

Abiturprüfung 2023

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

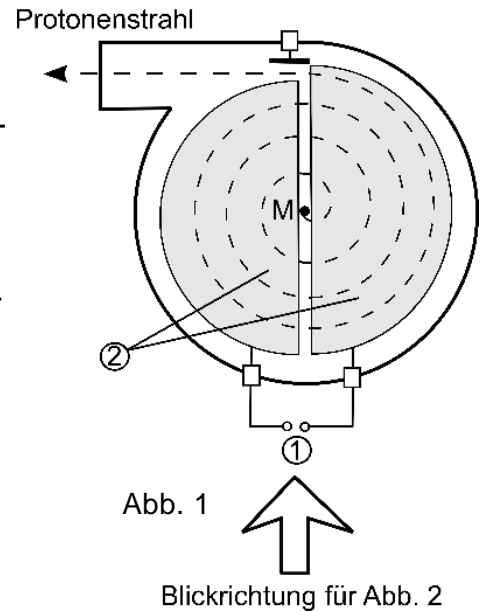
zur Bearbeitung aus.

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

Name: _____

1. Zyklotron

Zur Beschleunigung von Protonen wird häufig ein Zyklotron verwendet. Bei dem in Abb. 1 dargestellten Zyklotron befindet sich im Mittelpunkt M eine Protonenquelle. Gehen Sie zunächst davon aus, dass die Protonen parallel zur Zeichenebene emittiert werden und das Zyklotron mit einem homogenen Magnetfeld betrieben wird. Relativistische Effekte können für die Protonen vernachlässigt werden.



- 6 a) Beschreiben Sie den Aufbau und die Funktionsweise des dargestellten Zyklotrons. Gehen Sie dabei insbesondere auf die Bauteile ① und ② ein.
- 5 b) Berechnen Sie den Betrag der Geschwindigkeit eines Protons, das auf eine kinetische Energie von 4,5 MeV beschleunigt wurde. Bestimmen Sie ferner die Anzahl der dazu erforderlichen Umläufe im Zyklotron, wenn der Scheitelwert der anliegenden Wechselspannung $U_{\max} = 50 \text{ kV}$ beträgt.
- 6 c) Ein Proton der Masse m durchläuft im Magnetfeld mit der magnetischen Flussdichte B eine Kreisbahn mit Radius r . Leiten Sie mithilfe eines geeigneten Kraftansatzes folgende Beziehung für die kinetische Energie E_{kin} des Protons her:

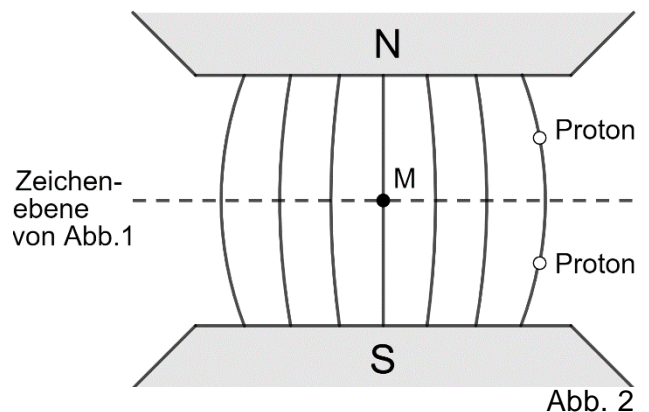
$$E_{\text{kin}} = \frac{e^2 \cdot r^2 \cdot B^2}{2 \cdot m}. \text{ Schätzen Sie für } B = 1,5 \text{ T und } E_{\text{kin}} = 4,5 \text{ MeV die Abmessung des Zyklotrons ab.}$$

- 2 d) In der Realität können die von der Quelle emittierten Protonen auch eine geringe Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Zeichenebene von Abb. 1 haben. Beschreiben Sie die Bahnen derartiger Protonen im Zyklotron.

- 5 e) Mit einem inhomogenen Magnetfeld kann erreicht werden, dass auch die in Teilaufgabe d beschriebenen Protonen im Protonenstrahl in der Zeichenebene von Abb. 1 verbleiben. Abb. 2 zeigt vereinfacht eine entsprechende Anordnung bei seitlicher Beobachtung (vgl. Blickrichtungspfeil in Abb. 1).

Ergänzen Sie in Abb. 2 zunächst die Richtung der Magnetfeldlinien

und für beide Protonen die jeweils wirkende Kraft, wenn nur die Geschwindigkeitskomponente in die Zeichenebene von Abb. 2 hinein betrachtet wird. Erklären Sie damit das Verbleiben des Protonenstrahls in der Zeichenebene von Abb. 1.



(Fortsetzung nächste Seite)

6

- f) In der Protonenquelle werden die Protonen aus Wasserstoffgas durch Stoßionisation mit beschleunigten Elektronen gewonnen (vgl. Abb. 3). Zu medizinischen Zwecken werden neben Protonen auch andere Teilchenstrahlen eingesetzt. Beschreiben

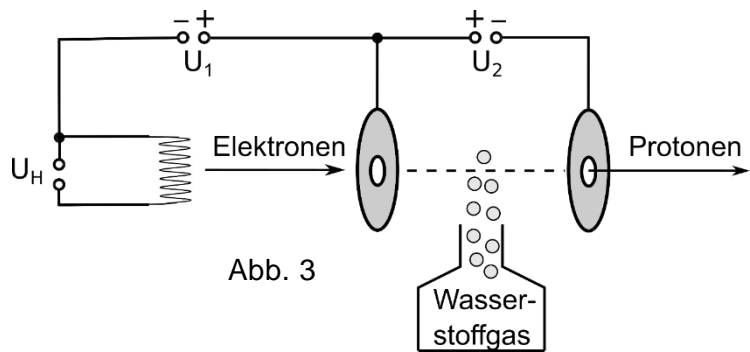


Abb. 3

Sie erforderliche Änderungen an der Protonenquelle, um sie zu einer Elektronenquelle bzw. α -Teilchenquelle umzubauen. Entscheiden Sie anschließend für beide Fälle begründet, ob auch diese Teilchen mit dem oben beschriebenen Zyklotron (gleiche Abmessung wie in Teilaufgabe c, $B = 1,5 \text{ T}$, $U_{\text{max}} = 50 \text{ kV}$) auf eine kinetische Energie von $4,5 \text{ MeV}$ beschleunigt werden können.

2. Schwingkreis

Ein Kondensator mit der Kapazität $64,0 \mu\text{F}$ wird zunächst mit der Gleichspannung 12 V aufgeladen (Schalterposition 1 in Abb. 4). Zur Zeit $t = 0 \text{ s}$ wird der Schalter auf Position 2 umgestellt, wodurch sich der Kondensator über eine Spule entlädt. Die entstehende elektromagnetische Schwingung wird als ungedämpft angenommen. Die Induktivität der gleichmäßig gewickelten, langgestreckten Spule kann durch einen zwischen A und B verschiebbaren Abgriff verändert werden. Der Abgriff befindet sich zunächst in der Anfangsstellung A, in der die Spule eine Induktivität von $2,30 \text{ mH}$ besitzt.

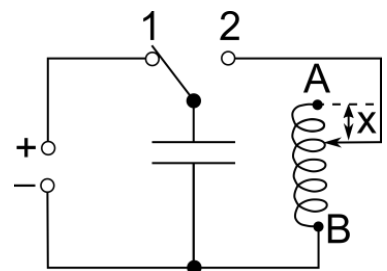


Abb. 4

5

- a) Die elektromagnetische Schwingung soll mit einem Zeigermessgerät, das die Spannung U am Kondensator misst, sichtbar gemacht werden. Berechnen Sie die Schwingungsfrequenz und beurteilen Sie, ob eine Zeigerbewegung beobachtet werden kann. [zur Kontrolle: 415 Hz]

4

- b) Erklären Sie den im t - U -Diagramm in Abb. 5 dargestellten Verlauf der Spannung U am Kondensator für $0,6 \text{ ms} \leq t \leq 1,2 \text{ ms}$ anhand der Vorgänge im Schwingkreis.

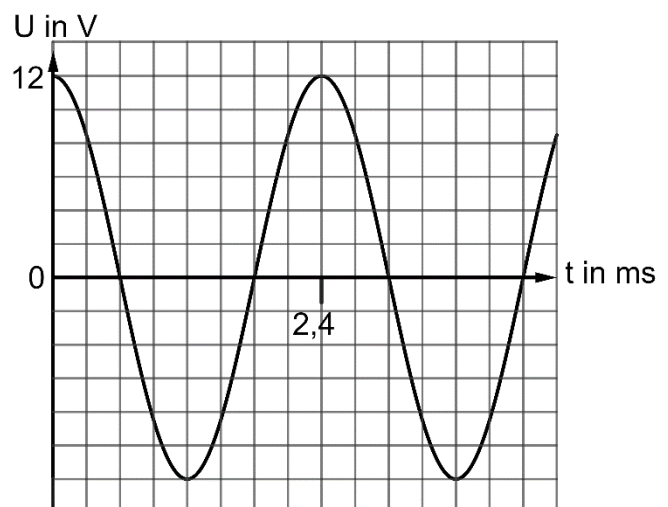


Abb. 5

6

- c) Berechnen Sie die maximale Stromstärke im Schwingkreis und zeichnen Sie in Abb. 5 das t - I -Diagramm für den gesamten vorgegebenen Zeitraum mit ein. Verwenden Sie dazu die vorhandene senkrechte Achse für die Stromstärke I und beschriften Sie diese unabhängig von den Spannungswerten zusätzlich mit Stromstärkewerten.

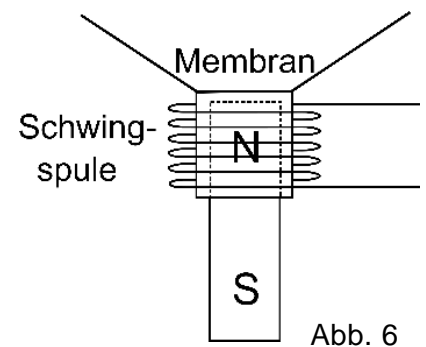
In einem Versuch soll aus diesem Schwingkreis ein Modell eines Stimmgeräts entwickelt werden. Zusätzlich zu der in der Barockmusik üblichen Stimmfrequenz von 415 Hz soll auch der Kammerton a' mit 440 Hz eingestellt werden können.

- 8 d) Berechnen Sie die für den Kammerton a' nötige Induktivität bei gleichbleibender Kapazität und weisen Sie nach, dass die hierfür erforderliche Verschiebung x des Abgriffs 11 % der Spulenlänge beträgt.

Um die Schwingung hörbar zu machen, wird ein Lautsprecher (vgl. Abb. 6) in Reihe mit der Spule in den Schwingkreis eingebaut. Der Lautsprecher besteht aus einer mit einer Membran fest verbundenen Schwingspule, die über einem ortsfesten Stabmagneten nach oben bzw. nach unten gleiten kann.

- 4 e) Erklären Sie, dass eine an der Schwingspule des Lautsprechers anliegende Wechselspannung mit konstanter Frequenz einen Ton mit genau dieser Frequenz erzeugt.

- 3 f) Ein Elektrotechniker behauptet, dass der Einbau dieses Lautsprechers dazu führe, dass die zum Stimmen benötigten Frequenzen des Schwingkreises sich veränderten. Nehmen Sie zu seiner Behauptung Stellung.



(Leerseite)

1. Der Zitteraal – ein Elektrofisch

Zitteraale besitzen ein elektrisches Organ, den sog. Elektroplax, der fast die gesamte Körperlänge einnimmt. Mit diesem Organ können die Zitteraale elektrische Ladung speichern und zur Beutejagd oder zur Verteidigung blitzartig freisetzen.

Zunächst wird der Elektroplax durch einen Plattenkondensator modelliert. Bei einer für Zitteraale typischen maximalen Spannung von 600 V ist eine Ladung von 1,4 mC gespeichert.

- 7 a) In Experimenten gilt eine Spannung ab 60 V in Kombination mit einer elektrischen Energie ab 350 mJ als gefährlich. Berechnen Sie die Kapazität des Elektroplax sowie die maximal in ihm gespeicherte elektrische Energie und beurteilen Sie die Gefährlichkeit des Zitteraals für den Menschen.

Zur Modellierung des elektrischen Feldes außerhalb des Zitteraals betrachtet man ihn als elektrischen Dipol mit dem Kopf als Pluspol (elektrisches Potential $\varphi_K = +300\text{ V}$) und dem Schwanzende als Minuspol ($\varphi_S = -300\text{ V}$).

- 6 b) Skizzieren Sie in Abb. 1 den Verlauf der elektrischen Feldlinien in der Umgebung des Zitteraals und geben Sie die Bereiche größter Feldstärke an. Tragen Sie zusätzlich die Äquipotentiallinie zu $\varphi_0 = 0\text{ V}$ sowie eine beliebige weitere Äquipotentiallinie ein.



Abb. 1

- 6 c) Zitteraale jagen sowohl alleine als auch in Paaren oder kleinen Gruppen. Bei einer Jagd zu zweit schwimmen sie parallel zueinander. Skizzieren Sie eine für die Jagd sinnvolle Anordnung der beiden Zitteraale und tragen Sie die Position der Beute ein. Begründen Sie die Jagdstrategie physikalisch.
- 3 d) Wenn ein Zitteraal alleine jagt, krümmt er sich so, dass sich sein Kopf und sein Schwanzende sehr nahekommen und sich die Beute dazwischen befindet. Begründen Sie, dass dadurch die Feldstärke am Ort der Beute sehr groß wird.
- 8 e) Beim Entladen des Elektroplax eines Zitteraals wurde die Stromstärke I in Abhängigkeit von der Zeit t gemessen (vgl. Tabelle). Zeichnen Sie das zugehörige t - I -Diagramm und ermitteln Sie den Wert des elektrischen Widerstands R im Entladestromkreis. Schätzen Sie anhand des Diagramms die im Elektroplax gespeicherte Ladung ab und erläutern Sie Ihr Vorgehen. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem oben angegebenen Wert.

t in ms	0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
I in A	0,54	0,39	0,28	0,20	0,15	0,11	0,08

- 6 f) Eine genauere Betrachtung zeigt, dass der Elektrolax aus etwa $2,0 \cdot 10^5$ abgewandelten Muskelzellen, den sog. Elektrozyten, besteht. Jede Elektrozyte kann als Batterie betrachtet werden, die durch Ionenaustausch mit der Umgebung auf 0,15 V aufgeladen werden kann. Skizzieren Sie ein Schaltbild, aus dem die Verschaltung der Elektrozyten zu einem Elektrolax mit 600 V Gesamtspannung deutlich wird. Begründen Sie mithilfe des Schaltbildes, dass während der Entladung an jeder einzelnen Elektrozyte deutlich weniger Strom fließt als in Teilaufgabe e angegeben.
- 4 g) Immer wieder stellen sich Forscherinnen und Forscher selbst als Versuchsobjekt zur Verfügung. So hat ein amerikanischer Biologe seinen Arm in Kontakt mit einem Zitteraal gebracht, um die Wirkung der Stromschläge am eigenen Leib zu testen und Messungen vorzunehmen. Nehmen Sie zu dieser Vorgehensweise Stellung. Berücksichtigen Sie einen ethischen und einen physikalischen Aspekt.

2. Gekreuzte Strichgitter

Ein Laserstrahl trifft senkrecht auf ein optisches Strichgitter mit 200 Spalten pro cm. Auf einem parallel zum Gitter im Abstand $a = 1,26$ m aufgestellten Schirm sind neben dem Maximum 0. Ordnung in horizontaler Richtung auf beiden Seiten jeweils drei weitere Maxima erkennbar. Der Abstand zwischen den Maxima 3. Ordnung beträgt $d = 9,6$ cm.

- 3 a) Begründen Sie rechnerisch, dass für die Maxima 3. Ordnung die Kleinwinkelnäherung angewendet werden darf.
- 8 b) Leiten Sie mithilfe einer geeigneten Skizze (unter Betrachtung nur zweier benachbarter Spalte) die Formel $\lambda = \frac{d}{a} \cdot 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ für die Wellenlänge des Lasers her und berechnen Sie λ .

Platziert man unmittelbar hinter dem Strichgitter ein zweites, gegenüber dem ersten um 90° gedrehtes Strichgitter, erhält man das in Abb. 2 dargestellte idealisierte Interferenzbild.

- 3 c) Erklären Sie das Zustandekommen dieses Interferenzbilds.
- 3 d) Entscheiden Sie ohne weitere Rechnung, ob die Anzahl der Spalte pro cm des hinzugekommenen Gitters größer oder kleiner ist als 200 Spalte pro cm, und begründen Sie Ihre Entscheidung.
- 3 e) Beschreiben und erklären Sie die Veränderung des Interferenzbilds, wenn ein Laser mit kürzerer Wellenlänge verwendet wird.

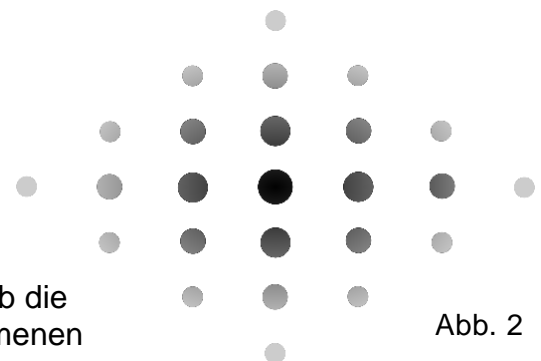


Abb. 2

1. h-Bestimmung mit LEDs

Im Jahr 1900 führte Max Planck die Konstante h ein, die seit 2019 als eine der sieben Naturkonstanten im Internationalen Einheitensystem dient und physikalische Größen von Quantenobjekten verknüpft.

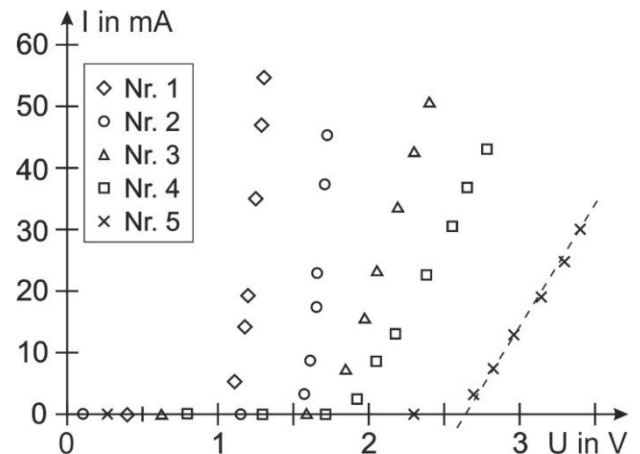
- 5 a) Erklären Sie mithilfe des Energiestufenmodells die Abstrahlung von Photonen durch Atome und geben Sie in diesem Zusammenhang eine Beziehung an, die die Planck-Konstante h enthält.

In ähnlicher Weise lässt sich auch die Photonenemission bei Leuchtdioden (LEDs) modellieren. Der Stromfluss durch die LED setzt ein, sobald die an der LED anliegende Spannung einen bestimmten Wert – die sogenannte Durchlassspannung U_D – erreicht. Für die Energie eines emittierten Photons gilt näherungsweise die Gleichung $E_{Ph} = e \cdot U_D$.

- 3 b) Deuten Sie diese Gleichung im beschriebenen Zusammenhang.

Mit LEDs, die in verschiedenen Farben leuchten, kann die Planck-Konstante experimentell bestimmt werden.

Dazu wird zunächst aus der Abbildung, die die U-I-Kennlinien fünf verschiedenfarbiger LEDs zeigt, die Durchlassspannung jeder LED ermittelt.



- 5 c) Durch die Messwerte der LED Nr. 5 ist eine gestrichelte Linie eingezeichnet, mit deren Hilfe der Tabellenwert für die Durchlassspannung U_D bestimmt wurde. Beschreiben Sie dieses Vorgehen zur Ermittlung von U_D und tragen Sie die beiden fehlenden Werte der Durchlassspannungen U_D in die Tabelle ein.

LED Nr.	1	2	3	4	5
λ in nm	950	665	635	590	480
f in 10^{14} Hz	3,16		4,72		6,25
U_D in V	1,15		1,75		2,65
E_{Ph} in 10^{-19} J	1,84		2,80		4,25

(Fortsetzung nächste Seite)

- 6 d) Ermitteln Sie für die LEDs Nr. 2 und Nr. 4 aus den angegebenen Wellenlängen jeweils die Frequenz f des abgestrahlten Lichts und berechnen Sie jeweils aus der Durchlassspannung U_D die Energie E_{Ph} der emittierten Photonen. Erstellen Sie aus den Tabellenwerten ein f - E_{Ph} -Diagramm.
- 10 e) Bestimmen Sie mithilfe des f - E_{Ph} -Diagramms einen Wert für die Planck-Konstante und geben Sie die prozentuale Abweichung des ermittelten Werts vom Literaturwert an. Erläutern Sie zwei mögliche Ursachen für diese Abweichung.
- In der Realität gibt nicht jedes Elektron in der LED Energie in Form eines Photons ab. Die sogenannte Quantenausbeute gibt den Quotienten aus der Anzahl der emittierten Photonen und der Anzahl der durch die LED fließenden Elektronen an.
- 5 f) Bestimmen Sie die Anzahl der Photonen, die von der blau leuchtenden LED pro Sekunde emittiert werden, bei einer Quantenausbeute von 24 % und einer Spannung von 3,2 V.

2. Batterien in Herzschrittmachern

In der Vergangenheit wurden in Herzschrittmachern Radionuklidbatterien eingesetzt. Diese wandeln die Energie des spontanen Kernzerfalls in elektrische Energie um. Sie sind wartungsfrei und können über lange Zeit hinweg Energie bereitstellen. Häufig wird dafür das Plutoniumisotop ^{238}Pu genutzt, ein α -Strahler mit einer Halbwertszeit von 87,7 Jahren. Plutonium ist wie andere Schwermetalle hochgiftig.

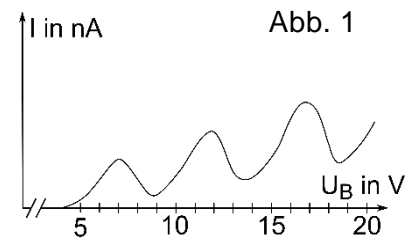
- 5 a) Geben Sie die Zerfallsgleichung von ^{238}Pu an und berechnen Sie den Q-Wert dieser Reaktion. [zur Kontrolle: 5,59 MeV]
- 4 b) Begründen Sie, dass Nuklide mit deutlich größerer oder kleinerer Halbwertszeit für diese Anwendung weniger geeignet sind.
- 4 c) Ein Herzschrittmacher mit Radionuklidbatterie ist von einem luftdichten, schuss- und feuersicheren Metallgehäuse umgeben. Dennoch entsteht eine radioaktive Belastung für den Träger. Erklären Sie diese Tatsache, indem Sie auf das Abschirmungsverhalten des Gehäuses eingehen.
- 8 d) Berechnen Sie die benötigte Masse an ^{238}Pu , so dass die Batterie bei einem Wirkungsgrad von 8,0 % auch nach 40 Jahren noch eine elektrische Leistung von 5,0 mW bereitstellt. [zur Kontrolle: Aktivität nach 40 Jahren: 70 GBq]
- 5 e) Moderne Lithiumiodid-Batterien können in Herzschrittmachern etwa acht Jahre verwendet werden. Beurteilen Sie anhand von drei Kriterien die Verwendung dieser modernen Batterien in Herzschrittmachern im Vergleich zu Radionuklidbatterien.

1. Gasgefüllte Röhren

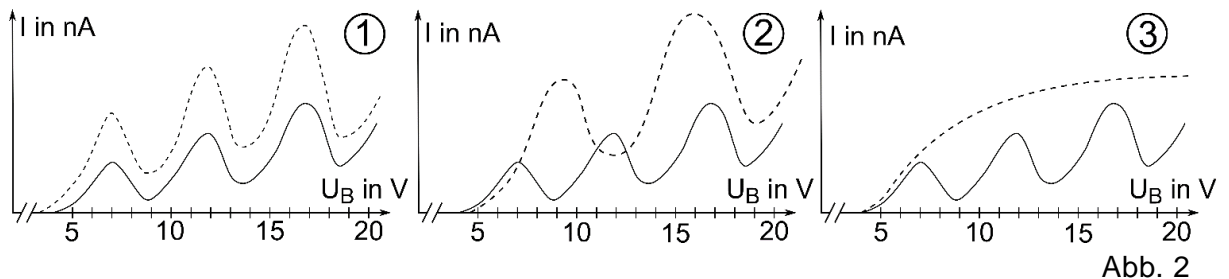
Die Physiker J. Franck und G. Hertz führten 1914 einen Versuch durch, der einen bedeutenden Beitrag zur Entwicklung des modernen Atommodells lieferte.

- 6 a) Stellen Sie den Aufbau und die Beschaltung einer gasgefüllten Franck-Hertz-Röhre in einer Zeichnung dar. Geben Sie bei allen verwendeten Spannungsquellen typische Spannungswerte an.

- 6 b) Abb. 1 zeigt den Verlauf der gemessenen Anodenstromstärke I in Abhängigkeit von der Beschleunigungsspannung U_B in einer mit Quecksilber gefüllten Röhre. Beschreiben Sie die Vorgänge in der Röhre, die zu dem periodischen Abfall der Anodenstromstärke führen. Erläutern Sie mithilfe von Abb. 1, dass bei diesem Experiment auch elektromagnetische Strahlung außerhalb des sichtbaren Bereichs ausgesandt wird.



- 6 c) Zusätzlich zur Messkurve aus Abb. 1 sind nun in Abb. 2 noch weitere Messkurven gestrichelt eingezeichnet. Erläutern Sie zu jedem Diagramm in Abb. 2 eine mögliche Veränderung im experimentellen Aufbau oder der Geräteeinstellung, die den Wechsel von der durchgezogenen zur gestrichelten Kurve bewirkt haben könnte.



Quecksilberdampf geringer Dichte befindet sich auch in Leuchtstoffröhren. Um aus der zunächst emittierten UV-Strahlung sichtbares Licht zu erhalten, ist die Innenseite einer solchen Röhre mit einer fluoreszierenden Leuchtschicht ausgekleidet. Für eine stark vereinfachte Beschreibung der Anregungszustände des Leuchtstoffs eignet sich das Modell des Potentialtopfs mit unendlich hohen Wänden, in dem sich ein Elektron befindet.

- 5 d) Erläutern Sie dieses Modell und gehen Sie dabei auch auf den Zusammenhang zwischen der Länge ℓ des Potentialtopfs und der Wellenlänge des Elektrons ein.
- 5 e) Das Wellenlängenspektrum der von der Leuchtschicht emittierten elektromagnetischen Strahlung zeigt ein Maximum bei 610 nm. Berechnen Sie die Länge ℓ des Potentialtopfs unter der Annahme, dass der zugehörige Übergang vom ersten angeregten Zustand in den Grundzustand erfolgt.

(Fortsetzung nächste Seite)

2. Tritium

Das Wasserstoffisotop Tritium ${}^3\text{H}$ entsteht in der Erdatmosphäre unter anderem durch Kernumwandlungsprozesse, nachdem ein Proton oder ein Neutron von einem Stickstoffkern absorbiert wurde.

- 3 a) Stellen Sie die Reaktionsgleichungen für die beiden Entstehungsprozesse auf, bei denen aus einem Stickstoffisotop jeweils ein ${}^3\text{H}$ -Atom sowie das Isotop ${}^{12}\text{N}$ bzw. ${}^{12}\text{C}$ gebildet werden.

Tritium ist radioaktiv und wandelt sich mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren in das stabile Heliumisotop ${}^3\text{He}$ um.

- 6 b) Entscheiden Sie begründet, um welche Zerfallsart es sich dabei handelt. Geben Sie die Reaktionsgleichung an und beschreiben Sie den Zerfall von Tritium im Quark-Modell.

- 5 c) Berechnen Sie den Q-Wert dieser Reaktion und begründen Sie, dass jedes der dabei entstehenden Teilchen eine geringere kinetische Energie als Q besitzt.

Tritium wird auch in Lichtquellen verwendet. Diese bestehen aus einem mit Tritiumgas befüllten Glasröhrchen, das innen mit einer fluoreszierenden Leuchtschicht versehen ist und ohne äußere Energiezufuhr einige Jahre sichtbar leuchtet. Im Folgenden wird eine Armbanduhr mit 14 solcher kleinen Glasröhrchen zur Beleuchtung von Ziffern und Zeigern betrachtet, für die der Hersteller eine Garantie von zehn Jahren auf die Leuchtstärke gewährt.

- 5 d) Direkt nach der Herstellung enthält jedes Röhrchen eine mittlere Masse von $0,20\ \mu\text{g}$ Tritium. Berechnen Sie die Anzahl $N_{\text{H},0}$ der anfangs in einem Röhrchen vorhandenen Tritium-Atome. Überprüfen Sie durch eine Rechnung, ob der in Deutschland für Tritium vorgeschriebene Grenzwert von $1,0\ \text{GBq}$ bei dieser Uhr eingehalten wird. [zur Kontrolle: $N_{\text{H},0} = 4,0 \cdot 10^{16}$]

Ein Uhrenhersteller untersucht das Alter einer größeren Lieferung von Tritiumglasröhrchen, indem er das Verhältnis der Anzahl $N_{\text{He}}(t)$ der gebildeten Helium-Atome zu den noch vorhandenen Tritium-Atomen $N_{\text{H}}(t)$ zum Zeitpunkt t bestimmt. Gehen Sie vereinfachend davon aus, dass das im Röhrchen enthaltene Helium vollständig aus Tritium-Zerfällen stammt und kein Helium entweichen konnte.

- 5 e) Erläutern Sie die Beziehung $N_{\text{He}}(t) = N_{\text{H},0} - N_{\text{H}}(t)$ und folgern Sie daraus, dass sich für das Verhältnis von Tochter- zu Mutterkernen die Gleichung

$$\frac{N_{\text{He}}(t)}{N_{\text{H}}(t)} = e^{\lambda \cdot t} - 1 \text{ ergibt. } \lambda \text{ bezeichnet dabei die Zerfallskonstante für Tritium.}$$

- 3 f) Für das Verhältnis von Helium zu Tritium ergibt sich für eines der untersuchten Röhrchen ein Wert von 0,32. Berechnen Sie die seit der Fertigung des Röhrchens vergangene Zeitdauer.

- 5 g) Ein Schüler möchte sich eine Armbanduhr mit Tritiumgasbeleuchtung kaufen. Im Internet findet er zur Gefährdung durch eine solche Uhr Folgendes: „Wenn alle Glasröhrchen zerbrechen und das enthaltene Tritium inhaliert wird, dann ergibt sich nach Angaben des Bundesamts für Strahlenschutz für eine Person eine Äquivalentdosis von $20\ \mu\text{Sv}$ pro Jahr.“ Beurteilen Sie das Gefahrenpotential einer Uhr mit Tritiumgaslicht anhand von drei Aspekten.

Ph 12 – Astrophysik 1

Im Sternbild Centaurus wurde 1915 ein lichtschwacher rötlicher Stern entdeckt, der der nächstgelegene Stern zur Sonne ist. Dieser Stern wird daher Proxima Centauri genannt.

1. Proxima Centauri

Proxima Centauri hat eine jährliche Parallaxe von $0,768''$. Im sichtbaren Spektralbereich wird eine scheinbare Helligkeit von 11,1 beobachtet.

- 7 a) Bestimmen Sie die Entfernung von Proxima Centauri zur Erde. Ermitteln Sie seine Leuchtkraft L_{sichtbar} im sichtbaren Spektralbereich in Vielfachen der Sonnenleuchtkraft. [zur Kontrolle: $L_{\text{sichtbar}} = 5,3 \cdot 10^{-5} \cdot L_{\odot}$]

Bei Proxima Centauri handelt es sich um einen Hauptreihenstern mit der Oberflächentemperatur $3,0 \cdot 10^3$ K. Sein Durchmesser beträgt 15 % des Sonnendurchmessers.

- 7 b) Berechnen Sie die Gesamtleuchtkraft L von Proxima Centauri in Vielfachen der Sonnenleuchtkraft. Vergleichen Sie dieses Ergebnis mit dem in Teilaufgabe a) ermittelten Wert für die Leuchtkraft im sichtbaren Spektralbereich und geben Sie eine Begründung für diese Abweichung an. [zur Kontrolle: $L = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot L_{\odot}$]

2. Proxima Centauri und das Doppelsternsystem Alpha Centauri

Proxima Centauri scheint sich um das Doppelsternsystem Alpha Centauri zu bewegen, welches näherungsweise als ein Zentralgestirn mit 2,16 Sonnenmassen angenommen werden kann. Die Masse von Proxima Centauri ist gegenüber der Masse von Alpha Centauri vernachlässigbar klein.

Für Proxima Centauri wurden in den letzten Jahren verschiedene Bahnformen diskutiert, von denen zwei in Abb. 1 aus Sicht der Erde mit der momentanen Position von Proxima Centauri dargestellt sind. Die große Halbachse der elliptischen Bahn 1 beträgt $9 \cdot 10^3$ AE.

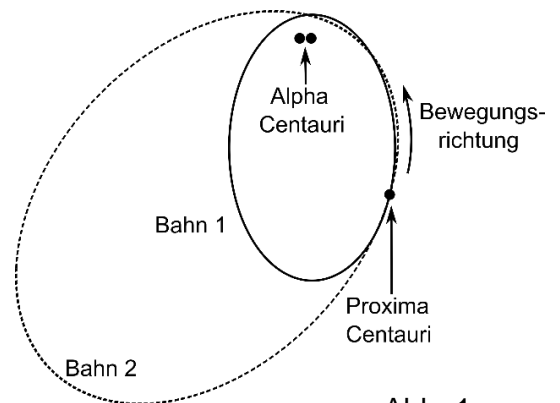


Abb. 1

- 4 a) Berechnen Sie die Umlaufzeit von Proxima Centauri auf Bahn 1. [zur Kontrolle: $6 \cdot 10^5$ a]
- 4 b) Begründen Sie, dass trotz 100-jähriger Beobachtung nicht geklärt werden konnte, ob sich Proxima Centauri auf Bahn 1 oder auf Bahn 2 bewegt. Schätzen Sie mithilfe von Abb. 1 grob ab, in wie vielen Jahren eine Momentaufnahme des Centauri-Systems genügen wird, um eine der Bahnen auszuschließen. Gehen Sie dabei von einem konstanten Betrag der Bahngeschwindigkeit aus.

Neueste Beobachtungsdaten von Alpha Centauri und Proxima Centauri ermöglichen sehr präzise Geschwindigkeitsbestimmungen und stützen die Annahme, dass es sich bei Alpha Centauri und Proxima Centauri um ein gravitativ gebundenes System handelt. Proxima Centauri ist heute $13 \cdot 10^3$ AE von Alpha Centauri entfernt.

(Fortsetzung nächste Seite)

- 7 c) Bestimmen Sie für einen Körper an der heutigen Position von Proxima Centauri die Geschwindigkeit, die er zum Verlassen des gravitativen Einflussbereichs von Alpha Centauri benötigt, also die 2. kosmische Geschwindigkeit. Beschreiben Sie unter Verwendung Ihres Ergebnisses ein Kriterium, das die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in der Annahme eines gebundenen Systems bestärkt haben könnte.

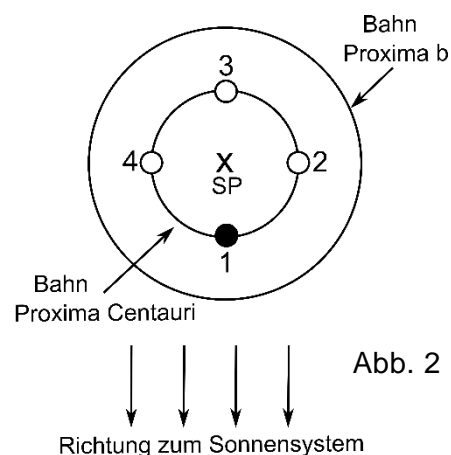
3. Der Exoplanet Proxima b – eine zweite Erde?

Mittels Doppler-Spektroskopie wurde 2016 eine minimale periodische Radialbewegung von Proxima Centauri relativ zum Doppelsternsystem Alpha Centauri nachgewiesen. Aus den Daten folgerten Astronomen die Existenz des Exoplaneten Proxima b, der sich auf einer annähernd kreisförmigen Bahn in 11,2 Tagen um Proxima Centauri bewegt.

- 5 a) Erläutern Sie das Messverfahren der Doppler-Spektroskopie zum Nachweis von Radialbewegungen.

In Abb. 2 sind die Bahnen von Proxima Centauri und seinem Exoplaneten Proxima b um den gemeinsamen Schwerpunkt SP schematisch dargestellt.

- 6 b) Tragen Sie in Abb. 2 für die Sternposition 1 die Position des Planeten Proxima b ein. Zeichnen Sie ein qualitatives Diagramm für die beobachtete Radialgeschwindigkeit des Sterns Proxima Centauri in Abhängigkeit von der Zeit. Tragen Sie darin die Nummern 1 bis 4 passend zu Abb. 2 ein.



Die Masse des Sterns Proxima Centauri beträgt 12 % der Sonnenmasse, sein Durchmesser 15 % des Sonnendurchmessers. Die Masse des Exoplaneten Proxima b wird mit 1,3 Erdmassen angenommen.

- 5 c) Bestimmen Sie den Bahnradius des Exoplaneten Proxima b. Vergleichen Sie diesen mit dem Bahnradius des innersten Planeten unseres Sonnensystems.
[zur Kontrolle: $7,2 \cdot 10^9$ m]
- 6 d) Berechnen Sie mithilfe einer geeigneten Skizze den Winkeldurchmesser von Proxima Centauri am Himmel von Proxima b und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem Winkeldurchmesser der Sonne an unserem Himmel.
- 4 e) Wie in Teilaufgabe 1b gezeigt, beträgt die Gesamtleuchtkraft von Proxima Centauri $1,6 \cdot 10^{-3} \cdot L_{\odot}$. Zeigen Sie, dass die Bestrahlungsstärke auf Proxima b in derselben Größenordnung liegt wie die solare Bestrahlungsstärke auf der Erde.
- 5 f) Aus den vorliegenden Daten kann noch nicht geschlossen werden, dass die Oberflächentemperaturen auf Proxima b und auf der Erde ähnlich sind. Erläutern Sie dies anhand zweier selbstgewählter Einflussgrößen.

Ph 12 – Astrophysik 2

Das James-Webb-Weltraumteleskop

Das James Webb Space Telescope (JWST) ist das bisher größte Weltraumteleskop. Es wurde am 25. Dezember 2021 gestartet und erreichte am 24. Januar 2022 die Umgebung des sog. Lagrange-Punkts L_2 . Der Punkt L_2 liegt von der Sonne aus gesehen etwa $d = 1,5$ Mio. km hinter der Erde auf der Verbindungsgerade Sonne-Erde (vgl. Abb. 1). L_2 ist also nicht ortsfest, sondern bewegt sich auf einer Kreisbahn mit Radius $r = r_E + d$ um die Sonne.

Die Erdbahn wird für alle Aufgaben als Kreisbahn mit Radius r_E angenommen.

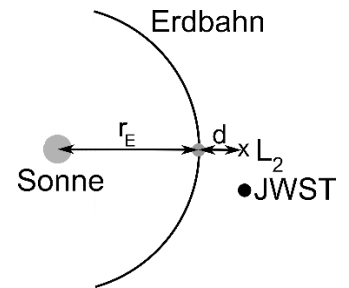


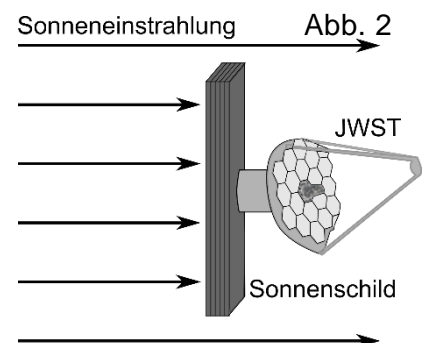
Abb. 1

1. Wahl der Umlaufbahn

- 3 a) Begründen Sie mithilfe eines der Kepler-Gesetze, dass ein Objekt auf der Bahn von L_2 ohne Berücksichtigung der Gravitationswirkung durch die Erde eine längere Umlaufdauer als die Erde hätte.
- 8 b) Befindet sich ein Körper in L_2 , dann sind die von Sonne (Masse M_S) und Erde (Masse m_E) auf ihn wirkenden Gravitationskräfte in Summe genau so groß wie die Zentripetalkraft, die notwendig ist, um den Körper auf der Kreisbahn um die Sonne zu halten. Zeigen Sie, dass die Umlaufdauer T eines solchen Körpers durch die Formel $T = \sqrt{\frac{4\pi^2}{G\left(\frac{M_S}{r^3} + \frac{m_E}{d^2 \cdot r}\right)}}$ bestimmt werden kann. Berechnen Sie T und begründen Sie, dass die Sonne, die Erde und der Körper während eines Umlaufs immer auf einer Geraden liegen. [zur Kontrolle $T = 1,0$ a]
- 6 c) Das JWST befindet sich nicht exakt im Punkt L_2 , sondern umkreist diesen im Abstand von 0,75 Mio. km mit einer Umlaufdauer von 6 Monaten. Die Ebene dieser Kreisbahn ist stets senkrecht zur Verbindungsgerade Sonne – L_2 . Ergänzen Sie in Abb. 1 die weiteren Positionen von Erde, L_2 und JWST im zeitlichen Abstand von 3 Monaten für die Dauer eines Jahres.

2. Sichtbarkeit am Nachthimmel

Das JWST besitzt einen Sonnenschild, der mit einer Fläche von ca. 260 m^2 etwa so groß wie ein Tennisplatz ist. Der Sonnenschild hat eine Aluminiumoberfläche, welche etwa 95 % der einfallenden Strahlung reflektiert. Der Abstand des JWST zur Sonne beträgt $1,51 \cdot 10^{11} \text{ m}$, der zur Erde $1,68 \cdot 10^9 \text{ m}$.



- 5 a) Weisen Sie nach, dass die Bestrahlungsstärke der Sonne am Ort des JWST 98 % der Solarkonstanten beträgt. Der Sonnenschild wird senkrecht zur Sonneneinstrahlung ausgerichtet (vgl. Abb. 2). Zeigen Sie, dass der Sonnenschild eine Strahlungsleistung von 0,33 MW reflektiert.

- 7 b) Die Leuchtkraft des JWST kann in einem einfachen Modell durch den 6-fachen Wert der in Teilaufgabe a bestimmten reflektierten Strahlungsleistung angenähert werden. Schätzen Sie die absolute Helligkeit M des JWST ab und beurteilen Sie, ob es mit einem Teleskop in einer Volkssternwarte (Grenzgröße $m = 17$) beobachtet werden kann. [zur Kontrolle $M = 56$]

3. Vergleich mit dem Hubble-Weltraumteleskop

Das JWST gilt als wissenschaftlicher Nachfolger des Hubble Space Telescope (HST), welches in einer gegenüber dem Erdäquator um $28,5^\circ$ geneigten Umlaufbahn ca. 570 km über der Erdoberfläche eingesetzt wurde.

- 6 a) Beschreiben Sie zwei Vorteile sowie einen Nachteil, die sich aus der gewählten Umlaufbahn für das JWST im Vergleich zum HST ergeben.
- 5 b) Der Spiegeldurchmesser des JWST beträgt 6,5 m, der des HST 2,4 m. Erklären Sie, dass das JWST bei gleicher Beobachtungszeit die ca. 7-fache Strahlungsenergie eines Objekts detektiert wie das HST. Begründen Sie, dass daher mit dem JWST im Vergleich zum HST Objekte beobachtet werden können, für die der Wert der scheinbaren Helligkeit um $\Delta m = -2,5 \cdot \lg\left(\frac{1}{7}\right)$ größer ist und berechnen Sie Δm .
- 4 c) Mit dem HST konnten Galaxien beobachtet werden, die vor 12,5 Mrd. Jahren entstanden sind. Mit dem JWST sollen noch ältere Galaxien entdeckt werden. Erläutern Sie, warum die Beobachtungsinstrumente des JWST im Vergleich zum HST auf größere Wellenlängen ausgelegt worden sind.

Das JWST kann Infrarotstrahlung bis maximal $28 \mu\text{m}$ nachweisen, das HST nur bis maximal $2,2 \mu\text{m}$.

- 6 d) Begründen Sie die Erwartung der Forschenden, mit dem JWST Exoplaneten zu entdecken, die dem HST verborgen blieben. Berechnen Sie dazu die Temperaturen von schwarzen Strahlern, die bei den genannten Wellenlängen jeweils ihr Strahlungsmaximum aufweisen.
- 5 e) In der Zeitschrift *Sterne und Weltraum* wurde die Wirkung des Sonnenschilds des JWST beschrieben: „Im Schatten des Schilds kühlt sich das Teleskop (...) auf -230°C ab; damit werden die Infrarotkameras nicht länger mit exzessiver Wärmestrahlung geflutet.“ Begründen Sie, dass das Teleskop die Temperatur beibehält und erklären Sie die Auswirkung auf die Güte der Messergebnisse der Infrarotkameras.
- 5 f) Grundlagenforschung wird heute vielfach in Form von internationalen Großforschungsprojekten durchgeführt, deren gemeinsame Kennzeichen hohe Kosten und lange Planungszeiträume sind. Beispiele hierfür sind der Beschleuniger LHC am CERN, die internationale Raumstation ISS oder das JWST. Es gibt immer wieder Forderungen, keine Projekte dieser Art mehr zu starten. Beschreiben Sie drei mögliche Konsequenzen einer derartigen gesellschaftlichen Entscheidung und bilden Sie sich bezüglich dieser Forderung Ihr eigenes Urteil.

Quellenangaben

Ph 12 – 2

Teilaufgabe 2g:

In Anlehnung an

URL:

https://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-alltag/uhren/uhren_node.html
(aufgerufen am 27.09.2022)

Ph 12 – Astrophysik 2

Teilaufgabe 3e:

Sterne und Weltraum, Ausgabe 2/2022, Spektrum der Wissenschaft-Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg, S. 33