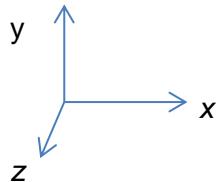


### **1. Aufgabe – Kosmische Strahlung und extraterrestrische Magnetfelder (40 Punkte)**

Der von der Sonne kommende „Sonnenwind“ besteht aus unterschiedlichen Teilchen, die mit teilweise sehr großen Energien bei Eruptionen („Solar Bursts“) aus der Sonnenoberfläche ins Weltall geschleudert werden. Ein Teil dieser Teilchen sind He-3-Kerne, also 2fach positiv ionisierte Heliumatome der Massenzahl 3u ( $1u = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $1e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

Betrachte im Folgenden diese Kerne mit einer kinetischen Energie von 250eV, welche weit außerhalb der Erdatmosphäre im Vakuum des Weltalls in ein schwaches Magnetfeld eintreten. Dieses kann in der betrachteten Region als homogen angesehen werden.

Als geeignetes Koordinatensystem wird die x-Achse parallel von der Sonne zur Erde angenommen und entspricht somit der Flugrichtung der Heliumkerne beim Eintritt ins Feld. Die y-Achse zeigt in der Blattebene nach oben, die z-Achse damit aus der Papierebene nach vorne (siehe Skizze). In diesem System haben die Vektoren die Komponenten:



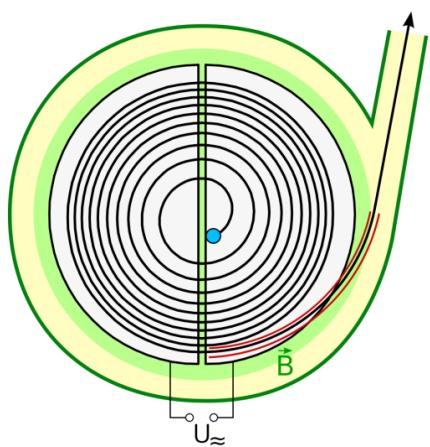
$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{B} = 0,5 \mu T \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

1. Begründe, warum die Lorentzkraft zwar eine Beschleunigung, aber keine Änderung von  $|\vec{v}|$  bewirkt. (6P)
2. Zeige mithilfe des Skalar-Produktes, dass der Winkel zwischen dem Magnetfeld und der Eintrittsgeschwindigkeit in das Feld  $\varphi = 63,4^\circ$  beträgt. (4P)
3. Berechne den Betrag  $v$  der Geschwindigkeit sowie die Anteile  $v_{||}$  parallel und  $v_{\perp}$  senkrecht zum B-Feld (zur Kontrolle und notfalls zu Teil 5:  $v_{\perp} \approx 160 \text{ km/sec}$ ). (6P)
4. Berechne den Vektor der Lorentzkraft. (4P)
5. Erläutere ausführlich anhand einer geeigneten Skizze (Perspektive!) die Richtung der Lorentzkraft bei Eintritt der Teilchen in das Magnetfeld sowie die entstehende Bahnkurve. (8P)
6. Berechne mit der Angabe aus 1.3 den Radius  $r$  der entstehenden Bahn sowie die Umlaufdauer  $T$ . (6P)
7. Mittels einer gigantischen Spule soll ein großer Raumbereich so zusätzlich mit einem Magnetfeld versehen werden, dass nur noch ein senkrechter Anteil von  $B_{\text{Ges}}$  zu  $v$  übrig bleibt. Hierzu wird eine Spule der Länge 100m und des Durchmessers von 10m mit 100.000 Wicklungen angefertigt. Skizziere die korrekte Spulenposition für dieses Vorhaben und berechne den benötigten Strom. Erläutere, welche Bahn sich dann für die He-3-Kerne ergeben würde. (6P)

Tipp: Magnetfeld einer langen Spule:  $B = \mu_0 n/L I$

## 2. Aufgabe – Vom Zyklotron zum Synchrotron (40 Punkte)

Ein Zyklotron besteht aus zwei Dipolmagneten, die in der Abbildung über- und unterhalb der gestrichelten Kreislinie angebracht sind. Zwischen den Magneten befinden sich zwei D-förmige Elektroden („Dees“), eine Ionenquelle und ein Deflektor. Die Dipolmagnete erzeugen ein möglichst homogenes, senkrecht zur Zeichenebene stehendes Magnetfeld (hier 2 Tesla). Im Spalt zwischen den Magneten befindet sich die Ionenquelle, hier werden die zu beschleunigenden Teilchen erzeugt. Sie werden durch eine an den Dees anliegende Wechselspannung beschleunigt. Die Frequenz der Wechselspannung muss so gewählt werden, dass beim Durchfliegen des Spalts die Dees so gepolt sind, dass die Teilchen durch



das dort herrschende elektrische Feld beschleunigt werden. Die Scheitelspannung der angelegten Beschleunigungsspannung zwischen den „Dees“ beträgt in den folgenden Rechnungen 1,5kV und wird pro Umlauf 2x durchlaufen.

Auf Grund der höheren Geschwindigkeit, die die Teilchen nun besitzen, wird der Bahnradius *größer*. Die Zeit zwischen zwei Spaltdurchläufen bleibt dabei immer *exakt dieselbe*, so dass das Zyklotron mit einer *konstanten* Wechselspannungsfrequenz betrieben werden kann, solange  $v \ll c$  noch erfüllt ist.

Am Rand des Zyklotrons ist ein Deflektor angebracht. An ihn kann eine Spannung angelegt werden, um den Strahl aus dem Magnetfeld zu lenken. Das klassische Zyklotron wurde zur Beschleunigung von Protonen, Deuterium und  $\alpha$ -Teilchen verwendet. Dabei konnten Protonen und Deuterium auf eine Energie von 22 MeV,  $\alpha$ -Teilchen auf 44 MeV beschleunigt werden. Mit heutigen Spezialformen des Zyklotrons lassen sich Teilchenenergien von bis zu 600 MeV erreichen.

Quelle: [www.solstice.de/grundl\\_d\\_tph/exp\\_besch/exp\\_besch\\_04.html](http://www.solstice.de/grundl_d_tph/exp_besch/exp_besch_04.html) (auch Abbildung)

1. Im Experiment sollen Protonen zunächst auf mindestens 20% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden. In diesem Bereich darf noch nichtrelativistisch gerechnet werden. Berechne die Zahl  $n$  der dafür mindestens benötigten kompletten Umläufe, den sich dann ergebenden Bahnradius  $r$  und die benötigte Frequenz  $f$  der Wechselspannung. (12P)
2. Zeige aus dem Ansatz „Lorentzkraft als Zentripetalkraft“, dass die Umlaufdauer  $T$  konstant ist, solange  $v \ll c$  und damit  $m = m_0 = \text{konstant}$  gilt. (6P)
3. Erläutere das Prinzip eines Wienschen Geschwindigkeitsfilters und dimensioniere diesen mit realistischen Werten so (Ablenkspannung  $U$ , Magnetfeld  $B$  und Plattenabstand  $d$ ), dass er obige Protonen durchlässt. (12P)
4. Nun werden die Protonen weiter auf  $0,99c$  beschleunigt. Berechne nun den Radius und die benötigte Frequenz der Beschleunigungsspannung. Berechne ebenfalls die hypothetische Stärke des Magnetfeldes, um die Protonen auf einem Kreis mit  $r=1\text{m}$  zu halten, und die dann benötigte Frequenz. (10P)

Tipp: Relativistische Masse („Dynamische Masse“):

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad \text{mit der Ruhemasse } m_0 = 1\text{u} = 1,66 \cdot 10^{-27}\text{kg des Protons}$$