

Klassische Physik 1

Johannes Blümer

WS 2014/15

V21 15.1.15

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA



1. Einführung

- 1.1. Was ist Physik?
- 1.2. Physikalische Größen und Einheiten
- 1.3. Messungen, Datenauswertung, Fehler

2. Klassische Mechanik

- 2.1. Kinematik der Massenpunkte
- 2.2. Dynamik der Massenpunkte
- 2.3. Systeme von Massenpunkten
- 2.4. Rotation

3. Gravitation

- 3.1. Gravitationsgesetz
- 3.2. Feld und Potential

3.3. Planetenbahnen: Kepler

3.4. Massenverteilungen

3.5. Dunkle Materie

4. Relativistische Mechanik

4.1. Bezugssysteme und Transformationen

4.2. Spezielle Relativitätstheorie

4.3. Relativistische Kinematik

5. Feste Körper und Flüssigkeiten

5.1. Feste Körper

5.2. Hydrostatik und Hydrodynamik

6. Schwingungen und Wellen

6.1. Schwingungen

6.2. Wellen

Zusammenfassung v20

E1: $c = \text{const}$; E2: ausgezeichnetes Inertialsystem

$$\beta = v/c \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Zeitdehnung $\Delta t = \gamma \Delta t'$

Längenkontraktion $L = L'/\gamma$

S' bewege sich mit v relativ zu S
Teilchen bewege sich in S' mit Geschw. u_x in x -Richtung

$$\Rightarrow u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v u'_x}{c^2}}$$

Doppler-Effekt:

$$\frac{f_B}{f_a} = \frac{\sqrt{1 \pm \beta}}{\sqrt{1 \mp \beta}} = \frac{\lambda_a}{\lambda_B}$$

Rotverschiebung

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda}$$

Hubble-Expansion

$$v = H_0 D$$

Massenzunahme

$$m = m_0 \cdot \gamma$$

relativistische Masse

"Ruhemasse": Masse eines Körpers "in seinem Ruhesystem"

Relativistischer Impuls, Energie

Ersetze klass. Impuls durch $\vec{p} = \underline{m_0} \underline{\vec{v} \gamma} = \underline{m(v)} \cdot \vec{v}$

$p \rightarrow \infty$ für $v \rightarrow c$

rel. Masse

Betr. kin. Energie: $E_{\text{kin}} = \int_{v=0}^v F ds = \int_{v=0}^v \frac{dp}{dt} ds = \int_0^v v \frac{dp}{\underset{ds/dt=v}{dt}}$

↑
relativist.
Formul.

$$= \int_0^v v d \left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \right) = \left[\frac{d}{dv} \left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \right) \text{ bilden, } m_0 = \text{konst} \right] = m_0 \int_0^v v \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} dv$$

Also

$$= m_0 c^2 \left(\underbrace{\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}}_{\gamma} - 1 \right)$$

$$E_{\text{kin}} = m_0 c^2 (\gamma - 1) = \underbrace{m_0 c^2 \gamma}_{v\text{-abh.}} - \underbrace{m_0 c^2}_{\text{„Restenergie“ für } v=0}$$

↳ Gesamtenergie $E_{\text{ges}} = E_{\text{kin}} + m_0 c^2 = m_0 c^2 \gamma$ $E_{\text{ges}} \rightarrow \infty$ für $v \rightarrow c$

rel. Masse $m = m_0 \gamma = m_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ entwickeln für $\beta \ll 1$ 2. Terme interpret.

$$\dots m = m_0 \left(1 + \frac{1}{2} \beta^2 + \dots \right)$$
$$= \frac{1}{c^2} \left(\underbrace{m_0 c^2} + \underbrace{\frac{1}{2} m_0 v^2} + \dots \right) = \frac{1}{c^2} \left(\text{Ruheenergie} + \text{kin. Energie} + \dots \right)$$

$$E = m c^2$$

Energie-Impuls-Relationen

" E_{kin} " $\rightarrow$ " T "

$$p = m v = m_0 \gamma v$$

$$E = T + m_0 c^2 = m c^2 = m_0 \gamma c^2 = p c^2 / v$$

$$p = m_0 \gamma v = E \beta / c$$

$$E = m_0 \gamma c^2 = p c / \beta$$

$$\gamma = E / m_0 c^2 = m / m_0 = p / (m_0 \beta c)$$

$$T = E - m_0 c^2 = m_0 (\gamma - 1) c^2$$

CERN: LHC beschleunigt Protonen (p) auf 7 TeV
 $m_0(p) = 1 \text{ GeV}/c^2$ $\hookrightarrow \gamma_{\text{LHC}} \approx \frac{7 \cdot 10^{12}}{1 \cdot 10^9} = 7000$

$$v^2/c^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2} \quad E^2 = \frac{p^2 c^2}{1 - 1/\gamma^2} \quad [...]$$

$$E^2 - p^2 c^2 = (\underline{m_0 c^2})^2$$

rechte Seite ist konstant $\rightarrow$

rel. Energiesatz

$\hookrightarrow E^2 - p^2 c^2$ ist eine "relativistische Invariante" = $(\text{Ruhmasse} \cdot c^2)^2$

Massen-Energie-Relationen

Klassisch: 1 kg $\approx$ 1 m Hub im Grav. feld der Erde

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h = 1 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 1 \text{ m} = \underline{9.81 \text{ Joule}}$$

Einstein: Gesamtenergie 1 kg Masse $E = m_0 c^2 = 1 \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2$
 $= 9 \cdot 10^{16} \text{ Joule}$

Wasserstoffkern Proton $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

sehr niedrige
Energie-, Massenskala

$$E_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 1.5 \times 10^{-10} \text{ J}$$

handl. Einheit $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ etc

$$\hookrightarrow E_p = 938 \text{ MeV} \xrightarrow{E=mc^2} m_p = 938 \text{ MeV}/c^2$$

$\hookrightarrow$ "c=1" bei Verw.
von geeigneten
Einheiten von
Energie, Impuls,
Masse...

<u>Teilchen</u>	<u>Ruhmasse MeV/c²</u>	<u>Symbol</u>
Photon	ϕ	γ
Elektron	0.511	e^+, e^-
Myon	105,7	$\mu^\pm$ instabil $\tau = 2\mu\text{s}$
Proton	938,280	p ($p^+, p^- = \bar{p}$) $p \hat{=} {}^1\text{H}$
Neutron	939,573	n
Deuteron	1875.628	${}^2\text{H}, {}^2\text{D}, \text{D} \leftarrow n+p$

Proton	938,280	} $m_p + m_n = 1877,853 \text{ MeV}/c^2$
Neutron	939,573	
Deuteron	<u>1875,628</u>	

Deuteron ist $2.2 \text{ MeV}/c^2$ leichter als $\{n+p\}$

"Massendefizit" $\hat{=}$ Bindungsenergie
des Deuterons

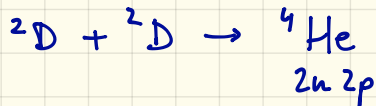
umgekehrt: Photon von $\geq 2.2 \text{ MeV}$ Energie kann D wieder in
p + n dissoziieren

Urknall: $q\bar{q}, e^\pm, \gamma, \nu$

Abkühlung $q\bar{q} \rightarrow$ Mesonen, $qqq \rightarrow$ Baryonen

$$n+p \leftrightarrow \underline{\underline{D}} \leftrightarrow n+p$$

und
udd p
 n



$\Rightarrow$ "primordiale Nukleosynthese"

alle anderen Elemente werden erst Mrd. Jahre später in Sternen gebildet	{	H	75%	"erste 3 Minuten"
		He	25%	
		:		

Strahlungsleistung der Sonne

- - auf der Erde $P_{\odot}^E \approx 1,4 \text{ kW/m}^2$ "Solarkonstante"

gesamte abgestrahlte Leistung: $P_{\odot} = P_{\odot}^E \times (4\pi r_E^2)$

also $P_{\odot} \approx 1,4 \text{ kW/m}^2 \cdot 4\pi \cdot (1,5 \cdot 10^{11} \text{ m})^2$ ↳ Rad. der Erdbahn

$$= 3,96 \cdot 10^{26} \text{ J/s} \rightarrow \Delta M_{\odot} = \frac{P_{\odot}}{c^2} = 4,4 \cdot 10^9 \text{ kg/s}$$

Watt!

Massenverlust der Sonne
durch Energieabstrahlung
ist 4 Mio t/s (!)

Kernprozesse

chem. Prozesse

vgl. Verbrennung von
1 t Holz:

Heizwert 17 MJ/kg $\rightarrow$ Energiewert 1 t Holz $1,7 \cdot 10^{10} \text{ J}$

$$\Delta m = 0,2 \text{ mg}$$

Viervektoren u. rel. Invarianz

4-Vektoren: $\tilde{a} = (a_0, \vec{a}) = (a_0, a_1, a_2, a_3)$

Betrag eines 4-Vektors: $|\tilde{a}|^2 = a_0^2 - |\vec{a}|^2$

L.T.: $\underbrace{x' = \gamma(x - vt), y' = y, z' = z}_{\text{Orte, Längen}}, \quad \underbrace{t' = \gamma(t - \frac{vx}{c^2})}_{\text{Zeit}}$

LT in Matrixform
mit 4-Vektor:

$\hookrightarrow ct' = \gamma(ct - \frac{v}{c}x)$
nur noch Längen

$$\tilde{x}' = L \cdot \tilde{x}$$

vermutete $\tilde{x} = (ct', \underbrace{x'_1}_{y'}, \underbrace{x'_2}_{z'}, x'_3)$

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma v/c & 0 & 0 \\ -\gamma v/c & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \gamma ct - \gamma \frac{v}{c} x_1 \\ -\gamma \frac{v}{c} ct + \gamma x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma (ct - \frac{v}{c} x_1) \\ \gamma (x_1 - vt) \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}$$

|| Lorentz-Invarianz von "geeigneten" $\tilde{a}$:
 $|\tilde{a}|^2$ ist in jedem Inertialsystem gleich ||

Beweis $\tilde{x} = (ct, x_1, 0, 0)$ als Lorentz-Invariante

$|\tilde{x}|^2$ bilden "im System S"

$|\tilde{x}'|^2$ - " - S'

LT! ... $|\tilde{x}'|^2 = |\tilde{x}|^2 \quad \square.$

Also $c^2 t^2 - \vec{x}^2$ ist eine Lorentz-Invariante

nä. Demo $\tilde{a} = (E, \vec{p}c)$ ist ein geeigneter 4-Vektor
 $(E/c, \vec{p})$

Beweis durch $\tilde{a}' = L \cdot \tilde{a}$ und Beträge bilden

↳ finde $|\tilde{a}'|^2 = (E\gamma - \gamma\beta pc)^2 - (-\gamma\beta E + \gamma pc)^2 = \dots = E^2 - p^2c^2$

d.h. $E^2 - p^2c^2$ ist Lorentz-invariant

- " - hat in jedem Inertialsystem den gleichen Wert

↙
berechne den Wert in einem besonders einfachen Inertialsystem

nämlich dem Ruhesystem $(E^2 - p^2c^2)_{\text{Ruhesystem}} = (m_0c^2)^2$
 $\downarrow$
 $= 0$ ✓