**Allgemeine Hinweise:**

- Kommentieren Sie Ihre Lösungen! (Erläuterungen, Begründungen, Folgerungen)
- Rechnen Sie in SI-Einheiten (kg, m, s etc.)!
- Überprüfen Sie die physikalischen Einheiten in Ihren Rechenschritten und Lösungen! (Vor allem bei längeren Rechenwegen!)
- Lesen Sie die Aufgaben zunächst alle einmal und beginnen Sie dann mit der für Sie einfachsten Aufgabe!
- Wenn Sie einen Graphen mit dem GTR anfertigen, skizzieren Sie ihn bitte in der Klausur!

Erlaubte Hilfsmittel: Taschenrechner, Formelsammlung, Schreibutensilien

Aufgabe 1: Photoeffekt

1888 bestrahlte Wilhelm Hallwachs in Fortführung der Untersuchungen seines Lehrers Heinrich Hertz eine geladene, auf einem Elektroskop sitzende Metallplatte mit UV-Licht.

- 1.1. Aus welchen Versuchsschritten und Beobachtungen konnte Hallwachs folgern, dass bei Lichteinstrahlung nur negative Ladungsträger aus Metallen austreten?
- 1.2. Nennen Sie Gründe, warum das Wellenmodell des Lichtes bei der Deutung des von Hallwachs beobachteten Effektes versagt.

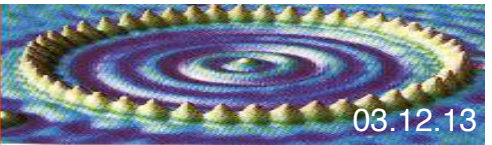
Man bestrahlt die Photokathode einer Vakuumphotozelle nacheinander mit drei ausgewählten Linien des Heliumspektrums ($\lambda_{\text{rot}} = 667,8 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{grün}} = 492,2 \text{ nm}$, $\lambda_{\text{violett}} = 402,6 \text{ nm}$).

- 1.3. Erläutern Sie anhand einer Skizze, wie man mit einem geeigneten Versuch die maximale kinetische Energie von Photoelektronen bestimmen kann.

In der folgenden Tabelle ist der Zusammenhang zwischen Wellenlänge des eingestrahnten Lichts und der gemessenen maximalen kinetischen Energie der Photoelektronen angegeben:

λ in nm	667,8	492,2	402,6
E_{kin} in eV	0,81	1,48	2,03

- 1.4. Tragen Sie in einem geeigneten Koordinatensystem die maximale kinetische Energie der Photoelektronen über der Frequenz f auf.
- 1.5. Bestimmen Sie Steigung und Achsenabschnitte (auf der E_{kin} -Achse und auf der f -Achse) der Geraden und interpretieren Sie diese Werte physikalisch. Vergleichen Sie den Steigungswert mit dem entsprechenden Literaturwert.
- 1.6. Zeigen Sie, dass sich die untersuchte Photozelle zum Nachweis eines Teils des infraroten Spektralbereichs eignet.
- 1.7. Welche Aussagen zum äußeren lichtelektrischen Effekt („Photoeffekt“) sind wahr, welche falsch?
 - a) Je kurzwelliger das Licht, je besser werden Elektronen aus der Kathode gelöst
 - b) Wird die Intensität des Lichts verstärkt, erhöht sich die Geschwindigkeit der herausgelösten Elektronen.
 - c) Die Energie des Lichtes ist von der Frequenz abhängig.
 - d) Das Kathodenmaterial muss immer ein Metall sein.
 - e) Die Grenzfrequenz hängt vom Licht ab.
 - f) Das Plancksche Wirkungsquantum hängt vom verwendeten Kathodenmaterial ab.



Aufgabe 2: Relativitätstheorie - Die Expansion des Universums

Der Doppler-Effekt beschreibt Frequenzänderungen, die bei Wellen auftreten, wenn sich Sender oder Empfänger relativ zueinander bewegen - für Schallwellen eine aus dem Alltag bekannte Erscheinung. Für Lichtwellen war der Effekt im 19. Jahrhundert von Christian Doppler vorhergesagt worden; er sollte für die Astrophysik zu einer wichtigen Messmethode werden.

1929 hatte der amerikanische Astronom Edwin Hubble erstmals das Licht ferner Galaxien spektral zerlegt. Er entdeckte, dass typische Spektrallinien bekannter Elemente nicht bei den im Labor gemessenen charakteristischen Wellenlängen auftreten, sondern zu längeren Wellenlängen - also zum roten Bereich - verschoben sind. Hubble deutete diese Rotverschiebung als Doppler-Effekt einer sich entfernenden Lichtquelle analog zu dem tieferen Motorengeräusch, mit dem wir ein Fahrzeug hören, das sich von uns entfernt. Ohne Kenntnis der Relativitätstheorie könnte man aus dieser Fluchtbewegung den Schluss ziehen, dass wir ruhen und alle Galaxien sich von uns entfernen. Tatsächlich entfernen sich alle Galaxien relativ voneinander.

Aus der Rotverschiebung lässt sich eine Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien berechnen. Hubble machte die überraschende Feststellung, dass die relative Fluchtgeschwindigkeit umso größer ist, je weiter die Galaxien voneinander entfernt sind. Man erklärt dies heute mit der Expansion des Universums. Aus den Rotverschiebungen sehr weit entfernter Galaxien ergeben sich Fluchtgeschwindigkeiten, die an die Lichtgeschwindigkeit heranreichen. Speziell die seit 1960 entdeckten Quasare weisen große Rotverschiebungen auf.

- 2.1. (Für Experten! Nichtexperten benutzen die bekannte Dopplerverschiebung für Frequenzen und formulieren sie um für Wellenlängen.)

Sei λ_E die von einem Empfänger beobachtete Wellenlänge, λ_S die Wellenlänge des ausgesandten Lichtes; Lichtquelle und Empfänger entfernen sich voneinander mit der Relativgeschwindigkeit v . Zeigen Sie, dass

$$\text{gilt: } \frac{\lambda_E}{\lambda_S} = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} = 1 + \frac{\Delta\lambda}{\lambda_S} \quad \text{mit } \Delta\lambda = \lambda_E - \lambda_S$$

(Tipp: Betrachten Sie den zeitlichen Abstand T_S zweier ausgesandter Wellenberge (= Schwingungsdauer im System des Senders). Bestimmen Sie zunächst die Zeitdauer, die ein Empfänger für diesen Vorgang misst und beachten Sie zudem, dass der Sender in dieser Zeit eine Wegstrecke zurücklegt, für deren Durchlaufen das Licht eine zusätzliche Zeit benötigt. So erhalten Sie T_E , d.h. die Schwingungsdauer, die ein Empfänger beobachtet. Über die bekannten Zusammenhänge zwischen Schwingungsdauer, Frequenz und Wellenlänge einer Welle gelangen Sie zu obiger Beziehung.)

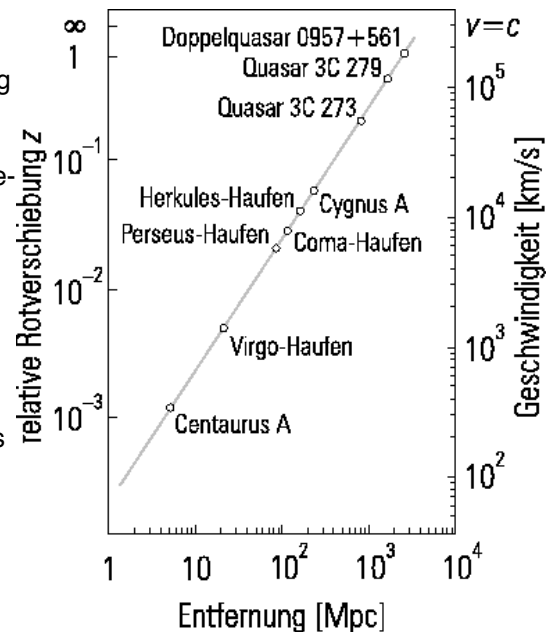
In der Astrophysik gibt man üblicherweise die Doppler-Verschiebung als den Quotienten $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_S}$ an.

- 2.2. Leiten Sie eine Formel her, in der die Fluchtgeschwindigkeit v nur in Abhängigkeit von z und c ausgedrückt ist.

- 2.3. Trägt man die aus der Doppler-Verschiebung ermittelte Fluchtgeschwindigkeit ferner Galaxien gegen deren Entfernung auf, erhält man nebenstehendes Diagramm.

- Ermitteln Sie daraus die Proportionalitätskonstante, die man auch *Hubble-Konstante* nennt, und formulieren Sie das Hubble-Gesetz, was den Zusammenhang zwischen Fluchtgeschwindigkeit und Entfernung der Galaxien mathematisch beschreibt.
- Welche Fluchtgeschwindigkeit besitzt eine Galaxie von der Erde aus betrachtet, die eine Rotverschiebung von $z=1,4$ aufweist?
- Wie weit ist die Galaxie aus b) entfernt?
- Zeigen Sie, dass sich mit der Hubble-Konstanten das Alter des Universums ergibt und berechnen Sie dieses.

(Tipps: Einheitenbetrachtung im Hubble-Gesetz; Nachdenken ;-)



- $1 \text{ pc} = 1 \text{ parsec ('Parallaxensekunde')} = 3,26 \text{ Lj} = 3,086 \cdot 10^{16} \text{ m}$
- $1 \text{ Mpc} = 1 \text{ Megaparsec}$