

# Abiturprüfung 2020

## 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.**

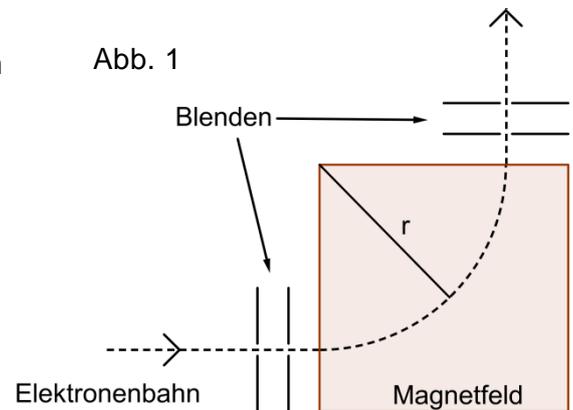
**Name:** \_\_\_\_\_

## 1. Strahlentherapie mit Elektronen

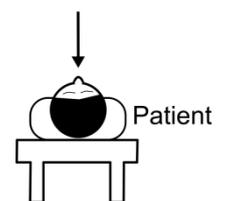
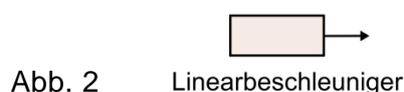
Durch Bestrahlung mit energiereichen Elektronen können Tumore auf der Hautoberfläche behandelt werden. Hierzu werden Elektronen in einem Linearbeschleuniger auf eine kinetische Energie von 1,2 MeV beschleunigt. Anschließend werden sie umgelenkt und treten aus dem evakuierten Gerät als Elektronenstrahl aus.

- 4 a) Zeigen Sie, dass der Lorentzfaktor für diese Elektronen  $\gamma = 3,3$  beträgt.
- 4 b) Weisen Sie rechnerisch nach, dass die Geschwindigkeit dieser Elektronen 95 % der Lichtgeschwindigkeit beträgt.

Die Bewegungsrichtung der Elektronen kann mit Umlenkeinheiten um jeweils genau  $90^\circ$  verändert werden. Eine solche Umlenkeinheit beinhaltet mehrere Blenden und ein homogenes Magnetfeld der magnetischen Flussdichte 0,13 T.



- 6 c) Ergänzen Sie in Abb. 1 die Orientierung des Magnetfelds und berechnen Sie den Radius  $r$  der Elektronenbahn.
- 4 d) Mithilfe der Umlenkeinheit können Elektronen mit abweichender Energie aus dem Strahlengang entfernt werden. Erklären Sie dies am Beispiel von Elektronen mit zu hoher Energie.
- 4 e) Bestimmen Sie das Verhältnis aus Windungszahl  $N$  und Spulenlänge  $l$ , wenn für die Erzeugung des Magnetfelds eine langgestreckte Zylinderspule verwendet werden würde, durch die ein Strom der Stromstärke 6,0 A fließt.
- 4 f) Bei einer Behandlung in einer Arztpraxis verlässt der Elektronenstrahl den Linearbeschleuniger horizontal und soll senkrecht von oben auf den liegenden Patienten treffen. Zeichnen Sie in die Abb. 2 an geeigneten Orten Umlenkeinheiten mit der jeweiligen Orientierung des Magnetfeldes ein und ergänzen Sie den sich ergebenden Strahlengang. Markieren Sie zusätzlich den evakuierten Bereich und begründen Sie Ihre Entscheidung.



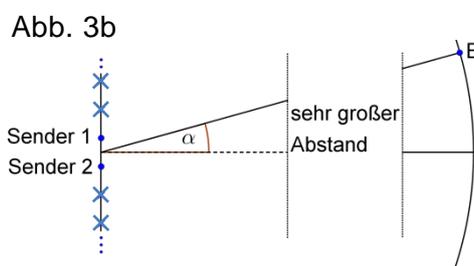
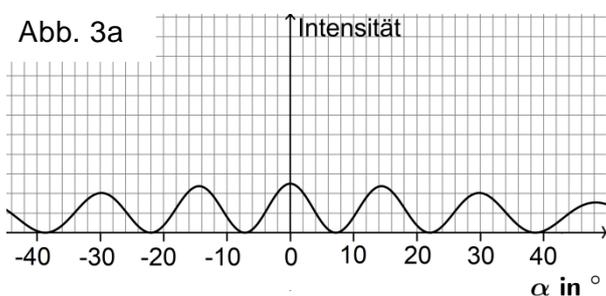
- 4 g) Die Stromstärke des Elektronenstrahls beträgt etwa ein Mikroampere. Berechnen Sie die Anzahl der Elektronen, die pro Sekunde den Linearbeschleuniger verlassen.  
[zur Kontrolle:  $6 \cdot 10^{12}$ ]

- 4 h) Als Quelle von Elektronen der gewünschten Energie 1,2 MeV könnte man anstelle eines Linearbeschleunigers auch radioaktives Cäsium  $^{137}\text{Cs}$  verwenden, das pro Gramm und pro Sekunde ca.  $3 \cdot 10^{12}$  Elektronen aussendet. Nehmen Sie zur Verwendung dieser Alternative in einer Arztpraxis kritisch Stellung, indem Sie je zwei Vor- und Nachteile dieser Alternative nennen.

## 2. Mikrowellen im Mobilfunkstandard 5G

Bei einem Experiment mit zwei phasengleichen Sendern werden Mikrowellen der Frequenz 30 GHz zur Interferenz gebracht.

- 2 a) Zeigen Sie, dass die Wellenlänge dieser Mikrowellen 1,0 cm beträgt.
- 5 b) Abb. 3a zeigt einen Ausschnitt der in sehr großem Abstand zu erwartenden Intensitätsverteilung in Abhängigkeit vom Winkel  $\alpha$  (s. Abb. 3b). Berechnen Sie den Abstand der beiden Sender.



- 4 c) Erläutern Sie qualitativ die Veränderung der Winkel, unter denen Maxima beobachtet werden können, falls die Frequenz der Mikrowellen sinkt.
- 3 d) Im Experiment werden nun an den mit Kreuzen markierten Stellen weitere phasengleiche Sender platziert (Abb. 3b), sodass eine Reihe von zehn gleichartigen, äquidistanten Sendern entsteht. Zeichnen Sie qualitativ in Abbildung 3a das sich nun ergebende Interferenzmuster ein.

Der neue Mobilfunkstandard 5G nutzt Mikrowellen der Frequenz 30 GHz. Durch die im Vergleich zum bisherigen LTE-Standard fünfzehnfache Frequenz können mehr Daten in gleicher Zeit übertragen werden.

- 3 e) Die von einem Sender auf einen Empfänger übertragene Leistung ist bei sonst vergleichbaren Bedingungen proportional zum Quadrat der Wellenlänge. Vergleichen Sie unter diesem Aspekt quantitativ die beiden Mobilfunkstandards.
- 4 f) Das Vorgehen aus Teilaufgabe d wird benutzt, um die auf einen Empfänger übertragene Leistung zu erhöhen. Erläutern Sie, dass dieses Vorgehen ohne zusätzliche Maßnahmen für den Mobilfunk nicht geeignet ist.
- 5 g) Künftig sollen LKWs hintereinander „im Verband vernetzt autonom fahren“. Dabei soll der erste LKW Informationen zu seinem Bewegungszustand an nachfolgende LKWs übertragen. Im Vergleich zum LTE-Standard gelingt es mit 5G, die Latenzzeit (vereinfacht: die Zeitspanne, bis die Technik anspricht) von 70 ms auf 1,0 ms zu reduzieren. Beurteilen Sie unter diesem Aspekt die Eignung der beiden Mobilfunkstandards für das vernetzte Fahren. Gehen Sie dabei von einem Abstand der LKWs von nur 1,0 m auf gerader Strecke und von einer LKW-Geschwindigkeit von 80 km/h aus.

### 1. Elektrisches Feld bei einem Gewitter

Die Unterseite einer Gewitterwolke hat den Flächeninhalt  $A = 9,5 \text{ km}^2$  und befindet sich in  $500 \text{ m}$  Höhe über dem Erdboden. Sie lässt sich zusammen mit der Erde als Plattenkondensator auffassen. Die Wolke sei zunächst mit  $Q = 12 \text{ C}$  positiv geladen.

- 4 a) Fertigen Sie eine beschriftete Skizze der Anordnung an und zeichnen Sie den Verlauf der elektrischen Feldlinien zwischen Wolke und Erdboden ein. Geben Sie zwei geometrische Bedingungen an, unter denen dieses Feld als homogen betrachtet werden kann.
- 6 b) Zeigen Sie, dass für die Feldstärke im homogenen elektrischen Feld  $E = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{A}$  gilt, und berechnen Sie deren Betrag für obige Anordnung.

[zur Kontrolle:  $E = 0,14 \text{ MV/m}$ ]

Abb. 1 zeigt die Verformung der Äquipotentiallinien des Feldes durch die Metallkuppel einer Sternwarte.

- 4 c) Ergänzen Sie in Abb. 1 die Feldlinien durch die sieben mit Kreuzen gekennzeichneten Punkte und begründen Sie mithilfe der Abbildung, dass sich in der unmittelbaren Nähe der Kuppel die Feldstärke erhöht.

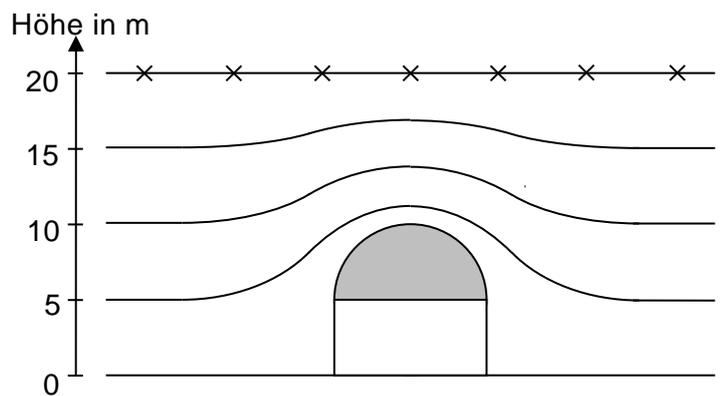


Abb.1

- 7 d) Geben Sie für die eingezeichneten Äquipotentiallinien die Werte des jeweiligen Potentials an, wenn das Potential der Erde  $0 \text{ V}$  beträgt, und schätzen Sie damit den Betrag der elektrischen Feldstärke unmittelbar oberhalb der Kuppel ab. Entscheiden Sie aufgrund Ihres Ergebnisses, ob es zu einem Blitz kommen kann, wenn dieser ab einem Feldstärkewert von  $1,2 \text{ kV/mm}$  auftritt.

Schließlich kommt es zu einer teilweisen Entladung der Wolke durch einen Blitz, der  $60\%$  der Gesamtladung der Wolke transportiert. Abb. 2 zeigt schematisch aber maßstäblich zwei Momentaufnahmen dieses Blitzes im zeitlichen Abstand von  $3,0 \mu\text{s}$ .

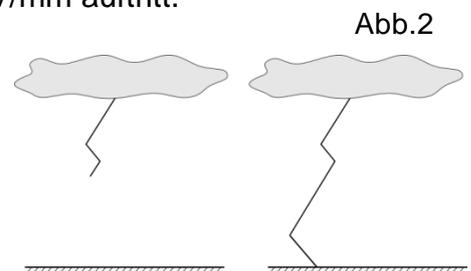


Abb.2

- 5 e) Schätzen Sie mithilfe der Abb. 2 die mittlere Stromstärke dieses Blitzes ab. Gehen Sie dazu stark vereinfachend davon aus, dass der Ladungstransport 50mal länger dauert als die Zeit, die der optisch wahrnehmbare Blitz von der Wolke bis zum Einschlag in den Boden benötigt.

(Fortsetzung nächste Seite)

## 2. Geschwindigkeitsmessung beim Fahrrad

Zur Demonstration der Geschwindigkeitsmessung eines Fahrrads wird ein Neodym-Magnet an einer Speiche des fest eingespannten Vorderrads befestigt. Dieser bewegt sich bei jeder Umdrehung des Rades näherungsweise geradlinig an einer Spule vorbei. Die Spule besitzt eine quadratische Querschnittsfläche mit der Seitenlänge 1,0 cm und hat  $N = 500$  Windungen.

Für die theoretische Betrachtung wird davon ausgegangen, dass das Feld des Magneten mit der magnetischen Flussdichte  $B = 0,80$  T homogen und auf einen quadratischen Bereich mit der Seitenlänge  $\ell = 0,50$  cm beschränkt ist.

Der Magnet wird mit der Geschwindigkeit  $v = 1,0$  m/s nahe an der Spule vorbeigeführt; zum Zeitpunkt  $t = 0$  s ist er 2,0 cm von der Spule entfernt. Abb. 3 zeigt vereinfacht die Anordnung.

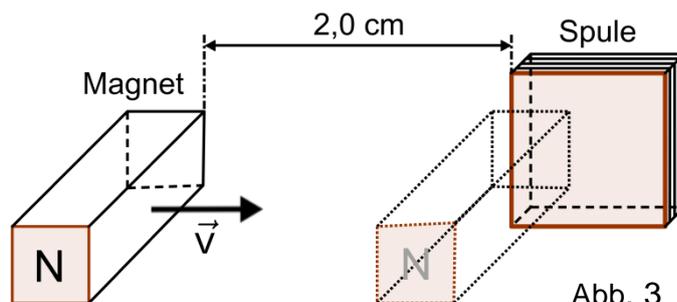


Abb. 3

- 5 a) Begründen Sie, dass im Intervall  $20 \text{ ms} \leq t \leq 25 \text{ ms}$  an den Spulenenenden eine Spannung induziert wird.
- 5 b) Zeichnen Sie den Verlauf des magnetischen Flusses  $\Phi$  durch die Spule in einem  $t$ - $\Phi$ -Diagramm im Intervall  $0 \text{ ms} \leq t \leq 55 \text{ ms}$ .
- 7 c) Eine Schülerin entnimmt einer Formelsammlung die Beziehung  $|U_{\text{ind}}| = N B \ell v$ . Leiten Sie diese Beziehung aus dem allgemeinen Induktionsgesetz her und geben Sie die Zeitintervalle an, in denen mit obigen Werten der Betrag der Induktionsspannung berechnet werden kann.
- 4 d) Bestimmen Sie für das Intervall  $0 \text{ ms} \leq t \leq 55 \text{ ms}$  die Werte der induzierten Spannung und fertigen Sie das  $t$ - $U_{\text{ind}}$ -Diagramm an.

Abb. 4 zeigt den realen Spannungsverlauf mit zwei aufeinanderfolgenden Messsignalen.

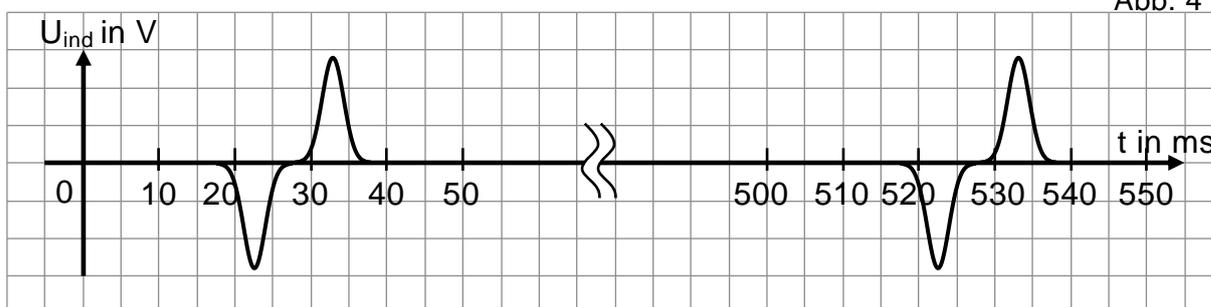


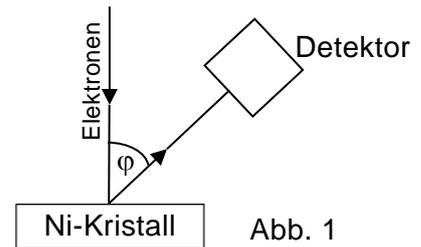
Abb. 4

- 5 e) Beschreiben Sie zwei Unterschiede zwischen dem idealisierten Diagramm aus Teilaufgabe d und dem realen Spannungsverlauf (Abb. 4) im Intervall von 15 ms bis 40 ms und begründen Sie diese.
- 4 f) Bestimmen Sie mithilfe des Diagramms in Abb. 4 die Bahngeschwindigkeit eines Punktes auf der Reifenoberfläche des Vorderrads (Durchmesser 72 cm) in km/h.
- 4 g) Erläutern Sie zwei Veränderungen des realen Spannungsverlaufs, wenn sich das Rad mit doppelter Winkelgeschwindigkeit dreht.

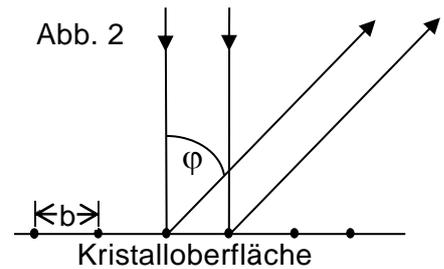
## Ph 12 – 1

### 1. Experiment von Davisson und Germer

Im Jahr 1927 wiesen Davisson und Germer die Welleneigenschaft von Elektronen experimentell nach. Bei ihrem Experiment treffen Elektronen senkrecht auf die Oberfläche eines Nickelkristalls (s. Abb. 1). Die regelmäßige Anordnung der Atome in der Oberfläche wirkt wie ein Reflexionsgitter mit der Gitterkonstanten  $b = 0,215 \text{ nm}$  (s. Abb. 2). Ein Detektor misst die Intensität in Abhängigkeit vom Winkel  $\varphi$ .



In einem ersten Versuch, bei dem zunächst ruhende Elektronen durch die Spannung  $U_B$  beschleunigt werden, kann ein deutliches Maximum bei  $\varphi_0 = 51^\circ$  festgestellt werden.



8

- a) Zeigen Sie, dass (bei nicht-relativistischer Rechnung) zwischen der angelegten Beschleunigungsspannung  $U_B$  und der de Broglie-Wellenlänge  $\lambda$  der Elektronen

der Zusammenhang  $\lambda^2 = \frac{h^2}{2 \cdot m_e \cdot e \cdot U_B}$  gilt, und geben Sie die Bedeutung der in

dieser Formel verwendeten Konstanten an. Berechnen Sie den Wert von  $\lambda$  für  $U_B = 54 \text{ V}$ .  
[zur Kontrolle:  $\lambda = 0,17 \text{ nm}$ ]

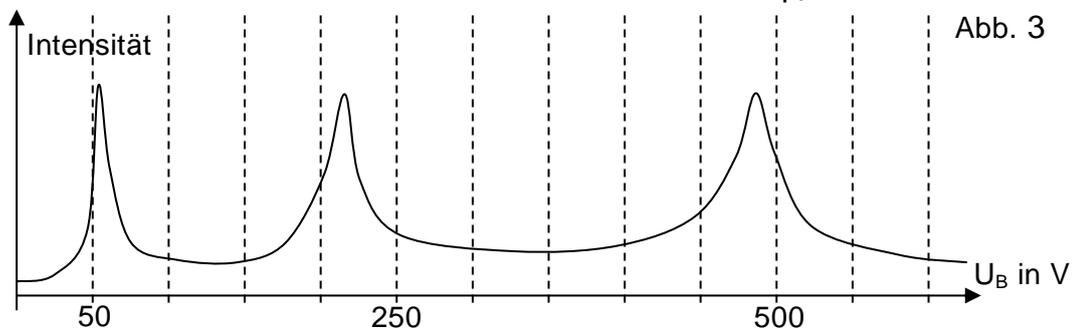
5

- b) Tragen Sie in Abb. 2 den Gangunterschied zwischen den beiden eingezeichneten Strahlen ein und bestätigen Sie mithilfe des Gangunterschieds für den Winkel  $\varphi_0$  den in Teilaufgabe a berechneten Wert von  $\lambda$ . Geben Sie auch die Ordnung des betrachteten Maximums an.

3

- c) Erläutern Sie die Veränderung des Winkels, unter dem das Maximum erster Ordnung beobachtet wird, wenn die Beschleunigungsspannung  $U_B$  erhöht wird.

In einem zweiten Experiment wird die Wellenlänge der Elektronen durch Änderung von  $U_B$  variiert und die Intensität bei dem festen Winkel  $\varphi_0$  ermittelt.



8

- d) Erklären Sie den in Abb. 3 dargestellten Verlauf der gemessenen Intensität in Abhängigkeit von  $U_B$ . Verifizieren Sie auch die Lage der Maxima.

4

- e) Beschreiben Sie, was nach dem klassischen Teilchenbild für das Diagramm des zweiten Experiments zu erwarten wäre, und zeigen Sie einen Widerspruch zum klassischen Teilchenbild auf, der sich aus dem Ergebnis des Experiments ergibt.

(Fortsetzung nächste Seite)

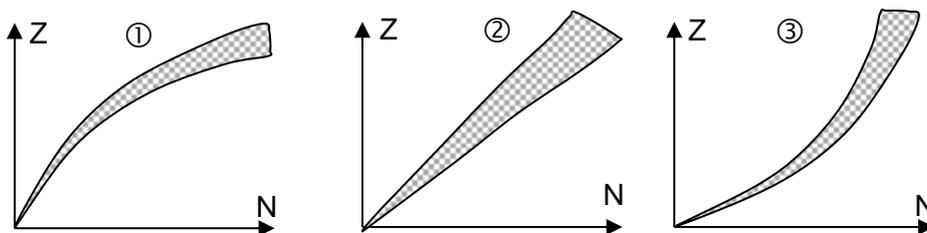
## 2. Das künstliche Element mit der Ordnungszahl 117

Im Jahr 2010 wurde in einem russisch-amerikanischen Gemeinschaftsprojekt erstmals das Element mit der Ordnungszahl 117 erzeugt. Dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt gelang die Erzeugung dieses Elements im Jahr 2014 ebenfalls. Um das im deutschsprachigen Raum inzwischen als Tenness (Ts) bezeichnete Element zu erhalten, wurde das Berkelium-Isotop  $^{249}\text{Bk}$  (Halbwertszeit 330 Tage) mit dem Calcium-Isotop  $^{48}\text{Ca}$  beschossen. Durch Kernfusion entsteht unter Abgabe von Neutronen das instabile Isotop  $^{294}\text{Ts}$ .

- 2 a) Geben Sie die Reaktionsgleichung zur Erzeugung von  $^{294}\text{Ts}$  an.
- 4 b) Die Reaktion ist endotherm, der Q-Wert beträgt  $-194\text{ MeV}$ . Berechnen Sie die Atommasse von  $^{294}\text{Ts}$  in u.  
Gegebene Atommassen:  $m(^{48}\text{Ca}) = 47,952522\text{ u}$ ;  $m(^{249}\text{Bk}) = 249,074987\text{ u}$
- 6 c) Für das Experiment wurden  $13\text{ mg } ^{249}\text{Bk}$  hergestellt. Berechnen Sie die Anfangsaktivität.
- 4 d) Zwischen der Herstellung und der Verwendung des Berkeliums lagen 17 Tage. Berechnen Sie den Anteil des Berkeliums, der bereits vor Versuchsbeginn zerfallen ist.
- 4 e) Nach der klassischen Vorstellung könnte bei den verwendeten Energien keine ausreichende Menge an  $^{294}\text{Ts}$  erzeugt werden. Wegen des Tunneleffekts läuft die Reaktion aber deutlich häufiger ab, als es klassisch zu erwarten wäre. Erklären Sie den Tunneleffekt in diesem Zusammenhang anhand des Potentialtopfmodells für Atomkerne.

2010 war zunächst nicht bekannt, welches Element durch den Beschuss von  $^{249}\text{Bk}$  mit  $^{48}\text{Ca}$  entstand. Die Untersuchung der emittierten Strahlung zeigte, dass dieses Element ausschließlich durch  $\alpha$ -Zerfälle in das Dubnium-Isotop  $^{270}\text{Db}$  übergeht.

- 3 f) Beschreiben Sie, wie aus dem Spektrum der emittierten  $\alpha$ -Strahlung auf die Existenz von  $^{294}\text{Ts}$  geschlossen werden kann, wenn für alle Elemente mit Ordnungszahlen  $Z \leq 115$  die Spektren der  $\alpha$ -Strahlung bekannt sind.
- 3 g) Der  $^{270}\text{Db}$ -Kern zerfällt durch spontane Spaltung. Dabei werden neben zwei großen Bruchstücken im Mittel drei Neutronen frei. Wählen Sie aus den Diagrammen ①, ② oder ③ dasjenige aus, das den Zusammenhang zwischen der Neutronen- und der Protonenzahl richtig wiedergibt, und erklären Sie die Abgabe der Neutronen mit Hilfe dieses Diagramms.



- 6 h) Nennen Sie die vier fundamentalen Wechselwirkungen des Standardmodells der Teilchenphysik und erläutern Sie jeweils deren Bedeutung für die Stabilität schwerer Kerne.

### 1. Rauchmelder retten Leben

Rauchmelder sind seit 2018 in bayerischen Privathaushalten gesetzlich vorgeschrieben. Bei sogenannten Ionisationsrauchmeldern wird ein radioaktives Präparat verwendet. Abb. 1 zeigt den Aufbau in vereinfachter Form. Die radioaktive Strahlung ionisiert die Luft zwischen zwei Elektroden, was zu einem Stromfluss führt. Rauch in diesem Bereich verändert die gemessene Stromstärke und löst Alarm aus. Üblicherweise wird in solchen Rauchmeldern das Americium-Isotop  $^{241}\text{Am}$  ( $\alpha$ -Strahler, Halbwertszeit: 432 Jahre) verwendet.

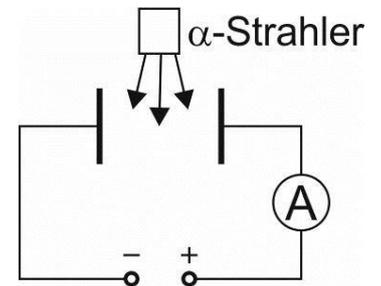


Abb. 1

- 3 a) Erklären Sie, dass die  $\alpha$ -Strahlung Luftmoleküle ionisieren kann und dadurch zwischen den Elektroden Strom fließen kann.
- 5 b) Geben Sie die Zerfallsgleichung von  $^{241}\text{Am}$  an und berechnen Sie die beim Zerfall freigesetzte Energie. [zur Kontrolle: 5,6 MeV]

Es ist gesetzlich vorgegeben, dass die von einem Menschen in 10 cm Abstand vom Rauchmelder aufgenommene Äquivalentdosis 1,0  $\mu\text{Sv}$  pro Stunde nicht überschreiten darf. Gehen Sie im Folgenden von einer  $^{241}\text{Am}$ -Aktivität von 40 kBq aus.

- 6 c) Berechnen Sie die im Rauchmelder enthaltene Masse an  $^{241}\text{Am}$ .
- 4 d) Berechnen Sie die Äquivalentdosis, die eine 75 kg schwere Person in einer Stunde aufnehmen würde, wenn sie die gesamte vom  $^{241}\text{Am}$  freigesetzte Strahlung absorbieren würde. [zur Kontrolle: 35  $\mu\text{Sv}$ ]
- 4 e) Erläutern Sie zwei mögliche Aspekte, die dazu beitragen, dass bei einem Rauchmelder trotzdem der gesetzliche Grenzwert eingehalten wird.
- 6 f) In der folgenden Tabelle sind physikalische Eigenschaften verschiedener radioaktiver Isotope aufgeführt. Begründen Sie damit, dass keines dieser Isotope als Alternative für  $^{241}\text{Am}$  Verwendung in Rauchmeldern findet.

Isotop	Zerfallsart	Zerfallsenergie	Halbwertszeit
$^{248}\text{Bk}$	$\alpha$	5,8 MeV	10 a
$^{248}\text{Cm}$	$\alpha$	5,2 MeV	$348 \cdot 10^3$ a
$^{137}\text{Cs}$	$\beta^-$	1,2 MeV	30 a

- 4 g) In Privathaushalten sind Rauchmelder mit radioaktivem Präparat mittlerweile von Geräten mit einem optischen Messprinzip verdrängt worden. Diese nutzen die Streuung von Licht durch Rauch aus und arbeiten vergleichbar zuverlässig. Ein Verbot der Ionisationsrauchmelder in Privathaushalten wird diskutiert. Bewerten Sie ein solches Verbot hinsichtlich Einsatz und Entsorgung dieser Geräte aus Sicht des Strahlenschutzes.

## 2. Untersuchung von Quanten-Dashes

In Experimenten werden häufig Helium-Neon-Laser benutzt. Das Laserlicht entsteht beim Übergang des Neon-Atoms von einem Anregungszustand in den Grundzustand (Abb. 1).

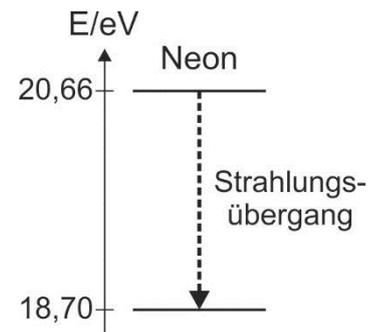


Abb. 1

- 2 a) Geben Sie begründet die Farbe des Lichts an, das bei dem beschriebenen Übergang entsteht.
- 4 b) Der Laser emittiert Lichtpulse der Dauer 50 ms bei einer Lichtleistung von 600 mW. Berechnen Sie die Anzahl der Photonen pro Lichtpuls.

Forschern ist es gelungen, Emissions- und Absorptionseigenschaften von Atomen nachzubilden. Dazu nutzen sie längliche Strukturen in Halbleitermaterial, sogenannte Quanten-Dashes (Abb. 2). Darin können sich Elektronen zwar frei in Längsrichtung, aber nicht in die beiden anderen Richtungen bewegen. Die Elektronen können die Quanten-Dashes nicht verlassen. Im Folgenden wird zunächst ein einzelnes Elektron in einem Quanten-Dash der Länge 1,3 nm betrachtet.

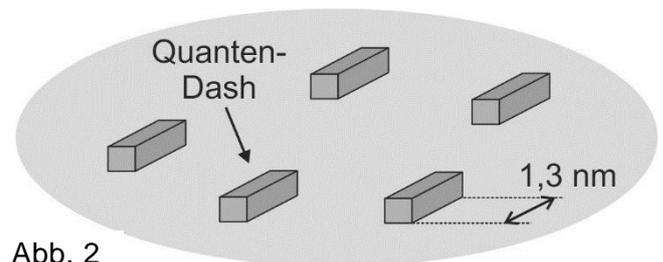


Abb. 2

- 7 c) Entscheiden Sie begründet, mit welchem Modell sich die Bewegung des freien Elektrons im Quanten-Dash richtig beschreiben lässt. Folgern sie daraus, welche der beiden Formeln  $E_n = \frac{1}{8} \cdot \frac{h^2 \cdot n^2}{m_e \cdot L^2}$  oder  $E_n = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{R_H \cdot h \cdot c}{n^2}$  die Energiewerte des Systems besser beschreibt, und erläutern Sie die in der gewählten Formel vorkommenden Größen.
- 5 d) Berechnen Sie die Energiewerte für die ersten fünf Niveaus und zeichnen Sie das zugehörige Energieniveauschema.
- 6 e) Der Quanten-Dash mit dem freien Elektron kann im Gegensatz zu Atomen auch mit einem Photon angeregt werden, dessen Energie größer ist als die Energiedifferenz zweier Niveaus, da überschüssige Energie durch den Halbleiter aufgenommen wird. Zur Anregung wird der oben beschriebene Helium-Neon-Laser verwendet. Bestimmen Sie den größtmöglichen Anregungszustand, wenn nur vom Grundzustand aus angeregt wird, und zeichnen Sie dazu das Emissionsspektrum des Quanten-Dash in Abhängigkeit von der Emissionswellenlänge.
- 4 f) Die Längen der Quanten-Dashes weisen in der Praxis geringe Unterschiede auf. Begründen Sie die zu erwartenden Veränderungen im Spektrum von Teilaufgabe e.

## Ph 12 – Astrophysik 1

### 1. Merkur

- 2 a) Nikolaus Kopernikus beklagte in seinem Werk „De revolutionibus orbium coelestium“ (1543), dass er Merkur nur selten gut beobachten konnte. Erläutern Sie zwei Ursachen dafür, dass die Beobachtung des Merkur von der Erde aus schwierig ist.
- 5 b) Als innerer Planet wandert Merkur manchmal von der Erde aus gesehen vor der Sonnenscheibe vorbei. Der letzte solche Merkurtransit fand am 11. November 2019 statt. Begründen Sie, dass nicht bei jeder unteren Konjunktion ein Merkurtransit stattfindet, und zeigen Sie, dass am 13. November 2032 erneut ein Merkurtransit zu erwarten ist.
- 4 c) Berechnen Sie die Entfernung des Merkur von der Sonne im Aphel und im Perihel. [zur Kontrolle:  $r_{\text{Aphel}} = 0,47 \text{ AE}$ ;  $r_{\text{Perihel}} = 0,31 \text{ AE}$ ]
- 3 d) Aufgrund der Exzentrizität seiner Bahn variiert die Sonneneinstrahlung auf Merkur im Verlauf eines Merkurjahres deutlich. Zeigen Sie, dass die Bestrahlungsstärke im Perihel etwa 2,3-mal so groß ist wie im Aphel.
- 4 e) Unter Astronomen ist strittig, ob man aufgrund des in Teilaufgabe d festgestellten Sachverhalts von Jahreszeiten auf Merkur sprechen kann. Stellen Sie diesbezüglich eine Hypothese auf und begründen Sie diese. Berücksichtigen Sie bei Ihren Überlegungen auch die Ursachen, die auf der Nordhalbkugel der Erde zur Entstehung der Jahreszeiten führen, sowie die Tatsache, dass die Rotationsachse des Merkur senkrecht zu seiner Bahnebene steht.
- Am 20. Oktober 2018 startete BepiColombo, die erst dritte Raummission zum Merkur. BepiColombo wird voraussichtlich am 5. Dezember 2025 in eine Umlaufbahn um Merkur einschwenken und dort auch die europäische Sonde MPO (Mercury Planetary Orbiter) freisetzen. Diese soll den Merkur mindestens ein Jahr lang auf einer annähernd kreisförmigen Bahn in durchschnittlich 950 km Höhe über der Planetenoberfläche umlaufen.
- 4 f) Berechnen Sie die Umlaufdauer  $T_{\text{MPO}}$  von MPO auf dieser Bahn. [zur Kontrolle:  $T_{\text{MPO}} = 2,32 \text{ h}$ ]
- Die Umlaufbahn von MPO wird über die beiden Pole des Merkur führen. So kann ohne eine Änderung der Satellitenbahn im Laufe der Zeit die gesamte Oberfläche untersucht werden.
- 2 g) Zeigen Sie, dass Merkur sich während eines Umlaufs der Sonde um  $0,593^\circ$  dreht.
- 3 h) Nehmen Sie an, dass eine Kamera in der Sonde bei jeder Umrundung einen Streifen der Merkuroberfläche filmt. Dabei fügen sich die Streifen am Äquator nahtlos aneinander, so dass mithilfe des Rotationswinkels aus Teilaufgabe g die Anzahl der Umläufe ermittelt werden kann, die die Sonde benötigt, um die gesamte Oberfläche zu kartografieren. Bestimmen Sie diese Anzahl.

(Fortsetzung nächste Seite)

## 2. Hubble

Noch im Jahre 1920 war unklar, ob die nebelartigen Strukturen, die wir heute als Galaxien kennen, eigenständige Sternsysteme außerhalb unserer Milchstraße sind. Viele Spezialisten hielten sie für Strukturen innerhalb unserer Milchstraße. Erst die Beobachtung eines Cepheiden in der Andromeda-Galaxie M31 im Oktober 1923 durch Edwin Hubble klärte diese Frage.

6

a) Fertigen Sie eine Skizze der Seitenansicht unserer Galaxie an. Tragen Sie den ungefähren Ort unserer Sonne ein, bezeichnen Sie die typischen Bereiche und geben Sie deren Größenordnungen an.

7

b) Abb. 1 zeigt die Lichtkurve des ersten Cepheiden, den Hubble in M31 beobachtet hat. Bestimmen Sie damit die Entfernung von M31 und begründen Sie, dass dadurch die oben erwähnte Streitfrage entschieden war.

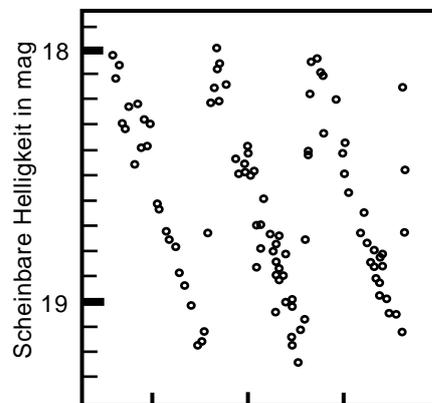


Abb. 1 Jul Aug Sep Okt

Durch seine Beobachtungen stellte Hubble fest, dass die Radialgeschwindigkeit einer Galaxie mit ihrer Entfernung zunimmt. Die daraus abgeleitete Hubble-Beziehung  $v = H_0 \cdot r$  wird wegen ihrer fundamentalen Bedeutung für unser Weltbild bis heute immer wieder überprüft, indem die Radialgeschwindigkeit  $v$  und die Entfernung  $r$  einer Galaxie bestimmt werden

und der sich daraus ergebende Wert für die Hubble-Konstante  $H_0$  berechnet wird. In Abb. 2 sind Werte für  $H_0$  dargestellt, die mit dem Hubble-Space-Teleskop in den Jahren 1993 bis 2001 ermittelt wurden. Jeder Datenpunkt repräsentiert eine Galaxie.

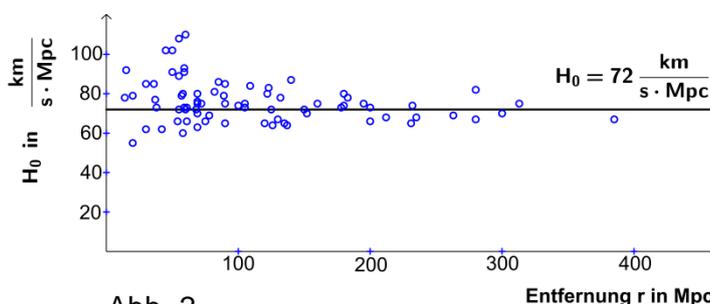


Abb. 2

4

c) Erläutern Sie eine Methode zur Bestimmung der Radialgeschwindigkeit von Galaxien.

5

d) Zur Entfernungsmessung weit entfernter Galaxien werden Supernovae vom Typ Ia verwendet. Erläutern Sie, dass diese als Standardkerzen dienen und für Messungen sehr großer Entfernungen gut geeignet sind.

2

e) Bestimmen Sie aus Abb. 2 für die Galaxie mit der größten Entfernung die Radialgeschwindigkeit.

5

f) Erläutern Sie, inwiefern Abb. 2 die Expansion des Raums beschreibt. Beschreiben und deuten Sie den offensichtlichen Unterschied für große und kleine Entfernungen.

4

g) Erklären Sie, dass das Alter des Universums durch  $1/H_0$  abgeschätzt werden kann, wenn man eine gleichförmige Expansion des Universums zugrunde legt. Berechnen Sie mit diesem Ansatz und dem Wert  $H_0 = 72 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$  das Alter des Universums in Jahren.

## Ph 12 – Astrophysik 2

### 1. Regulus

Der Stern Regulus im Sternbild Löwe ist 77,6 Lj von der Erde entfernt. Er besitzt den 3,24-fachen Radius der Sonne und die relative Leuchtkraft  $L^* = L / L_{\odot} = 138$ .

3 a) Zeigen Sie, dass die Oberflächentemperatur von Regulus  $11 \cdot 10^3$  K beträgt. Nehmen Sie dazu an, dass seine Oberfläche ein Schwarzer Strahler ist.

7 b) Ergänzen Sie im nebenstehenden Hertzsprung-Russell-Diagramm (Abb. 1) die fehlenden Spektralklassen und tragen Sie die Positionen von Sonne und Regulus sowie den Bereich der Roten Riesen und den Bereich der Weißen Zwerge ein. Nennen Sie zwei Merkmale der Sterne, die sich im gleichen Entwicklungsstand wie Regulus befinden.

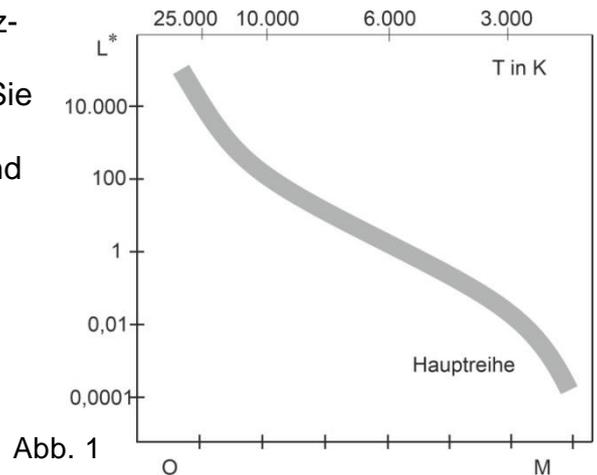


Abb. 1

4 c) Die absolute Helligkeit von Regulus beträgt  $-0,57$ . Zeigen Sie, dass sich rechnerisch für die scheinbare Helligkeit 1,31 ergibt. Durch Messungen ergibt sich für die scheinbare Helligkeit jedoch 1,36. Nennen Sie einen möglichen Grund für diese Abweichung.

4 d) Abb. 2 zeigt die spektrale Intensitätsverteilung der Sonne. Ergänzen Sie den für das Auge sichtbaren Bereich und tragen Sie qualitativ den Verlauf der zu Regulus gehörigen Kurve ein. Geben Sie an, ob Regulus dem Betrachter rötlich oder bläulich erscheint.

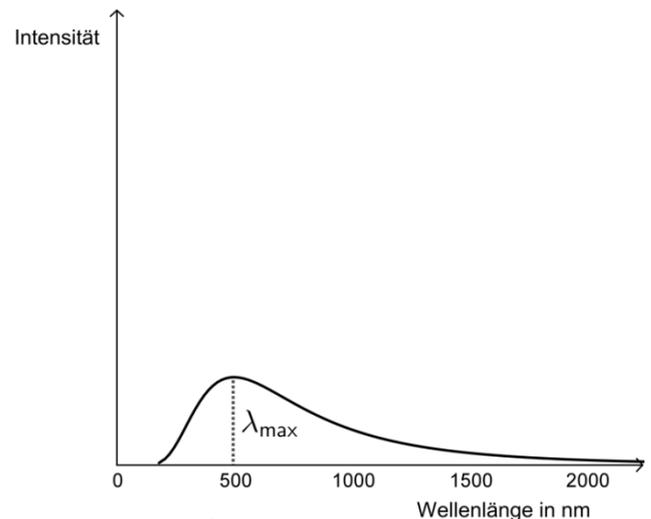


Abb. 2

### 2. Die Sonne

Am 12. August 2018 startete die Raumsonde „Parker Solar Probe“ der NASA zur Sonne. Das Raumfahrzeug wird der Sonne näher kommen als alle seine Vorgänger. Man verspricht sich von dieser Mission insbesondere neue Erkenntnisse über die Verhältnisse in der äußeren Atmosphäre (Korona) unseres Zentralgestirns.

(Fortsetzung nächste Seite)

- 7 a) In einer vereinfachten Modellvorstellung lässt sich der Aufbau der Sonne in Zonen gliedern. Fertigen Sie eine beschriftete Skizze der Zonen an und beschreiben Sie die wesentlichen Vorgänge, die den Energietransport vom Zentralbereich der Sonne bis zur Oberfläche ermöglichen.
- 6 b) Durch Fusion von vier Protonen zu einem Heliumkern wird in der Sonne Energie freigesetzt. Geben Sie die Reaktionsgleichung an; die Angabe von Zwischenprodukten ist dabei nicht nötig. Zeigen Sie, dass bei diesem Prozess eine Energie von 24,7 MeV frei wird, und berechnen Sie die Energie  $E$ , welche die Fusion von 1,0 kg Wasserstoff liefert. [zur Kontrolle:  $E = 5,9 \cdot 10^{14}$  J]
- 4 c) Eine der ersten Theorien ging von der Annahme aus, dass die Energie der Sonne aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammt. Bei vollständiger Verbrennung von 1,0 kg fossilen Brennstoffs werden  $5,0 \cdot 10^7$  J Energie freigesetzt. Untersuchen Sie, ob eine solche Verbrennung die Energie für den gesamten bisherigen Lebenszeitraum der Sonne von 4,5 Milliarden Jahren hätte liefern können, wenn deren Leuchtkraft für diesen Zeitraum als konstant vorausgesetzt wird.
- 4 d) Schätzen Sie ab, um wie viel Prozent die Masse des Wasserstoffs in 4,5 Milliarden Jahren durch Kernfusion gesunken ist. Gehen Sie davon aus, dass die Sonne zur Zeit ihrer Entstehung zu 75 % aus Wasserstoff bestand.
- 4 e) Neben der Umstellung von fossilen auf regenerative Energieträger könnte die Kernfusion in Zukunft eine weitere Option zur Energieversorgung der Welt darstellen. Bewerten Sie diese Option unter Berücksichtigung der bisherigen Teilaufgaben sowie eines weiteren, nichtphysikalischen Aspekts.
- Die Sonde „Parker Solar Probe“ soll am 24. Dezember 2024 ihren sonnennächsten Punkt erreichen. Ihre Entfernung zur Sonne beträgt dann  $8,86 \cdot R_{\odot}$ . Danach bewegt sich die Sonde für einige Zeit auf einer elliptischen Bahn mit einer Umlaufdauer von 88 Tagen um die Sonne. Ein ebener Hitzeschild, der immer zur Sonne hin gerichtet ist, schützt die Sonde vor zu starker Hitze durch die Sonnenstrahlung.
- 5 f) Berechnen Sie die maximale Entfernung  $r_{\max}$  der Sonde vom Sonnenmittelpunkt in Sonnenradien. [zur Kontrolle:  $r_{\max} = 1,6 \cdot 10^2 R_{\odot}$ ]
- 5 g) Schätzen Sie unter Annahme einer Albedo von 0,5 die Temperatur des Hitzeschildes im sonnennächsten Punkt nach oben ab. Nehmen Sie hierzu stark vereinfachend an, dass der Hitzeschild die aufgenommene Energie ausschließlich in die sondenabgewandte Richtung wieder abgibt. Nennen Sie die weiteren Annahmen, die Sie dabei machen. [zur Kontrolle:  $T = 1,63 \cdot 10^3$  K]
- 4 h) Der Hitzeschild hielt in Tests Temperaturen von bis zu 1650 °C stand. Beurteilen Sie, inwieweit die Temperaturbeständigkeit des Hitzeschildes sowie die Bahnform geeignet gewählt sind.
- 3 i) In der Nähe des Perihels muss die Sonde die Sonnenkorona durchqueren, deren Temperatur etwa eine Million Grad Celsius beträgt. Erklären Sie, dass die Sonde die Korona trotz der hohen Temperatur unbeschadet durchqueren kann.