



Einblicke in die Teilchenphysik

1. Einführung
2. **Beschleuniger**
3. Detektoren
4. Bewegungsgleichungen und Symmetrien
5. Das Quark-Modell und die CKM-Matrix
6. CP-Verletzung im Standardmodell
7. Proton- und Photonstruktur
8. Elektroschwache Präzisionsmessungen
9. Das Higgs-Boson
10. Neutrino-Massen und Neutrino-Oszillationen



Der Cockcroft - Walton - Beschleuniger

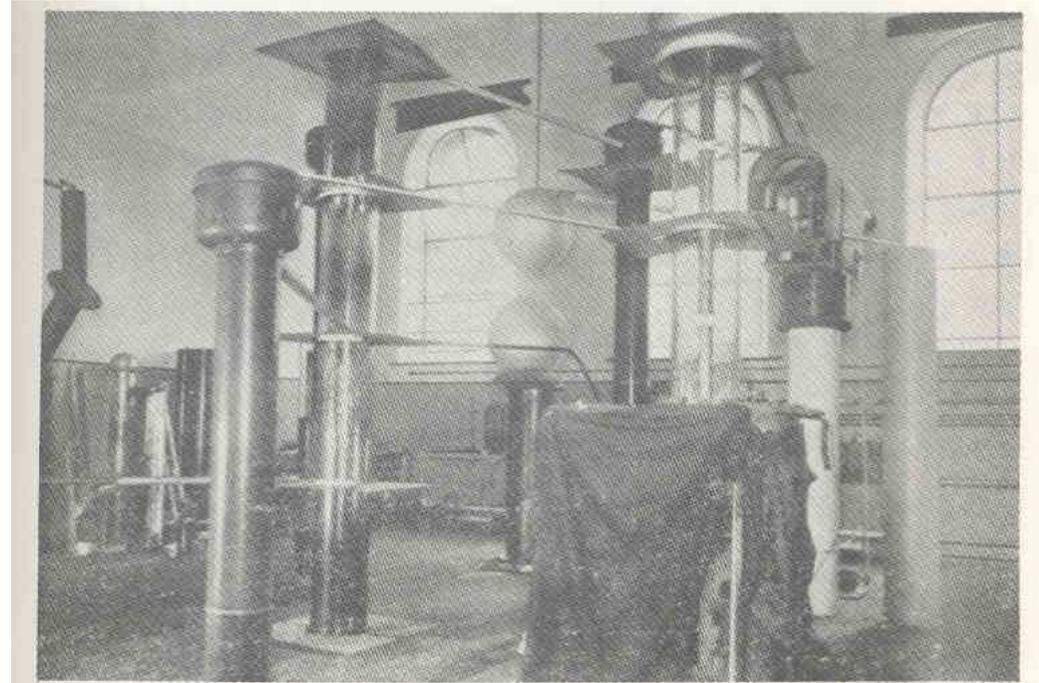
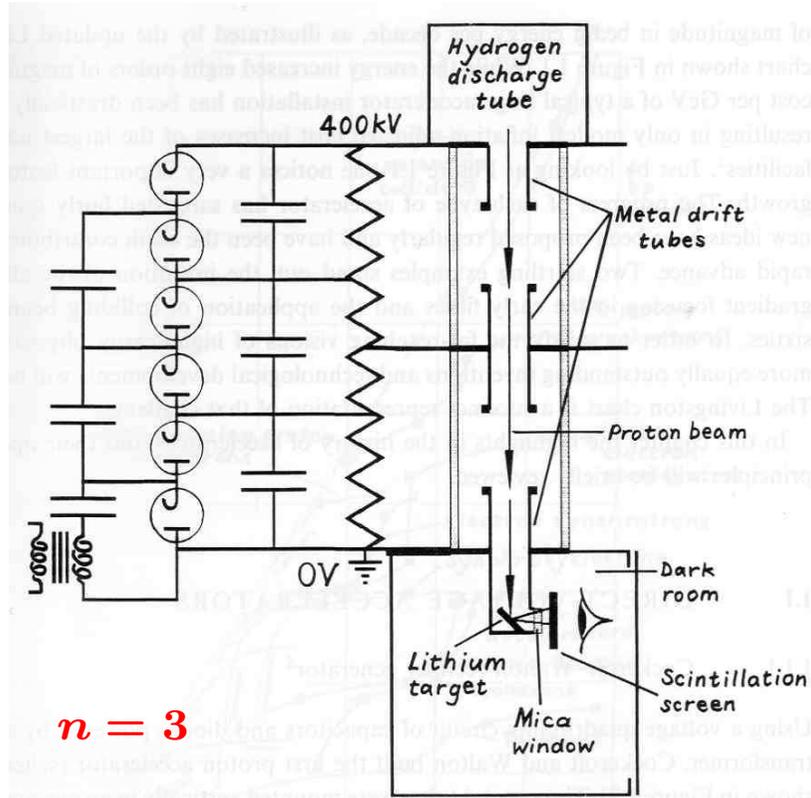


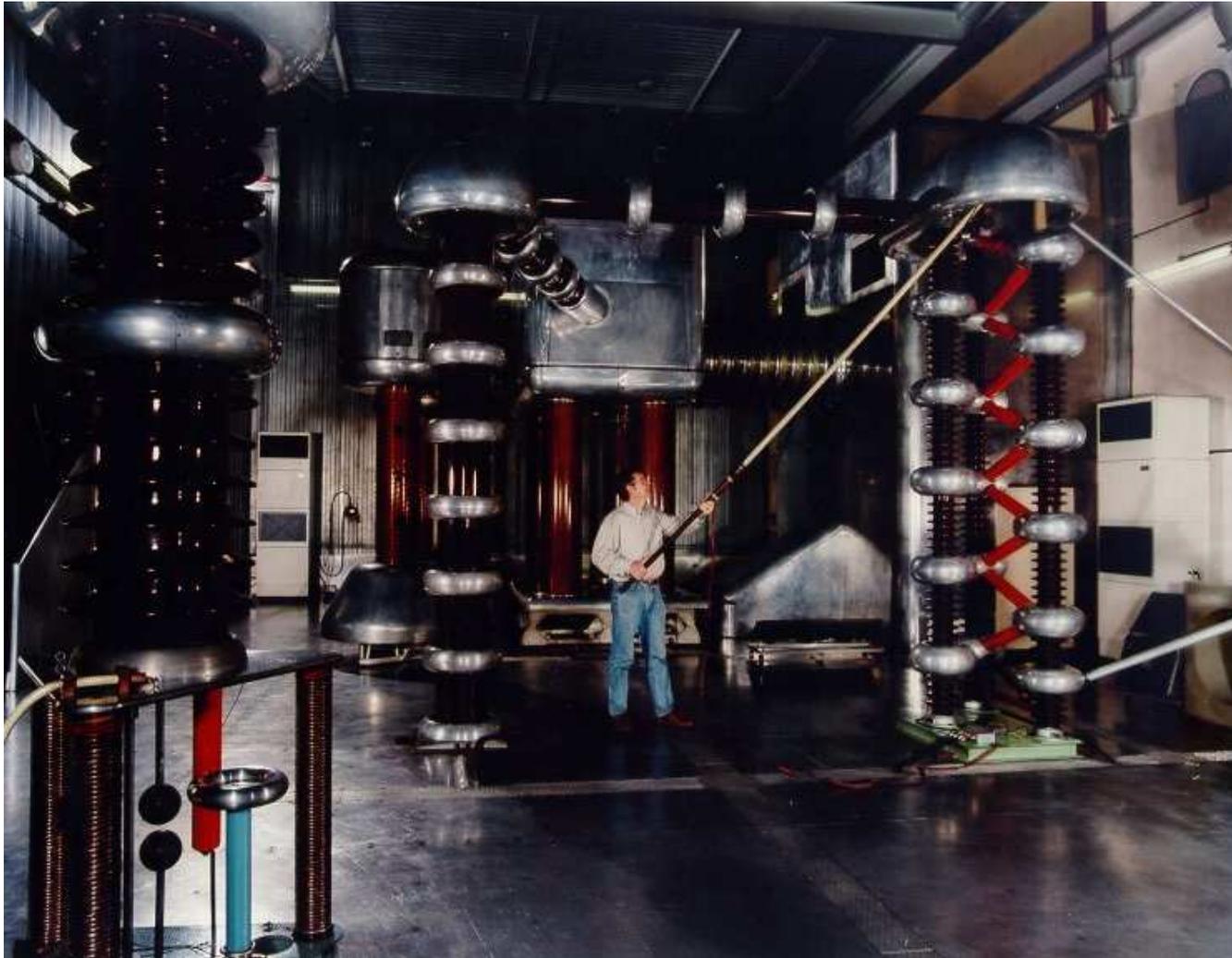
FIG. 2. Voltage multiplier with which Cockcroft and Walton achieved nuclear disintegration in 1932.

- Der erste Beschleuniger (1932).
- Die Kondensatoren werden parallel mit $U(t) = U_0 \sin(2\pi ft)$ geladen und in Reihe entladen.
- Die erreichbare Spannung $U_{\text{out}} = 2nU_0$ ist wegen Überschlügen limitiert auf ca. 1 MV.
- Abfall unter Last: $U_{\text{drop}} = \frac{I}{fC} \left(\frac{2n^3}{3} + \frac{n^2}{2} - \frac{n}{6} \right)$

Damit gelang Cockcroft und Walton der stimulierte Kernzerfall: ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{p}(500\text{keV}) \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$.



Ein moderner Cockcroft-Walton-Beschleuniger



ISIS
Rutherford Lab
Oxford

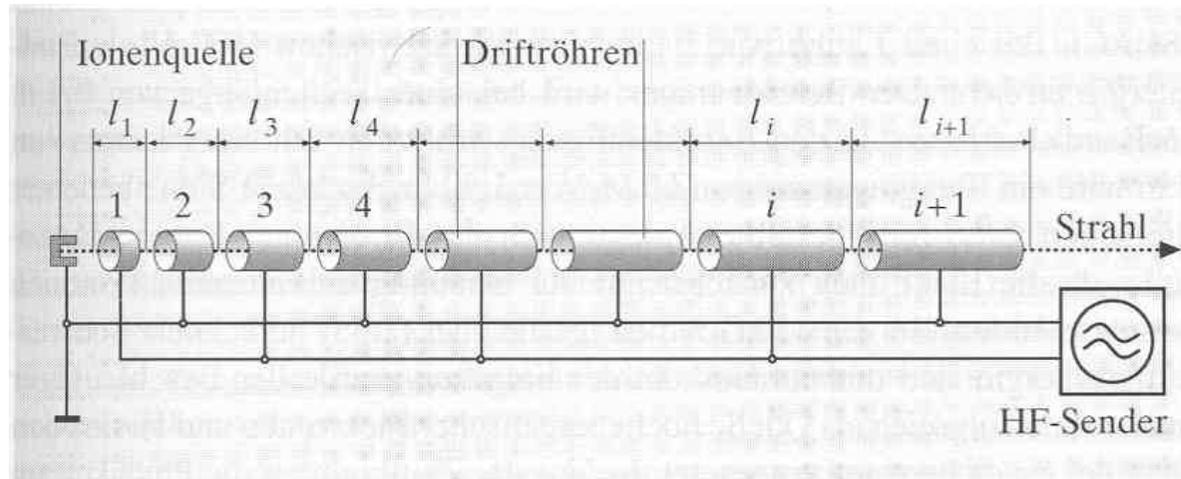
$$E_{H^-} = 665\text{keV}$$

Dieses Prinzip wird heute noch in Vorbeschleunigern benutzt.



Das Grundprinzip des Linearbeschleunigers

Das Prinzip stammt von Wideröe (1928).



$$U(t) = U_0 \sin(2\pi ft)$$

- Der Energiegewinn pro Spannungsdurchlauf: $\Delta E = q U_0 \sin \Phi_s$
- Abstimmung der Driftlänge, damit die Teilchen in Phase eintreffen $\Rightarrow l_i = \frac{v_i}{2f}$.
- Für relativistische Teilchen gilt $v_i \approx c$ und $l_i \equiv l = \text{const.}$
- Für eine typische Frequenz von $f = 10 \text{ MHz}$ ergibt sich $l = 15 \text{ m}$.
- Ungeeignet für hohe Energien, dort benutzt man Hohlraumresonatoren.

Diese Entdeckung bildet die Grundlage für alle Beschleuniger.



Das Zyklotron - der erste Kreisbeschleuniger

Das Prinzip

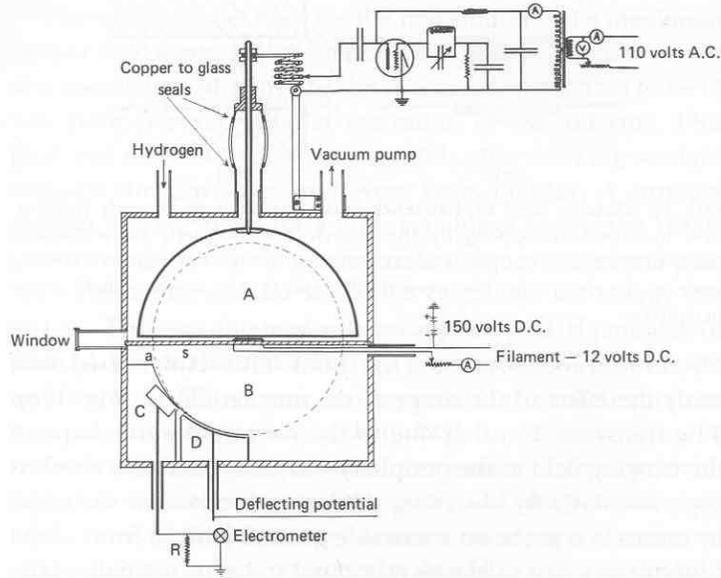
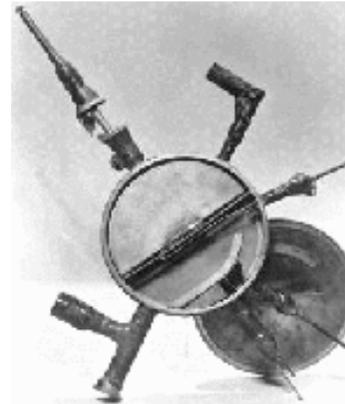


FIG. 13. Diagram of the vacuum chamber for the 1.2-MeV cyclotron built by Lawrence and Livingston at the University of California in 1931. See also Fig. 7.

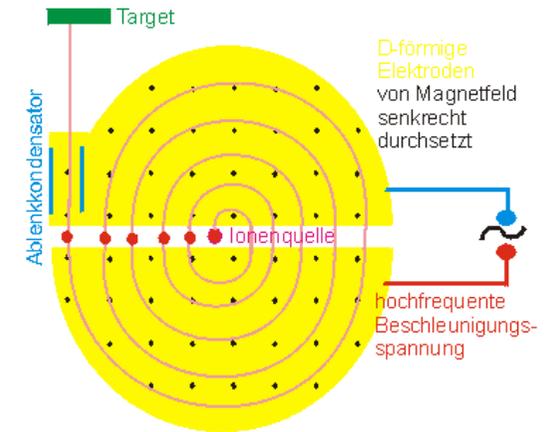
Das erste Zyklotron



Livingston (1932)

- $B = 0.52 \text{ T}$, H_2^+ -Ionen
- $\Rightarrow f_z \approx 4 \text{ MHz}$
- ca. 40 Umläufe \Rightarrow
Endenergie 13 keV

A Zyklotron at work



- Limitiert zu:
- $E_p < 20 \text{ MeV}$
- $E_\alpha < 70 \text{ MeV}$

- Nicht relativistisch:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) = \frac{mv^2}{R}$$

$$\Rightarrow R = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}$$

- Die Zyklotronfrequenz

$$f_z = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi R} = \frac{qB}{2\pi m}$$

ist unabhängig vom Impuls!

Im relativistischen Fall wächst die Masse und die Frequenz muss verkleinert werden. Dies ist der große Nachteil des Zyklotron und führte zum Synchrotron (fester Radius, synchronisiertes B-Feld).



Colliding-Beam versus Fixed-Target Experiment

Schwerpunktenergie zweier Teilchen:

$$\sqrt{s} = \sqrt{\left[\begin{pmatrix} E_1 \\ \vec{p}_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} E_2 \\ \vec{p}_2 \end{pmatrix} \right]^2} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

Hochenergie:

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ \vec{p}_1 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} E \\ \vec{p} \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad E \gg m_1 \equiv m$$



$$\begin{pmatrix} E_2 \\ \vec{p}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E \\ -\vec{p} \end{pmatrix}$$

$$\sqrt{s} = \sqrt{(E + E)^2 - (\vec{p} - \vec{p})^2} = 2E$$

Beispiel Tevatron

$$E = 1 \text{ TeV}, m = m_p \approx 1 \text{ GeV}$$

$$\sqrt{s} = 2 \text{ TeV}$$



$$\begin{pmatrix} E_2 \\ \vec{p}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\sqrt{s} = \sqrt{(E + m)^2 - (p)^2} = \sqrt{2m(E + m)}$$

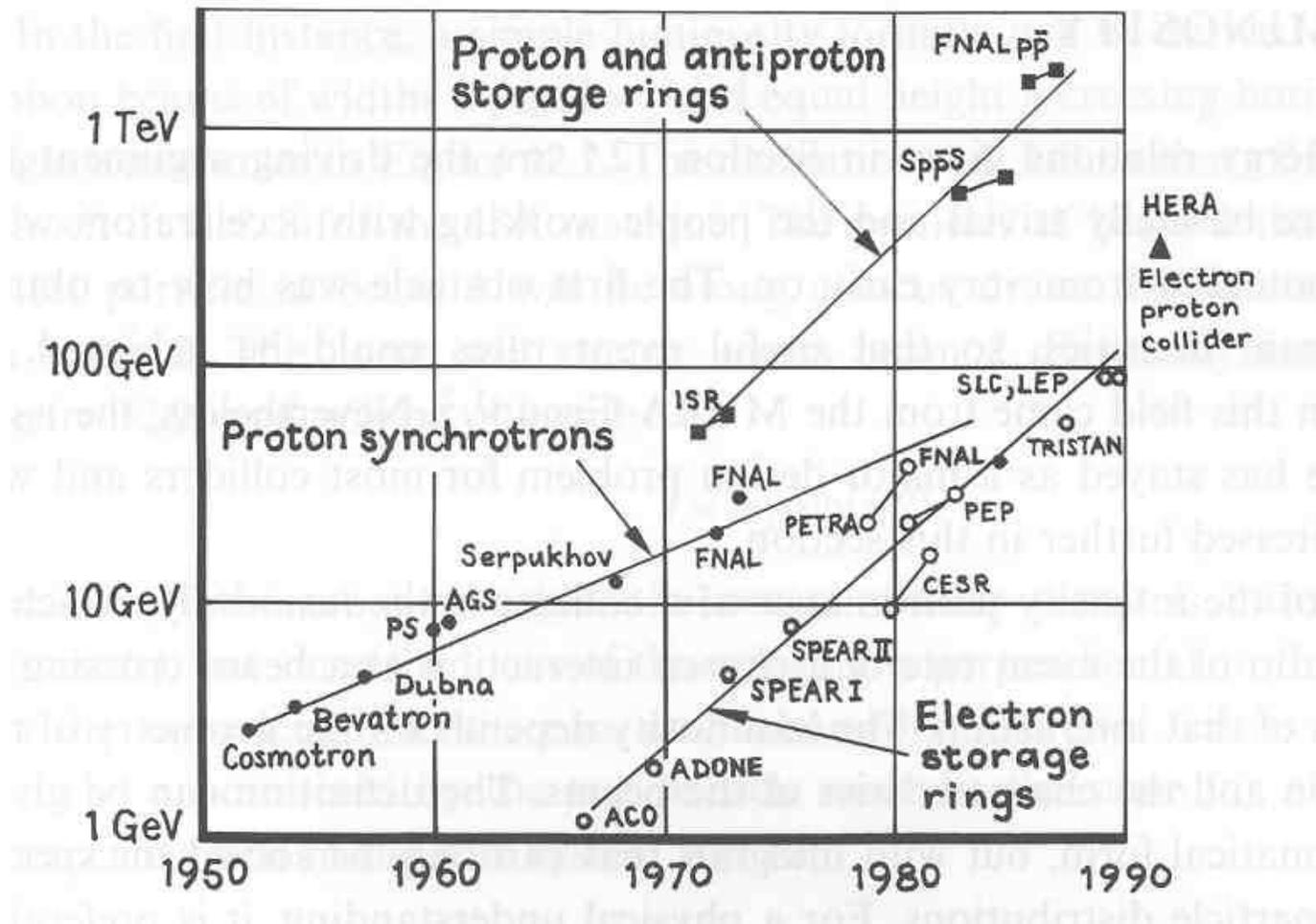
Im Fixed-Target Modus benötigte man dafür

$$E \approx \frac{s}{2m_p} = 2000 \text{ TeV}$$

Höchste Schwerpunktenergien lassen sich nur mit Collidern erzielen.



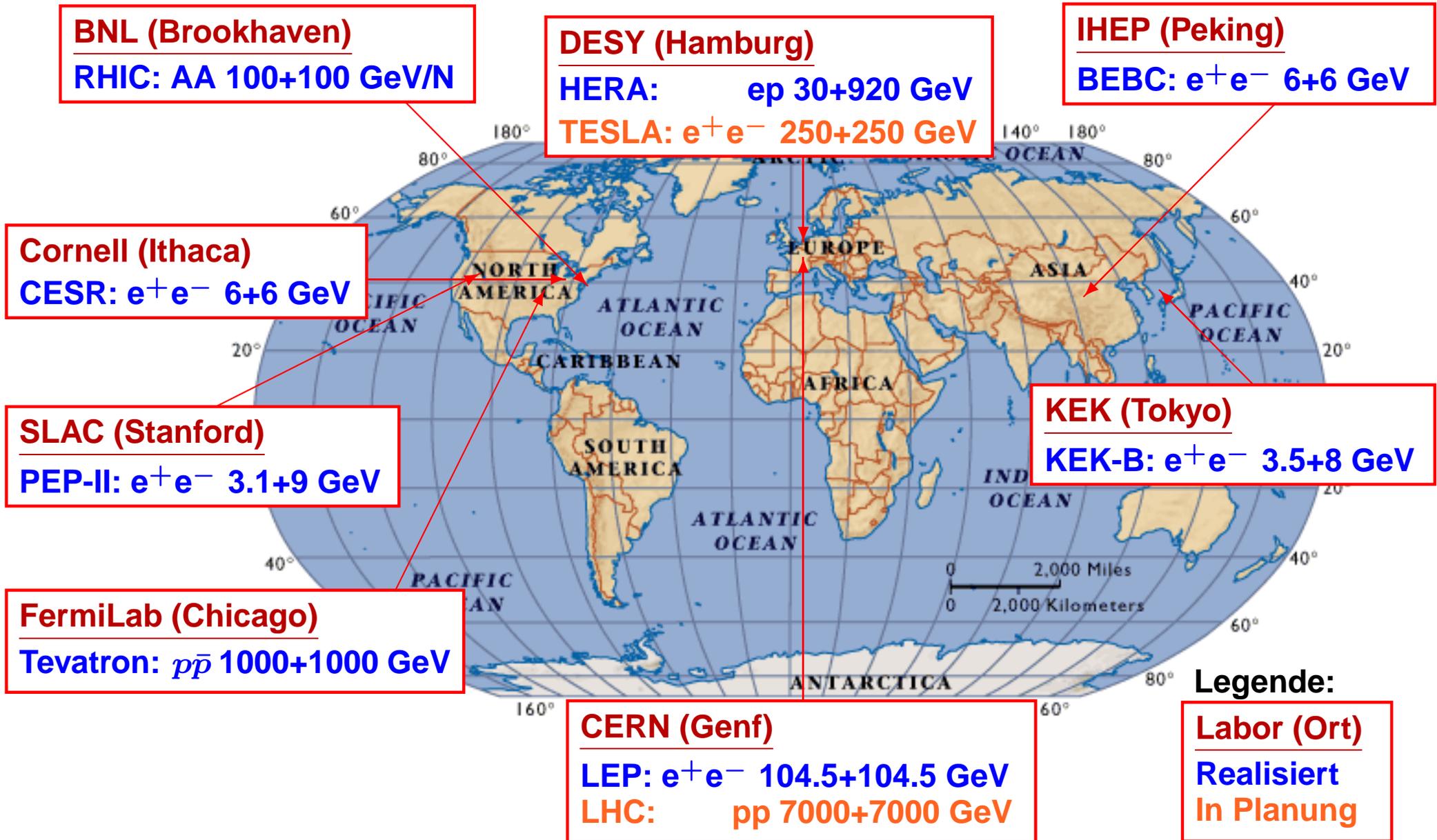
Auszug aus der Geschichte der Teilchenbeschleuniger



Es erfolgte eine kontinuierliche Weiterentwicklung von Hadron- und Elektronbeschleunigern über mehr als 70 Jahre.

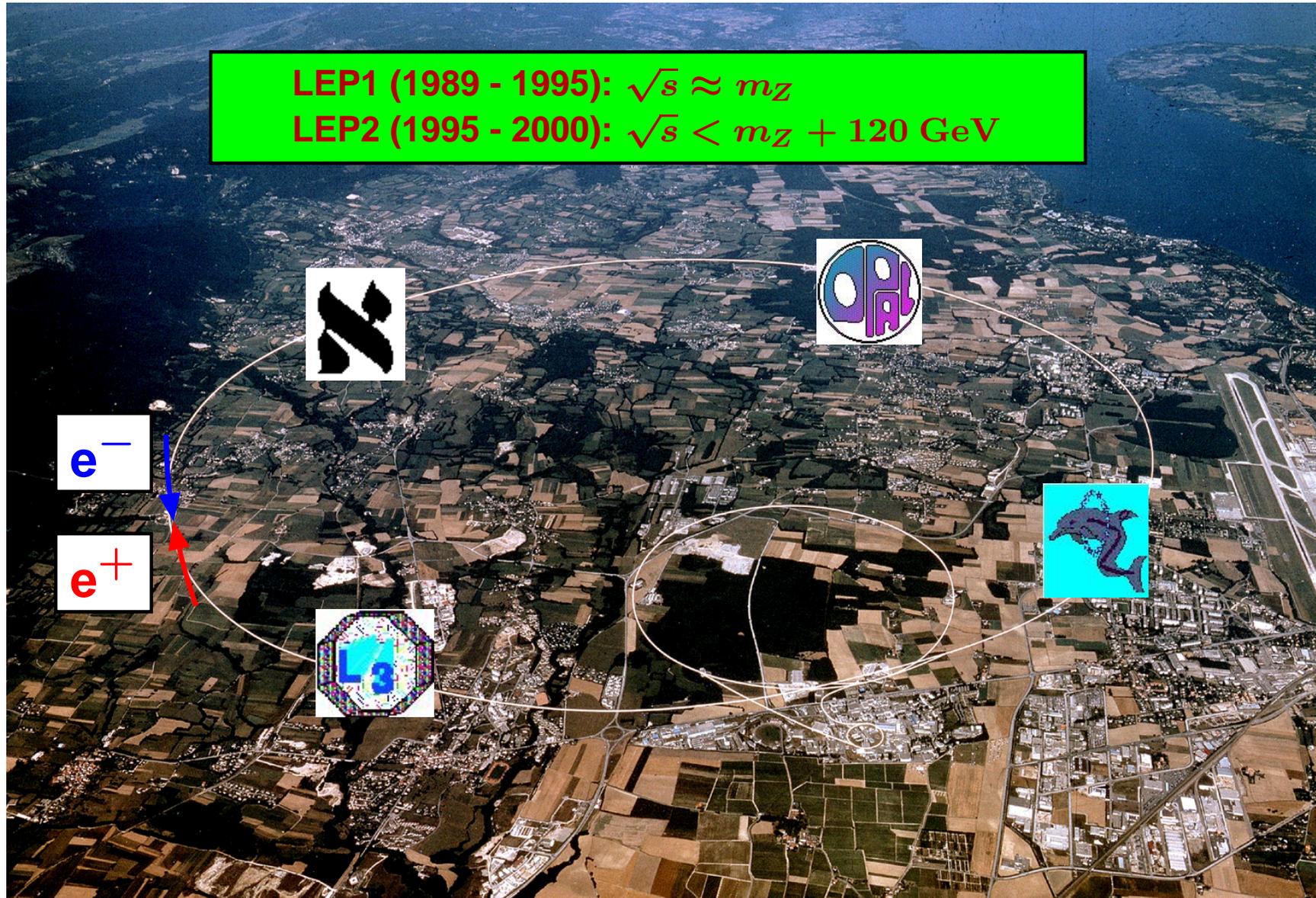


Auszug aus der Welt der Beschleuniger





Der Large Electron Positron Beschleuniger (LEP)

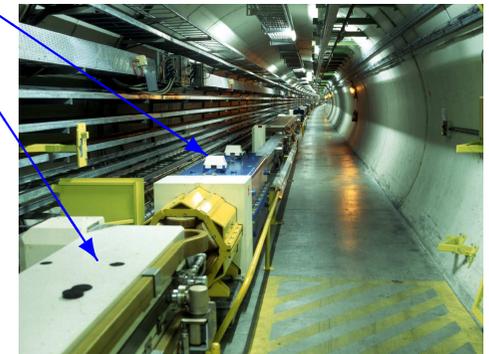
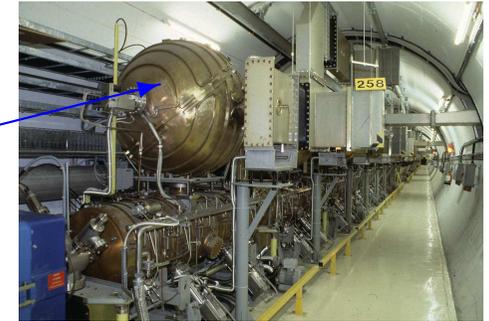
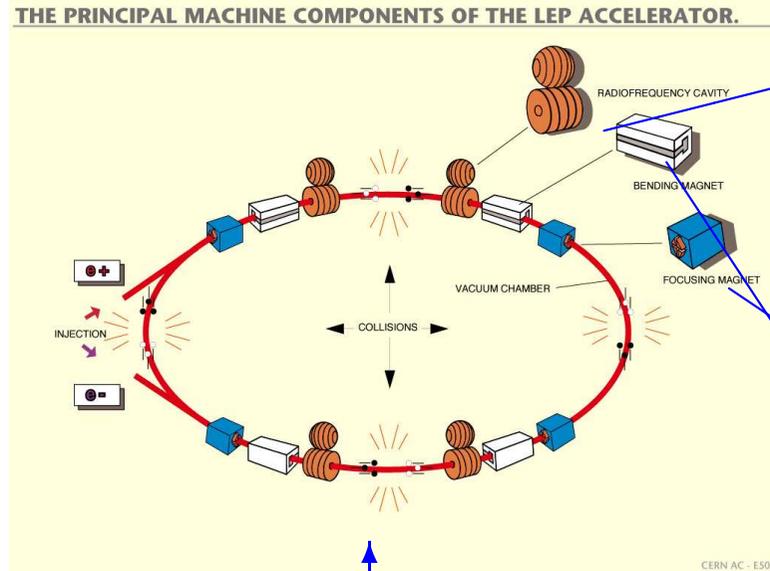




Einige Details zum LEP (1989 - 2000[†]) Beschleuniger

Technische Daten

Länge	26.7 km
Gradient	7.5 MV/m
Energie	104.5 GeV
N_{e^-}	10^{12}



Der Weg ist manchmal ganz schön lang.





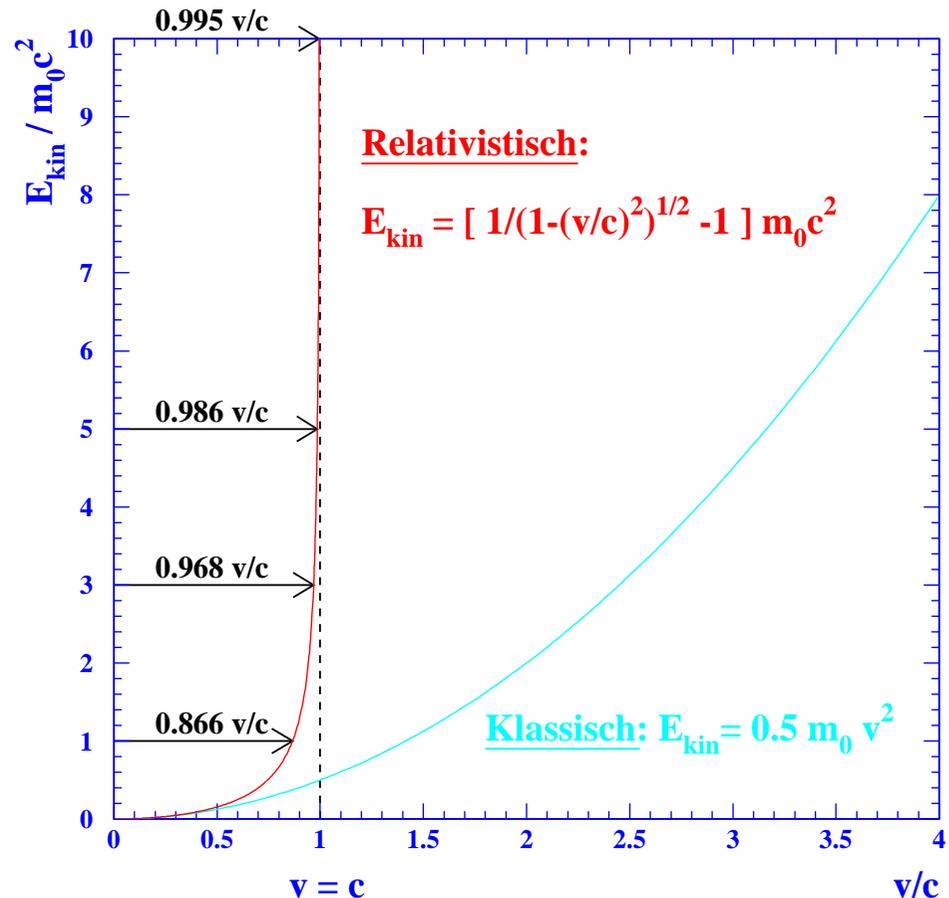
Ist ein Beschleuniger wirklich ein 'Beschleuniger'?

LEP: $E = 20 \rightarrow 100 \text{ GeV}$ in 900 s

Klassisch: $E_{\text{Kin}} = 0.5 m_0 v^2$
 $= 0.5 (v/c)^2 \cdot m_0 c^2$

Relativistisch: $E = mc^2 = m_0 \gamma c^2$
 $E = E_{\text{Ruhe}} + E_{\text{Kin}}$
 $E_{\text{Ruhe}} = m_0 c^2$

Wie steht es mit der Beschleunigung
20 GeV $v = 299792457.902 \text{ m/s}$
100 GeV $v = 299792457.996 \text{ m/s}$
 $c = 299792458 \text{ m/s}$

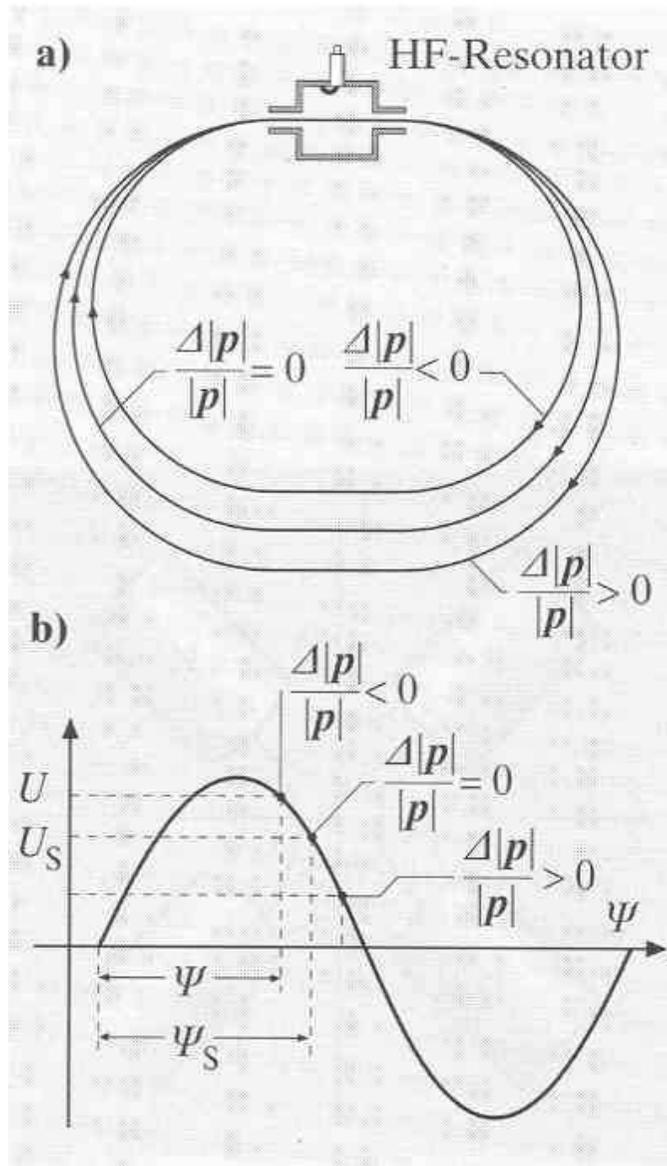


Resultat: $a_{\text{LEP}} = \frac{0.094 \text{ m/s}}{900 \text{ s}} \approx 0.0001 \text{ m/s}^2$, $a_{\text{Auto}} = \frac{100 \text{ km/h}}{10 \text{ s}} \approx 2.7 \text{ m/s}^2$

Ein Beschleuniger testet die Relativitätstheorie und ist eher ein Energiezuführer als ein Beschleuniger!



Die Synchrotronschwingungen



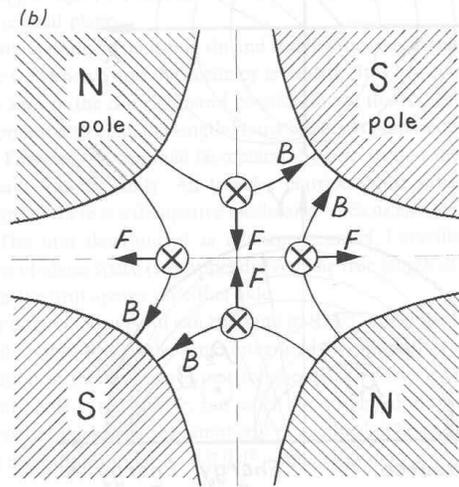
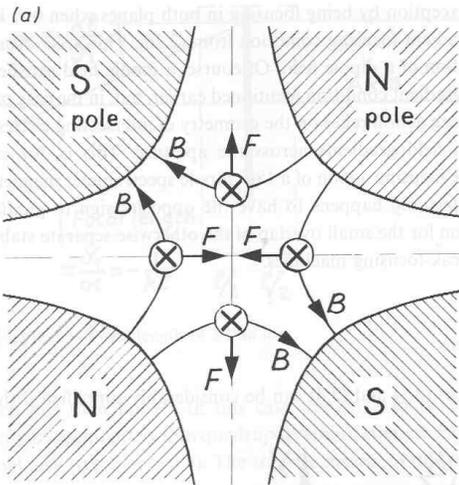
Selbststabilisation des Strahls

- Teilchen mit zu niedrigem Impuls, $\Delta p/p < 0$, laufen auf kürzeren Bahnen und kommen zu früh.
- Wer zu früh kommt - wird belohnt - sieht eine höhere Spannung und wird wieder an die Sollbahn herangeführt.
- Das Umgekehrte gilt für Teilchen mit zu großem Impuls, $\Delta p/p > 0$.

Die Teilchen führen Schwingungen um die Sollbahn durch - die Synchrotronschwingungen.



Alternating-gradient Fokussierung



$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = e \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ c \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} gy \\ gx \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -ecg_x \\ +ecg_y \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} dp_x/dt \\ dp_y/dt \\ dp_z/dt \end{pmatrix}$$

mit: $x' \equiv \frac{dx}{dz} = \frac{v_x}{v_z} = \frac{p_x}{|p|}$, $dt = \frac{dz}{c}$ folgt: $\frac{dp_x}{dt} = \frac{dx'|p|}{dz/c} = -ecg_x$

also: $x'' = \frac{dx'}{dz} = -\frac{eg}{|p|}x = -kx = \begin{cases} k > 0 & \text{(F)okussierend} \\ k < 0 & \text{(D)efokussierend} \end{cases}$

Abbildung: $\begin{pmatrix} x_2 \\ x'_2 \end{pmatrix} = M_X \begin{pmatrix} x_1 \\ x'_1 \end{pmatrix}$, $L = z_2 - z_1$

$M_F = \begin{pmatrix} \cos \Omega & 1/\sqrt{|k|} \sin \Omega \\ -\sqrt{|k|} \sin \Omega & \cos \Omega \end{pmatrix}$ mit $\Omega = \sqrt{|k|}L$

$M_{\text{Drift}} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $M_D = \begin{pmatrix} \cosh \Omega & 1/\sqrt{|k|} \sinh \Omega \\ \sqrt{|k|} \sinh \Omega & \cosh \Omega \end{pmatrix}$

Bei geeigneter Wahl der Parameter wirkt ein System alternierender Quadrupole $M = M_F M_{\text{Drift}} M_D$ fokussierend.



Die Luminosität

- Die Luminosität ist die Beschleuniger-Eigenschaft, die die mögliche Ereignisrate bestimmt.
- Spezifische Luminosität: $\mathcal{L} = \frac{f N_1 N_2}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$ mit $I_i = q n_b n_i f_b \Rightarrow \mathcal{L} = \frac{I_1 I_2}{4\pi q^2 f_b n_b \sigma_x \sigma_y}$
- Aus der integrierten Luminosität, $L = \int \mathcal{L} dt$, folgt die Ereignisrate $N = \sigma \cdot L$, wobei der Wirkungsquerschnitt σ in barn, $1b = 10^{-28} m^2$, angegeben wird, ($1pb = 10^{-12} b$).



Ein Beispiel - PEP II am SLAC

- $E_{e^+} = 3.1 \text{ GeV}, E_{e^-} = 9 \text{ GeV}$
- $\sigma_x \approx 5 \mu m, \sigma_y \approx 150 \mu m, f = 1.37 \cdot 10^5 / s$
 $n_b \approx 900, I = 1.5(0.9) \text{ A}$ für $e^+(e^-)$.
- $\mathcal{L}_{\max} \approx 5 \cdot 10^{33} / cm^2 s = 5 \cdot 10^{-3} / pb s$.
- Das gibt 5 Ereignisse in 1000 s für einen Prozess mit einem Wirkungsquerschnitt von $\sigma = 1 pb$.

Hohe Luminosität erfordert viele Teilchen und kleine Strahlquerschnitte.



Synchrotronstrahlung

- Jedes beschleunigte geladene Teilchen der Masse m_0 strahlt Photonen ab.
- Liénard-Wichert: $P_\gamma = \frac{2}{3} r_e m_e c \gamma^6 \left\{ \left(\frac{d\vec{\beta}}{dt} \right)^2 - \left[\vec{\beta} \times \frac{d\vec{\beta}}{dt} \right]^2 \right\}$
- Die Aufteilung in $\beta_{||}$ und β_{\perp} bzw. $p_{||}$ und p_{\perp} liefert $P_\gamma = \frac{2r_e}{3m_0c} \left\{ \left(\frac{dp_{||}}{dt} \right)^2 + \left(\frac{\gamma dp_{\perp}}{dt} \right)^2 \right\}$
- Die Strahlung auf Grund der Impulsänderung in Bewegungsrichtung ist unterdrückt. Der Hauptanteil kommt von der Querschleunigung.
- Die Strahlungsleistung ist: $P_\gamma = \frac{2}{3} r_e m_e c^3 \frac{(\beta\gamma)^4}{r^2}$
- Die Strahlung ist proportional zu $\beta\gamma = \frac{p}{m_0}$, d.h. $\frac{P_{\gamma,p}}{P_{\gamma,e}} = \frac{m_e^4}{m_p^4} \approx 10^{-13}$ bei gleicher Energie.

Beispiele:

Maschine	E [GeV]	r [m]	ΔE_{turn} [GeV/Teilchen]	P_γ , [MW/Strahl]	N_γ [1/s]
LEP e^+e^-	100	3096	-2.86	8.57	$2 \cdot 10^{14}$
LHC pp	8000	2669	-0.0119	0.0103	$1 \cdot 10^{13}$

Riesige Verlustleistung bei LEP \Rightarrow höhere Energien erfordern einen Linearbeschleuniger.



Die Hadron Elektron Ring Anlage (HERA)

Beschleunigerkomplex



HERA-Tunnel



Heliumverflüssiger



- Umfang: 6336 m, Teilchenenergien: $E_p(E_e) = 920(30) \text{ GeV} \Rightarrow \sqrt{s} = 332 \text{ GeV}$, Luminosität: $\mathcal{L} = 1.4 \cdot 10^{31} / \text{cm}^2 \text{ s}$, Magnetfeld: $B_e(B_p) = 0.274(4.65) \text{ Tesla}$.
- So hohe Magnetfelder lassen sich nur mit supraleitenden Magneten erreichen. Dies erfordert die Produktion von flüssigem Helium zur Kühlung der Magneten auf ca. 3K.

Der einzige ep-Beschleuniger und der erste Beschleuniger mit supraleitenden Magneten.



Der Proton-Antiproton Beschleuniger Tevatron

Ein paar Details



	Run I 1992 - 1996	Run II 2001 - 20xx
Umfang [km]	6.4	6.4
$E_{p,\bar{p}}$ [TeV]	0.9	0.98
Teilchenpakete	6x6	140x103
N_p/Paket [10^{11}]	2.3	2.7
$N_{\bar{p}}/\text{Paket}$ [10^{11}]	0.55	1.0
\mathcal{L}_{int} [fb^{-1}]	0.11	10-30

Das Tevatron ist zur Zeit der Beschleuniger mit der höchsten Schwerpunktsenergie.



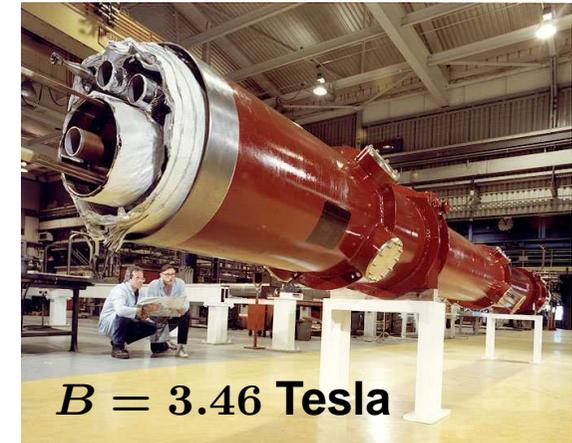
Der Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)

Der Beschleunigerkomplex



- Umfang: 3.9 km
- Energie: $E = 100 \text{ GeV/Nukleon}$

Ein Magnet



In 2003 - Deuteron auf Gold

- Reaktion: ${}^2_1\text{H}^{+2} + {}^{197}_{79}\text{Au}^{+79} \rightarrow X$
- 110 bunches mit N_x/bunch von $N_{\text{H}} = 6 \cdot 10^{10}$ und $N_{\text{Au}} = 8 \cdot 10^8$
- Luminosität: $\mathcal{L} = 6 \cdot 10^{27} / \text{cm}^2 \text{ s}$

Ein idealer Platz zur Untersuchung der Schwerionenphysik, z.B. Quark-Gluon-Plasma.



Der LHC - ein Proton-Proton Beschleuniger (2007⁺⁺)

Alice

Schwere Kerne, ...

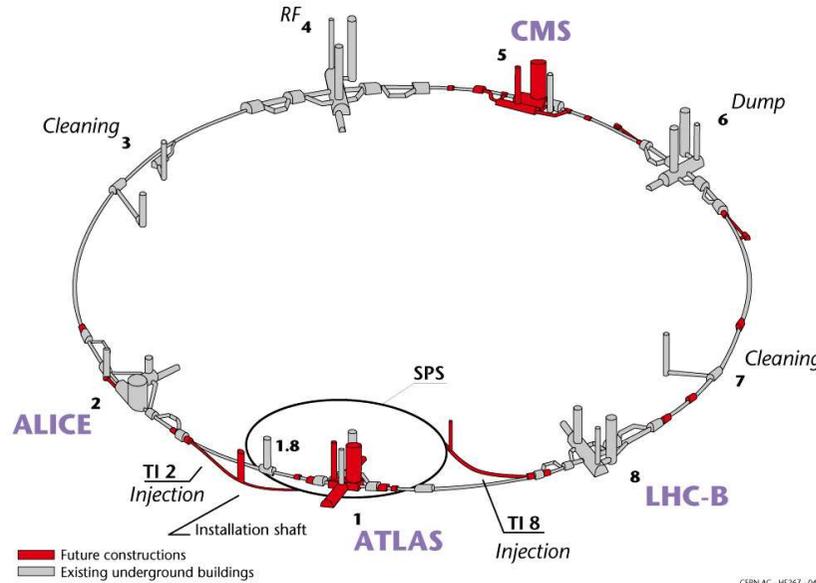
LHC-B

Materie ↔ Antimaterie,
...

ATLAS / CMS

Higgs Produktion, ...

Das Herzstück des LHC - die supraleitenden Magnete



Technische Daten

$L = 26.7 \text{ km}$
 $E_p = 7 \text{ TeV}$
 $N_p = 1.1 \cdot 10^{11} / \text{Strahl}$

Lumi Erwartungen

$10 \text{ fb}^{-1} / \text{a}$ beim Start
 $100 \text{ fb}^{-1} / \text{a}$ nominal



Länge	15 m
Gewicht	23.8 t
B-Feld	8.3 T
Temperatur	1.9 K
Strom	12000 A
Energie	7.1 MJ



Bauarbeiten für ATLAS - die Schächte

Der Bauplan: Man nehme viel Platz,...



...grabe zwei tiefe Löcher...



Ein paar Daten

- Durchmesser: 12.6 und 18 m
- Tiefe: 60 m (Augsburger Dom)
- Baubeginn: 1998, während LEP läuft !
- Fertigstellung: 2002



Bauarbeiten für ATLAS - die Kaverne

...bringe schweres Gerät hinunter...



...und schachte eine Kaverne aus.



Ein paar Schwierigkeiten auf dem Weg

- Durch das fehlende Gestein der Schächte hebt sich der LEP-Ring lokal um etwa 4 cm.
- Damit der Beschleunigerring nicht bricht, muß er nachjustiert werden.
- Kaverne: $L \times B \times H = 53 \times 30 \times 35 \text{ m}^3$ ($L \times B$ = Doppelturnhalle, H = Augsburger Rathaus).

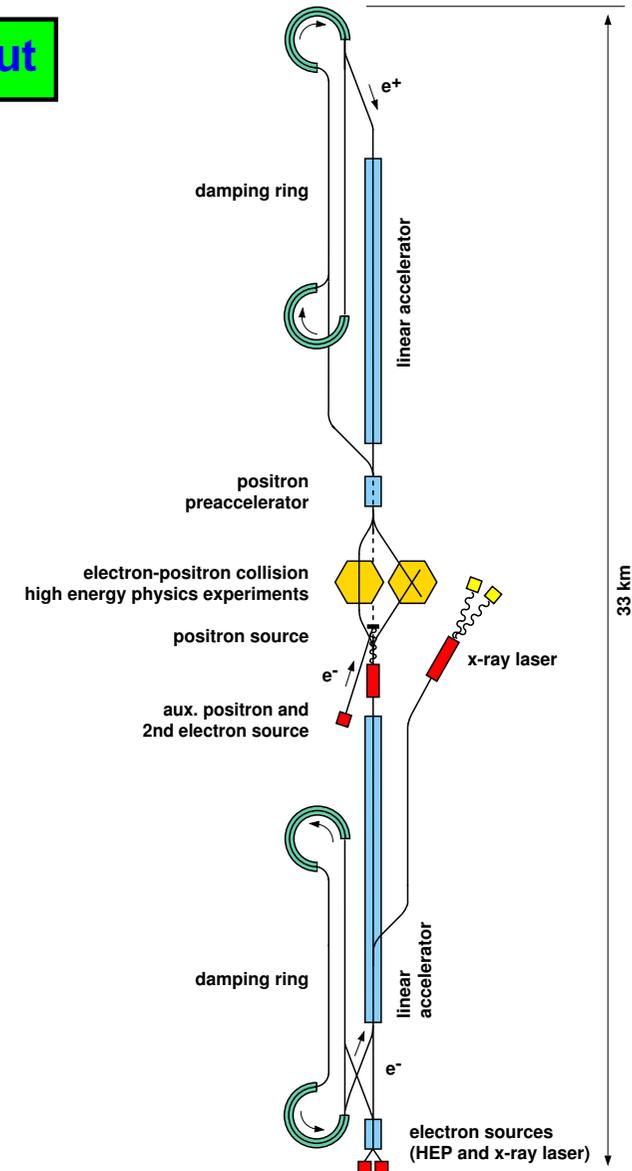


Das TESLA Projekt - der Plan

Die Lage



Das Layout



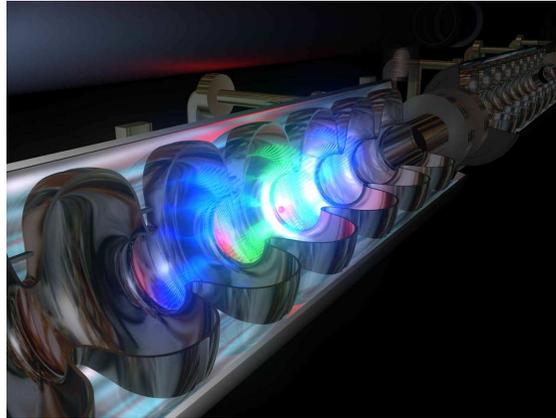
Technische Daten

Länge	33 km
Gradient	23.4 MV/m
E_e	250 GeV
N_e	$2 \cdot 10^{10}$ /Paket
N_{Paket}	2820
Kavitäten	21000
Luminosität	$3.4 \cdot 10^{34}$ /cm ² s

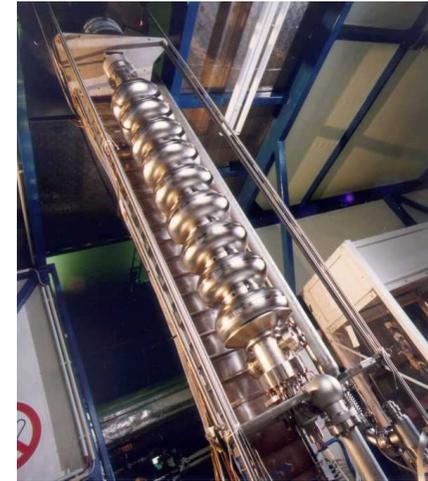


Das TESLA Projekt - die Entwicklungsarbeiten

Es ist ein langer Weg von der Prinzipskizze



über die Kavität



und die Tesla Test Facility



zum engültigen Beschleuniger.

Die Bauzeit, gerechnet ab dem Tag X, beträgt 8 Jahre.



Zusammenfassung

- Beschleuniger werden seit 1932 zur Untersuchung elementarer Teilchen eingesetzt.
- Die ersten Experimente waren Fixed-Target Experimente an Beschleunigern, in denen die Beschleunigungsstrecke nur einmal durchlaufen wurde.
- Heute sind die meisten Beschleuniger Speicherringe, in denen Teilchen-Antiteilchen Paare, e^+e^- oder $p\bar{p}$, zur Kollision gebracht werden. Es gibt aber auch Elektron-Proton- und Nukleon-Nukleon Beschleuniger.
- Die heute erreichten Schwerpunktsenergien sind 209 GeV und 2000 GeV für e^+e^- und $p\bar{p}$ Beschleuniger.
- Die wesentlichen Limitierungen der Speicherringe sind die Synchrotronstrahlung für Elektron-Maschinen und das erreichbare Magnetfeld für Proton-Maschinen.
- Maschinen mit wesentlich höheren Schwerpunktsenergien sind in Bau oder Planung. Der Linear Collider für 500-1000 GeV e^+e^- -Kollisionen ist in Planung und der Large Hadron Collider für 14000 GeV pp -Kollisionen ist bereits im Bau.