

Erdgebundene Teilchenbeschleuniger

- kurze Geschichte der Beschleunigerphysik
- Grundlagen der Teilchenbeschleunigung
- Collider Parameter
- Synchrotronstrahlung
- Beispiele hochenergetischer Beschleuniger
- Zukunftspläne und -ideen

Kurze Geschichte der Beschleunigerphysik

- 1928: R. Wideroe berichtet über ersten Betrieb eines Linearbeschleunigers (Ka und Na-Ionen)
- 1931: Van de Graaff konstruiert ersten Hochspannungsgenerator
- 1932: Lawrence und Livingston präsentieren ersten Protonen-Strahl vom 1.2 MeV Zyklotron
- 1939: Hansen, Varian und Varian erfinden Klystron
- 1941: Kerst und Serber stellen das erste funktionierende Betatron vor;
Touschek und Wideroe entwickeln das Prinzip von Ringbeschleunigern
- 1947 Alvarez entwickelt ersten Proton-Linearbeschleuniger
- 1950 Christofilos formuliert Konzept der Starke Fokussierung



E.O. Lawrence

Grundlagen der Teilchenbeschleunigung

Differentialform	Integralform
$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_{\text{frei}}$	$\oint \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q$
$\operatorname{div} \vec{B} = 0$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$
$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$
$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = I + \frac{d}{dt} \int \vec{D} \cdot d\vec{A}$

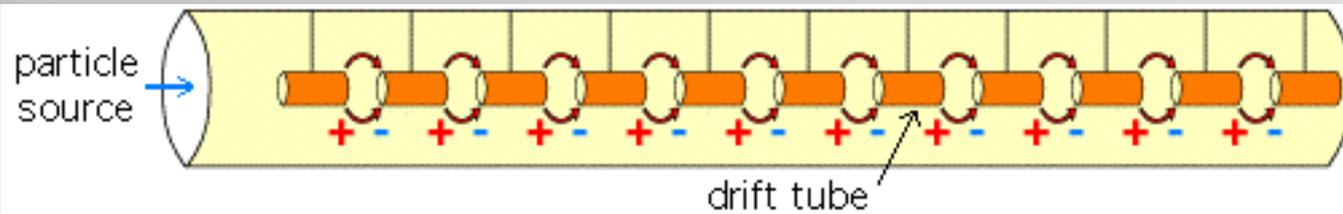
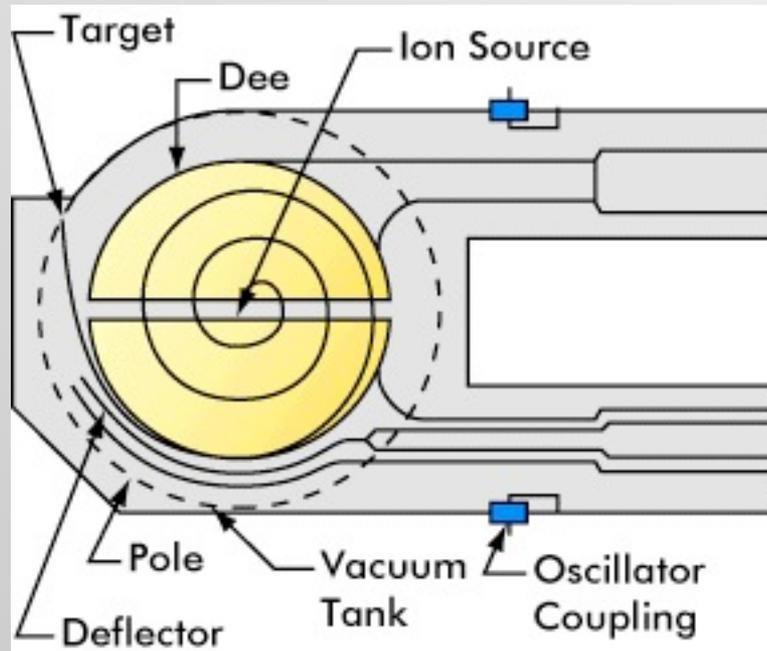
Maxwell-
Gleichungen

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{Lorentzkraft}$$

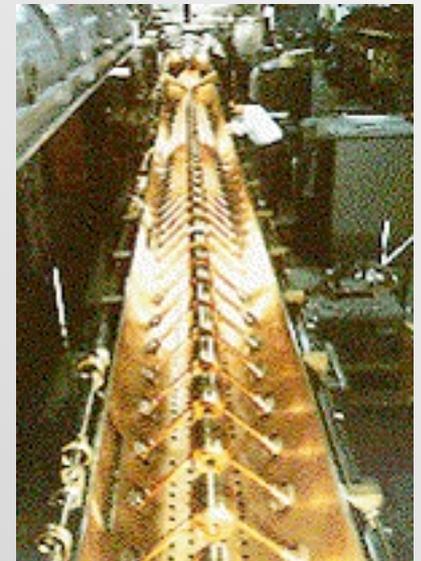
n.b.: Lorentzkraft bei zeitabhängigen Feldern ist keine konservative Kraft, i.e. $\oint \vec{F} d\vec{s} \neq 0$

Grundlagen der Teilchenbeschleunigung

Zyklotron

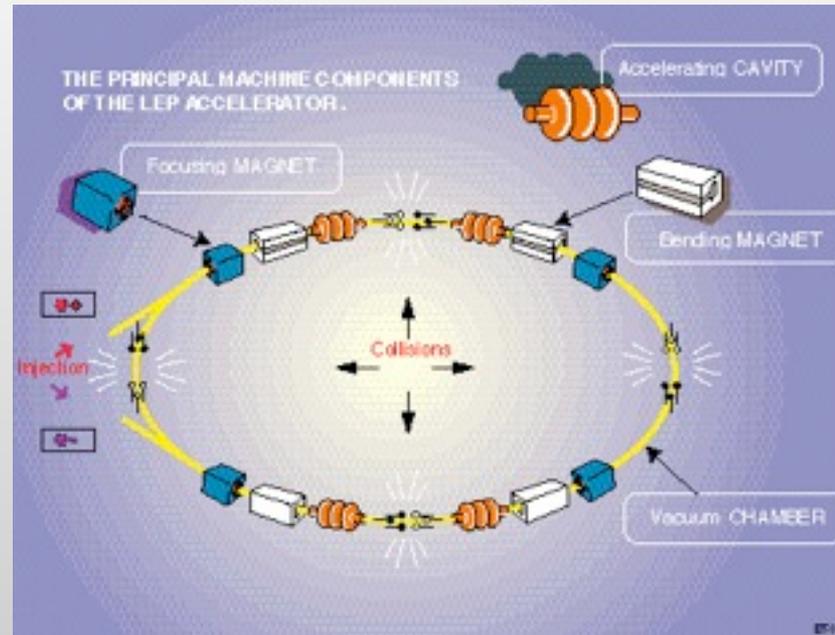


Linearbeschleuniger



Grundlagen der Teilchenbeschleunigung

Kreisförmige Beschleuniger (Synchrotron)



- Vorteile:
- Magnetfeld nur lokal um Strahlführung (ökonomischer als Zyklotron)
 - Mehrfachbenutzung der Beschleunigerstrecken
 - Höhere effektive Schwerpunktsenergie im "Collider"-Modus
 - Effektivere Ausnutzung der Teilchen (Speicherring)
- Nachteile:
- Energieverlust durch Bremsstrahlung (Synchrotronstrahlung)

Grundlagen der Teilchenbeschleunigung

Fixed Target versus Colliding Beams

für Protonen ($m_p c^2 \sim 1 \text{ GeV}$):

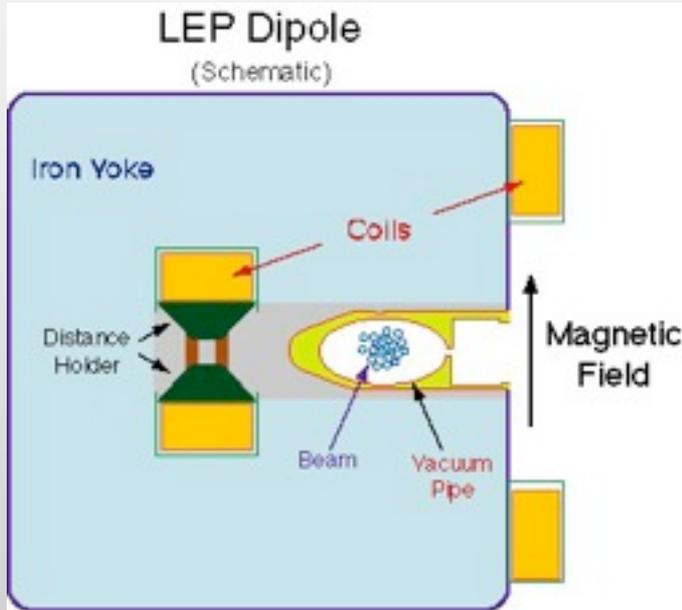


$$E_{\text{cm}} = \sqrt{2(\gamma + 1)} m_p c^2$$

$$E_{\text{cm}} = 2E = 2\gamma m_p c^2$$

$$E_{\text{beam}} = 450 \text{ GeV} \rightarrow \gamma \sim 450$$

Funktionsteile von Kreisbeschleunigern:



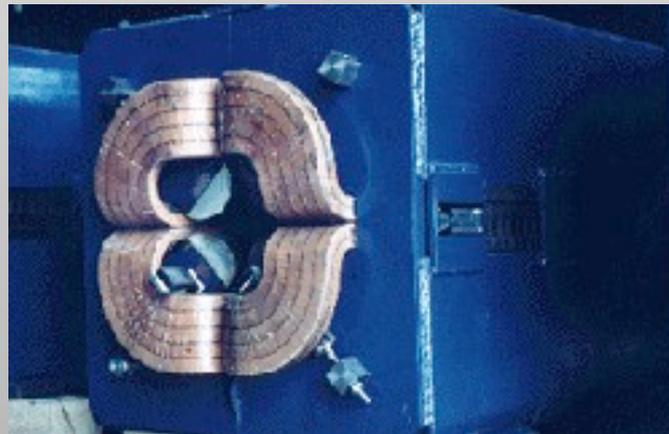
Dipol
(Kreisbahn)



Kavität
(Beschleunigung)

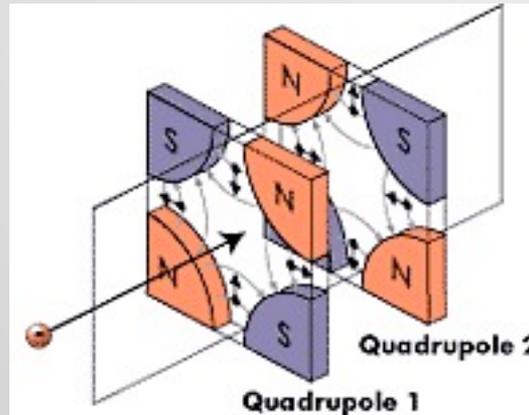


Tunnel, Strahlröhre,
Vakuumpumpen, Sextupol, ...



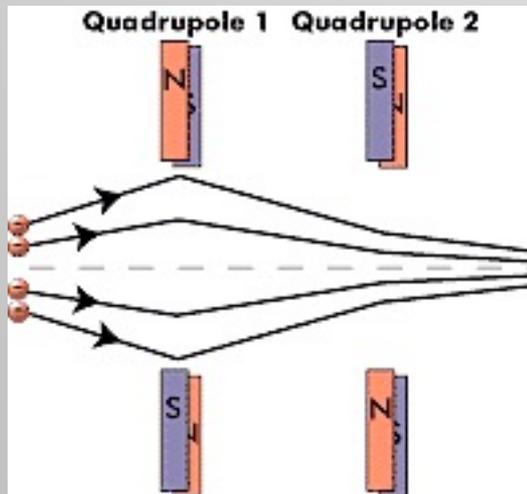
Quadrupol
(Fokussierung)

Strong Focussing

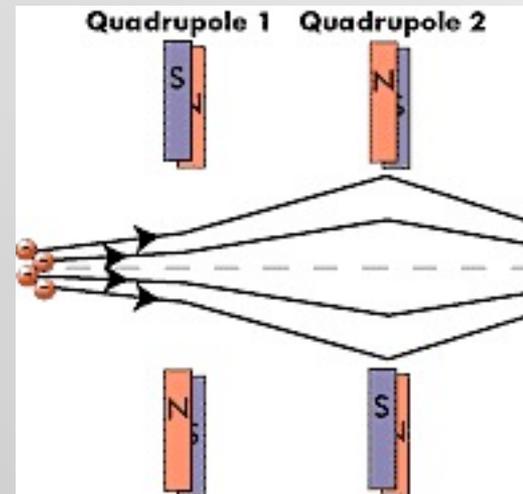


$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

Seitenansicht



Ansicht von oben



Zwei gekreuzte Quadrupole im Abstand d kleiner als deren doppelte Fokallänge wirken insgesamt fokussierend (in beiden Ebenen).

Collider Parameter

Ereignis-Rate R:

$$R = L \cdot \sigma$$

σ : Wirkungsquerschnitt

Luminosität L:

$$L = f \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x \sigma_y}$$

f: Kollisionsfrequenz

n_i : Anzahl Teilchen in Paket i

σ_x : horizontale Strahlgröße

σ_y : vertikale Strahlgröße

Strahlgröße:

- transversale Emittanz ε (Strahlqualität)
- Amplitudenfunktion β (Strahloptik)

$$\varepsilon = \pi\sigma\sigma'$$

σ : transversale Versetzung

$$\beta = \sigma/\sigma'$$

σ' : Winkel bzgl. Strahlachse

β^* : Wert der β -function am WW-Punkt.

Luminosität L: $\Rightarrow L = f \frac{n_1 n_2}{4\sqrt{\varepsilon_x \beta_x^* \varepsilon_y \beta_y^*}}$

Grundlagen der Teilchenbeschleunigung

Synchrotronstrahlung:

Abstrahlungsleistung eines relativistischen Teilchens bei zentripetalen Beschleunigung:

$$P = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \frac{e^2 a^2}{c^3} \gamma^4$$

$$a = v^2 / \rho$$

v: Teilchengeschwindigkeit

ρ : Krümmungsradius

Pro Umlauf abgestrahlte Energie:

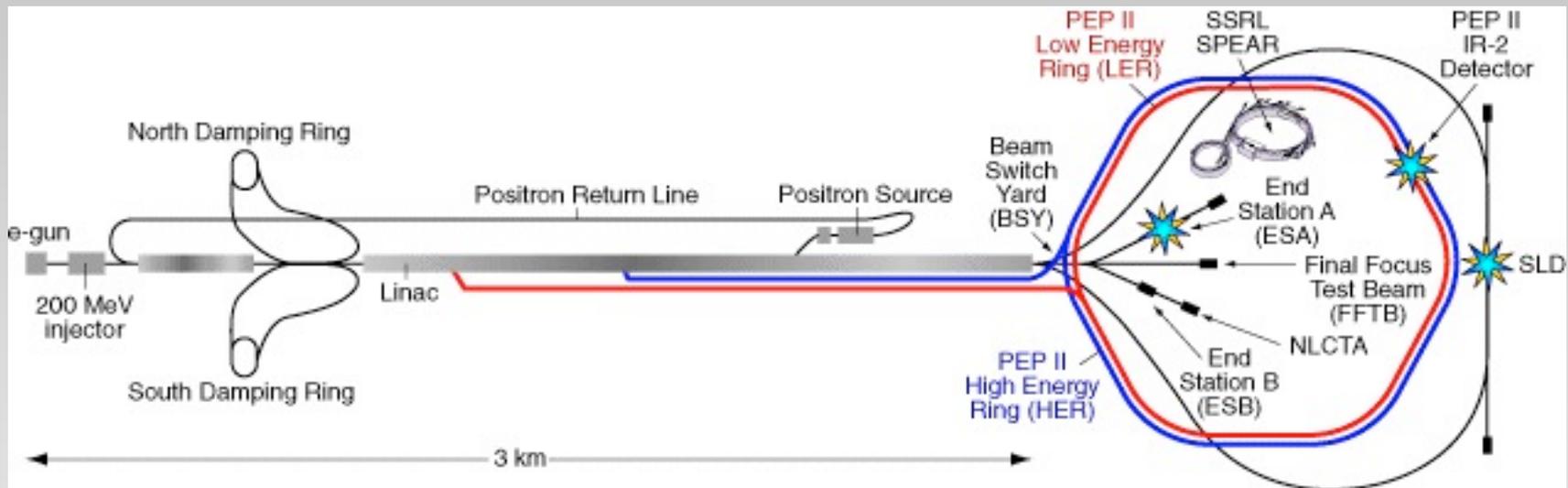
- Elektron mit $v \approx c$

$$W = 8.85 \times 10^{-5} \frac{E^4 [\text{MeV}^4]}{\rho [\text{km}]} \text{MeV}$$

- Proton mit $v \approx c$

$$W = 7.8 \times 10^{-6} \frac{E^4 [\text{TeV}^4]}{\rho [\text{km}]} \text{MeV}$$

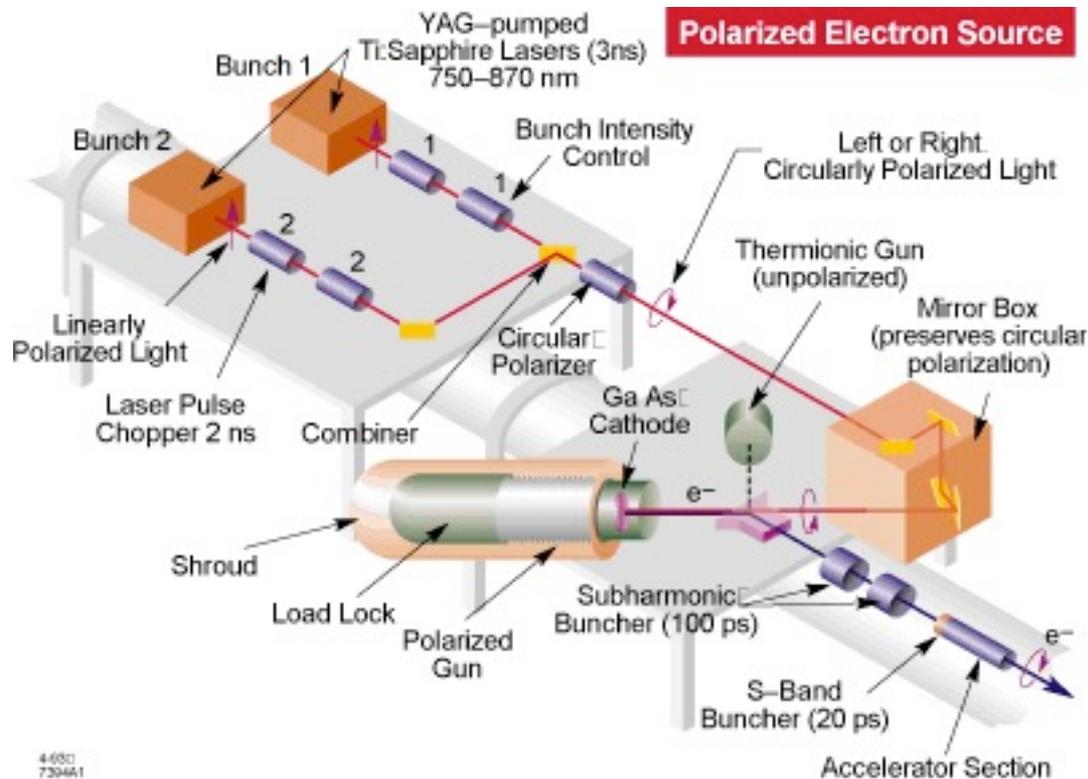
SLAC Linear Collider (SLC)



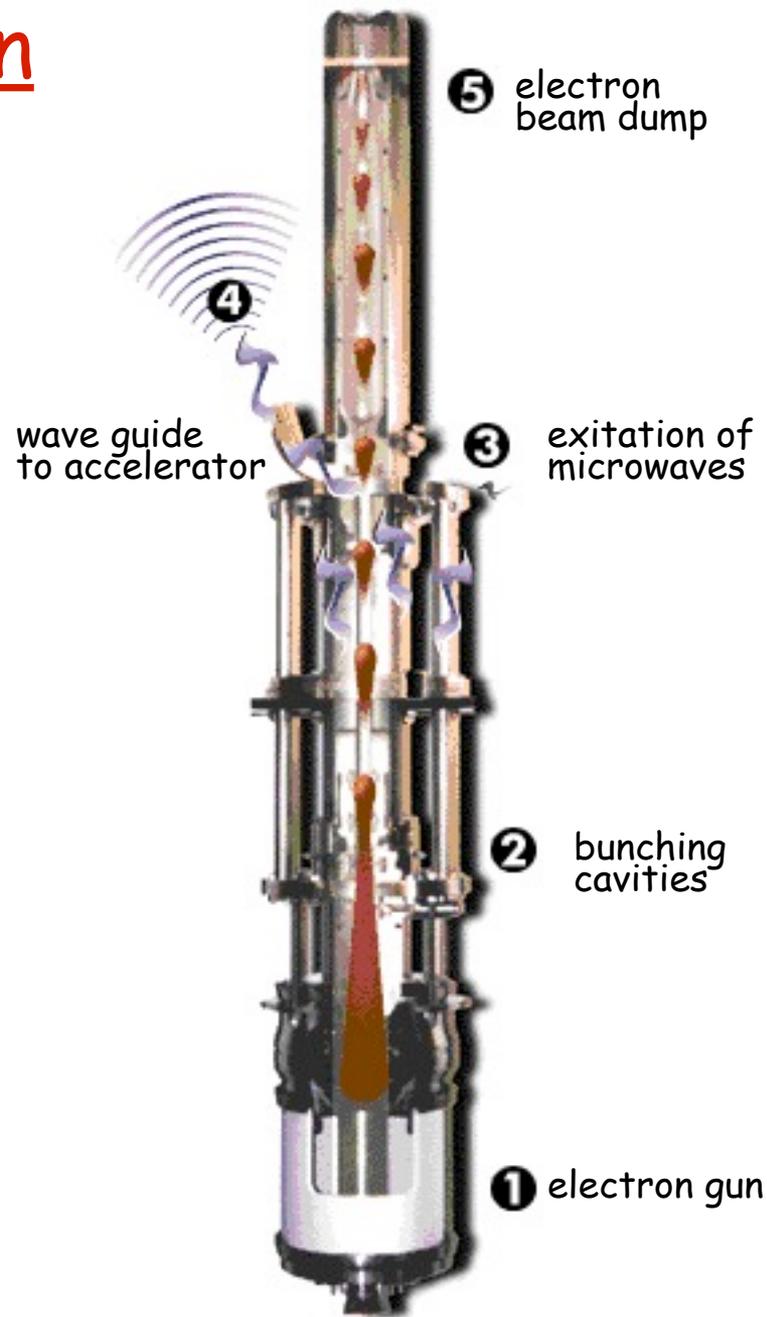
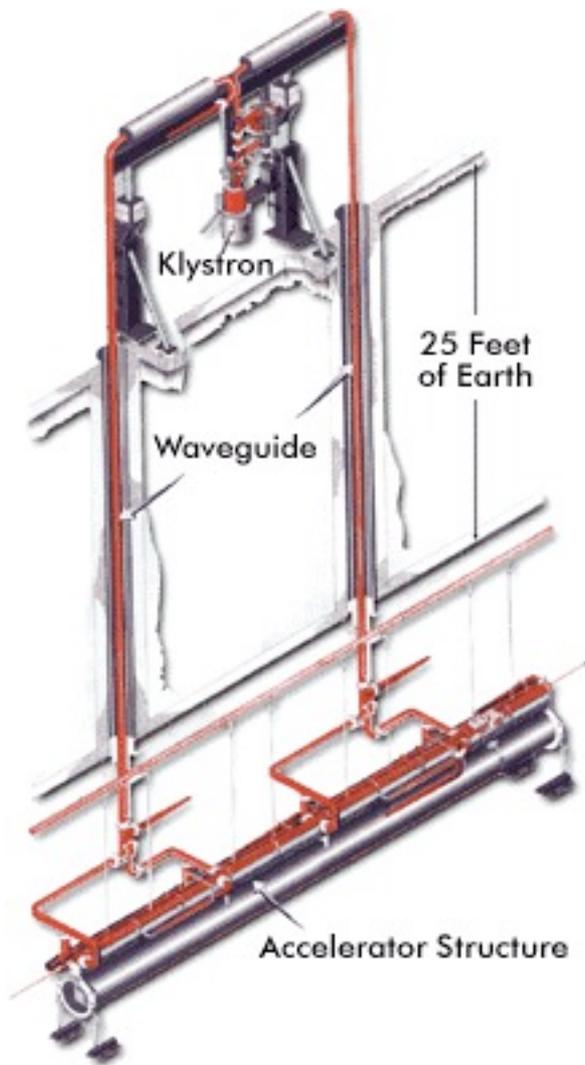
- e^- bis 50 GeV; fixed-Target Programme (bis 1980er)
- e^- und e^+ für PEP-I Speicherring ($E_{cm} = 29$ GeV; frühe 1980er)
- e^- und e^+ für SLC collider ($E_{cm} = M_Z \sim 91$ GeV; 1989 - 1999)
- e^- und e^+ für PEP-II Speicherring ($E_{cm} \sim 10$ GeV; 1999 - 2008)

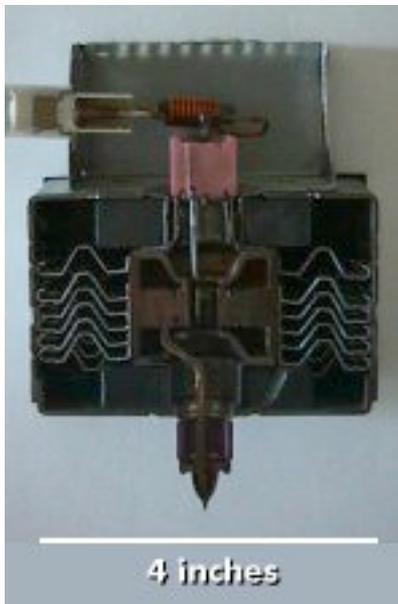


SLAC Linear Collider (SLC)



Klystron



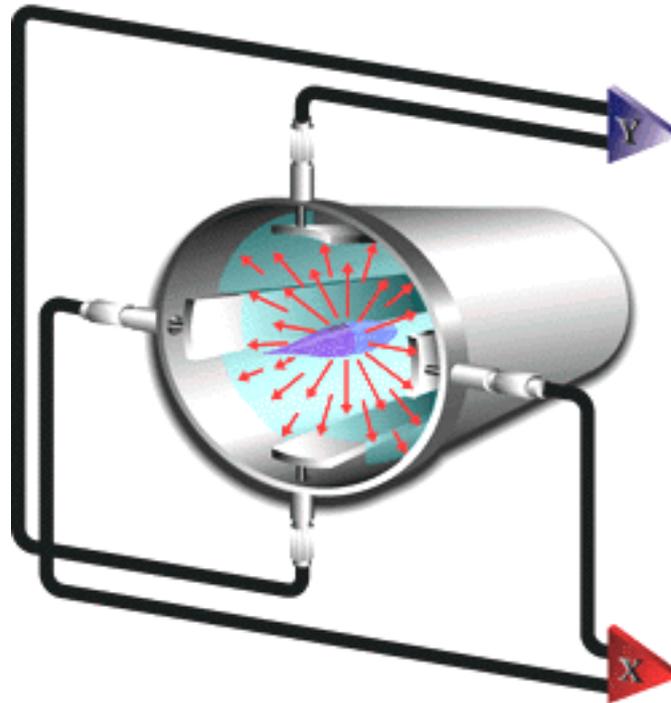


“Klystron” eines
Mikrowellen-
herdes



Klystron-Galerie des SLC

Beam Position Monitor



pick-up Elektroden in x- und y-Richtung;
relative Stärke der Signale ergibt 2-dimensionale Information
über die Lage des Strahls.

hochenergetische Teilchenbeschleuniger:

Collider	start – end date	beam type	max. beam energy (GeV)	circumference or length (km)	L (cm ⁻² s ⁻¹)
PETRA (DESY)	1978 - 1986	e ⁺ e ⁻	23.4	2.304	10 ³⁰
SLC (SLAC)	1989 – 1999	e ⁺ e ⁻	50	1.45 + 1.47	3x10 ³⁰
LEP (CERN)	1989 – 2000	e ⁺ e ⁻	104	26.7	10 ³²
ILC (??)	2020(???) -	e ⁺ e ⁻	400 (?)	15 + 15	2x10 ³⁴
KEKB (KEK)	1999 - 2009 2015 -	e ⁺ e ⁻	8 x 3.5	3.0	10 ³⁴
PEP-II (SLAC)	1999 - 2008	e ⁺ e ⁻	9 x 3.1	2.2	10 ³⁴
HERA (DESY)	1991 - 2007	e p	30 x 920	6.3	8x10 ³¹
Sp \bar{p} S (CERN)	1981 – 1990	p \bar{p}	315	6.9	6x10 ³⁰
TEVATRON (Fermilab)	1987 - 2010	p \bar{p}	1000	6.28	2x10 ³²
LHC (CERN)	2009-	pp	7000	26.7	10 ³⁴

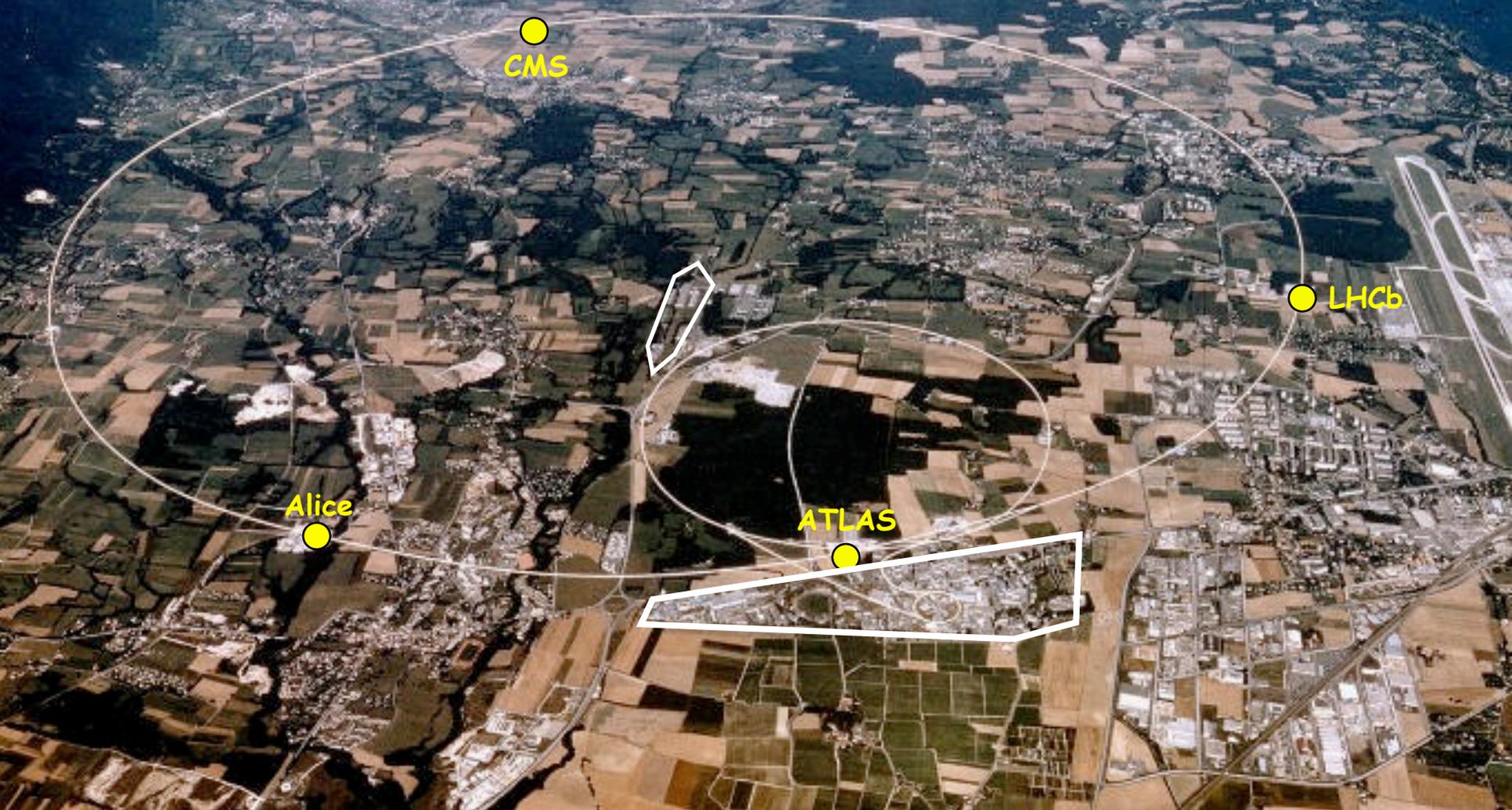
DESY / Hamburg



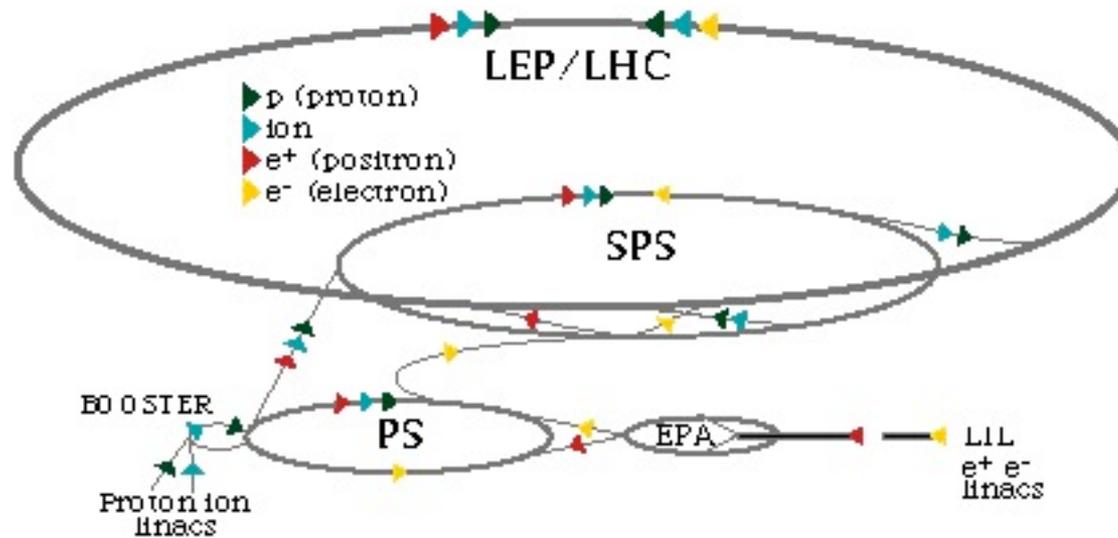
PETRA: e^+e^- Kollisionen 1978 - 1986

HERA: $e-p$ Kollisionen 1990-2007

Der Large Hadron Collider am Europäischen Zentrum für Teilchenphysik CERN / Genf



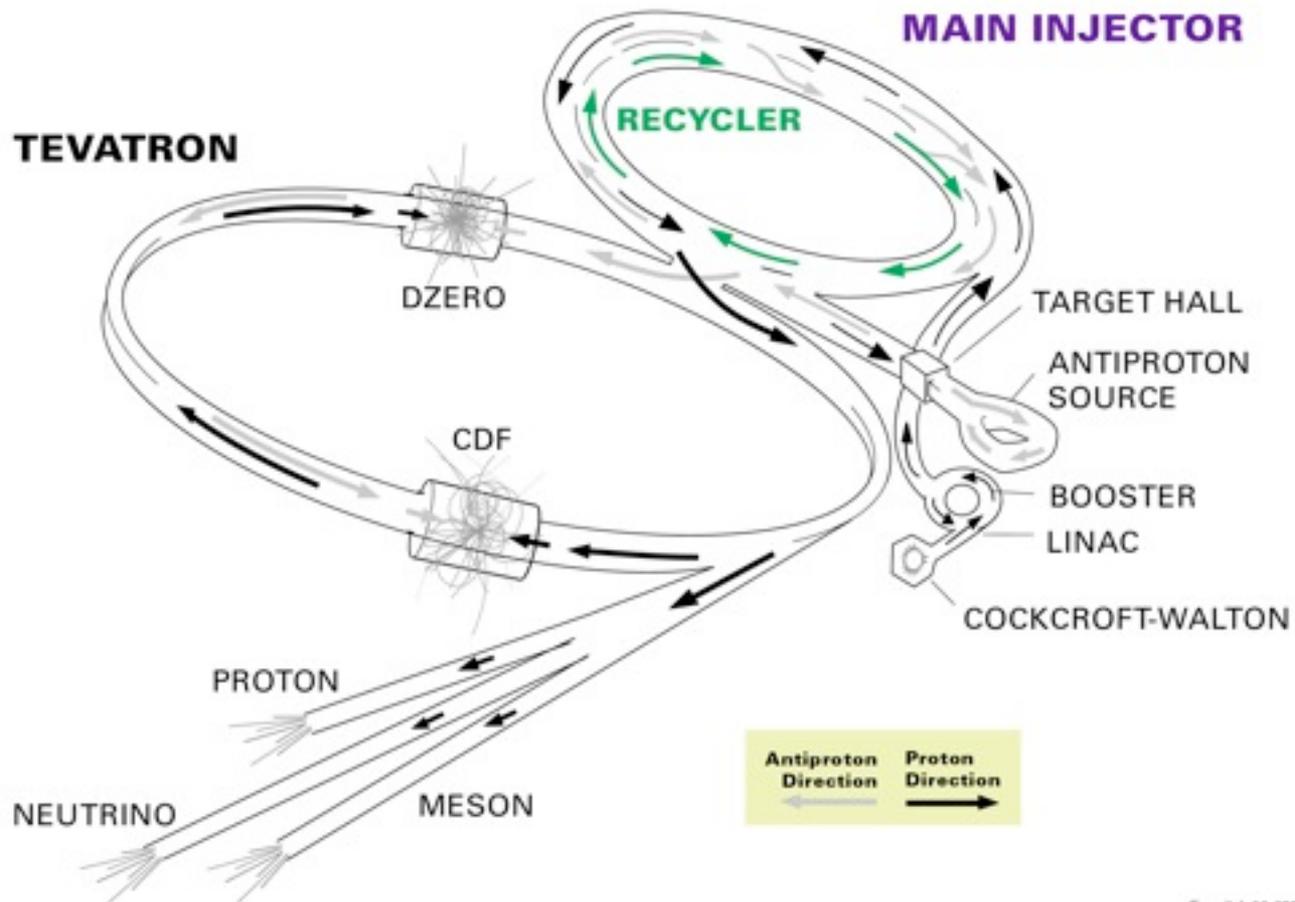
Beschleunigersystem des CERN



LHC Tunnel



FERMILAB'S ACCELERATOR CHAIN

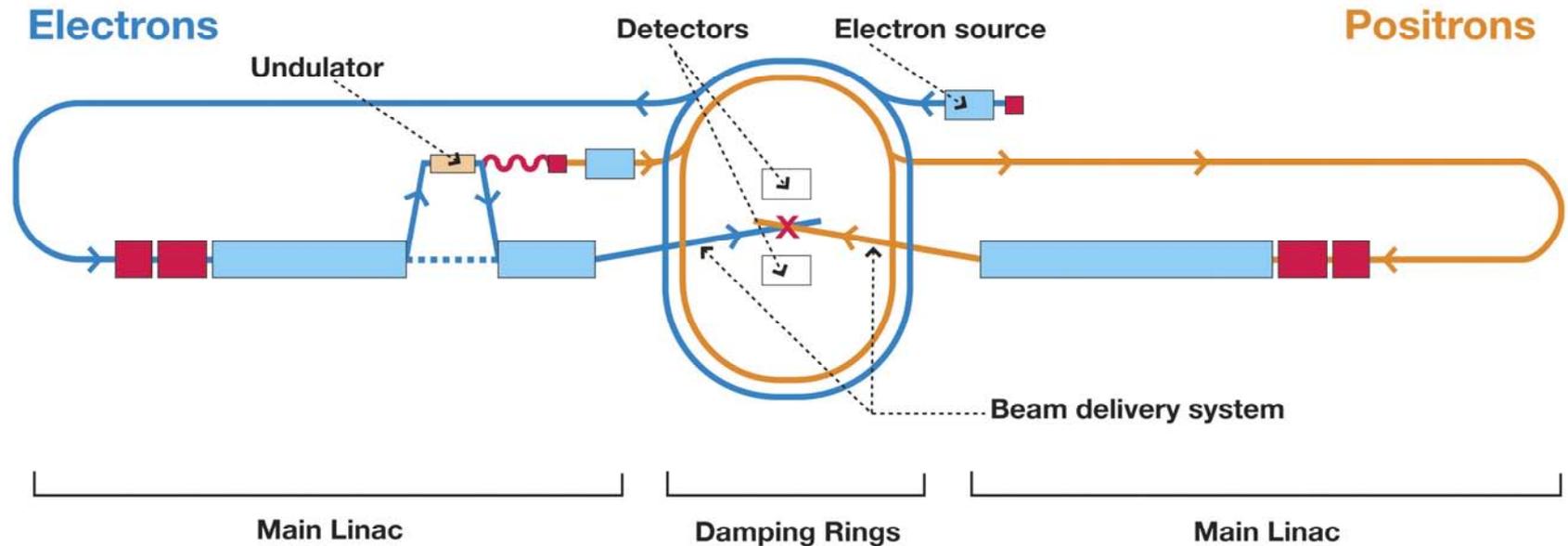


Fermilab 00-635

Tevatron @ Fermilab



International Linear e+e- Collider



- $E_{cm} = 0.5 \dots 1.0 \text{ TeV}$
- supraleitende Kavitäten aus purem Niobium ; 31.5 MV/m
- Länge ca. 31 Kilometer, plus 2 damping rings mit Durchmesser 6 km
- Kosten: 6.65 Mrd \$ plus 13.000 Mann-Jahre

Estimate 7 years of construction for accelerator and experiments after formal approval

Themenkatalog für die Zukunft der Teilchenphysik an Beschleunigern:

• Ursprung der Teilchenmassen

- Suche nach dem (den) Higgs Boson(en) → Tevatron; LHC (pp)
- präzise Vermessung seiner Eigenschaften
- Klassifizierung des Mechanismus der Symmetriebrechung im SM (oder in SUSY) → ILC (e^+e^-)

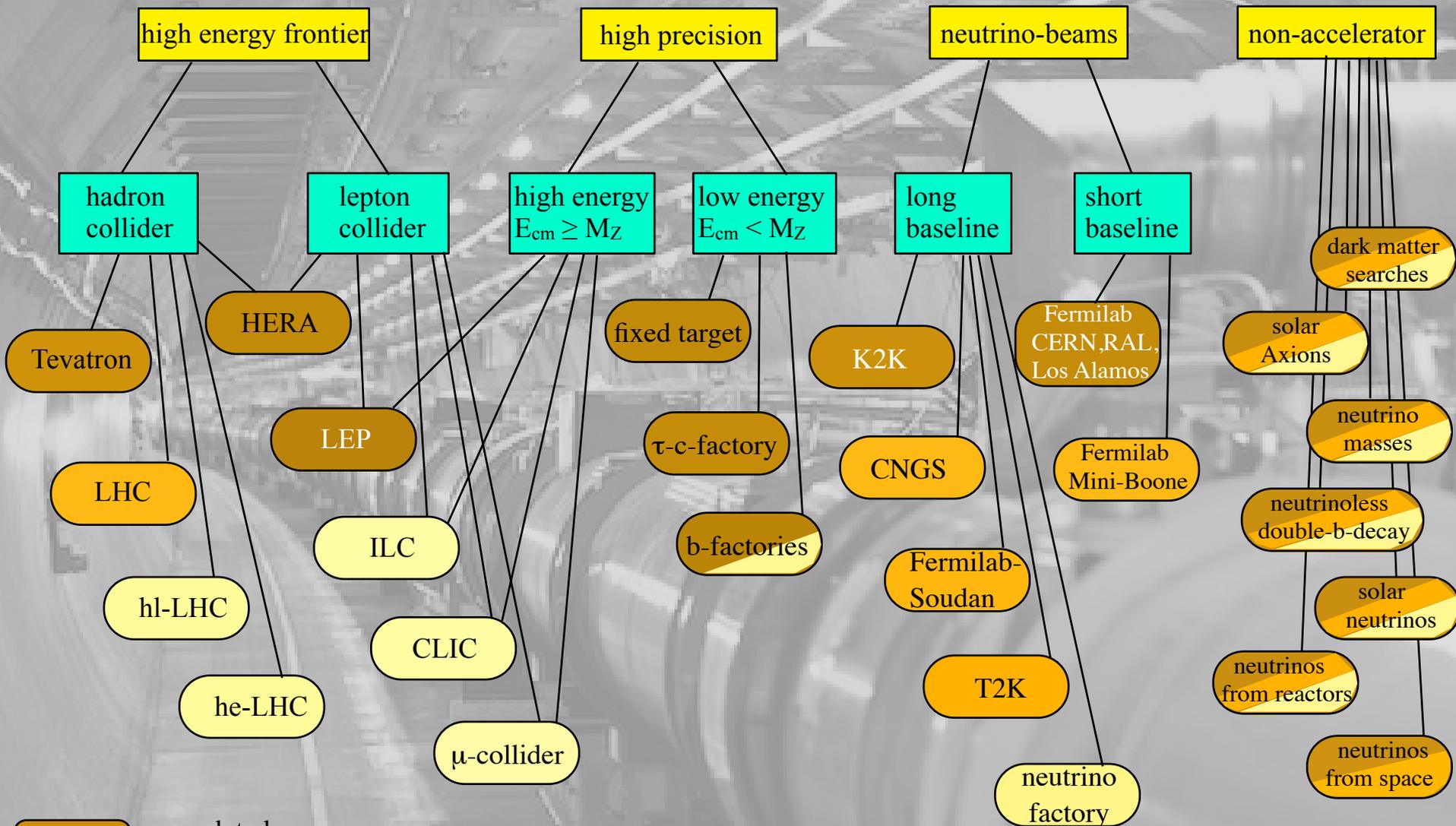
• Konsistenz des SM mit höchster Präzision

- top-Quark Physik
- Strahlungskorrekturen: Reichweite $M_X \gg E_{cm}$ → ILC
- CP-Verletzung → B-(super)-Fabriken; (hl)LHC
- Neutrino-Oszillationen → long baseline; ν -Fabriken

• Suche nach Physik jenseits des SM

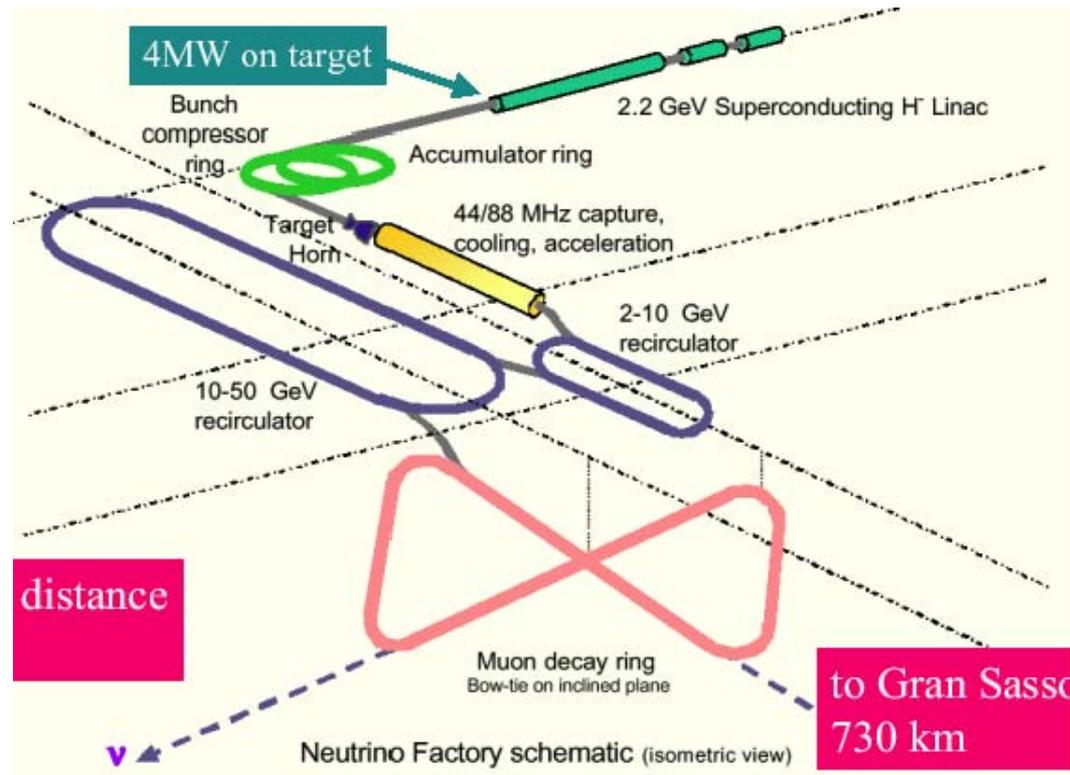
- Entdeckung → (hl)LHC
- Präzision & Klassifizierung → ILC
- ... das Unerwartete ... → VLHC; CLIC (e^+e^-); μ -Collider

Particle Physics Projects



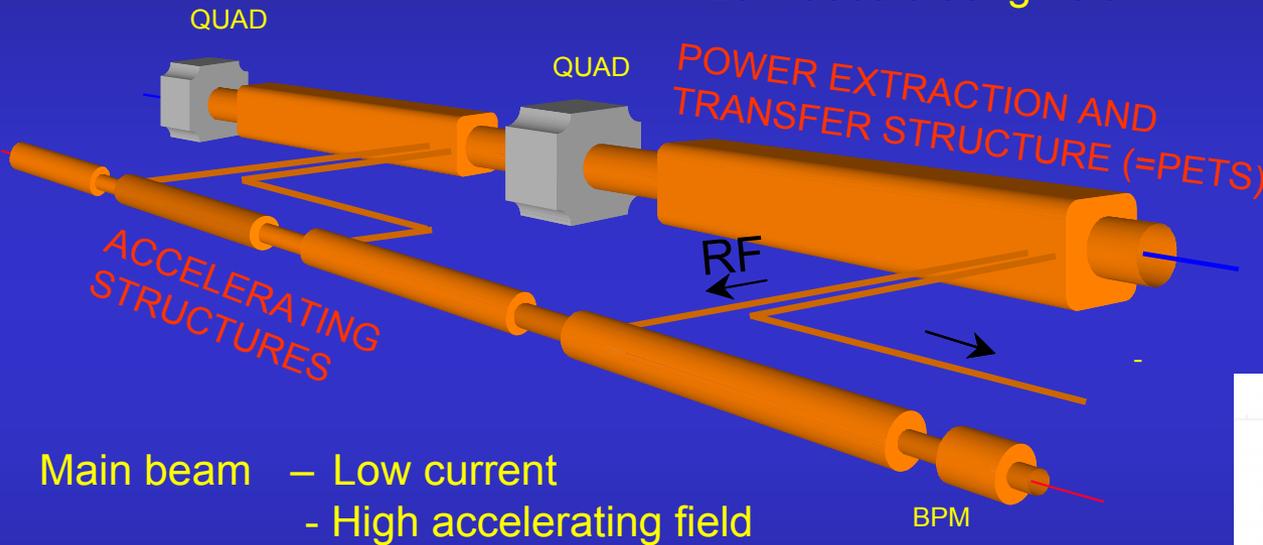
- completed
- running / under construction
- planned

Neutrino-Fabrik (CERN-Studie)



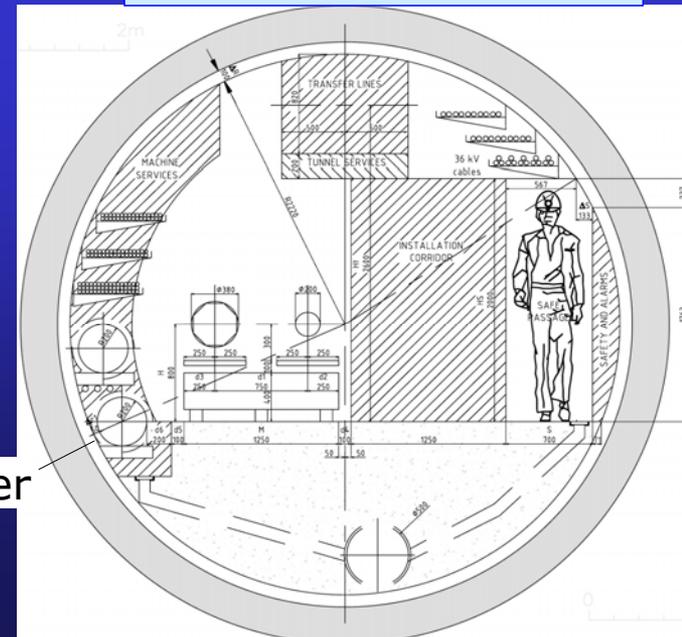
CLIC TWO-BEAM SCHEME

Drive beam - High current
- Low decelerating field



Main beam - Low current
- High accelerating field

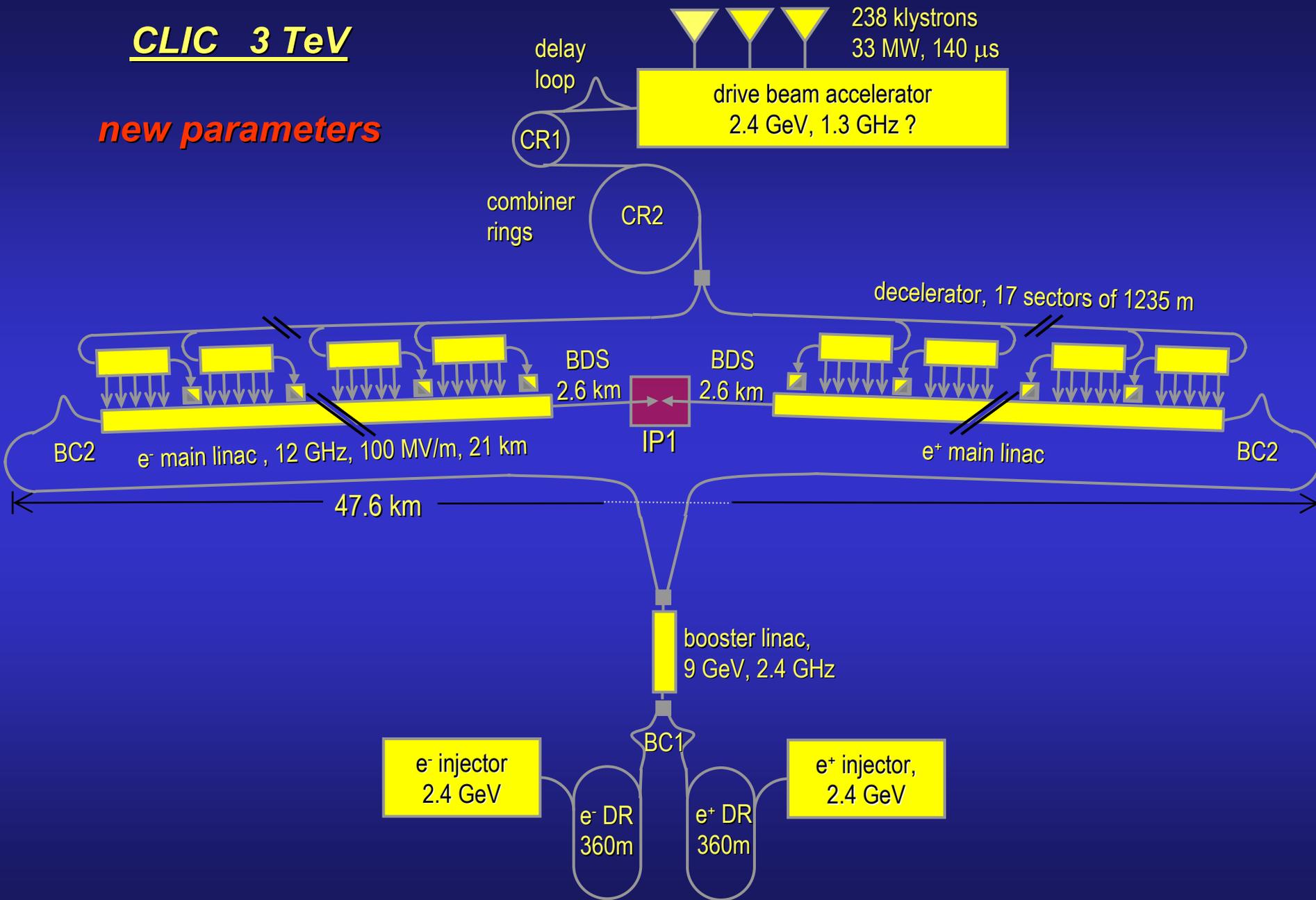
CLIC TUNNEL CROSS-SECTION



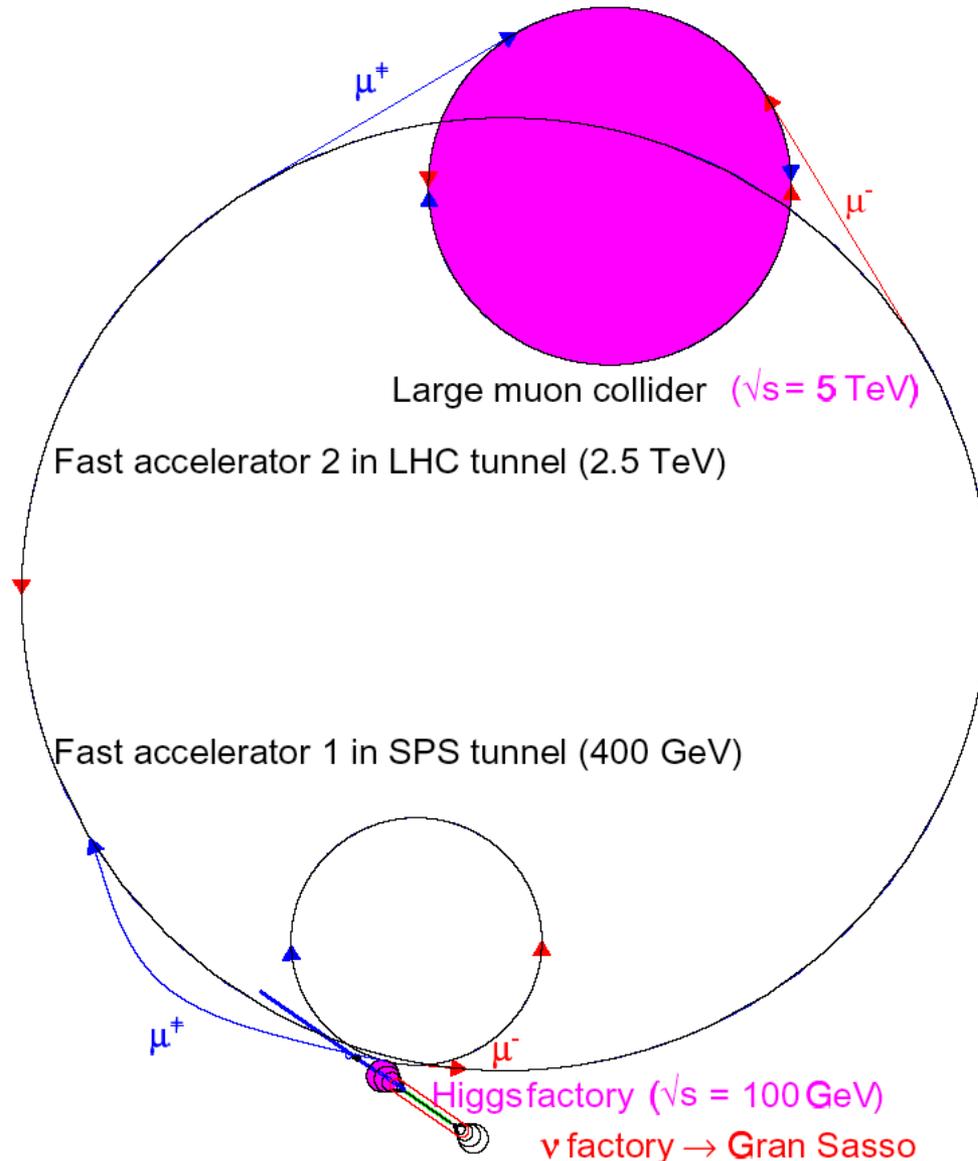
4.5 m diameter

CLIC 3 TeV

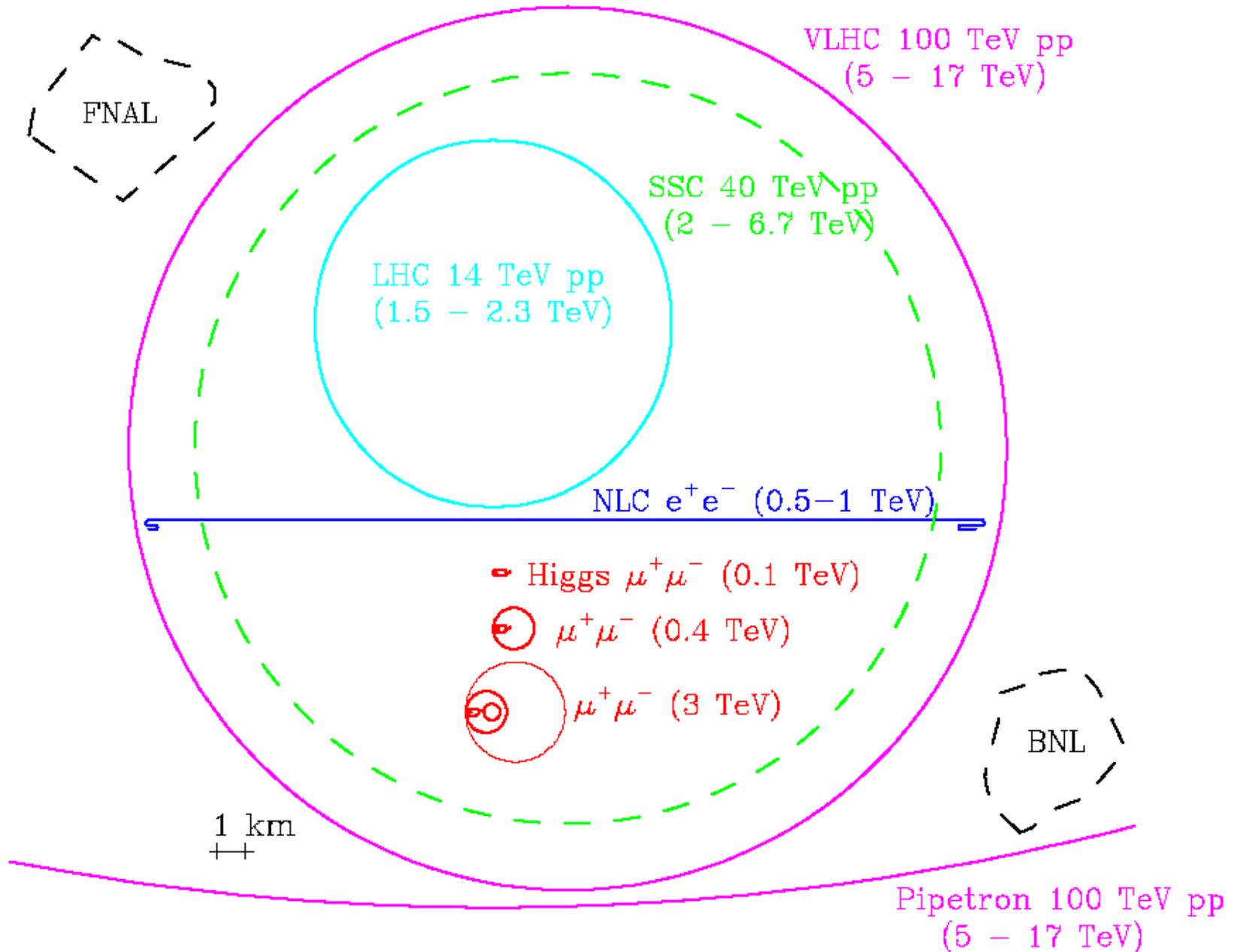
new parameters



μ -Kollider Komplex (CERN-Studie)

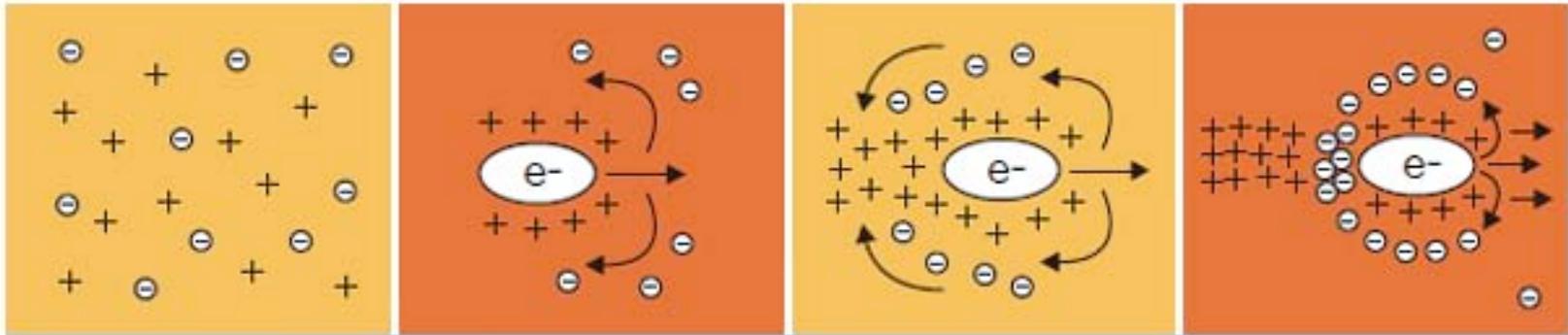


Zukünftige Beschleuniger (Fermilab-Studie)



Plasma-Wellen-Beschleunigung

Plasma-Wake-Acceleration



Picturing the plasma acceleration

1. A plasma, made of positive ions and free electrons before an electron bunch enters.
2. The electron bunch enters the plasma, repelling all the free electrons from its path, and attracting the positive ions. The moving electron bunch leaves a wake of positive ions behind it as it passes.
3. The displaced free electrons are now attracted to the mass of positive ions behind the electron bunch.
4. The free electrons in their new position give the electron bunch an acceleration.

lokale elektr. Feldstärken: $\sim \text{GV/m}$!

fernere Zukunft?

zumindest als „after burners“ ??

Hauptprobleme: - limitierte Länge der Beschleunigungsstrecke
- sehr begrenzte Luminosität

Plasma-Wellen-Beschleunigung mit Protonen (Simulation)

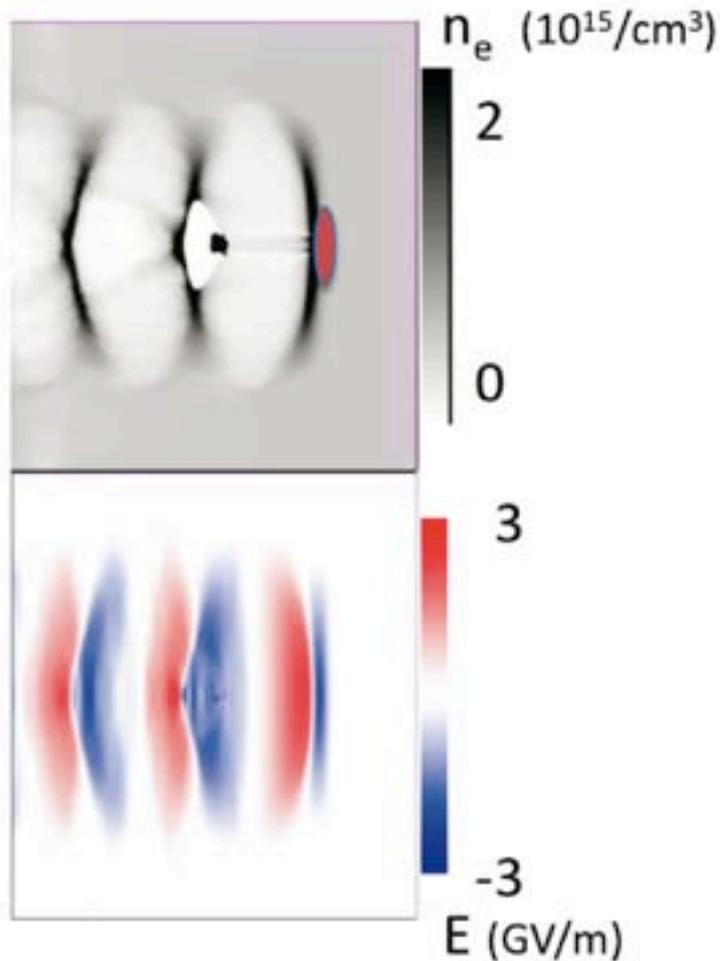
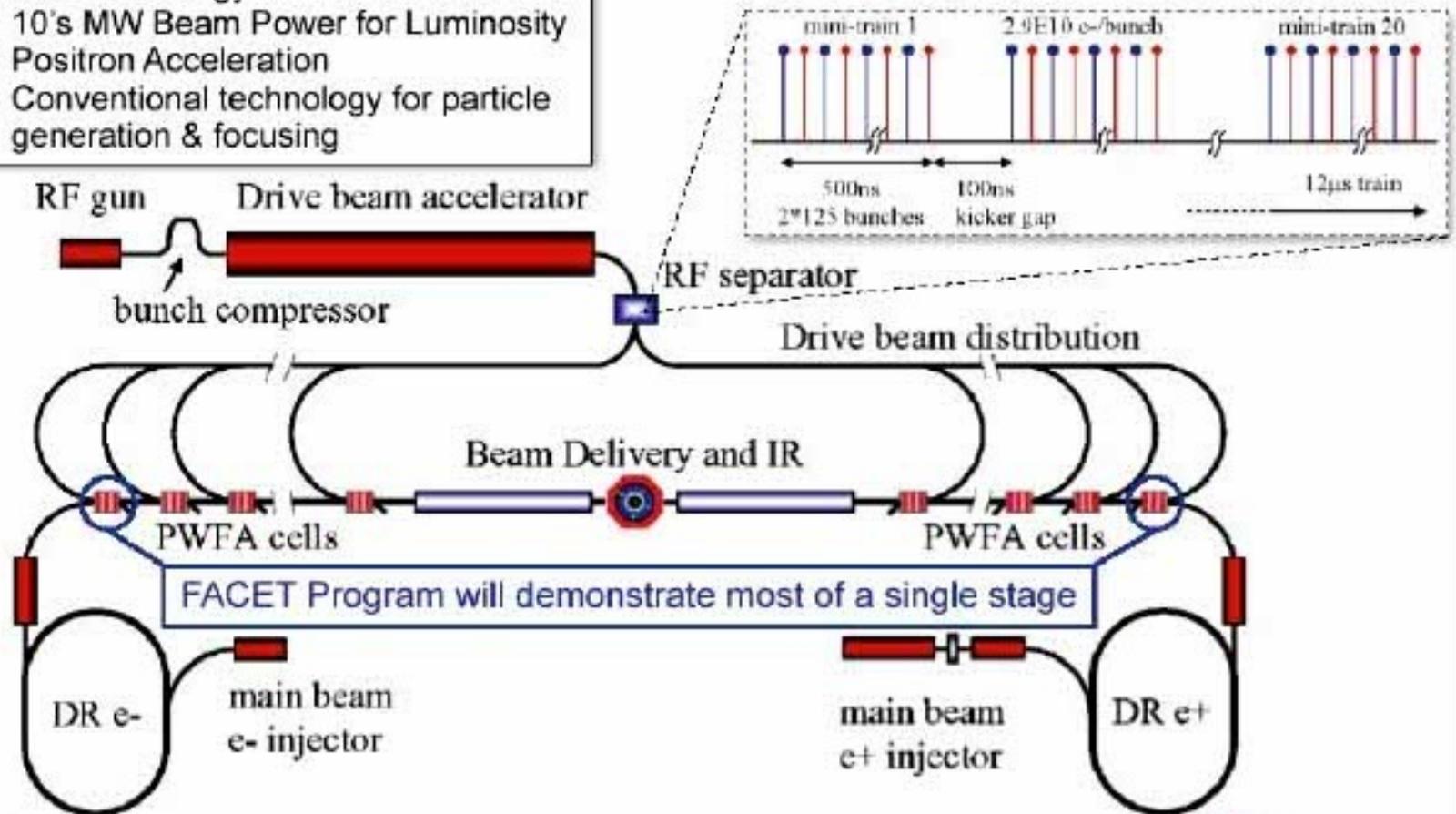
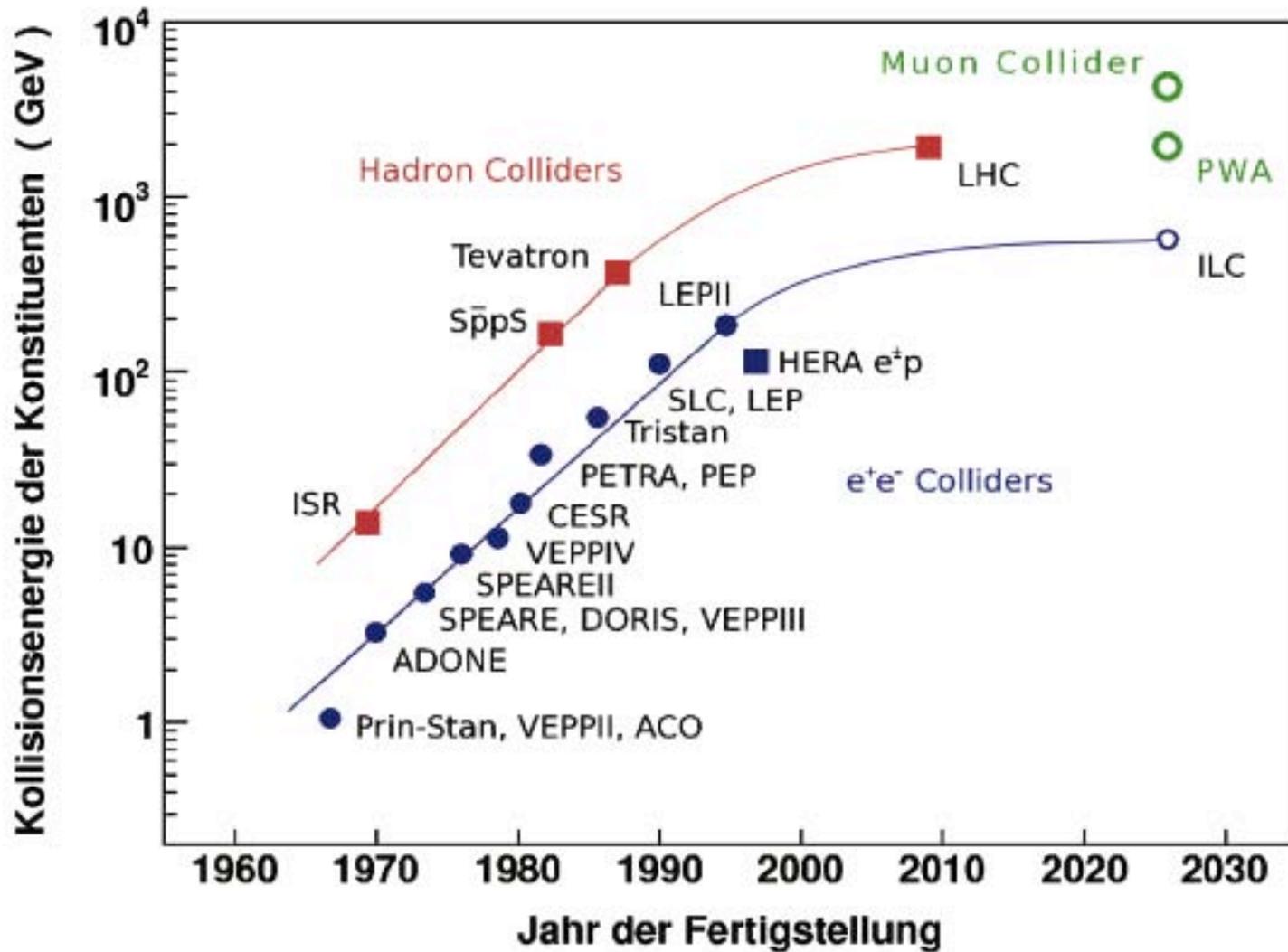


Abb. 2: Das obere Bild zeigt die Dichte der Plasmaelektronen (schwarz) und das Protonenbündel (rot). Die Struktur, die durch den Durchflug des Protonenbündels erzeugt wird, bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit nach rechts, in dieselbe Richtung wie das Protonenbündel. Das zu beschleunigende Elektronenbündel ist als schwarzer Punkt mit hoher Dichte in der Nähe der Bildmitte zu sehen. Das untere Bild stellt die Stärke des elektrischen Feldes dar, das von der inhomogenen Ladungsdichte erzeugt wird. Das beschleunigte Elektronenbündel steht ein Beschleunigungsfeld von beinahe -3 GV/m .

A Concept for a Plasma Wakefield Accelerator Based Linear Collider

- TeV CM Energy
- 10's MW Beam Power for Luminosity
- Positron Acceleration
- Conventional technology for particle generation & focusing





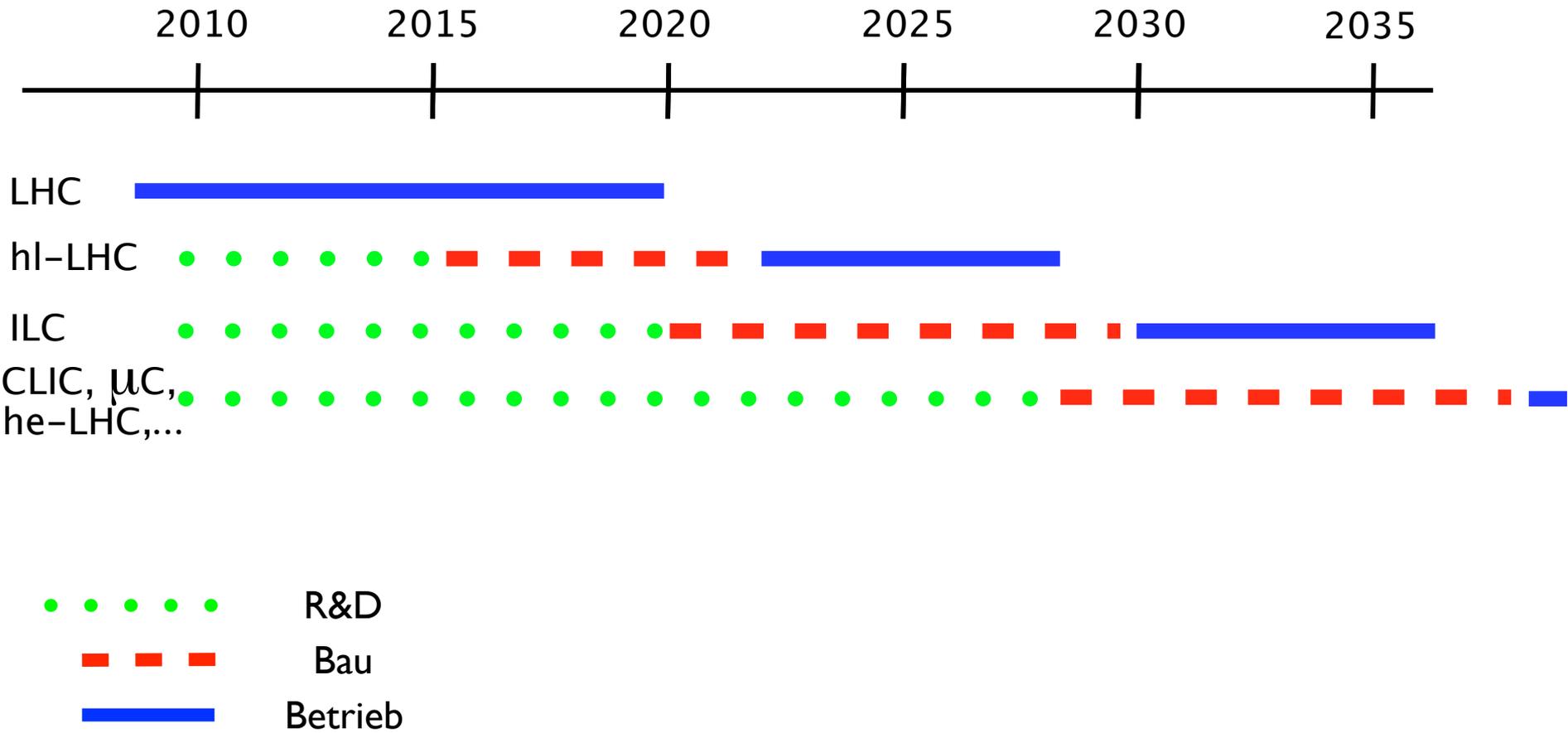


The European strategy for particle physics

CERN Council, 2012/2013

1. the highest priority is to fully exploit the physics potential of the **LHC** ... and organize towards a luminosity upgrade by around 2022 (**hl-LHC**).
2. facilitate rigorous **R&D** program for future **accelerators** (high field magnets; accelerating structures)
3. encourage Japan in their offer to host an International Linear Collider (**ILC**) to further explore the Higgs Boson and other particles with highest precision
4. European participation in a global (long baseline) **neutrino** programme.

Possible timeline of high energy collider projects



Zusammenfassung

- heute erreichbare Beschleuniger-Parameter
 - Beschleunigungsgradienten: 5 MV/m (LHC); 7 MV/m (LEP); 35 MV/m (ILC)
 - Teilchenenergie:
 - e^- / e^+ bis 102 GeV (LEP)
 - p bis 4 (7) TeV (LHC)
 - Teilchen / bunch: $> 10^{11}$
 - Luminositäten:
 - e^- / e^+ bis $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (KEKB, PEP-II)
 - p p bis $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Tevatron); LHC: $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- limitierende Faktoren:
 - kreisförmige Beschleuniger (Speicherringe):
 - e^- / e^+ : Synchrotronstrahlung vs. Beschleunigungsspannung/Umlauf
($W_{\text{synch}} \sim E^4 / r$)
 - p p : Magnetfeldstärke der Dipole (Supraleitung!)
 - $\mu^+ \mu^-$: Phasenraumkühlung und kurze Lebensdauer
 - Linear-Beschleuniger:
 - e^- / e^+ : Länge (Beschleunigungsspannung; derzeit max. 40 MeV/m: ILC)

Literatur / weiterführende Informationen:

- H. Wiedemann, "Particle Accelerator Physics" I & II
Springer 1993/1995 / 2007
- K. Wille, Physik der Teilchenbeschleuniger,
Teubner 1992 / 2001
- M.J. Hogan et al., „PLasma Wakefield acceleration experiments...“,
New J. Phys. 12 (2010) 055030
- Particle Data Group,
<http://pdg.lbl.gov>
- SLAC Linear Accelerator Center,
<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/accelerators/>
- CERN,
<http://public.web.cern.ch/Public/ACCELERATORS/accintro.html>

Nächste Vorlesung:

Mo, 29.4.2013

Teilchendetektoren