

Uwe Pilz, Bernhard Häusler

Elektronische Photometrie heller Kometen - der Parameter A_p

Visuelle Helligkeitsmessung

Die visuelle Helligkeitsmessung hat eine lange Tradition. Die Methode zielt darauf ab, einen Kometen mit Sternen bekannter Helligkeit zu vergleichen. Gemessen wird die Gesamthelligkeit von Koma und Schweif. Das Verfahren ist bei geeigneter Wahl des Beobachtungsinstrumentes sehr genau, da das Auge bei indirektem Sehen in der Lage ist, den gesamten Lichtstrom über der Hintergrundhelligkeit vergleichend zu ermitteln, unabhängig von der scheinbaren Objektgröße. Dies funktioniert gut für einigermaßen kompakte Kometen, deren Koma im Instrument nicht größer als 1° erscheint. Das Instrument ist also so zu wählen, dass bei Minimalvergrößerung dieser Wert nicht überschritten wird. Wenn dies nicht beachtet wird, unterschätzt das Messergebnis die Helligkeit.

Die Hauptursache der verbleibenden Differenzen erfahrener Beobachter liegt in verschiedenen atmosphärischen Bedingungen begründet. Eine schwache, aber ausgedehnte äußere Komachale kann erheblich zur Gesamthelligkeit beitragen. Der Beobachter mit den schlechteren Bedingungen nimmt diese möglicherweise nicht wahr. Das prominente Beispiel für diesen Effekt war der Ausbruch des Kometen 17P/Holmes in seiner Spätphase (Bild 1).



Bild 1: Der Komet 17P/Holmes zeigte am 30. Oktober 2007 eine schwache äußere Koma. (Norbert Mrozek).

Die konventionelle CCD-Photometrie

Die Bildaufnahme-Elemente der elektronischen Kameras sammeln Ladungen. Eine Addition dieser Ladungen führt auf einem direkten Weg zur Helligkeit von Sternen und Kometen, wenn die Hintergrundhelligkeit subtrahiert wird. Allerdings dürfen die Pixel bei der Belichtung nicht in die Sättigung geraten. Dieses vom Prinzip her ideale Verfahren scheidet, wenn große Bildfelder abgedeckt werden sollen. Die Berücksichtigung des Hintergrundes einschließlich eingeschlossener Sterne wird immer schwieriger, die Fehler steigen. Interessanterweise stört dies bei visueller Photometrie nicht im gleichen Maße - die Datenverarbeitungsanlage "Mensch" hat die besseren Algorithmen.

Als Folge dieser Einschränkung wird üblicherweise nicht der gesamte Komet vermessen, sondern nur der innere Teil. Der für die Messung berücksichtigte Himmelsausschnitt wird als Apertur bezeichnet. International hat sich eine Apertur von 10 Bogensekunden durchgesetzt. Dies führt bei kleinen und damit meist schwachen Kometen zu Ergebnissen, welche sich mit den visuellen Resultaten vergleichen lassen. Die üblicherweise visuell vermessenen, hellen Kometen haben jedoch Komadurchmesser von einigen Bogenminuten. Nur die innersten 10 Bogensekunden zu berücksichtigen bedeutet, einen Großteil der rückgestrahlten Energie nicht zu verwenden. CCD-Helligkeiten liegen in solchen Fällen oft einige Magnituden über den visuellen.

Einen Ausweg aus diesem Dilemma bieten Multiapertur-Messungen, hierüber habe ich schon berichtet [1]. Dieses Vorgehen erweitert den Einsatzbereich der elektronischen Helligkeitsbestimmung, scheitert aber letztlich bei sehr ausgedehnten, hellen Kometen ebenfalls.

Der Parameter Afp

Aus der Gesamthelligkeit lässt sich die physikalische Gestalt der Kometenatmosphäre nur bedingt ableiten. Allgemein wird der Aktivitätsparameter bestimmt, ein empirisches Maß. Es gibt Ansätze zur Abschätzung der Gasentwicklung [2], aber diese lassen sich nur auf Kometen anwenden, die über einen langen Zeitraum beobachtet wurden.

Elektronische Helligkeitsbestimmungen bieten einen eleganten Weg, nahezu direkt an das physikalische Geschehen der Kometenoberfläche heranzukommen. Erdacht wurde diese Methode 1984 von Michael A'Hearn [3]. Er schlägt die Bestimmung des Parameter Afp vor. Hierin ist A die Albedo der Kometenatmosphäre, d.h. der Anteil des vom Staub reflektierten Lichts. Der Füllfaktor f kennzeichnet den Flächenanteil des Staubes an der Gesamtfläche des zur Messung benutzten Himmelsfeldes. Der letzte Parameter ρ stellt die lineare Ausdehnung des Messfeldes dar, also gemessen in Metern. ρ kann aus der Messapertur einfach berechnet werden, wenn die Erdentfernung Δ des Kometen bekannt ist.

Füllfaktoren, die wesentlich kleiner als 1 sind, geben die Staubdichte der Kometenatmosphäre gut wieder. Bei f in der Nähe von 1 gilt dieser Zusammenhang nicht mehr. Ich möchte das an einem irdischen Beispiel erläutern: Wenn wir einen kleinen lichten Wald ansehen, dann können wir zwischen den Bäumen hindurch den Hintergrund sehen. Wir können einen Füllfaktor angeben, den die Bäume vom Hintergrund ausblenden. Wenn wir dies zur Vermeidung perspektivischer Effekte aus einer größeren Entfernung ansehen, ist der Füllfaktor ein gutes Maß für die Dichte an Bäumen. Bei der Betrachtung eines immer dichteren Waldes überdecken und verdecken sich Bäume. Der Zusammenhang zwischen Füllfaktor und Dichte ist schwächer. Bei einem völlig undurchsichtigen Wald lässt sich nichts mehr entscheiden, da wir kein Maß dafür haben, wie viele Bäume in der Sichtlinie stehen. Es ist nicht zu entscheiden, ob es ein mittelgroßer, undurchsichtiger Wald ist oder ein riesig ausgedehnter. Dieser Effekt hat für die Bewertung des Afp -Wertes eine wichtige Bedeutung.

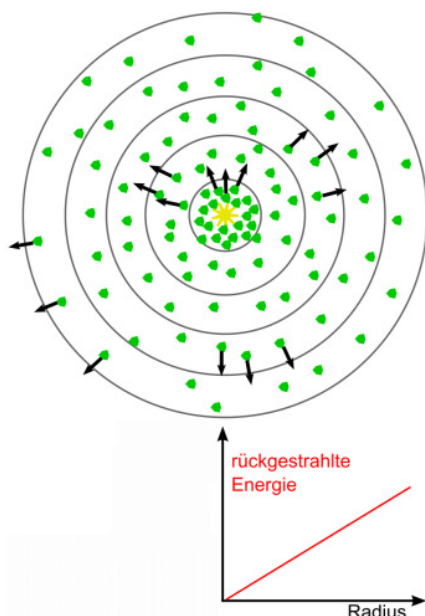


Bild 2: Die Teilchen einer ungestörten Kometenatmosphäre bewegen sich im Effekt radial. Jede Schale um den Kometenkern enthält dieselbe Menge Teilchen.

Afp stellt den Anteil des Sonnenlichts dar, der von einem Ausschnitt der Kometenatmosphäre reflektiert wird und die Erde erreicht. Dieser Wert ist in weiten Grenzen unabhängig von ρ selbst. Dies hängt mit dem Aufbau der Kometenatmosphäre zusammen (Bild 2). Die Staubteilchen bewegen sich radial nach außen. Solange dieses Abströmen nicht wesentlich gestört wird, befinden sich in jeder Schale gleichviele Teilchen, also Staub. Im Bild 2 befinden sich in jeder Schale 20 Teilchen. Wenn wir den innersten Radius mit ρ_1 kennzeichnen, dann ergibt

sich hierfür ein Wert $Af_1\rho_1$. Der nächste Radius ρ_2 ist doppelt so groß wie ρ_1 . In dieser Fläche ρ_2 befinden sich doppelt so viele (40) Teilchen. Der Füllfaktor ist insgesamt nur halb so hoch: Doppelt so viele Teilchen, doppelter Radius, was der vierfachen Fläche entspricht. Es gilt also $\rho_2=2*\rho_1$ und $f_2=f_1/2$. Da sich die Albedo beim Abströmen nicht ändert, bleibt der Wert $Af\rho$ unabhängig von der ρ selbst und damit unabhängig von der Messapertur.

Dies gilt allerdings nur für ungestörte Kometenatmosphären wie in der Abbildung dargestellt. Die Außenbereiche der Atmosphäre mit ihrer geringen Teilchendichte sind dem Strahlungsdruck stärker ausgesetzt. Damit gilt die Konstanz von $Af\rho$ gegen ρ bzw. die Apertur vor allem für ausgedehnte Kometen mit kräftiger Staubbülle bei Benutzung einer kleinen Apertur. Dieser Wert eignet sich gerade für die Gruppe von Schweifsternen, wo die direkte Photometrie versagt.

Die Berechnungsformeln für $Af\rho$ können dem Bild 3 entnommen werden.

$$Af = \frac{\text{vom Radius } \rho \text{ reflektierter Lichtstrom}}{\text{am Ort des Kometen auf } \rho \text{ einfallender Lichtstrom}}$$

$Af = \frac{F_C 4\pi \Delta^2 r^2}{F_S \pi \rho^2}$	Größengleichung: $Af\rho = 494530 r^2 \Delta 10^{(-0,4 m_1)}$
$Af = \frac{F_C}{F_S} \frac{4 \Delta^2 r^2}{\rho^2}$	r, Δ in AE: $Af\rho$ in m. Apertur 10"
$Af\rho = \frac{F_C}{F_S} \frac{4 \Delta^2 r^2}{\rho}$	

Bild 3: Formeln zur Berechnung von $Af\rho$.

Die physikalische Bedeutung des $Af\rho$ -Parameters

Bild 4. zeigt den Verlauf des $Af\rho$ -Wertes über einen weiten Bereich von ρ . Bei mittlerem ρ gilt die oben besprochene Konstanz, bei sehr großen Aperturen erfassen wir gestörte Teile der Kometenatmosphäre: Der Füllfaktor sinkt stärker als von der Theorie des ungestörten Abströmens vorhergesagt, in der Folge verkleinert sich $Af\rho$.

Bei sehr kleinen Radien tritt das Phänomen des "dunklen Waldes" ein. Nicht alle Teilchen der Kometenatmosphäre können Sonnenlicht zur Erde reflektieren, da sie sich aus der Sichtlinie des Beobachters gegenseitig überdecken. Für eine völlig opake Atmosphäre wird $Af\rho$ linear mit ρ kleiner: A ist laut Modell als konstant, f ist konstant bei 1 und ρ sinkt linear.

Mit einer kleinen Idealisierung können wir den Grenzwert ρ_{gr} ermitteln, ab dem $Af\rho$ konstant wird. An dieser Stelle gilt $f=1$ und somit $f\rho=1*\rho_{gr}$.

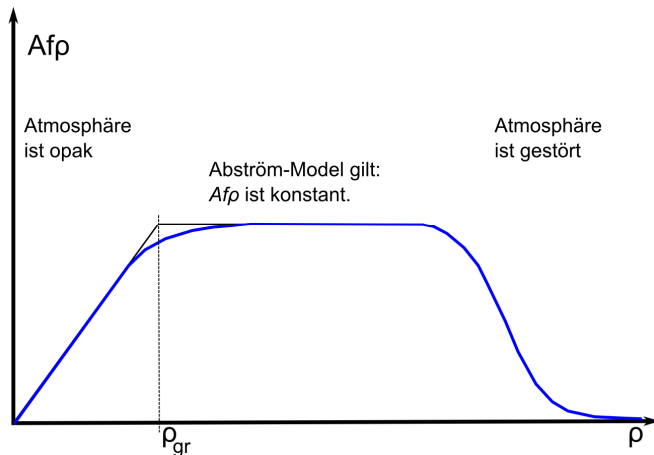


Bild 4: Die Konstanz von $A_f\rho$ gilt nur in einen Bereich der Kometenatmosphäre. In der Nähe des Nukleus ist der Füllfaktor 1, weit außen wird das freie Abströmen gestört.

Wir können also feststellen:

$f\rho$ ist die Dicke der opaken Kometenatmosphäre. $A_f\rho$ ist die Dicke der opaken Atmosphäre, korrigiert um die Albedo.

Mit einer einfachen Messung können wir also die Größenordnung der undurchsichtigen Staubhülle ermitteln. Diese ist erstaunlich klein und bewegt sich zwischen wenigen Zentimetern bis hin zu Metern, meist unterhalb des Kilometerbereichs: Kometenatmosphären sind dünn (Bild 5). Der $A_f\rho$ -Wert ist direkt mit der Gesamtstaubproduktion verbunden. Wenn man die Abströmgeschwindigkeit kennt oder plausibel annähert, kann man also die Staubproduktion in Molekülen je Sekunde direkt angeben. Die Abströmgeschwindigkeit ist verbunden mit der Sublimationstemperatur, also der kinetischen Energie der verdampfenden Teilchen. Durch die Verdampfungskühlung wird diese Temperatur auch bei Annäherung an die Sonne weitgehend konstant gehalten. Auch wenn wir diesen Wert nicht genau kennen, führt seine Konstanz zur Folgerung:

Die $A_f\rho$ - r -Kurve zeigt die relativen Veränderungen der Staubeentwicklung bei verschiedenen Sonnenabständen r .

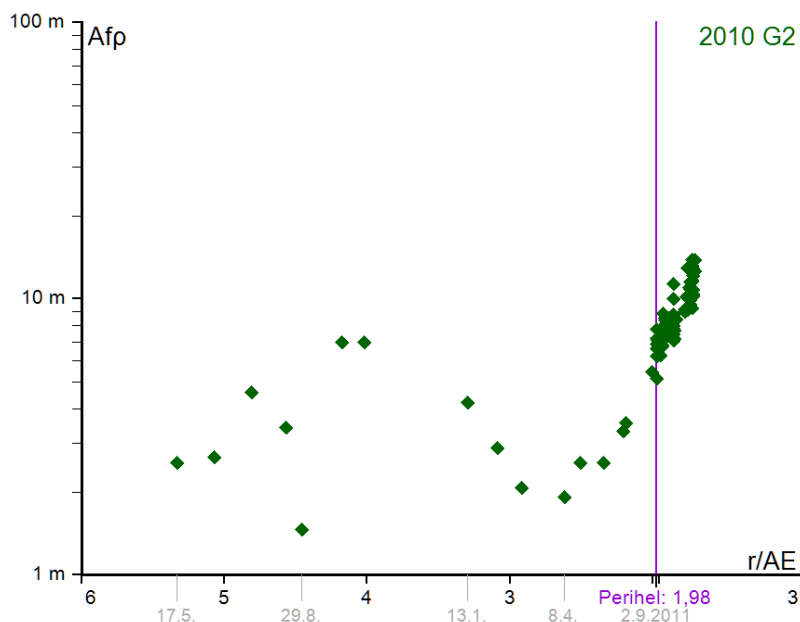


Bild 5: Komet C/2010 G2 (Hill) – Veränderung des $A_f\rho$ -Wertes bei Annäherung und Entfernung von der Sonne

Literatur

- [1] Uwe Pilz, U., Häusler, B., 2xxx. Visuelle und CCD-Photometrie von Kometen: Angleich der Messwerte durch die Multiapertur-Methode. VdS-Journal x/2xxx, xx-xx
- [2] Hübner, W. F., 1965. Über die Gasproduktion der Kometen. Zeitschrift für Astrophysik 63, 22-34
- [3] A'Hearn M. F., Schleicher, D. G., Feldmann, P. D., Millis, R. L., Thompson D. T., 1984. Comet Bowell 1980b. The Astronomical Journal 89, 579-591