F1

	J	MeV	u	kg
1 J entspricht	1	$6.241'461 \cdot 10^{12}$	$6.700'425 \cdot 10^{9}$	$1.112'650 \cdot 10^{-17}$
1 MeV entspricht	$1.602'189 \cdot 10^{-13}$	1	$1.073'535 \cdot 10^{-3}$	$1.782'675 \cdot 10^{-30}$
1 u entspricht	$1.492'443 \cdot 10^{-10}$	$9.315'023 \cdot 10^{2}$	1	$1.660'566 \cdot 10^{-27}$
1 kg entspricht	$8.987'554 \cdot 10^{16}$	$5.609'547 \cdot 10^{29}$	$6.022'043 \cdot 10^{26}$	1

u & kg → J gemäss $E = m \cdot c^2$

MeV → J gemäss $1e \cdot 1V \cdot 10^6$

u → MeV gemäss $m \cdot c^2 / (1e \cdot 10^6)$ ...

(F2)

Gesamte Bindungsenergie :

$$16 \cdot 1.007'825'2\ u \;-\; 15.994'915\ u \;\approx\; 0.130'288\ u$$

Pro Nukleon : $\left(0.130'288\ u \;/\; 16\right) u$

In MeV :

$$\left(0.130'288 \;/\; 16\right) \cdot 9.315'023 \cdot 10^2 \;\approx\; \underline{\underline{7.585\ \mathrm{MeV}}}$$

Das passt sehr gut zum Diagramm auf p. 90, in der Gegend gleich rechts vom He-4.

(F3)

Vorher : Teilchen 1 $E_0 = m_0c^2$, v , $E_{kin} = 4\,m_0c^2$

Teilchen 2 $E_{tot} = E_0 = m_0c^2$, $E_{kin} = 0$

Nachher : 1 Teilchen $E_{tot} = M_u c^2$, u , M_0

Energiesatz : $m_0c^2 + 4\,m_0c^2 + m_0c^2 = M_u \cdot c^2$ I

Impulssatz : $5 \cdot m_0 \cdot v = M_u \cdot u$ II

I $\Rightarrow$ $M_u = 6 \cdot m_0$

Dies in II : $5 \cdot \cancel{m_0} \cdot v = 6 \cdot \cancel{m_0} \cdot u$

$\Rightarrow$ $u = \frac{5}{6} \cdot v$

Geschwindigkeit von Teilchen 1 : $E_0^{\,2} = E_{tot}^{\,2} - (p \cdot c)^2$

$$(m_0c^2)^2 = (5\,m_0c^2)^2 - (5 \cdot m_0 \cdot v \cdot c)^2$$

$$\cancel{m_0^2} \cdot c^{\cancel{4}\,2} = 25\,\cancel{m_0^2}\,c^{\cancel{4}\,2} - 25\,\cancel{m_0^2}\,\cancel{c^2} \cdot v^2$$

$$25\,v^2 = 24\,c^2 \quad ; \quad v = \sqrt{\frac{24}{25}} \cdot c$$

$$v = \frac{2}{5} \cdot \sqrt{6} \cdot c \approx 0.979'796 \cdot c$$

$$u = \frac{5}{6} \cdot v = \frac{5}{6} \cdot \frac{2}{5} \cdot \sqrt{6} \cdot c = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{6} \cdot c = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot c$$

$$u \approx 0.816'497 \cdot c$$

$$M_0 = M_u \cdot \sqrt{1 - u^2/c^2} = 6 \cdot m_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{2}{3}} =$$

$$= 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot m_0 = \sqrt{12} \cdot m_0 \approx 3.464'102 \cdot m_0$$

$$M_0 = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot m_0$$

F4

a) $m_v / m_0 = 3700$ (je)

$$\rightarrow \quad E_{kin} = 3699 \cdot m_0 \cdot c^2$$
$$\approx 3699 \cdot 9.1095 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ J}$$
$$\approx 1893 \text{ MeV}$$
$$\approx 2.032 \text{ u}$$

also so schwer wie 2 Protonen !

b) $M \cdot c^2 = M_0 \cdot c^2 = 2 \cdot m_v \cdot c^2 = 2 \cdot 3700 \cdot m_0 \cdot c^2$

$$M = 7400 \cdot m_0$$
$$\approx 3787 \text{ MeV}$$
$$\approx 4.065 \text{ u}$$

c) Erzeugte Ruhemasse nach Karambolage = 7400 x die Ruhemasse der zusammenstossenden Teilchen !

Aus 2 x 500 kg = 1 t entstehen also (bei der entsprechenden Zusammenprall-Geschwindigkeit !) $\underline{\underline{3700 \text{ t}}}$ Schrott !!

F5

I Energiesatz $\quad {}^{+}m_v \cdot c^2 + {}^{-}m_0 \cdot c^2 = {}^{\psi}M_u \cdot c^2$

II Impulssatz $\quad {}^{+}m_v \cdot v = {}^{\psi}M_u \cdot u$

I quadriert : $\quad {}^{+}E_{tot}^2 + 2 \cdot {}^{+}E_{tot} \cdot {}^{-}E_{tot} + {}^{-}E_{tot}^2 = {}^{\psi}E_{tot}^2$

II quadriert, $\cdot c^2$: $\quad ({}^{+}p \cdot c)^2 = ({}^{\psi}p \cdot c)^2$

Gemäss $\quad E_{tot}^2 = E_0^2 + (p \cdot c)^2 \quad$ eingesetzt :

$${}^{+}E_0^2 + \cancel{({}^{+}p \cdot c)^2} + 2 \cdot {}^{+}E_{tot} \cdot {}^{-}E_{tot} + {}^{-}E_{tot}^2 = {}^{\psi}E_0^2 + \cancel{({}^{\psi}p \cdot c)^2} \qquad \mathrm{II}\ !$$

$$2 \cdot {}^{+}E_{tot} \cdot {}^{-}E_0 + 2 \cdot E_0^2 \overset{!}{=} (7400 \cdot E_0)^2 \qquad | : (2 \cdot E_0)$$

$${}^{+}E_{tot} + E_0 = \tfrac{1}{2} \cdot 7400^2 \cdot E_0$$

$${}^{+}E_{tot} = \left(\tfrac{1}{2} \cdot 7400^2 - 1\right) \cdot E_0 = z \cdot E_0$$

Aufwand ist 7400 x so gross !!

$$\text{mit} \quad z = \tfrac{1}{2} \cdot 7400^2 - 1 = 27'379'999 \quad !!$$

((vorher, mit Doppelspeicherring : $z = 3700$!))

$$M_u = m_v + m_0 = 27'380'000 \cdot m_0$$

(statt vorher $M_u = M_0 = 7400 \cdot m_0$!)

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{E_{tot}^2}} = \sqrt{1 - \frac{1}{z^2}} \approx 1 - \frac{1}{2 \cdot z^2} \approx 1 - \frac{1}{2 \cdot 27'380'000^2}$$

$$\frac{v}{c} = 1 - 6.67 \cdot 10^{-16} \quad ; \quad w = 6.67 \cdot 10^{-16} \cdot c \approx 2 \cdot 10^{-7}\ \mathrm{m/s} \quad !!$$

$$\frac{u}{c} = \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{E_{tot}^2}} = \sqrt{1 - \frac{7400^2}{27'380'000^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{7400^2}{27'380'000^2} \approx$$

$$\frac{u}{c} \approx 1 - 3.652 \cdot 10^{-8} \quad ; \quad W = c - u \approx 10.96\ \mathrm{m/s}$$

F6

$$E_{alt} = \frac{1}{2}\cdot m_v \cdot v^2 \quad ; \quad E_{neu} = m_0\cdot c^2\cdot\left(\frac{1}{\sqrt{}} - 1\right)$$

Wir zeigen: $E_{alt} / E_{neu} \neq 1$ falls $v > 0$

$$\frac{E_{alt}}{E_{neu}} = \frac{\frac{1}{2}\cdot\frac{\cancel{m_0}}{\sqrt{}}\cdot v^2}{\cancel{m_0}\cdot c^2\cdot\left(\frac{1}{\sqrt{}} - 1\right)} = \frac{v^2}{2\cdot c^2\cdot\sqrt{}\cdot\left(\frac{1}{\sqrt{}} - 1\right)} =$$

$$= \frac{v^2}{2\cdot c^2}\cdot\frac{1}{\left(1-\sqrt{}\right)} = \frac{v^2}{2\cdot c^2}\cdot\frac{\left(1+\sqrt{}\right)}{1-\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)} =$$

$$= \frac{v^2}{2\cdot c^2}\cdot\frac{1+\sqrt{}}{v^2/c^2} = \frac{1}{2}\cdot\left(1+\sqrt{}\right)$$

Für <u>kleine</u> Geschwindigkeiten gilt in sehr guter Näherung

$$\frac{1}{2}\cdot\left(1+\sqrt{1-v^2/c^2}\right) \approx \frac{1}{2}\cdot(1+1) = 1$$

Der Fehler wird aber immer grösser, je näher $\frac{v}{c}$ an 1 herankommt. Er geht gegen 50% für $v/c \to 1$.

Die Formel ist also viel 'besser' als $\frac{1}{2}m_0\cdot v^2$, aber sie ist dennoch einfach falsch.

(77) $B = 0.214\ \mathrm{T}$; $r_1 = 8.31\ \mathrm{cm}$; $r_2 = 5.17\ \mathrm{cm}$

$$\frac{m_v \cdot v^2}{r} = F_z = F_L = e \cdot v \cdot B \implies m_v \cdot v = e \cdot r \cdot B$$

---

a) $$m_v \cdot v_1 = p_1 = e \cdot r_1 \cdot B \approx 2.849 \cdot 10^{-21}\ \mathrm{Ns}$$

$$m_v \cdot v_2 = p_2 = e \cdot r_2 \cdot B \approx 1.772 \cdot 10^{-21}\ \mathrm{Ns}$$

$$E_0 = m_0 \cdot c^2 \approx 0.511'714\ \mathrm{MeV}$$

$$p_1 \cdot c = 2.849 \cdot 10^{-21} \cdot 3 \cdot 10^8\ \mathrm{J} \approx 5.334'3\ \mathrm{MeV}$$

$$p_2 \cdot c = 1.772 \cdot 10^{21} \cdot 3 \cdot 10^8\ \mathrm{J} \approx 3.318'9\ \mathrm{MeV}$$

$$E_{tot,1} = \sqrt{E_0^2 + (p_1 \cdot c)^2} \approx 5.359\ \mathrm{MeV}$$

$$E_{tot,2} = \dots \approx \underline{3.358\ \mathrm{MeV}}$$

$$8.717\ \mathrm{MeV}$$

$$\frac{m_v}{m_0} = \frac{E_{tot}}{E_0} \approx 10.5 \text{ für Teilchen 1 }, \ 6.56 \text{ für Teilchen 2}$$

b) $$E_{kin} = E_{tot} - E_0 \approx 5.023\ \mathrm{MeV}\ (1) \text{ resp. } 2.846\ \mathrm{MeV}\ (2)$$

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{E_{tot}^2}} \approx 0.995'4\ (1) \text{ resp. } 0.988'3\ (2)$$

c) $$E = h \cdot f > 8.717\ \mathrm{MeV} \approx 1.3964 \cdot 10^{-12}\ \mathrm{J}$$

denn $$f > E/h \approx \frac{1.396'4 \cdot 10^{-12}}{6.626 \cdot 10^{-34}} \approx \underline{2.108 \cdot 10^{21}\ \mathrm{Hz}}$$

d) $$p(\text{Photon} \sim \gamma\text{-Quant}) = E/c \approx 4.655 \cdot 10^{-21}\ \mathrm{Nm}$$

Vergleich: $$p_1 + p_2 \approx 4.621 \cdot 10^{21}\ \mathrm{Nm}$$

Paarerzeugung findet tatsächlich nur in unmittelbarer Nachbarschaft eines Atomkerns statt. Daher können diese Quanten auch unterwegs kaum zerfallen, bei den guten ∅ Vakuum im All.

F8

a) Impulssatz $\quad p_\gamma$ (vorher) $=$ p_e (nachher)

$$\frac{E}{c} = m_r \cdot v = m_0 \cdot \frac{v}{\sqrt{\ \ }} \quad \Big| :(m_0 \cdot c)$$

$$\frac{E}{m_0 \cdot c^2} = \frac{v}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{\ \ }} = x \cdot \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} \quad \Big| \text{ quadriere}$$

$$\frac{E^2}{E_0^2} = \frac{x^2}{1-x^2} \quad ; \quad E^2 \cdot (1-x^2) = E_0^2 \cdot x^2$$

$$E^2 = x^2 \cdot (E^2 + E_0^2) \quad ; \quad x = \frac{v}{c} = \sqrt{\frac{E^2}{E^2 + E_0^2}}$$

$$x = \frac{v}{c} \approx \frac{100 \text{ keV}}{\sqrt{511^2 + 100^2} \text{ keV}} \approx \frac{100}{521} \approx \underline{\underline{0.192}}$$

b) Energiesatz $\quad E_\gamma$ (vorher) $=$ $E_{kin,e}$ (nachher)

$$E_\gamma = m_0 \cdot c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\ \ }} - 1\right) = E_0 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{\ \ }} - 1\right)$$

$$\frac{E_\gamma}{E_0} = \frac{1}{\sqrt{\ \ }} - 1 \quad ; \quad 1 + \frac{100}{511} = \frac{1}{\sqrt{\ \ }} \quad ; \quad \frac{611}{511} = \frac{1}{\sqrt{\ \ }}$$

$$\sqrt{\ \ } = \frac{511}{611} \quad ; \quad 1 - x^2 = \left(\frac{511}{611}\right)^2 \quad ; \quad x^2 = 1 - \left(\frac{511}{611}\right)^2$$

$$x = \frac{v}{c} \approx \sqrt{1 - \left(\frac{511}{611}\right)^2} \approx \underline{0.548} \overset{!}{>} 0.192$$

c) Mit der Geschwindigkeit $v \approx 0.192 \cdot c$ von a) gerechnet:

$$E_{tot}(e) = m_0 \cdot c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - 0.192^2}} - 1\right) \approx 511 \text{ keV} \cdot 0.018'958$$

$$\approx 9.687 \text{ keV}$$

Einfallende Energie : 100 keV !

% verschwunden : $\frac{100 - 9.687}{100} \cdot 100\% \approx 90.3\,\%$!

Wohin geht das ?? Austrittsarbeit – nö, winzig. Aber: Beschleunigte Elektronen strahlen!