

# Abiturprüfung 2021

## PHYSIK

**Arbeitszeit: 180 Minuten**

Der Fachausschuss wählt

**eine** Aufgabe aus der Aufgabengruppe Ph 11  
und **eine** aus der Aufgabengruppe Ph 12

oder

**eine** Aufgabe aus der Aufgabengruppe Ph 11  
und **eine** aus der Aufgabengruppe Ph 12-Astrophysik

zur Bearbeitung aus.

**Die Angabe ist vom Prüfling mit dem  
Namen zu versehen und mit abzugeben.**

**Name:** \_\_\_\_\_

## 1. Experiment von Bucherer

Mit der abgebildeten evakuierten Anordnung (Abb. 1) wird die Ablenkung von Elektronen in einem homogenen Magnetfeld der Flussdichte  $\vec{B}$  untersucht. In einem Plattenkondensator mit dem Plattenabstand 0,25 mm befindet sich ein radioaktives Präparat P als Elektronenquelle.

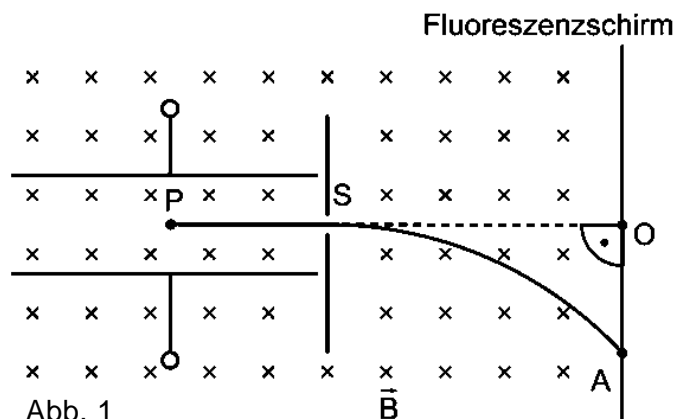


Abb. 1

Eine am Kondensator anliegende Spannung erzeugt ein näherungsweise homogenes und auf das Innere des Kondensators beschränktes elektrisches Feld. Durch den Spalt S verlassen Elektronen den Kondensator parallel zu den Platten.

- 4 a) Beschreiben Sie eine Möglichkeit, ein homogenes Magnetfeld veränderbarer Flussdichte zu erzeugen.
- 7 b) Berechnen Sie die an den Kondensatorplatten anliegende Spannung, wenn die elektrische Feldstärke  $E = 25 \text{ kV/m}$  beträgt. Weisen Sie nach, dass für die Geschwindigkeit  $v$  der durch den Spalt austretenden Elektronen gilt:  $v = \frac{E}{B}$ .

Zeichnen Sie außerdem in Abb. 1 die Polung der Platten ein.

Nachdem die Elektronen den Plattenkondensator verlassen haben, durchlaufen sie einen Kreisbogen mit Radius  $r$  und treffen im Punkt A auf einen Fluoreszenzschirm.

- 2 c) Der Radius  $r$  kann nicht direkt gemessen werden. Geben Sie mithilfe von Abb. 2 eine Gleichung an, mit der man aus den beiden Messgrößen  $\ell$  und  $x$  den Radius  $r$  der Kreisbahn bestimmen kann.

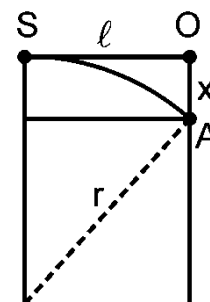


Abb. 2

- 5 d) Zeigen Sie, dass für die Masse der Elektronen  $m = \frac{e \cdot B^2 \cdot r}{E}$  gilt.

Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse einer Messreihe:

Messung	E in kV/m	B in mT	r in cm	v in m/s
1	25	1,8	4,4	
2	40	2,9	2,7	
3	520	3,4	30	
4	970	3,6	98	$2,7 \cdot 10^8$

- 3 e) Berechnen Sie die sich aus Messung 1 ergebende Masse der Elektronen und vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Literaturwert für die Ruhemasse.
- 4 f) Ergänzen Sie in der Tabelle die fehlenden Werte für die Geschwindigkeit. Begründen Sie nur mit Hilfe dieser Werte, dass man im Rahmen der Messgenauigkeit aus den ersten beiden Messungen den gleichen Wert für die Masse der Elektronen erhalten muss.

- 6 g) Überprüfen Sie durch eine Rechnung den in Messung 4 für den Radius ermittelten Wert. Begründen Sie, dass dafür eine relativistische Betrachtung erforderlich ist.
- 9 h) Die in Abb. 3 gezeichneten Diagramme stellen jeweils die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Größen Masse, Impuls bzw. kinetische Energie eines Elektrons nach klassischer Vorstellung dar. Ordnen Sie die drei Größen den Diagrammen ①, ② und ③ begründet zu. Skizzieren Sie anschließend in Abb. 3 qualitativ die drei Diagramme, wie sie sich gemäß der Relativitätstheorie ergeben.

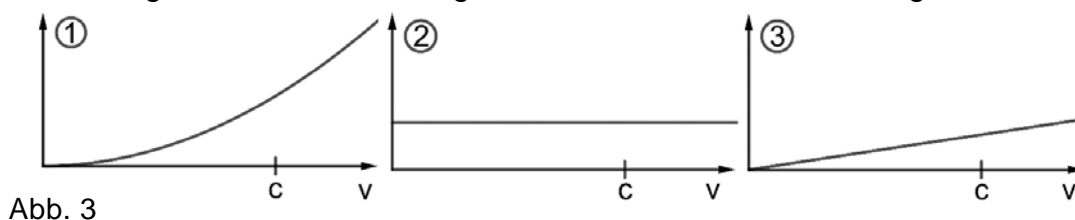


Abb. 3

## 2. Lawinenverschütteten-Suchgerät (LVS-Gerät)

LVS-Geräte dienen zur Ortung von in Lawinen verschütteten Personen. Sie besitzen zwei Betriebsarten, den Sende- und den Empfangsmodus. Das Gerät S des Verschütteten befindet sich im Sendemodus. Mit Hilfe einer Spule, die um einen Eisenkern gewickelt ist, wird ein magnetisches Wechselfeld mit einer Frequenz von 457 kHz erzeugt. Abb. 4 zeigt eine Momentaufnahme des Feldlinienbildes. Die Retter betreiben ihre LVS-Geräte  $E_1$  und  $E_2$  im Empfangsmodus, bei dem an den Anschlüssen der jeweiligen Spulen eine Wechselspannung gemessen werden kann.

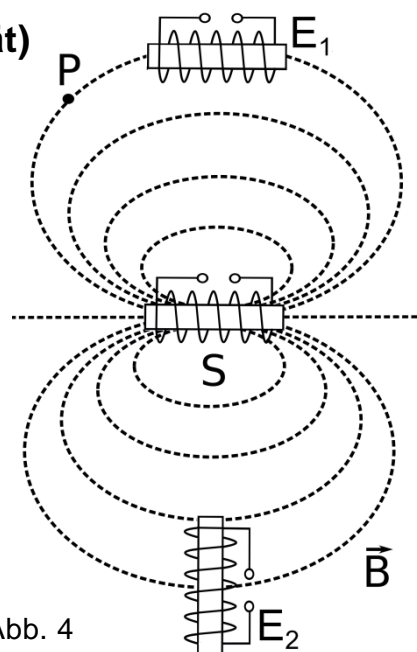


Abb. 4

- 4 a) Im Sendebetrieb wird das Gerät im Abstand von einer Sekunde für jeweils 70 ms betrieben. Bestimmen Sie die Anzahl der Umpolungen des Magnetfeldes innerhalb eines Pulses.
- 5 b) Erläutern Sie die Entstehung der Wechselspannung an den Spulenanschlüssen im Empfänger  $E_1$  und gehen Sie dabei auf die Funktion des Eisenkerns ein.
- 3 c) Erklären Sie, dass in der in Abb. 4 dargestellten Situation nur  $E_1$ , aber nicht  $E_2$  ein deutliches Signal empfängt.

Das LVS-Gerät zeigt die aktuelle Signalstärke durch einen Ton entsprechender Lautstärke an.

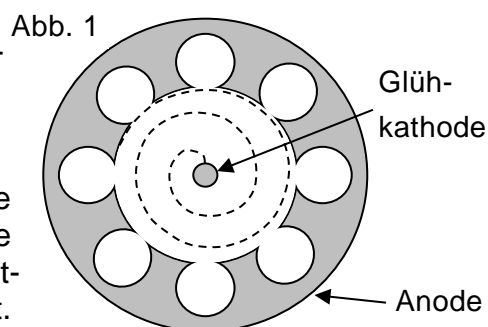
- 5 d) Gehen Sie zunächst davon aus, dass die Zeichenebene in Abb. 4 parallel zur Erdoberfläche liegt. Die Sendespule befindet sich in geringer Tiefe. Bei der Suche nach dem Verschütteten soll der Empfänger entlang einer in Abb. 4 dargestellten Feldlinie zum Sender geführt werden. Formulieren Sie Handlungsanweisungen für den dafür erforderlichen Umgang mit dem Gerät, wenn der Suchende bei P startet.
- 3 e) Entscheiden Sie begründet, welche Orientierung der Sendespule für die Suchstrategie aus Teilaufgabe d am ungünstigsten ist.

## 1. Elektronenbewegung im Magnetron

Betrachtet wird ein homogenes Magnetfeld der Flussdichte  $B = 21 \text{ mT}$ . Senkrecht zur Magnetfeldrichtung bewegen sich Elektronen auf einer Kreisbahn.

- a) Berechnen Sie für Elektronen der Geschwindigkeit  $2,5 \cdot 10^7 \text{ m/s}$  den Radius  $r$  der Kreisbahn.
- b) Weisen Sie nach, dass für die Umlaufzeit  $T$  unabhängig vom Bahnradius die Beziehung  $T = \frac{2\pi \cdot m_e}{e \cdot B}$  gilt. Berechnen Sie die Umlaufzeit für das gegebene Magnetfeld.

Abb. 1 zeigt ein sogenanntes Magnetron im Querschnitt. Dieses besteht aus einem weitgehend hohlen Kupferzylinder. In der Mitte befindet sich eine Glühkathode, aus der Elektronen austreten. Der Zylinder selbst ist gegenüber der Glühkathode positiv geladen und bildet die Anode. Der gesamte Aufbau befindet sich in einem homogenen Magnetfeld, das senkrecht zur Zeichenebene gerichtet ist.

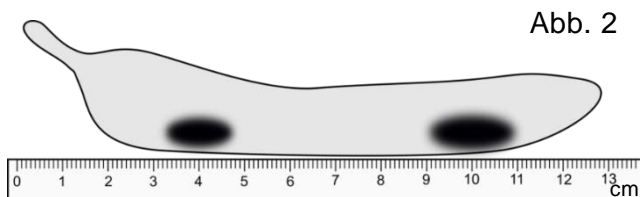


- c) Begründen Sie, dass im Inneren des Zylinders der Betrag der elektrischen Feldstärke nach außen abnimmt.
- d) Die Elektronen bewegen sich auf einer Spiralbahn nach außen (in Abb. 1 gestrichelt dargestellt). Erklären Sie diesen Sachverhalt und geben Sie die Orientierung des Magnetfelds an.

## 2. Mikrowellengerät

In einem Mikrowellengerät werden Mikrowellen der festen Frequenz  $2,45 \text{ GHz}$  erzeugt und in den Innenraum des Geräts geleitet. Dort bildet sich eine stehende Welle aus. Die Mikrowellen erhitzen vor allem das Wasser in den Lebensmitteln.

- a) Erläutern Sie allgemein die Entstehung stehender Wellen.
- b) Legt man eine Banane in ein Mikrowellengerät, aus dem der Drehteller entfernt wurde, verbrennt die Schale nur an einigen Stellen (s. Abb. 2). Erklären Sie dies und erläutern Sie den Zusammenhang zwischen den verbrannten Stellen der Banane und der Wellenlänge der Mikrowellen. Bestätigen Sie mithilfe der Abbildung die angegebene Frequenz der verwendeten Mikrowellen.



- c) Die Wellenlänge der Mikrowellen soll so gewählt sein, dass möglichst viel Energie in den Lebensmitteln absorbiert wird. Für die Wechselwirkung der Mikrowellen mit Wasser sind zwei Größen des Wassers entscheidend: die Permittivität und die Absorptionsfähigkeit.

Eine große Permittivität bedeutet, dass sich die Moleküle an der Oberfläche polarisieren lassen und so den Innenbereich gegen das elektromagnetische Feld abschirmen. Je größer die Absorptionsfähigkeit ist, desto effektiver wird Energie aus der Mikrowellenstrahlung vom Wasser aufgenommen. Abb. 3 zeigt die Abhängigkeit dieser beiden Größen von der Frequenz.

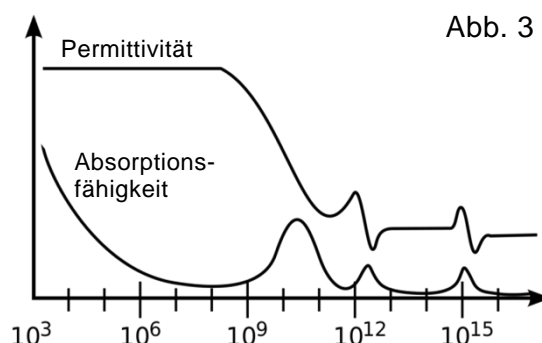


Abb. 3

Entscheiden Sie nur mit Hilfe des Diagramms begründet, welcher Frequenzbereich besonders geeignet wäre.

4

- d) Im Blickfenster des Mikrowellengeräts befindet sich ein Metallblech mit Löchern. Dieses Blech verhindert, dass durch das Blickfenster Mikrowellenstrahlung austritt, deren Wellenlänge deutlich größer als der Lochabstand ist. Ein Hersteller von Mikrowellengeräten plant Metallbleche mit Löchern, deren Mittelpunkte einen Abstand von wenigen Millimetern haben. Bewerten Sie dies im Hinblick auf Ihr Ergebnis von Teilaufgabe c.

### 3. Elektrisches Feld

Zwei gleich geladene, symmetrisch angeordnete Metallplatten, die einen Winkel von  $60^\circ$  einschließen und elektrisch isoliert sind, halten ein punktförmiges, positiv geladenes Metallkugelchen im Punkt K (s. Abb. 4) in der Schwebe.

Gehen Sie zunächst vereinfachend davon aus, dass die Ladungen auf beiden Platten gleichmäßig verteilt sind.

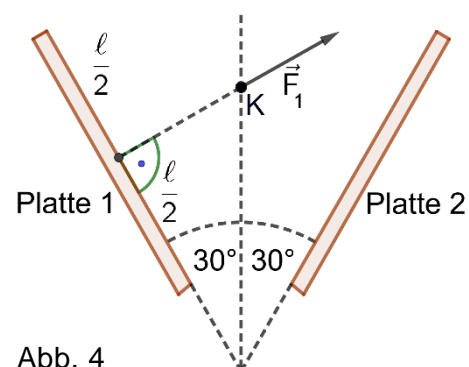


Abb. 4

5

- a) Platte 1 übt eine elektrische Kraft  $F_1$  von 15 mN auf das Metallkugelchen aus. Tragen Sie alle weiteren wirkenden Kräfte maßstabsgetreu in Abb. 4 ein. Begründen Sie damit, dass die von den beiden Platten auf das Kugelchen wirkende Gesamtkraft 15 mN beträgt.

3

- b) Berechnen Sie die Masse des Kugelchens.

2

- c) Das Kugelchen trägt die Ladung 1,3 mC. Bestimmen Sie die elektrische Feldstärke des Feldes, das durch die beiden Platten im Punkt K hervorgerufen wird.

Berücksichtigen Sie nun im Folgenden, dass die Ladung auf Platte 2 einen Einfluss auf die Ladungsverteilung auf Platte 1 hat und umgekehrt. Der Einfluss der Ladung des Kugelchens soll weiterhin vernachlässigt werden.

6

- d) Beschreiben und begründen Sie die Ladungsverteilung, die sich auf Platte 1 ergibt, und skizzieren Sie in einer neuen Skizze auf Ihrem Arbeitsblatt qualitativ das Feldlinienbild des sich einstellenden elektrischen Feldes im Bereich zwischen den Platten 1 und 2.

6

- e) Im Vergleich zum idealisierten Fall in Teilaufgabe a ergibt sich durch die veränderte Ladungsverteilung eine andere Richtung der Kraft durch Platte 1 auf das Kugelchen. Erläutern Sie dies qualitativ.

## 1. Nobelpreis 1921 für die Deutung des Photoeffekts

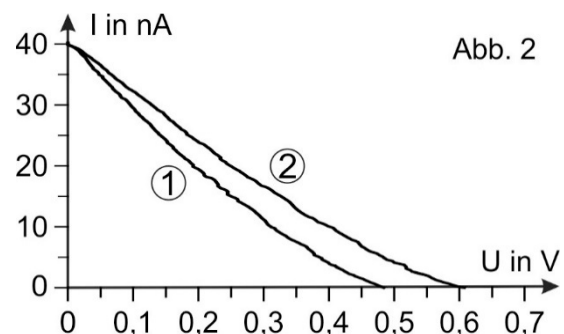
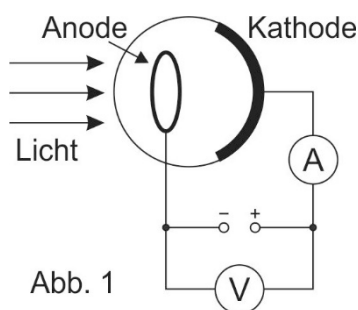
Für seine 1905 veröffentlichte Deutung des Photoeffekts wurde Albert Einstein mit dem Nobelpreis für das Jahr 1921 ausgezeichnet. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts wurde der Effekt von W. Hallwachs mit Hilfe eines Elektroskops untersucht.

Zur qualitativen Demonstration des Photoeffekts stehen eine Zinkplatte, ein Elektroskop, eine Gleichspannungsquelle sowie als Lichtquellen eine Quecksilberdampf-lampe (Wellenlängen von 248 nm bis 579 nm) und eine Glühlampe (Wellenlängen von 380 nm bis 950 nm) zur Verfügung.

- 4 a) Beschreiben Sie den Aufbau und die Durchführung eines Experiments zur qualitativen Demonstration des Photoeffekts unter Nutzung genannter Materialien.
- 6 b) Berechnen Sie mithilfe der Formelsammlung die Grenzwellenlänge für Zink. Entscheiden Sie damit begründet, welche der beiden Lichtquellen zur Demonstration des Photoeffekts verwendet werden muss. Deuten Sie die Entladung des Elektroskops unter Verwendung der Lichtquantenhypothese.

Um den Photoeffekt quantitativ zu untersuchen, wird eine Vakuum-Photozelle mit Kalziumoxid-Kathode verwendet. Die Kathode wird mit der Quecksilberdampf-lampe bestrahlt und die zwischen Kathode und Anode angelegte Spannung  $U$  schrittweise erhöht (siehe Abb. 1).

Abb. 2 zeigt die Photostromstärke  $I$  in Abhängigkeit von der Spannung  $U$  für Licht der Wellenlängen  $\lambda_1 = 578 \text{ nm}$  (Graph ①) und  $\lambda_2$  (Graph ②).



- 7 c) Erklären Sie die Abnahme der Stromstärke bis auf den Wert 0 A (vgl. Abb. 2). Zeigen Sie, dass die Austrittsarbeit dieser Kathode 1,7 eV beträgt.

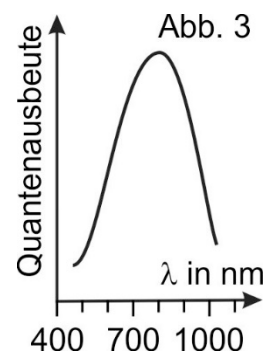
In diesem Experiment versteht man unter der Quantenausbeute den Quotienten aus der Anzahl der freigesetzten Elektronen und der Anzahl der einfallenden Photonen.

- 7 d) Die Leistung des eintreffenden Lichts beträgt 5,0 mW. Bestimmen Sie unter der Annahme, dass jedes ausgelöste Elektron die Anode erreicht, die Quantenausbeute für Graph ① bei der Spannung 0 V. Geben Sie die durchschnittliche Photonenanzahl an, die zur Auslösung eines Elektrons benötigt wird.
- 2 e) Nun wird die Lichtleistung bei gleichbleibender Wellenlänge verringert. Skizzieren Sie in Abb. 2 einen dazu passenden Graphen.
- 2 f) Begründen Sie mit Abb. 2, dass die Wellenlänge  $\lambda_2$  kleiner ist als  $\lambda_1$ .

(Fortsetzung nächste Seite)

4

- g) Nehmen Sie zu folgender Behauptung begründet Stellung: „Bei Graph ② in Abb. 2 ist die Leistung des eintreffenden Lichts größer als bei Graph ①“. Beziehen Sie dazu die in Abb. 3 dargestellte Quantenausbeute der Photozelle mit ein und gehen Sie davon aus, dass bei beiden Wellenlängen gleich viele Elektronen aus der Kathode ausgelöst werden. Verwenden Sie  $\lambda_2 = 546 \text{ nm}$ .



## 2. Altersbestimmung mit der Radiokarbonmethode

Zur Altersbestimmung organischer Materialien eignet sich häufig die Radiokarbonmethode ( $^{14}\text{C}$ -Methode). Das hierzu genutzte Kohlenstoff-Isotop  $^{14}\text{C}$  entsteht in der Atmosphäre aus dem Stickstoff-Isotop  $^{14}\text{N}$  durch Wechselwirkung mit einem Neutron. Da sich  $^{12}\text{C}$  und  $^{14}\text{C}$  chemisch annähernd gleich verhalten, nehmen Lebewesen auch  $^{14}\text{C}$  auf. Für das Verhältnis der Teilchenzahlen  $N_0(^{14}\text{C}) : N_0(^{12}\text{C})$  in der Atmosphäre und in lebender Materie kann der konstante Wert  $1,176 \cdot 10^{-12}$  angenommen werden. Der Anteil des radioaktiven  $^{14}\text{C}$  (Halbwertszeit  $T_{1/2} = 5730 \text{ a}$ ) verringert sich nach dem Absterben. Aus dem gemessenen Verhältnis der Teilchenzahlen von  $^{14}\text{C}$  zu  $^{12}\text{C}$  kann auf das Alter des untersuchten Stoffs geschlossen werden.

2

- a) Stellen Sie die Reaktionsgleichung für die Entstehung von  $^{14}\text{C}$  auf.

$^{14}\text{C}$  ist radioaktiv und zerfällt durch  $\beta^-$ -Zerfall.

5

- b) Stellen Sie die zugehörige Zerfallsgleichung für diesen Zerfall auf und berechnen Sie die freiwerdende Energie  $Q$ .

4

- c) Skizzieren Sie die Verteilung der kinetischen Energie der  $\beta^-$ -Teilchen bei diesem Zerfall und erläutern Sie, dass die  $\beta^-$ -Teilchen eine geringere Energie als die in Teilaufgabe b berechnete besitzen.

Im Turiner Dom wird ein Leinentuch aufbewahrt, das ein Abbild eines Menschen zeigt und als das Grabtuch von Jesus Christus verehrt wird. Im Lauf der Jahrhunderte überstand es einige Brände und wurde mehrmals ausgebleicht. Das Alter des Tuchs wurde 1988 mit der  $^{14}\text{C}$ -Methode datiert. Dazu wurde an einer Ecke eine sehr kleine Stoffprobe der Masse  $52,8 \text{ mg}$  herausgeschnitten.

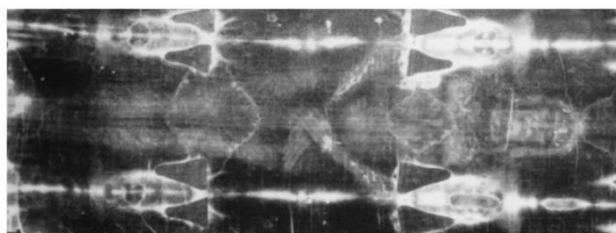


Abb. 4 Negativaufnahme des Grabtuchs

5

- d) Im Vorfeld der Untersuchung gab es zwei konkurrierende Zielsetzungen: Eine möglichst genaue Datierung oder ein möglichst vollständiger Erhalt des Tuchs. Bewerten Sie aus Sicht der beiden Zielsetzungen den gewählten Entnahmeort und die Größe der Stoffprobe und folgern Sie daraus die bei der Untersuchung bevorzugte Zielsetzung.

7

- e) Schätzen Sie mit einer Rechnung ab, ob man die Aktivität der Stoffprobe mit einem Nachweisgerät messen könnte, das eine Nullrate von  $12 \text{ min}^{-1}$  detektiert. Gehen Sie davon aus, dass die Stoffprobe komplett aus  $^{12}\text{C}$  und  $^{14}\text{C}$  besteht.

5

- f) Das Verhältnis der Teilchenanzahlen  $N(^{14}\text{C}) : N(^{12}\text{C})$  in der Stoffprobe beträgt  $1,078 \cdot 10^{-12}$ . Berechnen Sie daraus das Alter der Stoffprobe.

## 1. Eigenschaften von Quantenobjekten

Quanteneigenschaften von Elektronen können mithilfe der Elektronenbeugungsröhre nachgewiesen werden.

- 7 a) Erstellen Sie eine beschriftete Skizze des Versuchsaufbaus und erläutern Sie anhand des erzeugten Bilds auf dem Fluoreszenzschirm die damit nachgewiesene Eigenschaft des Quantenobjekts Elektron.
- 7 b) Berechnen Sie die de Broglie-Wellenlänge von Elektronen, die mit einer Spannung von 1,2 kV beschleunigt wurden. Leiten Sie daraus eine Konsequenz für die Größe der beugenden Struktur ab, wenn man diese bzw. deutlich höhere Spannungen verwendet.

Dem Physiker R. Feynman zufolge trägt das Doppelspaltexperiment „das Herz der Quantenmechanik in sich“<sup>1</sup>, weil es die Eigenschaften von Quantenobjekten umfassend aufzeigt. In diesem treffen Elektronen einheitlicher Geschwindigkeit  $v_0$  auf einen geeigneten Doppelspalt und werden auf einem Schirm dahinter registriert.

- 8 c) Stellen Sie in einem Diagramm die Intensitätsverteilung auf dem Schirm qualitativ dar. Erläutern Sie den Nachweis von drei grundlegenden Eigenschaften von Quantenobjekten mithilfe des Doppelspaltexperiments.
- 3 d) In der Realität sind die Geschwindigkeiten der Elektronen nicht einheitlich, sondern schwanken leicht um den Wert  $v_0$ . Vergleichen Sie die sich daraus ergebende Intensitätsverteilung mit der aus Teilaufgabe c. Gehen Sie dabei auf drei Aspekte ein.
- 6 e) Der Doppelspalt wird nun durch einen Dreifachspalt (gleiche Spaltbreiten, konstanter Spaltabstand) ersetzt. Vereinfachend werden nur Elektronen mit einheitlicher Geschwindigkeit  $v_0$  betrachtet. Ihr Durchgang durch einen Spalt kann bei Bedarf mit einer Messapparatur detektiert werden. Das Experiment wird in drei Varianten durchgeführt:  
 α) Am mittleren Spalt wird eine Messapparatur angebracht,  
 β) an den beiden äußeren Spalten werden Messapparaturen angebracht,  
 γ) an keinem der Spalte wird eine Messapparatur angebracht.  
 Ordnen Sie den drei Varianten jeweils eine passende Intensitätsverteilung aus Abb. 1 begründet zu.

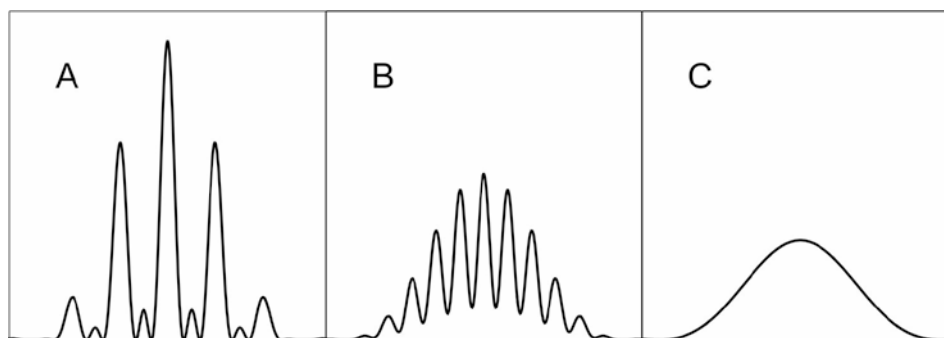


Abb. 1: Intensitätsverteilungen bei gleicher Skalierung

<sup>1</sup> Feynman, Richard P. 2007: Feynman Vorlesungen über Physik 3. Oldenbourg Wissenschaftsverlag



## 2. Radioaktive Substanzen im Tabakrauch

Neben einer Vielzahl von toxischen chemischen Substanzen enthält Tabak auch radioaktive Stoffe, die beim Rauchen inkorporiert werden. Einen großen Beitrag zu dieser Strahlenexposition liefern das Blei-Isotop  $^{210}\text{Pb}$  sowie das Polonium-Isotop  $^{210}\text{Po}$ , die in derselben natürlichen Zerfallsreihe auftreten.

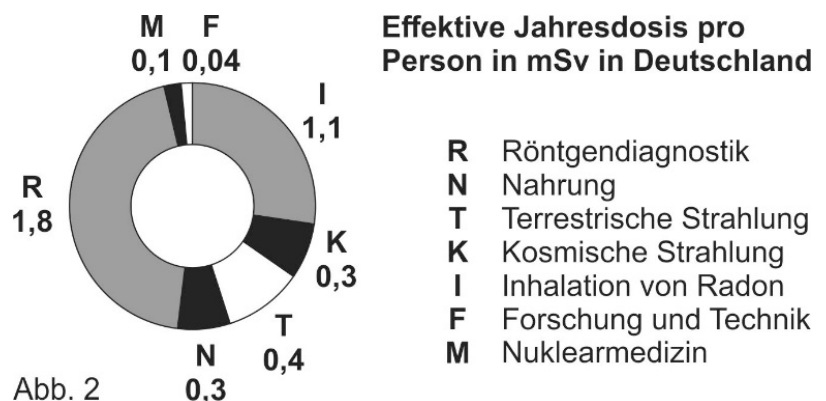
- 6 a) Begründen Sie, dass  $^{210}\text{Po}$  nur in einer der natürlichen Zerfallsreihen auftreten kann, und geben Sie diese Zerfallsreihe an. Ermitteln Sie durch eine geeignete Rechnung die Anzahl der  $\alpha$ - und  $\beta^-$ -Zerfälle, die ausgehend vom Uranisotop  $^{238}\text{U}$  bis zu  $^{210}\text{Po}$  auftreten.
- 5 b) Stellen Sie die Reaktionsgleichung für den Zerfall von  $^{210}\text{Po}$  auf und berechnen Sie die beim Zerfall freiwerdende Energie Q. [zur Kontrolle:  $Q = 5,41 \text{ MeV}$ ].

Aus dem Gas Radon, das aus dem Erdboden entweicht, bilden sich radioaktive Folgeprodukte, die sich an Staubpartikel anheften. Diese bleiben an klebrigen Härchen auf den Blättern der Tabakpflanzen hängen. Durch radioaktiven Zerfall entstehen dort  $^{210}\text{Pb}$  und  $^{210}\text{Po}$ .

Beim Einsatz uranhaltiger Kunstdünger entweicht aus dem Boden mehr Radon als üblich und im Erdboden bildet sich  $^{210}\text{Po}$ , welches die Tabakpflanze zusätzlich über die Wurzeln aufnimmt.

Das im Tabak einer Zigarette enthaltene  $^{210}\text{Po}$  besitzt eine mittlere Aktivität von 12 mBq. Bei einer glühenden Zigarette gehen Radionuklide in den Rauch über und setzen sich beim Einatmen in der Lunge ab.

- 4 c) Nennen Sie zwei Maßnahmen, um die durch Polonium hervorgerufene Aktivität im Zigarettenrauch zu verringern, und beurteilen Sie dabei auch die Umsetzbarkeit der von Ihnen vorgeschlagenen Maßnahmen.
- 4 d) Berechnen Sie die Anzahl  $N_{\text{Po}}$  der in einer Zigarette enthaltenen  $^{210}\text{Po}$ -Atome. [zur Kontrolle:  $N_{\text{Po}} = 2,1 \cdot 10^5$ ]
- 6 e) Schätzen Sie die jährliche Äquivalentdosis aufgrund der Strahlenbelastung durch  $^{210}\text{Po}$  ab, die ein Raucher aufnimmt, der 20 Zigaretten täglich raucht. Gehen Sie vereinfachend davon aus, dass die Hälfte der  $^{210}\text{Po}$ -Atome der Zigarette vom gesamten Körper aufgenommen werden.
- 4 f) Aufgrund des Zerfalls von  $^{210}\text{Pb}$  wird bei täglich 20 gerauchten Zigaretten eine weitere Äquivalentdosis von etwa 0,4 mSv pro Jahr aufgenommen. Bewerten Sie die jährliche Strahlenbelastung durch diesen Tabakkonsum unter Verwendung von Abb. 2.



## Ph 12 – Astrophysik 1

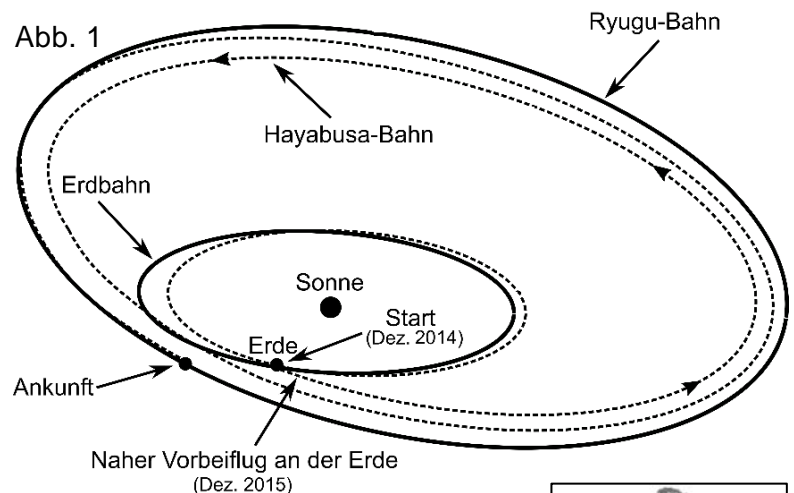
### 1. Der Asteroid Ryugu

Der 1999 entdeckte Asteroid Ryugu gehört zu den Apollo-Asteroiden, die der Erde besonders nahekommen. Die große Halbachse seiner Bahn beträgt 1,19 AE, die numerische Exzentrizität 0,1903.

- a) Man vermutet, dass die Apollo-Asteroiden ihre ursprüngliche Umlaufbahn im Asteroidengürtel aufgrund gravitativer Störungen durch einen Planeten verlassen haben. Beschreiben Sie die Lage des Asteroidengürtels und entscheiden Sie begründet, welcher der Planeten vermutlich für die Bahnstörung verantwortlich ist.
- b) Berechnen Sie die Umlaufdauer  $T$  des Asteroiden und zeigen Sie, dass die Entfernung von Ryugu zur Sonne zwischen 0,964 AE und 1,42 AE schwankt. Erläutern Sie, dass allein daraus noch keine mögliche Kollisionsgefahr von Ryugu mit der Erde gefolgt werden kann. [Zur Kontrolle:  $T = 1,30 \text{ a}$ ]

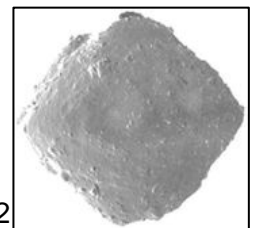
Im Dezember 2014 startete die japanische Weltraumagentur JAXA die Sonde Hayabusa 2, um den Asteroiden genauer zu untersuchen.

- c) Die gewählte Flugbahn führte Hayabusa 2 nach etwa einem Jahr wieder sehr nahe an die Erde heran, dann erst schwenkte die Sonde auf die Bahn in Richtung des Asteroiden ein. Begründen Sie diese Wahl der Bahn und weisen Sie mit Hilfe von Abb. 1 nach, dass Hayabusa 2 Ryugu im Juli 2018 erreichte.



Die Sonde begleitete den Asteroiden in konstantem Abstand über ein Jahr auf einer sehr nahen Bahn. Die Geometrie des rotierenden Asteroiden wurde durch Kameras und Radar vermessen. Ryugu kann näherungsweise als Kugel mit einem Durchmesser von 0,90 km beschrieben werden (s. Abb. 2).

Abb. 2



- d) Schätzen Sie den kürzesten Abstand ab, welchen die Sonde von der Oberfläche des Asteroiden hatte, als deren Kamera den Asteroiden unter dem Winkel  $6,0^\circ$  gerade noch voll erfassen konnte.

Mithilfe von Beschleunigungssensoren wurde die Schwerebeschleunigung in Oberflächennähe des Asteroiden bestimmt; sie beträgt  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^2$ .

- e) Bestimmen Sie näherungsweise die Masse  $m_R$  des Asteroiden und dessen mittlere Dichte (Verhältnis von Masse und Volumen). Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der Dichte  $3,5 \text{ g/cm}^3$  von Gestein. Stellen Sie eine Hypothese bezüglich der Zusammensetzung oder des Aufbaus von Ryugu auf.

[Zur Kontrolle:  $m_R = 4,6 \cdot 10^{11} \text{ kg}$ ]

- |   |   |
|---|---|
| 5 | f) Die Sonde näherte sich der Asteroidenoberfläche und klinkte in geringer Höhe den etwa schuhkartongroßen Lander MASCOT (Mobile Asteroid Surface Scout) mit der Geschwindigkeit von 11 cm/s in Richtung des Asteroiden aus. Die Falldauer von MASCOT betrug etwa zehn Minuten. Berechnen Sie die Aufprallgeschwindigkeit $v_A$ des Landers unter der vereinfachenden Annahme, dass die Beschleunigung während des gesamten Falls konstant blieb. Vergleichen Sie diese mit der Fluchtgeschwindigkeit auf Ryugu. [Zur Kontrolle $v_A = 0,20$ m/s] |
| 2 | g) MASCOT konnte durch einen beweglichen Schwungarm nach dem Aufsetzen auf Ryugu seine Lage korrigieren und bis zu 70 m weite Sprünge ausführen. Geben Sie zwei mögliche Gefahren an, die dabei bestanden.  |
| 3 | h) Die Kosten des Projekts betrugen insgesamt mehr als 123 Mio. Euro. Bewerten Sie, ob es vertretbar ist, eine so große Summe in die Erforschung eines Asteroiden zu investieren.   |

## 2. Das Doppelsternsystem TOI 1338

Das Doppelsternsystem TOI 1338 befindet sich im Sternbild Maler auf dem Südhimmel. Die beiden Sterne TOI A und TOI B bewegen sich um ihren gemeinsamen Schwerpunkt im Abstand von 0,13 AE und benötigen dafür 14,6 Tage. Bahn- und Beobachtungsebene stimmen überein.

- |   |  |
|---|--|
| 4   | a) Erläutern Sie die spektroskopische Nachweismethode für ein Doppelsternsystem und nennen Sie eine weitere Nachweismethode.   |
| 5   | b) Das Massenverhältnis der Sterne TOI A und TOI B beträgt 3,5 : 1. Berechnen Sie zunächst die Gesamtmasse des Doppelsternsystems und bestimmen Sie daraus die Massen $M_A$ und $M_B$ der beiden Sterne in Vielfachen der Sonnenmasse. [Zur Kontrolle: $M_A = 1,1 M_\odot$ ; $M_B = 0,31 M_\odot$ ]  |
| Beide Sterne sind Hauptreihensterne. TOI A hat eine Oberflächentemperatur von 6050 K, TOI B von 3330 K. |  |
| 6   | c) Erläutern Sie, dass die Entwicklung der beiden Sterne TOI A und TOI B, wenn man sie separat betrachtet, ähnlich abläuft, die von TOI A aber schneller. Leiten Sie davon ausgehend eine Hypothese ab, wie sich das Doppelsternsystem entwickeln könnte.  |
| 6   | d) Begründen Sie, dass die Flächenhelligkeit (Verhältnis von Leuchtkraft und Querschnittsfläche) von TOI A sehr viel größer ist als die von TOI B. Stellen Sie schematisch die Lichtkurve des Doppelsternsystems für eine Zeitdauer von mindestens einem Umlauf in einer beschrifteten Skizze dar.   |
| 2   | e) Ein High-School-Absolvent entdeckte 2019 als Praktikant bei der NASA den Exoplaneten TOI 1338 b aufgrund von Unregelmäßigkeiten in der gemessenen Lichtkurve. Der Planet besitzt etwa die Größe des Saturns und umkreist im Abstand von 0,46 AE den Schwerpunkt des Doppelsternsystems in dessen Bahnebene. Beschreiben Sie die Beobachtungen, die den Praktikanten dazu veranlasst haben könnten, auf die Existenz eines Exoplaneten zu schließen. |

## Ph 12 – Astrophysik 2

### 1. Beteigeuze

Der helle Stern Beteigeuze im Sternbild Orion ist neben der Sonne einer der wenigen Sterne, die bei Verwendung geeigneter Teleskope als Fläche und nicht nur als Punkt sichtbar sind. Seine jährliche trigonometrische Parallaxe beträgt  $0,00507''$ .

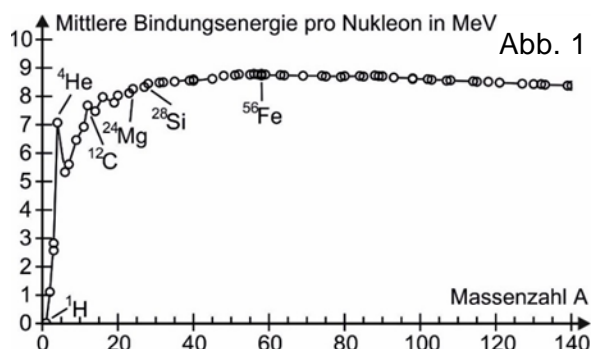
- 2 a) Bestimmen Sie die Entfernung  $r$  des Sterns in pc. [Zur Kontrolle:  $r = 197$  pc]
- 6 b) Beteigeuze liegt sehr nahe der Ekliptik. Veranschaulichen Sie dies und die jährliche trigonometrische Parallaxe in einer gemeinsamen Skizze. Geben Sie die Form der parallaktischen Bewegung Beteigeuzes vor dem Hintergrund weit entfernter Sterne an.
- 6 c) Der Winkeldurchmesser des Sterns beträgt  $0,05''$ . Berechnen Sie seinen Radius  $R$  und vergleichen Sie diesen mit Abmessungen im Sonnensystem.  
[Zur Kontrolle:  $R = 7 \cdot 10^8$  km]

Beteigeuze hat eine Masse von ca. 20 Sonnenmassen und befindet sich im Entwicklungsstadium eines Überriesen. Durchmesser und Helligkeit sind zeitlich nicht konstant. Die scheinbare Helligkeit war im Februar 2020 um eine Magnitude größer als im September 2019. Der Spektraltyp des Sterns blieb unverändert.

- 8 d) Zeigen Sie, dass die Veränderung der Helligkeit durch eine Abnahme der Leuchtkraft um 60 % erklärt werden kann. Weisen Sie zudem nach, dass eine Abnahme des Radius um 37 % zu dieser Leuchtkraftreduzierung führen könnte. Geben Sie eventuell verwendete Annahmen an.

Die sehr starke Helligkeitsänderung hat Anfang 2020 zu Spekulationen geführt, dass bei Beteigeuze eine Supernova vom Typ II unmittelbar bevorstehen könnte. Bei einem Vorläuferstern einer Supernova vom Typ II kommt es im Zentrum des Sterns zu einer Abfolge unterschiedlicher Fusionsphasen. Die Fusion von Wasserstoff zu Helium dauert mehrere Millionen Jahre an, die anschließende Fusion von Helium zu Kohlenstoff mehrere 100 000 Jahre, die von Kohlenstoff zu Magnesium und weiteren Elementen ca. 600 Jahre, die von Silizium zu Eisen nur wenige Tage.

- 8 e) Erläutern Sie mithilfe von Abb. 1 qualitativ, dass die Fusionsphasen mit zunehmender Massenzahl immer kürzer dauern und dass der Stern instabil wird, sobald sich im Zentrum ein Eisenkern gebildet hat. Nehmen Sie vereinfachend an, dass sich die Leuchtkraft des Sterns während der verschiedenen Phasen nicht wesentlich ändert.



- 5 f) Für die Beteigeuze-Supernova wird eine absolute Helligkeit von etwa  $-18$  Magnituden erwartet. Entscheiden Sie begründet, ob ein Beobachter auf der Erde diese Supernova am Taghimmel beobachten könnte. Verwenden Sie, dass der Vollmond eine scheinbare Helligkeit von  $-12,6$  Magnituden aufweist.
- 5 g) Nennen Sie zwei mögliche Endstadien der Sternentwicklung für Beteigeuze und beschreiben Sie eines davon kurz.

## 2. Gravitationslinsen

Albert Einstein hat 1912 beschrieben, dass Lichtstrahlen in der Nähe massereicher Objekte so stark gekrümmt werden können, dass zwei Bilder einer Lichtquelle entstehen können. Im Jahr 1979 wurden tatsächlich zwei Bilder des Quasars 0957 beobachtet. Damit war das erste Gravitationslinsensystem nachgewiesen. Ein solches besteht aus einem lichtaussendenden Objekt (Quelle), einem lichtablenkenden massereichen Objekt (Linse) und dem Beobachter (vgl. Abb. 2).

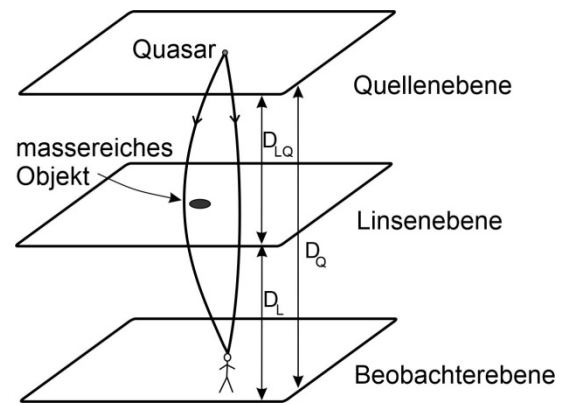


Abb. 2

- a) Nennen Sie drei typische Kennzeichen eines Quasars.
- b) Zeichnen Sie in Abb. 2 die Positionen ein, an denen der Beobachter, entsprechend der zwei eingezeichneten Lichtwege, den Quasar in der Quellenebene sehen würde.

Bei einigen Gravitationslinsensystemen wird sogar ein sogenannter Einsteinring, d. h. ein ringförmiges Bild der Quelle (s. Abb. 3), beobachtet.

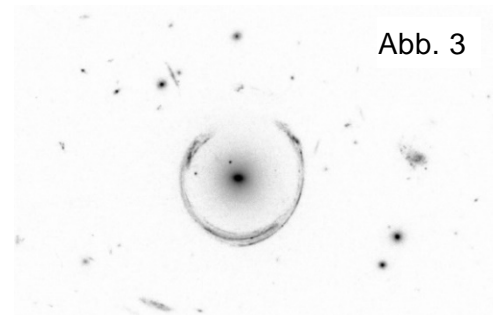


Abb. 3

- c) Beschreiben Sie die Lage von Beobachter, Linse und Quelle zueinander, wenn der Beobachter einen Einsteinring erkennt.

Die Masse  $M$  der Linse, die Abstände  $D_Q$  der Quelle und  $D_L$  der Linse vom Beobachter und der Abstand  $D_{LQ}$  zwischen Linse und Quelle bestimmen die Größe des Einsteinwinkels  $\Theta_E$ , unter dem der Radius des Einsteinrings beobachtet wird:

$$\Theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \cdot \frac{D_{LQ}}{D_L \cdot D_Q}} \quad (\Theta_E \text{ im Bogenmaß}).$$

Bei dem Gravitationslinsensystem J1000+0221 beträgt die Entfernung der Linse vom Beobachter ca. 9 Milliarden Lichtjahre, die Quelle ist etwa doppelt so weit von ihm entfernt.

- d) Rechnen Sie den bei diesem System beobachteten Einsteinwinkel von  $0,35''$  ins Bogenmaß um und berechnen Sie die Masse der Linse in Vielfachen der Sonnenmasse.  
[Zur Kontrolle:  $M = 8 \cdot 10^{10} M_\odot$ ].
- e) Im Gravitationslinsensystem J1000+0221 ist die Linse eine elliptische Galaxie, aus deren Lichtverteilung eine Galaxienmasse von  $3 \cdot 10^{10} M_\odot$  bestimmt wurde. Stellen Sie eine Hypothese auf, die die Abweichung zu der in Teilaufgabe d bestimmten Masse der Linse auflösen kann.
- f) Vergleichen Sie die Entfernung der Quelle mit der Strecke, die das Licht in der Zeitdauer zurücklegt, die dem Alter des Universums entspricht. Erläutern Sie, dass es dennoch möglich ist, dass uns Licht der heute 18 Milliarden Lichtjahre entfernten Quelle erreicht.

## Quellenangaben

Ph 11 – 2

Abb. 3:

In Anlehnung an Prof. Kenneth A. Mauritz (derivative work: Cepheiden): Dielectric responses, URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11345745> (aufgerufen am 1.2.2021)

Ph 12 – 1

Abb. 4:

Shroud of Turin, URL:

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d6/Turin\\_shroud\\_negative-positive.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d6/Turin_shroud_negative-positive.JPG) (aufgerufen am 1.2.2021)

Ph 12 – Astrophysik 1

Abb. 2:

In Anlehnung an: JAXA, University of Tokyo, Kochi University, Rikkyo University, Nagoya University, Chiba Institute of Technology, Meiji University, University of Aizu and AIST: Asteroid Ryugu, URL:

[https://www.dlr.de/content/en/images/2018/3/asteroid-ryugu\\_31672.jpg?\\_\\_blob=normal&v=17\\_\\_ifc1920w](https://www.dlr.de/content/en/images/2018/3/asteroid-ryugu_31672.jpg?__blob=normal&v=17__ifc1920w) (aufgerufen am 1.2.2021)

Ph 12 – Astrophysik 2

Abb. 3:

In Anlehnung an ESA/Hubble & NASA: Lensshoe Hubble, URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lensshoe\\_hubble.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lensshoe_hubble.JPG) (aufgerufen am 1.2.2021)