



- 
- 
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

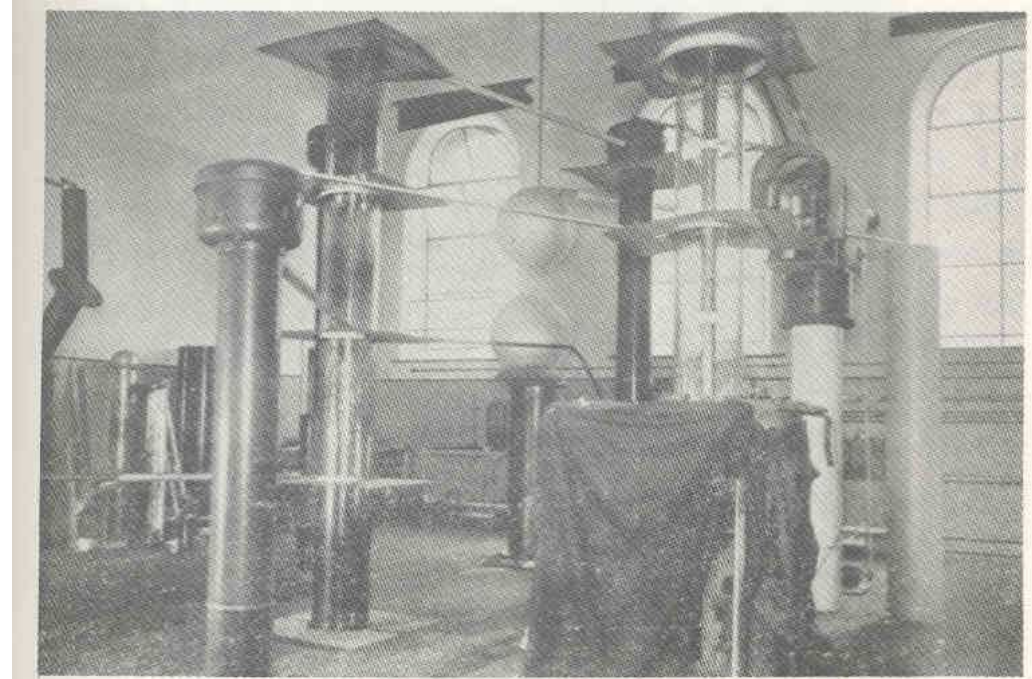
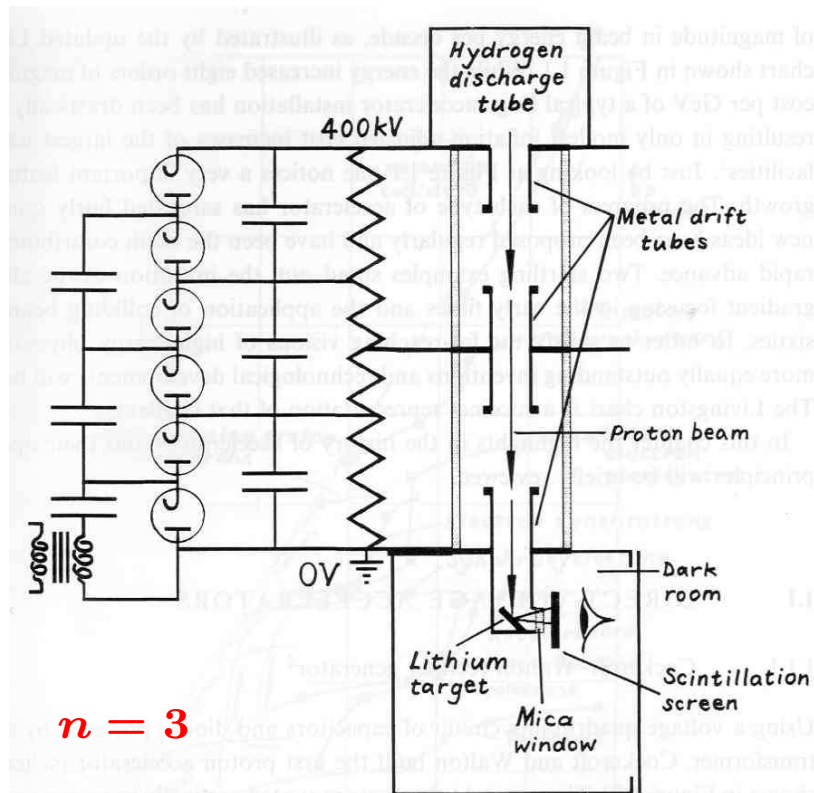


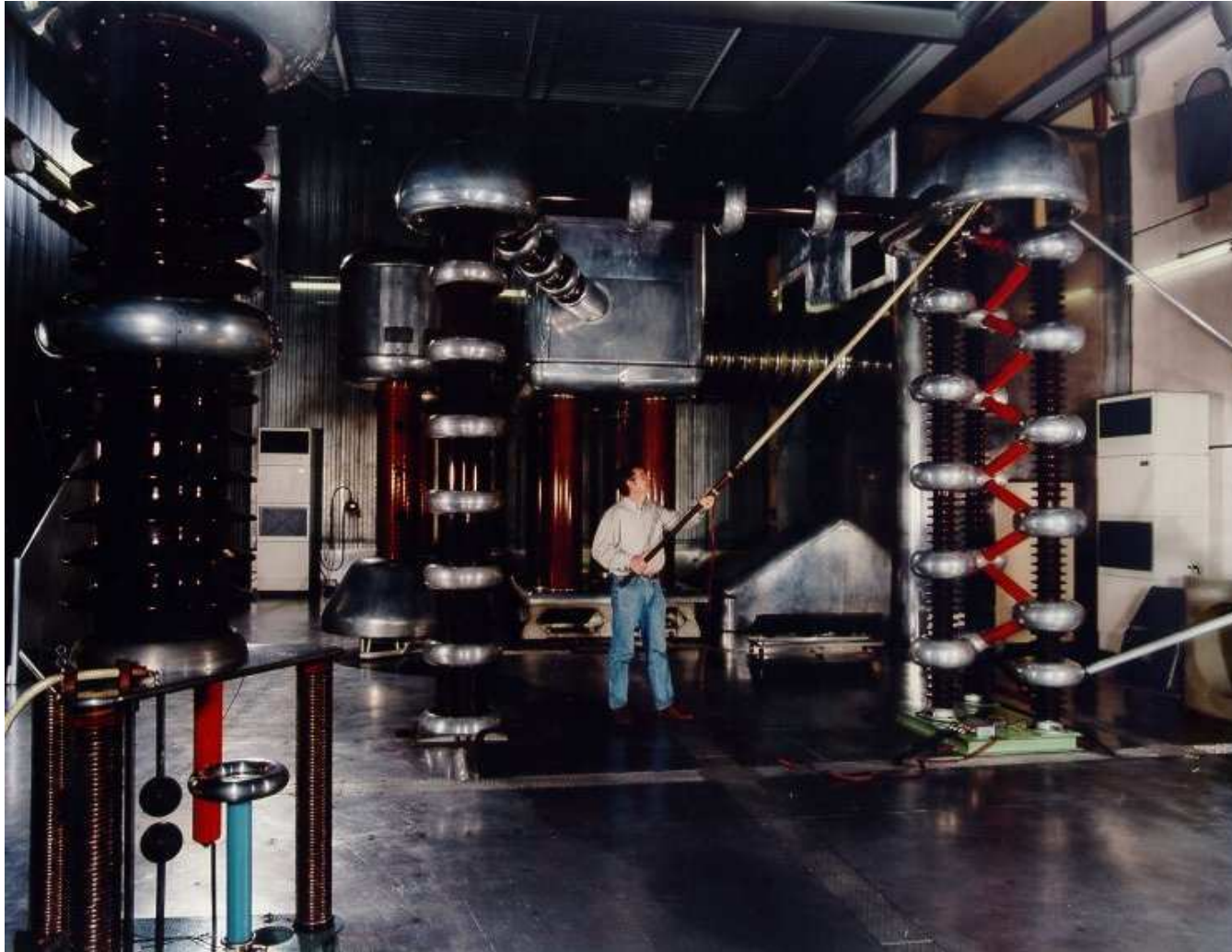
FIG. 2. Voltage multiplier with which Cockcroft and Walton achieved nuclear disintegration in 1932.

- 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



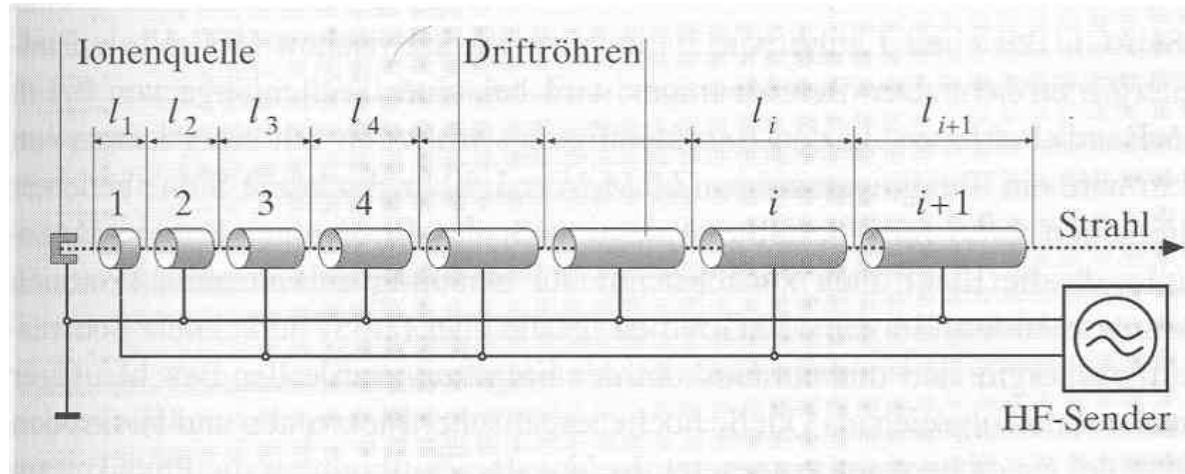
ISIS  
Rutherford Lab  
Oxford  
 $E_{H^-} = 665\text{keV}$

**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

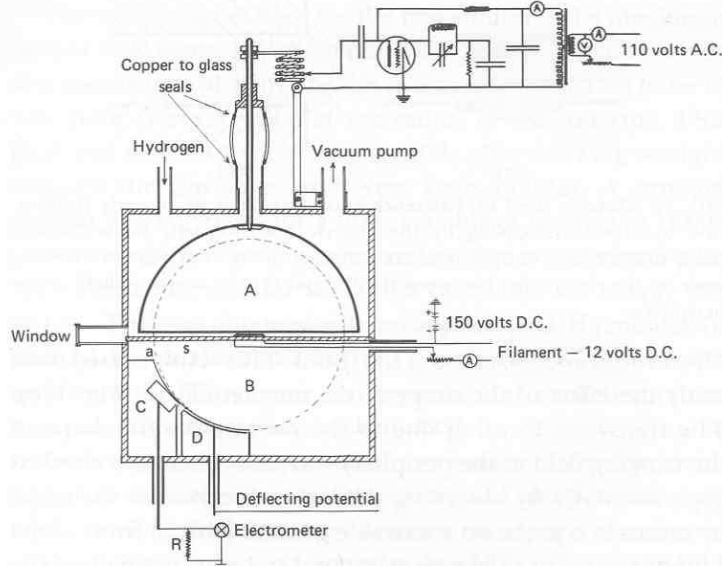


FIG. 13. Diagram of the vacuum chamber for the 1.2-MeV cyclotron built by Lawrence and Livingston at the University of California in 1931. See also Fig. 7.

– Nicht relativistisch:

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

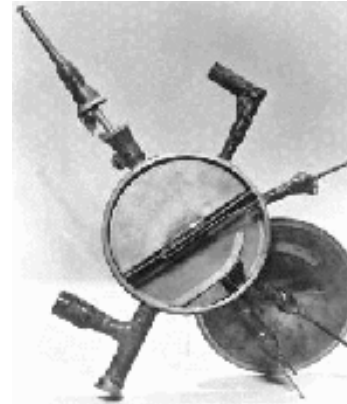
$$\Rightarrow R = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}$$

– 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)

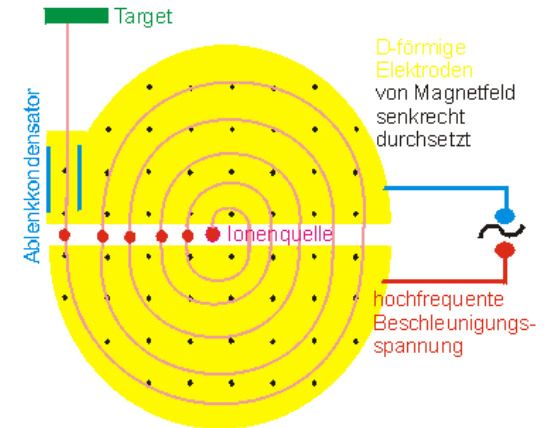
–  $B = 0.52 \text{ T}$ ,  $H_2^+$ -Ionen

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

– 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

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

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



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

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

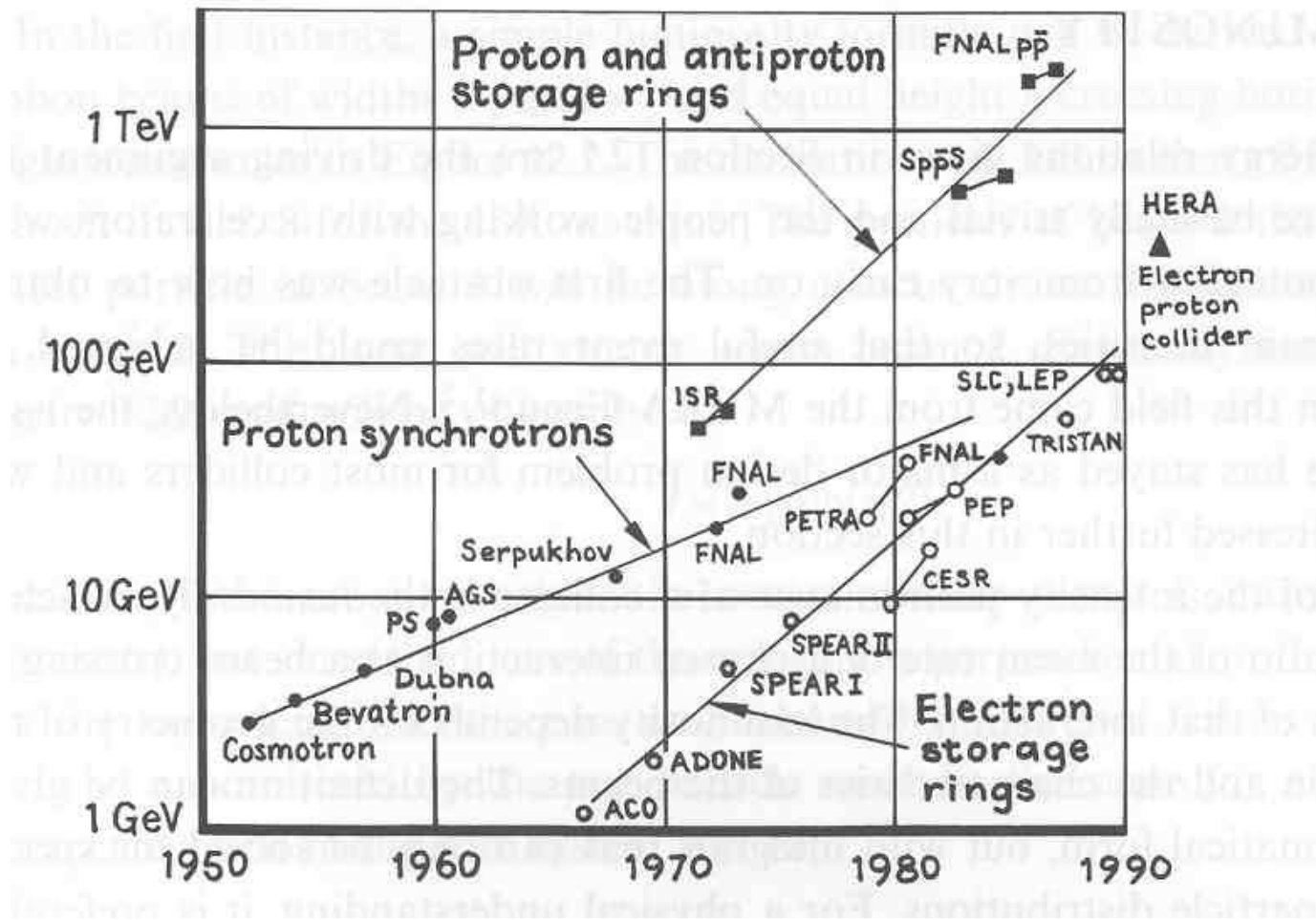
Im Fixed-Target Modus benötigte man dafür

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

**Höchste Schwerpunktsenergien lassen sich nur mit Collidern erzielen.**



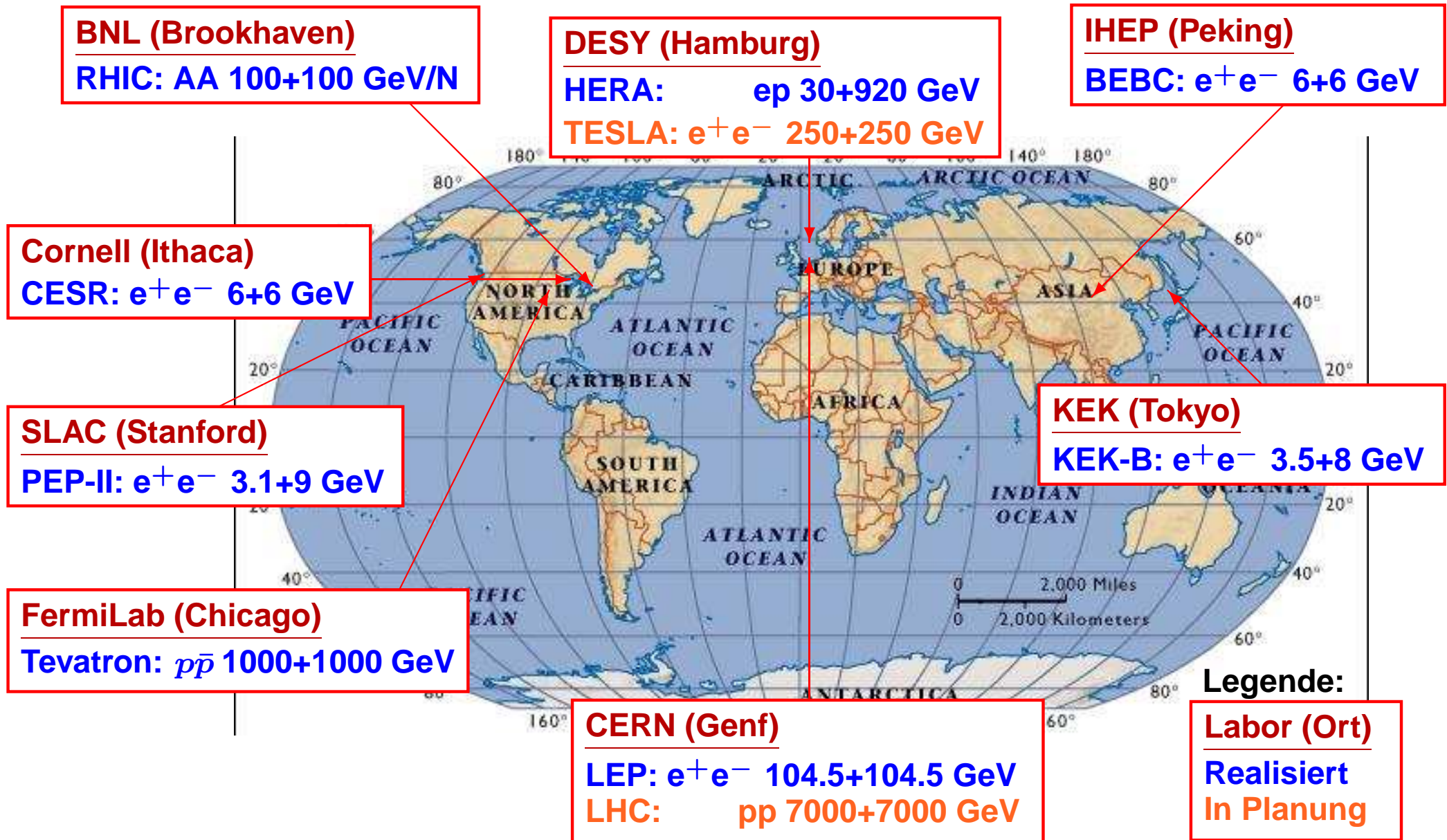
# Auszug aus der Geschichte der Teilchenbeschleuniger



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



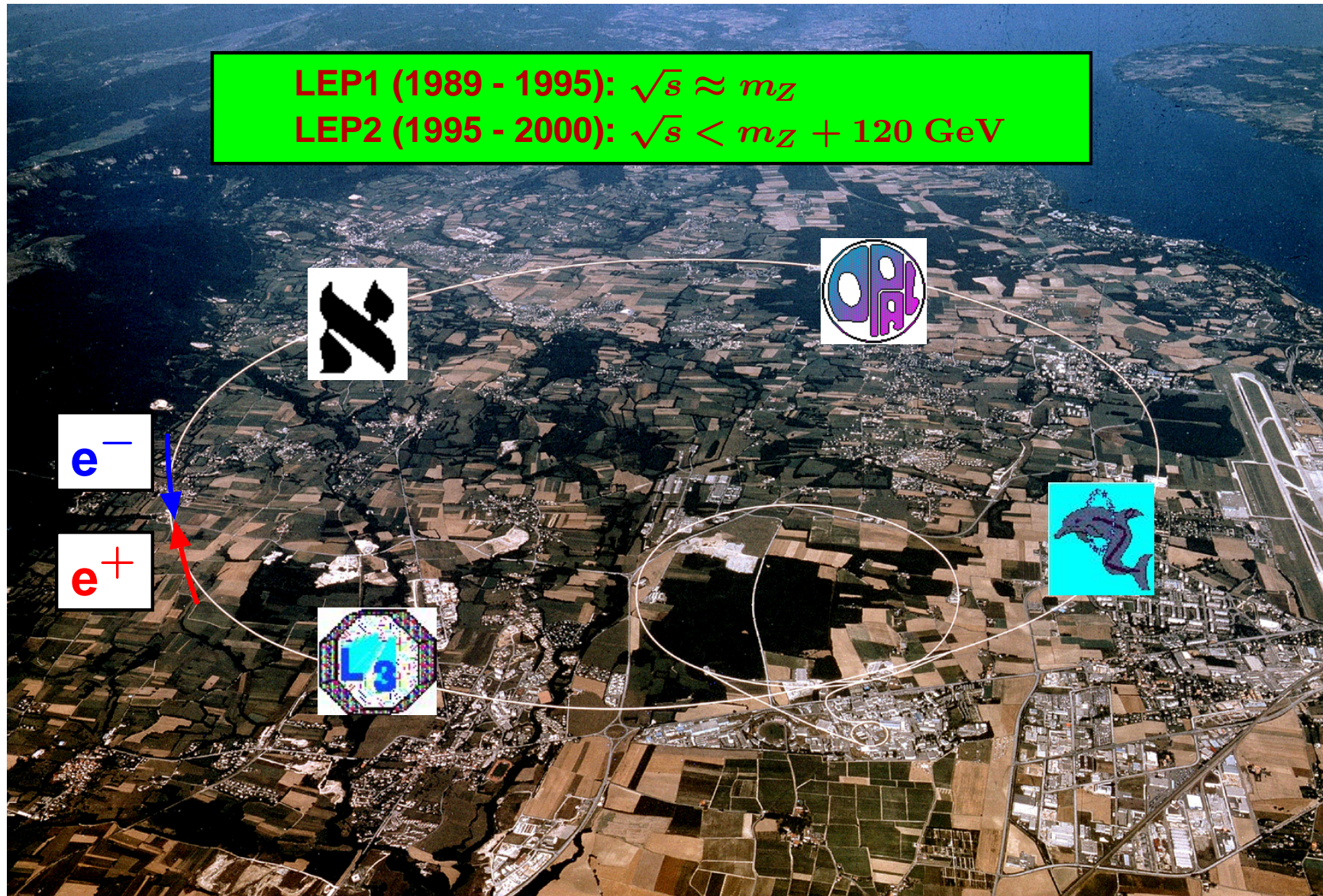
# Auszug aus der Welt der Beschleuniger







# Der Large Electron Positron Beschleuniger (LEP)



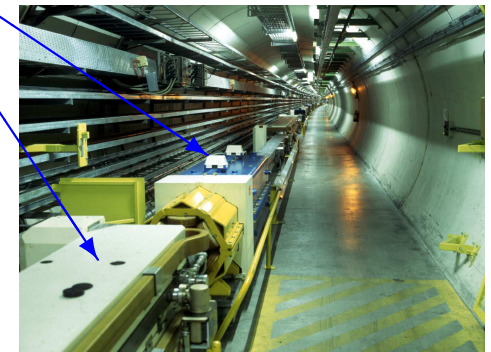
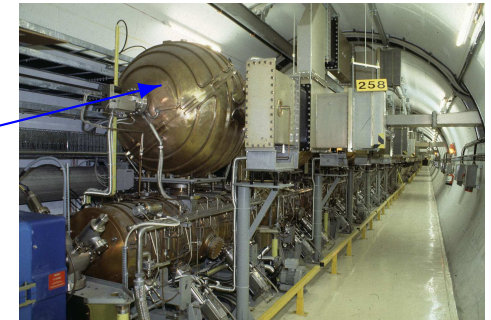
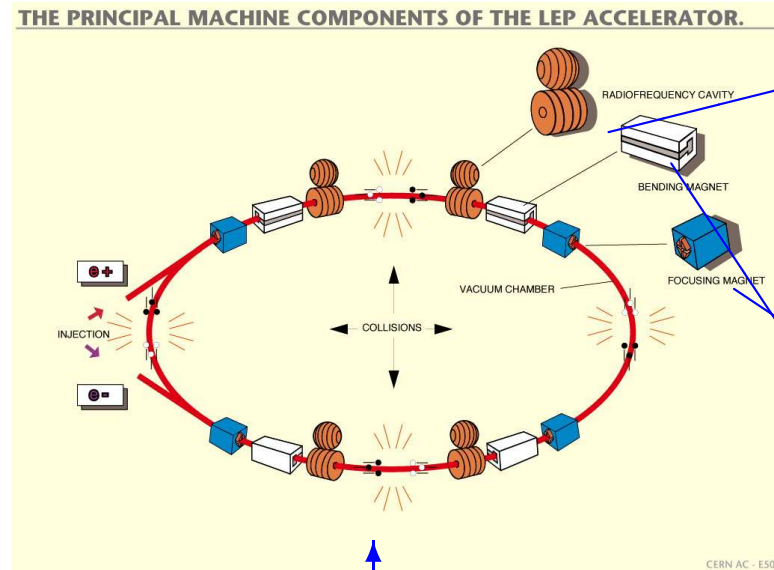




# Einige Details zum LEP (1989 - 2000<sup>†</sup>) Beschleuniger

## Technische Daten

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



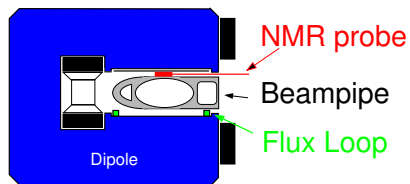
Der Weg ist manchmal ganz schön lang.



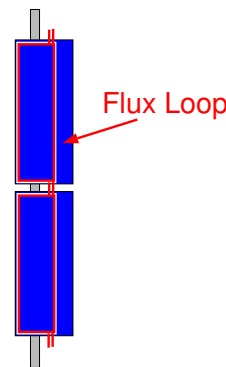
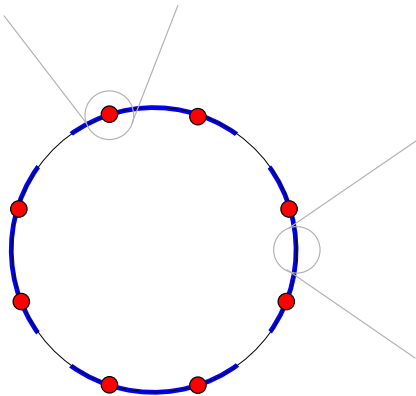


# Die Bestimmung der Strahlenergie bei LEP, oder ...

- 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.



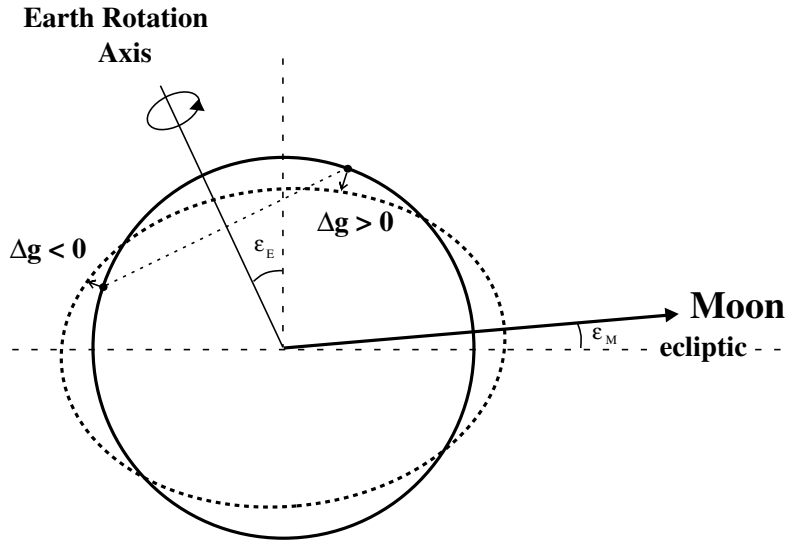
Beispiele sind:

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

**Die genaue Kenntnis des B-Felds ist unabdingbar.**



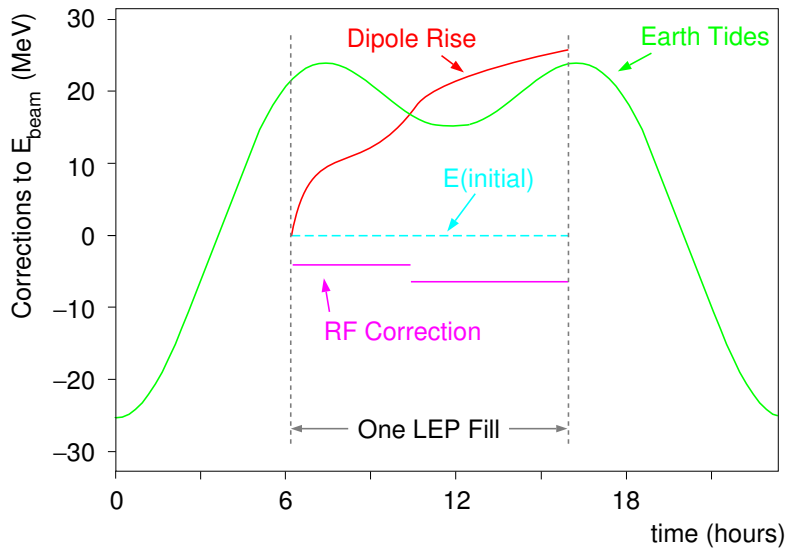
# ... von Sonne, Mond ...



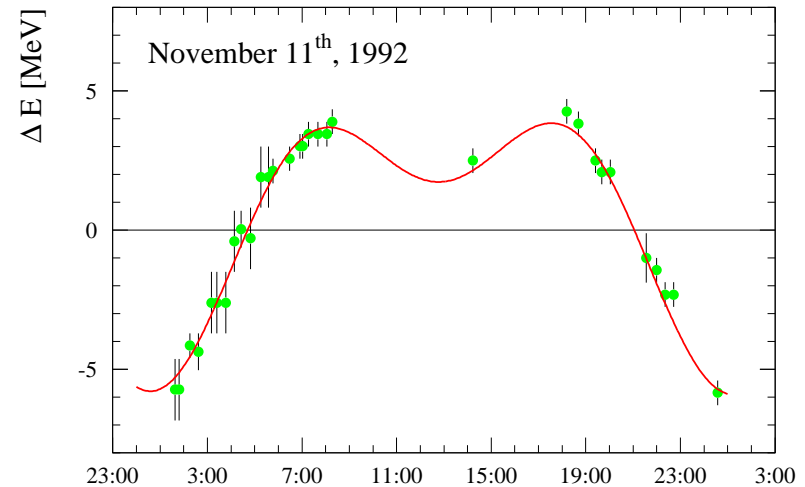
## Der Effekt

- Sonne und Mond erzeugen nicht nur Ebbe und Flut sondern deformieren die Erde derart, dass sich die Länge des LEP Rings ändert. Die Längenänderung des Ringes beträgt etwa  $\Delta L/L \approx 10^{-8}$  also  $\Delta L = 270 \mu m$ .

## Das Modell



## Der Mond ist aufgegangen ...



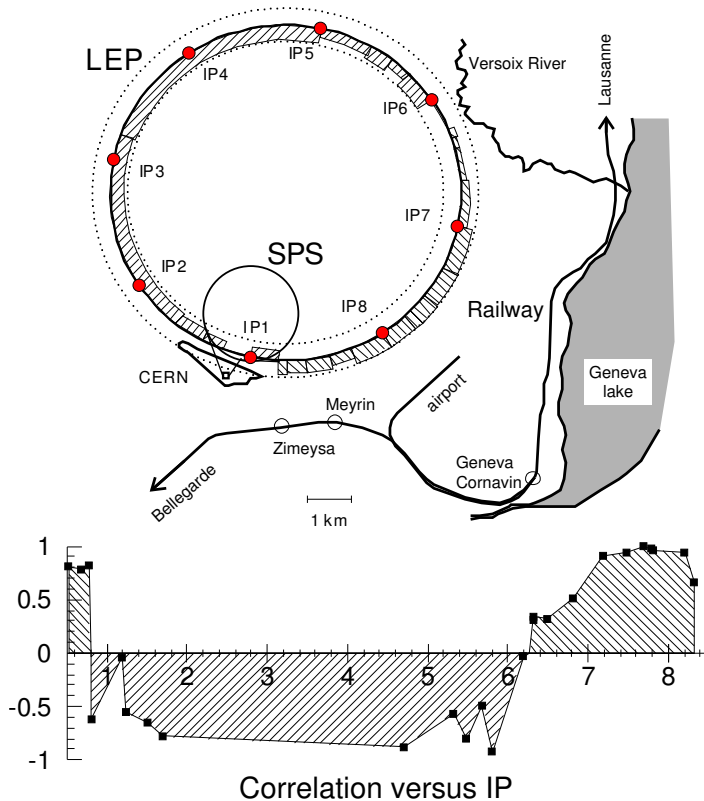
**Guter Monddetektor auch bei wolkeigem Wetter.**



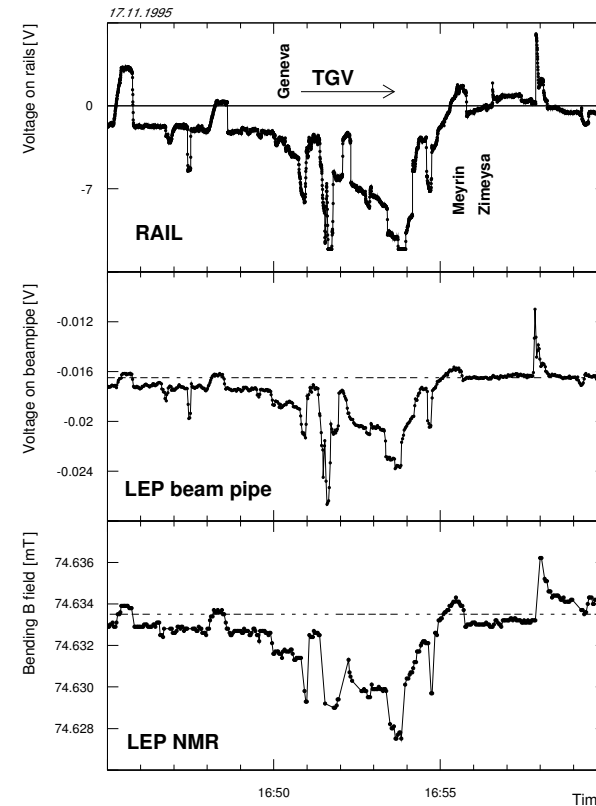


# ... und von schnellen Zügen

— 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**

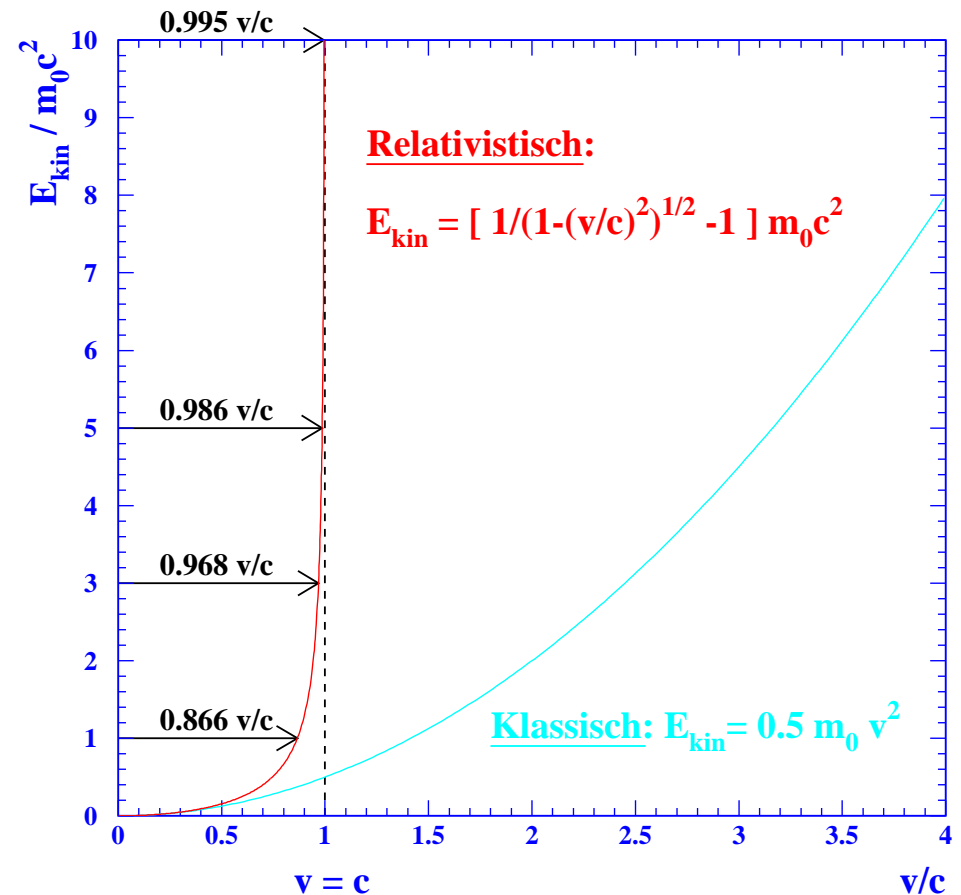
**Klassisch:  $E_{\text{Kin}} = 0.5 m_0 v^2$   
 $= 0.5 (v/c)^2 \cdot m_0 c^2$**

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

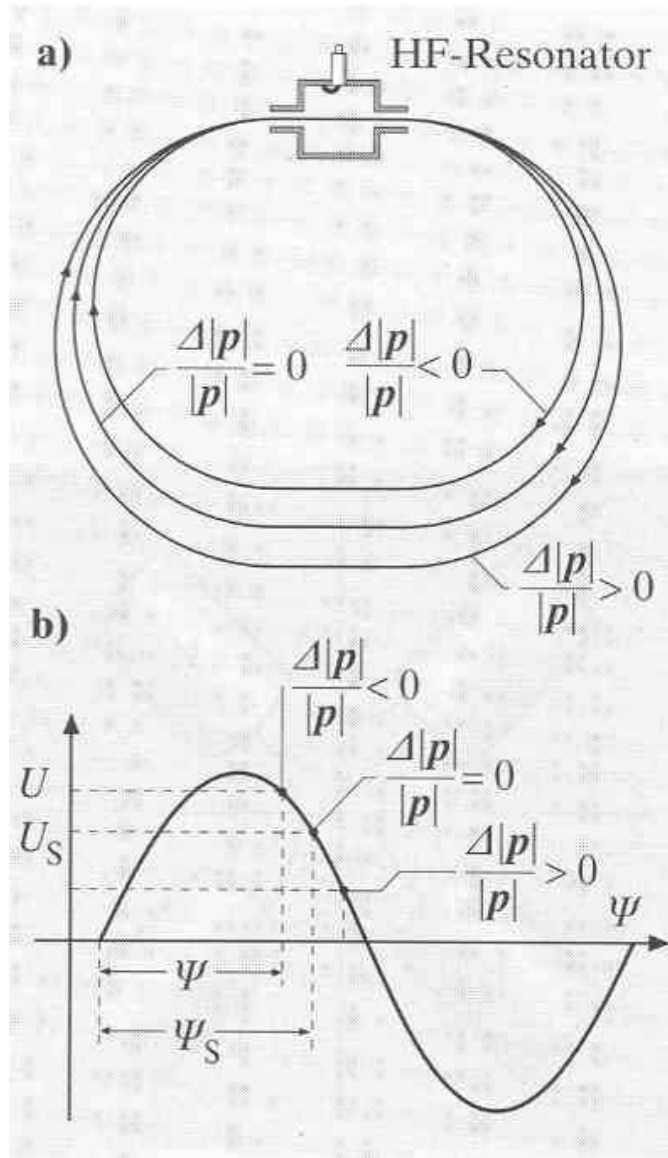
**Resultat:  $a_{\text{LEP}} = \frac{0.094 \text{ m/s}}{900 \text{ s}} \approx 0.0001 \text{ m/s}^2$ ,  $a_{\text{Auto}} = \frac{100 \text{ km/h}}{10 \text{ s}} \approx 2.7 \text{ m/s}^2$**

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





# Die Synchrotronschwingungen



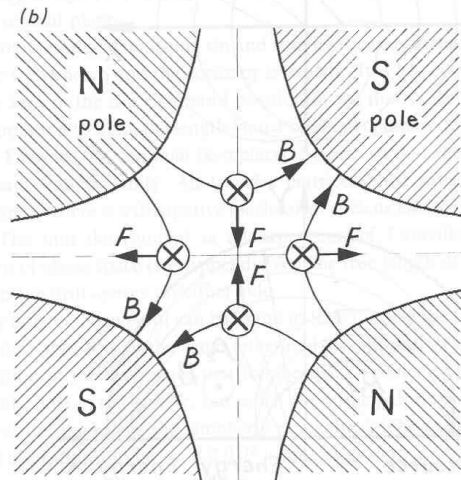
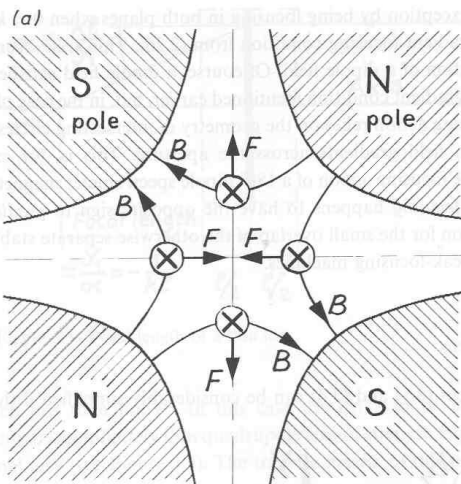
## Selbststabilisation des Strahls

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

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

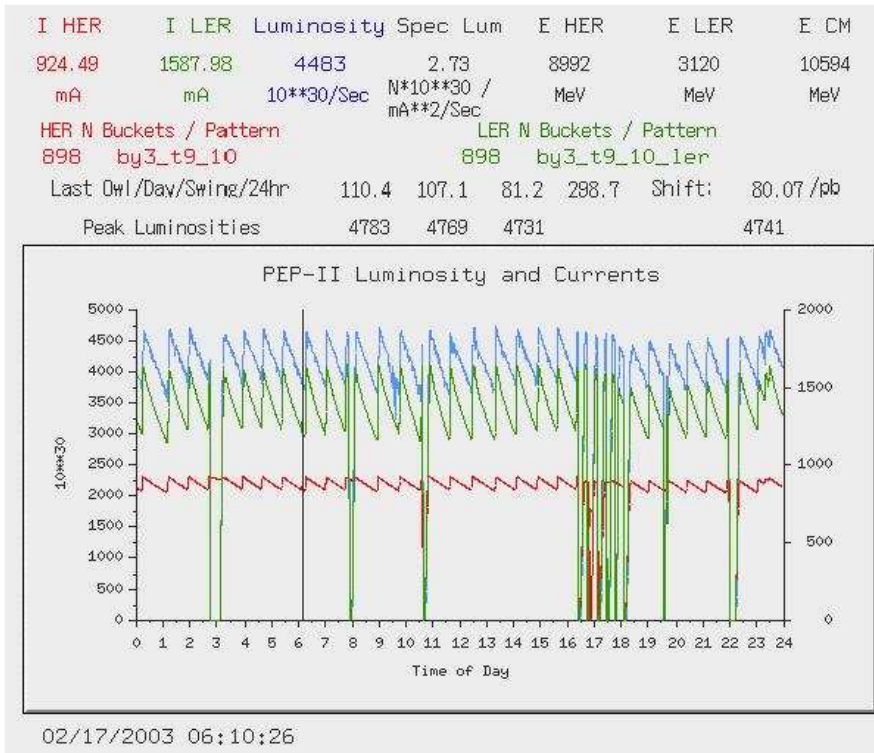
**Bei geeigneter Wahl der Parameter wirkt ein System alternierender Quadrupole  $M = M_F M_{\text{Drift}} M_D$  fokussierend.**





# 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  $\sigma$  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  $\beta_{\perp}$  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]	$\Delta E_{\text{turn}}$ [GeV/Teilchen]	$P_\gamma$ , [MW/Strahl]	$N_\gamma$ [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.**

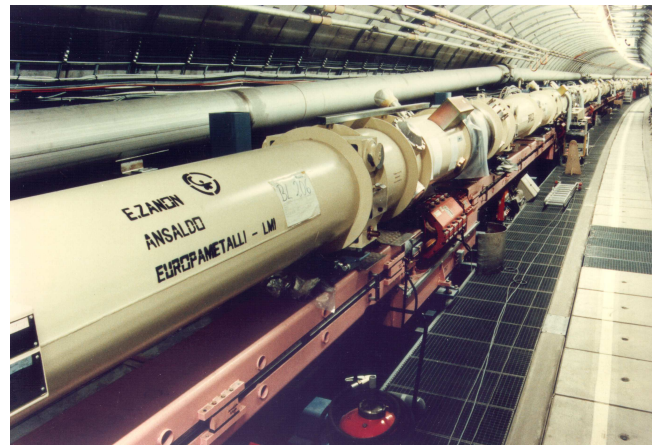


# Die Hadron Elektron Ring Anlage (HERA)

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
$N_p/\text{Paket}$ [ $10^{11}$ ]	2.3	2.7
$N_{\bar{p}}/\text{Paket}$ [ $10^{11}$ ]	0.55	1.0
$\mathcal{L}_{\text{int}}$ [ $\text{fb}^{-1}$ ]	0.11	10-30

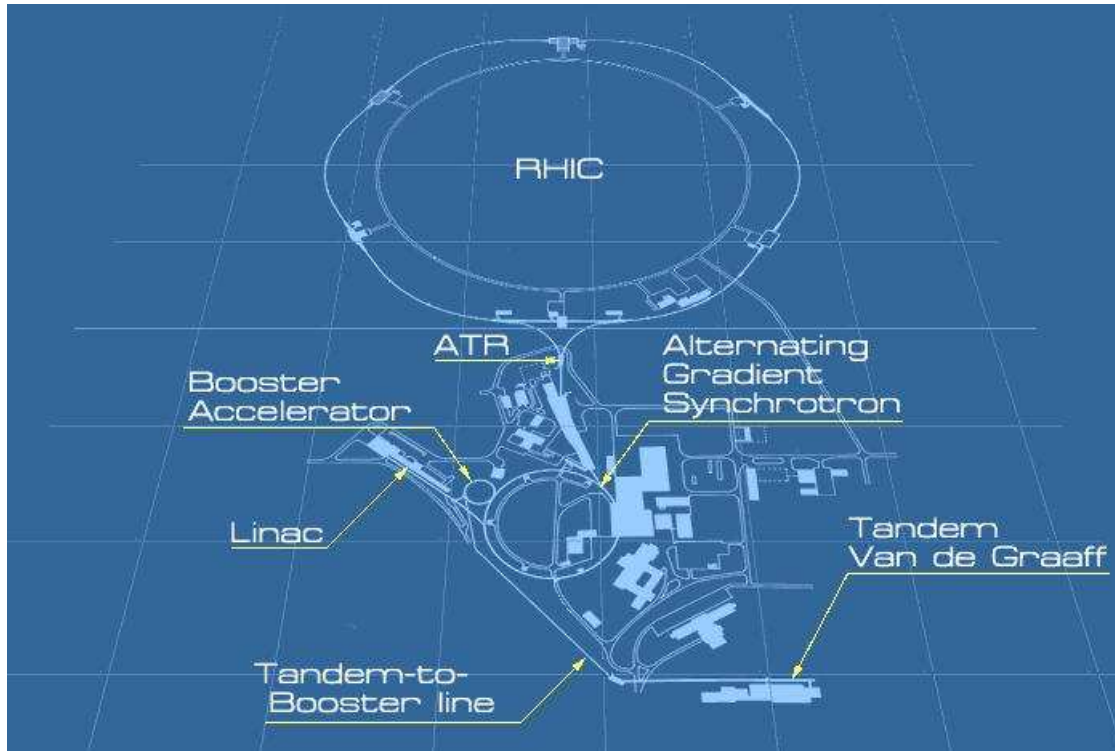
**Das Tevatron ist zur Zeit der Beschleuniger mit der höchsten Schwerpunktsenergie.**





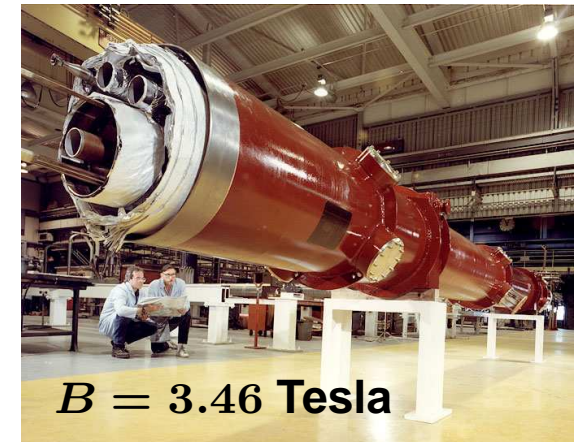
# Der Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)

## 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  $N_x/\text{bunch}$  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<sup>++</sup>)

## Alice

Schwere Kerne, ...

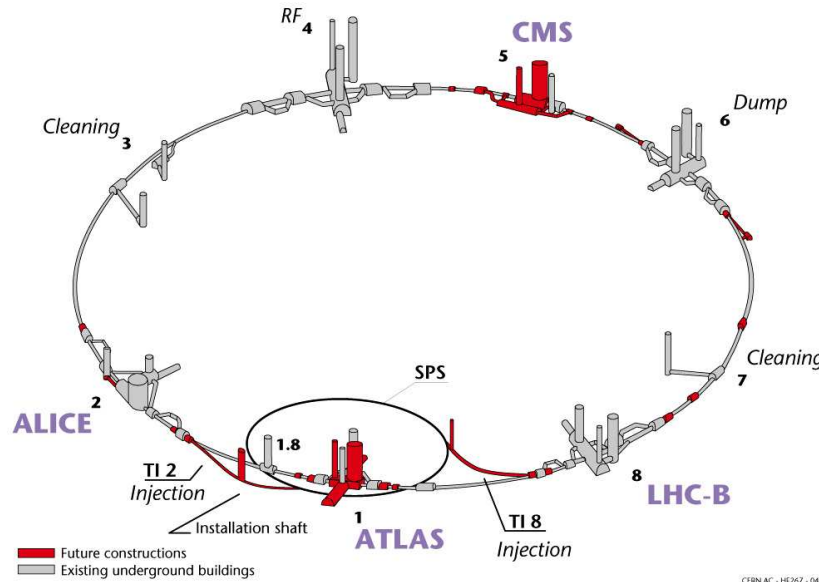
## LHC-B

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

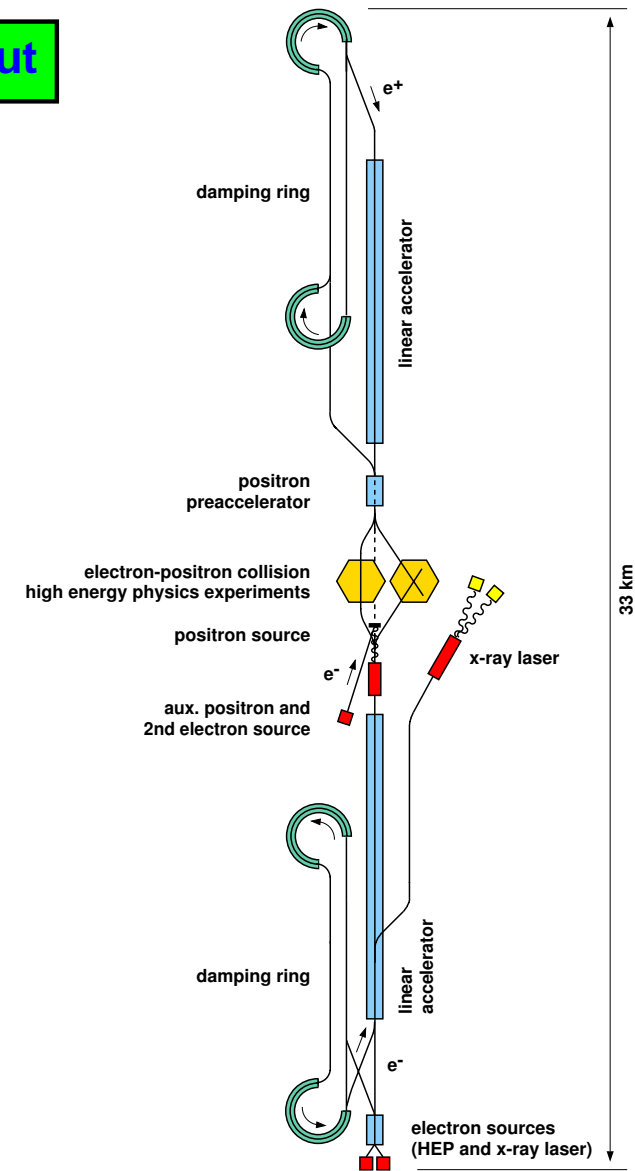


# Das TESLA Projekt - der Plan

## Die Lage



## Das Layout



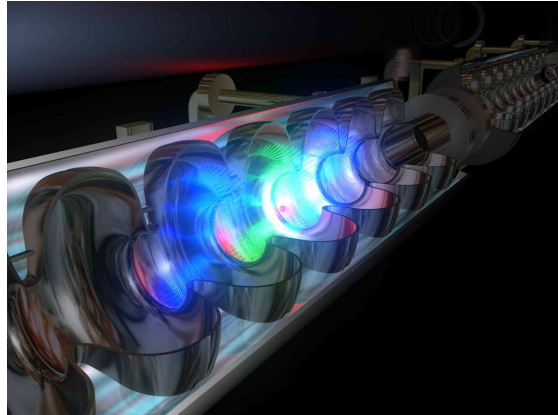
## Technische Daten

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

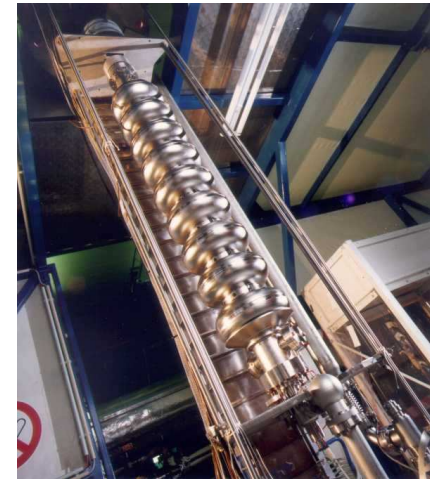


# Das TESLA Projekt - die Entwicklungsarbeiten

Es ist ein langer Weg von der Prinzipskizze



über die Kavität



und die Tesla Test Facility



zum endgültigen Beschleuniger.

**TESLA liefert die Technik für den geplanten ILC.**





# 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.