

Kern- und Teilchenphysik

SS2012

Vorlesung-Website

■ Johannes Blümer

KIT-Centrum Elementarteilchen- und Astroteilchenphysik KCETA



■ Schwache Wechselwirkung

■ ...

■ Doppelter Betazerfall

■ Sondersendung: das Higgs-Boson

Erinnerung
an v21

■ Von W- und Z-Bosonen zum Standardmodell

■ Theoretisch akzeptiertes Konzept,
experimentelle Suche!

■ Entdeckung

■ Eigenschaften

■ Kopplungen: “ $W^\pm$ ok”, aber Z^0 anders? Elektroschwache WW!

■ vom SPS zum LHC, von $W^\pm$, Z^0 zum Higgs

heute

Von den W- und Z-Bosonen zum Standardmodell

PRODUCING MASSIVE NEUTRAL INTERMEDIATE VECTOR BOSONS WITH EXISTING ACCELERATORS*)

C. Rubbia and P. McIntyre

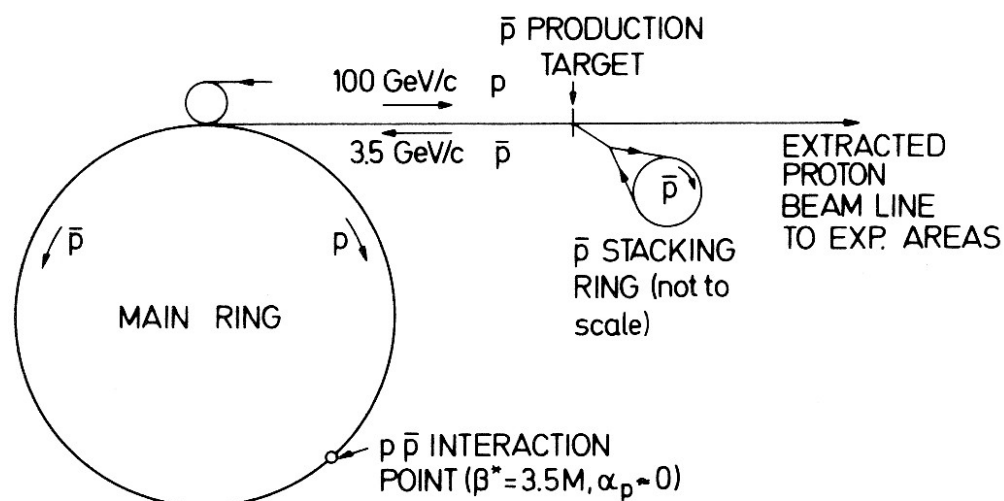
Department of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts 02138
and

D. Cline

Department of Physics, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin 53706

Presented by C. Rubbia

Abstract: We outline a scheme of searching for the massive weak boson ($M = 50 - 200 \text{ GeV}/c^2$). An antiproton source is added either to the Fermilab or the CERN SPS machines to transform a conventional 400 GeV accelerator into a $p\bar{p}$ colliding beam facility with 800 GeV in the center of mass ($E_{\text{eq}} = 320,000 \text{ GeV}$). Reliable estimates of production cross sections along with a high luminosity make the scheme feasible.



Material:

Luigi DiLella

Scuola Normale Superiore, Pisa, Italy

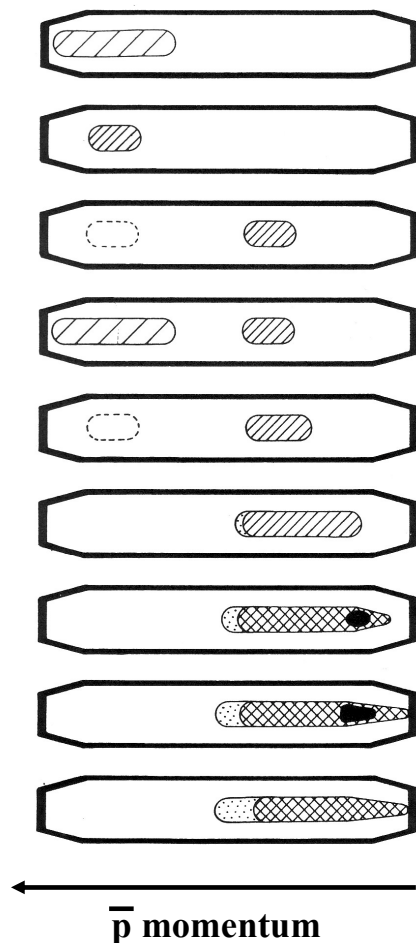
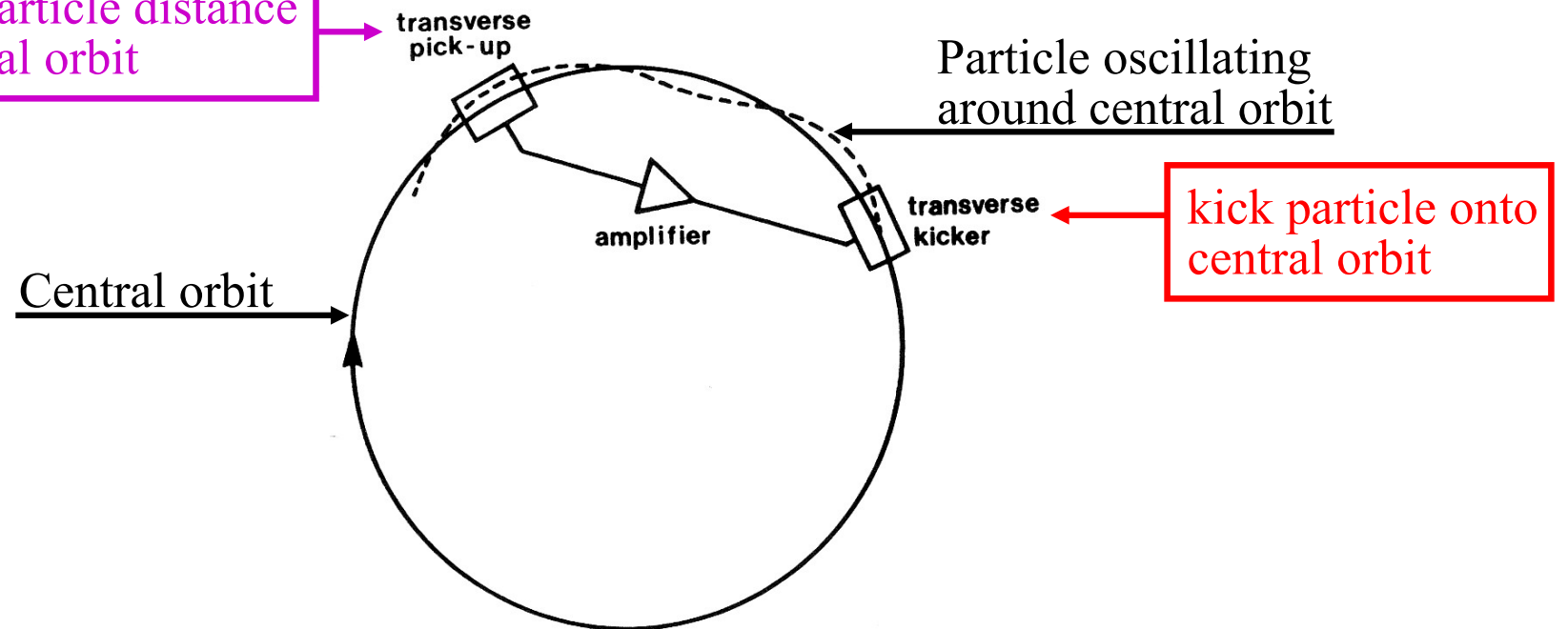
IMFP 2004, Alicante, 5 March 2004

<http://ific.uv.es/imfp04/talks/dilella-pbar.pdf>

Antiprotonen

Example: cooling of the horizontal motion

Measure particle distance from central orbit



The first pulse of $7 \times 10^6 \bar{p}$ has been injected

Precooling reduces momentum spread

First pulse is moved to the stack region where cooling continues

Injection of 2nd $\bar{p}$ pulse 2.4 s later

After precooling 2nd pulse is also stacked

After 15 pulses the stack contains $10^8 \bar{p}$

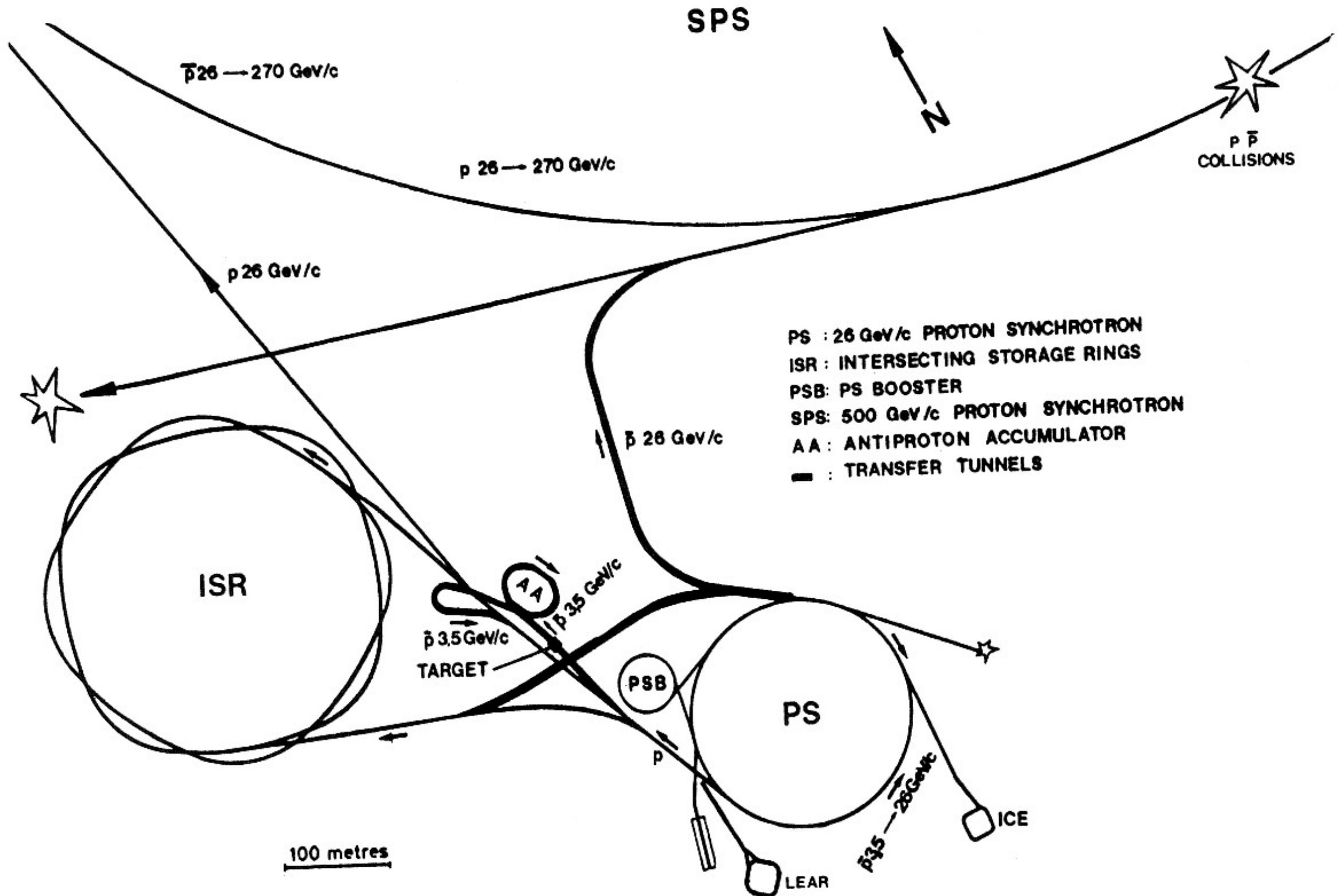
After one hour a dense core has formed inside the stack

After one day the core contains enough $\bar{p}$'s for transfer to the SPS

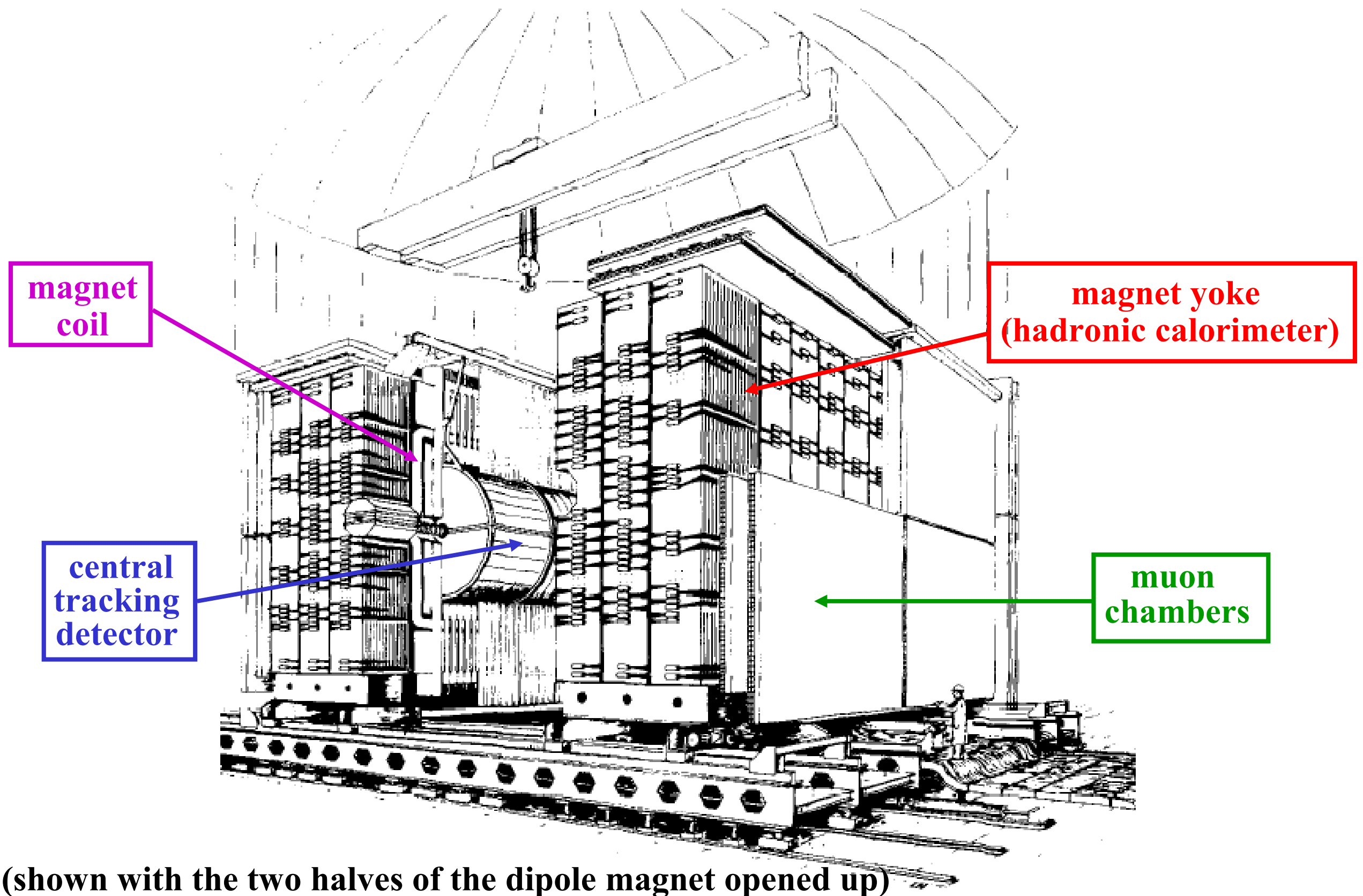
The remaining $\bar{p}$'s are used for next day accumulation



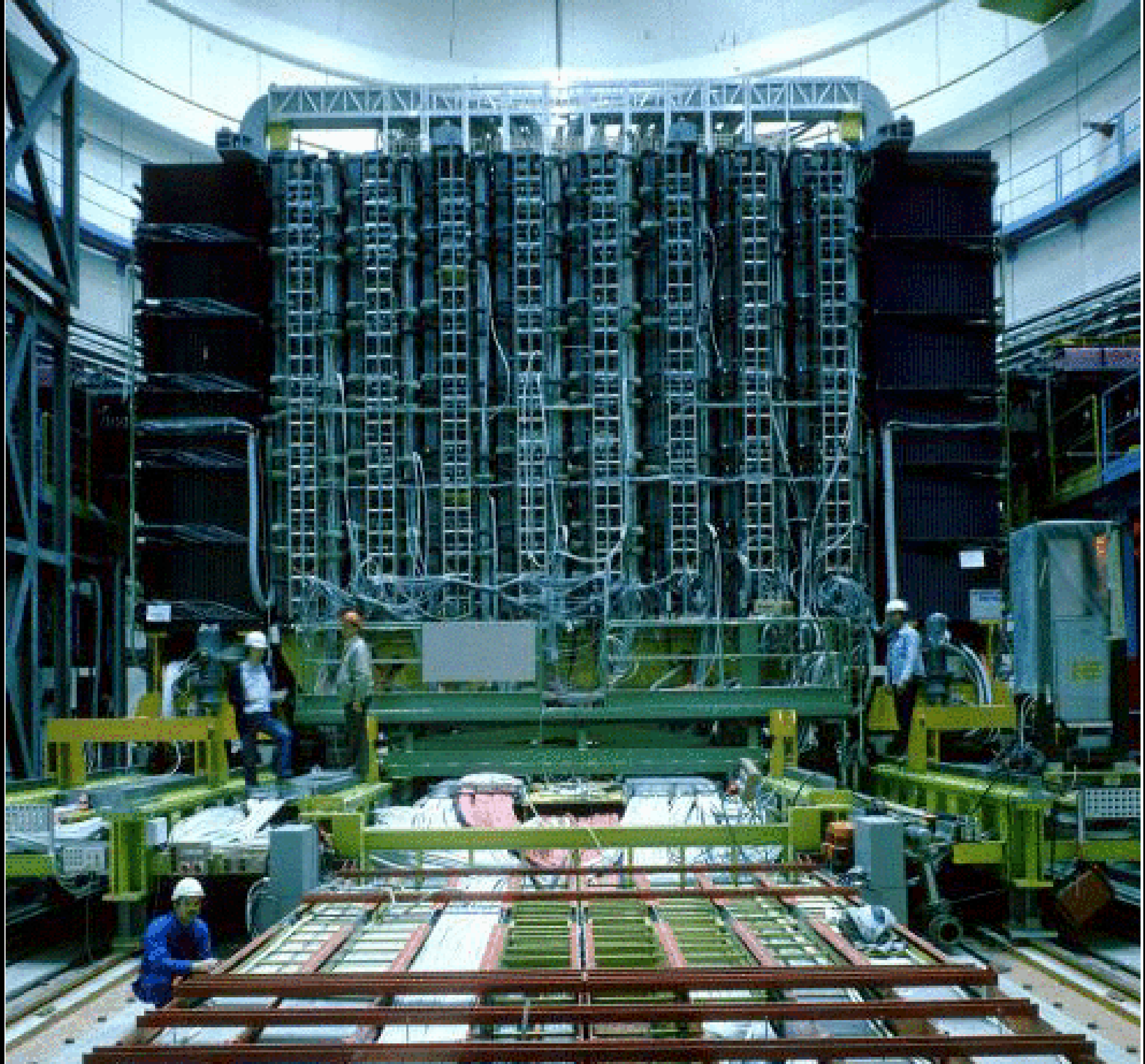
CERN Beschleuniger-Komplex



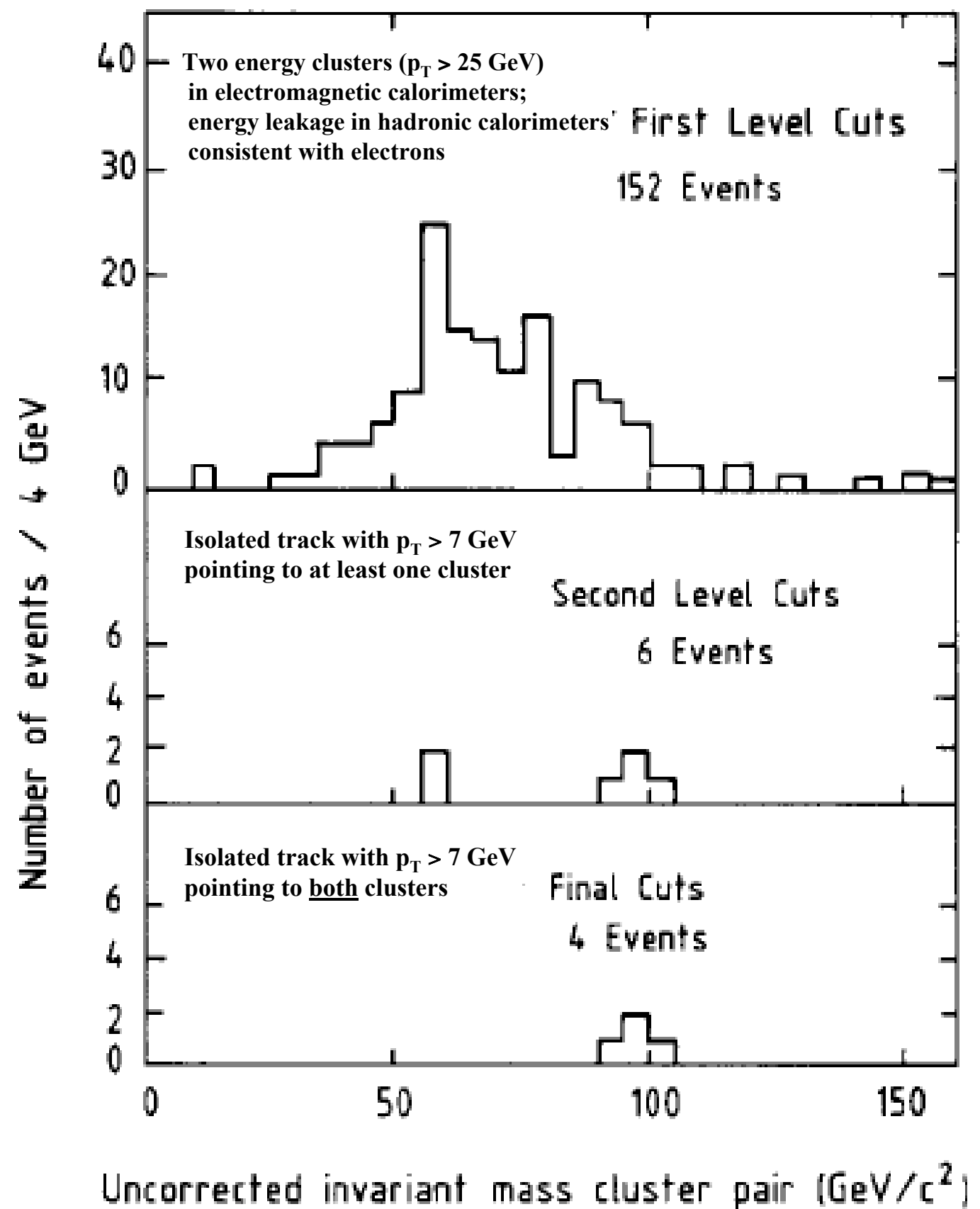
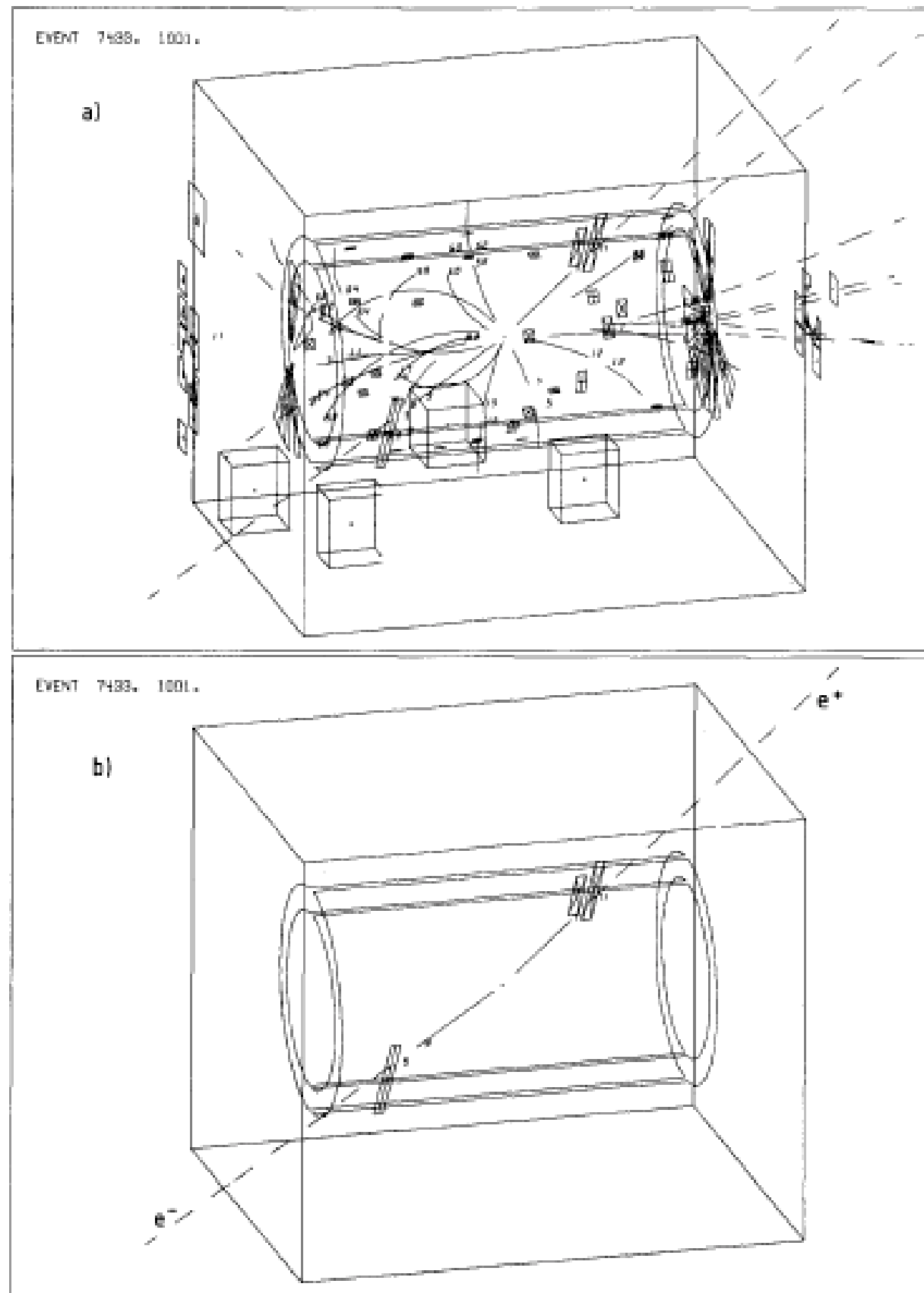
UA1-Detektor



UA1



UA1 $Z \rightarrow ee$



Zee-Ereigniss

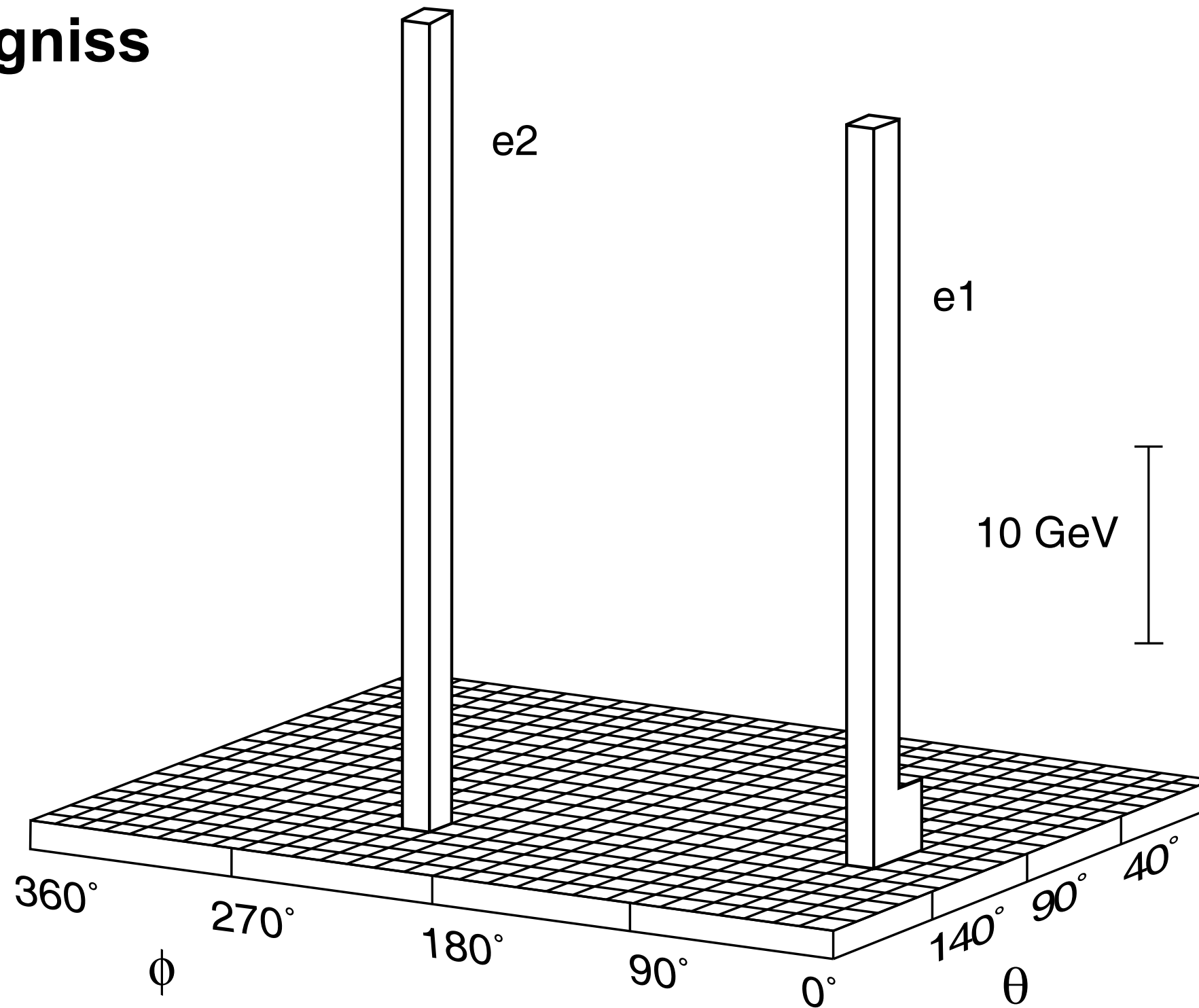
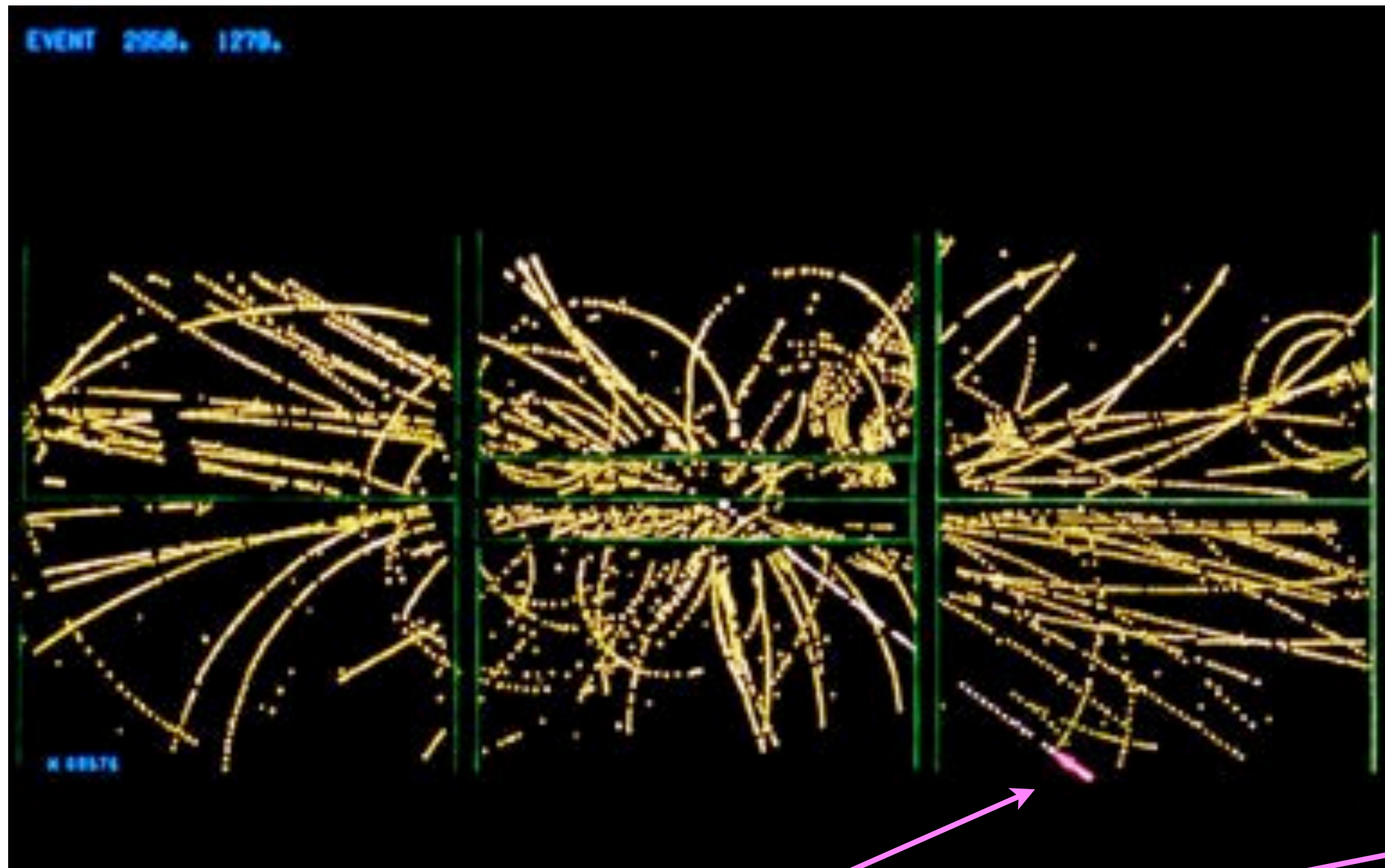
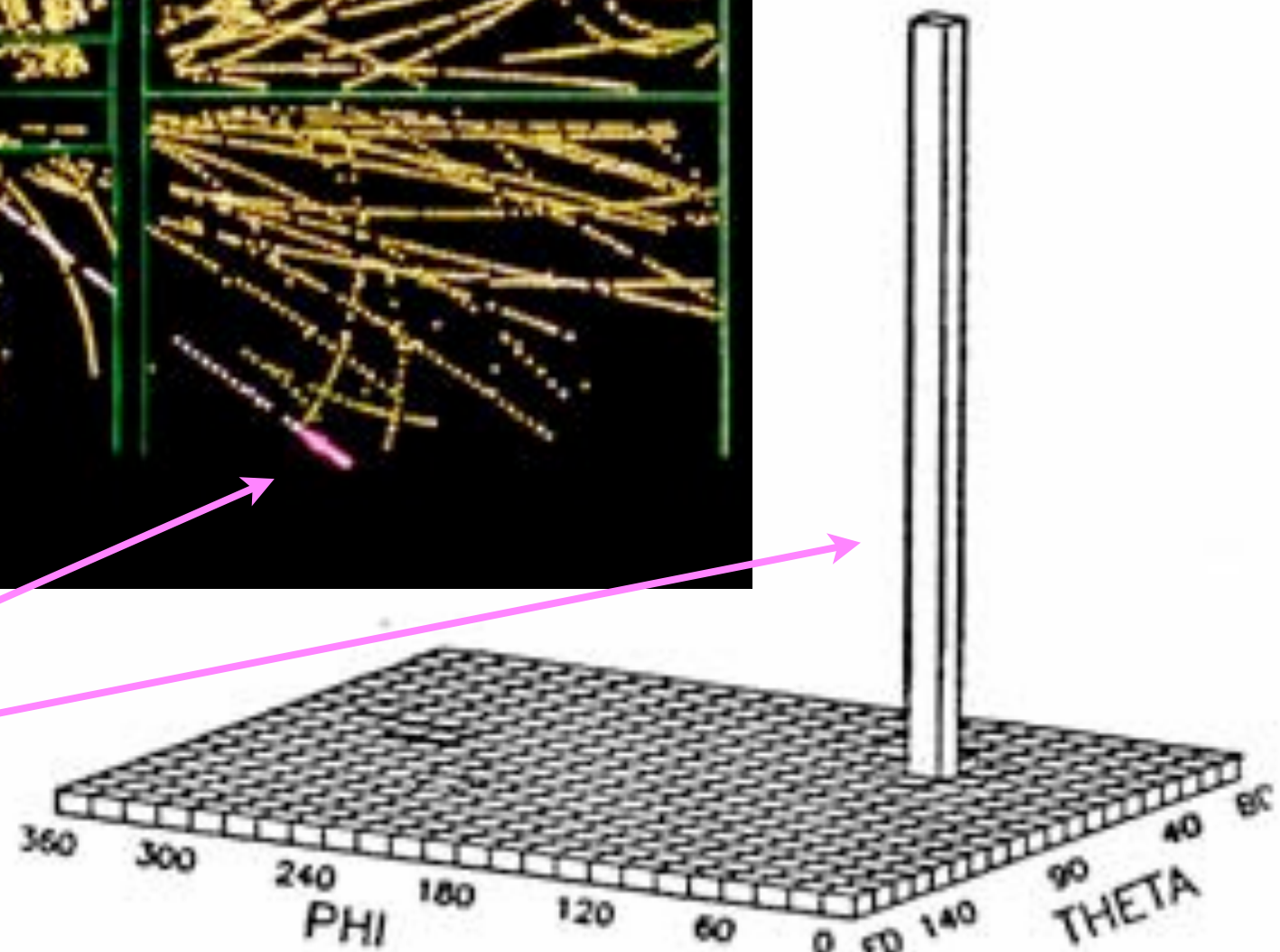


Abbildung 11.1. „Lego-Diagramm“ für eines der ersten Ereignisse der Reaktion $q\bar{q} \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+e^-$, mit denen am CERN das Z^0 -Boson entdeckt wurde. Aufgetragen ist die in den Kalorimerelementen nachgewiesene transversale Energie von Elektron und Positron als Funktion von Polar- und Azimutalwinkel [Ba83b].

UA1 $W \rightarrow e \nu$



Elektronspur



UA1, UA2 $W \rightarrow e \nu$

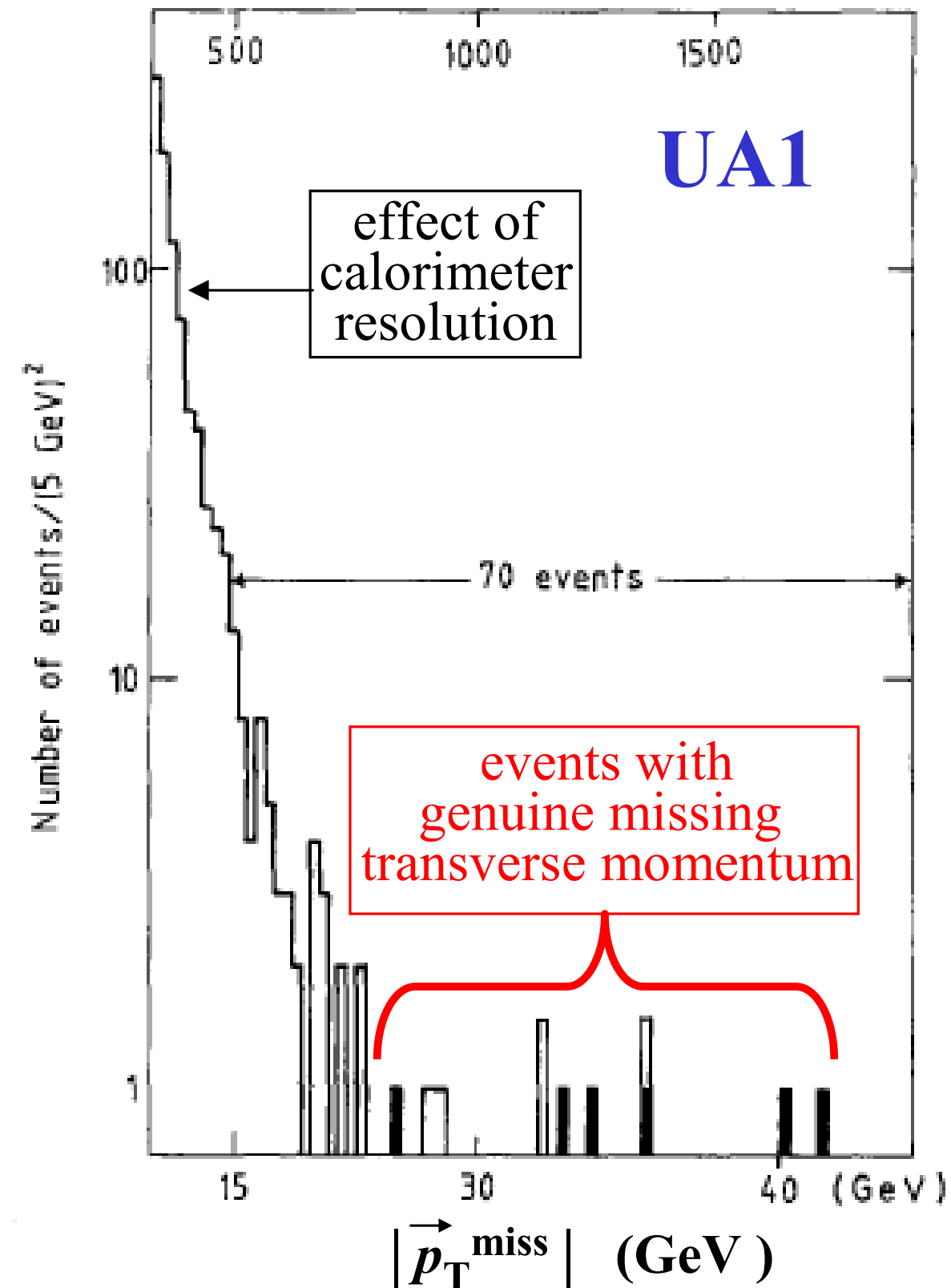
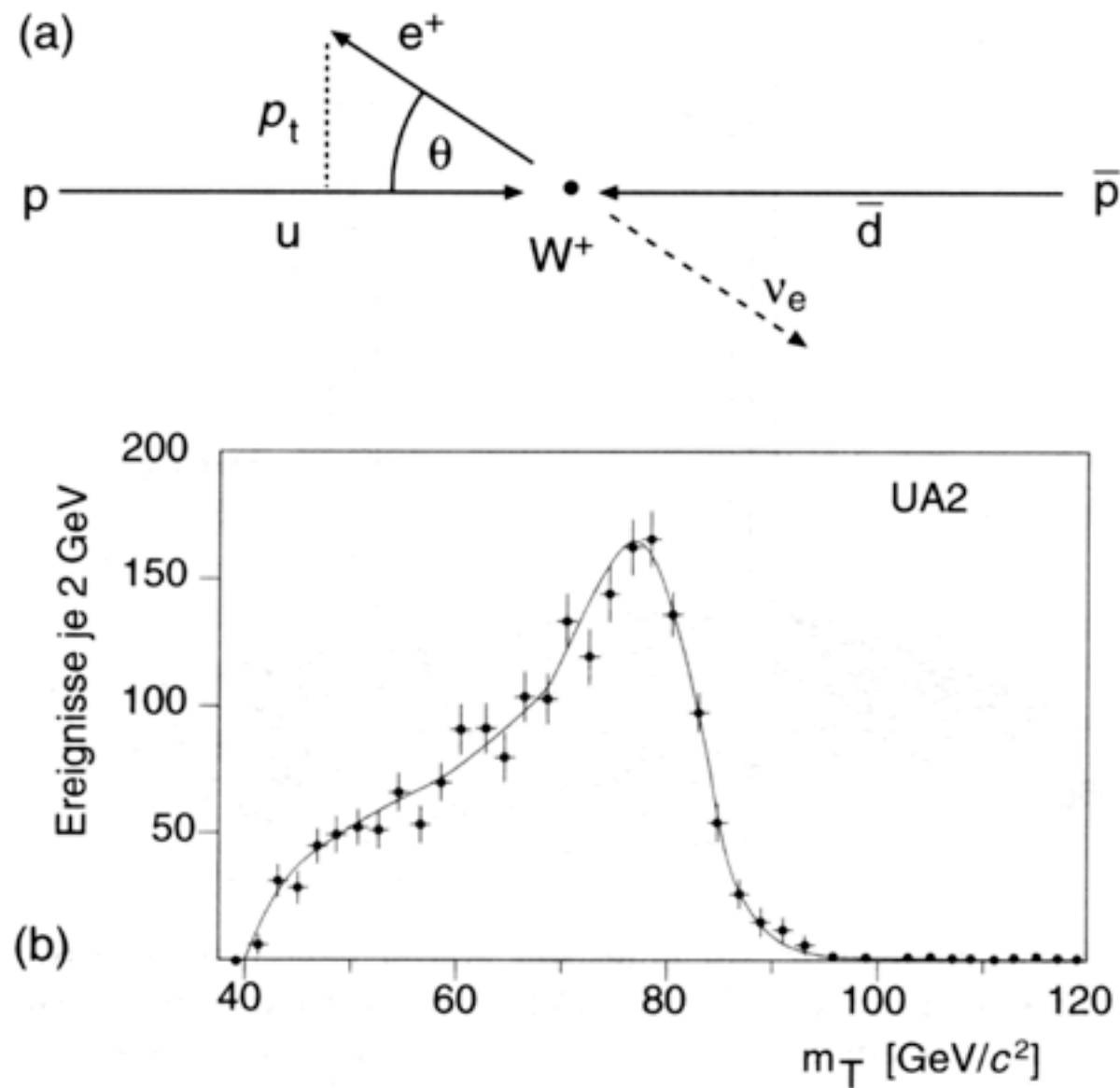
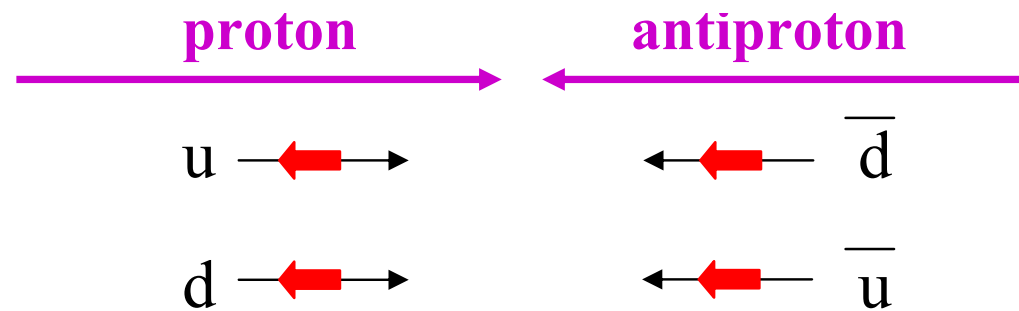


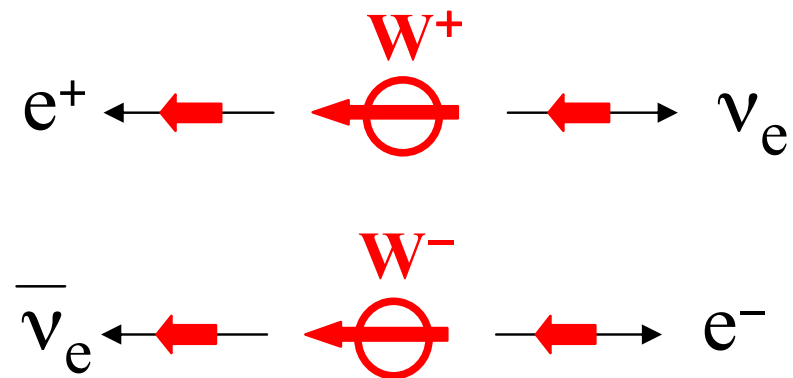
Abb. 11.2. (a) Kinematik des Zerfalls $W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$. Der maximal mögliche Transversalimpuls p_t des e^+ ist $M_W c/2$. (b) Verteilung der „transversalen Masse“ $m_t = 2p_t/c$ von e^+ und e^- aus der Reaktion $q_1 + \bar{q}_2 \rightarrow e^\pm + \text{„nichts“}$ aus dem UA2-Experiment am CERN [Al92b].



Ladungsasymmetrie



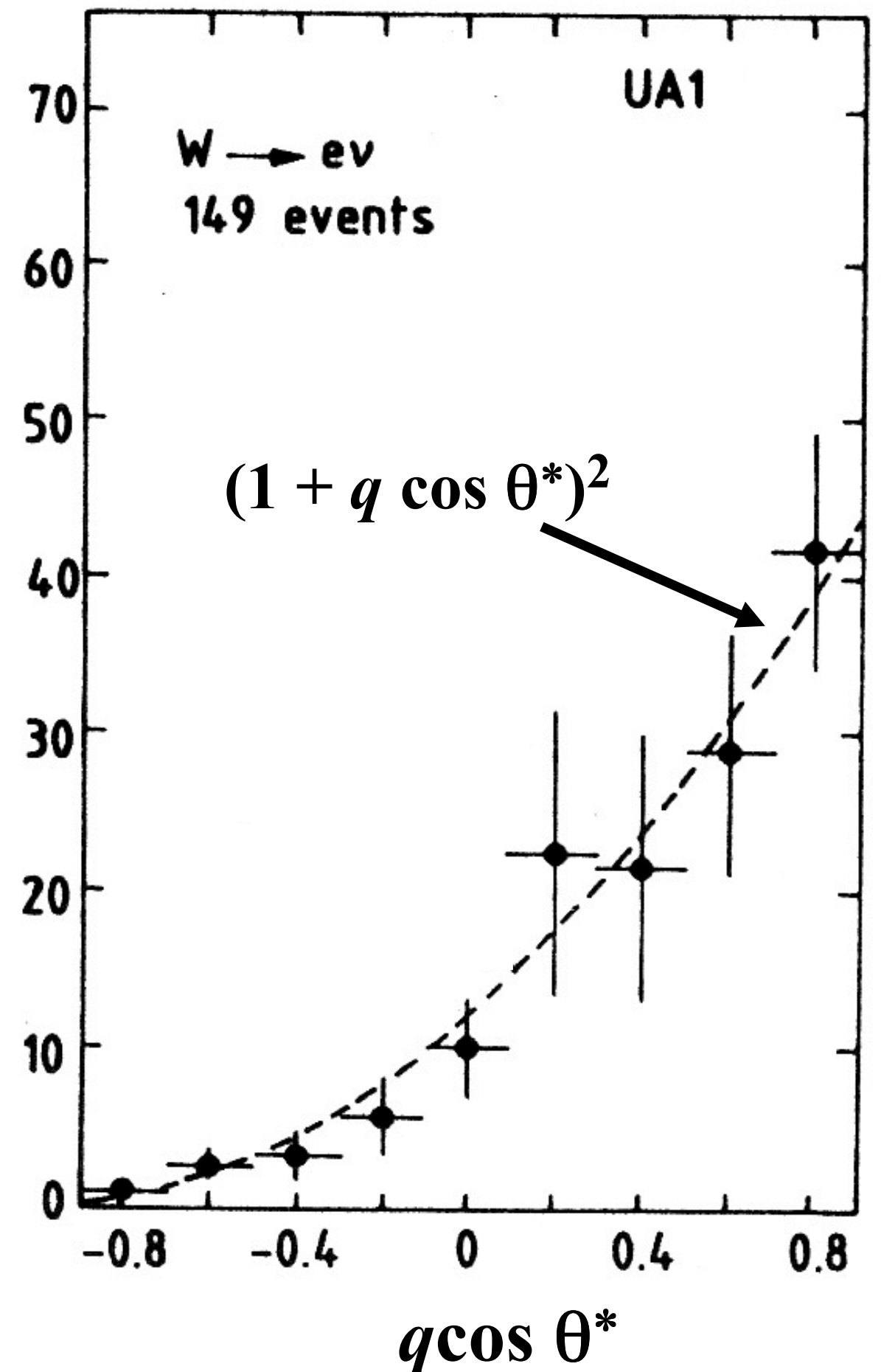
In the W rest frame:



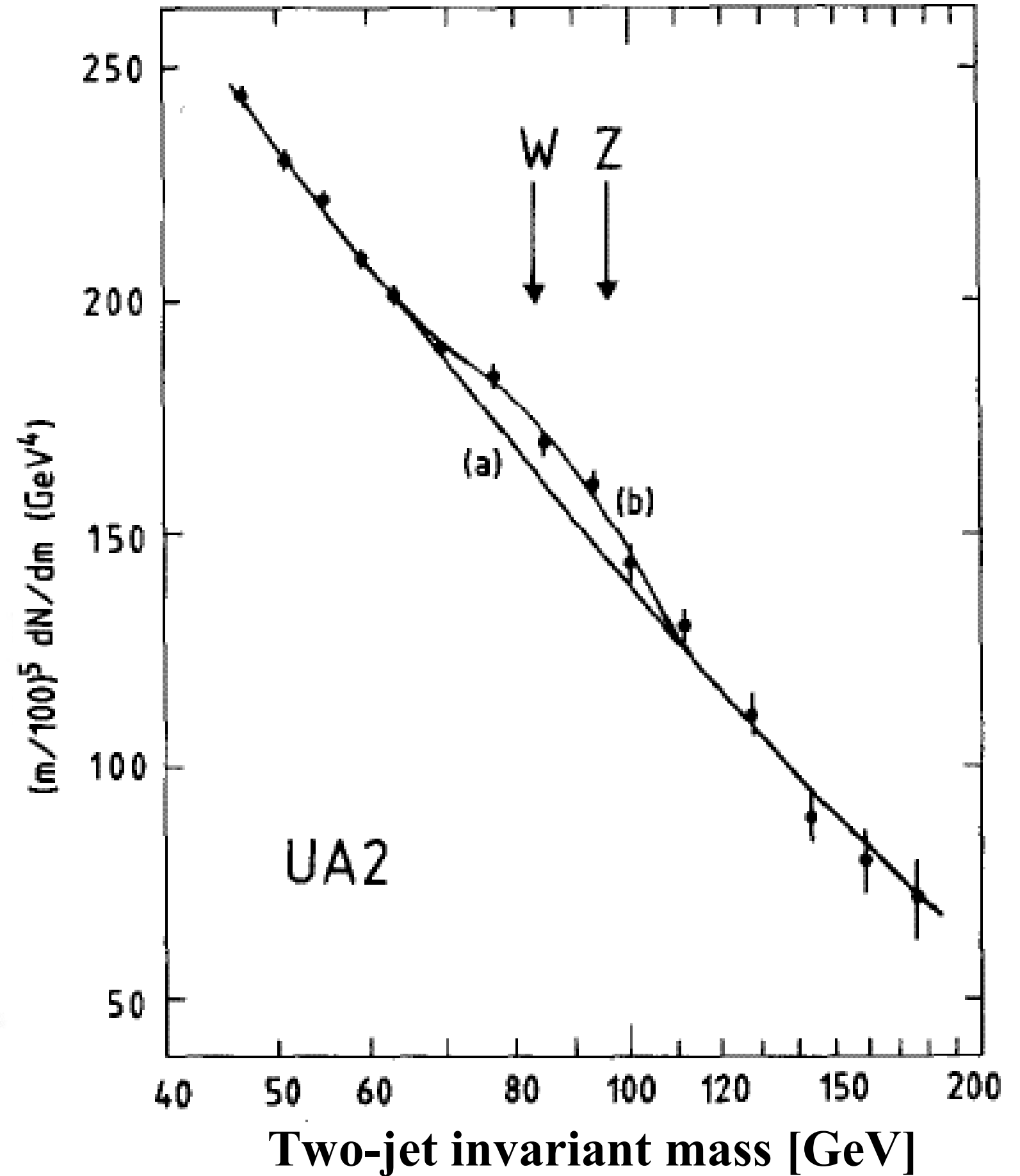
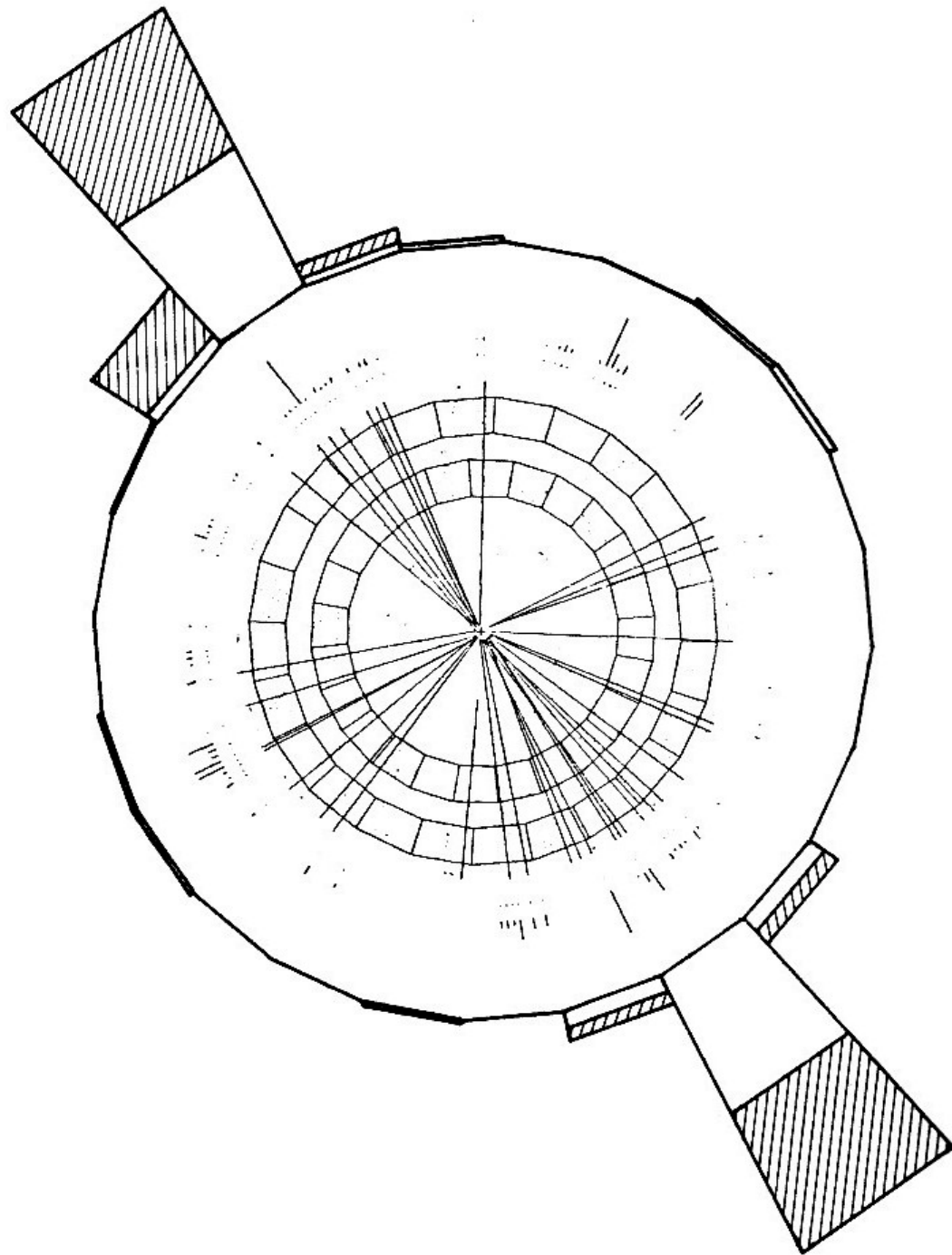
Electron (positron) angular distribution:

$$\frac{dn}{d \cos \theta^*} \propto (1 + q \cos \theta^*)^2$$

$q = +1$ for positrons; $q = -1$ for electrons
 $\theta^* = 0$ along antiproton direction



Jet-Physik



W-Eigenschaften



$$J = 1$$

Charge = $\pm 1 e$

Mass $m = 80.399 \pm 0.023 \text{ GeV}$

$m_Z - m_W = 10.4 \pm 1.6 \text{ GeV}$

$m_{W^+} - m_{W^-} = -0.2 \pm 0.6 \text{ GeV}$

Full width $\Gamma = 2.085 \pm 0.042 \text{ GeV}$

$\langle N_{\pi^\pm} \rangle = 15.70 \pm 0.35$

$\langle N_{K^\pm} \rangle = 2.20 \pm 0.19$

$\langle N_p \rangle = 0.92 \pm 0.14$

$\langle N_{\text{charged}} \rangle = 19.39 \pm 0.08$

nur 2 $q\bar{q}$ x 3 Farben berücksichtigen:

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

$$\begin{array}{cccccc} 1 & : & 1 & : & 1 & : & 3 & : & 3 \\ | & & | & & | & & | & & | \\ 1/9 & & 1/9 & & 1/9 & & 1/3 & & 1/3 \\ & & & & & & \hline & & & & & & 2/3 \end{array}$$

→ 6 leptonische + 5 hadronische Kanäle

W^- modes are charge conjugates of the modes below.

W^+ DECAY MODES

	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	p (MeV/c)
$\ell^+ \nu$	[b] $(10.80 \pm 0.09) \%$		—
$e^+ \nu$	$(10.75 \pm 0.13) \%$		40199
$\mu^+ \nu$	$(10.57 \pm 0.15) \%$		40199
$\tau^+ \nu$	$(11.25 \pm 0.20) \%$		40180
hadrons	$(67.60 \pm 0.27) \%$		—
$\pi^+ \gamma$	< 8	$\times 10^{-5}$	95% 40199
$D_s^+ \gamma$	< 1.3	$\times 10^{-3}$	95% 40175
cX	$(33.4 \pm 2.6) \%$		—
$c\bar{s}$	$(31^{+13}_{-11}) \%$		—
invisible	[c] $(1.4 \pm 2.9) \%$		—

W koppelt an alle LH-Fermionen gleich stark (Quarks erst mit CKM drehen!)

Z-Eigenschaften



$J = 1$

Erwartung: $\underbrace{1 : 1 : 1}_{ee, \mu\mu, \tau\tau} : \underbrace{1 : 1 : 1}_{\nu_e \bar{\nu}_e, \nu_\mu \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau \bar{\nu}_\tau} : \underbrace{3 : 3 : 3 : 3 : 3}_{u\bar{u} \quad d\bar{d} \quad s\bar{s} \quad c\bar{c} \quad b\bar{b}}$

Z ist nicht nur ein “neutrales W”, sondern vermittelt eine kompliziertere WW – Ladungseffekt, Interferenz mit Photon?

Charge = 0
Mass $m = 91.1876 \pm 0.0021$ GeV ^[d]
Full width $\Gamma = 2.4952 \pm 0.0023$ GeV
 $\Gamma(\ell^+ \ell^-) = 83.984 \pm 0.086$ MeV ^[b]
 $\Gamma(\text{invisible}) = 499.0 \pm 1.5$ MeV ^[e]
 $\Gamma(\text{hadrons}) = 1744.4 \pm 2.0$ MeV
 $\Gamma(\mu^+ \mu^-) / \Gamma(e^+ e^-) = 1.0009 \pm 0.0028$
 $\Gamma(\tau^+ \tau^-) / \Gamma(e^+ e^-) = 1.0019 \pm 0.0032$

Average charged multiplicity
 $\langle N_{charged} \rangle = 20.76 \pm 0.16 \quad (S = 2.1)$

Z DECAY MODES

	Fraction (Γ_i / Γ)	Scale factor/ Confidence level	p (MeV/c)
$e^+ e^-$	(3.363 $\pm$ 0.004) %		45594
$\mu^+ \mu^-$	(3.366 $\pm$ 0.007) %		45594
$\tau^+ \tau^-$	(3.367 $\pm$ 0.008) %		45559
$\ell^+ \ell^-$	[b] (3.3658 $\pm$ 0.0023) %		—
invisible	(20.00 $\pm$ 0.06) %		—
hadrons	(69.91 $\pm$ 0.06) %		—
$(u\bar{u} + c\bar{c})/2$	(11.6 $\pm$ 0.6) %		—
$(d\bar{d} + s\bar{s} + b\bar{b})/3$	(15.6 $\pm$ 0.4) %		—
$c\bar{c}$	(12.03 $\pm$ 0.21) %		—
$b\bar{b}$	(15.12 $\pm$ 0.05) %		—

Statische Symmetriegründe für Quarks

Der 8-fache Weg: rechtes ... Erkennen, Entschließen, Reden, Handeln,
Erwerben, Bemühen, Aufmerksamkeit und Versenkung



Gell-Mann

Table 14.1: Additive quantum numbers of the quarks.

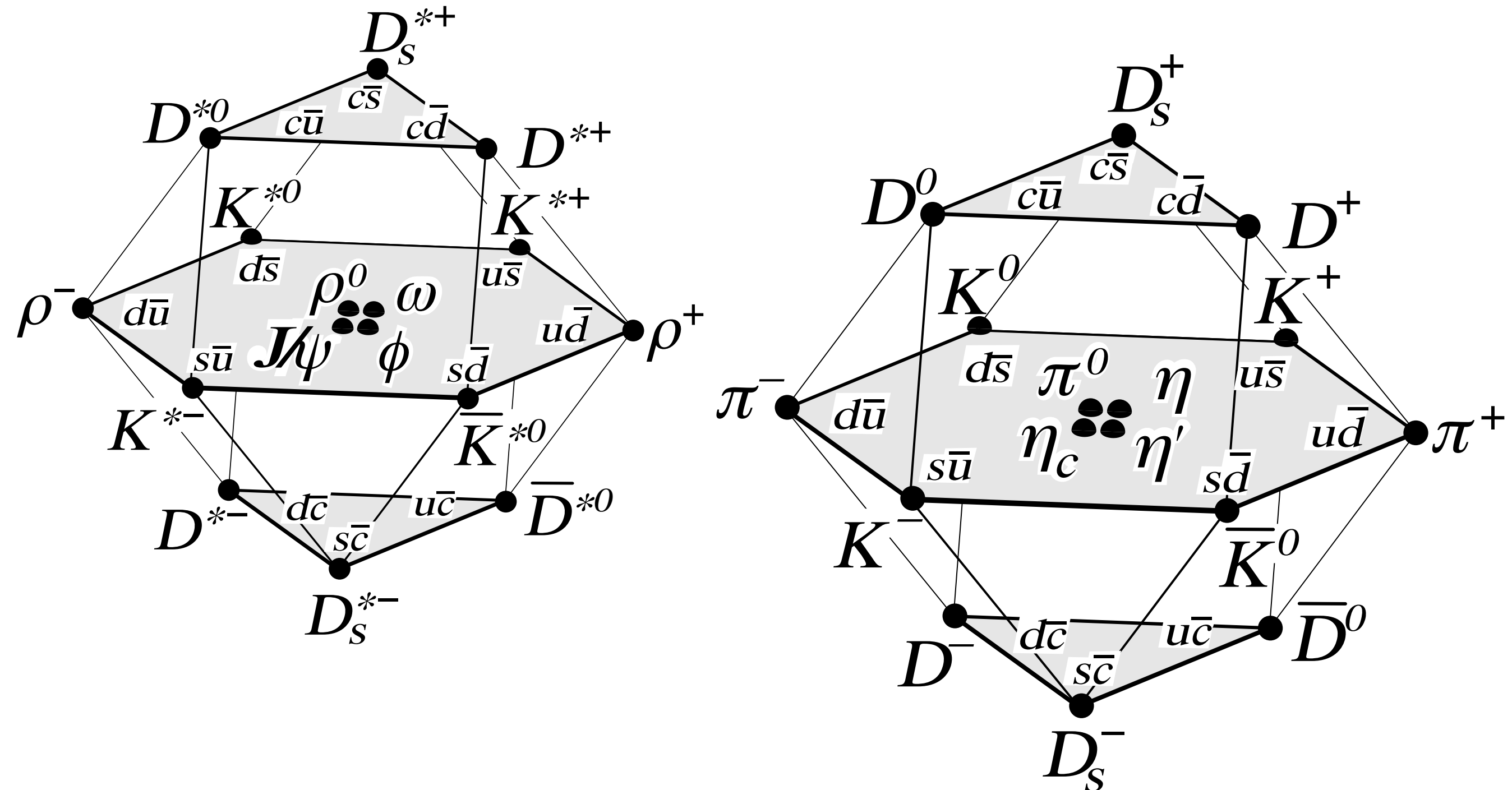
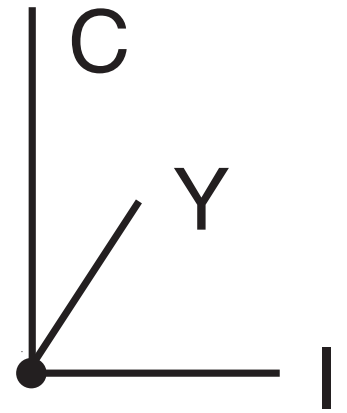
Property \ Quark	d	u	s	c	b	t
Q – electric charge	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$+\frac{2}{3}$
I – isospin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0
I_z – isospin z -component	$-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0
S – strangeness	0	0	-1	0	0	0
C – charm	0	0	0	+1	0	0
B – bottomness	0	0	0	0	-1	0
T – topness	0	0	0	0	0	+1

verallgemeinerte Gell-Mann-Nishijima-Formel

$$Q = I_z + \frac{B + S + C + B + T}{2}$$

Statische Symmetriegründe für Quarks

Figure 14.1: SU(4) weight diagram showing the 16-plets for the pseudoscalar (a) and vector mesons (b) made of the u , d , s , and c quarks as a function of isospin I , charm C , and hypercharge $Y = S + B - \frac{C}{3}$. The nonets of light mesons occupy the central planes to which the $c\bar{c}$ states have been added.



Statische Symmetriegründe für Quarks

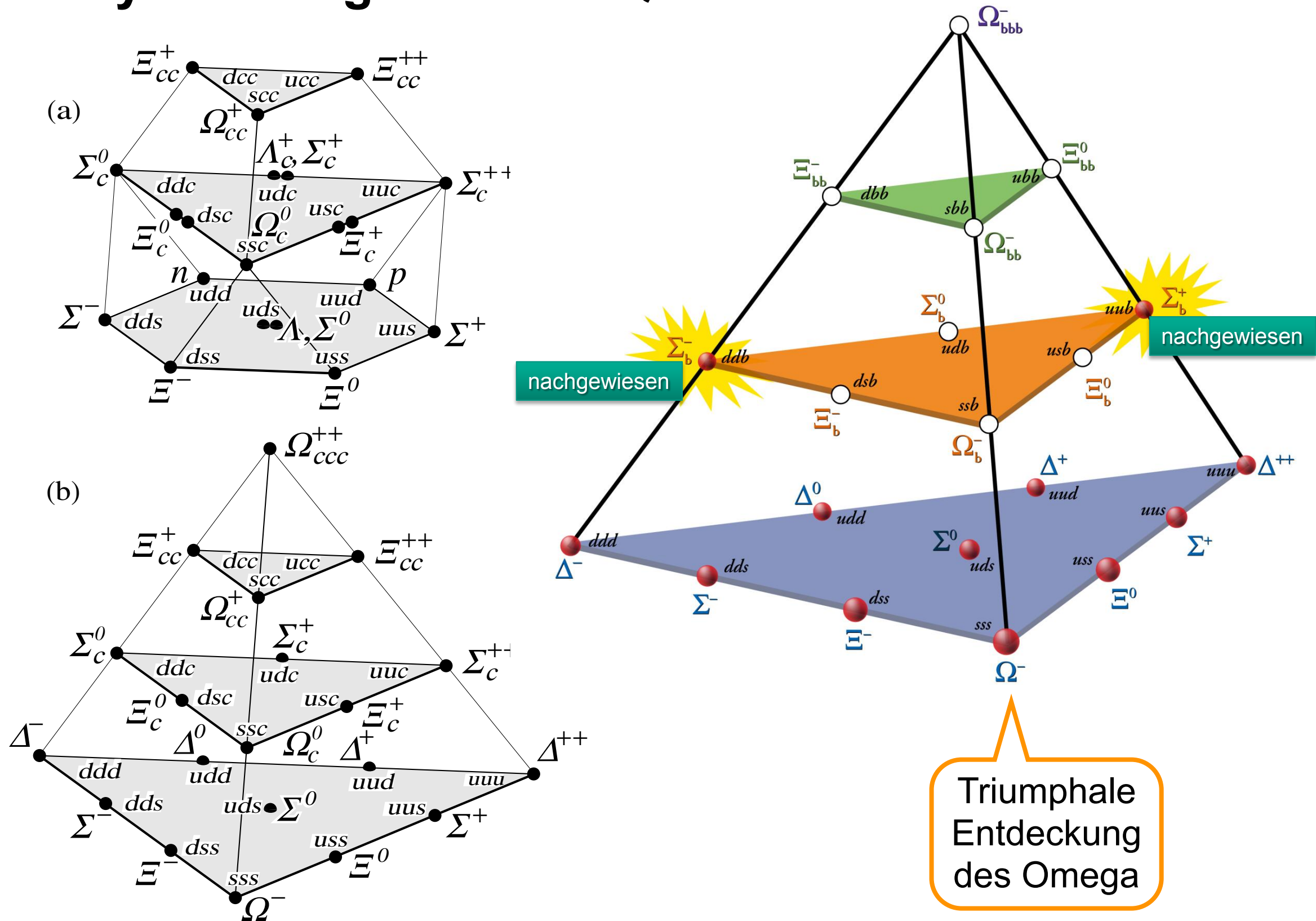
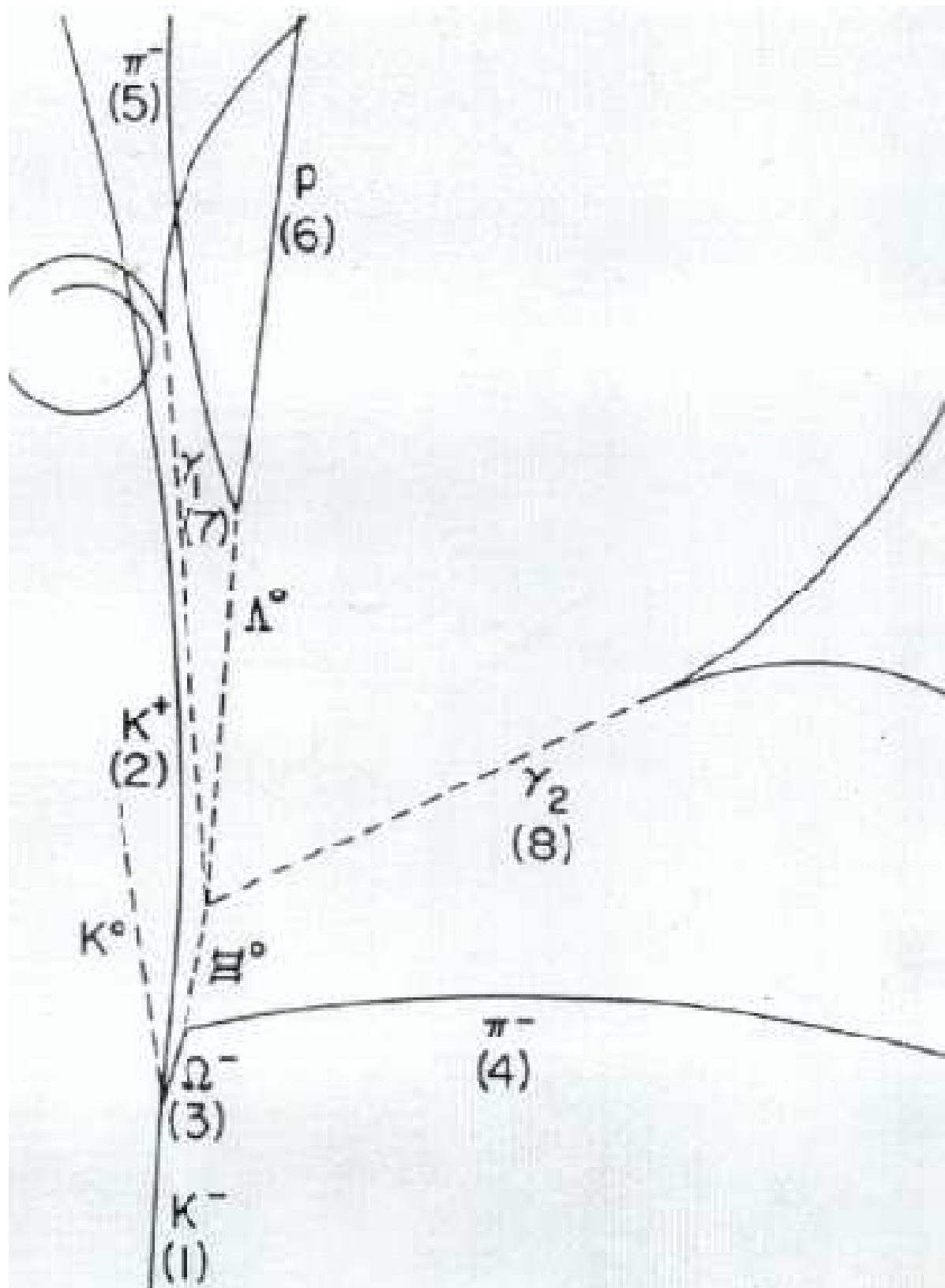
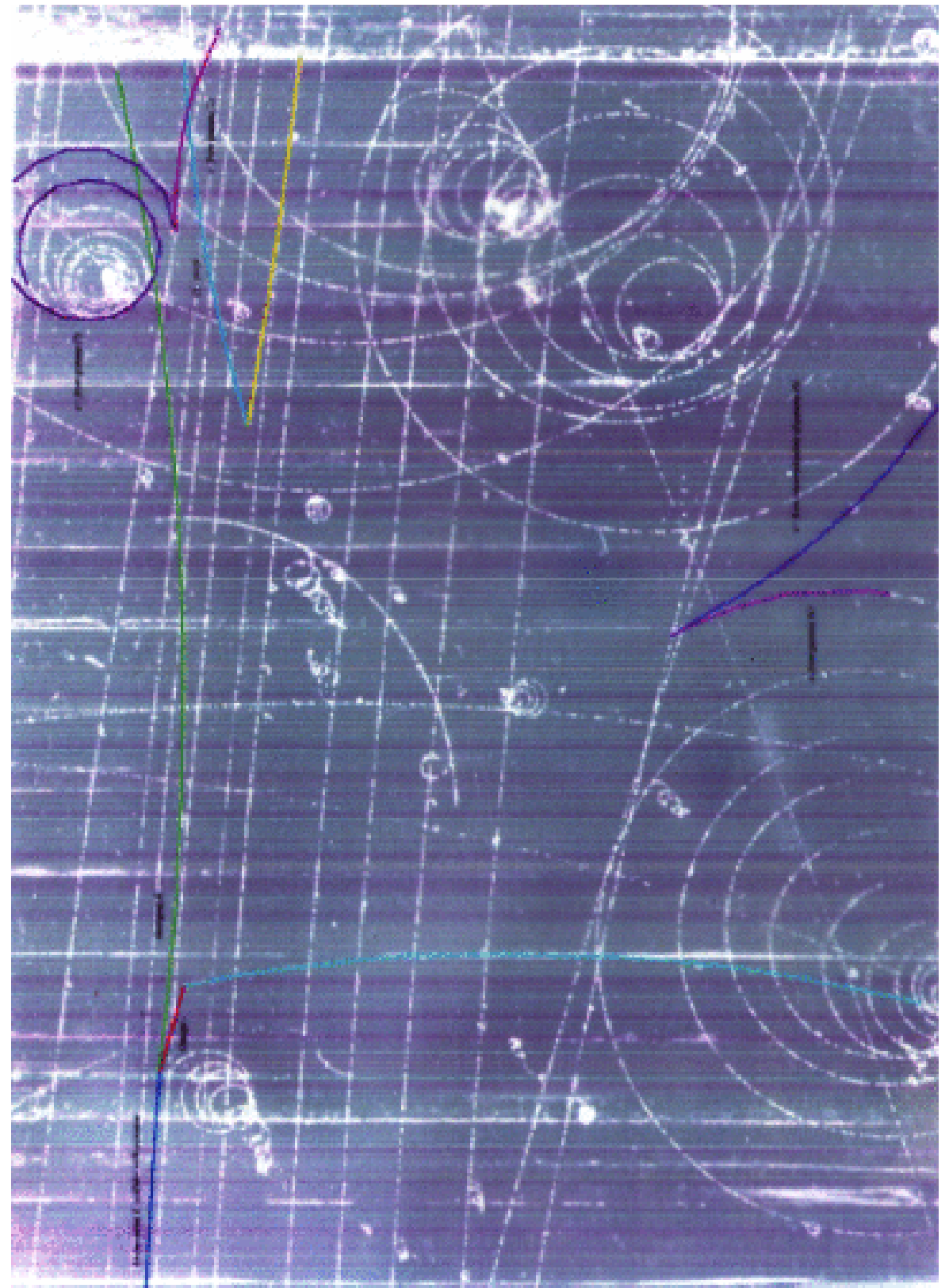


Figure 14.4: SU(4) multiplets of baryons made of u , d , s , and c quarks. (a) The 20-plet with an SU(3) octet. (b) The 20-plet with an SU(3) decuplet.

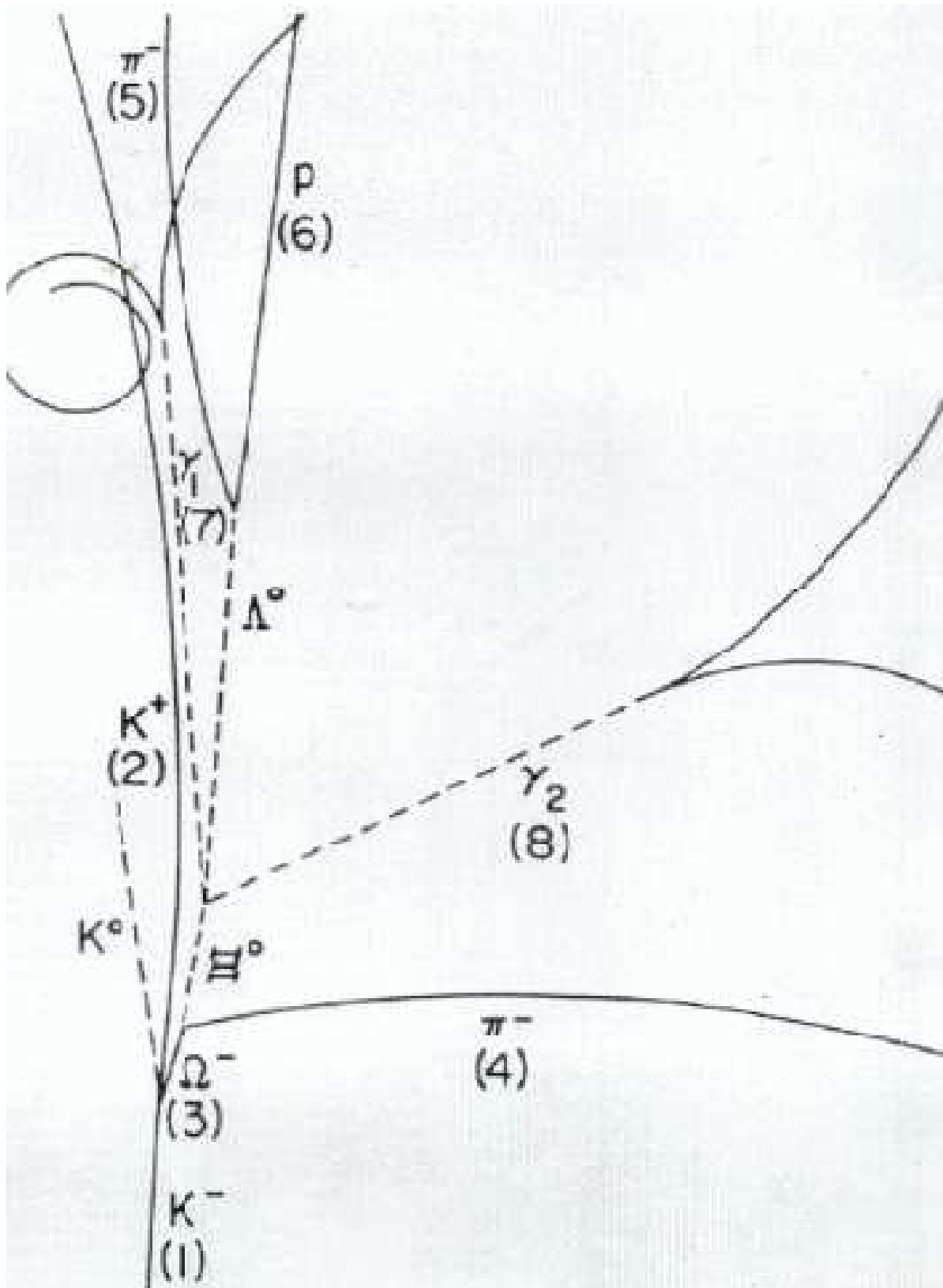
Entdeckung des Omega⁻



http://teachers.web.cern.ch/archiv/HST2002/Bubblech/omega-discovery_2.png



Entdeckung des Omega⁻

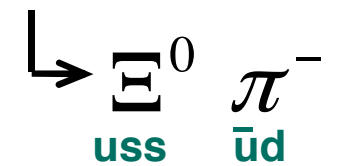


3s



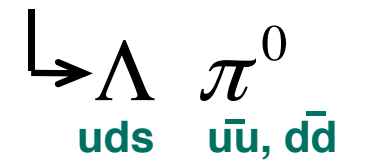
2s

$$\tau = 0.8 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$



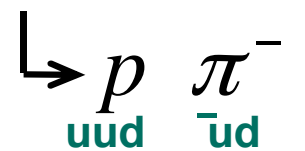
1s

$$\tau = 2.9 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$



0s

$$\tau = 2.6 \cdot 10^{-10} \text{ s}$$



Elektro-Schwache WW



Elektro-Schwache WW

Tabelle 11.1. Multipletts der elektroschwachen Wechselwirkung. Die Quarks d' , s' und b' gehen durch verallgemeinerte Cabibbo-Rotation (CKM-Matrix) aus den Masse-Eigenzuständen hervor. Dupletts des schwachen Isospins T sind durch Klammern zusammengefasst. Die elektrische Ladung der beiden Zustände in jedem Duplett unterscheidet sich jeweils um eine Einheit. Das Vorzeichen der dritten Komponente T_3 ist so definiert, dass die Differenz $z_f - T_3$ innerhalb eines Dupletts konstant ist.

	Fermionmultipletts	T	T_3	z_f
Leptonen	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2	0
	e_R		-1/2	-1
Quarks	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	1/2	+1/2 -1/2	+2/3 -1/3
	μ_R			
	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$			
	τ_R			
	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$			
	u_R			
	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	0	0	+2/3
	c_R			
	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$			
	t_R	0	0	-1/3
	d_R			
	s_R	0	0	-1/3
	b_R			

Standardmodell

Fermionen	Familie			elektr. Ladung	Farbe	schwacher Isospin		Spin
	1	2	3			linkshdg.	rechtshdg.	
Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	—	1/2	—	1/2
	e	μ	τ	−1			0	
Quarks	u	c	t	+2/3	r, b, g	1/2	0	1/2
	d	s	b	−1/3			0	

Wechselwirkung	koppelt an	Austausch- Teilchen	Masse (GeV/c ²)	J^P
stark	Farbe	8 Gluonen (g)	0	1 [−]
elektromagn.	elektrische Ladung	Photon (γ)	0	1 [−]
schwach	schwache Ladung	$W^\pm, Z^0$	$\approx 10^2$	1

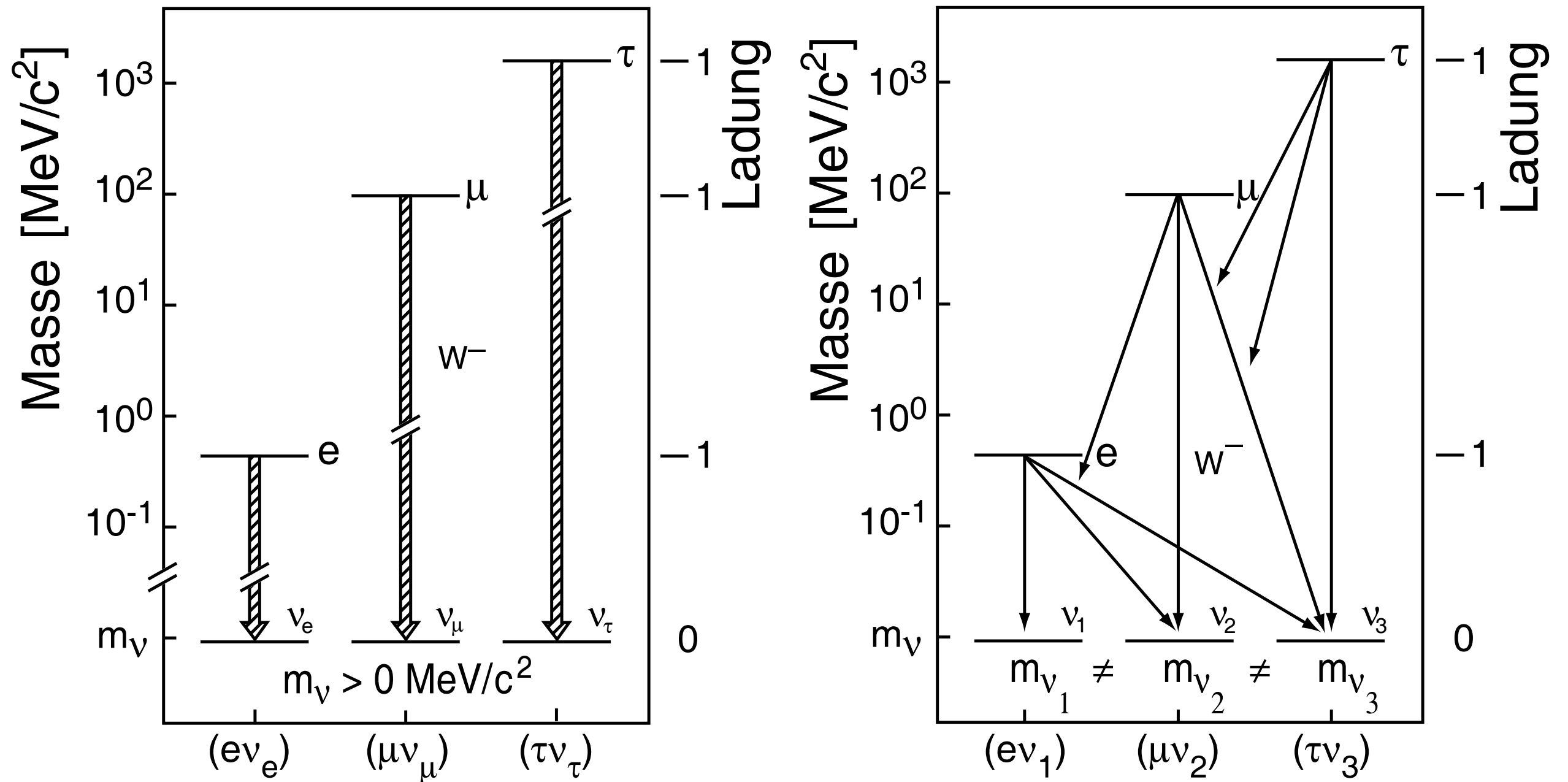


Abbildung 12.1. Durch geladene Ströme vermittelte Übergänge zwischen den leptonischen Zuständen. Links zwischen den leptonischen Eigenzuständen der schwachen Wechselwirkung, rechts zwischen den leptonischen Eigenzuständen des Massenoperators.

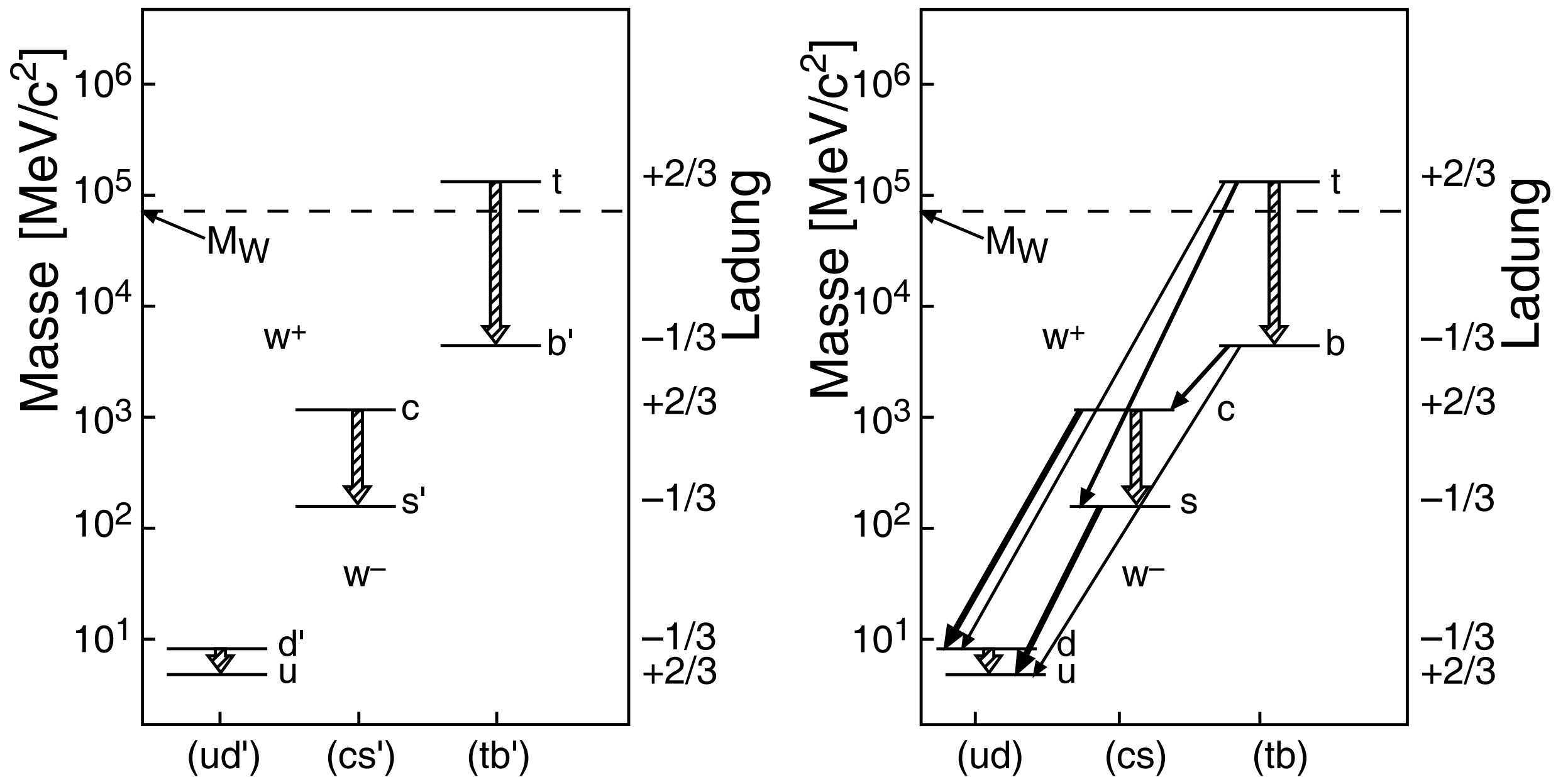
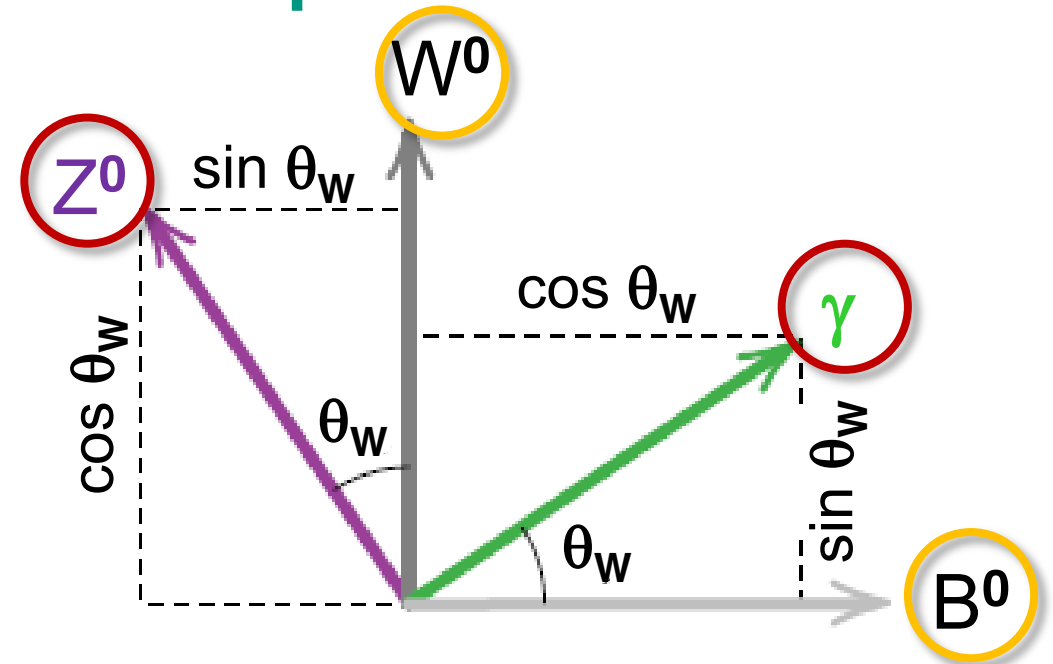


Abbildung 12.2. Durch geladene Ströme vermittelte Übergänge zwischen den Quarkzuständen. Links die Quarkeigenzustände der schwachen Wechselwirkung, rechts des Massenoperators. Die Dicke der Pfeile gibt die relative Stärke der Übergänge an. Die Masse des t-Quarks ist so groß, dass der Zerfall durch die Emission des *realen* W^+ -Bosons stattfindet.

Photon und Z^0 als gedrehte Zustände

Darstellung als **Drehung um θ_W im schwachen Isospinraum**:

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



Weinbergwinkel θ_W :

- misst die Stärke der elektromagnet. relativ zur schwachen Wechselwirkung

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

- experimenteller Wert aus der ν -e Streuung, der elektroschwachen Interferenz bei e^+e^- Streuung, Z^0 - Breite

$$\sin^2 \theta_W = 0.2325 \pm 0.0008$$

Parameter des Standardmodells

Kopplungskonstanten	$e, g, \sin \theta_W$
Boson – Massen	m_W, m_{Higgs}
Lepton – Massen	m_e, m_μ, m_τ ; $m_\nu = 0$ → nicht mehr
Quark – Massen	$m_u, m_d, m_c, m_s, m_t, m_b$
Parameter der CKM–Matrix	3 Winkel θ_i , Phase δ
QCD Parameter	Λ_{QCD}

(>) **22 Parameter**

..., die exp. bestimmt werden müssen. Kann das fundamental sein?

- L, B separat erhalten
- $\nu_L, \bar{\nu}_R, m_\nu = 0$... das ist bereits sicher nicht der Fall...
- V-A – Kopplung
- $q(e^+) = q(p)$ obwohl Lepton- und Quarksektor völlig getrennt sind
- **Eichsymmetrie:**

SU(3)	x	SU(2)	x	U(1)
stark (8 Gluonen)		schwach $W^\pm, W^0$		e.m. B^0