

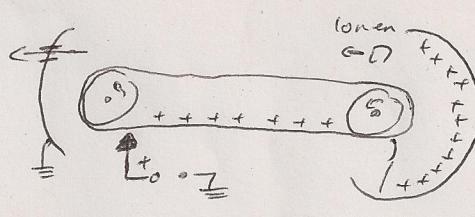
$$\text{Lorentz-Kraft: } F_L = q(\vec{E} + \vec{v}_x \vec{B})$$

$$\hookrightarrow \text{Energiezufuhr durch Beschleunigung: } \Delta E = \int_{S_0}^{S_1} \vec{F}_L d\vec{s} = q \int_{S_0}^{S_1} \vec{E} d\vec{s} = q \cdot U \text{ (Spannung)}$$

Elektrostatische Beschleuniger

Bandgenerator:

\hookrightarrow Isolieren des Band wird aufgeladen



Grasbehälter:

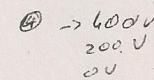
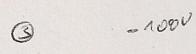
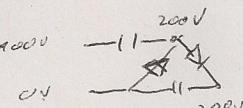
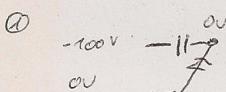
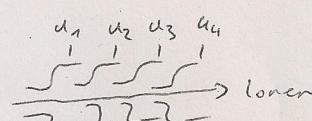
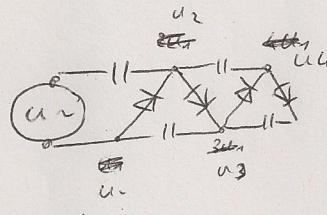
Verhindert Durchschlag

\hookrightarrow Bürste überträgt Ladung auf Kugel ("abstreifen")

$$C \cdot U = Q \quad I = C \frac{dU}{dt}$$

Crook's-Welle:

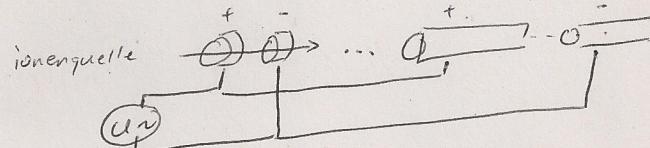
\hookrightarrow Hochspannungsbeschleunigung



HF-Beschleuniger

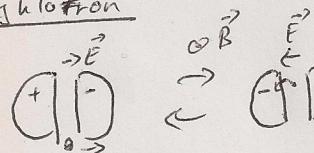
Wideröre-Röhre (Linac)

\hookrightarrow Wiederwendwendung von U~



\hookrightarrow Teilchen muss zum richtigen Zeitpunkt zwischen den Zylindern sein $\Rightarrow \vec{E}$ -Feld

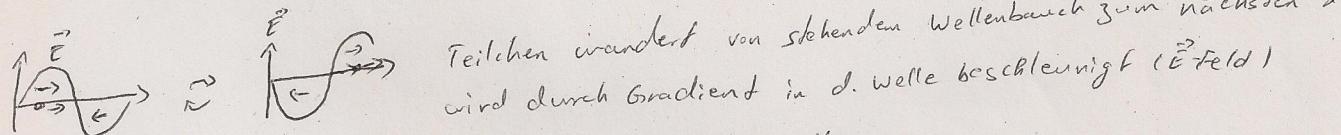
Zyklotron



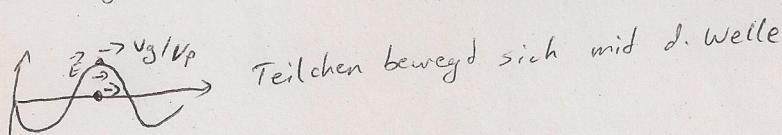
\rightarrow Teilchen durchläuft immer größer werdende Kreisbahnen $(\vec{F}_L \text{ im } \vec{B}-\text{Feld})$
 \rightarrow HF-Spannungsquelle beschleunigt im richtigen Moment

$$\text{Zyklotronfrequenz: } \omega = \frac{qB}{4\pi m} \quad \text{Radius: } R = \frac{P}{qB} = \frac{\beta \gamma m c}{qB}$$

cavity: Beschleunigung durch stehende Welle \rightarrow longitudinale Fokusierung



Bei Lichtgeschwindigkeit: Beschleunigung durch Wanderwelle



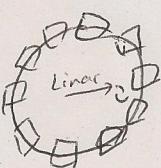
Synchrotron

Ablenkung: Dipol

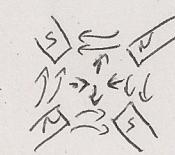
Radius konstant $\rightarrow \vec{B}$ -Feld variabel

Fokusierung: Quadrupol

Dipol: Lorentz-Kraft



Beschleunigung: cavity



Injektor: Linac

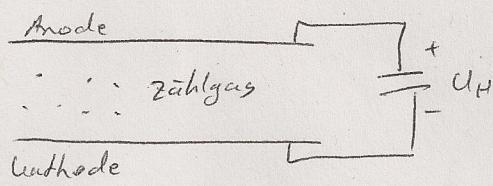
Fokusierung in 1 Richtung

\hookrightarrow 2x um 90° gedreht

(Rechte-Hand-Regel)

Gasgefüllte Detektoren

Detektor - Techniken



Ionisierung d. Zählgases \Rightarrow Elektronenendrift
durch Sekundärelektronen
+ Ionendrift

- für γ -Strahlung

U_H niedrig \Rightarrow Proportionalkammer

Zahl d. Elektronen-Ionen-Paare \sim Energie Primärionisation

U_H hoch \Rightarrow Geiger-Müller-Zählrohr, viele Elektronen

MWPC Vierdraht - Proportionskammer

- viele parallele Drähte
- 1D - Ortsinformation durch Signal am Draht } Messung der Ortskoordinate
beim Teilchendurchgang

Driftkammer:

Weiter entfernte Anode erhält Signal später

\hookrightarrow aus Driftzeit d. Elektronen im Gas lässt sich Ort genau bestimmen.

TPC : Time - Projection - Chamber

Homogenes E^- -Feld: e^- wandern zu "Endplatte"

\hookrightarrow 3D - Auflösung

\hookrightarrow aus Driftzeit: Zeitauflösung

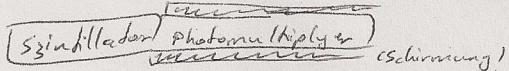
Halbleiderdetektoren: Halbleiterdiode in Sperrrichtung

\hookrightarrow große Verarmungszone: elektrisch neutral

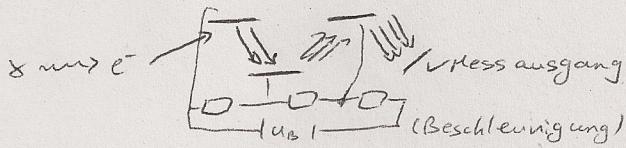
\hookrightarrow Drift von e^- und Rekombination \rightarrow messbarer Stromimpuls

Szintillatoren:

ionisierende Strahlung \rightarrow Anregung vom Szintillatormaterial \rightarrow Lichtemission



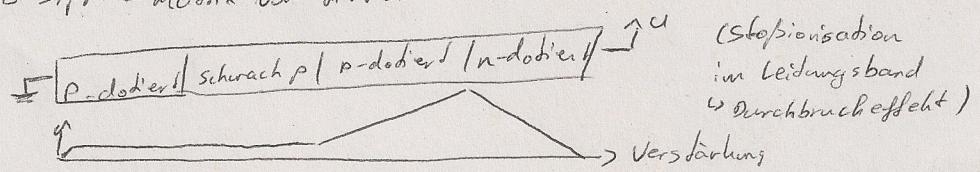
Photomultiplier / Photolektronenvervielfacher \rightarrow Photokathode



viele Sekundärelektronen durch E^- -Feld

Halbleider-Photodioden: (z.B. Si:PH = Matrix von APDs)

Avalanche Photodiode $\hat{=}$ „APD“



Halbleiter

e^- können nur diskrete Energieniveaus im Atom annehmen

↳ Mehrere Atome: Niveaus überlappen sich & erzeugen Bänder

Valenzband: e^- mit d. höchsten Energie, die noch am Atom gebunden sind

Leitungsband: e^- können zw. den Elektronen springen & sind frei

(Bandlücke dazwischen)

• Leiter: VB und LB überlappen, LR ist teilweise gefüllt

• Halbleiter: LB und VB von kleiner Bandlücke getrennt, Bei Raumtemperatur: e^- springen

• Isolator: große Bandlücke zw. LB und VB

Fermi-Energie: Höchste bei $T=0$ besetzte Energie, darunter alles besetzt!

↳ Metalle: EF liegt innerhalb eines Bandes, es gibt immer freie e^-

↳ Halbleiter / Isolatoren: EF liegt in d. Bandlücke

Dotierung: n → Dotierung: e^- Überschuss, EF wird angehoben

↳ Zusätzliches e^- ist schwach gebunden

p → Dotierung: e^- -Mangel, EF wird abgesenkt

↳ Loch im Valenzband

P-N-Ubergang:

Durchlassrichtung: Lücke wird kleiner



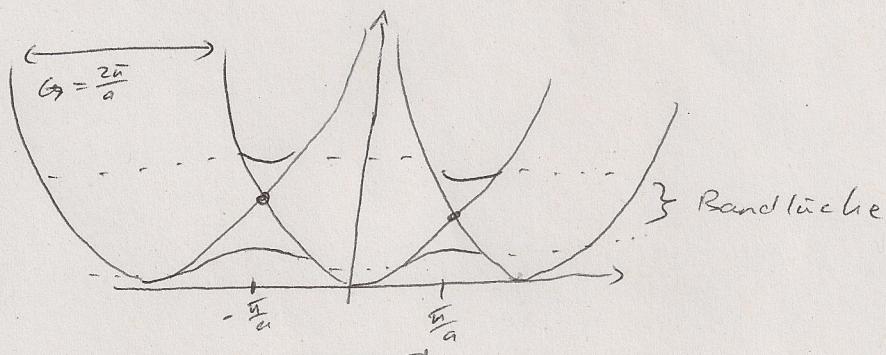
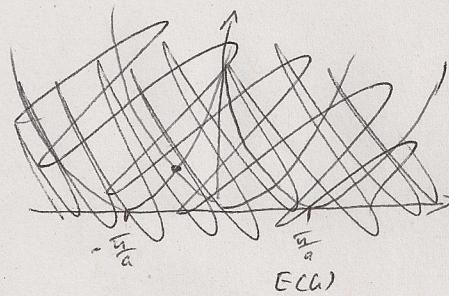
ψ -Herleitung:

$$\begin{aligned} \psi(x) &= \psi_0 e^{i k x} \\ \text{Valenzband: } &e^- \text{ sind quasi-freie Elektronen mit periodischem } V(x) \text{ im Hintergrund} \\ \Rightarrow \hat{T} \psi(\vec{r}) &= \psi(\vec{r} + \vec{T}) = \psi(\vec{r}) \\ \hat{T} \psi(\vec{r}) &= e^{i \vec{k} \cdot \vec{T}} \psi_0(\vec{r}) \end{aligned}$$

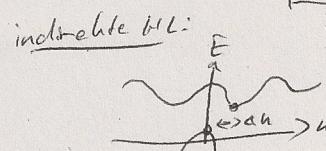
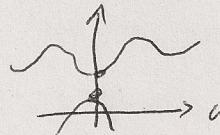
Bloch-Funktionen, ebene Wellen

Gekoppelte Potentialsäppfe: $\hat{H} = \begin{pmatrix} W_{E0} & 0 & 0 \\ 0 & W_{E0} & 0 \\ 0 & 0 & W_{E0} \end{pmatrix} \Rightarrow E(h) = E_0 + 2\omega \cos(h \cdot a) ; h = n \cdot \frac{2\pi}{L}, n \in \mathbb{N}$

Brillouin-Zone:



Direkte HT:



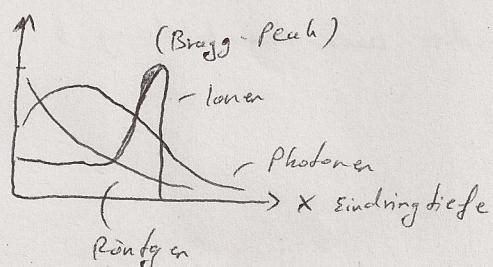
Wechselwirkungen:

LWW mit Materie

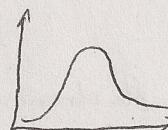
- geladene Teilchen: Ionisation, Anregung v. Atomen, Cherenkovstrahlung
- leichte Teilchen: Bremsstrahlung
- geladene Hadronen: Ionisation, Kollision, Streuung, Zerfall
- Photon: Absorption (Photoeffekt), Streuung (Compton), Paarbildung
- Neutrinos: nur schwache WW

Geladene Teilchen:

- inelastische Stoße \rightarrow Ionisation (schwere Teilchen), Anregung
- Strahlung: Bremsstrahlung bzw. Synchrotronstrahlung, Cherenkovstrahlung
- Ionisation: Bethe - Bloch - Gl. gibt Energieverlust ΔE durch Ionisation an



Bei dünnen Absorbern: Landau - Verteilung



Bei dicken Absorbern: Vielfachstreuung
↳ Gaußverteilung.

Elektronen / Protonen:

Energie klein \rightarrow Ionisation
 - " " groß \rightarrow Bremsstrahlung } Bei kritischer Energie: Energieverlust durch Ionisation und Bremsstrahlung gleich
 \hookrightarrow Energieverlust \sim Teilchenenergie

Cherenkov-Strahlung:

Medium mit Brechzahl n : $c_0 = \frac{c_0}{n}$

Langsam: $\begin{array}{c} + \\ \text{e}^+ \end{array} \begin{array}{c} - \\ \text{e}^- \end{array} \rightarrow \nu$ (Umgebung unpolarisiert)
 $\beta \ll 1$

Schwelleneffekt bei $\beta > n^{-1}$
 Licht-Ausbreitung im kegelförmig

Schnell!! $\begin{array}{c} + \\ \text{e}^+ \end{array} \rightarrow \nu$ (Umgebung polarisiert)
 $\beta \approx 1$ $\begin{array}{c} + \\ \text{e}^+ \end{array} \delta \rightarrow \text{mittleres Dipolmoment } \neq 0$

Übergangssstrahlung:

Übergang zw. Vakuum & Medium mit ϵ_0 Permittivität ϵ_r

↳ Dipol zw. Ladung und Spiegelladung (kein Schwelleneffekt)

Photonen:

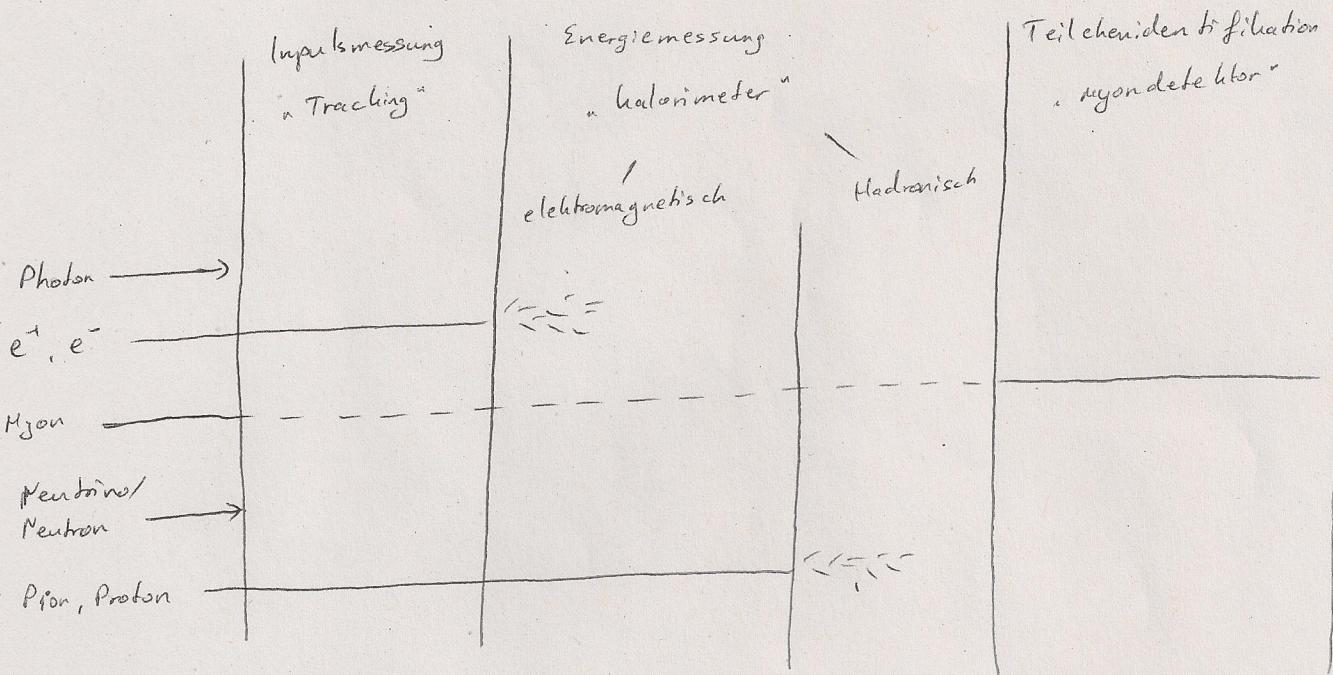
- niedrige Energie: Photoelektrischer Effekt (~~Aufprall~~) $\gamma \rightarrow e^-$ (weniger Energie)
- mittlere $\gamma\gamma$: Compton-Effekt $\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$ e^- wird aus d. Atom herausgeschlagen
- große $\gamma\gamma$: e^+e^- -Paarbildung

$\hookrightarrow \gamma \rightarrow e^+e^-$ Nur im Coulomb-Feld eines Kerns möglich
Schwelleneffekt für $\frac{E_\gamma}{m_e c^2} \geq 2$ möglich

im EM-Kalimeter: Schauer \Leftrightarrow Kaskade aus Paarbildung & Bremsstrahlung

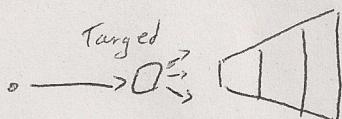
Hadronen \rightarrow "hadronischer Schauer"

CMS Aufbau

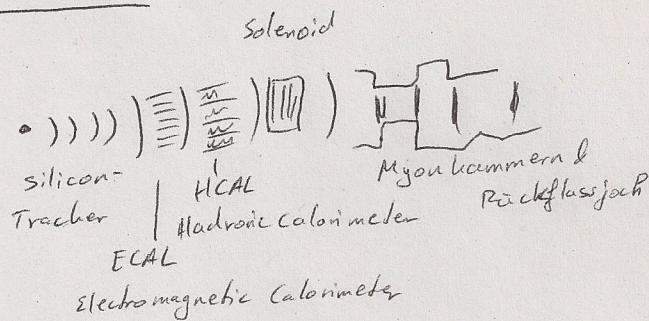


Fixed-Target: Kegel / u Wedge-Shape

↳ Vorwärtspektrometeren



Aufbau CMS:



Mjonsystem:

↳ misst Position & Energie von Myonen

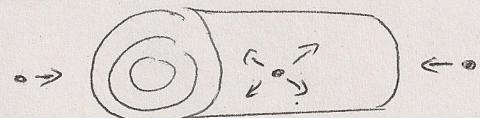
↳ Gasdetektion

↳ Myonen durchdringen vieles, daher außen

↳ Rückflussjoch: Stoppt Hadronen und verhindert Rückstreuung in der Myonkammer

Collider-Detektor: zyklindrischer 4π Detektor

↳ Collision products in all directions



Tracker / Spurdetektor: (innen pixel, außen Scheiben)

↳ misst Teilchenposition, ermöglicht die Bahnbahnrekonstruktion

↳ Siliziumdetektoren

ECAL:

↳ misst Energie von e^- und hochenergetischen γ
 ↳ Szintillatoren

HCAL:

↳ misst Energie von Hadronen durch Schauer

Dazu: Forward-Calorimeter

↳ Teilchen, die "einfall-Impuls" herausfliegen

EigRgruppen:

$$SU(2) \times U(1)_Y$$

$$SU(3)_C$$

I: Isospin

Y: Hyperladung

C: Farbe \Rightarrow starke Kraft

Additive Quantenzahlen: Q (el. Ladung), Hyperladung Y, Leptonenzahl L, Baryonenzahl B

Multplikative: CPT, Ladungs konjugation e

Elektroschwache WW

\hookrightarrow Renormierbarkeit \hookrightarrow Sichtfreiheit

② V-A Theorie ② $SU(2) \times U(1)$ Theorie ③ Higgs ④ $SU(2) \times U(1) + \text{Higgs}$

Elementare Prozesse:

\hookrightarrow Elektroschwache ~~Theorie~~ Theorie

\hookrightarrow geladene Ströme: W^\pm -Bosonen \hookrightarrow neutrale Ströme: Z-Bosonen

V-A Theorie: Vektor - Axialvektor

$$J^\mu = V^\mu - A^\mu, \quad J^\mu: \text{Vektorschirm}, \text{Paritätsinvariant}$$

A^μ : Axialvektorstrom, ändert seine Richtung bei Parität

\Rightarrow V-A verletzt die Parität

• erklärt μ -Zerfall • erklärt Helizität von Neutrinos

• nicht renormierbar \Rightarrow Problem: CP-Verletzung

Elektroschw. Vereinh.:

\rightarrow Coulomb-Kraft & schwache WW bei hohen Energien gleich

$SU(2)_I \rightarrow$ schwache WW (W- und Z-Bosonen)

$U(1)_Y \rightarrow$ Hyperladung, Coulomb-Kraft

Niedrige Energien: Symmetriebrechung & 2 versch. WW

Kur linkshändige Teilchen koppeln an schwachen Isospin (W_μ -Feld)

Alle Teilchen koppeln an schwache Hyperladung (B_μ -Feld)

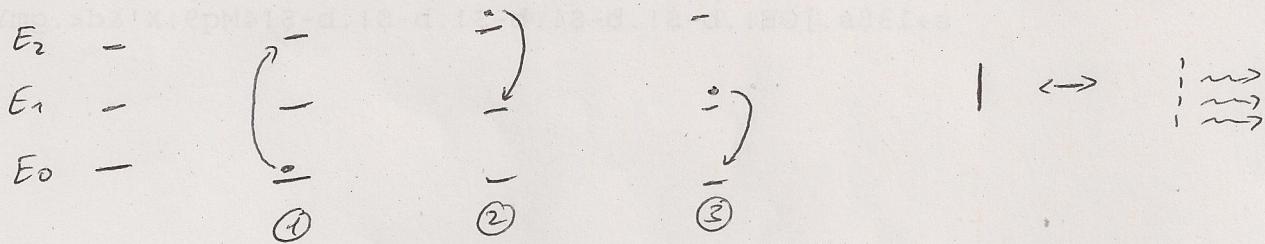
W^0 und B koppeln an Fermionen, Isospin bleibt aber unverändert.

Elektroschwache Quantenzahl: $Q = I_3 + \frac{Y_W}{2}$ (Ladung Q)

Dubletts: $L \quad u \quad c \quad t \quad \& \quad \nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau \quad \left\{ I = \frac{1}{2}, \quad I_3 = \begin{pmatrix} \frac{+1}{2} \\ 0 \\ -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \right.$

R $\Rightarrow I = I_3 = 0$

Laser



① Energiezufuhr / Pumpen

② kurzlebiger Zustand zerfällt \Rightarrow metastabiler Zwischenzustand

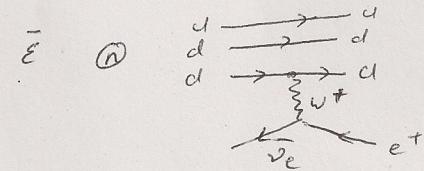
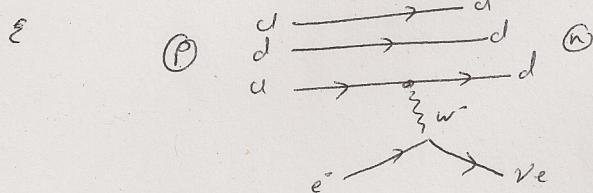
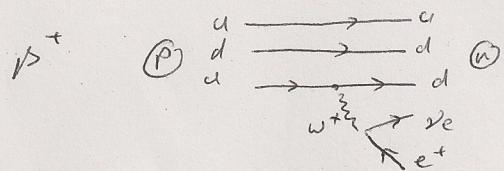
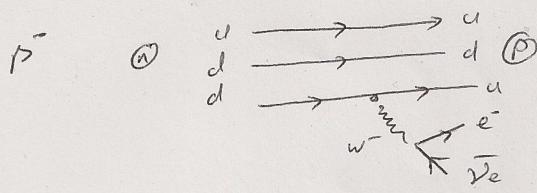
Bevölkerungsinverson: immer mehr e^- im Zustand E_1 , mehr als in E_0

Stimmtelnde Emission: große Anzahl an e^- fällt auf E_0 runter, ausgesendete
 ③ haben gleiche Energie ($= \hbar \omega$) und Phase φ

Optische Resonanz: Spiegel

Laser-Diode: Am PN-Übergang werden durch Rekombination \times ausgesendet
 \hookrightarrow Optische Resonanz \Rightarrow Verstärkung d. Lichtintensität

Δ^+ -Zerfall



Neutrino-Nachweis: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+, (\bar{e})$

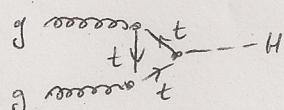
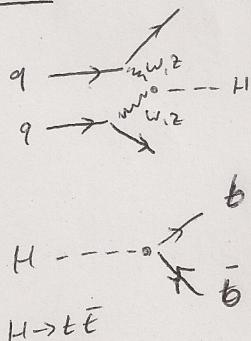
das e^+ kann durch e^+e^- -Annihilation nachgewiesen werden $\rightarrow \delta$ } verzögerte
das Neutron kann eingefangen werden $\rightarrow \times$ } Koinzidenz

Chiralität: Eigenwert unter γ^5 Transformation: $\gamma^5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$

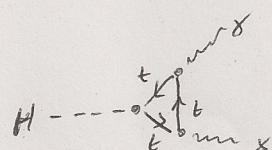
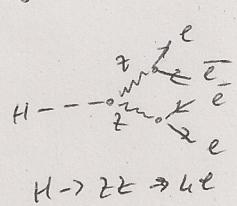
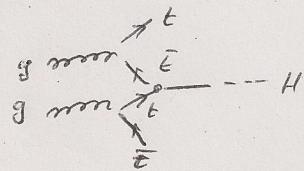
$$\gamma^5 u(p) = + u(p) \Rightarrow R \\ = - u(p) \Rightarrow L \quad u(p) \text{ ist Dirac-Spinor}$$

Bei masselosen / relativistischen Teilchen: Chiralität = Helizität

Higgs:

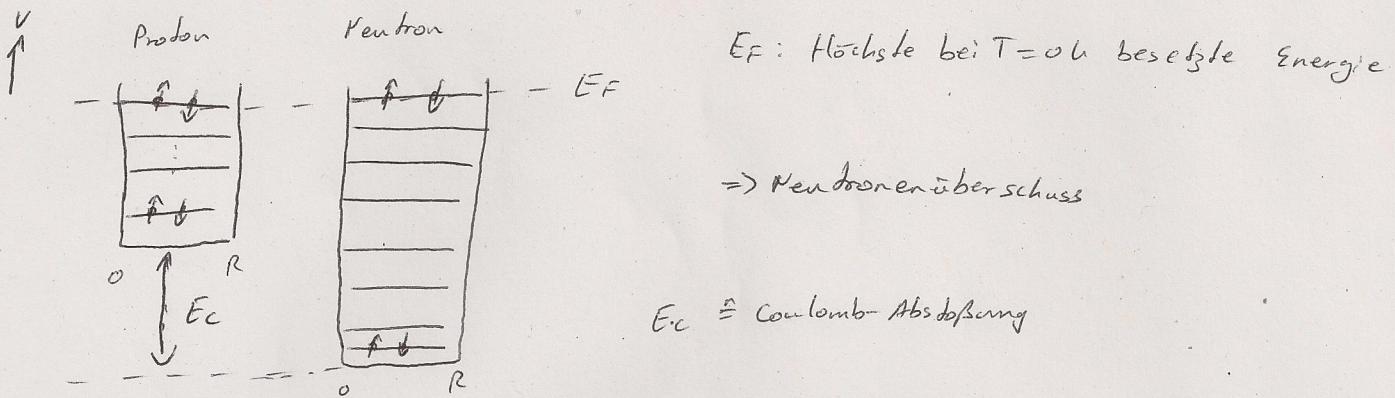


Erzeugung



Fermigas-Modell

"Thomas-Fermi-Modell"
 p und n Fermionen \Rightarrow effektive Einteilchensysteme ohne Ww



Wenn die Fermi-Energien der Protonen & Neutronen ungleich sind, kann eine Umwandlung $p \leftrightarrow n$ stattfinden $\Rightarrow \beta^{\pm}$ Zerfall

Fermi-Energie hängt nicht von Neutronenzahl ab: $E_F = \text{const.} \approx 30 \text{ MeV}$

Tröpfchenmodell: analogie zu Wasserdropfchen \Rightarrow kontinuum

$$E_B = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad \text{für } A > 30$$

$$\text{Volumenenergie: } E_1 = \alpha_1 \cdot A \quad (\text{u. Kondensationsenergie})$$

$$\text{Oberflächenenergie: } E_2 = -\alpha_2 \cdot A^{2/3} \quad (\text{vgl. Oberflächenspannung})$$

$$\text{Couloms-Energie: } E_3 = -\alpha_3 \cdot z^2 \cdot A^{-1/3}$$

$$\text{Antisymmetrie-Energie: } E_4 = -\alpha_4 \cdot \frac{(z - \frac{A}{2})^2}{A}$$

$$\text{Paarungsenergie: } E_5 = \alpha_5 \cdot A^{-1/2} \begin{cases} +1 & \text{falls gg} \\ 0 & \text{falls ug oder ga} \\ -1 & \text{falls uu} \end{cases}$$

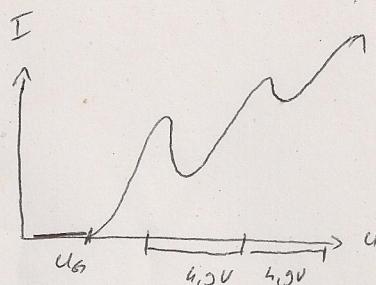
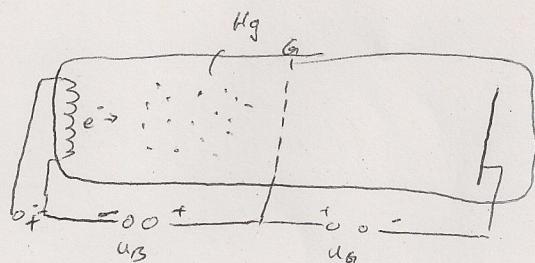
$$\text{Kernladungszahl: } z = \frac{A}{1,98 + 0,0215 \cdot A^{2/3}} < \frac{A}{2}$$

Schalenmodell: Schwerpunkt: Einzelnes Nukleon mit mittlerem Potential aller Nukleonen

\Rightarrow Lösung: SG. in kugelförm. mit spin-Bahn-Kopplung

\Rightarrow Energieniveaus: Schalen; korrekte Beschreibung d. magischen Zahlen, (2, 8, 20, 28, 50)
 Einteilchen- & Einlochzustände

Frank-Hertz-Versuch



klassisch: Ohm'sches Gesetz

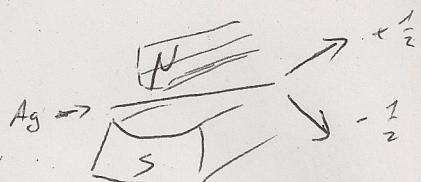
QM: Ionisierungsenergie
ist quantisierte Anregungsenergie

e^- werden von Heizbathode erhitzt und zum Gitter G beschleunigt.

Auf dem Weg werden Hüllenelektronen d. Hg angeregt $\Rightarrow e^-$ verliert kinetische Energie
 $\Rightarrow 4.5\text{ V}$ äquidistante Peaks

wenn die e^- Energie verlieren, können sie nicht mehr gegen die Gegenspannung arbeiten.

Stern-Gerlach-Versuch



Ag-Atome werden aus dem Ofen beschleunigt
& durch inhomogenes \vec{B} -Feld bewegt.

Silberatome: nur 1 Valenzelektron \rightarrow im s-Orbital

$$F = -\nabla V = \mu_s (\mu_e \cdot \vec{B}) = 0, \text{ da } \mu_s = \mu_e \text{ ge-} m_B = 0$$

(s-Orbital)

Beobachtung:

Ablenkung in 2 Teilstrahlen mit jeweils einem m_B Drehimpuls

$$\Rightarrow F = -\nabla V = \mu_s (\nabla \vec{B}), \quad \mu_s = m_s \cdot g_s \cdot m_B \Rightarrow \text{u spin } \uparrow$$

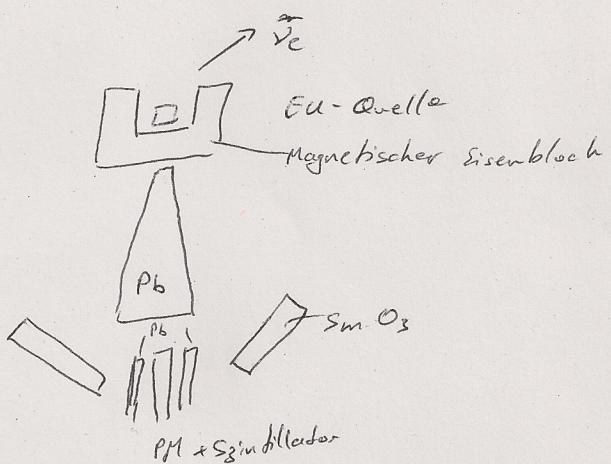
H-Atom:

$$H = \frac{p_r^2}{2m} - \frac{e^2}{r} = \frac{p_r^2}{2\mu} + \frac{1}{2\mu} \left(p_r^2 + \frac{L^2}{r^2} \right) - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

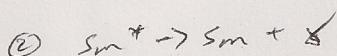
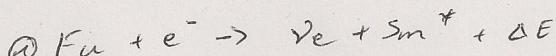
$$\Rightarrow \cancel{\text{Energie}} \quad E_n = -\frac{R_g}{n^2} \quad \text{in J/m} \rightarrow \begin{cases} \hat{H} \text{ in J/m} = E_n \text{ in J/m} \\ L^2 \text{ in J/m} = \hbar^2 l(l+1) \text{ in J/m} \\ L_z \text{ in J/m} = \hbar m \text{ in J/m} \end{cases}$$

$$\psi_{nlm} = R_{nl}(r) \Phi_{lm}(\theta, \phi)$$

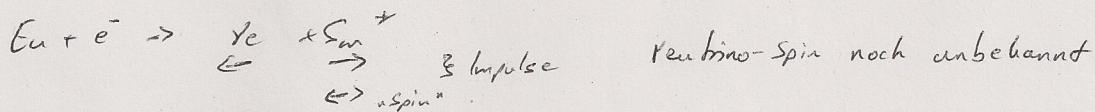
Goldhaber - Experiment



Ergebnis



- ① Zerfall durch Elektroneneinfang (e^-) sendet ein Neutrino aus. Das angeregte Samarium Sm^+ hat einen Impuls



- ② Der Sm^+ -zustand ist sehr kurzlebig und zerfällt unter Emission eines γ -quants. Die Emission ist spontan und findet in jede Raumrichtung gleich wahrscheinlich statt.

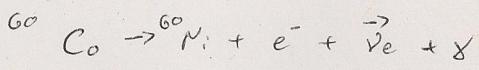
Wenn die Emission in die entgegengesetzte Richtung des Neutrinos stattfindet, bleibt das Sm stehen ($\vec{p}_1 = 0$) und die gesamte Energie geht an das γ über.
 → Neutrino ist nach oben geflogen.
 → Helizität d. γ ist identisch mit Helizität des Sm^+ und somit identisch mit Helizität des ν_e

- ③ Nur, wenn ν_e nach oben fliegt, kann es zu einer weiteren spontanen Anregung kommen! Helizität kann bleibt bei beiden γ gleich.
 ⇒ Nachweis d. Flugrichtung im Zählk. + PM "Resonanzabsorption"

Magnet-Block: Wirkungsquerschnitt für Compton-Streuung hängt von der Polarisierung d. Materials ab, das streut, ab. Ein im Eisen gestreutes γ verliert einen Teil d. Energie, sodass keine Resonanzabsorption mehr möglich ist.

Berechnete Helizität $\nu_e \Leftrightarrow$ Zählrate von Polarisierung abhängig

Wu-Experiment:



$e^- \rightarrow \rightarrow$ spin

$\rightarrow \leftarrow$ L Impuls
 $\leftarrow \rightarrow$ R

Temperatur: $\approx 0,01\text{ K}$

Heliizität:

$$H = \frac{\vec{s} \cdot \vec{p}}{|\vec{s}| \cdot |\vec{p}|}$$

$+1 \rightarrow R$
 $-1 \rightarrow L$

Bei Lichtgeschwindigkeit: Chiralität = Heliizität

Adiabatische Endmagnetisierung: \rightarrow G-Faktor vom Salz ist nicht isotrop!

1.) starkes Magnetfeld \rightarrow Spin vom paramagnetischen Salz wird ausgerichtet

\hookrightarrow Wärme im System, da parallele Spins = energetisch günstiger Zustand

2.) Helium-Kühlung

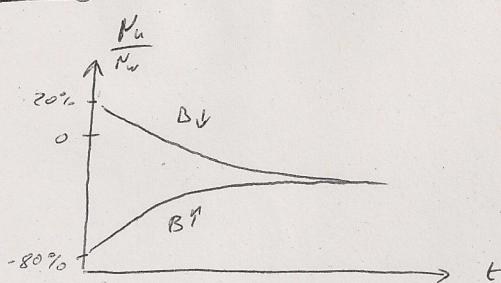
3.) Magnet abschalten \rightarrow Spins verteilen sich \rightarrow Umgebung kühlst ab

Magnet für Kühlung \perp Magnet für Co-Spin Ausrichtung

Panda's Verletzung: Gleich viele rechtsdändige wie linkshändige e^- bzw. $\bar{\nu}_e$ erwartet.

\hookrightarrow Detektion von e^- mit Szintillator & Photomultiplier

Messung:



γ -Detektoren:

\hookrightarrow funktioniert die Kühlung?

\hookrightarrow γ -Photonen haben selbe Ausrichtung wie Spin!

\hookrightarrow Wenn Co warm wird \rightarrow Spins verteilen sich \rightarrow \propto in alle Raumrichtungen messbar!