

Aussichten für die Beschleunigung instabiler Teilchen auf höchste Energien

Ulrich F. Katz

Rheinische Friedrich–Wilhelms–Universität
zu Bonn

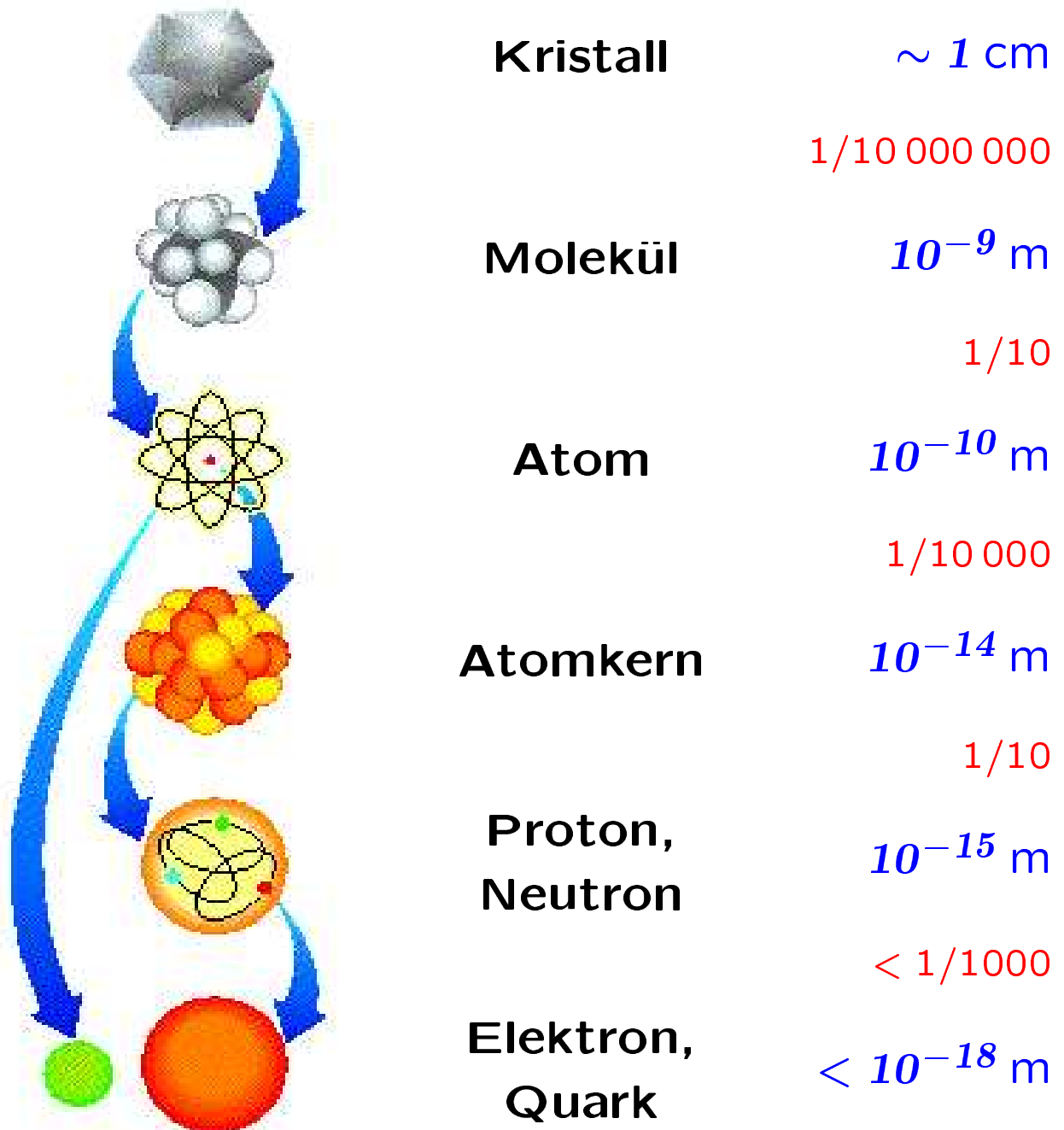


Antrittsvorlesung
2. Dezember 1998

- Experimentelle Teilchenphysik
- Teilchenbeschleuniger
- Gestatten, das Myon
- Myon–Kollider
- Einsatz in der Teilchenphysik
- Zusammenfassung und Ausblick

Experimentelle Teilchenphysik heute

Vom Makrokosmos zum Teilchen:



Der Teilchenzoo

Elementare, punktförmige Teilchen im
"Standardmodell der Teilchenphysik" :

Leptonen:

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Quarks:

$$\begin{pmatrix} d \\ u \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} b \\ t \end{pmatrix}$$

Fermionen

(Spin 1/2)



Materie

(Zu jedem
Fermion
gibt es ein
Antifermion)

Austauschteilchen:

Photon γ
Weakonen W^\pm, Z
Gluon g

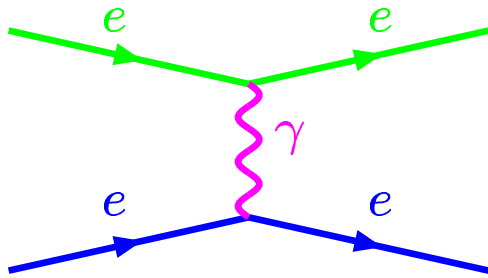
Bosonen

(Spin 1)



"Kraft-
Überträger"

Fundamentale Wechselwirkungen



Kraft =
Austausch von Bosonen
→ Wechselwirkung

Elektromagnetische Wechselwirkung:

Wirkt auf:	Austausch von:	Rel. Stärke:
geladene Teilchen	Photon	1
→ Atomare Kräfte, Magnetismus, ...		

Schwache Wechselwirkung:

Leptonen, Quarks	W^{\pm}, Z	0.001
→ Radioaktivität, ν -Wechselwirkungen, ...		

Starke Wechselwirkung:

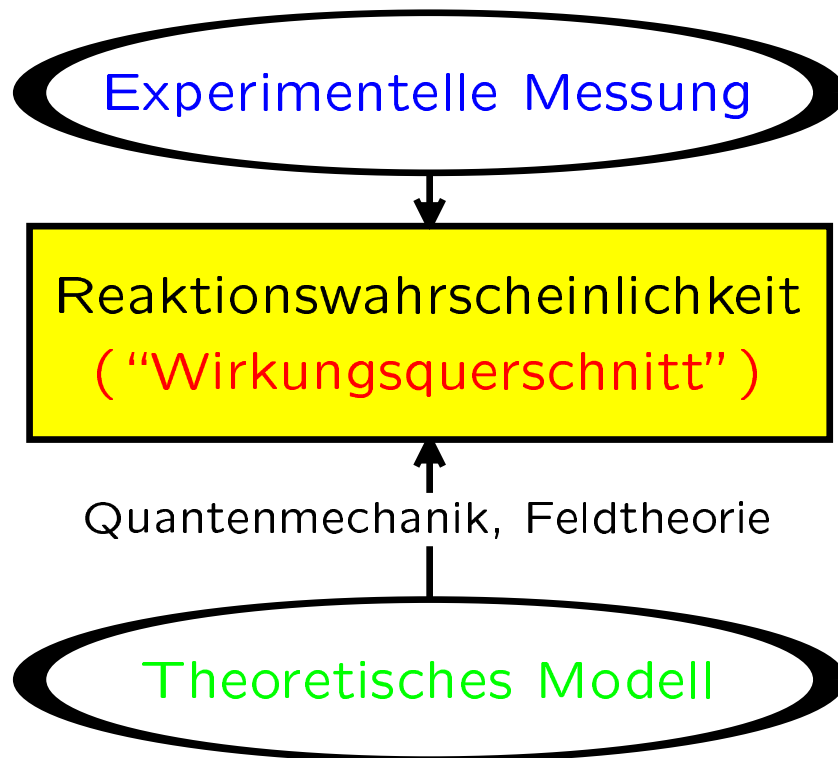
Quarks, Gluonen	Gluon	100
→ Quark-Bindung im Proton, ... , Kernkräfte		

Gravitation:

→ Erdanziehung, Kraft Erde-Sonne, ...
In Teilchen-Experimenten vernachlässigbar

Erforschung von Teilchen-Reaktionen

Teilchen-Reaktionen geben Aufschluß über
Teilchen-Eigenschaften und
Wechselwirkungs-Dynamik :



Ziele der Teilchenphysik:

- Überprüfung des **Standardmodells** und Messung seiner Parameter
- Studium von **Teilcheneigenschaften** und Zerfällen
- Suche nach "**neuer Physik**":
Supersymmetrie? andere Modelle?

Warum hohe Teilchen–Energien ?

Einsteins Energie–Masse–Äquivalenz:

$$E = Mc^2$$

(c = Lichtgeschwindigkeit)

Energie und Masse sind ineinander
umwandelbar

⇒ Erzeugung (unbekannter) Teilchen

Teilchen–Welle–Dualismus:

$$\lambda = \frac{h}{E}$$

Räumliches Auflösungsvermögen
steigt mit der Energie

⇒ Untersuchung kleinster Strukturen

Teilchen–Energien:

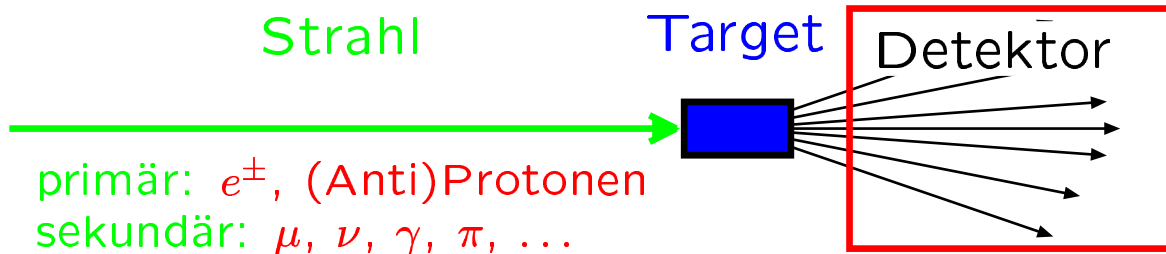
1 Elektronvolt = 1 eV

ist die Energie, die ein Teilchen mit Elektron–Ladung
beim Durchlaufen einer Spannung von 1 Volt gewinnt.

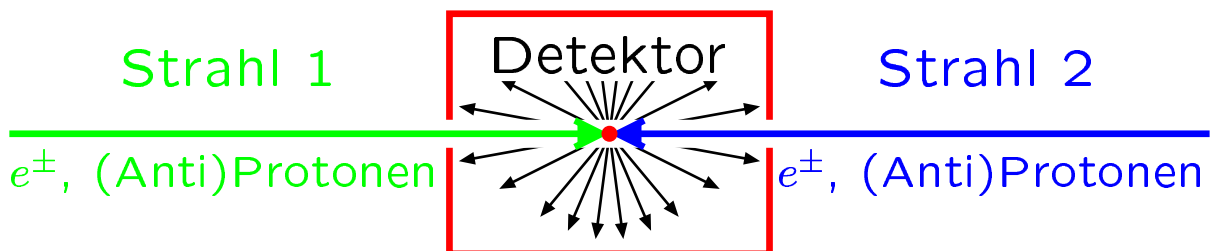
Typische Einheit: **1 GeV = 1 000 000 000 eV**

Experimente mit Teilchenstrahlen

“Fixed-Target Experiment” :

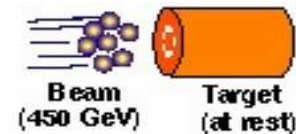


“Kollider-Experiment” :



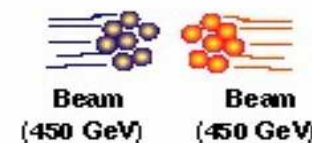
Bei gleichen
Strahlenergien liefern
Kollider die ungleich
höhere
Schwerpunktsenergie :

Fixed
Target



29 GeV

Colliding
Beams



900 GeV

Wichtige Beschleuniger-Parameter:

- $E_{\text{cms}} =$ Schwerpunktsenergie
- Reaktionsrate pro Wirkungsquerschnitt
- Teilchensorten

Einige wegweisende Entdeckungen

Jahr	Entdeckung	Reaktion/Energie
1911	Atomkern	He ⁴ auf Gold (F) $E_{\text{He}^4} \sim 0.01 \text{ GeV}$
1969	Proton-Substruktur	e auf Protonen (F) $E_e = 7 - 17 \text{ GeV}$
1974	Charm-Quark ($M_c \approx 1.5 \text{ GeV}/c^2$)	e^+e^- -Kollisionen (K) $E_{\text{cms}} = 3.1 \text{ GeV}$ Protonen auf Kerne (F) $E_p = 30 \text{ GeV}$
1977	Bottom-Quark ($M_b \approx 5 \text{ GeV}/c^2$)	Protonen auf Kerne (F) $E_p = 400 \text{ GeV}$
1983	W, Z-Bosonen ($M_W = 80 \text{ GeV}/c^2$ $M_Z = 91 \text{ GeV}/c^2$)	Proton-Antiproton-Kollisionen (K) $E_{\text{cms}} = 540 \text{ GeV}$
1994	Top-Quark ($M_t \approx 175 \text{ GeV}/c^2$)	Proton-Antiproton-Kollisionen (K) $E_{\text{cms}} = 1800 \text{ GeV}$

F=Fixed-Target
K=Kollider

Einige offene Fragestellungen

Ursprung der Massen ?

- Im Standardmodell: **Higgs-Mechanismus**
 - elementares Higgs-Boson, das an alle Teilchen proportional zu ihren Massen koppelt
 - liefert keine Erklärung für **Massenwerte** und für **Massenhierarchie**

Warum drei Generationen ?

- Im Standardmodell: **keine Erklärung**
- Weitergehende Modelle: z.B. **Compositeness**
 - haben “elementare” Teilchen **Substruktur** ?

Gibt es Supersymmetrie (SUSY)?

- Starke theoretische Argumente für **Symmetrie** zwischen Fermionen und Bosonen
 - zu jedem Standardmodell-Teilchen gibt es einen SUSY-Partner
 - neue Teilchen mit **Masse = einige 100 GeV/c²**

Teilchenbeschleuniger

Teilchenquelle

Für e^+ , Antiproton, μ :

Initiale Teilchenreaktionen erforderlich



“Kühlung”

Teilchen müssen kollimiert und auf etwa gleiche Impulse gebracht werden



Vorbeschleunigung

Oft mehrstufiger Prozeß



Speicherring

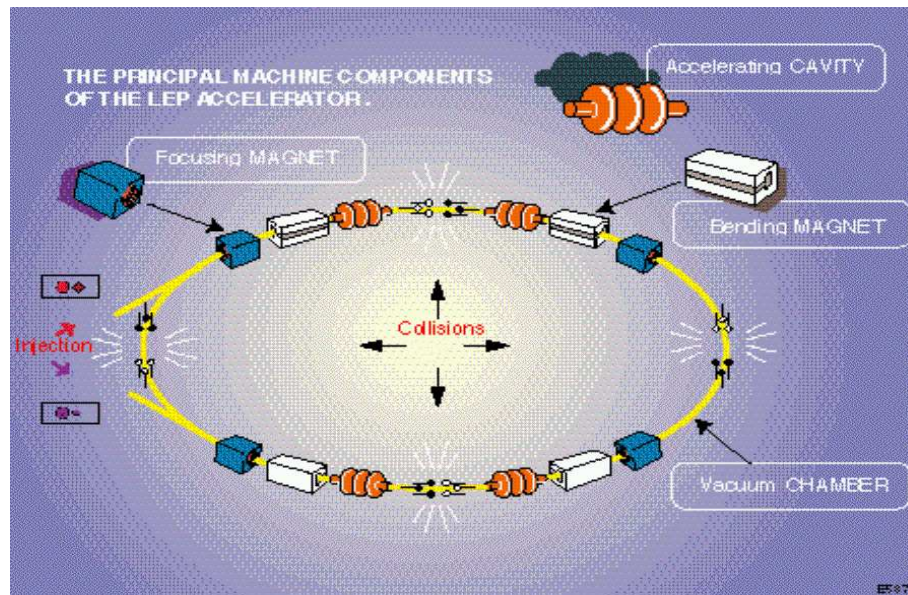
- Geschlossene Bahn durch Ablenkung in Magneten
- Beschleunigung in starken elektrischen Wechselfeldern
- Strahl kann über Stunden gespeichert werden.
- Gegenläufige Strahlen → Kollider



Linearbeschleuniger

- Geradlinige Bahn
- Elektr. Wechselfelder (bis über 10^7V/m)
- Jedes Teilchen durchläuft Beschleuniger nur einmal nur eine “Chance” zur Reaktion
- Zwei Linearbeschleuniger → Kollider

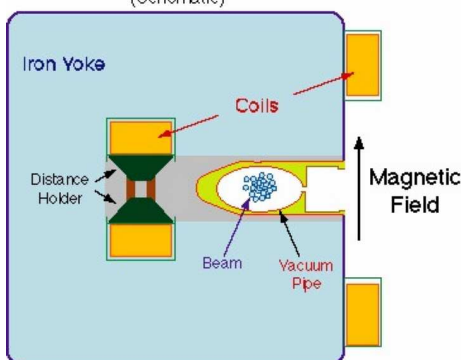
Beispiel: der LEP–Speicherring



Kavitäten

- Resonante Wechselfelder
- Teilchen "reitet" auf Welle des elektrischen Feldes
- oft supraleitend

LEP Dipole
(Schematic)



Dipol–Magnete

- Magnetfeld senkrecht zu Flugbahn
- oft supraleitend
- Bahnradius: $R \propto \frac{\text{Impuls}}{\text{Magnetfeld}}$

Quadrupol– und Sextupol–Magnete: Fokussierung

Grenzen heutiger Beschleuniger

Beschränkungen aufgrund von
Kosten, Platz, Physik, Nutzen

e^{\pm} -Speicherringe:

Synchrotronstrahlung

- Beschleunigte geladene Teilchen strahlen:

$$\text{Abgestrahlte Leistung: } P_{\gamma} \propto \frac{1}{R^2} \left(\frac{E}{M_e} \right)^4$$

→ begrenzt erreichbare Strahlenergie auf $\sim 100 \text{ GeV}$

Linearbeschleuniger:

Maximale Feldstärken:

- Supraleitende Kavitäten: Feld $\lesssim 5 \cdot 10^7 \text{ V/m}$
→ Grenze $\sim 1000 \text{ GeV}$ (entspricht $\sim 30 \text{ km}$ Länge)

Proton-Proton-Kollider:

Protonen sind keine elementaren Teilchen:

- E_{CMS} der “elementaren Wechselwirkung” viel kleiner als pp -Schwerpunktsenergie (und unbekannt)
- Starke Wechselwirkung → hohe Rate an “uninteressanten” Untergrundprozessen

Gestatten, das Myon

Eigenschaften:

Masse = $M_\mu = 0.1057 \text{ GeV}/c^2 \approx 207 M_e$

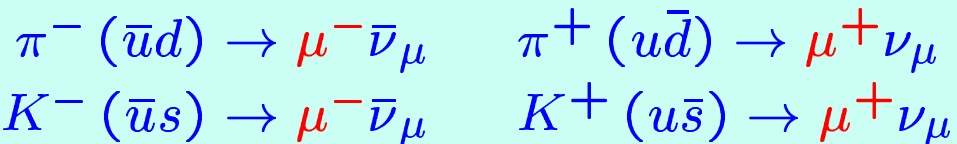
Wechselwirkungen: (fast) genau wie e^\pm

Zerfall: $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

Halbwertszeit = $1.5 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

Erzeugung der Myonen:

Meson-Zerfälle (schwache Wechselwirkung):

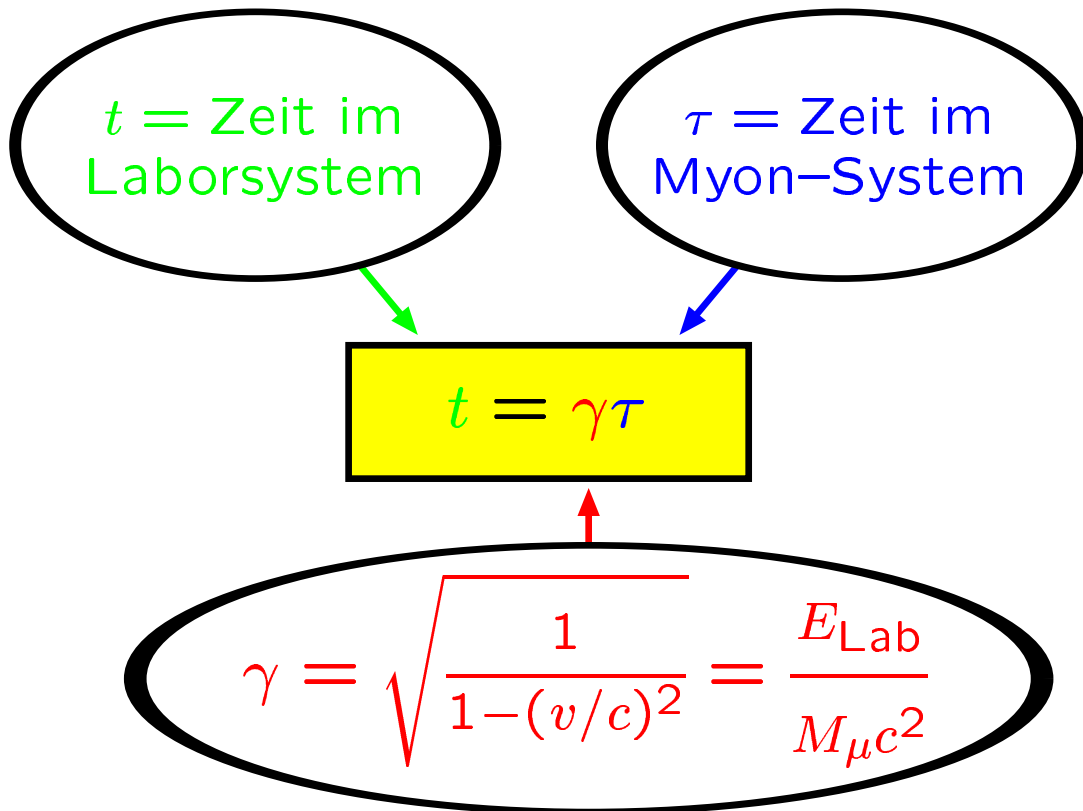


Myon-Beschleunigung:

- + Masse groß im Vergleich zu Elektron
→ Energie-Abstrahlung vernachlässigbar
- + Nur elektroschwache Wechselwirkung
→ hoher Anteil "interessanter" Reaktionen
- + Polarisierete Myon-Strahlen möglich
- Zerfall während Beschleunigung/Speicherung
→ Begrenzung der Reaktionsraten
→ Untergrund von Neutrinos und Elektronen
- Erzeugung nur in Teilchenreaktionen möglich

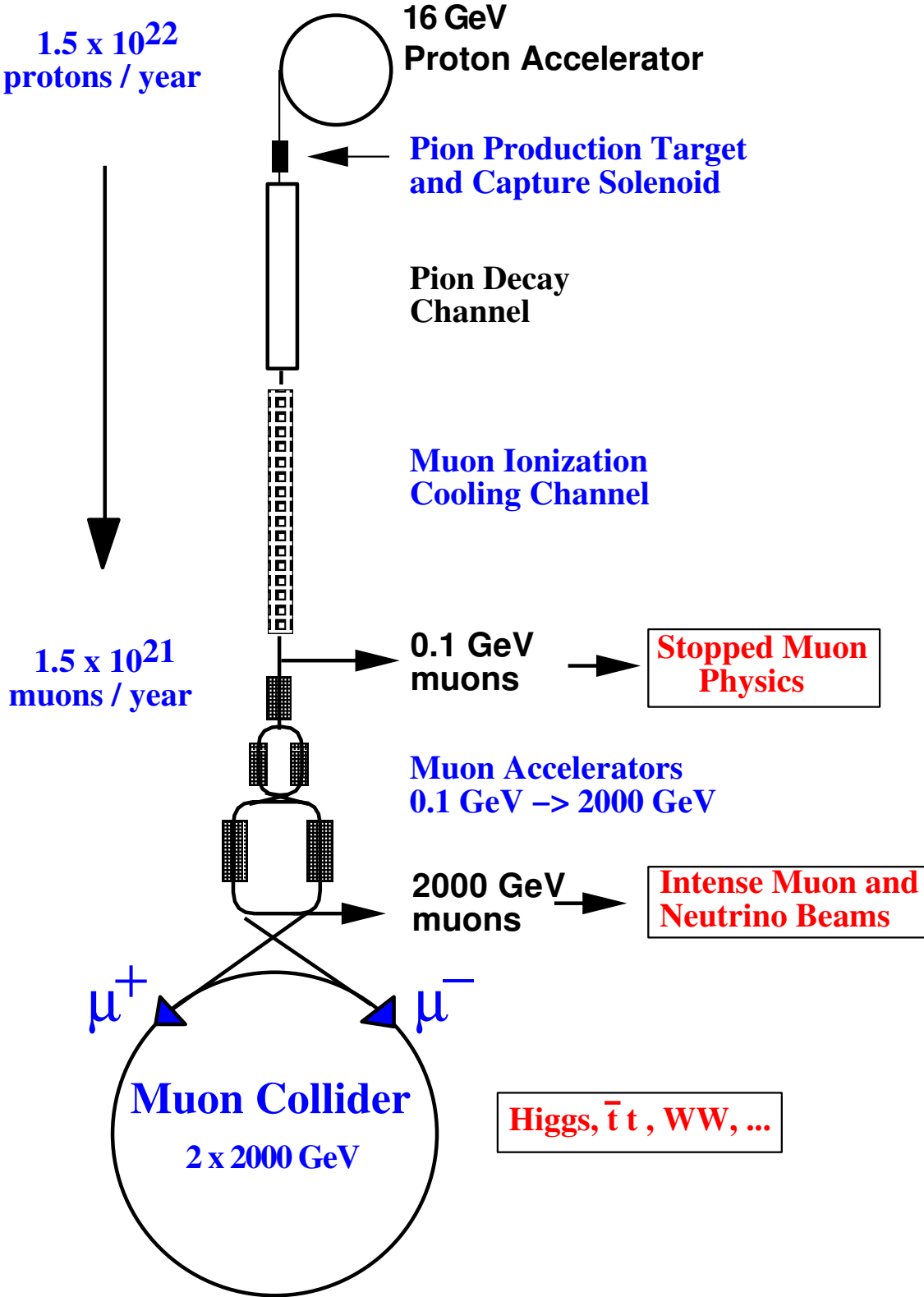
Relativität und Lebensdauer

Zeitdilatation:



- **Beispiel:** Myonen mit Energie **1 000 GeV**
→ haben im Laborsystem **0.014 s** Halbwertszeit
→ legen in dieser Zeit ca. **4 300 km** zurück
- Ca. **80%** aller Myonen “überleben” **Beschleunigung** von **0.1 GeV** auf **1 000 GeV** in Feld von **10^7 V/m**

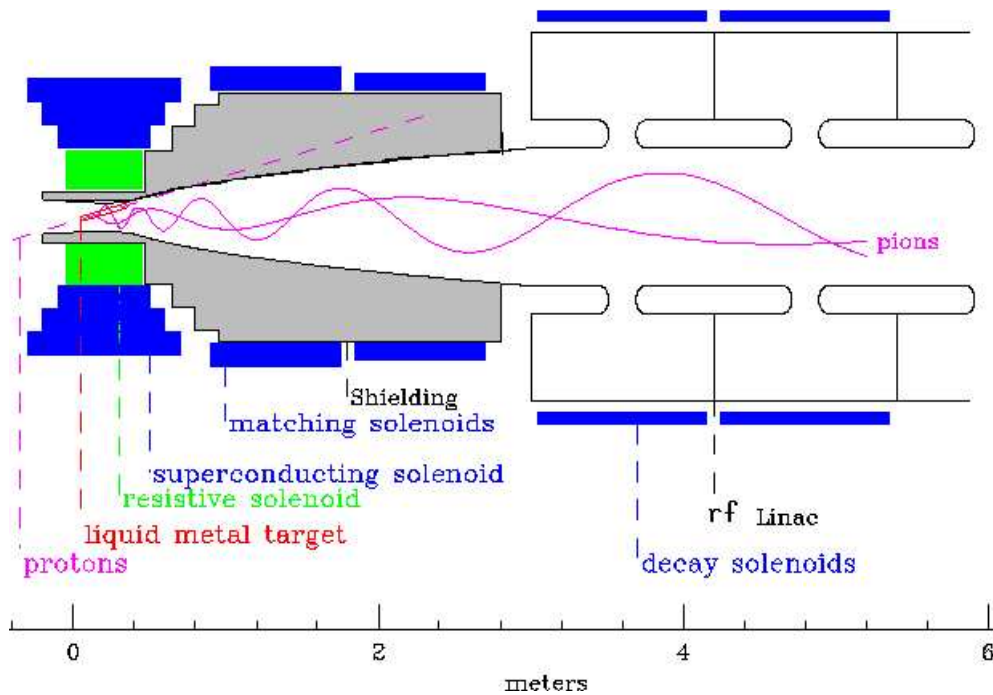
Myon-Kollider



Von den Anfängen bis heute

Wann?	Wo? / Wer?	Was?
1969/70	G.I.Budker (Novosibirsk)	Erstes Konzept
1981–83	A.N.Skrinski, V.V.Parkhomchuk (Novosibirsk), D.Neuffer (Fermilab)	Technische Konzepte für Erzeugung, Kühlung, Beschleunigung
1983	D.Neuffer	Erste Überlegungen zu Nutzung der Neutrinos vom Myon–Zerfall
ab 1992	USA	Detaillierte Untersuchungen
1996	Snowmass Workshop	Machbarkeitsstudie
1997	USA	Gründung der <i>Muon Collider Collaboration</i>
ab 1998	CERN	Myon–Kollider als Zukunftsoption, regelmäßige Treffen

Myon-Erzeugung und -Einfang



Primärer Proton-Strahl:

- $E_p = 16 \text{ GeV}$, $2.5 \cdot 10^{13} \text{ p/Bunch}$, 15 Bunche/s
- Abwechselnd für μ^+ - und μ^- -Erzeugung

Target:

- Muß ca. 400 kW Heizleistung abführen

Meson-Einfang:

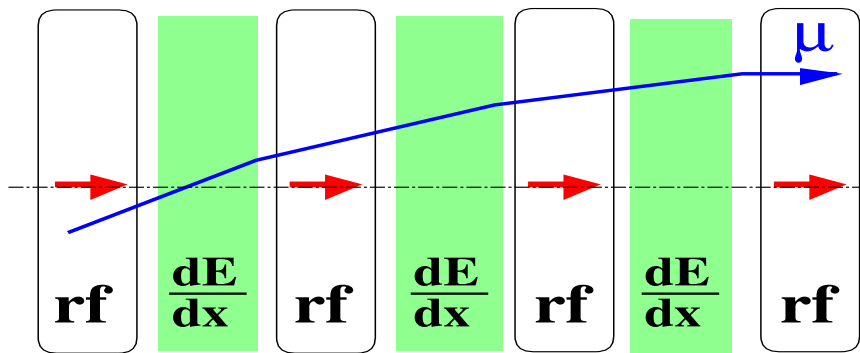
- In starkem Solenoid-Magnetfeld
- Linearbeschleuniger zur Impuls-Angleichung

⇒ ~ 0.3 eingefangene Pionen/Myonen pro Proton

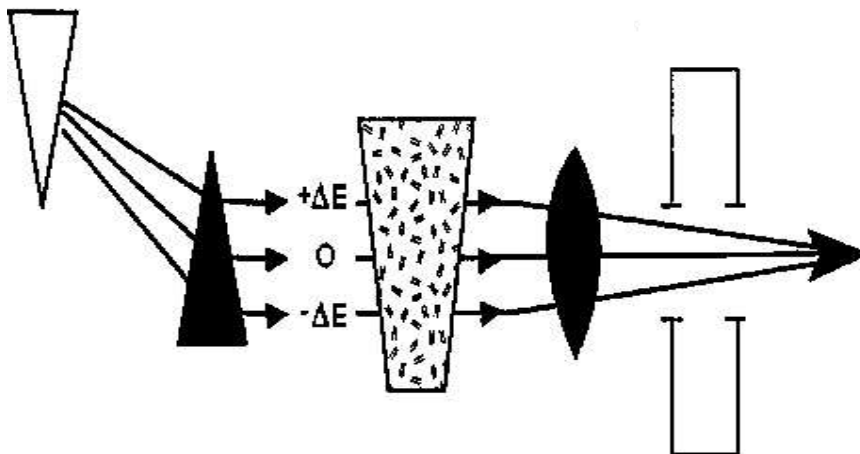
Strahl-Kühlung (I)

Aufgabe: Fokussierung der Myonen bei gleichzeitiger Reduktion der Impulsunterschiede (\Rightarrow Reduzierung des Phasenraumvolumens um Faktoren $10^5 - 10^6$)

Prinzip der Ionisationskühlung:



transversal



longitudinal

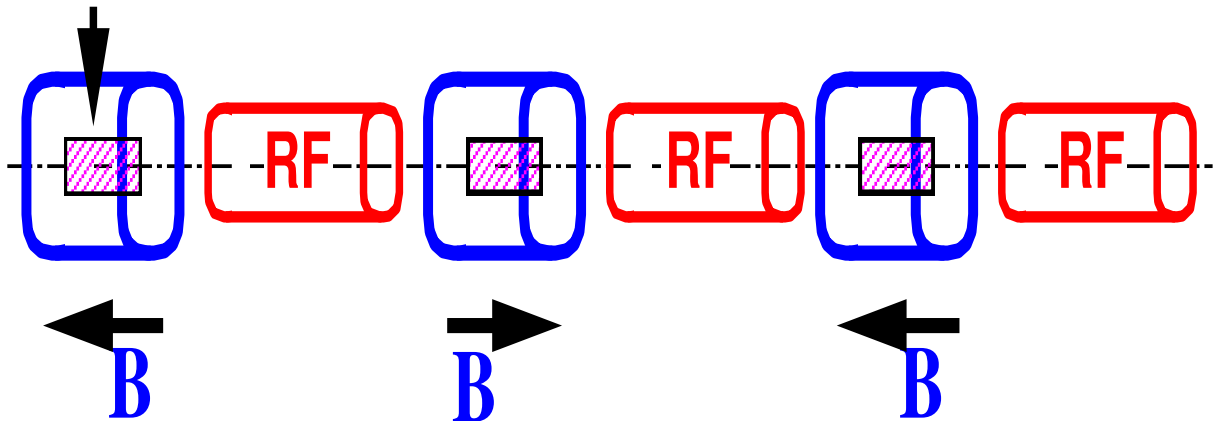
Funktionsweise:

- Impulsverlust durch Ionisation
- Beschleunigung "erneuert" Longitudinalimpuls

Strahl-Kühlung (II)

Gesamtaufbau der Kühlstrecke:

Absorber



Ca. 20–30 Abschnitte mit Absorber + Beschleunigung

Lithium-Linsen:

- Zylinder flüssigen Lithiums
- von Starkstrom durchflossen (mehrere 100 000 Ampere)
- Fokussierung durch resultierende Magnetfelder
- finale Ionisationskühlung

Entwicklungsstand:

- Testaufbauten und Prototypen geplant
- Simulation bestätigt Funktionsprinzip

25 – 50% der Myonen überleben Kühlung

Beschleunigung

Beschleunigung in mehreren Schritten:

1. Schritt (nach Kühlung):

- Linearbeschleuniger I, bis etwa 1 GeV

Nächste(r) Schritt(e):

- Geschlossene Bahn, mehrfache
Wiedereinspeisung in Linearbeschleuniger II
 - verschiedene Ablenkradien für verschiedene Strahlenergien
 - vermeidet Zeitverlust in Synchrotron aufgrund von Magnetfeldanpassung
 - Beschleunigung auf etwa 50 GeV

Endbeschleunigung:

- “Schnelle” Synchrotrons
 - Myon-Energie und Lebensdauer im Labor ausreichend für gepulste Magneten
 - mehrere Beschleuniger-Ringe in einem Tunnel
 - Endenergien bis ~ 2000 GeV

Myon-Speicherung

Speicherring:

- Kaum Energieverlust durch Synchrotronstrahlung
- Hohe Magnetfelder (13 Tesla) → 400 – 800 Umläufe

Energiekalibration:

- Myonen sind (schwach) longitudinal polarisiert
 - Präzession im Magnetfeld
 - Präzessionsfrequenz kann über Energiemessung der Zerfalls-Elektronen bestimmt werden
 - Energiekalibration mit Genauigkeit $\sim 10^{-6}$

Untergrundquellen und Probleme:

- Elektronen von Myon-Zerfall
 - Induzieren direkten und sekundären Untergrund
- “Fehlgeleitete” Myonen
 - Problem: Große Reichweite in Gestein
- Neutrinos von Myon-Zerfall
 - Problem im Falle feldfreier Strecken im Myon-Ring
 - gebündelter Neutrino-Strahl

Einsatz in der Teilchenphysik

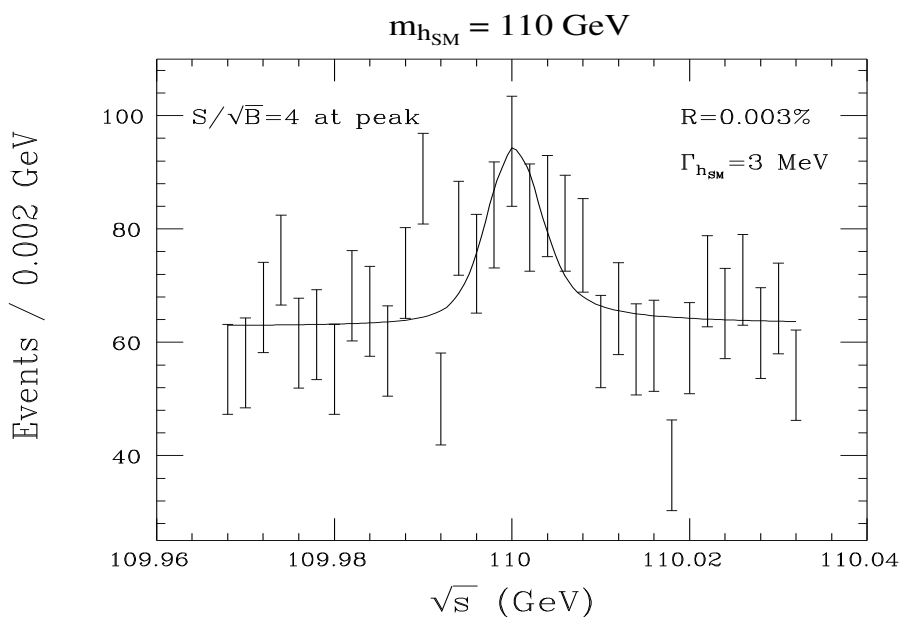
“First Muon Collider” (FMC)

$$E_{\text{cms}} = 100 - 200 \text{ GeV}$$

- Untersuchung des Higgs-Bosons (H)

$$\frac{\sigma(\mu^+\mu^-\rightarrow H)}{\sigma(e^+e^-\rightarrow H)} = \left(\frac{M_\mu}{M_e}\right)^2 \approx 43\,000$$

- Higgs-Boson ist als schmale Resonanz im $\mu^+\mu^-$ -Wirkungsquerschnitt sichtbar
- Annahme: Higgs-Masse von LEP/LHC/LC mit Genauigkeit $\Delta M_H \approx 0.1 \text{ GeV}/c^2$ bekannt



Abtasten von E_{cms} in Schritten von 0.02 GeV in etwa einem Jahr

Ziele:

- Genaues Vermessen der Higgs-Eigenschaften
- SUSY oder nicht?

Weitere Zukunftsoptionen

Hochintensive Myon-Quelle:

- Suche nach **seltene** Myon-Zerfällen
- Suche nach Reaktionen $\mu + N \rightarrow e + N$

μ -Proton-Kollisionen:

- Denkbar: Kombination von Myon-Speicherring mit existierendem Proton-Beschleuniger
- Tiefinelastische Streuung bei **höchsten** E_{cms}

“Next Muon Collider” (NMC)

$$E_{\text{cms}} = 2000 - 4000 \text{ GeV}$$

$\mu^+ \mu^-$ -Kollisionen:

- Erforschung des vollen Spektrums von **SUSY-Teilchen**
- Suche nach dem **Unerwarteten**

“The discoveries for which future colliders ... will be remembered are probably not those which are anticipated”

(J.Ellis, E.Keil, G.Rolandi:

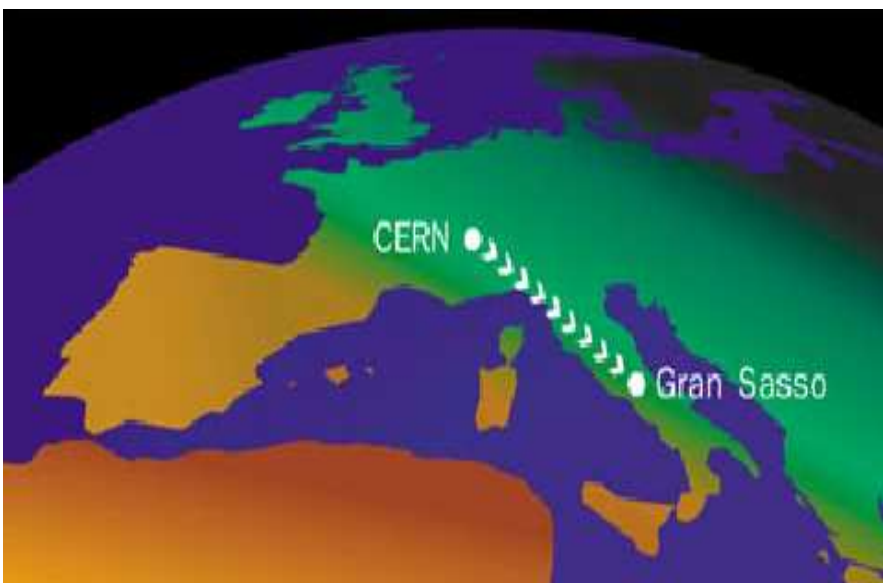
Options for Future Colliders at CERN)

Physik mit Neutrino–Strahlen

Neutrinos sind nicht nur störender Untergrund
Myon–Kollider kann Neutrino–Strahl bisher
unerreichter Intensität liefern.
Zusammensetzung und Energiespektrum sind
genau bekannt.

Neutrino–Oszillationen:

- **Kürzlich entdeckt:** ν_e, ν_μ, ν_τ verwandeln sich ineinander
→ Wahrscheinlichkeit \propto Weglänge



CERN: $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu$

nach 730 km
im Gran Sasso
Laboratorium

Nachweis von $\bar{\nu}_\tau$
 $\bar{\nu}_\tau + X \rightarrow \tau^\pm + X'$

- Eventuell Niederenergie–Myon–Speicherring
speziell für ν –Strahlen
- ν –Strahlen von Myon–Kollider intensiv genug zur
“Beleuchtung” von 10 000 km entfernten Experimenten

Zusammenfassung und Ausblick

Teilchen–Reaktionen bei höchsten Energien erlauben neue Einsichten und Entdeckungen in der Teilchenphysik

Konventionelle Beschleuniger stoßen an technologische und physikalische Grenzen. Beschleunigung instabiler Teilchen könnte diese Grenzen überwinden.

Erste Forschungs– und Entwicklungsarbeiten für einen Myon–Kollider sind im Gange. Vorarbeiten über viele Jahre sind notwendig, um die technologische Machbarkeit zu testen.

Es ist denkbar, daß — nach den jetzt in Planung befindlichen Beschleunigern — ab etwa dem Jahr 2010 Myon–Kollider und deren sekundäre Neutrino–Strahlen zu wichtigen Instrumenten der Teilchenphysik werden.