Associazione per l'Insegnamento della Fisica — AIF — 31ª Edizione

Olimpiadi di Fisica 2017

Progetto Olimpiadi

Nationaler Wettbewerb
Theoretischer Teil

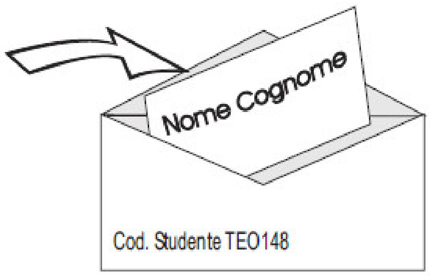
Freitag, den 21. April 2017
Liceo Statale "Medi"
Senigallia(An)

Bitte erst umblättern, wenn es die Aufsichtsperson sagt! Lies die Anweisungen GENAU durch!

Anleitungen

Zeit: 4 Stunden

1. Sobald du die Erlaubnis hast, die Arbeit zu beginnen, schreibst du deinen **NAMEN und FAMILIENNAMEN auf das Kärtchen**, das du zusammen mit den Blättern und den Umschlägen (groß und klein) erhalten hast. Gib das beschriftete Kärtchen in den kleinen Umschlag und verschließe ihn gut! Lege den kleinen Umschlag sofort in den großen Umschlag, in dem du am Schluss alle Blätter abgibst! **Anschließend darfst du KEINEN Namen mehr auf die Blätter und die Umschläge schreiben, sondern nur mehr deinen Schüler-Kenncode.**

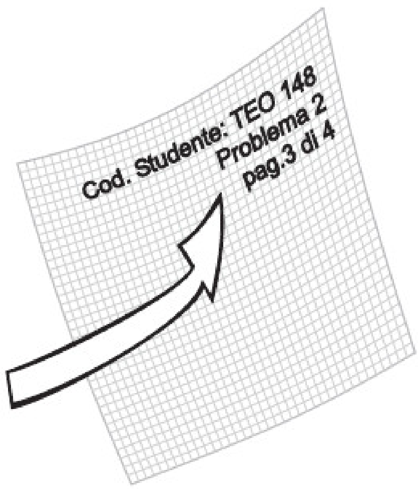


2. Lies den Text der drei Probleme genau durch!

3. Du musst für **jedes Problem ein eigenes Blatt verwenden!**

4. Schreibe auf jeder Seite oben rechts deutlich:
   - deinen **Schüler-Kenncode**
   - die **Nummer** des Problems
   - die **Seitenzahl** (beginnend mit 1 für jedes einzelne Problem)
   - die **gesamte Anzahl der verwendeten Seiten** für das betreffende Problem

   Beispiel: Seite 3 von 4



Der Nationale Wettbewerb wird unterstützt von

Comune di Senigallia

Ministero dell' Istruzione dell'Università e della Ricerca

Liceo Statale "Medi" Senigallia

Lies diesen Text aufmerksam und in aller Ruhe durch!

MERKE: Auf **keines** der Blätter darfst du deinen Namen schreiben. Nur auf das Kärtchen, das in den kleinen Umschlag kommt, schreibst du deinen Namen!
Schreibe auf alle Blätter den eigenen **Schüler-Kenncode (Codice Studente)**, der auf dem kleinen farbigen Umschlag steht - sowohl auf alle zusammenfassenden Blätter als auch auf alle karierten Blätter, die du verwendest.
Zusammen mit dem Text erhältst du für jedes Problem ein **zusammenfassendes Blatt**, auf dem du zu jedem Problem deine Antworten zusammenfasst. Die numerischen Werte müssen mit der richtigen Anzahl an Ziffern (signifikante Stellen!), abhängig von den vorgegebenen Daten, angegeben werden. Falls notwendig, gib die Einheit an!
ES IST WICHTIG, dass du alle Ergebnisse (formale und numerische) auf das entsprechende zusammenfassende Blatt schreibst, da es die Grundlage für die Bewertung deiner Arbeit ist.

Verwende für jedes Problem ein anderes kariertes Blatt und beginne immer damit, rechts oben deinen Schüler-Kenncode einzutragen.

Auf die karierten Blätter müssen die detaillierten Lösungen angegeben sein, wobei du umfangreichen Text eher vermeiden und stattdessen bevorzugt Gleichungen, Symbole, Zahlen und Diagramme verwenden sollst.

Auf jede Seite der karierten Blätter, die eine Lösung enthält, schreibst du die Nummer des Problems, die Seitenzahl und die gesamte Zahl der Seiten, die du für die Lösung dieses Problems benötigt hast (wie es auf dem Deckblatt steht)!

Zum Schluss ein nützlicher Hinweis: Nicht immer ist für die Lösung einer Frage die Lösung der vorangegangenen Frage notwendig!

Wichtig für numerische Daten: Der relative Fehler der numerisch angegebenen Daten muss mit 0,1% angenommen werden, egal, wie viele Stellen vorgegeben sind, außer es wird explizit anders angegeben! Bei den in der Tabelle angegebenen Konstanten kann der Fehler hingegen vernachlässigt werden. Die daraus folgenden numerischen Ergebnisse müssen mit der entsprechenden Anzahl an signifikanten Stellen angegeben werden.

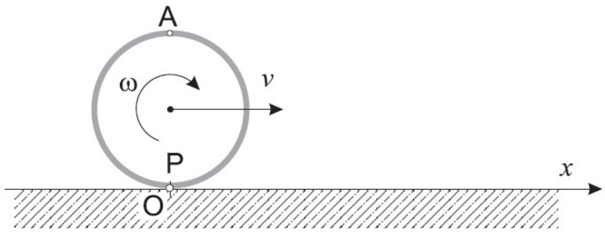
Ausarbeitung:

PROGETTO OLIMPIADI
Segreteria delle Olimpiadi Italiane di Fisica
e-mail: segreteria@olifis.it
WEB: www.olifis.it

Diese Unterlagen können unter Angabe der Quelle weiterverwendet werden, außer für kommerzielle Zwecke.
Übersetzung: Matthias Ratering und Klaus Überbacher, Realgymnasium Meran

P1 Ein Zylinder, der rutscht und rollt — 100 Punkte

Ein Hohlzylinder von vernachlässigbarer Dicke, Masse m und Radius R, bewegt sich fort, während er auf einer horizontalen Ebene rollt. Wir wollen das Verhalten dieses physikalischen Systems untersuchen, und zwar wenn keine reine Rollbewegung vorliegt ist.
Die Achse x der Translation ist nach rechts gerichtet. Im Uhrzeigersinn (siehe Abbildung) soll die Winkelgeschwindigkeit positiv sein. Der Ursprung O auf der Translationsachse fällt mit dem Kontaktpunkt P des Zylinders und der Ebene zur Zeit $t = 0$ zusammen. Zu diesem Zeitpunkt ist die Geschwindigkeit der Translation des Massenzentrums (CdM) $v_0 > 0$, während die Winkelgeschwindigkeit $\omega_0 < 0$ ist. Anders gesagt schleift der Zylinder anfänglich übver den Boden, während er sich nach rechts auf der Ebene bewegt und gleichzeitig im Gegenuhrzeigersinn um seine Achse rotiert, also entgegen der in der Abbildung eingezeichneten Richtung.



Anfänglich nehmen wir an, dass jegliche Art von Reibung vernachlässigbar sei, im Besonderen die Gleitreibung im Kontaktpunkt P zwischen Zylinder und Ebene.

1. In welcher Distanz von der anfänglichen Position wird sich der Zylinderpunkt A nach einer vollständigen Drehung des Zylinders befinden?

Nun nehmen wir an, dass die Gleitreibung (Gleitreibungskoeffizient μ) im Kontaktpunkt P zwischen Zylinder und Ebene nicht mehr vernachlässigbar ist. Andere Reibungsarten (Rollreibung, Viskosität) sollen weiterhin keine Rolle spielen.

2. Gib den Ausdruck der Geschwindigkeit V_P des Punktes P (dies ist der Punkt der Zylinderoberfläche, der zu jedem Zeitpunkt in Kontakt mit der Ebene ist) an, abhängig von der Geschwindigkeit v des CdM des Zylinders und der Winkelgeschwindigkeit ω. Bestimme den Betrag und die Richtung der Gleitreibungskraft und erkläre die Bedingung, die erfüllt sein muss, damit sie 0 ist.
3. Schreibe die Funktionen $v(t)$ und $u(t) = R\omega(t)$ als explizite Ausdrücke der Zeit t und bestimme den Zeitpunkt t_1, nach dem diese Ausdrücke nicht mehr gültig sind. Berechne die Werte der beiden Funktionen zur Zeit $t = t_1$. Zeichne die Graphen in das gleiche Geschwindigkeits-Zeit-Diagramm im Intervall $0 < t < t_1$, wobei die oben angegebenen Bedingungen für die Anfangswerte erfüllt sein müssen: $v_0 > 0$ und $\omega_0 < 0$.
4. Vervollständige die Graphen von $v(t)$ und $u(t)$für $t > t_1$ mit den gleichen oben gewählten Anfangsbedingungen, wobei du die Graphen begründen musst!
5. Bestimme in Funktion von v_0 denjenigen Wert $\overline{\omega_0}$ der anfänglichen Winkelgeschwindigkeit ω_0, für den zu einem bestimmten Zeitpunkt der Zylinder endgültig stehen bleibt. Bestimme den entsprechenden Zeitpunkt t_0 und die Position, an der der Zylinder anhält.
6. Zeige, dass eine andere Wahl von ω_0 eine andere Entwicklung der Bewegung des Zylinders verursacht hätte!
   Beschreibe, was sich in den zwei Fällen $\omega_0 > \overline{\omega_0}$ und $\omega_0 < \overline{\omega_0}$ ändert!
7. Berechne für $\omega_0 = 2\overline{\omega_0}$, abhängig von m und v_0 sowie unter Verwendung der Energiebilanz, die von der Reibungskraft verrichtete Arbeit vom Start bis $t = 2t_1$.

■

P2 Spektrum von natürlichem Wasserstoff 100 Punkte

ACHTUNG: In dieser Problemstellung muss berücksichtigt werden, dass die numerischen Daten, die mindestens 5 signifikante Stellen haben, eine relative Messunsicherheit von 10^{-5} aufweisen.
Die Beobachtung der Linien im Spektrum des Wasserstoffes, die im sichtbaren Bereich liegen, und die Messung der entsprechenden Wellenlängen hatten eine zentrale Bedeutung in der Entwicklung der ersten Modelle der Atomstruktur. In dieser Problemstellung widmen wir uns der roten Linie, die so genannte Hα-Linie, deren Wellenlänge in Luft $\lambda_a = 656,28\,\text{nm}$ beträgt.

1. Berechne die Wellenlänge λ_0 der gleichen Linie im Vakuum, wobei der Brechungsindex den Wert $n_a = 1,00027$ hat!

Nach dem Bohrschen Atommodell, das 1913 ausgearbeitet wurde, sind die erlaubten Energieniveaus des Wasserstoffatoms durch folgende Gleichung gegeben:
$E_n = -\dfrac{1}{8n^2} K(\epsilon_0, e, m_e, h)$ mit $n \in \mathbb{N}^+$
wobei $K(\epsilon_0, e, m_e, h)$ ein Ausdruck ist, der durch die angegebenen physikalischen Konstanten ausgedrückt werden kann (ϵ_0 ist die elektrische Feldkonstante, e ist die Elementarladung, m_e ist die Elektronenmasse, h ist das Planck'sche Wirkungsquantum), wobei der numerische Faktor gleich 1 ist.

2. Bestimme durch Dimensionsanalyse den Ausdruck von K in Funktion der angegebenen physikalischen Konstanten!

Das Bohrsche Atommodell liefert für K den Wert $1,7439 \cdot 10^{-17}$ J.

3. Wir wissen, dass die Hα-Linie beim Übergang vom Energieniveau $n_i = 3$ auf das Energieniveau $n_f = 2$ emittiert wird. Berechne den Wert, den das Bohrsche Modell für die Wellenlänge (λ_{th}) dieser Linie im Vakuum voraussagt und die prozentuale Differenz zwischen diesem Wert und dem Wert λ_0, den du bei der ersten Frage gefunden hast!

Die Ausdrücke für die oben angegebenen Energieniveaus findet man durch die Untersuchung der Bewegung der Elektronen im Bezugssystem des Kerns. Wir berücksichtigen, dass dieses Bezugssystem nur approximativ ein Intertialsystem ist. Eine bessere Übereinstimmung mit den Messdaten erhalten wir, wenn wir den Schwerpunkt des Systems Kern-Elektron als Bezugssystem wählen. Hierbei kommen wir zum gleiche Ausdruck für K, allerdings wird die Elektronenmasse durch die "reduzierte Masse" $\mu = m_e m_N/(m_e + m_N)$ ersetzt, wobei m_N die Masse des Kerns ist.

4. Verifiziere diese Behauptung, indem du mit diesem Hinweis den vorausgesagten Wert neu berechnest und zwar für die $H\alpha$-Linie im Vakuum (λ_H). Berechne wiederum die prozentuale Differenz zwischen diesem Wert und dem Wert λ_0.

Die soeben angebrachte Korrektur lässt vermuten, dass sich bei nicht völlig reinem Wasserstoff, der einen gewissen Anteil an Deuterium (die Masse des Deuteriumkerns beträgt $m_D = 3.3436 \cdot 10^{-27}$ kg, er besteht aus einem Neutron und einem Proton) enthält, alle Linien sich aufspalten müssten. In der Natur ist der Anteil an Deuterium circa 0,015%. Das Gemisch wird als *natürlicher Wasserstoff*[1] bezeichnet.
Verwende im Weiteren immer die Wellenlänge im Vakuum!

5. Berechne die Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda$ zwischen den roten Linien der beiden Isotope des natürlichen Wasserstoffes!

Um die Spektrallinien mit unterschiedlichen Wellenlängen zu trennen, kann man ein Beugungsgitter verwenden. Es besteht aus einer großen Anzahl an parallelen, gleich weit entfernten Öffnungen, die

[1] Es gibt in der Natur noch ein drittes Isotop des Wasserstoffs, das Tritium. Sein Kern besteht aus einem Proton und zwei Neutronen. Sein Anteil ist aber verschwindend gering und daher vernachlässigbar.

sehr nahe beieinander liegen. Das Gesetz, das den Winkel für das k-te Helligkeitsmaximum liefert, lautet

$$p \sin(\theta_k) = k\lambda$$

wobei p die Gitterkonstante ist, also der Abstand zwischen zwei Öffnungen.
θ_k ist der Beugungswinkel des k-ten Lichtbündels, gemessen von der Richtung des einfallenden Lichtbündels.
k ist eine ganze Zahl, die die Ordnung der Helligkeitsmaxima darstellt, λ ist die Wellenlänge.
Zwei Größen, die das Beugungsgitter charakterisieren, sind die Dispersion D und das Auflösungsvermögen R.
Die Dispersion ist definiert durch

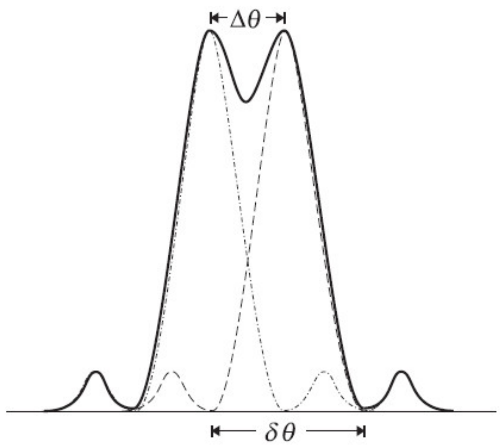
$$D \equiv \Delta\theta/\Delta\lambda$$

wobei $\Delta\theta$ der Winkel zwischen den Zentren zweier Beugungsmaxima (der gleichen Ordnung) ist, die von zwei Linien erzeugt werden, deren Wellenlängen eine Differenz von $\Delta\lambda$ haben.
Beachte, dass jedes einzelne Maximum in Funktion von θ einen ähnlichen Intensitätsverlauf hat wie die beiden in der nächsten Abbildung unterschiedlich strichliert dargestellten Verläufe. Charakteristisch für den Intensitätsverlauf ist eine Winkelbreite $\delta\theta$, die durch folgende Formel gegeben ist:
$\delta\theta = \dfrac{2\lambda}{N\, p\, \cos(\theta)}$, wobei N die Anzahl der ausgeleuchteten Öffnungen des Gitters ist.

Das Auflösungsvermögen gibt an, wie gut ein Gitter zwei sehr nahe beieinander liegende Spektrallinien der Wellenlänge λ_1 und λ_2 trennen kann, wobei das von der Breite der entsprechenden Maxima abhängt. Es ist definiert durch

$$R \equiv \lambda/\Delta\lambda_{\text{min}}$$

wobei $\lambda \approx \lambda_1 \approx \lambda_2$ gilt und $\Delta\lambda_{\text{min}}$ die kleinste Wellenlängendifferenz ist, bei der die beiden Linien getrennt gesehen werden können.
Damit zwei nahe Linien aufgelöst werden können, sodass man versteht, dass es sich um zwei Linien und nicht um eine einzige Linie handelt, muss der Winkelabstand $\Delta\theta$ zwischen den beiden Maxima groß genug sein im Vergleich zur Größe $\delta\theta$.



Dieser kleinste Winkelabstand ist meisten durch das *Rayleigh-Kriterium* gegeben, nach dem zwei Linien aufgelöst werden können, wenn das Maximum der einen Linie mit dem Minimum der anderen Linie[2] zusammenfällt, wie die Abbildung zeigt.

6. Bestimme die Dispersion D eines Beugungsgitters in Abhängigkeit von der Gitterkonstanten p und der Ordnung k!
7. Verwende das Rayleigh-Kriterium um das Auflösungsvermögen R eines Beugungsgitters zu berechnen, das eine Breite von $L = 1\,\text{cm}$ und eine Strichzahl pro mm von $n = 1200$ Linien mm^{-1} hat, wobei auf das Gitter senkrecht ein Lichtbündel fällt, das eine Bereite von $d = 1,25\,\text{mm}$ beleuchtet.
8. Zeige, dass es unter diesen Voraussetzungen nicht möglich ist, die rote Linie des Wasserstoffes und die rote Linie des Deuteriums zu trennen!
9. Gib an, was man ändern muss, damit man die beiden Linien mit diesem Gitter trennen kann!

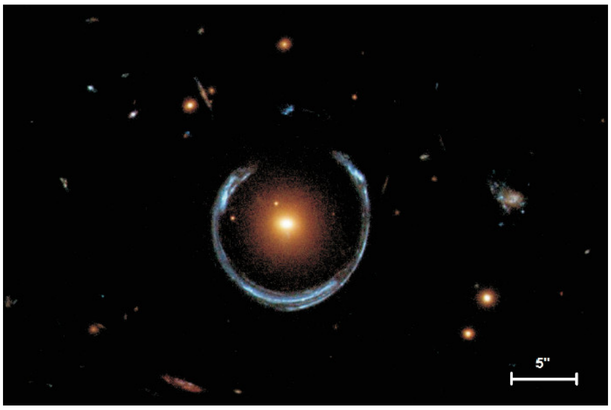
■

[2] In der Abbildung werden die beiden Maxima mit gleicher Höhe dargestellt, so als hätten die beiden Linien die gleiche Helligkeit. Dies gilt natürlich nicht für den Fall des natürlichen Wasserstoffes. Dazu müsste man dem Gemisch mehr Deuterium zuführen. Der Einfachheit halber untersuchen wir diesen Fall.

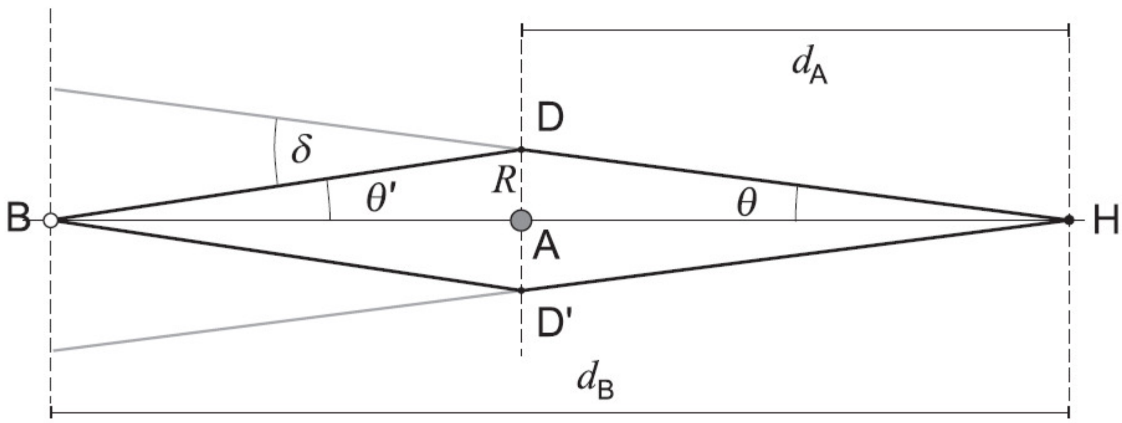
P3 Gravitationslinse 100 Punkte

Die Gravitationslinse ist ein astronomisches Phänomen, das von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt wurde. Dabei wir Licht von einer weit entfernten Quelle beim Durchqueren eines starken Gravitationsfeldes abgelenkt.

Einer der spektakulärsten Fälle wurde im Jahre 2007 entdeckt. Er wurde als "Horse Shoe Einstein Ring" bezeichnet (siehe nebenstehende Abbildung, aufgenommen mit dem Hubble Space Telescope). Die helle Scheibe in der Mitte des Ringes ist die sehr helle Galaxie LRG 3-757, die wir mit "A" bezeichnen werden. Das Licht, das vom Ring stammt, wird hingegen von einer anderen Galaxie ausgesandt, wir nennen sie "B". Sie ist auch sehr hell, aber nicht direkt sichtbar, da sie von der ersten Galaxie verdeckt wird. Ihr Licht erreicht das Hubble-Teleskop dank der Ablenkung durch die Gravitation der Galaxie A. Die fast kreisförmige Form des Ringes weist darauf hin, dass in diesem Fall die perspektivische Ausrichtung der beiden Galaxien fast perfekt ist.



Die Behandlung dieses Systems ist schwierig, da diese beiden Objekte in so großer Entfernung[3] liegen. Dabei dürfen die Expansion und die Krümmung des Raumes nicht vernachlässigt werden. In dieser Problemstellung vernachlässigen wir diese Effekte und untersuchen, was in einem kleineren Raumbereich passieren würde, der näher bei uns liegt. In diesem Zusammenhang können wir das Phänomen in vereinfachter Form beschreiben: Im folgenden Diagramm sind die Winkel der Übersicht halber stark vergrößert und der gekrümmte Verlauf des Lichtes wird durch zwei geradlinige Abschnitte angenähert, so als ob die Ablenkung nur an einer Stelle erfolgen würde.



In der Abbildung ist H die Position des Beobachters, θ ist der Winkel, unter dem der Lichtring betrachtet wird; δ ist der Ablenkwinkel durch das Gravitationsfeld von A. Ausgedrückt durch die Masse M der Galaxie A und der Entfernung $R = \overline{AD}$ gilt für δ

$$\delta = \frac{4GM}{c^2 R} \tag{1}$$

[3] Die Entfernungen sind zwischen 1 und 4 Gpc, wobei die Einheit der Länge "Parsec"(pc) in der Astronomie gleich $3,1 \cdot 10^{16}$ m ist.

G ist die Gravitationskonstante, c die Lichtgeschwindigkeit

1. Gib die Distanz R in Funktion der Masse M und der Distanzen d_A und d_B der beiden Galaxien an (siehe Abbildung)! Berücksichtige dabei die Beziehungen zwischen den Winkeln δ, θ und θ' und beachte, dass die Größen dieser Winkel immer im Bereich von Bogensekunden liegen!

2. Gib den Ablenkwinkel δ in Funktion der gleichen Größen an!

3. Zeige, dass die Masse M der Linsen-Galaxie A berechnet werden kann, wenn die Distanzen d_A und d_B sowie der Winkel θ, unter dem der Radius des Einstein-Ringes erscheint, bekannt sind!

4. Die Distanz d_A soll fixiert sein. Wir setzen $d_B = k \cdot d_A$. Berechne, für welchen Wert von k der Winkel des Ringes von H aus betrachtet maximal ist. Finde den Ausdruck für das entsprechende $\theta_{\max}$.

Wir nehmen an, dass die Galaxie A die Form eines Diskus hat und auf einer Ebene senkrecht zur Betrachtungsrichtung ist. Damit der Ring beobachtet werden kann, muss der Winkel, unter dem man seinen Radius sieht, um einiges größer sein als der Winkel, unter dem man den Radius R_A der Galaxie A betrachtet, es muss also mindestens $\theta > 2R_A/d_A$ sein.
Dies legt eine Beziehung zwischen der Distanz der Galaxie und ihrer "Kompaktheit" fest, die wir durch die Oberflächendichte $\sigma = M/(\pi R_A^2)$ ausdrücken.

5. Die maximale Dichte, die für eine kompakte Galaxie beobachtet wurde, liegt in der Größenordnung von $\sigma_0 = 200\,\mathrm{kg\,m^{-2}}$. Finde die kleinste Distanz d_A, bei der eine kompakte Galaxie einen Einsteinring formen kann, dessen Ausdehnung mindestens doppelt so groß ist wie die sichtbare Ausdehnung der Galaxie! Gib das Resultat in Megaparsec (Mpc) an!

Wir untersuchen, in welchem Zusammenhang man von einer Gravitationslinse sprechen kann. Wir vergleichen dazu das Verhalten der Ablenkung δ in Funktion von R, das durch die Gleichung (1) gegeben ist, mit der analogen Beziehung zwischen der Ablenkung, die eine dünne optische Sammellinse mit Brennweite f erzeugt, in Funktion des Abstandes R zwischen der optischen Achse und dem Schnittpunkt eines Strahles mit der Linse.

6. Bestimme die Funktion $\delta(R)$ für eine optische Linse, wenn Quelle und Bild im Abstand p und q von der Linse sind, wobei die Winkel klein sind (d.h. $p, q \gg R$)

Wir setzen $q = d_A$ und $p = d_B - d_A$ und betrachten den Kegel, der von Lichtstrahlen gebildet wird, die auf die Gravitationslinse im Abstand von R zur optischen Achse fallen.

7. Zeige: Beschränkt auf die Menge der Strahlen dieses Kegels ist die Gravitationslinse äquivalent zu einer optischen Linse, wobei die Brennweite F vom Parameter R (sowie den anderen Konstanten) abhängt! Finde den Ausdruck für $F(R)$! Zeige mit Hilfe einer Skizze das unterschiedliche Verhalten einer Gravitationslinse verglichen mit einer optischen Linse, indem du für beide Fälle drei Strahlen in drei Kegeln mit $R = r, 2r, 3r$ zeichnest! .

8. Wir betrachten den Fall, dass sich die Galaxie B im Unendlichen befindet. Zeige, dass für einen Beobachter H das Licht dieser Galaxie von einer ringförmigen Quelle zu kommen scheint, die sich in einer Entfernung D von H befindet. Berechne diese Distanz als Vielfaches von d_A

Einige physikalische Konstanten:

Diese gerundeten Werte mit einem relativen Fehler kleiner als 10^{-5} sind als **exakt** anzusehen!

Konstante	Symbol	Zahlenwert	Einheit
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	c	$2,9979 \cdot 10^8$	ms^{-1}
Elementarladung	e	$1,60218 \cdot 10^{-19}$	C
Elektronenmasse	m_e	$9,1094 \cdot 10^{-31}$ $= 5,1100 \cdot 10^2$	kg $keV c^{-2}$
Protonenmasse	m_p	$1,67262 \cdot 10^{-27}$ $9,3827 \cdot 10^2$	kg $MeV c^{-2}$
Neutronenmasse	m_n	$1,67493 \cdot 10^{-27}$ $9,3955 \cdot 10^2$	kg $MeV c^{-2}$
Elektrische Feldkonstante	ε_0	$8,8542 \cdot 10^{-12}$	Fm^{-1}
Magnetische Feldkonstante	μ_0	$1,25664 \cdot 10^{-6}$	Hm^{-1}
Planck'sches Wirkungsquantum	h	$6,6261 \cdot 10^{-34}$	Js
Universelle Gaskonstante	R	$8,3145$	$J\,mol^{-1}K^{-1}$
Avogadro-Konstante	N	$6,0221 \cdot 10^{23}$	mol^{-1}
Boltzmann-Konstante	k	$1,38065 \cdot 10^{-23}$	$J\,K^{-1}$
Faraday-Konstante	F	$9,6485 \cdot 10^4$	$C\,mol^{-1}$
Stefan-Boltzmann-Strahlungskonstante	σ	$5,6704 \cdot 10^{-8}$	$W\,m^{-2}K^{-4}$
Gravitationskonstante	G	$6,674 \cdot 10^{-11}$	$m^3kg^{-1}s^{-2}$
Normaldruck	p_0	$1,01325 \cdot 10^5$	Pa
Normaltemperatur ($0°C$)	T_0	$273,15$	K
Molares Volumen eines Idealen Gases bei Normalbedingungen (p_0, T_0)	V_m	$2,2414 \cdot 10^{-2}$	m^3mol^{-1}
Atomare Masseneinheit	u	$1,66054 \cdot 10^{-27}$	kg

Weitere Daten

Diese gerundeten Werte mit einem relativen Fehler kleiner als 10^{-5} sind als **exakt** anzusehen!
Zur Vereinfachung - falls nicht anders angeführt - sind diese Daten bei allen Temperaturen ohne wesentliche Fehler verwendbar, auch wenn sie nur für eine bestimmte Temperatur angegeben sind.

Mittlere Fallbeschleunigung	g	$9,8067$	$m\,s^{-2}$
Dichte von Wasser (bei $4°C$)	ρ_w	$1,000 \cdot 10^3$	$kg\,m^{-3}$
Spezifische Wärmekapazität von Wasser (bei $20°C$)	c_w	$4,182 \cdot 10^3$	$J\,kg^{-1}K^{-1}$
Wasser: spezifische Schmelzwärme	σ_s	$3,335 \cdot 10^5$	$J\,kg^{-1}$
Wasser: spezifische Verdampfungswärme (bei $100°C$)	σ_v	$2,257 \cdot 10^6$	$J\,kg^{-1}$