

35 Licht als Träger von Energie

Vertiefung und Kompetenzüberprüfung

Martin Apolin (Stand Februar 2012)

Quantensprung und Photonen

A1 a Schätze ab, wie viele Photonen eine 100 W-Glühlampe pro Sekunde aussendet. Schätze ab, wie viele Photonen die Sonne pro Sekunde aussendet ($P \approx 10^{26}$ W). Verwende dazu die Gleichung $E = h \cdot f$ und Tabelle 1.

	relative Photonenenergie	Wellenlänge in 10^{-7} m	Frequenz 10^{14} Hz
rot	1–1,2	6,5–7,5	4,0–4,6
grün	1,3–1,5	4,9–5,8	5,2–6,1
blau	1,5–1,8	4,2–4,9	6,1–7,1
UV-A	1,9–2,3	3,2–4,0	7,5–9,38
UV-B	2,3–2,7	2,8–3,2	9,38–10,7

Tab.1: Relative Photonenenergie von sichtbarem und ultraviolettem Licht (die niedrigste Energie von roten Photonen wurde mit 1 angenommen). (siehe auch Tab. 30.1, S. 31)

A1 b Berechne die Anzahl der Photonen, die die Sonne im Laufe ihres Lebens abstrahlt. Nimm dazu vereinfacht nur die Zeit an, die sich die Sonne auf der Hauptreihe im Hertzsprung-Russell-Diagramm befindet (siehe Kap. 49.2, BB8 und Tab. 2).

Phase	Dauer in 10^6 a	Dauer in %	relative Leuchtkraft	relativer Radius
Hauptreihenstern (2)	11.000	88,49	0,7–2,2	0,9–1,6
Übergangsphase (3)	700	5,63	2,3	1,6–2,3
Roter Riese (4)	600	4,83	2,3–2300	2,3–166
Beginn des He-Brennens (5)	130	1,04	44–2000	10–130
instabile Phase (6)	0,4	0,003	500–5000	50–200
Übergang zu Weißem Zwerg (7)	0,1	0,001	3500–0,1	100–0,08
Summe	12.430	100		

Tab. 2: Die Phasen der Sonne. Die relativen Werte sind auf die heutige Sonne bezogen (siehe auch Tab. 48.2, S. 94, BB8).

A2 a Was versteht man unter einem Elektronvolt?

A2 b Welche Spannung herrscht zwischen dem Proton und dem Elektron in einem Wasserstoffatom? Hilf dir mit Abb. 1 und mit A2 a.



Abb. 1: a) Das Elektron des Wasserstoffs befindet sich als „Wolke“ um das Proton. b) Das Elektron wird vom Atomkern abgelöst. Dazu braucht man 13,6 eV (Grafik. Janosch Slama; siehe auch Abb. 35.5, S. 79).

A3 Auf der Esoterik-Seite <http://www.seelencoaching2012.de> findet sich folgendes Zitat:

„Die neuen Naturwissenschaften unterstreichen diese immer deutlicher sichtbar werdende Entwicklung, bei der der Mensch nicht nur in die Evolutionsspirale eingebunden, sondern in der Lage ist, durch die Überschneidung vielfältigster Situationen und Ereignisse einen evolutionären Quantensprung vollziehen zu können.“

Kommentiere dieses Zitat!

A4 Photonen transportieren jene Energie, die beim „Sprung“ eines Elektrons auf ein tieferes Energieniveau frei wird. Licht ist also der Transport von Energie! Je größer diese abgegebene Energie ist, desto größer ist die Frequenz des Photons.

Licht hat eine Wellenlänge von etwa 400 bis 750 nm. In welchem Bereich muss die Differenz der Energieniveaus liegen, damit bei einem Quantensprung ein sichtbares Photon emittiert wird? Verwende dazu die Gleichung $c = f \cdot \lambda$ und rechne das Ergebnis in eV um (siehe A2a).

A5 a Berechne die Geschwindigkeit, die ein Elektron im Rahmen des Bohr'schen Atommodells im „Orbit“ haben müsste. Gehe dazu von der Zentripetalkraft $F_{ZP} = \frac{mv^2}{r}$ (siehe Kap. 11.6, BB5) und der Coulombkraft $F_E = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$ (Kap. 23.1.3, BB6) aus. Der Bohr-Radius für ein Wasserstoffatom beträgt $0,53 \cdot 10^{-10}$ m, die Ladung der Elektronen und Protonen beträgt $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, die Masse des Elektrons rund 10^{-30} kg und k ist etwa $9 \cdot 10^9$ Nm²/C².

A5 b Wie groß ist die Kreisfrequenz des Elektrons in der „Umlaufbahn“ um den Kern? Verwende das Ergebnis aus A3 a. Es gilt $v = \omega \cdot r = \frac{2\pi}{T} r = 2\pi f r$. Vergleiche das Ergebnis mit der Frequenz von Licht (Tab. 1). Was kann man daraus folgern bzw. nicht folgern?

A6 Gibt es physikalisch gesehen eigentlich „Farben“? Wo „entstehen“ diese?

A7 Man kann alle Teilchen dieses Universums anhand ihres Spins in zwei Gruppen einteilen: solche mit halbzahligem Spin, die Fermionen, und solche mit ganzzahligem Spin, die Bosonen (Tab. 3). Was würde mit Licht passieren, wenn Photonen ebenfalls Fermionen wären (natürlich kann das niemals passieren)?

Fermionen	Bosonen
Für diese gilt das Pauli-Verbot. Sie sind nach dem italienischen Physiker ENRICO FERMI benannt.	Für diese gilt das Pauli-Verbot nicht. Sie sind nach dem indischen Physiker SATYENDRA NATH BOSE benannt.
Elektron, Spin 1/2 Proton, Spin 1/2 Neutron, Spin 1/2	Photon, Spin 1

Tabelle 3: Die prominentesten Fermionen und Bosonen.

A8 Welche Masse haben eigentlich Photonen? Verwende für deine Berechnung die Gleichungen $E = mc^2$ und $E = hf$ sowie Tabelle 4. Vergleiche die Masse der Photonen mit der von Elektronen ($\approx 10^{-30}$ kg).

	relative Photonenenergie	Wellenlänge in 10^{-7} m	Frequenz 10^{14} Hz
rot	1–1,2	6,5–7,5	4,0–4,6
grün	1,3–1,5	4,9–5,8	5,2–6,1
blau	1,5–1,8	4,2–4,9	6,1–7,1
UV-A	1,9–2,3	3,2–4,0	7,5–9,38
UV-B	2,3–2,7	2,8–3,2	9,38–10,7

Tabelle 4: Relative Photonenenergie von sichtbarem und ultraviolettem Licht (die niedrigste Energie von roten Photonen wurde mit 1 angenommen; siehe auch Tab. 30.1, S. 31).



Abb. 2: Was passiert mit den Photonen? (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 43.14, S. 42, BB8)

A9 Du weißt, was mit normalen Objekten in der Schwerkraft passiert! Wenn man sie nach oben wirft, dann verlieren sie an kinetischer Energie, werden langsamer und fallen zurück. Was passiert mit Photonen, die im Schwerfeld der Erde aufsteigen (Abb. 2)? Fallen sie zurück? Was passiert

umgekehrt, wenn du Photonen „auf die Erde fallen lässt“? Können Sie die Lichtgeschwindigkeit überschreiten? Oder verändern sie sich in anderer Weise?

A10 a Quantensprünge erfolgen nicht in Nullzeit, sondern dauern etwa 10^{-8} s. Die überlagerte Wahrscheinlichkeitswelle schwingt mit jener Frequenz, die dann auch das Photon besitzt (siehe Abb. 3). Wie genau kann die Frequenz des Photons bestimmt werden? Verwende dazu die Gleichungen $\Delta E \cdot \Delta t \approx h/13$ und $E = h \cdot f$.

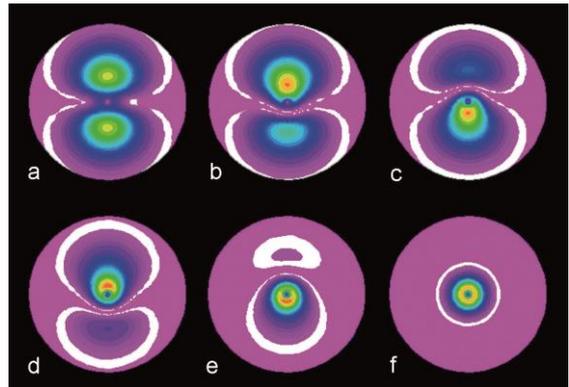


Abb.3: Änderung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons, das vom angeregten Zustand 2p (a) wieder auf den Grundzustand 1s (f) „zurückschwingt“. Hier sind zwei Schwingungen dargestellt (b bis e). Tatsächlich dauert der Übergang einige Millionen Schwingungen lang (Grafik © Michael Komma; Quelle: <http://www.mikomma.de>).

A10 b Wie lange ist der Wellenzug, der dabei ausgesendet wird? Wie lang ist daher, salopp gesagt, das Photon?

Arten von Spektren

A11 In Abb. 4 siehst du oben das Absorptionsspektrum der Sonne und unten das eines Supergalaxienhaufens (BAS11), der sich in großer Entfernung zur Erde befindet. Was fällt auf und wie könnte man diesen Effekt erklären?

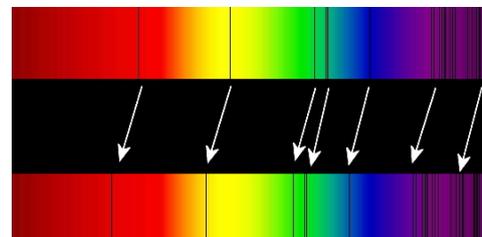


Abb. 4: Spektrum der Sonne (oben) und eines Supergalaxienhaufens (Grafik: Georg Wiora ; Quelle: Wikipedia).

A12 Ein Blauer Riese (Abb. 5) hat eine typische Oberflächentemperatur von etwa 10.000 K. Eine blaue Reklameleuchte (Abb. 6) hat natürlich nicht diese Temperatur, weil

sonst das Glas schmelzen würde. Warum ist das aber so? Worin liegt der Unterschied in den beiden Spektren?

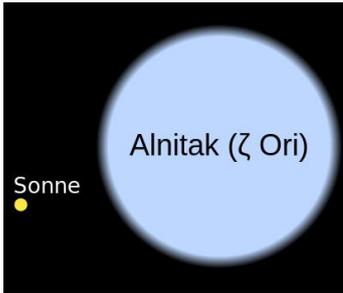


Abb. 5: Ein Blauer Riese ist ein heißer, großer Stern. Ein Beispiel ist Alnitak (oder Zeta Orionis), der östlichste Gürtelsterns im Orion, (Grafik: CWitte; Quelle: Wikipedia).



Abb. 6: (Foto: Norbert Kaiser; Quelle: Wikipedia).

A13 Abb. 7 zeigt das Spektrum einer herkömmlichen (und inzwischen bereits verbotenen) 60 W-Glühbirne und einer Energiesparlampe mit 11 W. Welches Spektrum gehört zu welcher Lampe? Begründe!

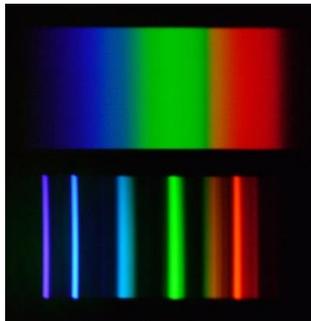


Abb. 7 (Quelle: Wikipedia)

A14 Linienspektren entstehen dadurch, dass die Elektronen in den Orbitalen nur bestimmte Energieniveaus einnehmen können. Dazu gibt es auch Analogiebeispiele, etwa aus der Mechanik. Überlege dir, welche drei „Energistufen“ eine liegende Streichholzschachtel einnehmen kann. Welches Niveau entspricht dem Grundzustand?

A15 Versuche qualitativ und möglichst einfach zu begründen, warum Gase mit höherer Ordnungszahl mehr Linien in ihrem Spektrum besitzen (siehe Abb. 8).

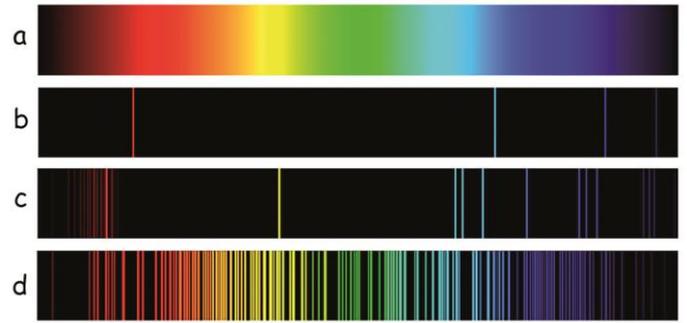


Abb. 8: a) Spektrum des weißen Lichts, das alle Farben beinhaltet; weiteres Spektren von b) Wasserstoff, c) Helium und d) Neon.

A16 In Abb. 9 siehst du das Spektrum einer Nieder- und einer Hochdruck-Natriumdampf Lampe. Was ist der Unterschied und wie kommt er zu Stande?

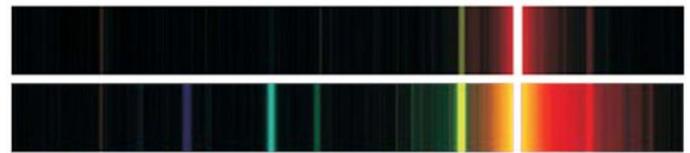


Abb. 9: Spektrum einer Niederdruck- (oben) und einer Hochdruck-Natriumdampf Lampe (unten; Grafik: Martin Apolin).

Metastabilität, Laser und Anwendungen

A17 Welche Formen der Stabilität kann man unterscheiden? Welcher Zusammenhang besteht zwischen der potentiellen Energie und der Form der Stabilität? Hilf dir mit Abb. 10!

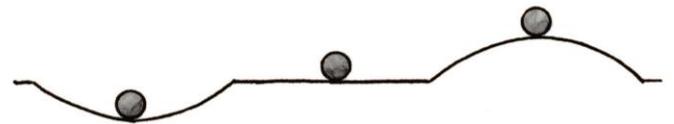


Abb. 10: Formen der Stabilität (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 4.16, S. 29, BB5).

A18 Wie könnte man die Lagen der Kugeln in Abb. 11a und b im Vergleich mit c bezeichnen?

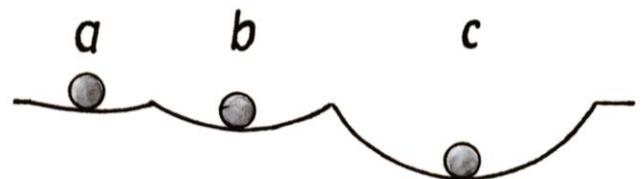


Abb. 11 zu A18 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 4.18, S. 29, BB5).

A19 Das „System Sauerstoff und Holz“ ist bei niedrigen Temperaturen ein metastabiles System. Was könnte damit gemeint sein? Überlege, ob das „System Sauerstoff und Holz“ oder das „System Asche und CO_2 “ einen energetisch stabileren Zustand darstellt und beziehe Abb. 11 in deine Antwort mit ein.

A20 Wenn man das Licht eines Lasers an die Wand wirft, dann sieht man dort ein Muster aus hellen und dunklen Punkten (Abb. 12). Man nennt diesen Effekt Lichtgranulation oder Speckle. Wie könnte dieses Muster zu Stande kommen?

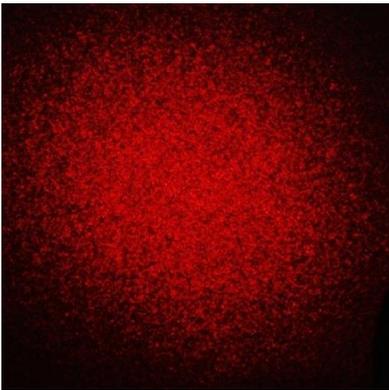


Abb. 12: Die Speckles eines Laserpointers an einer Wand (Quelle: Wikipedia).

A21 Du weißt aus dem Alltag, dass das Licht, das von zwei Lampen ausgeht, keine sichtbare Interferenz erzeugt. Aber warum? Müsstest nicht durch konstruktive und destruktive Interferenz irgendwo helle und dunkle Streifen entstehen?!



Abb. 13 (Grafik: Janosch Slama)

A22 a In Abb. 14 siehst du das Energieniveauschema eines CO_2 -Lasers. Er funktioniert ähnlich wie ein Helium-Neon-Laser. Die Stickstoffmoleküle werden durch Glimmentladung zu Schwingungen angeregt und geben ihre Energie durch Stöße an die CO_2 -Moleküle weiter. Schätze an Hand der Abbildung den maximalen Wirkungsgrad dieses Lasers ab.

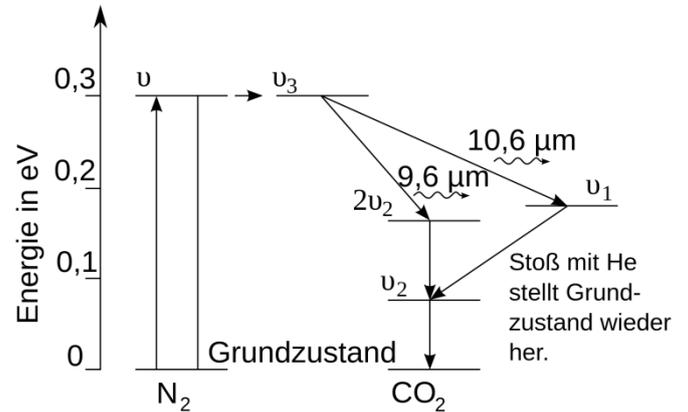


Abb. 14: Energieniveauschema eines CO_2 -Lasers (Quelle: Wikipedia).

A22 b Gibt ein CO_2 -Laser sichtbares Licht ab oder nicht? Verwende für deine Antwort Abb. 14 und das Ergebnis zu A4.

Hilfe zu A1 a: Um die ausgesendeten Photonen pro Sekunde zu berechnen, nehmen wir vereinfacht an, dass alles Photonen im mittleren Frequenzbereich um $5,5 \cdot 10^{14}$ Hz liegen. Ein einzelnes Photon hat daher die Energie $E = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 5,5 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1} = 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Es gilt $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$. Eine Glühbirne mit 100 W strahlt daher pro Sekunde 100 J ab. Wie viele Photonen benötigt man für 100 J? $100 \text{ J} / (3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J pro Photon}) \approx 3 \cdot 10^{20}$ Photonen. Und diese Menge an Photonen wird daher von der Glühbirne pro Sekunde abgestrahlt. Für die Sonne ergeben sich sagenhafte $10^{26} \text{ J} / (3,6 \cdot 10^{-19} \text{ J pro Photon}) \approx 3 \cdot 10^{44}$ Photonen pro Sekunde.

Hilfe zu A1 b: Die Sonne befindet sich etwa 11 Milliarden Jahre auf der Hauptreihe. Das entspricht $11 \cdot 10^9 \cdot 86400 \cdot 365 \text{ s} \approx 3,5 \cdot 10^{17} \text{ s}$. In Summe strahlt sie daher in dieser Zeit $3,5 \cdot 10^{17} \text{ s} \cdot 3 \cdot 10^{44} \text{ Photonen/s} \approx 10^{62}$ Photonen aus.

Hilfe zu A2 a: Darunter versteht man die potenzielle Energie eines einzigen Elektrons, wenn dieses im Spannungsfeld von 1 V verschoben wird. Seine Energie beträgt dann $E_p = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$.

Hilfe zu A2 b: Man kann ohne Rechnung überlegen. 1 eV ist die Energie, die nötig ist, um 1 Elektron im Spannungsfeld von 1 V zu verschieben. Wenn für die Ablösung des Elektrons 13,6 eV notwendig sind, muss das Spannungsfeld auch 13,6 V betragen.

Oder rechnerisch: Zum Ablösen des Elektrons ist eine Energie von 13,6 eV notwendig. Aus $E_p = Q \cdot U$ folgt daher $U = E_p / Q = 13,6 \text{ eV} / 1 \text{ e} = 13,6 \text{ V}$.

Hilfe zu A3: Was immer damit auch gemeint sein soll, der Begriff „Quantensprung“ ist auf jeden Fall falsch verwendet, nämlich für einen großen oder ungewöhnlichen Fortschritt, eine neue Stufe einer Entwicklung. In der Physik bezeichnet man als Quantensprung die Änderung des Energieniveaus eines Quants, also etwas extrem Winziges.

Hilfe zu A4: Es gilt $\Delta E = h \cdot f$. Andererseits gilt $c = f \cdot \lambda$ und daher $f = c / \lambda$. Daraus folgt $\Delta E = hc / \lambda$. Wenn man nun die Wellenlängen an den Grenzen des sichtbaren Bereichs einsetzt, erhält man rund $5 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ bzw. $2,7 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Ein eV entspricht $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Man kann daher generell die Photonen von Quantensprüngen sehen, bei denen die Differenz der Energieniveaus zwischen etwa 1,6 und 3,1 eV liegt.

Hilfe zu A5 a: Die benötigte Zentripetalkraft für die Kreisbahn wird durch die Coulombkraft erzeugt. Daher kann man diese beiden Kräfte gleichsetzen und nach v auflösen:

$$\frac{mv^2}{r} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{k Q_1 Q_2}{mr}}$$
 Durch Einsetzen der bekannten Werte erhält man $v = \sqrt{\frac{k Q_1 Q_2}{mr}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 \text{ m}}{10^{-30} \cdot 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ s}}} = 2,1 \cdot 10^6 \text{ m/s}$. Das ist zwar absolut gesehen sehr hoch, beträgt aber doch weniger als 1 % der Lichtgeschwindigkeit.

Hilfe zu A5 b: Aus $v = 2\pi f r$ folgt $f = \frac{v}{2\pi r} = \frac{2,1 \cdot 10^6}{2\pi \cdot 0,53 \cdot 10^{-10}} \text{ s}^{-1} \approx 6,8 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$. Das liegt rund eine Größenordnung über der tatsächlichen Frequenz von Licht, ist aber reiner Zufall, weil ja die Lichtfrequenz nicht von der Kreisfrequenz des Elektrons abhängt, sondern ausschließlich von $f = \Delta E / h$ beim Quantensprung.

Hilfe zu A6: Die Eigenschaft der Photonen, die die Farben verursacht, ist ihre Energie (bzw. mit $E = hf$ ihre Frequenz). Die Farben selbst entstehen im Gehirn. Dort wird die unterschiedliche Energie der Photonen in einen Farbindruck übersetzt. Im Prinzip kannst du dadurch die Energie der Photonen sehen. Rot entspricht Photonen mit niedrigerer Energie, blau solchen mit höherer Energie.

Hilfe zu A7: In diesem Fall könnten sich nicht beliebig viele Photonen an einer Stelle aufhalten. Licht könnte daher nicht beliebig hell sein. Auch ein Laser wäre unmöglich: Das wichtigste Merkmal eines Lasers ist ja, dass alle Photonen

exakt dieselbe Energie (also dieselbe Wellenlänge bzw. dieselbe Farbe) haben. Auch einfarbiges Licht wäre nicht möglich, eben weil keine zwei Photonen dieselbe Energie, also dieselbe Farbe aufweisen dürften. Sich kreuzende Lichtstrahlen würden quasi voneinander abprallen. Dann wäre man der Möglichkeit ein Lichtschwert zu bauen ein Stückchen näher gerückt.

Hilfe zu A8: Durch Gleichsetzen und Umformen der beiden Gleichungen erhältst du $m = hf/c^2$. Die Masse eines Photons ist also proportional zu seiner Frequenz. Wenn du aus Tabelle 4 die niedrigste Frequenz der roten und die höchste Frequenz der blauen Photonen einsetzt, erhältst du $2,9 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$ und $5,2 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$. Elektronen sind mit rund 10^{-30} kg einige hunderttausendmal schwerer.

Hilfe zu A9: Photonen haben auf Grund ihrer Energie über $E = mc^2$ eine Masse. Daher muss die Schwerkraft auf sie wirken. Ein Photon, das im Schwerfeld der Erde aufsteigt, muss somit Energie verlieren. Es kann zwar nicht langsamer werden, aber es vermindert sich seine Frequenz, denn es gilt auch $E = h \cdot f$ (Abb. 15). Das Aufsteigen eines Photons im Gravitationsfeld führt zu einer gravitativen Rotverschiebung. Wenn ein Photon nach unten geschickt wird, dann gewinnt es dabei an Energie, und die Frequenz erhöht sich. Das „Fallen“ eines Photons im Gravitationsfeld führt zu einer gravitativen Blauverschiebung.

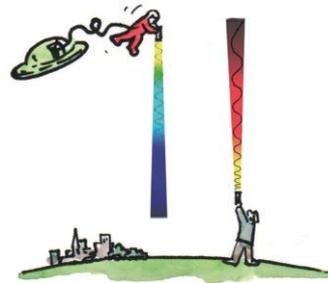


Abb. 15: Beim Aufsteigen im Gravitationsfeld verlieren Photonen an Frequenz. Es kommt zur Rotverschiebung. Beim Absteigen kommt es zur Blauverschiebung. Der Effekt ist übertrieben dargestellt (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 43.15, S. 42, BB8).

Hilfe zu A10 a: Aus $E = h \cdot f$ folgt $\Delta E = h \cdot \Delta f$. Außerdem folgt aus $\Delta E \cdot \Delta t \approx h / 13$ wiederum $\Delta E \approx h / (13 \cdot \Delta t)$. Durch Gleichsetzen und Umformen erhält man $\Delta f \approx 1 / (13 \cdot \Delta t)$. Wenn man Δt mit 10^{-8} s annimmt, ergibt sich für Δf etwa 10^7 s^{-1} . Weil die Frequenz selbst aber bei mindestens 10^{14} s^{-1} liegt, fällt diese Ungenauigkeit nicht ins Gewicht.

Hilfe zu A10 b: Die Lichtgeschwindigkeit c beträgt $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Daher gilt $s = c \cdot t = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 10^{-8} \text{ s} = 3 \text{ m}$. Dieser 3 m lange Wellenzug entspricht dem Photon.

Hilfe zu A11: Man sieht, dass die Absorptionslinien im Spektrum des Galaxienhaufens nach links, also in den roten

Bereich verschoben sind. Man spricht daher von Rotverschiebung. Diese kann durch die Entfernung eines Objekts ausgelöst werden (Doppler-Rotverschiebung; siehe z.B. Kap. 20.3, BB6) oder durch die Ausdehnung des Raums (kosmologische Rotverschiebung; siehe Kap. 42.1, BB8). In diesem Fall handelt es sich um den zweiten Effekt, der daher einen Rückschluss auf die Ausdehnung des Universums gibt.

Hilfe zu A12: Sterne sind beinahe perfekte Schwarze Strahler. Ihr Spektrum kommt praktisch ausschließlich durch ihre Temperatur zu Stande, und sie erzeugen kontinuierliche Spektren. Leuchtstoffröhren hingegen erzeugen Linienspektren. Diese sind keine Folge ihrer Temperatur, sondern beruhen einfach auf den möglichen Quantensprüngen innerhalb der Atome. Deshalb können sie, auch wenn sie kühl sind, blau leuchten.

Hilfe zu A13: Im Glühdraht einer Lampe kommt es durch die dichte Packung der Atome zur gegenseitigen Beeinflussung der Orbitale. Deshalb erzeugt eine Glühbirne ein kontinuierliches Spektrum (Abb. 7 oben). Leuchtende Gase erzeugen aber Linienspektren (Abb. 7 unten).

Hilfe zu A14: Ein Beispiel für ein mechanisches System, das drei Energiestufen einnehmen kann ist ein auf dem Boden liegender Quader, in diesem Fall eine Zündholzschachtel.



Abb. 16: Modell für ein System mit drei Energiestufen: links: Grundzustand; Mitte: erster Anregungszustand; rechts: zweiter Anregungszustand (Foto: Martin Apolin).

Aus den Anregungszuständen kann die Schachtel umfallen und dabei Energie abgeben (man kann das Umfallen hören). Aus dem ersten Anregungszustand kann es in den Grundzustand umfallen, aus dem zweiten Anregungszustand kann es in den ersten Anregungszustand oder den Grundzustand zurückfallen.

Hilfe zu A15: Je höher die Ordnungszahl, desto mehr Protonen im Kern, desto stärker werden die Elektronen an den Kern gezogen. Dadurch schieben sich die Energieniveaus der Orbitale zusammen. Außerdem haben höhere Elemente wesentlich mehr Elektronen, für die die Anregungsener-

gie gerade „passt“. Beide Effekte erhöhen die Anzahl und die Dichte der Linien.

Hilfe zu A16: Dünne Gase erzeugen Linienspektren. Wenn man den Druck erhöht, dann beeinflussen einander die einzelnen Atome und somit auch die Energieniveaus in den Orbitalen. Die Linien beginnen auseinander zu fließen. Unter extrem hohem Druck, wie er zum Beispiel in Sternen herrscht, sind die Linien so verbreitert, dass ein kontinuierliches Spektrum entsteht.

Hilfe zu A17:

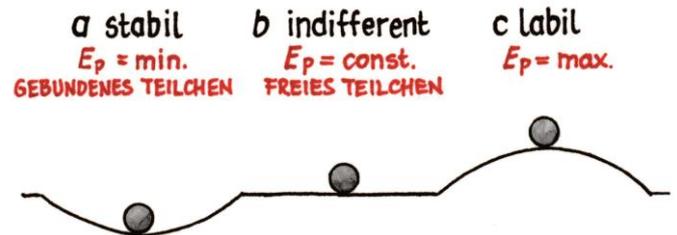


Abb. 17: Formen der Stabilität (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 4.16, S. 29, BB5).

Hilfe zu A18: Stabil ist nicht gleich stabil! Die Kugeln in der Abbildung sind alle im stabilen Gleichgewicht. Aber es ist offensichtlich, dass die linke Kugel am stabilsten ruht. Warum? Weil am meisten Energie notwendig ist, um sie aus der Grube rauszukriegen. Deshalb ist es manchmal so, dass ein System ziemlich lange Zeit stabil sein kann und dann auf einmal eine noch stabilere Lage einnimmt. Es war vorher nur zwischenstabil, oder, wie man das in der Physik nennt, metastabil.

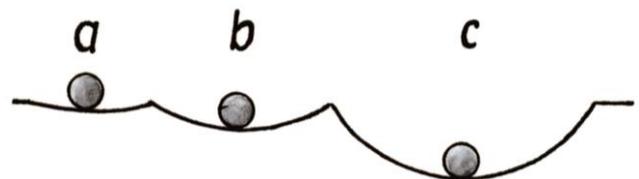


Abb. 18 zu A18 (Grafik: Janosch Slama; siehe auch Abb. 4.18, S. 29, BB5).

Hilfe zu A19: Aus thermodynamischer Sicht würde das spontane Verbrennen des darin chemisch gebundenen Kohlenstoffs mit dem Sauerstoff zu CO_2 zu einem stabileren Zustand führen. Ohne Aktivierung, also eine ausreichend große Energiezufuhr wie das Entzünden des Holzes, wird dies aber nicht passieren. Das unverbrannte Holz plus Sauerstoff entsprechen dabei der Kugel an Position 1. Durch Aktivierung (Hitze; 2) geht das Holz in den verbrannten Zustand über (3), und es entsteht Asche und CO_2 . Dieser Zustand ist energetisch günstiger. Deshalb befindet sich

das „System Sauerstoff und Holz“ im metastabilen Zustand – der aber Gott sein Dank doch sehr stabil ist und nie von selbst in den noch stabileren Zustand übergehen kann.

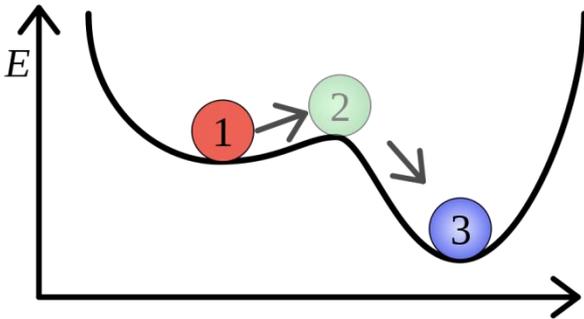


Abb. 19 (Grafik: Georg Wiora; Quelle: Wikipedia)

Hilfe zu A20: Plausibel wird die Speckle-Entstehung, wenn man die Unebenheiten der beleuchteten Oberfläche als neue Streuzentren betrachtet. Von diesen gehen Kugelwellen unterschiedlicher Phase aus, die dann auf der Netzhaut interferieren. Dabei entsteht eine räumliche Struktur mit zufällig verteilten Intensitätsminima und -maxima. Die Voraussetzung für das Auftreten von Speckle-Mustern ist, dass die Oberfläche Rauheiten in der Größenordnung der Wellenlänge des Laser-Lichts aufweist (bei sichtbarem Licht: einige 100 nm). Bei extrem glatten Flächen tritt das Speckle-Muster daher nicht oder kaum auf.

Hilfe zu A21: Damit an einer bestimmten Stelle zum Beispiel immer ein heller Streifen entsteht, müssen dort die Lichtwellen der beiden Lampen *immer* konstruktiv (oder bei einem dunklen Streifen *immer* destruktiv) interferieren. Wenn wir die Polarisation einmal außer Acht lassen, ist das nur möglich, wenn die ankommenden Wellenzüge zu jeder Zeit dieselbe Wellenlänge und Phase haben, also dieselbe Lage von Bergen und Tälern. Dazu braucht man aber kohärentes Licht, das allerdings von einer normalen Lampe nicht ausgestrahlt wird.

Mit zwei Lasern könnte man den in Abb. 13 dargestellten Effekt tatsächlich erzeugen. Allerdings würden die hellen und dunklen Streifen so nahe beieinander liegen, dass man sie mit freiem Auge trotzdem nicht sehen kann.

Hilfe zu A22 a: Die Energie, die man in die N_2 -Moleküle investieren muss, liegt bei etwa 0,3 eV. Beim Vorgang, bei dem das Laserlicht entsteht, verlieren die Elektronen maximal 0,14 eV (sie springen von 0,3 eV auf etwa 0,16 eV zurück). Der Wirkungsgrad beträgt daher $0,14 \text{ eV} / 0,3 \text{ eV} \approx 0,47$ oder knapp 50 %. Tatsächlich ist der Wirkungsgrad

kleiner, da nicht jeder Elektronenstoß mit einem Stickstoffmolekül zu einer Anregung führt. Außerdem gibt nicht jedes angeregte Stickstoffmolekül seine Anregungsenergie an ein CO_2 -Molekül ab.

Hilfe zu A22 b: Man kann generell die Photonen von Quantensprüngen sehen, bei denen die Energieniveaus eine Differenz zwischen etwa 1,7 und 3,1 eV aufweisen (siehe A4). Die Energiedifferenz bei einem CO_2 -Laser liegt aber im Bereich von etwa 0,14 eV. Daher sendet dieser Laser IR-Licht aus.