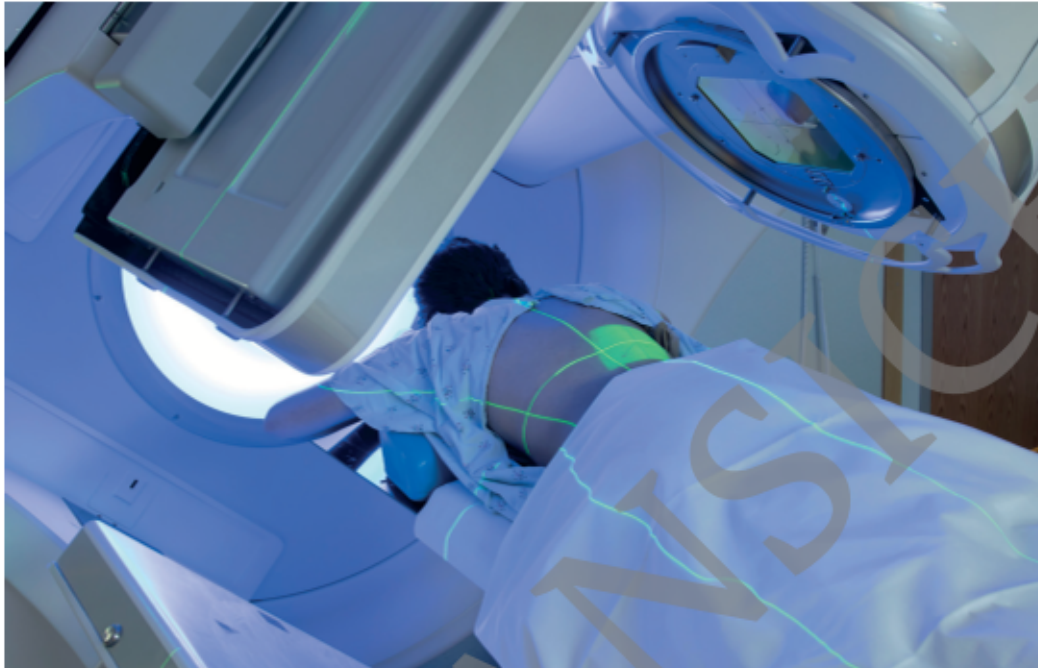


## II.F.11

### Atom- und Kernphysik

# Hochenergetische Strahlung – Tests auf Abiturniveau

Ein Beitrag von Anna Heidenblut



© RAABE 2021

© Mark Kostich/E+/Getty Images

Hochenergetische Strahlung spielt in der Natur und Technik eine große Rolle. Um die Wirkung von kosmischer Strahlung bzw. medizinisch genutzter hochenergetischer Strahlung zu erklären, werden Kenntnisse aus verschiedenen Teilgebieten der Physik benötigt. Hier werden zwei Klausuren auf Abiturniveau vorgestellt, die Aufgaben aus den Themenbereichen Radioaktivität, Teilchenphysik, Relativitätstheorie und Elektrodynamik am Kontext kosmischer Strahlung bzw. Strahlentherapie beinhalten.

---

#### KOMPETENZPROFIL

<b>Klassenstufe:</b>	12/13
<b>Dauer:</b>	8 Unterrichtsstunden
<b>Kompetenzen:</b>	Physikalische Vorgänge und technische Geräte beschreiben, physikalische Arbeitsweisen reflektieren, funktionale Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen verbal beschreiben und physikalische Formeln erläutern
<b>Thematische Bereiche:</b>	Beta-Zerfall, Strahlenschutz, Wirkung radioaktiver Strahlung, Zyklotron, Zeit- und Längenkontraktion, Relativistische Masse

---

## Kosmische Strahlung

**M 1**

In dieser Aufgabe geht es um verschiedene physikalische Aspekte der kosmischen Strahlung. Zur Bearbeitung der Aufgabe sollen die folgenden Werte benutzt werden:

Vakuumllichtgeschwindigkeit	$c = 299.792.458 \text{ m/s}$
Elementarladung	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Ruhemasse des Protons	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

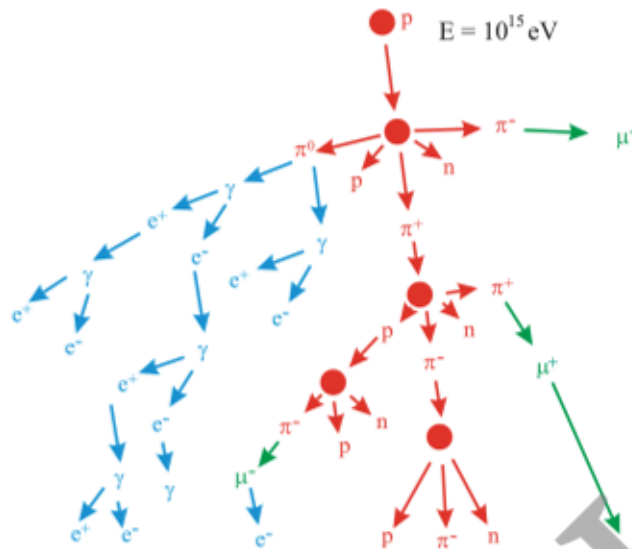
### Teilaufgabe 1: Kosmische Strahlung und Radioaktivität

- a) Die kosmische Strahlung ist eine hochenergetische Teilchenstrahlung, die aus dem Weltraum kommt. Sie besteht zum größten Teil aus Protonen, enthält aber auch Elektronen und vollständig ionisierte Atome. Die kosmische Strahlung ist mit einer durchschnittlichen Äquivalentdosis von 0,3 mSv pro Jahr an der Strahlenbelastung der Menschen in Deutschland aus natürlichen Quellen beteiligt.
- **Erklären** Sie den Unterschied zwischen Energiedosis und Äquivalentdosis.
  - **Beschreiben** Sie die Wirkung radioaktiver Strahlung auf den menschlichen Körper.
  - **Geben** Sie begründet **an**, ob die kosmische Strahlung deterministische oder stochastische Schäden verursacht.
- b) Durch Reaktion der kosmischen Strahlung mit der Erdatmosphäre entstehen unter anderem Neutronen. Treffen diese Neutronen auf Stickstoffmoleküle der Erdatmosphäre, können durch eine Kernreaktion radioaktive  $^{14}\text{C}$ -Nuklide und Protonen entstehen. Diese radioaktiven Kohlenstoffnuklide gelangen in die Nahrungskette und können zur Datierung abgestorbener Lebewesen genutzt werden.
- **Stellen** Sie die Entstehung eines  $^{14}\text{C}$ -Nuklids in der Erdatmosphäre als Kernreaktion **dar** und **nennen** Sie die Zerfallsart, nach der diese Nuklide zerfallen.
  - **Beschreiben** Sie den Zerfall von  $^{14}\text{C}$  mithilfe einer Zerfallsgleichung und geben Sie auf Ebene der Elementarteilchen **an**, wie dieser Zerfall abläuft.

**(9 + 10 P)**

### Teilaufgabe 2: Pionen und Myonen als Sekundärteilchen

- a) Beim Eintreten in die Erdatmosphäre in einer Höhe um 20 km über der Erdoberfläche erzeugt die kosmische Strahlung Teilchenschauer. Aus einem Proton der Energie von  $10^{15}$  eV entstehen mehr als eine Million Sekundärteilchen, die sich in der Erdatmosphäre ausbreiten.



© nach Mpfiz/wikimedia commons/CC BY-SA 3.0

Durch nicht elastische Stöße von Stickstoff- oder Sauerstoffatomen und kosmischer Strahlung entstehen unter anderem Pionen, die aus jeweils einem Quark und einem anti-Quark der ersten Generation entstehen.

Die Pionen haben mit  $2,6 \cdot 10^{-8}$  s eine sehr geringe Lebensdauer, da sie durch Paarvernichtung Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung bilden können. Diese haben eine noch geringere Lebensdauer und wandeln sich in Paare aus Fermionen und Neutrinos um. Meist entstehen Myonen, die sich durch Emission eines  $W$ -Bosons und anschließende Paarentstehung in Leptonen der ersten Generation umwandeln können.

- **Geben Sie an**, welche Quarks der ersten Generation kombiniert werden müssen, um ein positiv geladenes ( $\pi^+$ ) bzw. negativ geladenes ( $\pi^-$ ) Pion zu erhalten.
- **Zeichnen Sie** ein Feynman-Diagramm für die Umwandlung eines  $\pi^+$ -Pions in ein anti-Myon ( $\mu^+$ ).
- **Beschreiben Sie** die Umwandlung eines Myons in ein Elektron mithilfe von zwei Umwandlungsgleichungen.

# Strahlentherapie

M 2

In dieser Aufgabe geht es um verschiedene physikalische Aspekte der Strahlentherapie.

Zur Bearbeitung der Aufgabe sollen die folgenden Werte benutzt werden:

Vakuumllichtgeschwindigkeit	$c = 299.792.458 \text{ m/s}$
Elementarladung	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Ruhemasse des Protons	$m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

## Teilaufgabe 1: Dosis und Strahlungsarten

a) Als Strahlentherapie (auch Radiotherapie) wird die medizinische Anwendung von ionisierender Strahlung auf den Menschen bezeichnet. Ziel der Strahlentherapie ist es, Krankheiten zu heilen oder deren Fortschreiten zu verzögern. Als Strahlungsquellen dienen Röntgenröhren, Teilchenbeschleuniger oder radioaktive Präparate. Die zellschädigende Wirkung der Strahlentherapie ist nicht spezifisch, d. h., auch gesunde Körperzellen werden in Mitleidenschaft gezogen. Allerdings können, je nach Grad der Schädigung, die zelleigenen Reparatursysteme die Schäden am Erbgut reparieren. Die Reparaturmechanismen laufen in gesunden Zellen effizienter ab als in Tumorzellen.

Die Strahlenempfindlichkeit der Tumore ist unterschiedlich. Für eine vollständige Zerstörung des Tumors liegt die Strahlendosis bei 40 bis 70 Gray, die normalerweise in Einzeldosen von jeweils 1,8 bis 2 Gy aufgeteilt wird.

- **Erklären** Sie die Bedeutung der Dosisangabe „40 Gray“.
- **Beschreiben** Sie die Wirkung radioaktiver Strahlung auf den menschlichen Körper.
- **Begründen** Sie, warum die Gesamtdosis in Einzeldosen aufgeteilt wird.

b)  $^{32}\text{P}$  war das erste radioaktive Isotop, das medizinisch eingesetzt wurde. Es wird heute noch zur Behandlung von Erkrankungen und Tumoren des Knochenmarks eingesetzt. Das Phosphornuklid  $^{32}\text{P}$  wird durch Bestrahlung des stabilen Schwefelnuklids  $^{32}\text{S}$  mit Neutronen hergestellt und wandelt sich beim „Zerfall“ zurück in dieses Schwefelnuklid um.

- **Beschreiben** Sie die Kernreaktion zur Herstellung von  $^{32}\text{P}$  mithilfe einer Reaktionsgleichung.
- **Beschreiben** Sie den Zerfall von  $^{32}\text{P}$  mithilfe einer Zerfallsgleichung und geben Sie auf Ebene der Elementarteilchen an, wie dieser Zerfall abläuft.

c)  $^{32}\text{P}$  hat eine Halbwertszeit von 14,3 Tagen. Radiomedikamente, die das radioaktive Phosphorisotop enthalten, werden meist mehrfach injiziert, die maximale Einzeldosis beträgt 270 MBq. Das Medikament wird so gewählt, dass es von den Tumorzellen deutlich stärker aufgenommen wird als von gesunden Zellen.

In der Nuklearmedizin wird die Aktivität eines Medikamentes vor seiner Anwendung in einem sogenannten Aktivimeter gemessen.

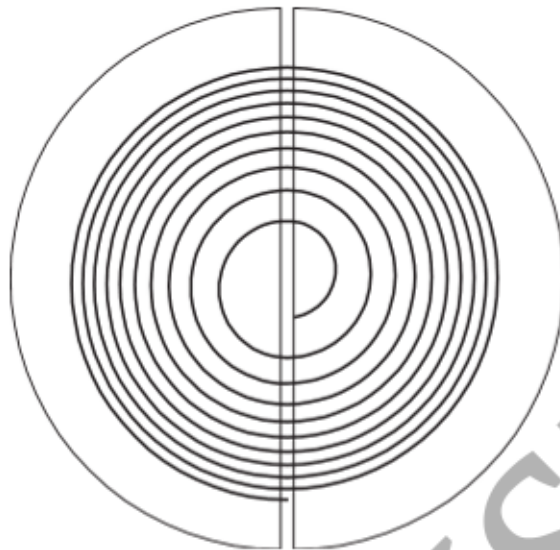
- **Begründen** Sie, warum für Medikamente, die das Nuklid  $^{32}\text{P}$  enthalten, die Aktivität vor jeder Behandlung bestimmt werden muss.

(9 + 10 + 4 P)

## Teilaufgabe 2: Zyklotrons in der Strahlentherapie

- a) In der Strahlentherapie werden Zyklotrons verwendet, um Protonenstrahlen für die Protonentherapie oder für die Herstellung medizinisch genutzter radioaktiver Nuklide zu generieren. Die magnetische Flussdichte eines Zyklotrons ist bei Eisenmagneten auf etwa 1 bis 2 Tesla beschränkt.

### Prinzipskizze eines Zyklotrons



wikimedia commons/gemeinfrei gestellt

- **Ergänzen** Sie die obere Abbildung zu einer beschrifteten Prinzipskizze eines Zyklotrons in dem Moment, in dem ein positiv geladenes Teilchen vom rechten zum linken Duanten beschleunigt wird.
  - **Erklären** Sie die spiralförmige Bahn des beschleunigten Teilchens.
- b) Ist die Geschwindigkeit des beschleunigten Teilchens nicht größer als etwa zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit, kann das Zyklotron mit einer konstanten Frequenz betrieben werden, die sich berechnen lässt als

$$f = \frac{q \cdot B}{2\pi \cdot m}$$

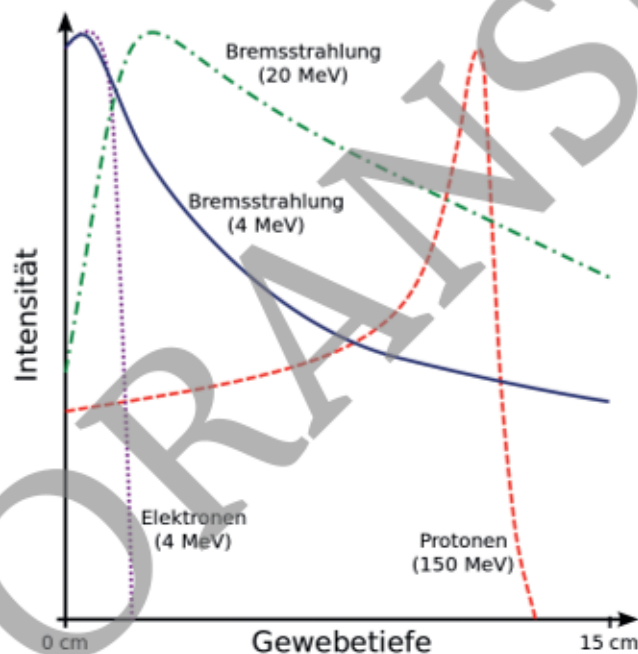
- **Leiten** Sie die Formel für die Frequenz des Zyklotrons aus einem geeigneten Kraftansatz her.
- **Berechnen** Sie die Zyklotronfrequenz in Megahertz für Protonen ( $H^+$ -Ionen), die in einem Magnetfeld der Stärke 1 T beschleunigt werden.
- **Begründen** Sie, warum bei höheren Teilchengeschwindigkeiten relativistische Effekte berücksichtigt werden müssen.

- c) Damit das Zyklotron für höhere Teilchengeschwindigkeiten verwendbar wurde, wurden ab 1945 Synchrozyklotrons gebaut, bei denen die Frequenz an die Geschwindigkeit der Teilchen angepasst wird.
- **Geben** Sie die Formel für die relativistische Masse **an** und **beurteilen** Sie qualitativ, wie die Zyklotronfrequenz bei hohen Teilchengeschwindigkeiten angepasst werden muss.
  - **Bestimmen** Sie die prozentuale Abweichung der relativistischen Masse von der Ruhemasse, wenn ein Teilchen auf fünfzig Prozent der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt wird.

(7 + 13 + 6 P)

### Teilaufgabe 3: Protonentherapie

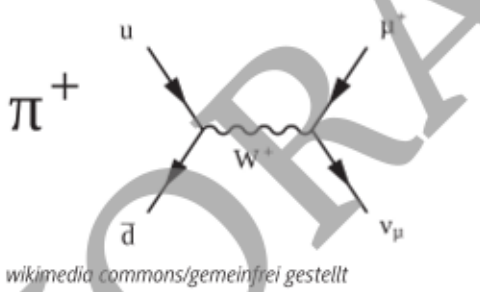
- a) Seit 2009 wird in Deutschland auch Strahlentherapie mit Protonenstrahlen (Protonentherapie) durchgeführt. Durch ihre große Masse bilden Protonen einen dicht gebündelten Strahl. Die Eindringtiefe des Protonenstrahls in Gewebe unterscheidet sich stark von Elektronen- oder Röntgenstrahlen (s. Abb. unten).
- **Geben** Sie qualitativ **an**, warum Protonentherapie weniger Nebenwirkungen verursacht als andere Formen der Strahlentherapie.
  - **Beurteilen** Sie, welche Art der Strahlentherapie für tief liegende Tumore besonders günstig ist.



© MBq &amp; Cepheiden/wikimedia commons/CC BY-SA 3.0

# Lösungen

## Lösungen (M 1)

A	Musterlösung	Pmax	Punkte	
1a	Die Energiedosis D ist definiert als Quotient der absorbierten Strahlungsenergie E und der Masse m <b>(1)</b> . Die Äquivalentdosis H ist das Produkt aus der Energiedosis E und dem Bewertungsfaktor q, der die relative Gefährlichkeit verschiedener Strahlungsarten für menschliches Gewebe widerspiegelt <b>(1)</b> .	2	/9	
	Radioaktive Strahlung zählt zur ionisierenden Strahlung, d. h., sie ionisiert körpereigene Moleküle, z. B. Wassermoleküle <b>(1)</b> . Die dabei entstandenen Ionen sind sehr reaktiv und können entweder reaktionsfreudige Radikale bilden <b>(1)</b> oder Bestandteile der Zelle direkt chemisch verändern, z. B. Enzyme inaktivieren <b>(1)</b> .	3		
	Die Dosis der kosmischen Strahlung ist zu gering <b>(1)</b> , um deterministische Strahlungsschäden, d. h. das Absterben vieler Zellen, zu verursachen <b>(1)</b> . Sie kann allerdings stochastische Schäden, d. h. Schäden an der DNA, verursachen <b>(1)</b> , die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit sehr viel später zu Krebserkrankungen führen können <b>(1)</b> .	4		
1b	${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{p}$	3	/10	
	${}^{14}\text{C}$ zerfällt in einem $\beta^-$ -Zerfall.	1		
	${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$	3		
	Beim radioaktiven $\beta^-$ -Zerfall wandelt sich ein down-Quark durch Emission eines W <sup>-</sup> -Teilchens in ein up-Quark um <b>(1)</b> . Das W <sup>-</sup> -Teilchen ist das Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung und ist extrem kurzlebig <b>(1)</b> . Es wandelt sich nach sehr kurzer Zeit durch Paarentstehung in ein Elektron und ein anti-Elektronneutrino um <b>(1)</b> .	3		
2a	$\pi^+ : u\bar{d}$ (up-Quark + anti-down-Quark) $\pi^- : d\bar{u}$ (down-Quark + anti-up-Quark)	2	/13	
	 <p>wikimedia commons/gemeinfrei gestellt</p>	2		
		Paarvernichtung		1
		Virtuelles W <sup>+</sup> -Boson		2
		Paarentstehung zu $\mu^+$ und $\nu_\mu$		1
		Linienarten		1
Pfeilrichtungen	1			
	$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + W^-$ <b>(2)</b> gefolgt von $W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$ <b>(2)</b>	4		
2b	$\Delta t = \frac{\Delta s}{v} = \frac{10 \cdot 10^3 \text{ m}}{0,9996 \cdot 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 3,337 \cdot 10^{-5} \text{ s}$	3		
	Da sich die Myonen mit annähernd Lichtgeschwindigkeit bewegen, müssen relativistische Effekte berücksichtigt werden.	1		
	$l' = \frac{l_0}{\gamma} = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 10 \cdot 10^3 \text{ m} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,9996^2}{1^2}} = 282,8 \text{ m}$	3		