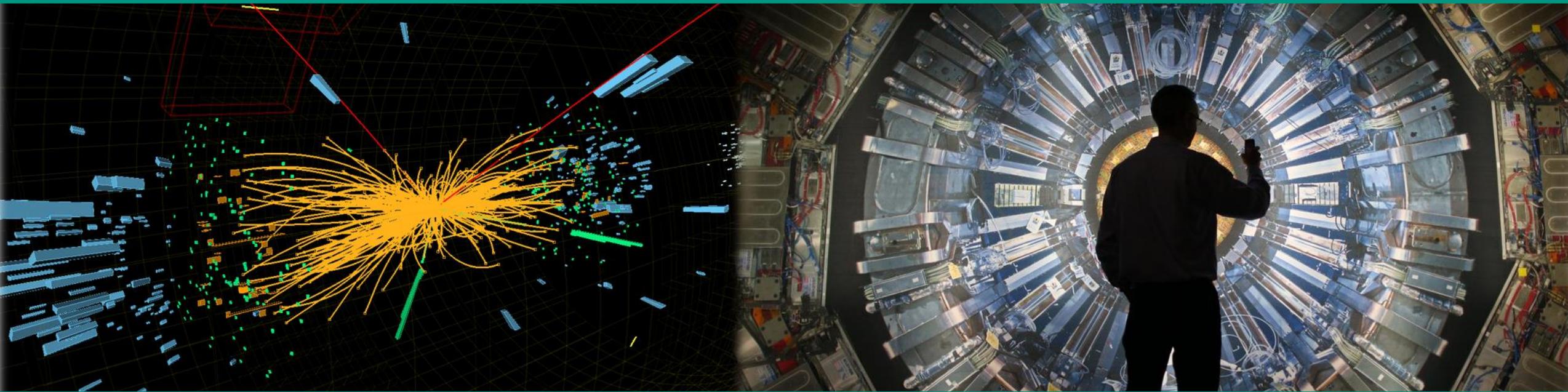


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 19

4.7.2023



Recap: Schlüsselexperimente

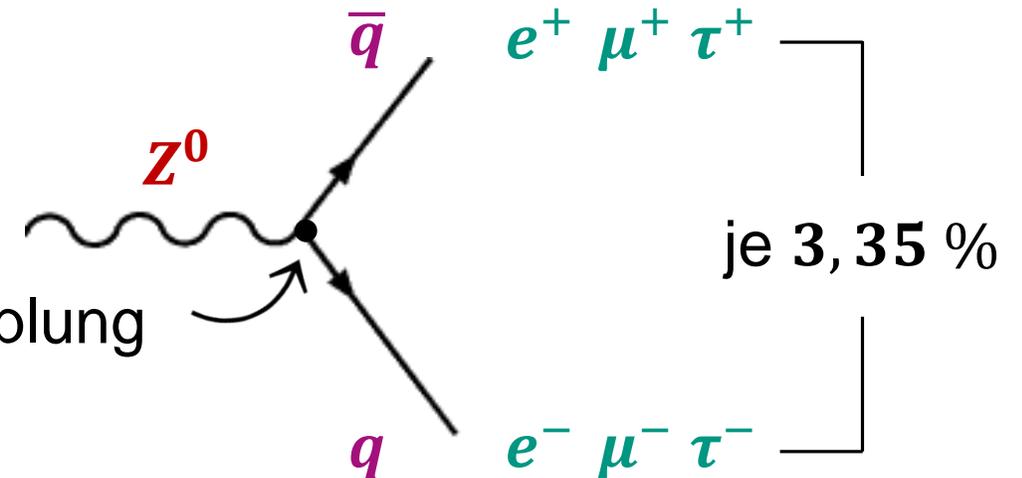
■ Nachweis der intermediären Bosonen W^\pm, Z^0 am *CERN* (1983)

- *Sp \bar{p} S* – Betrieb: Erzeugung von W^\pm, Z^0 über $q\bar{q}$ – Prozesse mit $x \cong 0,2$
wichtig für hohe Luminosität: **stochastische Kühlung** der erzeugten \bar{p}

- Neutrale Ströme: *NC* – Kopplung Z^0

Masse: **91,188 GeV**

Flavour–Universalität der Z^0 – Kopplung

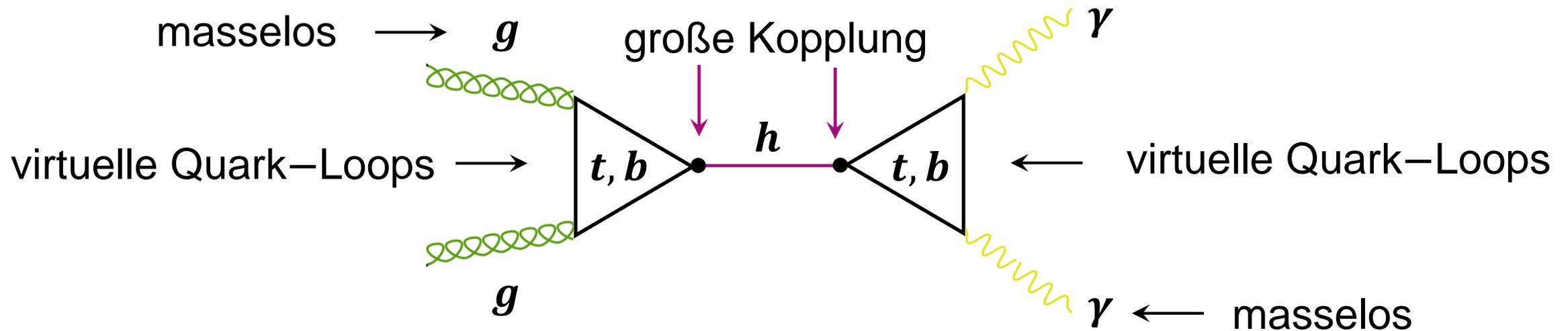


- Weinberg–Winkel $\sin^2 \theta_W = 0,231$ ($e = g \cdot \sin \theta_W$)

Recap: Higgs – Erzeugung & Nachweis

■ Nachweis des skalaren Higgs – Bosons h am *CERN* (2012)

- Higgs mit $m_h = 125 \text{ GeV}$: Erzeugung bevorzugt via gg – Fusion
- Zerfall: erster Nachweis via $\gamma\gamma$ – Paare (elektromagnet. Schauer im *ECAL*)

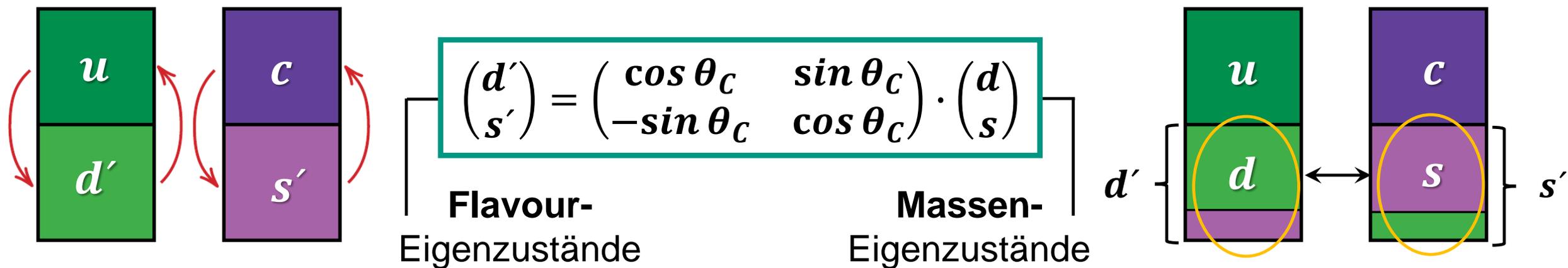


- Zerfall dominant in (reelle) $b\bar{b}$ – Paare (hadronischer Schauer im *HCAL*)

Recap: Mischung von Quarks – Winkel θ_c

■ schwache Wechselwirkung koppelt an **gemischte Zustände**

- W^\pm – Bosonen koppeln **nicht** an die Masseneigenzustände d, s sondern an die '**Cabibbo–gedrehten**' Quark–Flavour Zustände d', s'
- schwache Eigenzustände d' und s' beschrieben durch **Massenanteile**
- Quarkmischung könnte (alternativ) auch bei u, c und t beschrieben werden



Konzept der Mischung von Quarks: Winkel θ_c

■ schwache Wechselwirkung koppelt an gemischte Zustände

- W^\pm – Bosonen koppeln **nicht** an die Masseneigenzustände d, s sondern an die '**Cabbibo–gedrehten**' Quark–Flavour Zustände d', s'

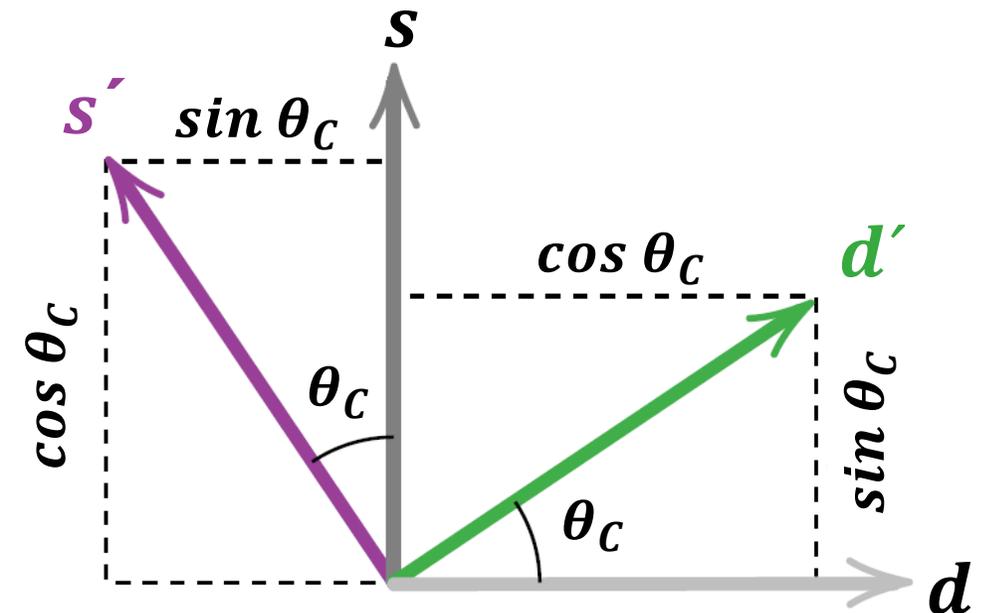
$$d' = \cos \theta_c \cdot d + \sin \theta_c \cdot s$$

$$s' = \cos \theta_c \cdot s - \sin \theta_c \cdot d$$

- experimenteller bestimmter Wert:
Cabbibo–Winkel $\theta_c \sim 13^\circ$

$$\cos \theta_c \sim 0,98$$

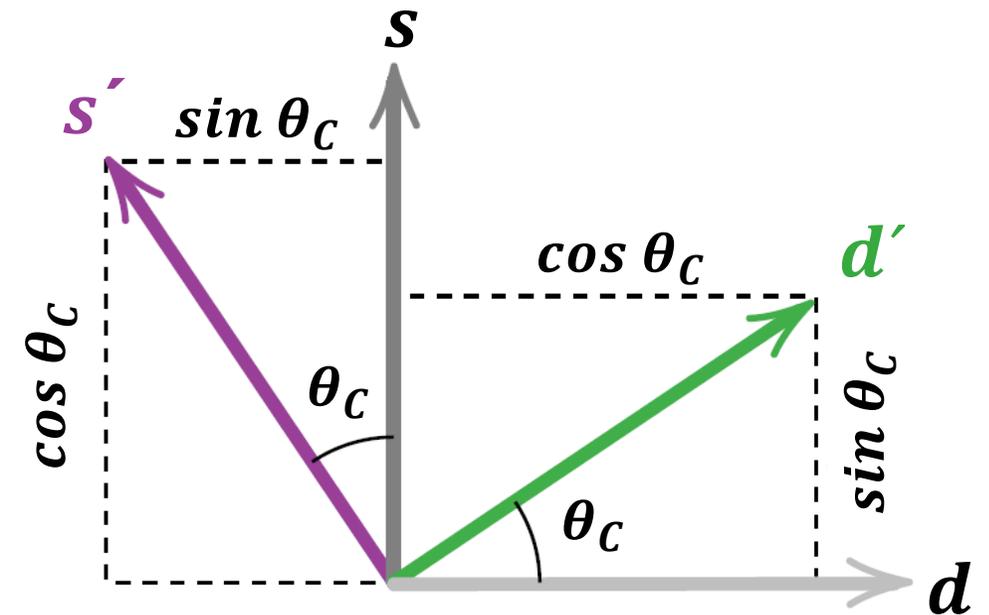
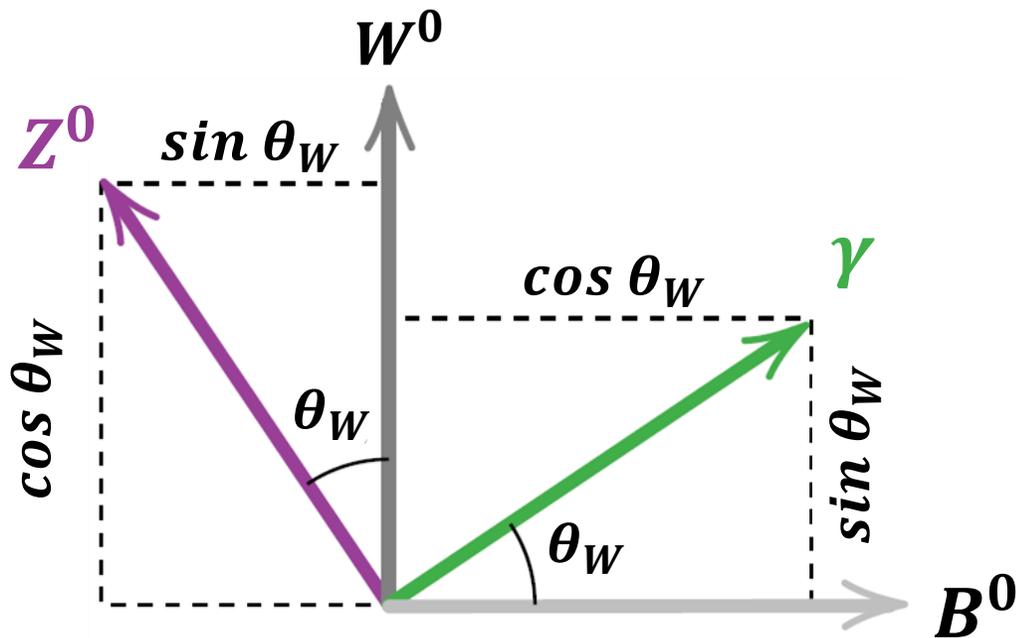
$$\sin \theta_c \sim 0,22$$



Konzept der Mischung: Darstellung via Winkel

■ Visualisierung des Konzepts der Mischung von Zuständen

- **Quarks:** Massen– (u, d) & Wechselwirkungs– (u', d') Zustände : $\theta_c \cong 13^\circ$
- **Vektorbosonen:** Symmetrie (W^0, B^0) & reelle (Z^0, γ) Zustände : $\theta_W \cong 30^\circ$



2. Dublett: Übergangsamplituden von u, c

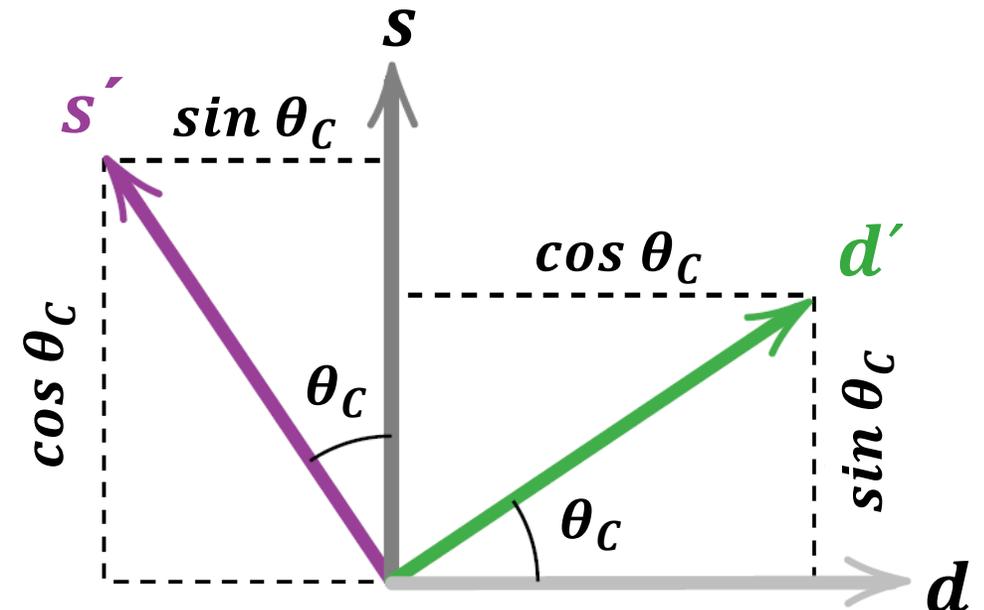
- wir benötigen einen weiteren Quark–Flavourzustand: das **Charm–Quark c**
 - bei W^\pm – Emission zu berücksichtigen: **Mischung** von **2 Quark–Dubletts**

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

- Zustände u und c koppeln an die Cabibbo–gedrehten Zustände d' und s'

$$ud' = u \cdot (d \cdot \cos \theta_c + s \cdot \sin \theta_c)$$

$$cs' = c \cdot (-d \cdot \sin \theta_c + s \cdot \cos \theta_c)$$



2. Dublett: Übergangsamplituden von u, c

■ weiterer Quark–Flavourzustand: **Charm–Quark c**

- Mischung von **2 Quark–Dubletts**

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

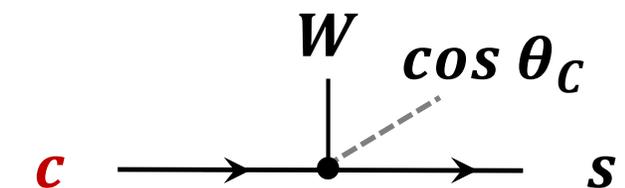
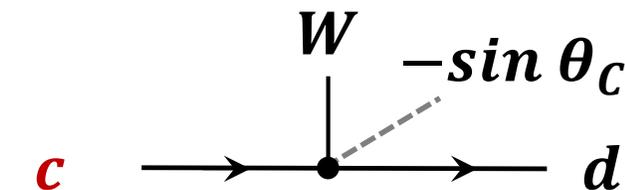
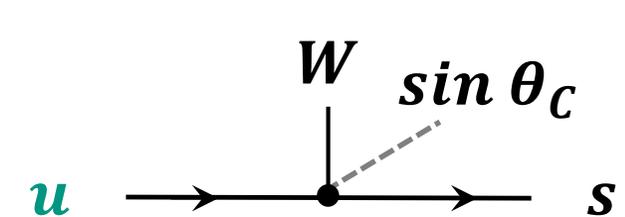
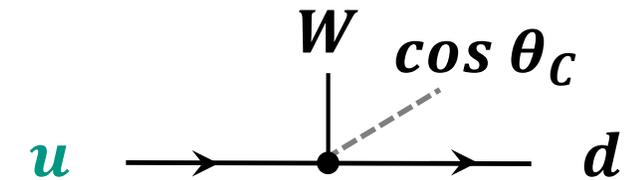
$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}$$

- Zustände u und c koppeln an die Cabibbo–gedrehten Zustände d' und s'

$$ud' = u \cdot (d \cdot \cos \theta_c + s \cdot \sin \theta_c)$$

$$cs' = c \cdot (-d \cdot \sin \theta_c + s \cdot \cos \theta_c)$$

$$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}$$



d'

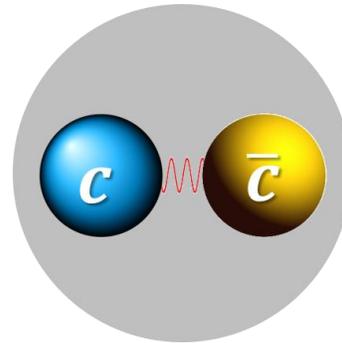
s'

2. Dublett: Übergangsamplituden von u, c

■ Glashow, Illiopoulos & Maiani (*GIM*) postulieren einen 4. Quarkzustand

- Mischung von **2 Quark–Dubletts**

- erfordert Einführung eines 4. **Flavourzustands** von Quarks: **Charm c**
Postulierung **VOR** der Beobachtung des J/Ψ , d.h. Charmonium $c\bar{c}$
am *SLAC* und *BNL*



- *GIM* – ‘Mechanismus’ wichtig für Verständnis
von **neutralen Strömen (NC)**

GIM

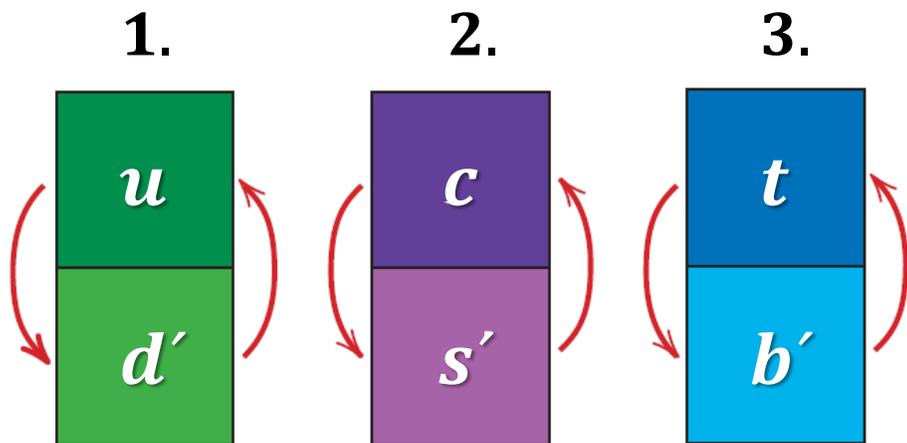
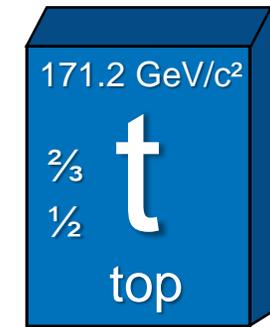
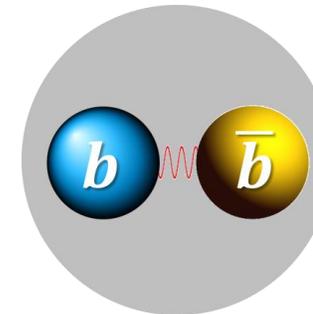


Glashow, Illiopoulos & Maiani

CKM – Mischungsmatrix

■ Mischung von 3 Quark-Generationen

- Motivation: Beschreibung der CP – Verletzung erfordert 3 Quarkfamilien
- **theoretische Vorhersage** der beiden Flavourzustände der 3. Quark-Generation:
Bottom b , Top t



Cabbibo – Kobayashi – Maskawa

CKM – Mischungsmatrix: Euler–Winkel & Phase

- Stärke: 3 reelle Mischungs–Winkel θ_{ij} & 1 CP – verletzende Phase δ

- 3 reelle Euler-Winkel: θ_{12} θ_{23} θ_{13}
- 1 komplexe, CP – verletzende Phase: δ

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\text{1. \& 2. Generation}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix}}_{\text{2. \& 3. Generation}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix}}_{\text{1. \& 3. Generation}}$$

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

$$\delta = CP - \text{verletzende Phase}$$

1. & 2. Generation

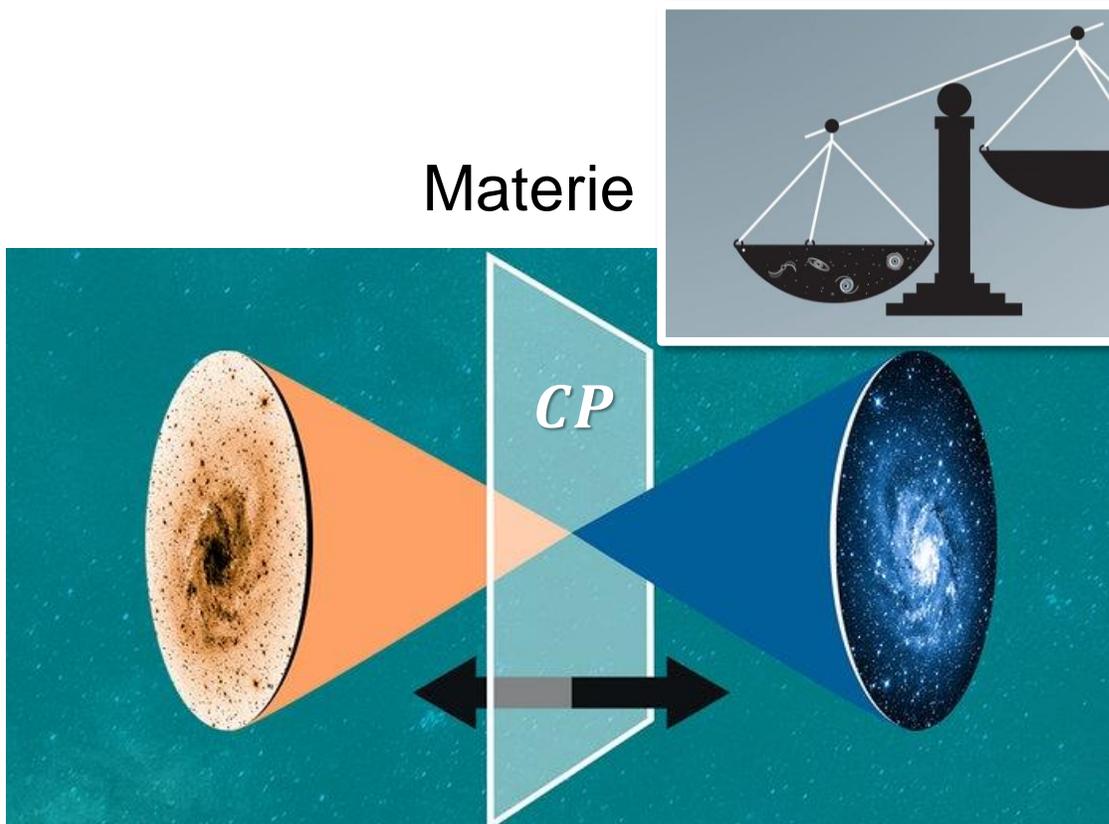
2. & 3. Generation

1. & 3. Generation

CKM – Mischungsmatrix: Euler–Winkel & Phase

- Stärke: 3 reelle Mischungs–Winkel θ_{ij} & 1 CP – verletzende Phase δ

- Beschreibung der CP – Verletzung erfordert 3 Quarkfamilien



Antimaterie

$$\begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix}$$

1. & 3. Generation

$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

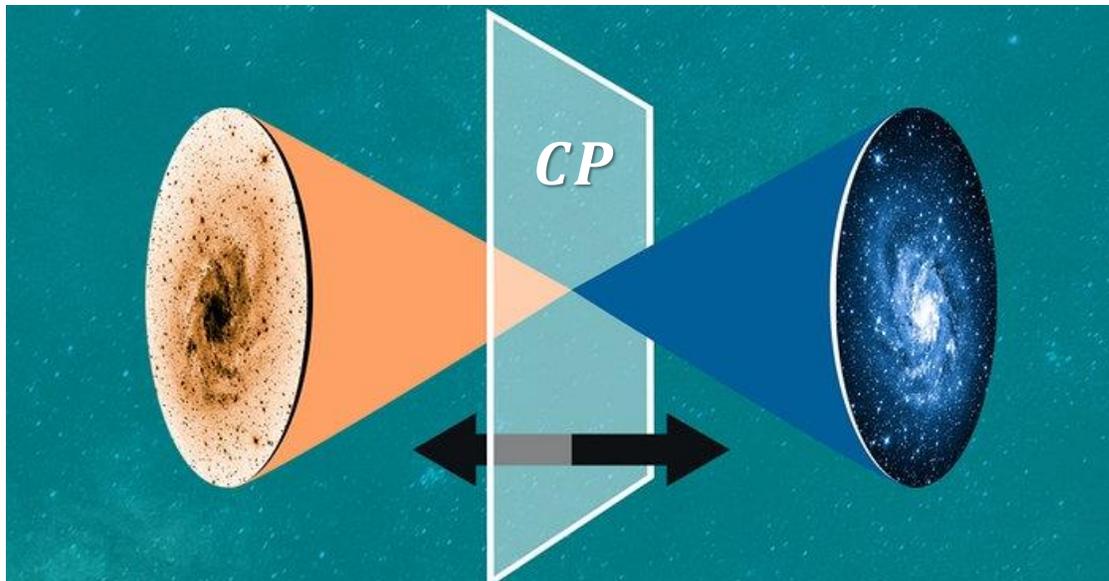
$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

δ = CP –
verletzende
Phase

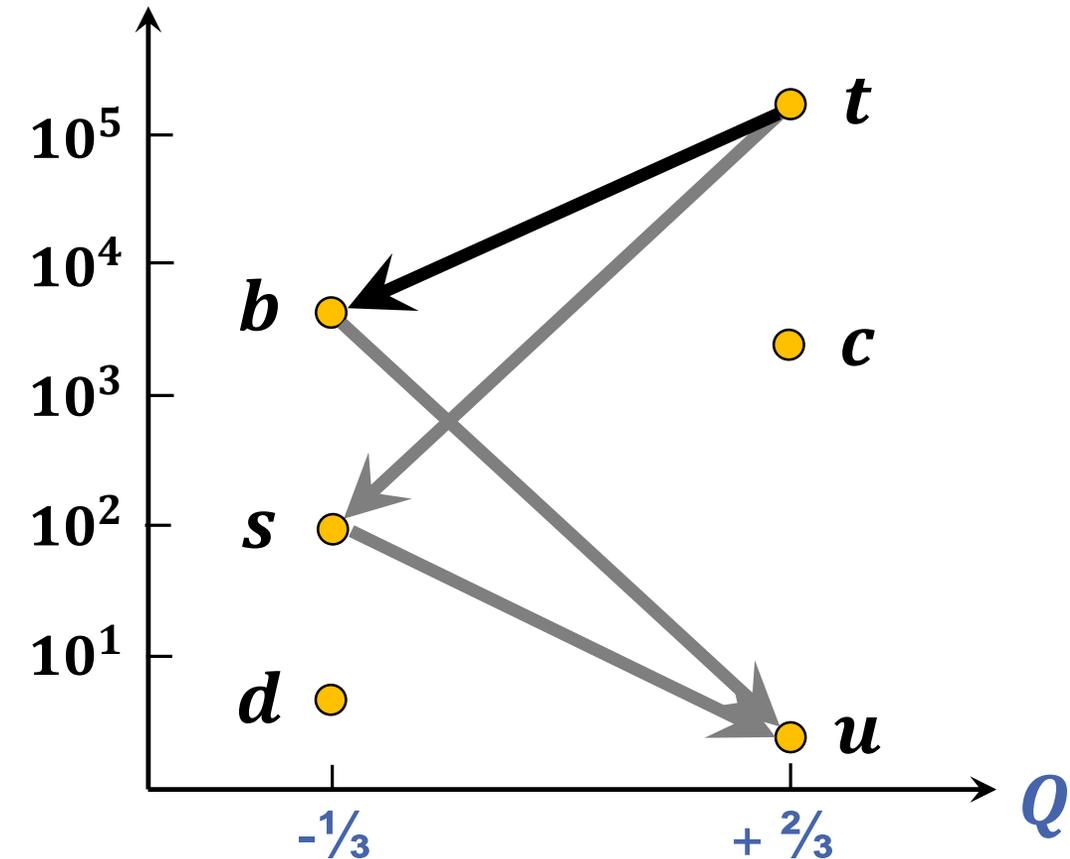
CKM – Mischungsmatrix: Stärke der Übergänge

■ Stärke der Übergänge: Messungen!

- Übergänge bevorzugt in der gleichen Generation, aber auch in benachbarte



Masse $M(\text{MeV})$



CKM – Mischungsmatrix: Stärke der Übergänge

■ Stärke der Übergänge: Messungen!

- Übergänge bevorzugt in der gleichen Generation, aber auch in benachbarte

$$\theta_{12} = (13,04 \pm 0,05)^\circ$$

$$\theta_{23} = (2,38 \pm 0,06)^\circ$$

$$\theta_{13} = (0,201 \pm 0,011)^\circ$$

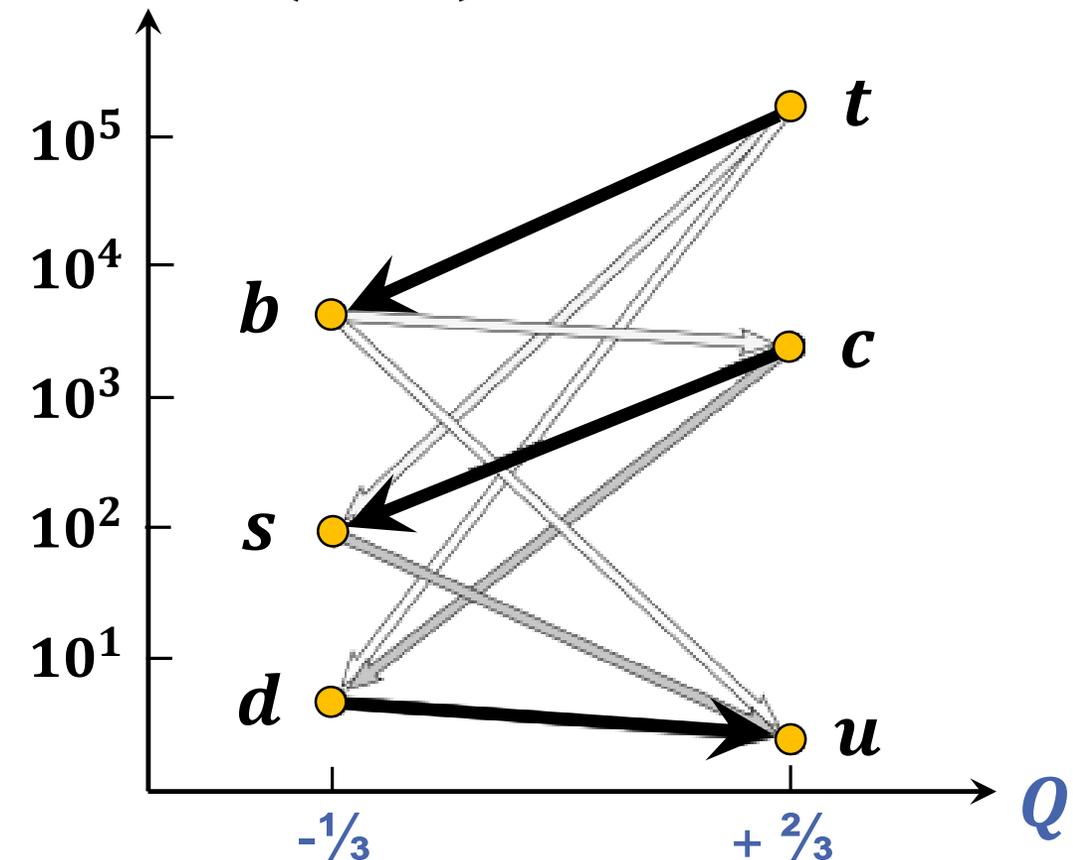
$$\delta = (68,8 \pm 4,5)^\circ$$

ausgeprägt



gering

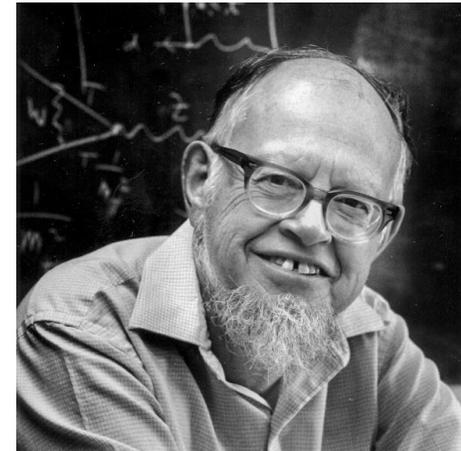
Masse M (MeV)



Quarkmischung, nachgefragt von *Lincoln W.*

■ Welche Aussagen über die Quarkmischung sind korrekt?

- nur der **relative** Mischungswinkel zwischen den Massen- & Flavourzuständen von Quarks ist relevant
- die **Stärke** der Übergänge folgt keinem Ordnungsprinzip & ist **vollkommen stochastisch**
- die **Quarkmischung** könnte man auch im System der up u , charm c und top t Quarks parametrisieren
- die Quarkmischung muss in **jedem Fall unitär** sein, Abweichungen beruhen auf experimentellen Fehlern

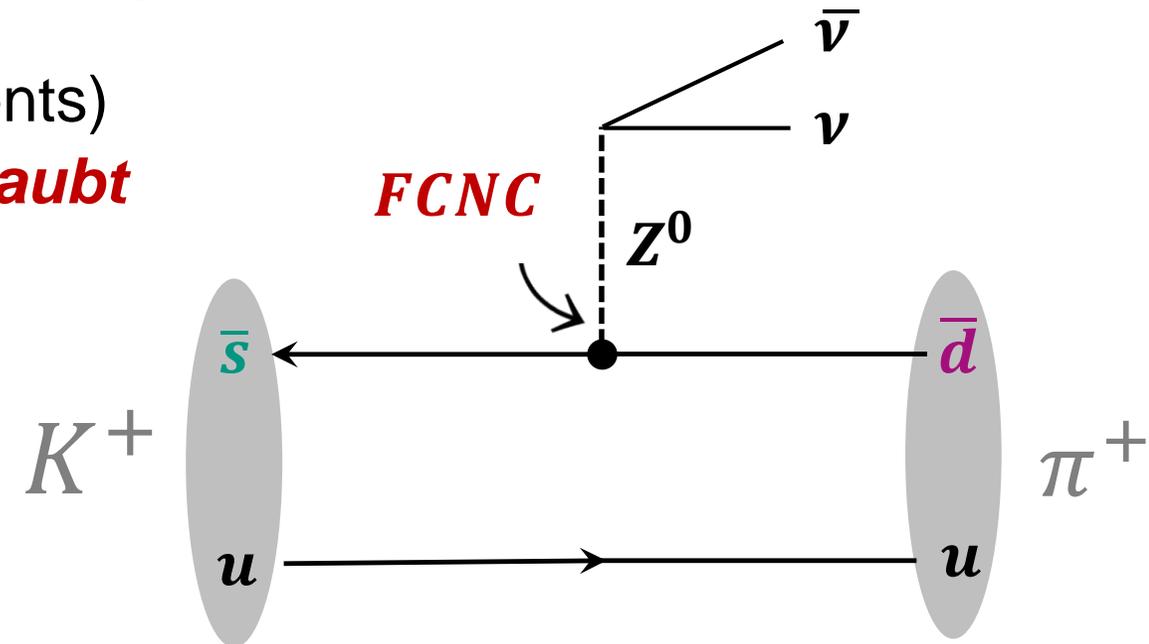
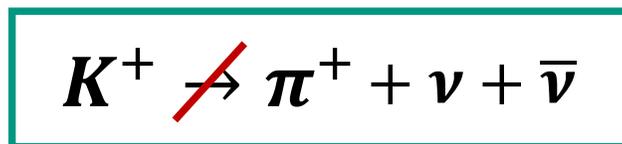


Sheldon Glashow

GIM – Mechanismus & das Fehlen von FCNC

■ Glashow, Iliopoulos & Maiani (GIM) untersuchen Zerfallsprozesse von K^+

- Beobachtung: Prozesse schwacher **neutraler Ströme (NC)** führen **NICHT** zu einer Strangeness– (Flavour–) Änderung
- **FCNC** (**F**lavour **C**hanging **N**eutral **C**urrents) Prozesse via Z^0 – Austausch **nicht erlaubt**
- Beispiel eines (**verbotenen!**) **FCNC**: Zerfall des K^+



GIM – Mechanismus & das Fehlen von FCNC

■ Glashow, Iliopoulos & Maiani (GIM) betrachten Box–Diagramme

- Prozesse schwacher neutraler Ströme (NC) können auch durch sog. **Box–Diagramme** übertragen werden: Austausch eines W^+W^- Paares

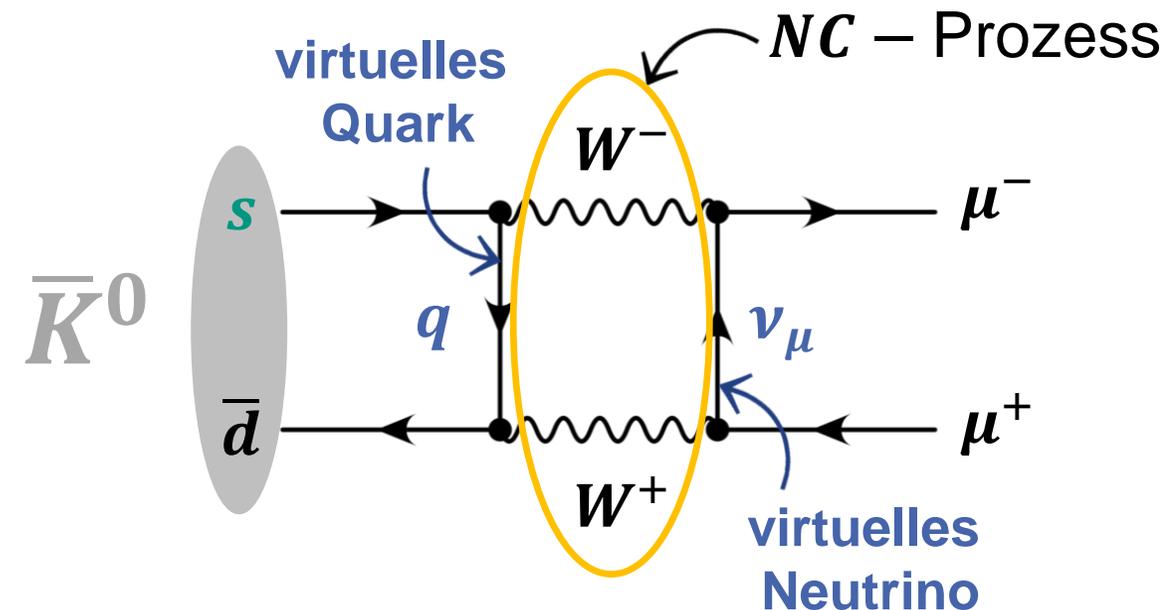
- Beispiel eines (unterdrückten!) FCNC :

$$\bar{K}^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$

- FCNC bei diesen Prozessen **stark unterdrückt** !

$$\Gamma = 6,84 \cdot 10^{-9}$$

(für K_L)



der seltene Zerfallsmodus $\bar{K}^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

■ ein Boxdiagramm weist den Weg

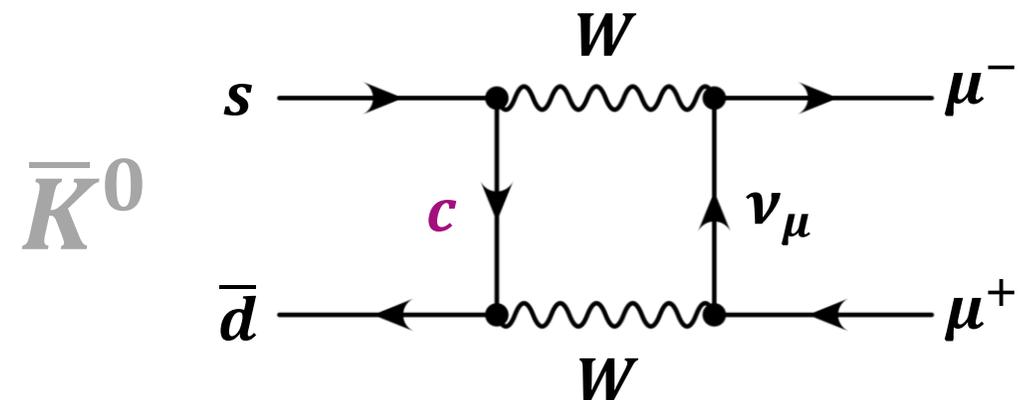
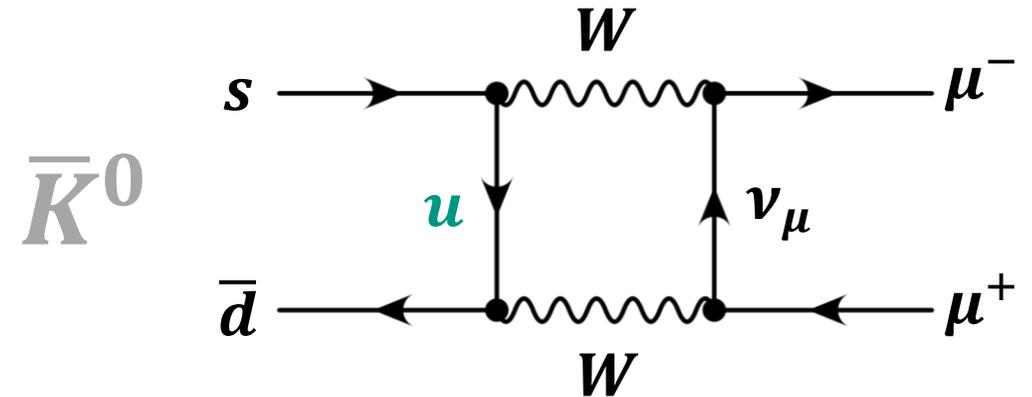
- **Boxdiagramme** für Zerfall:

die Feynman–Diagramme für den Austausch eines virtuellen u

bzw. c zeigen ein entgegengesetztes Vorzeichen! (\Rightarrow **destruktive Interferenz**)

$$\sin\theta_c \cdot \cos\theta_c + \cos\theta_c \cdot (-\sin\theta_c)$$

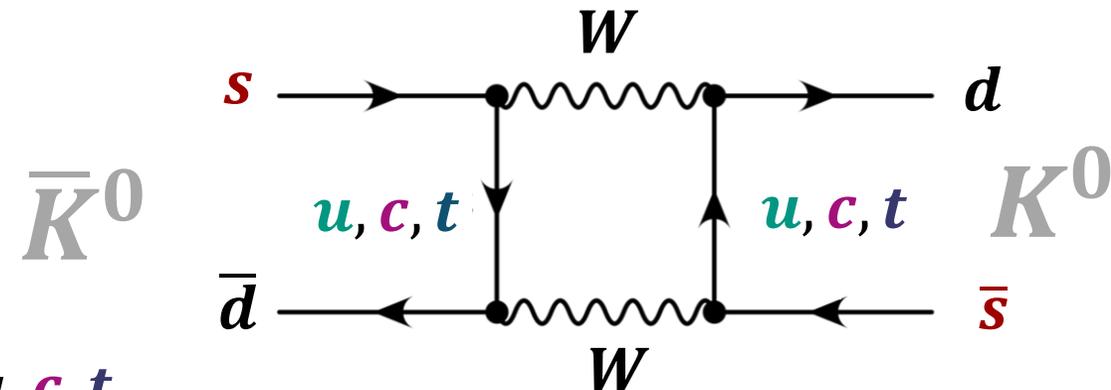
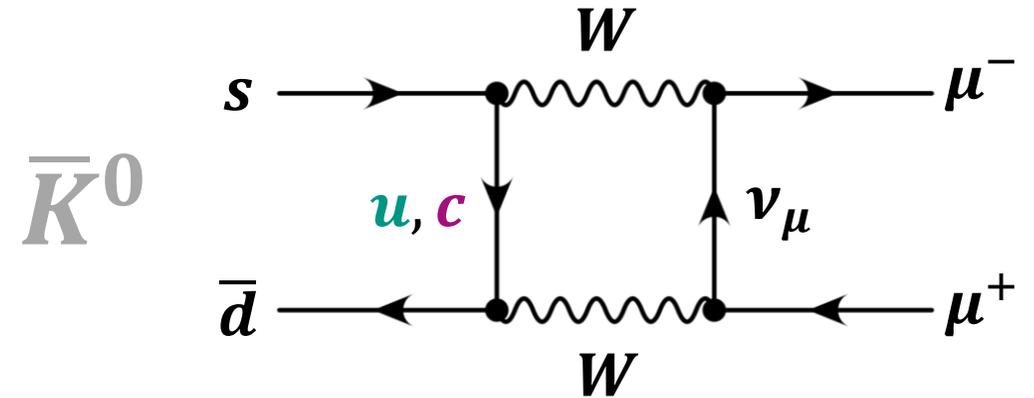
\Rightarrow gegenseitige Aufhebung der Amplituden (keine **FCNC**)

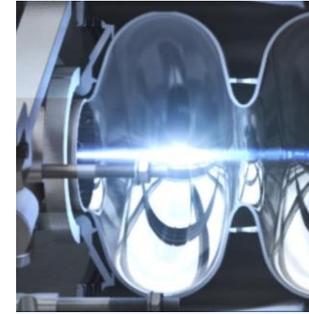


der seltene Zerfallsmodus $\bar{K}^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

■ ein Boxdiagramm weist den Weg

- bei ungebrochener Flavour-Symmetrie von u, c löschen sich die Amplituden **vollständig** aus
- durch die unterschiedlichen Massen von u, c (**gebrochene Symmetrie**) sind die Amplituden unterschiedlich:
 \Rightarrow für $m(c) \sim GeV$ gute Übereinstimmung
- ähnliche Box-Diagramme ($\Delta S = 2$) auch für $K^0 \leftrightarrow \bar{K}^0$ Oszillationen* mit virtuellen u, c, t



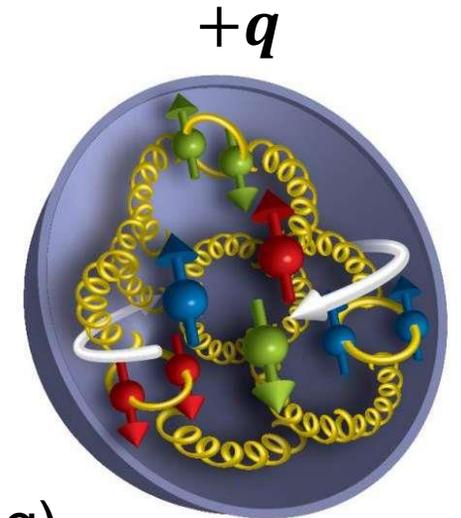


KAPITEL 8: MODERNE TEILCHENPHYSIK

Entwicklung von Beschleunigern

■ Hadron– und Lepton– Collider im Vergleich

- **Proton als zusammengesetztes Teilchen mit hadronischen Reaktionen:**
Partonen – Valenzquarks, Seequarks & Partonen,
alle mit spezifischem **Björken-Impulsanteil x**
- breite Verteilung der Stoßprozesse:
viele Ereignisse bei kleinem **Björken-Impulsanteil x**
nur wenige Ereignisse bei großem **Björken-Impulsanteil x**
- große Masse m_p , daher kaum radiative Verluste
⇒ **hohe Energien möglich** (d.h. keine Synchrotronstrahlung)
- ideale **'discovery machines'**, weniger geeignet für 'höchste Präzision'



Entwicklung von Beschleunigern

■ Hadron– und **Lepton**– Collider im Vergleich

- **Elektron als elementares Teilchen mit elektromagnet. Reaktionen:**
punktförmig, keine sub–Struktur, volle Strahlenergie



- sehr genau definierte Kollisionskinematik bei \sqrt{s}

- kleine Masse m_e , daher große radiative Verluste
bei hohen Energien (d.h. **Emission von Synchrotronstrahlung**)



- limitiert in Energie ($E_{max} = 209 \text{ GeV}$ am **LEP**), d.h. seit langem
keine 'discovery machines' mehr für (neue) schwere Teilchen,
besser geeignet für **höchste Präzisionsphysik**

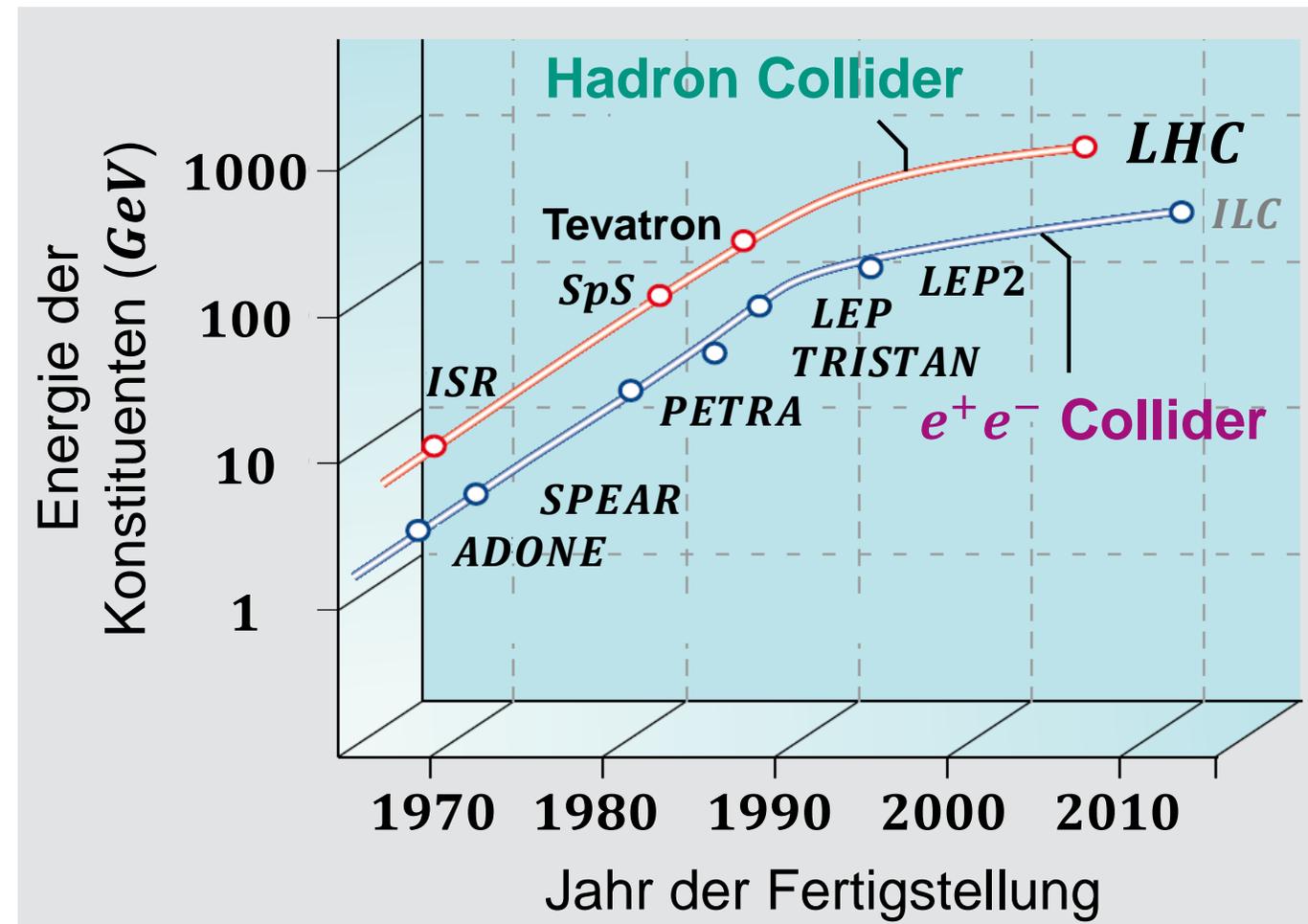
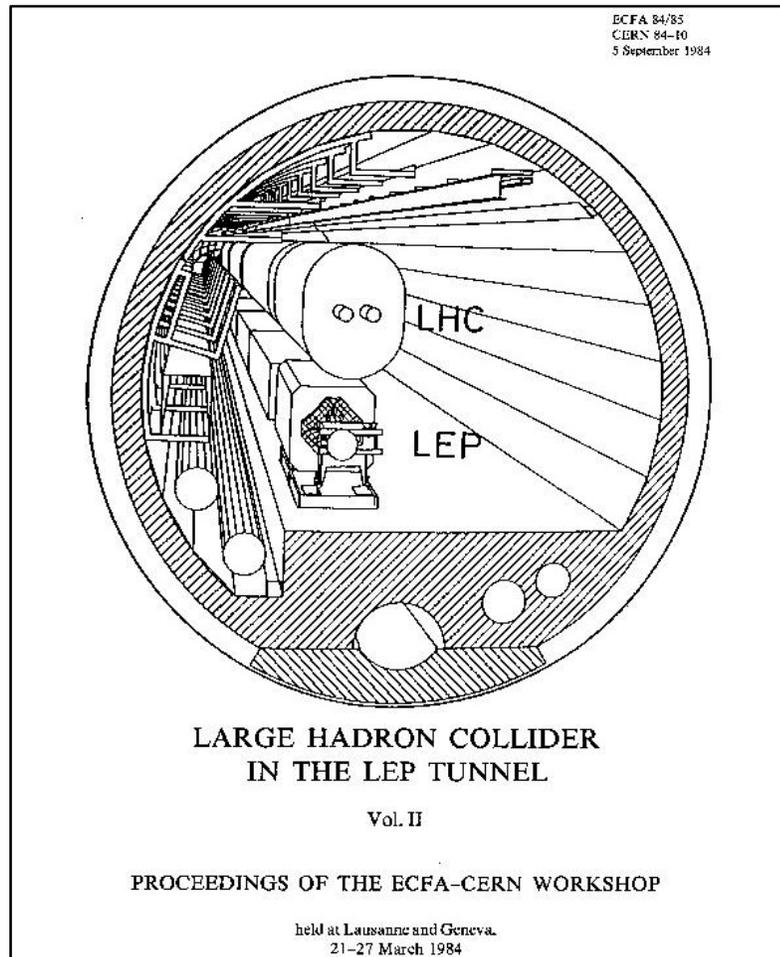
$-q$



$+q$

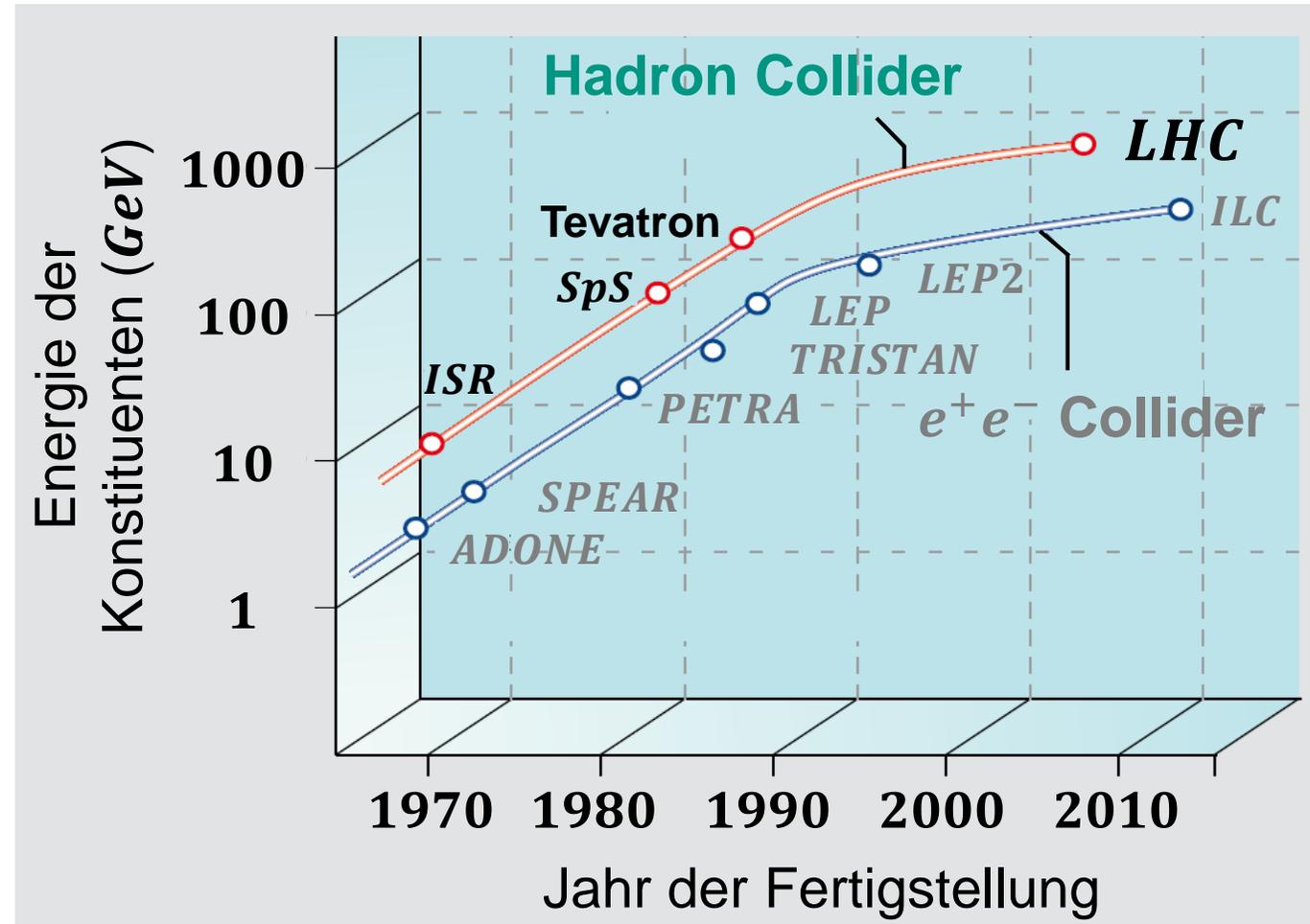
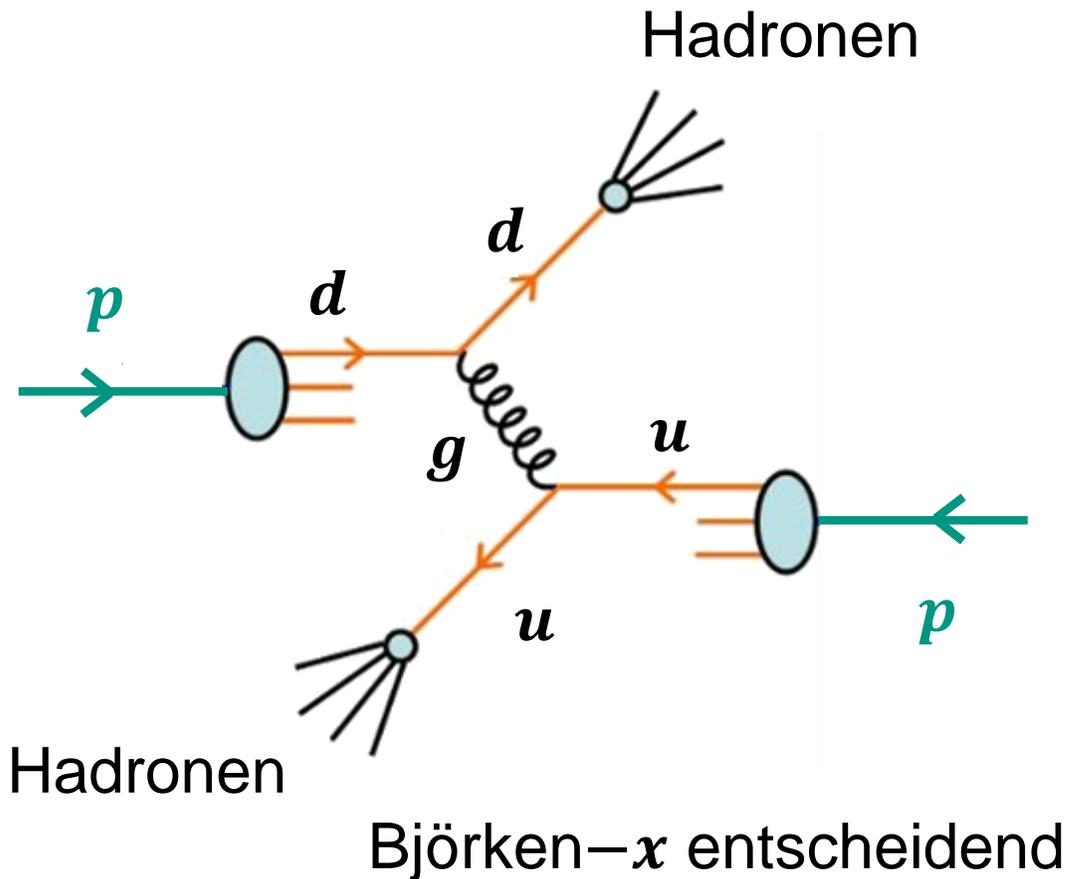
Entwicklung von Beschleunigern: Strahlenergie

- Auf dem Weg zu immer höheren Schwerpunkt – Energien \sqrt{s}



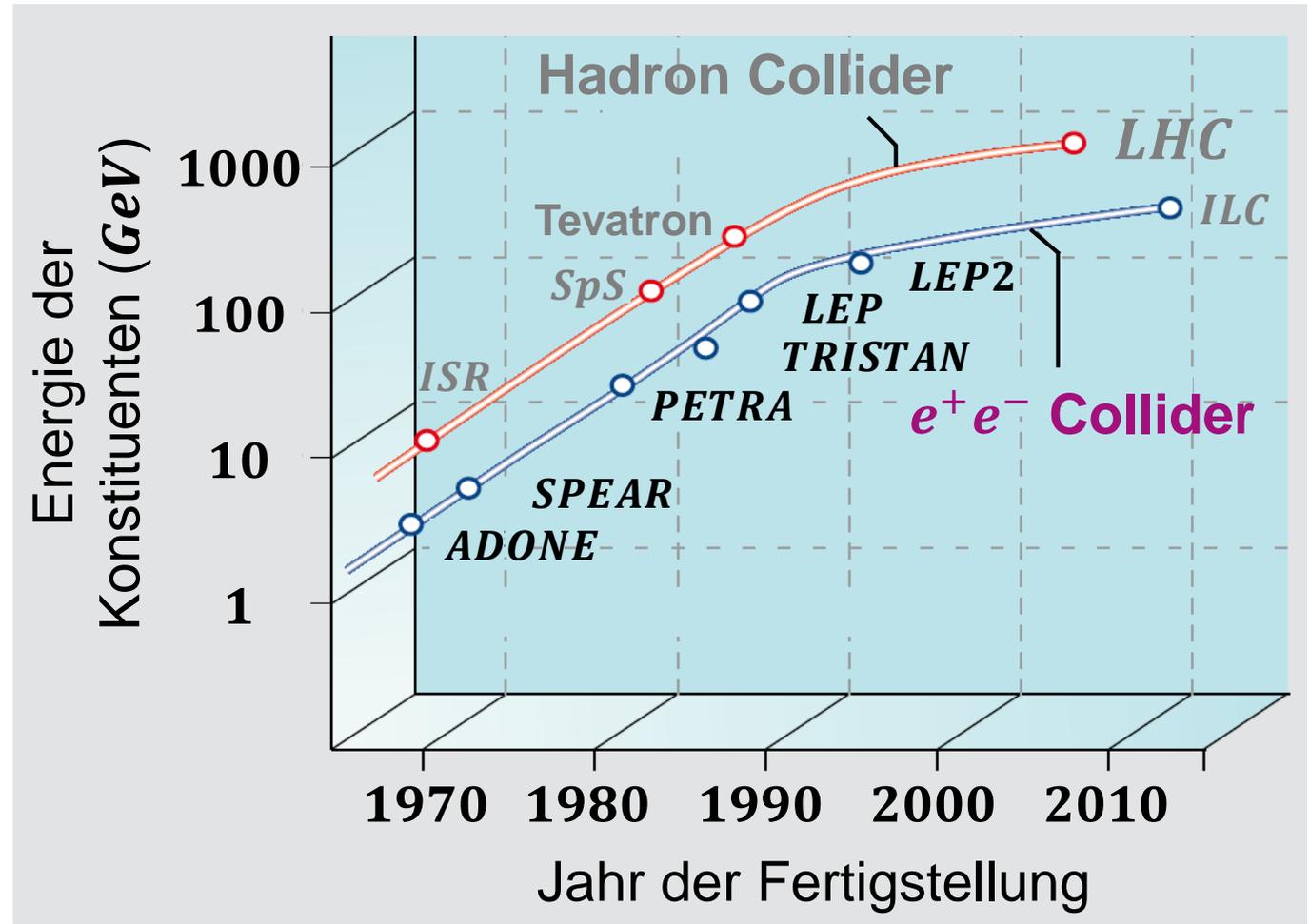
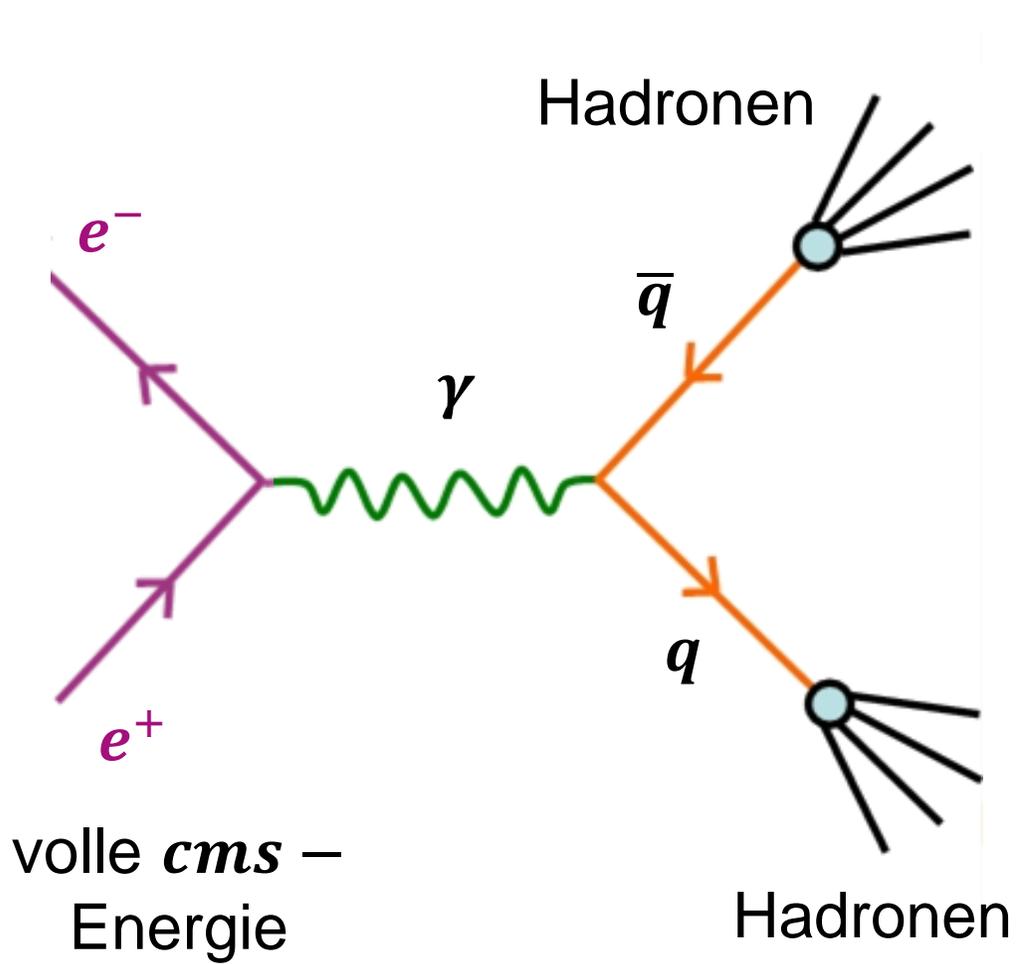
Entwicklung von Hadron-Beschleunigern

■ Kinematik der Parton–Streuprozesse an pp – Collidern



Entwicklung von Beschleunigern: Strahlenergie

■ Kinematik der $e^+ - e^-$ Streuprozesse an Lepton - Collidern



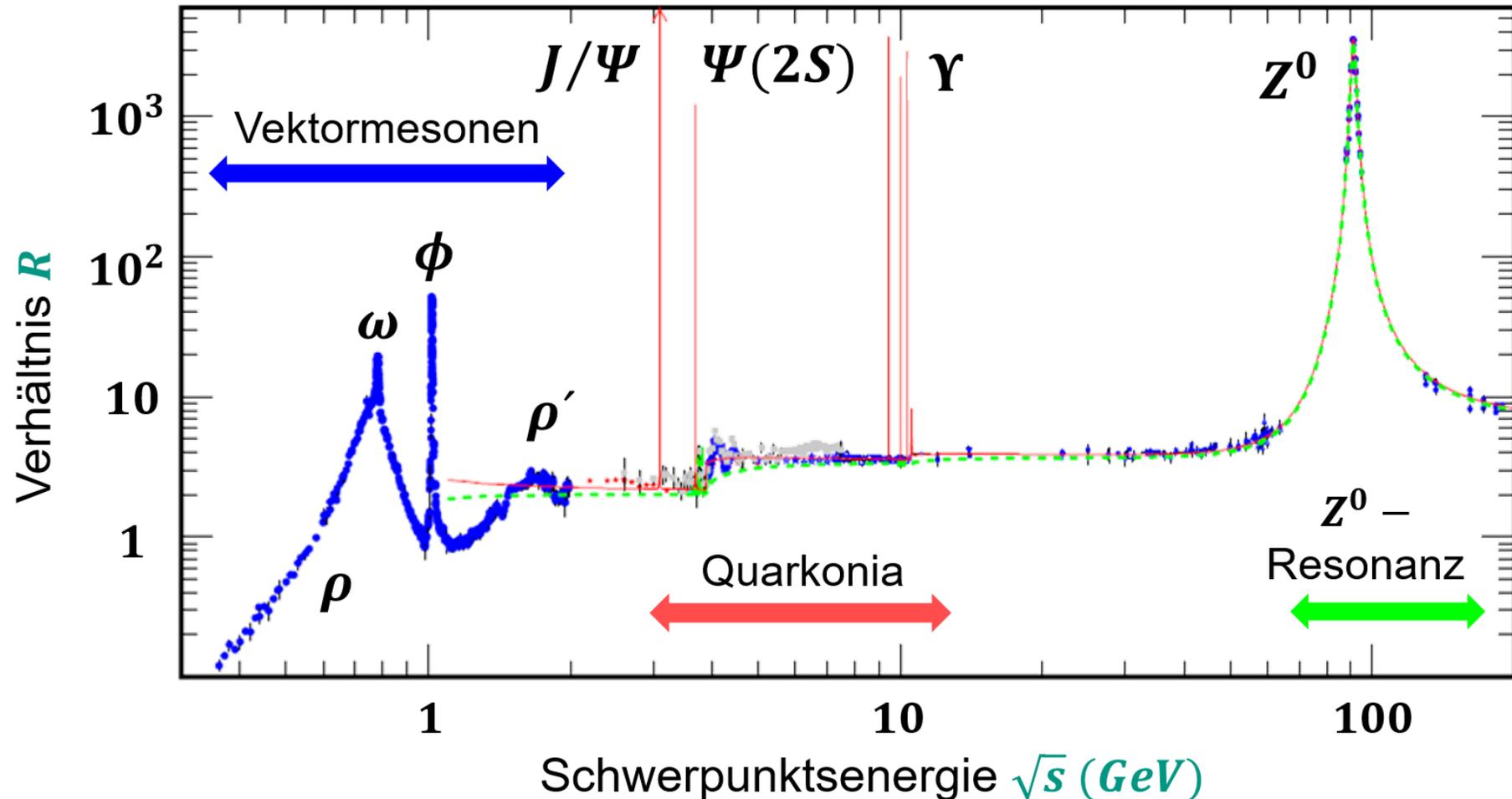
Entwicklung von Beschleunigern: Strahlenergie

■ Kinematik der $e^+ - e^-$ Streuprozesse: Photon ist ein 1^- Zustand (Boson)

- Recap: nur Erzeugung von Vektormesonen mit 1^-

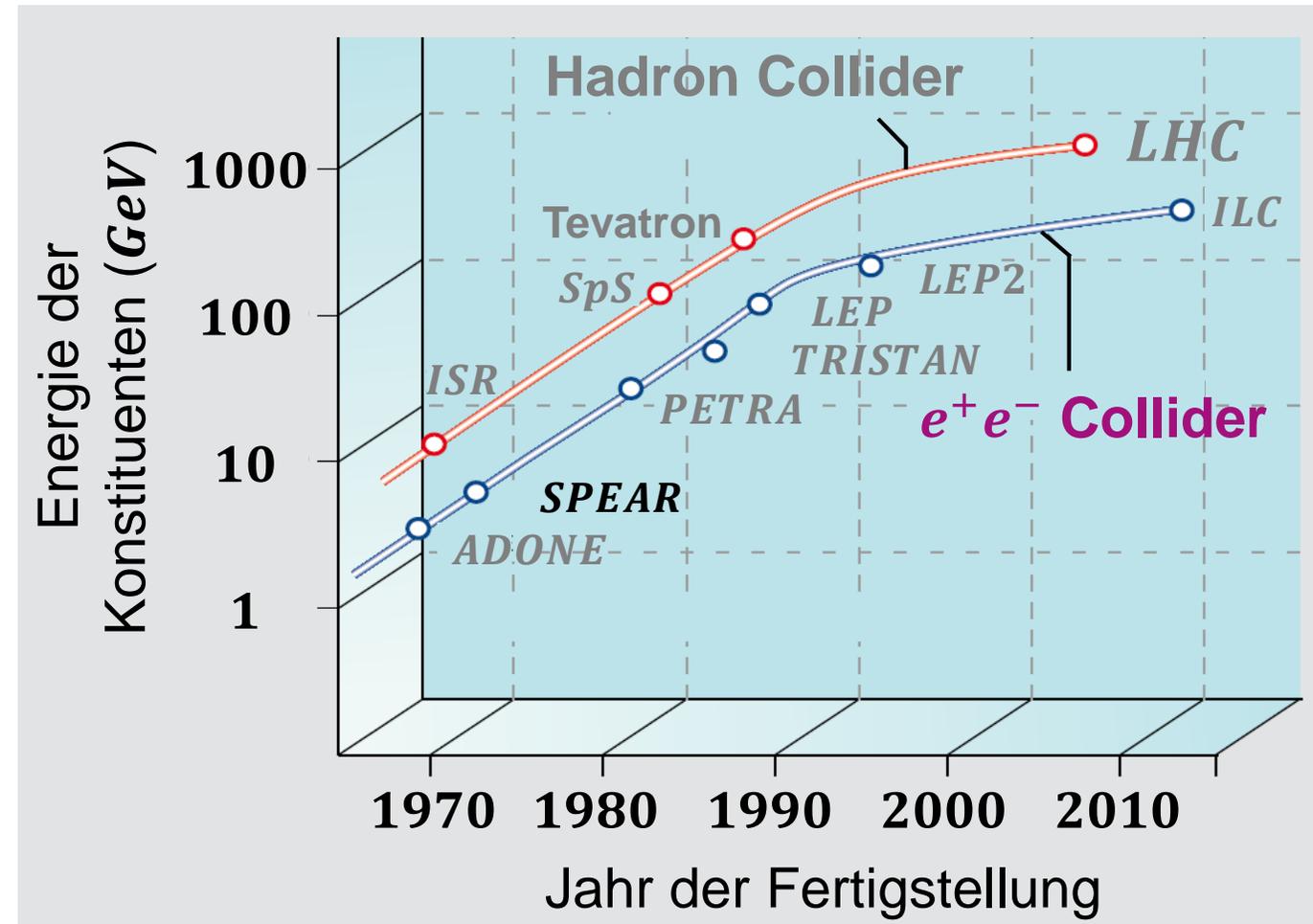
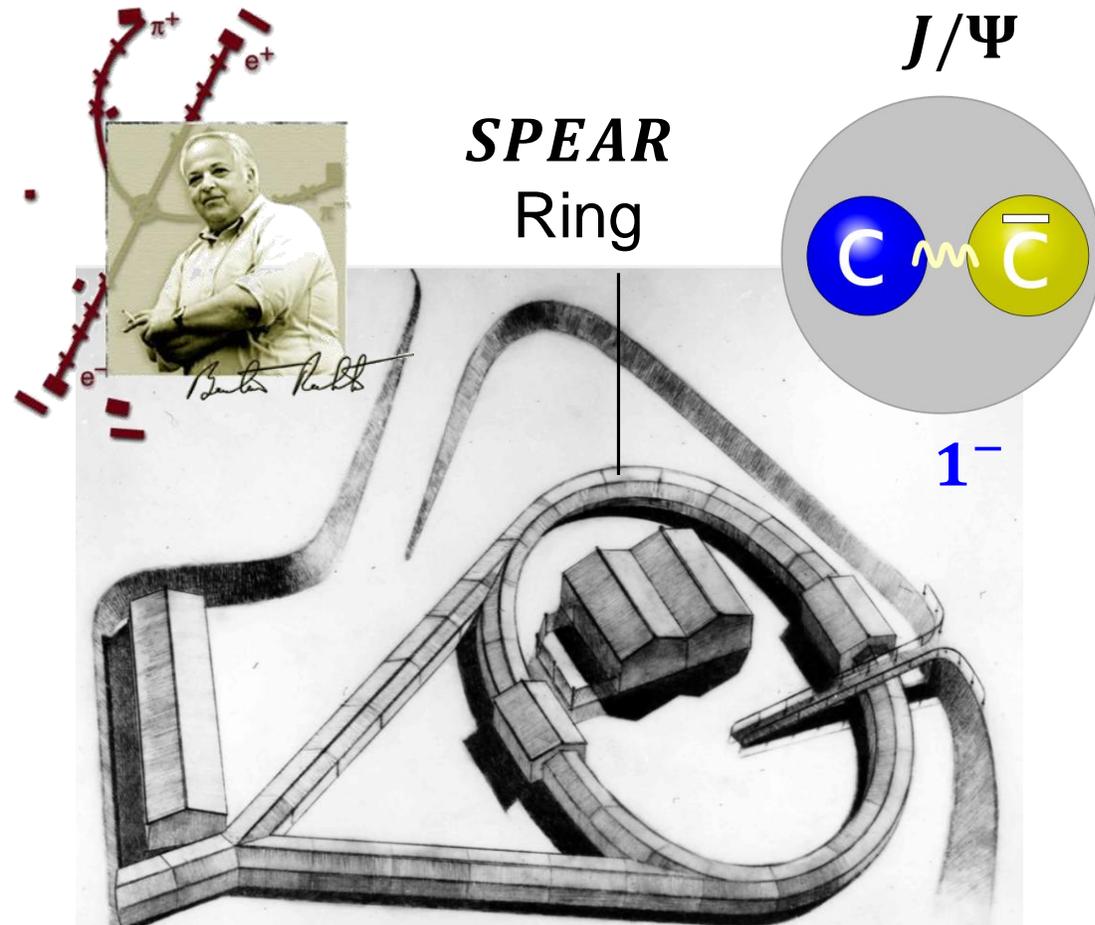
$\rho, \omega, \phi, \rho'$

Quarkonia
 $J/\Psi, \Upsilon$ und Anregungen



Entwicklung von Beschleunigern: Strahlenergie

■ Kinematik der $e^+ - e^-$ Streuprozesse an Lepton – Collidern: *SPEAR*

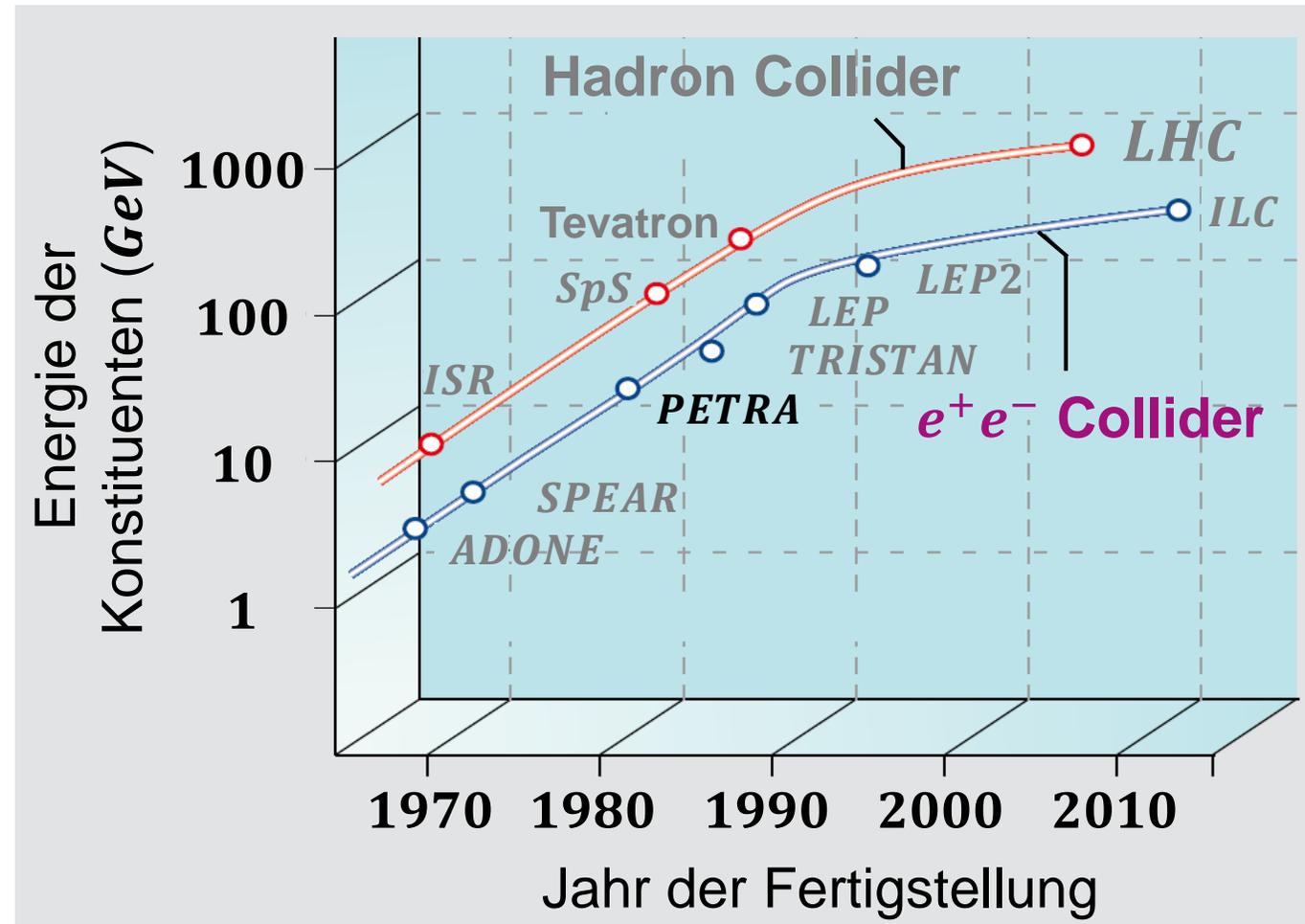


Entwicklung von Beschleunigern: Strahlenergie

■ Kinematik der $e^+ - e^-$ Streuprozesse an Lepton – Collidern: *PETRA**

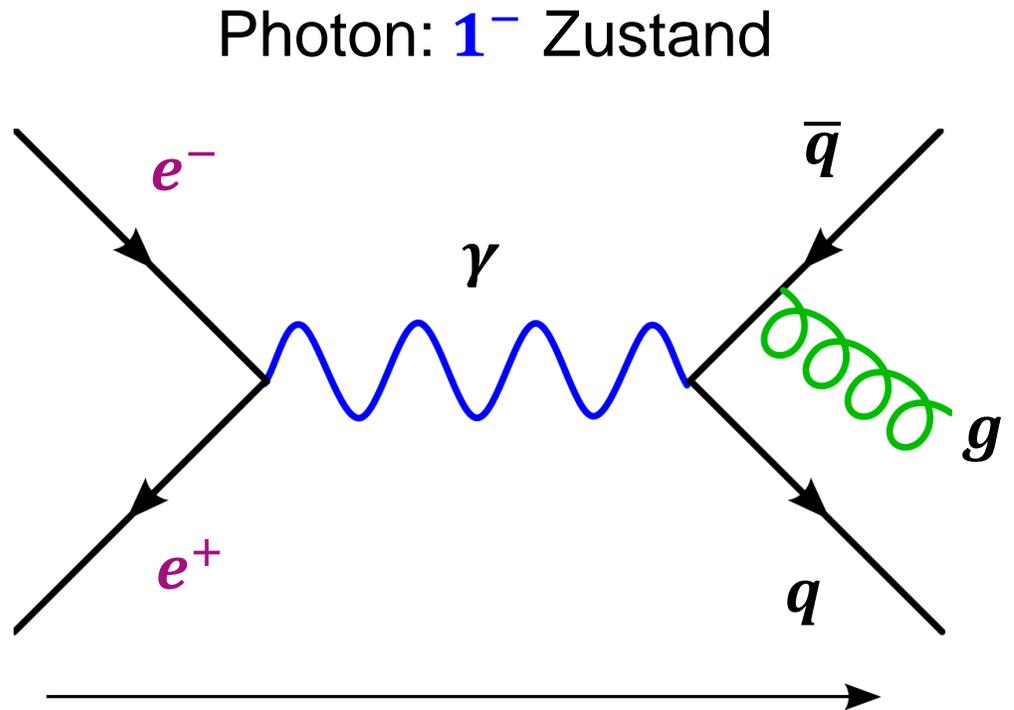


Deutsches Elektronen-Synchrotron *DESY*

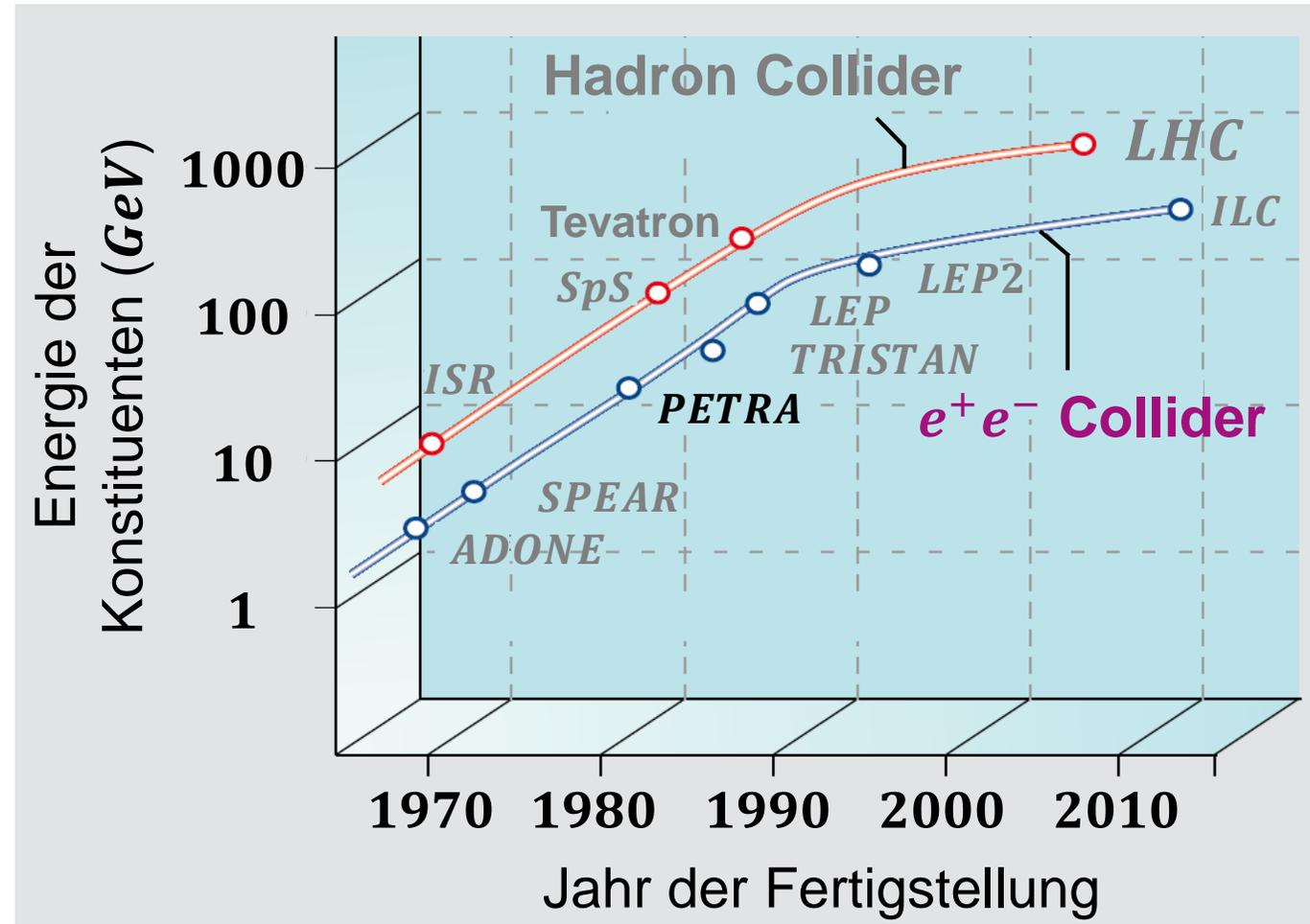


Entwicklung von Beschleunigern: Strahlenergie

■ Kinematik der $e^+ - e^-$ Streuprozesse an Lepton – Collidern: *PETRA*

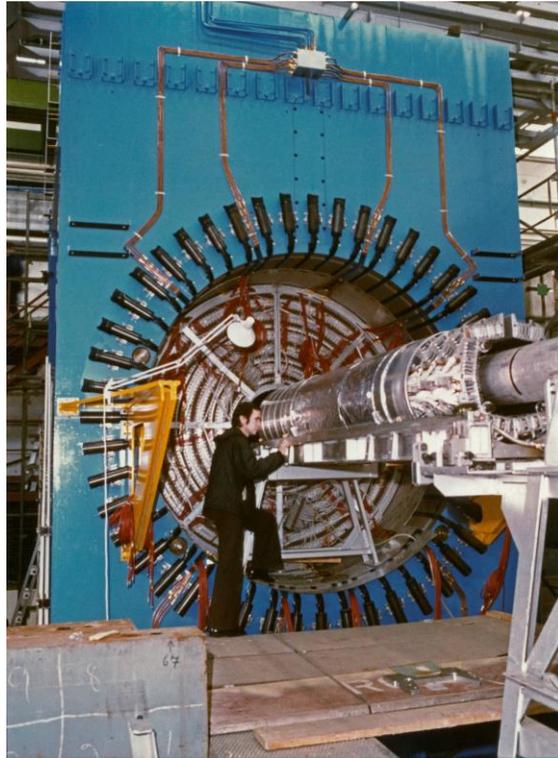
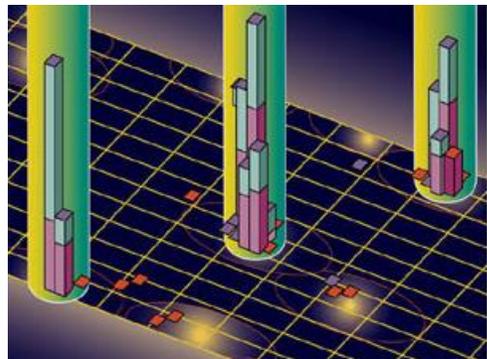
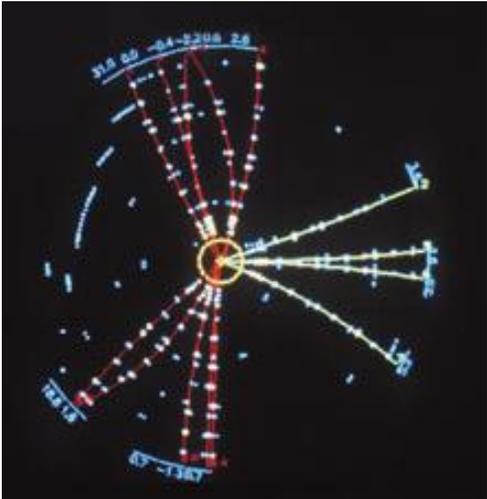


Entdeckung des Gluons (3 Jets)



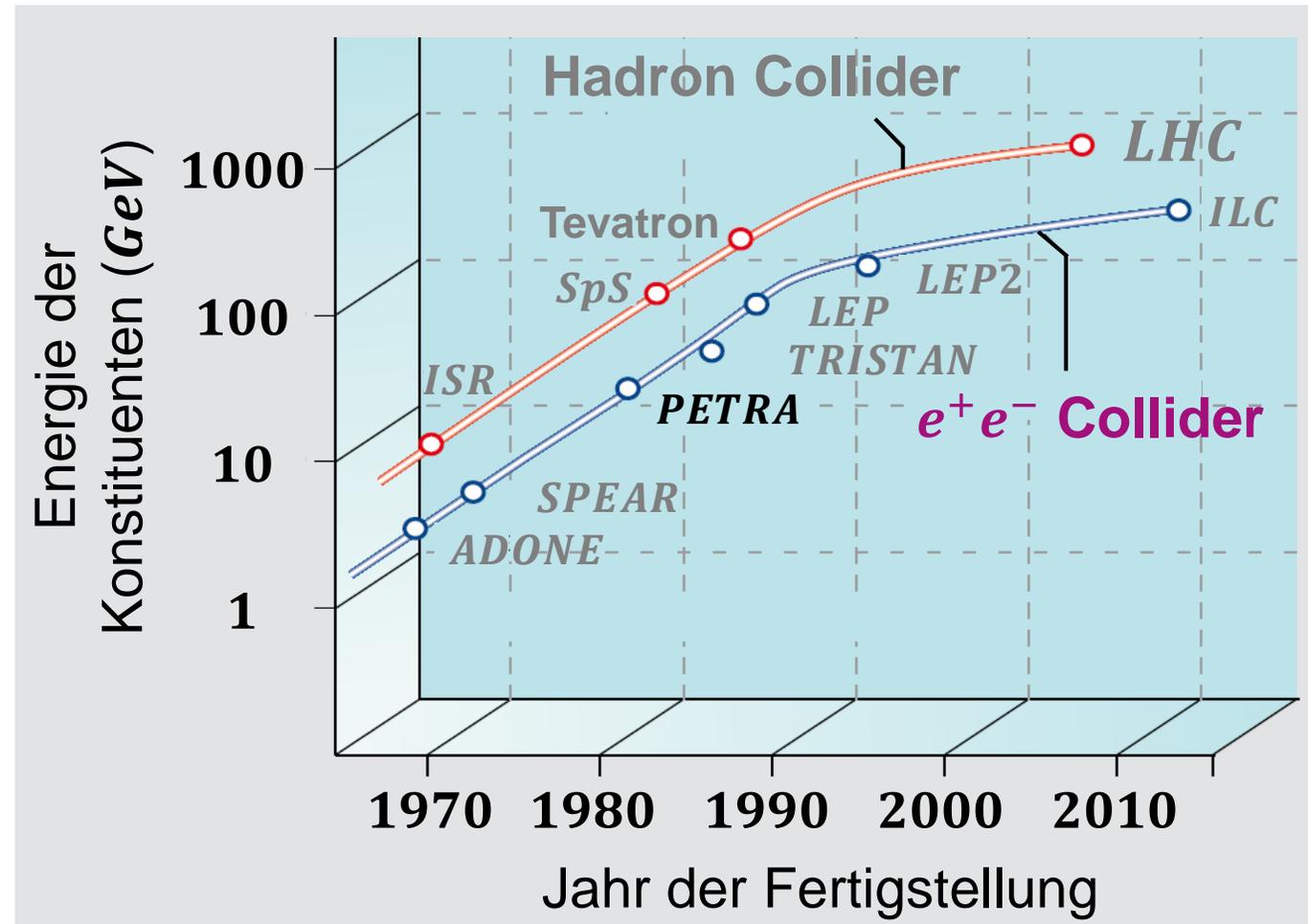
Entwicklung von Beschleunigern: Strahlenergie

■ Kinematik der $e^+ - e^-$ Streuprozesse an Lepton – Collidern: *PETRA*



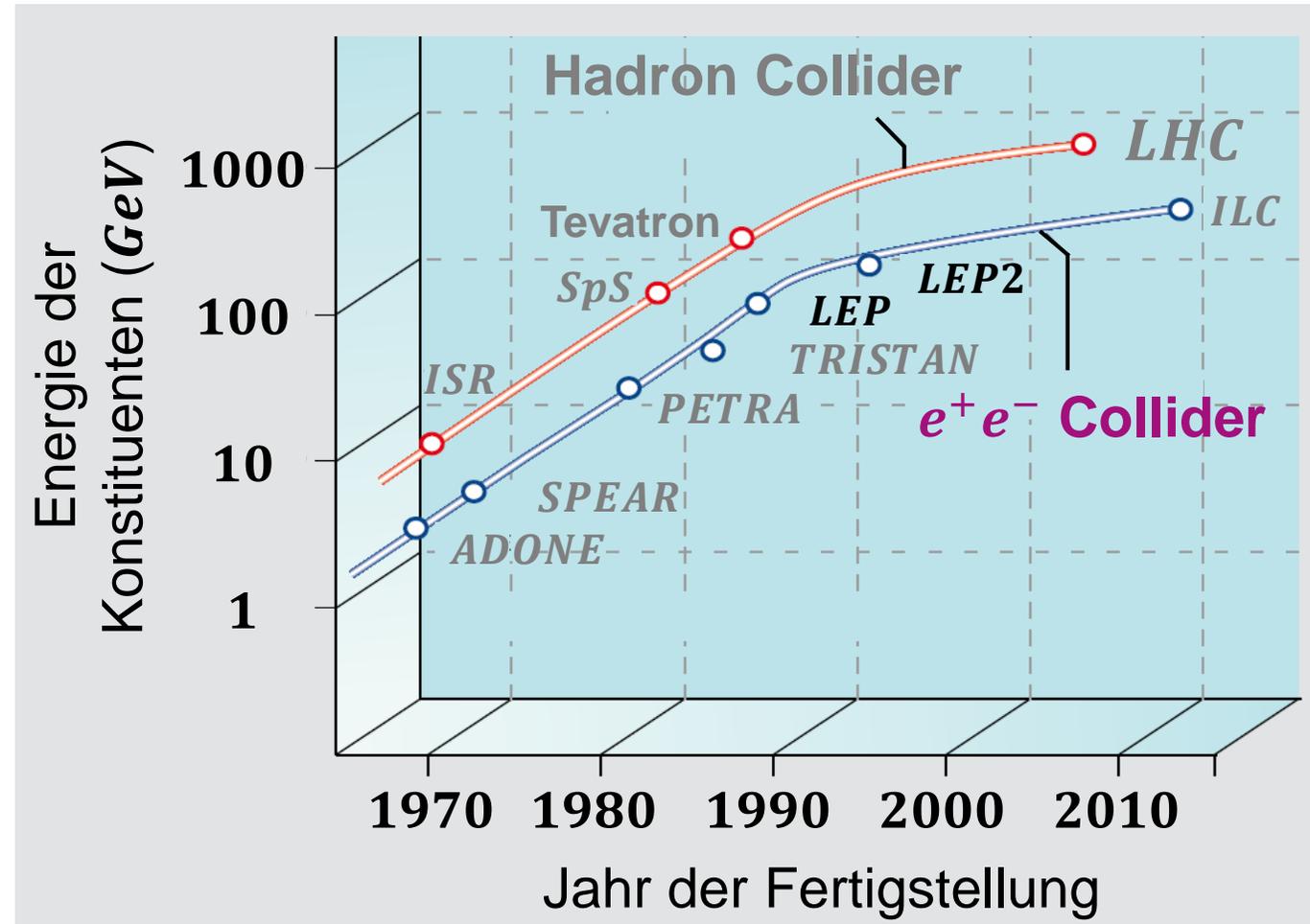
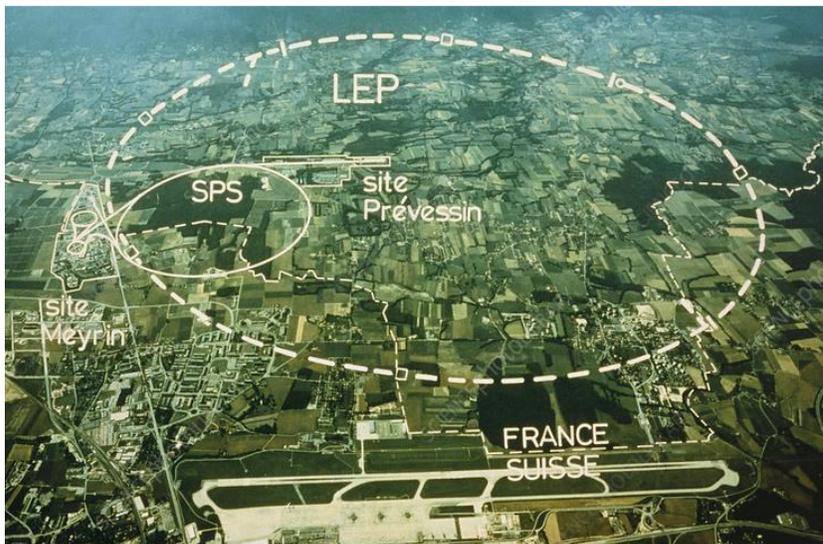
TASSO Detektor

Entdeckung des Gluons (3 Jets)



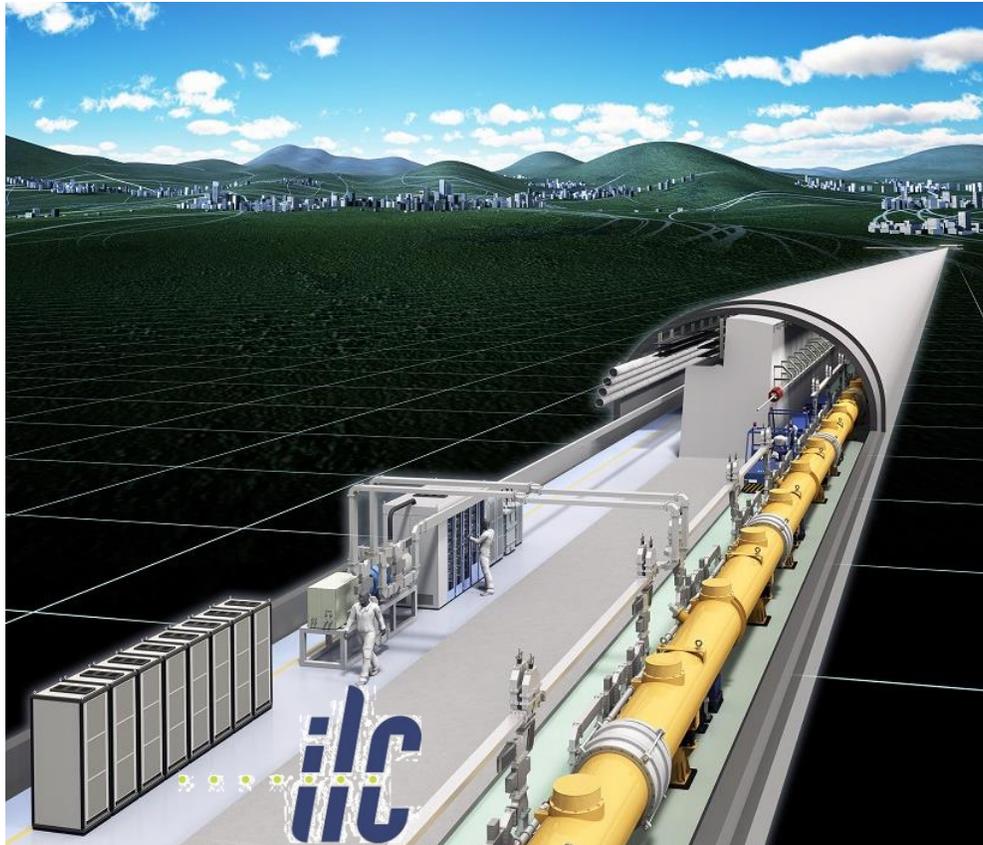
Entwicklung von Beschleunigern: Strahlenergie

■ Lepton – Collider: *LEP/LEP2* am *CERN*

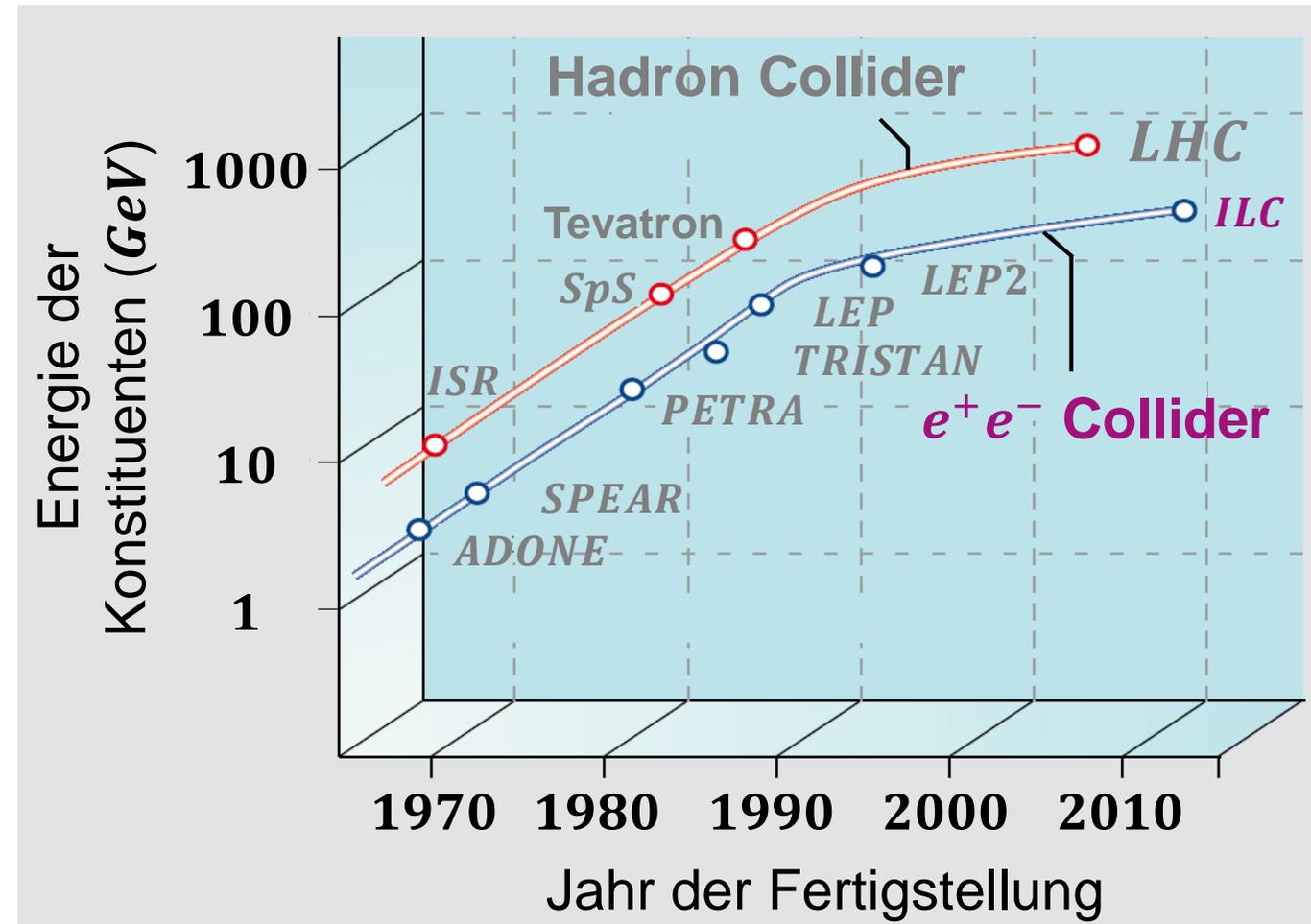


Entwicklung von Beschleunigern: Strahlenergie

■ Lepton – Collider: *International Linear Collider ILC* (?)



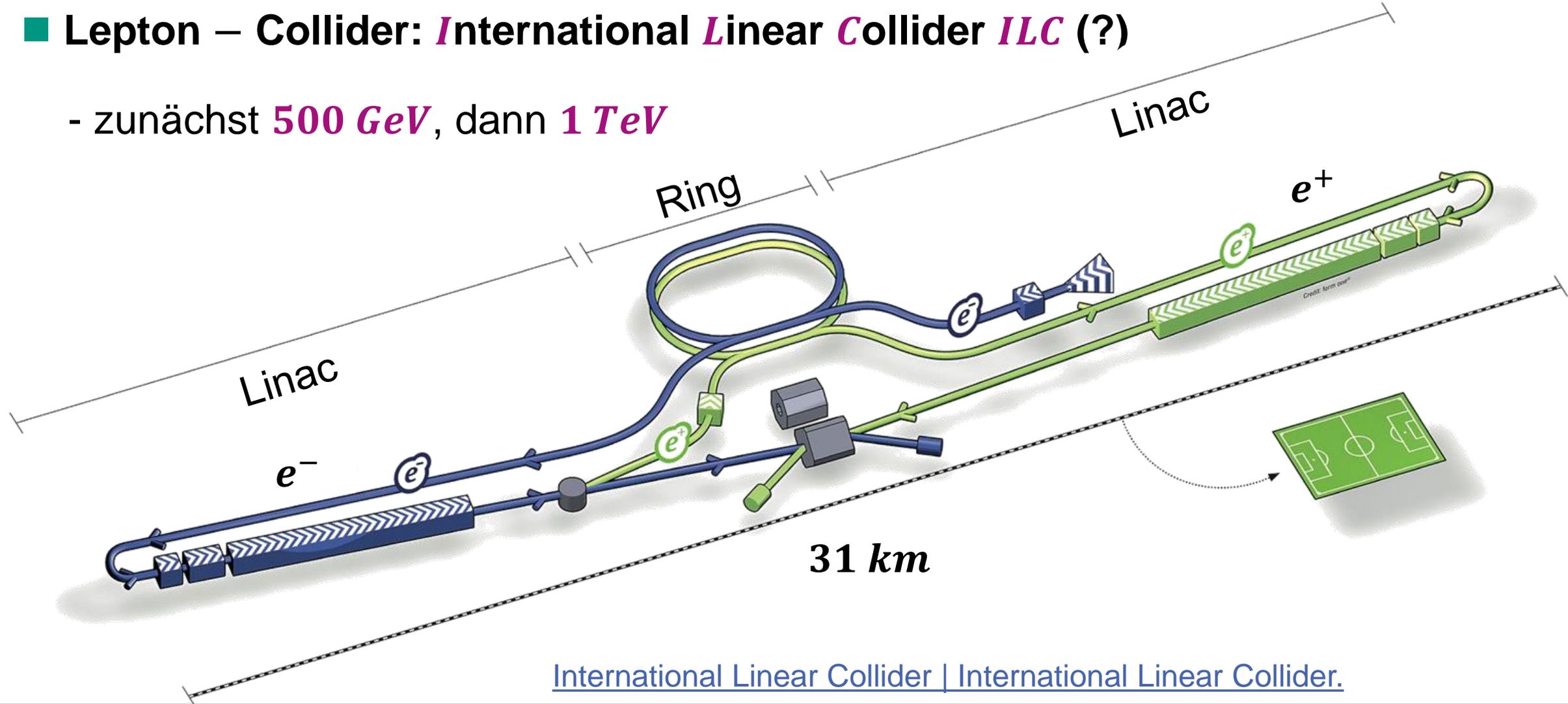
international linear collider

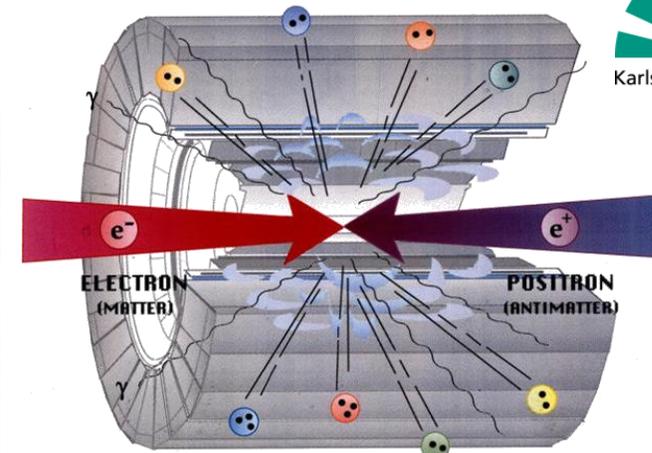
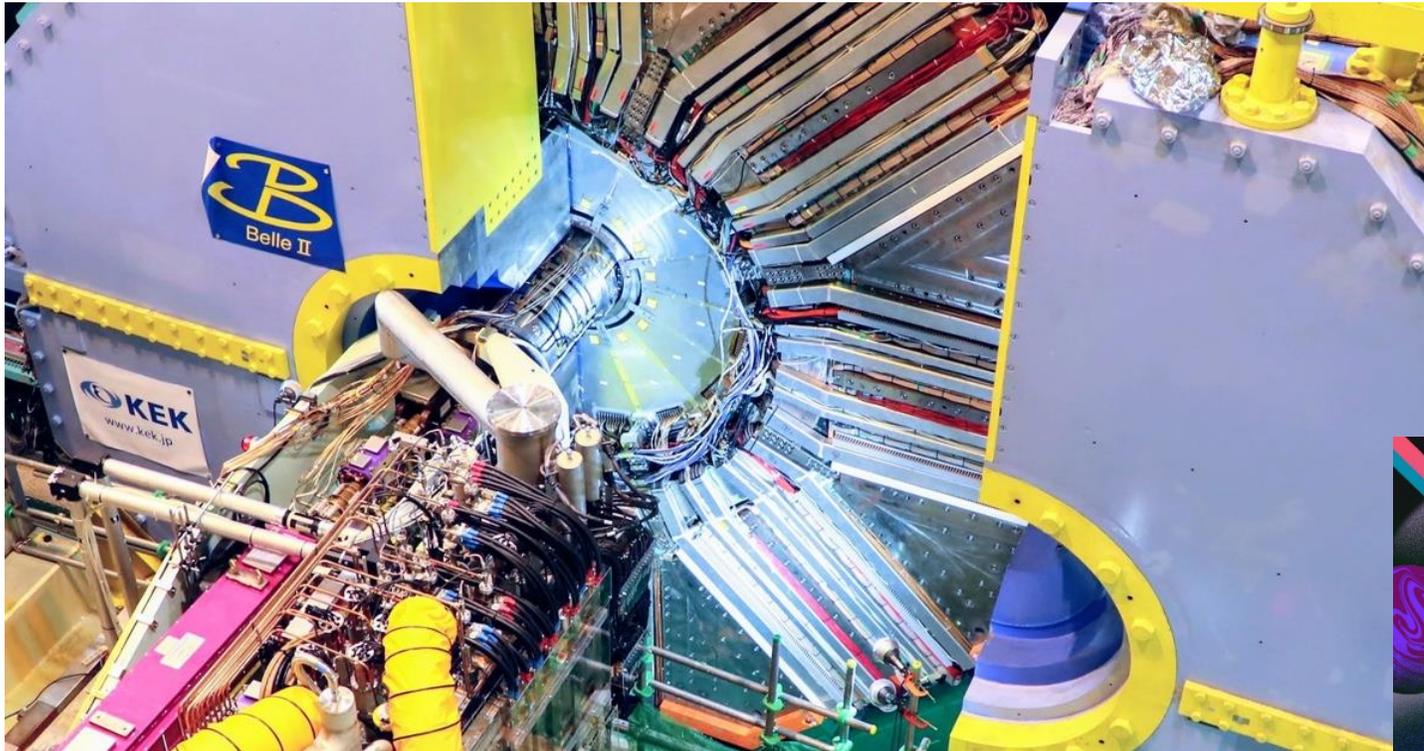


Entwicklung von Beschleunigern: Strahlenergie

■ Lepton – Collider: *International Linear Collider ILC* (?)

- zunächst *500 GeV*, dann *1 TeV*



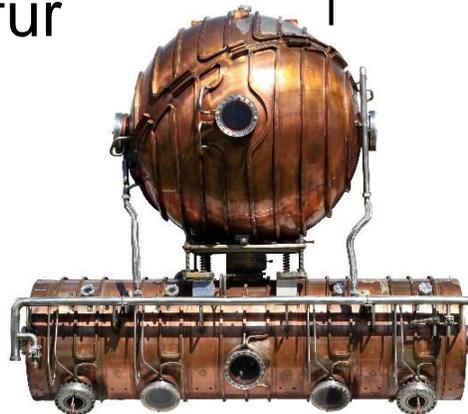
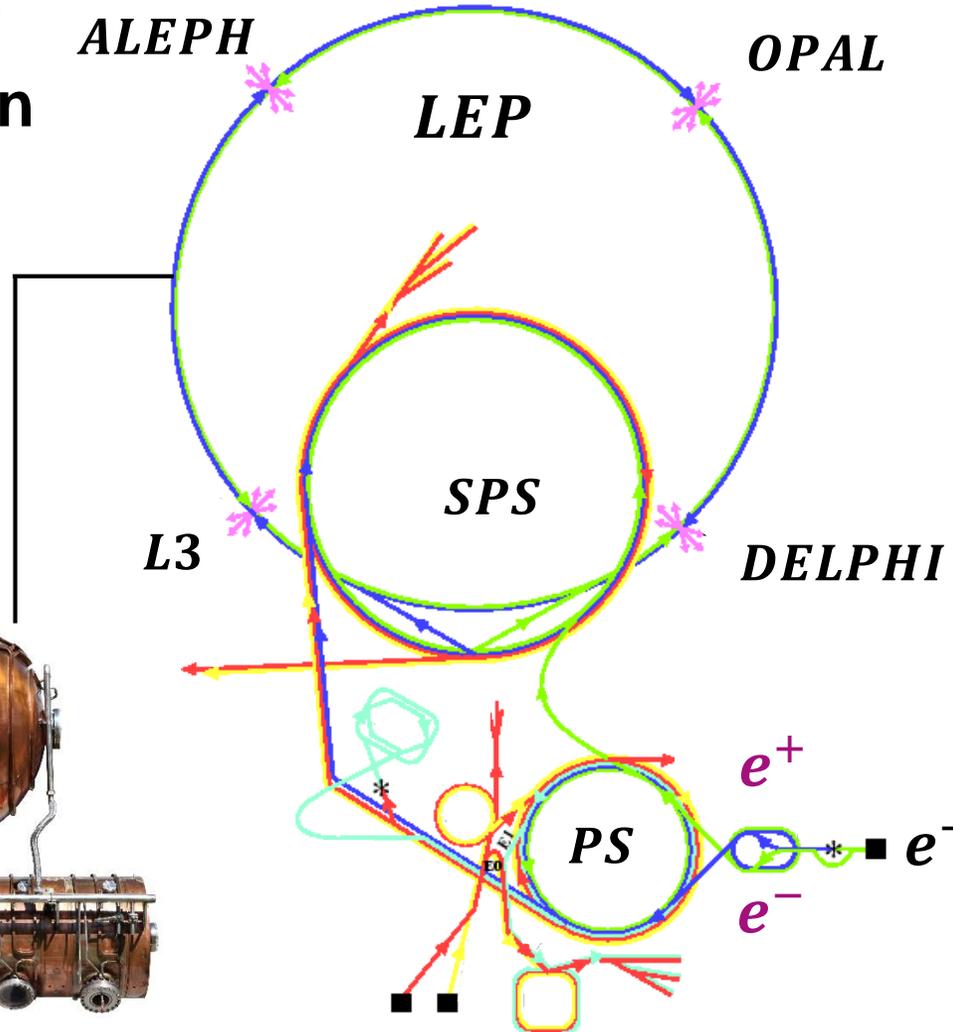


KAPITEL 8.1 : PRÄZISIONSPHYSIK AN e^+e^- COLLIDERN

Elektron–Positron Collider: *LEP*

■ *LHC* – ‘Vorgänger’: *LEP* Large *E*lectron–*P*ositron Collider

- Betrieb: 1989 – 2000
(gebaut: 1983 ... 1988)
- Ring mit 27 *km* Umfang,
heute genutzt für
den *LHC*



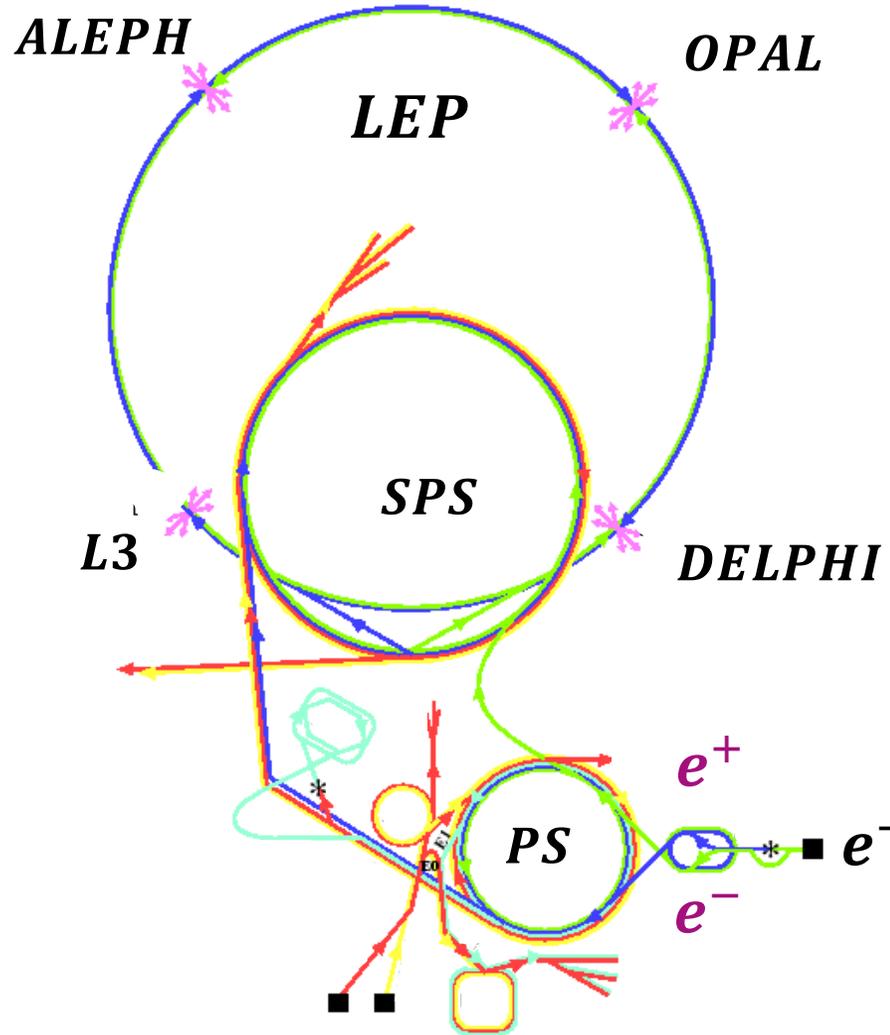
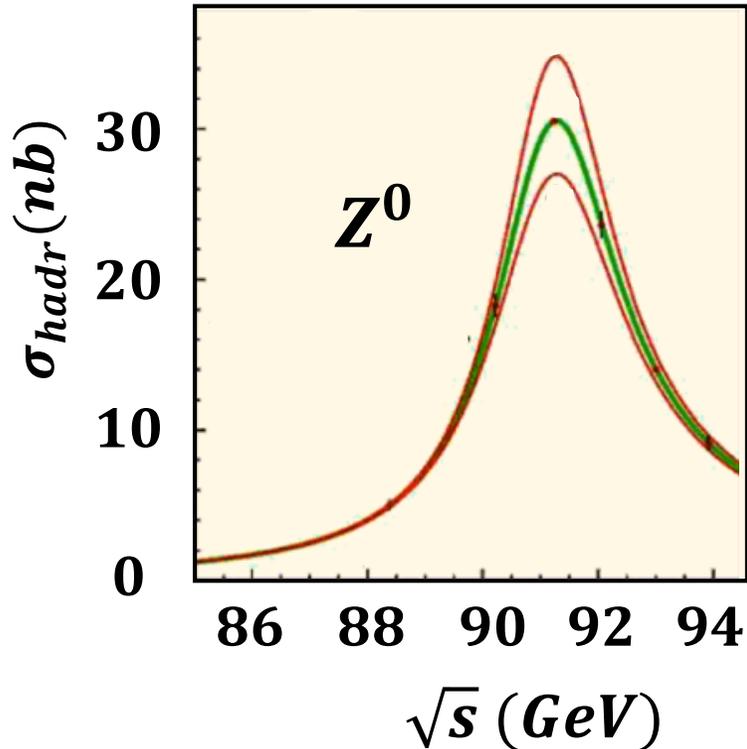
Beschleunigungs –
Kavität am *LEP*



LEP Tunnel

Elektron–Positron Collider: *LEP*

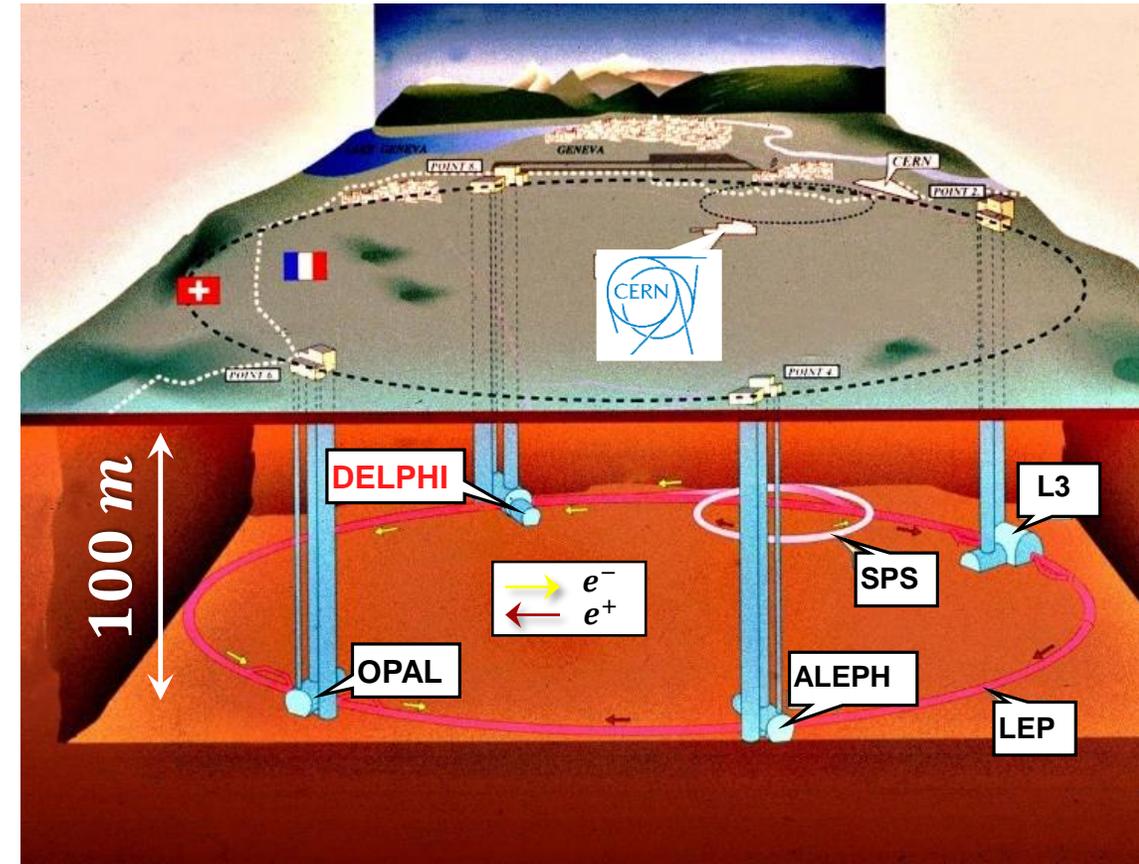
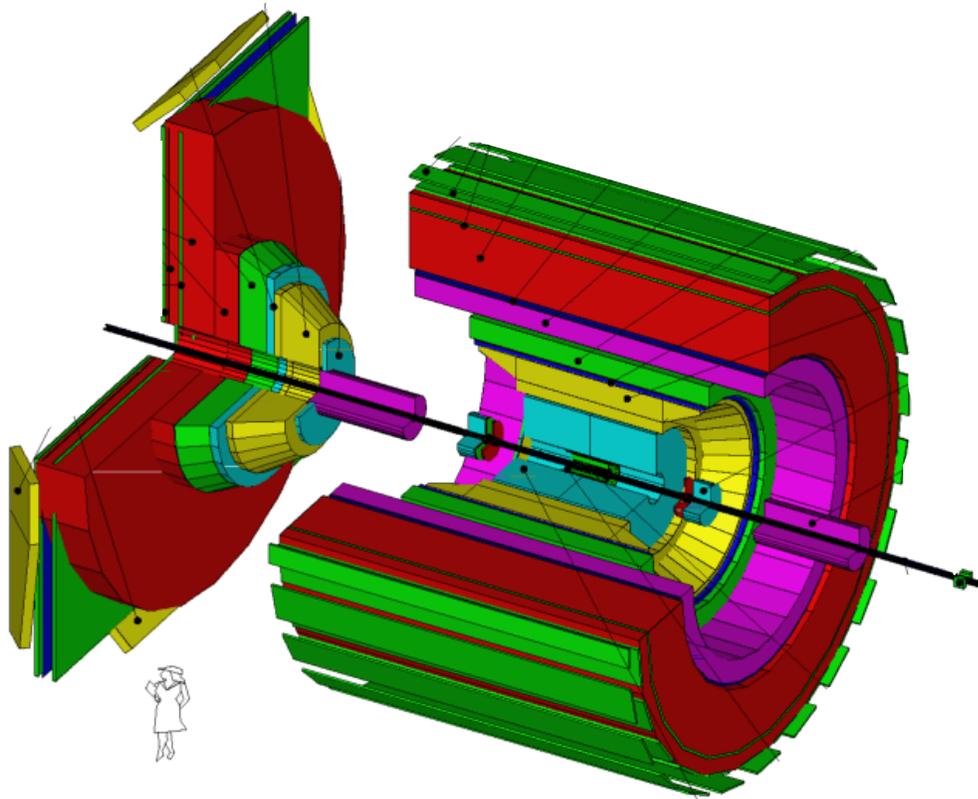
- *LEP* – Ziele:
Ausmessung der
 Z^0 – Resonanz, W^+W^-



LEP Tunnel

Elektron–Positron Collider: *LEP* – Experimente

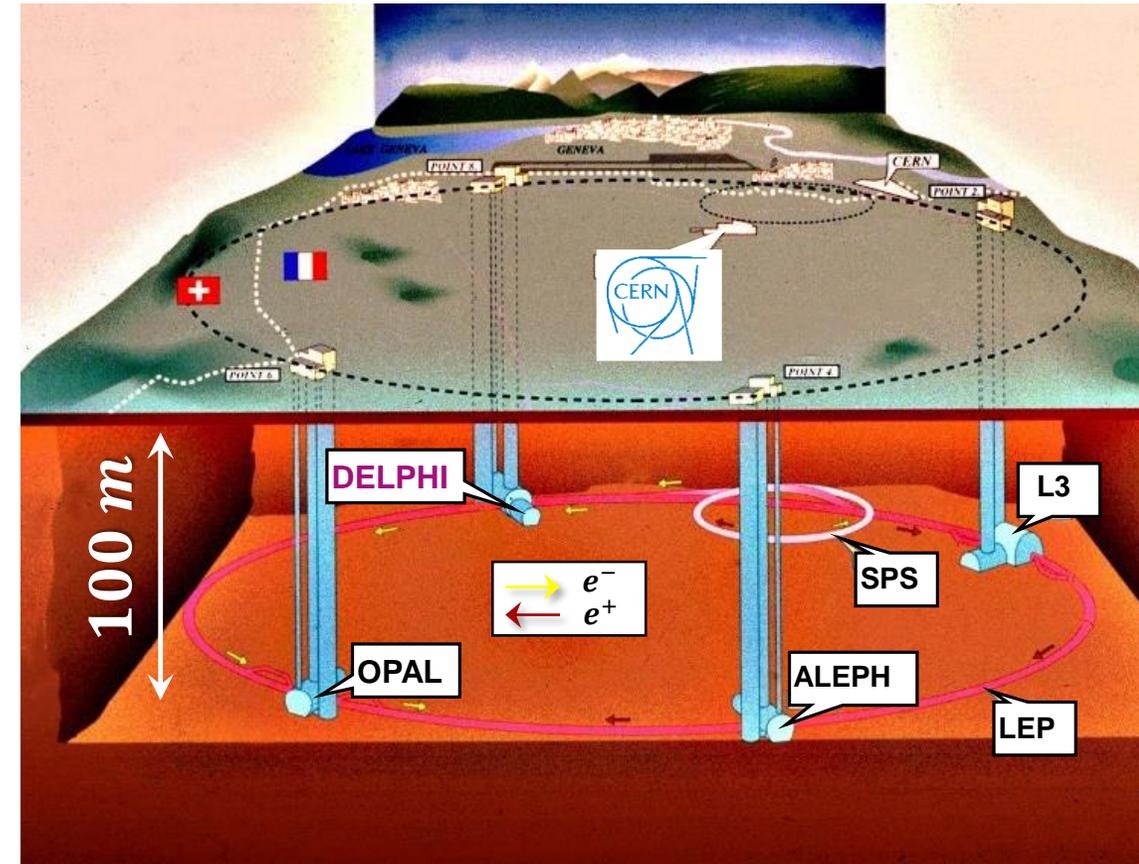
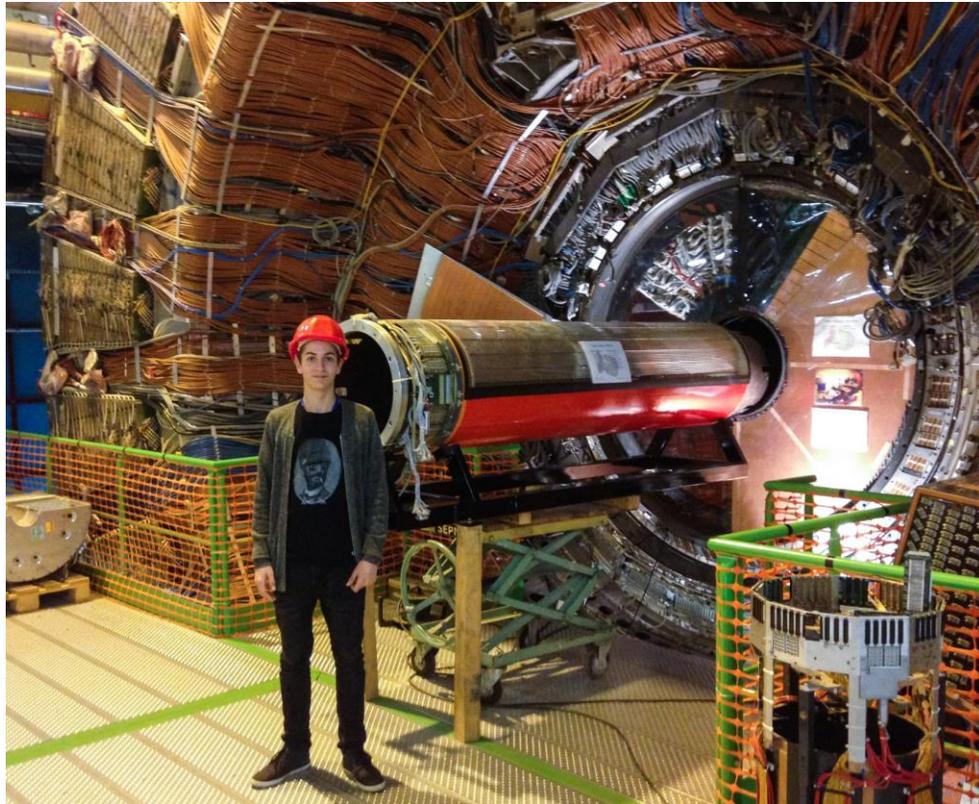
- *LEP* – Experimente
ALEPH – *OPAL* –
DELPHI – *L3*



größtes Tiefbau Projekt in Europa damals

Elektron–Positron Collider: *LEP* – Experimente

- *LEP* – Experimente
ALEPH – *OPAL* –
DELPHI – *L3*



DELPHI

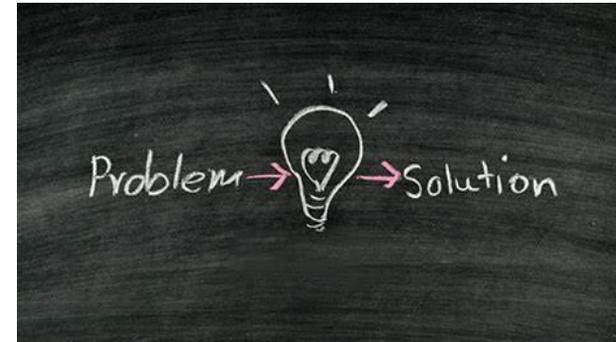
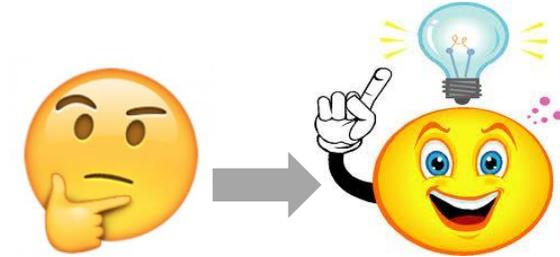
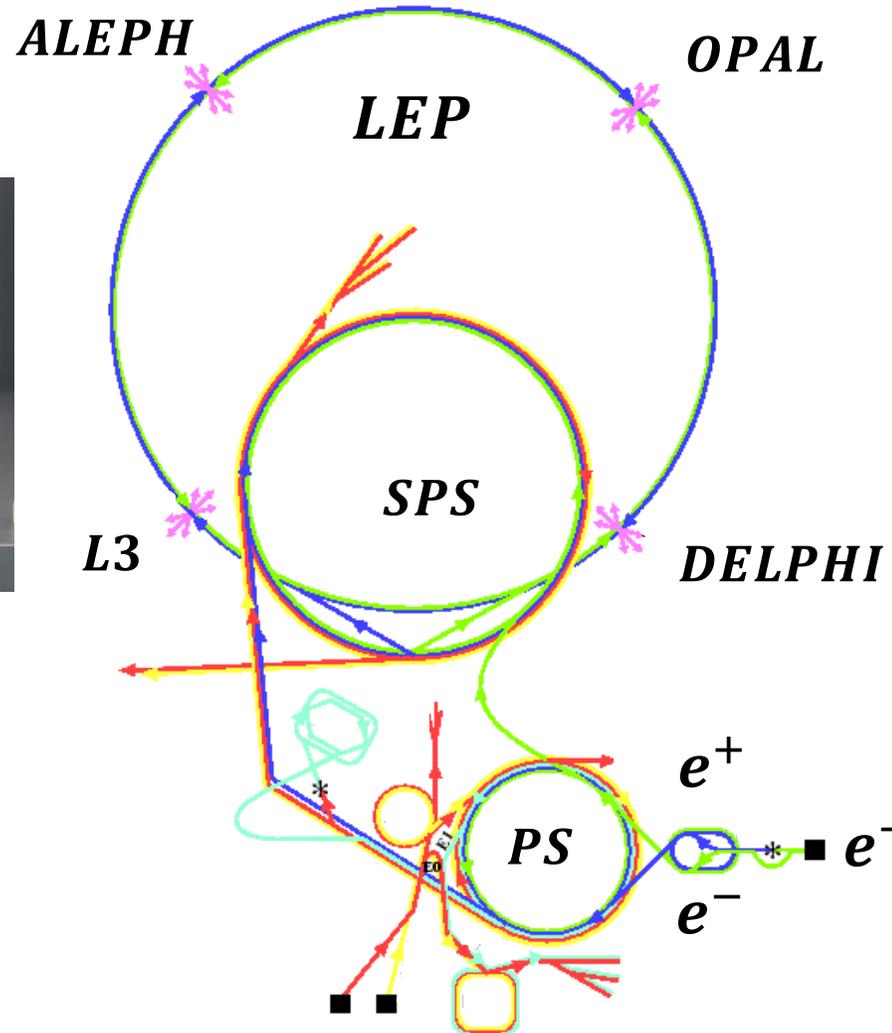
Elektron – Positron Collider: *LEP* – Effekte

- *LEP*: ein superpräziser Beschleuniger



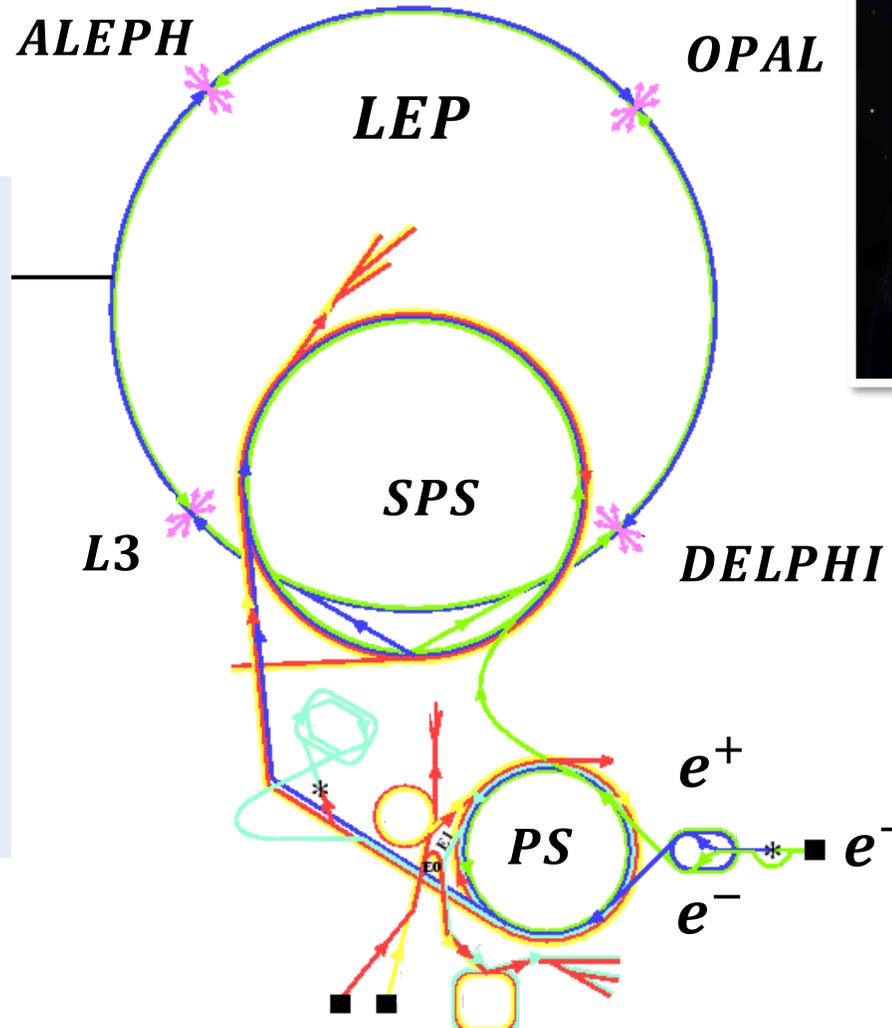
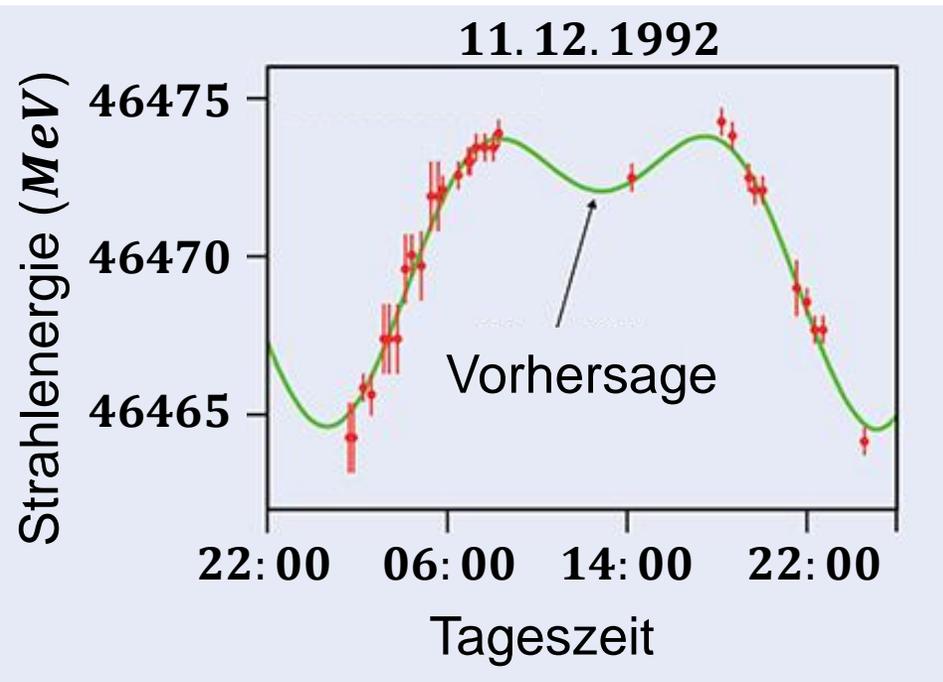
LEP – Strahlrohr

- die *LEP* Strahlenergie E zeigte tägliche, jährliche & stochastische Schwankungen um $10 \dots 30 \text{ MeV}$, weshalb?



Elektron – Positron Collider: *LEP* – Effekte

■ *LEP*: ein superpräziser Beschleuniger

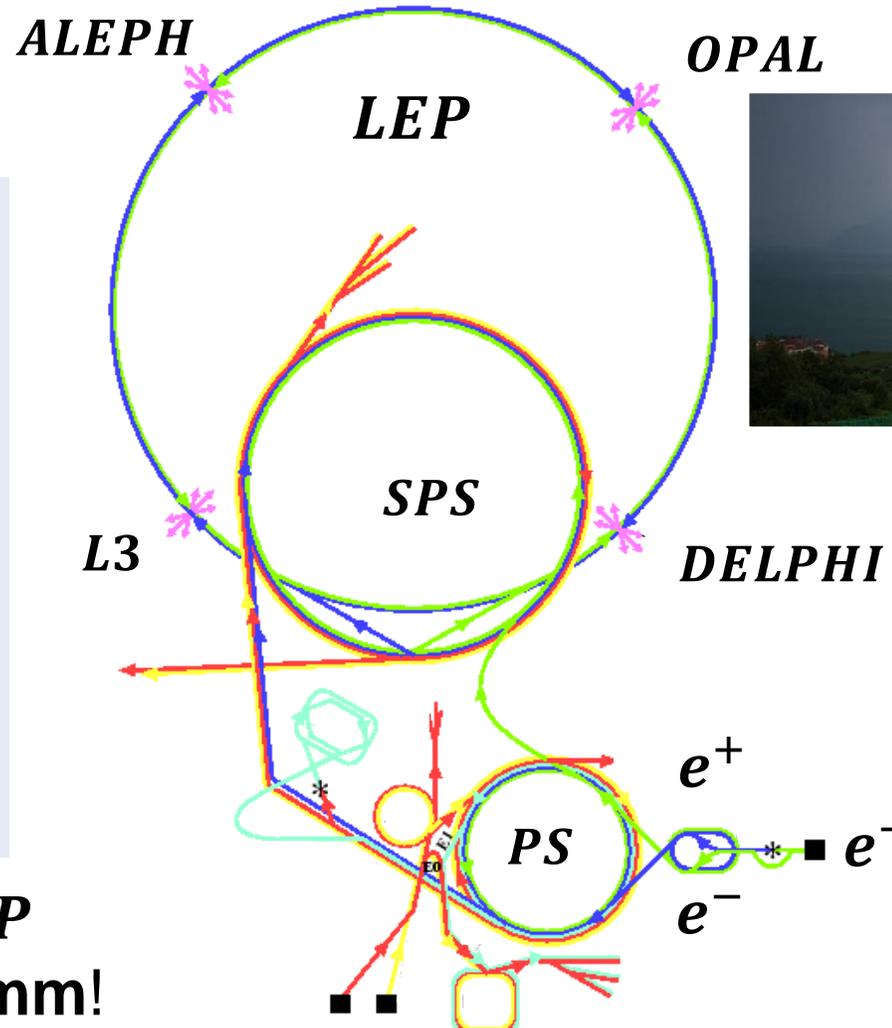
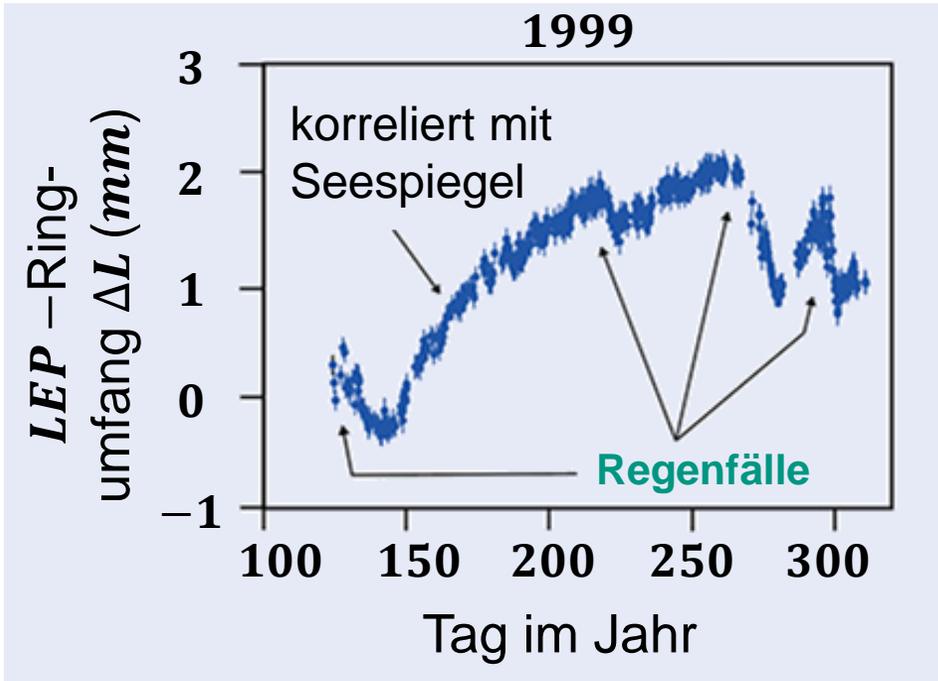


LEP Tunnel

Tidenhub: Änderung des *LEP* Umfangs (27 km) um 1 mm !

Elektron – Positron Collider: *LEP* – Effekte

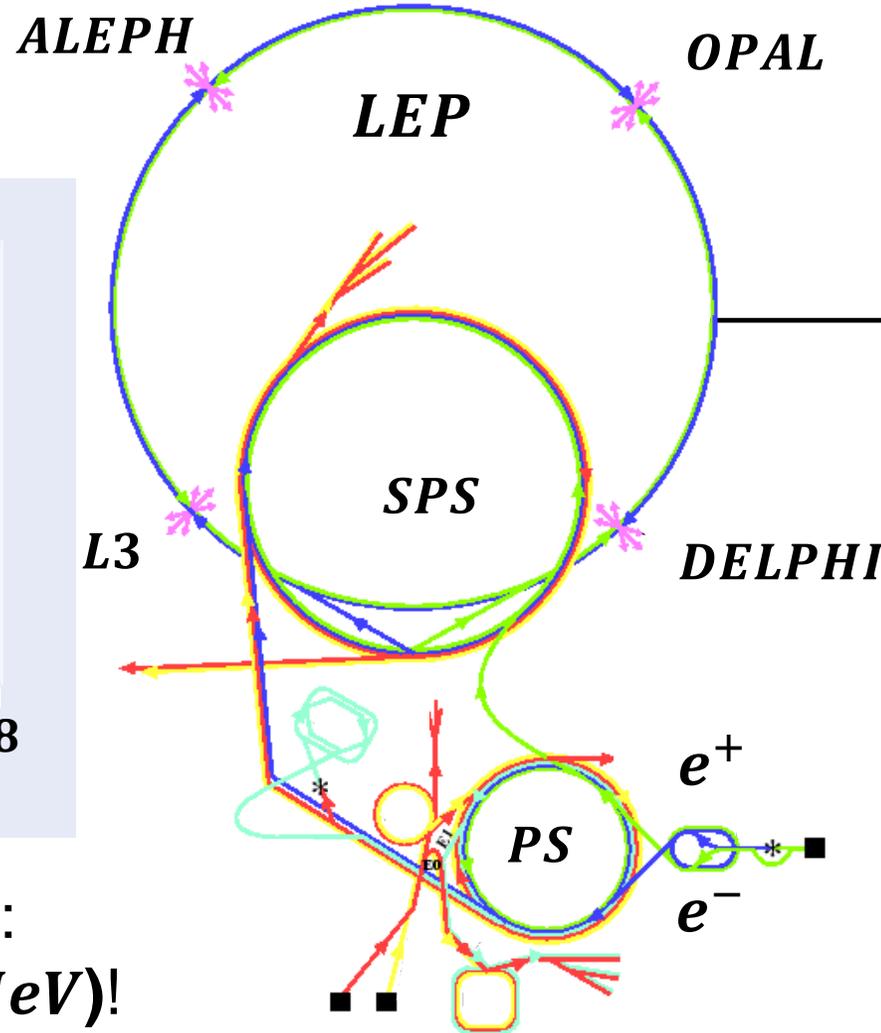
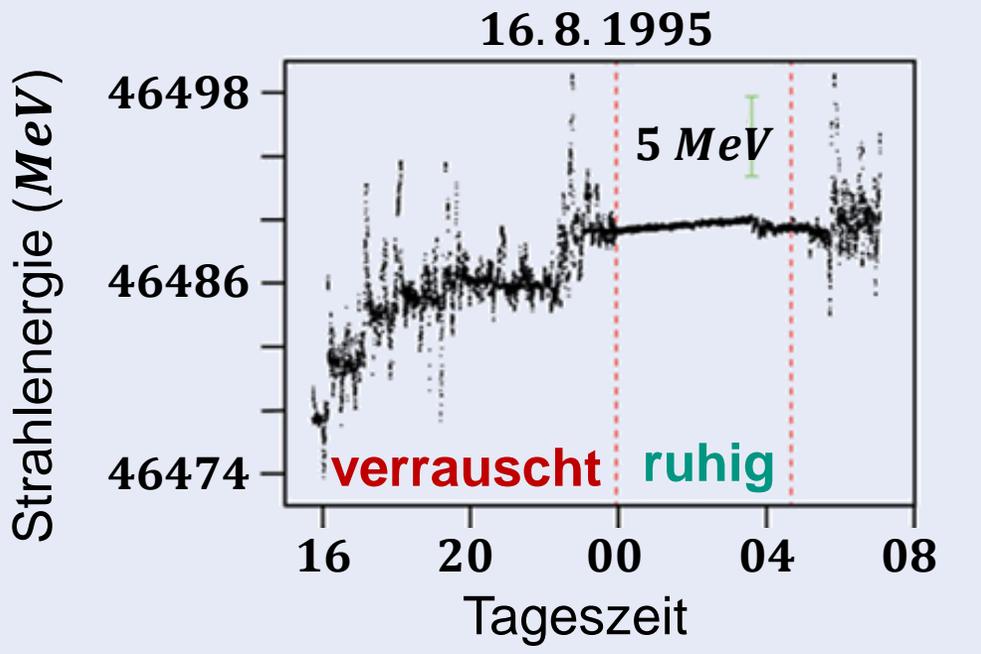
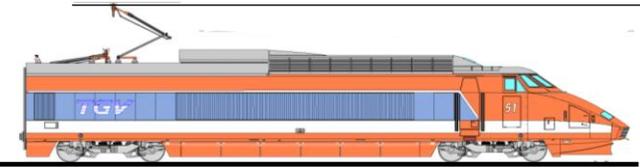
■ *LEP*: ein superpräziser Beschleuniger



Seespiegel: Änderung des *LEP* Umfangs (27 km) um einige mm!

Elektron – Positron Collider: *LEP* – Effekte

■ *LEP*: ein superpräziser Beschleuniger

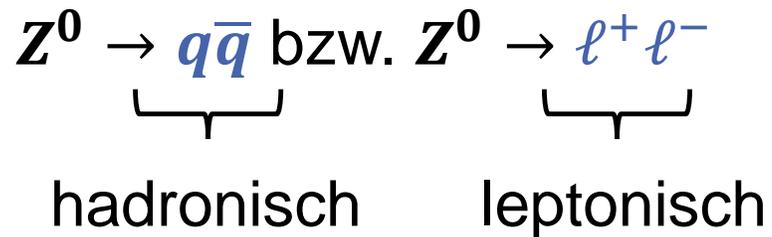


zunächst unbekannte Störung:
Rauschen (einige Dutzend MeV)!

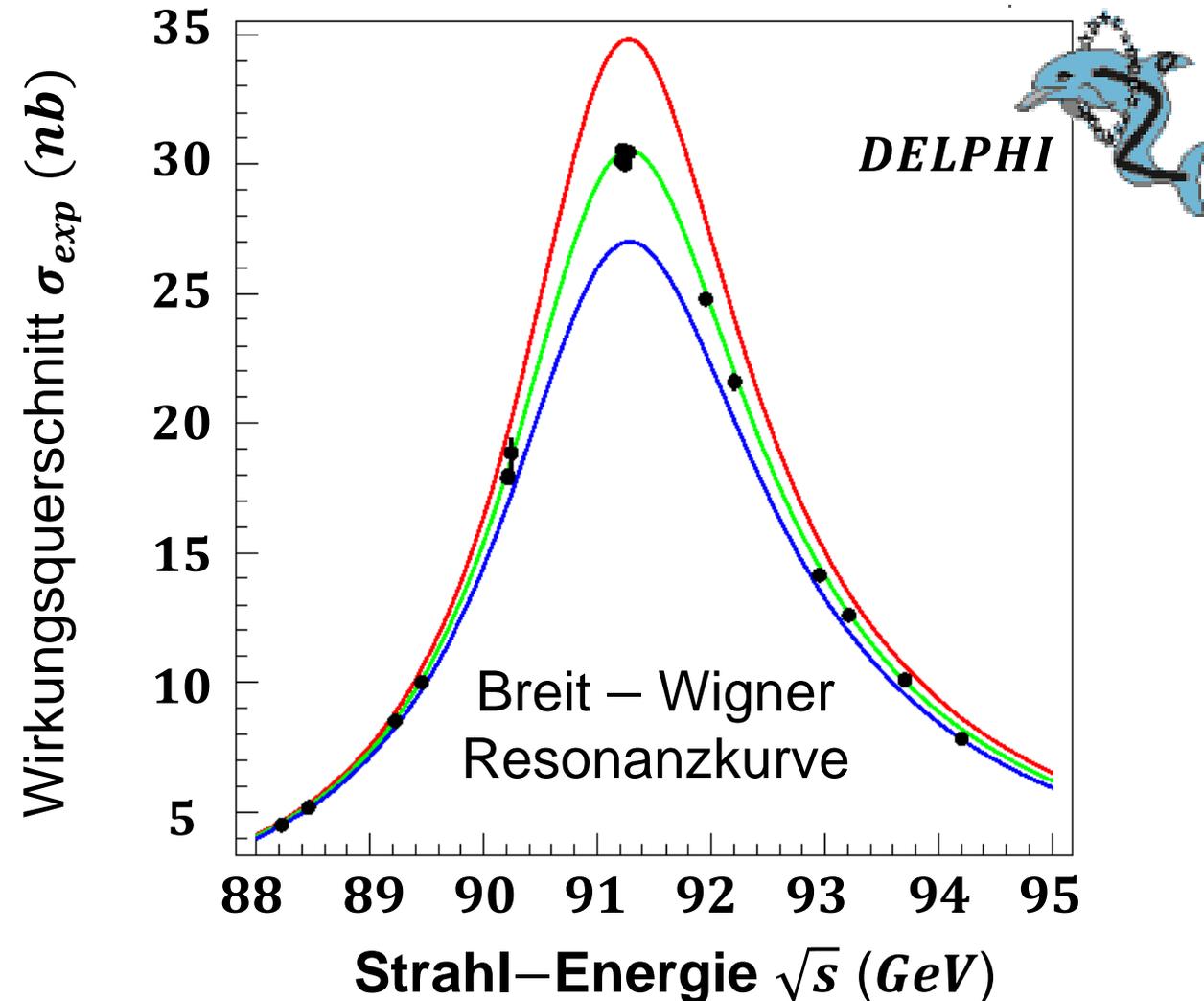
LEP – Physik: Messung der Z^0 – Zerfallsbreite

■ LEP: Messung der Breite des Z^0

- Variation von \sqrt{s} von 88 ... 95 GeV, dabei Messung von σ_{vis} für Zerfälle



- erwartet wird eine Breit – Wigner-Kurve für die Z^0 – Resonanz mit **totaler Breite** Γ_{tot}
- Partialbreiten Γ_i addieren sich zu **theor. Breite** $\Gamma_{tot} = \Sigma \Gamma_i$

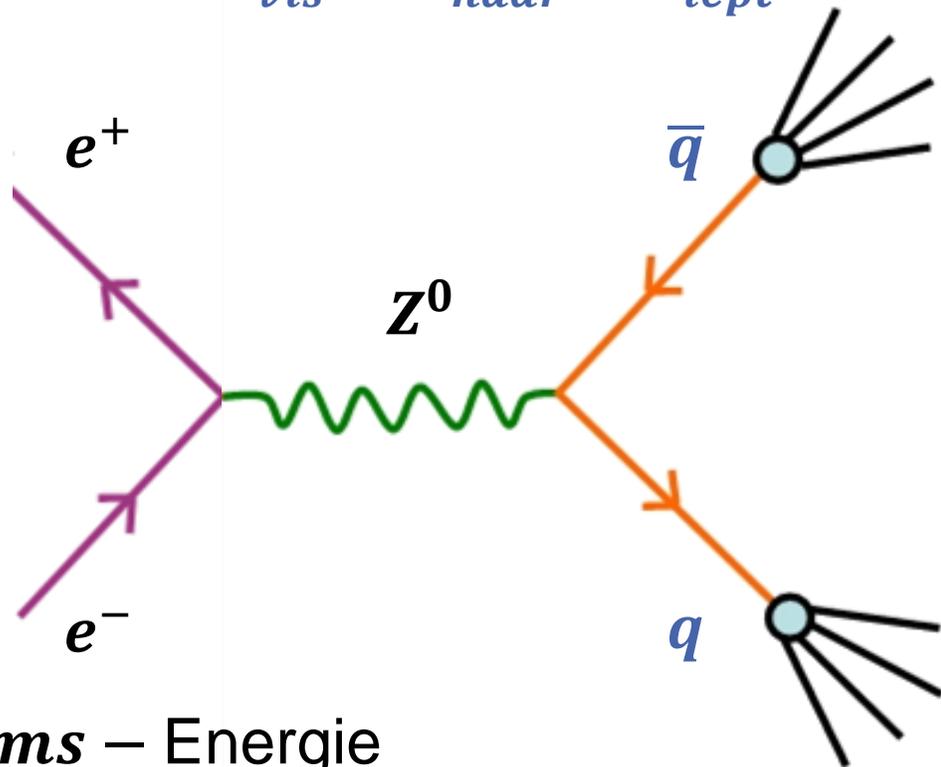


LEP – Physik: Messung der Z^0 – Zerfallsbreite

■ Sichtbare Breite Γ_{vis} : Addition der Partialbreiten in Leptonen & Hadronen

- experimentell 'sichtbare' Breite Γ_{vis}

$$\Gamma_{vis} = \Gamma_{hadr} + \Gamma_{lept}$$

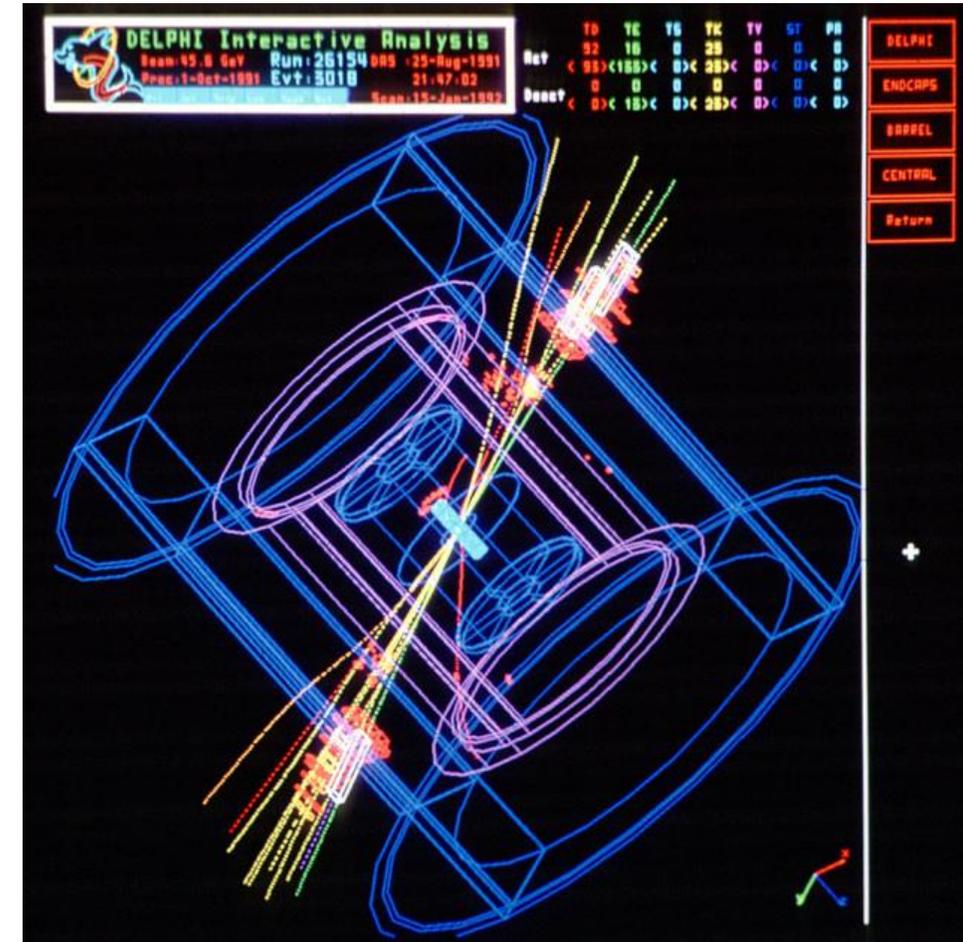


Hadronen

Z^0 – Zerfall
in Hadronen
im *DELPHI*
Detektor

Hadronen

cms – Energie

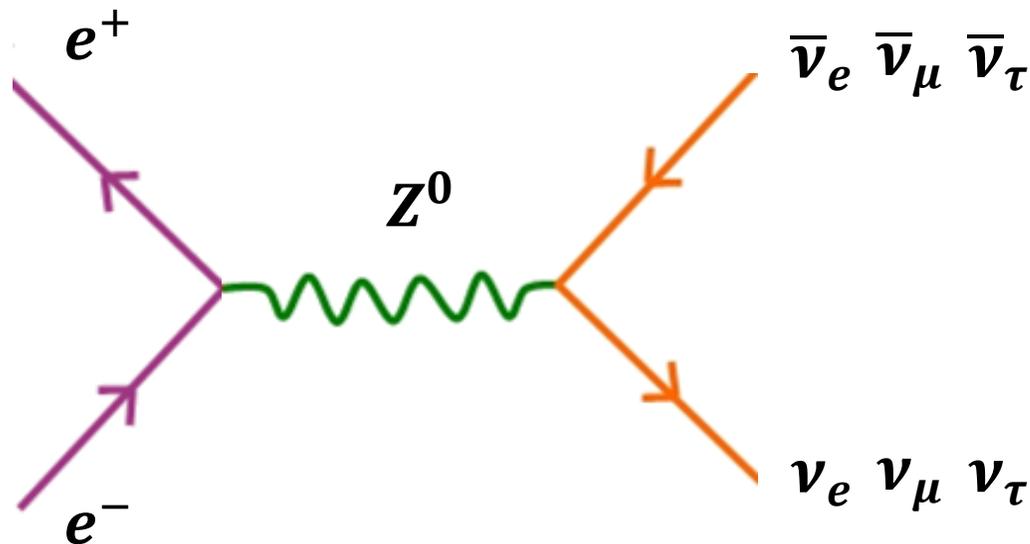


Z^0 – Zerfallsbreite: Anzahl der ν – Generationen

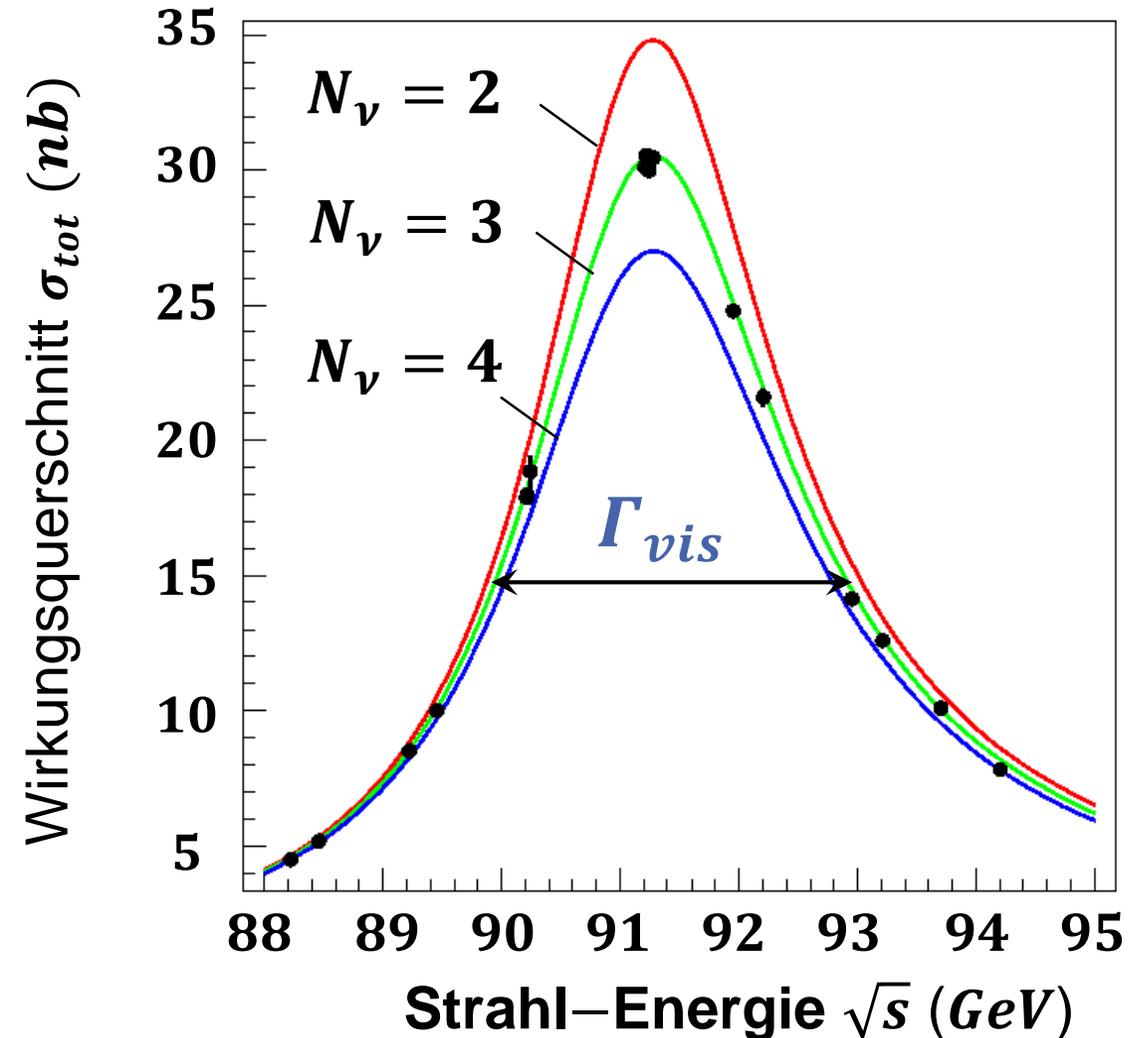
■ unsichtbare Neutrinos (kein Signal in den Detektoren!) mit Γ_{inv} :

- Relation der Breiten:

$$\Gamma_{inv} = \Gamma_{tot} - \Gamma_{vis}$$



jede Flavour trägt gleich bei* (je 6,7%)



Z^0 – Zerfallsbreite: Anzahl der ν – Generationen

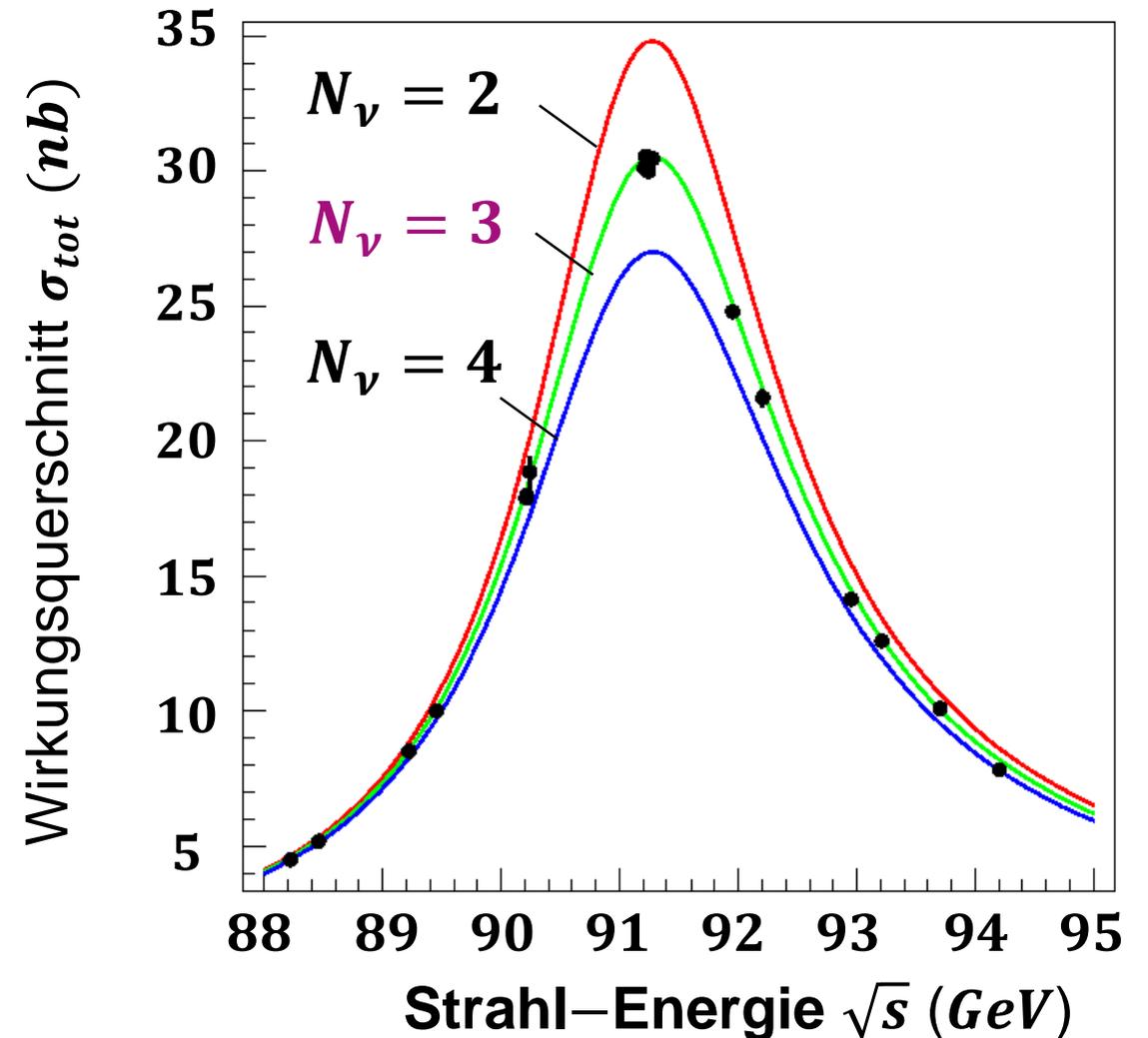
■ Bestimmung von N_ν

- Relation der Breiten:

$$\begin{aligned}\Gamma_{inv} &= \Gamma_{tot} - \Gamma_{vis} \\ &= (498 \pm 4,2) \text{ MeV}\end{aligned}$$

- Γ_{inv} berücksichtigt alle ν –
Generationen ($\sim 6,7\%$ pro $\nu\bar{\nu}$)
d.h. $166,9 \text{ MeV}$ pro Generation N_ν

$$N_\nu = 2,984 \pm 0,055$$



Anzahl ν – Generationen: *LEP* & Kosmologie*

■ Bestimmung von N_ν : Vergleich von *LEP* mit dem Big Bang

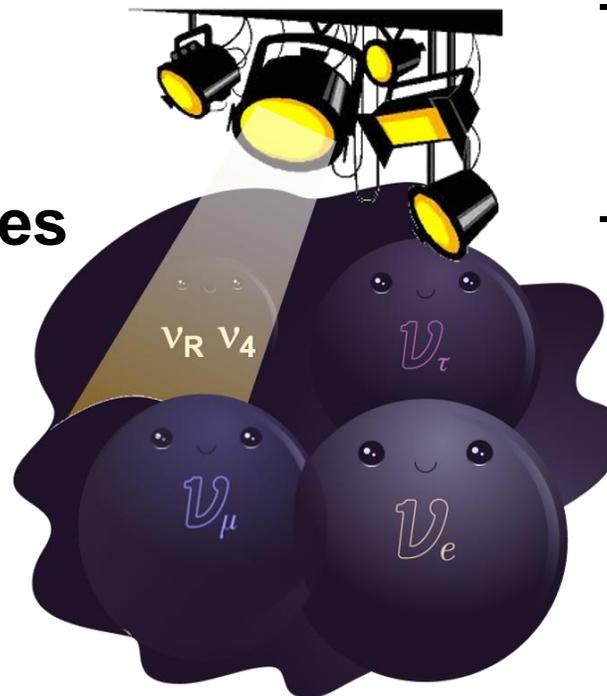
- *LEP* – Resultat:

- gilt nur für **aktive** ν – Spezies mit Ankopplung an Z^0
- gilt nur für 'leichte' ν – Spezies mit Masse $m(\nu) < 45 \text{ GeV}$

- Kosmologie – Resultat:

- gilt nur für **alle** ν – Spezies auch ν_{steril} ohne Kopplung an Z^0
- gilt nur für **alle** ν – Spezies **ohne Massenlimit**, & sonstige 'dunkle' Materiestrahlung

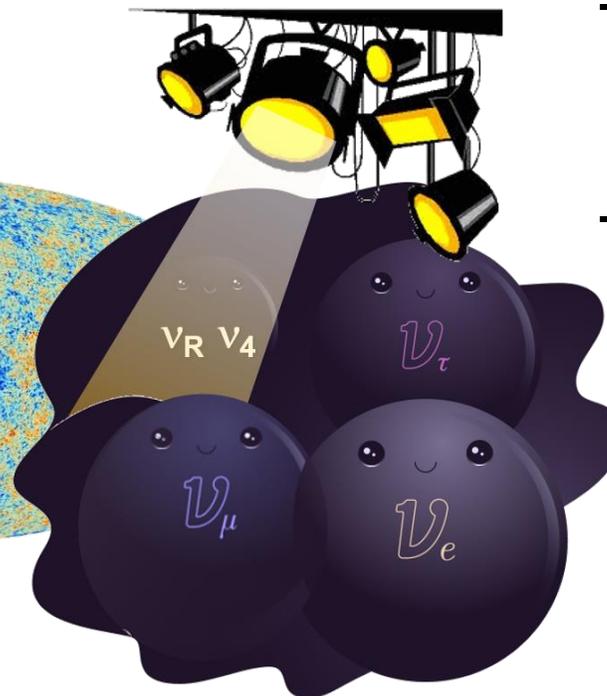
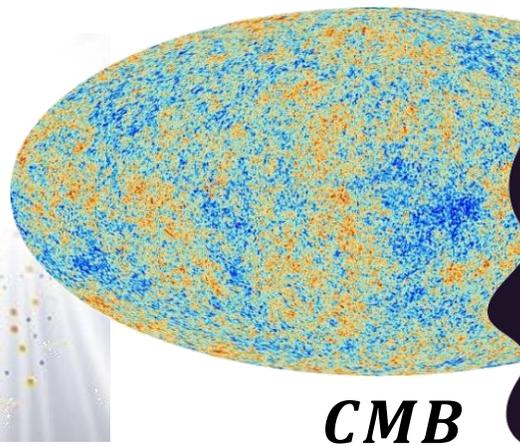
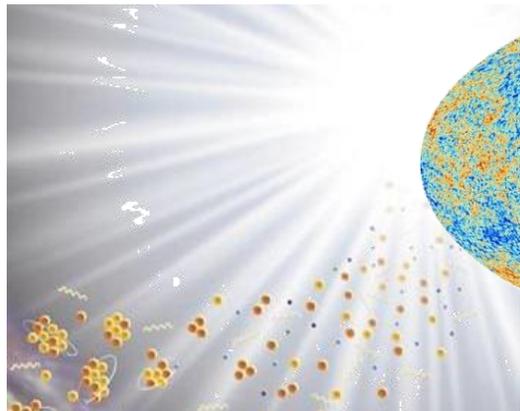
$$N_\nu = 2,984 \pm 0,055$$



$$N_\nu = 2,96 \pm 0,36$$

Anzahl ν – Generationen: *LEP* & Kosmologie

- Bestimmung von N_ν : Vergleich von *LEP* mit dem Big Bang (*BBN*)



- Kosmologie – Resultat:

- gilt nur für **alle ν – Spezies** auch ν_{steril} ohne Kopplung an z^0
- gilt nur für **alle ν – Spezies ohne Massenlimit**, & sonstige 'dunkle' Materiestrahlung

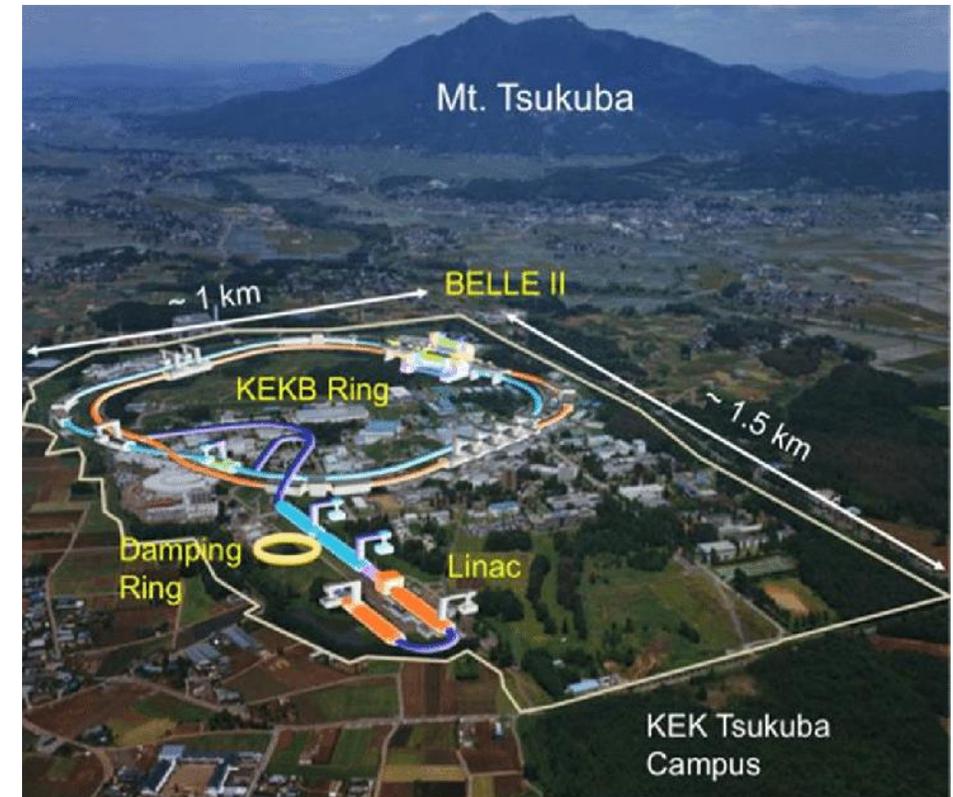
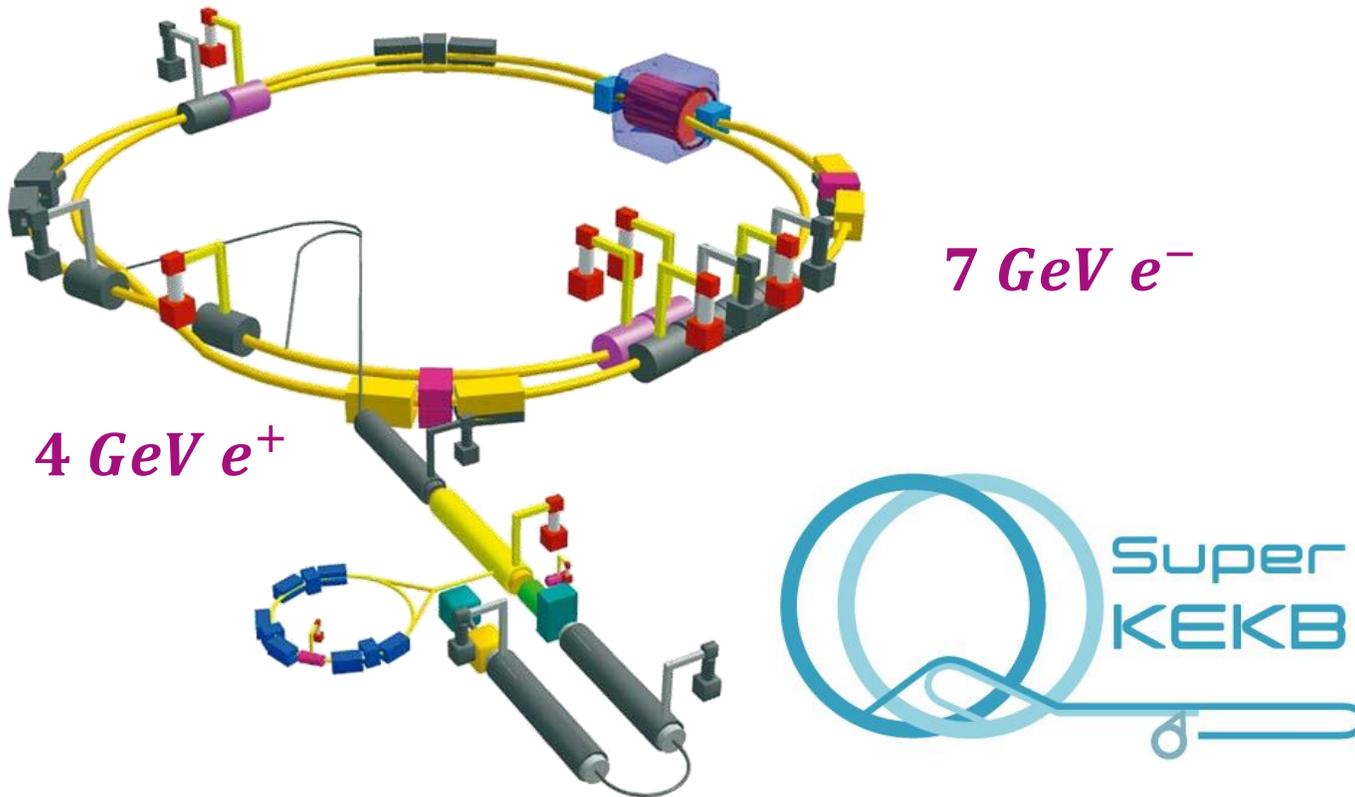
$$N_\nu = 2,96 \pm 0,36$$

Big Bang Nukleosynthese

b – Factories: SuperKEKB in Japan

■ moderne ‘*b* – Fabriken’: Messungen an der $\Upsilon(4S)$ Resonanz

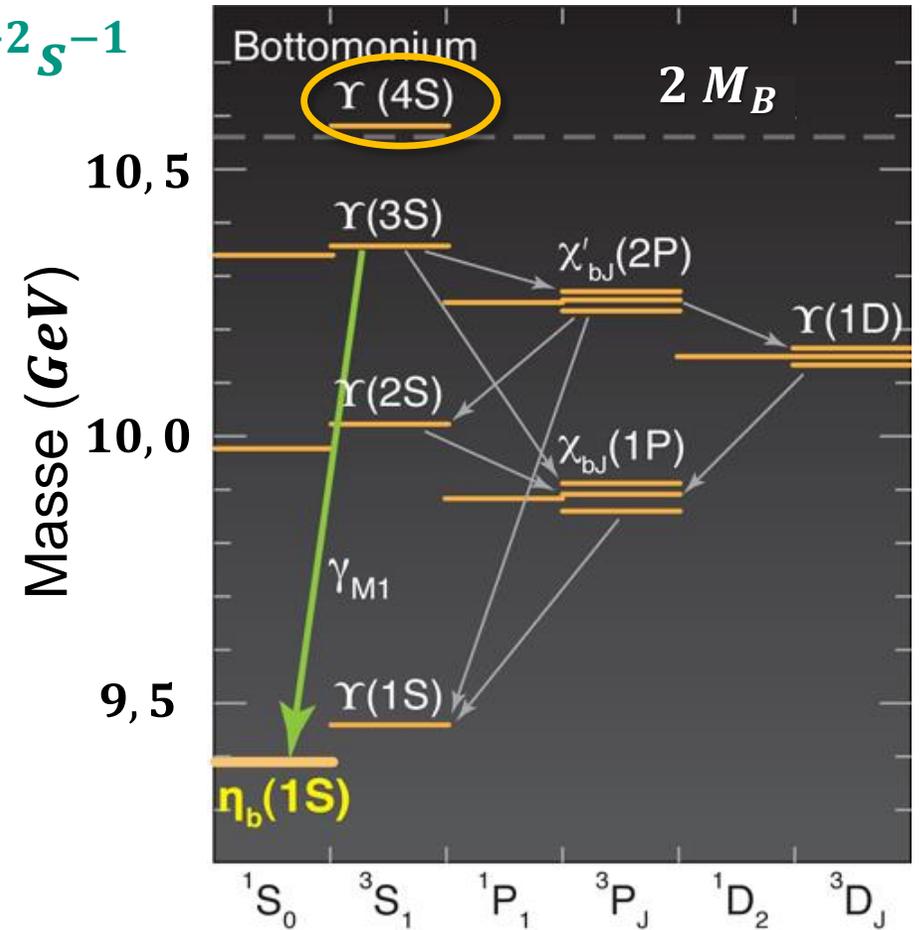
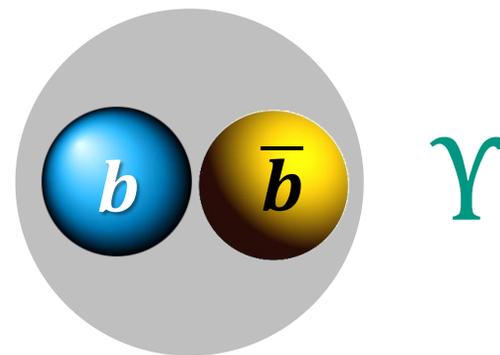
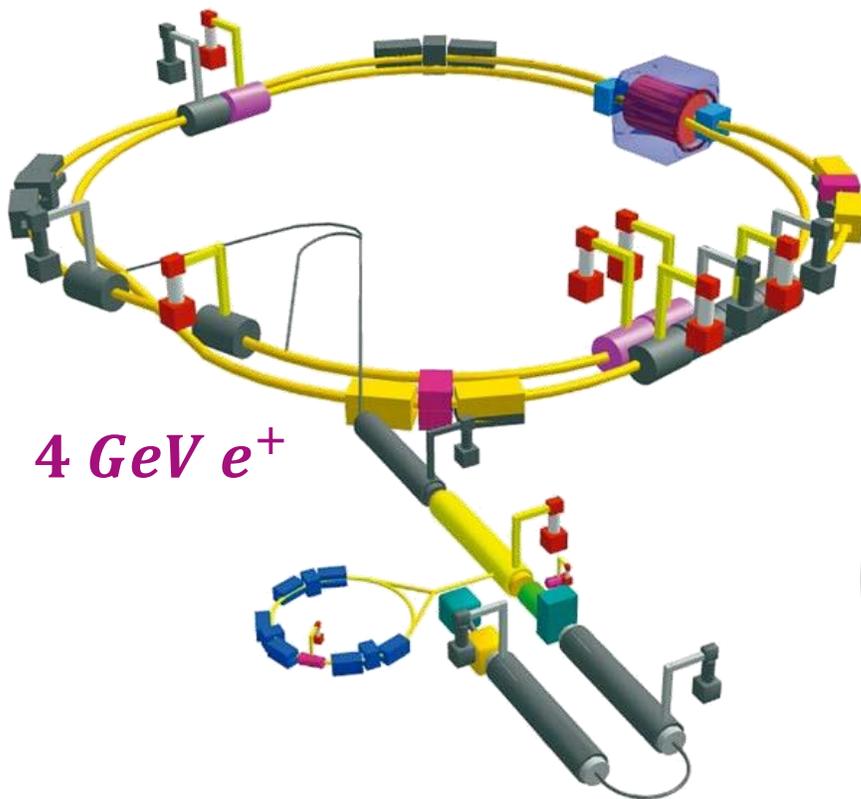
- ein **asymmetrischer e^+e^-** – Collider für **Flavourphysik***



b – Factories: SuperKEKB in Japan

■ moderne ‘ b – Fabriken’: Messungen an der Bottomonium $\Upsilon(4S)$ Resonanz

- welthöchste Collider – Lumi $L = 2,2 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

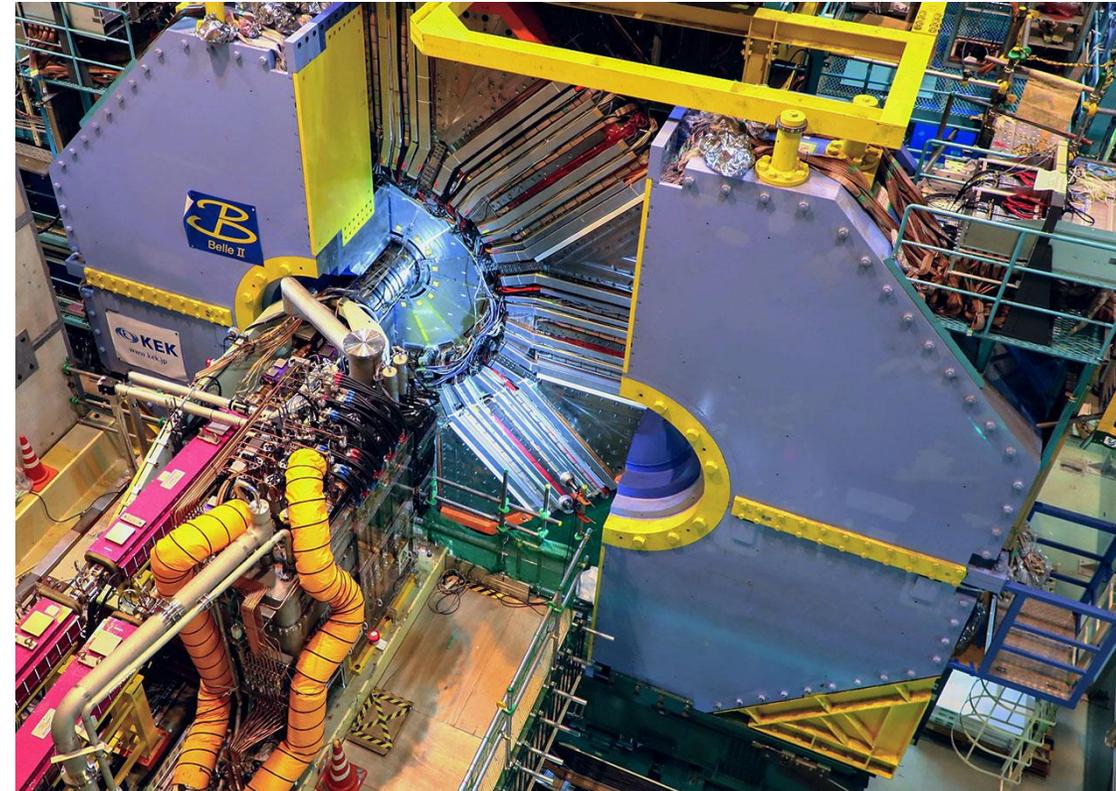
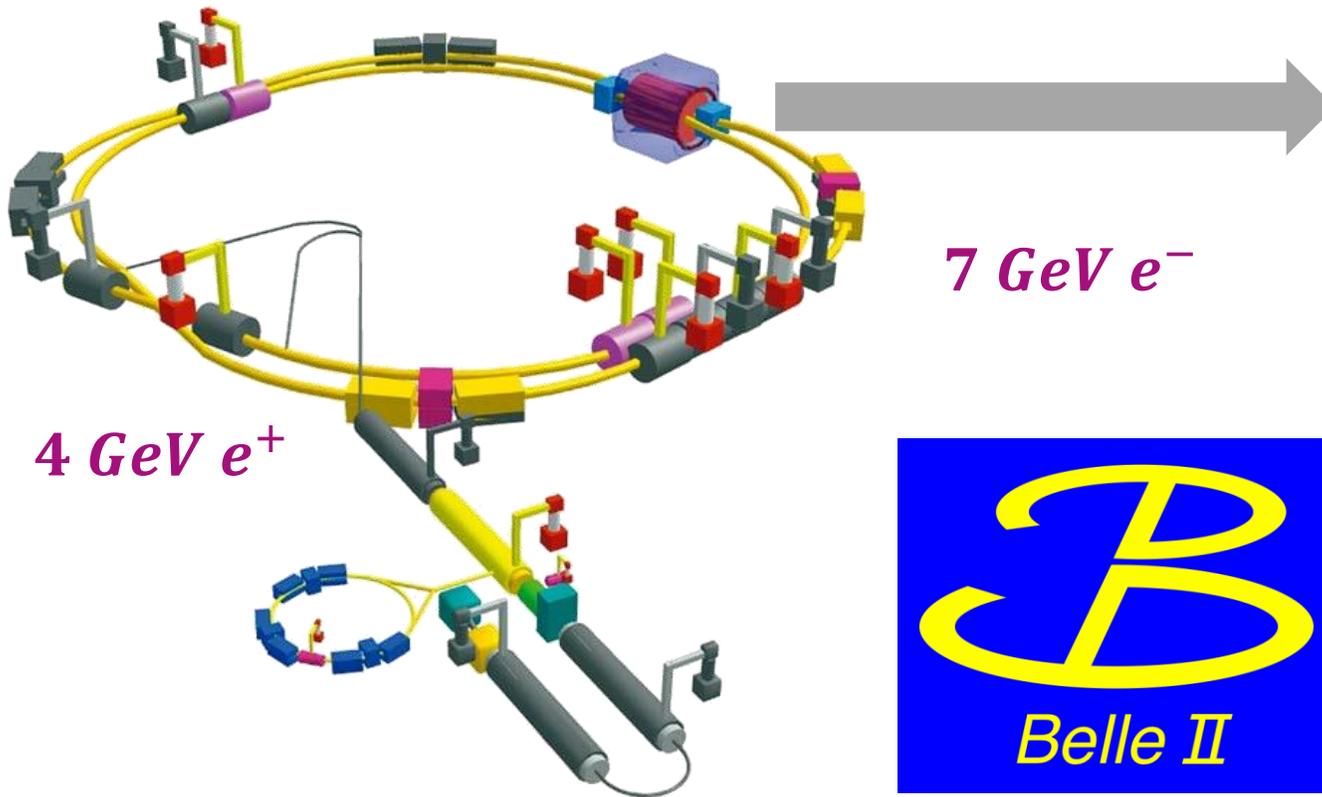


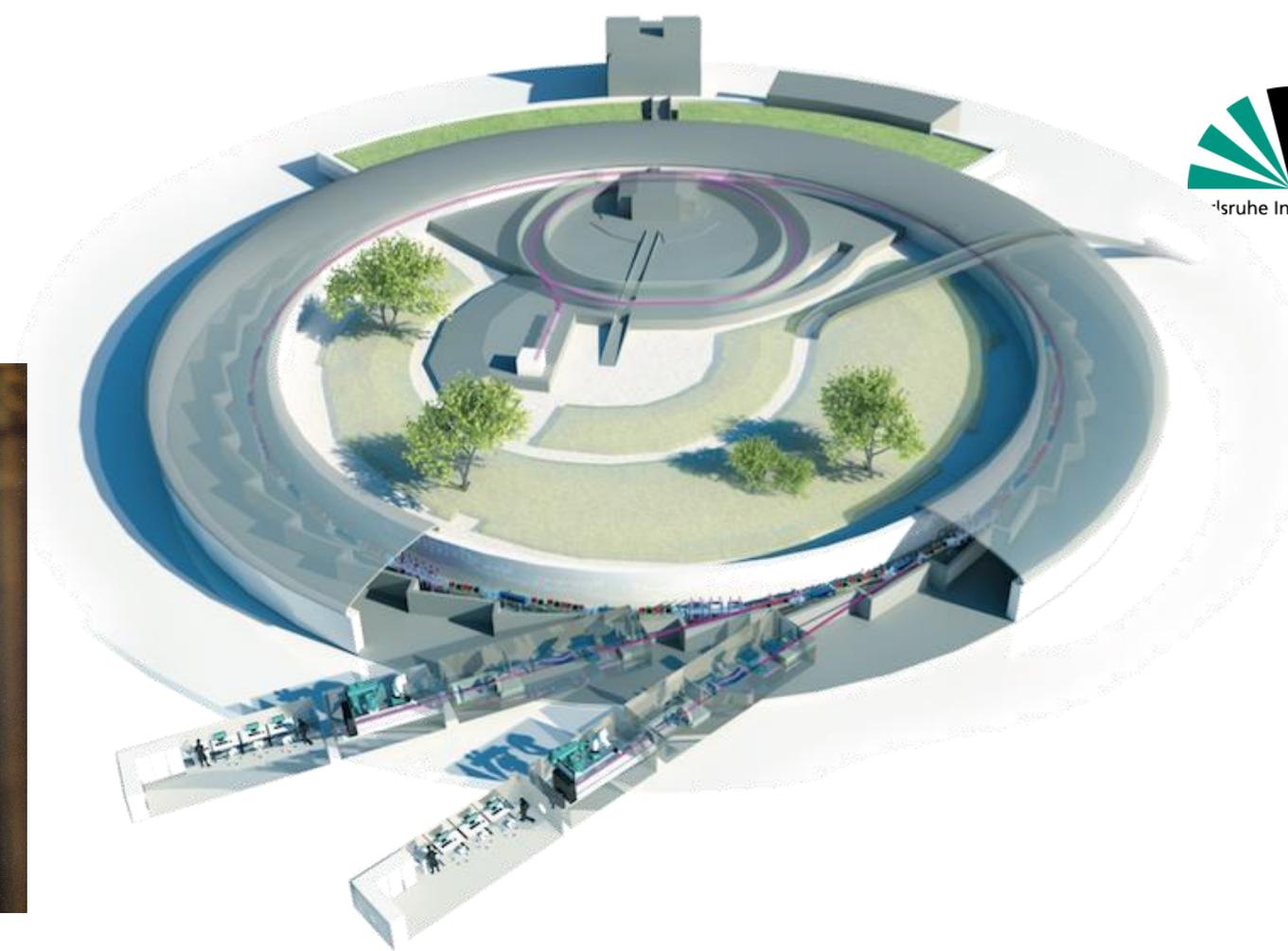
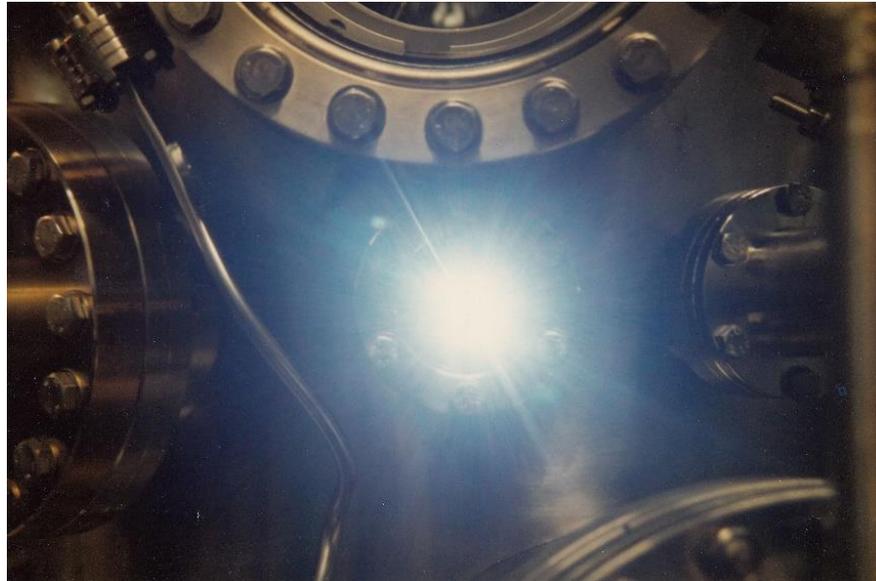
Q: KEK, SuperKEKB

b – Factories: SuperKEKB in Japan

■ moderne '*b* – Fabriken': Messungen mit *BELLE II* Detektor

- *Belle II*: Eigenschaften von *B* – Mesonen, z.B. $B^0 - \bar{B}^0$ Oszillationen





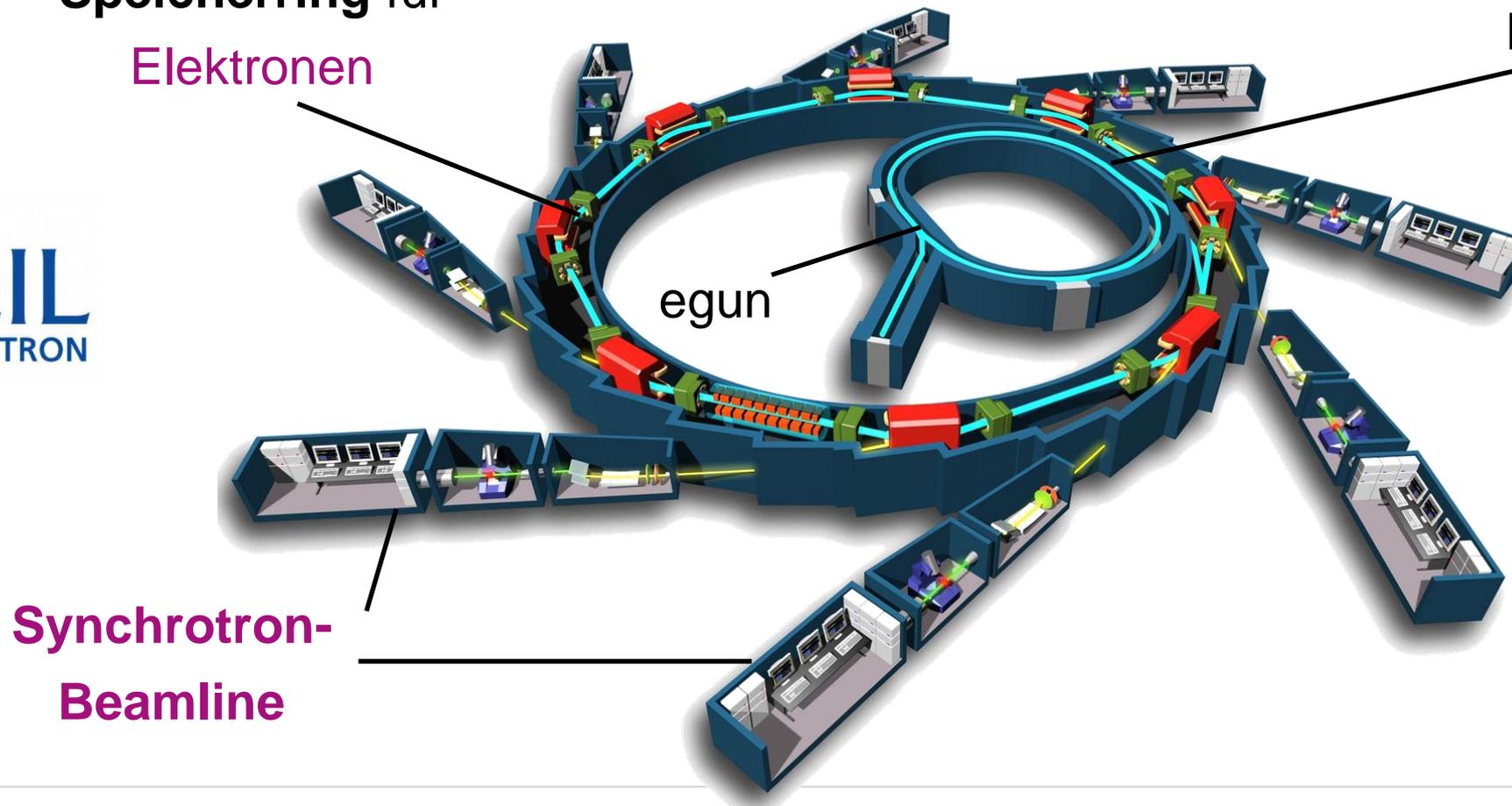
EINSCHUB: SYNCHROTRONSTRAHLUNGS- QUELLEN (ANWENDUNG)

Anwendung: Synchrotron–Strahlung

■ Aufbau einer Synchrotron–Strahlungsquelle

Speicherring für
Elektronen

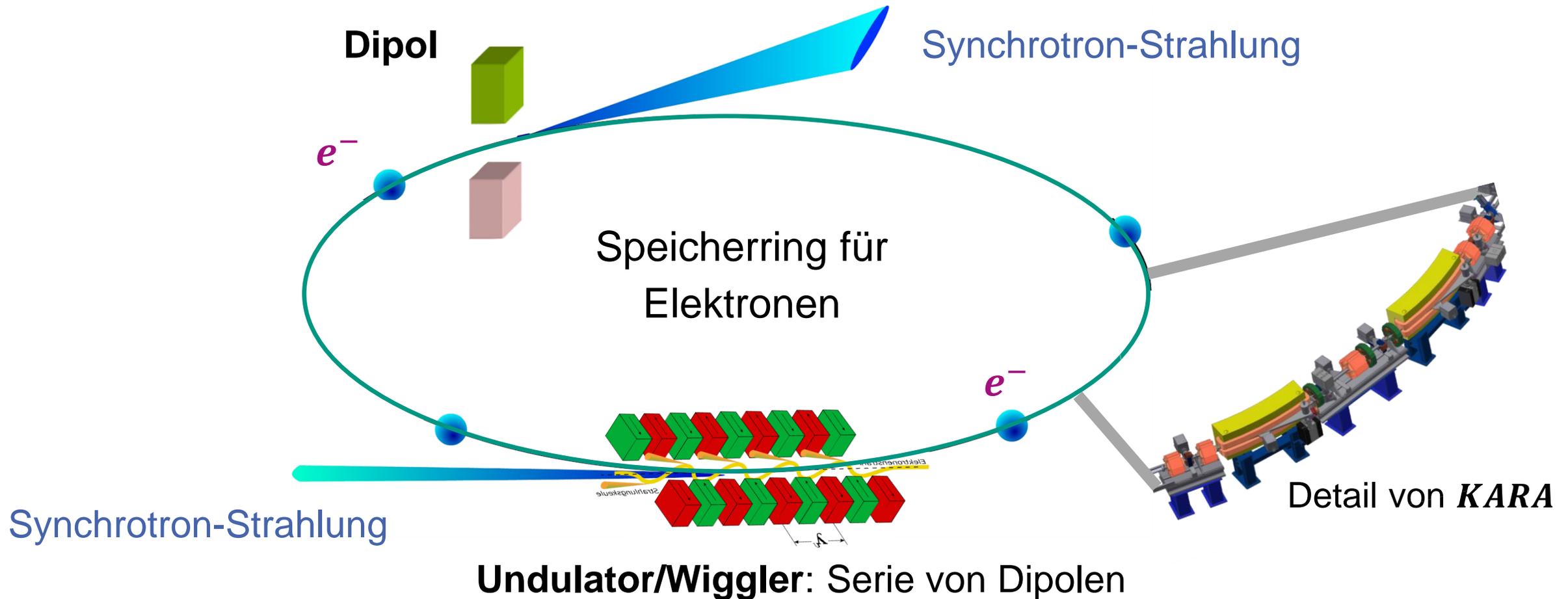
Beschleunigung
Elektronen
(Booster)



Q: wikipedia, soleil

Anwendung: Synchrotron–Strahlung

■ Aufbau einer Synchrotron–Strahlungsquelle: Beamline–Elemente



Q: wikipedia, soleil, KIT/KARA

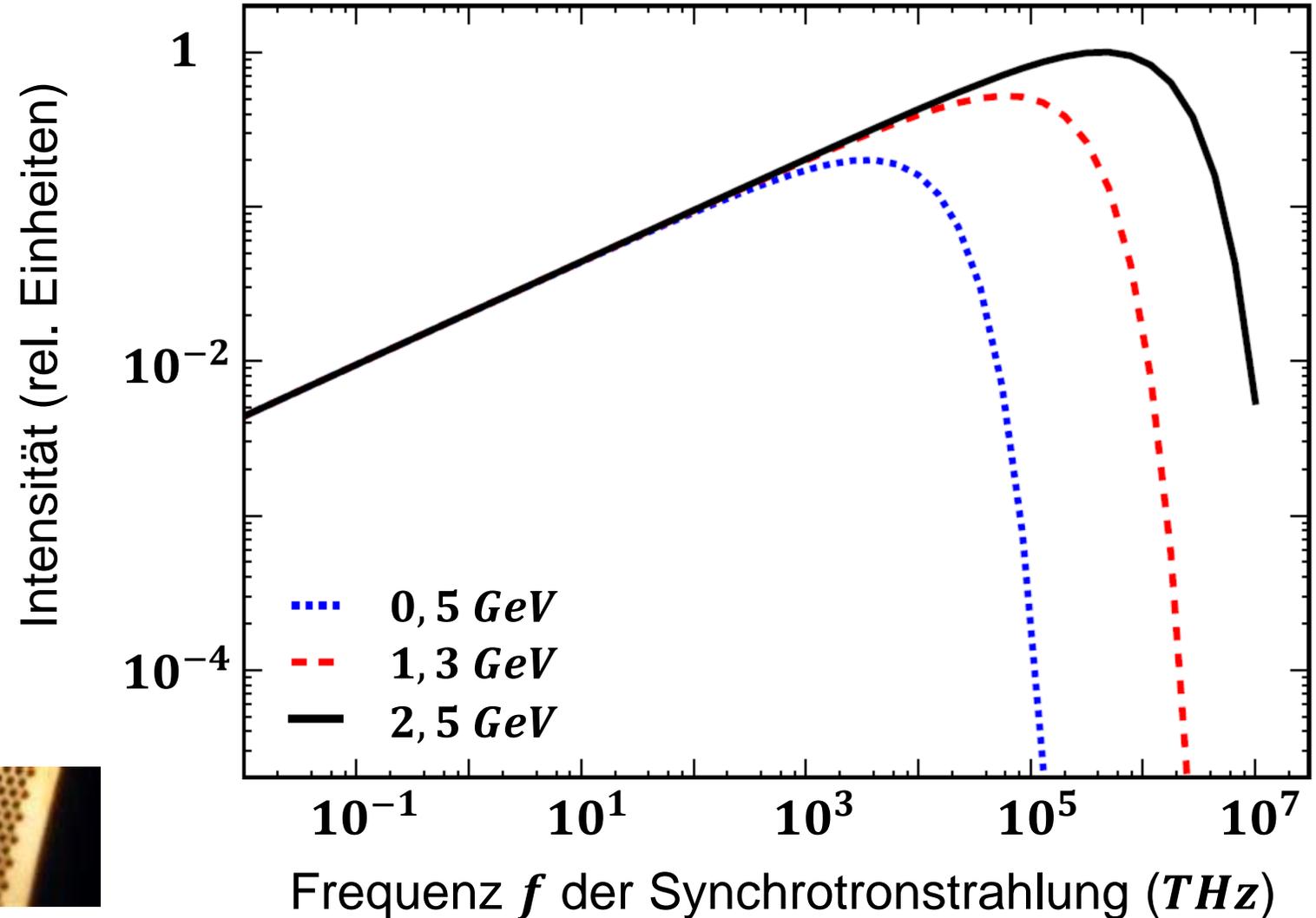
Synchrotronstrahlung: Frequenz f & Strahlenergie

■ kohärente Strahlung im Terahertz–Bereich

- Elektronen–Energie E
bestimmt maximale
Frequenz der erzeugten
Synchrotronstrahlung

- *sub – mm* Band

Lithographie



Anwendung: Synchrotron–Strahlung

■ Aufbau einer Synchrotron–Strahlungsquelle: *KARA* am *KIT*

- Elektronen beschleunigt und gespeichert bis zu Strom $I = 150 \text{ mA}$
- Erzeugung von **Synchrotronstrahlung**
- kohärente Strahlung in *THz* Region

KARA – ***KAR***lsruhe
Research ***A***ccelerator

