

Moderne Experimentalphysik II

Teilchenphysik - Vorlesung 12

Professor Dr. Markus KLUTE (markus.klute@kit.edu)
Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



- **Starke Kraft mit $SU(3)$ -Symmetrie**

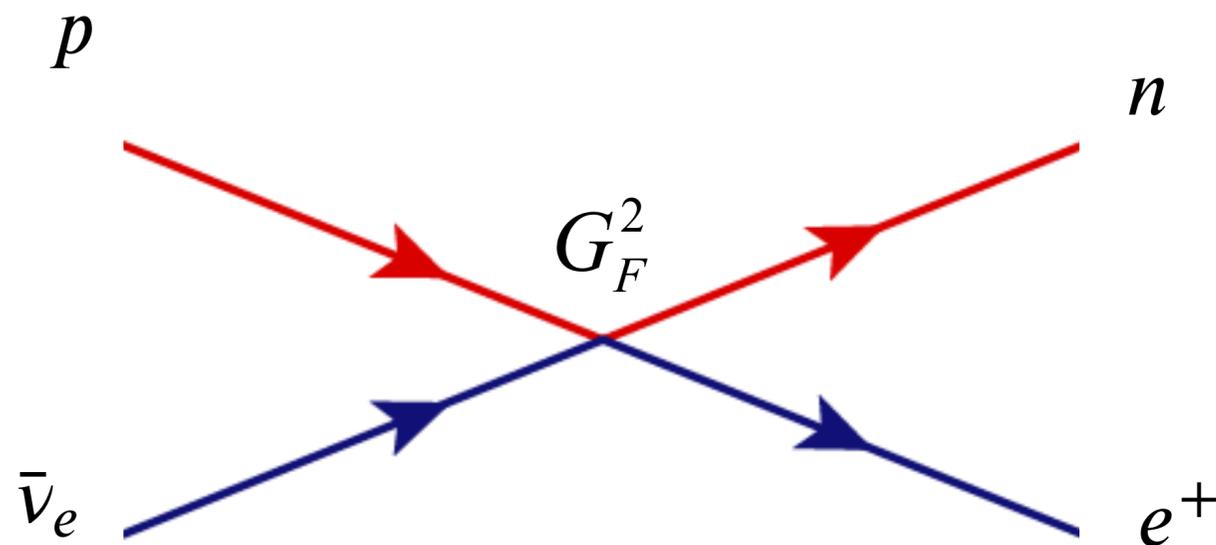
- Quarkflavours mit 3 Farben: aus $e^+e^- \rightarrow$ **Hadronen** als Funktion von \sqrt{s}
- Quark-Gluon-Plasma: neuer Zustand (extrem hohes T oder ultra-dichtem ρ)?
- **Björken** x : Impulsanteil des Partons ($x:0,\dots,1$)
- Strukturfunktionen $F_1(x), F_2(x)$ - **Skaleninvarianz** bei $\nu \rightarrow \infty$
- punktförmige Partonen: 3 **Valenzquarks**, **Seequarks**, **Gluonen**
- Parton-Dichte-Funktionen (pdf): wichtig bei pp -Prozessen am LHC

■ Klassifikation schwacher Zerfälle & Fermi-Punkt-Wechselwirkung

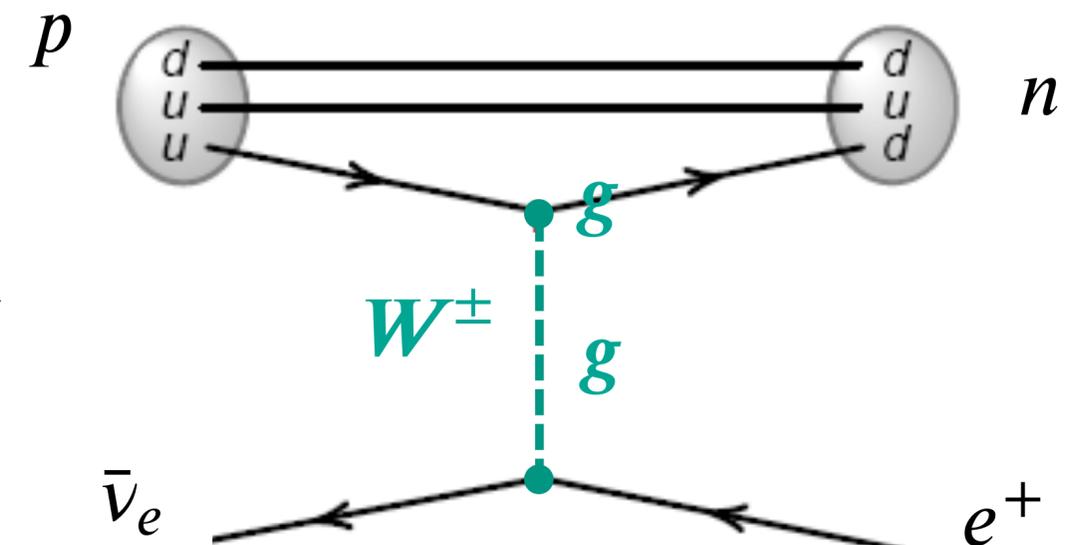
- leptonische, semi-leptonische & rein hadronische Prozesse

- semi-leptonisch: inverse β -Zerfallsreaktion $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

- früher: $G_F \Leftrightarrow$ heutiges Standardmodell mit **Propagatorterm** für W^\pm



$$\frac{1}{q^2 - M_W^2} \rightarrow \frac{1}{M_W^2}$$



Recap: von Fermi's Theorie zum Standardmodell

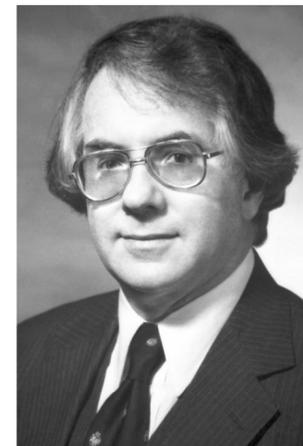
- die tragenden Säulen des modernen Standardmodells
 - $SU(3)$ - Konzept der starken Wechselwirkung mit **Gluonen** ✓
 - neues Konzept $SU(2)_L \times U(1)_Y$ für **elektroschwache** Kraft !
 - Säule 1: $SU(2)_L$ schwacher Isospin T
 - Säule 2: $U(1)_Y$ schwache Hyperladung Y_W



Fermi



Weinberg

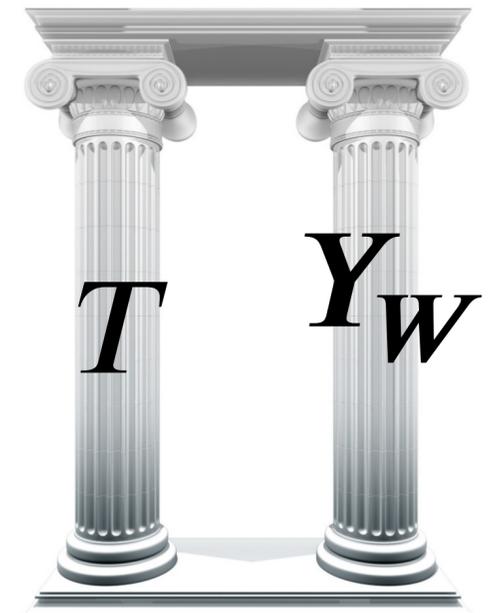


Glashow



Salam

Standardmodell



$SU(2)_L \times U(1)$

Schwacher Isospin T

- **Eingruppierung von Teilchen in neue $SU(2)$ – Symmetrie: Dubletts**

- schwache Wechselw.: chiral LH $(u, d')_L, (c, s')_L, (t, b')_L$ **Quark-Dubletts**

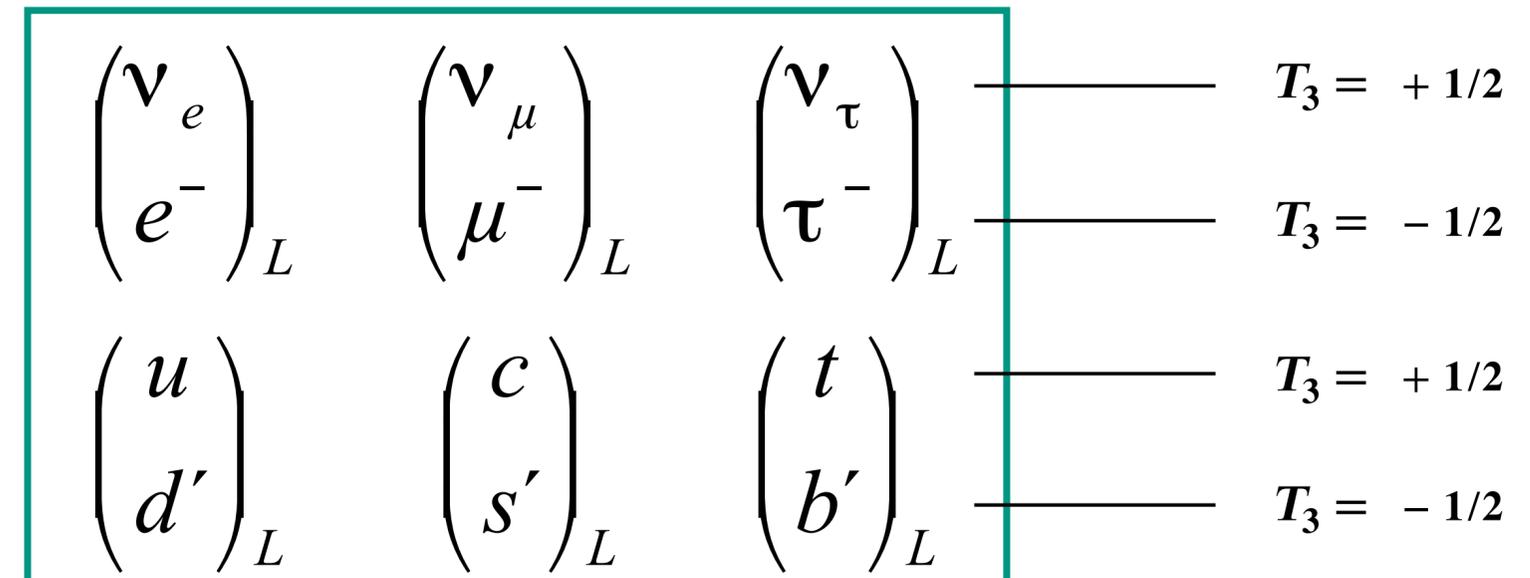
- chiral LH $(\nu_e, e^-)_L, (\nu_\mu, \mu^-)_L, (\nu_\tau, \tau^-)_L$ **Leptonen-Dubletts**

- Definition $SU(2)$ – Symmetriegruppe für schwache Wechselwirkung:
Quantenzahl **schwacher Isospin T^***

- **chiral linkshändige Teilchen**
bilden $SU(2)_L$ – **Dubletts**
mit $T = 1/2$

$$T_3 = \pm 1/2$$

- Zuordnung T_3 analog Ladung Q



gedrehte Quarkzustände & schwacher Isospin T

- **Ausblick: wichtiger Effekt der Quarkmischung!**

- schwache Wechselw.: chiral LH $(u, d')_L, (c, s')_L, (t, b')_L$ Quark-Doublets

- schwache Flavour-Eigenzustände der *down*-artigen Quarks sind **keine** Masseneigenzustände

- schwache Wechselwirkung koppelt an **gedrehte (gemischte) Quark-Zustände** d'_L, s'_L, b'_L

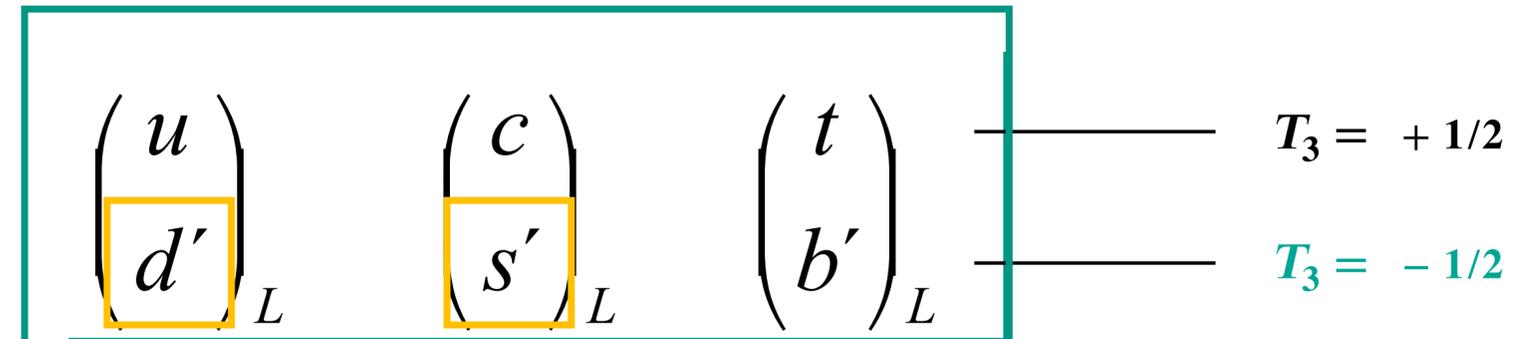
Flavour

Masse

$$\begin{pmatrix} |d'\rangle \\ |s'\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_c & \sin\theta_c \\ -\sin\theta_c & \cos\theta_c \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |d\rangle \\ |s\rangle \end{pmatrix}$$

Konzept der Quarkmischung!

*



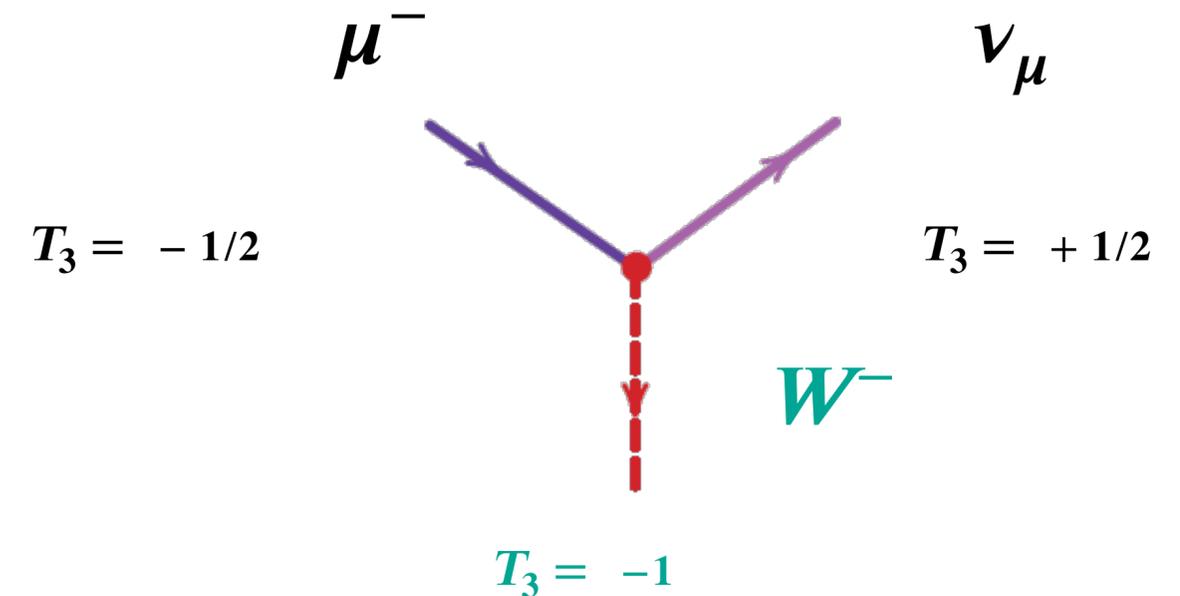
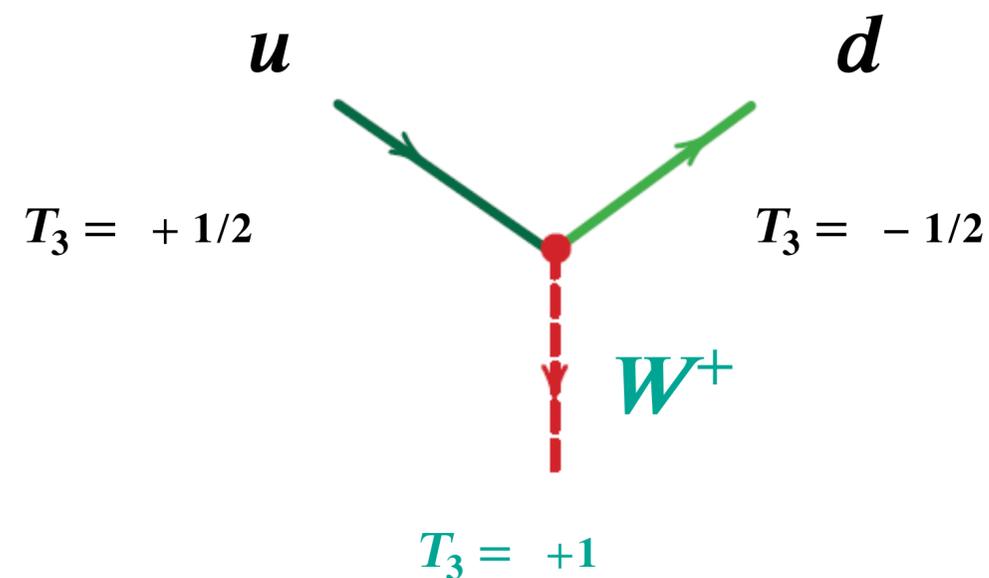
Schwacher Isospin T – Austauscheteilchen

- Eingruppierung von Teilchen in neue $SU(2)_L$ – Symmetrie: **Dubletts**

- $SU(2)_L$ – Symmetrie erfordert **schwaches Isospin-Triplett** $T = 1$:

(W^+, W^0, W^-) , mit 3. Komponente schwacher Isospin $T_3 = (+1, 0, -1)$

- Schwaches Isospin-Triplett (W^+, W^0, W^-) mischt mit Eichboson B^0 der schwachen Hyperladung Y_W zu reellen Austauscheteilchen $W^\pm + Z^0$



Schwacher Isospin T – Singulett

- **Eingruppierung von Teilchen in neue $SU(2)_L$ – Symmetrie: Singulett**

- schwache Wechselwirkung unterscheidet **verschiedene Chiralitäts-Zuständen von Teilchen** (maximale Verletzung der Parität)

- Recap: **Chiralität*** definiert für Dirac-Spinoren

$$(e^-)_R = \frac{1}{2}(1 + \gamma^5) e^- \quad \text{chiraler Projektionsoperator}$$

- **chiral rechtshändige Teilchen** bilden **Singulett** bzgl. $SU(2)_L$ mit $T=0$ & $T_3=0$

$$\begin{matrix} (e^-)_R & (u^-)_R & (\tau^-)_R \\ (u)_R & (c)_R & (t)_R & (d)_R & (s)_R & (b)_R \end{matrix}$$

- Singulett-Zustände: keine CC-Wechselwirkung mit W^\pm (aber NC-Prozesse möglich mit Z^0)

schwache Hyperladung Y_W

- **Neue Quantenzahl für schwache Wechselwirkung von S.L. Glashow (1961)**

- analog zur **Gell-Mann-Nishijima Formel** der starken Wechselwirkung*

$$Q = T_3 + Y_W/2$$

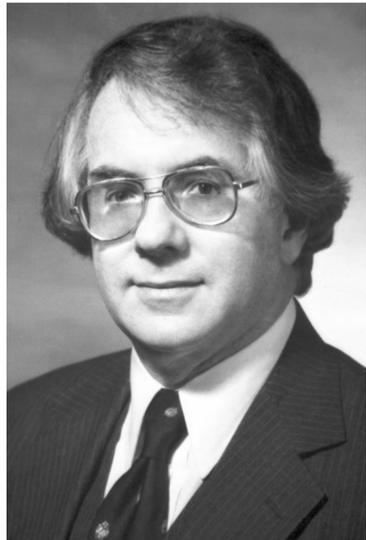
elektr. Ladung

$$Y_W = 2 \cdot (Q - T_3)$$

schwache
Hyperladung

3. Komponente
schwacher Isospin

- Eichsymmetrie $U(1)_Y$:
assoziertes Quantenfeld mit B^0 - Boson
- Feld wechselwirkt mit dem **Higgs-Hintergrundfeld**
(später), daher keine realen, masselosen B^0 - Bosonen



Sheldon Lee Glashow
Nobelpreis 1979

Schwache Hyperladung Y_W : Zuordnung

- **Neue Quantenzahl für schwache Wechselwirkung von S.L. Glashow (1961)**

- Zuordnung der schwachen Hyperladung Y_W zu Teilchen:

$$Y_W = 2 \cdot (Q - T_3)$$

	Q	T_3	Y_W	
$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$	0	$+ 1/2$	$- 1$	LH Leptonen
$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L$	-1	$- 1/2$	$- 1$	
$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$				
$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$+2/3$	$+ 1/2$	$+ 1/3$	LH Quarks
$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$-1/3$	$- 1/2$	$+ 1/3$	
$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$				

$SU(2)_L$ Dubletts der **chiral LH** Leptonen & Quarks

Schwache Hyperladung Y_W : Zuordnung

- **Neue Quantenzahl für schwache Wechselwirkung von S.L. Glashow (1961)**

- Zuordnung der schwachen Hyperladung y_w zu Teilchen:

$$Y_W = 2 \cdot (Q - T_3)$$

- **RH ν 's** nicht existent im SM

	Q	T_3	Y_W	
$(e^-)_R \ (\mu^-)_R \ (\tau^-)_R$	-1	0	-2	RH Leptonen
$(u)_R \ (c)_R \ (t)_R$	+ 2/3	0	+ 1/3	RH Quarks
$(d)_R \ (s)_R \ (b)_R$	-1/3	0	- 2/3	

$SU(2)_L$ Singulett der **chiral RH** Leptonen & Quarks

2 tragende Säulen des SM: etwas fehlt noch...

- neue Symmetrien: $SU(2)$ -Triplet (W^+, W^0, W^-) & $U(1)$ - Singulett B^0

- Ansatz: Lagrange-Dichte L_W der schwachen Wechselwirkung

Kopplung g' an schwache Hyperladung

$$L_W = g \cdot \sum_{a=1}^3 J_{\mu}^a \cdot W^{a\mu} + g' \cdot J_{\mu}^Y \cdot B^{\mu}$$

Kopplung g an schwachen Isospin

Iso-Triplett $(W^{\mu}) W^+, W^0, W^-$

Iso-Singulett $(B^{\mu}) B^0$

- 'massive' Vektorbosonen W^{μ} (d.h. erzeugt 'von Hand') nicht ausreichend zur Vermeidung von Divergenzen im Wirkungsquerschnitt...

- **Elektroschwache Eichsymmetrie mit T und Y_W**

- Basiszustände: Spin $s=1$ Vektorbosonen – Triplet und Singulett

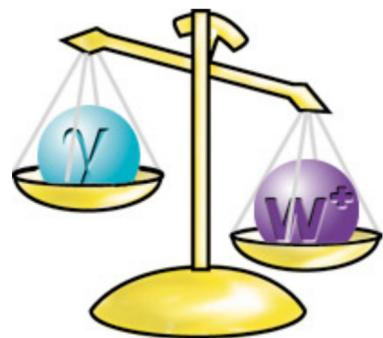
$$W_\mu = (W_\mu^1, W_\mu^2, W_\mu^3) \quad B_\mu$$

- reelle Vektorbosonen w^\pm aus Kombination (schwacher Isospin: Auf- & Absteige-Operatoren)

$$W_\mu^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (W_\mu^1 \pm i W_\mu^2)$$

- Probleme: a) w^0 koppelt nur an LH Zustände, aber neutrales Vektorboson koppelt auch an RH Zustände

- b) Massen der Vektorbosonen: $M = 80 - 90 \text{ GeV}$, aber masseloses Photon $m(\gamma) = 0$ (elektromagnet. Ww.)



■ Physik der Phasenübergänge: **spontane Symmetriebrechung**

Festkörperphysik*:

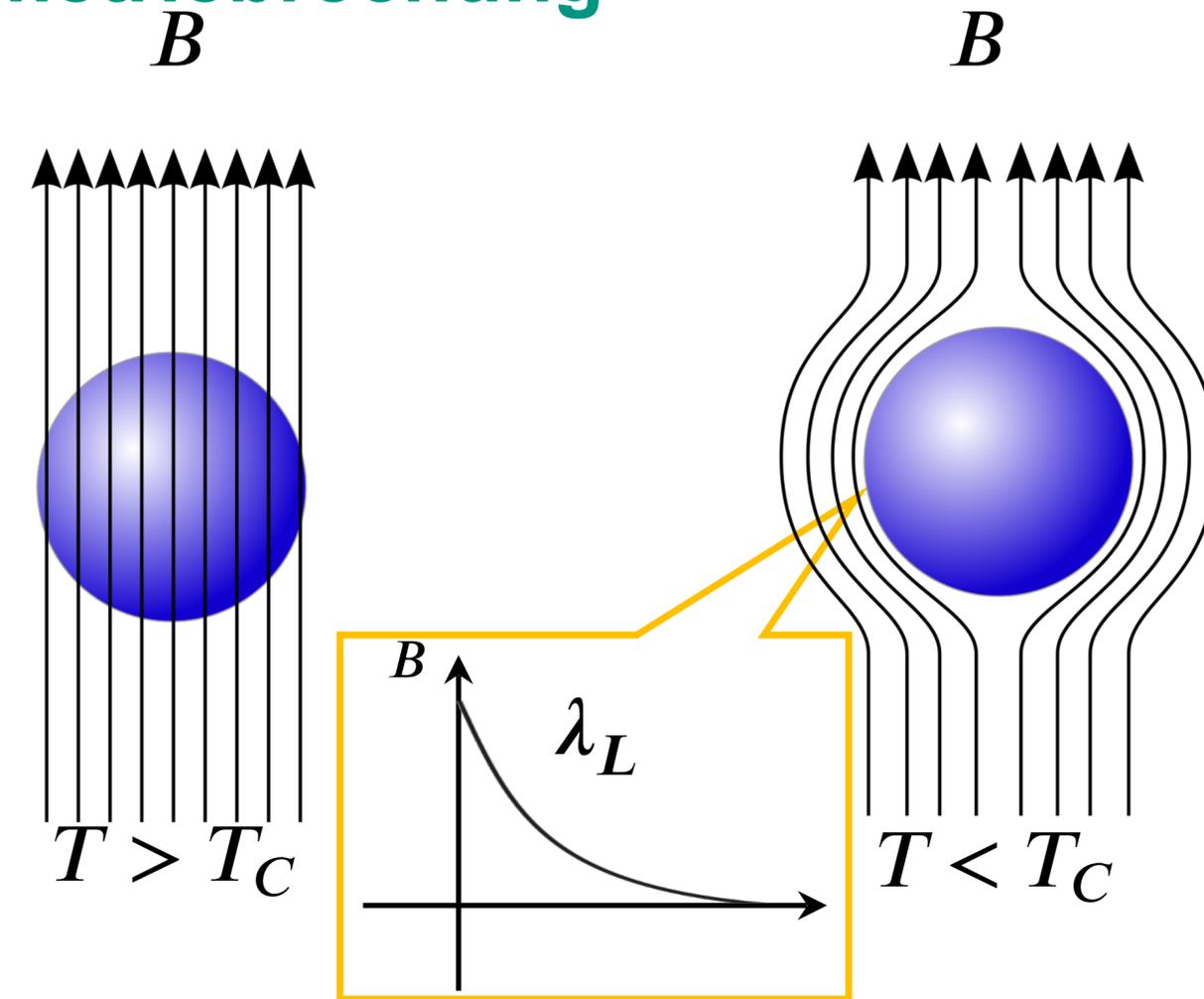
- Meissner-Ochsenfeld-Effekt – ab kritischem T_C

⇒ **feldfreies Inneres eines Supraleiters**

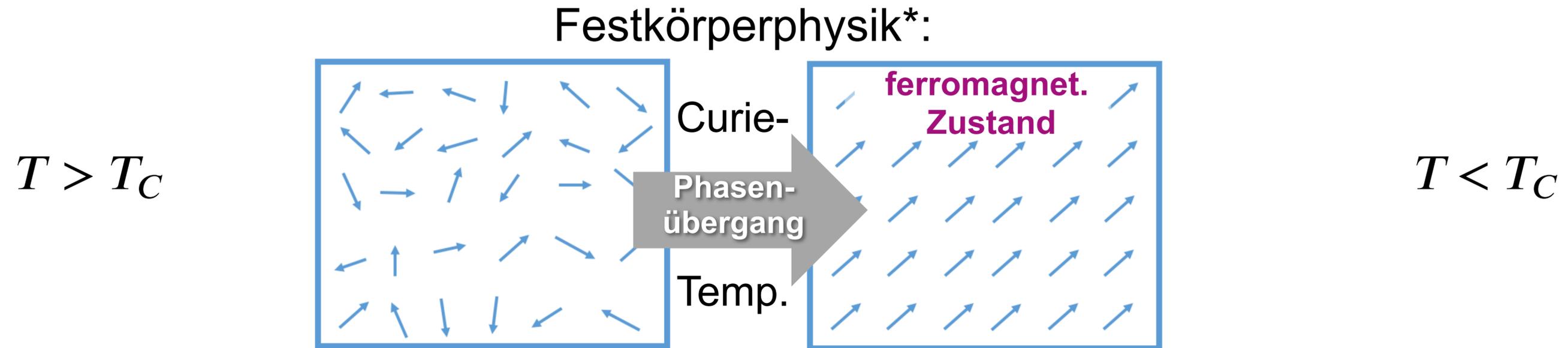
- ursprünglich masseloses Photon mit $m = 0$
erhält im Supraleiter eine „**effektive Masse**“! (vgl. London Eindringtiefe λ_L)

- Erklärung:

(spontane) **Brechung der ursprünglichen Symmetrie**, d.h. der Grundzustand (= Zustand niedrigster Energie) zeigt weniger Symmetrien als der **Lagrangian**



■ Physik der Phasenübergänge: **spontane Symmetriebrechung**



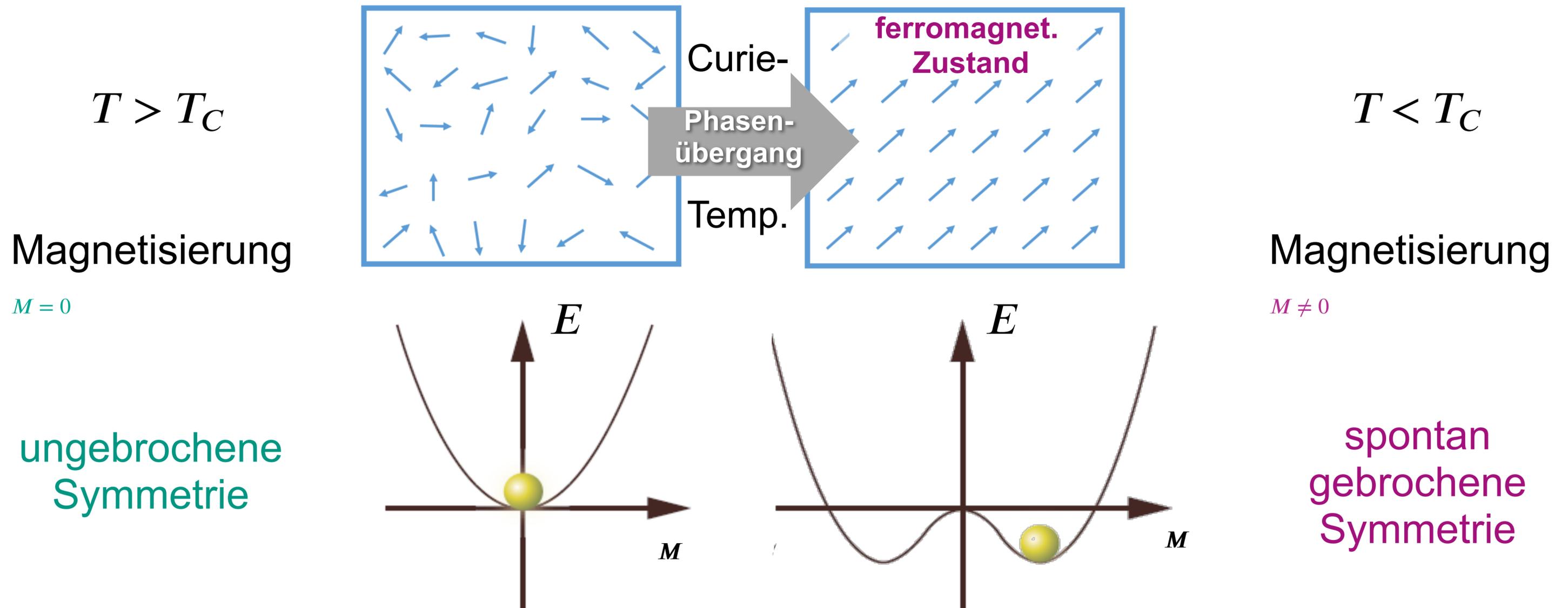
- **Ferromagnetismus** – ab kritischem T_C

⇒ Ausbildung von **Weiß'schen Bezirken**

- Erklärung:

(spontane) **Brechung der ursprünglichen Symmetrie**, d.h. der Grundzustand (= Zustand niedrigster Energie) zeigt weniger Symmetrien als der **Lagrangian**

- Physik der Phasenübergänge: **spontane Symmetriebrechung**
→ spontane Magnetisierung (Domänen)



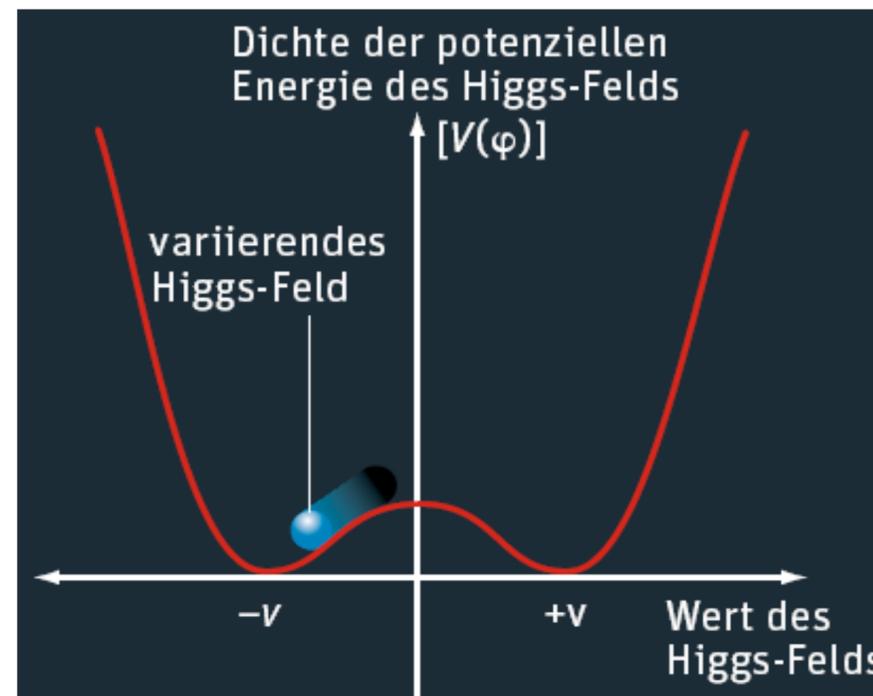
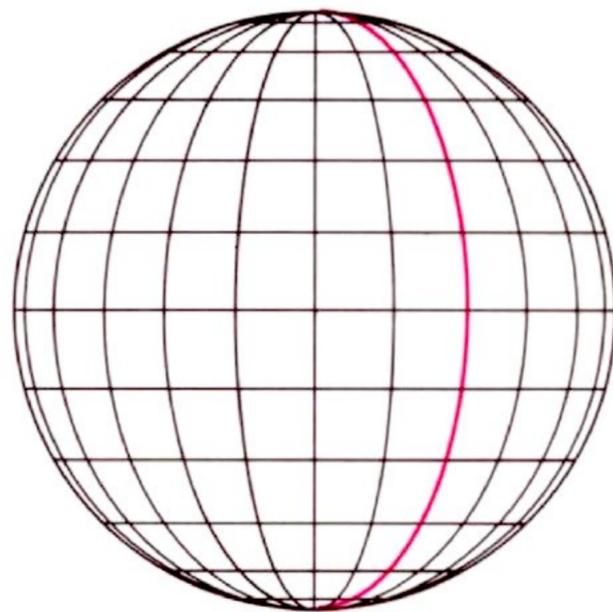
- **Y. Nambu: spontane Symmetriebrechung**

- spontane Symmetriebrechung **globaler Symmetrie**: masselose (Nambu-Goldstone) Bosonen
- spontane Symmetriebrechung einer **Eich-Symmetrie** wie $SU(2)_L \times U(1)_Y$: **massive Eichfelder**



Yoichiro Nambu,
Nobelpreis 2008

**globale
Symmetrie**



**Brechung
Eich-Symmetrie**

- Einführung* skalarer Felder: **spontane Symmetriebrechung**

- Ziel: Erzeugung der (großen) Masse für die Vektorbosonen w^\pm, z^0

- Higgs-Feld: $SU(2)$ – Dublett mit $T = 1/2, T_3 = \pm 1/2$

$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi^+ \\ \Phi^0 \end{pmatrix}$$

komplexe skalare Felder mit schwacher Hyperladung $Y_W = +1$



Kibble, Guralnik, Hagen, Englert, Brout

VOLUME 13, NUMBER 16 PHYSICAL REVIEW LETTERS 19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs
Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
(Received 31 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the

about the "vacuum" solution $\varphi_1(x) = 0, \varphi_2(x) = \varphi_0$:

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}, \quad (2c)$$



- Einführung skalarer Felder: **spontane Symmetriebrechung**

- Ziel: Erzeugung der (großen) Masse für die Vektorbosonen w^\pm, z^0

- Higgs-Feld: $SU(2)$ – Dublett mit $T = 1/2, T_3 = \pm 1/2$

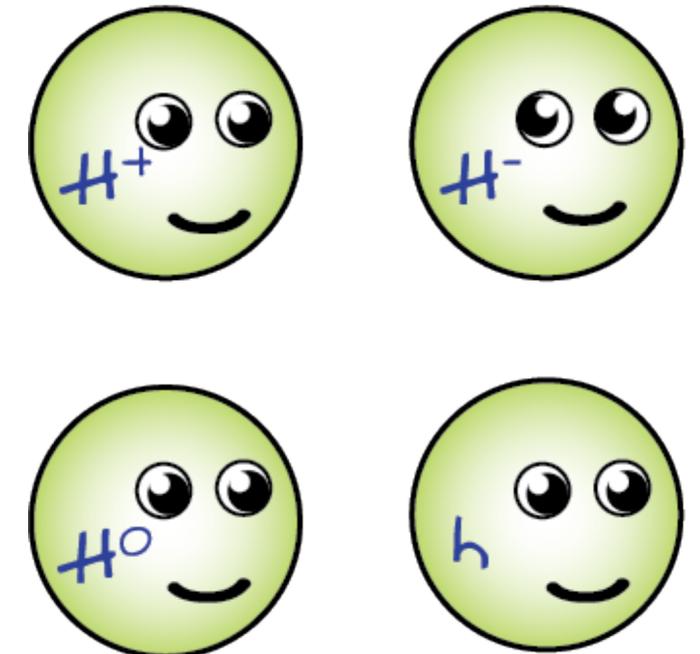
$$\Phi = \begin{pmatrix} \Phi^+ \\ \Phi^0 \end{pmatrix}$$

komplexe skalare Felder mit schwacher Hyperladung $Y_W = +1$

- 4 reelle Komponenten

2 geladene skalare Zustände: H^+, H^-

2 neutrale skalare Zustände: H^0, h



Brechung der Eichsymmetrie

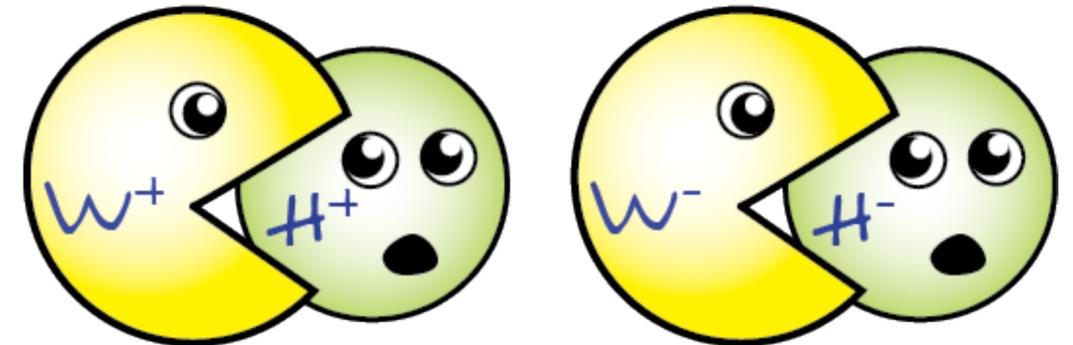
- **Vektorbosonen erhalten ihre Masse aus Freiheitsgraden von H^+, H^-, H^0**
 - spontane Symmetriebrechung & Massengenerierung unterhalb von T_C
 - 3 Eichfelder erhalten longitudinale Freiheitsgrade ($w^\pm z^0$ **mit Masse!**)
über 3 Higgs-Zustände H^+, H^-, H^0

+ neutrales Higgs h
 $m_h = 125 \text{ GeV}$

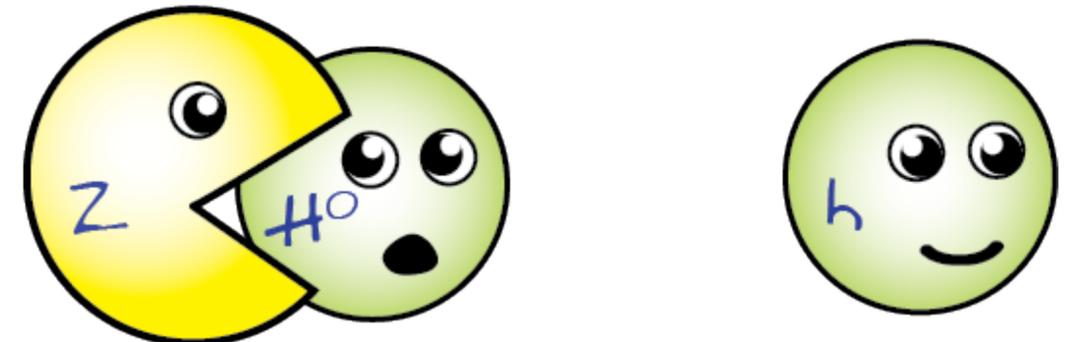
+ masseloses γ
 $m_\gamma = 0$

Vektorbosonen erhalten ihre Masse

$m_W =$
 $80,4 \text{ GeV}$



$m_Z =$
 $91,2 \text{ GeV}$



- **Vektorbosonen erhalten ihre Masse & Photon bleibt masselos**

- zwei **orthogonale Linearkombinationen** aus elektroschwachen Eichfeldern:

$$|Z^0\rangle = \frac{g \cdot |W^0\rangle - g' \cdot |B^0\rangle}{\sqrt{g^2 + (g')^2}}$$

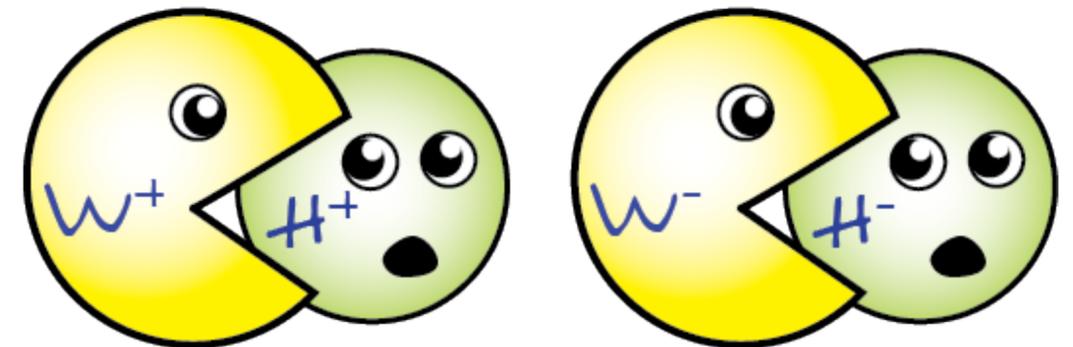
$$|\gamma\rangle = \frac{g \cdot |B^0\rangle + g' \cdot |W^0\rangle}{\sqrt{g^2 + (g')^2}}$$

Kopplung g an schwachen Isospin

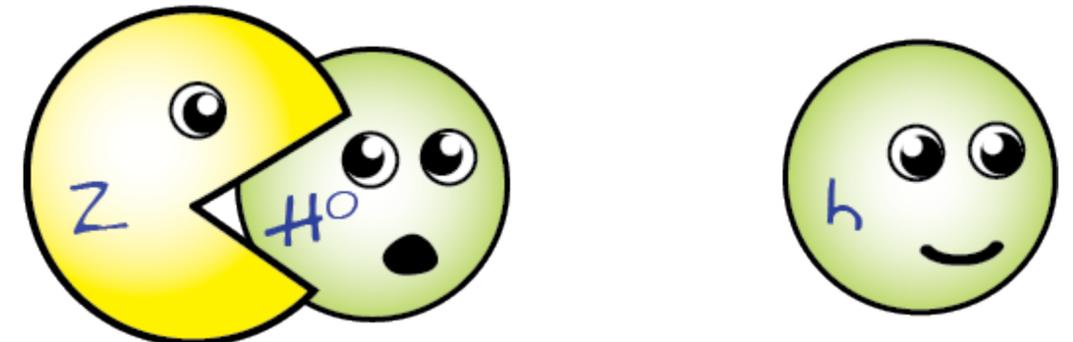
Kopplung g' an schwache Hyperladung

Vektorbosonen mit Masse

$m_W =$
80,4 GeV

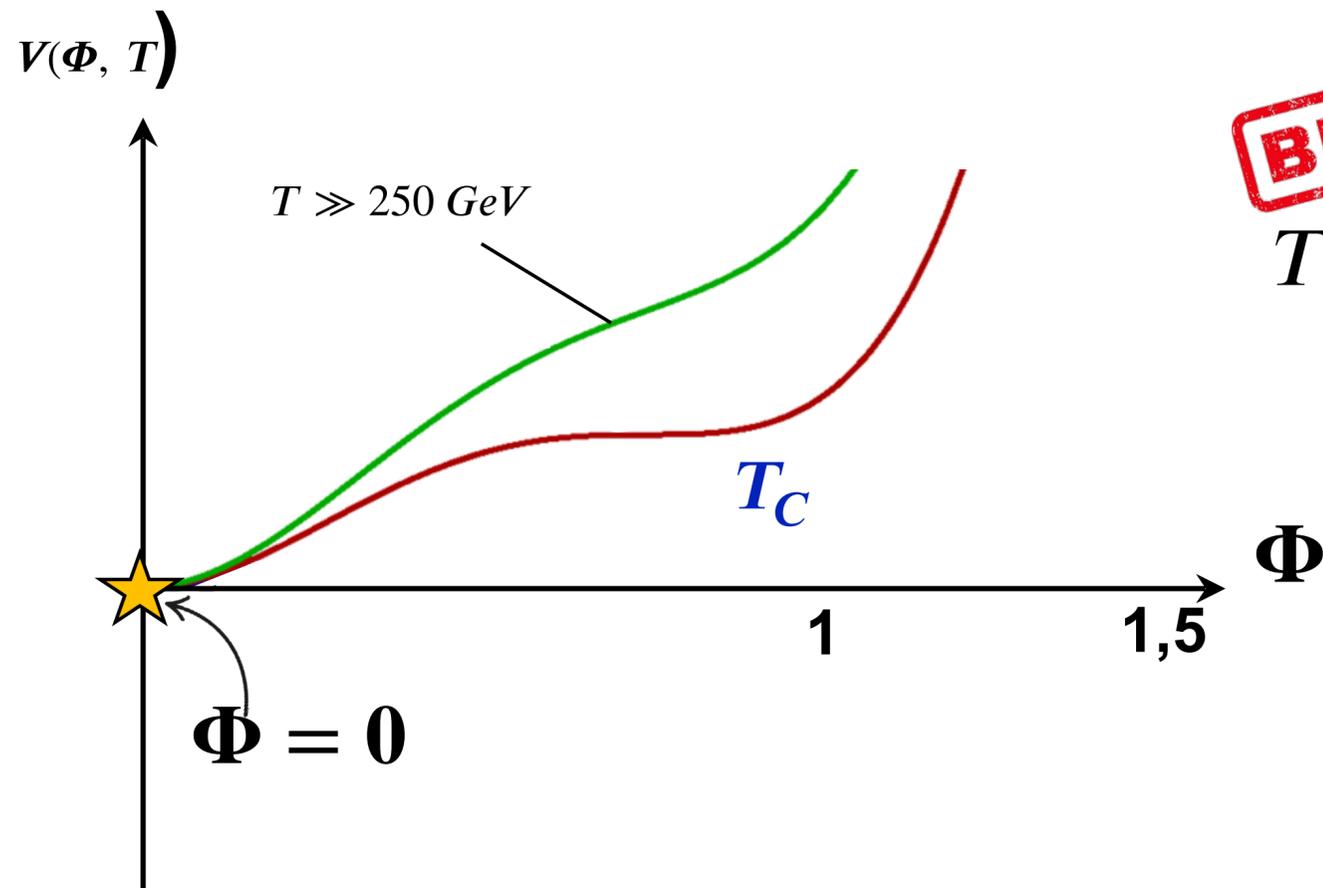


$m_Z =$
91,2 GeV



Brechung Eichsymmetrie via universelles Feld Φ

- **Higgs-Potential** $V(\Phi, T)$ im extrem frühen Universum bei $t \ll 10^{-12} s$
 - zunächst: alle SM Teilchen (Fermionen, Bosonen) sind **masselos** mit $m = 0$!

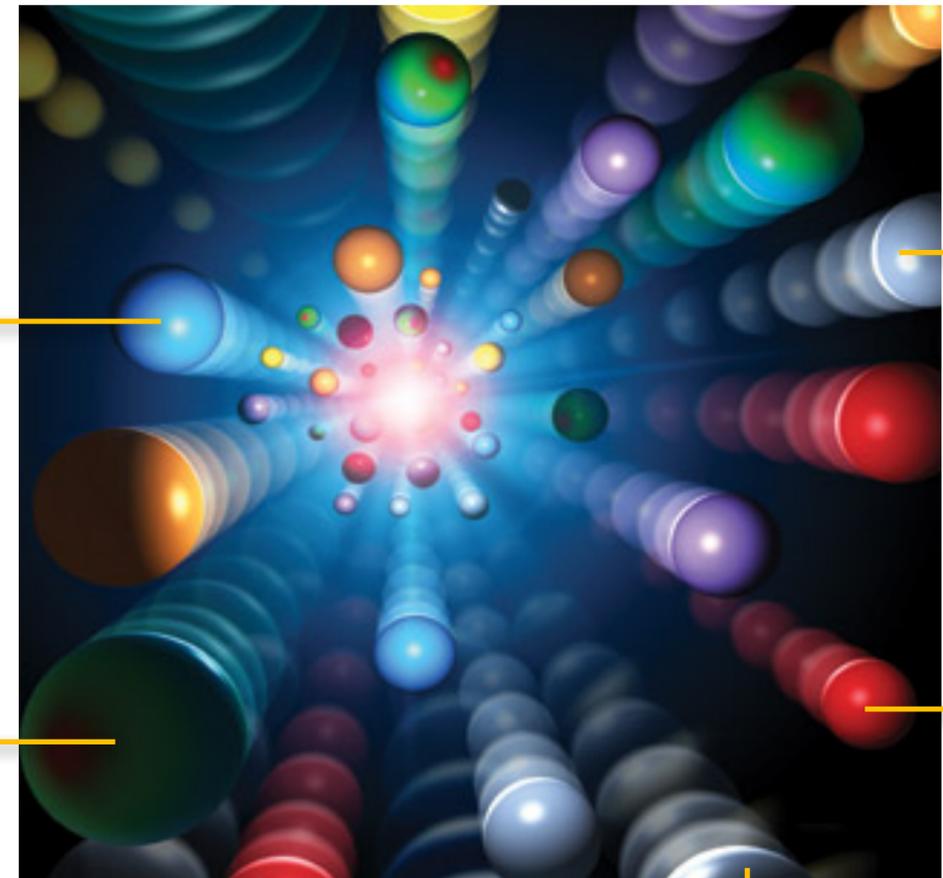


BEFORE

$T > T_c$

$m_\mu = 0$

$m_Z = 0$



$m_u = 0$

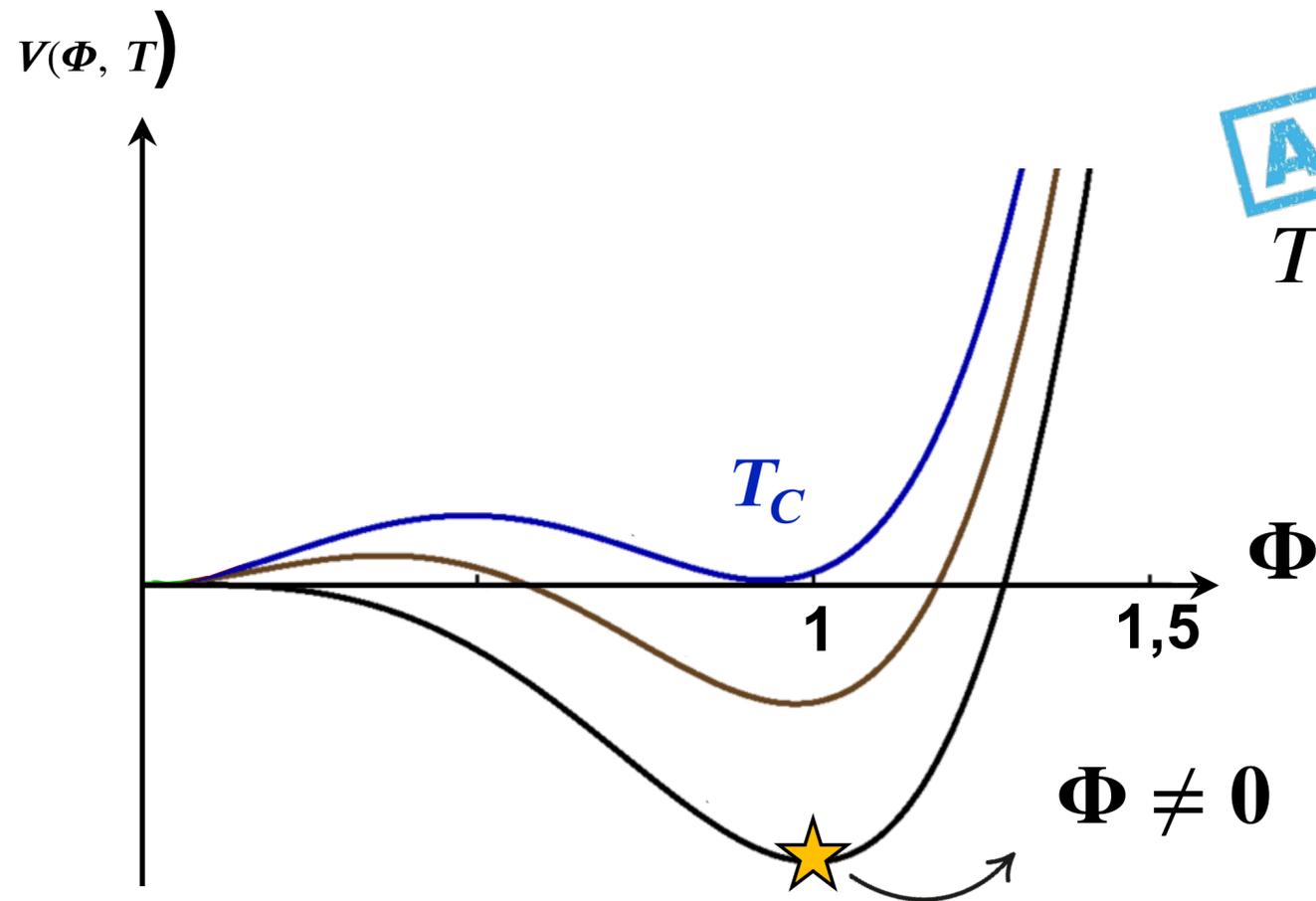
$m_e = 0$

$m_W = 0$

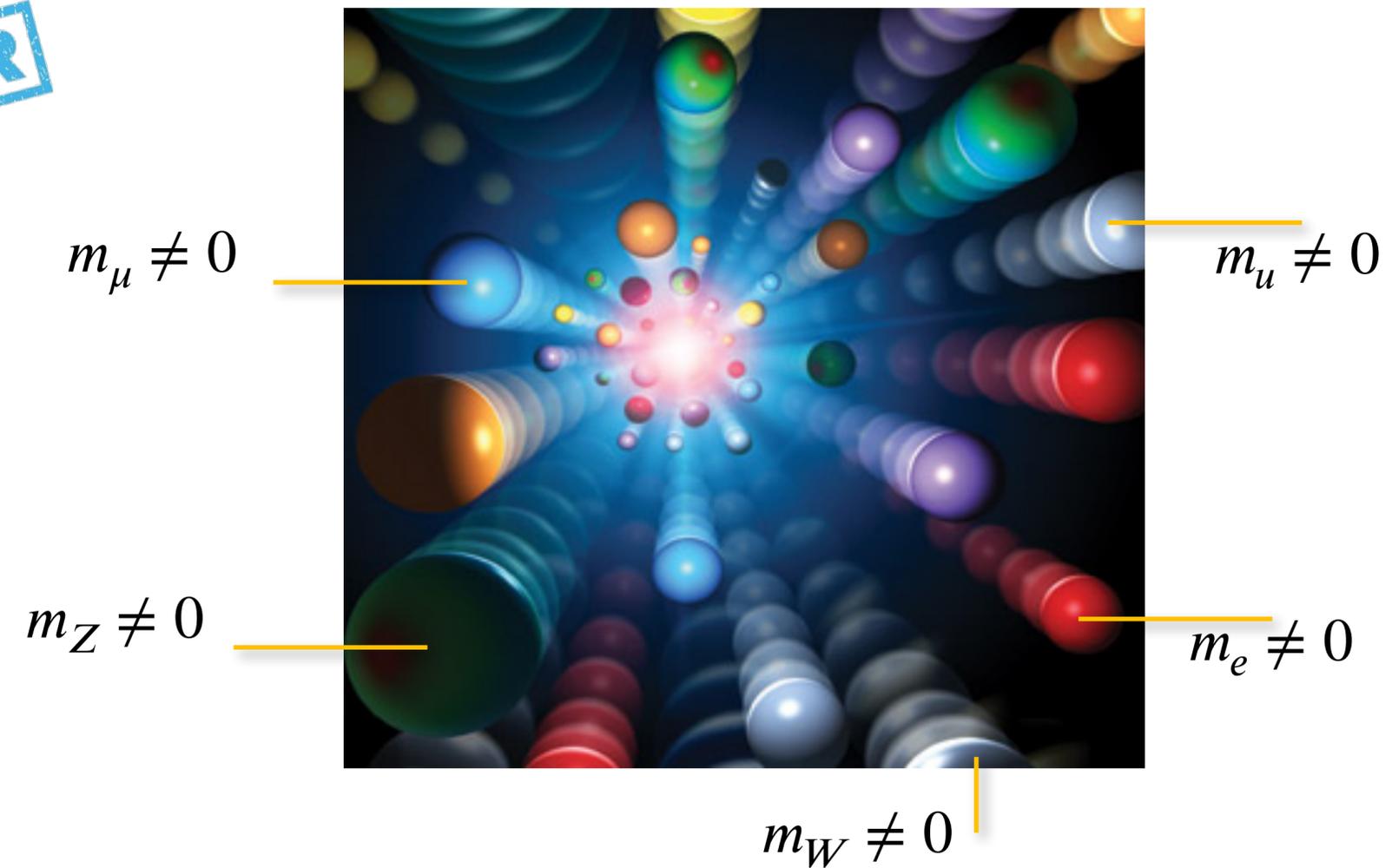
Entwicklung des Higgs-Potenzials

Brechung Eichsymmetrie via universelles Feld Φ

- **Higgs-Potential $V(\Phi, T)$ nach Übergang: (geladene) SM-Teilchen mit Masse**
 - nach elektroschwachem Phasenübergang: alle Teilchen massebehaftet*

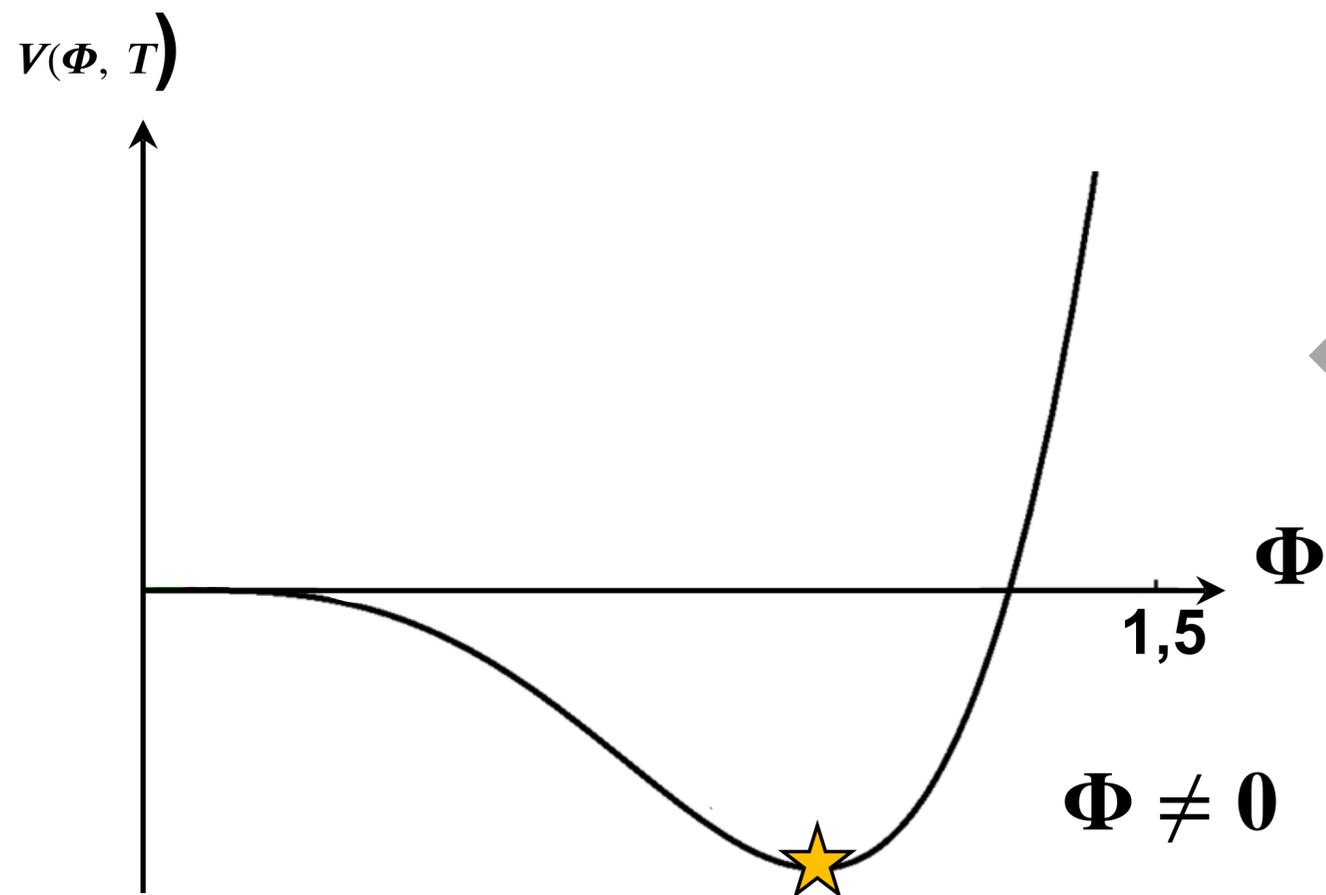


Entwicklung des Higgs-Potenzials

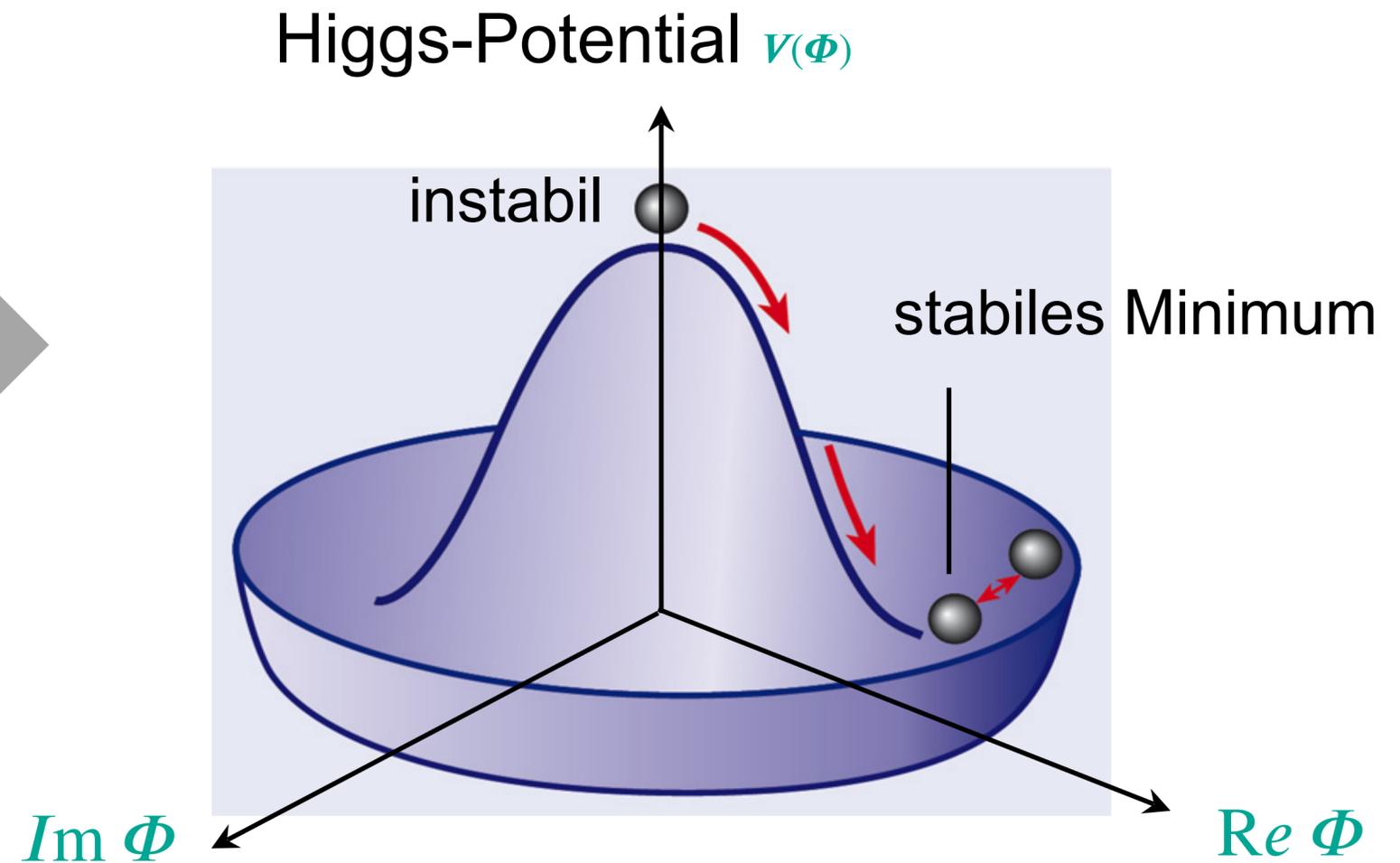


Brechung Eichsymmetrie via universelles Feld Φ

- **Higgs-Potential $v(\Phi, T)$ nach Übergang: (geladene) SM-Teilchen mit Masse**
 - nach elektroschwachem Phasenübergang: **'Mexican Hat' Potenzial $v(\Phi)$**



Entwicklung des Higgs-Potenzials



Wert des Higgsfelds ϕ

- **Spontane Brechung** der elektro-schwachen Eichsymmetrie $SU(2) \times U(1)_Y$

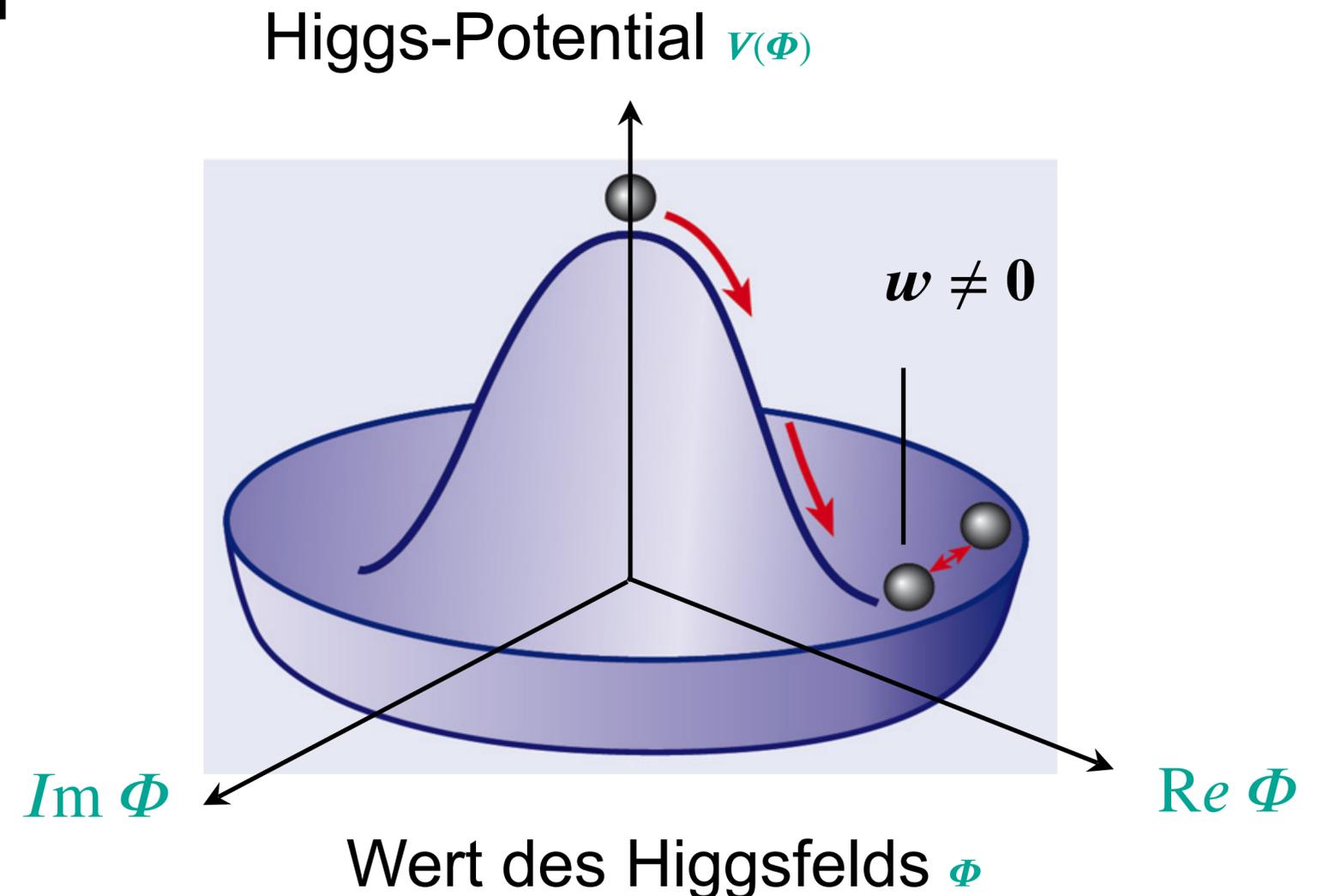
- bei $T < T_c$: Higgs-Feld nimmt einen endlichen Vakuum-Erwartungswert* w an

$$\langle \Phi \rangle_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ w \end{pmatrix}$$

$w = 246 \text{ GeV}$

- $w \neq 0$: **Brechung von** $SU(2) \times U(1)_Y$

‘elektroschwachen Energieskala’:
Teilchen des SM erhalten Masse,
vorher alle masselos



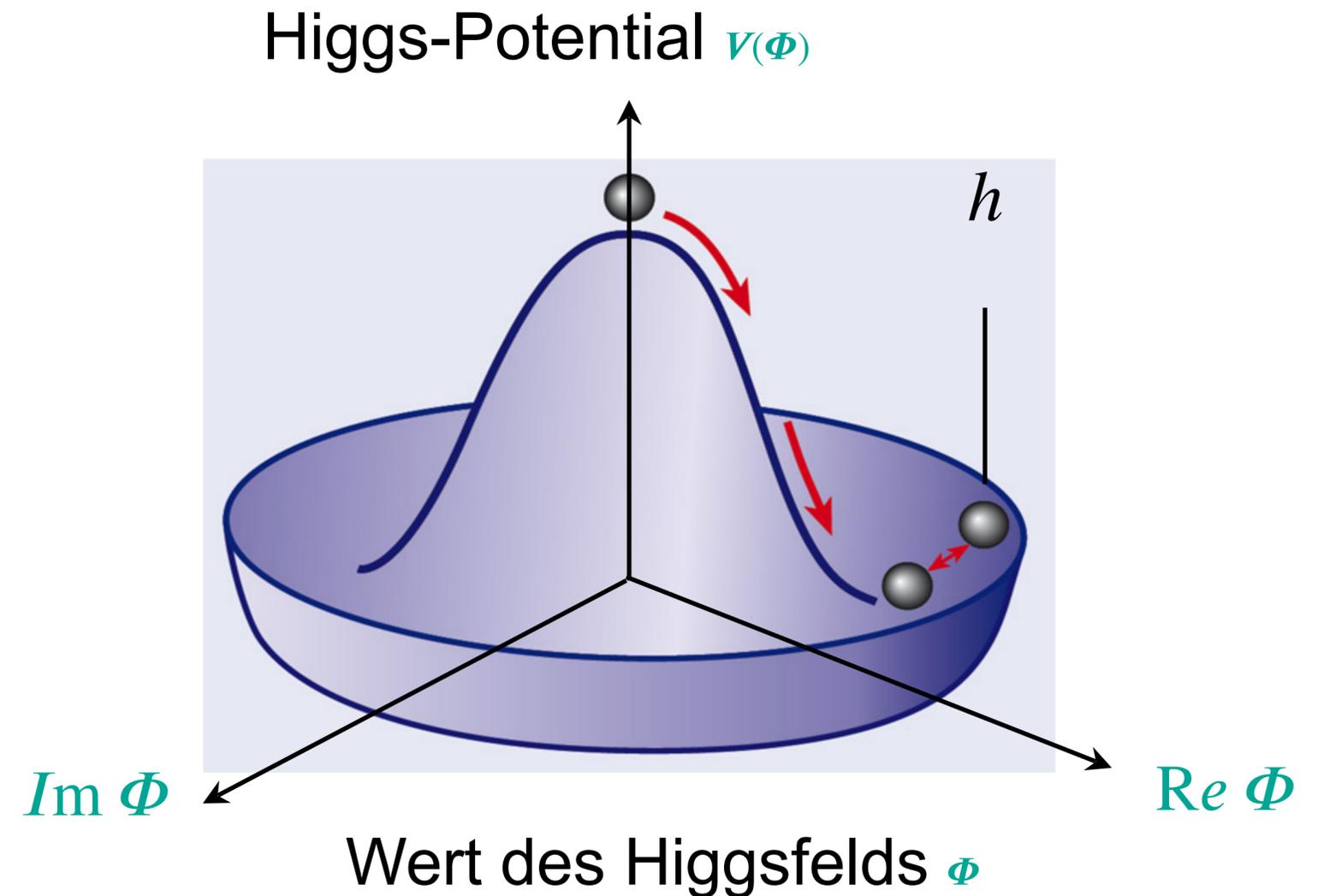
- **Spontane Brechung** der elektro-schwachen Eichsymmetrie $SU(2) \times U(1)_Y$

- Higgs-Boson als (radiale) Anregung des Higgs-Felds

$$m_h = 125 \text{ GeV}, \tau = 10^{-22} \text{ s}$$

⇒ 3 Vektorbosonen erhalten Massen (3 longitudinale Freiheitsgraden) aus den 3 Zuständen $H^+ H^- H^0$

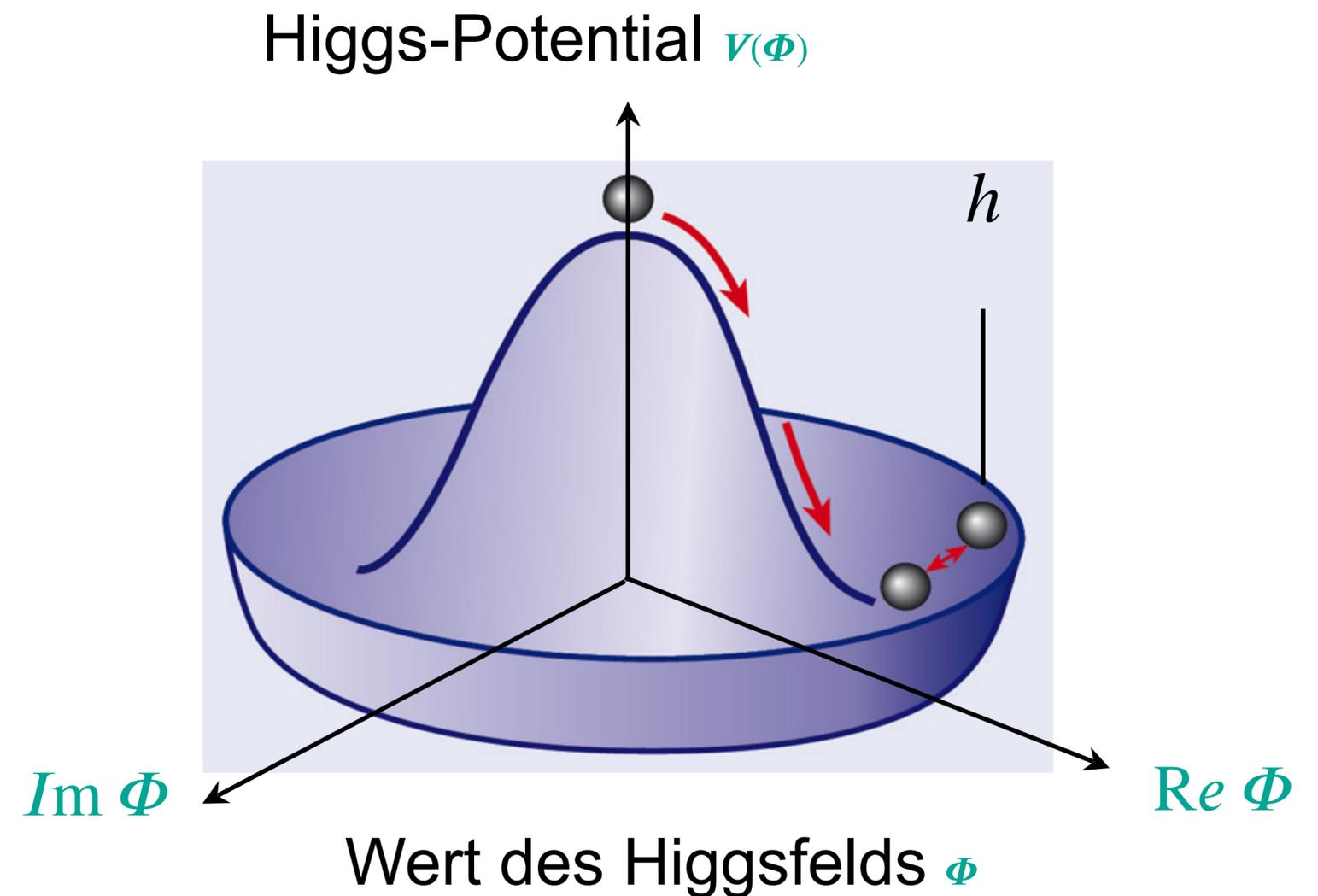
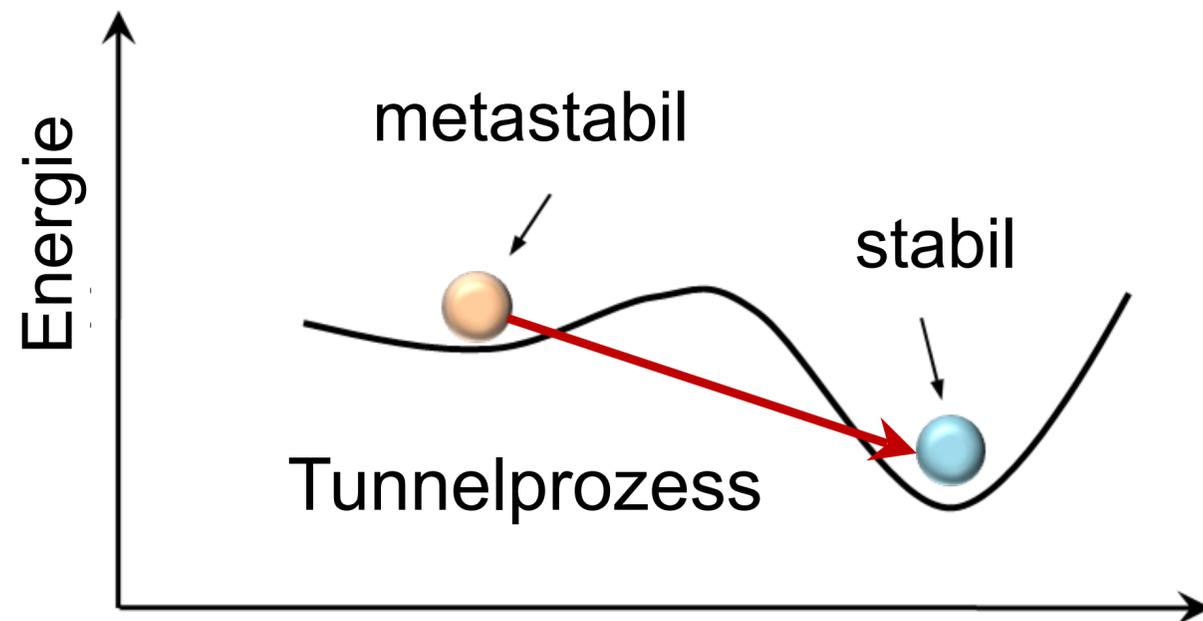
$$M_{W^-, W^+} = 80.4 \text{ GeV} \quad M_Z = 91.2 \text{ GeV}$$



Brechung der Eichsymmetrie: Masse von h und t

- Massen m_H und m_t beeinflussen Stabilität des elektroschwachen (EW) Vakuum- Zustands

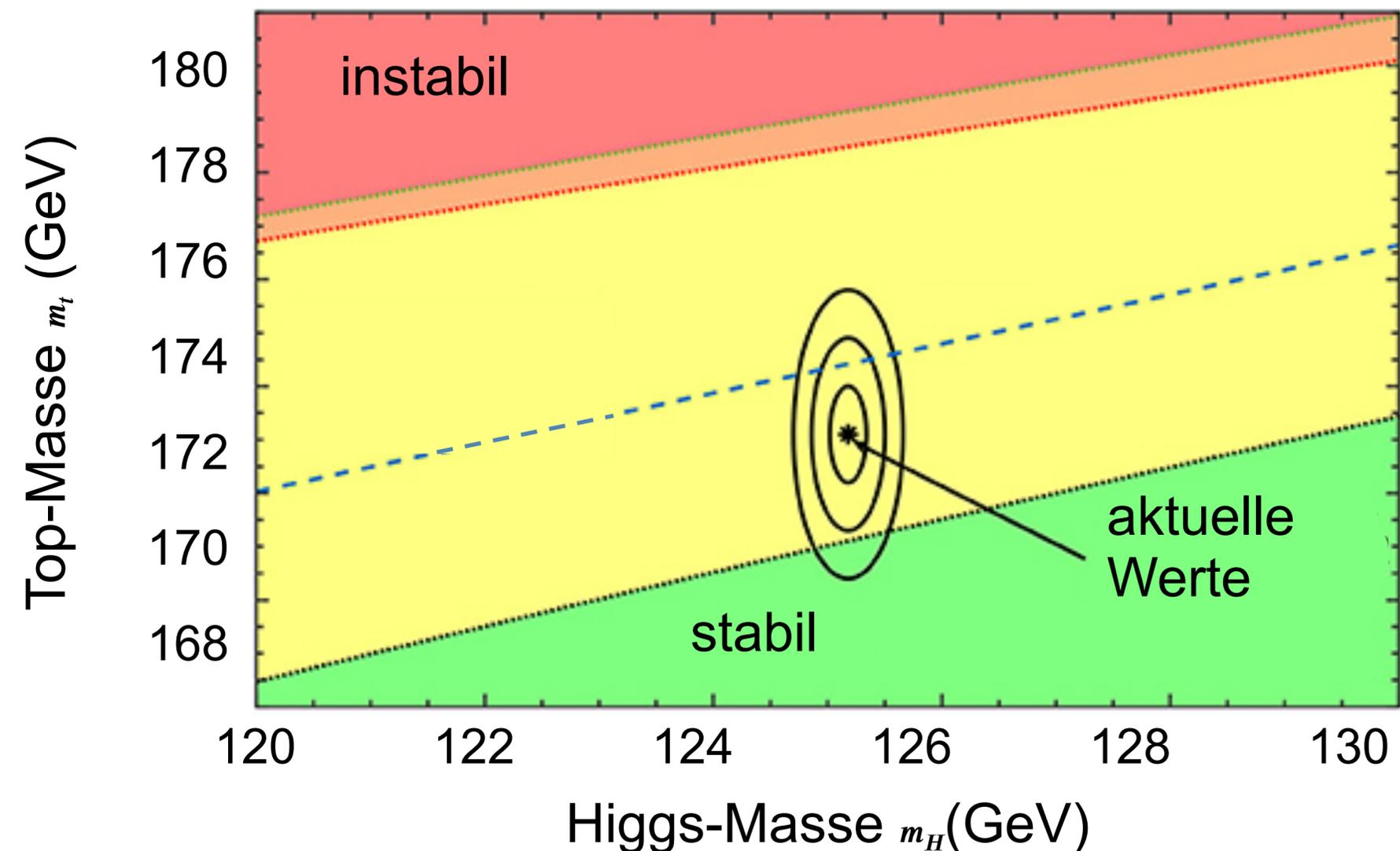
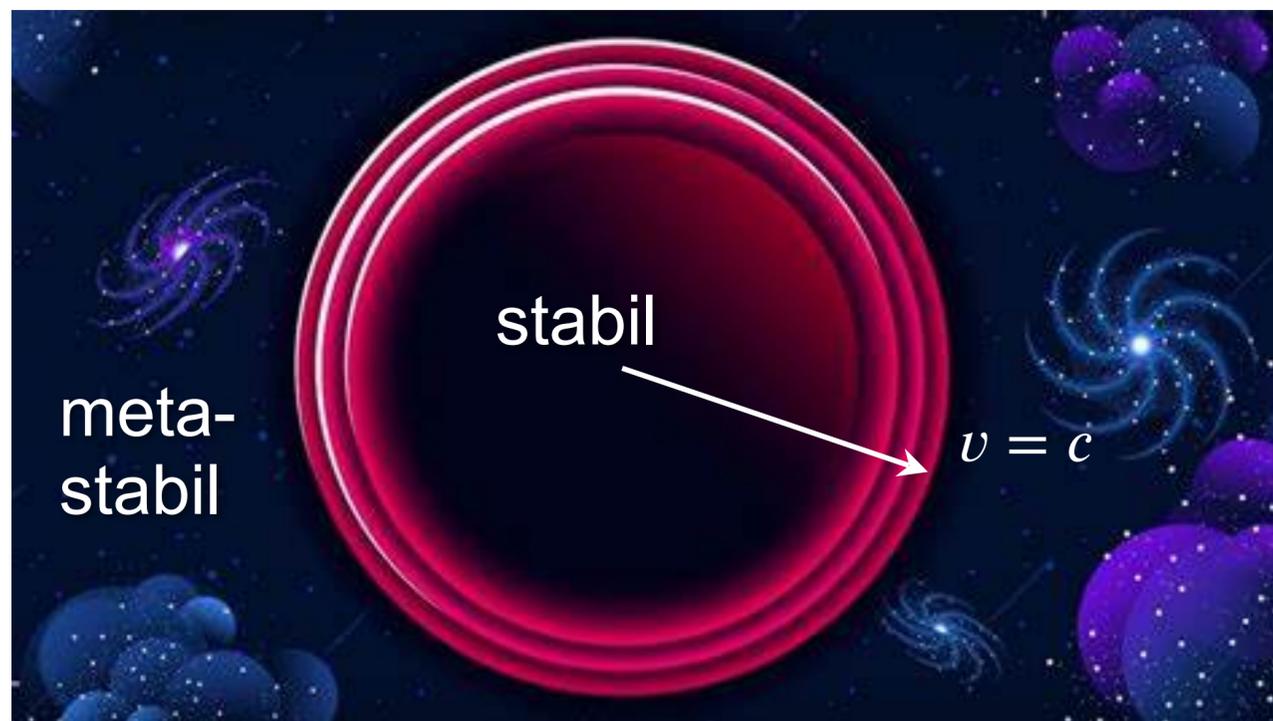
- falls keine weitere Teilchen/
neue Physik jenseits des SM:
EW Vakuum ist metastabil



Brechung der Eichsymmetrie: Masse von h und t

- Massen m_H und m_t beeinflussen Stabilität des elektroschwachen (EW) Vakuum- Zustands

- falls keine weitere Teilchen/
neue Physik jenseits des SM:
EW Vakuum ist **metastabil**

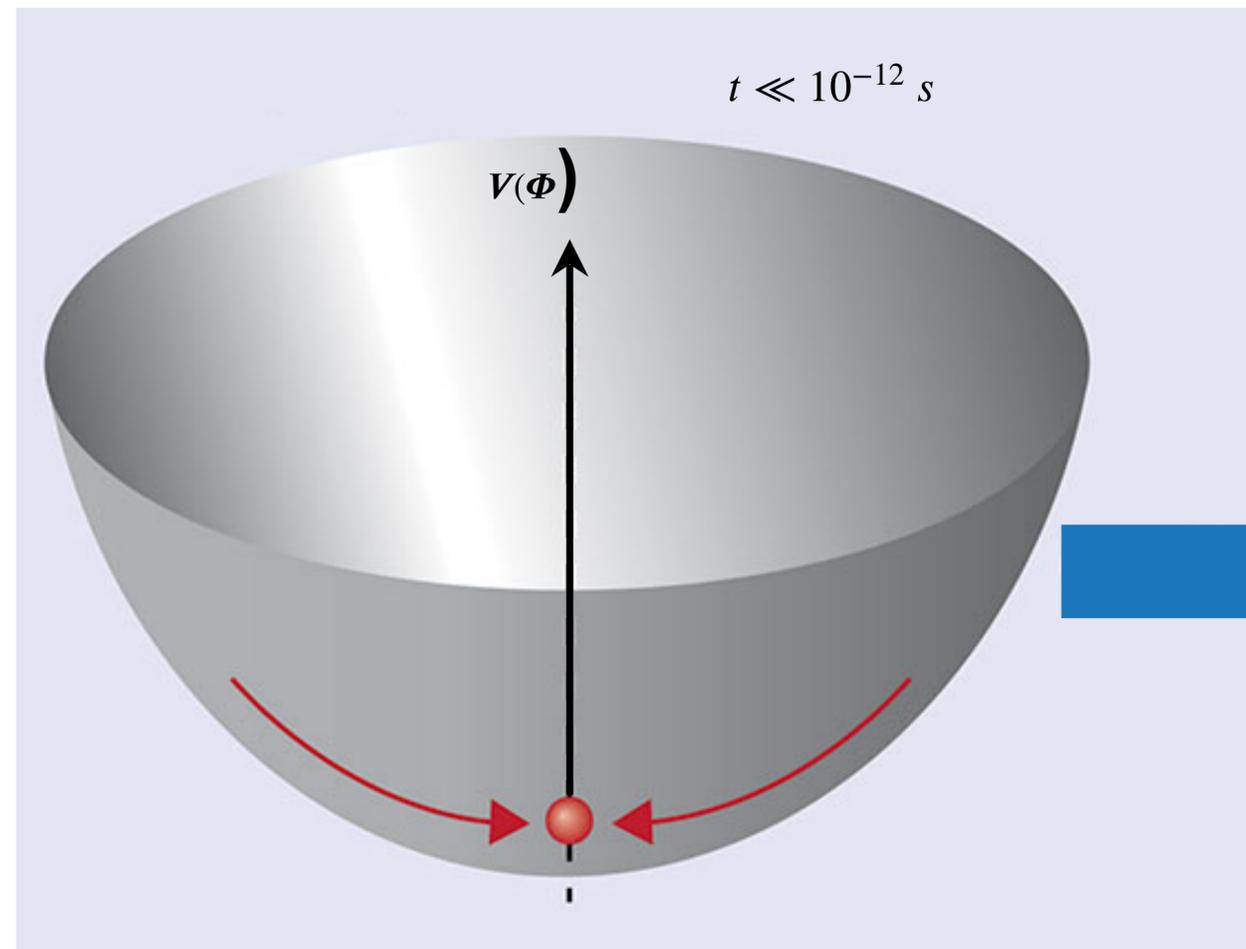


- **Symmetrien in der Physik**

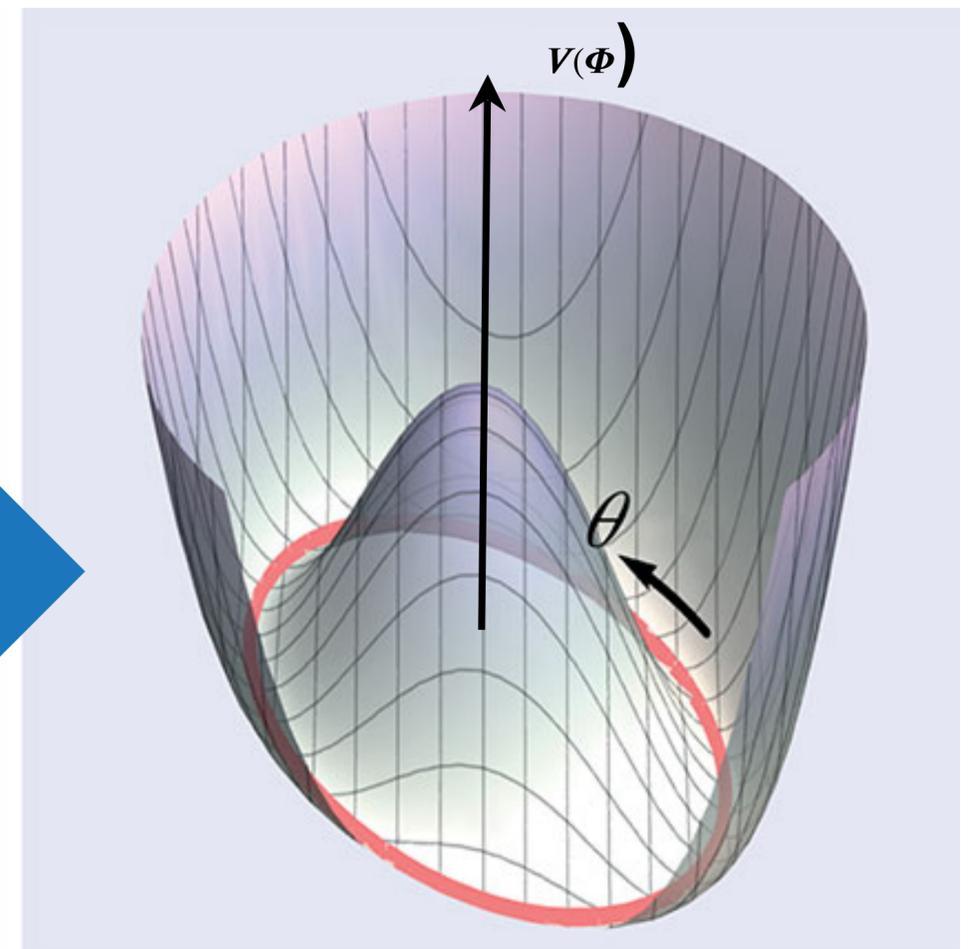
"It is only slightly overstating the case to say that **physics is the study of symmetry**"



Philip Anderson



ungebrochene Symmetrie



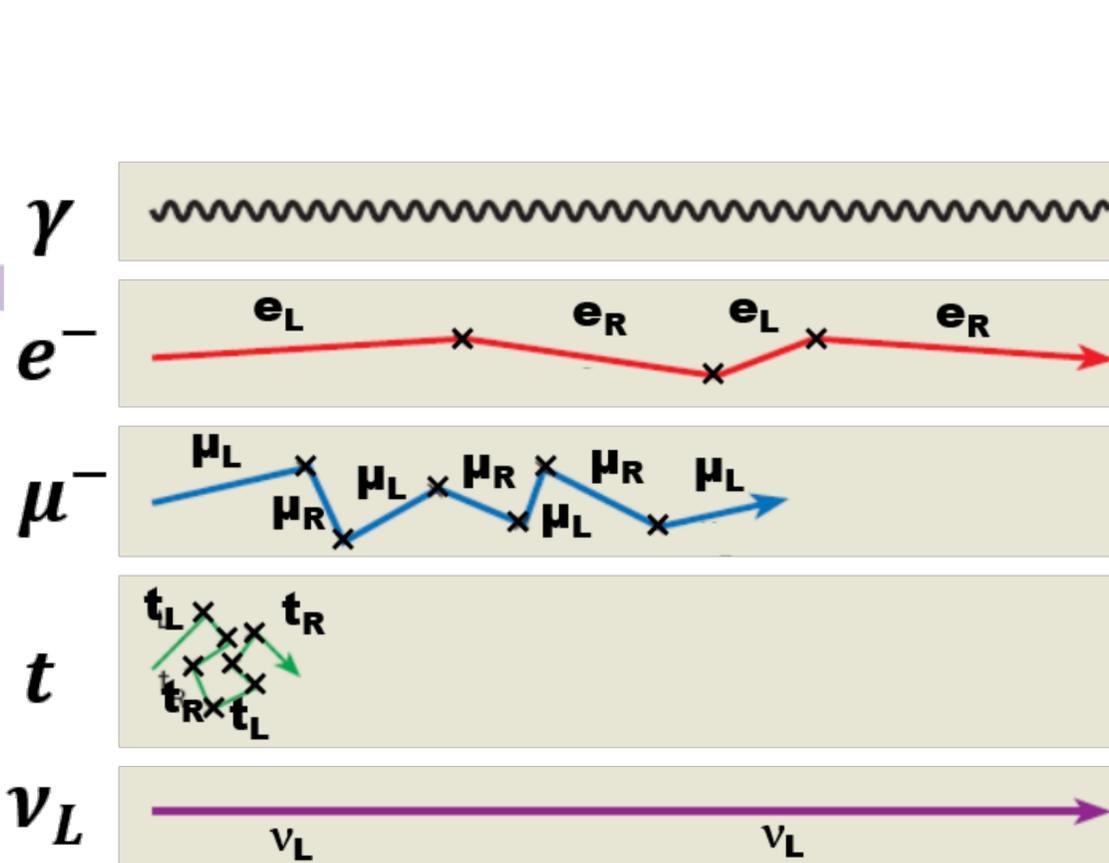
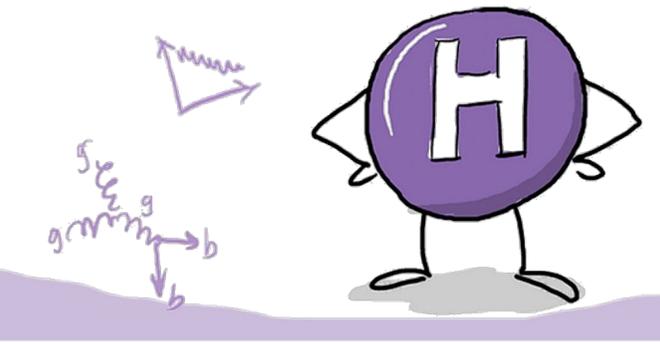
spontane Symmetriebrechung

Brechung der Eichsymmetrie

- Massen von Quarks & geladenen Leptonen durch Yukawa-Ankopplung

⇒ Ankopplung an das Higgsfeld: große Masse ⇔ große Kopplung

HIGGS BOSON

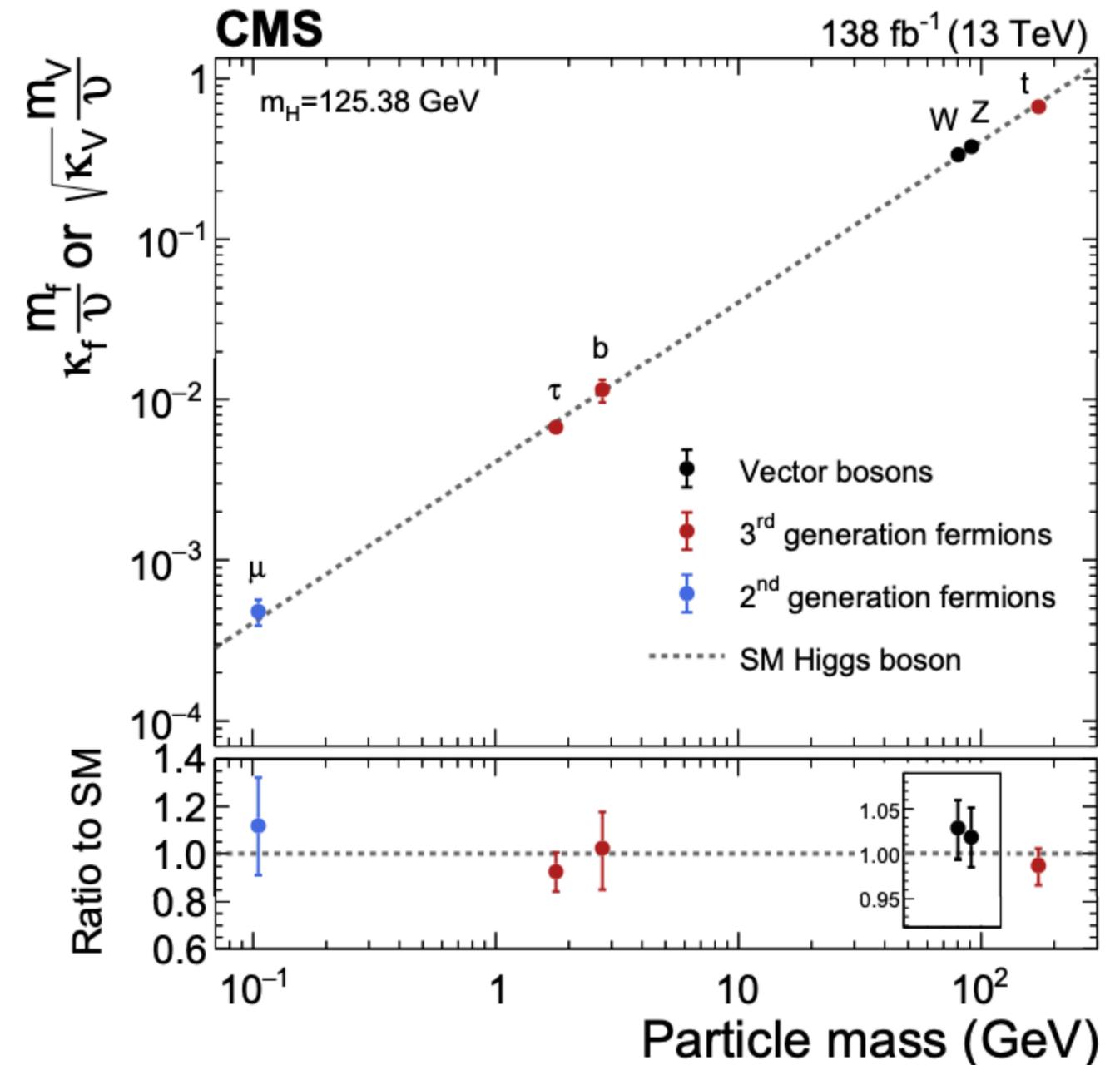
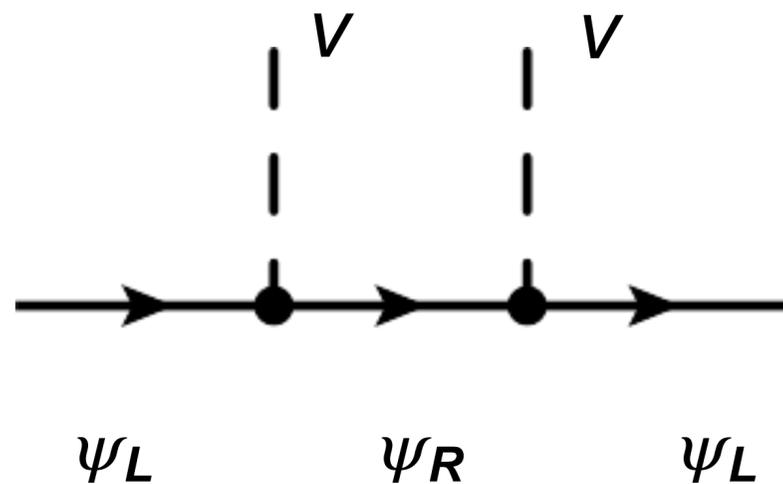


Teilchenart	Skala	m [MeV]
Photon γ	masselos	0
Elektron e	leicht	0.511
Myon μ	mittel	105.6
Top-Quark t	schwer	$1.71 \cdot 10^5$
SM-Neutrino ν_L	masselos	0

- Massen von Quarks & geladenen Leptonen durch Yukawa-Ankopplung

⇒ Ankopplung an das Higgsfeld:
 experimentelle Messungen von
 CMS & ATLAS

- Kopplung an Higgs-VEV (v) ändert
 die Teilchen-Chiralität: LH \leftrightarrow RH



Katzen



- **Welche der nachf. Aussagen zum Higgs-Mechanismus stimmen nicht?**
 - A) durch **Kopplung ans Higgs-Feld** erhalten sowohl Eichbosonen als auch die geladenen Fermionen des Standardmodells ihre Masse
 - B) das Standard-Modell sagt die **Masse des Higgs-Bosons** voraus
 - C) bei **spontaner Symmetriebrechung** besitzt der Grundzustand eines Systems nicht die Symmetrie der Lagrange-Dichte
 - D) ohne den Higgs-Mechanismus kommt es im Wq. bestimmter Streuprozesse zu **Divergenzen**

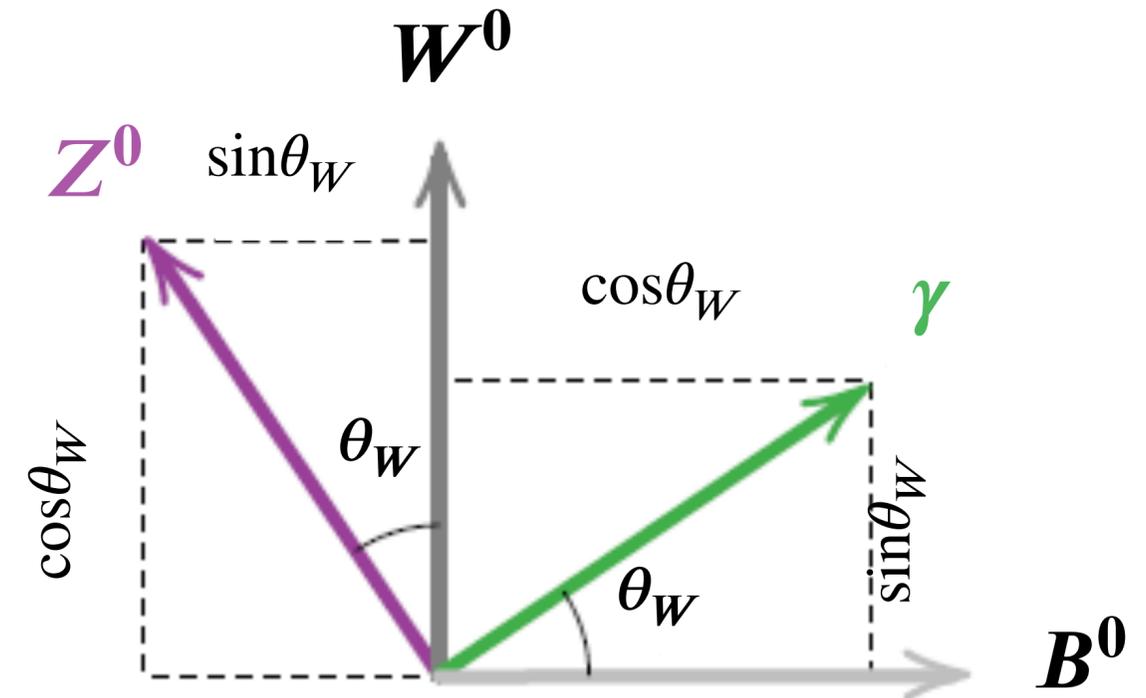


Weinberg-Winkel θ_W

- Elektroschwacher Mischungswinkel: **zentraler Parameter des SM**

$$\begin{pmatrix} |\gamma\rangle \\ |Z^0\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_W & \sin\theta_W \\ -\sin\theta_W & \cos\theta_W \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} |B^0\rangle \\ |W^0\rangle \end{pmatrix}$$

- beschreibt die **Drehung der Eigenzustände** des schwachen Eichfelder W^0, B^0 relativ zu den reellen Vektorbosonen Z^0 und γ
- keine theoretische Vorhersage für θ_W , Größe muss experimentell bestimmt werden



Weinberg-Winkel θ_W

- Elektroschwacher Mischungswinkel: **zentraler Parameter des SM**

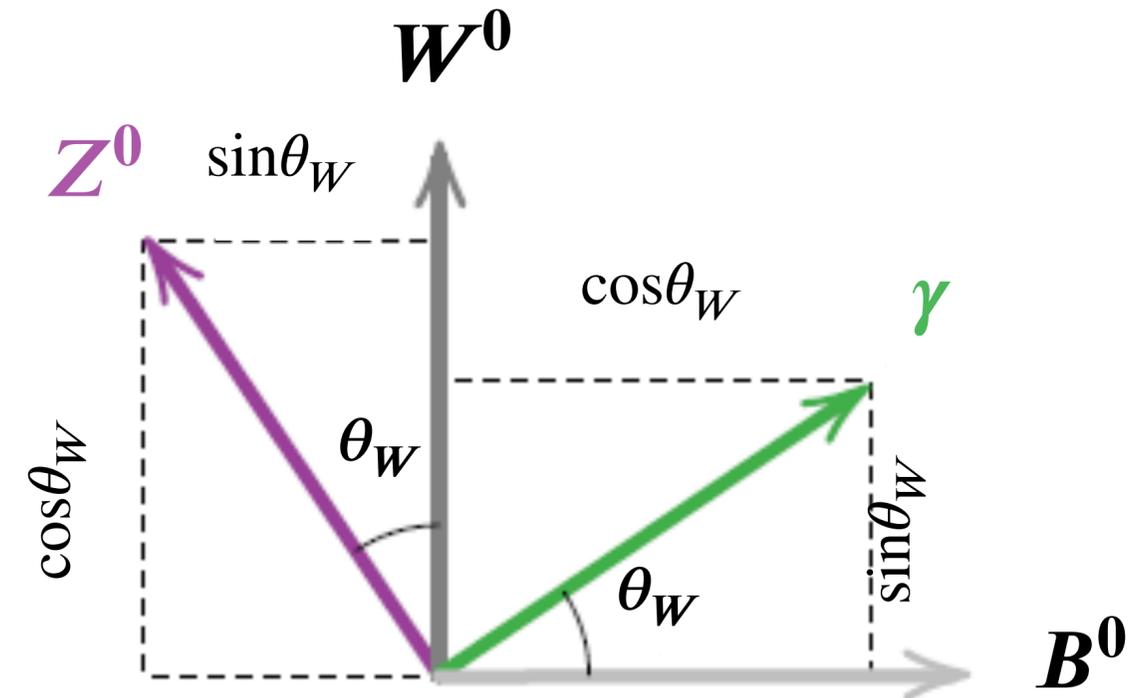
- Massenverhältnis von W^\pm und Z^0 wird durch Weinberg-Winkel θ_W festgelegt

$$\frac{M_W}{M_{Z^0}} = \cos\theta_W$$

- aktuelle Massenwerte von W^\pm und Z^0

$$M_W = 80.433 \pm 0.009 \text{ GeV}$$

$$M_Z = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$



- M_W und M_Z als Funktion des Higgs-VEV & der Kopplungskonstanten g, g'

- Massenverhältnis von W^\pm und Z^0 als Funktion des Higgs-VEV v , und der beiden Kopplungskonstanten g (schwacher Isospin) & g' (schwache Hyperladung)

$$M_W = \frac{1}{2} \cdot v \cdot g$$

$$M_Z = \frac{1}{2} \cdot v \cdot \sqrt{g^2 + (g')^2}$$

- aktuelle Massenwerte von W^\pm und Z^0

$$M_W = 80.433 \pm 0.009 \text{ GeV}$$

$$M_Z = 91.1876 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$

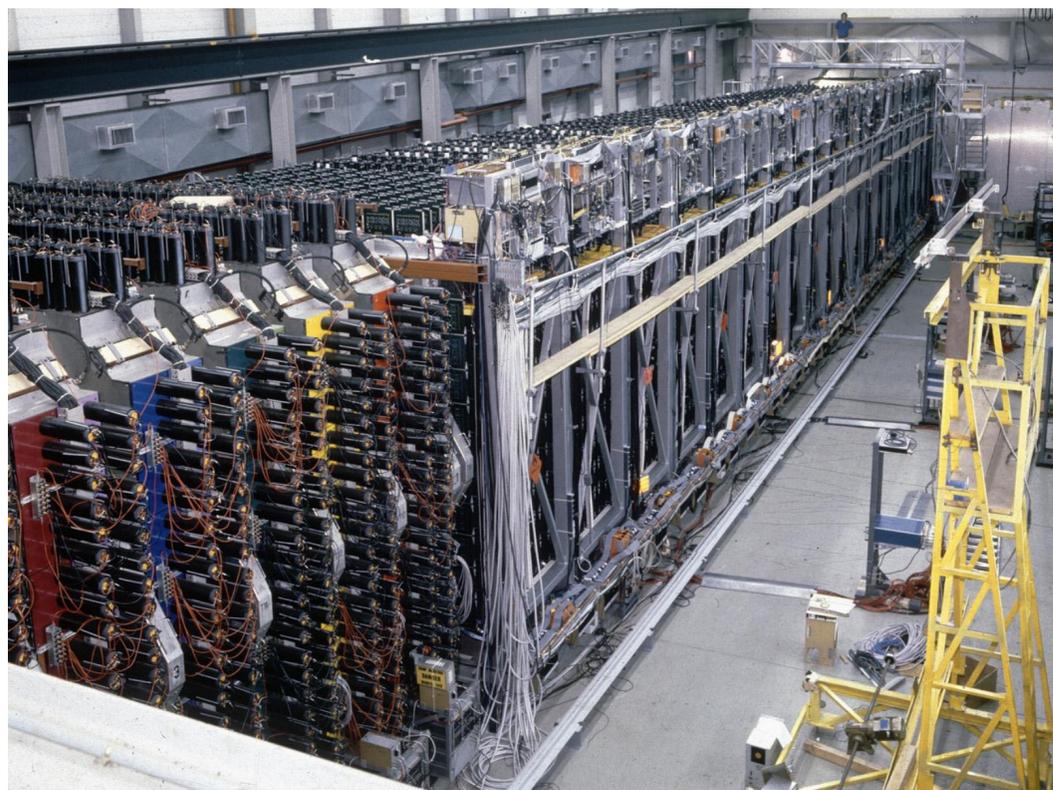


Weinberg-Winkel θ_W

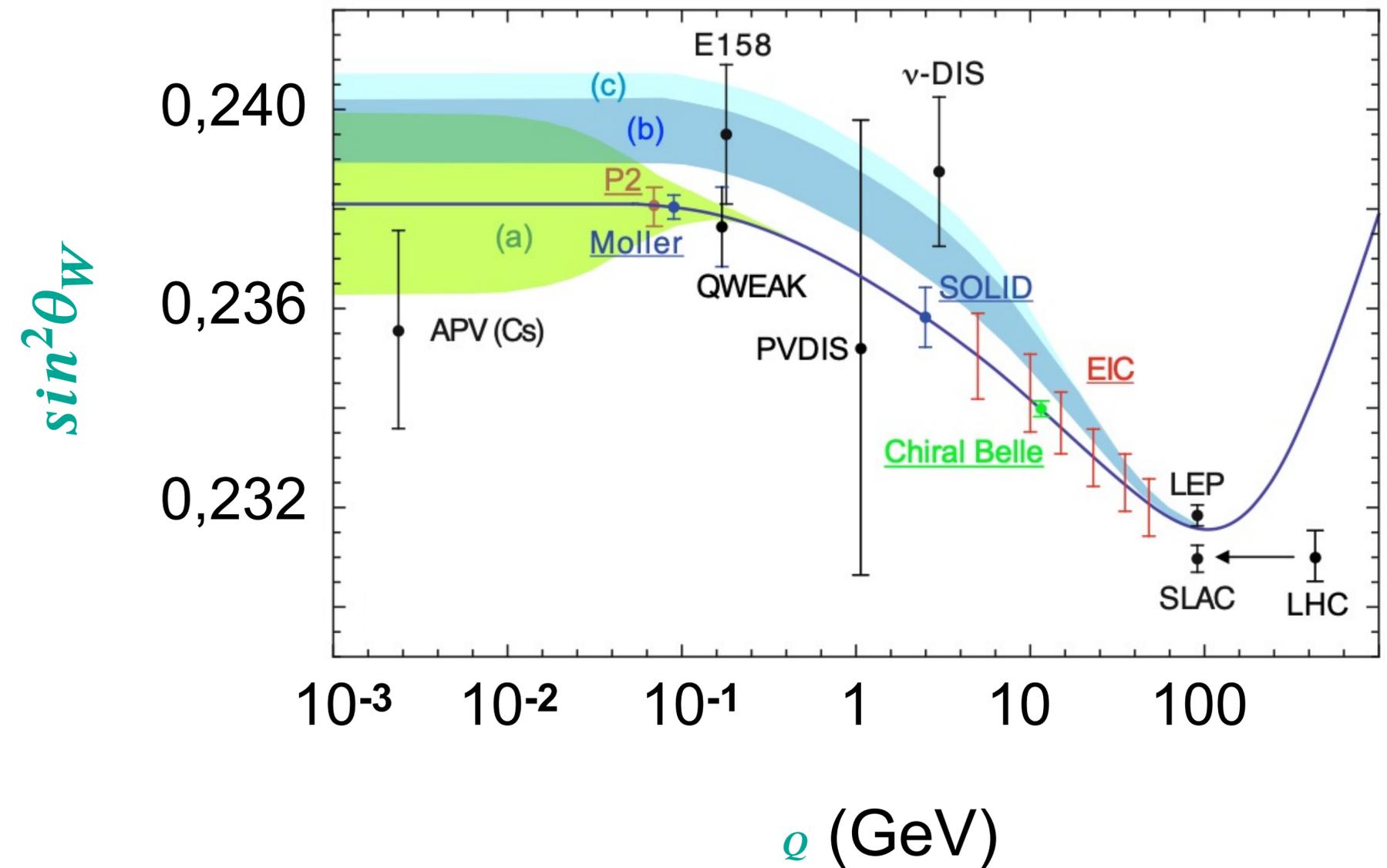
- experimentelle Bestimmung des Weinberg-Winkels (als Funktion von q)

- Messung von $\sin^2\theta_W$ über:

$\nu - e$ Streuung (GeV-Skala)



CHARM II Experiment am CERN



Weinberg-Winkel θ_W

- experimentelle Bestimmung des Weinberg-Winkels (als Funktion von q)

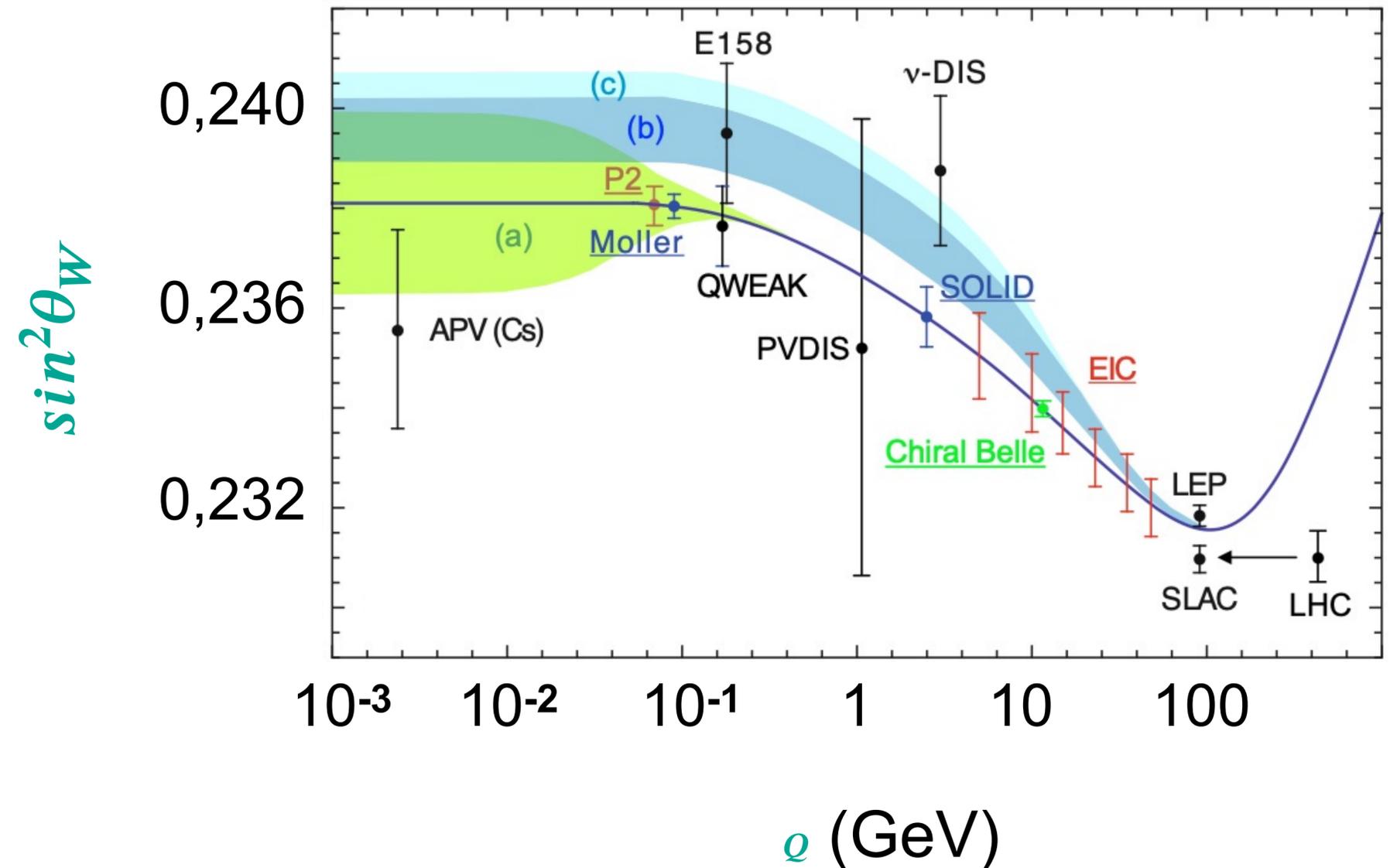
- Messung von $\sin^2\theta_W$ über:

Massenverhältnis von $W^\pm : Z^0$

Breite der Z^0 - Resonanz

$$\sin^2\theta_W = 0.23120 \pm 0.00015$$

$$\theta_W = 28.7^\circ \dots 29.3^\circ \approx 30^\circ$$



das 'Herz des SM': Weinberg-Winkel θ_W

- **Mischungswinkel θ_W : zentraler Parameter des SM**

- misst Stärke der elektromagnetischen W_w relativ zur schwachen W_w .

$$e = g \cdot \sin \theta_W = g' \cdot \cos \theta_W$$

- schwache W_w mit großer Kopplungskonstante

A MODEL OF LEPTONS*

Steven Weinberg†

Laboratory for Nuclear Science and Physics Department,
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts

(Received 17 October 1967)



t only with photons, and with bosons that presumably mediate interactions. What could be more interesting than these spin-one bosons of gauge fields? Standing in contrast to the obvious dif-

and on a right-handed singlet

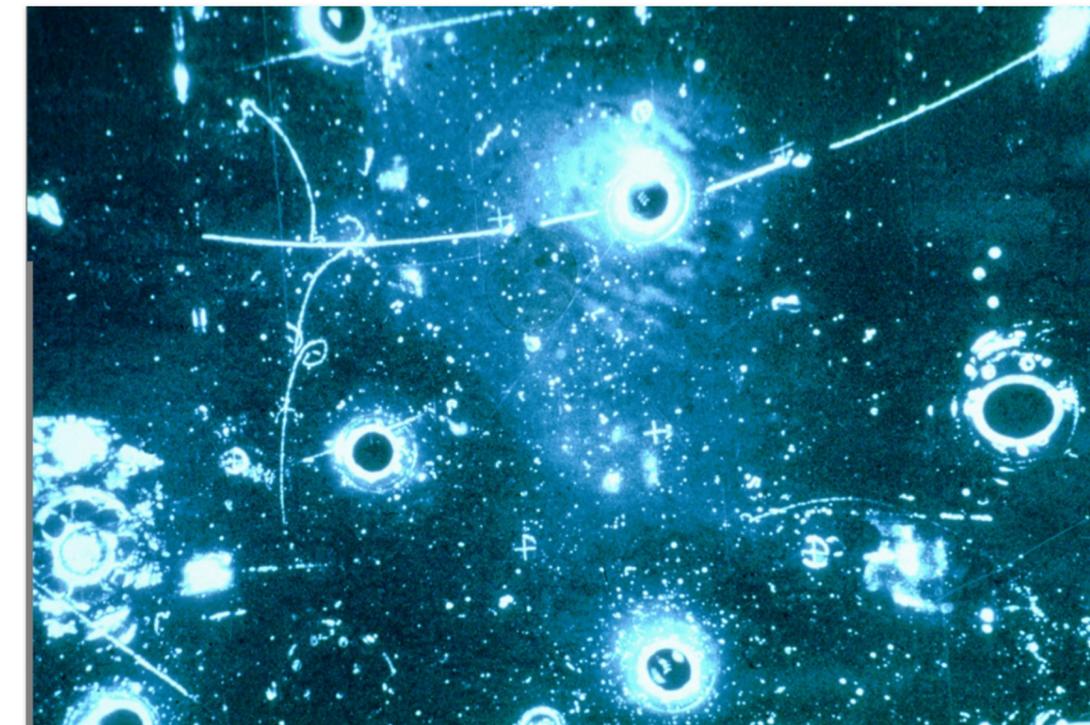
$$R \equiv \left[\frac{1}{2}(1 - \gamma_5) \right] e.$$

The largest group that leaves invariant the Lagrangian terms $-\bar{L}\gamma^\mu \partial_\mu L - \bar{R}\gamma^\mu \partial_\mu R$ of the

55 ~~50~~ years since iconic 'A Model of Leptons' published

Steven Weinberg's iconic paper, A Model of Leptons, was published in 1967 and determined the direction for high-energy particle physics research

20 NOVEMBER, 2017 | By Harriet Jarlett



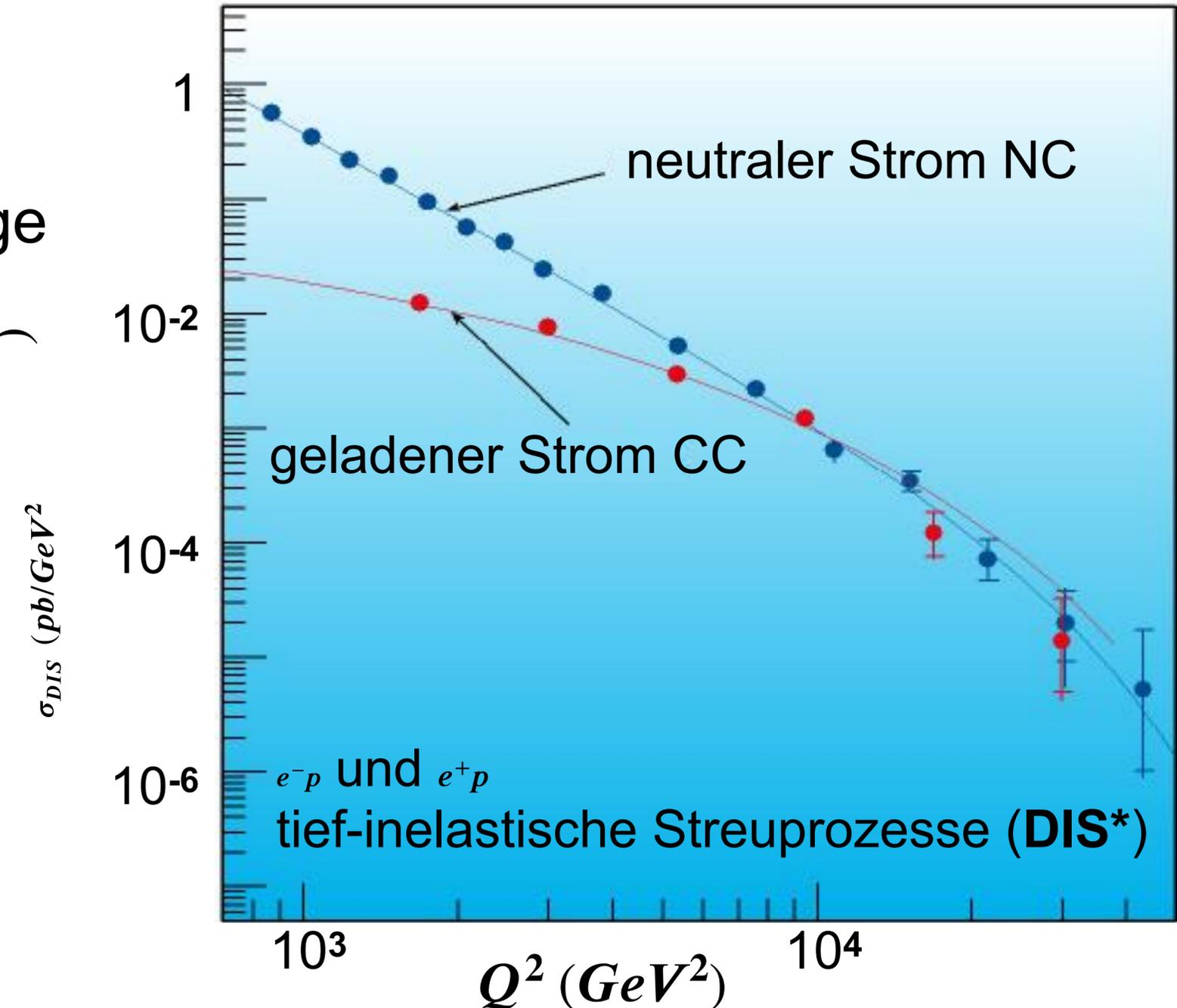
This event shows the real tracks produced in the 1200 litre Gargamelle bubble chamber that provided the first confirmation of a neutral current interaction. (Image: CERN)

Today, 50 years ago, Steven Weinberg published the iconic paper *A Model of Leptons*, which determined the direction for high-energy particle physics research from then on. This paper lies at the core of [the Standard Model](#), our most complete theory of how particles interact in our universe.

■ Elektroschwache Vereinigung

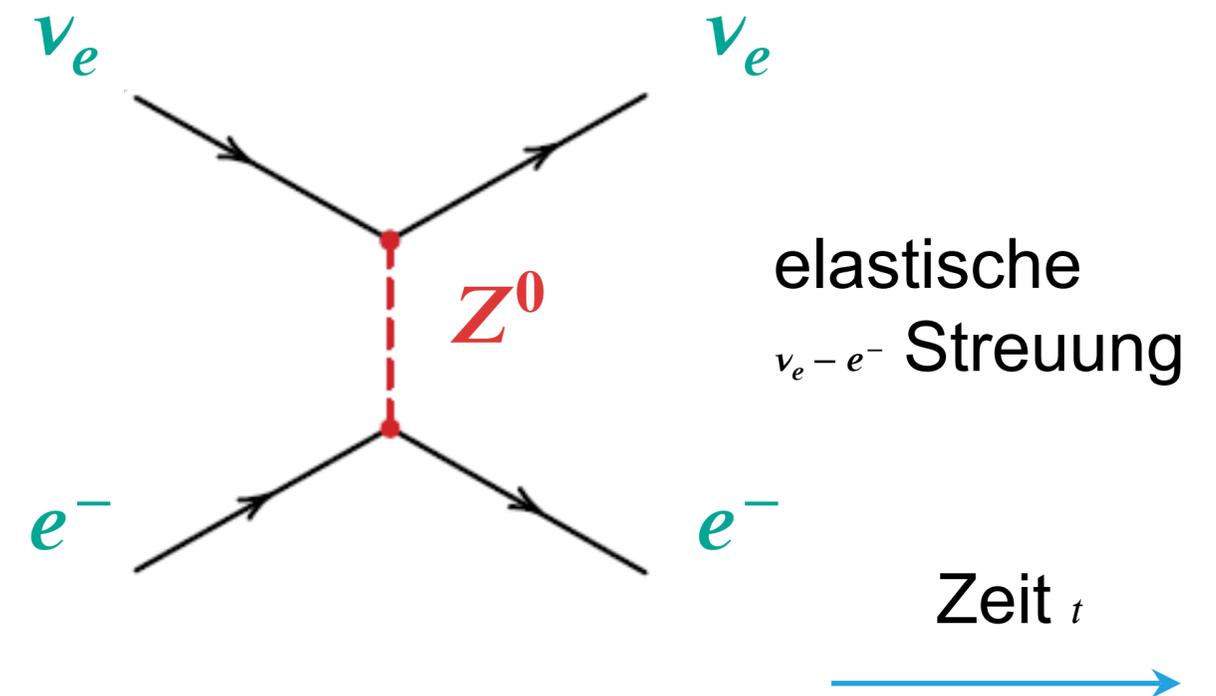
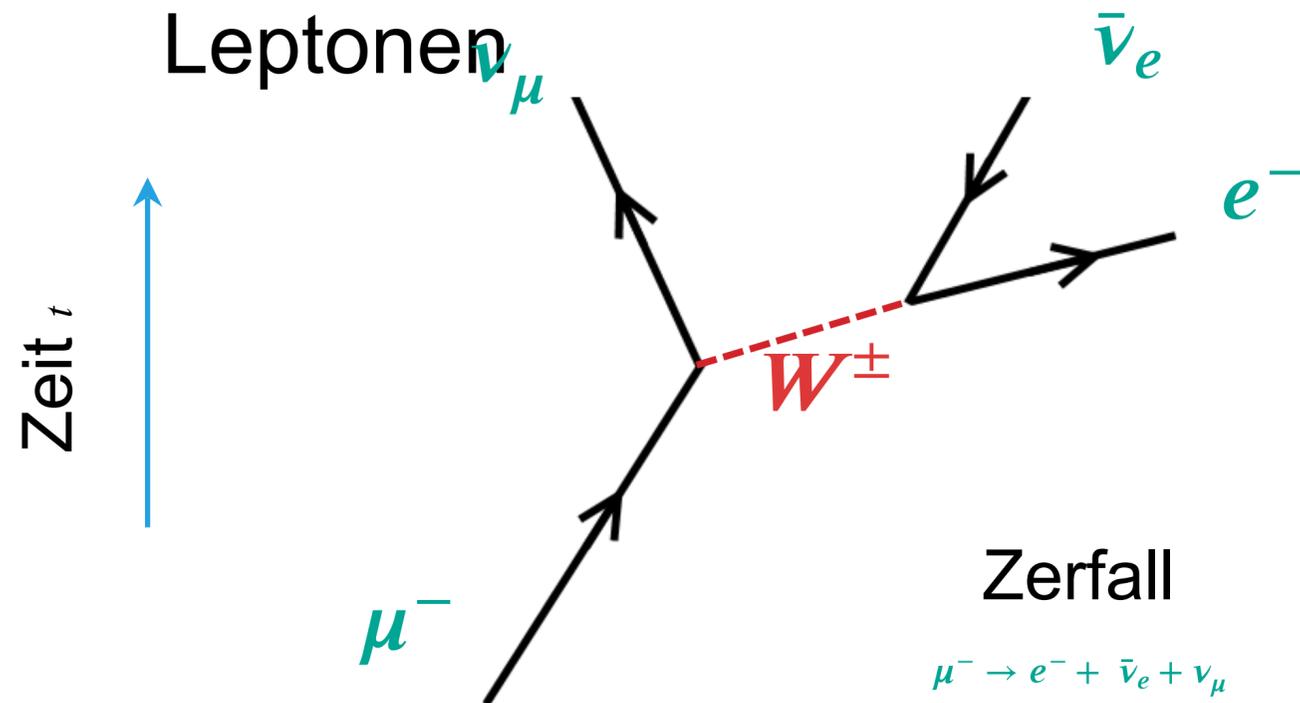
- wichtige Basis des Standardmodells:
Glashow, Weinberg & Salam - Vorhersage
von **schwachen neutralen Strömen**
(**weak neutral currents, NC**) via
massebehaftete z^0 -Bosonen

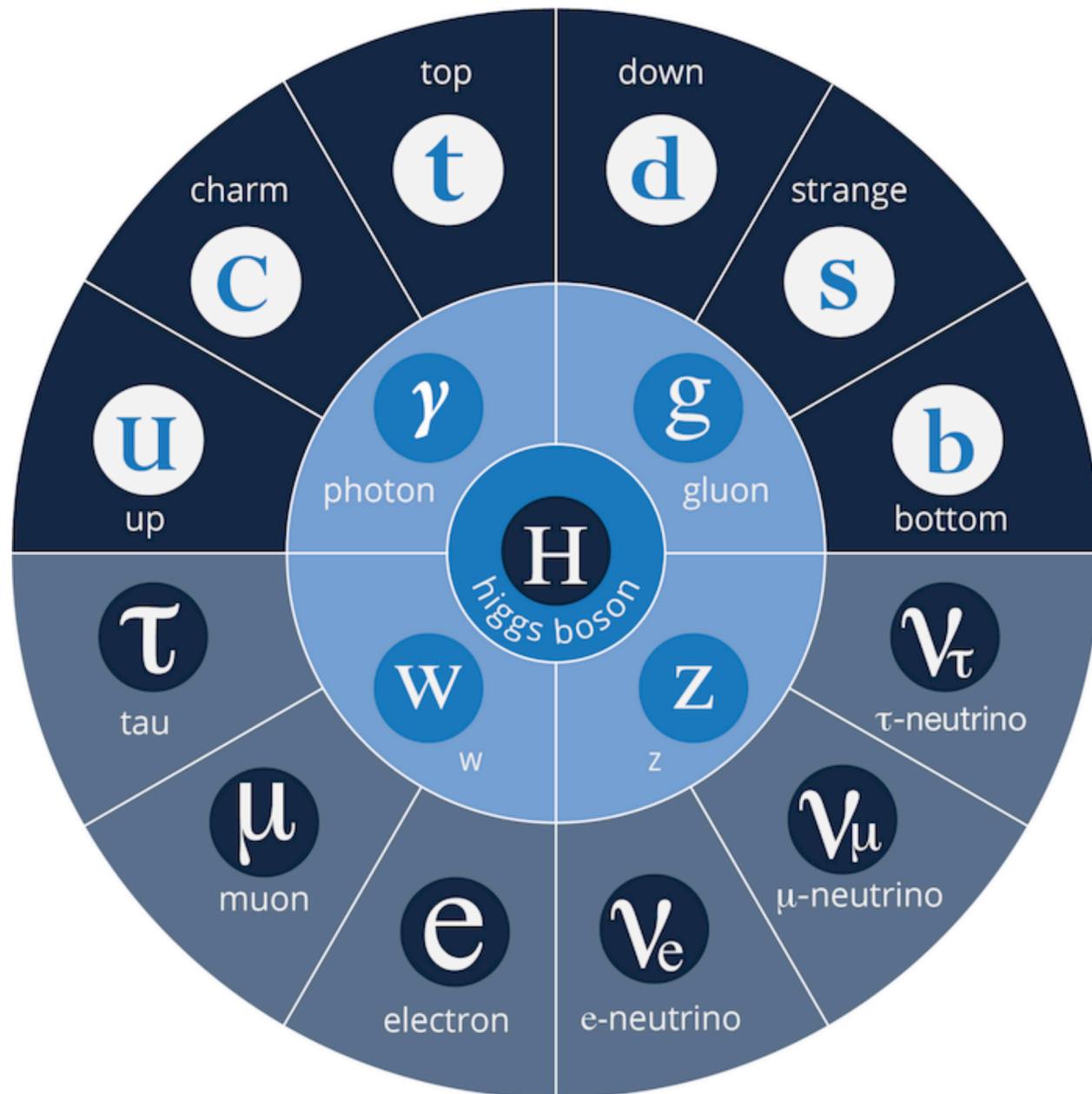
- bei sehr hohen Energien (HERA-
Beschleuniger, DESY Hamburg) lässt
sich **Vereinheitlichung der Stärke von**
Wechselwirkungen beobachten, hier:
 $\sigma(CC) = \sigma(NC)$



- **Standardmodell: Struktur von CC & NC Prozessen**

- **geladene Ströme:** W^\pm – Bosonen koppeln an alle **chiral LH** Quarks und Leptonen mit der gleichen Stärke (**Universalität**)
- **neutrale Ströme:** komplexere Struktur (Mischung mit elektromagnet. Wechselwirkung) \Rightarrow Ankopplung auch an **chiral RH** Quarks und Leptonen





■ 5. Wechselwirkungen

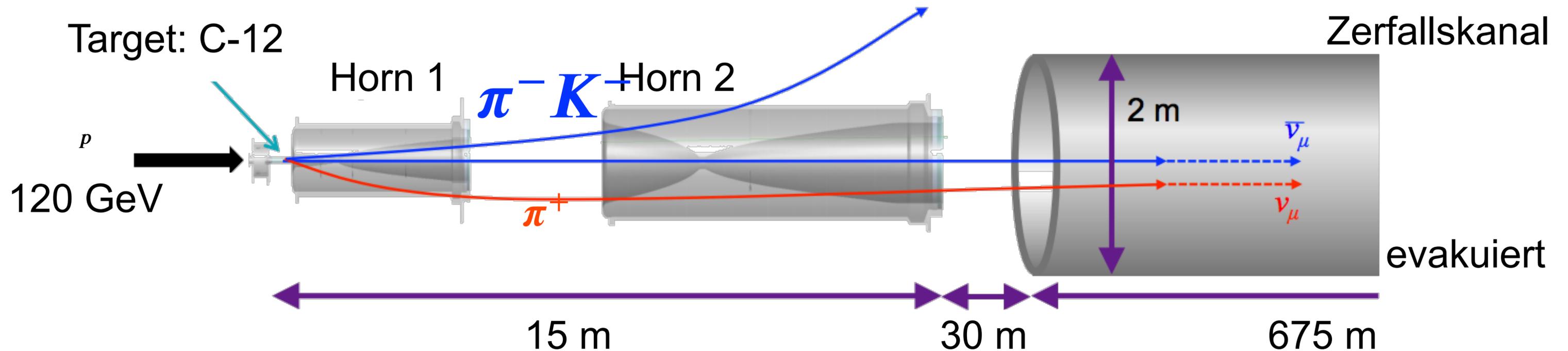
- 5.1 Quarkonium
- 5.2 Farbwechselwirkung in der QCD
- 5.3 Elektroschwache Prozesse
- 5.4 Elektroschwache Vereinheitlichung
- 5.5 Schlüsselexperiment der elektroschwachen Wechselwirkung
- 5.6 Quarkmischung

Entdeckung der neutralen Ströme

- **Neutrale Ströme (NC): eine zentrale Vorhersage des Standardmodells**

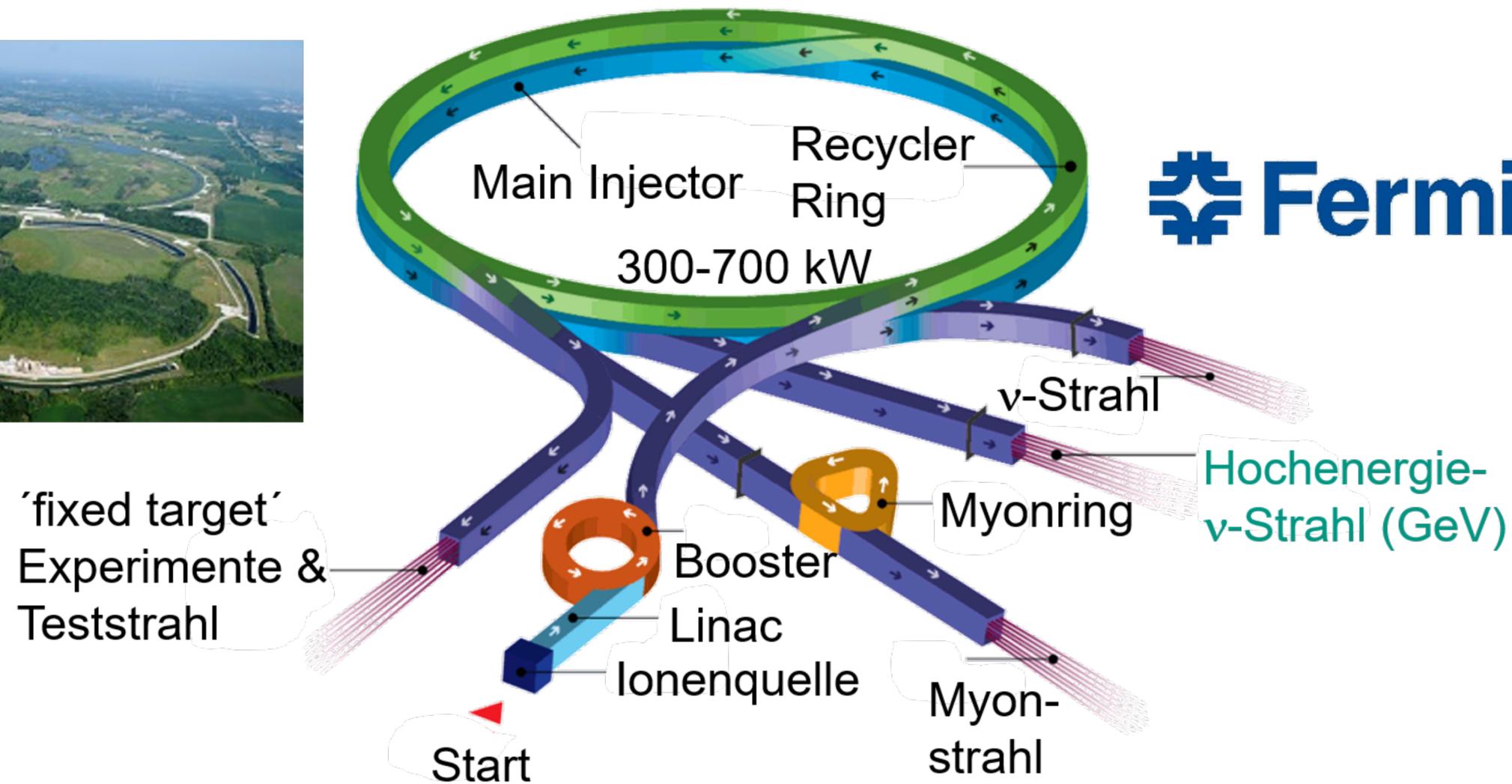
- Erzeugung von **GeV-Neutrinostrahlen**, am CERN

- **magnetische Hörner**: Ladungsselektion, **Zerfallskanal** für $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \bar{\nu}_\mu$
gepulster Betrieb \Rightarrow Strahlpakete



Entdeckung der neutralen Ströme

- **Neutrale Ströme (NC): eine zentrale Vorhersage des Standardmodells**
 - Erzeugung von **GeV-Neutrinostrahlen**, am CERN & anderen p -Beschleunigern*



Gargamelle: Untersuchung von CC und NC

- **Blasenkammer* mit 20 t Freon CF_3Br macht 1973 einen Schlüsselnachweis**

- Neutrino-Target: **20 t Freon** (12 m^3)
Kammer: $l = 4.8 \text{ m}$, $\varnothing = 1.9 \text{ m}$

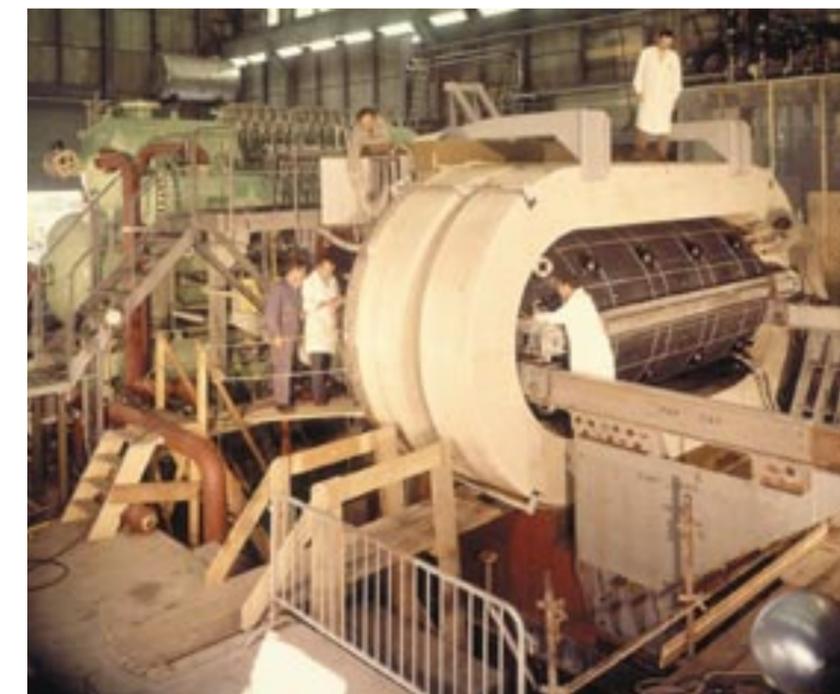
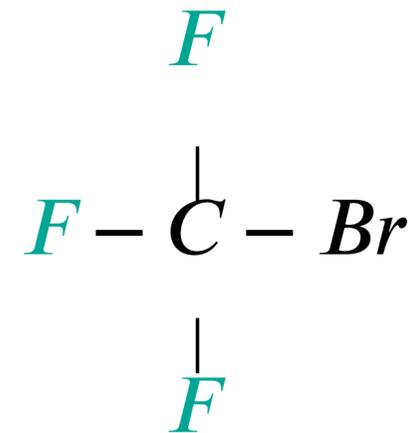
- Betrieb: 1970 - 79

- starkes B -Feld ($B = 2 \text{ T}$)

- **CERN-Neutrinostrahl** (1-10 GeV):

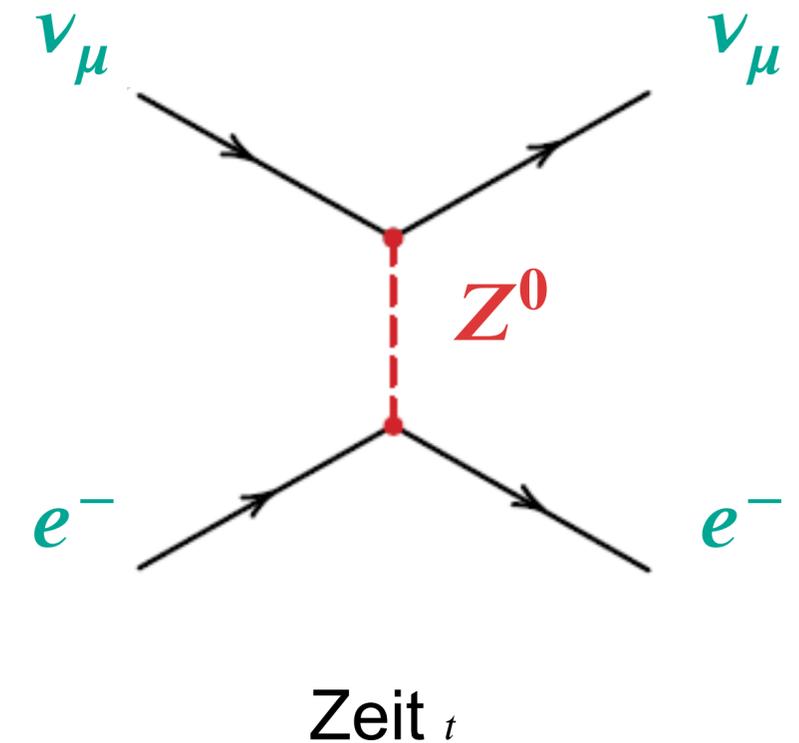
PS (Protonen-Synchrotron):

SPS (Super-Protonen-Synchrotron)



Gargamelle: Untersuchung von CC und NC

- Eine Blasenkammer mit 20 t Freon macht 1973 einen Schlüsselnachweis
 - Suche nach NC-Ereignissen in rein leptonischem Kanal
 - elastische $\nu_\mu - e^-$ Streuung, vermittelt durch Z^0 -Boson
 - Signatur: elektromagnetischer Schauer durch Stoßprozess am e^-
 - Blasenkammer: Aufnahme der Teilchenreaktionen mit Blitzlicht, danach: Entwicklung des Films, visueller Scan des Films

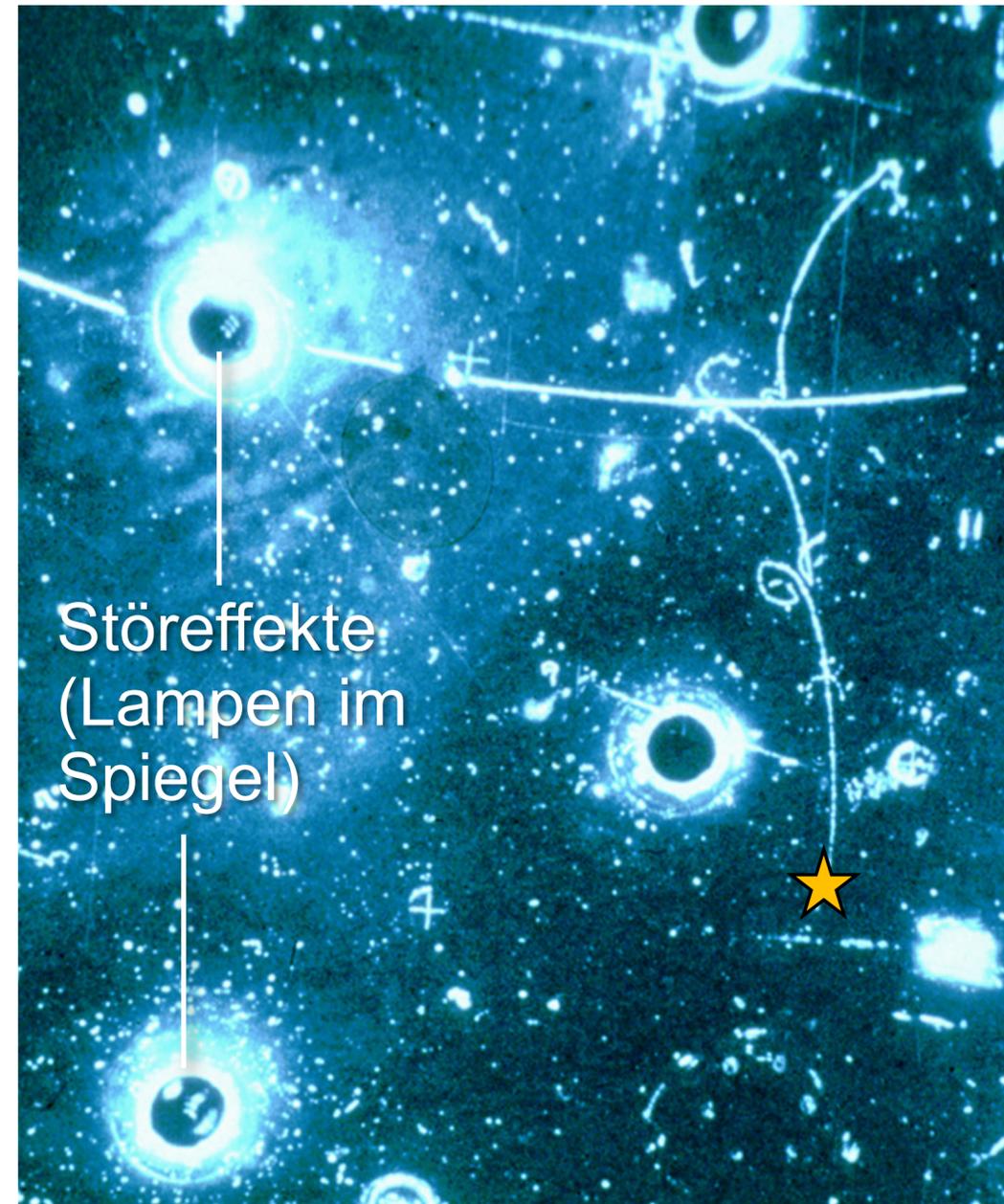


elastische
 $\nu_\mu - e^-$ Streuung

Erster Nachweis neutraler Ströme

- ein historisches Foto: das erste NC - event in Gargamelle

- Analysegruppe in Aachen: visueller Scan eines Teils der ~ 700.000 Bilder
- rein leptonischer Kanal bei $\nu_\mu e^-$ bzw. $\bar{\nu}_\mu e^-$:
 - kleiner Untergrund
 - kleine Signalrate
- 12/1972: Doktorand in Aachen findet erstes NC event!
 - $\Rightarrow NC$ sind physikal. Realität



Erster Nachweis neutraler Ströme

- ein historisches Foto: das erste NC - event in Gargamelle

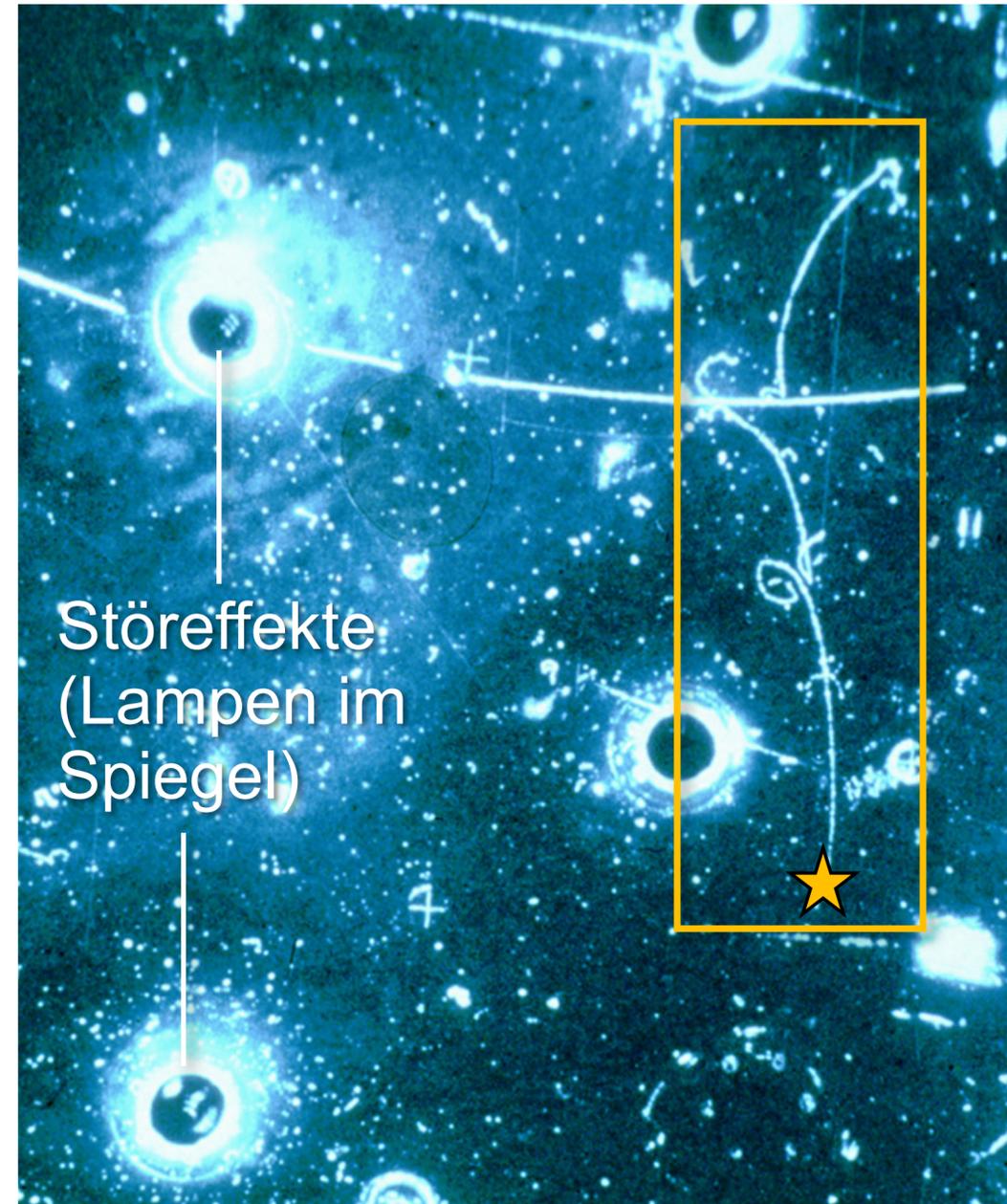
- zweifelsfreier Nachweis von NC - Reaktionen in zwei Kanälen: leptonisch & hadronisch (mehr Untergrund)

- rein leptonischer Kanal bei $\nu_\mu e^-$ bzw. $\bar{\nu}_\mu e^-$:

- Rate abhängig von θ_W
aus nur 1 Ereignis folgt:

$$\sin^2\theta_W = 0,35 \pm 0,25$$

- genaue Vorhersage von **Massen** von W^\pm , Z^0



Neutrale Ströme & θ_W , nachgefragt

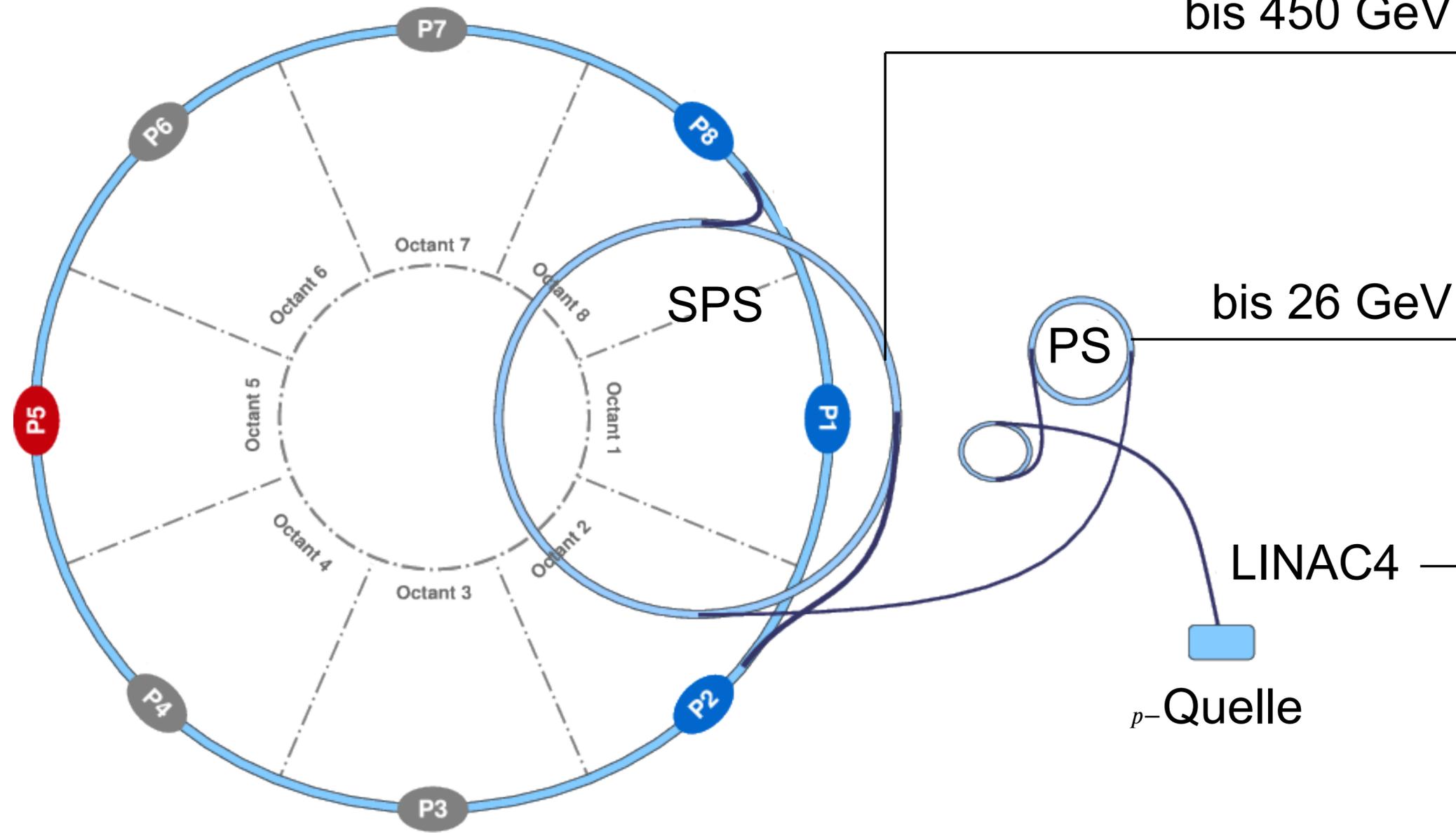
- Welche der nachfolgenden Aussagen zum NC & θ_W stimmt?
 - A) bei der elastischen $\nu_\mu - e^-$ Streuung im multi-GeV Bereich ist die Interferenz mit CC - Reaktionen zu berücksichtigen
 - B) die Größe des Weinberg-Winkels θ_W habe ich in einem meiner Artikel (*'A model of leptons'*) bestimmt, daher der Name
 - C) die Wirkungsquerschnitte von NC und CC nähern sich an in einem Energiebereich, der den Massen von z^0 und w^\pm entspricht
 - D) beim NC Nachweis mit Gargamelle war es wichtig, den Target-Kern Freon zu verwenden, da dieser eine z^0 Resonanz bildet





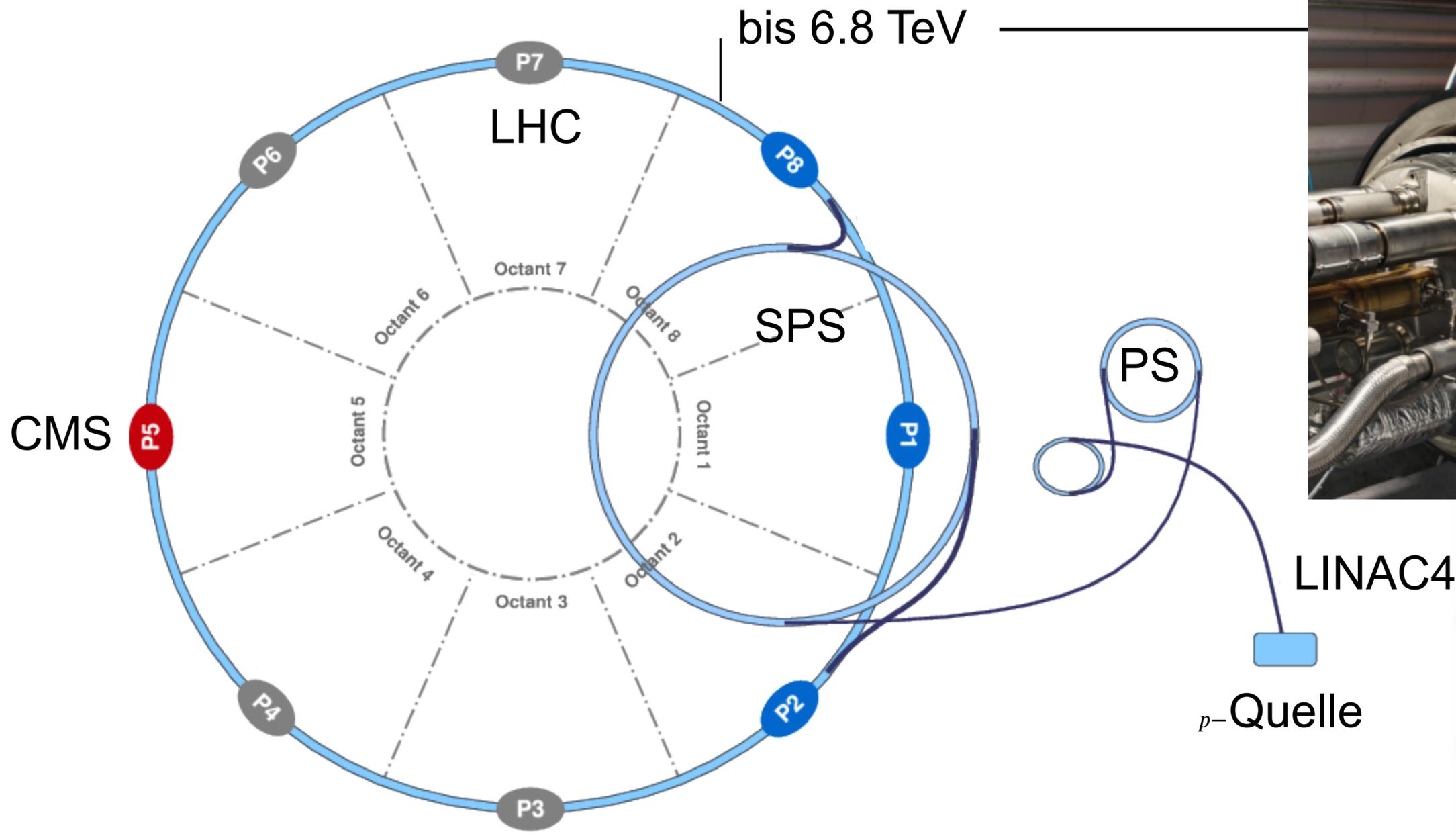
Vorschau: CERN auf dem Weg zu W^\pm , Z^0 h

- System an Protonenbeschleunigern

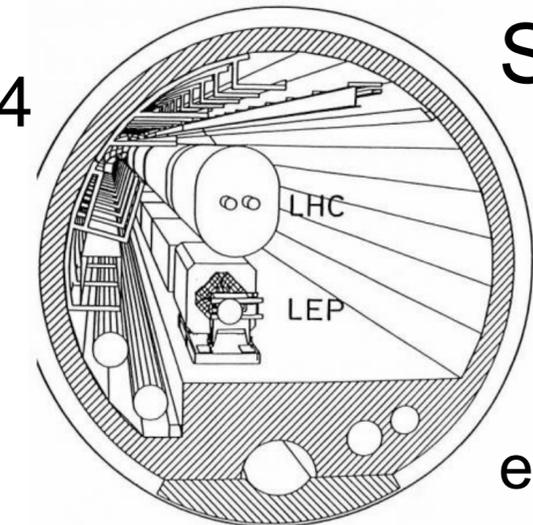


Vorschau: CERN Beschleuniger-Komplex

■ System an Protonenbeschleunigern



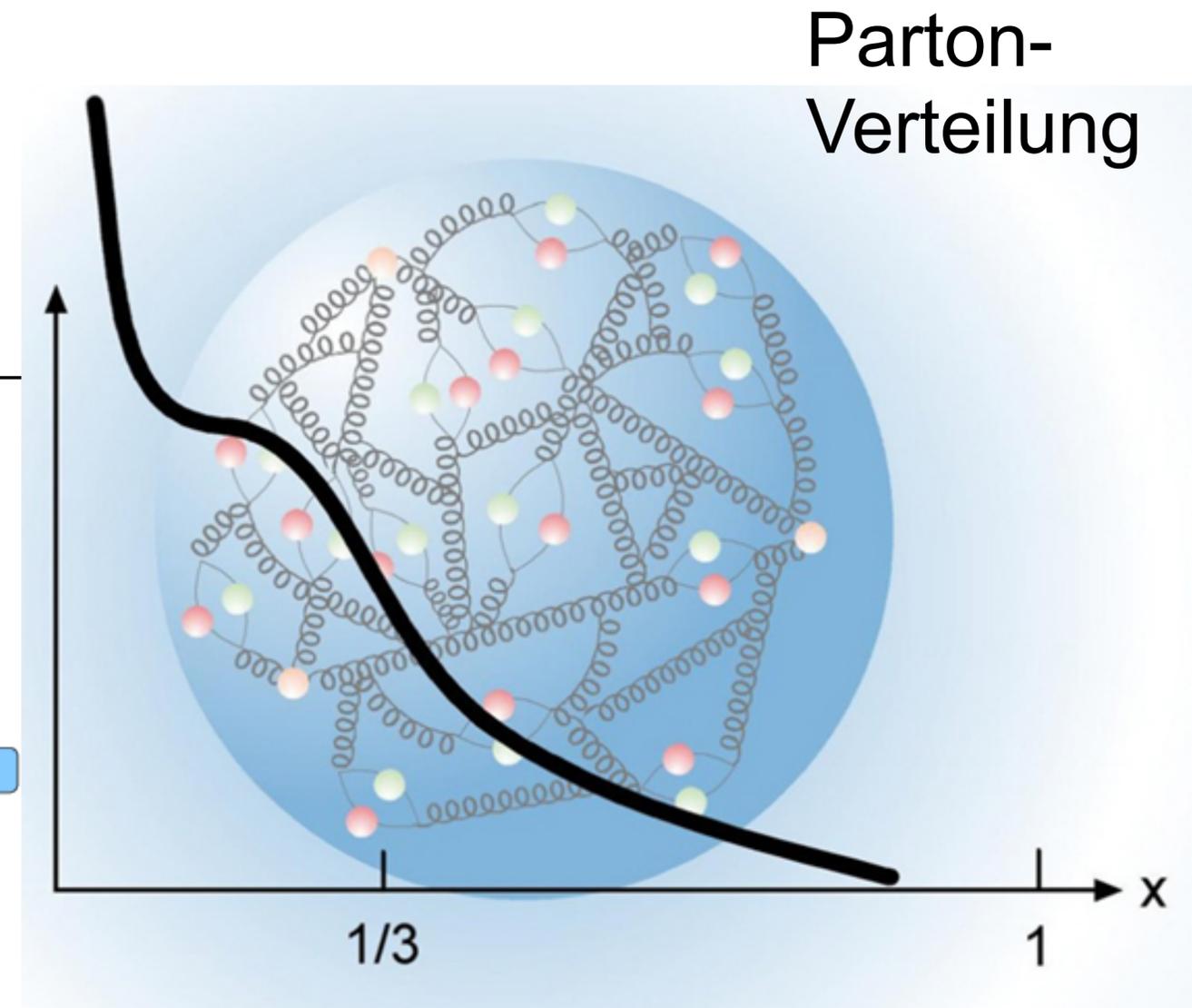
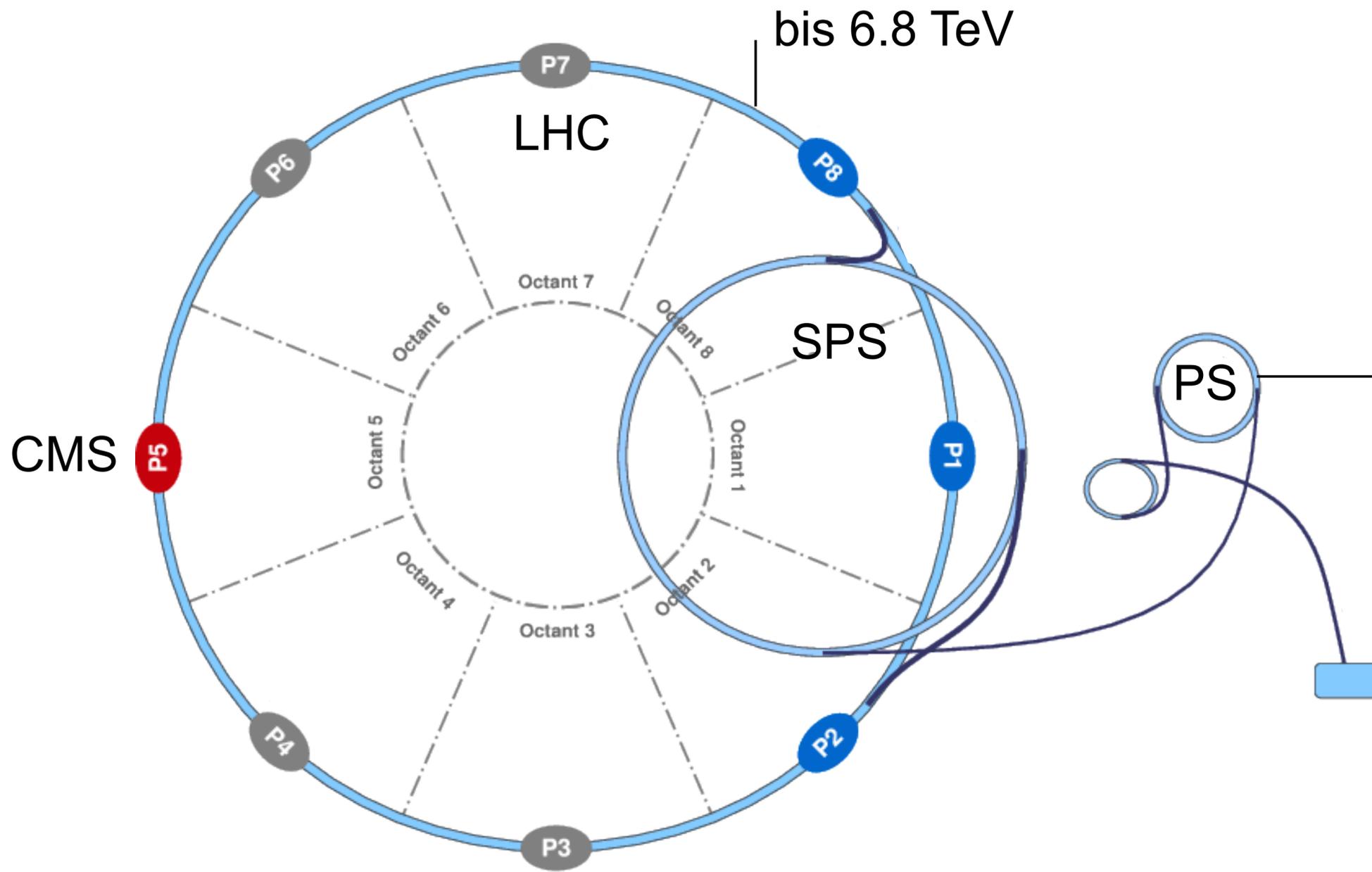
Start: 10.9.2008



erste Ideen 1984

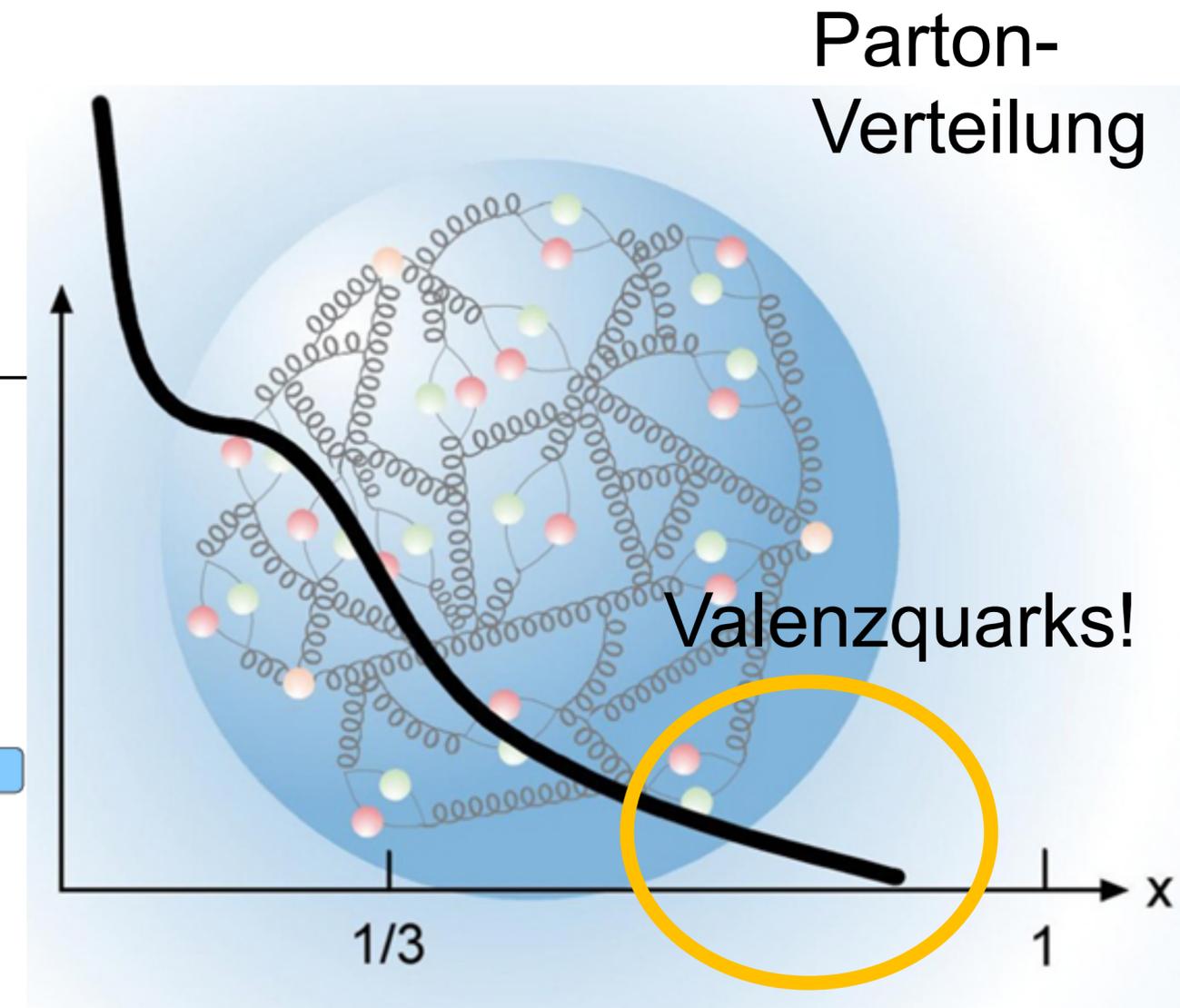
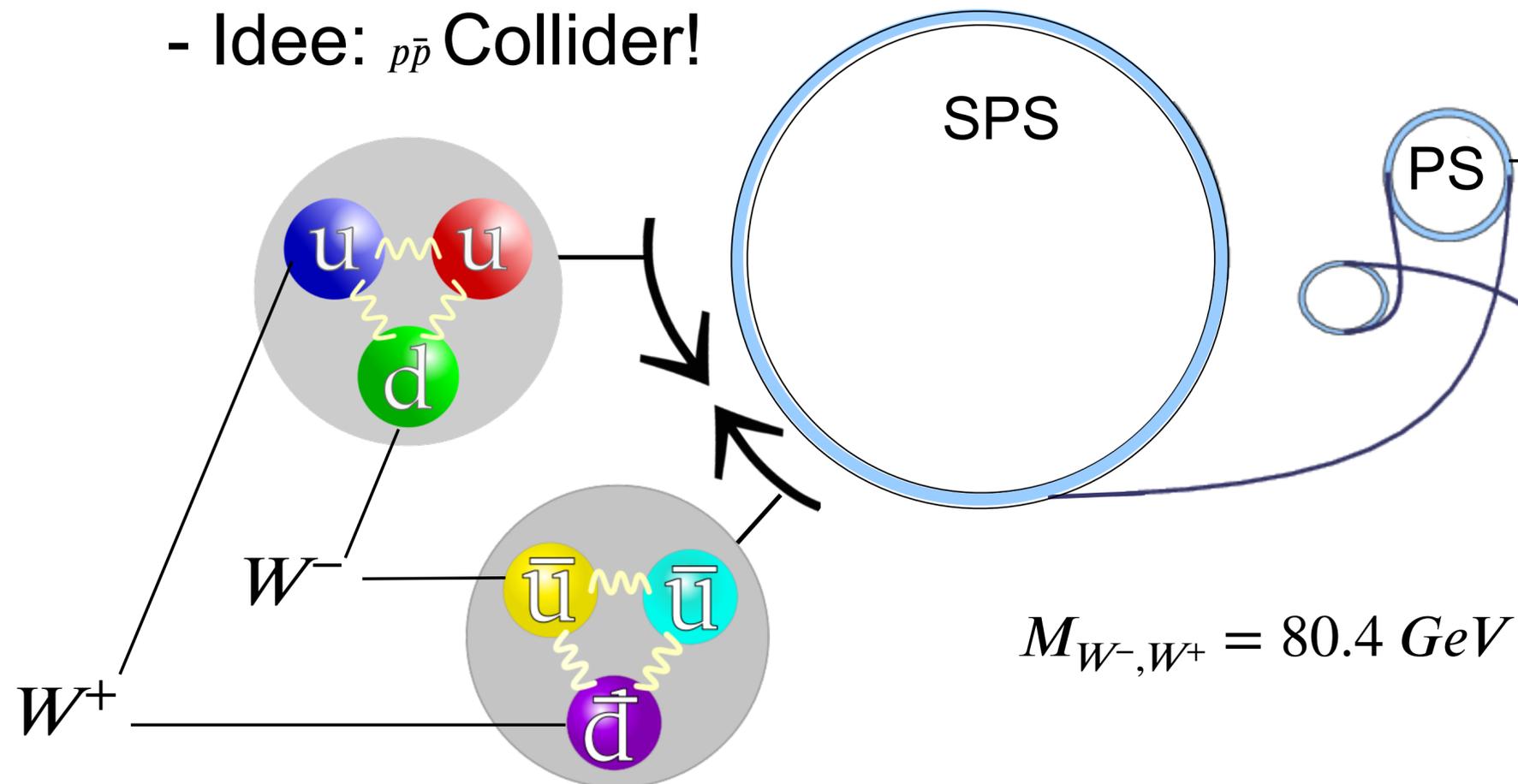
[The Large Hadron Collider | CERN \(home.cern\)](http://home.cern)

- Stoßprozesse zur Erzeugung von neuen Teilchen: **Björken- x** ist entscheidend



CERN Beschleuniger-Komplex: vor dem LHC

- Stoßprozesse zur Erzeugung von neuen Teilchen: **Björken- x** ist entscheidend
 - Suche nach W^\pm und Z^0 bei SPS-Energien von 450 GeV
 - neuer Beschleuniger: dauert sehr lange!
 - Idee: $p\bar{p}$ Collider!



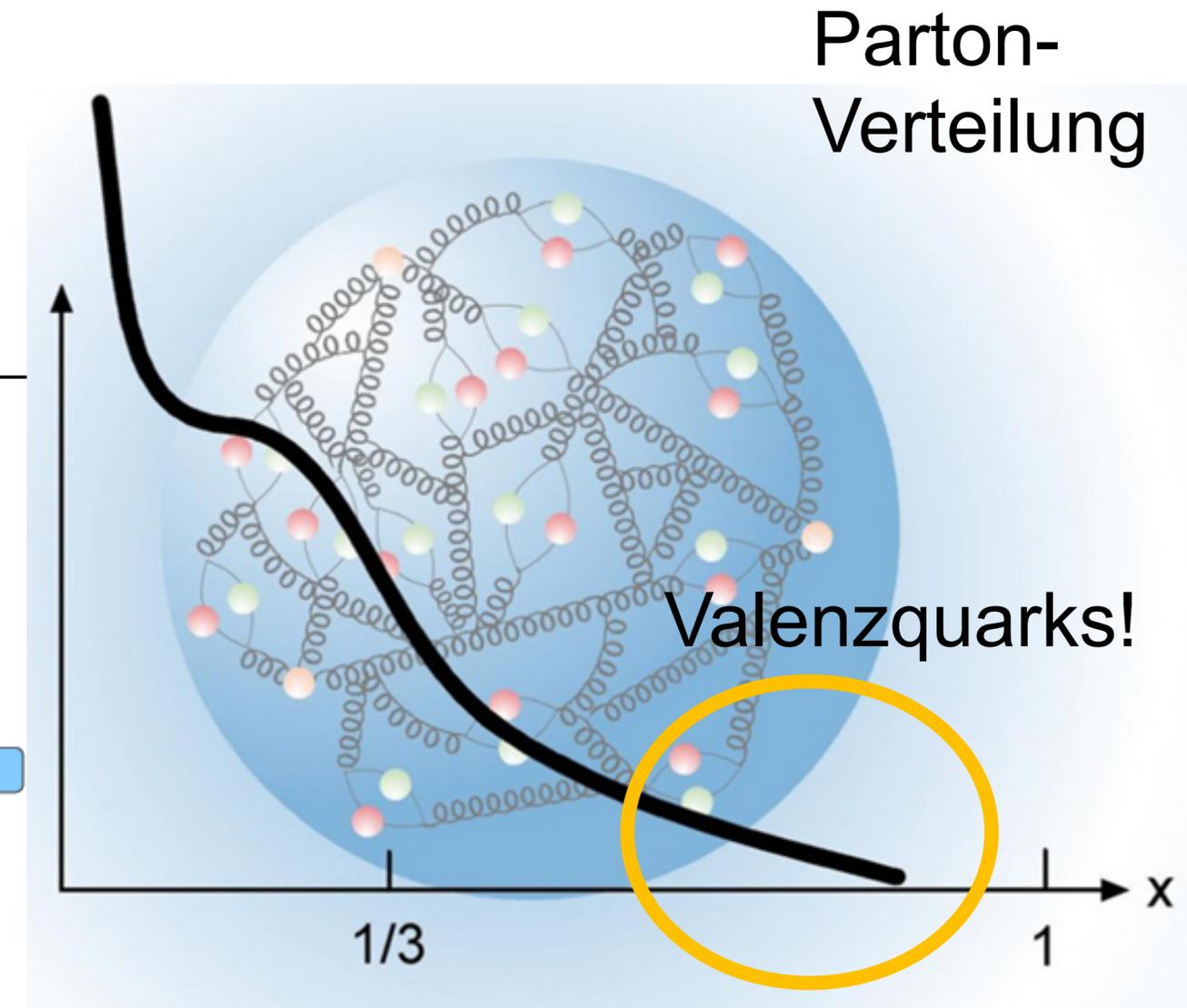
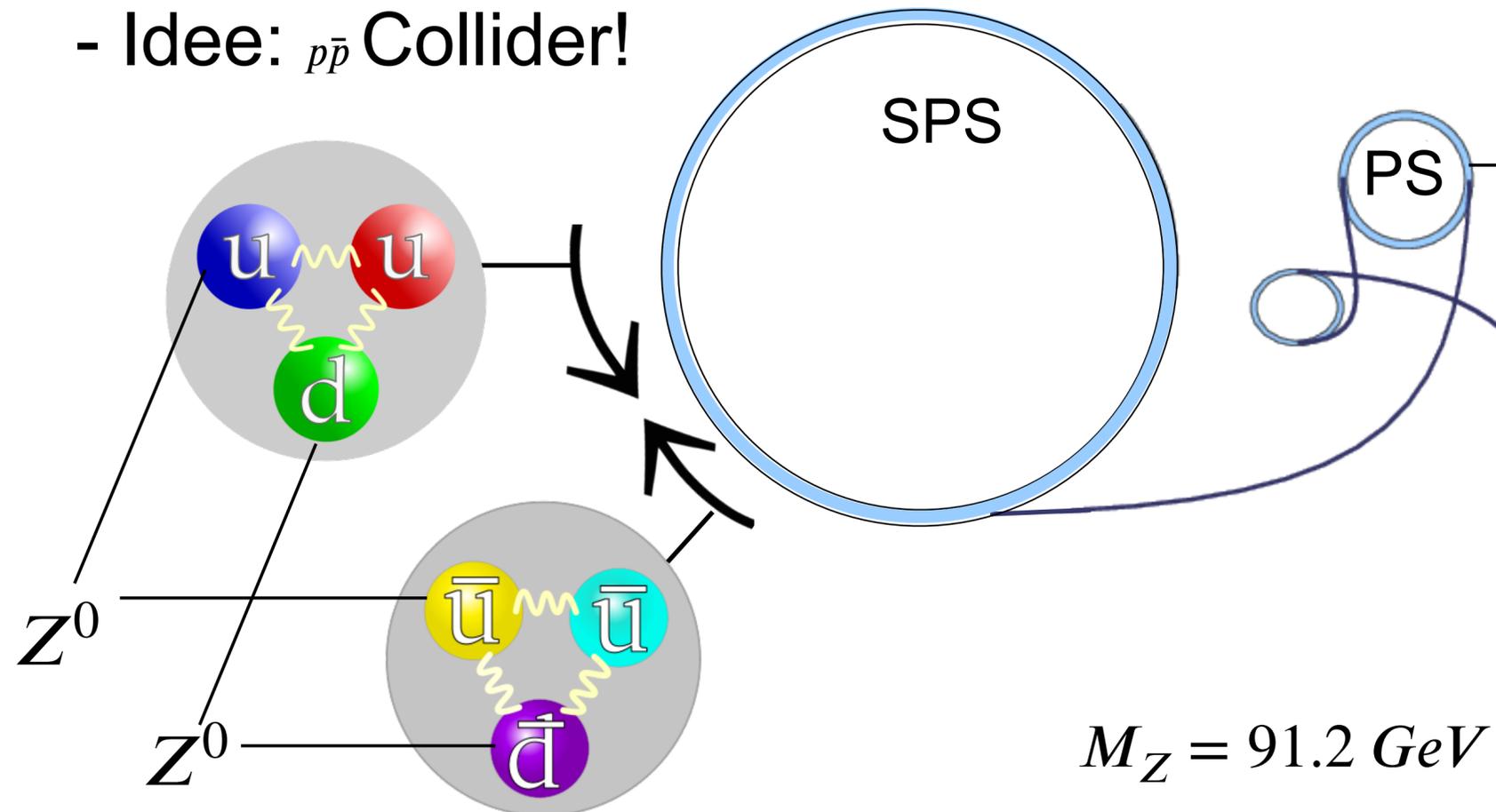
CERN Beschleuniger-Komplex: vor dem LHC

- Stoßprozesse zur Erzeugung von neuen Teilchen: **Björken- x** ist entscheidend

- Suche nach W^\pm und Z^0 bei SPS-Energien von 450 GeV

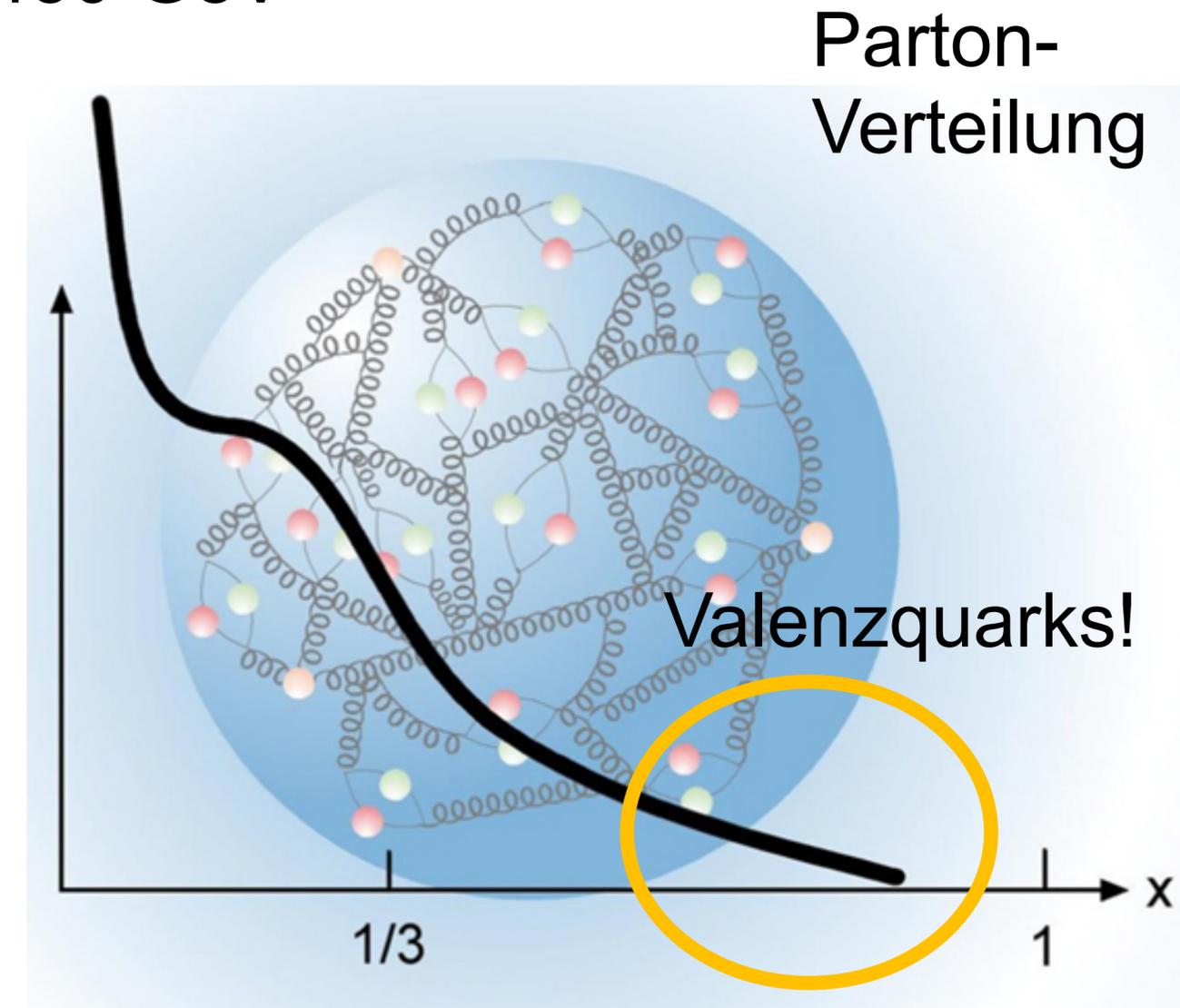
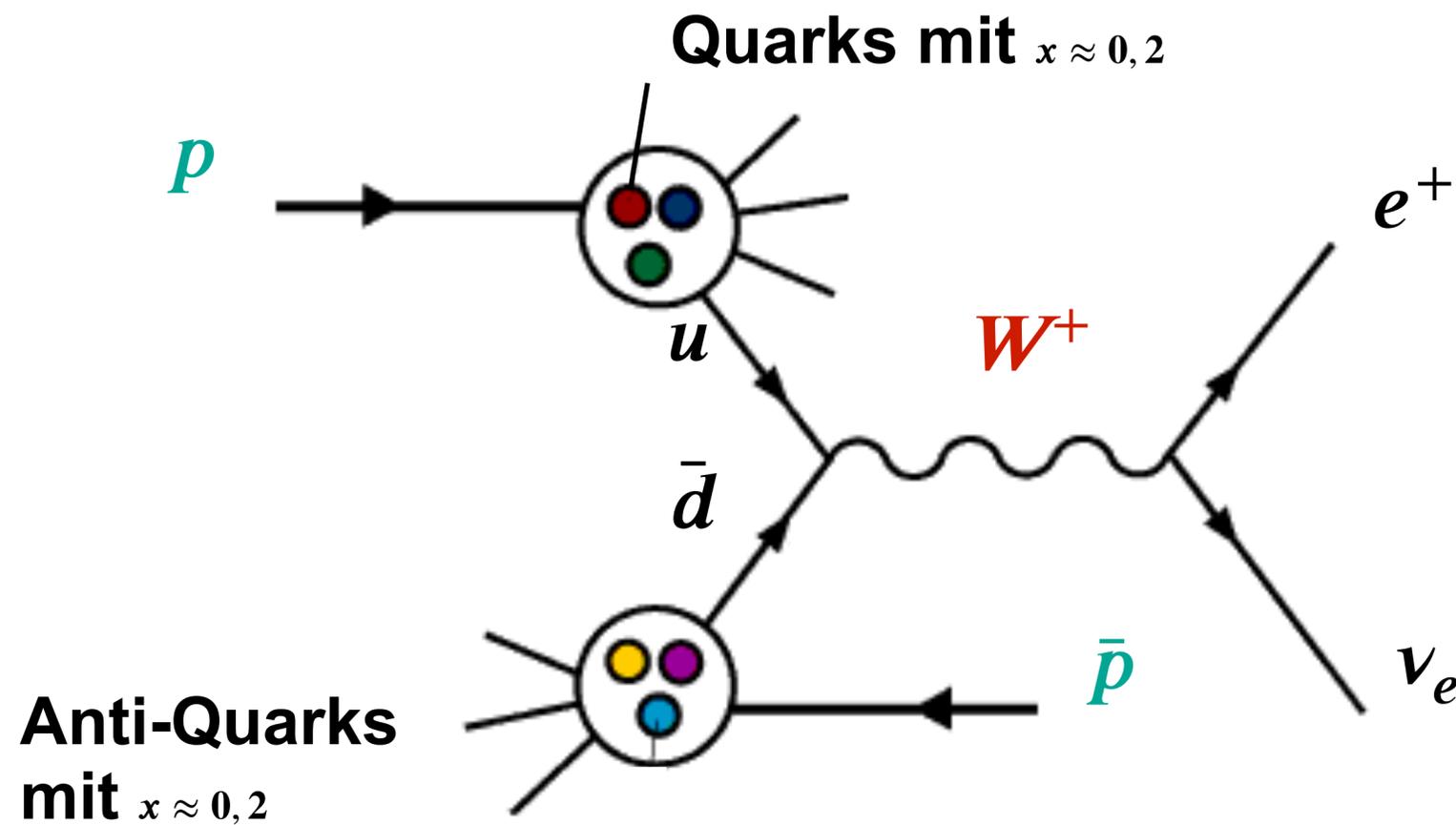
- neuer Beschleuniger: dauert sehr lange!

- Idee: $p\bar{p}$ Collider!



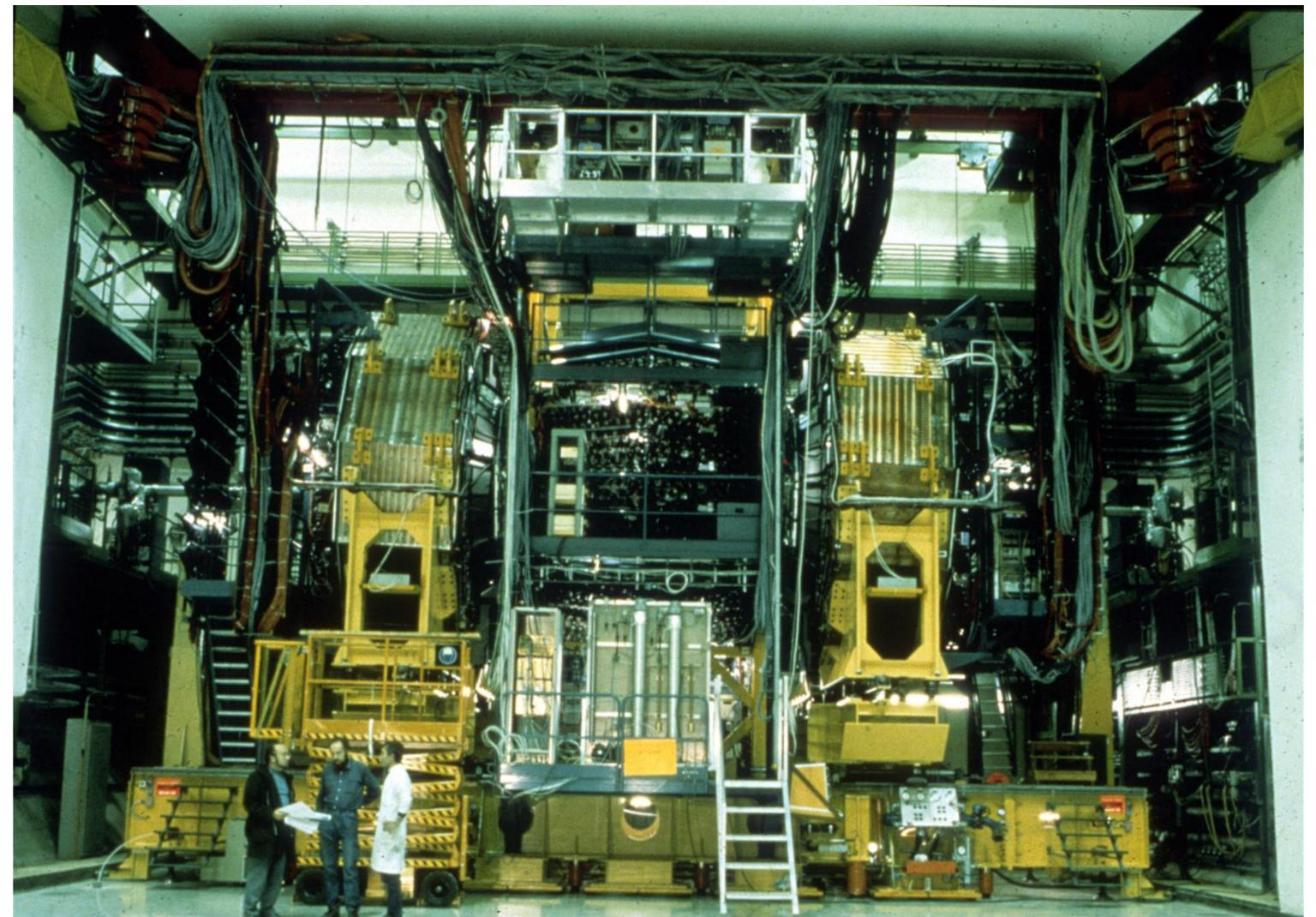
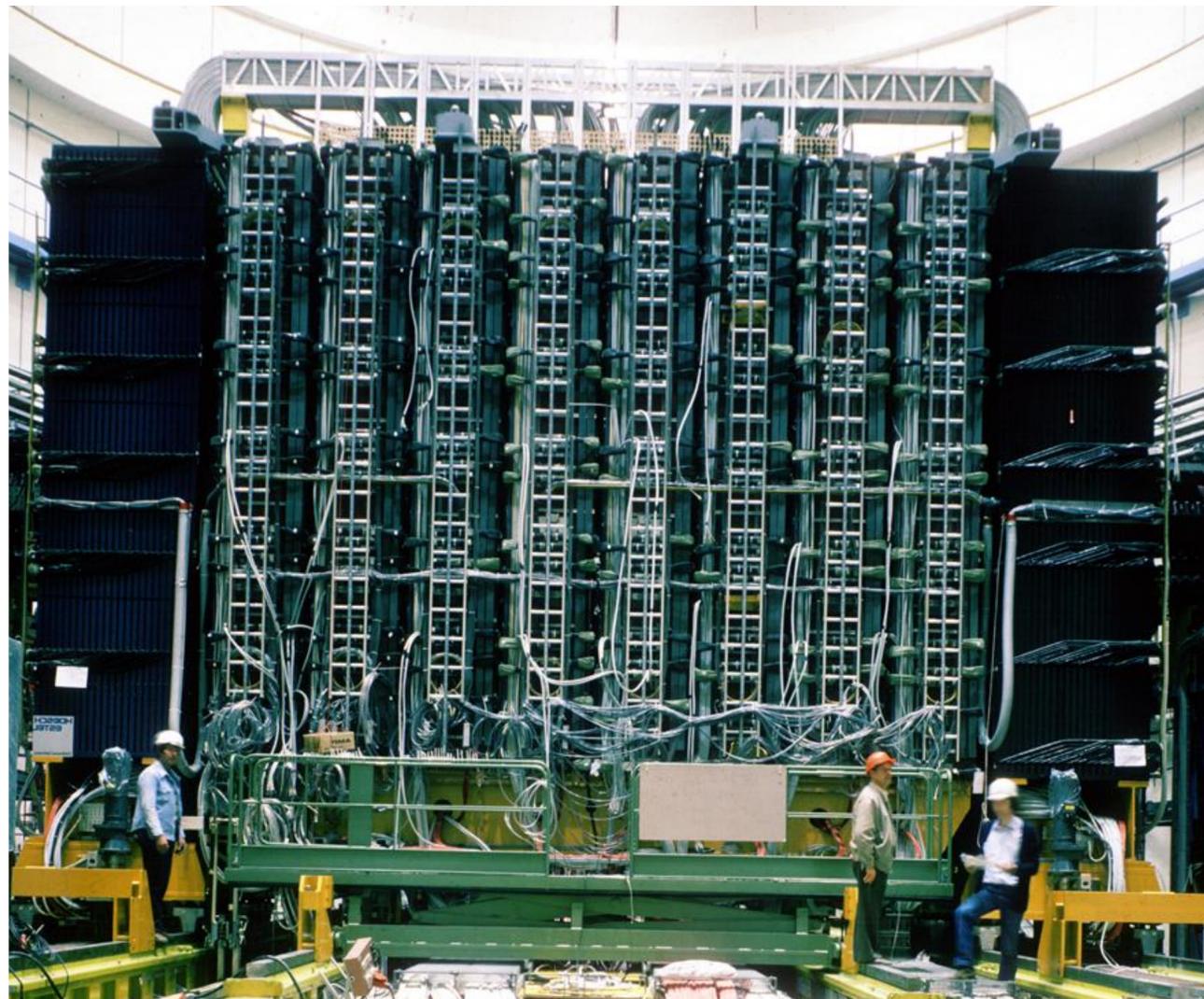
- Stoßprozesse zur Erzeugung von neuen Teilchen: **Björken- x** ist entscheidend

- Suche nach W^\pm und Z^0 bei SPS-Energien von 450 GeV
- Feynman-Diagramm für $p\bar{p}$ - Kollisionen!



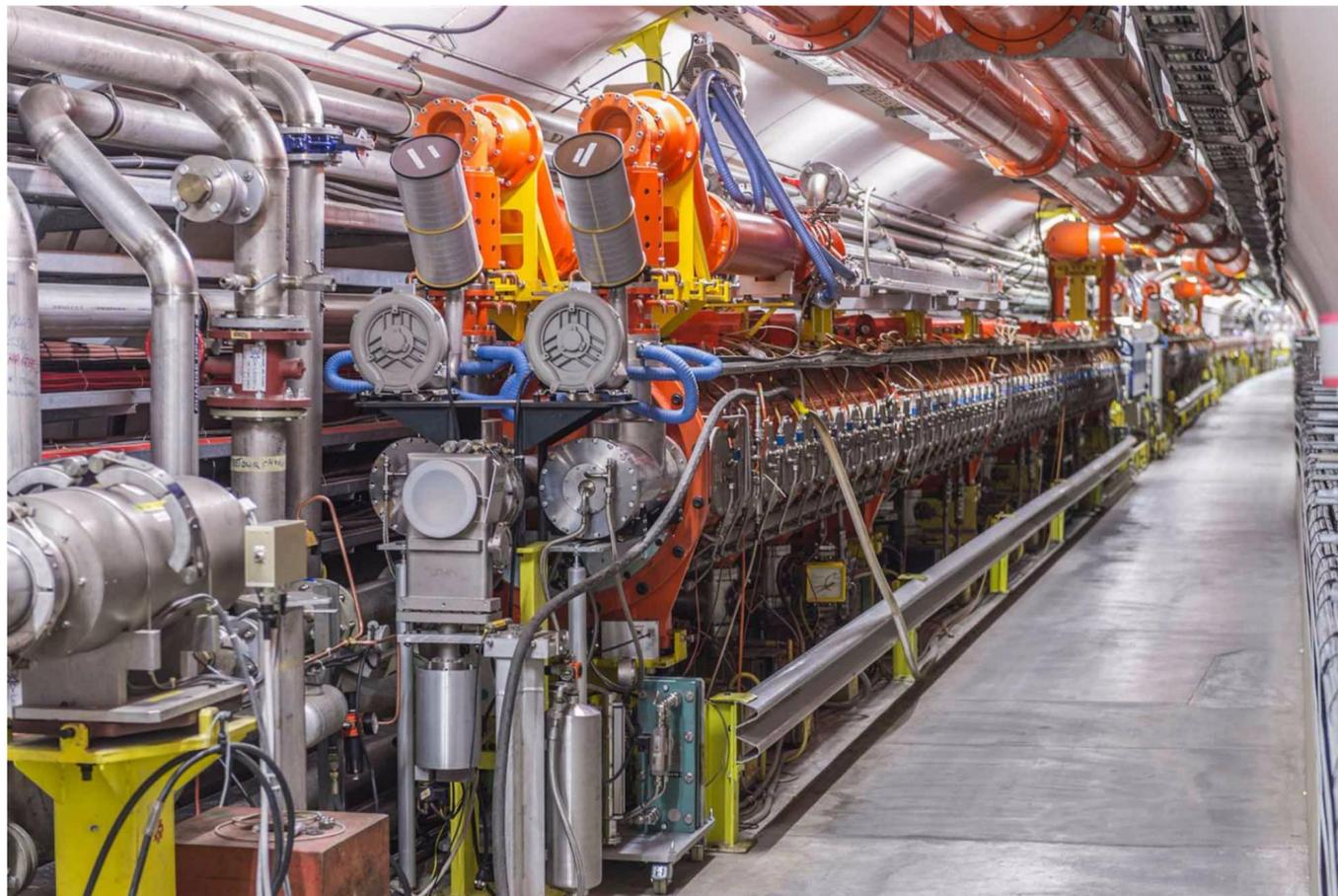
erster Nachweis der Bosonen W^\pm und Z^0

- **CERN: neue große Experimente am SPS mit extrem schneller Elektronik**
 - 2 Experimente* UA1, UA2: großer Raumwinkel zur Suche nach W^\pm und Z^0



erster Nachweis der Bosonen W^\pm und Z^0

- **CERN 1981-91: Superprotonensynchrotron im $p\bar{p}$ Kollisionsbetrieb: $S_{p\bar{p}S}$**
 - $p\bar{p}$ -Kollisionen bei $\sqrt{s} = 400 \text{ GeV}$ zur Erzeugung von reellen W^\pm und Z^0
 - große technische Herausforderung für $S_{p\bar{p}S}$: Erzeugung von \bar{p}

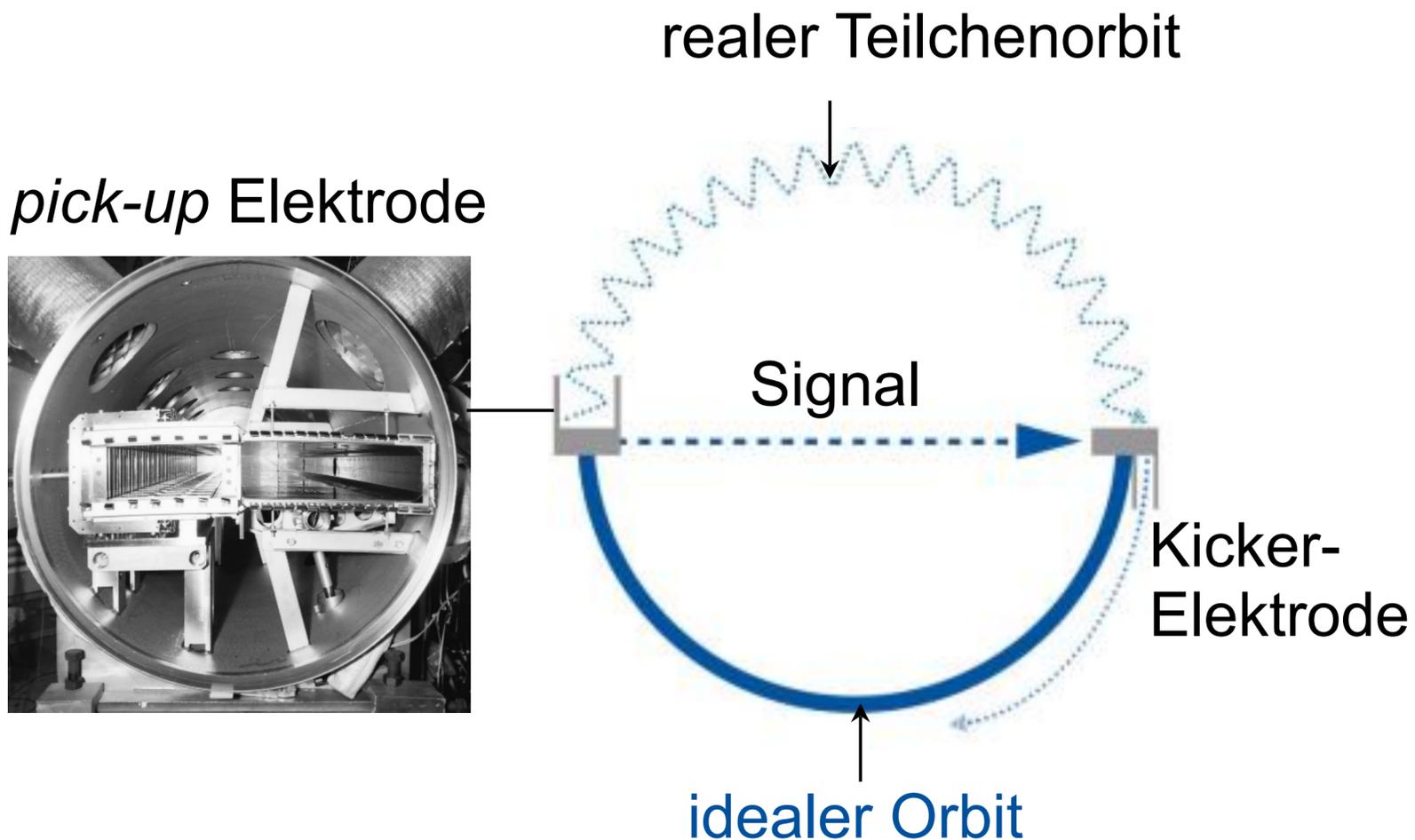


- p -Strahl wird auf Target gelenkt:
Erzeugung von \bar{p}
diese müssen dann impuls-selektiert &
(stochastisch) gekühlt werden
- Methode der **stochastischen Kühlung**
von Simon van der Meer

erster Nachweis der Bosonen W^\pm und Z^0

■ CERN 1981-91: Superprotonensynchrotron im $p\bar{p}$ Kollisionsbetrieb: $S_{p\bar{p}S}$

- große technische Herausforderung für $S_{p\bar{p}S}$: Erzeugung von \bar{p}
- p -Strahl wird auf separates Target gelenkt: dort Erzeugung von \bar{p}



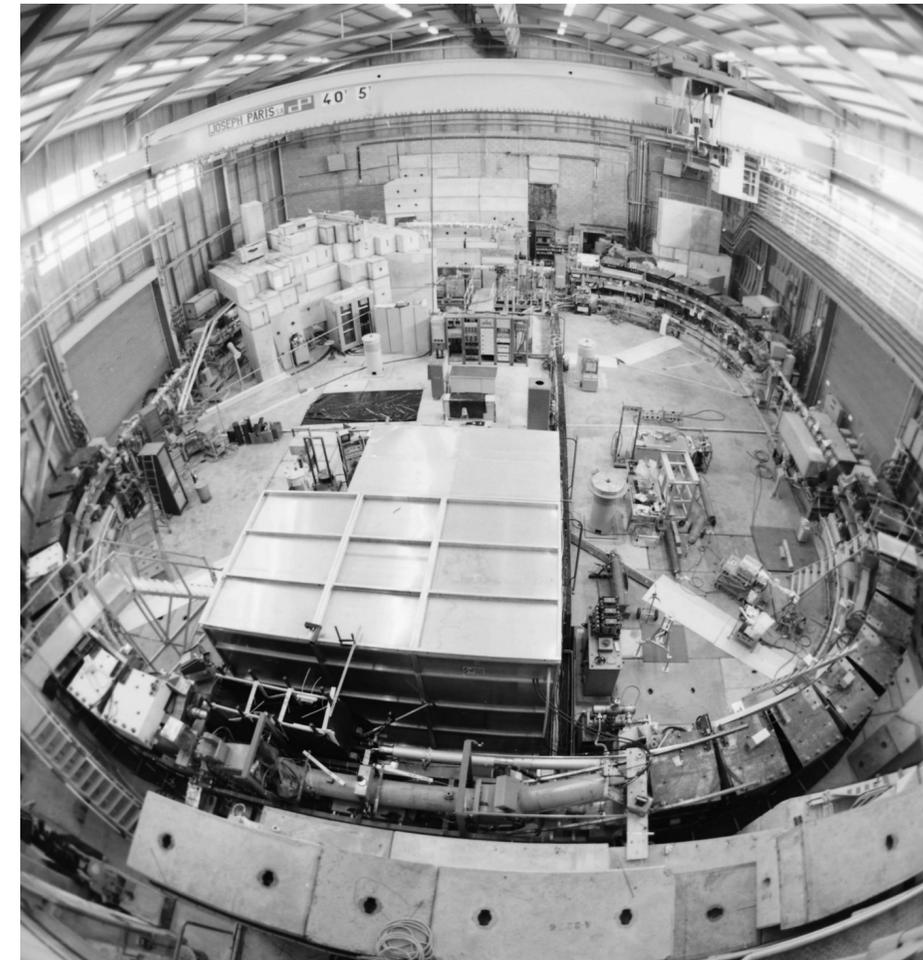
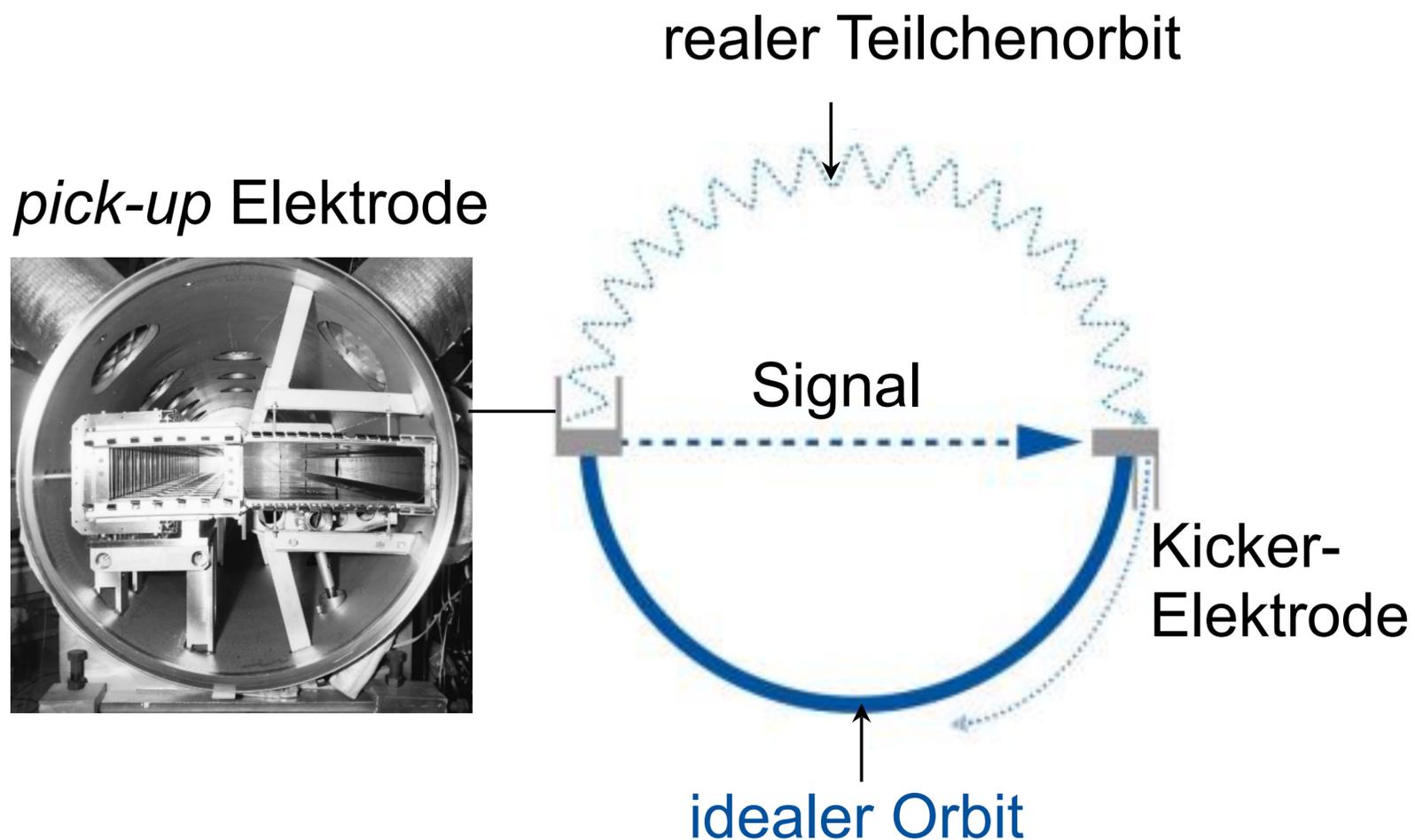
- erzeugte \bar{p} müssen impuls-selektiert & (stochastisch) gekühlt werden

- Methode der **stochastischen Kühlung** entwickelt von Simon van der Meer: Teilchen werden über Zeiträume von $min.$ gekühlt über Kicker-Elektrode



erster Nachweis der Bosonen W^\pm und Z^0

- **CERN 1981-91: Superprotonensynchrotron im $p\bar{p}$ Kollisionsbetrieb: $Sp\bar{p}S$**
 - große technische Herausforderung für $Sp\bar{p}S$: Erzeugung von \bar{p}
 - p -Strahl wird auf separates Target gelenkt: dort Erzeugung von \bar{p}

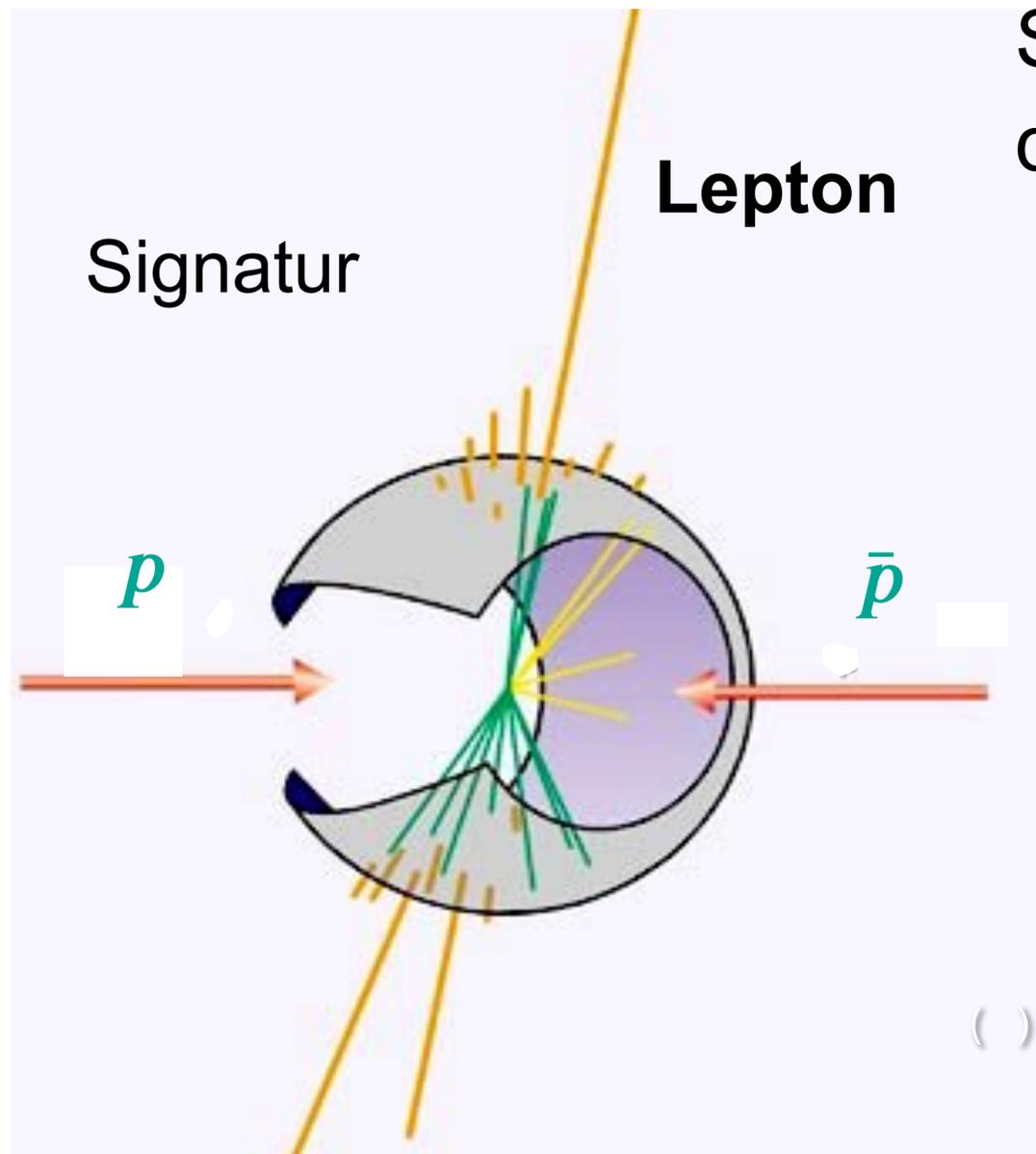


1977: Testring
ICE* am CERN



erster Nachweis der Bosonen W^\pm und Z^0

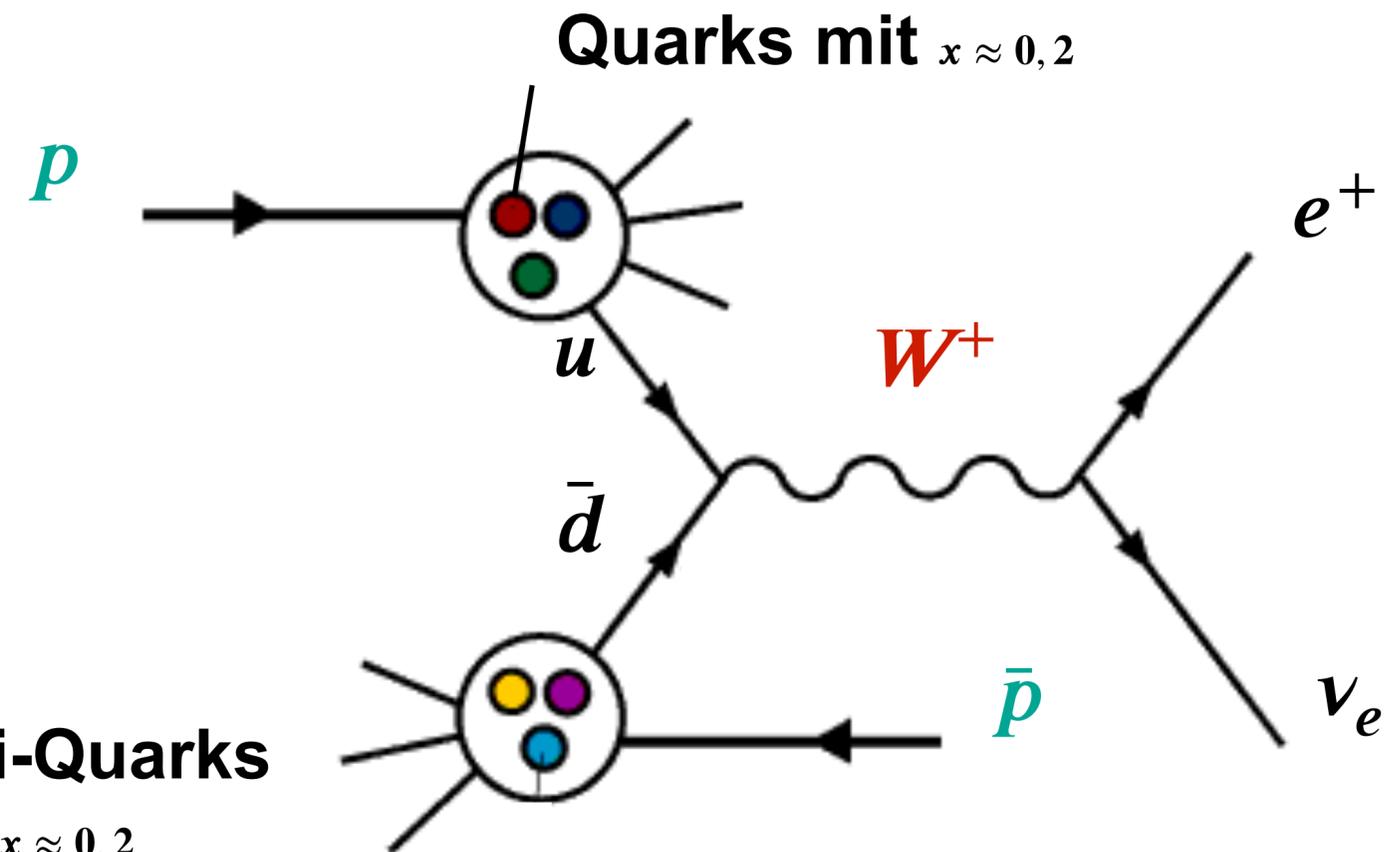
- Erzeugung von W^\pm und Z^0 über 'Drell-Yan'-Prozess (= $q\bar{q}$ -Annihilation)



Signatur W^\pm - Zerfall: hochenergetisches Lepton ℓ^\pm , dabei fehlende Transversalenergie (ν bzw. $\bar{\nu}$)

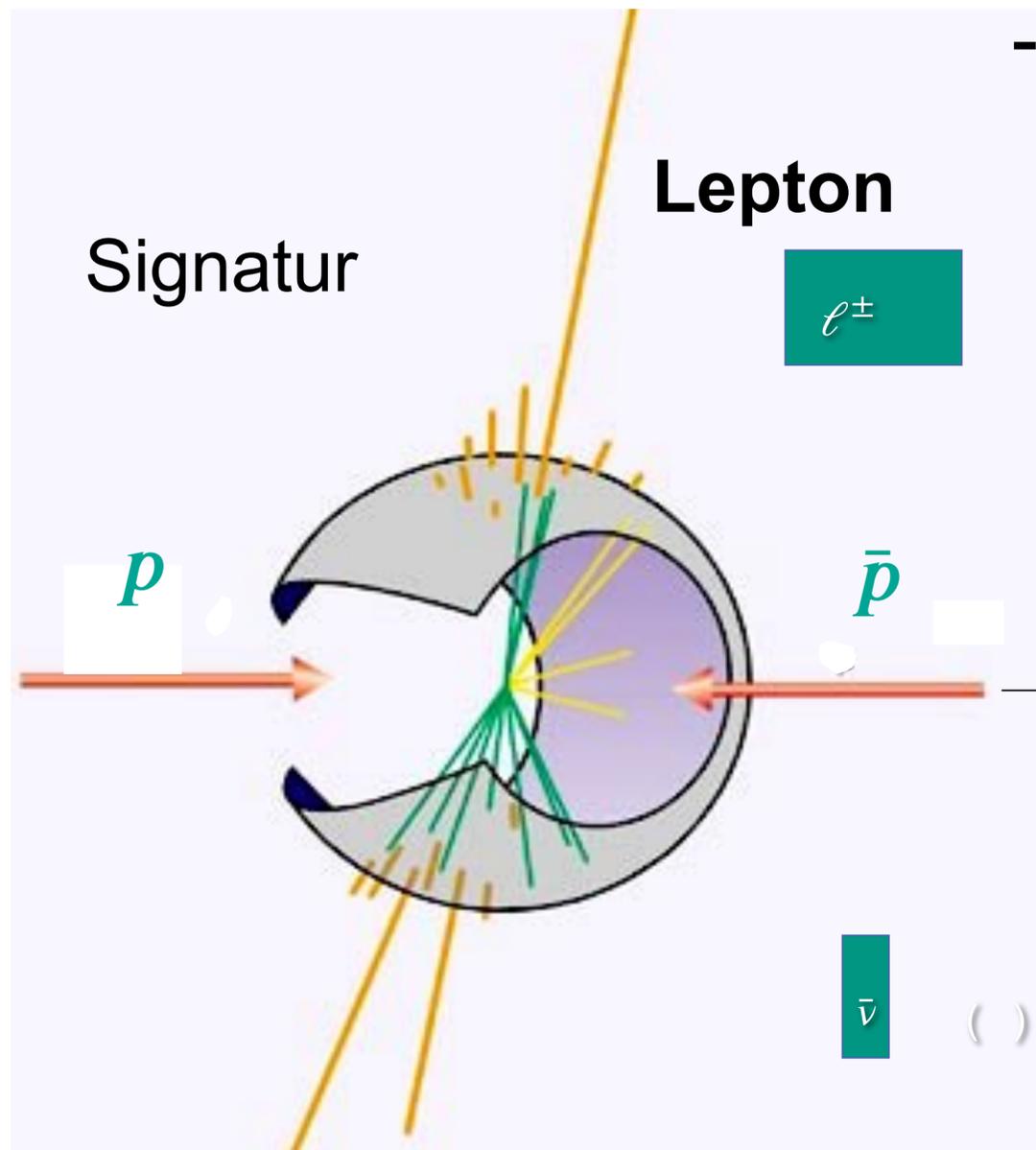
$$W^\pm \rightarrow \ell^\pm + \bar{\nu}$$

Anti-Quarks mit $x \approx 0,2$



erster Nachweis der Bosonen W^\pm und Z^0

- Erzeugung von W^\pm und Z^0 über 'Drell-Yan'-Prozess (= $q\bar{q}$ -Annihilation)



- Signatur W^\pm - Zerfall:

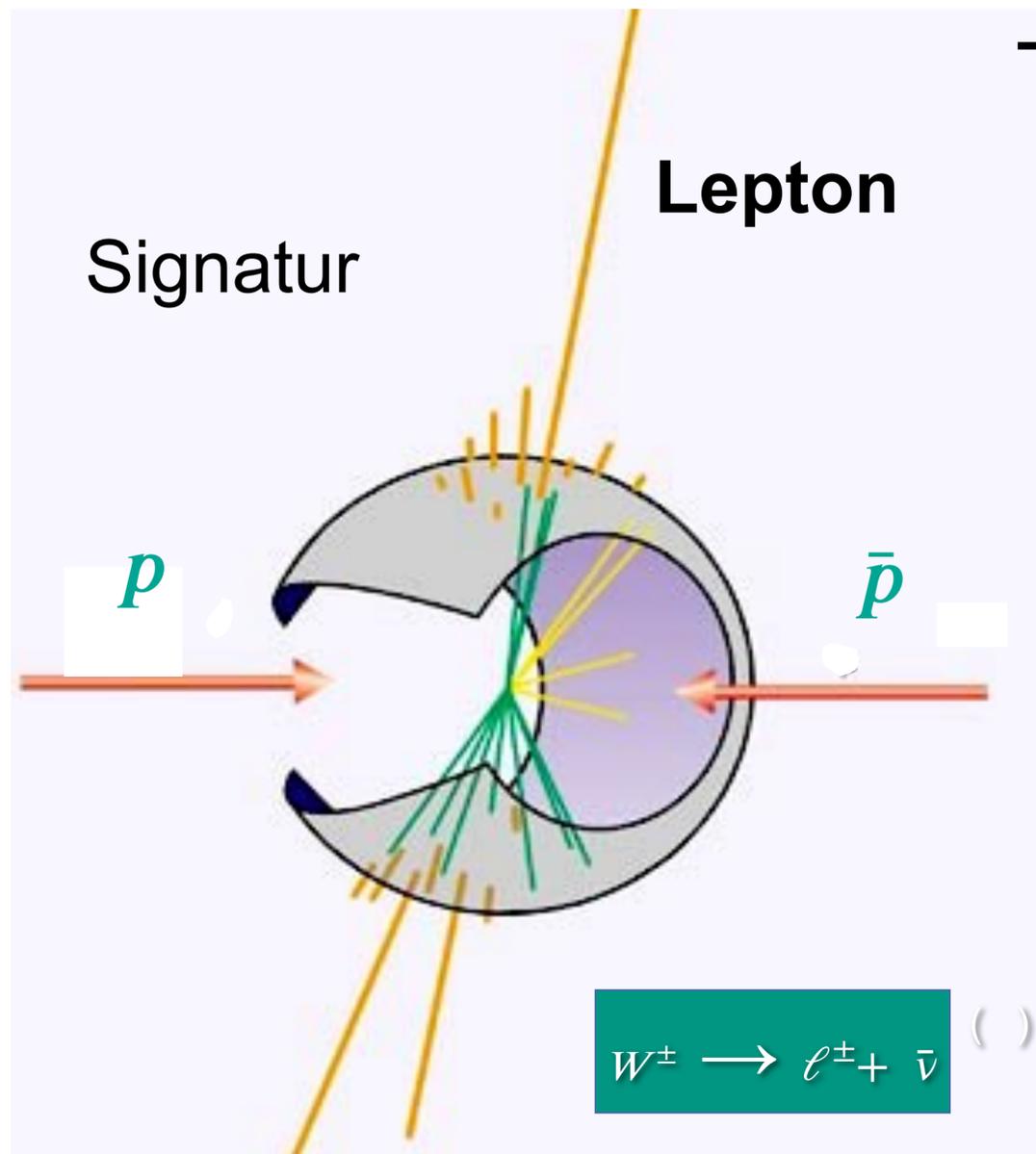
geladenes Lepton ($l = e, \mu$):
saubere Signatur dank **isolierter Spur**,
keine hadronischen Jets

$p\bar{p}$ - **Kollision: kein Transversalimpuls**

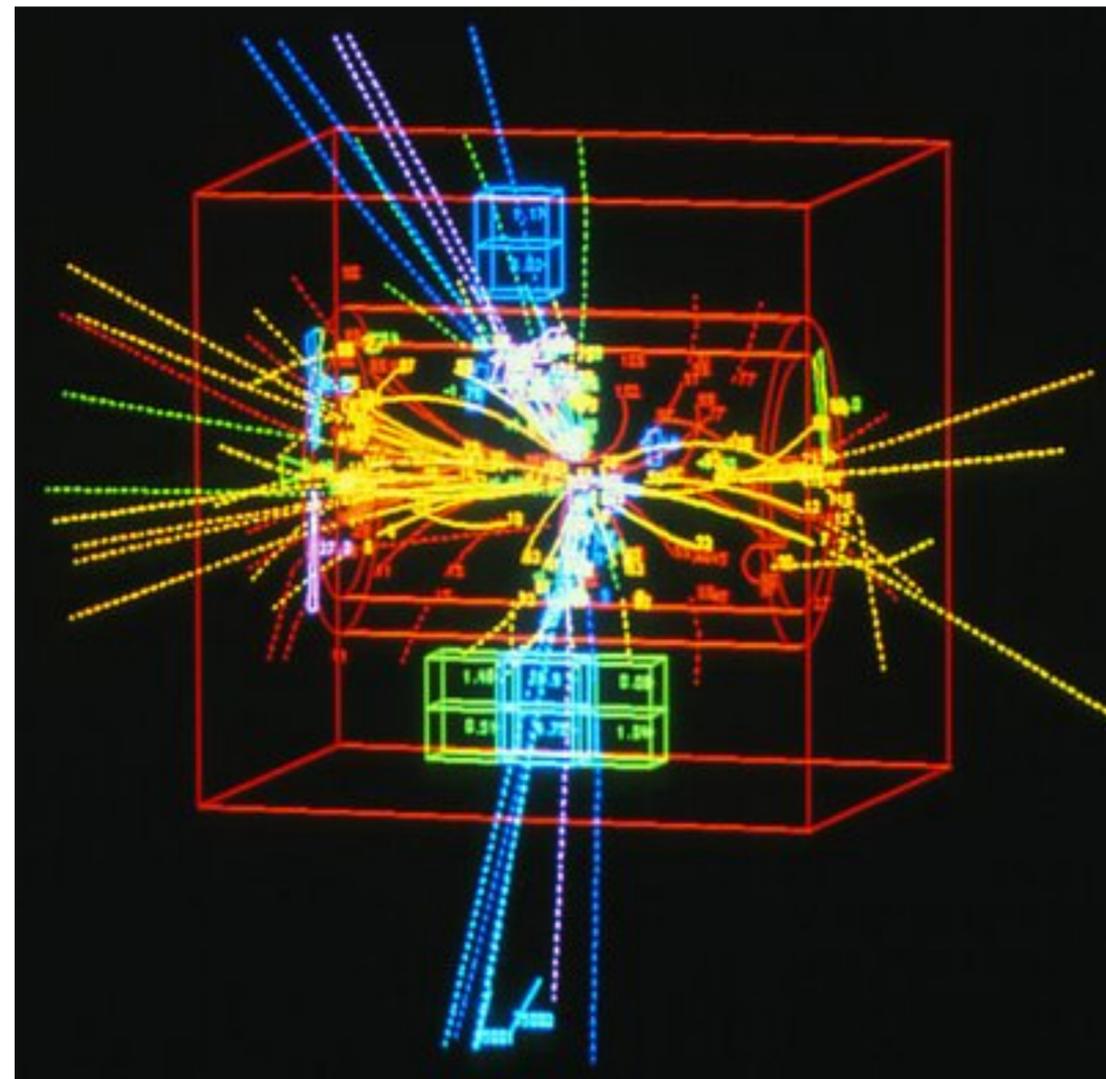
Neutrino entkommt ohne Wechselwirkung:
fehlender Transversalimpuls

erster Nachweis der Bosonen W^\pm und Z^0

- W^\pm und Z^0 Ereignisse analysiert im Hinblick auf z.B. Transversalenergie



- Signatur w^\pm - Zerfall:



Ereignis im UA1 Detektor

erster Nachweis der Bosonen W^\pm und Z^0

■ W^\pm – Bosonen: Übersicht zu leptonicen & hadronischen Zerfällen

- Signatur W^\pm – Zerfall:

W^+ Zerfall in jede Leptonfamilie identisch
(**Lepton-Universalität**):

leptonisch

$$W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$$

$$W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$W^+ \rightarrow \tau^+ + \nu_\tau$$



3 Leptondoublets
je $(10,80 \pm 0,09)\%$

$3/9 = 1/3$
leptonisch



1 : 1 : 1 : 3 : 3



hadronisch
 $6/9 = 2/3$

hadronisch

$$W^+ \rightarrow q + \bar{q}$$

2 Flavour-Doublets*: $\bar{u}d, \bar{c}s$
jeweils 3 Farben



$(67,60 \pm 0,27)\%$

*im 3. Dublett ist t zu schwer Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

■ Erzeugung und Nachweis des Z^0 Bosons

- wiederum Drell-Yan Prozess mit Valenz-Quarks erforderlich: $u\bar{u}, d\bar{d}$

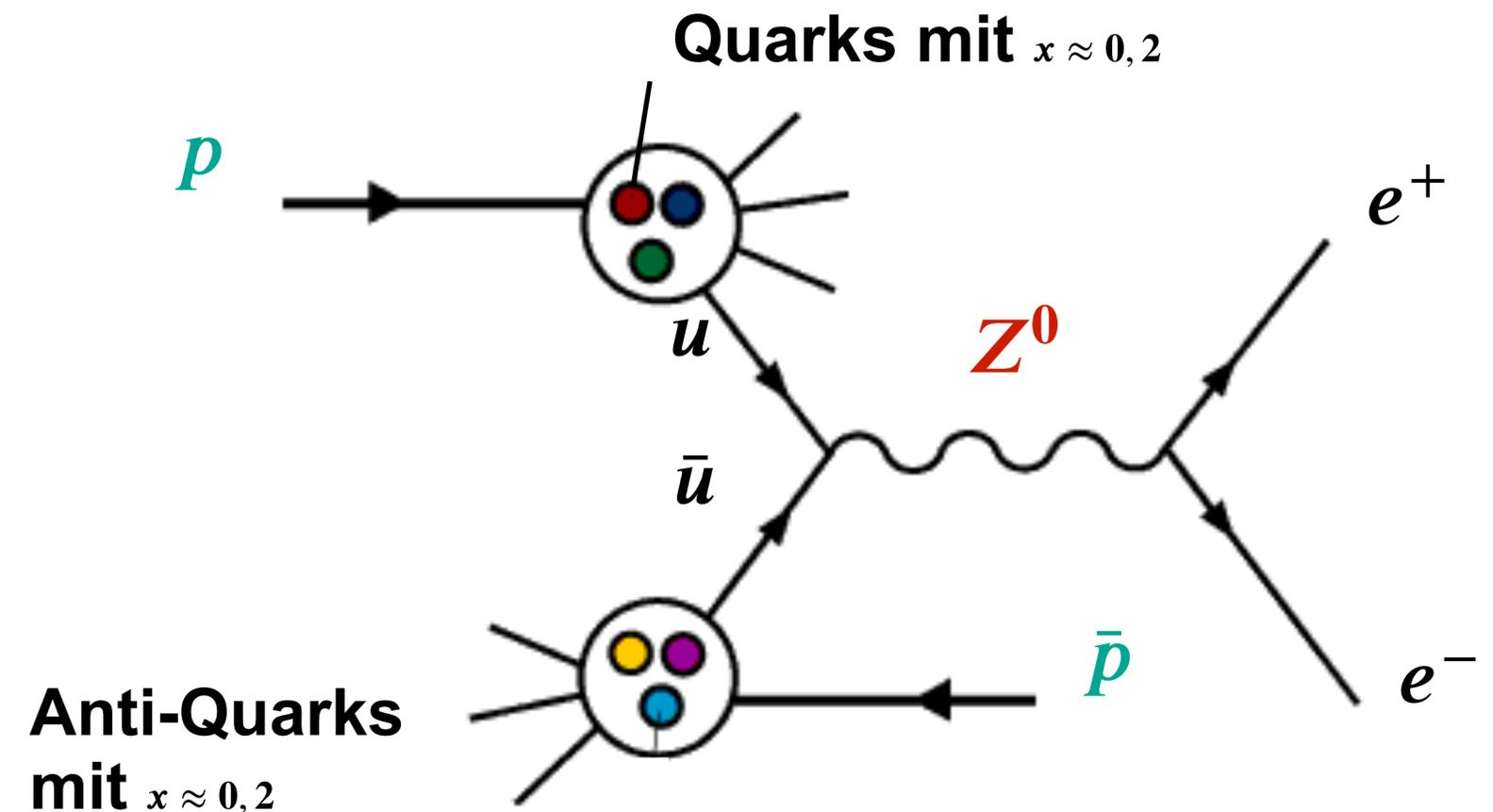
- Signatur:

leptonischer Zerfall

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

- 2 hochenergetische Leptonen mit Energie $E \sim 45 \text{ GeV}$

- balancierte Transversalimpulse



erster Nachweis der Bosonen W^\pm und Z^0

■ Erzeugung und Nachweis des Z^0 Bosons

- wiederum Drell-Yan Prozess mit Valenz-Quarks erforderlich: $u\bar{u}, d\bar{d}$

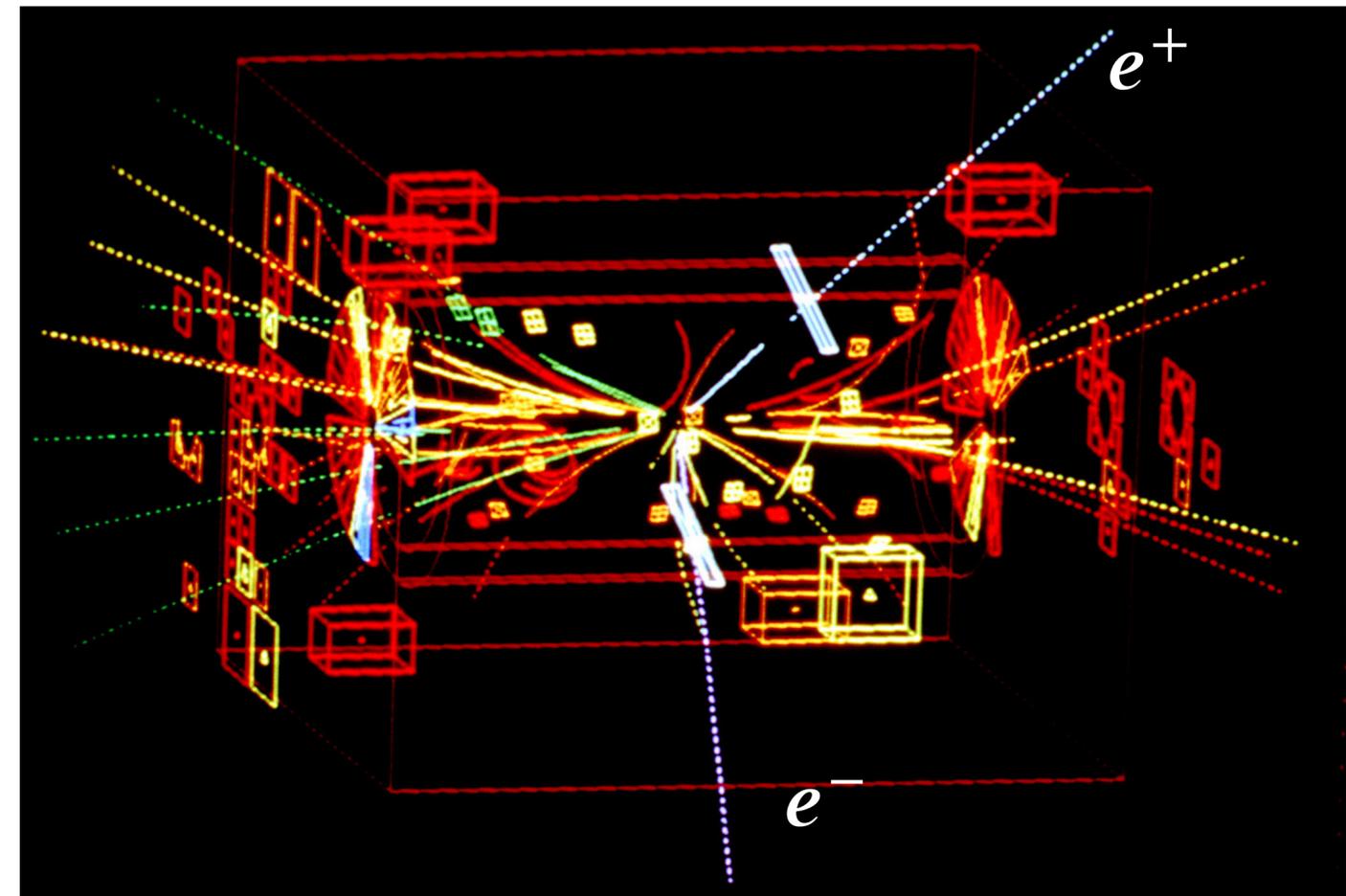
- Signatur:

leptonischer Zerfall

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

- 2 hochenergetische Leptonen
mit Energie $E \sim 45 \text{ GeV}$

- balancierte Transversal-
impulse

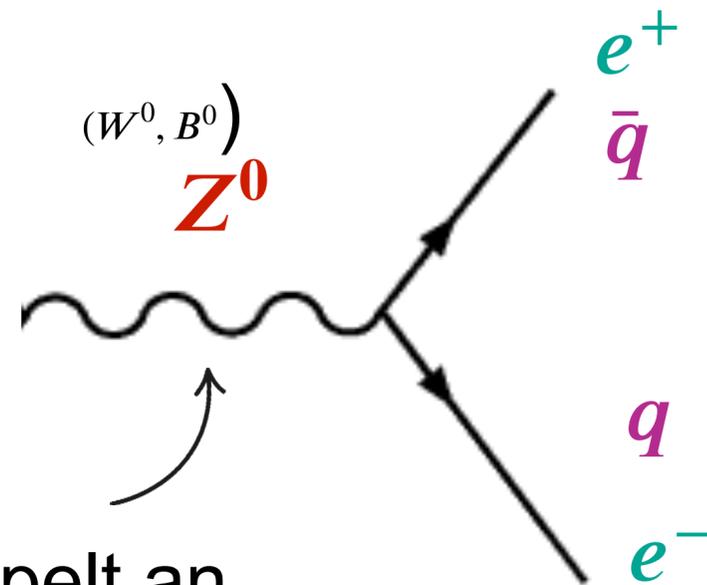


April 1983: erster Z^0 -Zerfall in UA1

erster Nachweis der Bosonen W^\pm und Z^0

■ Z^0 – Bosonen: Übersicht zu leptonicen & hadronischen Zerfällen

- leptoniche und hadronische Zerfallskanäle des Z^0 Bosons*



6 leptoniche Kanäle:

$(\nu_e, \bar{\nu}_e), (\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu), (\nu_\tau, \bar{\nu}_\tau)$ - unsichtbare Zerfälle in $\nu\bar{\nu}$ Paar

6,7% pro $\nu\bar{\nu}$ Flavour ($\Sigma = 20\%$)

$(e^+, e^-), (\mu^+, \mu^-), (\tau^+, \tau^-)$ - 3 geladene Leptonen-Paare

3,35% pro Flavour ($\Sigma = 10,2\%$)

5 hadronische Kanäle:

$(u, \bar{u}), (d, \bar{d}), (s, \bar{s}), (c, \bar{c}), (b, \bar{b})$

- 5 $q\bar{q}$ Flavours

($\Sigma = 69,2\%$)

koppelt an schwache & elektr. Ladung:

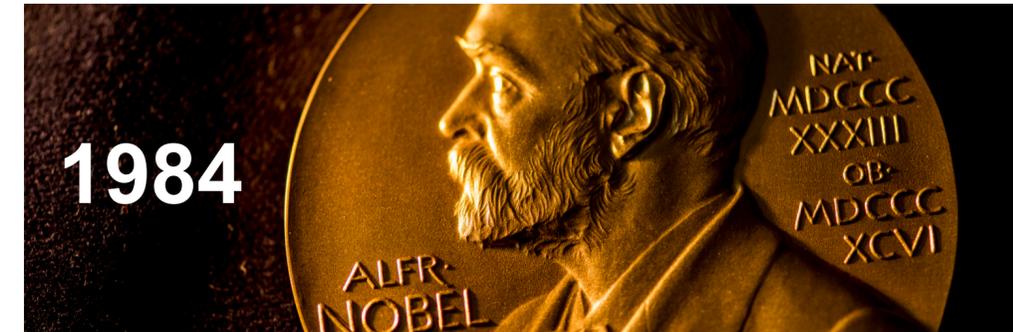
$$\sim I_3 - Q \cdot \sin^2\theta_W$$

*PDG-Werte: [s044.dvi \(lbl.gov\)](https://pdg.lbl.gov)

erster Nachweis der Bosonen W^\pm und Z^0

- CERN Pressekonferenz 1983, Nobelpreis 1984

“for their decisive contributions to the large project, which led to the discovery of the field particles W and Z , communicators of weak interaction.”



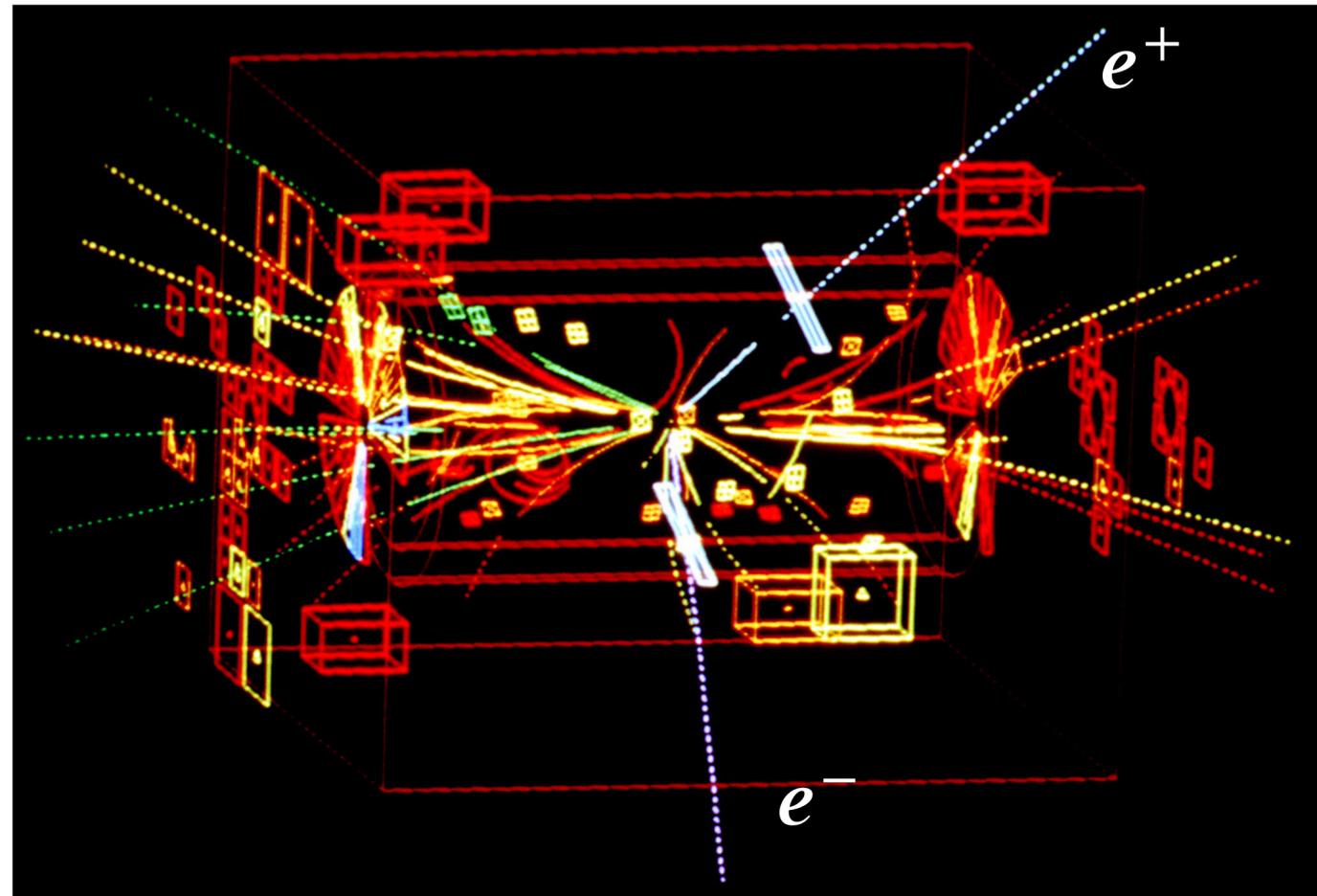
realer Teilchenorbit

Signal

idealer Orbit

pick-up-
Elektrode

Kicker-
Elektrode



Carlo Rubbia (UA1)
Simon van der Meer
(stoch. Kühlung)