

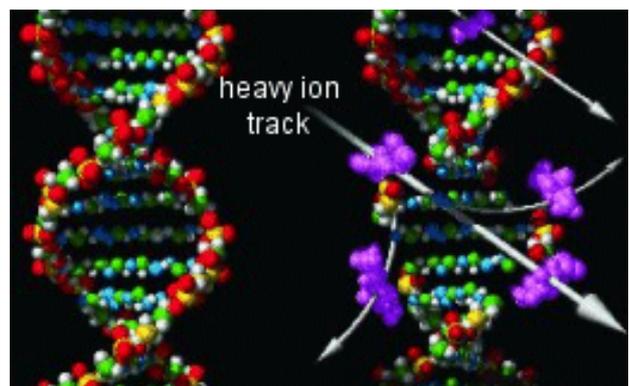
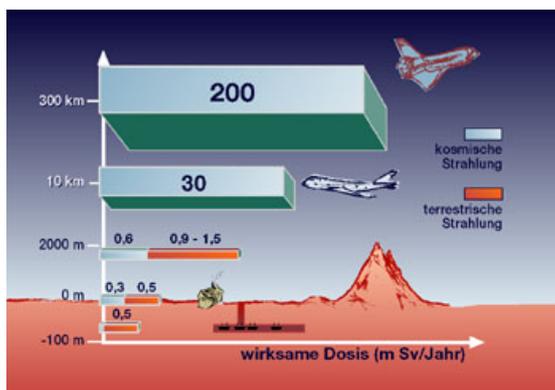
## Kosmische Strahlung – mehr als nur eine Randerscheinung

Nicht nur aus dem Makrokosmos wird die Erde „bombardiert“ (von kosmischen Staubteilchen bis hin zu Asteroiden), auch aus dem Mikrokosmos prasselt es auf die Erde herab. Teilchen der Kosmischen Strahlung (85% Protonen, 12% Heliumkerne, 1% schwere Kerne und 2% Elektronen stürzen „betankt“ mit riesigen Energien (etwa  $10^7$ - $10^{20}$ eV) auf unseren Planeten ein. Wenn man bedenkt, dass die Energie der Teilchen der Kosmischen Strahlung milliardenfach größer ist als die schon manchmal ängstlich „in Empfang genommene“ Röntgenstrahlung beim Arzt, so kann man die Natur schon ehrfürchtig betrachten. Dank der Atmosphäre und dem Magnetfeld der Erde sowie dem Sonnenwind sind wir auf dem Erdboden gut vor der tödlichen Wirkung der Kosmischen Strahlung geschützt.

In der Rubrik [„Nachgefragt und ausprobiert“](#) werden Aussagen, die der Autor des SuW-Beitrags „Kosmische Strahlung. Die Suche nach den Quellen“ macht, geprüft und diskutiert. Insbesondere die Tatsache, dass die Quellen der Kosmischen Strahlung bisher nicht aus den Beobachtungen lokalisierbar sind, weil die Richtungsinformation auf dem Wege der Teilchen verloren geht, soll quantitativ betrachtet werden. Es ergibt sich eine interessante [Anwendung der Lorentzkraft](#).

Die Kosmische Strahlung ist hinsichtlich ihrer Energiedichte ebenbürtig mit der Strahlung der Sterne – sie ist also mehr als nur eine Randerscheinung, die sogar den Alltag berühren kann, was die abschließende Aufgabe zeigen soll. So einfach diese [Aufgabe zum Thema Äquivalentdosis und Strahlenschutz](#) auch erscheinen mag, ihr Fächer verknüpfender Charakter eröffnet dem Schüler einen anderen Zugang zur Größe Äquivalentdosis und zur Strahlenschutzthematik.

Übersicht der Bezüge im WiS!-Beitrag		
Physik	Quantenphysik, Elektromagnetismus, Relativitätstheorie	Teilchenstrahlung, <a href="#">Myonen</a> , <a href="#">Lorentz-Kraft</a> , <a href="#">Äquivalentdosis</a> , <a href="#">relativistischer Massezuwachs</a> , <a href="#">Zeitdilatation</a>
Astronomie	Diffuses Medium	Kosmische Strahlung
Fächer-verknüpfung	Astro-Bio, Astro-Geo	<a href="#">Höhenstrahlung</a> , <a href="#">biologische Wirkungen ionisierender Strahlung</a> , <a href="#">Breitenabhängigkeit der Höhenstrahlung</a> , <a href="#">Topografie</a>



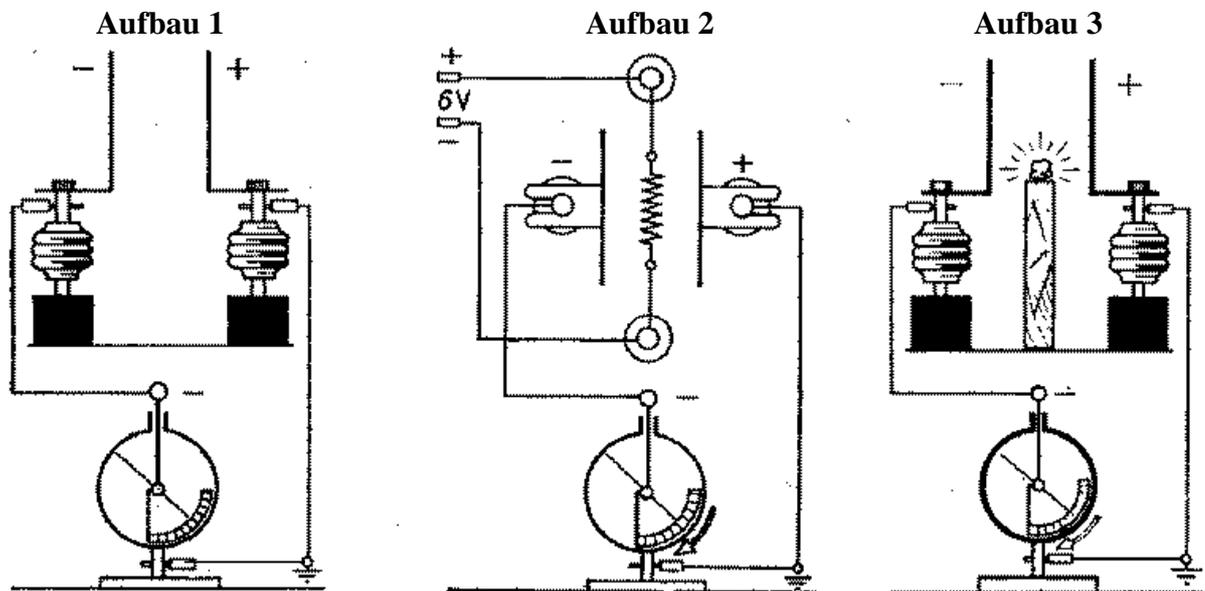
**Abbildung 1:** Links: Die kosmische Strahlung ist eine Gefahr für das Personal von Flugverkehrsgesellschaften und noch mehr für Astronauten, was die Werte der wirksamen Dosis (Äquivalentdosis) belegen. ©: Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=13181&pNid=2455>. Rechts: Besonders die schweren Kerne der Kosmischen Strahlung wirken sich schädigend auf das Erbgut aus. ©: NASA/OBPR (Office of Biological and Physical Research), [https://www.nasa.gov/vision/space/livinginspace/17feb\\_radiation.html](https://www.nasa.gov/vision/space/livinginspace/17feb_radiation.html).

**Nachgefragt und ausprobiert**  
(konkrete Bezüge zum SuW-Beitrag)

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

**1.) Luft als Leiter**

Auf S. 24 wird über die Ionisation der Luft berichtet, deren unerwartete Stärke in merklichem Abstand von der radioaktiven Erdkruste zur Annahme einer ionisierenden Strahlung aus dem Kosmos führte. Im folgenden Bild wird dargestellt, wie sich im Klassenraum mit einer einfachen Versuchsanordnung die Ionisation der Luft erzeugen und feststellen lässt. **Die Versuche sind hinsichtlich Aufbau und Wirkungsweise zu beschreiben!**



(Bilddatei: [Luftionisation.jpg](#), siehe: Wilke, H.-J. (Hrsg.): Physikalische Schulversuche, Teil 11: Aufbau der Stoffe, (PS11), Volk und Wissen, Berlin, 1982)

Die Experimentalaufbauten realisieren einen Stromkreis mit einem Elektrometer und einer Luftstrecke zwischen zwei Kondensatorplatten, die isoliert aufgestellt sind. Auf die Kondensatorplatten wird eine Ladung aufgebracht, die durch Reibung z. B. eines Plastikstabs mit einem Fell erzeugt wird. Die Stärke der Ladung wird durch das Elektrometer angezeigt. Da Luft als guter Isolator gilt, bleibt der Elektrometerschlag erhalten (**Aufbau 1**). Bringt man in die Luftstrecke zwischen den Kondensatorplatten frei bewegliche Ladungsträger ein, so ermöglichen diese eine Entladung. Beim **Aufbau 2** (bei dem die Kondensatorstrecke von oben gezeigt ist) werden Elektronen durch Glühemission freigesetzt und das Elektrometer zeigt eine Entladung an. Beim **Aufbau 3** sorgt eine radioaktive Probe (z. B. in Form eines Strahlerstifts) durch ihre ionisierende Strahlung für die Erzeugung frei beweglicher Ladungsträger. Die Luft wird ionisiert und der Elektrometerschlag geht zurück (Entladung). Der letzte Aufbau zeigt, was in größerer Höhe geschieht, in der die Ionisation der Luft jedoch durch die Kosmische Strahlung bewirkt wird.

## 2.) Schneller als das Licht?

(→ zurück zum Anfang)

Im Begleittext zu Abb. 3 (S. 26) liest man, dass ein einfallendes Proton mit der Energie von  $10^{15}$  eV etwa 1 Million Sekundärteilchen erzeugt. **Wie schnell war das Proton eigentlich?**

<b>Geg.:</b> Kinetische Energie des Protons	$E_{\text{kin}} = 10^{15}$ eV
Ruhemasse Proton	$m_{0,P} = 1,67262 \cdot 10^{-27}$ kg
Vakuumlichtgeschwindigkeit	$c = 2,9979 \cdot 10^8$ m/s
Umrechnung	$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J
Umrechnung	$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

**Lös.:** Zuerst wird klassisch gerechnet.

$$E_{\text{kin}} = \frac{m_{0,P}}{2} \cdot v^2,$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m_{0,P}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{15} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}} \approx \underline{\underline{4,4 \cdot 10^{11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}}.$$

Dieses Ergebnis kollidiert mit der physikalischen Erkenntnis, dass die Lichtgeschwindigkeit  $c$  die größte erreichbare Geschwindigkeit ist. Also muss man für derart hochenergetische Teilchen relativistisch rechnen.

$$E_{\text{kin}} = m_P \cdot c^2 - m_{0,P} \cdot c^2, \quad m_P = m_{0,P} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$m_{0,P} \cdot c^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = E_{\text{kin}} + m_{0,P} \cdot c^2 \Rightarrow v = \sqrt{1 - \left( \frac{m_{0,P} \cdot c^2}{E_{\text{kin}} + m_{0,P} \cdot c^2} \right)^2} \cdot c,$$

$$v = \sqrt{1 - \left( \frac{1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (2,9979 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2}{10^{15} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} + 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (2,9979 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2} \right)^2} \cdot c$$

$$v \approx \sqrt{1 - \left( \frac{1,5 \cdot 10^{-10}}{1,6 \cdot 10^{-4} + 1,5 \cdot 10^{-10}} \right)^2} \cdot c$$

$$v \approx \underline{\underline{0,999999999999 \cdot c}}$$

## 3.) Energiepakete

Auf S. 27 oben wird erwähnt, dass die Energie von  $10^{20}$  eV eines Teilchens der Kosmischen Strahlung ausreicht, einen Stein mit 1,5 kg Masse um 1 m (oder einen Stein mit 150 kg Masse um 1 cm) hochzuheben.

**Wie kommt der Autor darauf?** Dies soll einmal nachgerechnet werden.



©: Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=659491>

**Geg.:**  $E = 10^{20} \text{ eV}$   
 $m = 1,5 \text{ kg}$   
 $h = 1 \text{ m}$   
 $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$   
 $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$   
 $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

**Lös.:** Teilchenenergie = Potentielle Energie, z. B Berechnung der Hubhöhe

$$E = E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h \quad \Rightarrow \quad h = \frac{E}{m \cdot g}$$

$$h = \frac{10^{20} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} = \frac{10^{20} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{1,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} \approx \underline{\underline{1,1 \text{ m}}}$$

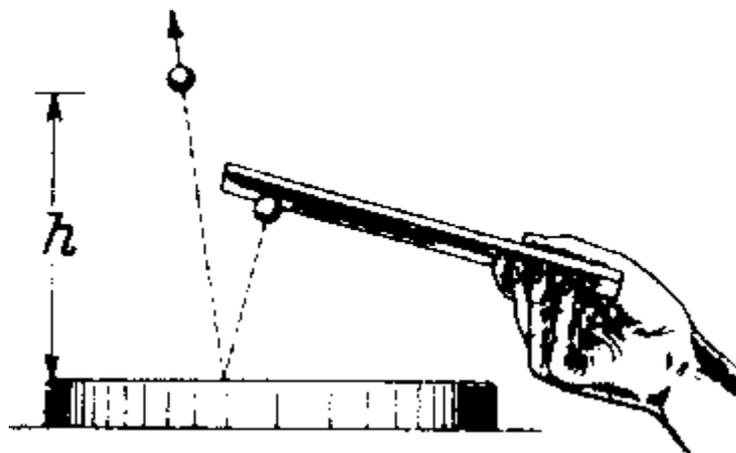
#### 4.) Analoges Denken

Auf S. 28 führt der Autor ein mechanisches Analogon zu einem möglichen Mechanismus auf, der die Teilchen so unheimlich beschleunigt. (Stoßwellenfronten von Supernovae oder in Jets von Kernen aktiver Galaxien als Tischtennisschläger, Teilchen der Kosmischen Strahlung als Tischtennisball). Ein etwas abgewandelter Analogieversuch ist nachfolgend dargestellt.



©: Von NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University) - HubbleSite: gallery, release., Gemeinfrei  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=516106>

**Warum springt der Ball nach dem Stoß an der Unterlage höher als bis in die Höhe, aus der er fallen gelassen wurde? Wie lässt sich die Analogie für das Verhalten eines Gases deuten, dass zusammengedrückt wird (Bezug zur Thermodynamik)?**



Der Tischtennisball springt nach dem Stoß höher als bis in die Ausgangshöhe, weil der Schläger auf den entgegen kommenden Ball zu bewegt wurde, was eine Vergrößerung der Relativgeschwindigkeit zwischen Ball und Schläger um die Schlägergeschwindigkeit zur Folge hat.

Ähnlich verhält es sich mit den Teilchen eines Gases, das zusammengedrückt wird. Geschieht dies schnell genug, so wird die Gasteilchengeschwindigkeit und damit die mittlere kinetische Energie als Maß für die Temperatur erhöht.

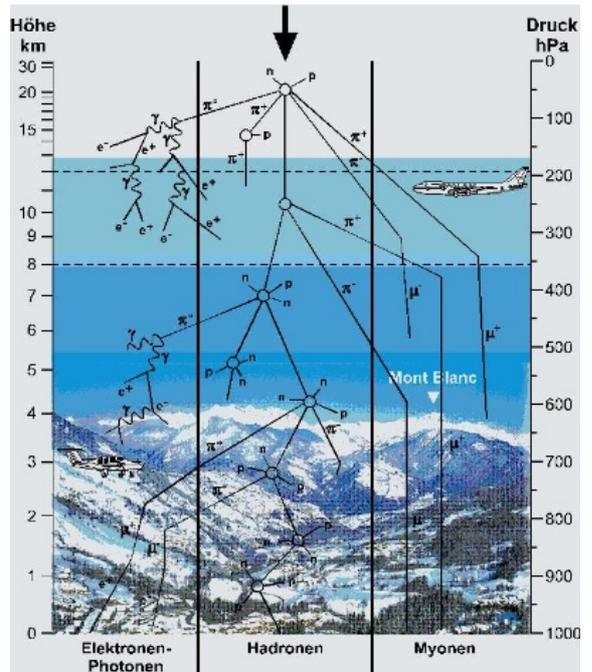
### 5.) „Totgesagte (Myonen) leben länger“

Myonen sind Teilchen mit einer mittleren Zerfallszeit von  $2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  (siehe SuW-Beitrag, Glossar, S. 26/27). Ein in 10 km Höhe erzeugtes Myon sollte also (nach klassischer Vorstellung) bei senkrechter Fortbewegung mit 0,994facher Lichtgeschwindigkeit in Richtung Erdboden in einer Höhe von 10 km –  $0,994 \cdot c \cdot 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ s} \approx 9,3 \text{ km}$  zerfallen sein. Im Begleittext zu Abb. 3 auf S. 26 und auf S. 33 ist aber von Myonen die Rede, die den Erdboden erreichen.

#### Wie ist das möglich?

Für einen gleichförmig bewegten Beobachter geht jede relativ zu ihm bewegte Uhr aus seiner Sicht um den Faktor  $\sqrt{1-v^2/c^2}$  langsamer (**Zeitdilatation**). Für Myonen mit 0,994-facher Lichtgeschwindigkeit beträgt der Faktor ca. 0,11, d. h. die Zerfallszeit der Myonen verlängert sich auf etwa  $1/0,11 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ s} \approx 14 \cdot 10^{-6} \text{ s}$  und viele Myonen können somit die Erdoberfläche erreichen.

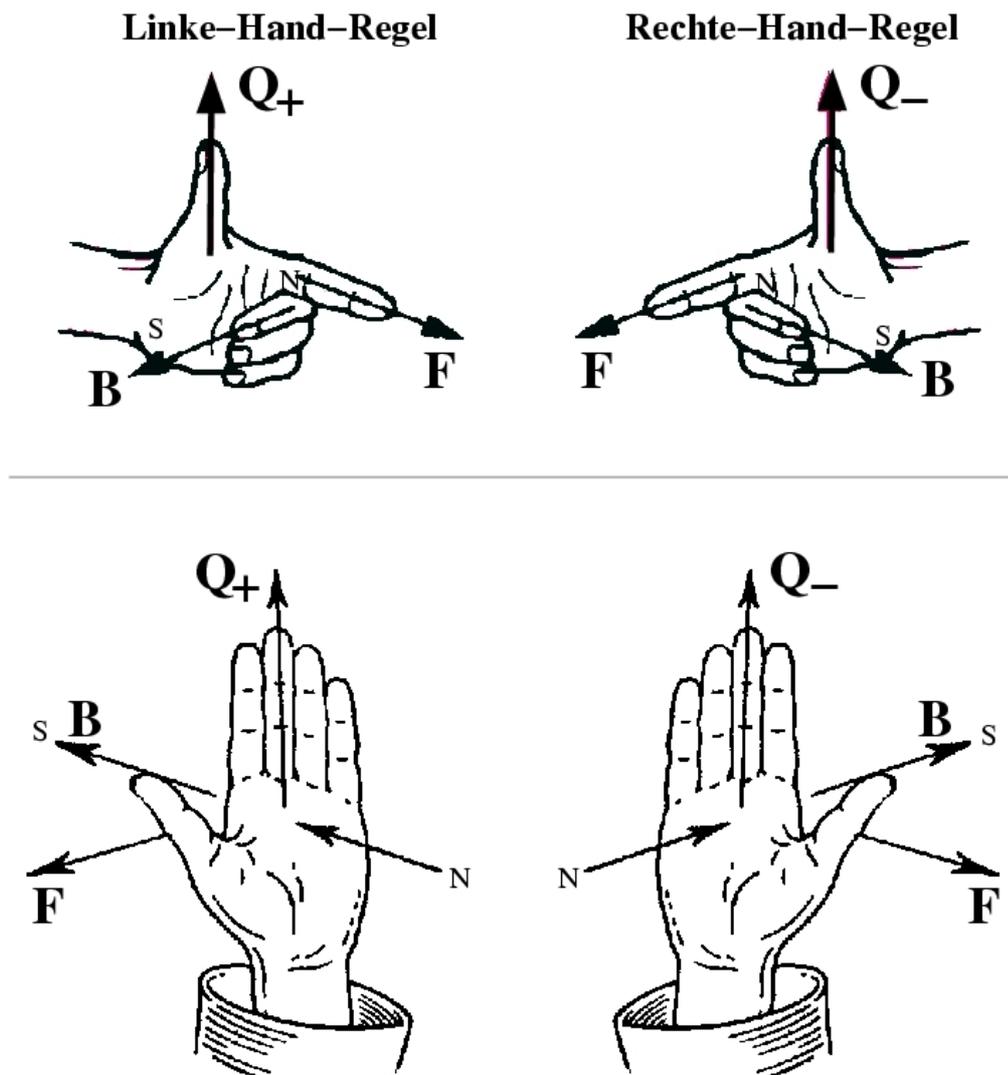
©: <http://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=13181&pNid=2455>.



## Die rätselhaften Quellen der kosmischen Strahlung

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

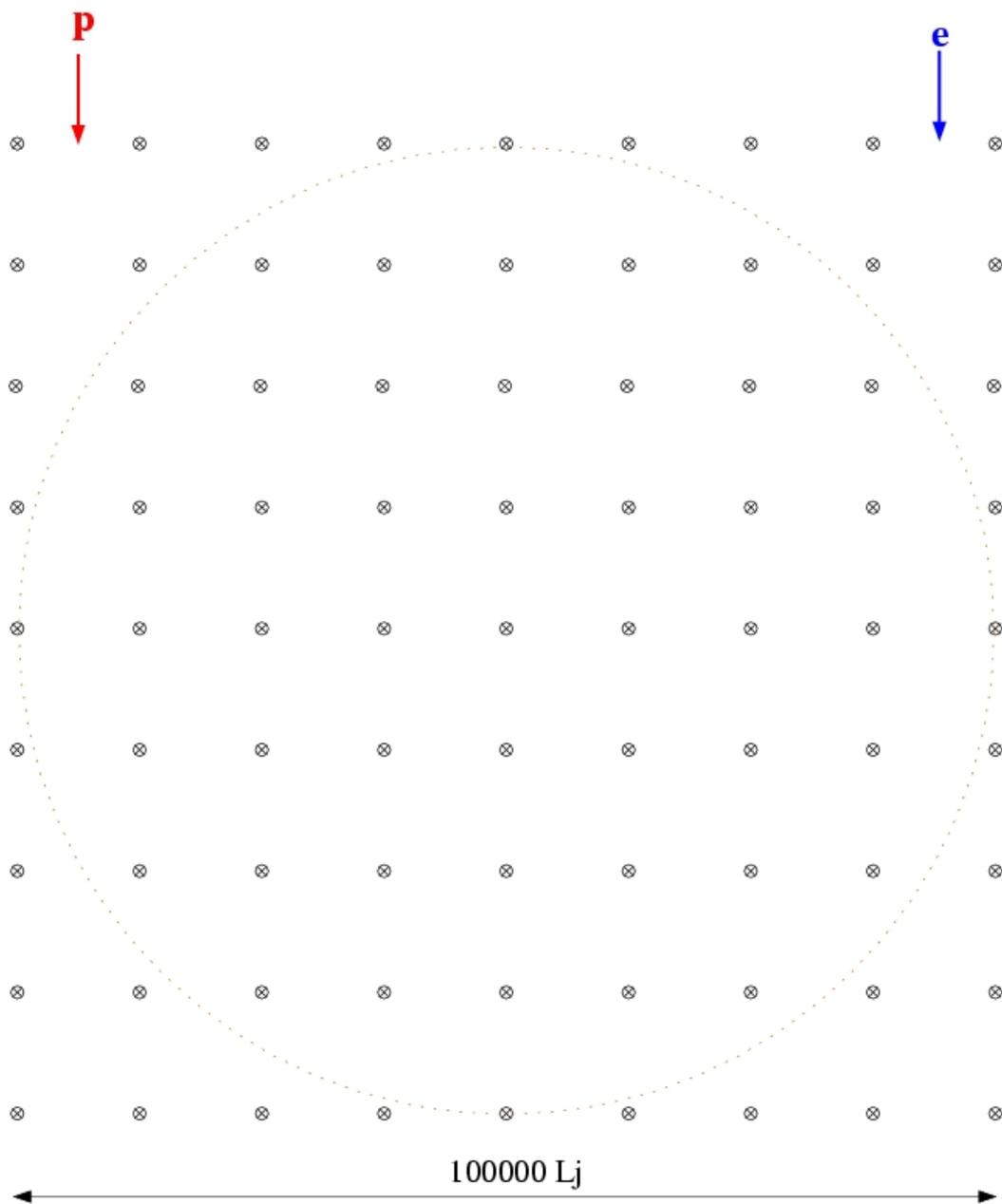
Vom Licht sind wir gewohnt, dass wir in der Richtung, aus der uns Photonen erreichen, auch die Strahlungsquelle vermuten können (außer, wenn die Photonen nahe an riesigen Massen vorbeilaufen). Bei geladenen Teilchen, aus denen die kosmische Strahlung besteht, muss man sich besinnen, dass der Raum zwischen den Sternen erfüllt ist von magnetischen Feldern. Ein geladenes Teilchen, das sich (zumindest mit einer Komponente) senkrecht zu den B-Feldlinien bewegt, erfährt eine ablenkende Kraft (**die Lorentzkraft  $F$** ), die es entsprechend der Polarität seiner Ladung ( $Q_+$  oder  $Q_-$ ) aus der Bahn drängt (unsere Hände weisen die Richtung wie dargestellt).



**Abbildung 2:** Verschiedene Memotechniken (in diesem Falle Handregeln) zur Festlegung der Richtungen der Bewegung der Ladungsträger ( $Q$ , positiv und negativ), des Magnetfeldes ( $B$ , von Nord nach Süd) und der Lorentzkraft  $F$ .

### Aufgabe: Teilchen der Kosmischen Strahlung im Magnetfeld

Im „Wust“ der magnetischen Felder zwischen den Quellen der Teilchen der Kosmischen Strahlung und der Erde geht (für die meisten Teilchen) die Richtungsinformation verloren. Im Folgenden soll abgeschätzt werden, entlang welcher Strecken dies geschieht. Dazu wird für das Magnetfeld im interstellaren Gas eine Feldstärke von ca.  $10^{-9}$  T vorausgesetzt (im Vergleich dazu hat das Erdmagnetfeld eine Stärke von  $30\text{-}60 \cdot 10^{-6}$  T,  $1\text{T}=1\text{Vs/m}^2$ ). Zudem wird vereinfachend angenommen, dass sich die Teilchen senkrecht zu den Linien eines homogenen Feldes bewegen. Gesucht ist der Radius des Kreises, auf den die Teilchen durch die Lorentzkraft gedrängt werden. Dabei sollen Protonen und Elektronen mit verschiedenen Energien ( $10^{10}\text{eV}$ ,  $10^{15}\text{eV}$ ,  $10^{20}\text{eV}$ ) betrachtet werden. Die Bahnen der Teilchen sind jeweils für die größte Energie auf der vorbereiteten Darstellung zu skizzieren (die Größe der galaktischen Scheibe ist zum Vergleich durch einen punktierten Kreis angedeutet)



**Lösung: Teilchen der Kosmischen Strahlung im Magnetfeld**

<b>Geg.:</b>	Ruhemasse Proton	$m_{0,P} = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
	Ruhemasse Elektron	$m_{0,E} = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
	Elementarladung	$e = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
	Vakuumlichtgeschwindigkeit	$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
	Umrechnung	$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

**Lös.:** Zentripetalkraft = Lorentzkraft

$$\frac{m \cdot v^2}{r} = Q \cdot v \cdot B \quad \Rightarrow \quad r = \frac{m \cdot v}{Q \cdot B}$$

Die Geschwindigkeit der Teilchen hat bei den betrachteten Energien nahezu den Wert von  $c$  (Rechnung siehe Aufgabe 2 im Anfangskapitel). Im Anfangskapitel wurde auch klar, dass bei den Teilchen der kosmischen Strahlung ein **relativistischer Massezuwachs** zu beachten ist.

$$E_{\text{kin}} = m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2 \quad \Rightarrow \quad m = \frac{E_{\text{kin}} + m_0 \cdot c^2}{c^2}$$

**Für Elektronen:**

Ruhemasse Elektron	$m_{0,E} = 9,10938 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Für $E_{\text{kin}} = 10^{10} \text{ eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ :	$m_E \approx 20000 m_{0,E}$
Für $E_{\text{kin}} = 10^{15} \text{ eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ :	$m_E \approx 2 \cdot 10^9 m_{0,E}$
Für $E_{\text{kin}} = 10^{20} \text{ eV} \approx 16 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ :	$m_E \approx 2 \cdot 10^{14} m_{0,E}$

$$\begin{aligned} \text{Für } 10^{10} \text{ eV: } r &\approx \frac{m_E \cdot v}{Q \cdot B} \approx \frac{20000 m_{E,0} \cdot c}{Q \cdot B} \\ r &\approx \frac{20000 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{m}^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{-9} \text{ Vs s}} \approx 3,4 \cdot 10^{10} \text{ m} \approx \underline{\underline{\frac{1}{4} \text{ AE}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Für } 10^{15} \text{ eV: } r &\approx \frac{m_E \cdot v}{Q \cdot B} \approx \frac{2 \cdot 10^9 m_{E,0} \cdot c}{Q \cdot B} \\ r &\approx \frac{2 \cdot 10^9 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{m}^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{-9} \text{ Vs s}} \\ r &\approx 3,4 \cdot 10^{15} \text{ m} \approx \underline{\underline{23.000 \text{ AE}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Für } 10^{20} \text{ eV: } r &\approx \frac{m_E \cdot v}{Q \cdot B} \approx \frac{2 \cdot 10^{14} m_{E,0} \cdot c}{Q \cdot B} \\ r &\approx \frac{2 \cdot 10^{14} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{m}^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{-9} \text{ Vs s}} \\ r &\approx 3,4 \cdot 10^{20} \text{ m} \approx \underline{\underline{2,3 \cdot 10^9 \text{ AE} \approx 11 \text{ kpc}}} \end{aligned}$$

**Für Protonen:**

Ruhemasse Proton  $m_{0,P} = 1,67262 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Für  $E_{\text{kin}} = 10^{10} \text{ eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ :  $m_P \approx 12 m_{0,P}$

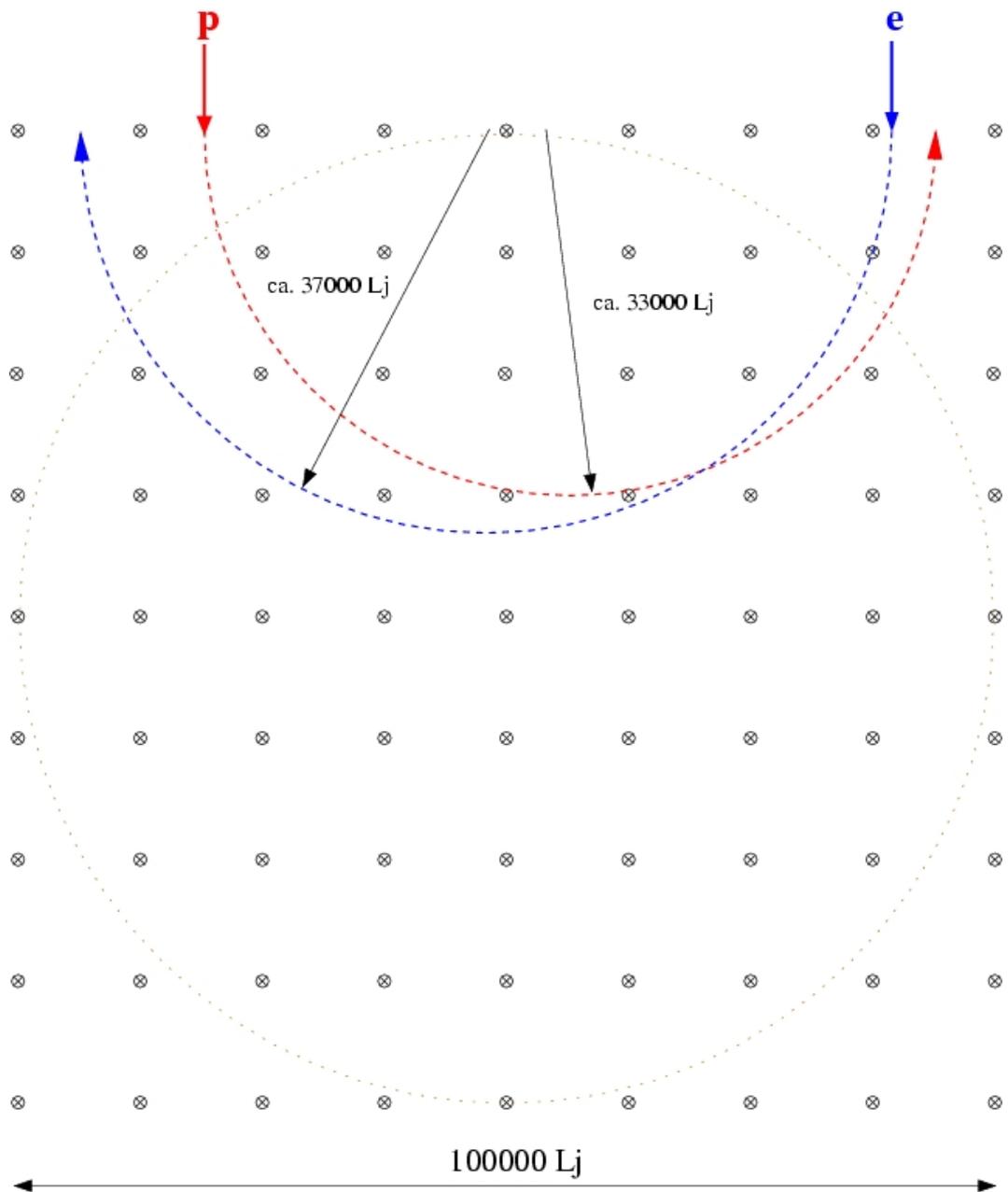
Für  $E_{\text{kin}} = 10^{15} \text{ eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ :  $m_P \approx 1 \cdot 10^6 \cdot m_{0,P}$

Für  $E_{\text{kin}} = 10^{20} \text{ eV} \approx 16 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ :  $m_P \approx 1 \cdot 10^{11} m_{0,P}$

$$\begin{aligned} \text{Für } 10^{10} \text{ eV: } r &\approx \frac{m_P \cdot v}{Q \cdot B} = \frac{12 m_{P,0} \cdot c}{Q \cdot B} \\ r &\approx \frac{12 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{-9} \text{ Vs s}} \approx 3,8 \cdot 10^{10} \text{ m} \approx \underline{\underline{\frac{1}{4} \text{ AE}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Für } 10^{15} \text{ eV: } r &\approx \frac{m_P \cdot v}{Q \cdot B} = \frac{1 \cdot 10^6 m_{P,0} \cdot c}{Q \cdot B} \\ r &\approx \frac{1 \cdot 10^6 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{-9} \text{ Vs s}} \approx 3,1 \cdot 10^{15} \text{ m} \approx \underline{\underline{21.000 \text{ AE}}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Für } 10^{20} \text{ eV: } r &\approx \frac{m_P \cdot v}{Q \cdot B} = \frac{1 \cdot 10^{11} m_{P,0} \cdot c}{Q \cdot B} \\ r &\approx \frac{10^{11} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 10^{-9} \text{ Vs s}} \approx 3,1 \cdot 10^{15} \text{ m} \approx \underline{\underline{2,1 \cdot 10^9 \text{ AE}}} \approx 10 \text{ kpc} \end{aligned}$$



## Diskussion

Im Vergleich zum Durchmesser der Galaxis (30 kpc) sind die berechneten Kreisbahnen der sehr hochenergetischen Elektronen und Protonen ( $10^{20}$  eV) nicht viel kleiner. Wie kann da der Autor behaupten, dass Teilchen mit diesen Energien (die vermutlich nicht aus unserer Galaxis kommen) nur wenig abgelenkt werden, d. h. dass ihre Richtungsinformation nahezu erhalten bleibt?

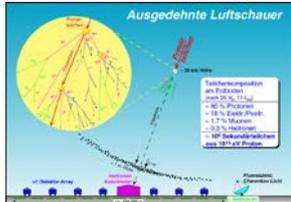
Zum einen wurde bei der Abschätzung angenommen, dass die Teilchen senkrecht zu den Magnetfeldlinien eintreffen. Dabei nehmen sie den Weg durch die galaktische Scheibe hindurch. Kommen sie aus dem Raum ober- oder unterhalb der Scheibe, so treffen sie nicht mehr senkrecht auf die Feldlinien (Winkel  $w$  zwischen Bewegungsrichtung und Feldlinien) und die Lorentzkraft verringert sich um den Faktor  $\sin(w)$ .

Zum anderen kann man für den Raum zwischen den Galaxien nicht so ein starkes Magnetfeld annehmen wie für den Raum innerhalb einer Galaxis (das interstellare Medium).

## Höhenstrahlung - wie gefährlich ist Fliegen?

([← zurück zum Anfang](#))

Wenn die energiereichen Teilchen der Kosmischen Strahlung (Primärteilchen) auf die Atome und Moleküle der Erdatmosphäre treffen, entstehen durch Kernreaktionen eine Reihe von Sekundärteilchen (Elektronen, Photonen, Hadronen und Myonen). So erzeugt ein Proton mit einer Energie von  $10^{15}$  eV eine Million Sekundärteilchen (siehe Abb. 3). Die Gesamtheit der primären und sekundären Teilchen (samt den Teilchen des Sonnenwinds), nennt man Höhenstrahlung. Die Höhenstrahlung schädigt wegen des großen Energiegehalts der Teilchen den menschlichen Organismus.



**Abbildung 3:** Luftschauer – ein Primärteilchen der Kosmischen Strahlung kann eine Lawine von Sekundärteilchen erzeugen (Bild [luftschauer.jpg](#), Quelle: <http://www.astroteilchenphysik.de/grafik/topics/cr/luftschauer.jpg>).

Die durch Strahlung an ein bestimmtes Massenelement übertragene Energie bezeichnet man als Energiedosis (Einheit Gy (Gray);  $1\text{Gy} = 1\text{J/kg}$ ). Verschiedene Strahlungsarten erzeugen verschiedene biologische Wirkungen. Dem wird im Strahlenschutz durch einen einheitslosen Wichtungsfaktor Rechnung getragen, über den die Energiedosis in die **Äquivalentdosis** überführt wird. Die Einheit der Äquivalentdosis ist das Sievert (Sv).

Die Äquivalentdosis, der ein Mensch in Deutschland durchschnittlich im Jahr durch Umwelteinflüsse ausgesetzt ist, beträgt etwa  $2100\ \mu\text{Sv}$  ( $1100\ \mu\text{Sv}$ : Radon,  $400\ \mu\text{Sv}$ :



Film badge or dosimeter measures tissue damage exposure in rems or sieverts

Absorbed dose measured in grays or rads

Ganzkörperdosimeter zur Ermittlung der aufgenommenen Energiedosis. ©: OpenStax - <https://cnx.org/contents/havxkvyvSZIP> Download: <https://cnx.org/exports/85abf193-2bd2-4908-8563-90b8a7ac8df6@9.524.zip/chemistry-9.524.zip>, CC BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=64301351>.

radioaktive Stoffe im Gestein,  $300\ \mu\text{Sv}$ : Kalium 40 in den Muskelzellen,  $300\ \mu\text{Sv}$ : Höhenstrahlung in Meereshöhe, siehe [höhenstrahlung.pdf](#)). Dieser Wert ist sehr vom Aufenthaltsort auf der Erde (Höhe, Breitengrad) abhängig. Insbesondere in der Höhe, in der sich Flugzeuge bewegen, kann die jährliche Äquivalentdosis bei längerem Aufenthalt deutlich größer werden.

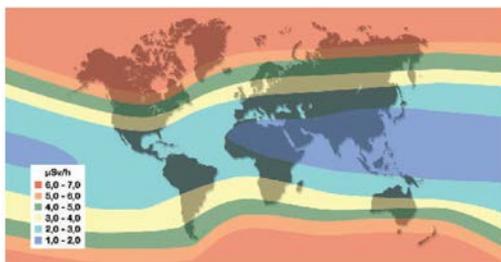
Seit 2003 sind die Fluggesellschaften verpflichtet, die durch die Höhenstrahlung verursachten Äquivalentdosiswerte für ihr Personal zu ermitteln und den Personaleinsatz so zu planen, dass die Dosisgrenzwerte eingehalten werden. Insbesondere dann, wenn die Höhenstrahlung mehr als  $1000\ \mu\text{Sv}$  ausmacht, dann ist das Luftverkehrspersonal überwachungspflichtig.

## Aufgaben – Höhenstrahlung und Strahlenschutz

Abflug	Ankunft	Dosisbereich
Frankfurt	Gran Canaria	10 – 18 $\mu\text{Sv}$
Frankfurt	Johannesburg	18 – 30 $\mu\text{Sv}$
Frankfurt	New York	32 – 75 $\mu\text{Sv}$
Frankfurt	Rio de Janeiro	17 – 28 $\mu\text{Sv}$
Frankfurt	Rom	3 – 6 $\mu\text{Sv}$
Frankfurt	San Francisco	45 – 110 $\mu\text{Sv}$
Frankfurt	Singapur	28 – 50 $\mu\text{Sv}$
Frankfurt	Dubai	.....

\*Die Schwankungsbreite geht hauptsächlich auf die Einflüsse von Sonnenzyklus und Flughöhe zurück.

Sie sind Strahlenschutzbeauftragter bei einer Luftverkehrsgesellschaft. Ihre Aufgabe besteht unter anderem darin, die Äquivalentdosen zu ermitteln, die bei verschiedenen Flügen wirksam werden und Einfluss auf die Planung des Personaleinsatzes zu nehmen. In der nebenstehenden Tabelle sind Äquivalentdosen für ausgewählte Flüge aufgeführt, die von Frankfurt am Main zu verschiedenen Orten auf der Welt führen. Die gegebene Abbildung zeigt die Breitenabhängigkeit der Äquivalentdosis für 11 km Flughöhe (aus [höhenstrahlung.pdf](#)).



Breitenabhängigkeit der Äquivalentdosis (vergrößertes Bild anhängend). ©: Bundesamt für Strahlenschutz, [http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschuere\\_n/ion/stth-hoehenstrahlung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.bfs.de/SharedDocs/Downloads/BfS/DE/broschuere_n/ion/stth-hoehenstrahlung.pdf?__blob=publicationFile&v=4).

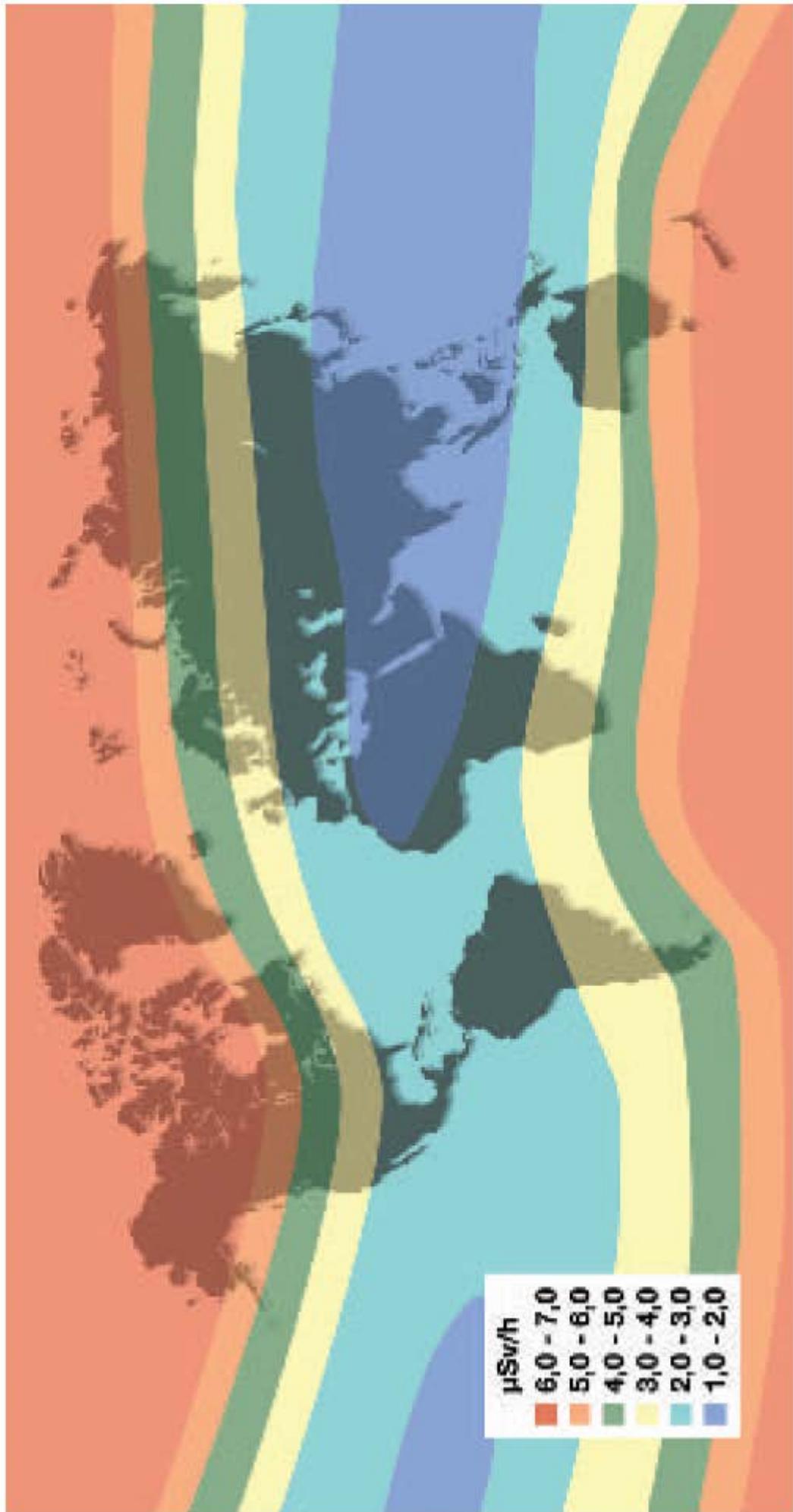
- Ermitteln Sie mit Hilfe der in der Abbildung gegebenen globalen Verteilung der Äquivalentdosis die minimale Dosis für den Flug von Frankfurt nach Dubai! (Annahmen: Flugroute ist gerade Verbindungslinie auf Karte, Flughöhe 11 km, für Auf- und Abstiegsphase wird mit voller Flughöhe gerechnet, mittlere Fluggeschwindigkeit: 700 km/h). Sie können auch auf den im Internet zur Verfügung stehenden Dosisrechner zurückgreifen.



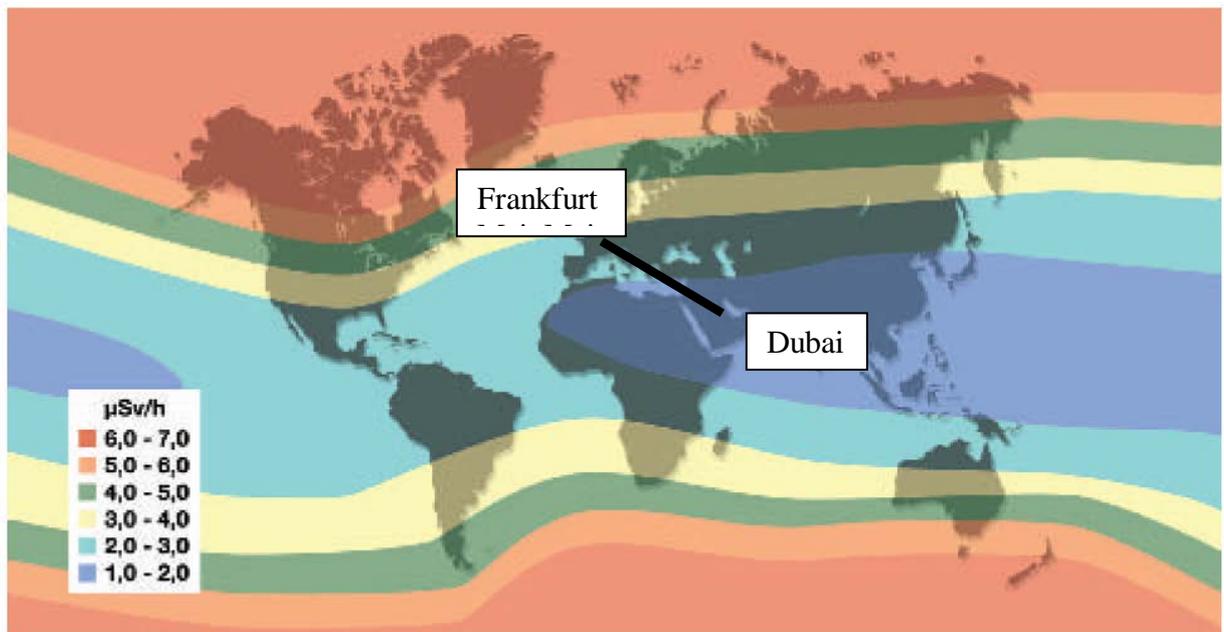
### Dosisrechner:

<http://www.ptb.de/de/org/6/63/flugdosis/flugdosisrechner/flugrechner.htm>

- Die Breitenabhängigkeit der Äquivalentdosis ist zu begründen.
- Auf welche jährliche Äquivalentdosis kommt das fliegende Personal auf den Strecken Frankfurt - San Francisco und Frankfurt – Rom, wenn man annimmt, dass es ausschließlich auf diesen Strecken verkehrt. Legen Sie ihrer abschätzenden Rechnung eine Ihrer Meinung nach realistische Dienstplanung zugrunde. Die Ergebnisse sind kurz zu diskutieren.



## Lösung zu den Aufgaben – Höhenstrahlung und Strahlenschutz



- Abschätzung der minimalen Äquivalentdosis für den Flug von Frankfurt nach Dubai:
  - Einzeichnen der Flugroute,
  - Bestimmung der Teilstrecken innerhalb der Gebiete mit verschiedener Dosisleistung (z. B.: ca. 1,4 cm für Gebiet mit 2-3  $\mu\text{Sv/h}$  und ca. 1 cm für Gebiet mit 1-2  $\mu\text{Sv/h}$  bei einer Länge der ausgedruckten Karte von ca. 17cm),
  - Berechnung der wahren Flugstrecken (für Beispiel: 17 cm entsprechen dem Erdumfang von 40.000 km, entsprechend erhält man: 1,4 cm  $\rightarrow$  ca. 3300 km, 1 cm  $\rightarrow$  ca. 2400 km),
  - Berechnung der Flugzeiten bei 700 km/h: 3300 km  $\rightarrow$  4,7 h, 2400 km  $\rightarrow$  3,4 h),
  - Berechnung der minimalen Äquivalentdosen: 4,7 h  $\rightarrow$  9,4  $\mu\text{Sv}$ , 3,4 h  $\rightarrow$  3,4  $\mu\text{Sv}$ ,
  - Ergebnis: ca. 13  $\mu\text{Sv}$ .
  
- Die Äquivalentdosisleistung wird mit zunehmender geografischer Breite größer, weil die geladenen Teilchen der Kosmischen Strahlung vom Magnetfeld der Erde abgelenkt werden. Die Lorentzkraft bewirkt, dass sich die Teilchen spiraland entlang der Feldlinien bewegen. Da sich die Feldlinien mit zunehmender geografischer Breite der Erde nähern, werden die durch sie geleiteten Teilchen in tiefere Atmosphärenschichten geführt (die Breitenabhängigkeit gilt auch für die Häufigkeit von Polarlichtern).
  
- Abschätzung der jährlichen Äquivalentdosis für das fliegende Personal auf den Strecken Frankfurt - San Francisco und Frankfurt – Rom:
  - Frankfurt - San Francisco: pro Woche 2 Flüge hin und zurück, bei 45 Arbeitswochen:  $2 \cdot 2 \cdot 45 \cdot (45 - 110 \mu\text{Sv}) = 8100 - 19800 \mu\text{Sv}$ .
  - Frankfurt – Rom: Pro Woche 6 Flüge hin und zurück, bei 45 Arbeitswochen:  $6 \cdot 2 \cdot 45 \cdot (3 - 6 \mu\text{Sv}) = 1620 - 3240 \mu\text{Sv}$ .
  - Selbst auf der Strecke Frankfurt – Rom wird der Grenzwert überschritten, ab dem das Flugpersonal medizinisch zu überwachen ist. Die Strecke Frankfurt - San Francisco sollte auf keinen Fall ganzjährig mit dem gleichem Personal geflogen werden.

## **Am Rande bemerkt**

Raumfahrer berichten über **Lichtblitze**, die sie bei ihren Missionen immer wieder sehen. Diese entstehen, wenn die Teilchen der Kosmischen Strahlung auf die Moleküle des Auges treffen und dabei auch Photonen erzeugen, die dann von der Netzhaut wahrgenommen werden (die Intensität der Kosmischen Strahlung im erdnahen Raum kann aus Abb. 1 erahnt werden). Leider haben diese Treffer auch Schäden im Auge zufolge, die dazu führen, dass der **Graue Star** (Trübung der Augenlinse) bei Raumfahrern stark gehäuft auftritt.