

Die Entdeckung der schwachen W- und Z-Bosonen

Schlüsselexperimente der Teilchenphysik
SS 2009 Prof. Johanna Stachel

Betreuer Kai Schweda

Gliederung

- I. Motivation
- II. Zerfall und Erzeugung der schwachen Bosonen
- III. Das UA1 Experiment
- IV. Resultate
- V. Zusammenfassung
- VI. Referenzen

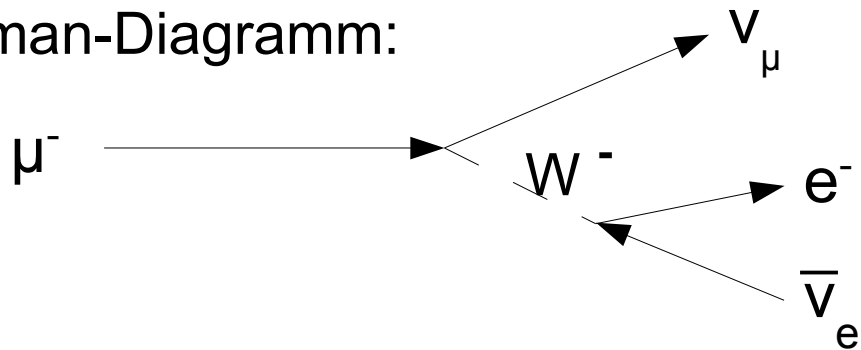
I. Motivation

Der Stand der schwachen Wechselwirkung vor 70er Jahre:

bekannter schwacher Zerfall:

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

dessen Feynman-Diagramm:



Eigenschaft: Lepton wechselt
immer seine Ladung

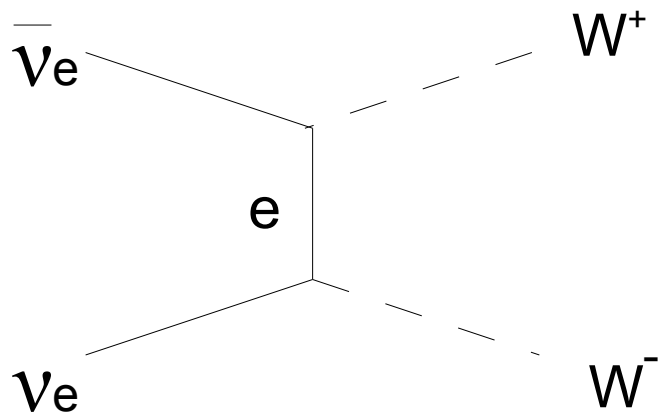
- Aber:
1. Die Masse der W-Bosonen war nicht bekannt
 2. Die theoretische Berechnung der Wirkungsquerschnitt divergiert bei hohen Ordnungen

Man versteht das theoretische Problem besonders gut anhand folgender Reaktion:

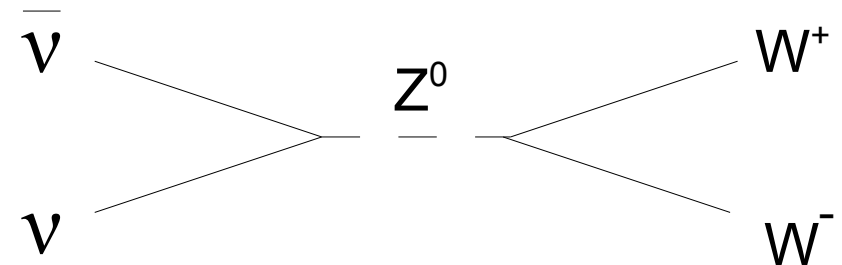
Divergenzen bei der Berechnung des Wirkungsquerschnitt

z.B. $\bar{\nu} \nu \rightarrow W^+ W^-$

Lösung: Etwa im Jahr 1968
Weinberg & Salam $\rightarrow$
elektroschwache Wechselwirkung
mit schwachen Neutralen Strömen



$$\sigma_{\text{tot}} \propto s \propto p^{*2}$$



Divergiert auch, aber mit
entgegengesetztem Vorzeichen!

1. Ordnung $\rightarrow$ quadratische Divergenz $\propto p^{*2}$
2. Ordnung $\rightarrow$ quadratische Divergenz $\propto p^{*4}$
- u.s.w.

($p^* :=$ Impuls des W's im CM-System)

$\Rightarrow$ Divergenzen heben sich
gegenseitig weg

$\Rightarrow$ endlicher Wirkungsquerschnitt

Die fundamentalen Vektorbosonen sind:

- Ein masseloses Isotriplett $\mathbf{W}_\mu = W_\mu^{(1)}, W_\mu^{(2)}, W_\mu^{(3)}$
- Ein masseloses Isosinglett B_μ

Infolge der spontanen Symmetriebrechung:

- Teilchen (das W_μ^+ , W_μ^-) erhalten Masse
- Teilchen werden gemischt $W^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} (W_\mu^{(1)} \pm i W_\mu^{(2)})$,
- Das $W_\mu^{(3)}$ und B_μ wird auch gemischt, $\sin^2\theta_w$ ist der Mischungsparameter



Sodass ein masseloses Feld A_μ (das Photon) und ein massives Feld Z_μ entsteht.

Die Lagrange-Funktion des elektroschwachen Standardmodell:

$$\mathcal{L} = \frac{g}{\sqrt{2}} (J_\mu^- W_\mu^+ + J_\mu^+ W_\mu^-) + \frac{g}{\cos(\theta_w)} (J_\mu^{(3)} - \sin^2(\theta_w) J_\mu^{\text{em}}) Z_\mu + g \sin(\theta_w) J_\mu^{\text{e.m.}} A_\mu$$

Schwacher geladener Strom Schwacher neutraler Strom e.m. neutraler Strom

$\sin^2(\theta_w)$, der einzige freie Parameter der Theorie!

J_μ : Isospin Strom (Vierer Strom)

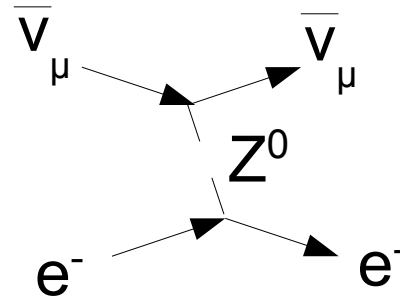
$J_\mu^{(3)}$: die dritte Komponente des J_μ

$J_\mu^{\text{e.m.}}$: der elektromagnetische Strom

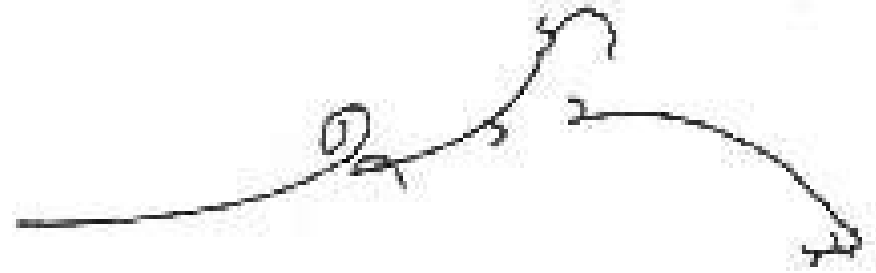
θ_w : schwacher Mischungswinkel (oder Weinberg-Winkel)

Durch Lagrange-Funktion $\rightarrow \sigma_{\text{el.weak}}^{\text{theor.}} = f(\sin^2 \theta_w)$

1973 Entdeckung des neutralen Stroms mit der Blasenkammer Gargamelle am CERN



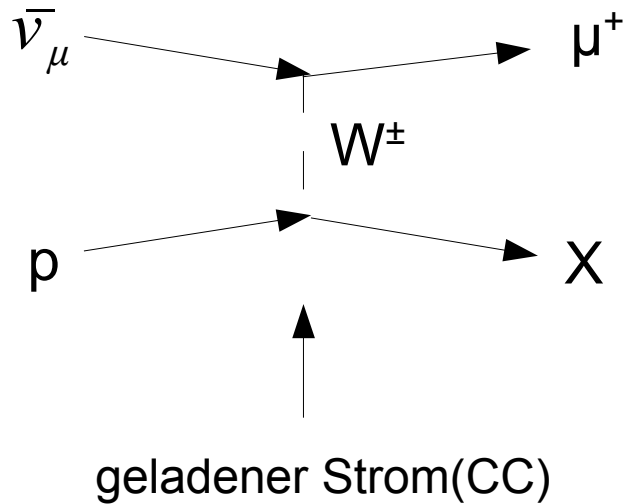
Blasenkammeraufnahme



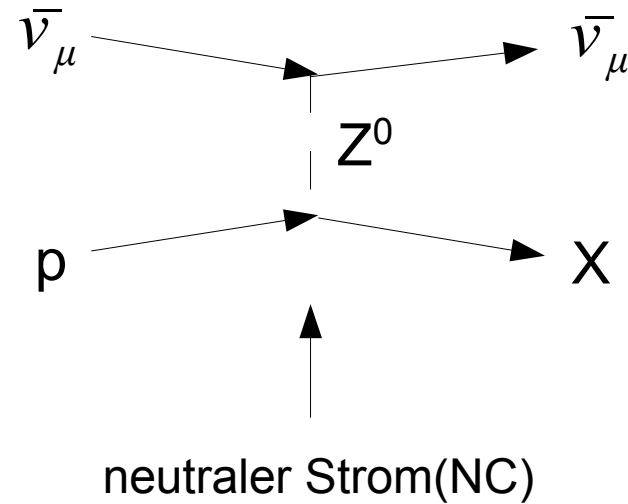
Spurrekonstruktion

=> Erste Evidenz des neutralen Strom(Z^0) !

- Weiterhin: (Neutrino-Quark Streuung)



$$\bar{\nu}_{\mu} \mathbf{N} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu} \mathbf{X} \quad (\mathbf{N}: \text{Nukleon})$$



Messe das Verhältnis $\frac{NC}{CC} \Big|_{\nu} \quad \frac{NC}{CC} \Big|_{\bar{\nu}}$

$$R_{\nu} \equiv \frac{\sigma^{NC}(\nu)}{\sigma^{CC}(\nu)} \equiv \frac{\sigma(\nu_{\mu} \mathbf{N} \rightarrow \nu_{\mu} \mathbf{X})}{\sigma(\nu_{\mu} \mathbf{N} \rightarrow \mu^{-} \mathbf{X})} = 0,31 \pm 0,01$$

$$R_{\bar{\nu}} = \frac{\sigma^{NC}(\bar{\nu})}{\sigma^{CC}(\bar{\nu})} \equiv \frac{\Sigma(\bar{\nu}_{\mu} \mathbf{N} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu} \mathbf{X})}{\sigma(\bar{\nu}_{\mu} \mathbf{N} \rightarrow \mu^{+} \mathbf{X})} = 0,38 \pm 0,02$$

$$\sigma_{\text{el.weak}}^{\text{theor.}} = f(\sin^2 \theta_w)$$

$$\Rightarrow \sin^2 \theta_w = 0,234 \pm 0,013$$

Dadurch: theoretische Vorhersage der W- und Z-Masse

$$m_W^2 = \frac{e^2 \sqrt{2}}{8G \sin^2 \theta_W}$$

$$m_Z^2 = \frac{m_W^2}{\cos^2 \theta_W}$$

$$m_W = (82 \pm 2,4) \text{ GeV}/c^2$$

$$m_Z = (94 \pm 2,5) \text{ GeV}/c^2$$

$G = 1,166367(5) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ Fermi-Konstante

(Bestimmt im Muonzerfall,
aus der Messung der Muon-
Lebensdauer.)

- 1979 Nobelpreis für Weinberg, Salam, Glashow



II. Zerfall und Erzeugung der Bosonen

- Zerfälle der Bosonen, die für uns wichtig sind

$$Z^0 \longrightarrow e^+ e^-$$

$$\longrightarrow \mu^+ \mu^-$$

$$\longrightarrow q \bar{q}$$

$$W^+ \longrightarrow e^+ \nu_e$$

$$\longrightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

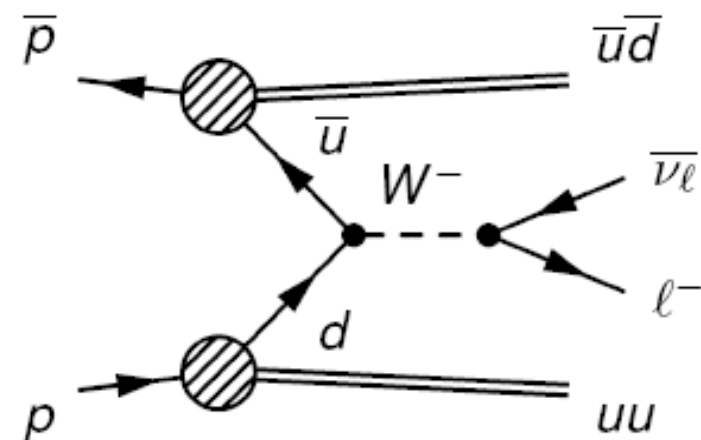
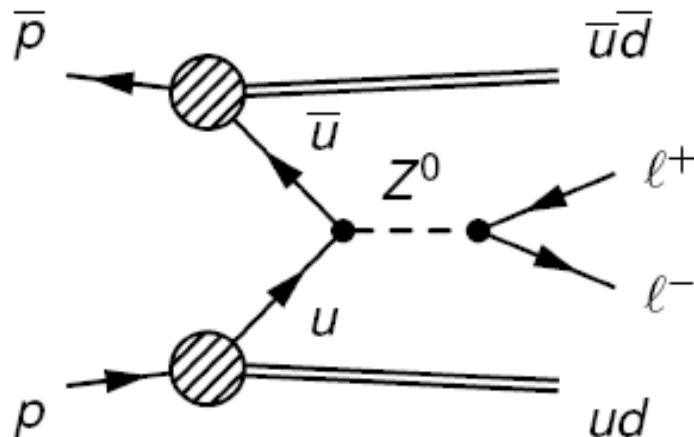
$$\longrightarrow u \bar{d}$$

$$W^- \longrightarrow e^- \bar{\nu}_e$$

$$\longrightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

$$\longrightarrow \bar{u} d$$

- Erzeugung der Bosonen $q \bar{q} \longrightarrow W/Z + X$



Warum braucht man Antiprotonen?



$$\sqrt{s_{q\bar{q}}} \geq M \approx 90 \text{ GeV}$$

- $s_{q\bar{q}} = (P_1 + P_2)^2$

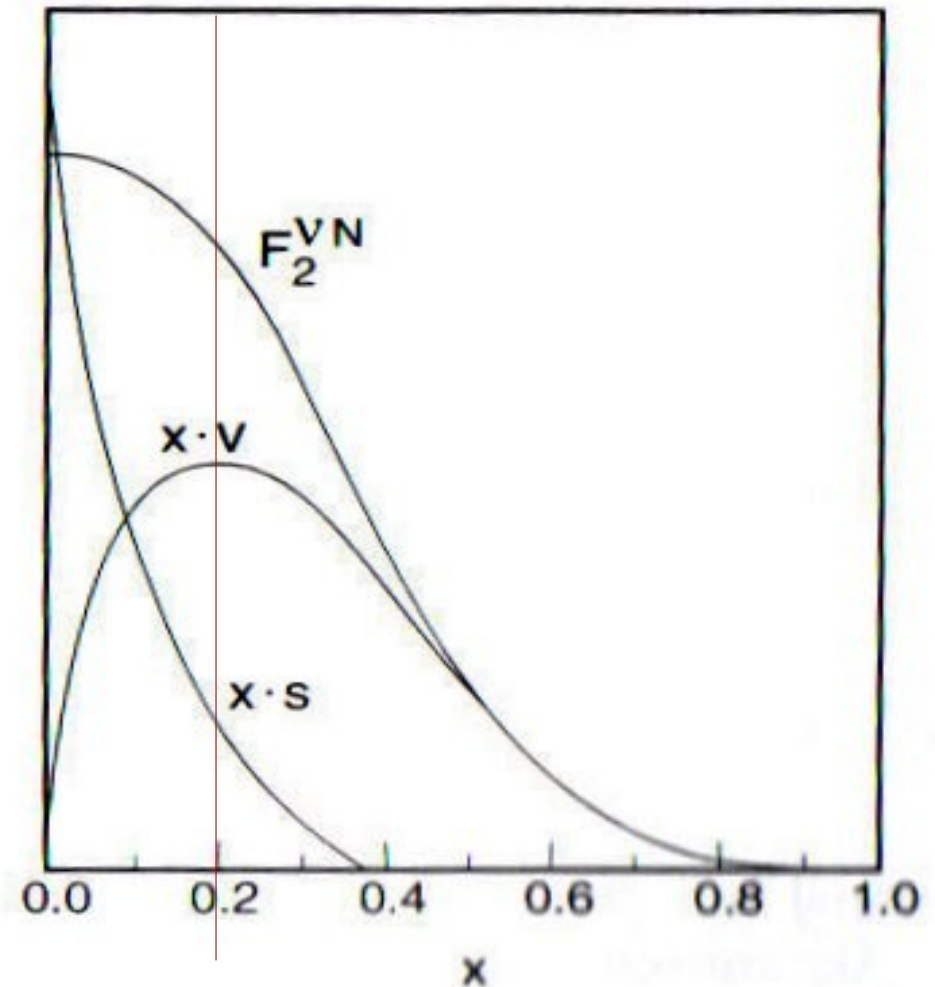
$$s_{q\bar{q}} = x_1 x_2 s_{p\bar{p}}$$

$$90^2 \text{ GeV}^2 = 0,2^2 \cdot s_{p\bar{p}}$$

$$\Rightarrow \sqrt{s_{p\bar{p}}} = 450 \text{ GeV}$$

$$\text{CERN}(Sp\bar{p}S): \sqrt{s_{p\bar{p}}} = 540 \text{ GeV}$$

(540 GeV war damals maximal möglich für Proton beim CERN)



Schematisch

=> Man benötigt Antiprotonen!

III. Das UA1- Experiment

- CERN
- Sp $\bar{p}$ S (Proton-Antiproton)
- 1978 genehmigt
- Lief bis 1990
- 12 Universitäten/Institute (u.A. CERN, Technische Hochschule Aachen, Saclay(CEN), Paris(Coll. de France))

Quelle der Protonen

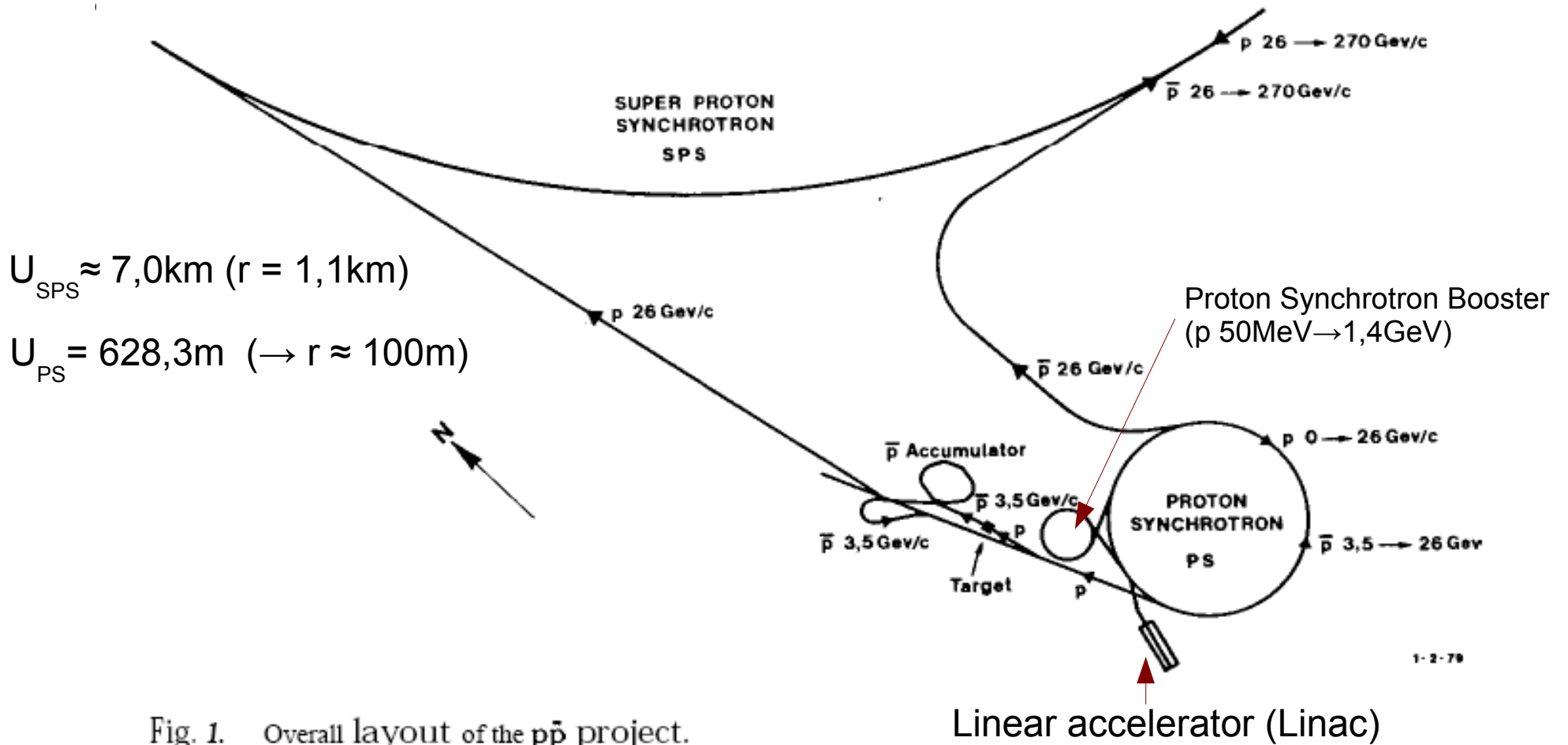


Fig. 1. Overall layout of the $p\bar{p}$ project.

p(26GeV/c) $\rightarrow$ Cu Target $\rightarrow$ $\bar{p}$ (3,5GeV/c) $\rightarrow$ AA $\rightarrow$ $\bar{p}$'s($\sim 10^{11}$) $\rightarrow$ PS

$$\frac{n_p}{n_p} = 10^{-6}$$

Schubweise
alle 2,4s
„eingekellert“

nach
etwa
24h

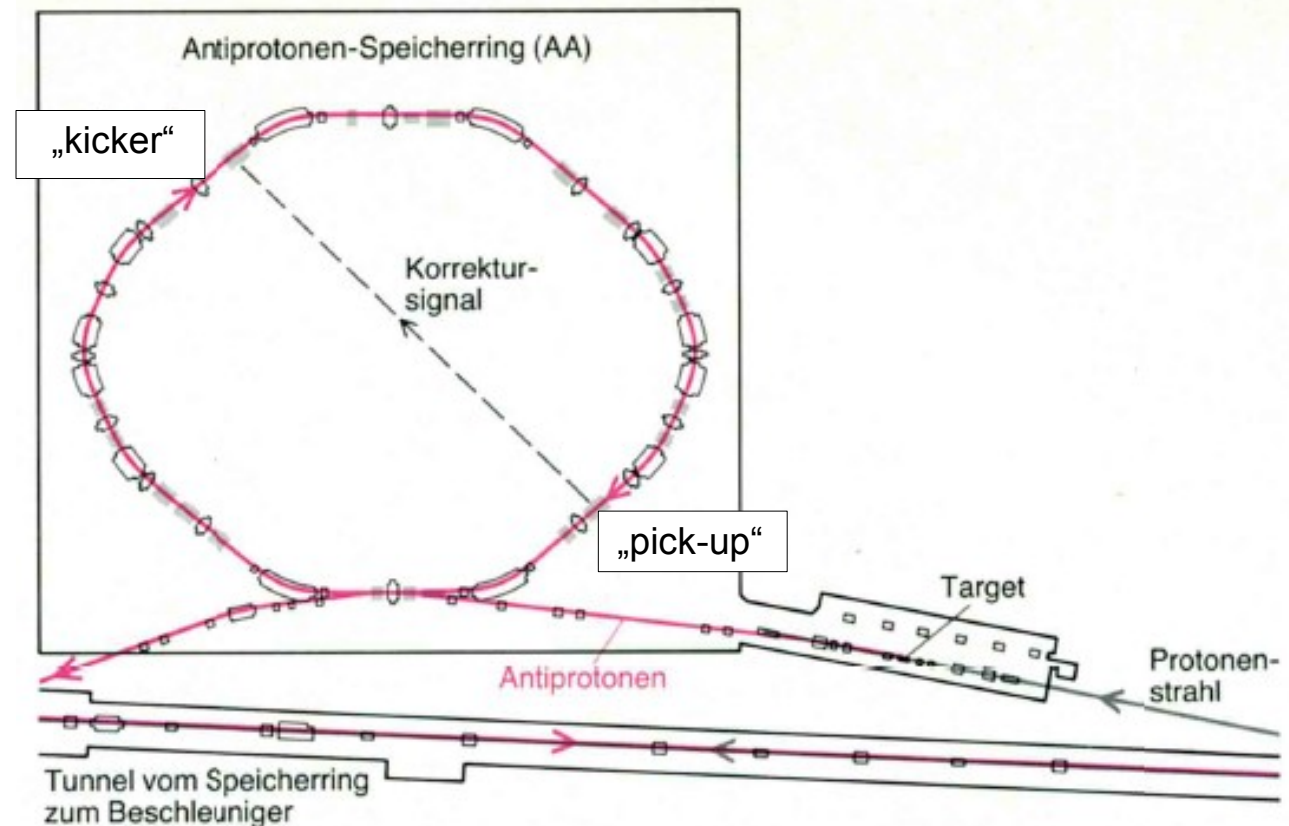
mit Hilfe von
Magnetfeldern

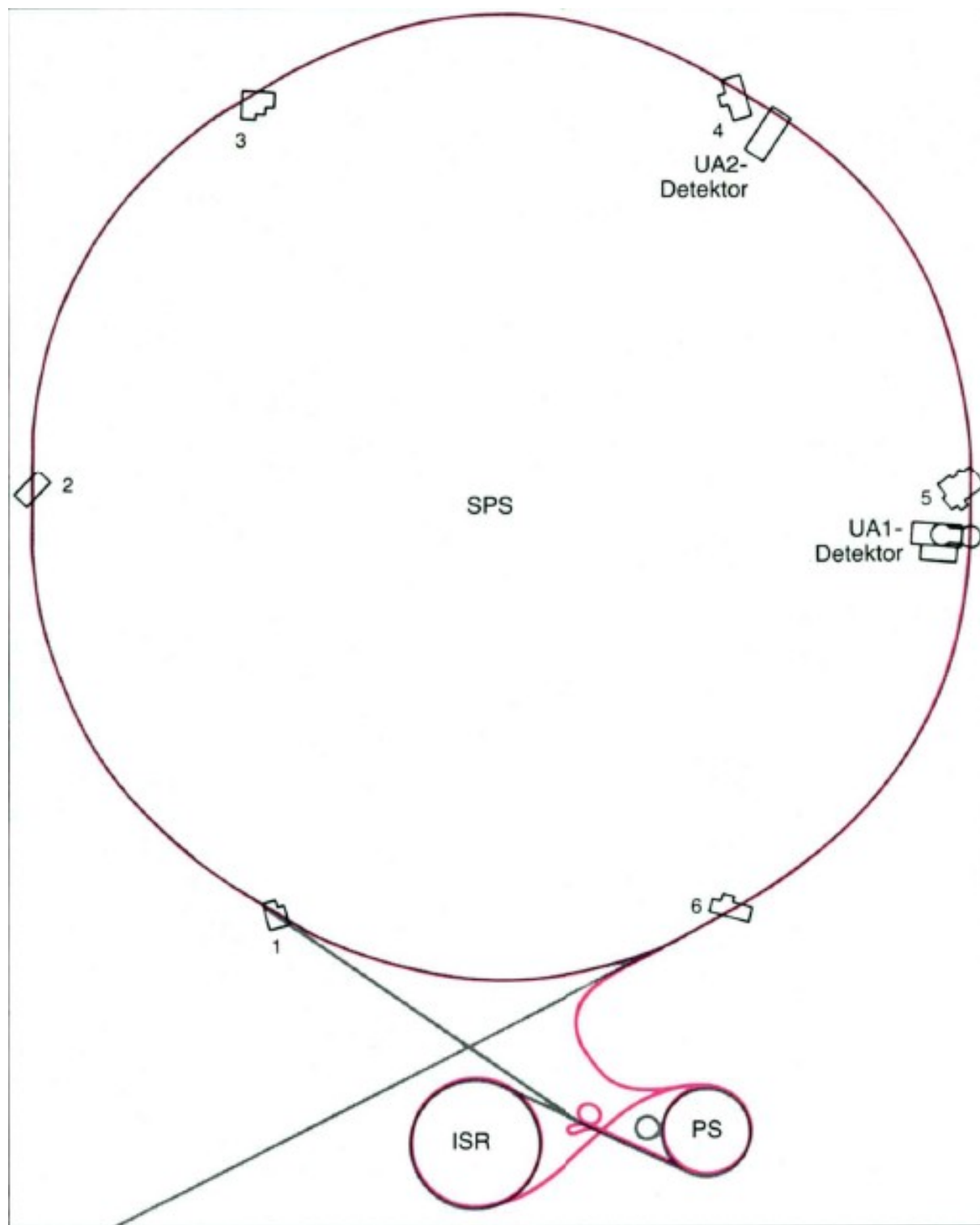
Stochastische Kühlung der Antiprotonen

- Um einen kompakten Strahl aus Antiprotonen hoher Intensität zu erzeugen wurde die stochastische Kühlung eingesetzt
- Abtaster messen die Abweichung der Teilchen von der idealen Bahn
- Ein EM-Feld gegenüber korrigiert die Bahn



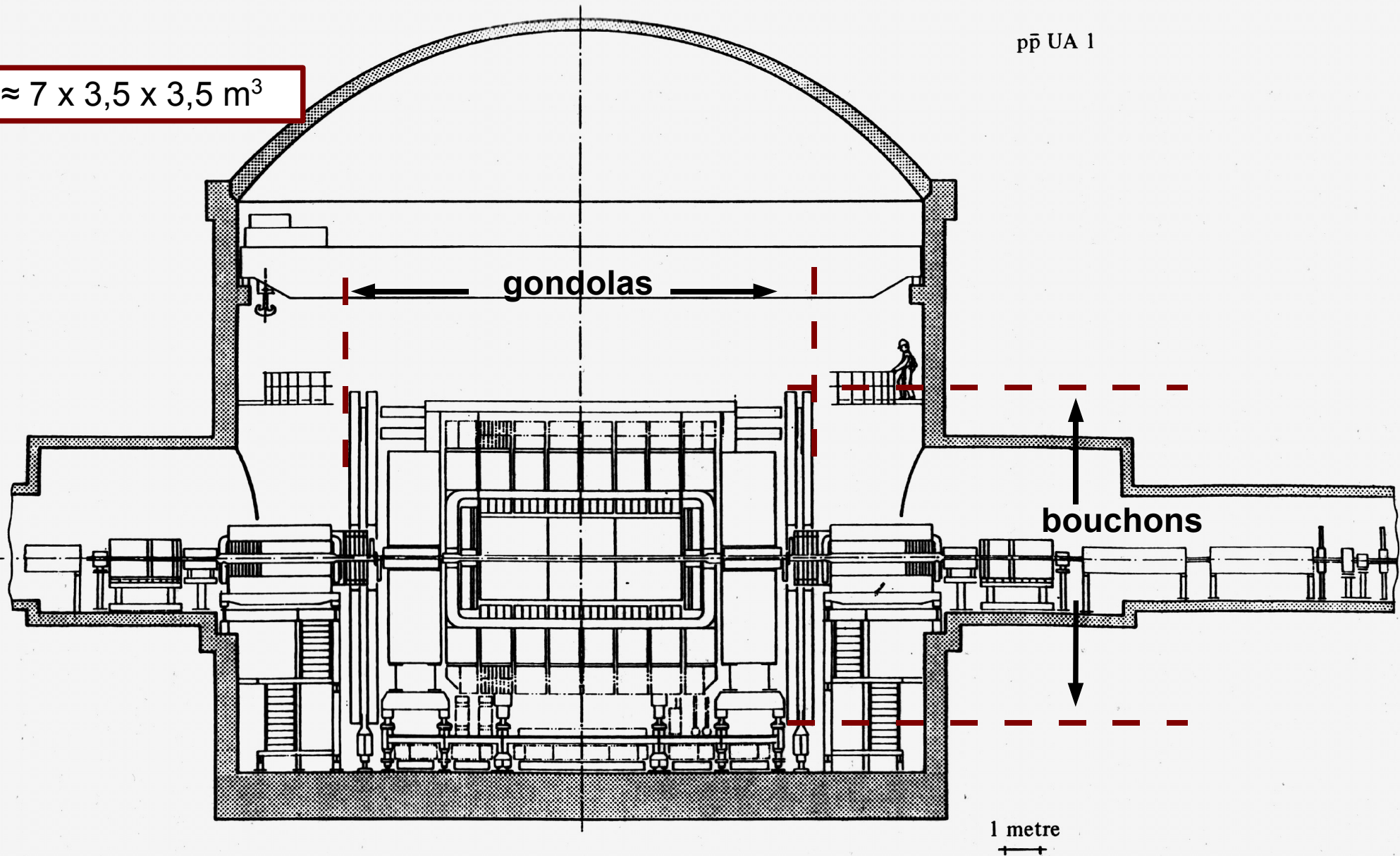
Simon van der Meer





UA -1 - Detektor

$$V \approx 7 \times 3,5 \times 3,5 \text{ m}^3$$



Gondolas : 25°-155°

EM: 1,2mm Pb; 1,5mm scint.

$\Delta E/E = 0,15/\sqrt{E}$

hadr.: 50mm Fe; 10mm scint.

$\Delta E/E = 0,8/\sqrt{E}$

muon

Drift chambers

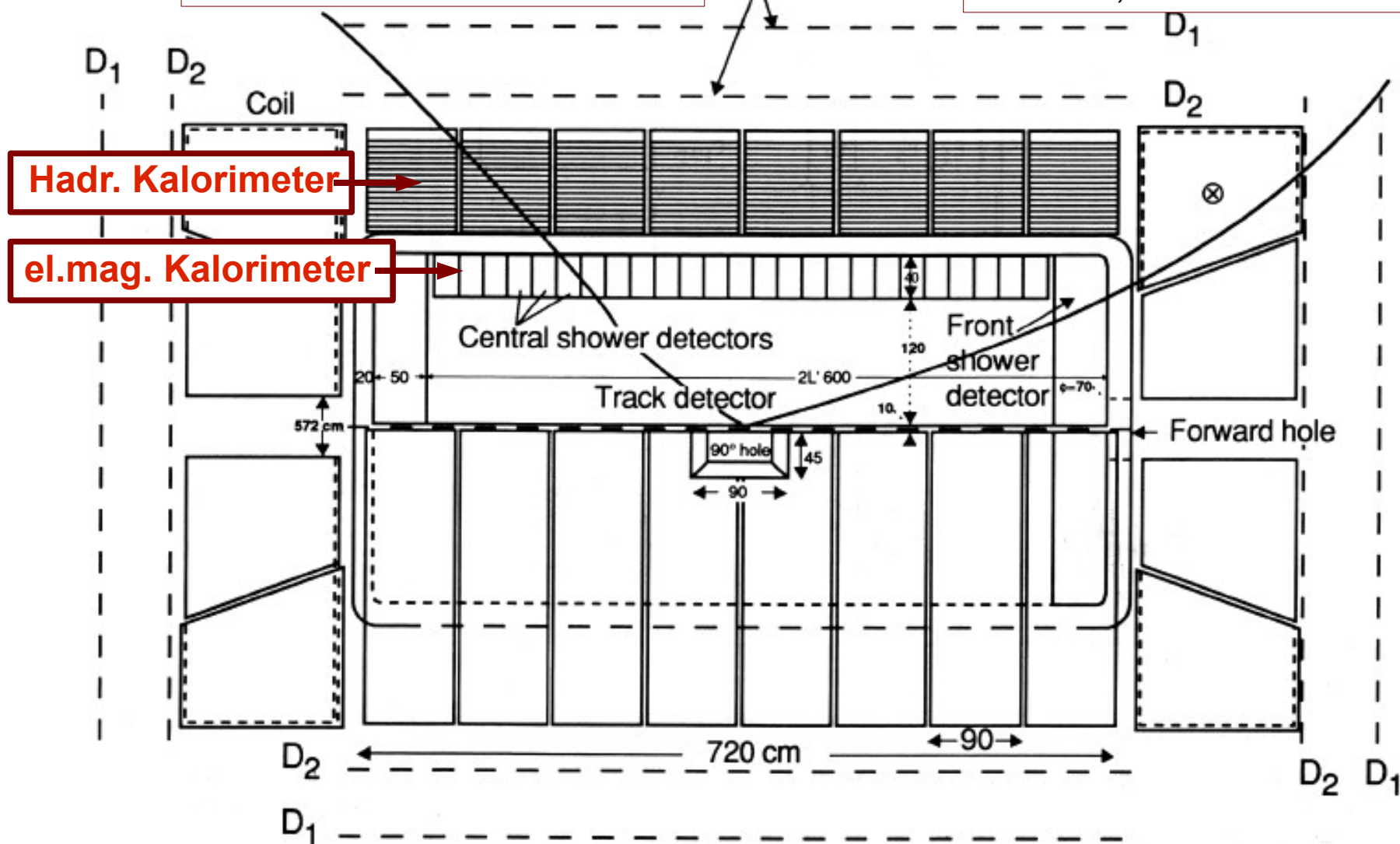
bouchons :

EM: 5°-25° 4mm Pb; 6mm scint.

$\Delta E/E = 0,12/\sqrt{E}$

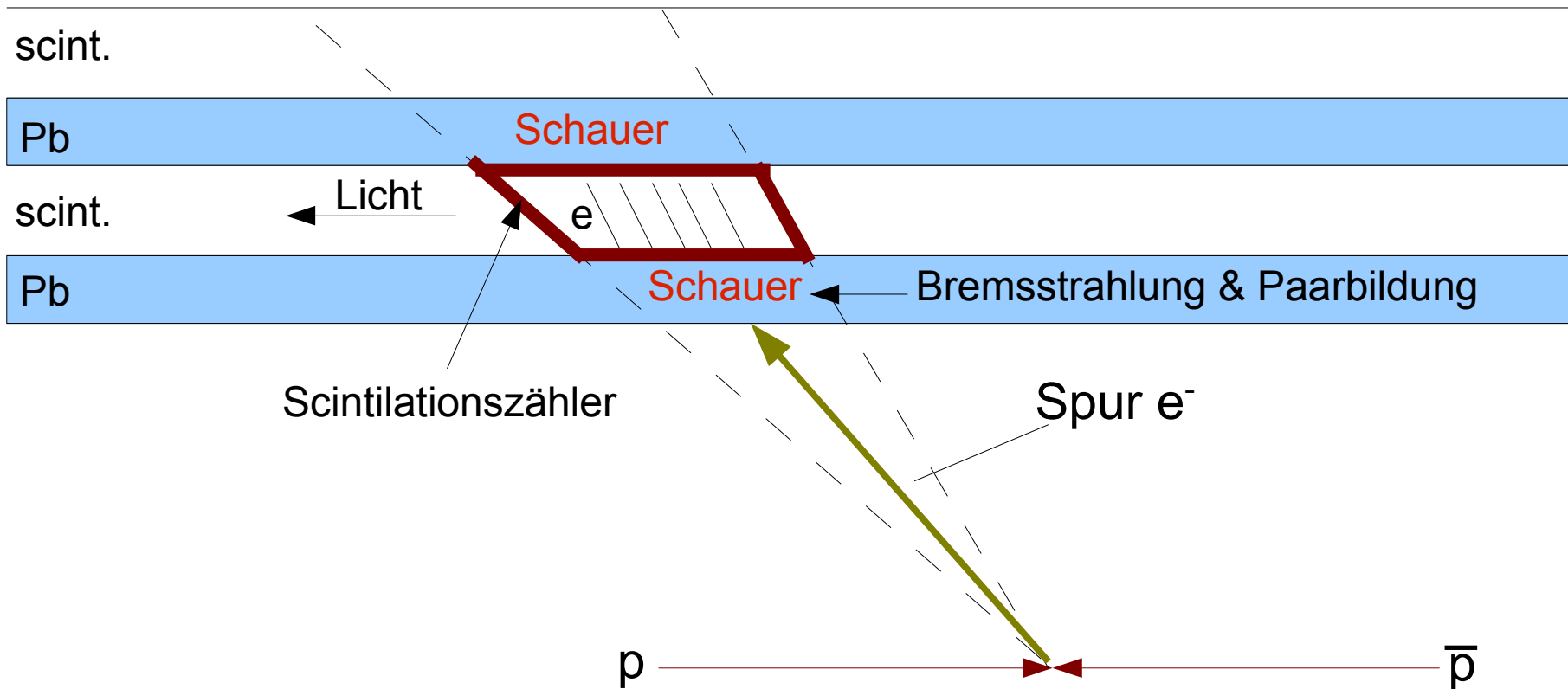
hadr.: 155°-175° 50mm Fe; 10mm scint.

$\Delta E/E = 0,8/\sqrt{E}$



Elektromagnetisches Kalorimeter:

Nur schematisch



Geladene Teilchen werden im Schintilationszähler durch die Messung der Lichtmenge(z.B. Mit einem Photonmultiplier) gemessen.

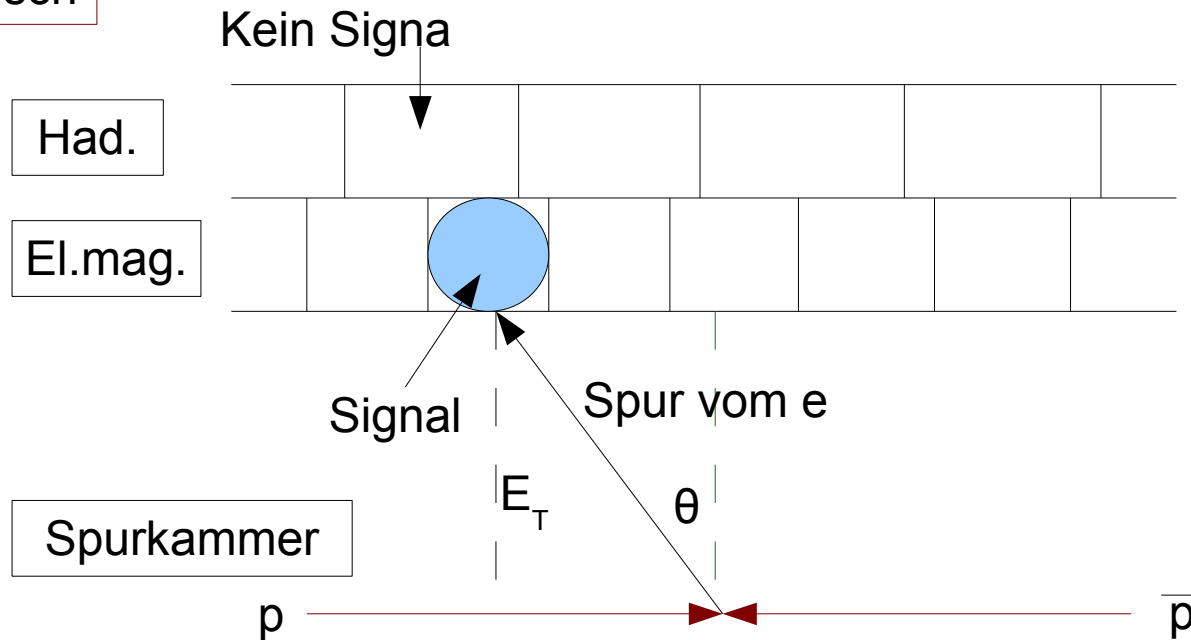
IV. Resultate

Entdeckung des Z-Bosons

$$\bar{p} + p \rightarrow Z^0 + X$$

$$\rightarrow e^+ + e^- \text{ or } \mu^+ + \mu^-$$

Nur schematisch



$$E_T = E_{\text{cal.-cluster}} \cos \theta$$

Transversale Energie

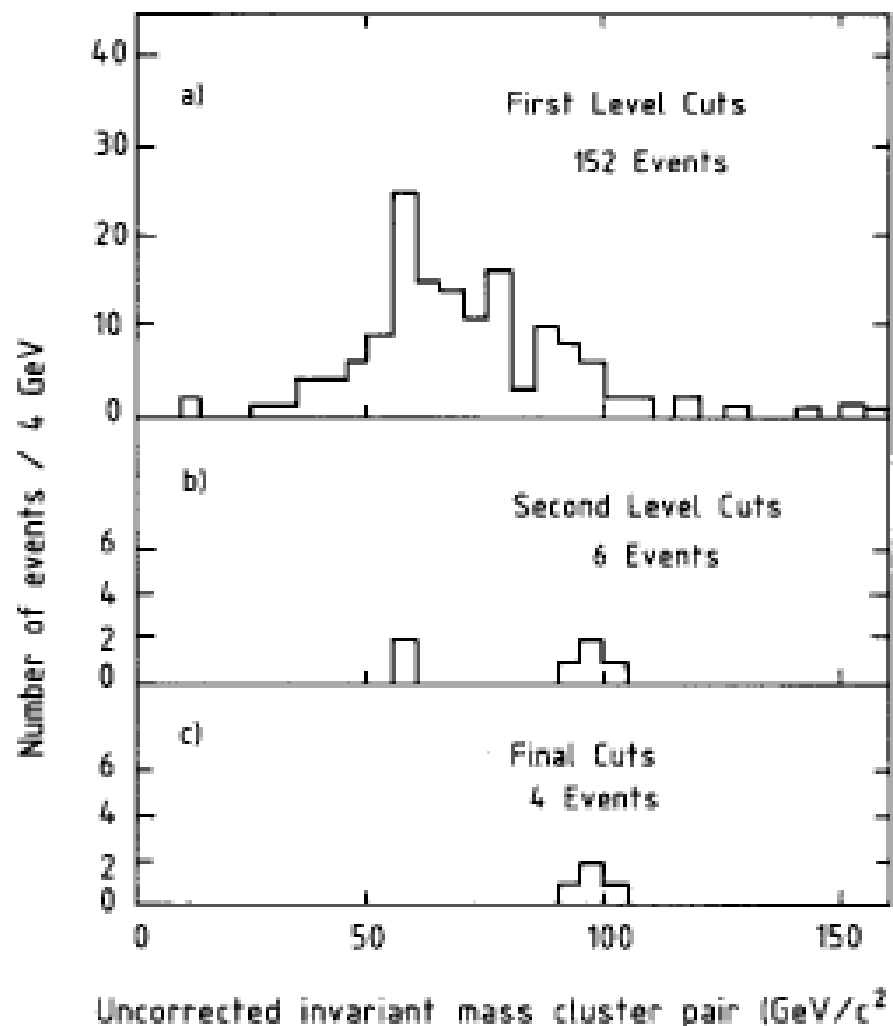


Fig. 1. Invariant mass distribution (uncorrected) of two electromagnetic clusters: (a) with $E_T > 25$ GeV; (b) as above and a track with $p_T > 7$ GeV/c and projected length > 40 cm pointing to the cluster. In addition, a small energy deposition in the hadron calorimeters immediately behind (< 0.8 GeV) ensures the electron signature. Isolation is required with $\sum p_T < 3$ GeV/c for all other tracks pointing to the cluster. (c) The second cluster also has an isolated track.

$$E_T > 25 \text{ GeV}$$



$$\text{Spur } p_T > 7 \text{ GeV/c}$$

$$\text{länge} > 40 \text{ cm}$$



$$\text{Hadr. } E < 0,8 \text{ GeV}$$

→ **4 Ereignisse**



$$m_Z = (95,2 \pm 2,5) \text{ GeV}/c^2$$

Untergrund:

(1) Zwei gewöhnliche Jets mit jeweils einem isoliertes π , das im Kalorimeter ein Elektron simuliert;

- Aber die Wahrscheinlichkeit für ein solches Elektron ist $P_e \approx 6 \times 10^{-3}$

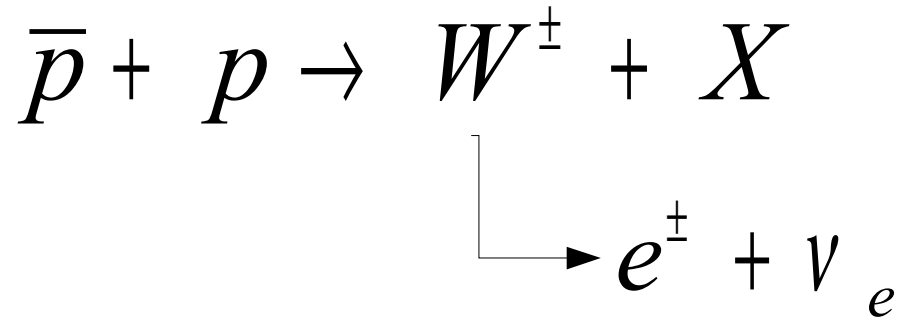
=> Vernachlässigbar

(2) Schwer-Flavour Jet zerfällt in ein Elektron.

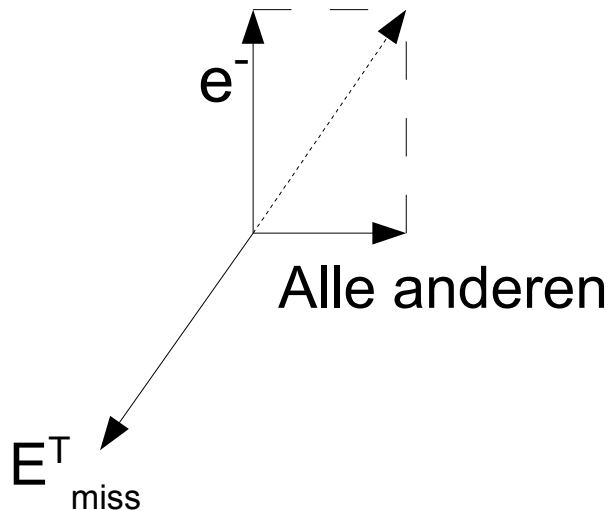
- Aber man erwartet durch Untergrund höchstens 10^{-4} Ereignisse.

=> Vernachlässigbar

Entdeckung der W-Bosonen

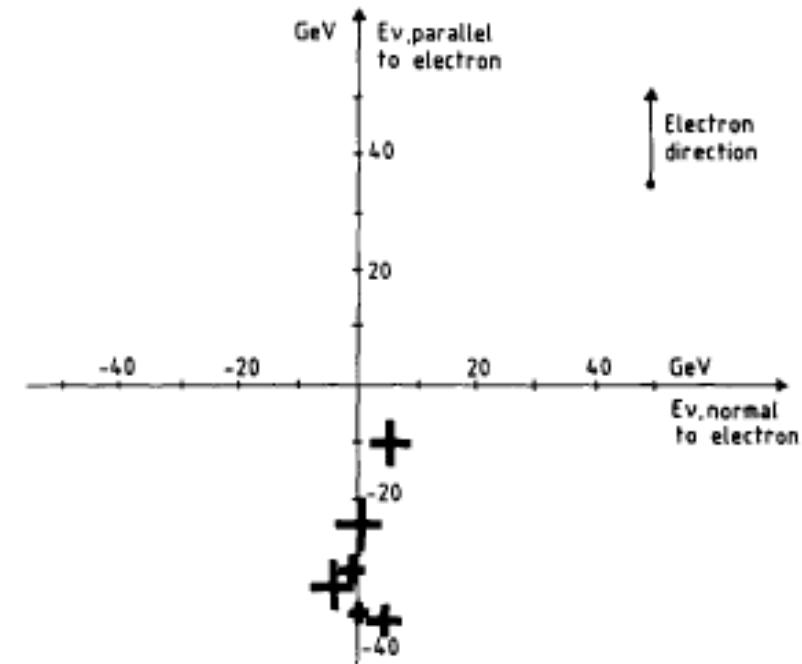


Transversal zur $p\bar{p}$ -Flugrichtung:



E^T_{miss} identifiziert man als ν_e

a EVENTS WITHOUT JETS



EVENTS WITHOUT JETS

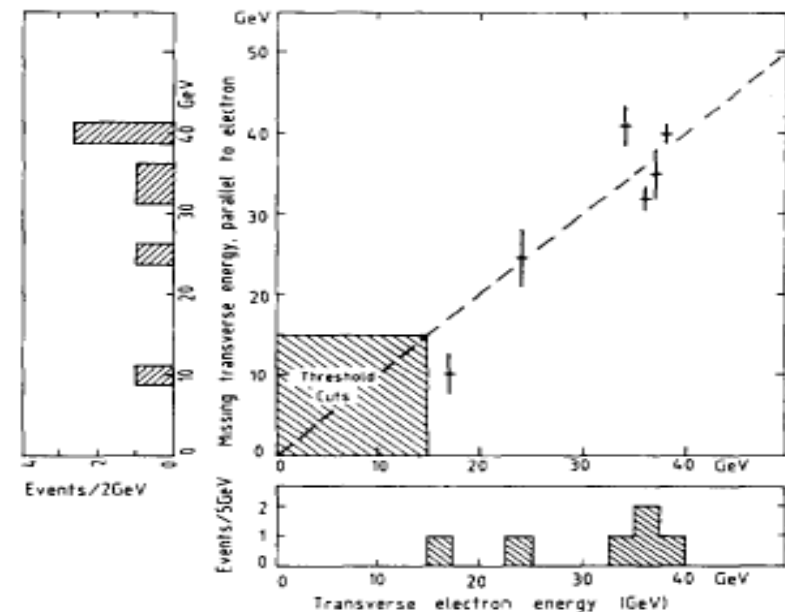
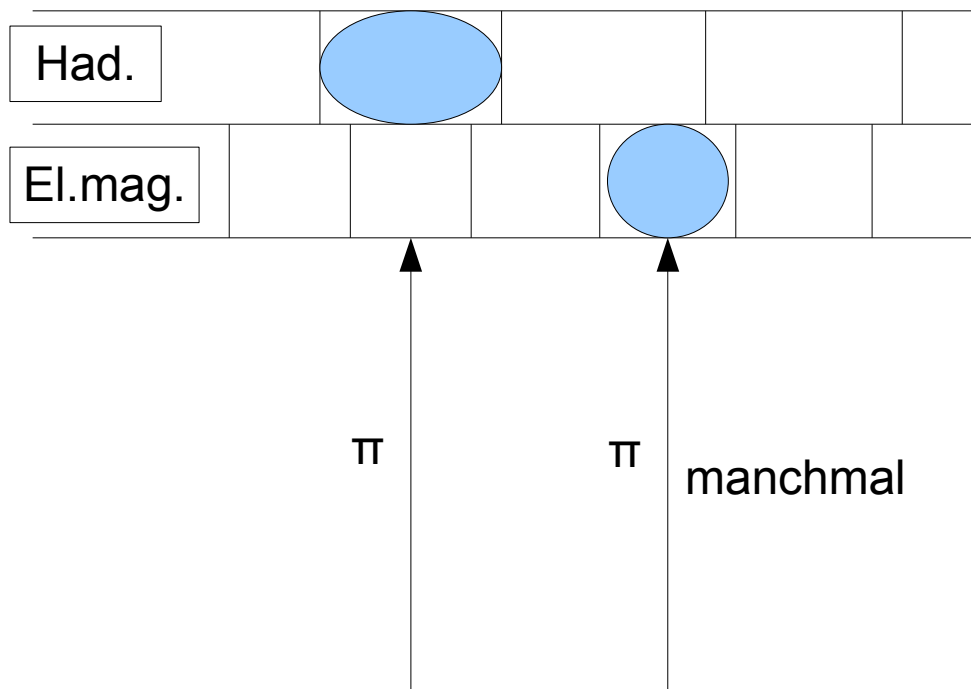


Fig. 8. The missing transverse energy component parallel to the electron, plotted versus the transverse electron energy for the final six electron events without jets (5 gondolas, 1 bouchon) All the events in the gondolas appear well above the threshold cuts used in the searches.

Untergrund:

(1) Ein geladenes Pion(hadron) mit hohem p_T wird falsch identifiziert als ein Elektron, oder ein geladenes Pion(hadron) überlappt mit einem oder mehreren π^0

Teststrahl:



$$\Rightarrow P_{\pi \rightarrow e}$$

• Aber im Experiment gab's kein isoliertes Pion!

$\Rightarrow$ Vernachlässigbar

(2) π^0 oder γ mit hohem p_T zerfallen wieder in e^+e^- -Paar, wobei ein e davon einen sehr kleinen Impuls besitzt, sodass nur ein e aus dem Paar detektiert wird.

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad (\approx 98,8\%)$$

$$\searrow \rightarrow e^+e^-$$

anhand:

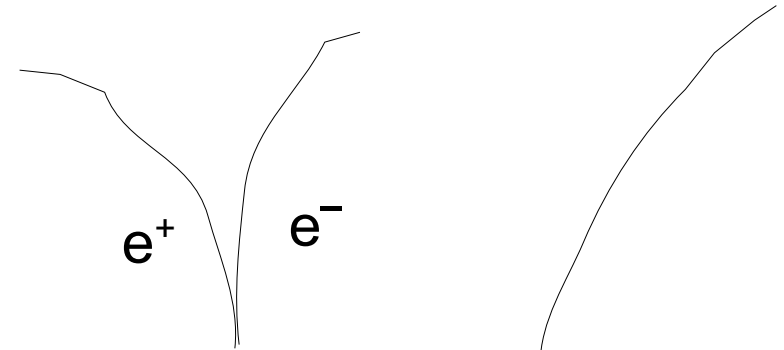
Bethe-Heitler Formel

$$\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma \quad (\approx 1,2\%)$$

Kroll-Wada Formel

(Dalitz - Paar)

$$N_{\text{erwartet}} = 0,2p_0(\text{GeV})$$



Kann nicht mehr nachgewiesen sein

Mit $p_0 = 200 \text{ MeV} \Rightarrow N_{\text{erwartet}} = 0,2 * 0,2 = 0,04 \text{ Ereignisse}$

(e wird nachgewiesen bei $p > 200 \text{ MeV}$)

$\Rightarrow$ Vernachlässigbar

Zusammenfassung

- Ziel: Suche nach dem intermediären Vektorboson der schwache Wechselwirkung

—► $W^{\pm}$ & Z^0 (als Lösung der theor. Probleme)

- Theo. Vorhersage(anhand $\sin^2\theta_w$)

$$m_W = (82 \pm 2,4) \text{ GeV}/c^2$$

$$m_Z = (94 \pm 2,5) \text{ GeV}/c^2$$

- Erzeugung der W/Z-Bosonen $q \bar{q} \longrightarrow W/Z + X$

- UA1-Experiment Z^0 : Suche nach e^+ und e^-

$W^{\pm}$: Suche nach $e^{\pm}$ und ν_e

- Ergebnisse:

(1983)

$$m_W = (81 \pm 5) \text{ GeV}/c^2$$

(6 Ereignisse) PDG 2008:
(= $80,398 \pm 0,025 \text{ GeV}$)

$$m_Z = (95,2 \pm 2,5) \text{ GeV}/c^2 \text{ (4 Ereignisse) (= } 91,1876 \pm 0,0021 \text{ GeV)}$$

Nobelpreis 1984

"Für ihre entscheidenden Einsätze bei dem großen Projekt, das zur Entdeckung der Feldpartikel W und Z, Vermittler schwacher Wechselwirkung, geführt hat"



Simon van der Meer



Carlo Rubbia



Tingting Niu

Referenzen

- Donald H. Perkins Hochenergie Physik 3. Auflage(1990)
- Donald H. Perkins Introduction to High Energy Physics 4th. edition
- Halzen & Martin Quarks & Leptons
- Physics Letters Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $\sqrt{s} = 540$ GeV UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland 24.February 1983
- Physics Letters Experimental observation of lepton pairs of invariant mass around 95 GeV/c² at the CERN SPS collider UA1 Collaboration, CERN, Geneva, Switzerland 7.July 1983
- Spektrum der Wissenschaft, Mai 1982 Elementarteilchen: die Fahndung nach Vektorbosonen von David B. Cline, Carlo Rubbia und Simon van der Meer
- Nobel lecture, 8 December, 1984 Stochastic cooling and the accumulation of antiprotons by Simon van der Meer CERN, CH- 1211 Geneva 23, Switzerland
- Particle Data Group Particle Physics Booklet July 2008
- <http://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/pp34/ua1.pdf>