

Moderne Physik: Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Kosmologie

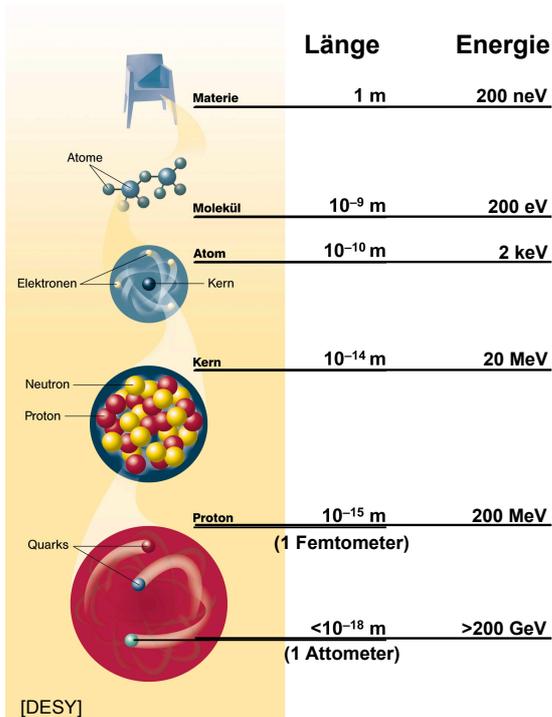
Ulrich Husemann
Humboldt-Universität zu Berlin
Sommersemester 2008

Termine

- Klausur
 - Prüfungsordnung sieht zweistündige Klausur vor
 - Termin:
 - Donnerstag, 24.07.08
 - 9–11 Uhr s.t.
 - Raum: 2'101
 - Anmeldeformalitäten werden noch geklärt
- Terminkollision: VL/Ü Donnerstag, 22.05.08 fällt aus
 - Zusätzliche Übungen (teilweise als VL): 15.05. und 29.05.

Teilchenbeschleuniger

Warum Teilchenbeschleuniger?



- Untersuchung von Materie auf Längenskalen $< 10^{-15}$ m (Protonradius)
- Optik: Beugungslimit für runde Linse mit Durchmesser d (Rayleigh-Kriterium)

$$\sin \theta_R = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$
- Elektronenmikroskop nutzt Welleneigenschaften des e^- : Auflösung $\approx 1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ m
- Rastertunnelmikroskop nutzt Oberflächenabtastung mit QM-Tunneleffekt: 1 \AA

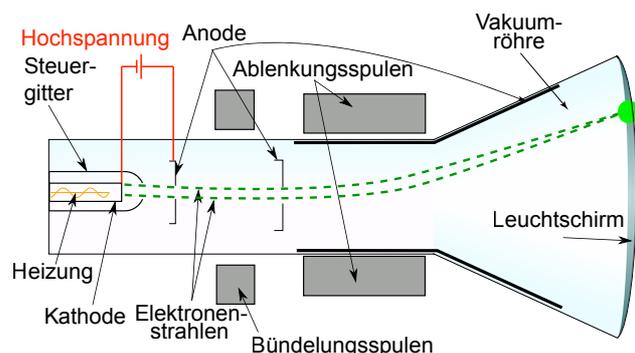
Abschätzung der Energie

- Zusammenhang Wellenlänge/Energie: $E = \hbar\omega = 2\pi\hbar c/\lambda$
- Energieeinheit: Elektronenvolt (eV) = Energie, die ein Elektron durch eine Potenzialdifferenz von 1 V erhält:
 $E = eU$ mit Elementarladung $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Faustformel zur Umrechnung: $\hbar c = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$
 → Für Auflösung von 1 fm benötigt man ca. 200 MeV
- Erzeugung neuer Teilchen
 - Mindestens Ruheenergie $E_0 = mc^2$ (Collider: $E_{\text{CMS}} = 2E$)
 - z. B.: Z-Boson ($mc^2 \approx 90 \text{ GeV}$) in e^+e^- -Collider:
 Strahlenergie mindestens 45 GeV (Fixed Target: >4000 GeV)

Lorentzkraft

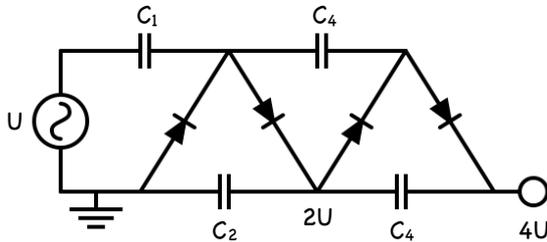
- Lorentzkraft $\vec{F} = e \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$
 - Elektrisches Feld E: Beschleunigung (parallel zu E-Feld)
 - Magnetisches Feld B: Ablenkung (senkrecht zu Bewegungsrichtung und B-Feld)
- Einfachster Beschleuniger: elektrostatisch, z. B. Braunsche Röhre

- Maximal einige MeV
- Limit: „Koronabildung“ (hohe lokale Feldstärke → Lawine von Ladungsträgern im Restgas)



Cockcroft-Walton-Generator

- Erzeugung von Hochspannung bis zu ca. 1 MV



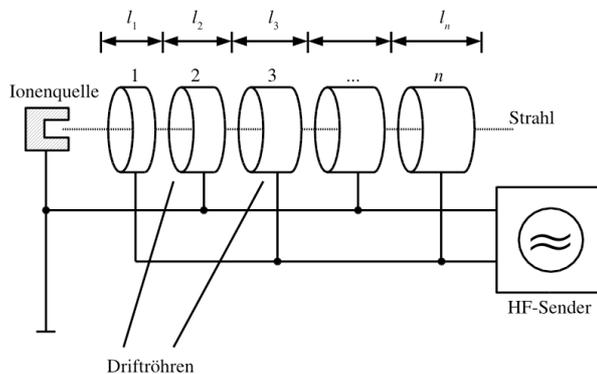
- Kaskade aus Kondensatoren und Gleichrichterdioden
- Typische Anwendung: erste Beschleunigungsstufe



Fermilab Cockcroft-Walton-Generator (750 kV)

Linearbeschleuniger

- Gleichspannung limitiert → verwende Hochfrequenz-Wechselspannung $U(t) = U_0 \sin(\omega t - \phi_0)$
- Linac (linear accelerator): Driftröhren im Vakuum mit abwechselnder Polung an HF-Sender angeschlossen



Energie nach i-ter Driftröhre (nicht-relativistisch):

$$E_i = \frac{1}{2} m v_i^2 = i e U_0 \sin \phi$$

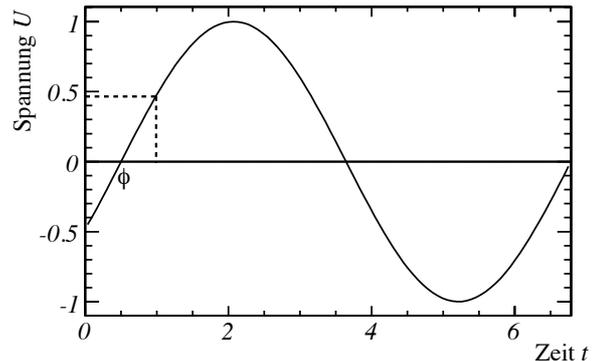
Länge der i-ten Driftröhre:

$$l_i = v_i \frac{\tau}{2} = v_i \frac{\pi}{\omega}$$

$$= \frac{\pi}{\omega} \sqrt{\frac{2 i e U_0 \sin \phi}{m}}$$

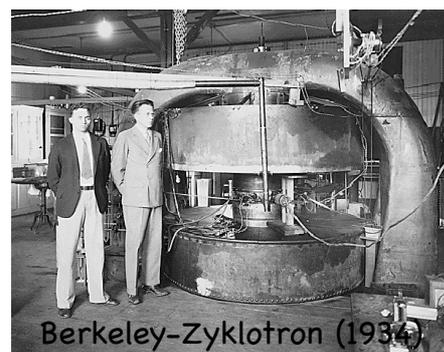
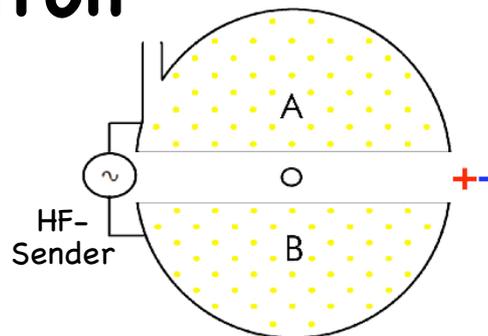
Phasenfokussierung

- Problem: Geschwindigkeit muss genau auf Driftlänge abgestimmt werden, um „Aufschaukeln“ von Abweichungen zu verhindern → geschickte Selbstregulierung der Phase ϕ
- Lösung: „Reite“ hinter Scheitelpunkt der Welle: zu viel Energie → Phase kleiner → weniger Beschleunigungsspannung (und umgekehrt)



Zyklotron

- Problem: Linac kann nicht beliebig lang sein (Technik, Kosten, ...) → Kreisbeschleuniger
- Zyklotron (E. O. Lawrence, M. S. Livingston, 1930)
 - Starkes Magnetfeld (bis 2 Tesla) lenkt Teilchen auf Kreisbahnen
 - Beschleunigung zwischen D-förmigen Polen mit HF-Sender
 - Energien bis ca. 20 MeV (Protonen: $\beta = pc/E \approx 0.02$)



Zyklotronfrequenz

- Ansatz: Lorentzkraft ($E=0$): $\vec{F} = m\dot{\vec{v}} = e\vec{v} \times \vec{B}$

- O. b. d. A.: Bewegung in x-y-Ebene, B-Feld nur in z:

$$m \begin{pmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{0} \end{pmatrix} = e \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix} = e \begin{pmatrix} v_y B \\ -v_x B \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Gekoppelte Dgl. erster Ordnung \rightarrow ableiten & einsetzen:

$$\ddot{v}_x = \frac{eB}{m} \dot{v}_y = - \left(\frac{eB}{m} \right)^2 v_x, \quad \ddot{v}_y = - \frac{eB}{m} \dot{v}_x = - \left(\frac{eB}{m} \right)^2 v_y$$

- Lösungen: $v_x = v_0 \cos(\omega_Z t - \phi_0)$, $v_y = v_0 \sin(\omega_Z t - \phi_0)$

- Charakteristische Zyklotronfrequenz: $\omega_Z = \frac{eB}{m}$

Synchrotron

- Noch höhere Strahlenergien: Bahnradius R (für $v \approx c$)

$$evB = m \frac{v^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{eB} \approx \frac{E}{eBc}$$

Zahlenbeispiel: $E = 1 \text{ TeV}$, $B = 4 \text{ T} \rightarrow R = 834 \text{ m}$

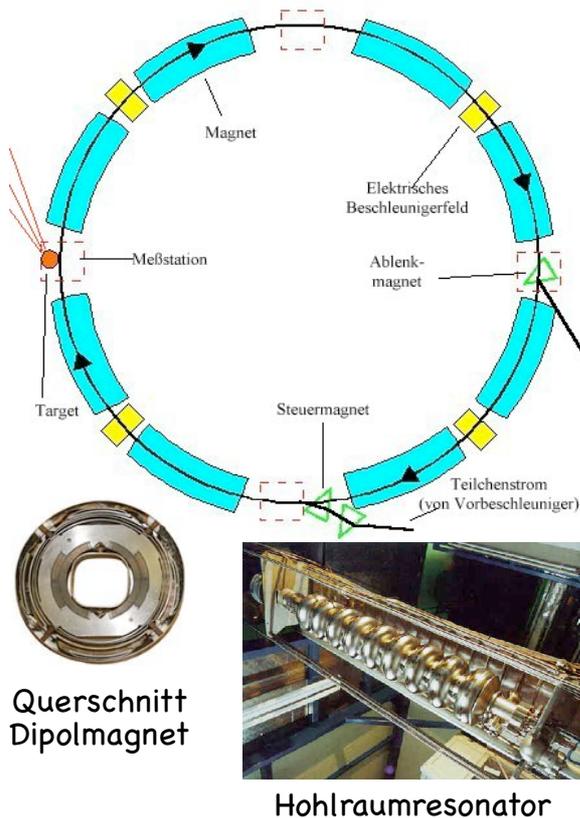
- Lösung: ein Magnet \rightarrow viele schmale Ablenkmagnete

- Beschleunigung bei konstantem Radius: Magnetfeld synchron mit Energie hochfahren („ramping“)
 \rightarrow „Synchrotron“ (E.M. McMillan, V. Veksler, 1945)

- Anwendungen

- Protonenstrahl für Fixed-Target-Experimente
- Nutzung der Synchrotronstrahlung als Röntgenquelle

Synchrotron



- Komponenten:
 - Vorbeschleuniger zur Strahlinjektion, z. B. Linac
 - Evakuierte Strahlröhre
 - Beschleunigungsstrecke: Hohlraumresonator („cavity“)
 - Ablenkmagnete: Dipol (häufig supraleitend)
 - Fokussiermagnete: Quadrupol (+ weitere Korrekturmagnete)
 - Gepulste Extraktionsmagnete („kicker“)

Synchrotronstrahlung

- Beschleunigte Ladung emittiert Strahlung
 - (Unerwünschter) Nebeneffekt in Teilchenphysik
 - Anwendung: hochbrilliant Röntgenstrahlung für: Biologie, Materialwissenschaften, ...
 - Leistung Hertz'scher Dipol (relativistisch):

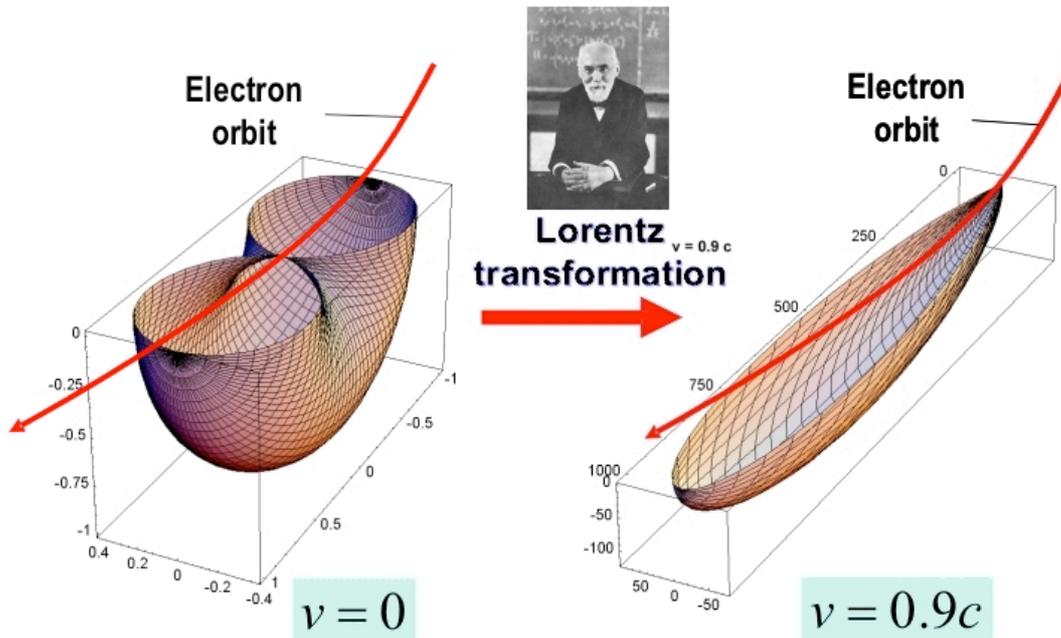
$$P = \frac{e^2 c}{6\pi\epsilon_0} \frac{1}{(mc^2)^4} \frac{E^4}{R^2}$$

- Energieverlust pro Umlauf (ständige Ablenkung):

$$\Delta E = P \cdot \Delta t = P \cdot \frac{2\pi R}{c} = \frac{e^2}{3\epsilon_0} \frac{1}{(mc^2)^4} \frac{E^4}{R}$$

- $1/m^4$: wichtig für Elektronen, vernachlässigbar für Protonen
- E^4/R : wichtig für hohe Energien und kleine Radien

Synchrotronstrahlung



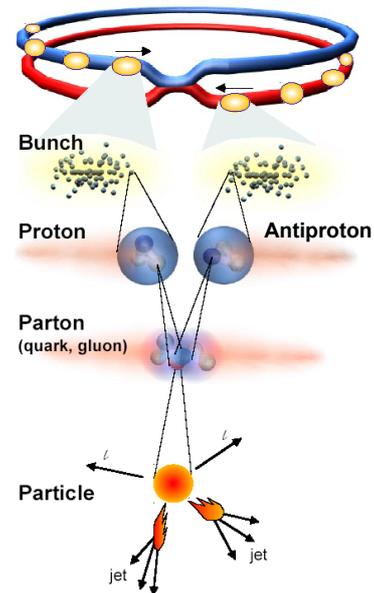
Synchrotronstrahlungsquellen



Speicherring („Collider“)

- Idee: beschleunige zwei Pakete von Teilchenstrahlen in entgegengesetzter Richtung (z. B. Teilchen/Antiteilchen in derselben Vakuumröhre)
- Kollisionsrate: mehrere MHz
- Reaktionsrate $\dot{N}_R = \sigma \cdot \mathcal{L}$ mit Luminosität

$$\mathcal{L} = f \cdot N \cdot \frac{\overset{\text{Zahl Teilchen}}{n_1 n_2}}{\underset{\text{Umlauffrequenz und Zahl Pakete}}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \underset{\text{Strahlfläche}}{}}$$



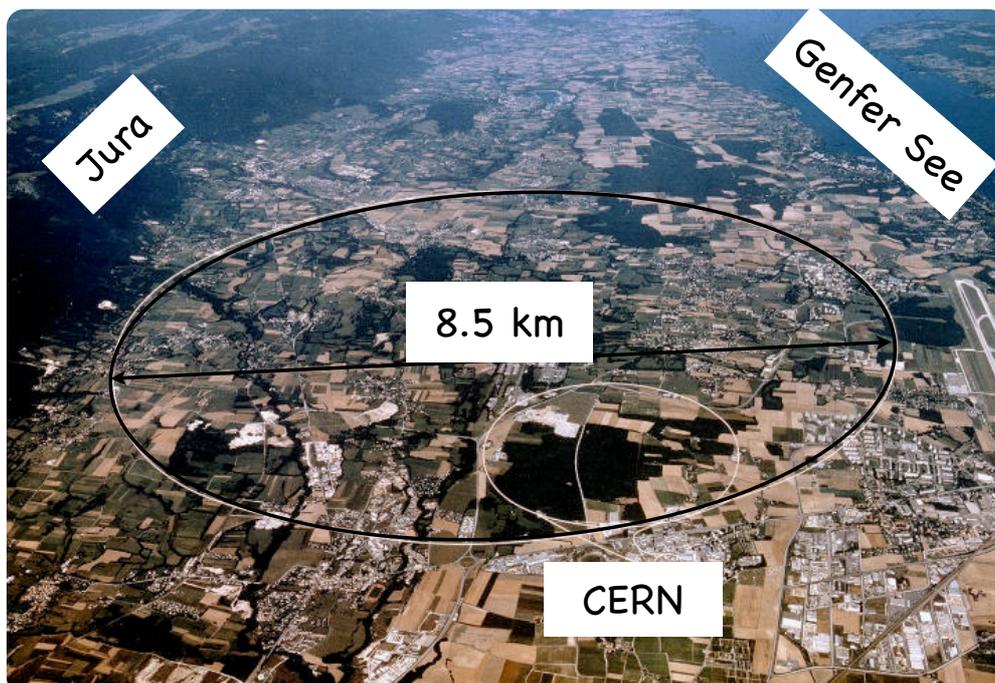
Beispiele für Speicherringe

Name	Teilchen	Strahlenergie	Umfang	Laufzeit
LEP (CERN, Schweiz)	Elektron - Positron	45-105 GeV	26,7 km	1989-2000
KEKB (KEK, Japan)	Elektron - Positron	8 GeV (e^-) 3.5 GeV (e^+)	3,0 km	ab 1999
PEP-II (SLAC, USA)	Elektron - Positron	9.0 GeV (e^-) 3.1 GeV (e^+)	2,2 km	1999-2008
HERA (DESY, Hamburg)	Elektron (Positron) - Proton	27,5 GeV (e) 920 GeV (p)	6,3 km	1992-2007
Tevatron (Fermilab, USA)	Proton - Antiproton	800-980 GeV	6,3 km	1987-2009
Large Hadron Collider (CERN)	Proton-Proton Blei-Blei	7 TeV (pp) 2.8 TeV/n (PbPb)	26,7 km	ab 2008
International Linear Collider	Elektron - Positron	>250 GeV	Länge: 32 km	2020?

Fermilab und das Tevatron



CERN & Large Hadron Collider



Themen für Vorträge

- Teilchenstrahlen in der Medizin
- Was kann man mit Synchrotronstrahlung untersuchen?
- Neutrinostrahlen: Erzeugung und Anwendung