

Abiturprüfung 2024

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. Ionenimplanter

Zur Herstellung von Computerchips werden Siliziumkristalle gezielt mit Fremdatomen durchsetzt. Abb. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines dafür verwendeten sogenannten Ionenimplanters. Die Ionen mit vernachlässigbarer Anfangsgeschwindigkeit werden in der Ionenquelle durch eine Spannung von $U = 10 \text{ kV}$ vorbeschleunigt. Im Folgenden treffen einfach positiv geladene Arsen-Ionen $^{75}\text{As}^+$ auf einen Siliziumkristall.

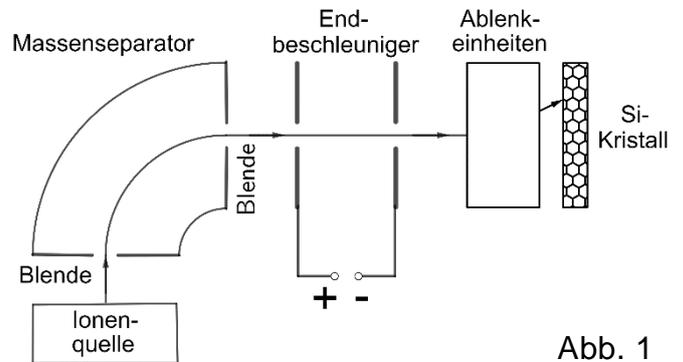


Abb. 1

- 5 a) Weisen Sie nach, dass die $^{75}\text{As}^+$ -Ionen nach der Vorbeschleunigung eine Geschwindigkeit von $1,6 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ besitzen.

Das Arsenpräparat in der Ionenquelle ist mit Antimon verunreinigt, weshalb sich im Ionenstrahl auch einfach positiv geladene Antimon-Ionen $^{121}\text{Sb}^+$ befinden. Um diese aus dem Ionenstrahl zu entfernen, befindet sich hinter der Ionenquelle entweder ein Geschwindigkeitsfilter oder ein Massenseparator (s. Abb. 1).

- 7 b) Erläutern Sie mithilfe einer Skizze den Aufbau und die Funktionsweise eines Geschwindigkeitsfilters. Erklären Sie, dass die $^{121}\text{Sb}^+$ -Ionen mit dessen Hilfe aus dem Ionenstrahl entfernt werden können.
- 8 c) Wird statt des Geschwindigkeitsfilters ein Massenseparator eingesetzt, sollen die gewünschten $^{75}\text{As}^+$ -Ionen diesen passieren können. Zeichnen Sie die Orientierung des dafür verwendeten Magnetfeldes in Abb. 1 ein. Leiten Sie folgende Gleichung für den Radius r der Kreisbahn der Ionen mit Masse m im Massenseparator mit der magnetischen Flussdichte B her:

$$r = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot U}{e \cdot B^2}}$$

Begründen Sie damit, dass die $^{121}\text{Sb}^+$ -Ionen im Massenseparator aussortiert werden, und skizzieren Sie eine mögliche Flugbahn eines $^{121}\text{Sb}^+$ -Ions in Abb. 1.

- 4 d) In Abb. 2 ist die Eindringtiefe der $^{75}\text{As}^+$ -Ionen in den Siliziumkristall in Abhängigkeit von ihrer kinetischen Energie dargestellt. Um für einen Computerchip Bereiche im Kristall von 20 nm bis 40 nm Tiefe mit $^{75}\text{As}^+$ -Ionen zu durchsetzen, benötigt man einen Endbeschleuniger (s. Abb. 1). Entscheiden Sie unter Verwendung von Abb. 2 begründet, wie hierfür die Spannung am Endbeschleuniger variiert werden muss.

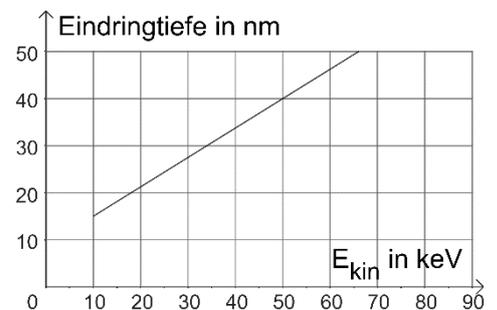


Abb. 2

- 5 e) Für eine Bestrahlung einer rechteckigen Fläche in einer bestimmten Tiefe im Siliziumkristall benötigt man elektrische Ablenkeinheiten. Skizzieren Sie einen möglichen prinzipiellen Aufbau solcher Ablenkeinheiten und erklären Sie, wie mit ihrer Hilfe der Strahl zeilenweise über die Fläche geführt werden kann.

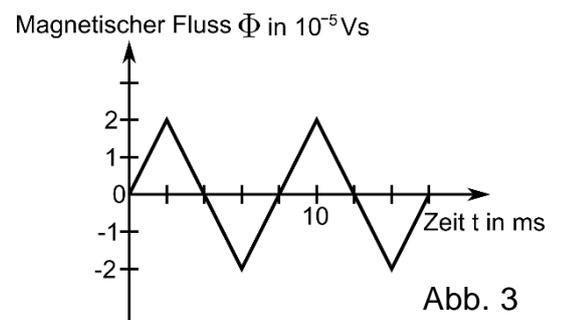
- 4 f) Um die Anzahl der eingebrachten $^{75}\text{As}^+$ -Ionen ermitteln zu können, misst man während der Bestrahlung die Stromstärke. Pro $^{75}\text{As}^+$ -Ion bewegt sich ein Elektron, wenn die Ionenquelle leitend mit dem Kristall verbunden wird, wodurch das $^{75}\text{As}^+$ -Ion zum ungeladenen Atom wird. Für die Bearbeitung einer 36 cm^2 großen Fläche im Kristall benötigte der Ionenimplanter 70 s, wobei eine Stromstärke von $0,10\text{ mA}$ gemessen wurde. Berechnen Sie die Anzahl der $^{75}\text{As}^+$ -Ionen, die pro Quadratzentimeter der Fläche in den Kristall eingebracht wurden.

2. Drahtloses Laden

Viele moderne Smartphones unterstützen die drahtlose Ladetechnologie, bei der das Smartphone zum Laden auf eine Ladestation gelegt wird. In dieser sowie im Smartphone ist jeweils eine Spule verbaut. Für ein Schulexperiment soll das Laden eines Smartphones auf einer Ladestation mithilfe zweier baugleicher langgestreckter Spulen mit jeweils 500 Windungen nachgestellt werden. Eine der Spulen wird an eine Wechselspannung angeschlossen. Dabei durchsetzt das erzeugte Magnetfeld auch die sich darüber befindliche Empfangsspule.

- 4 a) Erklären Sie das Zustandekommen der Spannung, die zwischen den Enden der Empfangsspule registriert werden kann.

Mithilfe eines Frequenzgenerators wird an die untere Spule eine Dreiecksspannung angelegt, sodass sich für den zeitlichen Verlauf des magnetischen Flusses im Inneren der Empfangsspule das in Abb. 3 dargestellte Diagramm ergibt.



- 7 b) Zeichnen Sie mithilfe von Abb. 3 ein t-U-Diagramm für die Spannung U zwischen den Enden der Empfangsspule für $0\text{ ms} \leq t \leq 16\text{ ms}$. Berechnen Sie hierfür den Betrag der maximal auftretenden Spannung.

Abb. 4 zeigt einen Blick in eine Ladestation; die Spule ist in Originalgröße hell abgebildet. Eine baugleiche Spule befindet sich im Smartphone. Hinter den Spulen befindet sich jeweils eine dünne ferromagnetische Folie.



- 4 c) Begründen Sie, dass für Ladestation und Smartphone diese Bauweise verwendet wird. Gehen Sie dabei auf zwei Aspekte ein.
- 6 d) Zum Laden des Akkus wandelt eine elektronische Schaltung im Inneren des Smartphones die Spannung, die an den Enden der Empfangsspule entsteht, in eine Gleichspannung von $5,0\text{ V}$ um. Die an den Akku abgegebene Leistung beträgt $7,5\text{ W}$. Ein vollständig entladener Akku eines Smartphones mit der Aufschrift 4000 mAh soll zu 80% aufgeladen werden. Berechnen Sie die benötigte Ladezeit.
- 6 e) Es gibt Überlegungen, die drahtlose Ladetechnologie auch für Akkus von Elektroautos zu nutzen. Beschreiben Sie zwei Voraussetzungen, die hierfür geschaffen werden müssten, und beurteilen Sie, ob diese Ladetechnologie künftig eine große Rolle spielen wird.

1. Ein Zylinderkondensator als Füllstandsmesser

Kondensatoren gibt es in verschiedenen Bauformen. Abb. 1 zeigt einen Zylinderkondensator von oben. Dabei handelt es sich um zwei ineinanderstehende metallische Zylinder gleicher Höhe h mit den Radien r_1 und r_2 . Im Zwischenraum befindet sich zunächst Luft. Zwischen den Zylindern wird eine Gleichspannung angelegt.

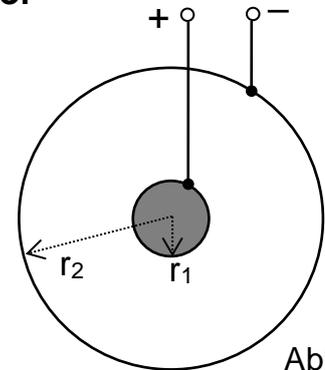


Abb. 1

- 3 a) Skizzieren Sie in Abb. 1 ein elektrisches Feldlinienbild im Zwischenraum der Zylinder bestehend aus acht Feldlinien.
- 6 b) Skizzieren Sie zum Vergleich ein elektrisches Feldlinienbild eines geladenen Plattenkondensators. Ergänzen Sie in Ihrer Zeichnung vier Äquipotentiallinien im Inneren des Kondensators und beschriften Sie diese mit den passenden Potentialwerten; dabei soll am Kondensator eine Gleichspannung von 2,0 kV anliegen und das Potential auf der negativ geladenen Platte Null betragen.
- 5 c) In einem Gespräch unter Schülerinnen und Schülern behauptet ein Schüler: „In Abb. 1 sind die Äquipotentiallinien konzentrische Kreise, die nach außen zunehmende Abstände voneinander haben, wenn zwischen zwei benachbarten Linien stets der gleiche Potentialunterschied vorliegt.“ Nehmen Sie zu den einzelnen Aspekten dieses Kommentars begründet Stellung.

Zylinderkondensatoren werden z. B. verwendet, um die Füllstandshöhe x ($0 \leq x \leq h$) in Flüssigkeitsbehältern zu kontrollieren (s. Abb. 2). Für die Kapazität C_0 eines luftgefüllten

Zylinderkondensators gilt
$$C_0 = 2\pi\epsilon_0 \cdot \frac{h}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}.$$

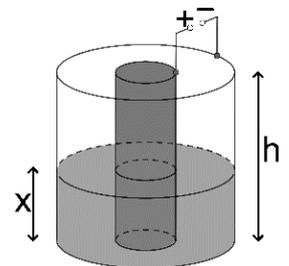


Abb. 2

Mit zunehmender Füllstandshöhe x ändert sich auch die Kapazität C des Kondensators.

Es gilt $C = C_0 + C_0 \cdot (\epsilon_r - 1) \cdot \frac{x}{h}$, wobei ϵ_r die Dielektrizitätszahl der Flüssigkeit ist.

Gehen Sie im Weiteren von einem Kondensator mit der Höhe $h = 85,3$ cm und den Radien $r_1 = 1,6$ cm und $r_2 = 4,3$ cm sowie von Öl als Flüssigkeit mit $\epsilon_r = 2,5$ aus.

- 8 d) Zeichnen Sie das x - C -Diagramm für Öl für $0 \leq x \leq h$ und erklären Sie den Verlauf des Graphen mithilfe der obigen Formeln. [zur Kontrolle: $C_0 = 48$ pF]
- 6 e) Eine Warnlampe wird aktiviert, sobald die Kapazität unter 86 pF fällt. Bestimmen Sie rechnerisch den zugehörigen Grenzwert für den Füllstand und überprüfen Sie nachvollziehbar Ihr Ergebnis mithilfe des in Teilaufgabe d gezeichneten Diagramms.

2. Die Dipolstrahlung der Raumsonde Mars-Express

Mars-Express ist die erste erfolgreiche europäische Mission zum Planeten Mars. Seit 2003 umrundet die gleichnamige Raumsonde unseren Nachbarplaneten. Die 40,0 m

(Fortsetzung nächste Seite)

lange Dipolantenne der Sonde sendet elektromagnetische Wellen in Richtung der Marsoberfläche aus. Die Reflexionen geben u. a. Aufschluss über Wasservorkommen im Marsboden.

- 6 a) Zeigen Sie, dass die Antenne Wellen der Frequenz 3,75 MHz abstrahlt, wenn sie in der Grundschiwingung angeregt wird. Geben Sie die Bezeichnungen der Spektralbereiche ① bis ⑤ an (s. Abb. 3) und ordnen Sie die Frequenz 3,75 MHz dem passenden Spektralbereich zu.

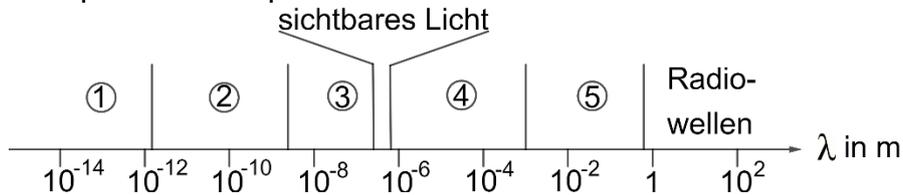


Abb. 3

- 5 b) Die Antenne sendet elektromagnetische Wellen im Pulsbetrieb aus. Jeder Puls wird über eine Zeitdauer von 500 μ s abgestrahlt. Zwischen zwei Pulsen schaltet die Antennenanlage in den Empfangsmodus um, der 7,2 ms dauert. Berechnen Sie die maximale Entfernung von der Marsoberfläche, bei der ein Puls vollständig empfangen werden kann, bevor der nächste abgestrahlt wird, und erläutern Sie Ihre Überlegungen. Vereinfachend wird angenommen, dass die Reflexionen nicht im Marsboden, sondern direkt an der Oberfläche erfolgen.

3. Der Magneto-optische Effekt

Durchstrahlt monochromatisches, polarisiertes Licht einen Quader aus Flintglas, in dem ein Magnetfeld der Flussdichte B parallel zur Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle vorliegt, so kann in Abhängigkeit von B eine Drehung der Polarisationsrichtung um den Winkel α beobachtet werden (vgl. Abb. 4).

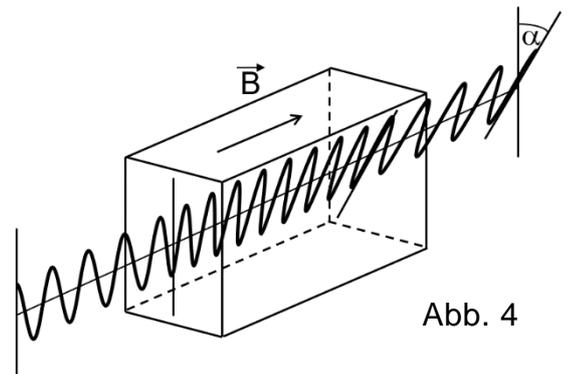


Abb. 4

- 5 a) Schreiben Sie einen Beitrag für ein Schüler-Lexikon zum Stichwort „Polarisierte Wellen“, in den Sie auch ein Beispiel zur Veranschaulichung mit einbeziehen.
- 7 b) Das Magnetfeld in Abb. 4 wird mittels Elektromagneten erzeugt. Um die jeweilige magnetische Flussdichte B zu bestimmen, wird der Quader kurz aus dem Versuchsaufbau entfernt und eine Hall-Sonde eingesetzt. Erläutern Sie das Funktionsprinzip einer Hall-Sonde und zeigen Sie ausgehend von einem geeigneten Kraftansatz, dass die gemessene Hall-Spannung direkt proportional zur magnetischen Flussdichte ist.
- 5 c) Untersuchen Sie anhand der Messwerte in folgender Tabelle, ob eine direkte Proportionalität von B und α vorliegt. Stellen Sie zwei Vermutungen auf, welche Veränderungen im Versuchsaufbau den Winkel α noch beeinflussen könnten.

B in mT	78	107	182	221
α in $^\circ$	2	3	5	6

- 4 d) „Allein mit der Demonstration dieses Experiments wird überzeugend nachgewiesen, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist!“ Nehmen Sie begründet Stellung zu dieser Aussage.

1. Materiewellen – Experiment von Möllenstedt und Düker

Im Jahr 1955 wurde von den Physikern Möllenstedt und Düker experimentell nachgewiesen, dass Elektronen, auch ohne in Materie einzudringen, Interferenzerscheinungen zeigen. Dafür wurde zunächst ein Elektronenstrahl erzeugt.

- 4 a) Fertigen Sie eine beschriftete Skizze einer experimentellen Anordnung an, mit der sich ein Elektronenstrahl erzeugen lässt.
- 4 b) Leiten Sie nicht-relativistisch einen Ausdruck für die de Broglie-Wellenlänge eines Elektrons in Abhängigkeit von seiner kinetischen Energie her.

Im Experiment wird ein Strahl aus Elektronen einheitlicher Geschwindigkeit bei Q zu einem Elektronenbündel aufgeweitet. Dieses tritt von oben in eine Ablenkeinheit ein, die aus zwei negativ geladenen Platten und einem dünnen positiv geladenen Quarzfaden besteht (vgl. Abb. 1).

Zwischen jeder Platte und dem Quarzfaden wird eine Gleichspannung U angelegt; dadurch werden die Elektronen links und rechts des Quarzfadens in gegensätzliche Richtungen abgelenkt. Infolgedessen scheinen statt einem zwei Elektronenbündel von virtuellen Elektronenquellen S_1 und S_2 zu kommen. Es ergibt sich folglich eine Situation, die einem Doppelspaltexperiment mit Spaltabstand b zwischen S_1 und S_2 und Abstand a zur Detektorschicht entspricht. Die Auftreffstellen der Elektronen auf der Detektorschicht erscheinen dabei hell.

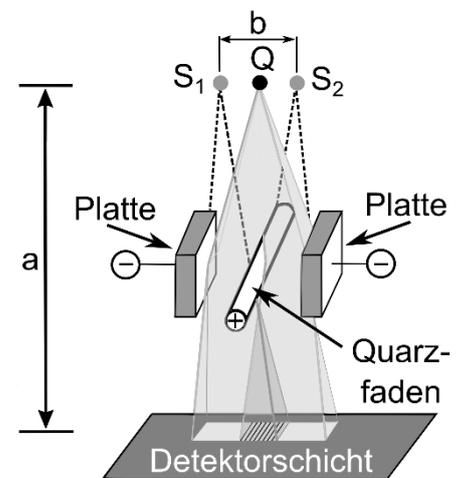


Abb. 1

- 3 c) Nennen Sie zwei Unterschiede zwischen dem Experiment von Möllenstedt und Düker und dem Experiment mit der Elektronenbeugungsröhre.

- 4 d) Die beiden Schirmbilder A und B in Abb. 2 ergeben sich durch zwei unterschiedliche Spannungen U . Erläutern Sie, dass der Abstand b umso größer ist, je höher die Spannung U ist, und entscheiden Sie begründet, welches der Schirmbilder zur größeren Spannung gehört.

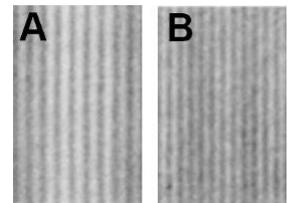


Abb. 2

- 7 e) Eine Spannung $U = 5,0 \text{ V}$ entspricht einem b von $3,5 \mu\text{m}$. Abb. 3 zeigt eine Vergrößerung des zugehörigen Schirmbilds, das im Abstand $a = 22 \text{ cm}$ detektiert wird. Das Maximum 0. Ordnung befindet sich bei $0 \mu\text{m}$.

Bestimmen Sie anhand der Lage der Maxima 4. Ordnung die de Broglie-Wellenlänge λ der Elektronen. Begründen Sie, dass sich λ bei Vergrößerung der Ordnung der zur Auswertung verwendeten Maxima genauer ermitteln lässt.

[zur Kontrolle: $\lambda = 8,7 \text{ pm}$]

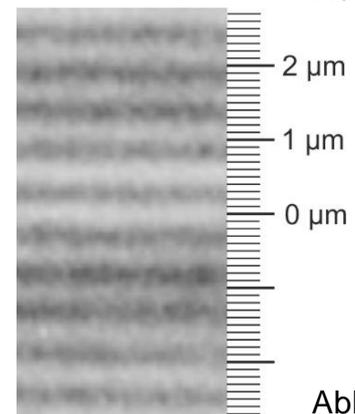


Abb. 3

- 6 f) Bei der Erzeugung des Elektronenstrahls wurden die Elektronen mit der Spannung $U_B = 19,4 \text{ kV}$ beschleunigt. Ermitteln Sie die sich ergebende de Broglie-Wellenlänge der Elektronen mithilfe der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung $E^2 = c^2 \cdot p^2 + E_0^2$, wobei c die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit, p den Impuls, E die relativistische Energie und E_0 die Ruheenergie des Elektrons bezeichnen. Vergleichen Sie das Ergebnis mit dem aus Teilaufgabe e.
- 6 g) In einer Abwandlung des oben beschriebenen Experiments wird die Intensität der Quelle so stark reduziert, dass Elektronen einzeln und nacheinander auf die Detektorschicht treffen. Die Auftreffstellen werden zu einem Gesamtbild zusammengesetzt. Der übrige Versuchsaufbau bleibt unverändert. Erläutern Sie die Beobachtungen auf dem Detektorschirm über einen längeren Zeitraum, indem Sie auf drei wesentliche Eigenschaften des Quantenobjekts Elektron eingehen.

2. Existenz von Tetra-Neutronen

Eine Forschungsgruppe der TU München hat im Jahr 2022 Ergebnisse publiziert, die darauf hindeuten, dass Teilchen aus vier gebundenen Neutronen, sogenannte Tetra-Neutronen, erzeugt werden können. Dazu werden zunächst Lithium-Atome ${}^7\text{Li}$ vollständig ionisiert und die entstehenden ${}^7\text{Li}$ -Kerne der Masse $m_K({}^7\text{Li}) = 7,014358 \text{ u}$ auf 11,8 % der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt.

- 4 a) Ermitteln Sie mithilfe einer relativistischen Rechnung die kinetische Energie eines beschleunigten ${}^7\text{Li}$ -Kerns. [zur Kontrolle: 46,0 MeV]

Dieser ${}^7\text{Li}$ -Kern trifft anschließend auf einen weiteren, ruhenden ${}^7\text{Li}$ -Kern als Target, sodass ein Kern des Kohlenstoff-Isotops ${}^{10}\text{C}$ der Masse $m_K({}^{10}\text{C}) = 10,013561 \text{ u}$ und ein Tetra-Neutron ${}^4_0\text{n}$ entstehen könnten. Gehen Sie zunächst davon aus, dass das Tetra-Neutron eine Masse von $m({}^4_0\text{n}) = 4,035116 \text{ u}$ besitzt. Nehmen Sie außerdem an, dass sich der entstehende ${}^{10}\text{C}$ -Kern im Grundzustand befindet.

- 6 b) Geben Sie die entsprechende Reaktionsgleichung an und berechnen Sie den Q-Wert in MeV. Entscheiden Sie begründet, ob die Reaktion unter diesen experimentellen Rahmenbedingungen ablaufen kann.
- 6 c) Ein Tetra-Neutron würde durch einen β^- -Zerfall zerfallen. Geben Sie die zugehörige Reaktionsgleichung an und stellen Sie den β^- -Zerfall in einer Skizze des Potentialtopfmodells eines Atomkerns schematisch dar.

(Fortsetzung nächste Seite)

Die Li-Kerne, die als Targets dienen, befinden sich in einer Schicht aus Lithiumoxid (Li_2O). Daher werden neben Li-Kernen auch Sauerstoffkerne getroffen. Es entstehen Kerne des Kohlenstoffisotops im Grundzustand (^{10}C) oder in angeregten Zuständen ($^{10}\text{C}^*$) sowie jeweils weitere Teilchen (siehe Tabelle).

Target	weitere(s) Teilchen	$E_{\text{kin}}(^{10}\text{C})$ in MeV	$E_{\text{kin}}(^{10}\text{C}^*)$ in MeV
^7Li	^4_0n	26,43	20,81
^7Li	$4 \cdot ^1_0\text{n}$	25,88	19,70
^6Li	$3 \cdot ^1_0\text{n}$	33,43	30,06
^{16}O	^{13}B	22,98	18,90
^{17}O	^{14}B	19,28	14,70

6

- d) Abb. 4 zeigt die Zählrate in Abhängigkeit von der kinetischen Energie der angeregten und nicht angeregten Kohlenstoffkerne. Wählen Sie aus den zehn möglichen Reaktionen der Tabelle die gemäß Abb. 4 bevorzugt auftretenden aus. Begründen Sie damit, dass das Experiment die Entstehung von Tetra-Neutronen nahelegt.

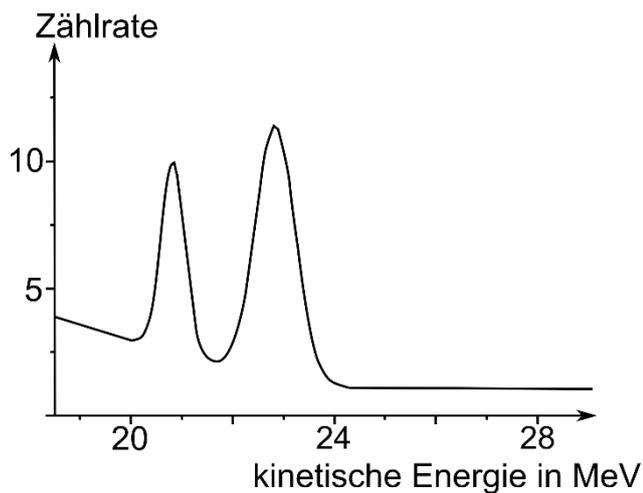


Abb. 4

4

- e) An der Existenz des Tetra-Neutrons gibt es trotz der oben dargestellten Messungen erhebliche Zweifel. Erläutern Sie zwei Vorgehensweisen, die in der Physik angewendet werden könnten, um experimentelle Ergebnisse abzusichern.

60

(Leerseite)

1. Farbzentren in Kristallen

Ein NaCl-Kristall besteht aus regelmäßig angeordneten Na^+ - und Cl^- -Ionen in einer dreidimensionalen Gitterstruktur. Mit hochenergetischer Strahlung kann ein Cl^- -Ion herausgeschlagen werden, sodass eine Fehlstelle entsteht. Diese wird in der Folge von einem Elektron besetzt. Der Kristall erscheint bei einer Vielzahl solcher Veränderungen farbig, weshalb man den würfelförmigen Bereich mit der Kantenlänge a um die Fehlstelle als Farbzentrum bezeichnet (vgl. Abb. 1).

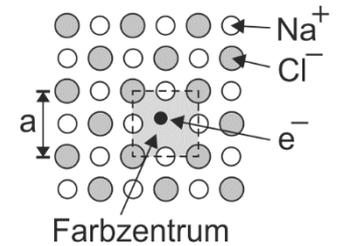


Abb. 1

- 4 a) Zur Erzeugung einer Fehlstelle im NaCl-Kristall kann Röntgenstrahlung eingesetzt werden. Fertigen Sie eine beschriftete Zeichnung des Aufbaus einer Röntgenröhre einschließlich der elektrischen Beschaltung an.

Das einfachste Potentialtopfmodell ist der eindimensionale Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden. Damit werden im Folgenden die Energiezustände des Elektrons mit Masse m im Farbzentrum modelliert.

- 7 b) Geben Sie die Grundannahmen dieses Modells an. Zeigen Sie davon ausgehend, dass für die Energieniveaus E_n des Elektrons $E_n = \frac{h^2 \cdot n^2}{8 \cdot m \cdot a^2}$ gilt.

Farbzentren absorbieren Licht eines bestimmten Spektralbereichs, der von der Kantenlänge a abhängt.

- 5 c) Für den NaCl-Kristall gilt $a = 0,564 \text{ nm}$. Berechnen Sie mithilfe der Beziehung aus Teilaufgabe b die größtmögliche Wellenlänge des absorbierten Lichts, wenn das Elektron aus dem Grundzustand angeregt wird.

Abb. 2 zeigt das gemessene Absorptionsverhalten von Farbzentren in verschiedenen Kristallen, die wie NaCl modelliert werden können. Die Anregung erfolgt stets vom Grundzustand in den ersten angeregten Zustand.

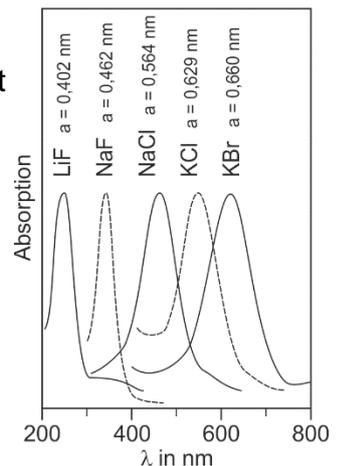


Abb. 2

- 4 d) Begründen Sie mithilfe des Potentialtopfmodells und Abb. 2 die unterschiedlichen Wellenlängen maximaler Absorption von NaCl und KCl.

- 4 e) Beurteilen Sie anhand von insgesamt drei Aspekten die Eignung des Modells des eindimensionalen Potentialtopfs mit unendlich hohen Wänden zur Beschreibung des Absorptionsverhaltens eines Farbzentrums. Berücksichtigen Sie dabei Pro- und Kontraargumente.

- 4 f) Durch den Einbau eines Fremdatoms in der Umgebung eines Farbzentrums kann ein Kristall als Quelle einzelner Photonen mit einer bestimmten Wellenlänge eingesetzt werden. Beschreiben Sie den in Abb. 3 dargestellten Kreisprozess, der diese Photonenemission ermöglicht.

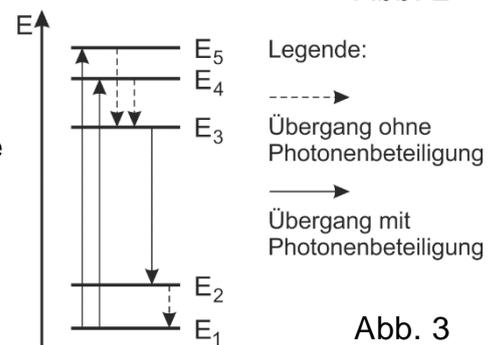


Abb. 3

(Fortsetzung nächste Seite)

2. Beschleunigergetriebener Kernreaktor

- 5 a) Beschreiben Sie den Ablauf und die Regelung der Kettenreaktion in einem Kernreaktor mit Wasser als Moderator.
- 5 b) Brennelemente werden nach ihrem Einsatz im Reaktor zunächst in einem mit Wasser gefüllten Becken gelagert. Nach einem Jahr ist die Aktivität eines Brennelements um 99 % gesunken. Berechnen Sie die Zeit in Tagen, nach der die Aktivität auf die Hälfte gesunken ist.

Weltweit werden neue Reaktorkonzepte erforscht, die gegenüber herkömmlichen u. a. sicherer sein sollen. Abb. 4 zeigt einen möglichen Aufbau eines sogenannten Accelerator Driven Systems (ADS): Im Reaktor befindet sich flüssiges Blei, mit dem Energie in Form von Wärme nach außen transportiert wird. Treffen Protonen aus dem Teilchenbeschleuniger auf die Bleikerne, werden schnelle Neutronen freigesetzt. Jeder Kern des in den Brennstäben enthaltenen Thorium-Isotops ^{232}Th kann eines dieser schnellen Neutronen einfangen. Durch zwei darauffolgende Zerfälle entsteht das Uran-Isotop ^{233}U , das bevorzugt durch schnelle Neutronen gespalten wird. Nehmen Sie zur Vereinfachung im Folgenden an, dass als Spaltprodukte des ^{233}U ausschließlich das Iod-Isotop ^{135}I mit der Atommasse 134,910049 u, ein weiteres Nuklid mit der Atommasse 96,918134 u und zwei schnelle Neutronen entstehen.

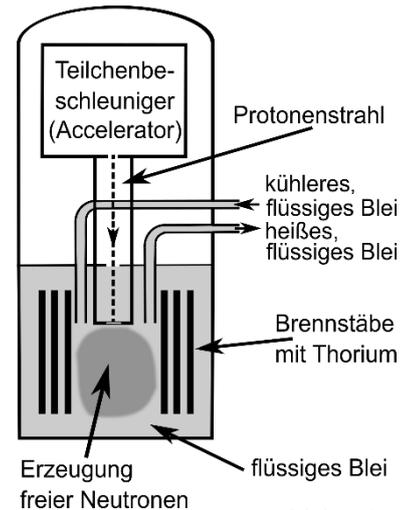


Abb. 4

- 5 c) Vervollständigen Sie die Gleichungen ① bis ④ der im ADS ablaufenden Reaktionen.
- ① $^{232}_{90}\text{Th} + \boxed{\phantom{^{233}_{90}\text{Th}}} \rightarrow ^{233}_{90}\text{Th}$
- ② $^{233}_{90}\text{Th} \rightarrow \boxed{\phantom{^{233}_{90}\text{Th}}} \rightarrow \boxed{\phantom{^{233}_{90}\text{Th}}}$
- ③ $\boxed{\phantom{^{233}_{90}\text{Th}}} \rightarrow ^{233}_{92}\text{U} + \boxed{\phantom{^{233}_{92}\text{U}}}$
- ④ $^{233}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow ^{135}_{53}\text{I} + \boxed{\phantom{^{135}_{53}\text{I}}} + 2 \cdot {}^1_0\text{n}$
- 3 d) Zeigen Sie, dass sich für die oben beschriebene Kernspaltung von ^{233}U der Q-Wert 189 MeV ergibt.
- 5 e) In einem Jahr betrug der Bedarf an elektrischer Energie eines Vier-Personen-Haushalts etwa 3000 kWh. Berechnen Sie die dafür benötigte Masse von ^{233}U . Gehen Sie davon aus, dass die benötigte Energie allein aus der oben beschriebenen Kernspaltung von ^{233}U stammt und die bei der Kernspaltung freigesetzte Energie vollständig in elektrische Energie umgewandelt wird.
- 4 f) Ein Entwickler des ADS-Reaktors behauptet: „Sobald wir den Beschleuniger abschalten, stoppt die Reaktion. Eine unkontrollierte Kettenreaktion ist ausgeschlossen. Die Anlage ist also sicher.“ Nehmen Sie zu dieser Aussage begründet Stellung.
- 5 g) Angesichts des Klimawandels setzen manche Länder verstärkt auf die Kernenergie. Bewerten Sie die aktuellen Forschungsanstrengungen, den ADS-Reaktor zur Marktreife zu entwickeln, indem Sie mindestens vier Aspekte, darunter auch außerfachliche, in Ihre Überlegungen einbeziehen.

Ph 12 – Astrophysik 1

1. Weltraumschrott

Im November 2021 wurde der ausgediente Satellit Kosmos-1408 bewusst zerstört und zerbrach dabei in mehrere Tausend Teile unterschiedlicher Massen und Geschwindigkeiten. Zuvor bewegte er sich auf einer annähernd kreisförmigen Umlaufbahn in einer Höhe von 465 km über der Erdoberfläche.

- 5 a) Bestimmen Sie die Bahngeschwindigkeit des Satelliten auf seiner Umlaufbahn.
[zur Kontrolle: 7,64 km/s]

Es wird exemplarisch ein Trümmerteil der Masse 10 g betrachtet. Nehmen Sie an, dass sich direkt nach der Satellitenzerstörung seine Bewegungsrichtung nicht verändert hat und sich seine Geschwindigkeit um 20,0 % erhöht hat.

- 6 b) Das Trümmerteil bewegt sich auf einer elliptischen Umlaufbahn mit der großen Halbachse a um die Erde. Für seine Geschwindigkeit gilt $v = \sqrt{G \cdot M \cdot \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$, wobei r der momentane Abstand zum Erdmittelpunkt und M die Erdmasse sind. Begründen Sie, dass das Trümmerteil die ursprüngliche Kreisbahn des Satelliten verlässt, aber weiterhin eine gebundene Bewegung durchführt. Verwenden Sie dabei, dass seine Fluchtgeschwindigkeit das 1,41-fache der Satelliten-Bahngeschwindigkeit beträgt. Berechnen Sie die große Halbachse der neuen Umlaufbahn.
[zur Kontrolle: $a = 12,2 \cdot 10^6$ m]

- 7 c) Direkt nach der Zerstörung des Satelliten hatte das Trümmerteil den geringsten Abstand zur Erde. Berechnen Sie die lineare Exzentrizität e sowie die kleine Halbachse der Bahn. Stellen Sie die lineare Exzentrizität und die beiden Halbachsen maßstäblich dar und ergänzen Sie die Umlaufbahn des Trümmerteils um die Erde, wobei die Kennzeichnung der Erde durch ihren Mittelpunkt ausreichend ist.
[zur Kontrolle: $e = 5,37 \cdot 10^6$ m]

Die Internationale Raumstation ISS bewegt sich auf einer Bahn zwischen 370 km und 460 km über der Erdoberfläche um die Erde.

- 4 d) Beurteilen Sie, ob Trümmerteile des zerstörten Satelliten die ISS in Gefahr bringen können, und begründen Sie Ihre Entscheidung.

In den USA wurde der Umgang mit ausgedienten Satelliten gesetzlich reglementiert. Ab dem Jahr 2025 gestartete Satelliten, die für Dienstleistungen in den USA genutzt werden, müssen nach ihrem Einsatz kontrolliert zum Absturz gebracht werden.

- 4 e) Bewerten Sie die Sinnhaftigkeit dieser Regelung; beziehen Sie dabei jeweils einen physikalischen und einen nichtphysikalischen Aspekt mit ein.

2. Der Planetarische Nebel NGC 7662 („Blue Snowball“)

Im Oktober 2024 jährt sich die Entdeckung des annähernd kugelförmigen Planetarischen Nebels NGC 7662 durch William Herschel zum 250. Mal. Bemerkenswert an NGC 7662 ist seine blau-grüne Farbe, für die sein Zentralstern HD 220733 verantwortlich gemacht wird.

(Fortsetzung nächste Seite)

3
7
2
4
3
4
8
3

- a) Aufgrund der Deklination des Planetarischen Nebels NGC 7662 von $42^{\circ}32'$ beträgt der Winkel zwischen dem Planetarischen Nebel und dem Himmelsnordpol $47^{\circ}28'$. Beurteilen Sie, ob der Planetarische Nebel in ganz Bayern, das sich von $47^{\circ}16'$ bis zu $50^{\circ}34'$ nördlicher Breite erstreckt, zirkumpolar ist.
- b) Beschreiben Sie die wesentlichen Schritte bei der Entstehung von Planetarischen Nebeln. Gehen Sie von einem Hauptreihenstern wie unserer Sonne aus und nehmen Sie als Endzustand des Zentralsterns einen Weißen Zwerg an. Charakterisieren Sie einen solchen Weißen Zwerg.

Die Entwicklung des Sterns HD 220733 ist noch nicht abgeschlossen. In einer Fachpublikation findet sich ein Diagramm (s. Abb. 1), das den Weg von HD 220733 zum Weißen Zwerg darstellt. Für die logarithmische Darstellung werden seine relative Leuchtkraft L/L_{\odot} und seine in Kelvin angegebene Oberflächentemperatur T verwendet. Der gegenwärtige Zustand des Sterns ist durch einen Punkt dargestellt.

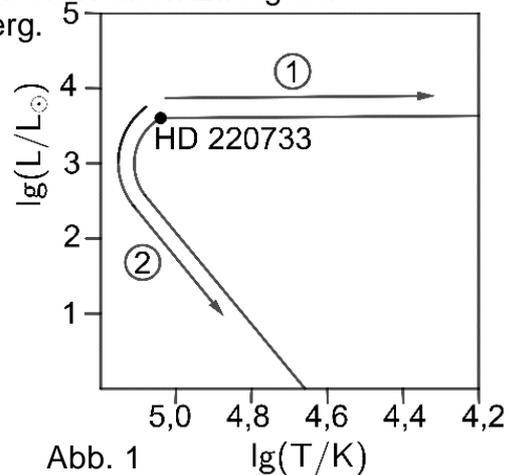


Abb. 1

- c) Entscheiden Sie begründet, welcher der beiden Wege ① oder ② in Abb. 1 die zukünftige Entwicklung von HD 220733 korrekt wiedergibt.
- d) Bestimmen Sie mithilfe von Abb. 1 die gegenwärtige relative Leuchtkraft und die absolute Helligkeit von HD 220733. [zur Kontrolle: $M = -4,2$]
- e) HD 220733 hat eine scheinbare Helligkeit von 6,8. Zeigen Sie damit, dass seine Entfernung zur Sonne ca. $5,1 \cdot 10^3$ Lj beträgt.
- f) Der Planetarische Nebel wird unter einem Winkel von $23''$ beobachtet. Berechnen Sie damit den Durchmesser des Planetarischen Nebels in Astronomischen Einheiten. [zur Kontrolle: $3,6 \cdot 10^4$ AE]

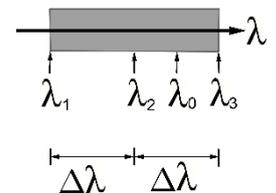


Abb. 2

Die Expansion der Hülle erfolgt gegenüber HD 220733 in alle Richtungen mit 27 km/s.

- g) Die bläuliche Farbe des Nebels wird hervorgerufen durch angeregte Sauerstoffatome, welche Licht der Wellenlänge λ_0 aussenden. Auf der Erde wird jedoch nicht eine Spektrallinie bei der Wellenlänge λ_0 beobachtet, sondern eine verbreiterte Spektrallinie, die alle Wellenlängen von λ_1 bis λ_3 enthält (s. Abb. 2). Schließen Sie begründet aus der Verschiebung von λ_2 gegenüber λ_0 auf die Bewegungsrichtung des gesamten Nebels relativ zur Erde. Ordnen Sie in Abb. 3 die detektierten Wellenlängen λ_1 , λ_2 und λ_3 den Orten A bis D der Lichtaussendung zu. Begründen Sie, dass mithilfe von $\Delta\lambda$ die Expansionsgeschwindigkeit der Hülle bestimmt werden kann.

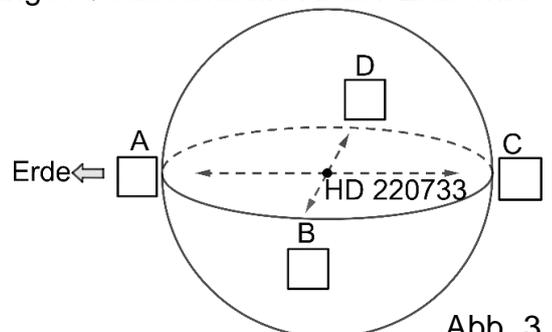


Abb. 3

- h) Bestimmen Sie die Zeitdauer, die der Planetarische Nebel bereits expandiert. Gehen Sie davon aus, dass die Expansionsgeschwindigkeit konstant bleibt.

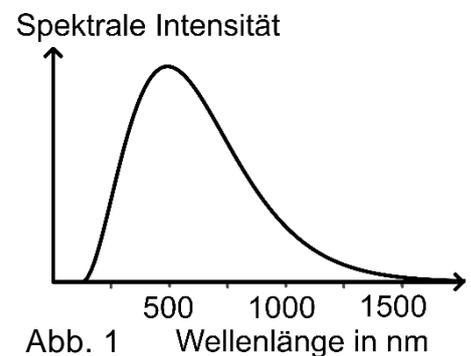
Ph 12 – Astrophysik 2

1. Barnards Pfeilstern

Barnards Pfeilstern ist von der Sonne 5,96 Lichtjahre entfernt und hat die Oberflächentemperatur $3,22 \cdot 10^3$ K. Der Stern hat eine absolute Helligkeit von 13,2. Seine Leuchtkraft beträgt 0,34 % der Sonnenleuchtkraft.

- 3 a) Berechnen Sie die scheinbare Helligkeit von Barnards Pfeilstern und beurteilen Sie damit, ob man den Stern mit bloßem Auge sehen kann.
- 6 b) Barnards Pfeilstern ist ein Hauptreihenstern. Berechnen Sie Radius und Masse des Sterns jeweils im Vergleich zur Sonne.

- 5 c) Abb. 1 zeigt die spektrale Intensitätsverteilung der Sonne. Berechnen Sie die Wellenlänge, bei der die spektrale Intensität von Barnards Pfeilstern maximal ist, und geben Sie den Spektralbereich an, zu dem diese Wellenlänge gehört.
Skizzieren Sie in Abb. 1 die spektrale Intensitätsverteilung, die für Barnards Pfeilstern zu erwarten ist.



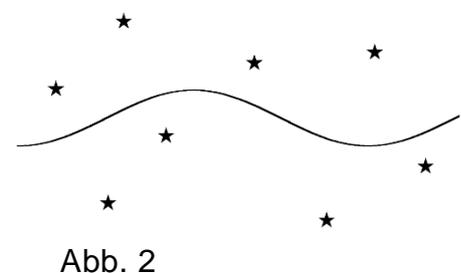
Die Position des Sterns an der Himmelskugel verschiebt sich pro Jahr um $10,4''$. Diese Bewegung des Sterns bezeichnet man als Eigenbewegung.

- 8 d) Zeigen Sie unter Verwendung einer Skizze, dass die Eigenbewegung des Sterns einer Tangentialgeschwindigkeit von $90,1$ km/s entspricht. Barnards Pfeilstern nähert sich der Erde mit einer mittleren Radialgeschwindigkeit von 111 km/s. Kennzeichnen Sie die Richtung der Radialbewegung in Ihrer Skizze und bestimmen Sie den Betrag der Raumgeschwindigkeit des Sterns.

Zusätzlich zu seiner Eigenbewegung lässt sich bei Barnards Pfeilstern eine Parallaxe beobachten.

- 2 e) Berechnen Sie die jährliche trigonometrische Parallaxe des Sterns.

- 5 f) Abb. 2 zeigt nicht maßstäblich die Bahn von Barnards Pfeilstern, die ein Beobachter am Nachthimmel wahrnimmt. Erläutern Sie das Zustandekommen der Form dieser Sternbahn. Ermitteln Sie die Länge des Beobachtungszeitraums, in dem die abgebildete Sternbahn aufgezeichnet wurde.



2. Der Asteroid Nürnberg

Der 1915 erstmals beobachtete Asteroid Nürnberg gehört zum Asteroidengürtel des Sonnensystems. Nürnberg bewegt sich auf einer Ellipsenbahn, die große Halbachse beträgt $2,241$ AE, die numerische Exzentrizität $0,09464$.

(Fortsetzung nächste Seite)

3 a) Beschreiben Sie die Lage des Asteroidengürtels im Sonnensystem und folgern Sie daraus eine untere und eine obere Grenze für die Umlaufzeiten aller Objekte des Asteroidengürtels.

8 b) Zeichnen Sie in Abb. 3 die große Halbachse der Bahn des Asteroiden Nürnberg ein. Veranschaulichen Sie dort auch die Apheldistanz r_A und die Periheldistanz r_P des Asteroiden Nürnberg sowie den minimalen Abstand d_{\min} und den maximalen Abstand d_{\max} zwischen der Erdbahn und der Bahn des Asteroiden. Berechnen Sie r_A , r_P , d_{\min} und d_{\max} . Der Abstand der Erde zur Sonne darf hierbei vereinfachend als konstant angenommen werden.

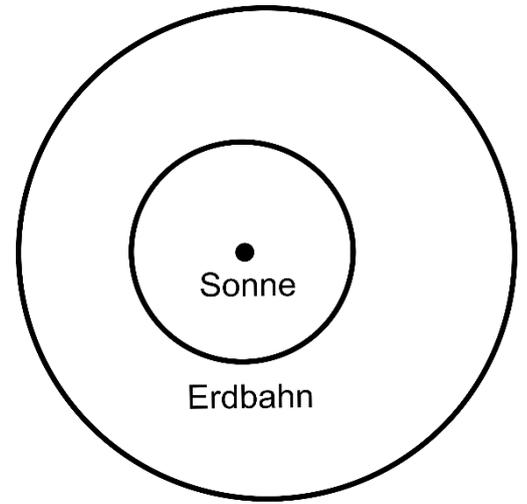


Abb. 3 Bahn des Asteroiden

5 c) Berechnen Sie die siderische Umlaufzeit T_{sid} und die synodische Umlaufzeit T_{syn} des Asteroiden. [zur Kontrolle: $T_{\text{sid}} = 3,355 \text{ a}$, $T_{\text{syn}} = 1,425 \text{ a}$]

Der Asteroid reflektiert einen Teil der Strahlungsleistung der Sonne in Richtung Erde. Abb. 4 zeigt die im Zeitraum von 2004 bis 2020 gemessene scheinbare Helligkeit des Asteroiden Nürnberg als Funktion der Zeit.

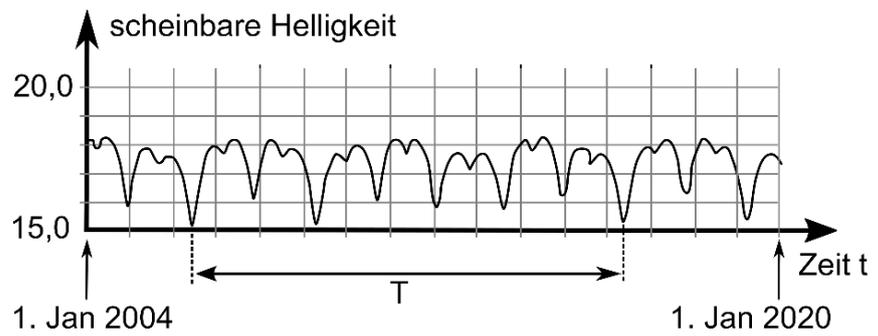


Abb. 4

5 d) Nach einer Zeit T (s. Abb. 4) wiederholt sich der zeitliche Verlauf der scheinbaren Helligkeit in sehr ähnlicher Form. Bestimmen Sie T mithilfe von Abb. 4 und geben Sie T jeweils als Vielfaches der in Teilaufgabe c berechneten Umlaufzeiten an. Erklären Sie die Bedeutung von T hinsichtlich der gegenseitigen Lage und der Abstände von Sonne, Erde und Asteroid.

5 e) Die Kurve in Abb. 4 zeigt während der Zeit T mehrere Minima zwischen 15 und 17 Magnituden. Bestimmen Sie den mittleren zeitlichen Abstand zwischen diesen Minima. Beschreiben und begründen Sie, in welcher Konstellation sich der Asteroid zum Zeitpunkt dieser Minima jeweils befindet. Erklären Sie, warum diese Minima nicht alle gleich tief sind.

5 f) Eine der Fragen, mit denen Besucher des Zukunftsmuseums in der Stadt Nürnberg konfrontiert werden, lautet: „Gehört der Mensch ins All?“ Auf zwei großen Videowänden sieht man zwei Personen, die den Besuchern in knapper Form konträre Argumente zu dieser Fragestellung liefern. Erstellen Sie für beide Personen einen Textvorschlag mit jeweils einem Argument. Begründen Sie, welches der beiden Argumente Sie bei einer persönlichen Entscheidungsfindung als gewichtiger einstufen würden.

Quellenangaben

Ph 12 - 1

Abb. 1: selbst erstellt

Abb. 2:

Entnommen und ausgeschnitten aus Möllenstedt und Düker, Beobachtungen und Messungen an Bisprima-Interferenzen mit Elektronenwellen, Zeitschrift für Physik, Band 145, S. 377-397 (1956), Fig. 8e und 8g.

Abb. 3:

Entnommen und nachbearbeitet aus Möllenstedt und Düker, Beobachtungen und Messungen an Bisprima-Interferenzen mit Elektronenwellen, Zeitschrift für Physik, Band 145, S. 377-397 (1956), Fig. 8e.

Abb. 4:

Entnommen und nachbearbeitet aus: Faestermann, Bergmaier, Gernhäuser und Mahgoub: Indications for a bound tetra-neutron, Physical Letters B 824 (2022) 136799, Fig. 2

Tab. 1:

Entnommen und nachbearbeitet aus: Faestermann, Bergmaier, Gernhäuser und Mahgoub: Indications for a bound tetra-neutron, Physical Letters B 824 (2022) 136799, Table 1

Ph 12 – Astrophysik 1

Abb. 1

In Anlehnung an

I. Gonzalez-Santamaria, M. Manteiga, A. Manchado et al: Planetary nebulae in Gaia EDR3: Central Star identification, properties, and binarity. In: Astronomy & Astrophysics 656, A51 (2021). URL:

<https://www.aanda.org/articles/aa/pdf/2021/12/aa41916-21.pdf> (aufgerufen am 16.10.2023)

Ph 12 – Astrophysik 2

Abb. 4

In Anlehnung an <https://www.naa.net/kleinplaneten.php> (aufgerufen am 03.12.2023)