Das Standard Modell

I. Physik – was ist das?

II. Physik der fundamentalen Wechselwirkungen.

1. Die heutige Theorien.
2. Raum, Zeit, Bewegung, Raumzeitliche Symmetrien.
3. Fundamentale Wechselwirkungen.
4. Erhaltungsgesetze.
5. Die “gängige” Teilchen.
6. Teilchen- und Hochenergie-Experimente.
7. Die Quarks und die Struktur der Kernteilchen.
8. Das Standardmodell der Elementarteilchen.
9. Prozesse.

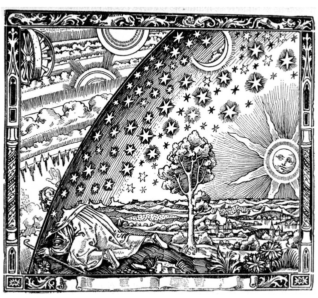
III. Das Urknall-Modell (das “Standard Kosmologisches Modell”).

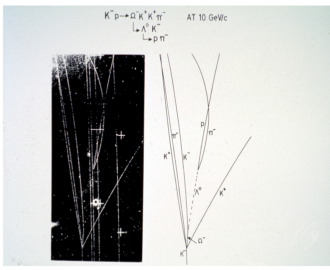
1. Geschichte
2. Perspektive
3. Die Grundlagen des Standard Kosmologischen Modells.
4. Der Inhalt des Kosmos
5. Entfernungen in Kosmos.
6. Das Urknall Modell.

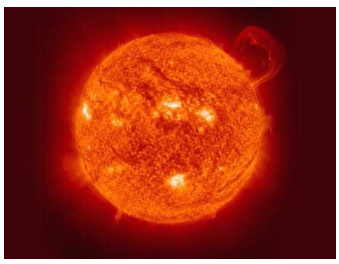
Anhang A. Physikalische Konstanten.
Anhang B. Umgehen mit Zehnerpotenzen.

NB: Alle vorgeführte Beschreibungen sollen mit den bisherigen Kenntnissen verständlich sein. Die Formeln enthalten keine Terme, die wir nicht schon kennen und angewandt haben.
Die *Magenta* umrandeten Kasten enthalten Details, die man beim ersten Lesen auslassen kann.
Die *Rot* umrandeten Kasten enthalten Bemerkungen zum Text.
Die *Blau* umrandeten Kasten sind Übungen, die das Verstehen erleichtern sollen.
Ich habe keine Literatur angegeben. Einige Angaben kommen aus: H.-G. Dosch, “Das Standard Modell”, in E. Seiler/I.-O. Stamatescu Eds. *Approaches to Fundamental Physics*, Springer, 2006; C.W. Misner/K.S. Thorne//J.A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, 1970; U. Ellwanger, *Vom Universum zu den Elementarteilchen*, Springer 2008; R.P. Feynman/R.B. Leighton/M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley 1965.
Einige Figuren sind aus Internet und eventuell Copyright geschützt: der Text ist daher nur für unser Hector-Modul und **nicht zum verbreiten** freigegeben!

HECTOR Seminar, C Ion Stamatescu 2010







Übungen mit Rechenbeispiele

Coulomb Gesetz:

$$Kraft \propto \frac{Ladung_1 \, . \, Ladung_2}{(Abstand)^2} \text{ , kurz (und damit übersichtlicher) } \quad K = const \times \frac{Q_1 \, Q_2}{D^2} \qquad (1)$$

Übung 1:

In R wird eine negative Ladung $Q_1 = -4\text{C}$ *(C: Coulomb)* und in S eine positive Ladung $Q_2 = 1\text{C}$ fest eingebracht im Abstand $d = 2\text{mm} = 0{,}002 \; m$. Die Kraft wird in N (*Newton*) gemessen, und mit diesen Einheiten ist in Gl. (1) $const = 8{,}99 \times 10^9 \; \frac{N \; m^2}{C^2}$ (die Einheiten sind konsistent gewählt, das heißt, wenn man Ladungen in C und Abstände in m misst, kommt das Resultat automatisch in N).

Ein Urankern wird in einem Punkt T im Abstand D hinter S angebracht. Welche Gesamtkraft K wirkt auf dem Kern für:

$D = 1\text{mm} \; , \; 2\text{mm} \; , \; 3\text{mm} \; , \; ... \; , \; 10 \; mm$?

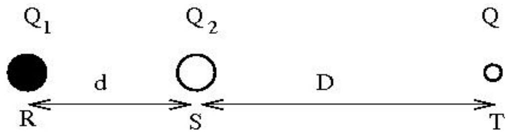
Erstelle eine Tabelle

D :	0,001	0,002	...	0,010 m
K :	....	....	.....	.... N

und zeichne den Graph K gegen D (oder verwende einen GTR).

Vergleiche mit der Kraft K_2 die auf dem Urankern wirkt wenn die Ladung in R weggenommen wird (also, $Q_1 = 0$). Beschreibe die Kräfte K und K_2 .

Hinweis: die Ladung von S wirkt mit einer positiven (abstoßenden) Kraft auf dem Kern in T und die vom R mit einer negativen (anziehenden) Kraft, die Gesamtkraft ist die Summe der beiden (mit ihren Vorzeichnen).



Rechenbeispiel:
Wir rechnen die Kraft, die ein Proton auf einem Elektron im Abstand von 1 nm (nanometer) übt. Wir bezeichnen die Ladungen $Q \, , q$ und den Abstand x , dann::

$Q = 1{,}6 \times 10^{-19} \, C \, , \; q = -1{,}6 \times 10^{-19} \, C \, , \; x = 10^{-9} \, m$ und wir verwenden Gl. (1):

$$K = const \times \frac{Q \; q}{x^2} = 8{,}99 \times 10^9 \; \frac{N \; m^2}{C^2} \times \frac{1{,}6 \; 10^{-19} \; C \; (-1{,}6 \; 10^{-19}) \; C}{10^{-18} \; m^2} = -2{,}3 \; 10^{-10} \; N$$

Diese Kraft ist negativ, also anziehend.

NB: Kräfte, Geschwindigkeiten, Impulse haben eine Größe (Betrag) und eine Richtung. Man nennt sie „Vektoren“: Pfeile von gegebenen Richtung und Länge. Wir werden immer versuchen, alles nur längs einer gegebenen Richtung zu beschreiben, dann haben wir nur mit positiven oder negativen reellen Zahlen zu tun – wie hier oben. Dann können wir die Kräfte, Geschwindigkeiten, etc einfach addieren (oder subtrahieren). Das ist nicht so einfach wenn sie in verschiedenen Richtungen zeigen, so wie z.B. die Impulse der Protonen und die der Muonen in der Zeichnung auf S.6. (siehe dort).

Geschwindigkeitsaddition Gesetz:

$$u = \frac{v + w}{1 + \frac{v\,w}{c^2}}$$

c :	Lichtgeschwindigkeit	
u :	unsere Geschwindigkeit gegenüber dem Bahnhof,	(4)
v :	unsere Geschwindigkeit innerhalb des Zugs,	
w :	Geschwindigkeit des Zugs gegenüber dem Bahnhof,	

im Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten $u \ll c\ ,\ w \ll c\ :\quad u = v + w$ (5)

Rechenbeispiel:

Die Rakete fliegt weg von der Erde mit Geschwindigkeit $0{,}9\,c$ gesehen im Bezugssystem der Erde. Die Rakete wirft einen Lichtstrahl nach hinten. Welche Geschwindigkeit misst man auf der Erde wenn der Strahl ankommt? Wir schreiben $v_1 = 0{,}9\,c$, $v_2 = -c$ verwenden Gl.(4):

$$u = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1\,v_2}{c^2}} = \frac{(0{,}9 - 1)\,c}{1 - 0{,}9\,\frac{c^2}{c^2}} = \frac{-0{,}1\,c}{0{,}1\,\frac{c^2}{c^2}} = -c$$

Äquivalenz Prinzip:

Allgemeine Relativitätstheorie: Phänomene *in einer kleinen Umgebung* in freiem Fall im Schwerefeld verhalten sich so, als ob weder Beschleunigung noch Schwerefeld vorhanden wären. Damit werden die Effekte der Gravitation mit denen von Beschleunigung verglichen.

Übung 2:

Eine Rakete fliegt mit halber Lichtgeschwindigkeit von der Erde weg, $w = \frac{1}{2}\,c$, und schießt Projektile mit Geschwindigkeiten $v = 0{,}1\ c\ ;\ 0{,}2\ c\ ;\ 0{,}3\ c\ ;\ \ldots\ ,\ 0{,}9\ c\ ;\ 1{,}0\ c$ (gemessen im Bezugssystem der Rakete). Welche Geschwindigkeiten u haben diese Projektile im Bezugssystem der Erde? Erstelle einen Graph u gegen v . Verwende das relativistisches Gesetz Gl. (4) und vergleiche mit den nicht-relativistischen, Gl. (5).

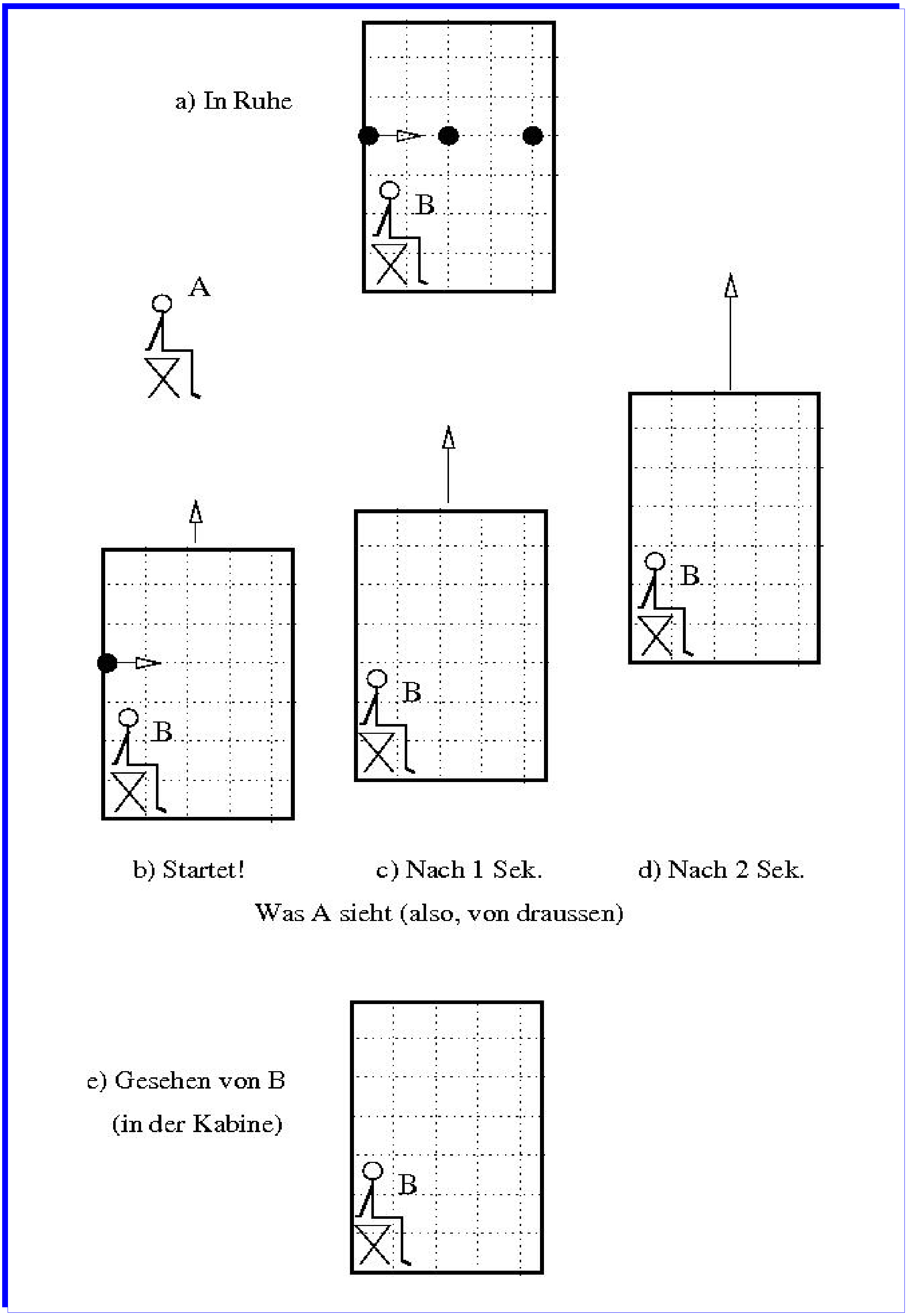
Übung 3:

Betrachte eine Aufzugkabine im gravitationsfreien Raum, irgendwo im Weltall (siehe die Bilder auf der nächsten Seite !).

Im Bild *a)* ist die Kabine in Ruhe und der äußere Beobachter ***A*** und der innere Beobachter ***B*** sehen dasselbe: Ein mit Geschwindigkeit 2 *m/s* in *4 m* Höhe in der Kabine waagerecht geworfener Ball bewegt sich waagerecht gerade aus und kommt nach 1, 2, ... *Sek.* 2, 4, .. *m* weit (das Gitter ist in Einheiten von *1 m*).

Im Bild b) startet die Kabine *beschleunigt* nach oben wenn der Ball waagerecht geworfen wird, und erreicht nach *1 Sek.*, die Stellung *c)* und nach *2 Sek. d)*. Zeichne in *c)* und *d)* die jeweilige Stellung des Balls (also, so wie ***A*** sie sieht).

Zeichne in *e)* die Bahn des Balls, so wie sie ***B*** sieht (nach 0, 1 und 2 Sekunden).


a) In Ruhe
B
A
b) Startet!
c) Nach 1 Sek.
d) Nach 2 Sek.
Was A sieht (also, von draussen)
e) Gesehen von B
(in der Kabine)

Energie-Impuls Relation:

- Für massive Teilchen $E = \sqrt{m_0^2\, c^4 + p^2\, c^2}$. (6)
- Für masselose Teilchen (z.B., Photon) $E = c\,|p|$ (7)

Hier sind: E : Energie, p : Impuls, m_0 : Ruhemasse.
Ein Teilchen kann nur dann als frei existieren, wenn die Energie-Impuls Relation erfüllt ist!

Die gängigen Einheiten in der Elementarteilchenphysik sind:
- für Energie : MeV , für Impuls : MeV/c , für Masse : MeV/c^2 .

Wir haben $m_P \simeq 1\ GeV/c^2$, $m_e \simeq 0{,}5\ MeV/c^2$ und die Energie der Photonen etwa in der Sonnenstrahlung $E_\gamma \sim 0{,}5\ eV$. Siehe Anhang für die Übersetzung in SI .

Die Relation zwischen *Impuls* und *Geschwindigkeit* ist (entsprechend spezieller Relativitätstheorie):

$$p = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\, v = m\, v \quad \text{und dementsprechend} \quad v = c\, \frac{p\, c}{\sqrt{m_0^2\, c^4 + p^2\, c^2}} \qquad (8)$$

Hier hat man eine sog. "relativistische Masse" m eingeführt, um diese Relation ähnlich der üblichen, nichtrelativistischen zu machen. m ist aber keine feste Eigenschaft des Teilchens, weil sie vom dessen Impuls abhängt (z.B., für Photon $m = |p|/c$). Wenn von der Masse eines Teilchens gesprochen wird, wird normalerweise die *Ruhemasse* gemeint, weil diese eine feste Eigenschaft des Teilchens ist und nicht von dessen Situation abhängig.

Für Photonen gilt darüber hinaus $|p| = \frac{h}{c}\, f = \frac{h}{\lambda}$ mit f : Frequenz, λ : Wellenlänge des Lichts.

Einfachheitshalber wählt man häufig die Länge und Masse Einheiten so, dass die Lichtgeschwindigkeit $c = 1$ (also, z.B., $1\ m = \frac{1}{3 \times 10^8}\ Lichtsekunden\ (Ls)$) und auch die Planck Konstante $h = 1$. Dann lautet die Energie-Impuls Relation:

- Für massive Teilchen $E = \sqrt{m_0^2 + p^2}$. (9)
- Für masselose Teilchen (z.B., Photon) $E = |p| = f$. (10)

d.h., mit $c = 1$, messen wir Energie, Impuls und Masse nur in MeV , mit Gl. (9), (10).

Übung 4:

Berechne die Energie E eines Protons ($m_0 = 0{,}938\ GeV/c^2$) mit einem Impuls p von:

$0,\ ;\ 100\ MeV/c\ ;\ 500\ MeV/c\ ;\ 1\ GeV/c\ ;\ 2\ GeV/c\ ;\ 5\ GeV/c\ ;\ 10\ GeV/c$

mit Hilfe von Gl. (6). (Behalte dabei c als Buchstaben, ohne seinen Wert einzusetzen, es wird sich kürzen!) Trage die Resultate in einer Tabelle ein und erstelle den Graph E gegen p . Vergleiche mit der selben Rechnung für ein Photon – verwende Gl. (7).

Berechne die Geschwindigkeit des Protons (in % von c) für jeden dieser Impulse mit Hilfe der 2. Gl. (8) (z.B., für $p = 1\ GeV/c$ findest Du $v = 0{,}72936\ c$, d.h. 72,936 % c).

Übung 5:

Wie viel Energie wird freigesetzt bei der Vernichtung eines Elektron-Positron Paares ($m_0 = 0{,}511\ MeV/c^2$) mit entgegengesetzten Impulsen $1\ MeV/c$, $-1\ MeV/c$?

Wenn 2 Photonen diese Energie aufnehmen sollen, welche Impulse würden sie haben?

Rechenbeispiele:
ein Elektron mit einem Impuls von $p = 700\, KeV/c$ hat eine Energie von

$$E = \sqrt{m_0^2\, c^4 + p^2\, c^2} = \sqrt{(0{,}511\ MeV/c^2)^2\, c^4 + (0{,}7\ MeV/c)^2\, c^2} = 0{,}867\ MeV$$

und eine Geschwindigkeit:

$$v = c\, \frac{(0{,}7\ MeV/c)\ c}{\sqrt{(0{,}511\ MeV/c^2)^2\, c^4 + (0{,}7\ MeV/c)^2\, c^2}} = 0{,}807\ c$$

Bei einem 10 -fachen Impuls $p = 7\, MeV/c$ hat er

$$E = \sqrt{m_0^2\, c^4 + p^2\, c^2} = \sqrt{(0{,}511\ MeV/c^2)^2\, c^4 + (7\ MeV/c)^2\, c^2} = 7{,}02\ MeV$$

$$v = c\, \frac{(7\ MeV/c)\ c}{\sqrt{(0{,}511\ MeV/c^2)^2\, c^4 + (7\ MeV/c)^2\, c^2}} = 0{,}997\ c$$

Bei einem 100 -fachen Impuls $p = 70\, MeV/c$ hat er

$$E = \sqrt{m_0^2\, c^4 + p^2\, c^2} = \sqrt{(0{,}511\ MeV/c^2)^2\, c^4 + (70\ MeV/c)^2\, c^2} = 70{,}002\ MeV$$

$$v = c\, \frac{(70\ MeV/c)\ c}{\sqrt{(0{,}511\ MeV/c^2)^2\, c^4 + (70\ MeV/c)^2\, c^2}} = 0{,}99997\ c$$

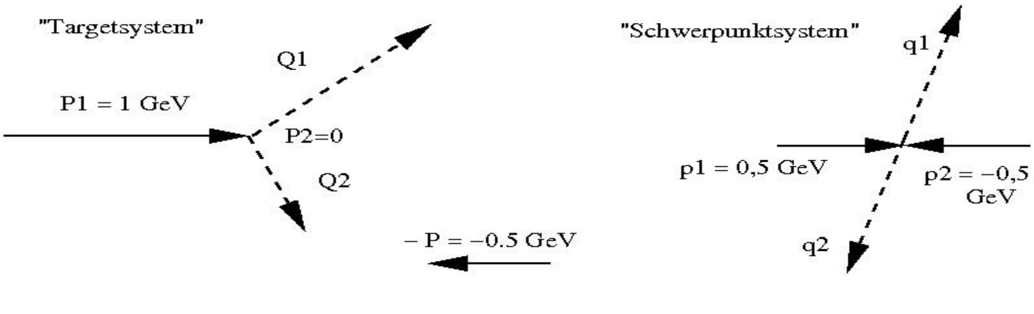
Energie-Impuls-Erhaltung

Bei Prozessen gilt Energie und Impuls Erhaltung. Wir dürfen den Bezugssystem durch einer *Gesamtverschiebung* aller Impulse auswählen. Im folgenden werden wir immer das sog. “Schwerpunktsystem” wählen, in dem der Gesamtimpuls 0 ist (die 2 ankommende Teilchen haben gleiche, entgegengesetzte Impulse) und die Diskussion einfacher.

Rechenbeispiel:
Ein Antiproton von $P_1 = 1\, GeV/c$ annihiliert mit einem ruhenden Proton. Es entsteht ein μ^+, μ^- Paar ($m_\mu = 106\, MeV/c$). Welche Energien und Impulse haben die auslaufende Muonen im *Schwerpunktsystem*?

Erster Schritt: Wir erreichen das Schwerpunktsystem durch Verschiebung aller Impulse mit $P = 0{,}5\, GeV/c$, so dass der Gesaamtimpuls 0 wird (da P, P_1, p_1, p_2 auf *einer* Gerade liegen, können wir P einfach addieren/subtrahieren, für die Q 's müssen wir richtige Verschiebungen der Köpfe der Pfeilen durchführen, wie in der Ebenegeometrie gelernt (hier nur angedeutet).

$$p_1 = P_1 - P = 0{,}5\, GeV/c,\ \ p_2 = 0 - P = -0{,}5\, GeV/c,\ \ p_1 + p_2 = 0$$



Zweiter Schritt: wir verwenden die Energie-Impuls-Relation für jedes Teilchen und die Energie-Impuls-Erhaltung für das Ganze. Im Folgenden sind alle Angaben in GeV.
Die Energie-Impuls-Relation Gl.(6) ergibt für Proton und Antiproton im Schwerpunktsystem

$$E_P = E_{\bar{P}} = \sqrt{0{,}998^2 + 0{,}5^2} = 1{,}116$$

weil die Energie nicht von der Richtung sondern nur vom Betrag des Impulses abhängt, gleich für P und $\bar{P}$. Durch Annihilation wird also eine Gesamtenergie von $2 \times 1{,}116\,GeV$ freigesetzt.

Wir bezeichnen q_1, q_2 die Impulse der Muonen im Schwerpunktsystem. Wegen der Impulserhaltung muss der Gesamtimpuls der Muonen auch 0 sein, das heißt ihre Impulse sind auch entgegengesetzt und gleich im Betrag (auch wenn sie in eine andere Richtung als die Impulse der Protonen zeigen mögen). Ihre Energien sind deshalb auch gleich. Die Energieerhaltung besagt nun:

$$E_{\bar{P}} + E_P = E_{\bar{\mu}} + E_\mu = 2 \times 1{,}116$$

und aus der Energie-Impuls Relation für die Muonen haben wir im Schwerpunktsystem aus Gl.(6):

$$E_\mu = E_{\bar{\mu}} = 1{,}116 = \sqrt{0{,}106^2 + q_\mu^2}$$

Daraus kann man auch die Beträge der Impulse der Muonen im Schwerpunktsystem rechnen:

$$1{,}116 = \sqrt{0{,}106^2 + q_\mu^2} \Rightarrow 0{,}106^2 + q_\mu^2 = 1{,}116^2 \Rightarrow q_\mu^2 = 1{,}116^2 - 0{,}106^2 = 1{,}234 \Rightarrow q_\mu = 1{,}111\,GeV/c$$

Für Photonen muss man Gl.(7) statt (6) für ihre Energie-Impuls-Relation benützen.

Übung 6:

Beim jetzt durchgeführten Experiment am LHC in CERN werden Protonen mit der Energie von jeweils $3{,}5\ TeV = 3500\ GeV$ auf einander gejagt.

a) Welchen Impuls hat ein so beschleunigtes Proton? Verwende Gl. (6). Die Protonen kommen in Paketen von etwa 10^{11} Protonen, und im LHC sollen gleichzeitig etwa 3000 solcher Pakete laufen. Welcher Gesamtimpuls werden alle diese Pakete zusammen haben?

Welche Geschwindigkeit hat es? Verwende Gl. (8).) Welche Masse M sollte ein Körper haben, um bei einer Geschwindigkeit $V = 100\ Km/h$ denselben Impuls zu entwickeln? (Verwende hier diesen Körper die nichtrelativistische Gleichung $p = M\ V$.)

b) Bei diesen Experimenten entstehen beim Stoß der 2 Protonen (mit genau entgegengesetzten Impulsen) viele Teilchen. Welcher Gesamtimpuls, welche Gesamtenergie, Gesamtladung, Gesamtbaryonenzahl und Gesamtleptonenzahl haben die erzeugten Teilchen?

Übung 10:

Ein Elektron-Positron Paar ($m_e = 0{,}511\ MeV/c^2$) mit entgegengesetzten Impulse $p, -p$ annihiliert, mit Erzeugung eines muonen Paares μ^+, μ^- ($m_\mu = 105{,}638\ MeV/c^2$) - Diagramm e). Wie viel muss p mindestens sein, so dass ein reales μ^+, μ^- Paar produziert werden kann? Welche Energie und Impuls hat dann das *virtuelle* Photon, welche Impulse die zwei muonen?

Ladungs-, Baryonenzahl-, Leptonenzahlerhaltung

Übung 7:

Prüfe die Ladungs-, Baryonenzahl- und Leptonenzahlerhaltung auf jeder Stufe des Prozesses im Blasenkammerbild auf Seite 19 an Hand der dort angegebenen Skizze. Was für eine Ladung, Baryonenzahl und Leptonenzahl muss das D^* - Teilchen haben, so dass diese Erhaltungsgesetze erfüllt werden? Ist es ein Hadron oder ein Lepton, ein Baryon oder ein Meson? Beachte, dass auf der 4. und 6. Stufe (linker Zweig) jeweils ein zusätzlicher Proton (aus der Blasenkammer) in Anfangszustand hinzu kommt.

(Siehe auch *Übung 6b.*)

Übung 11:

Untersuche folgende Prozesse in Bezug auf die $\boldsymbol{Q}$, $\boldsymbol{B}$ und $\boldsymbol{L_e}$ *Erhaltungsgesetze*.

Welche Prozesse können allein aufgrund dieser Gesetze nicht stattfinden (sind "verboten")?

a) $p+n \rightarrow e^{+}+e^{+}+\bar{p}+n+n$

b) $p+d \rightarrow n+d+e^{+}+\bar{\nu}_e$

c) $p+e^{-} \rightarrow n+e^{+}+e^{-}+\nu_e$.

Übung 12:

Bei einem $p\ p$ Ereignis ("event") findet man als Resultat ein n und Hinweis auf einem sehr kurzlebigen, schweren Teilchen $\boldsymbol{X}$ das gleich in einem p und einem π - Meson zerfällt.

a) Welche Ladung, Baryonenzahl und Leptonenzahl muss $\boldsymbol{X}$ haben?

Findest Du ein solches Teilchen in der in *Übung 8* erstellten Tabelle? Welcher Quarkinhalt hat es?

b) Welche Ladung hat das π - Meson in diesem Ereignis?

Rechenbeispiele:

Im Prozess $e^{-}+p \rightarrow n+\nu_e$ haben wir:

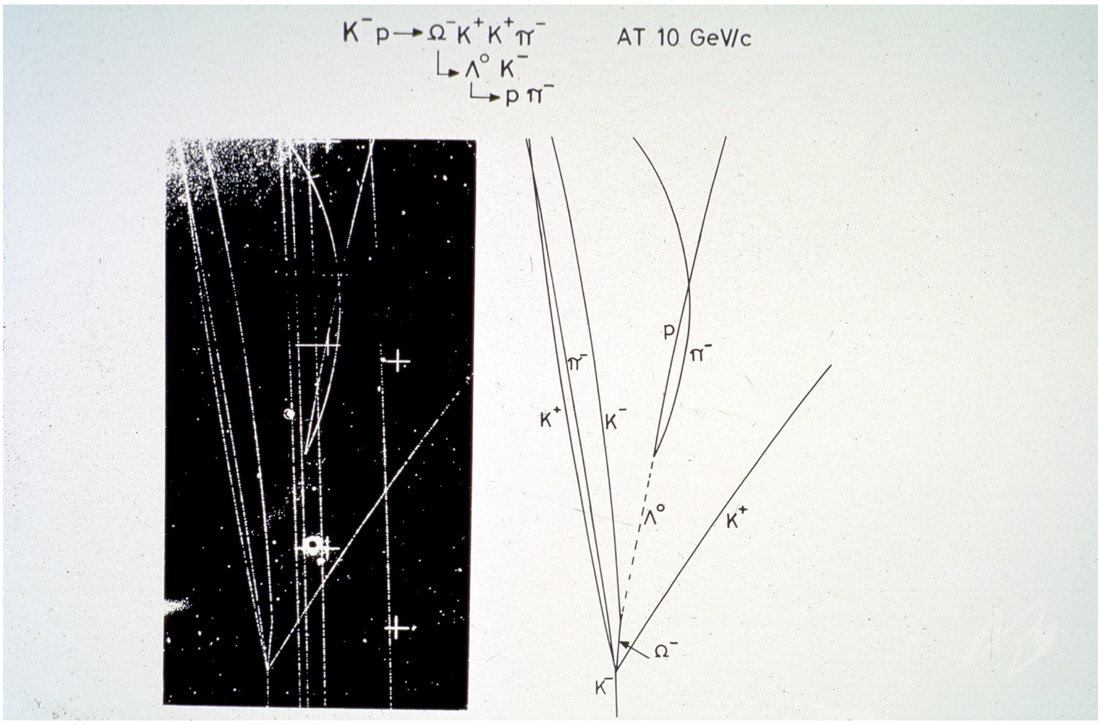
Ladungserhaltung:	$-1+1=0=0+0$,	i.A.	$0=N_p-N_{\bar{p}}$
Baryonenzahl erhaltung:	$0+1=1=1+0$,	i.A.	$1=N_p-N_{\bar{p}}+N_n-N_{\bar{n}}$
Leptonenezaherhaltung:	$1+0=1=0+1$,	i.A.	$1=N_\nu-N_{\bar{\nu}}$

falls mehrere Protonen, Antiprotonen, Neutronen, Antineutronen, Netrinos und Antineutrinos produziert wurden. Die erzeugte Teilchen haben also Gesamtladung null, Gesamtbaryonenzahl 1 und Gesamtleptonenzahl 1 .

In einem Stufenprozess müssen die Erhaltungssätze auf jeder Stufe erfüllt werden. Im Prozess auf der Seite 27/28, sind bekannt: K, π Mesonen ($B=0$) und p Baryon ($B=1$). Angenommen, wir wüssten nicht, was für Teilchen Ω , Λ sind, schreiben wir B_Ω, L_Ω und B_Λ, L_Λ für deren, unbekannten, Baryonen- und Leptonenzahl, und wir haben:

Stufe	Prozess	Q-Erhalt.	B-Erhalt.	L-Erhalt.
1.	$K^- + p \to \Omega^- + K^+ + K^+ + \pi^-$	-1 +1 = 0 = -1 +2 -1	0 + 1 = 1 = B_Ω + 0	0 = L_Ω + 0
2.	$\Omega^- \to \Lambda^0 + K^-$	-1 = 0 -1	B_Ω = B_Λ + 0	L_Ω = L_Λ + 0
3.	$\Lambda^0 \to p + \pi^-$	0 = 1 -1	B_Λ = 1 +0	L_Λ = 0
Gesamt:	$K^- + p \to p + K^- + K^+ + K^+ + \pi^- + \pi^-$	0 = 0	1 = 1	0 = 0

Aus dem B und L Bilanz auf 1. Stufe schließen wir: $B_\Omega=1$, $L_\Omega=0$.
Aus dem Bilanz auf 3. Stufe schließen wir: $B_\Lambda=1$, $L_\Lambda=0$.
Diese Schlussfolgerungen werden durch dem Bilanz auf Stufe 2 bestätigt. Damit schließen wir, dass Ω , Λ Baryonen sind, also Hadronen. Wären die Ladungen von Ω , Λ nicht angegeben, hätten wir sie genau so leicht aus der Q Bilanzen bekommen (nachprüfen!).



Anhang A: physikalische Konstanten und Einheiten

$h = 6{,}6262 \times 10^{-34}\ J \times s = 4{,}1357 \times 10^{-15}\ eV \times s$	(Planck Konstante)
$e = 1{,}60219 \times 10^{-19}\ C$	(Elektron Ladung)
$c = 2{,}997925 \times 10^{8}\ m/s$	(Lichtgeschwindigkeit)
$m_e = 9{,}1096 \times 10^{-28}\ g = 0{,}5110\ MeV/c^2$	(Elektron Masse)
$m_p = 1{,}0072766\ amu = 938{,}25\ MeV/c^2$	(Proton Masse)
$m_n = 1{,}0086652\ amu = 939{,}55\ MeV/c^2$	(Neutron Masse)
$G = 6{,}6732 \times 10^{-11}\ N \times m^2/Kg^2$	(Gravitationskonstante)
$k_B = 1{,}38062 \times 10^{-23}\ J/K$	(Boltzmann Konstante)

$l_P \simeq 1{,}62 \times 10^{-35}\ m\ ,\ \ m_P \simeq 1{,}22 \times 10^{19}\ GeV/c^2 = 2{,}176 \times 10^{-8}\ Kg$ (Planck Länge, Masse)

$1\ amu = 1\ u = 1{,}66053 \times 10^{-24}\ g$

$1\ eV = 1{,}60219 \times 10^{-19}\ J$

$1\ LJ\ (Lichtjahr) \simeq 0{,}947 \times 10^{13}\ Km \qquad 1\ pc\ (parsec) \simeq 3{,}26\ LJ$

$1\ J = 1\ Kg \times m^2/s^2 = 1\ C \times V = 1\ W \times s\ ,\quad 1\ N = 1\ Kg \times m/s^2\ ,\quad 1\ A = 1\ C/s$

(C : *Coulomb*, Ladungseinheit ; V : *Volt*, Spannungseinheit ; A : *Ampère*, Stromstärkeeinheit ; W: *Watt*, Leistungseinheit ; K : *Kelvin*, Temperatureinheit ; eV : *Electronvolt*, Energieeinheit ; J : *Joule*, Energieeinheit ; N : *Newton*, Krafteinheit)

Anhang B: Umgehen mit Zehnerpotenzen

$10^3 = 1000\ ;\ 10^5 \times 10^3 = 10^{5+3} = 10^8\ ;\ 10^5\ x\ 10^{-3} = \frac{10^5}{10^3} = 10^{5-3} = 10^2\ ;\ i.A.\ 10^n \times 10^k = 10^{n+k}$

$(10^3)^2 = 10^{3\times 2} = 10^6\ ;\ (10^3)^{-2} = 10^{-6}\ ;\ i.A.:\ (10^n)^k = 10^{n \times k}$

Auf dem Rechner wird z.B. $1{,}2 \times 10^{23}$ als 1.2e23 dargestellt (*scientific modus*), auf den Ti82 kannst Du eingeben: 1.2 , dann *gelb EE* (also, *shift EE*), dann 23 (erst sci *modus* anwählen).

p	n	µ	m		K	M	G	T
pico	nano	micro	mili		kilo	mega	giga	tera
10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	$1 = 10^0$	10^3	10^6	10^9	10^{12}