

Abiturprüfung 2022

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. Superkondensator

Bei einem bestimmten Typ sogenannter Superkondensatoren bestehen die beiden Elektroden aus einem sehr rauen Material. Zwischen den Elektroden befindet sich eine Elektrolytlösung mit entgegengesetzt geladenen Ionen. Durch Anlegen einer Spannung bildet sich an jeder Elektrodenoberfläche eine Doppelschicht von entgegengesetzt geladenen Ionen. Jede dieser Doppelschichten entspricht einem geladenen Kondensator (vgl. Abb. 1). In dieser Aufgabe wird ein solcher Superkondensator, der in einem zylinderförmigen Gehäuse eingebaut ist, mit einem luftgefüllten Plattenkondensator verglichen.

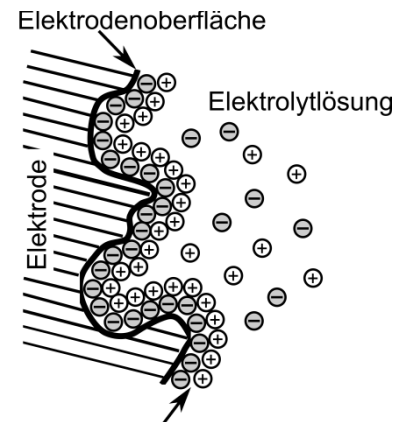


Abb. 1 Doppelschicht

- 6 a) Nennen Sie die geometrischen Größen, von denen die Kapazität eines Plattenkondensators abhängt. Beschreiben Sie, mit welchen Mitteln bei einem Plattenkondensator eine möglichst hohe Kapazität erreicht wird, und erklären Sie die Umsetzung bei dem oben beschriebenen Superkondensator.

Verwenden Sie für die weiteren Teilaufgaben folgende Daten:

beide Kondensatoren: Kapazität $C = 3,4 \cdot 10^3 \text{ F}$; max. Spannung $U = 2,85 \text{ V}$

nur Plattenkondensator: Plattenabstand $d = 10 \text{ nm}$

nur Superkondensator: Zylinderradius $r = 3,0 \text{ cm}$; Zylinderhöhe $h = 17,5 \text{ cm}$;
Masse $m = 550 \text{ g}$; Auf- und Entladedauer $t = 30 \text{ s}$

- 3 b) Berechnen Sie die maximal in diesen Kondensatoren gespeicherte elektrische Energie. [zur Kontrolle: 14 kJ]
- 6 c) Berechnen Sie den Flächeninhalt einer Platte des Plattenkondensators und vergleichen Sie diesen mit der Größe eines Fußballfeldes. [zur Kontrolle: 3,8 km²]
- 5 d) Weisen Sie nach, dass ein solcher Plattenkondensator auch gefaltet oder aufgerollt nicht im angegebenen Gehäuse des Superkondensators Platz findet.
- 6 e) Zeigen Sie, dass für die elektrische Feldstärke im Inneren eines luftgefüllten Plattenkondensators gilt: $E = \sqrt{\frac{2W_{\text{el}}}{\epsilon_0 \cdot V}}$, dabei ist W_{el} der Energieinhalt des Kondensators und V das Volumen zwischen den Kondensatorplatten.
- 3 f) Eine Schülerin schätzt die Feldstärke im Superkondensator ab, indem sie in obige Formel das Volumen des Zylinders einsetzt. Entscheiden Sie begründet, ob die wirkliche Feldstärke größer oder kleiner als der so berechnete Wert ist.
- 6 g) Bei Elektroautos möchte man im Stadtverkehr die kinetische Energie, die beim Bremsen frei wird, speichern und für den Beschleunigungsvorgang wiederverwenden. Untersuchen Sie mithilfe geeigneter Rechnungen oder Abschätzungen sowie unter Berücksichtigung Ihrer bisherigen Ergebnisse und der oben angegebenen Daten, ob hier ein Einsatz von Superkondensatoren sinnvoll ist. Fassen Sie Ihre Argumente in einer kurzen Stellungnahme zusammen.

(Fortsetzung nächste Seite)

2. Interferometer

Zur Messung von Verschiebungen im Bereich von Mikrometern oder kleiner können sogenannte Interferometer eingesetzt werden. Ihre Funktionsweise basiert auf der Interferenz von Licht.

- 6 a) Beschreiben Sie die Interferenz von zwei Wellen und erläutern Sie die Bedeutung des Gangunterschieds.

Eine häufig eingesetzte Anordnung ist das Michelson-Interferometer, dessen prinzipieller Aufbau in Abb. 2 dargestellt ist. Laserlicht wird durch einen halbdurchlässigen Spiegel H in zwei Teilstrahlen zerlegt. Der eine wird an H reflektiert und trifft auf den Spiegel S₂, der andere tritt durch H hindurch und trifft auf den Spiegel S₁. Nach der Reflexion an S₁ bzw. S₂ wird das Licht im Detektor überlagert.

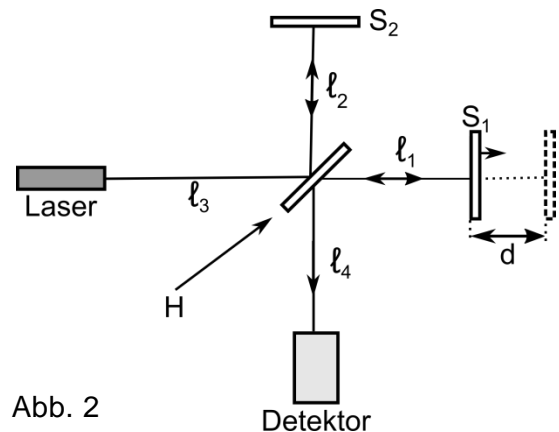


Abb. 2

- 4 b) Wenn die Abstände l_1 und l_2 gleich lang sind, wird im Detektor maximale Intensität gemessen. Ermitteln Sie einen Term für den Gangunterschied Δs der beiden Teilstrahlen am Detektor und begründen Sie damit diesen Sachverhalt.
- 6 c) Am Detektor liegt zunächst ein Interferenzmaximum vor. Wird der Spiegel S₁ nun nach rechts bewegt, werden abwechselnd Intensitätsminima und -maxima beobachtet. Erklären Sie diese Beobachtung und geben Sie einen Term für die Abstände d zur Ausgangsposition von S₁ an, in denen Intensitätsminima auftreten.

Das weltweit größte Michelson-Interferometer ist das LIGO in den USA, mit dem im Jahr 2015 die ersten Gravitationswellen nachgewiesen wurden. Es wird mit Laserlicht der Wellenlänge $\lambda = 1064 \text{ nm}$ betrieben. Die Strecke l_1 beträgt effektiv 560 km.

- 5 d) Eine Gravitationswelle aus passender Richtung dehnt bzw. staucht den Raum so, dass nur l_1 um den Faktor 10^{-21} geändert wird. Berechnen Sie die zugehörige Längenänderung Δl_1 in Metern und vergleichen Sie diese mit der nötigen Spiegelverschiebung, um im Interferenzbild einen Wechsel zwischen Intensitätsmaximum und -minimum zu erreichen. [zur Kontrolle: $\Delta l_1 = 5,6 \cdot 10^{-16} \text{ m}$]

- 4 e) Um eine Gravitationswelle nachzuweisen, stellt man das Interferometer zunächst auf ein Intensitätsminimum ein. Wenn sich die Länge l_1 um die kleine Strecke Δl_1 ändert, dann ändert sich die Intensität am Detektor gemäß $I(\Delta l_1) = I_0 \cdot \left(2\pi \frac{\Delta l_1}{\lambda} \right)^2$.

Dabei bezeichnet I_0 die Intensität im Maximum. Berechnen Sie den Anteil $I(\Delta l_1) / I_0$, den der Detektor beim Durchlauf einer Gravitationswelle nachweisen können muss.

1. Versuch von Kirchner

Dem Physiker Fritz Kirchner gelang es 1930, die spezifische Ladung von Elektronen über die Messung ihrer Geschwindigkeit zu bestimmen.

In seinem Versuch (Anordnung s. Abb. 1) werden aus einer Glühkathode K Elektronen mit vernachlässigbarer Anfangsgeschwindigkeit freigesetzt und durch die Spannung U_B beschleunigt, die zwischen Kathode K und Anode A anliegt. Durch eine kleine Öffnung in der Anode treten die Elektronen als gebündelter Strahl in einen zunächst feldfreien Raum ein, durchlaufen die beiden Kondensatoren C_1 und C_2 (Abstand L) und treffen anschließend auf einen Schirm S.

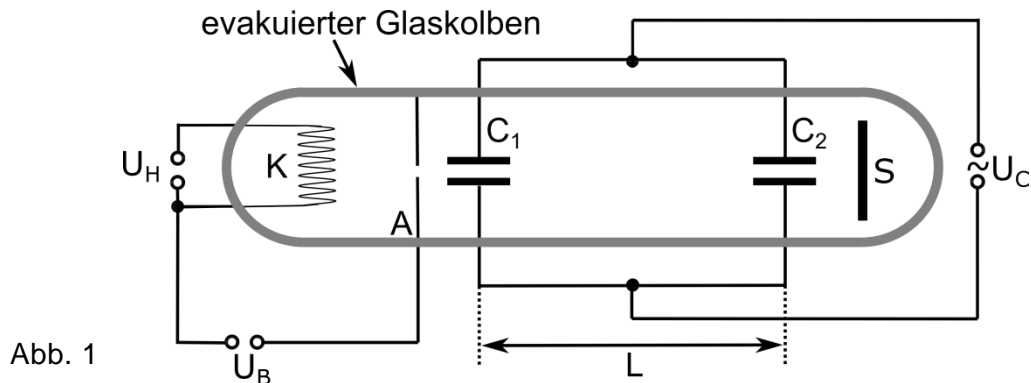
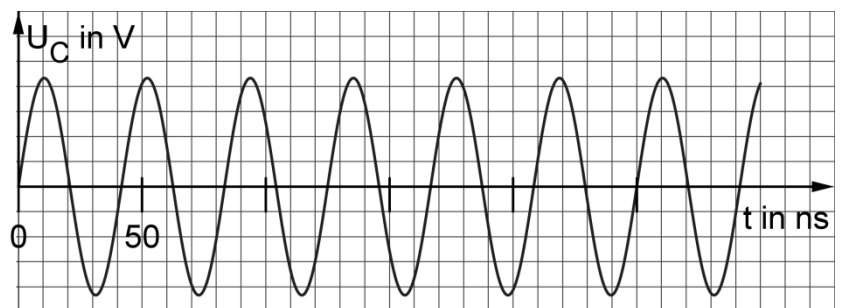


Abb. 1

- 4 a) Geben Sie die Polung von Kathode und Anode an und beschreiben Sie den Prozess der Freisetzung der Elektronen aus der Kathode.
- 4 b) Leiten Sie unter der Annahme kleiner Beschleunigungsspannungen her, dass die Elektronen mit der Geschwindigkeit $v_0 = \sqrt{2 \frac{e}{m} U_B}$ in den feldfreien Raum eintreten.

An C_1 und C_2 liegt eine hochfrequente Wechselspannung U_C an, deren zeitlicher Verlauf in Abb. 2 dargestellt ist.

Abb. 2



- 4 c) Bestimmen Sie aus dem Diagramm möglichst genau die Periodendauer T und die Frequenz f der Wechselspannung. [zur Kontrolle: $f = 24$ MHz]

Vereinfachend wird für die Zeit, die ein Elektron zum Durchqueren des Kondensators C_1 bzw. C_2 benötigt, die jeweilige Kondensatorspannung als zeitlich konstant angenommen. Elektronen, die im Augenblick des Nulldurchgangs der Spannung U_C den Kondensator C_1 passieren, erfahren keine Richtungsänderung. Nur diese erreichen den Kondensator C_2 .

(Fortsetzung nächste Seite)

4 d) Begründen Sie, dass die Elektronen genau dann unabgelenkt auf dem Schirm S auftreffen, wenn für die Zeit Δt , die ein Elektron für die Strecke zwischen den Kondensatormitten benötigt, gilt: $\Delta t = k \cdot \frac{T}{2}$ ($k = 1, 2, 3, \dots$)

5 e) Entscheiden Sie begründet, welches Bild aus Abb. 3 auf dem Schirm S zu erwarten ist, wenn die Beziehung aus Teilaufgabe d nicht erfüllt ist, die Elektronen aus dem Kondensator C_2 aber noch austreten können.

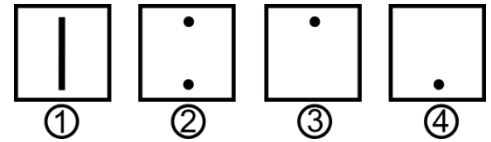


Abb.3

6 f) Erhöht man die Beschleunigungsspannung U_B bei konstanter Frequenz f der Spannung U_C von Null ausgehend so lange, bis letztmalig ein scharfer Leuchtfleck in der Mitte des Schirms auftritt, dann gilt für die Elektronengeschwindigkeit: $v_0 = 2 \cdot \frac{L}{T}$. Begründen Sie diesen Sachverhalt und berechnen Sie v_0 für

$$L = 50 \text{ cm.}$$

$$[\text{zur Kontrolle: } v_0 = 2,4 \cdot 10^7 \text{ m/s}]$$

4 g) Für die in Teilaufgabe f bestimmte Elektronengeschwindigkeit tritt der scharfe Leuchtfleck letztmalig bei $U_B = 1,6 \text{ kV}$ auf. Berechnen Sie damit die spezifische Ladung e/m der Elektronen.

7 h) Kirchner nutzte zur Bestimmung der spezifischen Ladung von Elektronen ausschließlich die elektrische Kraft. Erläutern Sie anhand einer beschrifteten Skizze ein anderes Experiment, in dem für denselben Zweck zusätzlich die Lorentzkraft genutzt wird.

2. Leitungssucher

Mit sogenannten Leitungssuchern ist es möglich, in Wänden metallische Gegenstände (z. B. Wasserleitungen, Stahlträger) aufzuspüren. Bei einer bestimmten Bauart eines solchen Leitungssuchers wird ein Schwingkreis verwendet, dessen Eigenfrequenz durch ferromagnetische Gegenstände verändert wird.

8 a) Beschreiben Sie unter Verwendung geeigneter Skizzen die Vorgänge in einem elektromagnetischen Schwingkreis während einer Schwingungsperiode.

4 b) Erklären Sie, dass sich die Eigenfrequenz eines Schwingkreises ändern kann, wenn man einen ferromagnetischen Gegenstand in die Nähe bringt. Nennen Sie dabei das Bauteil des Schwingkreises, das beim Betrieb des Leitungssuchers der Wand am nächsten sein sollte.

6 c) Der Schwingkreis eines Leitungssuchers hat – ohne ferromagnetischen Gegenstand in der Nähe – eine Eigenfrequenz von 425 kHz. Berechnen Sie die Kapazität des eingebauten Kondensators, wenn die verwendete Spule eine Induktivität von 300 μH hat. Beurteilen Sie, ob die Eigenfrequenz höher oder niedriger wird, wenn sich das Gerät nahe über einem Eisenrohr befindet.

4 d) In der Bedienungsanleitung eines Leitungssuchers ist Folgendes abgedruckt: „Die Messergebnisse können prinzipbedingt durch bestimmte Umgebungsbedingungen beeinträchtigt werden. Dazu gehören z. B. die Nähe von Geräten, die starke magnetische oder elektromagnetische Felder erzeugen [...]“. Erklären Sie die physikalischen Hintergründe dieses Hinweises.

1. Oberflächendesinfektion mit ultravioletter Strahlung

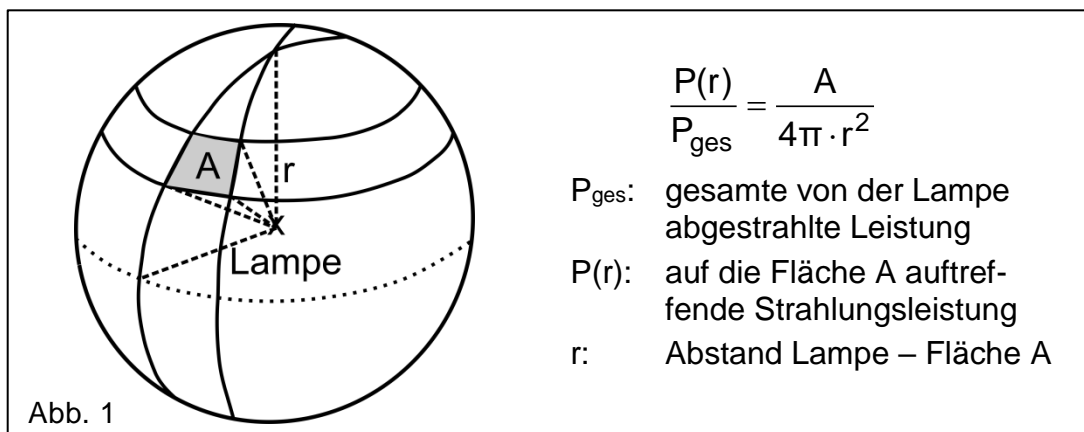
Zur Desinfektion können Oberflächen mit Licht aus Quecksilber-Niederdrucklampen bestrahlt werden. Vor allem die darin enthaltene UV-C-Strahlung (vgl. Tabelle) inaktiviert Viren und tötet Bakterien ab.

Strahlung	Wellenlängenbereich
UV-A	315 nm – 380 nm
UV-B	280 nm – 315 nm
UV-C	100 nm – 280 nm

- 7 a) Das Emissionsspektrum eines Quecksilberatoms zeigt unter anderem Linien bei den Wellenlängen 436 nm, 546 nm und 579 nm. Erläutern Sie allgemein die Entstehung von Linien im Emissionsspektrum einatomiger Gase und begründen Sie, dass durch Bestrahlung mit Licht dieser drei Wellenlängen kein effizientes Desinfizieren möglich ist.

Im Folgenden wird eine Quecksilber-Niederdrucklampe betrachtet, die Strahlung mit einer Photonenenergie von 4,9 eV und einer Leistung von 1,3 W aussendet.

- 4 b) Ordnen Sie diese Strahlung begründet einem der UV-Bereiche zu.
- 6 c) Mit einer solchen Lampe sollen bestimmte Viren auf dem Display eines Smartphones inaktiviert werden. Dazu ist eine einminütige Bestrahlung erforderlich, bei der insgesamt pro cm² eine Energie von 16 mJ auf das Display auftrifft. Um zu berechnen, welcher Abstand der Lampe vom Display für die vorgesehene Desinfektion nicht überschritten werden darf, können Sie den in Abb. 1 gegebenen Auszug aus einem Lexikon verwenden. Erläutern Sie die im Lexikon angegebene Gleichung und führen Sie die Berechnung durch. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Lampe punktförmig ist, gleichmäßig in alle Raumrichtungen abstrahlt und die Strahlung senkrecht auf das gesamte Display trifft.



- 4 d) Geben Sie mit Begründung zwei Sicherheitshinweise für die Desinfektion mit dieser Quecksilber-Niederdrucklampe an.

2. Transmutation von Plutonium-239

Im Laufe des Jahres 2022 sollen alle in Deutschland noch am Netz befindlichen Kernkraftwerke abgeschaltet werden. Die Suche und die Auswahl eines Standorts für die Endlagerung des hochradioaktiven Abfalls, der auch das waffenfähige radioaktive Plutonium-Isotop ^{239}Pu enthält, ist noch nicht abgeschlossen.

- 6 a) In modernen Kernreaktoren entsteht ^{239}Pu aus dem Uran-Isotop ^{238}U durch den Einfang eines Neutrons und zwei sich anschließende Zerfallsprozesse. Begründen Sie, dass dabei nur eine Zerfallsart auftritt. Geben Sie die Zerfallsgleichungen an.

Eine Entlastung für Endlagerstätten könnte die chemische Abtrennung (Partitionierung) langlebiger Radionuklide wie ^{239}Pu und deren anschließende Umwandlung (Transmutation) in andere Elemente sein, die in dafür eigens zu errichtenden Kernreaktoren stattfinden. Bei ^{239}Pu entstehen bei einer möglichen Spaltreaktion nach Beschuss mit einem Neutron das Barium-Isotop ^{144}Ba (Halbwertszeit 11,5 s) und das Strontium-Isotop ^{94}Sr (Halbwertszeit 75,3 s) sowie weitere Neutronen.

- 8 b) Berechnen Sie für ^{239}Pu und ^{94}Sr jeweils die Dauer, bis aufgrund des natürlichen radioaktiven Zerfalls nur noch ein Prozent der ursprünglichen Anzahl radioaktiver Kerne vorhanden ist. Erklären Sie aufgrund dieses Ergebnisses, dass die Transmutation von ^{239}Pu sinnvoll sein könnte.

- 4 c) Trifft ein Neutron auf einen ^{239}Pu -Kern, so kann neben einer Spaltung auch ein sogenannter Neutroneneinfang stattfinden. Das Neutron wird dabei absorbiert, ohne dass Teilchen mit Masse freigesetzt werden. Begründen Sie mithilfe von Abb. 2, dass sich schnelle Neutronen für die Transmutation von ^{239}Pu besser eignen als thermische Neutronen.

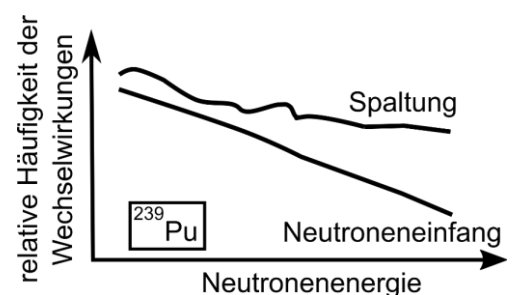


Abb. 2

- 5 d) Eine Studie zur Nutzung der Transmutation führt neben anderen Risiken Folgendes auf: „Nach der Partitionierung kann das Plutonium in reiner Form vorliegen. Während des Transports zu den Transmutationsanlagen oder in ein Zwischenlager könnte dieses entwendet werden.“ Wägen Sie je zwei Argumente für und gegen die Nutzung der Transmutation gegeneinander ab. Berücksichtigen Sie unter anderem die Aussage der Studie und das Ergebnis der Teilaufgabe b.

3. π -Mesonen

Zu den leichtesten Mesonen gehören die π -Mesonen. Sie bestehen nach dem Standardmodell der Teilchenphysik aus zwei Quarks der 1. Generation (up- und down-Quark und deren Antiteilchen). Es gibt das ungeladene π^0 -Meson und die geladenen Mesonen π^+ und π^- .

- 3 a) Geben Sie für π^+ und π^- jeweils die Zusammensetzung aus Quarks an.

(Fortsetzung nächste Seite)

Alle drei π -Mesonen sind instabil und zerfallen. Die Lebensdauer der geladenen π -Mesonen beträgt $2,6 \cdot 10^{-8}$ s. Bei deren Zerfall in Myonen stellt auch die sogenannte Myon-Leptonenzahl L_μ (s. Tabelle) eine Erhaltungsgröße dar.

Teilchen	μ^-	ν_μ	μ^+	$\bar{\nu}_\mu$	sonstige
L_μ	+1	+1	-1	-1	0

- 4 b) Identifizieren Sie unter Verwendung von Erhaltungssätzen die Gleichung, welche den Zerfall eines π^+ -Mesons richtig beschreibt, und begründen Sie Ihre Entscheidung.

(1) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (2) $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$ (3) $\pi^+ \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$

Das π^0 -Meson (Ruheenergie 135 MeV) wurde erst drei Jahre nach den geladenen π -Mesonen entdeckt und besitzt eine Lebensdauer von $0,85 \cdot 10^{-16}$ s. Es zerfällt mit einer sehr großen Wahrscheinlichkeit in zwei Photonen.

- 4 c) Erläutern Sie zwei physikalische Gründe, dass es experimentell schwierig ist, das π^0 -Meson nachzuweisen.

- 5 d) Begründen Sie, dass beim Zerfall eines ruhenden π^0 -Mesons mehr als ein Photon entstehen muss, und berechnen Sie für einen Zerfall in zwei Photonen die Beträge der zugehörigen Impulse.

1. Doppelspaltexperiment mit Neutronen

Einzelne Neutronen durchlaufen einen Geschwindigkeitsfilter und treffen senkrecht auf einen Doppelspalt mit dem Spaltmittenabstand $126 \mu\text{m}$. Zur Messung des in Abb. 1 abgebildeten Interferenzmusters wird ein Detektor mit einem wenige Mikrometer breiten Eintrittsspalt in einer Ebene in $5,00 \text{ m}$ Entfernung parallel zur Doppelspaltebene schrittweise verschoben.

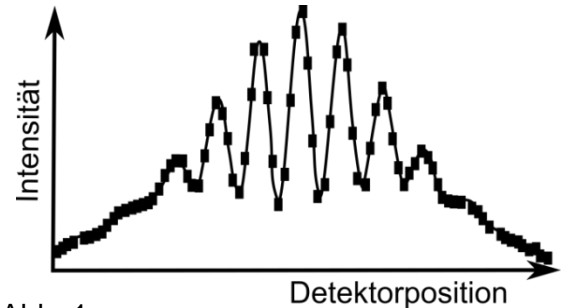


Abb. 1

- 4 a) Die Neutronen besitzen eine mittlere Geschwindigkeit von 214 m/s . Berechnen Sie die zugehörige de-Broglie-Wellenlänge. [zur Kontrolle: $1,85 \text{ nm}$]
- 9 b) Berechnen Sie den Abstand d_2 der Maxima 2. Ordnung in der Detektorebene. Ermitteln Sie unter Verwendung von Abb. 1 die Verschiebung des Detektors zwischen zwei Messpunkten. [zur Kontrolle: $d_2 = 0,293 \text{ mm}$]
- 4 c) Das Interferenzbild in Abb. 1 unterscheidet sich von idealisierten Darstellungen. Geben Sie zwei Ursachen hierfür sowie deren jeweilige Auswirkung auf das Interferenzbild an.

2. Nuklear-thermischer Raketenantrieb

Ein nuklear-thermisches Triebwerk würde die Flugdauer eines Raketenfluges zum Mars im Vergleich zu einem chemischen Triebwerk deutlich verkürzen. Die Energie für den Antrieb stammt dabei aus Spaltprozessen in einem Kernreaktor, in dem der Antriebsstoff erhitzt wird. In einem möglichen Spaltprozess innerhalb des Reaktors trifft ein einzelnes Neutron auf einen Kern des Uran-Isotops ^{235}U . Neben dem Krypton-Isotop ^{90}Kr entstehen ein weiteres Spaltprodukt sowie zwei freie Neutronen.

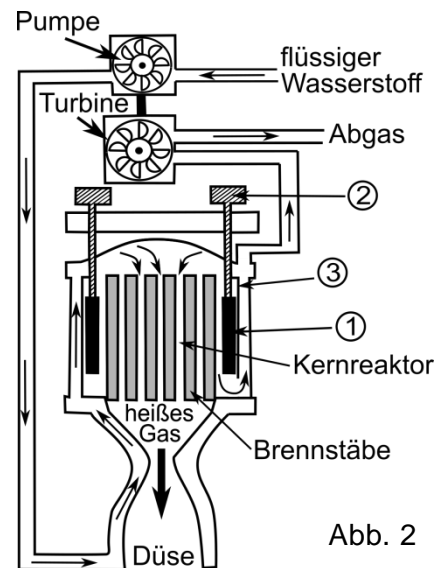


Abb. 2

- 3 a) Stellen Sie die Reaktionsgleichung für diesen Spaltprozess auf.
- 7 b) Der Antriebsstoff besteht aus flüssigem Wasserstoff. Beschreiben Sie anhand Abb. 2 das wesentliche Funktionsprinzip eines solchen nuklear-thermischen Antriebs. Verwenden Sie dabei alle acht dort genannten Begriffe.
- 6 c) Für die Leistungsregelung des Kernreaktors werden am Rand des Kernreaktors um ihre Längsachse drehbare Kontrollstäbe (① in Abb. 2) mit einem dazu gehörenden Stellmotor (②) verwendet sowie eine Innenraumauskleidung (③) mit Material, das Neutronen abbremst und reflektiert. Erläutern Sie mithilfe von Abb. 3, dass mit diesen Bauteilen eine Leistungsregelung in einem nuklearen Antrieb möglich ist.

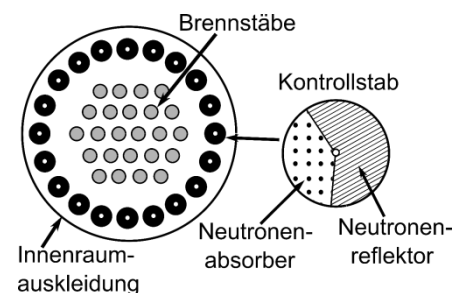


Abb. 3: Sicht von oben

3. Bodenbelastung nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl

Beim Reaktorunfall in Tschernobyl im Jahr 1986 wurden große Mengen an radioaktivem Material frei, u. a. das Cäsium-Isotop ^{137}Cs . Dieses Isotop ist ein β^- -Strahler mit einer physikalischen Halbwertszeit von 30 Jahren. Der Wind in den darauffolgenden Tagen trug diese Radionuklide auch nach Bayern.

- 5 a) Geben Sie die Zerfallsgleichung dieses β^- -Zerfalls an und zeigen Sie, dass die dabei freiwerdende Energie 1,2 MeV beträgt.

Nach dem Unfall bestimmten Forscher in Niederbayern die durchschnittliche Bodenaktivität aufgrund von ^{137}Cs zu ca. 25 kBq pro Quadratmeter.

- 4 b) Zeigen Sie, dass die Anzahl der niedergegangenen ^{137}Cs -Teilchen pro Quadratmeter im Durchschnitt $3,4 \cdot 10^{13}$ betrug.

Von 1990 bis 2003 wurden in Niederbayern Waldbodenschichten bis 30 cm Tiefe analysiert.

Abb. 4 zeigt Ausgleichskurven der Aktivität von ^{137}Cs in der organischen Auflage (z. B. Laub) und in tieferen Schichten sowie die über alle untersuchten Schichten summierte Aktivität.

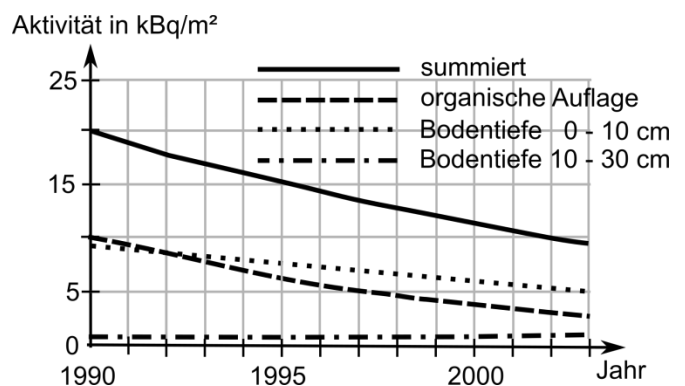


Abb. 4

- 6 c) Bestimmen Sie aus dem Verlauf der Kurve der summierten Aktivität in Abb. 4 die effektive Halbwertszeit und ermitteln Sie damit die summierte Aktivität pro Quadratmeter im Jahr 2021.

- 4 d) Vergleichen Sie die physikalische Halbwertszeit mit der ermittelten effektiven Halbwertszeit und erläutern Sie mithilfe des Diagramms einen Grund für den Unterschied.

Aufgrund der Aufnahme von ^{137}Cs betrug 2021 die Aktivität von Waldpilzen in Niederbayern durchschnittlich 480 Bq pro kg.

- 8 e) Schätzen Sie die von einer Person aufgenommene jährliche Äquivalentdosis aufgrund von ^{137}Cs bei einem Verzehr von 300 g Waldpilzen ab. Gehen Sie dabei davon aus, dass die mittlere Aktivität von ^{137}Cs im Körper über einen Zeitraum von einem Jahr 40% der Anfangsaktivität beträgt, und berücksichtigen Sie, dass nur ein Teil der beim Zerfall freiwerdenden Energie vom menschlichen Körper absorbiert wird. Beurteilen Sie damit und unter Berücksichtigung der mittleren jährlichen Strahlenbelastung in Deutschland die Gefährdung einer Person, die sich bei regelmäßigem Pilzverzehr aufgrund der radioaktiven Belastung ergibt.

Ph 12 – Astrophysik 1

1. Quasar 3C 273

Im Jahr 1963 wurde entdeckt, dass die Spektrallinien der punktförmig erscheinenden Radioquelle 3C 273 eine sehr hohe Rotverschiebung aufweisen. Abb. 1 zeigt einen Ausschnitt des Spektrums von 3C 273, Abb. 2 im Vergleich dazu einen entsprechenden Ausschnitt des Linienspektrums von Wasserstoff im Labor. Aufgrund der Beobachtungserkenntnisse wurde das Objekt 3C 273 als quasi-stellar bezeichnet, woraus sich dann die Bezeichnung Quasar für Objekte wie 3C 273 etablierte.

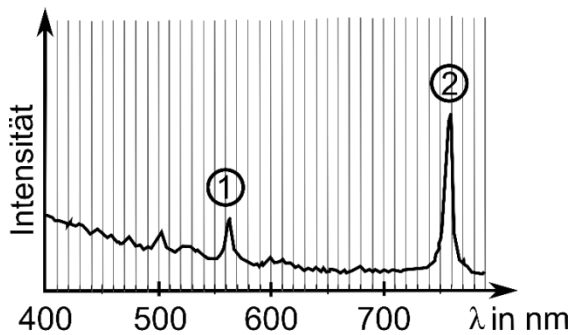


Abb. 1

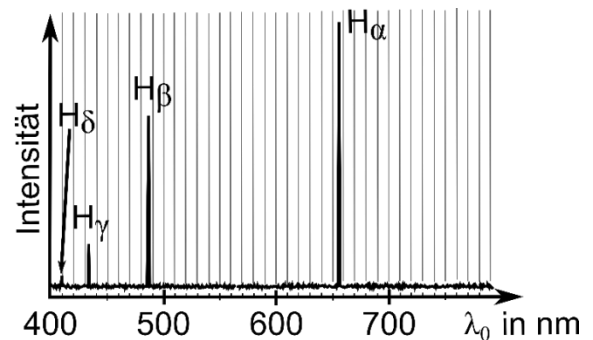


Abb. 2

- 4 a) Beschreiben Sie allgemein die Entstehung von Linien im Emissionsspektrum von Wasserstoff.
- 7 b) Ordnen Sie den Linien ① und ② des Quasar-Spektrums jeweils die zugehörige Linie aus Abb. 2 zu. Bestimmen Sie die Rotverschiebung $z = \Delta\lambda/\lambda_0$ für 3C 273 und weisen Sie nach, dass auch der Abstand der Linien ① und ② dazu stimmig ist. [zur Kontrolle: $z = 0,16$]
- 3 c) Erklären Sie die Entstehung der Rotverschiebung von 3C 273.
- 6 d) Begründen Sie unter Verwendung der Hubble-Beziehung, dass die Entfernung r des Quasars mit $r = \frac{z \cdot c}{H_0}$ bestimmt werden kann. Berechnen Sie r . [zur Kontrolle: $r = 6,5 \cdot 10^2$ Mpc]
- 8 e) Der Quasar 3C 273 hat eine scheinbare Helligkeit von 12,86. Berechnen Sie seine absolute Helligkeit M . Vergleichen Sie die Leuchtkraft des Quasars mit der Leuchtkraft der Sonne und mit der Leuchtkraft der gesamten Milchstraße, die eine absolute Helligkeit von $-20,6$ aufweist. [zur Kontrolle: $M = -26$]
- Nach heutigem Kenntnisstand sind Quasare aktive Kerne von Galaxien, in deren Zentren sich supermassereiche Schwarze Löcher befinden.
- 3 f) Erläutern Sie, dass die Beobachtung Schwarzer Löcher schwieriger ist als die von Sternen.

2. Das Zentrum unserer Milchstraße

Durch die Beobachtungen von Quasaren waren Astrophysiker auf die Idee gekommen, auch im Zentrum unserer Milchstraße nach einem Schwarzen Loch zu suchen. Vermutet wurde, dass die $2,7 \cdot 10^4$ Lj von der Erde entfernte Radioquelle

Sagittarius A* (Sgr A*) im Zentrum der Milchstraße ein Schwarzes Loch ist. Der Nachweis gelang zwei Arbeitsgruppen um R. Genzel und A. Ghez, die dafür 2020 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurden. Entscheidend für deren Erfolg war insbesondere die genaue Vermessung der Bahn des Sterns S2, der sich in 16 Jahren einmal um Sgr A* bewegt. Abb. 3 zeigt die Umlaufbahn von S2, wie sie von der Erde aus beobachtet werden kann.

3 a) Die Messungen erfolgten nicht im sichtbaren Spektralbereich, sondern im Infraroten. Erläutern Sie, dass dies für die Beobachtung des Zentrums der Milchstraße sinnvoll ist.

6 b) Der Stern S2 bewegt sich auf einer Ellipse, deren Bahnebene nicht senkrecht zur Blickrichtung liegt, sondern dazu gedreht ist. Die große Halbachse der beobachteten projizierten Ellipse verläuft auch in diesem Fall durch Sgr A* und halbiert die Fläche der beobachteten Ellipse. Zeichnen Sie in Abb. 3 die große Halbachse ein und schätzen Sie mithilfe der angegebenen Winkelskala deren Länge in Meter ab.

4 c) Die tatsächliche große Halbachse ist größer als die beobachtete und beträgt $1,6 \cdot 10^{14}$ m. Bestimmen Sie damit die Masse von Sgr A* in Vielfachen der Sonnenmasse.

3 d) Erläutern Sie, dass mit Teilaufgabe c noch nicht nachgewiesen ist, dass Sgr A* ein Schwarzes Loch ist.

4 e) Die Arbeitsgruppe um R. Genzel begann ihre hochauflösenden Infrarot-Beobachtungen bereits vor etwa 30 Jahren. Bewerten Sie, ob es vertretbar ist, dass Forschungsprojekte über einen derart langen Zeitraum gefördert werden.

Es gibt einen weiteren Ansatz, supermassereiche Schwarze Löcher aufzuspüren: J. G. Hills beschrieb 1988 einen Mechanismus, wonach ein Doppelsternsystem, das in die Nähe eines supermassereichen Schwarzen Lochs gerät, durch Gravitationskräfte auseinandergerissen wird, sodass einer der beiden Sterne aus dem Bereich des Schwarzen Lochs geschleudert wird. In der Milchstraße wurde nach diesen extrem schnellen Sternen gezielt gesucht; dabei wurde im Jahr 2019 außerhalb der galaktischen Scheibe mit S5-HVS1 einer der schnellsten je beobachteten Hauptreihensterne entdeckt.

5 f) Für den 8,8 kpc von der Erde entfernten Stern S5-HVS1 wurde eine Eigenbewegung von $0,035''$ pro Jahr und eine Radialgeschwindigkeit von 1020 km/s gemessen. Zeigen Sie, dass S5-HVS1 sich mit einer Gesamtgeschwindigkeit von $1,8 \cdot 10^3$ km/s bewegt.

4 g) S5-HVS1 ist heute 8,1 kpc vom Zentrum der Milchstraße entfernt. Schätzen Sie ab, vor wie vielen Jahren er möglicherweise aus seinem Doppelsternsystem herausgeschleudert wurde und geben Sie Ihre dabei verwendeten Annahmen an.

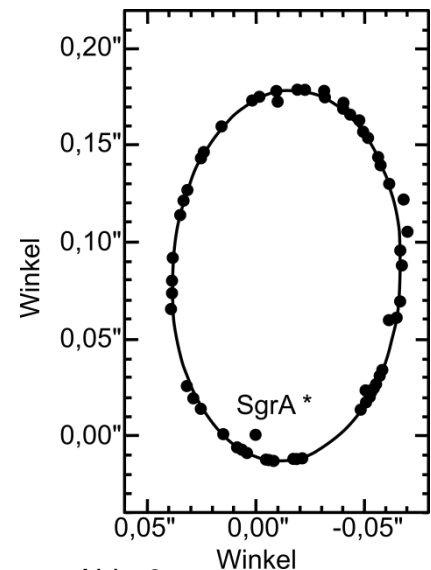


Abb. 3

Ph 12 – Astrophysik 2

1. Die Ringe des Saturn

Über Saturn ist bekannt, dass sein Hauptringsystem aus mehr als 100 000 einzelnen Ringen besteht, die sich aus vielen kleinen Eis- und Gesteinskörpern zusammensetzen. Das Ringsystem befindet sich genau in der Äquatorebene des Saturn und steht damit senkrecht zu dessen Rotationsachse. Es weist mit der sogenannten Cassinischen Teilung eine Lücke auf, die hauptsächlich durch den Mond Mimas verursacht wird, obwohl seine Bahn nicht in dieser Teilung liegt. Mimas bewegt sich auf einer fast kreisförmigen Bahn mit Radius $1,85 \cdot 10^8$ m um den Saturn.

- 4 a) Mimas hat eine Umlaufzeit von 0,94 Tagen. Berechnen Sie daraus die Masse des Saturn.

In Abb. 1 sieht man den Schattenwurf des Planeten auf das Ringsystem. Er erstreckt sich ein Stück über die Cassinische Teilung hinweg. Die Rotationsachse Saturns ist gegenüber der Normalen seiner Bahnebene um $\alpha = 26,7^\circ$ geneigt (s. Abb. 2).

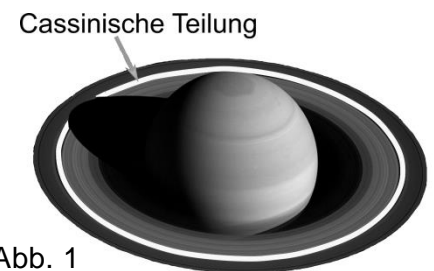


Abb. 1

- 6 b) Mit dem Schattenwurf und der Neigung seiner Rotationsachse kann der Abstand der Cassinischen Teilung zur Saturnachse abgeschätzt werden. Zeichnen Sie in Abb. 2 die Ebene des Ring-systems ein und führen Sie mithilfe der Abbildung und einer geeigneten Rechnung die Abschätzung durch.

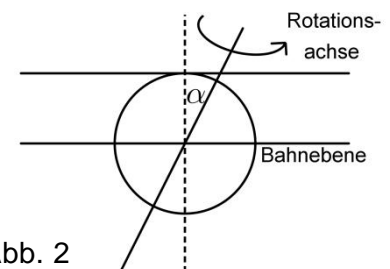


Abb. 2

- 5 c) Galileo Galilei entdeckte die Saturnringe bereits 1610. Beschreiben Sie zwei Gründe dafür, dass die Ringe von der Erde aus meist gut sichtbar sind.

Die Raumsonde Cassini startete am 15.10.1997, flog am 18.08.1999 wieder nahe an der Erde vorbei und schwenkte am 01.07.2004 auf die Saturnbahn ein.

- 5 d) Die Bahn der Sonde ab dem 18.08.1999 wird durch eine Halbellipse mit der Sonne in einem der Brennpunkte genähert. Fertigen Sie unter dieser Voraussetzung eine beschriftete Skizze der Flugbahn bis zum Einschwenken auf die Saturnbahn an und zeigen Sie, dass die große Halbachse 5,3 AE beträgt.
- 7 e) Berechnen Sie mithilfe des 3. Kepler'schen Gesetzes die Flugdauer der Sonde von ihrem Vorbeiflug an der Erde bis zu ihrem Einschwenken auf die Saturnbahn. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den angegebenen Daten und beurteilen Sie damit die in Teilaufgabe d verwendete Näherung.

Die Raumsonde Cassini untersuchte unter anderem die Temperatur des Mondes Mimas.

- 6 f) Mimas hat ein hohes Reflexionsvermögen von 0,96. Berechnen Sie die zu erwartende Oberflächentemperatur auf Mimas. Gehen Sie davon aus, dass der Mond mit seiner gesamten Oberfläche gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlt und seine durchschnittliche Entfernung von der Sonne 9,58 AE beträgt.

[zur Kontrolle: 40 K]

Quellenangaben

Ph 12 – 1

Abb. 2:

In Anlehnung an

O. Iwamoto et al: JENDL Actinoid File 2008. J. Nucl. Sci. Technol. 46(5), 510-528, 2009.

URL: https://www.researchgate.net/figure/Example-of-cross-sections-in-the-unresolved-resonance-region-239-Pu-Solid-curves-are_fig2_254276873

(aufgerufen am 8.11.2021)

Ph 12 – 2

Abb. 1:

In Anlehnung an

R. Gähler, Z. Zeilinger: Wave-Optical Experiments with Very-Cold Neutrons, Am. J. Phys. 59, 316 (1991). URL:

https://www.oeaw.ac.at/fileadmin/Institute/IQOQI-Vienna/PDF/publications-zeilinger/1991_-_Wave-optical_experiments_with_very_cold_neutrons.pdf

(aufgerufen am 8.11.2021)

Abb. 2 und 3:

In Anlehnung an

M. Houts et al: Low-Enriched Uranium Nuclear Thermal Propulsion Systems

URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170001555/downloads/20170001555.pdf>

(aufgerufen am 8.11.2021)

Abb. 4:

In Anlehnung an

Schilling B et al (Bayer. Landesamt für Umwelt): Monitoring der Radioaktivität im Boden - Veränderungen zwischen 1990 und 2003. Fachberichte, Augsburg, 2005 – Seite 46

Ph 12 – Astrophysik 1

Abb. 1:

Gemäß Formelsammlung und in Anlehnung an

W. J. Kaufmann: Galaxies and Quasars, 1979. W. H. Freeman and Company Publishers

Abb. 2:

In Anlehnung an

H. E. Smith: Quasars & Active Galaxies, 2007

URL: <https://cass.ucsd.edu/archive/physics/ph7/Quasars.html>

(aufgerufen am 8.11.2021)

Abb. 3:

In Anlehnung an

ESO/MPE/GRAVITY Collaboration: Bahndiagramm von S2 um das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße

URL: <https://www.eso.org/public/germany/images/eso1825c/?lang>
(aufgerufen am 27.9.2021)

Ph 12 – Astrophysik 2

Abb. 1:

In Anlehnung an

NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute: Saturn, Approaching Northern Summer

URL:

<https://solarsystem.nasa.gov/resources/210/saturn-approaching-northern-summer/>
(aufgerufen am 27.9.2021)

Abb. 4:

In Anlehnung an

G. Kauffmann: Distances in Cosmology

URL: https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/~gamk/TUM_Lectures/Lecture3.pdf