



-
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

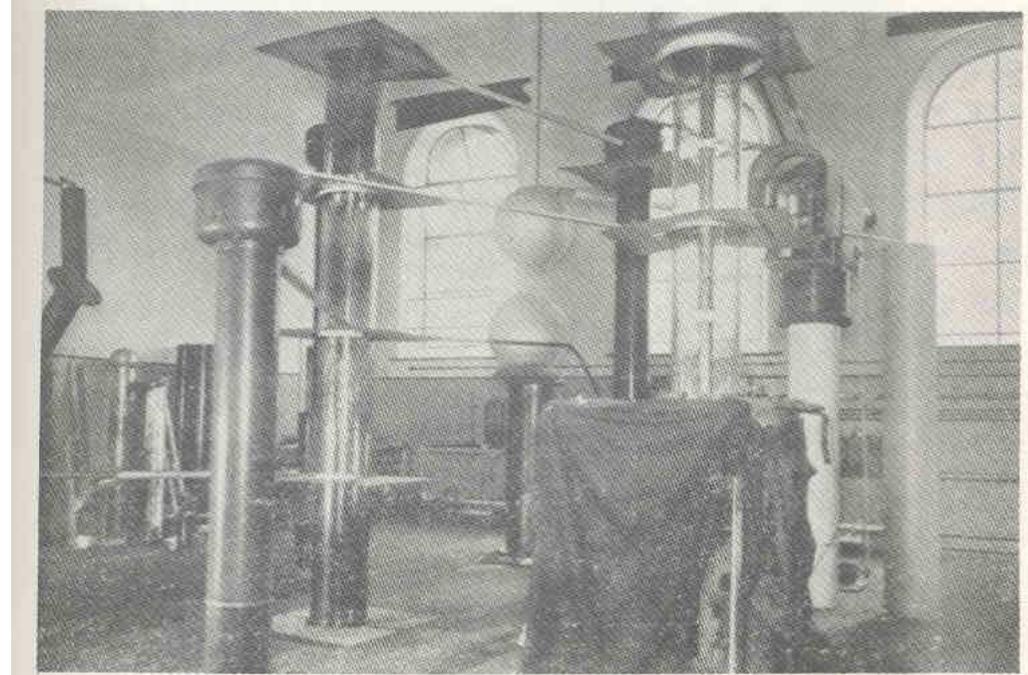
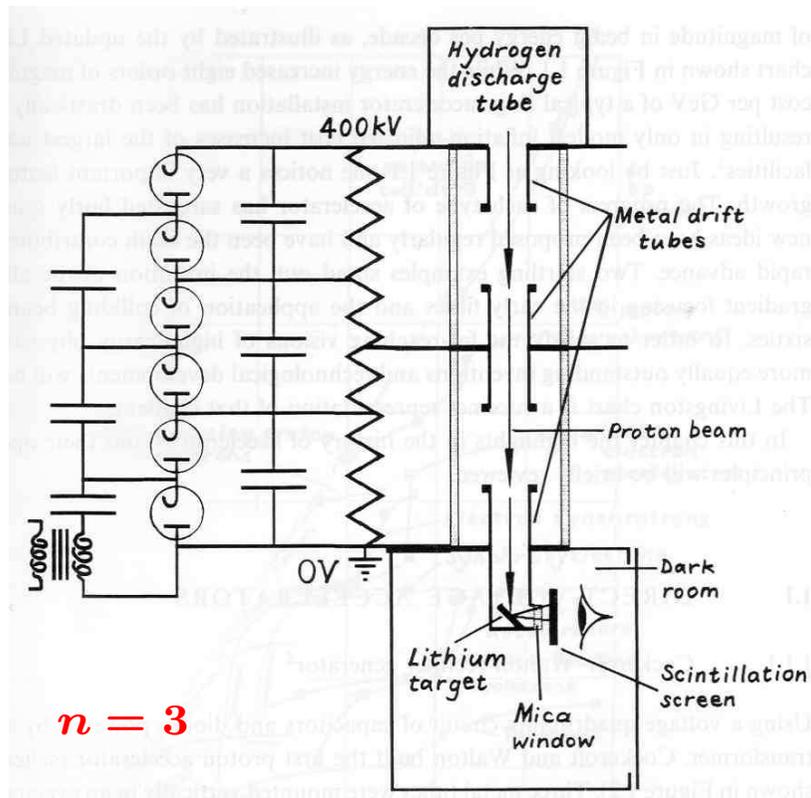


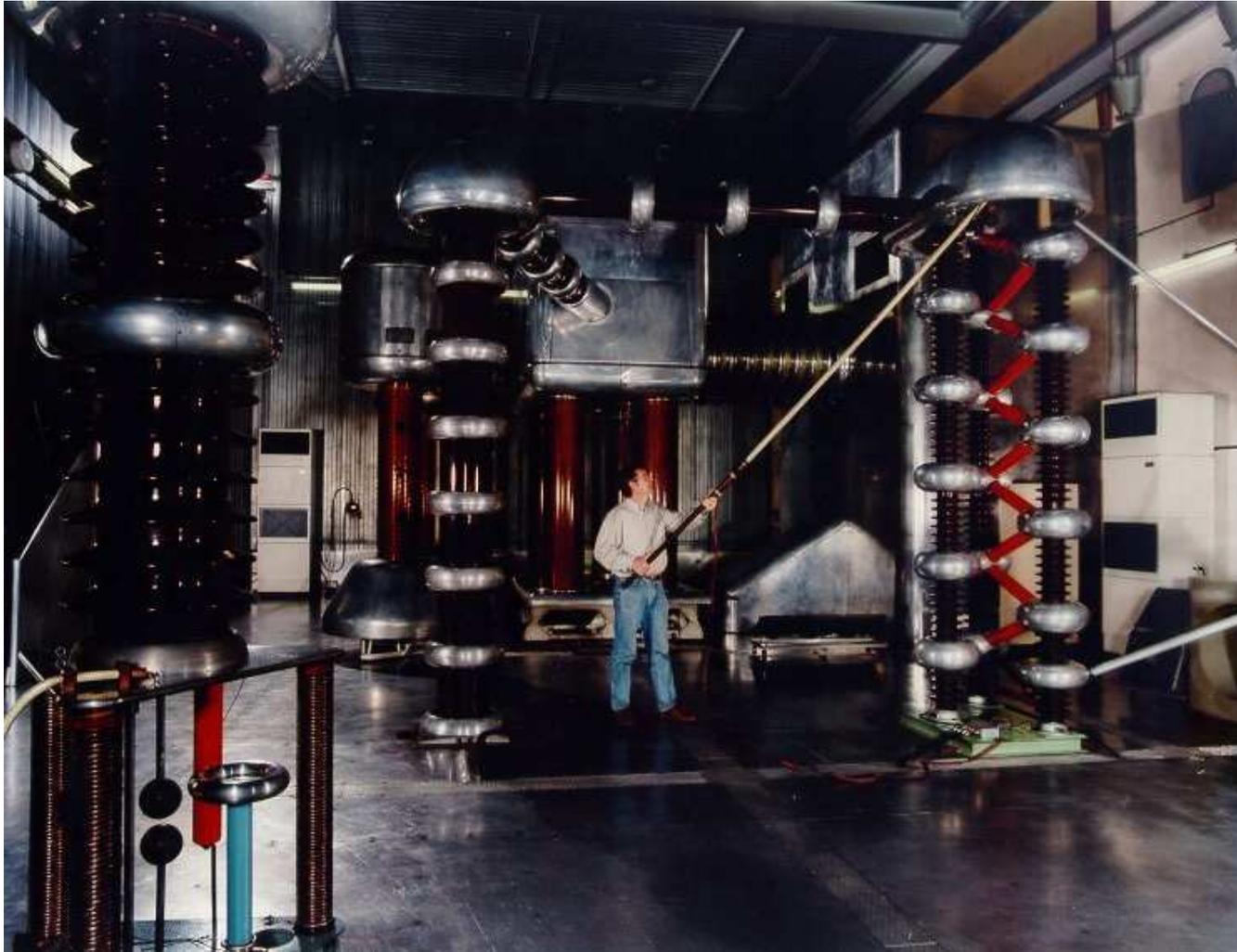
FIG. 2. Voltage multiplier with which Cockcroft and Walton achieved nuclear disintegration in 1932.

- 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 Überschlägen 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



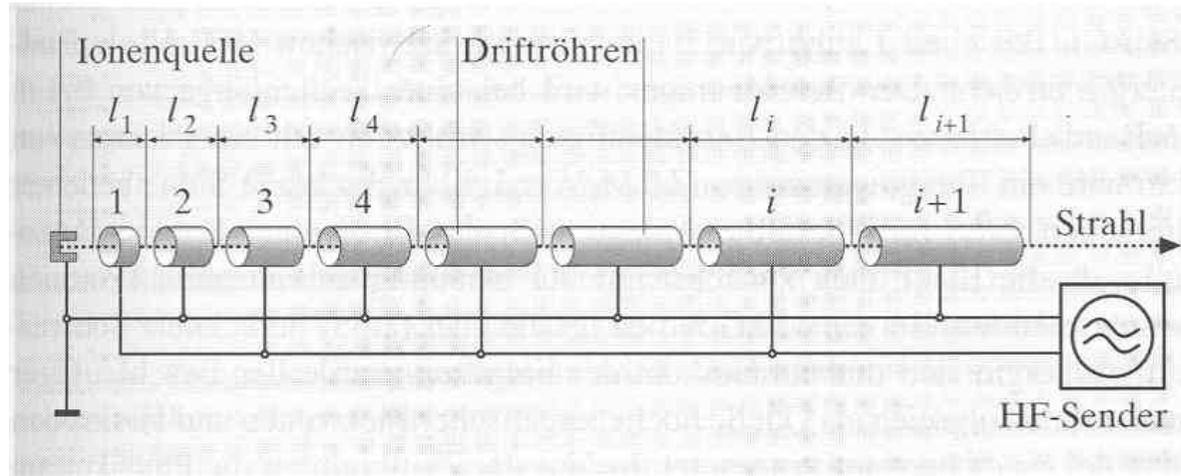
ISIS
Rutherford Lab
Oxford
 $E_{H^-} = 665\text{keV}$

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

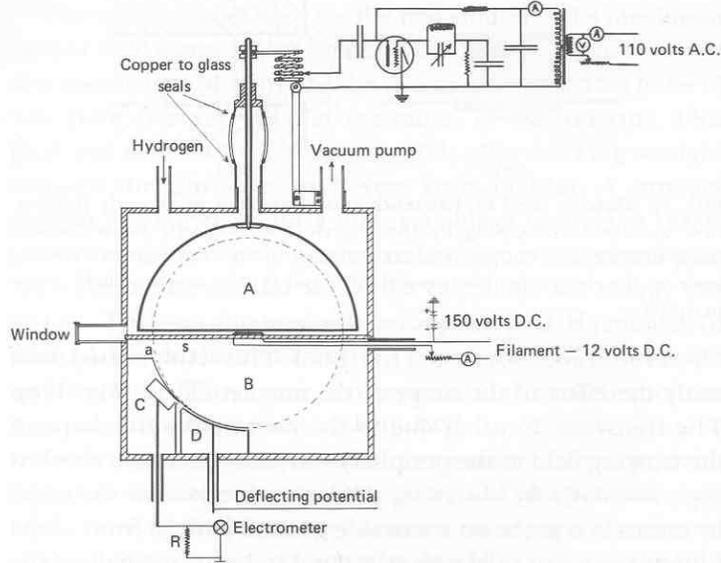


FIG. 13. Diagram of the vacuum chamber for the 1.2-MeV cyclotron built by Lawrence and Livingston at the University of California in 1931. See also Fig. 7.

– Nicht relativistisch:

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

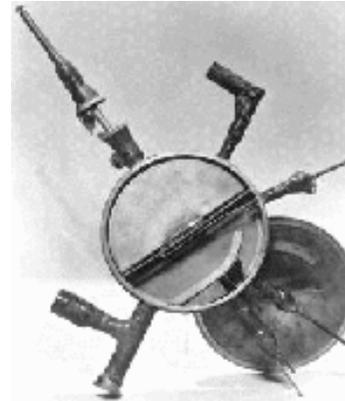
$$\Rightarrow R = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}$$

– Die Zyklotronfrequenz

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

ist unabhängig vom Impuls!

Das erste Zyklotron



Livingston (1932)

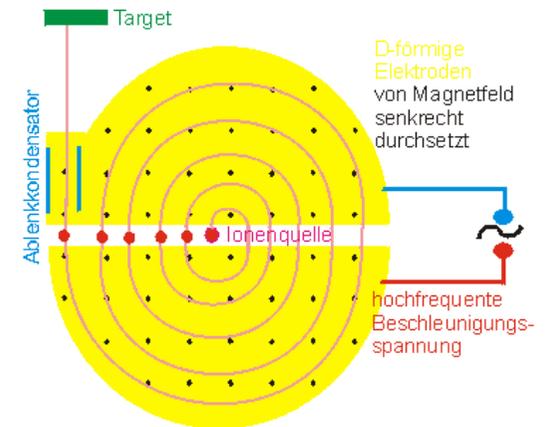
– $B = 0.52 \text{ T}$, H_2^+ -Ionen

$$\Rightarrow f_z \approx 4 \text{ MHz}$$

– ca. 40 Umläufe \Rightarrow

Endenergie 13 keV

A Zyklotron at work



– Limitiert zu:

$$E_p < 20 \text{ MeV}$$

$$E_\alpha < 70 \text{ MeV}$$

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

Schwerpunktsenergie 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

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

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



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

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

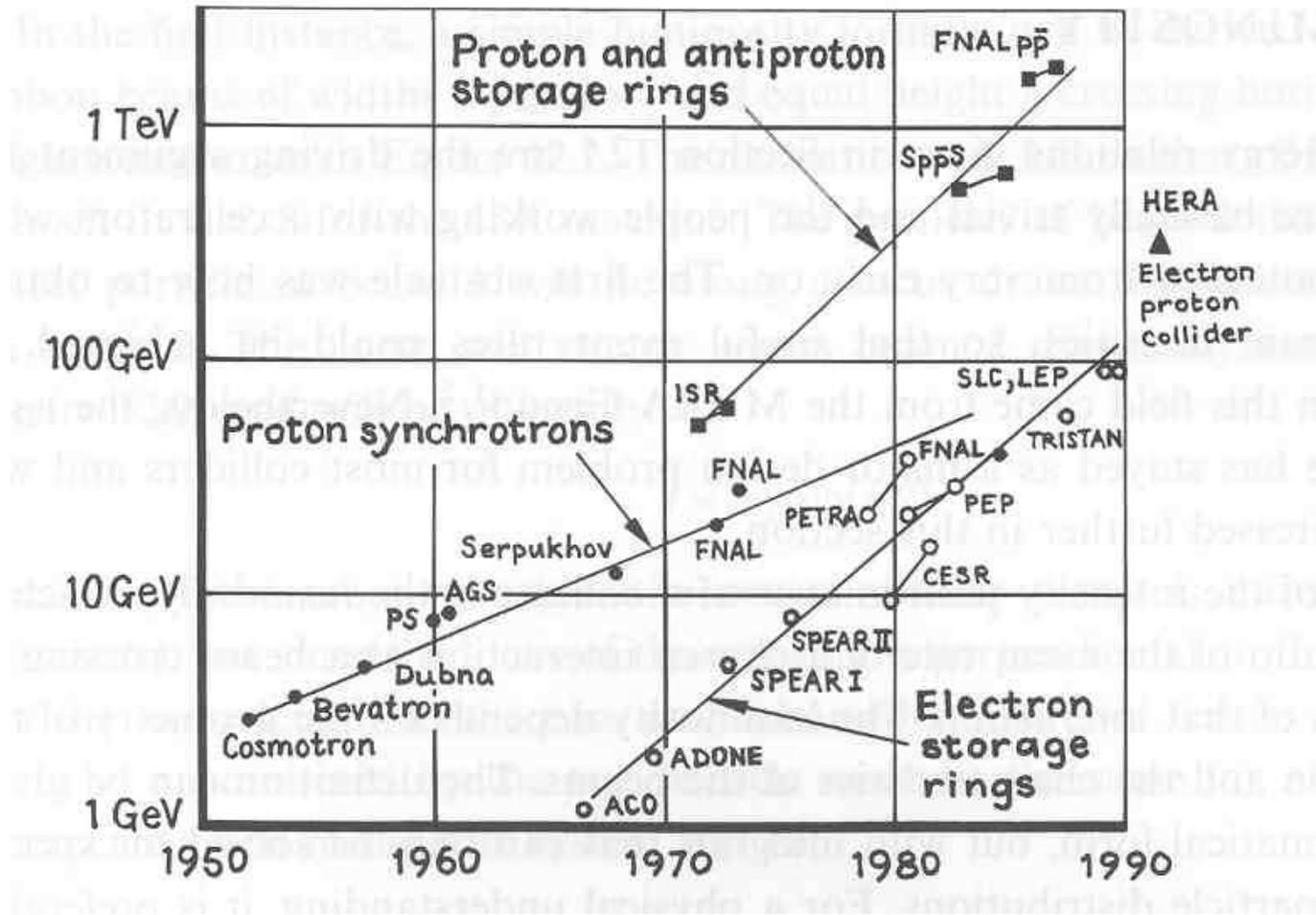
Im Fixed-Target Modus benötigte man dafür

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

Höchste Schwerpunktsenergien lassen sich nur mit Collidern erzielen.



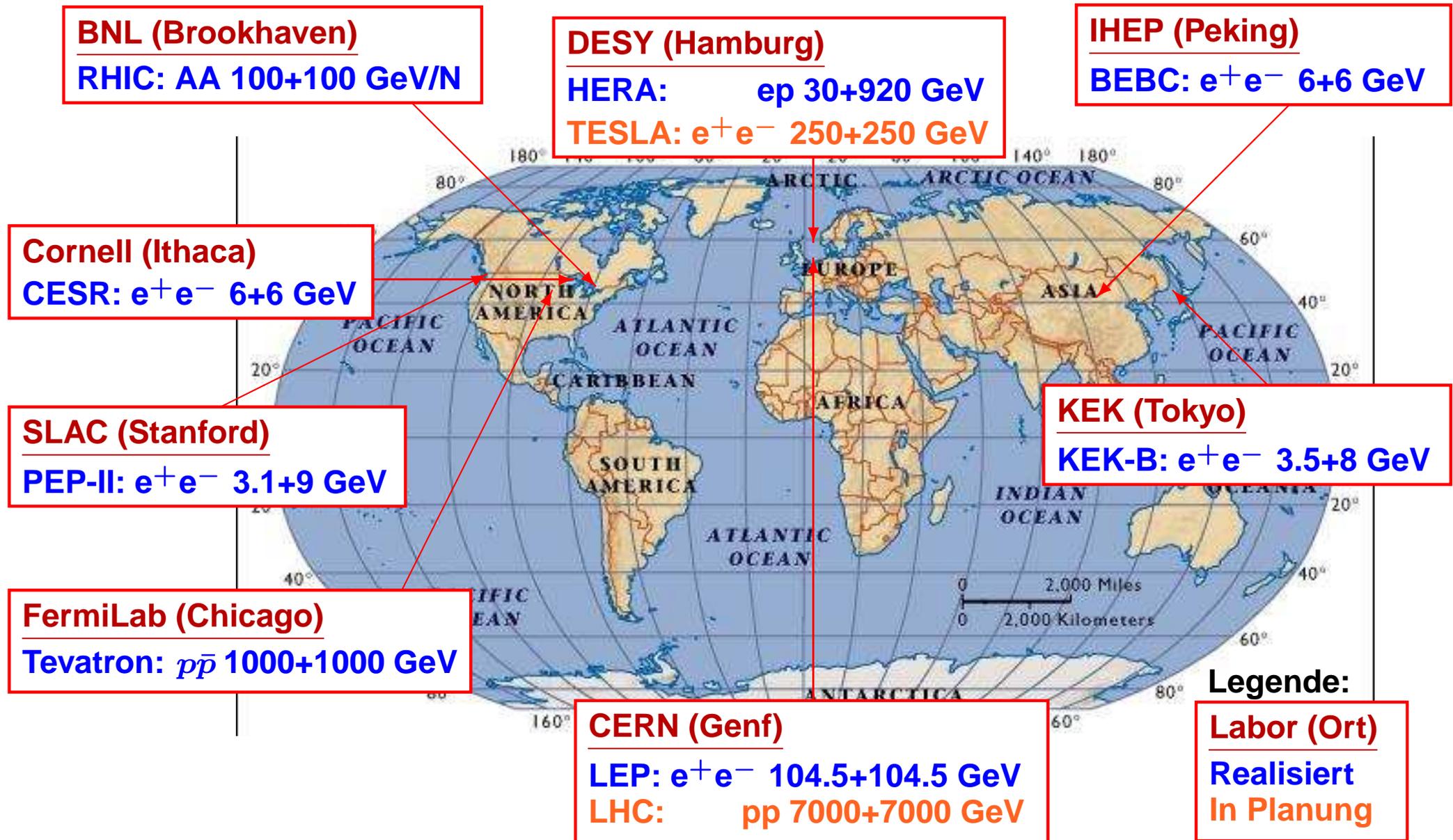
Auszug aus der Geschichte der Teilchenbeschleuniger



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

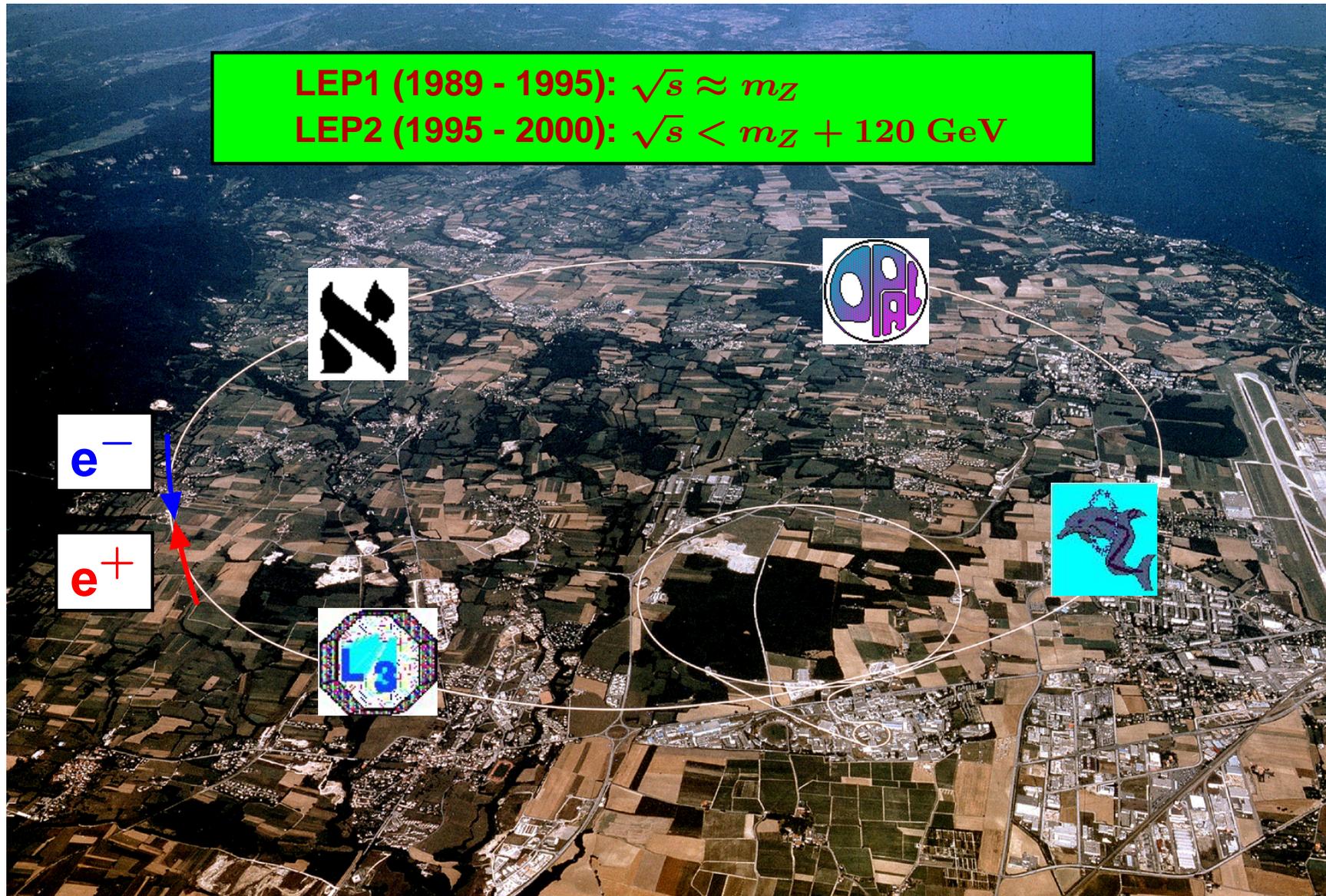


Auszug aus der Welt der Beschleuniger





Der Large Electron Positron Beschleuniger (LEP)

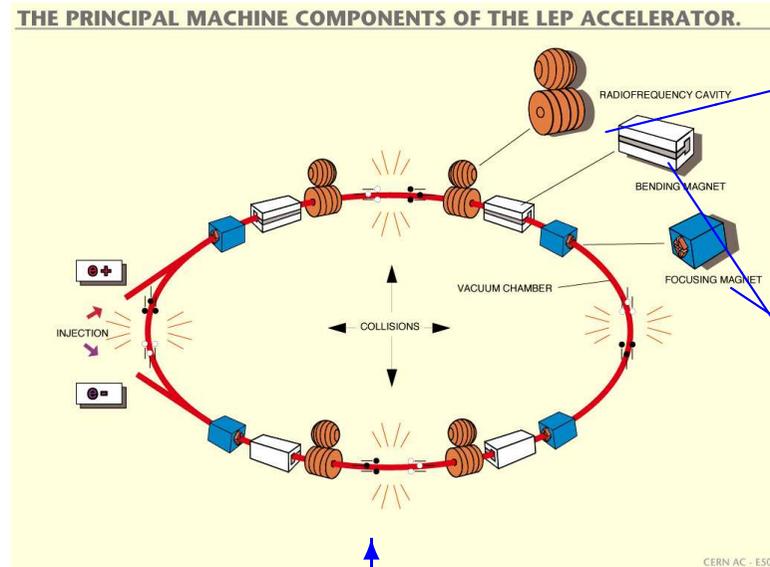




Einige Details zum LEP (1989 - 2000[†]) Beschleuniger

Technische Daten

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



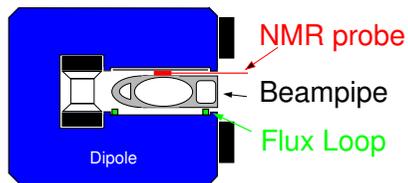
Der Weg ist manchmal ganz schön lang.



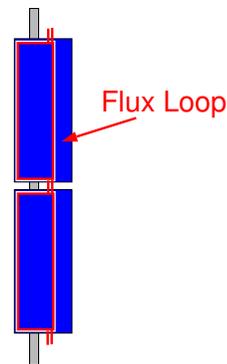
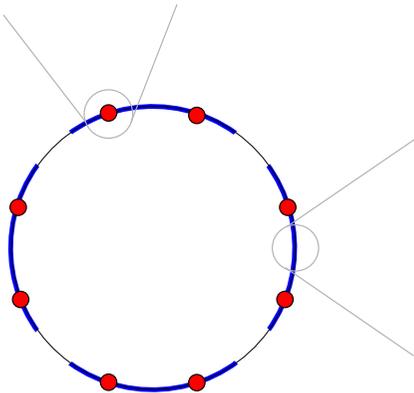


Die Bestimmung der Strahlenergie bei LEP, oder ...

- Die Energie lässt sich durch resonante Depolarisation des Elektronstrahls sehr genau messen $f_{\text{depol}} = \left(\frac{g_e - 2}{2m_e c^2} \right) \cdot E_b$. Dies liefert $\sigma_{E_b} = 0.2 \text{ MeV}$.
- Diese Methode funktioniert aber nur ohne Strahlkollisionen. Die Bestimmung der Energie während Strahlkollisionen erfordert eine Extrapolation unter genauer Kenntnis des B-Felds.
- Die Länge der Umlaufbahn ist durch die Frequenz der Beschleunigerelemente festgelegt. Die Energie bestimmt sich durch das integrale Magnetfeld senkrecht zur Teilchenbahn pro Umlauf.



- Das Magnetfeld wird mit NMR Proben gemessen und der Ort des Teilchendurchgangs durch elektrostatische Strahlmonitore.
- Die Sensitivität der Strahlenergie auf äußere Effekte ist so groß, dass kleinste Effekte wahrgenommen werden können.



Beispiele sind:

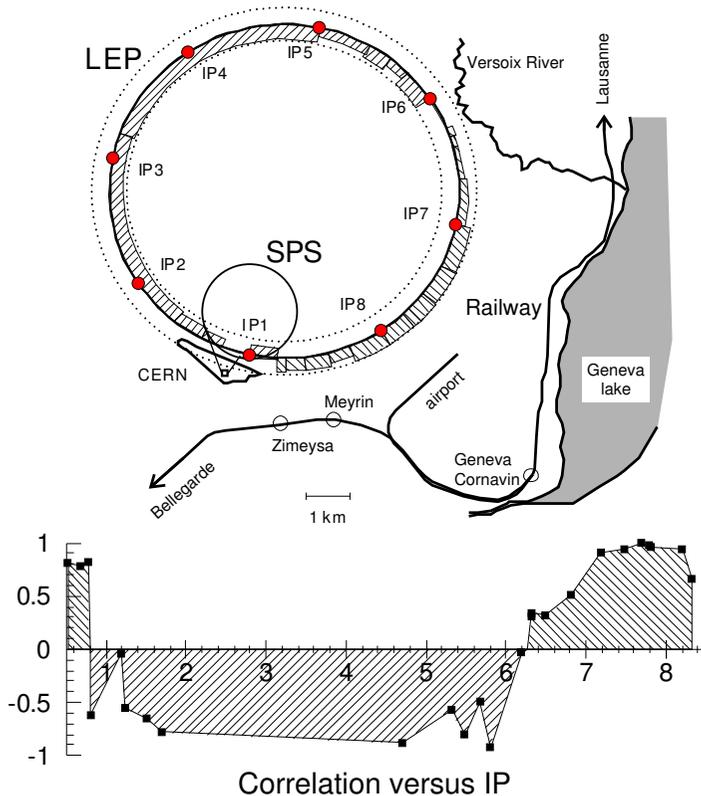
- Die Variation der Gravitation bei der Mondbewegung
- Verlustströme der französisch-schweizerischen Eisenbahnen.

Die genaue Kenntnis des B-Felds ist unabdingbar.

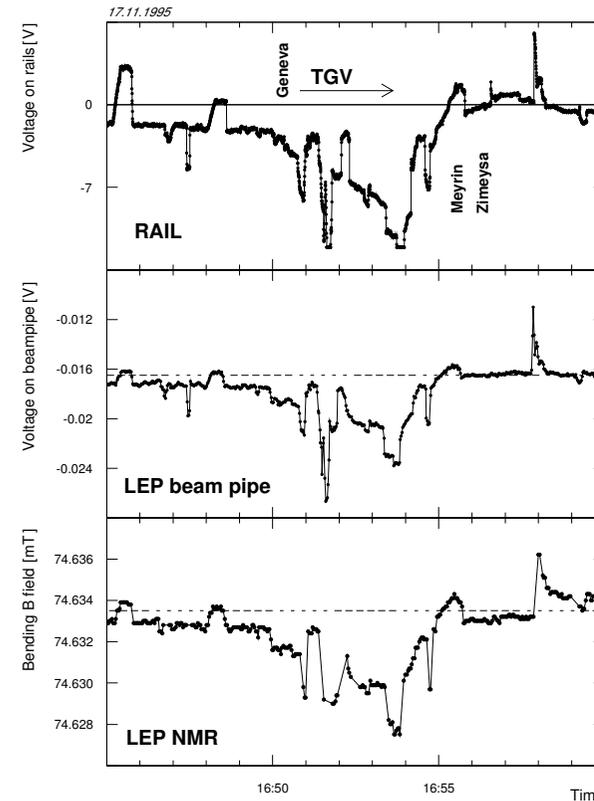


... und von schnellen Zügen

— Der Streckenplan für Elektronen ...



... und der des **T**rain à **G**rande **V**itesse.



— Bei der Rückführung des Antriebsstroms der Züge über die Bahngleise gibt es Verluste die als parasitäre Ströme über den LEP-Ring laufen. Diese Ströme (ca. 1A bei 2000A Magnetstrom) stören die Magnetisierung der Dipolmagnete und ändern deren Magnetfeld.

Der LEP Beschleuniger ist ein etwas unhandlicher Zugfahrplan für Reisende aus Genf.



Ist ein Beschleuniger wirklich ein 'Beschleuniger'?

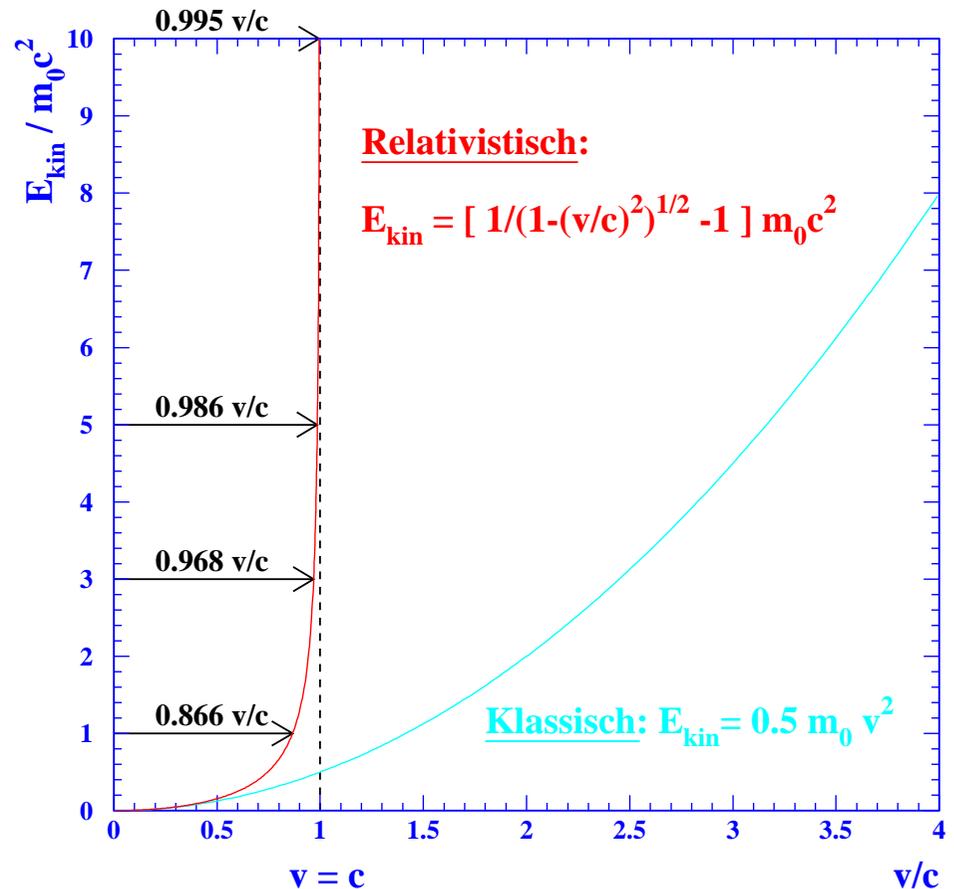
LEP: $E = 20 \rightarrow 100 \text{ GeV}$ in 900 s

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 $v = 299792457.996 \text{ m/s}$
 $c = 299792458 \text{ m/s}$

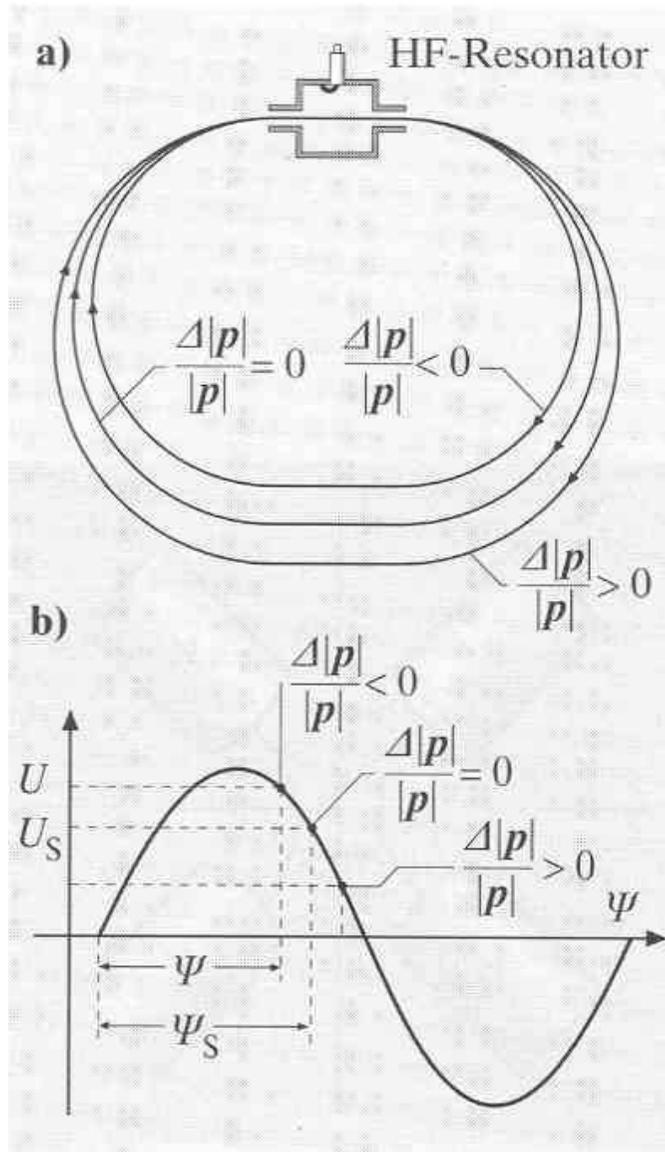
Resultat: $a_{\text{LEP}} = \frac{0.094 \text{ m/s}}{900 \text{ s}} \approx 0.0001 \text{ m/s}^2$, $a_{\text{Auto}} = \frac{100 \text{ km/h}}{10 \text{ s}} \approx 2.7 \text{ m/s}^2$



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



Die Synchrotronschwingungen



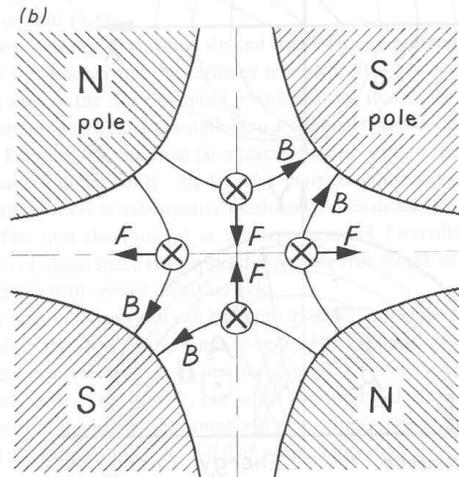
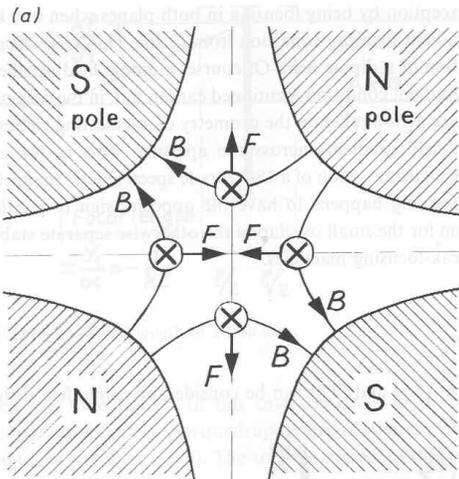
Selbststabilisation des Strahls

- 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



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

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

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 $\Omega = \sqrt{|k|}L$

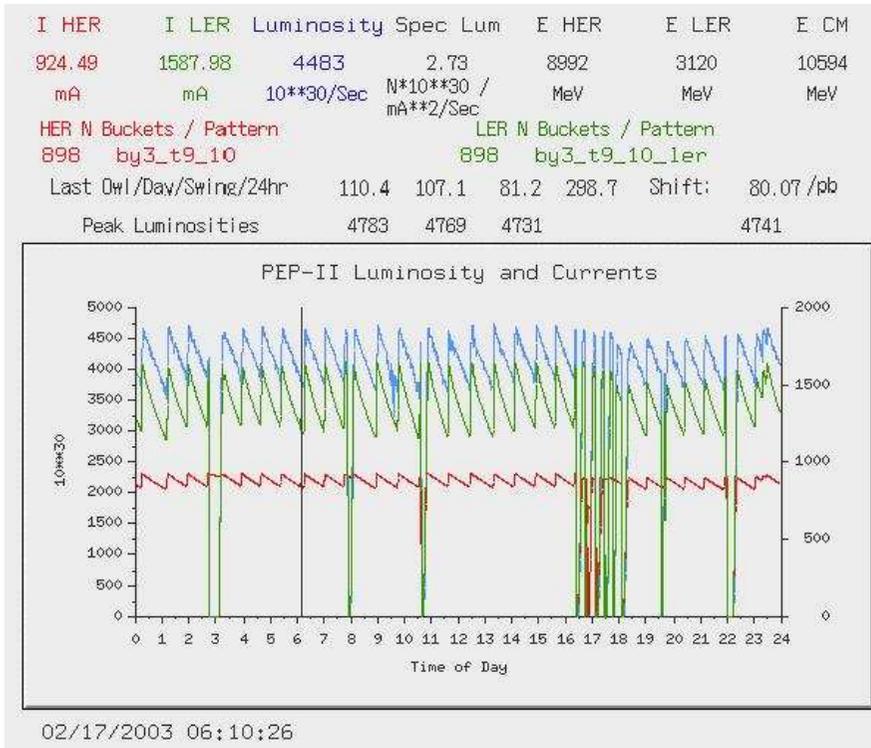
$M_{\text{Drift}} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $M_D = \begin{pmatrix} \cosh \Omega & 1/\sqrt{|k|} \sinh \Omega \\ \sqrt{|k|} \sinh \Omega & \cosh \Omega \end{pmatrix}$

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: $P_\gamma = \frac{2}{3} r_e m_0 c \gamma^6 \left\{ \left(\frac{d\vec{\beta}}{dt} \right)^2 - \left[\vec{\beta} \times \frac{d\vec{\beta}}{dt} \right]^2 \right\}$
- 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 für $\frac{dp_{||}}{dt} \ll \frac{\gamma dp_{\perp}}{dt}$ 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



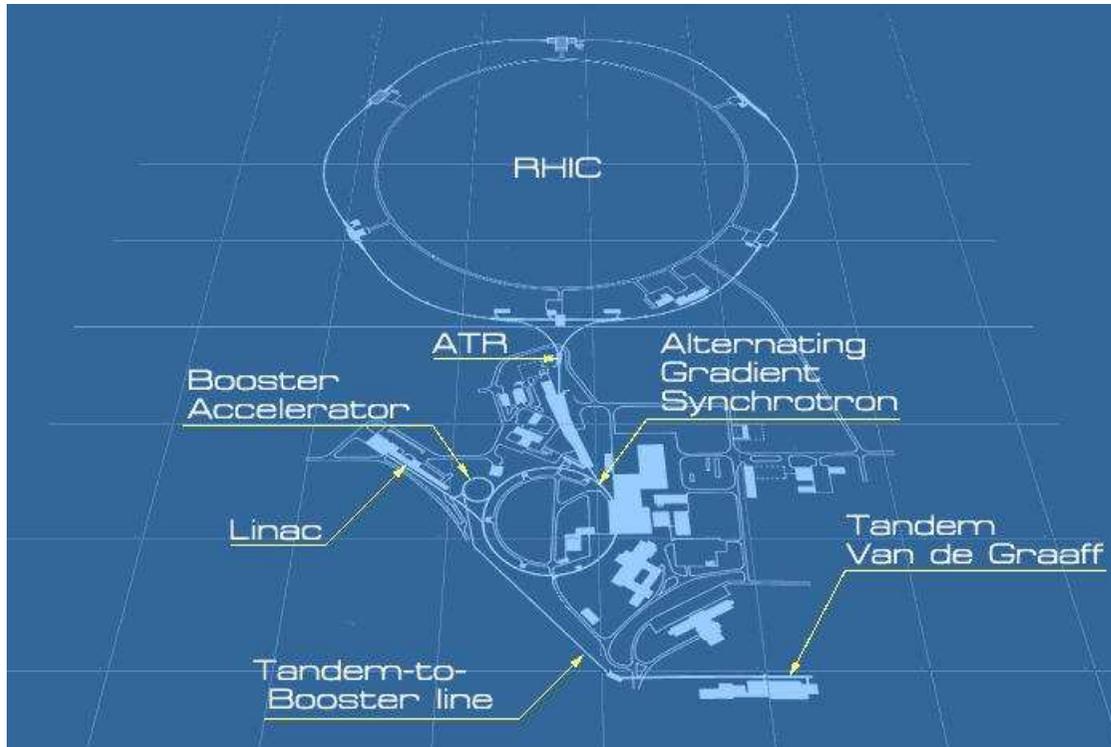
	Run I 1992 - 1996	Run II 2001 - 20xx
Umfang [km]	6.4	6.4
$E_{p,\bar{p}}$ [TeV]	0.9	0.98
Teilchenpakete	6x6	140x103
N_p/Paket [10^{11}]	2.3	2.7
$N_{\bar{p}}/\text{Paket}$ [10^{11}]	0.55	1.0
\mathcal{L}_{int} [fb^{-1}]	0.11	10-30

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: ${}^2_1\text{H}^+ + {}^{197}_{79}\text{Au}^{+79} \rightarrow X$
- 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, ...

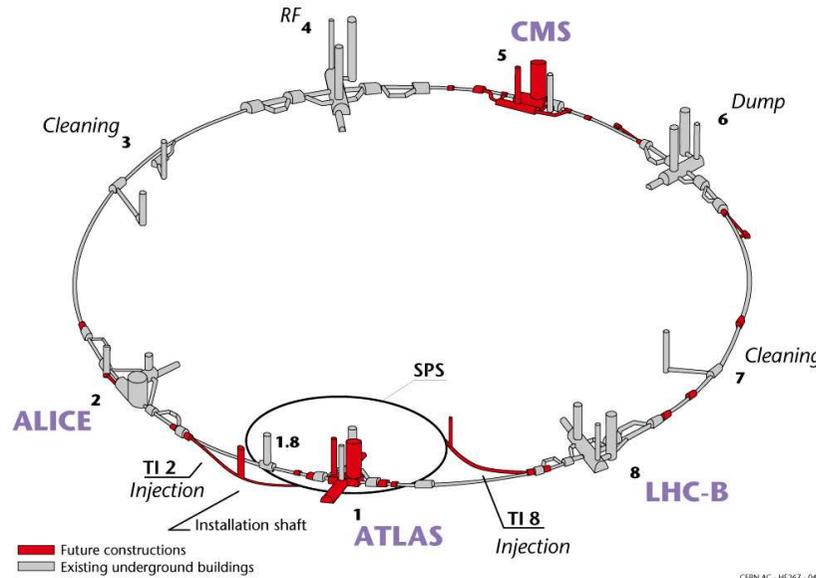
LHC-B

Materie ↔ Antimaterie,
...

ATLAS / CMS

Higgs Produktion, ...

Das Herzstück des LHC - die supraleitenden Magnete



Technische Daten

L = 26.7 km

$E_p = 7 \text{ TeV}$

$N_p = 1.1 \cdot 10^{11} / \text{Strahl}$

Lumi Erwartungen

10 fb⁻¹/a beim Start

100 fb⁻¹/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,...



Ein paar Daten

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

...grabe zwei tiefe Löcher...



Point 1 - PX14 shaft - installation of waterproof membrane - November 16, 1999 - CERN ST-CE



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).



Bauarbeiten für ATLAS - die Installation im Zeitraffer



31.05.2003
30.06.2003
31.07.2003
31.08.2003
30.09.2003
31.10.2003
28.11.2003
31.12.2003
31.01.2004
28.02.2004
31.03.2004
30.04.2004
06.05.2003

Schauen Sie doch bitte bis zum Frühjahr 2007 noch ein paar Mal vorbei.

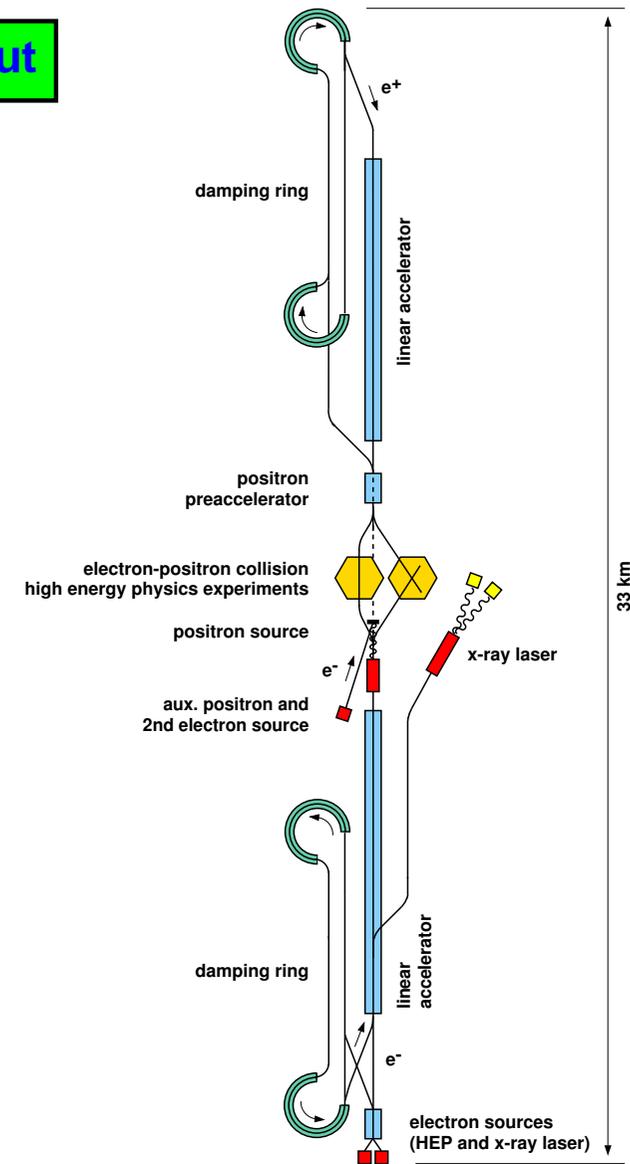


Das TESLA Projekt - der Plan

Die Lage



Das Layout



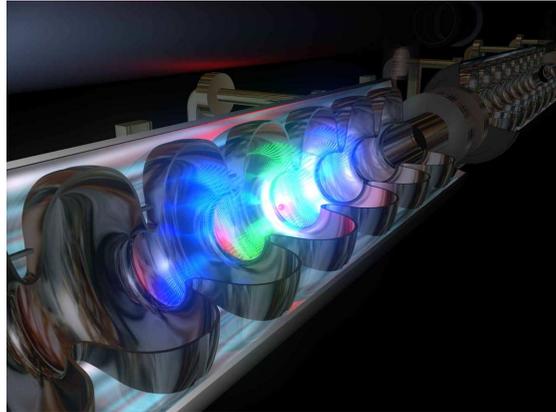
Technische Daten

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

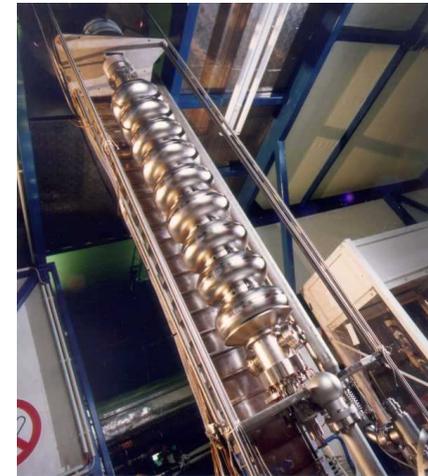


Das TESLA Projekt - die Entwicklungsarbeiten

Es ist ein langer Weg von der Prinzipskizze



über die Kavität



und die Tesla Test Facility



zum endgültigen 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.