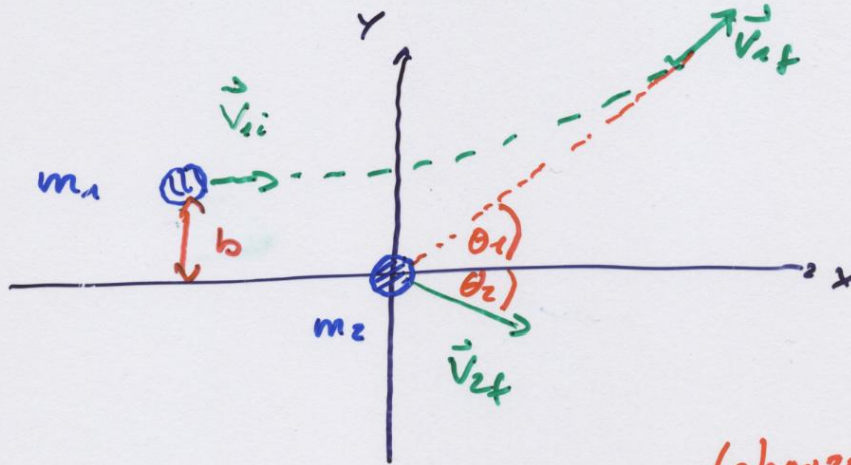
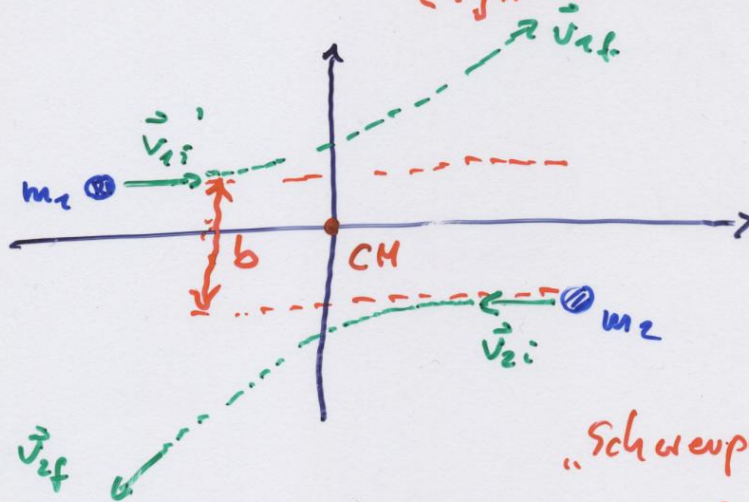


4] Stöße in 2 / 3 Dimensionen



„Laborsystem“
[system von m_2]

11



„Schwerpunkt-system“
„CMS“

a) Spezialfall : $m_1 = m_2 = m$

$Q = 0$ [Elast. Stoß]

„Billard“

Laborsystem :

$$m \vec{v}_{1i} = m \vec{v}_{1f} + m \vec{v}_{2f}$$

$$\Rightarrow v_{1i}^2 = v_{1f}^2 + v_{2f}^2 + 2 \vec{v}_{1f} \cdot \vec{v}_{2f}$$

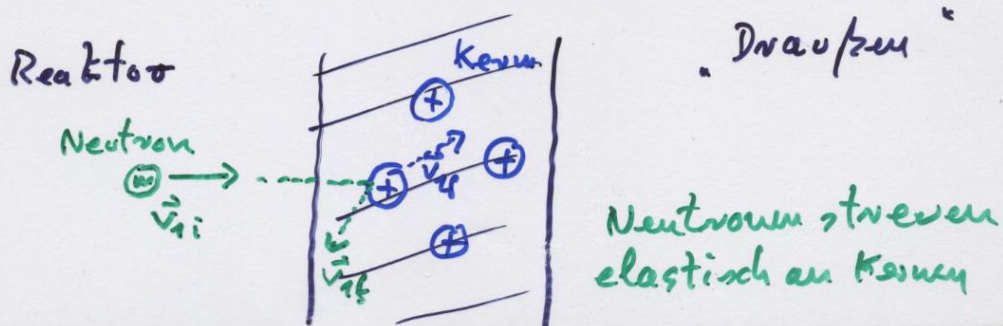
$$= v_{1f}^2 + v_{2f}^2 + 2 v_{1f} v_{2f} \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$\cdot \frac{1}{2} m v_{1i}^2 = \frac{1}{2} m (v_{1f}^2 + v_{2f}^2)$$

$$\Rightarrow 2 v_{1f} v_{2f} \cos(\theta_1 + \theta_2) = 0$$

$$\Rightarrow \theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$$

b) Anwendung : Abschirmung von Neutronen



Wir wollen, daß die Neutronen
abgebremst werden: $v_{1f} \ll v_{1i}$

Für frontale Stöße:

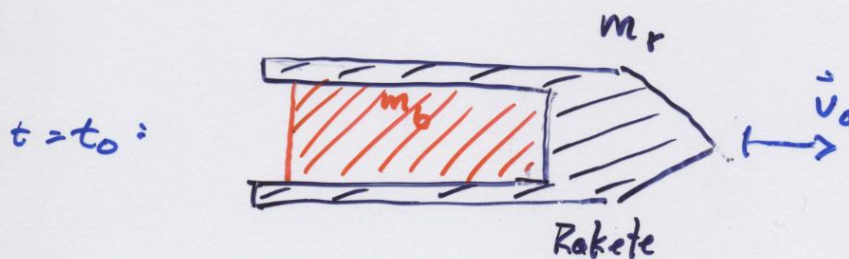
$$v_{1f} = v_{1i} \cdot \frac{m_n - m_A}{m_n + m_A}$$

$v_{1f} \rightarrow 0$, wenn $m_n \rightarrow m_A$

Abbremsung optimal, wenn $m_A = m_n$:
A = Wasserstoff ($\approx B$ in Paraffin)

2.3.3 Systeme mit variabler Masse

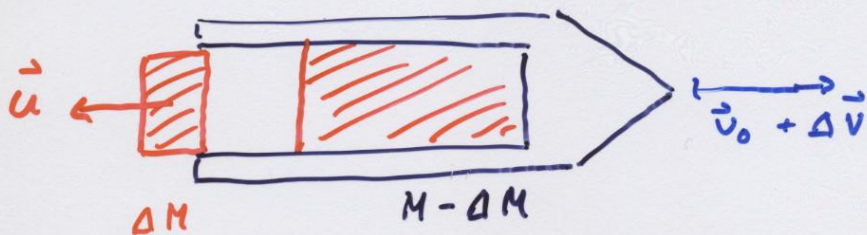
- keine äußeren Kräfte -



$$\vec{P}_{\text{cm}} = (m_n + m_b) \vec{v}_0 = M \vec{v}_0$$

[Gesehen vom ruhenden Betrachter]

$$t = t_0 + \Delta t :$$



$$\vec{v}_{\text{rel}} = \vec{u} - \vec{v}_0 = \text{const}$$

$$\vec{P}_{\text{CM}}' = \underbrace{(M - \Delta M)(\vec{v}_0 + \Delta \vec{v})}_{\text{Rakete}} + \underbrace{\Delta M \cdot \vec{u}}_{\text{Brennstoff}}$$

$$= \cancel{M \vec{v}_0} + M \Delta \vec{v} - \cancel{\Delta M \vec{v}_0} - \cancel{\Delta M \Delta \vec{v}}_{\text{klein}} + \Delta M \vec{v}_{\text{rel}} + \cancel{\Delta M \vec{v}_0}$$

$$= \vec{P}_{\text{CM}} = M \vec{v}_0$$

$$\Rightarrow 0 = M \Delta \vec{v} + \Delta M \vec{v}_{\text{rel}}$$

Im Komponenten:

$$\Delta M v_{\text{rel}} = M \Delta v$$

für $\Delta t \rightarrow dt$:

$$-\frac{dM}{dt} v_{\text{rel}} = M \frac{dv}{dt}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta M > 0 \\ \frac{dM}{dt} < 0 \end{array} \right\}$$

$$\Rightarrow - \int_{m_n + m_b}^{m_n} \frac{dM}{M} = \frac{1}{v_{rel}} \int_{v_0}^{v_{end}} dv$$

$$\Rightarrow v_{end} = v_{rel} \cdot \ln \frac{m_n + m_b}{m_n} (+ v_0)$$

Raketengleichung

Beispiele

a) Saturn V (Mondrakete)

Treibstoff: Mischung von Kerosin
und $\uparrow$ O_2
Flüssig

$$v_{rel} = 3,1 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m_n + m_b = 2450 \text{ t}$$

$$m_b = 1700 \text{ t} \quad ; \text{ Brenndauer } 100 \text{ s}$$

$$v_{end} = 3700 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

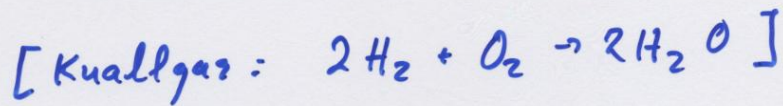
$$v_{end}' = 3700 \frac{\text{m}}{\text{s}} - g \cdot 100 \text{ s} = 2700 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$\Rightarrow$ Brauche mehrere Stufen

$$< 11,2 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

b) Reise zum nächsten Stern

1. Konventionellen Treibstoff



$$v_{\text{rel}} = 5 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m_N = 100 \text{ t}$$

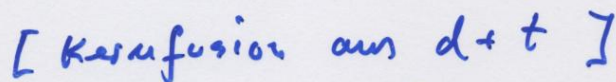
$$v_{\text{end}} \stackrel{!}{\approx} c$$

$$= v_{\text{rel}} \cdot \ln \frac{m_N + m_B}{m_N}$$

$$m_B = m_N \cdot (e^{c/v_{\text{rel}}} - 1)$$

$$= 10^{4912} \text{ t} \quad \text{zu viel!}$$

2. Revolutionärer Treibstoff



$$v_{\text{rel}} = 5 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$m_N = 100 \text{ t}$$

$$m_B = 2,2 \cdot 10^6 \text{ t} \quad \text{geht!}$$

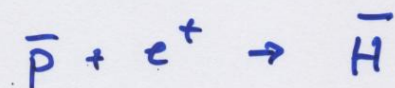
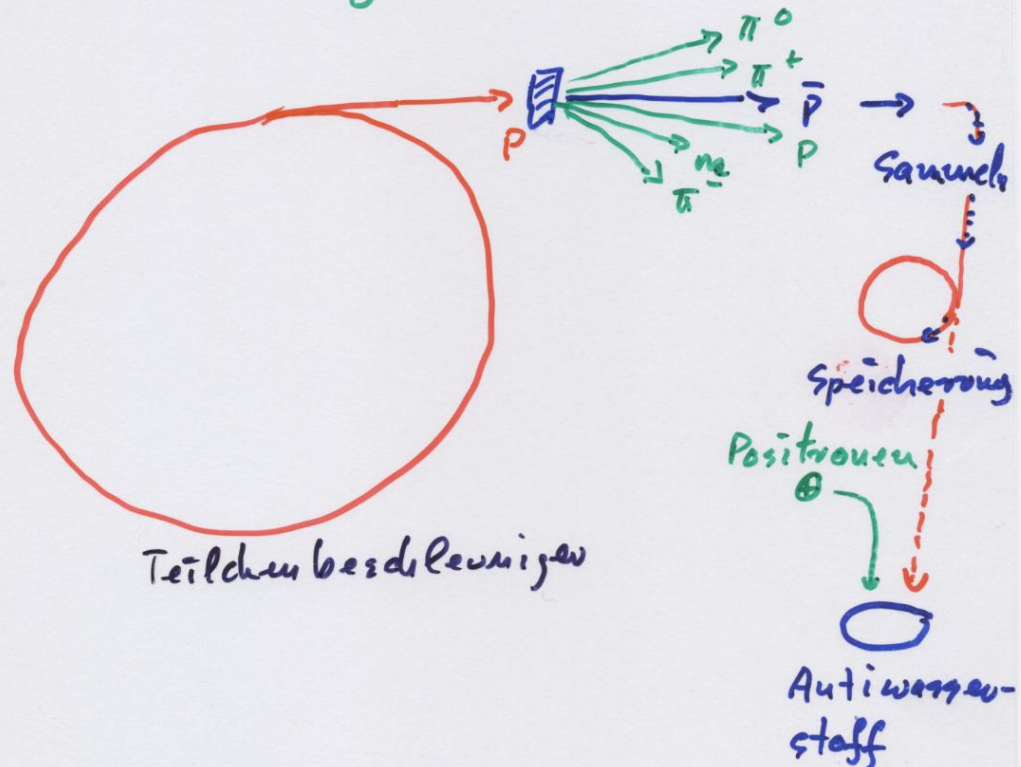
aber: brauchen m_B zum Abbremsen!

$$\Rightarrow m_{N'} = 2,2 \cdot 10^6 \text{ t} \Rightarrow m_{B'} = 4,4 \cdot 10^{10} \text{ t}$$

3. SF Treibstoff

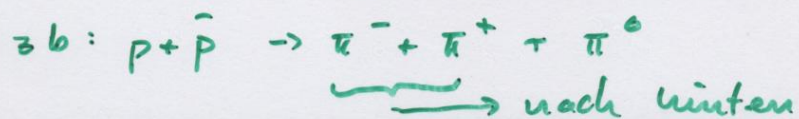
[Antiwasserstoff]

a) Herstellung



b) Verwendung

$H + \bar{H} \rightarrow 2 \text{ GeV reine Energie}$
 $\rightarrow$ Teilchen mit $v \approx c$



$$m_b = 100 \text{ t} \cdot (e^{c/213c} - 1)$$

$$\approx 450 \text{ t}$$

Brauchen wir
zum abbrennen

$$\rightarrow \underline{m'_b = 2465 \text{ t}}$$

Geht !

Abw: bündelung $O(100) \text{ H}^-$
hergestellt !

Schlussfolgerung: Riesen zum Stern
dauern lange !