnet wird.

Damit wurde klar, dass die bisherige eindimensionale Klassifikation (eine echte Temperaturfolge) durch sogenannte *Leuchtkraftklassen* erweitert werden muss. Darunter ist aber keine physikalische Grösse zu verstehen, sondern vielmehr nur der Name einer weiteren Klasse. Erst aus Eichungen mittels

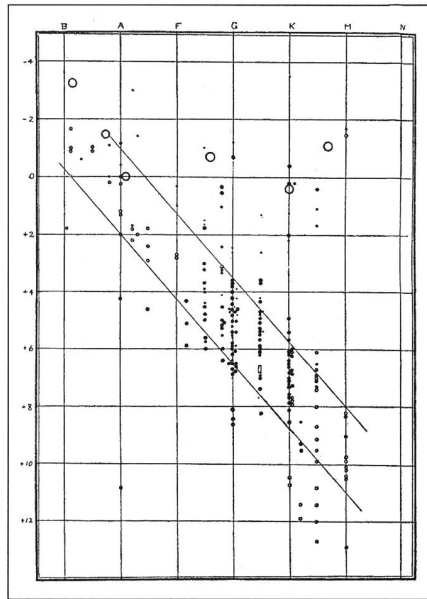


Fig. 5. Das Hertzsprung-Russell-Diagramm wie es 1914 von HENRY NORRIS RUSSELL publiziert wurde. Es zeigt deutlich einen Zusammenhang zwischen der absoluten Helligkeit (Ordinate) und der Spektralklasse (Abszisse) aller Sterne, deren Distanzen bis 1913 gemessen waren. Aus: Shapley, M. (ed): Source Book in Astronomy 1900-1950, Cambridge 1960; Fig. 1. p. 257.

direkten Distanzbestimmungen und Strahlungsmessungen an einzelnen Klassenvertretern kann die *Leuchtkraft*, und damit Temperatur und Grösse des Sterns, bestimmt werden.

Als eine Art der Zusammenfassung aller bis anhin gemachten Arbeiten darf der 1943 abgeschlossene Gebrauchskatalog zur Klassifizierung von Sternspektren von WILLIAM WILSON MORGAN (1906-1995), PHILIP C. KEENAN und EDITH KELLMAN betrachtet werden. Dieser Katalog ermöglicht, bei Verwendung der-

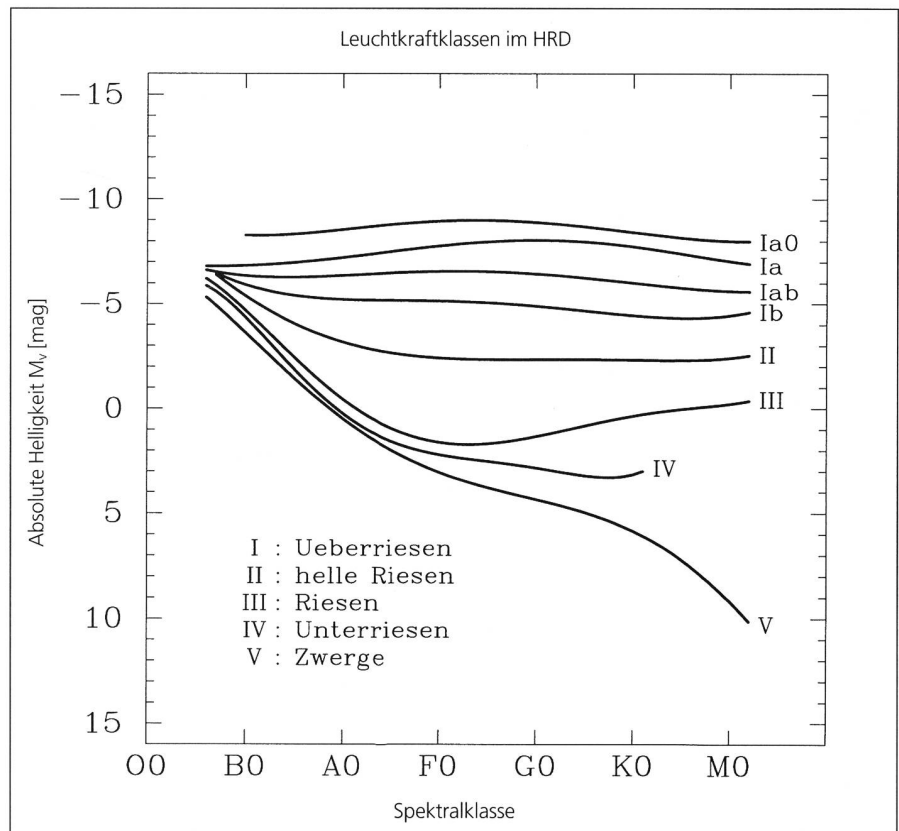
selben spektralen Auflösung, Spektraltyp und Leuchtkraftklasse eines zu klassifizierenden Sterns – mittels eines «einfachen» Vergleichs und Einfügen in das Referenzsystem – zu bestimmen.

Dieses MKK- (oder oft nur MK- genannte) System übernimmt die Bezeichnungen der Spektralklassen, wie sie im HD-Katalog eingeführt wurden, und erweitert diese durch die in Tabelle 6 dargestellten Bezeichnungen für die Leuchtkraftklassen.

Tab. 6: Bezeichnung der Leuchtkraftklassen im MKK-System

Leuchtkraftklasse	Name
I	Überriese
II	Heller Riese
III	Riese
IV	Unterriese
V	Zwerg

Fig. 6: Schematischer Überblick über den Verlauf der Leuchtkraftklassen im HR-Diagramm



Die später vorgenommenen Ergänzungen am MKK-System und dessen Folgekataloge haben keine grundsätzlichen Änderungen am Verfahren und der Klassenbildung erbracht und sollen hier nicht weiter erwähnt werden. Vielmehr ist in Figur 6 ein Überblick über den Verlauf der Leuchtkraftklassen im Hertzsprung-Russell-Diagramm gegeben:

Nur knapp 40 Jahren nach Abschluss des HD-Kataloges musste festgestellt werden, dass dessen Klassifikation um die Leuchtkraftklasse erweitert werden sollte – wobei diese Arbeiten längst aufgenommen wurden!

Die dritte Dimension

Alle bis zu diesem Zeitpunkt gemachten Aussagen gelten nur für Sterne der Population I. Eine erste Feststellung für diese Behauptung sind das Fehlen der CN-Banden bei gewissen K, M und G-Sternen, womit diese gemäss den Regeln der Spektralklassifikation als Zwerge eingestuft werden müssten. Andere Eigenheiten des Spektrums ergeben aber eindeutig Riesen! Diese Diskrepanz wird als CN-Anomalie bezeichnet und erbringt den direkten Beweis, dass die chemische Zusammensetzung eines Sternes einen direkten Einfluss auf sein Spektrum und auf seine Klassifikation hat.

Als Population I werden Sterne von sonnenähnlicher Zusammensetzung bezeichnet. Dabei ist das Vorhandensein von schweren Elementen – der Astronom spricht hierbei von Metallen und zählt alles ausser Wasserstoff hierzu – ausschlaggebend. Population II sind dagegen Sterne von sehr geringer Metallizität, was im übrigen auf einen Stern schliessen lässt, der aus dem noch wenig metallisch angereichertem Material aus der Frühzeit des Universums entstanden ist.

Als eine mögliche Schlussfolgerung kann die Aussage von KARL SCHWARZSCHILD (1873-1916) gelten, der sagte, «Alle untersuchten Sterne unterscheiden sich in drei grundlegenden Eigenschaften: Ihren Massen, ihren (chemischen) Zusammensetzungen bei ihrer Geburt und ihrem Alter». Damit wird klar, dass als dritte Dimension, d.h. als dritte Grösse zur Charakterisierung eines Sternes, die chemische Zusammensetzung gemeint ist. Sie zu bestimmen, d.h. sie aus einem Spektrum herauslesen zu können und somit auch die Regeln zur spektralen Klassifikation entsprechend anzupassen, ist die Herausforderung und das Ziel der aktuellen Forschung.

Klasse	Beschreibung
O	Heisse Sterne mit Linien mehrfach ionisierter Atome, He II vorherrschend. H relativ schwach. Gelegentlich Emissionen.
B	He II fehlt. He I stark. Balmerreihe nimmt zu.
A	H im Maximum. Schwache Linien ionisierter Metalle (Ca II...).
F	Ca II stark. Sonst ionisierte und neutrale Metalle etwa gleich. H nimmt zu.
G	Sonne. Ca II sehr stark. Viele neutrale Metalle (Fe I...). H nimmt zu.
K	Starke Metalllinien. Auftreten von Molekülbanden.
M	Neutrale Metalllinien, besonders CaI. TiO-Banden.

Tab. 7: Typische Merkmale von Spektren der jeweiligen Spektralklasse

Klasse	Verwendete Unterklassen									
O	(0.3)	(3)	4	5	6	7	8	9	9.5	
B	0	0.5	1	2	3	5	7	8		9.5
A	0			2	3	5	(6)	7	(8)	
F	0			2	3	5		7	8	9
G	0			2		5	(7)	8		
K	0			2	3	4	5			
M	0		1	2	3	4		7	8	

Tab. 8: Bezeichnungen der verwendeten Unterklassen der Spektralklassen. Angaben in Klammern meinen seltene Klassifikationen

Zusammenfassung

Die Spektralklassifikation erfolgt nach einem festen Schema, dessen Regeln, besonders vom Anfänger (!), strikt eingehalten werden müssen. Eine Zusammenfassung der Aussagen der spektralen Klassifikation ergibt folgendes Bild:

1. Klassifiziert werden die Spektren, und nicht die Sterne.
2. Die Klassifikation erfolgt mittels Referenzspektren, einfachen Hinweisen auf das Vorhandensein und die Stärke von Linien, und das Verhältnis von Linienintensitäten.
3. Die Reihenfolge der Spektralklassen stellt eine Temperaturfolge dar.
4. Die Angabe der Leuchtkraftklasse und der Spektralklasse zusammen ermöglichen eine Aussage über die absolute Helligkeit und somit über die Distanz (die *Spektroskopische Parallaxe*) zum Stern.
5. Die Angabe der Leuchtkraftklasse und der Spektralklasse zusammen ermöglichen eine Aussage über die Leuchtkraft, die Oberflächentemperatur und die Grösse des Sterns.
6. Eine Bezeichnung wird gebildet durch die Angabe von Spektralklasse mit Unterklasse, Leuchtkraftklasse mit Unterklasse und Hinweisen auf Besonderheiten.
A2 Vm (Castor) meint Spektralklasse A mit Unterklasse 2, und Leuchtkraftklasse V (Zwerg) mit starken Absorptionslinien von Metallen.

Die folgenden Tabellen 7 bis 10 zeigen abschliessend die aktuelle Charakterisierung der Spektral- und Leuchtkraftklassen und deren jeweilige Feineinteilung. Nicht dargestellt sind Erweiterungen, wie z.B. die Klassifikation der Wolf-Rayet-Sterne, die sich nicht in die *zweidimensionale* Klassifikation einfügen lassen.

Tab. 9: Bezeichnungen der Leuchtkraftklassen und deren Unterklassen

Leuchtkraftklasse	Name	Unterklasse
O	Hyperriesen	
I	Überriesen	I Ia Iab Ib
II	Helle Riesen	
III	(Normale) Riesen	II-III IIIa IIIab IIIb III-IV
IV	Unterriesen	
V	Zwerge (Hauptreihe)	
VI, sd	Unterzwerge	
VII, wd, D	Weisse Zwerge	

Literatur

Für eine allgemein verständliche Beschreibung der spektralen Klassifikation und der charakteristischen Sterne: «JAMES B. KALER, *Sterne und ihre Spektren* - Astronomische Signale aus Licht, Spektrum Akademischer Verlag, 1994».

Für eine exakte Beschreibung der Klassifikation und seines Ablaufes: «CARLOS JASCHEK & MERCEDES JASCHEK, *The Classification of Stars*, Cambridge University Press, 1990».

Für eine allgemein verständliche, wunderbare Beschreibung der Quantenphysik: «TONY HEY und PATRICK WALTERS, *Quantenuniversum - Die Welt der Wellen und Teilchen*, Spektrum der Wissenschaft, 1990»

Autoren

MARCEL PROHASKA, ERICH WENGER
Astronomisches Institut Universität Bern,
Sidlerstrasse 5, CH-3012 Bern

DR. CHARLES TREFZGER

Astronomisches Institut Universität Basel
Venusstrasse 7, CH-4102 Binningen

Kürzel	Name	Beschreibung	Ursache
n	nebulous	diffuse, verwaschene Linien	rasche Rotation
nn		sehr diffuse Linien	
s	sharp	scharfe Linien	
e	Emission	Emissionslinien (H-Emission bei O-Sternen)	ausgedehnte Hüllen
em		Metall-Emissionslinien	
ep	peculiar	Emissionslinien mit Besonderheiten	
eq		P-Cygni-Emissionslinien (Absorptionskomponente an der kurzwelligen Seite)	
er	reserved	Emissionslinien mit zentraler Einsenkung	
f		He- und N-Emissionslinien von Metallen	
wk	weak	schwache Linien	
m		starke Absorptionslinien von Metallen	
v	variable	Veränderliches Spektrum	
k	K-line	starke interstellare Kalzium-Linien (H & K)	
!		besondere Auffälligkeiten	
pec	peculiar	Besonderheiten, die sich nur durch ausführliche Beschreibung zu erfassen sind	

Tab. 10: Angaben über Besonderheiten im Spektrum

L'Univers, dis-moi ce que c'est?

Episode 15: Les étoiles, sixième partie

FABIO BARBLAN

9) Une étoile particulière: le Soleil

Nous savons aujourd'hui que du point de vue astronomique, en tant qu'objet étoile, le Soleil n'a rien de particulier. C'est une étoile ordinaire de la séquence principale du diagramme de Hertzsprung-Russell.

Par contre, elle est tout à fait particulière et joue un rôle capital pour l'homme et toute la biosphère terrestre. L'influence que le Soleil exerce sur cette dernière est loin d'être complètement comprise et maîtrisée. La vie est possible sur la Terre parce qu'elle se trouve, entre autres, à la bonne distance du Soleil pour garantir une certaine température moyenne, ou l'eau, élément vital pour le règne vivant, peut exister sous forme liquide. Mais le Soleil, malgré le fait qu'il se trouve encore dans la phase «tranquille» de son histoire, à mi-chemin de l'agitation finale qui va l'amener vers un état de naine blanche, il a des périodes d'activité plus ou moins intenses qui peuvent agir d'une façon encore inconnue sur notre biosphère (par exemple le réchauffement de l'atmosphère).

Mais revenons à l'astronomie. Dire que le Soleil n'a rien de particulier est, malgré tout, incorrect sur un point au moins; c'est, en fait, la seule étoile dont on peut aisément étudier et observer la surface. De ce point de vue là elle reste pour les astronomes un objet tout à fait exceptionnel. Parce qu'elle joue un rôle particulier pour l'homme et parce qu'elle est, probablement, l'étoile la plus étudiée par les astronomes, nous lui consacrons entièrement cet épisode final de la série consacrée aux étoiles.

Le Soleil est une étoile moyenne appartenant à la séquence principale (du diagramme de Hertzsprung-Russell), de type spectral G2 IV, ayant une température effective de 5700°K, sa densité est de 1,4 g/cm³ et il est animé d'un mouvement de rotation différentiel (fig. 1)(mis en évidence par les taches solaires) de 25.38 jours. La vitesse de rotation à l'équateur est de 2 km/s et l'axe de rotation est incliné de 70° et 15' sur le plan de l'écliptique. Il se déplace avec son cortège de planètes à une vitesse d'environ 250 km/s autour du centre de la galaxie (la Voie lactée).

La lumière qui nous parvient du Soleil, et qui contribue, au niveau de la Terre, à donner au spectre solaire ses caractéristiques, est engendrée dans différentes couches ayant des épaisseurs différentes et situées à des profondeurs différentes.

La photosphère: donne les 90% de l'énergie rayonnée depuis le proche ultraviolet jusqu'à l'infrarouge lointain. C'est la couche la plus profonde à partir de laquelle nous obtenons du rayonnement. Elle possède environ une épaisseur de 300 km et sa limite supérieure constitue le bord visible du Soleil. Elle est responsable des raies d'absorption dans le spectre solaire.

La chromosphère: dans la photosphère la température décroît progressivement de l'intérieur vers l'extérieur (elle provoque entre autres l'assombrissement du bord du disque solaire). Le minimum de température indique le début de la chromosphère dont l'épaisseur est d'environ 5000 km. Cette partie de l'atmosphère solaire est responsable des raies d'émission.

La couronne solaire (chromosphère): une augmentation brutale de la température qui croît rapidement jusqu'à un million de degrés marque la transition entre la chromosphère et la couronne solaire (fig. 2). Cette couche est responsable d'un fond continu faible avec des raies d'émission, l'émission d'ondes radios et de rayons X.