

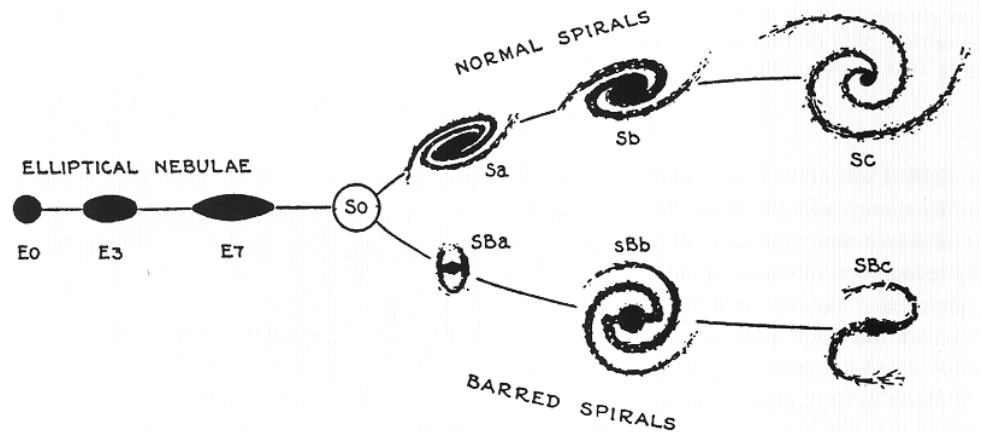
Hubble und die Klassifikation der Galaxien

von Wolfgang Steinicke

In den 1920er Jahren erweiterte Edwin Powell Hubble unser Verständnis der Galaxien durch die Einführung einer revolutionären Klassifikation. Sie ist nach wie vor die Basis um die mannigfachen Formen und Strukturen zu ordnen. Das berühmte Diagramm in Form einer Stimmgabel („tuning-fork“) präsentierte er erstmals in seinem Buch *The Realm of the Nebulae*. Es zeigt die drei Grundtypen: elliptische Galaxien (E), normale Spiralgalaxien (S) und Balkenspiralen (SB). Allan Sandage zelebrierte die Klassifikation 1961 im epochalen *Hubble Atlas of Galaxies*. Seitdem gab es diverse Revisionen. Als Bausteine des Kosmos sind Galaxien zentrale Objekte der Forschung. Sie erfreuen sich aber auch bei Amateuren großer Beliebtheit. Mit mittelgroßen Teleskopen lassen sich die Grundtypen visuell gut unterscheiden [1].



Edwin Powell Hubble (1889–1953)



Hubbles berühmtes „Stimmgabel“-Diagramm (aus [7])

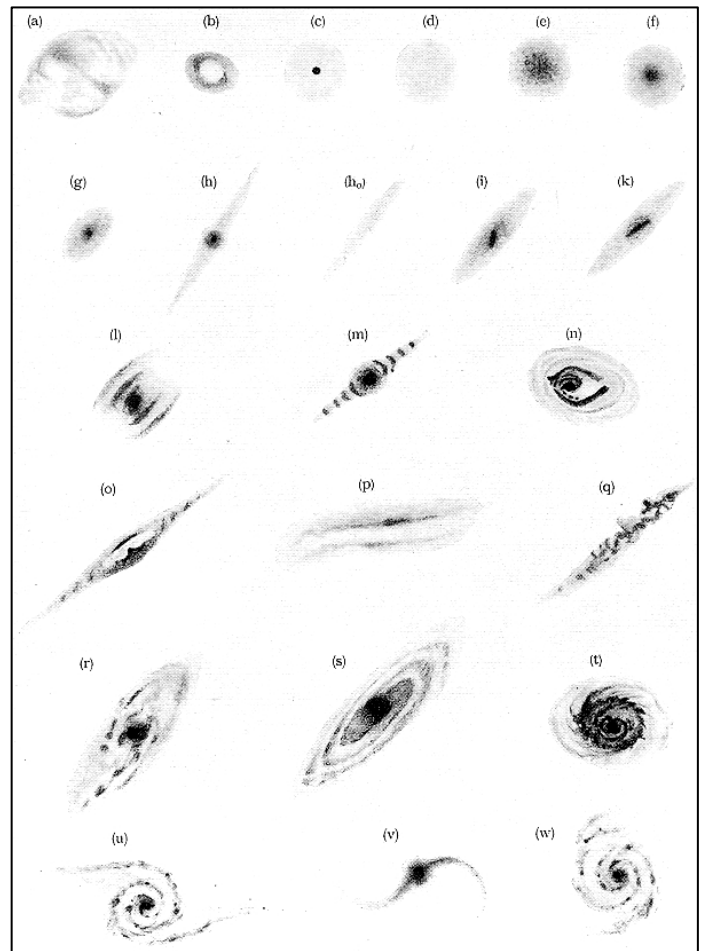
Erste Klassifikationen von Nebeln

Zwischen 1783 und 1802 entdeckte William Herschel fast 2500 nichtstellare Objekte und teilte sie nach dem visuellen Eindruck in 8 Klassen ein: Nebel (nach Größe und Helligkeit), Sternhaufen (nach Größe und Dichte) sowie Planetarische Nebel (als Sammelbecken für den Rest). 1845 kam eine neue Struktur hinzu: die Spiralform, entdeckt von Lord Rosse bei M 51. Viele Astronomen glaubten, alle Nebel seien letztlich Sternhaufen. Doch selbst mit den größten Teleskopen war der Nachweis nicht zu führen. Allein durch Beobachtung, Zeichnung und Katalogisierung – hier ist vor allem der 1888 von John Louis Emil Dreyer publizierte *New General Catalogue* (NGC) zu nennen – war es nicht möglich, die physikalische Natur der Nebel zu ergründen [2].



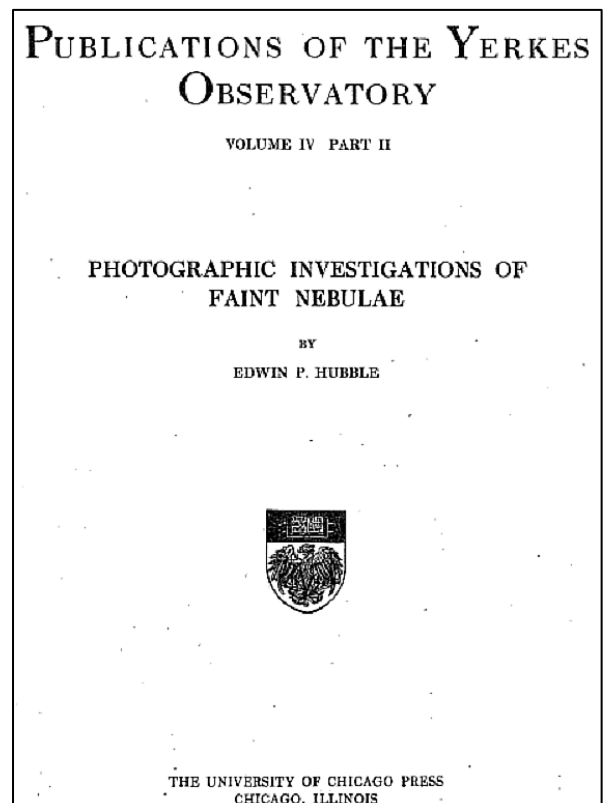
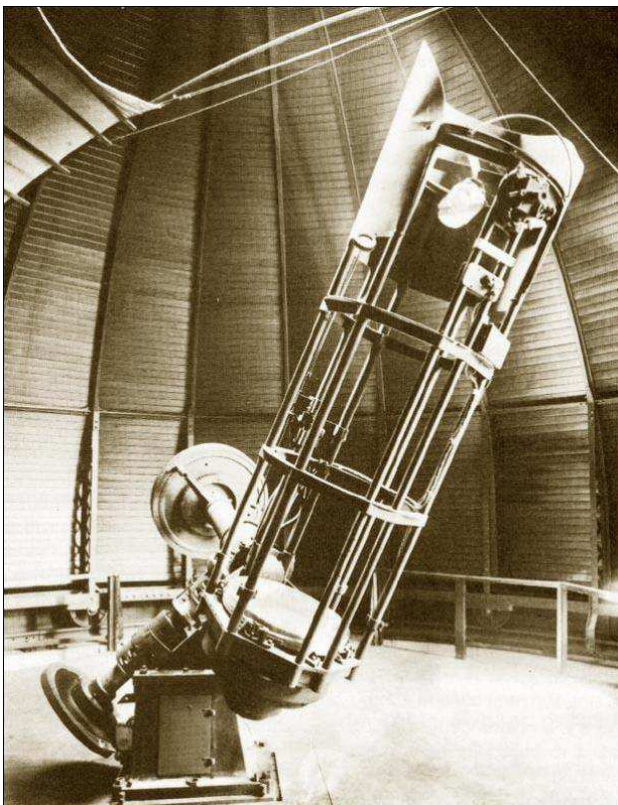
Lord Rosses erste Zeichnung des Spiralnebels M 51 in den Jagdhunden (siehe [2])

Dank Spektroskopie und Astrofotografie änderte sich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts allmählich die Lage. Anhand des Spektrums konnte man entscheiden, ob ein diffuses Objekt aus Gas oder Sternen besteht. Immer mehr Aufnahmen zeigten die Vielfalt an Formen und Strukturen und allmählich kam Ordnung ins Reich der Nebel. 1908 präsentierte Max Wolf ein lineares Schema, das 23 Typen (a bis w) unterscheidet [3]. Es reicht von amorphen Formen bis zu voll entwickelten Spiralen. Später erkannte man, dass die Klassifikation eine Mischung aus galaktischen (planetarischen) Nebeln und Galaxien darstellt. Sie war übertrieben detailliert und außerdem stark von der räumlichen Orientierung der Objekte beeinflusst. Trotzdem wurde Wolfs Schema fast 30 Jahre lang verwendet – unter anderem von Edwin Hubble.



Die Klassifikation der Nebel von Max Wolf (aus [3])

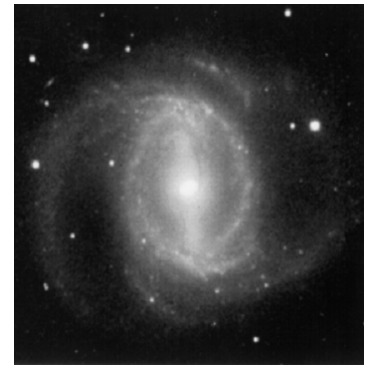
Für seine Dissertation hatte Hubble 1914-17 am Yerkes Observatory insgesamt 588 Nebel untersucht (bis auf 76 waren alle neu). Grundlage waren eigene Aufnahmen mit dem 24"-Reflektor. Hubble ordnete die Objekte anhand der 23 von Wolf definierten Typen und führte zusätzlich den „irregulären“ Fall ein. Das Ergebnis wurde 1920 unter dem Titel „Photographic Investigations of Faint Nebulae“ publiziert [4].



Links: 24"-Reflektor des Yerkes Observatory; rechts: Hubbles Dissertation

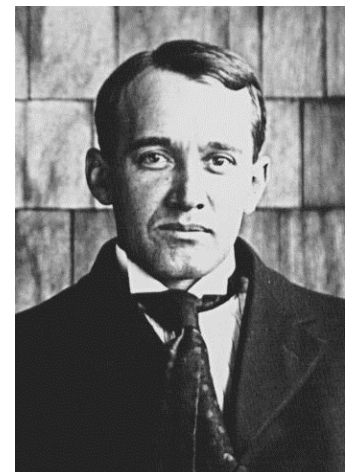
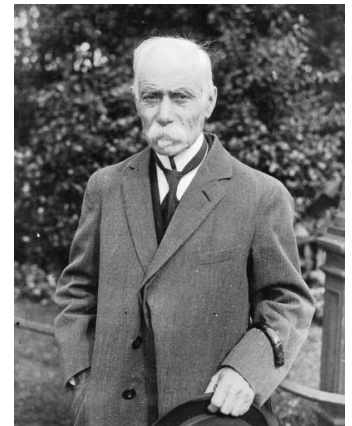
Die umfangreichste fotografische Durchmusterung der Nebel führte Heber Curtis mit dem 36"-Crossley-Reflektor des Lick Observatory durch. Bis 1917 waren bereits 17000 Objekte katalogisiert und die grundlegenden morphologischen Strukturen wurden immer deutlicher. Curtis unterschied zunächst planetarische, diffuse und spiralförmige Nebel. 1918 kam dann ein neuer Typ hinzu: die Balkenspirale, von ihm „ Φ -type spiral“ genannt.

Balkenspirale („ Φ -type spiral“) NGC 1433 im Sternbild Pendeluhr



Hubbles beschwerlicher Weg

1917 wurde Hubble Mitarbeiter am Mount Wilson Observatory [5, 6]. Er fotografierte viele Nebel mit dem 60- und 100-Zöller und untersuchte das Klassifikationsproblem weiter. Ein entscheidender Schritt war seine Unterscheidung zwischen „galactic nebulae“ und „extragalactic nebulae“. Erstere waren für ihn aufgrund ihrer Position eindeutig Objekte der Milchstraße (z.B. Planetarische Nebel). Dagegen sah er letztere als wesentlich weiter entfernt an, weil sie in großer Zahl außerhalb des Milchstraßenbandes auftreten (darunter die Spiralnebel). Die Tatsache, dass diese oft kleinen und schwachen Nebel die Milchstraße mieden, sollte ihn später zum Begriff der „zone of avoidance“ führen. Den Begriff „Galaxie“ – 1846 von John Nichol eingeführt – verwendete Hubble nicht; er empfand ihn als „romantischen Glamour“. Die extragalaktischen Nebel unterteilte er in 4 Typen: spiralförmige, gestreckte (inkl. spindelförmige und ovale), kugelförmige und irreguläre. 1922 präsentierte Hubble sein Ergebnis der Internationalen Astronomischen Union (IAU). Zuständig war die Kommission für Nebel und Sternhaufen, geleitet von einem Relikt der klassischen Astronomie, Guillaume Bigourdan. Der Franzose zeigte sich wenig aufgeschlossen gegenüber den neuen astrophysikalischen Methoden und ignorierte die Klassifikation. Doch damit nicht genug: Dreist schlug er der Kommission (der übrigens auch Dreyer angehörte) vor, sein bereits publiziertes System zu verwenden – ein Ergebnis seiner langjährigen visuellen Nebelbeobachtungen in Paris. Eine herbe Enttäuschung für den jungen amerikanischen Astronomen!



Oben:
Guillaume Bigourdan
(1851–1932)
Unten:
Vesto Slipher
(1875–1969)

Als bald darauf Vesto Slipher vom Lowell Observatory, ein Pionier der Galaxienspektrographie, den Vorsitz übernahm, probierte es Hubble erneut und legte der IAU-Kommission im Sommer 1923 eine revidierte Klassifikation vor. Sie entspricht weitgehend der finalen Form und unterscheidet 4 Nebeltypen: elliptische (E), normale Spiralen (S), Balkenspiralen (SB) und irreguläre (I), wie etwa die Magellanschen Wolken. Bei S bzw. SB wird die Dichte der Spiralarme in drei Stufen durch a, b oder c differenziert (z.B. Sa oder SBb). Beim Typ E gibt eine Zahl zwischen 0 und 7 die Elliptizität an (z.B. E0 oder E4). Der Zwischentyp S0 fehlt noch. Hubble war von James Jeans' Evolutionstheorie der Galaxien beeinflusst, wonach die Formenvielfalt Folge ihrer physikalischen Entwicklung ist. So interpretierte Jeans elliptische Galaxien als Vorläufer der Spiralnebel (S, SB). Folglich unterscheidet Hubble bei letzteren „frühe“ (a), „mittlere“ (b) und „späte“ (c) Formen.

Im Sommer 1925 tagte die Kommission in Cambridge und diskutierte die neue Klassifikation. Überraschend entschied sie sich erneut gegen Hubble, der leider nicht anwesend war. Viele Teilnehmer kritisierten, dass er sich auf unbewiesene physikalische Eigenschaften von Nebeln stützen würde (wie die Theorie von Jeans); vor allem lehnte man die Bezeichnungen „früh“ bzw. „spät“ ab. Die Kritik war aufgrund der noch dürftigen Faktenlage berechtigt. Heute ist klar, dass sich die Spiralgalaxien nicht von links nach rechts entwickeln. Auf die gesamte Hubble-Sequenz bezogen ist es sogar eher umgekehrt: Elliptische Galaxien können aus der Kollision von Spiralgalaxien entstehen, was in dichten Galaxienhaufen deutlich wird.

Hubble, erneut schwer enttäuscht, betonte den rein deskriptiven Charakter seiner Klassifikation. Was die astrophysikalischen Grundlagen betraf, hatte er bereits einen entscheidenden Beitrag geleistet: Im Oktober 1923 war es ihm gelungen, die extragalaktische Natur der Galaxien durch die Beobachtung von Cepheiden in M 31 nachzuweisen – sie erwiesen sich als „island universes“. Von Kollegen ermutigt, publizierte er schließlich seine Klassifikation im Dezember 1926 [7]. Die umfangreiche Darstellung mit dem Titel „Extragalactic Nebulae“ brachte den Durchbruch.

Hubble beschreibt die einzelnen Galaxientypen, nennt viele Beispiele und präsentiert eigene Aufnahmen. Eine grafische Darstellung („Stimmgabel“) fehlt allerdings.

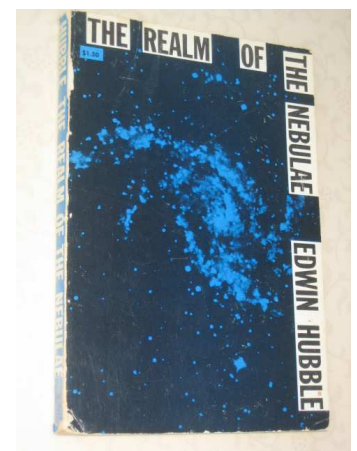
1926 war auch ein wichtiges Jahr für Hubbles schärfsten Konkurrenten: Knut Lundmark, zeitweise ein Kollege am Mount Wilson. Die Rivalität in kosmischen Fragen reichte soweit, dass man sich sogar gegenseitig des Plagiats bezichtigte. So publizierte Lundmark, der Galaxien „anagalaktische Nebel“ nannte, wenige Monate vor Hubble eine dreistufige Klassifikation. Der Unterschied lag einzig in der Differenzierung innerhalb der Klassen, bestehend aus elliptischen, spiralförmigen und irregulären Galaxien. So benutzte Lundmark bei Spiralen die Lichtkonzentration als Parameter, Hubble setzte dagegen auf die Dichte der Arme. Wütend schrieb Hubble in seinem Artikel über den Schweden: „kürzlich hat Lundmark eine Klassifikation publiziert, die praktisch mit der von mir eingereichten identisch ist [...] sie enthält keinen Hinweis auf die Diskussion der Kommission“ (pikanterweise hatte Lundmark an der IAU-Sitzung in Cambridge teilgenommen). 1927 präsentierte noch John Reynolds eine Einteilung der Spiralnebel, die z.B. auch die Dicke der Arme berücksichtigte. Er meinte, Hubbles Schema sei zu vereinfachend und übergehe viele Details. Letztlich empfand Hubble aber Genugtuung, denn seine Klassifikation setzte sich eindeutig durch. Sie war einfach und effektiv.



Knut Lundmark
(1889–1958)

Das Reich der Nebel und sein Erbe

Populär wurde die Hubble-Klassifikation durch das Buch *The Realm of the Nebulae* aus dem Jahr 1936 [8]. Es gibt nun auch Zwischenstufen wie Sab oder SBbc. Im zweiten Kapitel findet sich die legendäre Stimmgabel. Die Darstellung – bezeichnet als „The Sequence of Nebular Types“ – zeigt auch die (hypothetische) Klasse S0 als Übergang zwischen den elliptischen und spiralförmigen Galaxien. Zur Erläuterung der Sequenz zeigt Hubble einige Aufnahmen, gemacht mit dem 60- und 100-Zöller am Mount Wilson. Wegen der geringen Qualität der Darstellung entschloss er sich später, einen Atlas zusammenzustellen. Ab 1948 fotografierte er viele Galaxien mit dem 200-Zöller auf dem Mount Palomar, wobei er auch Objekte vom Typ S0 fand. Im Jahr 1953 war das Projekt weit fortgeschritten als Hubble plötzlich am 28. September (in Folge eines Schlaganfalls) verstarb.

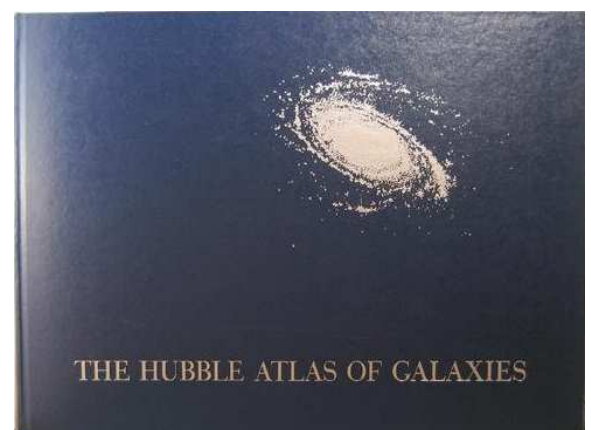


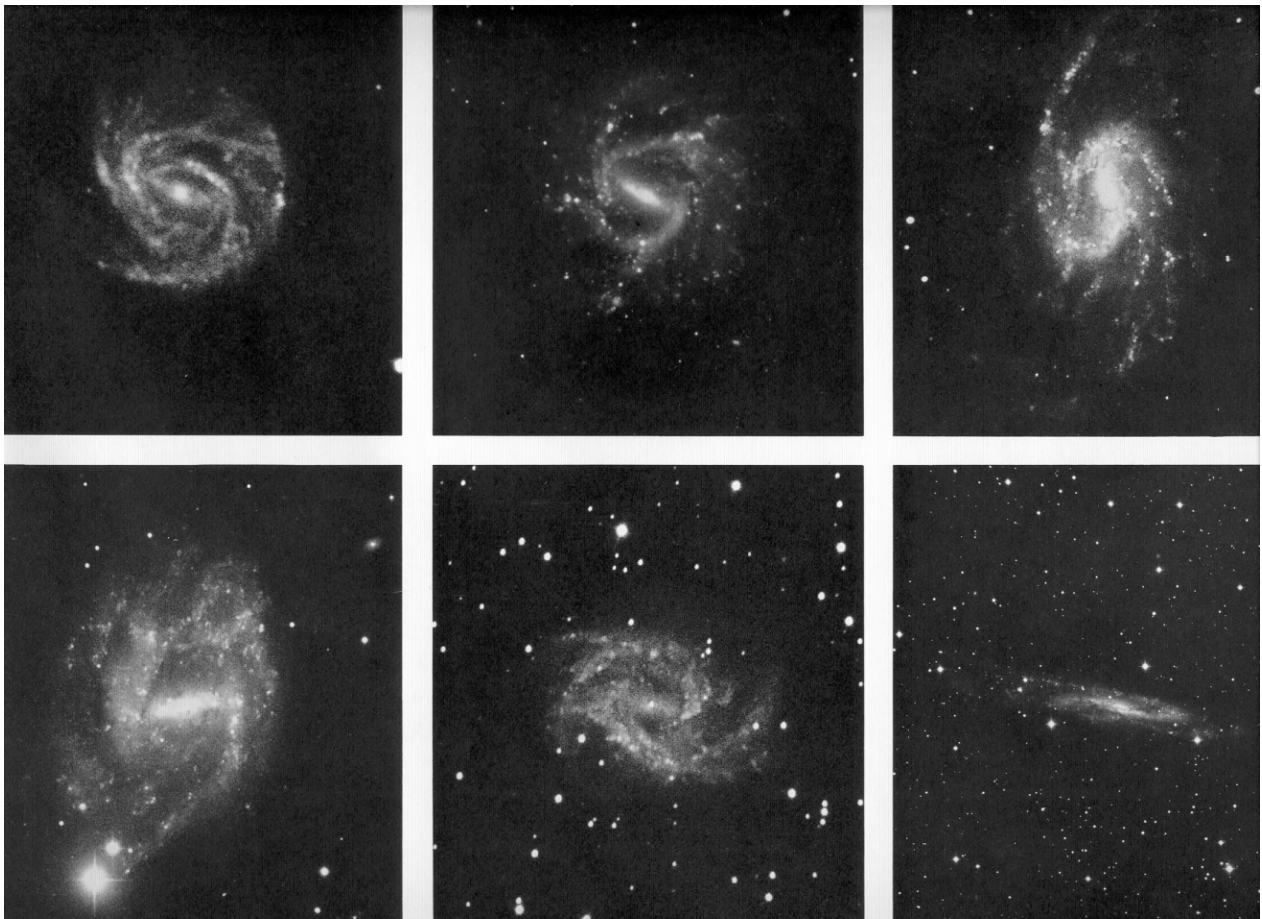
Allan Sandage vollendete sein Werk und 1961 erschien der monumentale Hubble Atlas of Galaxies [9]. Der Unterschied zum „Taschenbuch“ von 1936 könnte kaum größer sein: Auf 50 großformatigen Tafeln präsentiert er eine Auswahl der besten Aufnahmen. Insgesamt werden 183 Galaxien gezeigt. Sandage revidierte die Klassifikation und führte neue Bezeichnungen ein: SB0 als Pendant zu S0; Sd (bzw. SBd) für Galaxien mit extrem weit gefächerten Spiralarmen; Irr I und II zur Unterscheidung von amorphen und pekulären Systemen; (s) und (r) für S-förmige bzw. ringförmige Spiralarme; „pec“ um besondere Strukturen bei regulären Galaxien zu markieren. Später kam noch Sm bzw. SBm dazu; m bedeutet „magellanisch“ und markiert den Übergang zwischen spiralförmigen (Sd) und amorphen Systemen (Irr I) [10].



Allan Sandage (1926–2010) vor dem 100-Zöller
am Mount Wilson

Wem der Hubble-Atlas noch nicht groß genug ist, wird mit dem zweibändigen *Carnegie Atlas of Galaxies* von Allan Sandage und John Bedke endgültig bedient sein [11]. Das 1994 erschienene Werk benötigt zum Transport eine Schubkarre. Die Hubble-Sandage-Klassifikation wird mit einer riesigen Zahl von Galaxien illustriert (ein letztes Mal mit konventioneller Fotografie).

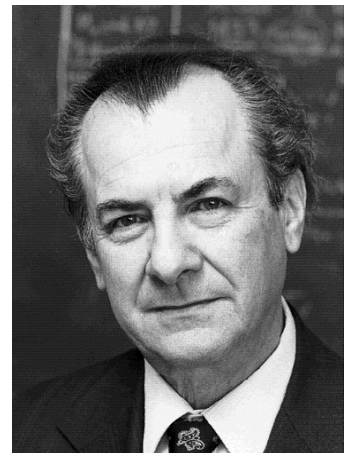




Tafel 49 auf dem Hubble Atlas of Galaxies zeigt Beispiele für SBc-Galaxien: oben v.l.n.r. NGC 3367, NGC 1073, NGC 3359; unten v.l.n.r. NGC 7741, NGC 2525, NGC 7640

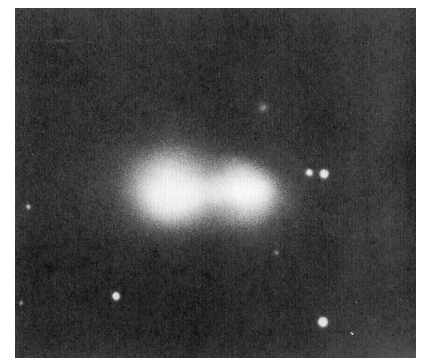
Derweil hatte Gerard de Vaucouleur die Klassifizierung der Galaxien grundlegend modifiziert. In den 1950er Jahren verwandelte er Hubbles zweidimensionale Stimmgabel in ein dreidimensionales Gebilde. Das neue System fand seine Anwendung in de Vaucouleurs Second Reference Catalogue of Bright Galaxies (RC2). Es ist relativ kompliziert, wie das Beispiel der Milchstraße zeigt: Nach Hubble als SBb klassifiziert, gilt nun SAB(rs?)bc. Das Pendant zum Hubble-Atlas ist der 2007 erschienene de Vaucouleurs Atlas of Galaxies von Ron Buta, Harold Corwin und Stephen Odewahn [12]. Die ehemaligen Mitarbeiter von de Vaucouleurs (der 1995 starb) erläutern das die Klassifikation anhand von über 500 Galaxien und stützen sich dabei auf CDD-Aufnahmen.

Gérard de Vaucouleurs (1918–1995)



Nach welchen Kriterien wird klassifiziert?

Wir beschränken uns hier auf die Hubble-Klassifikation. Relativ einfach ist der Fall bei elliptischen Galaxien. Beim Typ En (mit $n = 0$ bis 7) berechnet sich n aus dem großen und kleinen Durchmesser (a , b): $n = 10(a-b)/a$. Bei einer Größe von $10' \times 6'$ ($a = 10$, $b = 6$) folgt $n = 10(10-6)/10 = 4$; das Objekt ist also vom Typ E4. Die Abbildung zeigt den seltenen Fall eines Paares aus zwei E0-Galaxien: die Doppelgalaxie NGC 750/51 im Dreieck.



Bei NGC 750/51 im Dreieck sind zwei E0-Galaxien in Kontakt (Hubble Atlas, Tafel 8)

Normale Spiralen (S) bestehen aus einem sphärischen Kern („bulge“) und der ihn umgebenden Scheibe („disk“) mit den Spiralarmen als Hauptmerkmal. Vom Rand des Kerns gehen zwei (oder mehr) Arme aus. Balkenspiralen (SB) besitzen ebenfalls eine Scheibe, die aus zwei Spiralarmen besteht. Der Kern ist aber hier balkenförmig und die Arme beginnen an den Enden des Balkens. Unsere Milchstraße ist eine Balkenspirale.

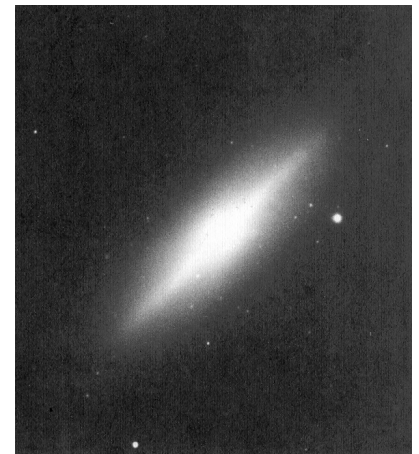
Bei der Klassifikation von Spiralgalaxien werden folgende Kriterien benutzt:

- Form und Dichte der Spiralarme
- relative Größe von Kern und Scheibe („bulge-to-disk ratio“)
- Form des Kerns: sphärisch (S) bzw. balkenförmig (SB)

Die beiden ersten Kriterien sind äquivalent. Dies ist nützlich, denn oft ist nur eines anwendbar: Im Fall großer Inklination („edge-on“) ist die Dichte der Arme nicht feststellbar, dagegen kann das „bulge-to-disk ratio“ leicht ermittelt werden. Bei edge-on-Galaxien ergibt sich noch ein anderes Problem: die Frage des Balkens. Zum Glück hängen die Spiralarme manchmal ober- oder unterhalb der Scheibe am Balken, wie etwa bei der SBc-Galaxie NGC 7640 in Andromeda. Tab. 1 zeigt Beispiele für S- und SB-Galaxien.

S0-Galaxien sind linsenförmige Systeme hoher Flächenhelligkeit die keine Spiralarme besitzen. Verglichen mit dem Typ S ist die Scheibe weniger abgeflacht und der sphärische Kern geringer ausgeprägt. In der Draufsicht („face-on“) sind sie mitunter schwer von elliptischen Galaxien zu unterscheiden. In manchen Fällen zeigen sich Staubbänder oder eine schwache Balkenstruktur (SB0). Linsenförmige Galaxien werden auch als Klasse L („lenticular“) bezeichnet. Ein schönes Beispiel für den Typ S0 ist die „Spindel Galaxie“ NGC 3115 im Sextant; sie wurde früher als E7 klassifiziert.

Die „Spindel Galaxie“ NGC 3115 im Sextant ist vom Typ S0 (Hubble Atlas, Tafel 1)



Alles was nicht in die „Stimmgabel“ passt, wird als irregulär (I) bezeichnet. Hier gibt es kaum definitive Kriterien. Für besondere Strukturen bzw. Abweichungen von regulären Systemen benutzt man häufig den Zusatz „pec“ was für „peculiar“ steht (siehe dazu auch meinen Beitrag über „Extragalaktische Kometen“). Ein Beispiel ist die elliptische Galaxie NGC 185 in Andromeda. Ihren Typ E3 pec verdankt sie einer markanten Staubstruktur. Abschließend noch ein Wort über die relative Häufigkeit der Hubble-Typen. Dazu benötigt man ein gut klassifizierbares Ensemble von Galaxien; hier eignen sich helle, relativ nahe Objekte (weit entfernte lassen oft nur die Differenzierung S oder E zu). Das Resultat (Tab. 2), bei dem normale Spiralgalaxien dominieren, gibt nur einen groben Anhaltspunkt und entspricht nicht der wahren Verteilung im Kosmos (diese ist unbekannt).



NGC 185 ist vom Typ E3 pec
(Hubble Atlas, Tafel 3)



Tab. 1: Klassifikation von Spiralgalaxien nebst Beispielen

Spiralarme	„bulge-to-disk ratio“	Kern: sphärisch	Kern: Balken
eng	groß: dominanter Kern, kleine Scheibe	Sa (M 104)	SBa (NGC 7743)
mittel	eins: Kern und Scheibe gleich groß	Sb (NGC 2841)	SBb (M 95)
weit	klein: kleiner Kern, große Scheibe	Sc (M 101)	SBc (NGC 253)
sehr weit	sehr klein: winziger Kern, dominante Scheibe	Sd (NGC 7793)	SBd (NGC 4242)
magellanisch	null: kein Kern, nur Scheibe	Sm (NGC 4449)	SBm (IC 2574)

Tab. 2: Statistik der Hubble-Typen auf der Basis heller (naher) Galaxien

Typ	Häufigkeit (%)
Elliptische Galaxie (E)	14,2
Linsenförmige Galaxie (L)	13,2
Normale Spiralgalaxie (S)	58,5
Balkenspiralgalaxie (SB)	11,3
Irreguläre Galaxie (I)	2,8

Literatur

- [1] Steinicke, W., Jakiel, R. (2006): Galaxies and How to Observe Them, Springer-Verlag
- [2] Steinicke, W. (2010): Observing and Cataloguing Nebulae and Star Clusters – from Herschel to Dreyer’s New General Catalogue, Cambridge University Press; siehe auch: www.klima-luft.de/steinicke
- [3] Wolf, M. (1908): Publikationen des Astrophysikalischen Instituts Königstuhl-Heidelberg, Bd. 3, Nr. 5
- [4] Hubble, E. (1920): Publications of the Yerkes Observatory, Vol. IV, Part II
- [5] Christiansson, G. (1996): Edwin Hubble Mariner of the Nebulae, University of Chicago Press
- [6] Sharov, A., Novikov, I. (2000): Edwin Hubble – der Mann, der den Urknall entdeckte, Birkhäuser-Verlag
- [7] Hubble, E. (1926): Astrophysical Journal 64, 321
- [8] Hubble, E. (1936): The Realm of the Nebulae, Yale University Press
- [9] Sandage, A. (1961): The Hubble Atlas of Galaxies, Carnegie Institution of Washington, Pub. 618
- [10] Sandage, A., Tammann, G. (1987): A Revised Shapley-Ames Catalogue of Bright Galaxies, Carnegie Institution of Washington, Pub. 635
- [11] Sandage, A., Bedke, J. (1994): The Carnegie Atlas of Galaxies, Carnegie Institution of Washington, Pub. 638
- [12] Buta, R., Corwin, H., Odewahn, S. (2007): The de Vaucouleurs Atlas of Galaxies, Cambridge University Press