Elektromagnetische Strahlung

Eigenschaften

Grundlagen aus dem ersten Semester
05-Astronomische Instrumente (Seite 2 - 3)
07-Eigenschaften der Sterne (Seite 2 - 5)

Während in anderen Wissenschaften eine Vielzahl von Datenquellen herangezogen werden können, ist in der Astronomie nur eine relevant: Elektromagnetische Strahlung. Dadurch, dass im Weltall Vakuum herrscht, können sich neben elektromagnetische Wellen nur Gravitationswellen und Neutrinos bis zu uns ausbreiten. Diese sind jedoch weit schwerer zu detektieren, so dass man fast alle astronomischen Erkenntnisse aus der Untersuchung elektromagnetischer Wellen gewonnen hat.

Um Erkenntnisse aus der elektromagnetischen Strahlung zu gewinnen, ist es zunächst einmal notwendig, ihre grundlegenden Eigenschaften zu betrachten. Dabei kann man die Strahlung laut Welle-Teilchen-Dualismus sowohl als Welle, als auch als Teilchen beschreiben.

Jede Welle lässt sich mathematisch durch eine unendliche Summe von Sinus- und Cosinusfunktionen vollständig darstellen, wobei man mit jedem weiteren Summenglied näher an den tatsächlichen Wert herankommt. Das bedeutet, wenn man diese Funktion kennt, kann man zu jedem beliebigen Zeitpunkt die Höhe der Welle an jeder beliebigen Stelle beliebig genau herausfinden.

Aus den Eigenschaften der Welle kann man auch direkt einige Teilcheneigenschaften berechnen, wie beispielsweise die Photonenmasse oder den Photonenimpuls. Für viele Anwendungen wird gar keine vollständige Beschreibung der Strahlung benötigt und man begnügt sich daher mit der Angabe von ausgewählten Eigenschaften.

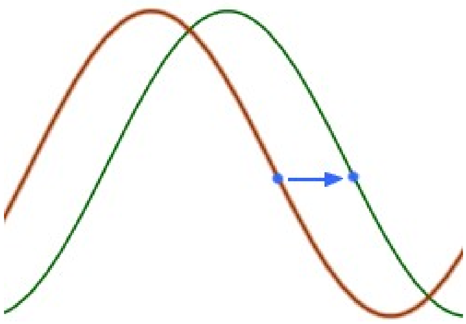
1 Phasen

Man gibt die Höhe der Welle nur an bestimmten Stellen und zu bestimmten Zeitpunkten an. Diese Stellen nennt man Phasen. Historisch wurden die Phasen zuerst für Sinusschwingungen definiert, eine Periodendauer wird also in 2π Teile unterteilt, wobei siuch bei $\frac{\pi}{2}$ die maximale Höhe und bei $\frac{3\pi}{2}$ die minimale Höhe befindet.

Wenn man ganzzahlige Vielfache der Periode zum Ort und/oder ganzzahlige Vielfache der Periodendauer zur Zeit dazurechnet, erhält man für die Phase wieder den gleichen Wert.

2 Ausbreitungsrichtung

Die Ausbreitungsrichtung entspricht der zeitlichen Ableitung der Phase mit konstanter Höhe, also in welcher Richtung sich der Punkt mit der gleichen Höhe innerhalb eines infinidesimal kurzen Zeitintervalls bewegt. Da sich normalerweise nicht die Struktur der Welle verändert, ist diese Größe an jeder Stelle gleich.



Die rote Welle wurde in dieser Graphik nach einem kurzen Zeitintervall zur grünen Welle. Die Ausbreitungsrichtung gibt an, in welche Richtung sich der Punkt mit derselben Höhe bewegt.

Der Betrag der Ausbreitungsrichtung entspricht der Kreiswellenzahl $\frac{2\pi}{\lambda}$. Diese Größe wurde ursprünglich für Kreisschwingungen benutzt, bei denen man wissen wollte, in welchem Zeitintervall ein Bogenmaß zurückgelegt wurde. Analog wurde das dann auch für Orte und Wellen definiert.

3 Polarisation

Die Polarisation gibt die Richtung an, in welche die Wellen im Vergleich zur Ausbreitungsrichtung schwingen. Um die Polarisation anzugeben, muss man sich also den Vektor der Ausbreitungsrichtung und den Vektor zwischen ausgelenktem und unausgelenktem Lichtstrahl ausrechnen. Dann gibt man den Winkel zwischen den beiden Vektoren an.

4 Wellenlänge, Frequenz oder Photonenenergie

Es genügt entweder die Wellenlänge (λ), oder die Frequenz (ν), oder die Photonenenergie (ϵ) einer Welle anzugeben, weil man bei elektromagnetischen Wellen aus einer Angabe alle anderen ausrechnen kann. Dazu genügen die Beziehungen $c = \lambda\nu$ und $\epsilon = h\nu$ die man zu folgenden Formeln umformen kann:

	λ	ν	ϵ
λ		$\frac{c}{\nu}$	$\frac{hc}{\epsilon}$
ν	$\frac{c}{\lambda}$		$\frac{\epsilon}{h}$
ϵ	$\frac{hc}{\lambda}$	$h\nu$	

In diesen Formeln ist h die Planckkonstante (6,6 x 10^{-27}ergs) und c die Lichtgeschwindigkeit (3 x $10^{8}\frac{cm}{s}$).

5 Photonenmasse

Die Formel für die relativistische Massenzunahme lautet

$$M_R = M_D\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \tag{5.1}$$

wobei M_R die Ruhemasse, also die Masse, die das Photon in Ruhe hätte, und M_D die dynamische Masse, also die Masse die das Photon besitzt, während es sich ausbreitet, ist. Da sich die Photonen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, können wir statt v c in die Formel einsetzen und erhalten:

$$M_R = M_D\sqrt{1-1} = 0 \tag{5.2}$$

Das Photon hat also keine Ruhemasse.

Da sich das Photon nie in Ruhe befindet, wird oft auch die dynamische Masse benötigt. Die dynamische Masse kann man mithilfe der Gleichungen

$$E = M_D c^2 \tag{5.3}$$

und

$$E = h\nu \tag{5.4}$$

ausrechnen. Dafür setzt man diese Formeln gleich

$$h\nu = M_D c^2 \tag{5.5}$$

und formt sie nach der dynamischen Masse um. Dann erhält man

$$M_D = \frac{h\nu}{c^2} \tag{5.6}$$

Die dynamische Masse der Photonen ist also nur von der Frequenz der Lichtwelle abhängig.

Die dynamische Masse ist zwar sehr klein, wenn das Licht an einer großen Gravitationsquelle wie einem Stern vorbeiläuft, trägt sie jedoch dennoch zur Ablenkung des Lichts bei.

6 Impuls der Photonen

Die relativistische Formel für den Impuls lautet:

$$p = \frac{vM_R}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{6.1}$$

Wenn man in diese Formel für die Ruhemasse 0 und für die Geschwindigkeit c einsetzen würde, erhielte man

$$p = \frac{0}{0} \tag{6.2}$$

und damit kein sinnvolles Ergebnis. Dieses Problem kann man umgehen, indem man für die Ruhemasse die Formel 5.1. einsetzt. Dann erhält man:

$$p = \frac{vM_D\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tag{6.3}$$

durch kürzen des Bruchs durch die Wurzel erhält man

$$p = vM_D \tag{6.4}$$

Für die Geschwindigkeit des Photons setzt man die Lichtgeschwindigkeit und für die dynamische Masse Formel 5.6. ein. Damit erhält man:

$$p = \frac{h\nu}{c} \tag{6.5}$$

Die Einheit für den Impuls des Lichts wird analog zum Impuls zweier sich abstoßender Ladungen definiert, damit sich einige Formeln vereinfachen. Damit kommt man auf eine Einheit von

$$\sqrt{\frac{erg}{cm^3}} = \sqrt{\frac{g}{cms^2}} \tag{6.6}$$

Diese Größe nennt man Franklin, wenn man von elektromagnetischen Wellen spricht und Gauß wenn man sich auf magnetischen Wellen bezieht. Sie ist nicht mit dem klassischen Impuls vergleichbar, weil in diesen Impuls die dynamische Masse eingeht, während in den klassischen Impuls die Ruhemasse eingeht. Der Impuls der elektrischen und magnetischen Wellen ist immer gleich groß und orthogonal auf die Ausbreitungsrichtung. Der Impulsvektor der elektrischen Welle und der Impulsvektor der magnetischen Welle stehen ebenfalls normal aufeinander.

7 Strahlungsdruck

Der Strahlungsdruck (P_r) ist der Druck, der von der elektromatische Strahlung erzeugt wird. Die allgemeine Formel für den Druck lautet:

$$P_r = \frac{F}{A} \tag{7.1}$$

Um den Druck aus dem Impuls auszurechnen, muss man statt der Kraft die Formel

$$F = \frac{p}{t} \tag{7.2}$$

einsetzen und erhält dadurch

$$P_r = \frac{p}{At} \tag{7.3}$$

Der Impuls der dabei herauskommt ist so minimal, dass wir auf der Erde nichts davon merken, dass Licht uns anstösst. (Der Strahlungsdruck der Sonne ist nur 46μBa groß, das heißt wenn wir einen $1cm^3$ großen Würfel, der 1g wiegt tragen, wirkt auf uns ein 200.000-fach größerer Druck).

Im Weltall kommt es jedoch durchaus vor, dass Teilchen durch den Strahlungsdruck bewegt werden, der Strahlungsdruck hat beispielsweise Auswirkungen auf die Bildung eines Kometenschweifs.

8 Energie

Die elektromagnetische Strahlung besteht sowohl aus elektrischen als auch aus magnetischen Wellen. Somit besitzt sie sowohl elektrische als auch magnetische Energie. Das ist sehr wichtig, weil elektromagnetische Strahlung der einzige Weg ist, wie Energie durch das Weltall zu uns übertragen wird, das heißt ohne elektromagnetische Strahlung, hätten wir auch keine Energie.

Die Energiedichte im Vakuum, also die Energie, die die Strahlung im Vakuum pro Volumselement abgibt, kann man mit der Formel

$$W = \frac{E^2}{4\pi} = \frac{B^2}{4\pi} \tag{8.1}$$

ausrechnen, wobei E den Impuls der elektrischen Wellen, B den Impuls der magnetischen Wellen und W die Energiedichte beschreibt. Der Energiefluss, also die Energie, die die elektromagnetische Strahlung an die Umgebung abgibt, beträgt

$$S = \frac{B^2 ck\lambda}{8\pi^2} = \frac{E^2 ck\lambda}{8\pi^2} \tag{8.2}$$

den Rest der Energie behält sich die elektromagnetische Strahlung, um sie später abzugeben. Außerhalb des Vakuums sind Energiedichte und Energiefluss viel schwerer zu berechnen, weil man dafür die Frequenzen, Polarisationsrichtungen und Wellenamplituden sämtlicher einfallender Wellen wissen müsste.

9 Helligkeit

Eine intuitiv naheliegende Frage, wäre die Frage nach der Helligkeit der Strahlung. Wissenschaftlich lässt sich diese Frage nicht eindeutig beantworten, deshalb gibt es in der Astronomie sehr viele unterschiedliche Größen mit dem Ziel, die Helligkeit anzugeben (siehe nachfolgende Tabelle).

Die erste Frage ist, wie man die Helligkeit einer Strahlung interpretiert (Spalten in der Tabelle). Man kann diese Helligkeit angeben, indem man die Photonen zählt oder indem man die Energie der Strahlung angibt. Da sich die Energie eines Photons mit der Formel $E = h\nu$ berechnet, muss man die Größe mit $h\nu$ multiplizieren, um von der Photoneninterpretation auf die Energieinterpretation zu kommen und durch $h\nu$ dividieren, um wieder zurück zu kommen.

Eine weitere Frage ist, wie sehr man die Helligkeit einschränkt (Zeilen in der Tabelle). Die Einschränkungen werden hier nur anhand der Photoneninterpretation erklären, sie funktioniert jedoch für die Energieinterpretation analog. Räumliche und zeitliche Einschränkung sind auf jeden Fall notwendig, weil sonst immer eine Helligkeit von unendlich herauskommen würde.

Ort: Die räumliche Einschränkung erfolgt dadurch, dass man ein infinidesimales Flächenelement dA angibt, und nur die Photonen zählt, die durch dieses Flächenelement durchgehen. Neben den Koordinaten der Position ist auch die Ausrichtung der Fläche entscheidend. Diese gibt man mit Hilfe eines Normalvektors an.

Zeit: Die zeitliche Einschränkung kann man festlegen, indem man ein infinidesimal kurzes Zeitintervall dt angibt, während dem man die Photonen zählt. Man kann die Zeit aber auch als dritte Ortskoordinate interpretieren: Nach dem infinidesimal kurzen Zeitintervall haben die Photonen ein infinidesimal kurzes Wegintervall zurückgelegt und man hat die Photonen gezählt, die in diesem Wegintervall liegen. Da die Photonen sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, muss man mit dieser multiplizieren, um von der Zeitinterpretation zur Rauminterpretation zu kommen und durch sie dividieren um wieder zurückzukommen

Oft interessiert man sich nur für die Strahlung, die aus einer bestimmten Richtung oder in einer bestimmten Frequenz kommt. In diesen Fällen ist es notwendig, zusätzliche Einschränkungen einzuführen.

Frequenz: Um die Art der Strahlung einzuschränken gibt man normalerweise ein infinidesimal kurzes Frequenzintervall an und zählt nur die Photonen, die in diesem Frequenzintervall auftreffen. Statt dem Frequenzintervall kann man auch ein Wellenlängenintervall angeben. Um von der Frequenzdarstellung zur Wellenlängendarstellung zu kommen, kann man die Formel $\lambda = \frac{c}{\nu}$ verwenden.

Richtung: Da die Strahlung aus drei Dimensionen kommt, genügt es nicht, einen normalen Winkel anzugeben, sondern man benötigt einen Raumwinkel. Ein Raumwinkel ist so wie ein normaler Winkel definiert, nur dass man den in drei Dimensionen, als Kombination von Höhen und Breitenwinkel angibt. Um die Richtung des Raumwinkels zu definieren, gibt man den Cosinus von ϕ, dem Winkel der zwischen Normalvektor und Raumwinkel ist, an. Die Einheit des Raumwinkels „sterad (ster)" ist analog zur Einheit rad ($1m^2$ bei einer Einheitskugel statt 1m auf einem Einheitskreis) definiert.

	Strahlung als Energie		**Strahlung als Photonenanzahl**	
	Zeit als Zeit	**Zeit als Volumen**	**Zeit als Zeit**	**Zeit als Volumen**
Ort, Zeit	Gesamt-strahlungs-strom	Gesamt-energiedichte	Gesamt-photonenstrom	Gesamt-photonendichte
Ort, Zeit, Frequenz	Strahlungs-strom	Strahlungs-dichte	Photonen-strom	Photonen-dichte
Ort, Zeit, Frequenz, Raumwinkel	Strahlungs-intensität			

Um eine Einschränkung zu eliminieren, muss man über diese Integrieren. Möchte man beispielsweise von der Strahlungsintensität auf den Strahlungsstrom kommen, muss man die Strahlungsintensität über alle infinidesimal kleinen Raumwinkelintervalle integrieren.

$$F_\nu = \int_0^{4\pi} I_\nu d\phi \tag{9.1}$$

In die andere Richtung ist das nur eingeschränkt möglich, weil der Strahlungsstrom nichts über die Verteilung der Strahlungsintensität auf die einzelnen Raumwinkel aussagt. Man kann nur mittels Division durch die Anzahl der Raumwinkel die mittlere Strahlungsintensität berechnen.

$$\overline{I_\nu} = \frac{F_\nu}{4\pi} \tag{9.2}$$

Flächenhelligkeit

Die Flächenhelligkeit beschreibt die scheinbare Helligkeit, die ein Objekt pro Flächenelement hat. Sie wird vor allem bei der Messung der Helligkeit von ausgedehnten Objekten verwendet.

Die Flächenhelligkeit hat im Gegensatz zur scheinbaren Helligkeit den Vorteil, dass sie nicht entfernungsabhängig ist: Wenn man sich von einem leuchtenden Objekt entfernt, erscheint es mit zunehmender Entfernung immer kleiner (die Fläche nimmt also ab). Die Strahlungsintensität, die nur in einem infinidesimal kleinen Flächenelement gemessen wird, bleibt jedoch, sofern dazwischen nur Vakuum ist, gleich.

Im Gegensatz zur absoluten Helligkeit wird die Flächenhelligkeit kleiner, wenn ISM im Weg ist. Man kann also die Flächenhelligkeit auch dann angeben, wenn die absolute Helligkeit nicht bekannt ist.