Atomdurchmesser: 10^{-10}m Kerndurchmesser: 10^{-14}m Durchmesser Nukleon: 10^{-15}m

Gesamtenergie: $E=\sqrt{m_0^2c^4+p^2c^2}$, LHC: 14×10^{12} eV

Elektrondrift: 1 ms $\sim$ 5 cm, Flugstrecke relativistisches Teilchen: 1 ns $\sim$ 30 cm

relative Stärke Kräfte: Schwerkraft 10^{-41}, schwache WW (Quarks, Leptonen; wirkt auf Flavor): 10^{-4}, EM WW: 1, starke WW (Quarks, Gluonen, wirkt auf Farbladung): 60

Reichweite virtuelles Teilchen: Unschärfe: $\Delta E\Delta t > \frac{\hbar}{2} \Rightarrow \Delta E \Delta t \approx mc^2\Delta t > \frac{\hbar}{2} \Rightarrow$ Reichweite $\approx c\Delta t > \frac{\hbar}{2mc}$
EM WW (Photon): $m=0 \Rightarrow$ Reichweite $=\infty$
schwache WW: $m_W = 80\,\text{GeV}/c_0^2, m_{Z_0}=91\,\text{GeV}/c_0^2 \Rightarrow$ Reichweite = 0.001 fm
starke WW: Gluonen mit Selbst-WW, Reichweite $\sim$ 0.5 fm
Starke Kraft: $m_{Pion}=140\,\text{MeV}/c_0^2 \Rightarrow$ Reichweite $\sim$ 1 fm

Auflösung Objekt mit Radius R mit Impuls p: Unschärfe: $p\cdot R > \frac{\hbar}{2}$, $\Delta p_{max}=2p \Rightarrow \Delta p_{max}\cdot R > \hbar$

$E=\sqrt{m_0^2c^4+p^2c^2}$, $P=\begin{pmatrix} E/c \\ \vec{p}\end{pmatrix}$, $E=E_0+E_{kin}$, $E_0=m_0c^2$, $E=\gamma m_0c^2$, $\vec{p}=\gamma m_0\vec{v}$, $\gamma=\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, $\beta=\frac{v}{c}$

Invariante Masse: $P^2=\frac{E^2}{c^2}-\vec{p}^2=m_0^2c^2$

Schwerpunktsenergie $\sqrt{S}$: nutzbare Energie in der Reaktion; invariant unter Lorentz-Trafo; $S=(P_1+P_2+...)^2$
Stoßprozess: Summe der Viererimpuls bleibt erhalten

Lorentz-Trafo: Koordsyst. Strich bewegt sich mit Geschw. v gegenüber ungestrichenem Koordsyst. in z-Richtung
$P'=\begin{pmatrix} E'/c \\ \vec{p}'\end{pmatrix}$, $P=\begin{pmatrix} E/c \\ \vec{p}\end{pmatrix}$
$p_x'=p_x$, $p_y'=p_y$, $p_z'=\gamma p_z-\beta\gamma\frac{E}{c}$, $\frac{E'}{c}=-\beta\gamma p_z+\gamma\frac{E}{c}$

Strahlfluss: $J=n_a\cdot v_a=\frac{\dot{N}_a}{F}$ mit n_a Teilchendichte, N_a Teilchen im Strahl, F Querschnittsfläche Strahl
Luminosität: $L=J\cdot N_b$ mit N_b Teilchen im Target
Reaktionsrate: $R=L\cdot\sigma_r$, mit σ_r Reaktionsquerschnitt: $\sigma_r=\int\frac{d\sigma}{d\Omega}\,d\Omega$
WK Wechselwirkung Strahlteilchen + Target:
$P=\frac{\sigma_{\text{tot}}N_b}{F}$, $\frac{N_b}{F}=n_bd$ mit Dicke d des Targets und N_b der Anzahl der Teilchen im Target mit Fläche F

Fermis goldene Regel: $\sigma_{i\to f}=\frac{R}{L}=\frac{2\pi}{\hbar v_a}\left|\mathcal{M}_{fi}\right|^2\cdot\rho\left(E_f\right)\cdot V$ mit $V=\frac{N_a}{n_a}$, $\rho\left(E_f\right)=\frac{dn\left(E_f\right)}{dE_f}=\frac{V\cdot 4\pi p'^2}{v'\cdot(2\pi\hbar)^3}$ Dichte der Endzustände, $\mathcal{M}_{fi}=\langle\psi_f|\mathcal{H}_{WW}|\psi_i\rangle$

Kosmische Strahlung: Energien bis zu 10^{21} eV
Primärstrahlung: 85% Protonen, 14% α-Teilchen, 1% schwere Kerne; Supernovae, Sonnenwind
Sekundärstrahlung: Erzeugung von Myonen (> 95%), Protonen, Pionen (Promille-Bereich) $\Rightarrow$ Entdeckung Pion

Elektrostatische Beschleuniger: $E_{kin}=qU$
Tandem van der Graaff: 1-fach negativ geladenes Ion beschleunigen $\Rightarrow$ n+1 e^- strippen $\Rightarrow$ n-fach positives Ion beschleunigen $\Rightarrow$ Gesamtenergie: $E_{kin}=(n+1)\cdot eU$
Beschleunigungsspannung MLL: $\approx$ 14 MV

Fokussierung: gekreuzte Quadrupolmagnete, da ein Magnet nur in eine Richtung fokussiert, aber in die andere defokussiert

Betatron: Nur für e^-. Teilchen werden durch Magnetfeld auf Bahn gehalten. Beschleunigung erfolgt durch zweites zeitlich veränderliches Magnetfeld (Induktion)
$F_L=qvB_H$, $v=\omega r$, $F_z=\frac{mv^2}{r}$
Im GG: $F_L=F_z\Rightarrow p=mv=\gamma m_0v=qB_Hr$
Umlaufdauer: $T=\frac{2\pi r}{v}=\frac{2\pi\gamma m_0}{qB_H}$
Frequenz: $\omega=\frac{2\pi}{T}=\frac{qB}{\gamma m_0}$, Zyklotronfrequenz: $\omega=\frac{eB}{m}$
Beschleunigung: E_B das vom zeitl. veränderl. Magnetfeld B erzeugte elektr. Feld
$U_{ind}=\int E_B\,ds=E_{B,\phi}\cdot 2\pi R_0=-\frac{d}{dt}\int B\,dA=-\dot{\Phi}$
$\frac{d}{dt}p=F=eE_{B,\phi}=\frac{e\dot{\Phi}}{2\pi R_0}=\frac{d}{dt}eB_Hr=eB_H\dot{r}+eB_H\dot{r}=e\dot{B}_HR_0$
$\Rightarrow$ Haltefeld B_H steigt proportional zum Elektronenimpuls an
$R_0^2\dot{B}_H(R_0)=E_{B,\phi}\cdot R_0=\frac{d}{dt}\int_0^{R_0}R\cdot B(R)\,dR=\frac{d}{dt}\bar{B}\cdot\frac{R_0^2}{2}$
$\Rightarrow B_H(r=R_0)=\frac{1}{2}\bar{B}(r=R_0)$
Stabilisierung: F_L muss mit wachsendem R schwächer abfallen als $F_z\Rightarrow B_H\sim R^{-n}$, $0<n<1$, $n=-\frac{R}{B_{H,z}}\frac{dB_{H,z}}{dR}$
Rückstellkraft erzeugt Betatron-Schwingung: $\omega_r=\sqrt{1-n}\,\omega_0$, $\omega_z=\sqrt{n}\,\omega_0$, $\omega_r\neq\omega_z\neq\omega_0$
$E_{max}\approx 20-300$MeV

Zyklotron: nicht für e^-. Maximale Energie $E_{max}=\frac{p_{max}^2}{2m_0}=\frac{q^2r_{max}^2B^2}{2m_0}$
Für relat. Teilchen Frequenz abh. von Geschw.: $\omega=\frac{qB}{\gamma m_0}$
Phasenstabilität: optimaler Punkt vor Maximum des E-Felds $\Rightarrow$ zu späte Teilchen sehen größeres Feld, werden schneller; zu langsame Teilchen sehen kleineres Feld, werden weniger beschleunigt
$E_{max}\approx 1-100\text{MeV}/u$

Synchrotron: Beschleunigung durch E-Feld, Halten auf Kreisbahn durch B-Feld
$B(t)=\frac{p(t)}{qr}$, $\omega_{Umlauf}=\frac{2\pi}{T}=\frac{2\pi v}{S}=\frac{2\pi pc^2}{E_qS}$, mit S Länge der Sollbahn, E_q Energie der Teilchen
Synchrotronstrahlung: Verluste durch Strahlung: $\Delta E_{sync}\sim\frac{E_q^4}{m^4R}\Rightarrow$ für e^- bei gl. Energie um 10^{13} größer als bei Protonen
Fokussierung durch gekreuzte Quadrupolmagnete
Phasenstabilität führt zu Synchrotronfrequenz
$\omega_{Betatron}>>\omega_{Umlauf}>>\omega_{Synchrotron}$, Resonanz bei $\omega_{Betatron}=n\,\omega_{Umlauf}$ verhindern
$E_{max}\approx 100$ MeV $-$ 3.5 TeV

Nachteile Kreisbeschleuniger: Magnete teuer, Defokussierung wegen Magneten, Verluste durch Synchrotronstrahlung

Linearbeschleuniger: Röhren mit Wechselspannung, feldfrei innerhalb der Röhren
Länge n-te Röhre: $l_n=v\frac{T_{HF}}{2}=\frac{\pi v}{\omega_{HF}}=\sqrt{n\frac{2e}{m}U_0}\frac{\pi}{\omega_{HF}}$
relativistischer Grenzfall: Länge konstant
Elektronen Linac: Wanderwelle in Hohlleiter mit $v_{Welle}=v_{Elektron}\Rightarrow$ Runzelröhre
$E_{max}\approx 100$ keV $-$ 50 GeV

Collider, Fixed-Target: Maximale Schwerpunktsenergie bei Kollision im Gegensatz zu fixed Target, $\sqrt{S}=E_1+E_2$; LHC: pp-Colider: 7 TeV + 7 TeV
Bei Fixed-Target müssen erzeugte Teilchen noch durch Targetmaterial propagieren $\Rightarrow$ evtl. Streuung, Absorption
Fixed-Target haben höhere Luminoeitäten da Targetdichte größer
Einfacherer mechanischer Aufbau bei Fixed-Target $\Rightarrow$ günstiger

Bethe-Bloch-Formel:
$-\frac{dE}{dx}=4\pi N_0\frac{Z}{A}\frac{z^2e^4}{m_ev^2}\left[\ln\left(\frac{2m_ev^2}{I}\right)-\ln\left(1-\beta^2\right)-\beta^2-\frac{c_K}{Z}\right]$
mit z Ladung einfallendes Teilchen, Z Ladung des Kerns, $\frac{N_0}{A}$ Zahl der Kerne/Einheitsvolumen, I effekt. Ionisationspotential, c_K Korrekturfaktor für Bindung in K-Schale
Unabh. von Masse Teilchen, bei $\beta\gamma$ klein $\sim\frac{1}{\beta^2}$, bei großen Energien $\sim\ln\beta^2\gamma^2$, Minimum bei $\beta\gamma\approx 3$
Abschirmungseffekte bei großer Energie: Polarisierung der Atome entlang des Wegs des Teilchens, wichtiger bei dichten Materialien $\Rightarrow\delta$
Anstieg erklärt sich dadurch, dass Feldlinien enger werden.

Annahme, dass e^- in Ruhe in Bezug auf einfallendes Teilchen ist gilt bei kleiner Energie nicht mehr $\Rightarrow c_K$
Teilchen dereren mittlerer Energieverlust beim Minimum liegt heißen "Minimum Ionizing Particles" (MIP)

Schwankung Energieverlust: Gauß-verteilt
$P(\Delta E)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{1}{2}\left(\lambda+e^{-\lambda}\right)}$, $\lambda=\frac{\Delta E-\Delta E_{mp}}{\xi}$, ξ ist materialabh. Konstante, ΔE_{mp} der wahrscheinlichste Wert für ΔE

Energieverlust e^-+e^+: Bethe-Bloch-Korrektur um Rückstoß und Spinabh.; zusätzlich: Bremsstrahlung
$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{tot}=\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{coll}+\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}$, $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}\sim\frac{Z^2}{A}\frac{e^4}{m^2}E_0$
Kritische Energie: $\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{coll}=\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{rad}$

Vielfachstreuung: $P(\vartheta)d\vartheta=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\vartheta}e^{-\frac{\vartheta^2}{2\vartheta_0^2}}d\vartheta$ mit ϑ_0 Breite der Gaußverteilung

Ionisationsnachweis: Geiger-Müller-Zählrohr
E-Feld des Drahts: $E(r)=\frac{E_0}{r\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$ mit r_2 Radius Zählrohr, r_1 Radius Draht
Es werden nicht die e^- gemessen, die auf den Draht kommen, sondern die langsame Induktion durch die Ionen, die sich der Röhre bewegen

Cherenkov-Strahlung: Tritt auf wenn Teilchen in Materie schneller sind als Lichtgeschwindigkeit in Medium
Licht wird unter Winkel $\vartheta=\arccos\frac{1}{n\beta}$ abgestrahlt $\Rightarrow$ Winkel messen $\Rightarrow\beta$, p messen $\Rightarrow m$ ist bestimmt

Szintillator: Ionisierendes Teilchen regt Material an $\Rightarrow$ Abregung durch Emission $\Rightarrow$ Photomultiplier
anorganisch: Abklingzeit $\sim$ ms, organisch: Abklingzeit $\sim$ ns
Wichtige Eigenschaften: hohe Umwandlungseffizienz der Energie in Licht, Emission in richtiger Wellenlänge, hohe Zählraten. Bsp.: *NaI*, *BGO*, Plastik

WW von Photonen mit Materie:
kleine Energien $E_\gamma\geq E_{Bindung}\Rightarrow$ Photoeffekt, $\sigma_{ph}\sim\frac{Z^{4-5}}{E}$
mittlere Energien $E_{Bindung}\ll E_\gamma\leq 2m_ec^2\Rightarrow$ Comptonsteuung, $\sigma_C\sim Z(1-\varepsilon)$ für $\varepsilon\ll 1$, $\sigma_C\sim Z\frac{1+2\ln(2\varepsilon)}{\varepsilon}$ für $\varepsilon\gg 1$ mit $\varepsilon=\frac{E_\gamma}{m_ec^2}$
$\Delta\lambda=\lambda_C\left(1-\cos\varphi\right)$, $E_\gamma'=\frac{E_\gamma}{1+\frac{E_\gamma}{m_ec^2}(1-\cos\varphi)}$
$E_e'=E_\gamma-E_\gamma'$
Scharfe Kante bei maximaler Energie $E_\gamma'=E_\gamma$ hohe Energien $E_\gamma>2m_ec^2$ $\Rightarrow$ Paarbildung, $\sigma_P\sim Z^2$

Detektorarten: Ortsmessung: GEM, Vieldrahtproportionalkammer, Driftkammer, Silizium-Mikrostreifen / -Pixeldetektoren
Geschwindkeitsmessung: Flugzeitdetektor, Cherenkovdetektor
Energiemessung: Kalorimeter, Halbleiterdetektor (z.B. *Ge*)

Elastische Streuung: Bornsche Näherung: einfallendes und ausfallendes Teilchen sind ebene Wellen
$\Psi_i=\frac{1}{\sqrt{V}}e^{i\mathbf{px}/\hbar}$, $\Psi_f=\frac{1}{\sqrt{V}}e^{i\mathbf{p'x}/\hbar}$
$\frac{d\sigma}{d\Omega}=\frac{p'^2V^2}{v_av'4\pi^2\hbar^4}\left|\mathcal{M}_{fi}\right|^2$
Yukawa-Potential: $U(r)=\frac{g_0}{r}e^{-r/R}$, mit $R=\frac{\hbar c}{mc^2}$ für Austauschteilchen der Masse m
$\Rightarrow\frac{d\sigma}{d\Omega}=\frac{4p'^2}{v_av'}\left(\frac{g_0g}{\vec{q}^2+m^2c^2}\right)^2$ mit $\vec{q}=\vec{p}-\vec{p}'$ und Faktor g für jeden Vertex (bei Coulomb: $g=\sqrt{\alpha}\,\sqrt{\alpha}$)
$\mathcal{M}_{fi}=-\frac{e\hbar^2}{V|\vec{q}|^2}\int\rho\left(\vec{x}\right)e^{i\mathbf{qx}/\hbar}\,d^3x$
$\mathcal{M}_{fi}=-\frac{Ze^2\hbar^2}{V|\vec{q}|^2}\int f\left(\vec{x}\right)e^{i\mathbf{qx}/\hbar}\,d^3x$ mit $\rho\left(\vec{x}\right)=Z\cdot e\cdot f\left(\vec{x}\right)$
Formfaktor: $F\left(|\vec{q}|\right)=\int f\left(\vec{x}\right)e^{i\mathbf{qx}/\hbar}\,d^3x$

Rutherford-Streuung: Streuung an punktförmigem Atomkern $\Rightarrow$ $\mathcal{M}_{fi}=-\frac{Z\alpha}{V|\vec{q}|^2}$
Kernrückstoß vernachlässigt $\Rightarrow$ kein Energieübertrag $E=E'$; kein Spin; $p'=p$, $v'=v$
$|\vec{q}|=2|\vec{p}|\sin\frac{\vartheta}{2}\Rightarrow\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Ruth}}=\frac{Z^2\alpha^2}{4v^2|\vec{p}|^2\sin^4\frac{\vartheta}{2}}$

Mott-Steuung: Betrachtung des Spins gehorcht Helizitätserhaltung bei $\beta\to 1$ (unterdrückt Rückwärtsstreuung)
$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^*_{\text{Mott}}=\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Ruth}}\left(1-\beta^2\sin^2\frac{\vartheta}{2}\right)$
* bedeutet Rückstoß des Kerns vernachlässigbar

Streuung an Ladungsverteilung:
$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Ladungsverteilung}}=\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Ruth}}\left|F\left(|\vec{q}|^2\right)\right|^2$
Betragsquadrat des Formfaktors gibt Abweichung des Wirkungsquerschnitts von dem einer punktförmigen Ladungsverteilung an

Kernradius: keine exakte Größe: abh. von Wechselwirkung, abh. von Experiment

Formfaktor vom Kern: Formfaktor als Fouriertransformierte nur näherungsweise korrekt, da Rückstoß vernachlässigt wurde. Eigentlich gilt $E'\neq E$.
Je ausgedehnter Ladungsverteilung, desto stärker fällt $F(q^2)$ mit q^2 ab. Je kleiner Objekt, desto langsamer fällt $F(q^2)$ mit q^2 ab (Punktladung: $F(q^2)=1$).
Betrachtung Kern als Kugel:
$F\left(|\vec{q}|\right)=\frac{3}{\alpha^3}\left(\sin\alpha-\alpha\cos\alpha\right)$ mit $\alpha=\frac{q\cdot R}{\hbar}$
Erstes Minimum bei $\frac{q\cdot R}{\hbar}\approx 4.5\Rightarrow R=\frac{4.5\hbar}{q_{1.Min}}$

Elektronenstreuung: Streuung an Teilchen ohne Spin $\Rightarrow$ Mott-Wirkungsquerschnitt da e^- punktförmig mit Spin für $q\to 0$ (wegen der räumlichen Ausdehnung des Kerns)
Annahme Teilchen in Ruhe, $P'^2=P^2$ und $p'^2=p^2\Rightarrow p\cdot P=p'\cdot P'=p'\cdot(p+P-p')$
m_e vernachlässigbar, $E\approx|\vec{p}|\,c$
$\Rightarrow E'=\frac{E}{1+E/Mc^2\cdot(1-\cos\theta)}$, mit E' Energie gestr. e^-, M Masse Teilchen, E Energie e^- vor Streuung
Je größer $\frac{E}{Mc^2}$, desto mehr Rückstoß wird auf Target übertragen

Kernradius/Formfaktor: Entwickle $F(q^2)$ für $\frac{qR}{\hbar}\ll 1$
$F(q^2)=\iint r^2f(r)\left(1-\frac{1}{2}\left(\frac{qr}{\hbar}\right)^2\cos^2\vartheta+...\right)dr\,d\Omega$
Mittlerer quadratischer Radius: $\langle r^2\rangle=4\pi\int_0^\infty r^4f(r)\,dr$
$\langle r^2\rangle=-6\hbar^2\left.\frac{dF(q^2)}{dq^2}\right|_{q=0}$

Massenspektrometer: Kombination von E- und B-Feld
$\vec{F}_B=ze\vec{v}\times\vec{B}$, $\vec{F}_E=ze\vec{E}$
Für zylindrisches E-Feld: $E=\frac{Mv^2}{r_E}\Rightarrow\frac{M}{ze}=\frac{B^2r_B^2}{Er_E}$

Kern Daten: Bindungsenergie/Nukleon $\approx$ 8 MeV
Radius: $R=1.21\,\text{fm}\cdot A^{1/3}$
Bindungsenergie: $B=c^2\left(Z(m_p+m_e)+n\cdot m_n-M(A,Z)\right)$
Massenformel: $M\left(A,Z\right)=Z\left(m_p+m_e\right)+\left(A-Z\right)m_n-\left[a_VA-a_SA^{2/3}-a_C\frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}-a_A\frac{(Z-A/2)^2}{A}+\frac{\delta}{A^{1/2}}\right]$
Volumenterm: $\sim V\sim R^3\sim A$, kurzreichweitige Kernkraft, WW in etwa nur mit nächstem Nachbarn
Oberflächenterm: $\sim R^2\sim A^{2/3}$, Nukleonen an Oberfläche haben weniger Nachbarn
Coulomb-Term: $E_{Coul}\sim\frac{Z^2}{R}\sim\frac{Z^2}{A^{1/3}}$

Asymmetrieterm: Bei kleinen Massenzahlen sind Kerne mit gleicher Neutronen- und Protonenzahl bevorzugt. Bei schweren Kernen mehr Neutronen wegen Coulomb
Paarungsterm: Gerade Anzahl von Protonen und/oder Neutronen erhöht Stabilität des Kerns

Massenformel (Bethe-Weizsäcker): Alternative Schreibweise

$$\begin{aligned}
M(A,Z) &= \alpha\cdot A-\beta\cdot Z+\gamma\cdot Z^2+\frac{\delta}{A^{1/2}},\\
Z_0 &= \beta/(2\gamma)\\
\alpha &= M_n-a_V+a_SA^{-1/3}+a_a/n\\
\beta &= a_a+(M_n-M_p+m_e)\\
\gamma &= a_a/A+a_C/A^{1/3}\\
\delta &= \begin{cases}\pm 11.2MeV/c^2(+\text{Z und N gerade},\\ -\text{Z und N ungerade}\\ 0\text{A ungerade}\end{cases}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_v &: Volumenanteil\\
a_C &: Coulomb-Abstossung\\
a_S &: Oberfl.anteil\\
a_a &: Symmetrieanteil\\
\delta &: \text{Paarungsanteil (Kerne mit geraden p und n-Zahlen sind stabiler als ungerade Anteile}\\
a_C &\sim \alpha, a_c=\kappa\alpha
\end{aligned}$$

Nuklide: Isobare: gleiche Massenzahl A, Isotope: gleiches Element, gleiches Z, Isotone: gleiche Neutronenzahl N, Isomere: metastabile Zustände (Anregungen) mit gleichem Z und N

Elastische Streuung Nukleon: $Q^2=-q^2$
$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Punkt, Spin}}=\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}}\left[1+2\tau\tan^2\frac{\vartheta}{2}\right]$$
$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)=\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_M\left[\frac{G_E^2(Q^2)+\tau G_M^2(Q^2)}{1+\tau}+2\tau G_M^2(Q^2)\tan^2\frac{\vartheta}{2}\right]$
Elektrischer Formfaktor: $G_E=F_1^2-\frac{\kappa^2Q^2}{4M^2}F_2^2$
Magnetischer Formfaktor: $G_M=F_1+\kappa F_2$
$\tau=\frac{Q^2}{4M^2c^2}$, $F_{1,2}$ Dirac-Formfaktoren, $\kappa=\frac{g-2}{2}$
$Q\to 0$: Proton: $G_E=1$, $G_M=2.79$; Neutron: $G_M=-1.91$, $G_E(Q^2)=0$
$G_E^p(Q^2)\approx G^{Dipol}(Q^2)=\left(1+\frac{Q^2}{0.71(GeV/c)^2}\right)^{-2}$

Nukleonradius: $\langle r^2\rangle=-6\hbar^2\left.\frac{dG^{Dip}}{dQ^2}\right|_{Q=0}\approx 0.66fm^2$

Quasielastische Streuung: Bei Streuung an Nukleonen ($\vec{P}$, $\vec{P}'$, M) muss die Bindungsenergie des Nukleons auch betrachtet werden
$\nu=E-E'=E_N'-E_N=(Mc^2+\frac{\vec{P}'^2}{2M})-(Mc^2+\frac{\vec{P}^2}{2M}-S)=\frac{(\vec{P}+\vec{q})^2}{2M}-\frac{\vec{P}^2}{2M}+S=\frac{\vec{q}^2}{2M}+S+\frac{2|\vec{q}||\vec{P}|\cos\alpha}{2M}$
$\Rightarrow\nu$ verteilt sich um Mittelwert $\nu_0=\frac{\vec{q}^2}{2M}+S$
Breite der Verteilung: $\sigma_\nu=\frac{|\vec{q}|}{M}\sqrt{\frac{1}{3}\langle\vec{p}^2_{Fermi}\rangle}$

Inelastische Streuung: Anregung des Targets
Resonanzen: Lebensdauer $\Delta t=\frac{\hbar}{\Delta E}\sim 10^{-24}s$
Zerfall $\Delta^+\to p+\pi^0$ / $\Delta^+\to n+\pi^+$
Invariante Masse der Resonanz W: $W^2c^2=P'^2=(P+q)^2=M^2c^2+2Pq+q^2=M^2c^2+2M\nu-Q^2$ mit $\nu=\frac{Pq}{M}$ (lorentz-invariant)
Bjorken Variable: $x=\frac{Q^2}{2Pq}=\frac{Q^2}{2M\nu}$;
$x=1$: elastische Streuung; $0<x<1$: inelastische Streuung
Wirkungsquerschnitt:
$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE'}=\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)^*_{\text{Mott}}\left[W_2(Q^2,\nu)+2W_1(Q^2,\nu)\tan^2\frac{\vartheta}{2}\right]$
$F_1(x,Q^2)=Mc^2W_1(Q^2,\nu)$, $F_2(x,Q^2)=\nu W_2(Q^2,\nu)$
Callan-Gross Beziehung: $y=\frac{Pq}{Pp}=1-\frac{E'}{E}$
$\frac{d^2\sigma}{dQ^2dx}=\frac{4\pi\alpha^2\hbar^2}{Q^4}\left[\left(\frac{1-y}{x}-\frac{My}{2E}\right)F_2(x,Q^2)+y^2F_1(x,Q^2)\right]$
Messung ergibt $F_2(x,Q^2)$ unabh. von $Q\Rightarrow$ punktförmige Substruktur der Nukleonen
Es gilt $2xF_1(x)=F_2(x)\Rightarrow$ punktförmige Konstituenten haben Spin 1/2

Partonmodell: Nukleon besteht aus Partonen, Ruhemassen vernachlässigbar, Transversalimpulse vernachlässigbar, keine WW zwischen Partonen
Elastische Streuung an einzelnem Parton mit Anteil ξ des Protonimpulses: $p=\xi\cdot P$
Nach Streuung: $p'=p+q$
$\Rightarrow p'^2=(p+q)^2=p^2+2pq+q^2=p^2+2\xi Pq-Q^2$
$\Rightarrow$ bei elast. Streuung $p'=p\Rightarrow\xi=x$
Photon überträgt keine Energie ($q=(0,\vec{q})$) $\Rightarrow x=\frac{|\vec{p}|}{|\vec{P}|}$
$\frac{d^2\sigma}{dQ^2d\nu}=\left(\frac{d\sigma}{dQ^2}\right)^*_{\text{Mott}}\frac{F_2(x)}{\nu}\left[1+2\tau\tan^2\frac{\vartheta}{2}\right]$
Valenzquarks: bestimmen Quantenzahlen; See-Quarks: virtuelle $q\bar{q}$-Paare von Gluonen erzeugt

Strukturfunktion Partonen:
$F_2(x)=x\cdot\sum_{i=u,d,s}z_i^2(q_i(x)+\bar{q}_i(x))$; z_i Quarkladung
$q(x)=q_v(x)+q_s(x)$ für u, d; $q(x)=q_s(x)$ für s
Aus Symmetrie folgt: $S(x)=s_s(x)=\bar{s_s}(x)\approx u_s(x)=\bar{u_s}(x)=d_s(x)=\bar{d_s}(x)$ und
$u(x)=u_v(x)+u_s(x)$, $d(x)=d_v(x)+d_s(x)$
$\Rightarrow\frac{1}{x}F_2^p=\frac{1}{9}(4u_v+d_v)+\frac{4}{3}S$
$\Rightarrow\frac{1}{x}F_2^n=\frac{1}{9}(u_v+4d_v)+\frac{4}{3}S$
Da $\frac{F_2^n}{F_2^p}\to 1$ für $x\to 0$ dominiert $S(x)$ für $x\to 0$
Da $\frac{F_2^n}{F_2^p}\to\frac{1}{4}$ für $x\to 1\Rightarrow$ Valenzquarks dominieren
Alle Quarks zusammen tragen nur 54% des Gesamtimpulses, den Rest machen die Gluonen aus

Quarkmasse: u: 4 MeV, d: 8 MeV, s: 150 MeV, c: 1.1 GeV, b: 4.2 GeV, t: 175 GeV

Starke WW: Gesamtflavor ist Erhaltungsgröße
$V(r)=-\frac{4}{3}\frac{\alpha_s}{r}+kr$ mit $\alpha_s\to 0$ für $r\to 0$
Potential groß bei großen Abständen $\Rightarrow$ Confinement

Farbladung: Vergleich der Erzeugung von $q\bar{q}$ mit Bhabha-Streuung von e^++e^-
$R=\frac{\sigma\left(e^+e^-\to q\bar{q}\right)}{\sigma\left(e^+e^-\to\mu\mu^*\right)}=\sum_1^N\frac{\sum_{flavor}z_q^2\sigma^{\mu^+\mu^-}}{\sigma^{\mu^+\mu^-}}=\sum_{fl}\left(\frac{4}{9}+\frac{1}{9}+\frac{1}{9}\right)=\sum_{fl}\frac{2}{3}$
für die Quarks u, d, s. Man stellt stufenförmige Funktion fest. Bei gewisser Energie können weitere Quarks erzeugt werden $\Rightarrow$ weitere Terme in Summe über flavors. Durch Vgl mit Messung ergibt sich, dass es $N=3$ Farben gibt.

Hadronisierung: Zwei Quarks mit Relativimpuls $p>2m_qc$ können unter Abgabe von Energie Quarkpaare $q\bar{q}$ aus dem Vakuum erzeugen. Wird nur ein Teil der Energie verwedet $\Rightarrow$ Jet-Produktion

Symmetrie: Noether-Theorem: Aus einer Invarianz der Bewegungsgleichung folgt Erhaltungsgröße
Translationsinvarianz $\Rightarrow$ Impulserhaltung
Zeitliche Translationsinvarianz $\Rightarrow$ Energieerhaltung
Rotation im Raum $\Rightarrow$ Drehimpulserhaltung
Spiegelung: $\vec{x}\to-\vec{x}\Rightarrow$ Paritätserhaltung
Parität in Kugelkoordinaten: $\vartheta\to\pi-\vartheta$, $\varphi\to\pi+\varphi$
$\Rightarrow P_{Bahn}=(-1)^l$, mit l Drehimpulsquantenzahl
Parität: $\vec{r}\to-\vec{r}\Rightarrow\vec{p}\to-\vec{p},\vec{E}\to-\vec{E},\vec{A}\to-\vec{A}$
$\vec{L},\vec{\sigma},\vec{B}$ invariant
Polare Vektoren haben EW -1, axiale Vekt. EW $+1$
Zeitumkehr: $t\to-t\Rightarrow\vec{p}\to-\vec{p},\vec{L}\to-\vec{L},\vec{\sigma}\to-\vec{\sigma},\Psi(\vec{x},t)=e^{i(\mathbf{px}-Et)}\to\Psi^*$
Ladungskonjugation: $c\,|q\rangle=|\bar{q}\rangle$, $c\,|\bar{q}\rangle=|q\rangle$
Nur Teilchen mit Ladung $q=0$ können Eigenzustände sein
$c\,|\gamma\rangle=-|\gamma\rangle$ da $c\vec{E}=-\vec{E}$ und $c\vec{B}=-\vec{B}$
G-Parität: Ladungskonjugation + Rotation im Isospin-Raum
$G=(-1)^{L+S+I}$
CPT-Theorem: Physik ist invariant unter Anwendung von CPT (Austausch

Teilchen $\rightarrow$ Antiteilchen $\Rightarrow$ Inversion des Orts $\Rightarrow$ Inversion der Zeit)

Eigenschaften Hadronen: Nach außen farbneutral (R+B+G = Weiß)
Wellenfunktion: $\Psi = \varphi_{color}\Psi_{flav}\phi_{Spin}\Psi_{Ort}$ gehorcht Bose Symm. für Mesonen ($q\bar{q}$) und Fermi Symm. für Baryonen (qqq)

Baryonen: Gesamtwellenfkt antisymm. unter Vertauschung 2 Teilchen
Farbwellenfunktion ist antisymmetrisch, Ort+Spin+Flavour symmetrisch
z.B.: $S = \frac{3}{2} \Rightarrow |\uparrow\uparrow\uparrow\rangle$ und $L = 0 \Rightarrow$ Spin und Ort unter Vertausch symmetrisch $\Rightarrow$ Flavour symmetrisch; Existenz von $|\Delta^{++}\rangle = |uuu\rangle$ ist Hinweis auf Farbladung wegen Pauli-Verbot

Isospin: $I_z = \frac{1}{2}\left((n_u - n_{\bar{u}}) - (n_d - n_{\bar{d}})\right)$

Strangeness: s-Quark hat Quantenzahl $S = -1$
$Y = B + S =$ Baryonenzahl + Strangeness

Quarks: Übersicht

Checkliste: Ladung, Impuls, Masse, Spin, Baryonenzahl, Leptonenzahl, Leptonenfamilienzahl, ...

Reaktion	?	WW/verletzte Erhaltungsgröße
$e^+ + e \rightarrow \gamma$	x	Impuls/4-Imp./En.+Imp.
$e^+ + e \rightarrow \gamma + \gamma$	$\surd$	em. WW / em.+schwach
$e^+ + e \rightarrow e^+ + e + \gamma$	$\surd$	em. WW / em.+schwach
$\overline{\nu}_\mu + \tau \rightarrow \mu + \overline{\nu}_\tau$	x	Leptonfamilienzahl
$K \rightarrow \pi+\pi+\pi+\pi^+ + \pi^+$	x	Energieerhaltung/Masse
$Z^0 \rightarrow \mu_\tau \overline{\nu}_\tau$	$\surd$	schwache WW
$\pi + Pb \rightarrow Pb + \pi + \gamma$	$\surd$	em./em.+stark/em.+schw.
$\pi^+ + \pi \rightarrow n + \pi^0$	x	Baryonenzahl/L/"Spin"
$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$	$\surd$	schwache WW/schwach+stark
$\overline{p} + n \rightarrow \pi + \pi^+ + \pi$	$\surd$	starke WW
$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$	x	Leptonfamilienzahl
$n \rightarrow \pi^+ \pi^-$	x	Baryonenzahl
$\rho(770) \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$\surd$	starke WW
$K^0 \rightarrow \pi^- + \pi^+$	$\surd$	schwach (+stark)
$K^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+$	x	ΔS=2
$H^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- + \mu^+ \mu^-$	$\surd$	schwache WW
...	...	...
...	...	...
...	...	...
...	...	...
...	...	...