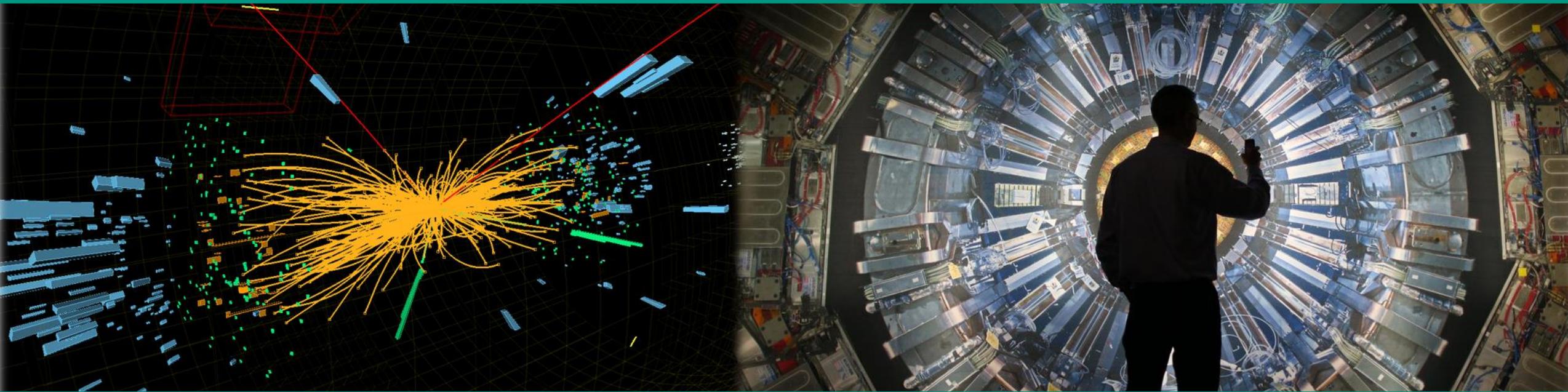


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 16

22.6.2023



Recap: Quarkonia & QCD – Freiheitsgrad Farbe

■ Charmonium $c\bar{c}$, Bottomonium $b\bar{b}$ & Top Quark t

- gebundener $c\bar{c}$ Quarkonium–Zustand: Masse $M = 3,1 \text{ GeV}$

Spektroskopie: Quark–Quark–Potenzial $V(r) = -\frac{4}{3} \cdot \alpha_s(r) \cdot \hbar c \cdot \frac{1}{r} + \kappa \cdot r$

- gebundener $b\bar{b}$ Quarkonium-Zustand bei Masse $M = 9,5 \text{ GeV}$

- Top–Quark t mit $M = 172,8 \text{ GeV}$: schwacher Zerfall $t \rightarrow b$ in $\sim 10^{-25} \text{ s}$

■ $SU(3)_C$: Gluonen als Vermittler der QCD – Farbkraft (Spin–1 Boson)

- 3 Farbladungen r, g, b und 3 Antifarben $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$

- 8 Gluonzustände: $r\bar{b}, r\bar{g}, b\bar{g}, b\bar{r}, g\bar{r}, g\bar{b}$ + 2 farbneutrale Gluonen

- farbneutrale Mesonen $q\bar{q}$ & Baryonen qqq , Suche nach Exotika...

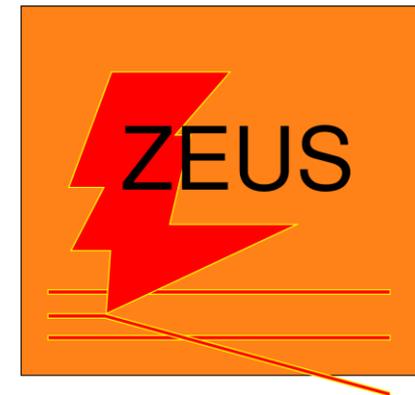
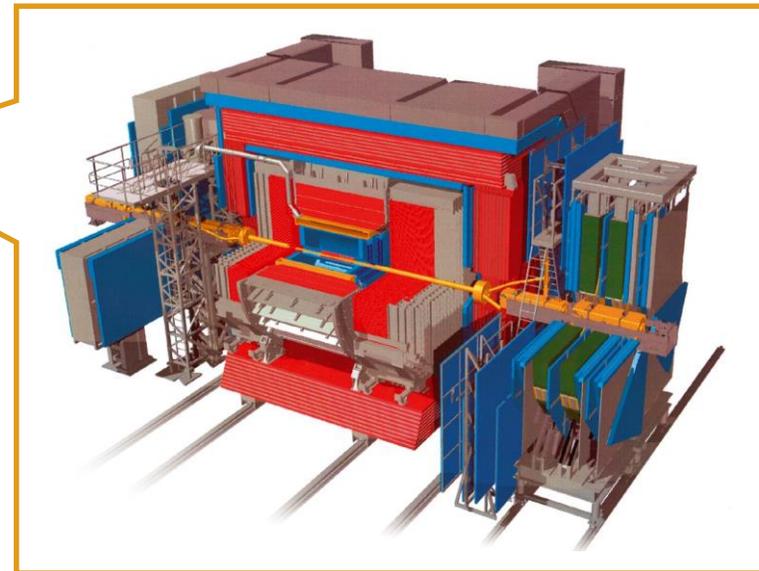
Messung der Stärke von α_s in der QCD

■ Elektron–Proton Kollisionen bei hohem Impulstransfer Q^2

- Messungen von α_s an **HERA** (**H**adron–**E**lektron–**R**ing **A**nlage) am **DESY**
Betrieb: 1992 ... 2007
mit Experimenten **H1** und **ZEUS***



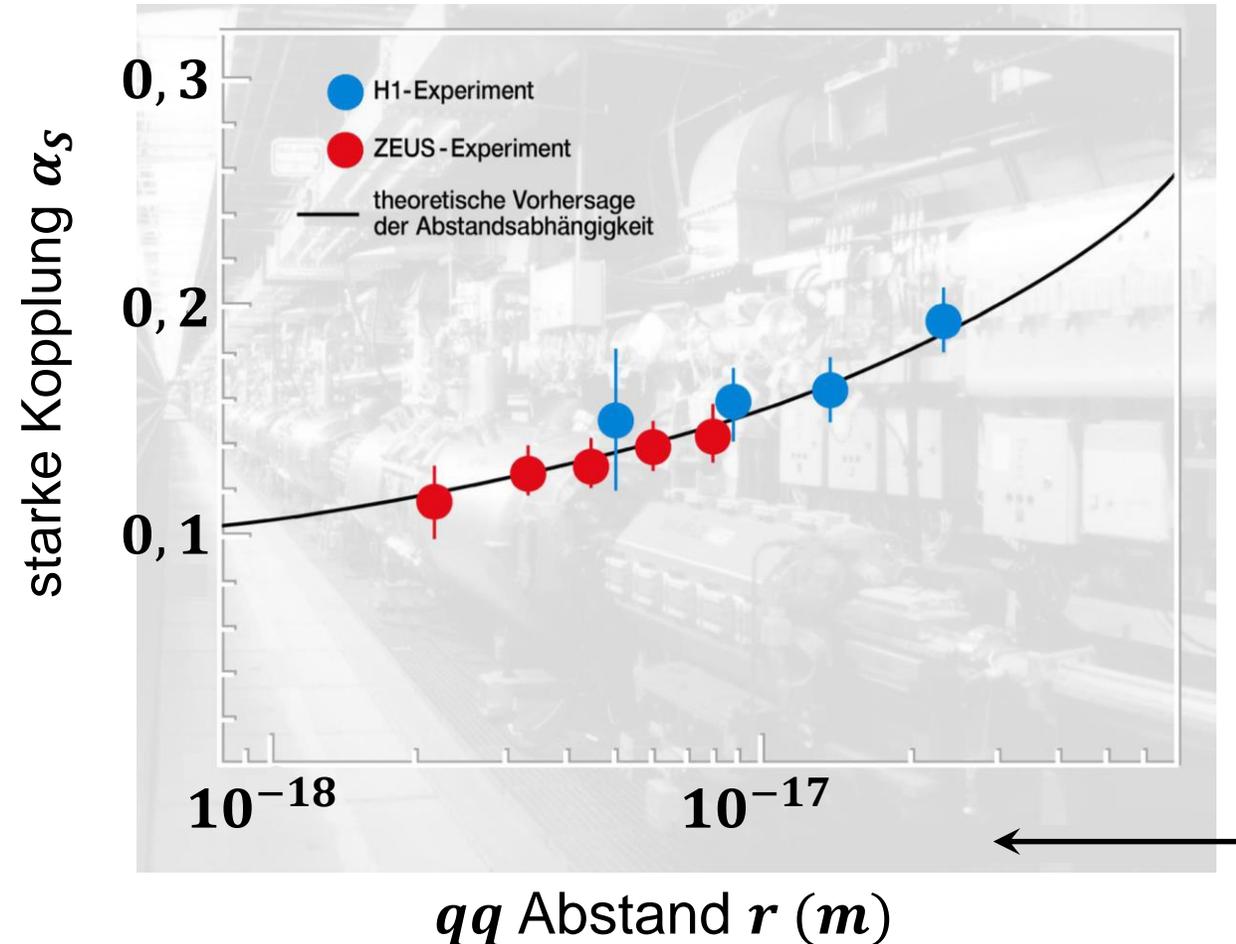
$$E_p = 920 \text{ GeV} \quad E_e = 27,5 \text{ GeV}$$



Laufende Kopplungs'konstante' α_s in der QCD

■ Starke Kopplung α_s wird schwächer bei kleineren qq – Abständen

- α_s (starke Kopplung) abhängig vom vom **Impulsübertrag Q^2** zwischen den beteiligten Teilchen
- Grund:
Vakuumzustand der QCD ist komplex, da dabei die **Emission von Gluonen** involviert ist



Laufende Kopplungs'konstante' α_s in der QCD

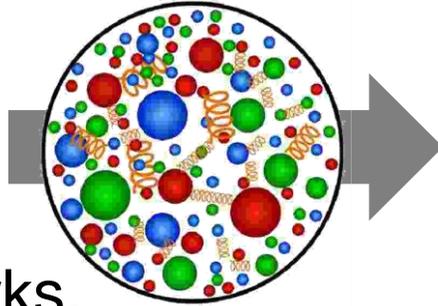
■ Starke Kopplung α_s : asymptotische Freiheit vs. 'confinement'

große Abstände r :

großes α_s

Hadronen (qqq $q\bar{q}$)

viele Gluonen, Seequarks,
keine Störungstheorie möglich

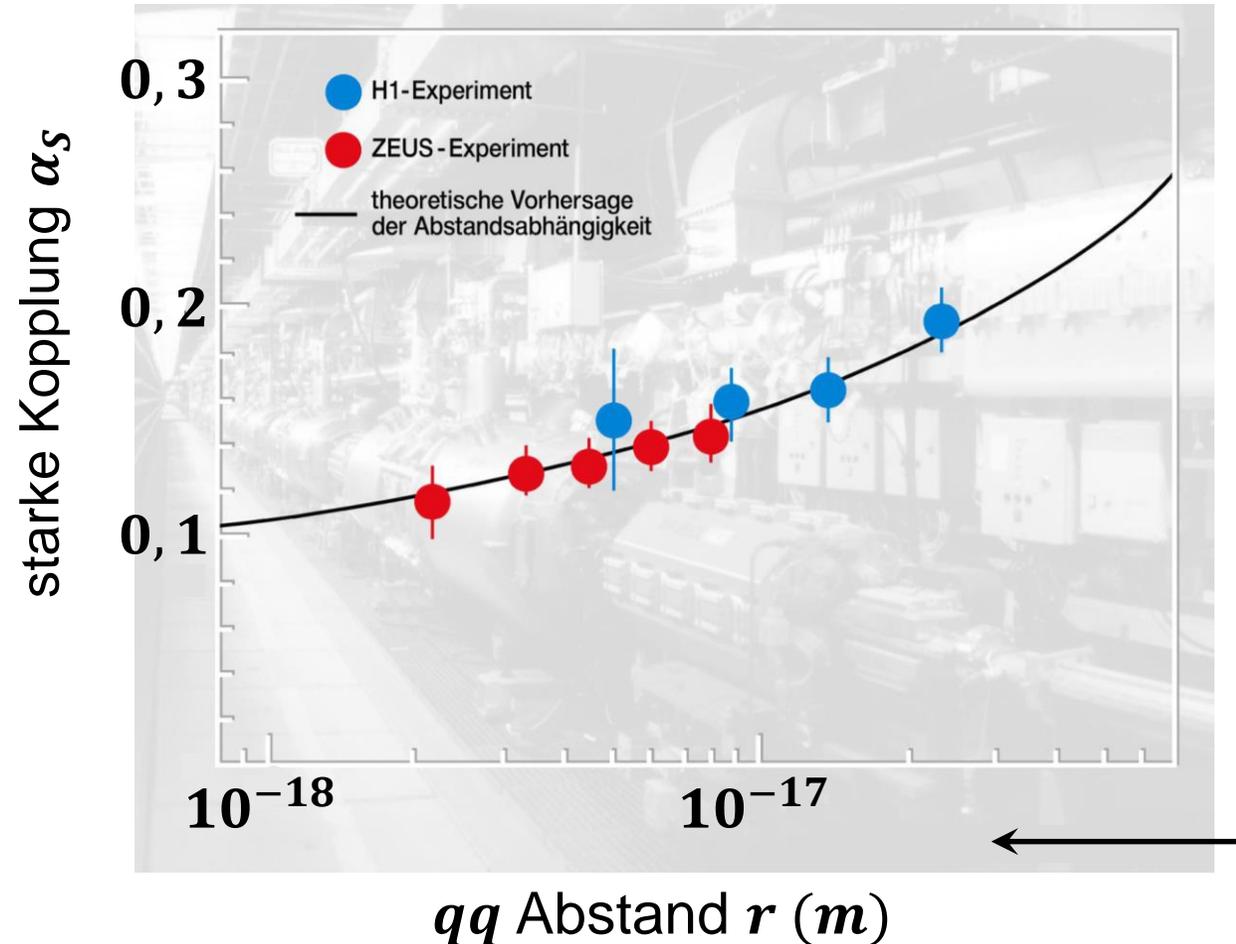
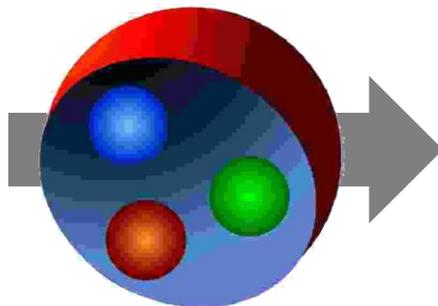


kleine Abstände r :

kleines α_s

'**quasifreie**' Partonen

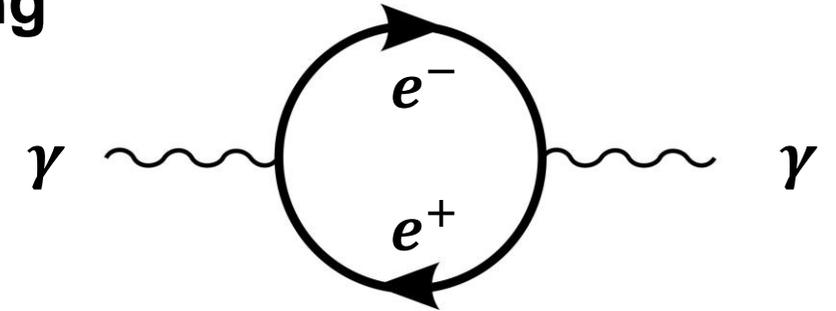
bei tief-inelastischen
Stoßprozessen (**DIS***)



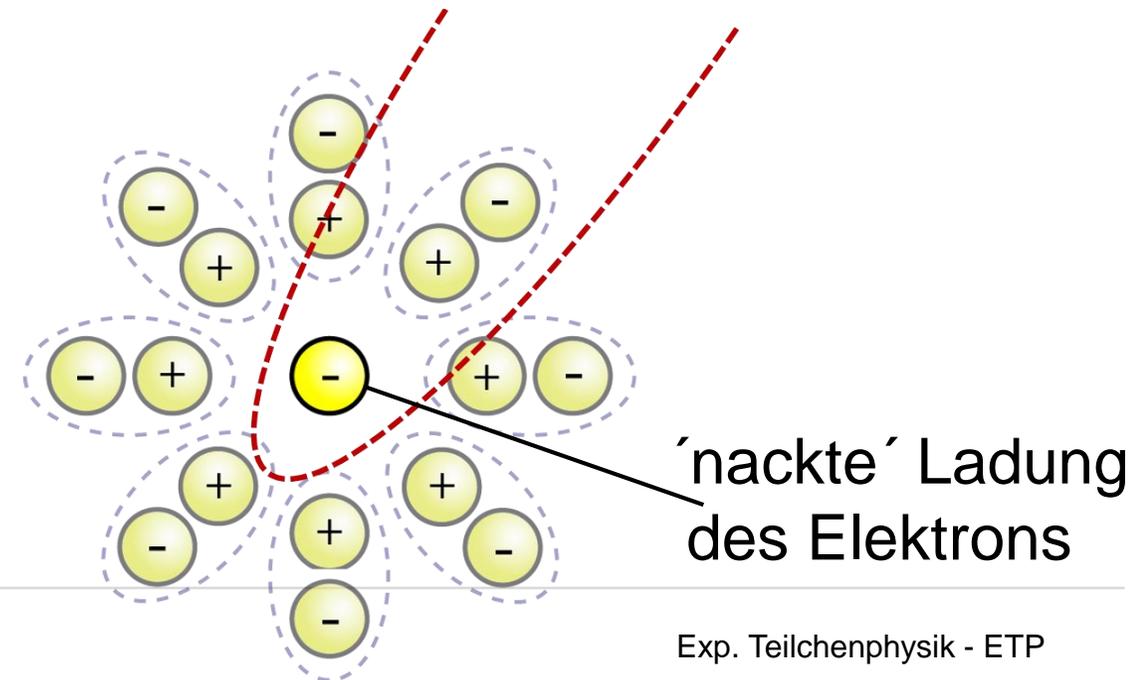
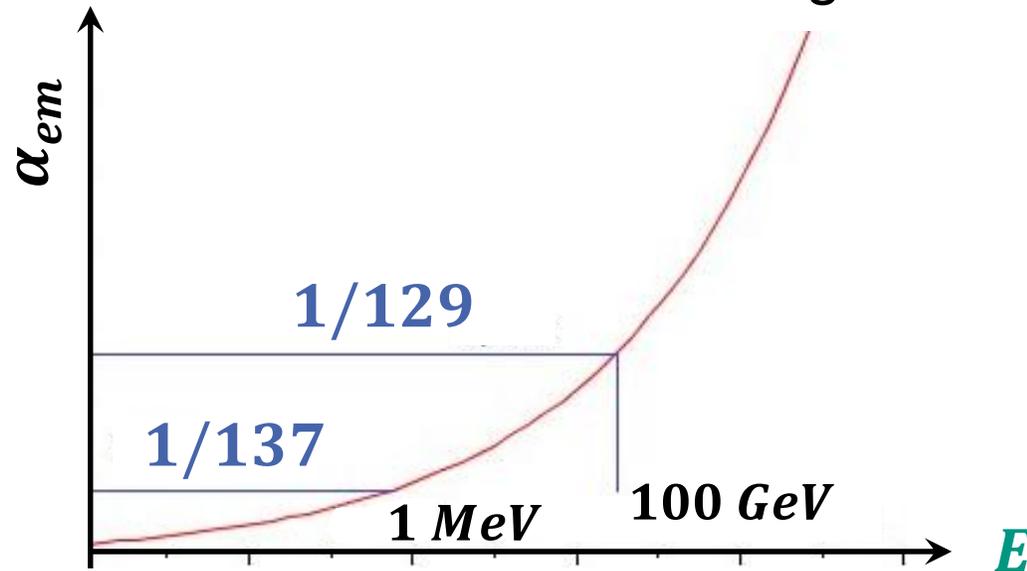
QCD – Effekte: Prozesse der Vakuumpolarisation

■ Kopplungsstärke α_s der starken Wechselwirkung

- Photon als Eichboson der *QED*:
Effekt der Vakuumpolarisation (Lamb–Shift,...)
Kopplung α nimmt ab bei größerem r
zu bei größerem E



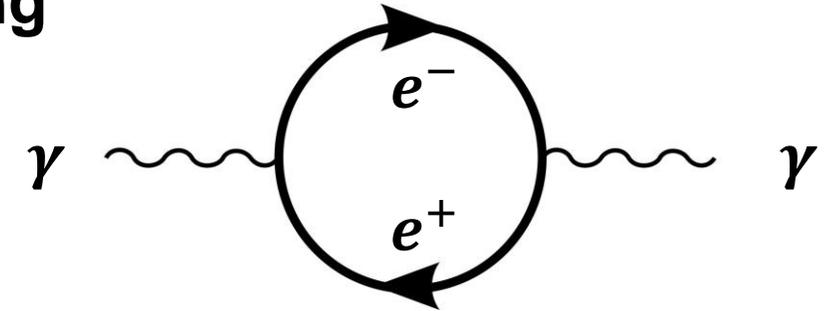
Vakuumpolarisation via $\gamma \rightarrow e^+ e^-$



QCD – Effekte: Prozesse der Vakuumpolarisation

■ Kopplungsstärke α_s der starken Wechselwirkung

- Photon als Eichboson der *QED*:
Effekt der Vakuumpolarisation (Lamb–Shift,...)
Kopplung α nimmt ab bei größerem r



Vakuumpolarisation via $\gamma \rightarrow e^+ e^-$

- **Gluonen** als Eichbosonen der *QCD*:
tragen selber eine *QCD* – Ladung (**Farbe/Antifarbe**) !
- zwei gegenläufige Effekte in der *QCD*:

Abschirmung (Screening)

Anti-Abschirmung (Antiscreening)



der 'nackten' Farbladung
(r, g, b) eines Quarks q

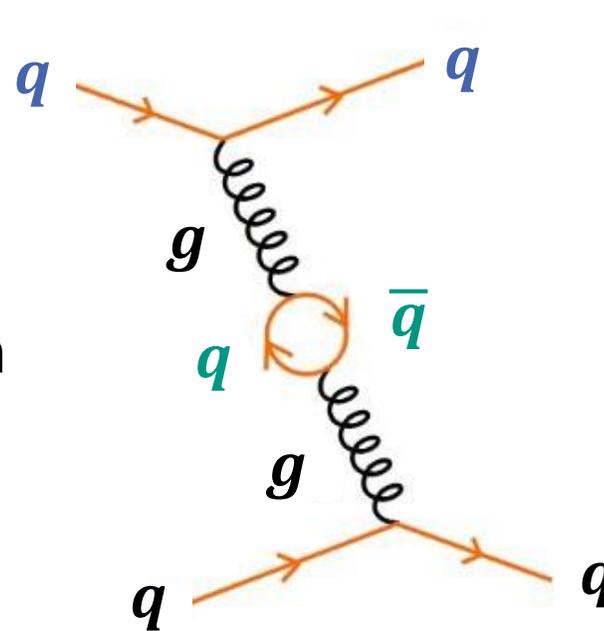
QCD – Effekte: Prozesse der Vakuumpolarisation

■ Abschirmung der Farbladung eines 'nackten' Quarks q

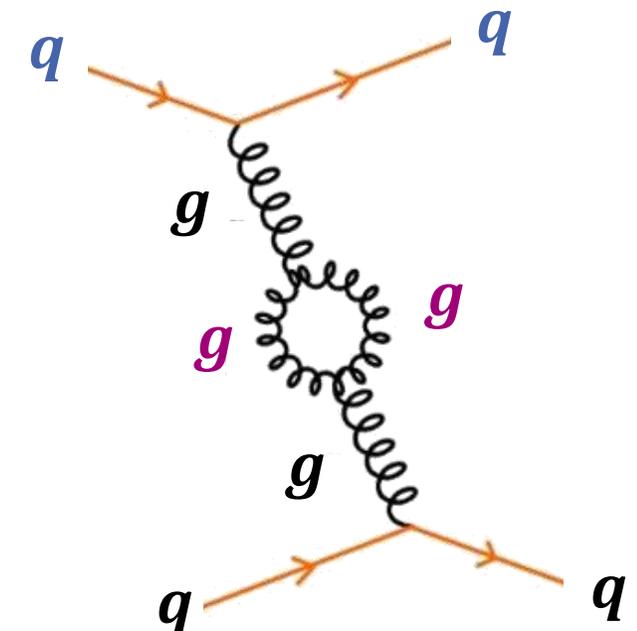
- Erzeugung von **virtuellen Quark–Antiquark $q\bar{q}$** Paaren (analog zur **QED**)
die **$q\bar{q}$** – Paare tragen aber **keine Netto-Farbladung**

■ Anti-Abschirmung der Farbladung des 'nackten' Quarks q

- emittiertes Gluon g erzeugt **2 virtuelle Gluonen**, diese nehmen Farbladungen mit \Rightarrow diese verteilt sich auf ein größeres Volumen (dominant bei kleinen Abständen, sofern # Flavour-Arten $n_f \leq 16$)



Screening Korrektur



Anti-Screening Korrektur

Laufende Kopplungs´konstante´ α_s in der QCD

■ Starke Kopplung α_s wird schwächer für ...

- ... höhere Energien \sqrt{s} / höhere Impulsüberträge Q^2 / größere Massenskalen μ
- ... kleinere Abstände r

■ Laufen der starken Kopplung α_s : Beiträge durch Quarks & Gluonen

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{\alpha_s(\mu)}{1 + \frac{33 - 2 \cdot n_f}{12 \pi} \cdot \alpha_s(\mu) \cdot \ln(Q^2/\mu^2)}$$

Quarks: Zahl n_f der Flavour–Arten

Gluonen: Zahl n_c der Farb–Ladungen $\times 11$

Laufende Kopplungs´konstante´ α_s : Messungen

■ Starke Kopplung α_s bei verschiedenen experimentellen Impulstransfers Q

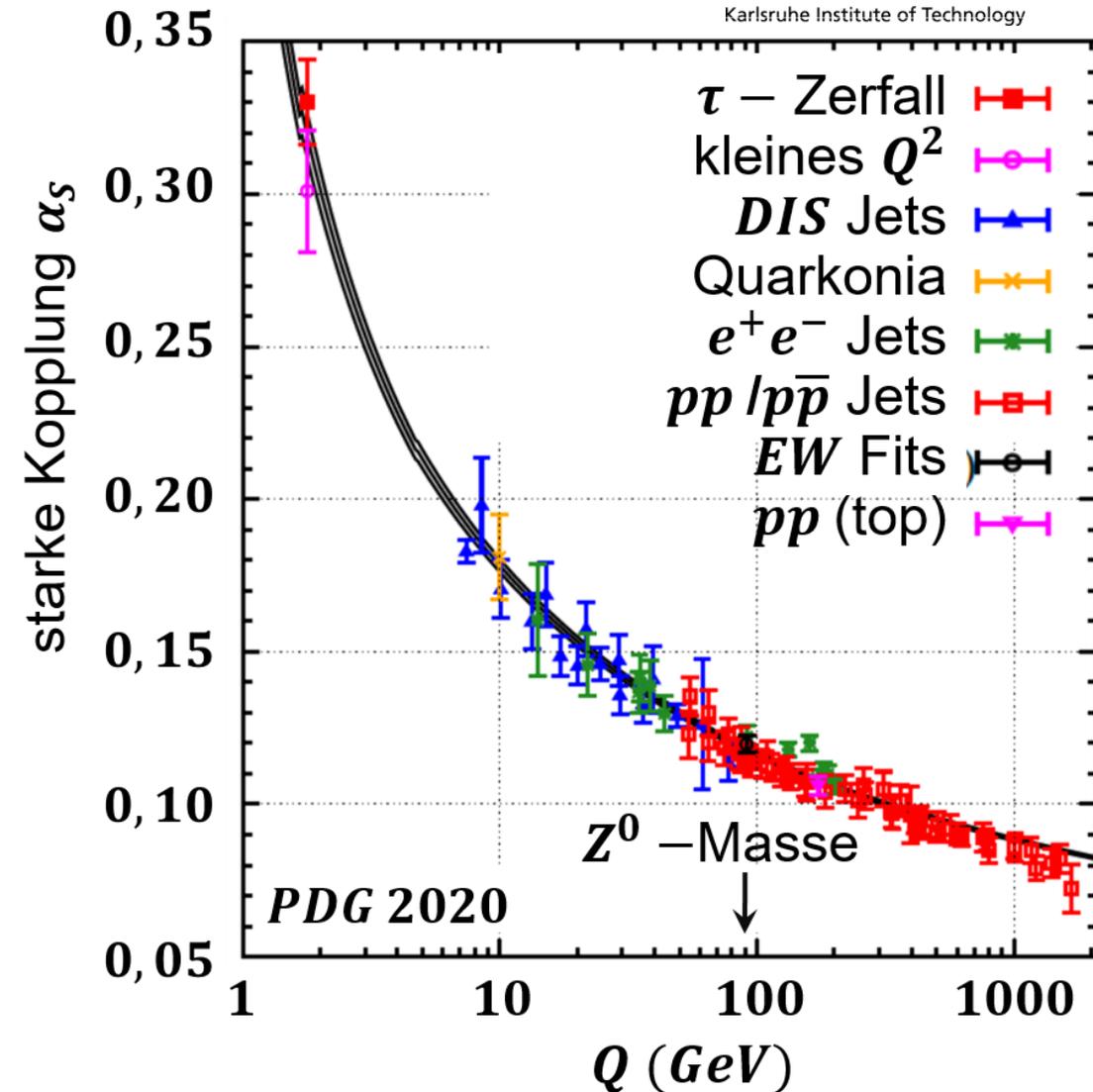
- Energie–Bezugspunkt für α_s ist Masse M_Z des Z^0 – Bosons (**90 GeV**)

$$\alpha_s(M_Z) = 0,1179 \pm 0,0010$$

- Wert von α_s hängt implizit ab von der Zahl der **Farbfreiheitsgrade** η_c , aus Anpassung an experim. Daten:

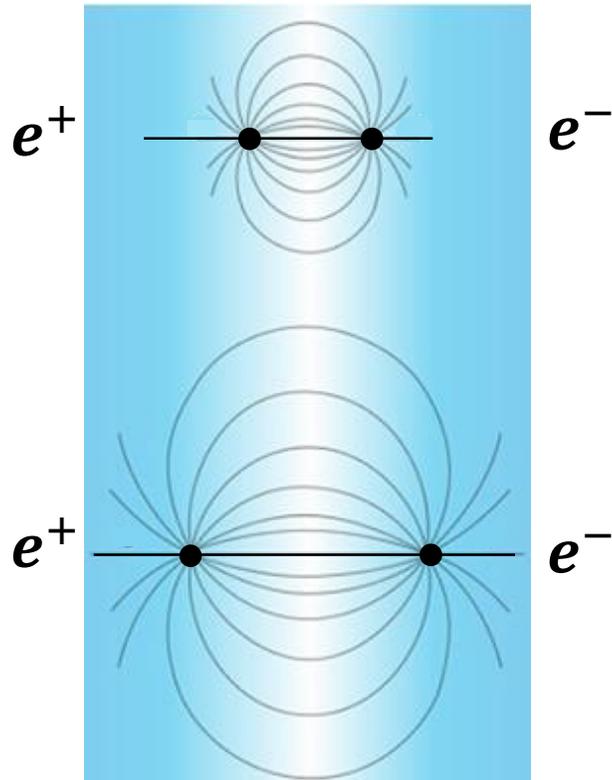
$$\eta_c = 3,03 \pm 0,12$$

QCD ✓

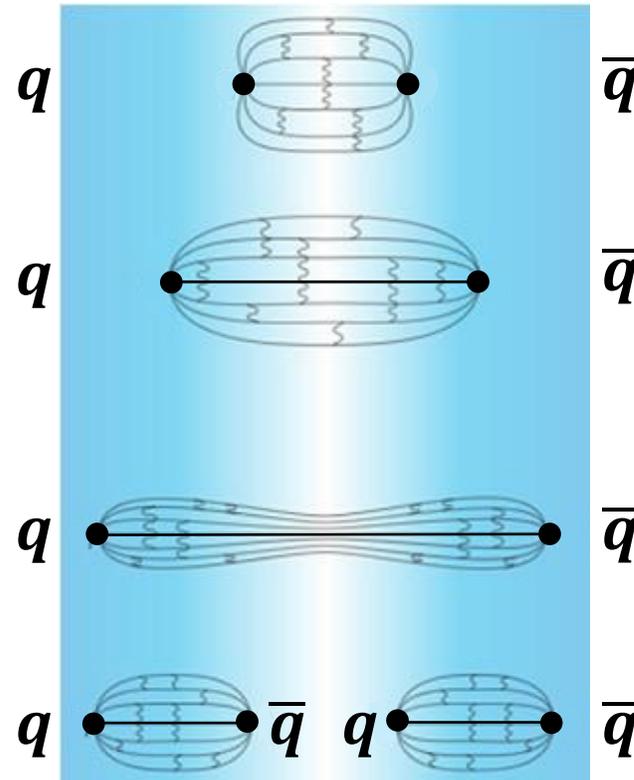


Starke Farbkraft: Selbstwechselwirkung Gluonen

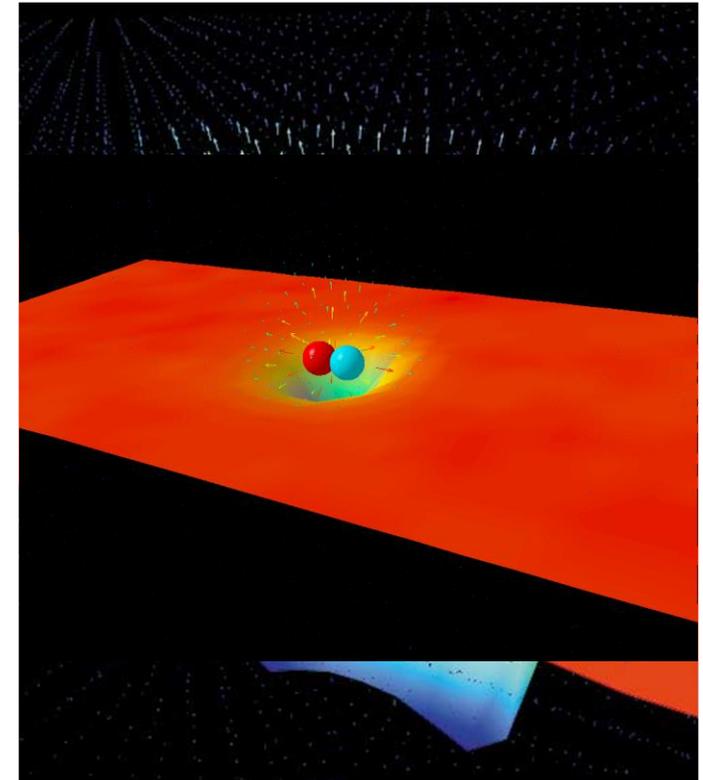
■ Flussschläuche der *QED* & *QCD*



QED: neutrale Photonen

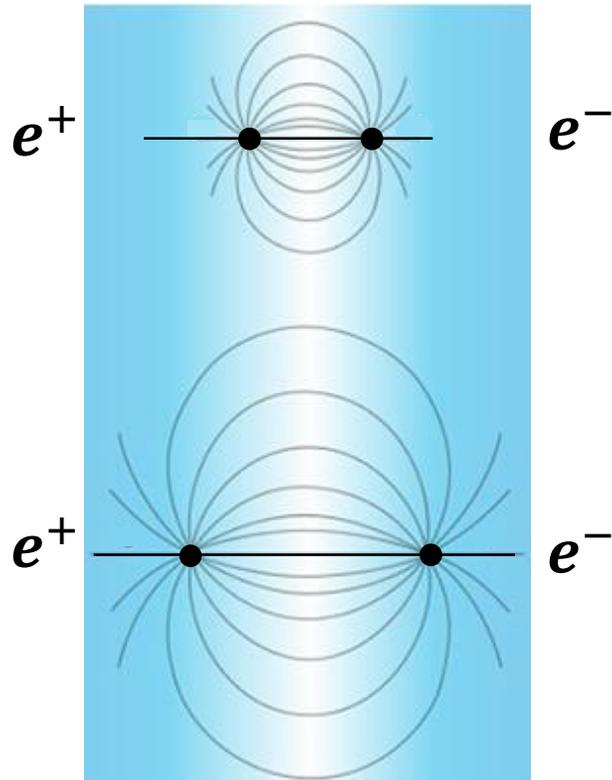


QCD: geladene Gluonen

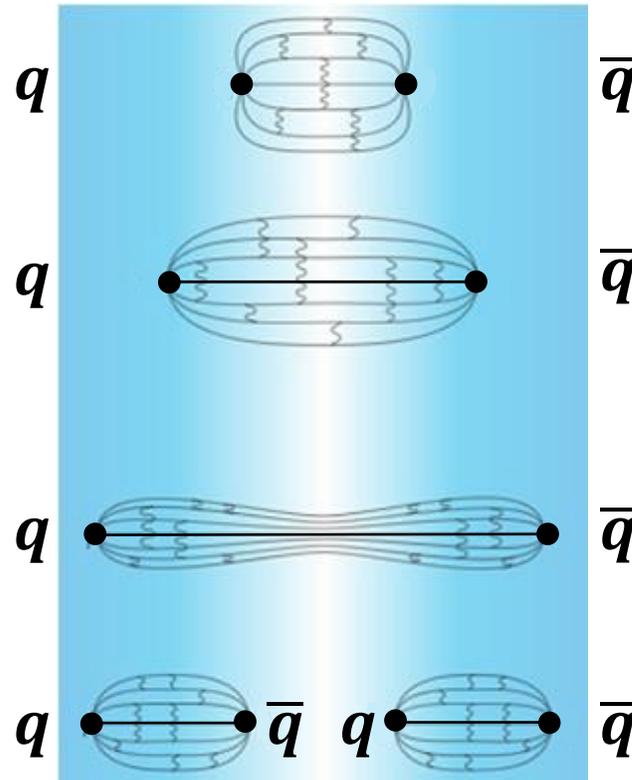


Starke Farbkraft: Selbstwechselwirkung Gluonen

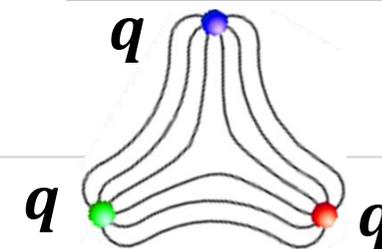
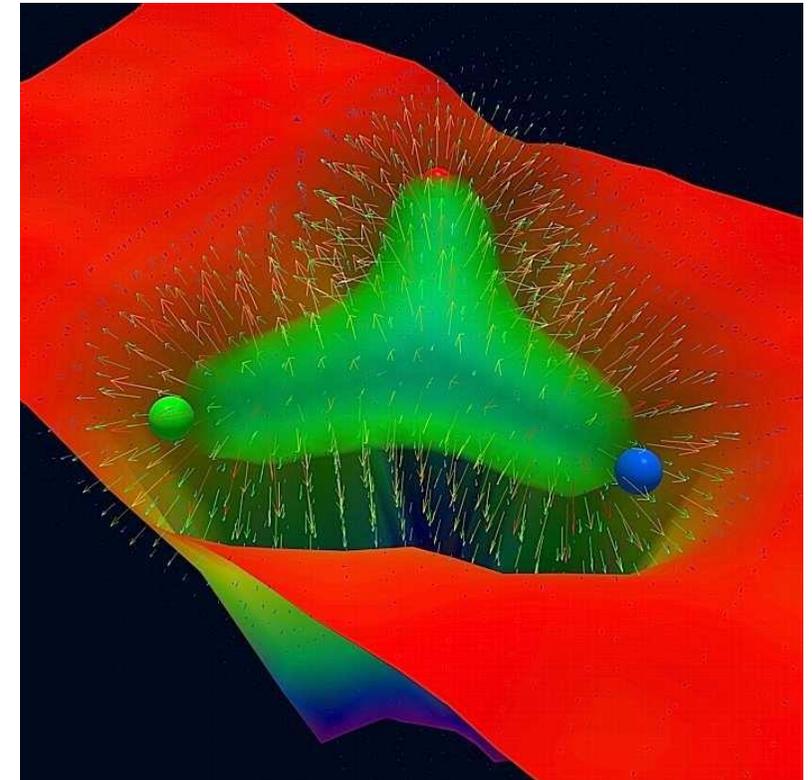
■ Flussschläuche der *QED* & *QCD*



QED: neutrale Photonen



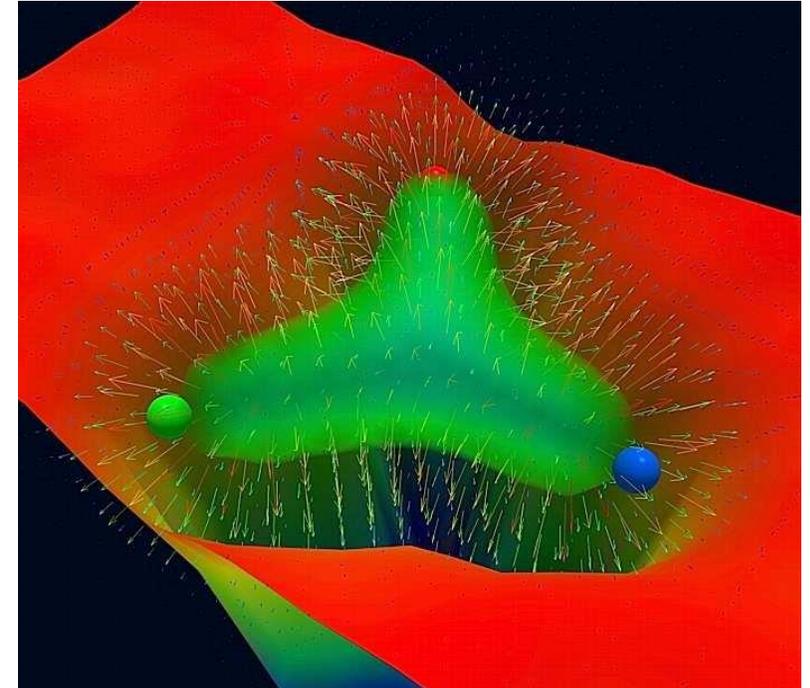
QCD: geladene Gluonen



Starke Farbkraft: Selbstwechselwirkung Gluonen

■ *QCD*: Konzept der **asymptotischen Freiheit**

- bei extrem kurzen Abständen sollten sich die Quarks entsprechend der *QCD* (*Wilzeck, Gross, Politzer*) wie nahezu freie Teilchen verhalten
- ermöglicht die Anwendung des Quark-Parton Modells zur Interpretation der tiefinelastischen eN – Streuung



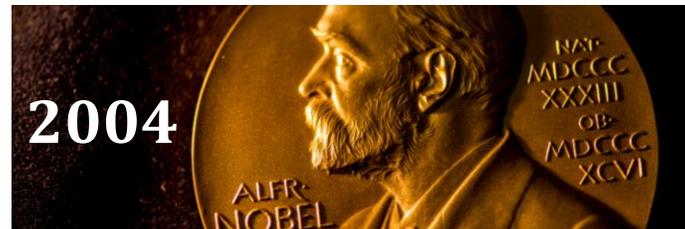
Frank
Wilczek



David J.
Gross



H. David
Politzer

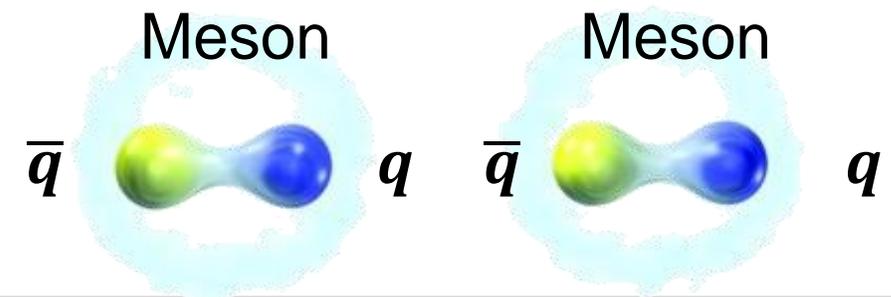
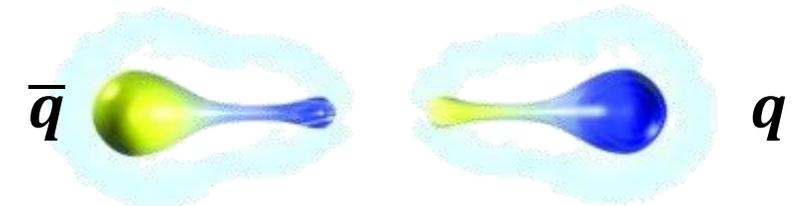
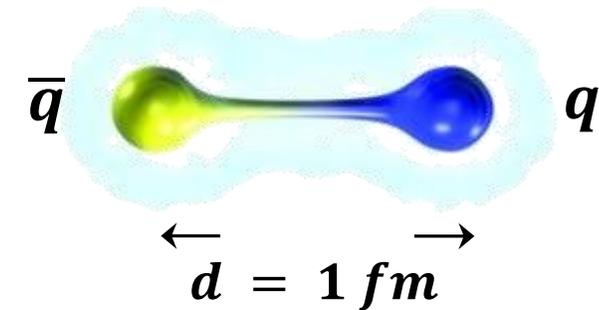
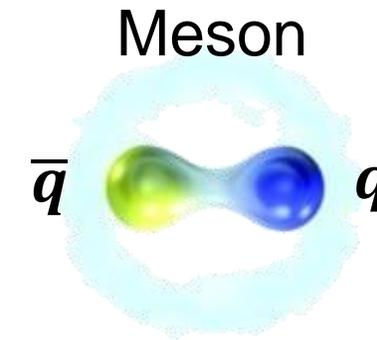


*"for the discovery of **asymptotic freedom** in the theory of the strong interaction"*

Starke Farbkraft: Hadronisierung

■ QCD: Konzept der Hadronisierung

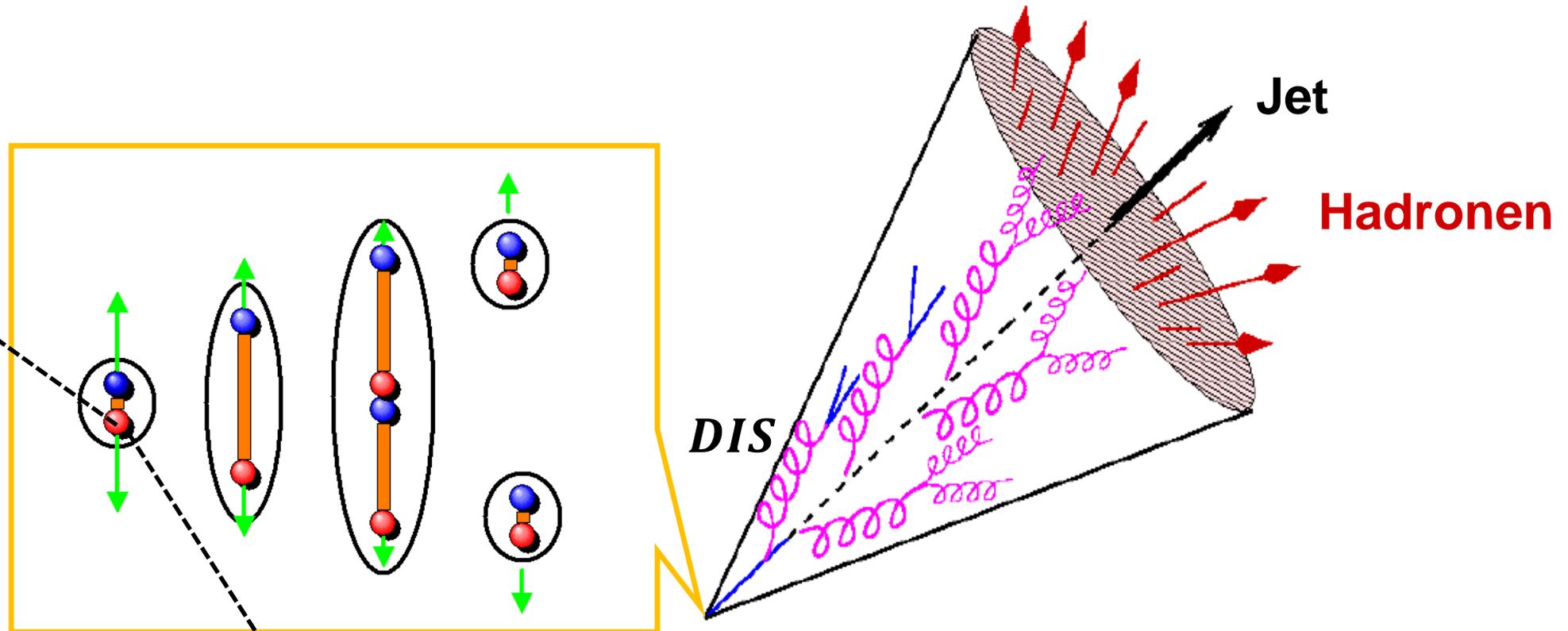
- bei harten Stoßprozess wird das $q\bar{q}$ –Paar räumlich voneinander getrennt & die Energie im farbelektrischen Flussschlauch wird so groß, dass ein weiteres **Quark–Antiquark Paar** erzeugt wird: man erhält **2 Mesonen**
- bei $d \cong 1 \text{ fm}$ erreicht man einen Wert von $E_{pot} \approx 1 \text{ GeV}$, dies reicht aus für $q\bar{q}$ – Paar
- Prozess der **Hadronisierung** kann sich mehrmals wiederholen:
⇒ Ausbildung eines **hadronischen Jets**



Starke Farbkraft: Jetstrukturen

■ *QCD*: Ausbildung von hadronischen Jets

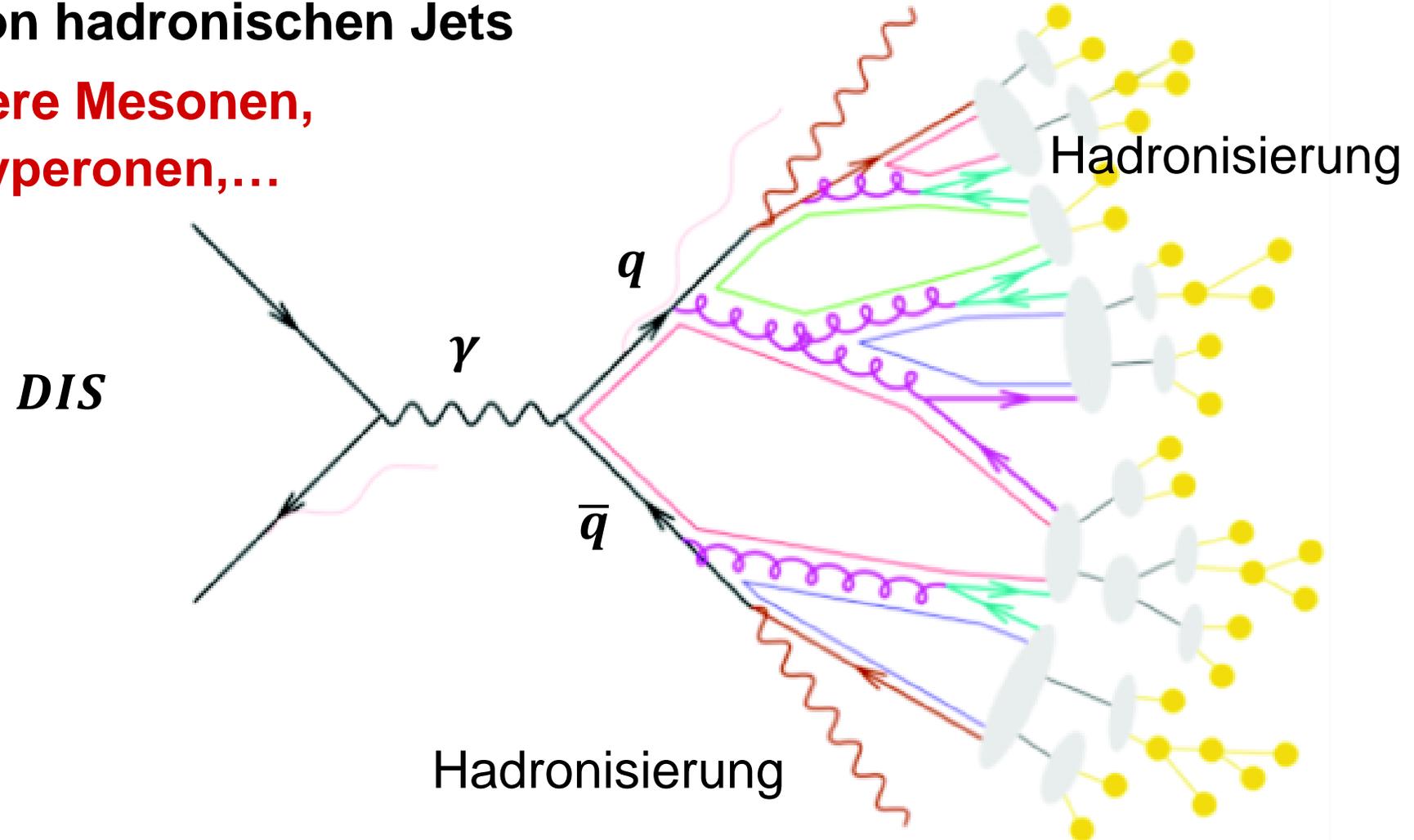
**Pionen, schwere Mesonen,
Nukleonen, Hyperonen,...**



Starke Farbkraft: Jetstrukturen

■ *QCD*: Ausbildung von hadronischen Jets

**Pionen, schwere Mesonen,
Nukleonen, Hyperonen,...**



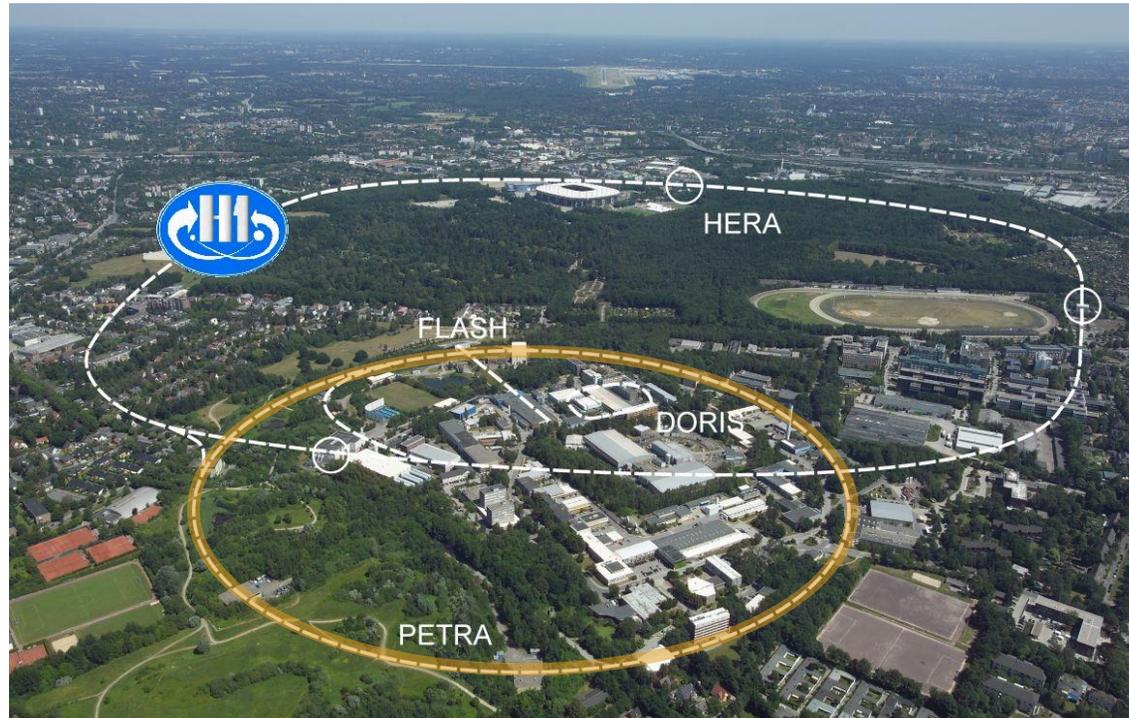
Starke Farbkraft: Nachweis von 3 –Jet Ereignissen

KIT
Karlsruhe Institute of Technology

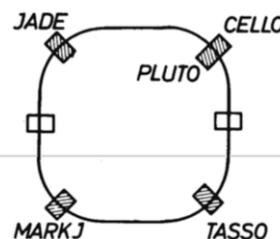
■ DESY: erster Nachweis von Gluonen am *PETRA* Collider

PETRA:

Positron-
Elektron
Tandem
Ring
Anlage



e^+e^- – Collider bis 19 GeV

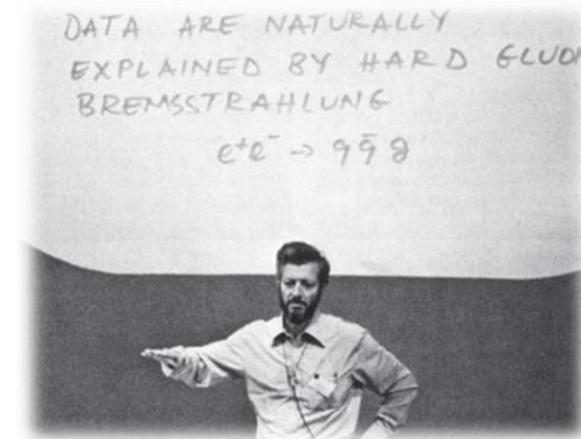
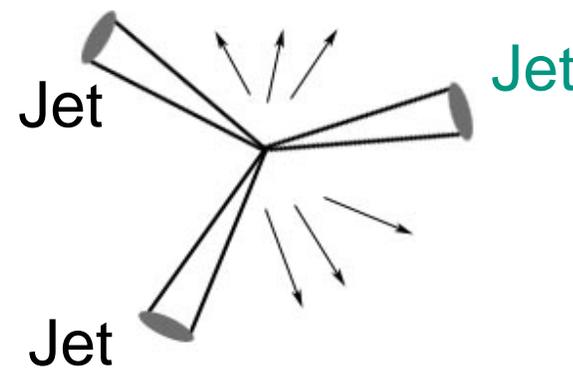
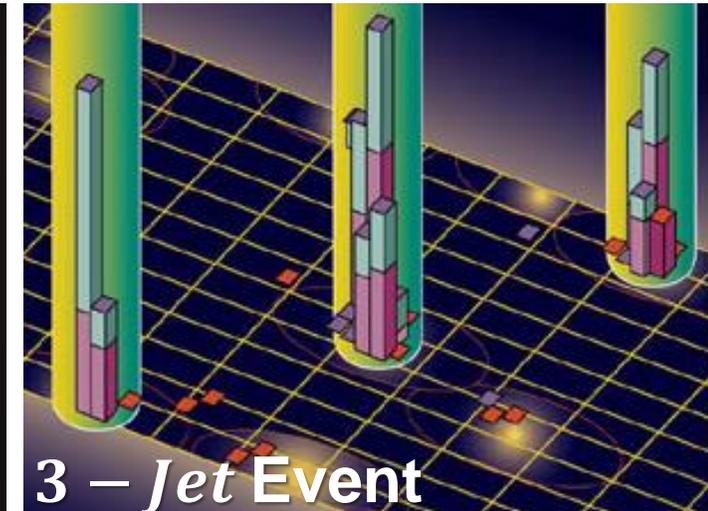
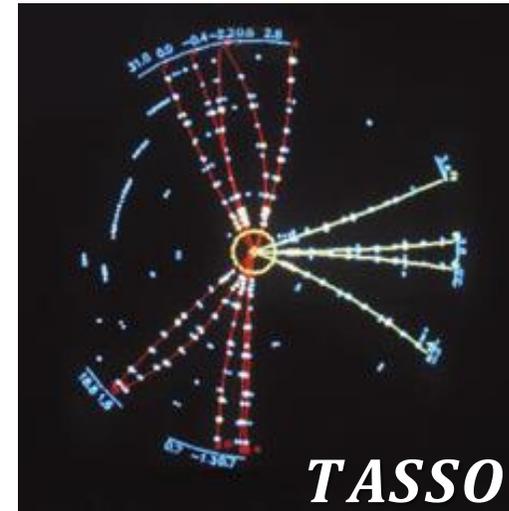
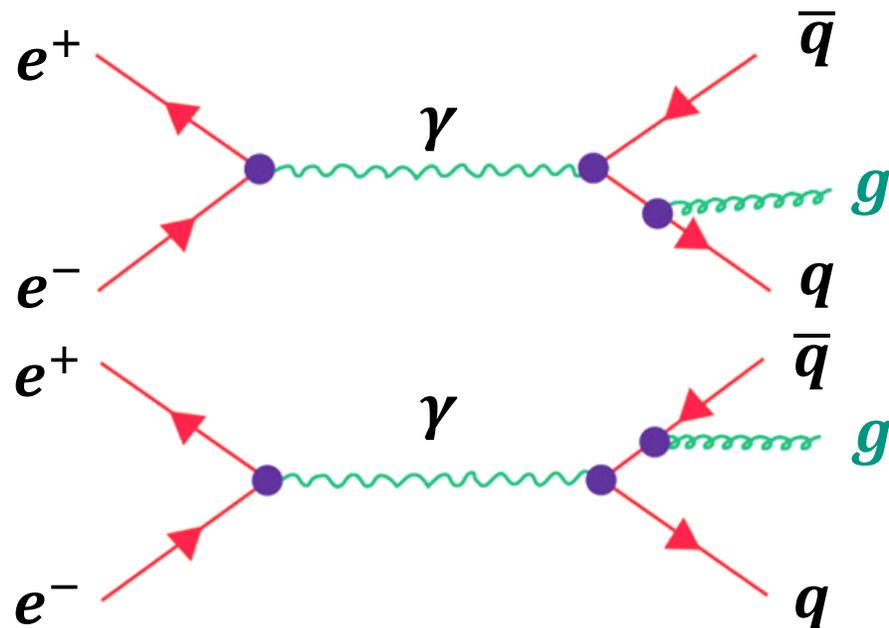


Starke Farbkraft: Nachweis von 3 – Jet Ereignissen

KIT
Karlsruhe Institute of Technology

■ 1979: erster Nachweis von Gluonen über **hadronische 3 – Jet Signaturen**

- Abstrahlung eines 'harten' Gluons & Ausbildung von 3 Jets:
1 Jet von q , 1 Jet von \bar{q} , **1 Jet von g**



Starke Farbkraft: Jetstrukturen

■ hadronische Jets im *CMS* Experiment am *LHC*

- Analysen* von kinematischen Größen:

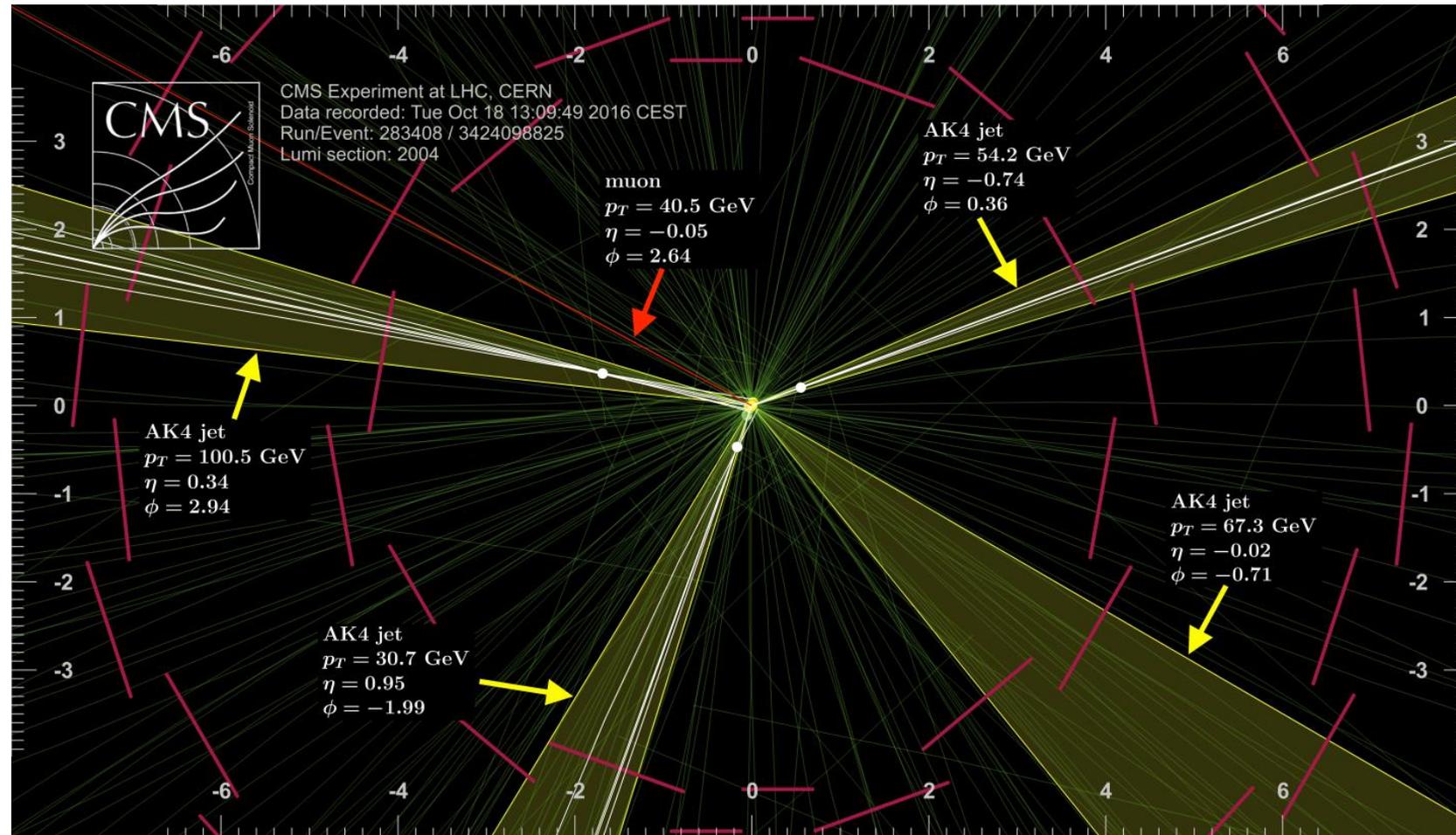
p_T : transversaler Impuls

E_T : transversale Energie

Jet–**Multiplizität**



Rückschlüsse
auf Vertex

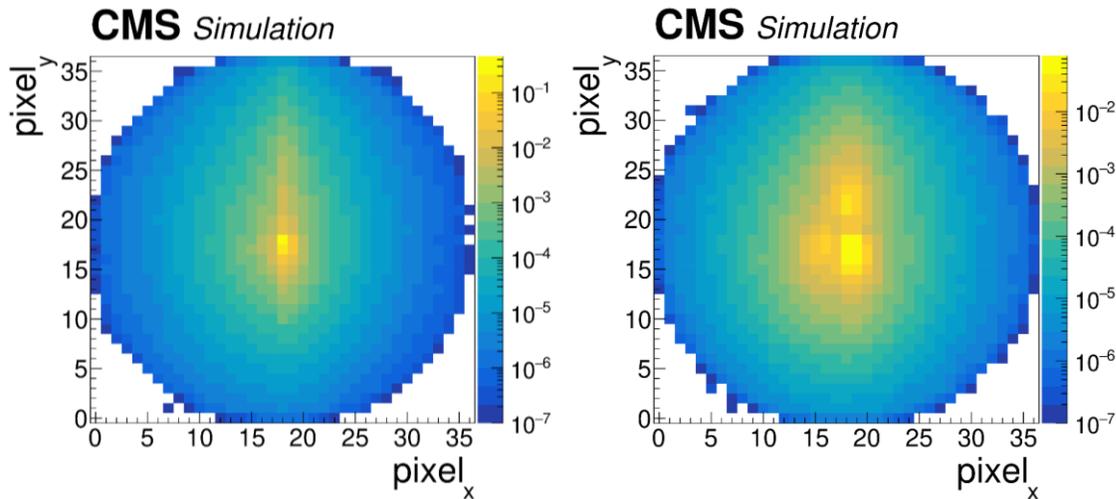


Starke Farbkraft: Jetstrukturen

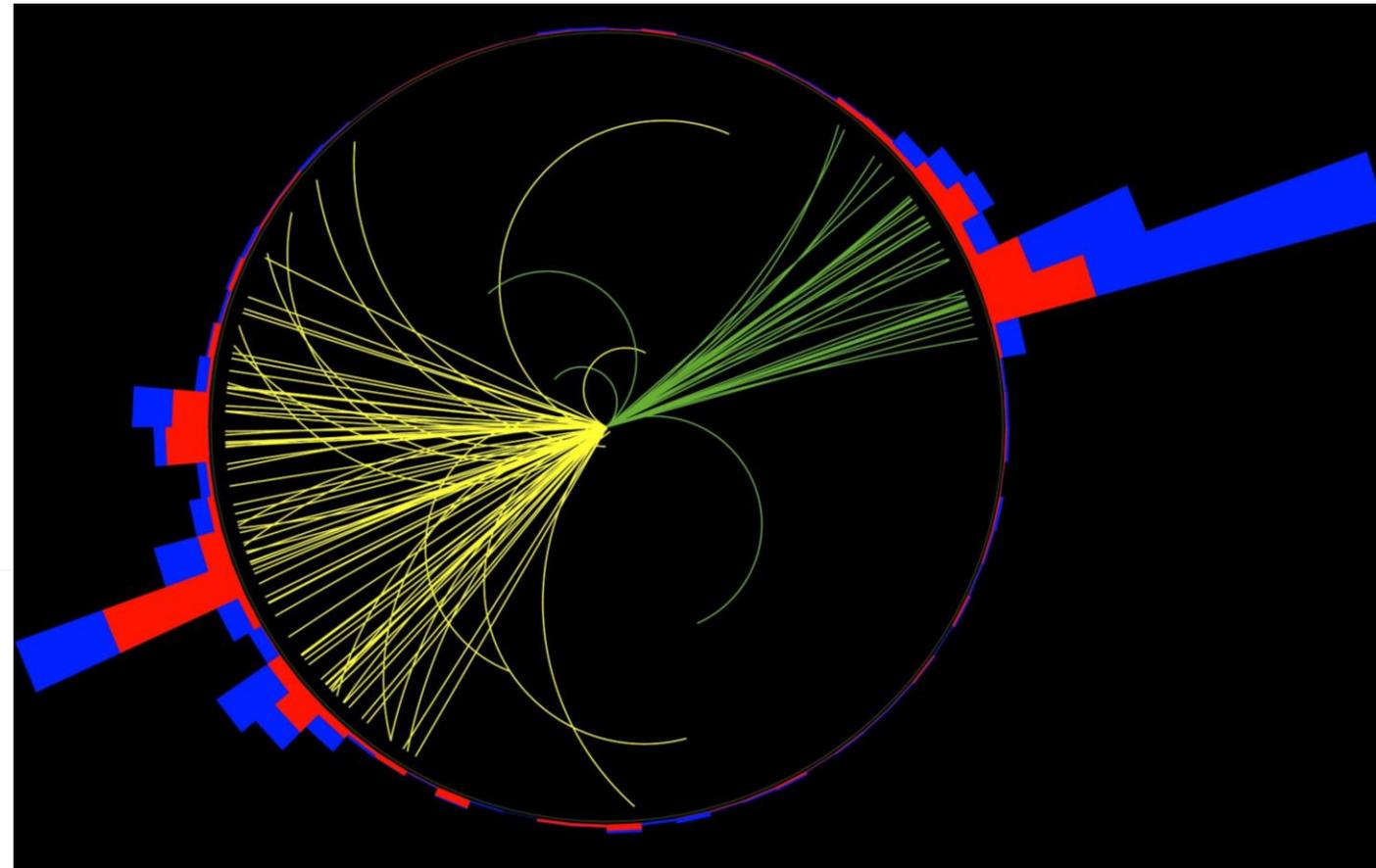
■ hadronische Jets im *CMS* Experiment am *LHC*

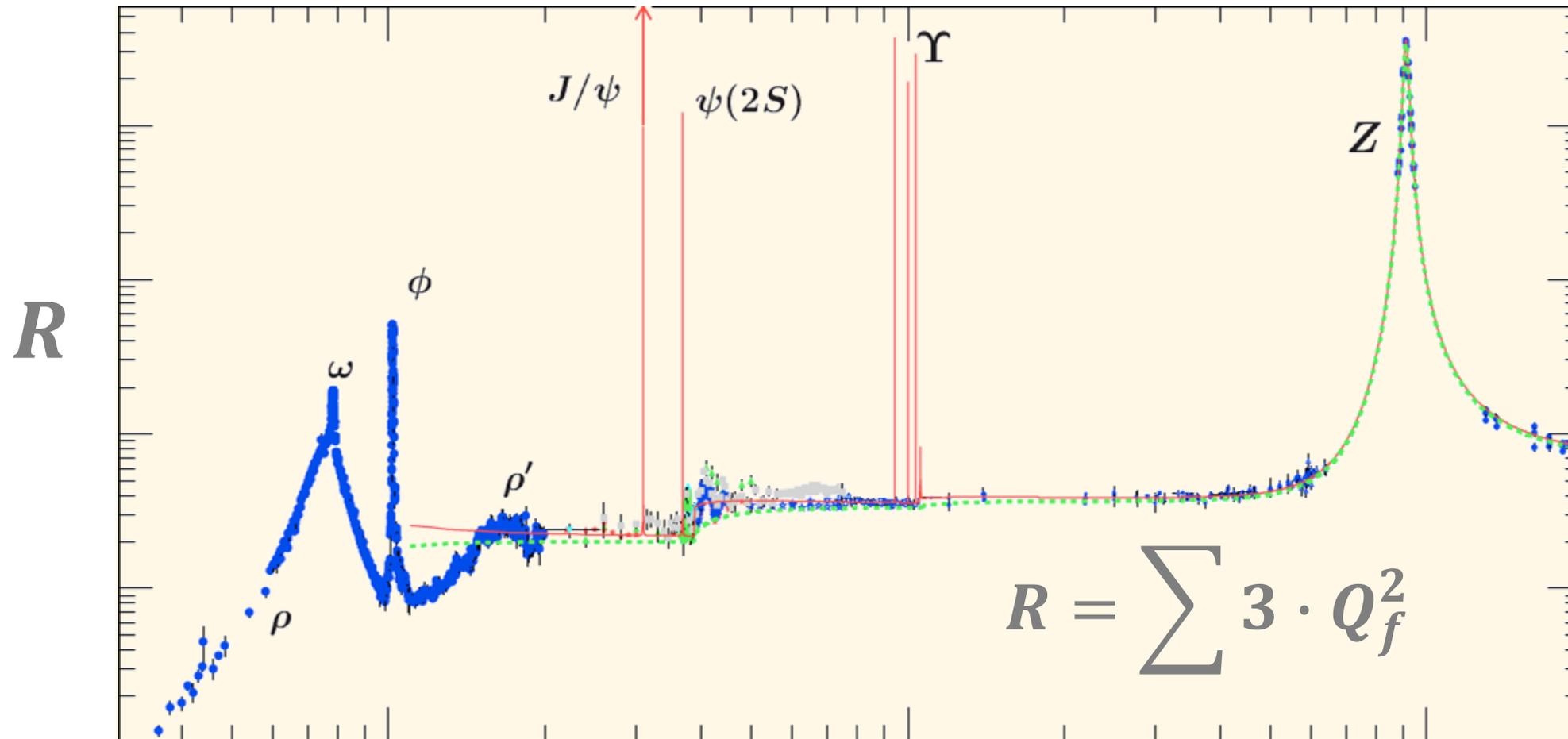
leichte Quarks

top Quarks



2 top–Quarks, die
in hadronische Jets
zerfallen





EINSCHUB – ANZAHL DER FARBLADUNGEN

Anzahl Quark – Farbladungen / – Flavourzustände

- Observable R zur Bestimmung der Flavour–Ladungszustände Q_f^2

Bestimmung von Wirkungsquerschnitts–Verhältnis R ...

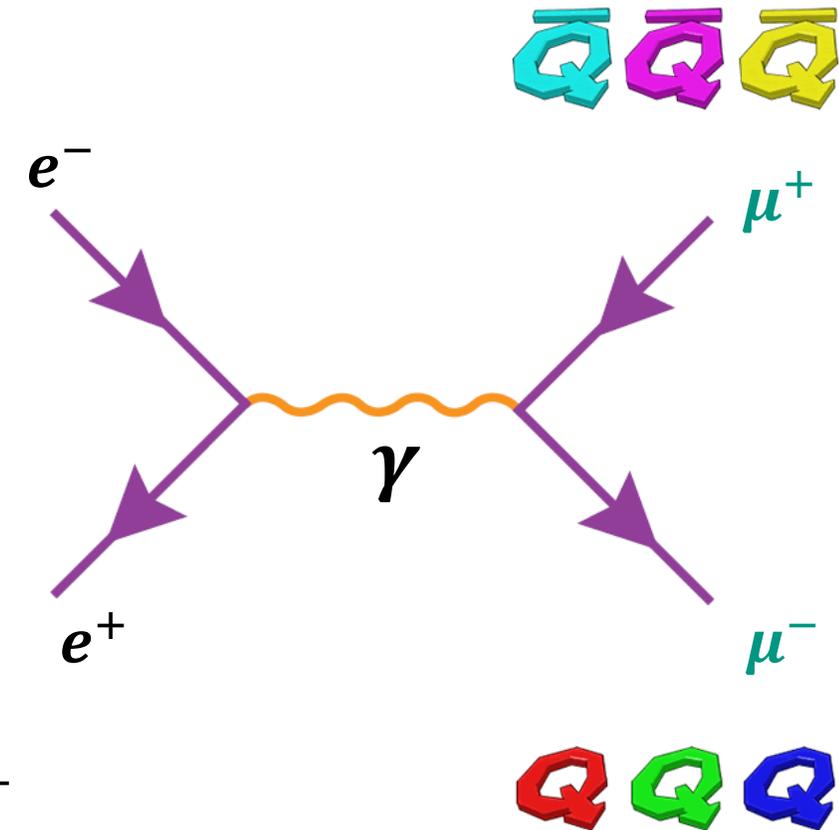
$$R = \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \text{Hadronen})}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)} = 3 \cdot \sum Q_f^2$$

... an $e^+ e^-$ – Collidern mit hohem \sqrt{s}

- $e^+ e^-$ – Annihilation (virtuelle Photonen γ) in :

Quark–Antiquark Paaren: $u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}...$

Lepton–Antilepton Paaren: $e^+ e^-, \mu^+ \mu^-, \tau^+ \tau^-$



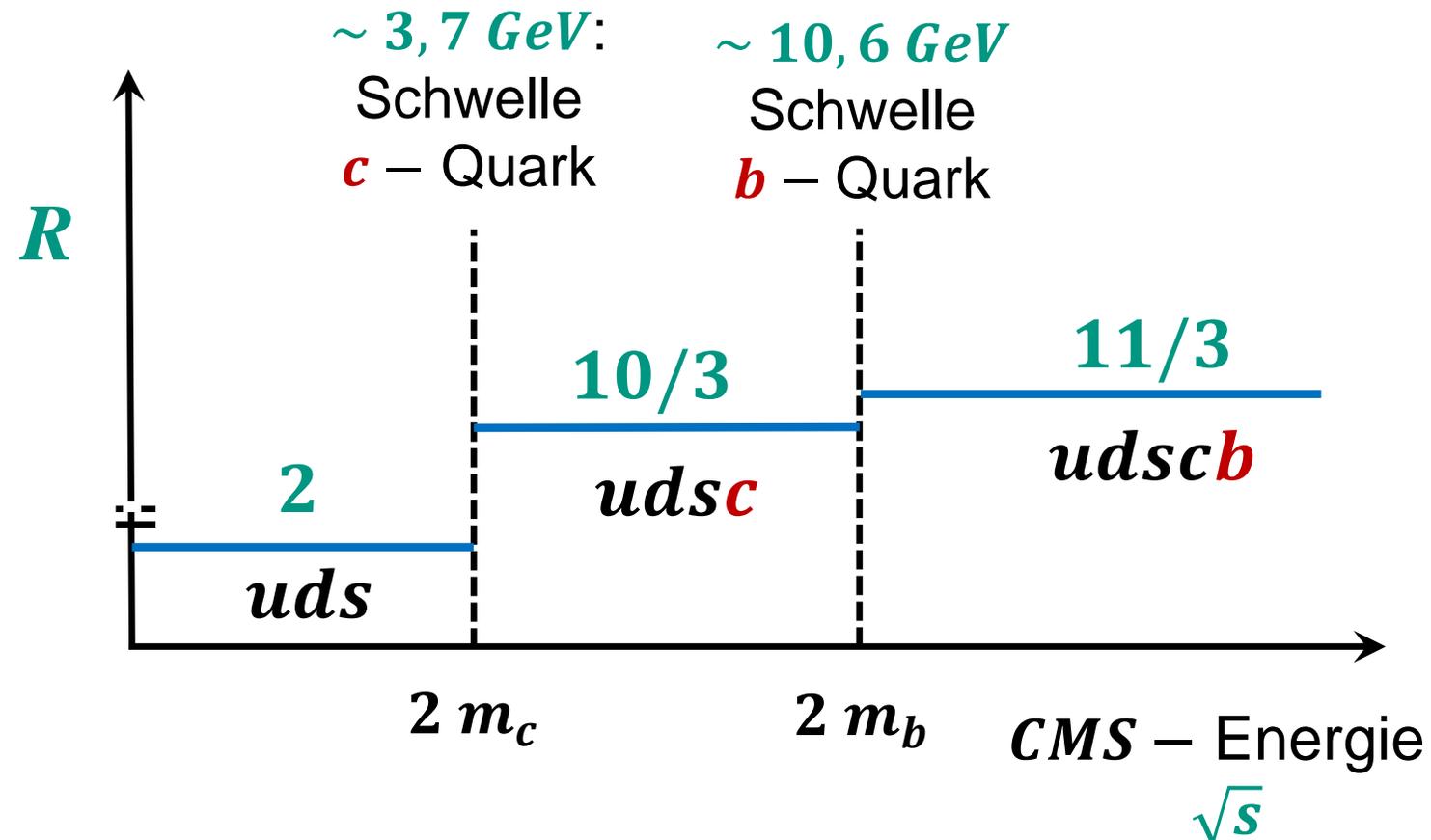
Anzahl Quark – Farbladungen / – Flavourzustände

■ Messungen der Observable R

- ab der kinematischen Schwelle wird ein **neuer Flavourzustand** (c , b) erzeugt

$$R = 3 \cdot \Sigma Q_f^2$$

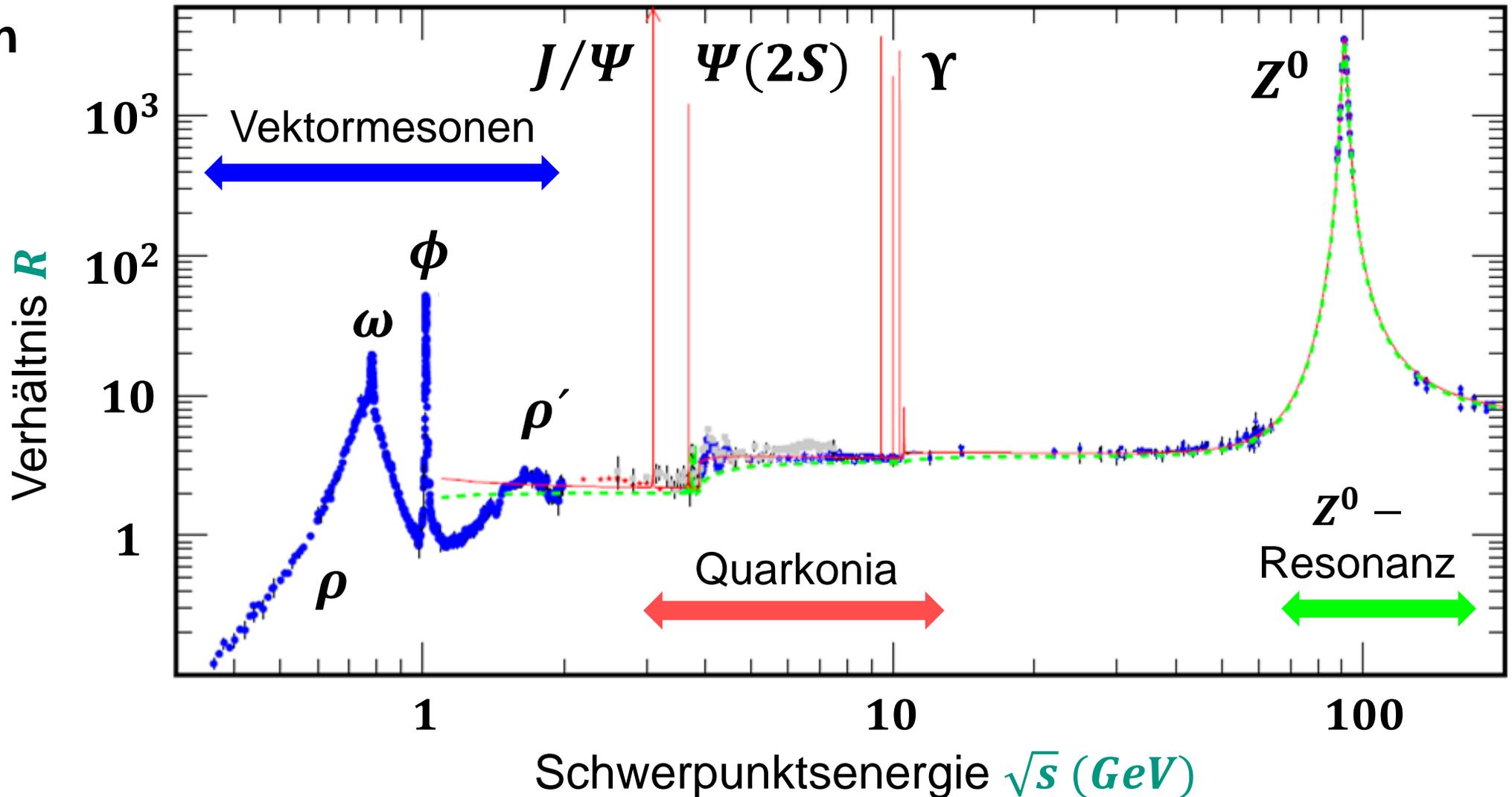
	u	d	s	c	b
Q_f	$+2/3$	$-1/3$	$-1/3$	$+2/3$	$-1/3$
Q_f^2	$4/9$	$1/9$	$1/9$	$4/9$	$1/9$
	ΣQ_f^2				



Gesamtüberblick über die Hadron-Produktion

■ Hadronen

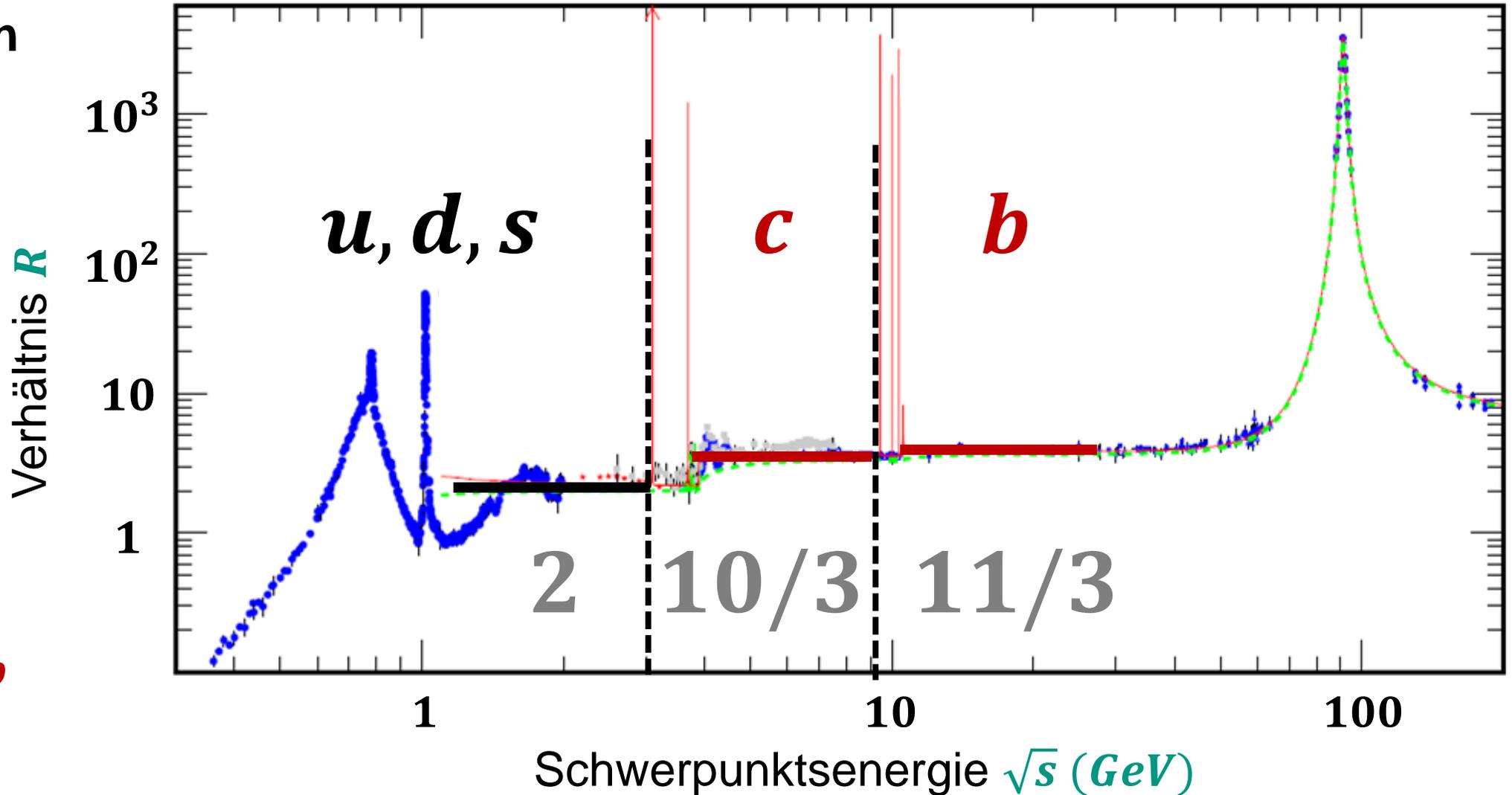
- niedrige Energien:
Vektor-Mesonen
 $\rho, \omega, \phi, \rho'$
- mittlere Energien:
Quarkonia
 $J/\Psi, \Upsilon$ und Anregungen



Gesamtüberblick über die Hadron-Produktion

■ Hadronen

- niedrige Energien:
drei Flavours u, d, s
- mittlere Energien:
weitere Flavours c, b
- + FARBE

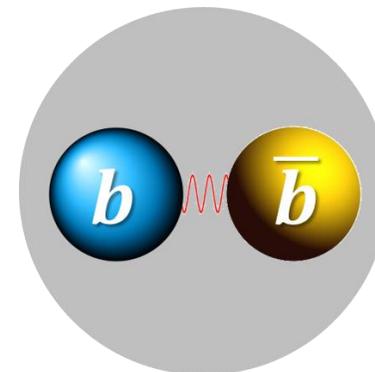
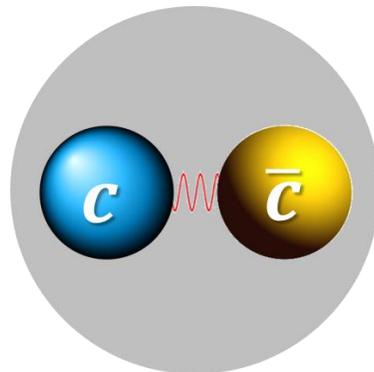


■ Messungen der Observable R

- man beobachtet **5 Quark–Flavour–Zustände** (top t zu kurzlebig für $t\bar{t}$)
- ohne Einbeziehung der **3 Farbfreiheitsgrade** keine Übereinstimmung !

■ Recap: Resonanzen

- direkt an der kinematischen Schwelle beobachtet man Resonanzen*
wie das J/ψ (**Charmonium**) oder Υ (**Bottomonium**)



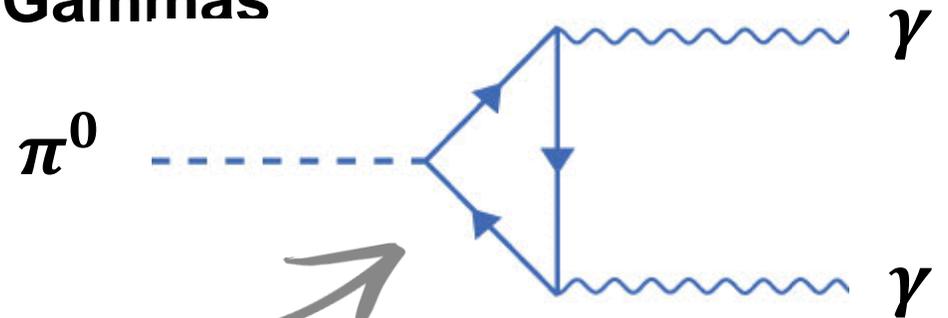
Weitere Evidenz für Farbladung

■ Zerfallsrate von neutralen Pionen π^0 in 2 Gammas

- Zerfallsprozess $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$:

beeinflusst durch
Anzahl der *QCD* –
Farbladungen

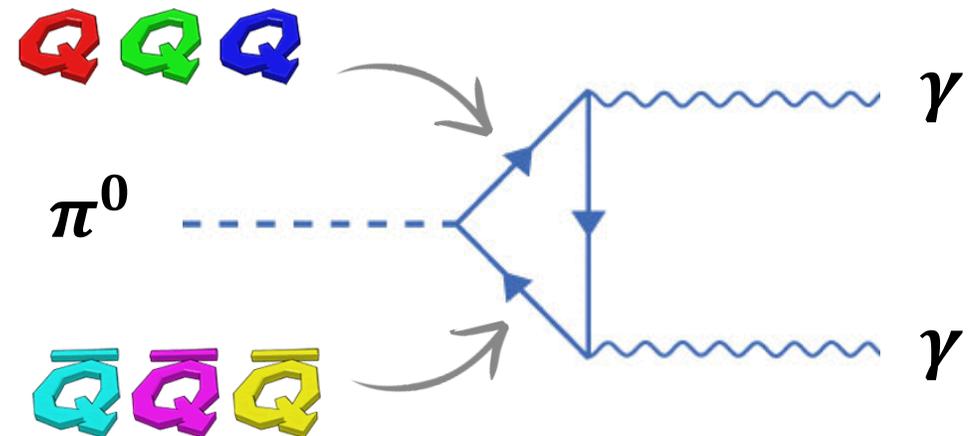
hier laufen
virtuelle Quarks
im Δ umher

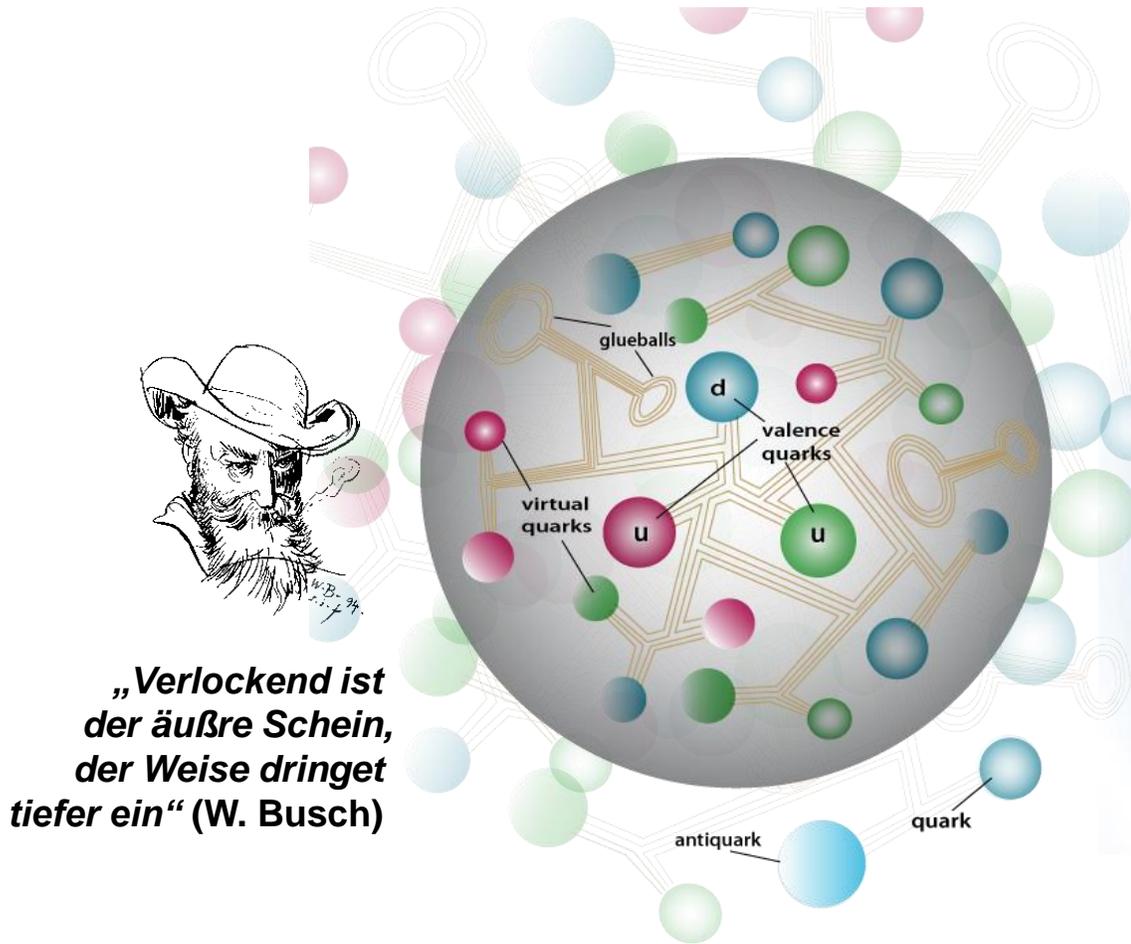


- Zerfallsprozess $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$:
mit **3** Quark- (**3** Antiquark-)
Farben:

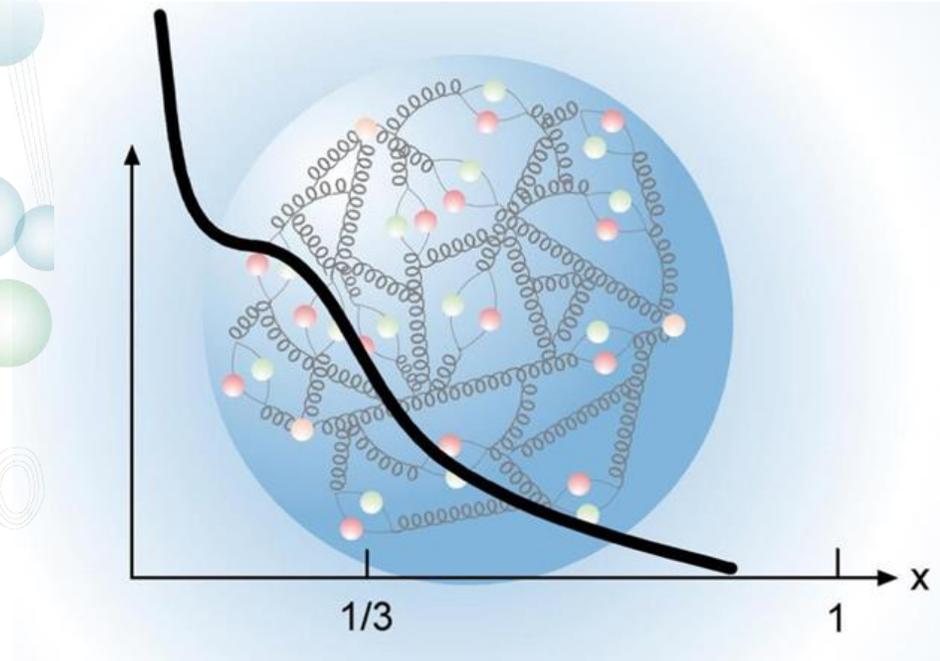
Amplitude $A \times 3$

Rate ($\sim A^2$) $\times 9$





„Verlockend ist der äußere Schein, der Weise dringet tiefer ein“ (W. Busch)

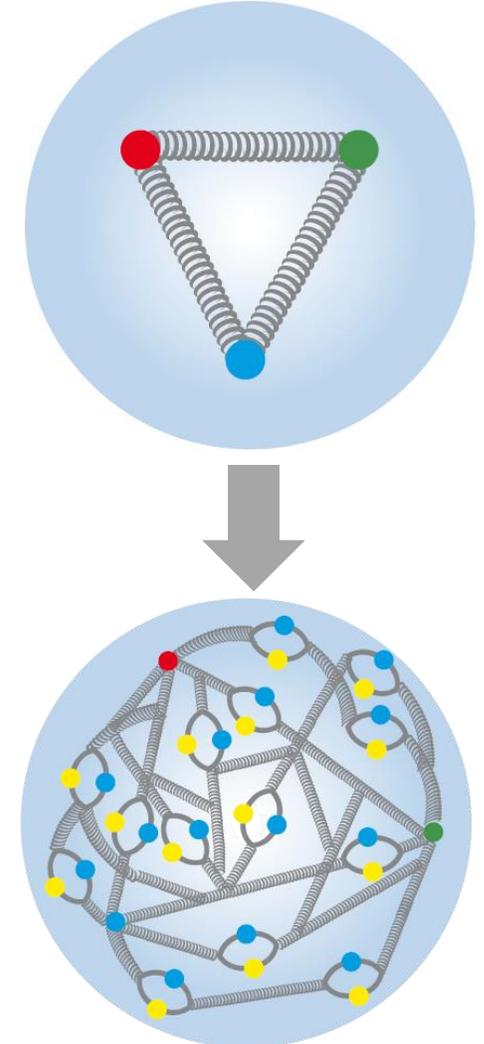


KAPITEL 6.4: STRUKTUR DER NUKLEONEN UND PARTONEN

Struktur von Nukleonen: Einführung

■ Jenseits des ´naiven´ Parton-Modells mit 3 Valenzquarks

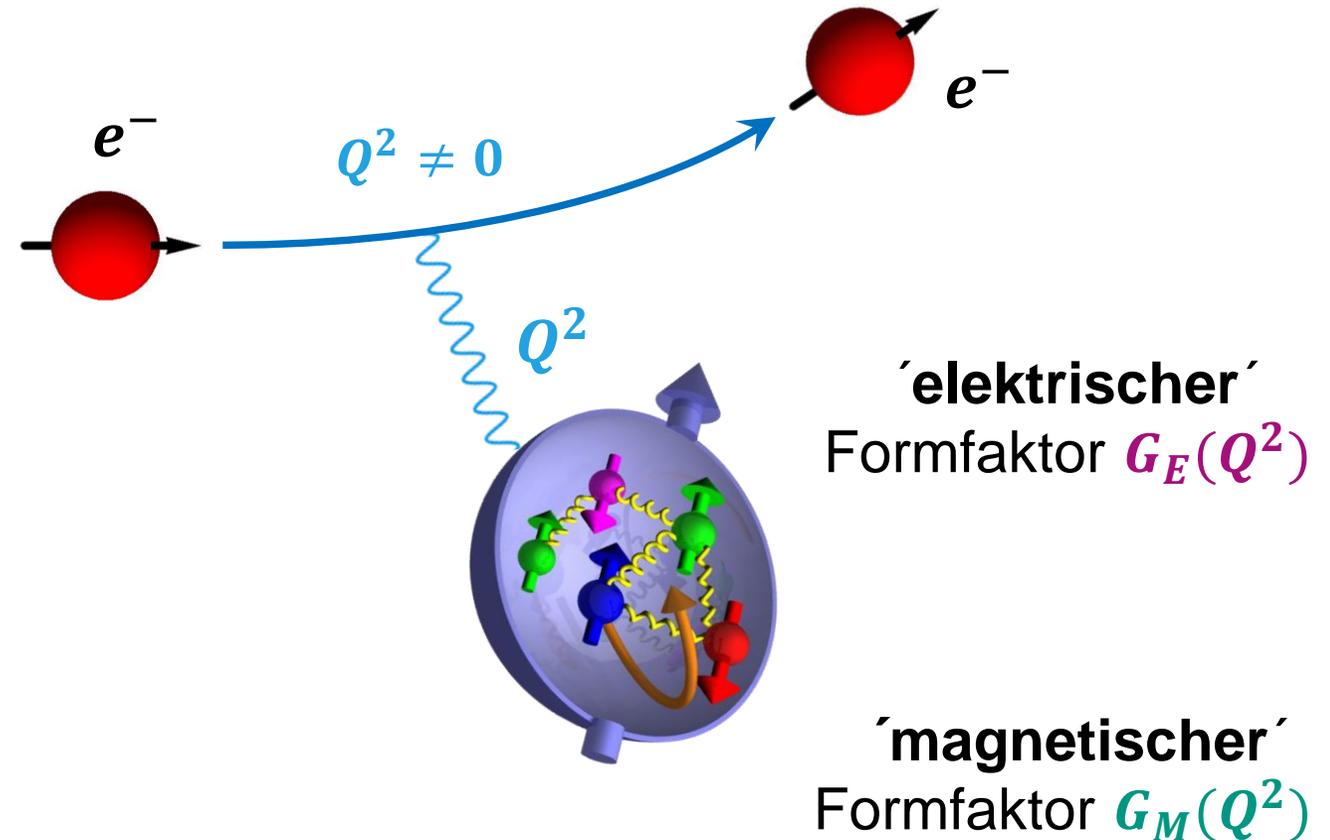
- Nukleonen sind komplexe Systeme bestehend aus **Valenzquarks**, **Gluonen** und **Seequarks**:
⇒ **erweitertes Partonenmodell**
- Frage 1: wie baut sich der **Spin** des Nukleons auf?
⇒ sehr komplexe Fragestellung*
- Frage 2: wie teilt sich der **Impuls der Partonen** auf?
⇒ wichtig für Collider–Experimente, z.B. am **LHC**
genaue Kenntnis der Parton–Struktur eines Nukleons erforderlich



RECAP: elastische Streuprozesse

■ Beschreibung der Streuung mit 2 Formfaktoren $G_E(Q^2)$ & $G_M(Q^2)$

- 'elektrische' Wechselwirkung:
Kopplung an die Verteilung
der **elektrischen Ladung**
im Nukleon
⇒ **elektrischer Formfaktor**
- 'magnetische' Wechselwirkung:
Kopplung an die Verteilung
des **magnetischen Moments**
im Nukleon
⇒ **magnetischer Formfaktor**



RECAP: elastische Streuprozesse

■ Rosenbluth–Formel: Beschreibung elektrische / magnetische Streuung

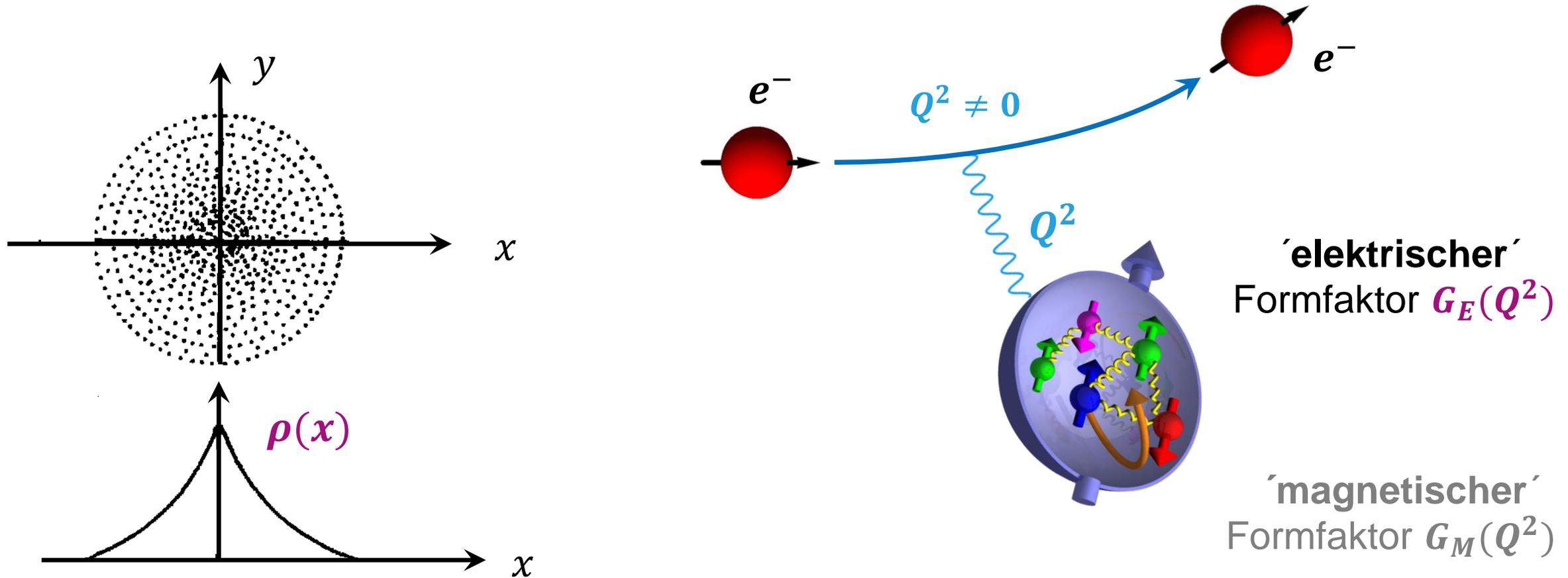
- differentieller Streuquerschnitt am **Nukleon** als Funktion von G_E und G_M

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{exp} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} \cdot \left\{ \underbrace{\frac{G_E^2 + (Q^2/4 M^2) \cdot G_M^2}{1 + (Q^2/4 M^2)}}_{\theta - \text{unabhängig}} + \underbrace{\frac{Q^2}{2 M^2} \cdot G_M^2 \cdot \tan^2(\theta/2)}_{\theta - \text{abhängig}} \right\} \left. \begin{array}{l} M = \text{Nukleon-} \\ \text{Masse, } c = 1 \end{array} \right\}$$

- **2 Streuterme:** winkelunabhängig $A(Q^2)$
winkelabhängig $B(Q^2) \cdot \tan^2(\theta/2)$

RECAP: elastische Streuprozesse

- Beschreibung der Streuung mit 2 Formfaktoren $G_E(Q^2)$ & $G_M(Q^2)$



RECAP: tiefinelastische Streuprozesse

■ Kinematik der tiefinelastischen Streuung* an Partonen: $W \gg M$

- Björken'sche Skalenvariable x : ein dimensionsloses Maß der Inelastizität (im Partonmodell des Nukleons)

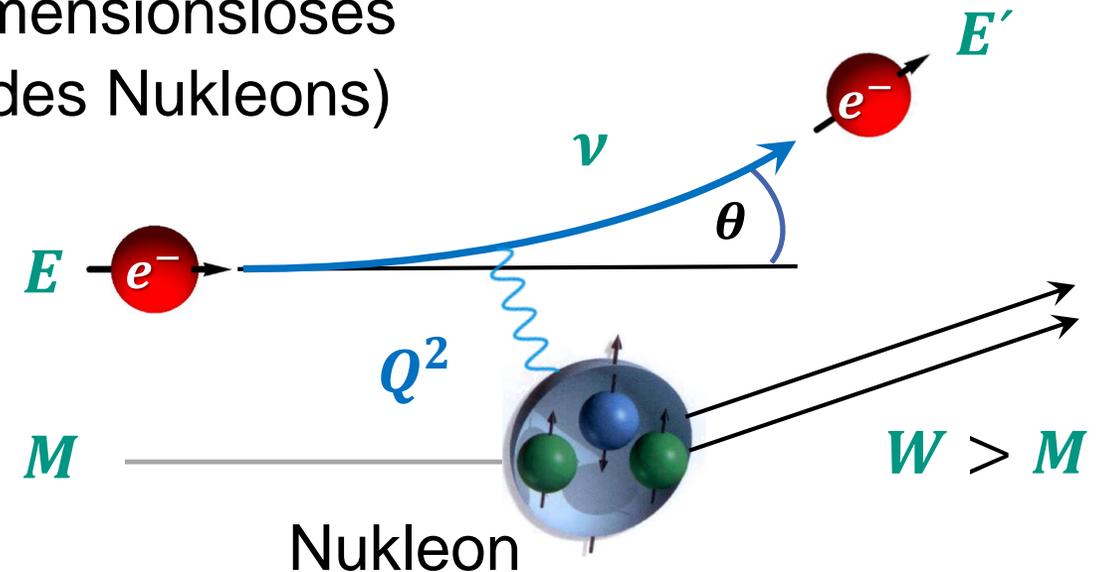
$$x = \frac{Q^2}{2 M \cdot \nu} \quad x = 0 \dots 1$$

$x = 4er$ – Impulsanteil des Partons

M = Masse Nukleon

W = invariante Masse, mit $W^2 = M^2 + 2 M \cdot \nu - Q^2$

Energieübertrag $\nu = E - E'$ $4er$ – Impulstransfer



RECAP: tiefinelastische Streuprozesse

■ Kinematik der tiefinelastischen Streuung* an Partonen: $W \gg M$

- Björken'sche Skalenvariable x : ein dimensionsloses Maß der Inelastizität (im Partonmodell des Nukleons)

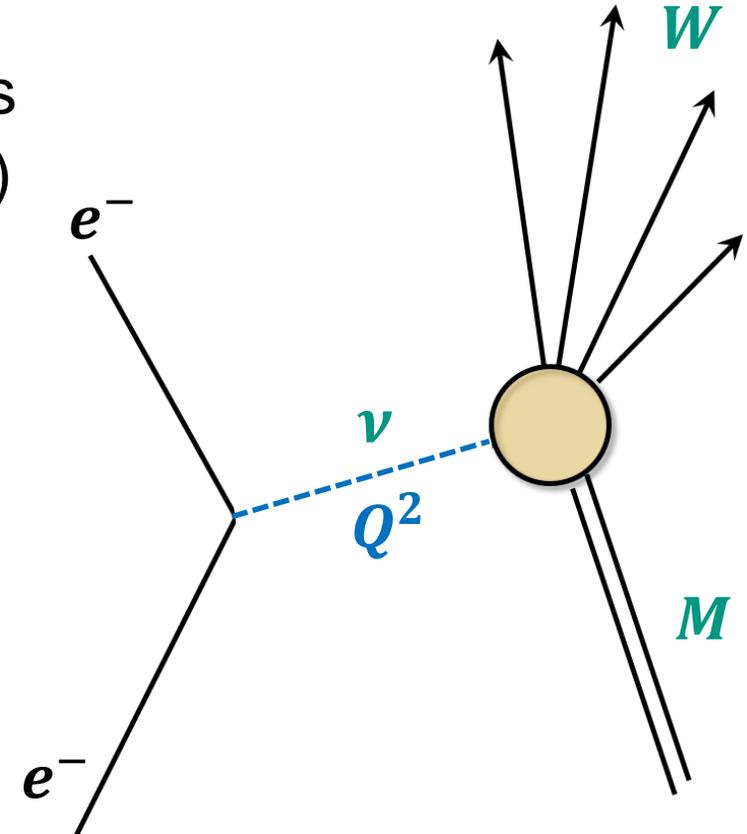
$$x = \frac{Q^2}{2 M \cdot \nu} \quad x = 0 \dots 1$$

$x = 4er$ – Impulsanteil des Partons

M = Masse Nukleon

W = invariante Masse, mit $W^2 = M^2 + 2 M \cdot \nu - Q^2$

Energieübertrag $\nu = E - E'$ $4er$ – Impulstransfer



tiefinelastische Streuprozesse: F_2 und F_1

■ Mitbewegtes System: Einführung der Strukturfunktionen F_2 und F_1

- Dimensionslose Strukturfunktionen F_2 und F_1

‘magnetische’

Wechselwirkung

$$F_1(x, Q^2) = Mc^2 \cdot W_1(Q^2, \nu)$$

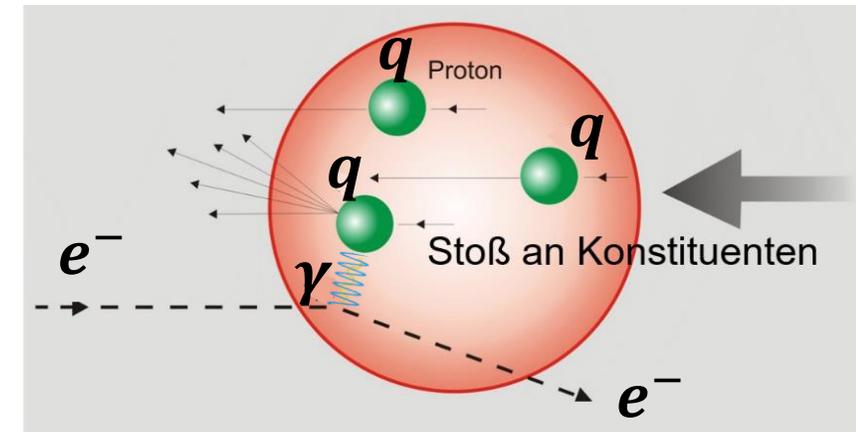
⇒ sensitiv auf Spin–abhängige Effekte

‘elektrische’

Wechselwirkung

$$F_2(x, Q^2) = \nu \cdot W_2(Q^2, \nu)$$

⇒ sensitiv auf Wahrscheinlichkeit, ein Parton mit bestimmten **Impulsanteil** x zu finden



inkohärente Streuprozesse
in speziellem (Breit-)System

Proton–Strukturfunktion F_2

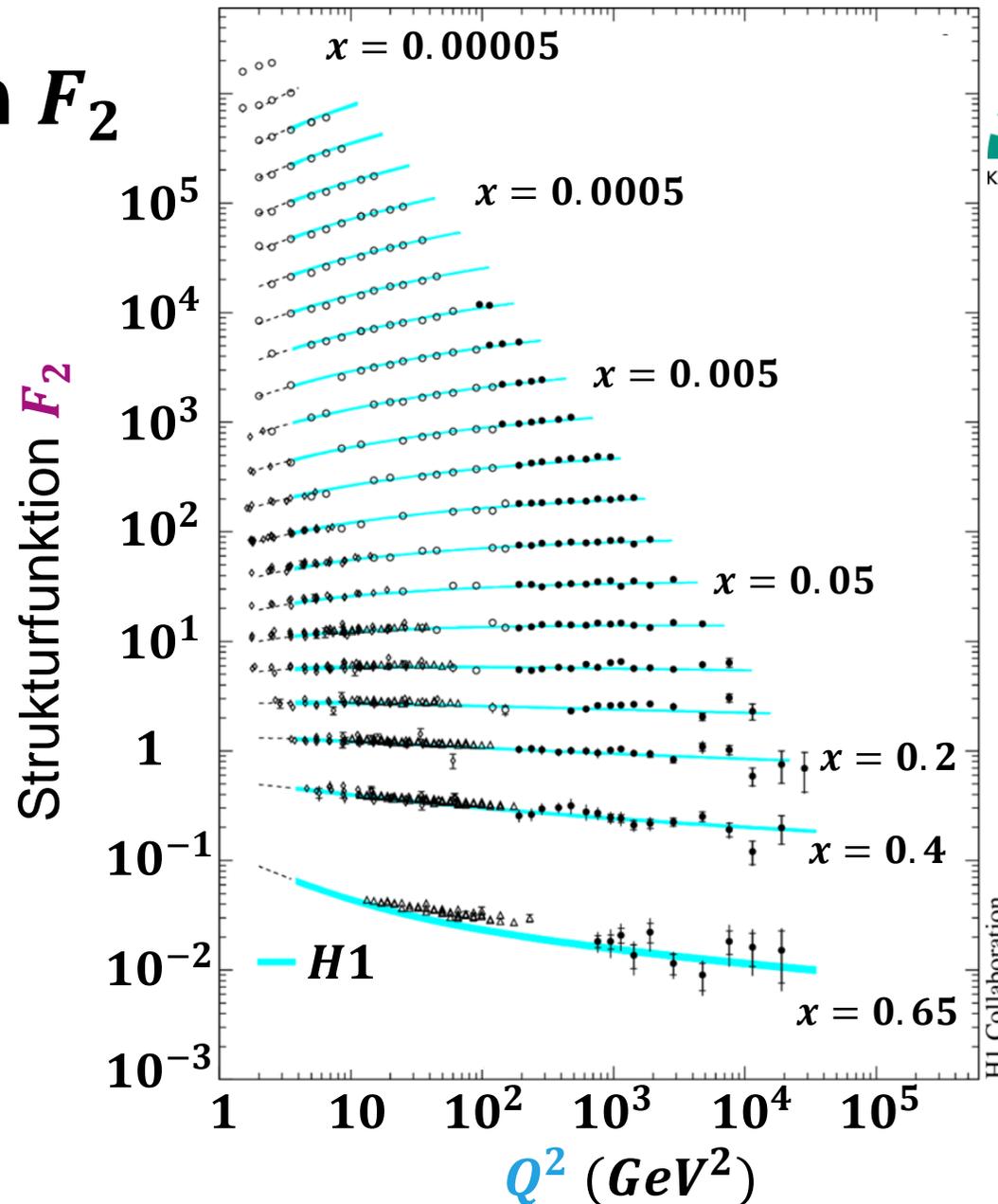
■ Messungen bei *HERA*

- Abdeckung eines großen $4er$ – Impulsbereichs Q^2

- **Skaleninvarianz:** F_2 ist unabhängig von Größe Q^2



Streuung an punktförmigen, ***nicht*** untereinander wechselwirkenden Partonen:
'**asymptotische Freiheit** der *QCD*
(*'quasifreie Quarks'*)



Björken
'scaling'

Callan–Gross: Relation der Strukturfunktionen

■ Verhältnis der Strukturfunktion $F_1(x)/F_2(x)$

- Ziel: bestimme den **Spin S** der geladenen Konstituenten des Nukleons

Spin **$S = 0$**

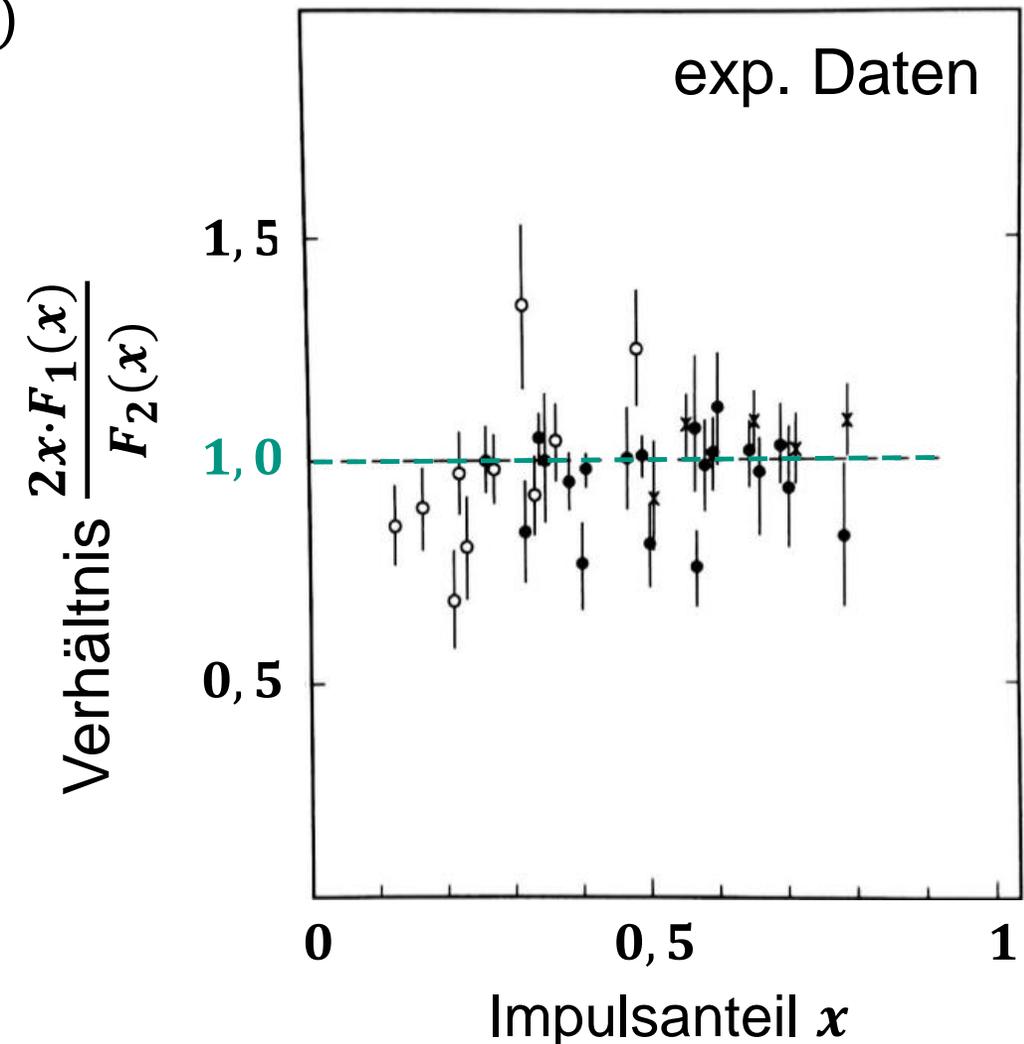
$$F_1(x, Q^2) = 0$$

Spin **$S = 1/2$**

$$2x \cdot F_1(x, Q^2) = F_2(x, Q^2)$$

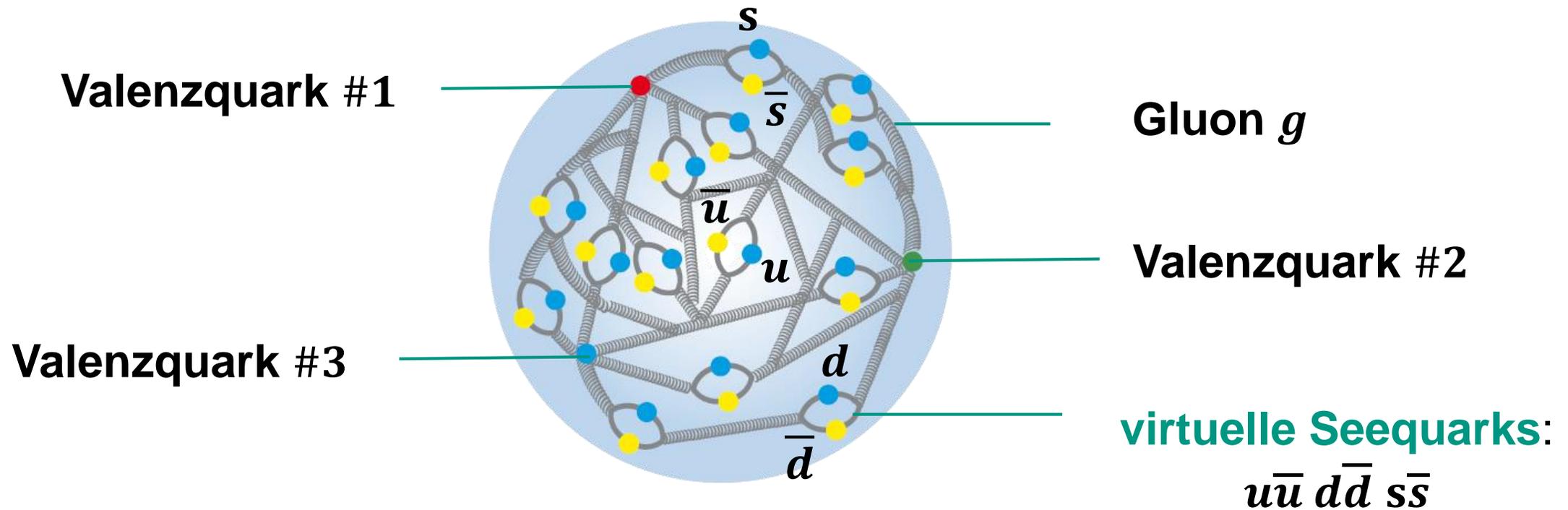
Callan–Gross Relation

exp. Daten: Quarks mit Spin **$S = 1/2$**



Streuprozesse im erweiterten Parton-Modell

- Erweiterung durch: **Gluonen** (neutral, koppeln nicht an Photonen), plus See aus virtuellen Quark-Antiquark Paaren (**Seequarks**)



tiefinelastische Streuprozesse: F_2

- Abtasten der Impulsverteilung x von Partonen über Strukturfunktion F_2

geladene
Partonen

$$F_2(x) = x \cdot \sum_f z_f^2 \cdot [q_f(x) + \bar{q}_f(x)]$$

Valenzquarks: u, u, d Flavour f

Seequarks: $u\bar{u} d\bar{d} s\bar{s} \dots$

Gewichtung mit Ladung z
des Quarkflavours

Wahrscheinlichkeitsverteilung für Impulsanteil x
eines **Quarks** (Valenz- & **Seequarks**) eines **Anti-Quarks** (**Seequarks**)

Streuung im erweiterten Parton-Modell

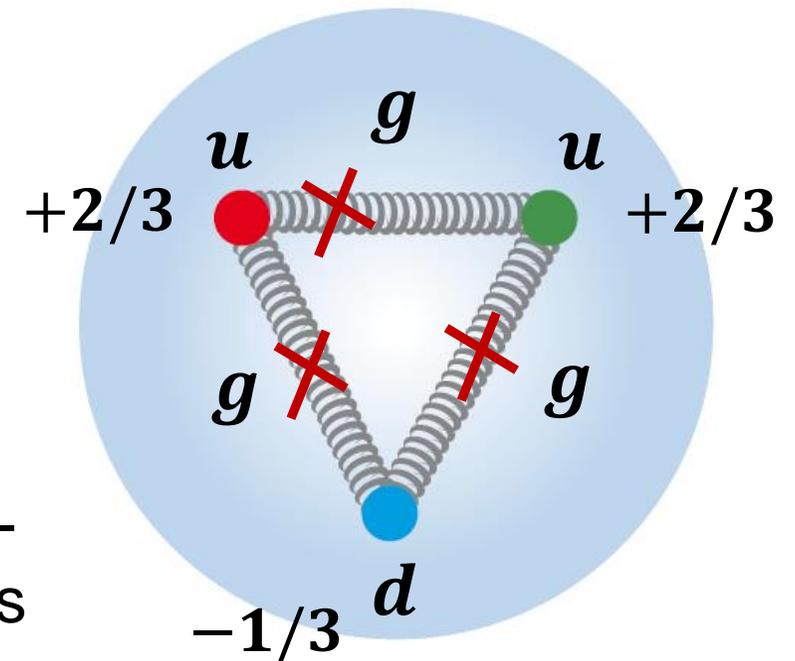
■ Streuprozesse an den Valenzquarks

geladene
Partonen

$$F_2(x) = x \cdot \sum_f z_f^2 \cdot [q_f(x) + \bar{q}_f(x)]$$

- Streuung an der **elektrischen Ladung** von Valenzquarks im p (uud) bzw. n (udd)

3 Valenz-
Quarks



Streuung im erweiterten Parton–Modell

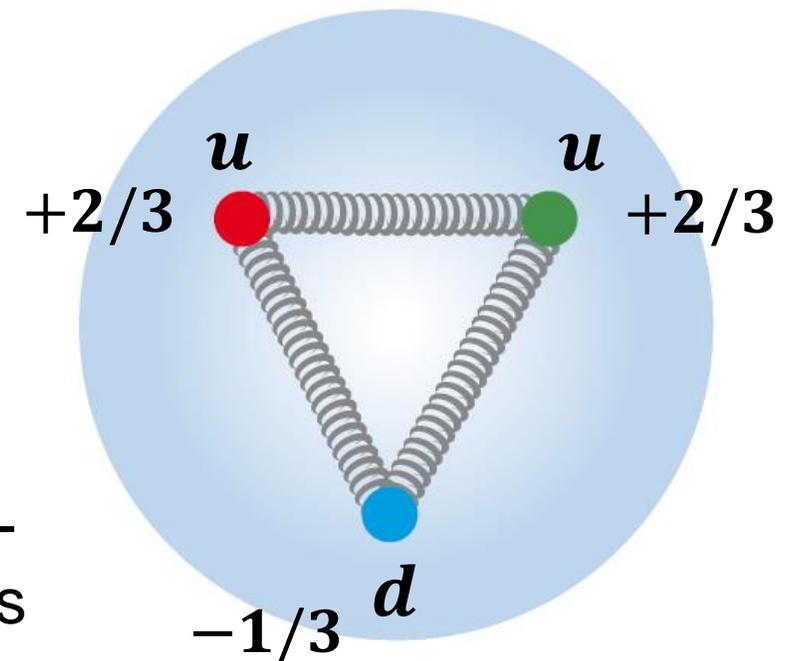
■ Streuprozesse an den Valenzquarks

- experimentelle Beobachtungen sind $2 \times$ kleiner als die Erwartung im 'naiven' Partonmodell:

die geladene Partonen tragen nur ca. 50% des inneren Nukleonen–Impulses

- weitere Partonen beteiligt:
Gluonen & **Seequarks**

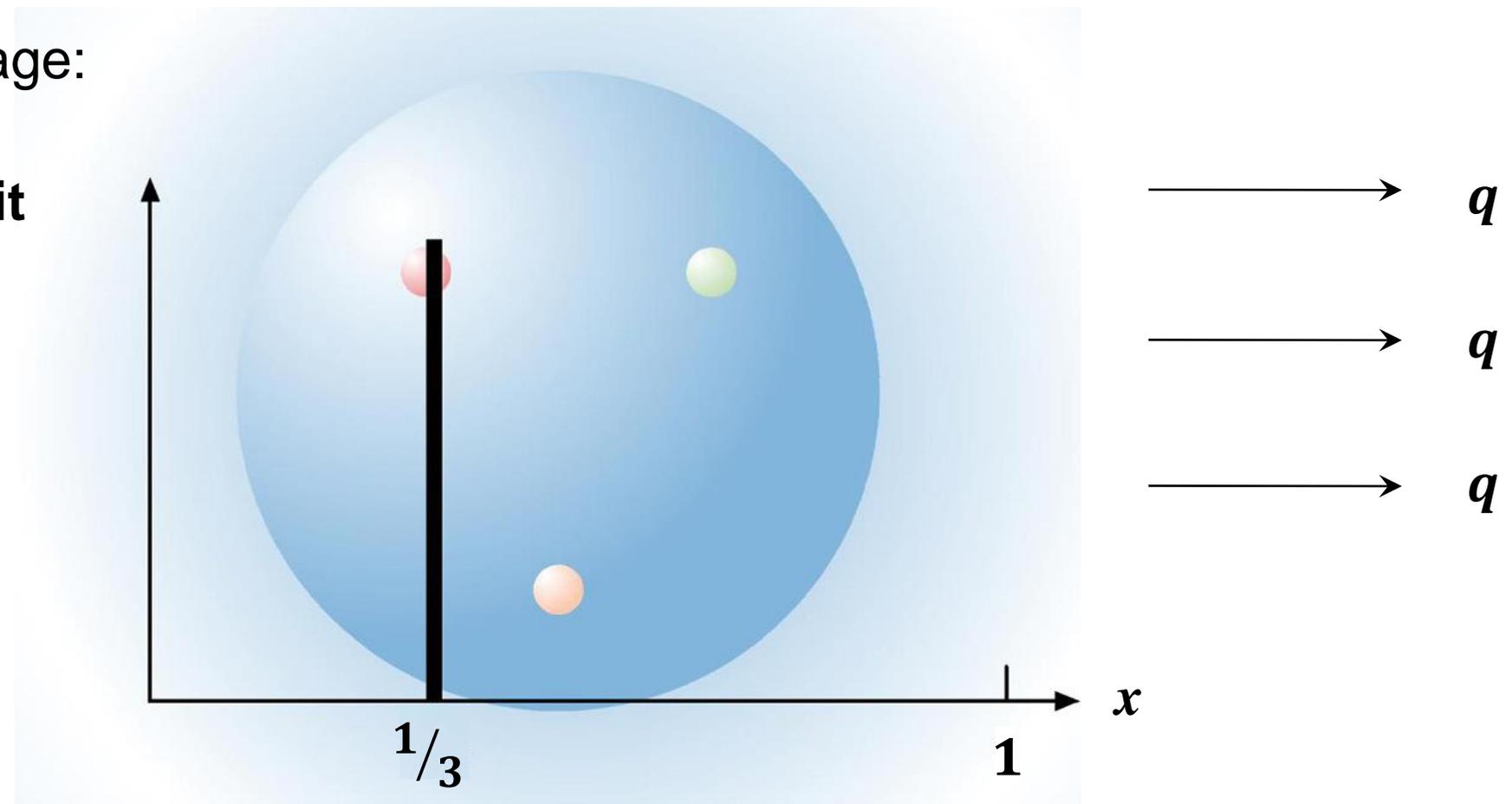
3 Valenz-
Quarks



Gemessene Parton–Impulsverteilung

■ Strukturfunktion $F_2(x)$

- Modell–Ausgangslage:
**3 unabhängige
Valenz-Quarks mit
 $x = 1/3$**

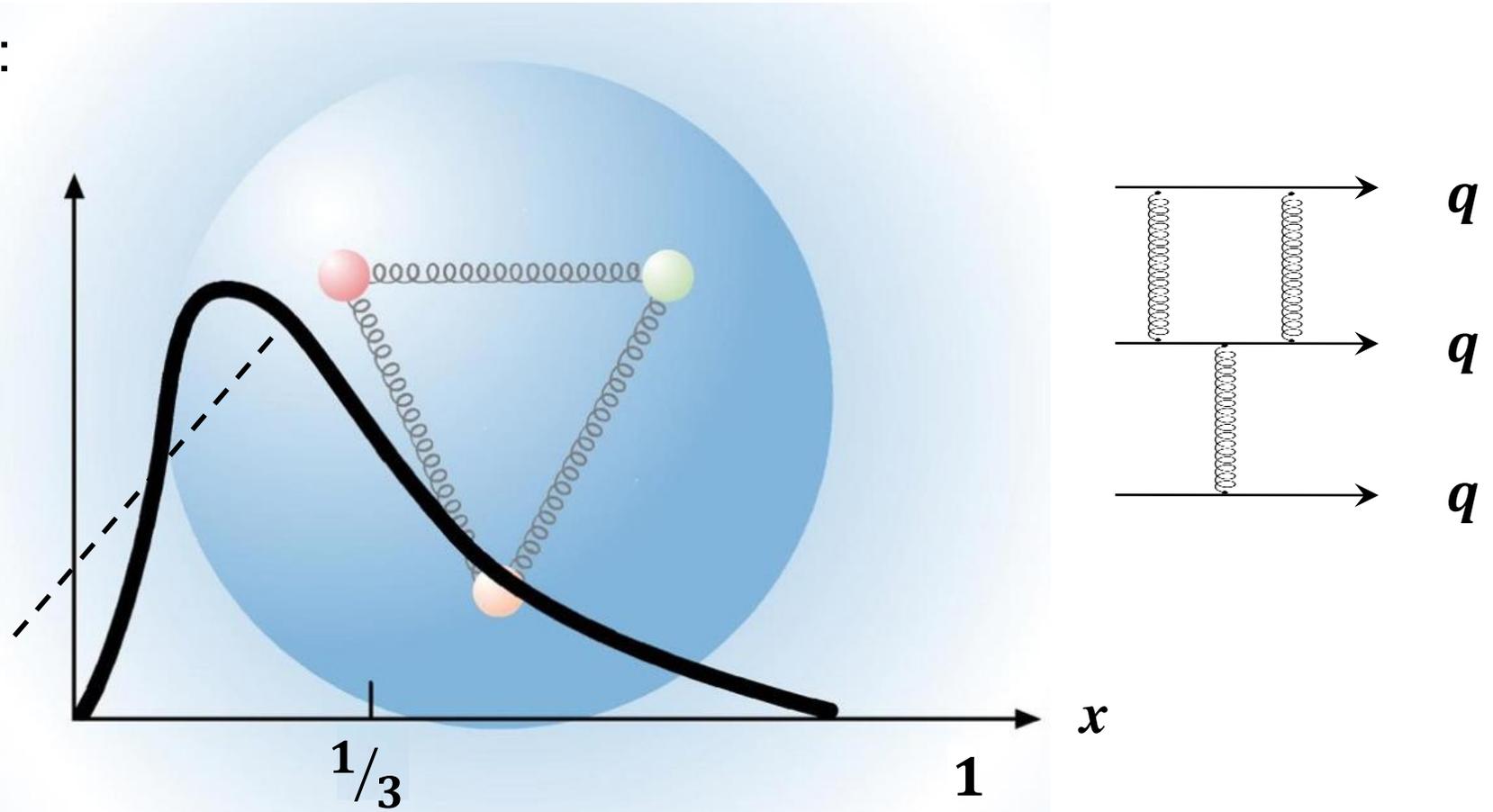


Gemessene Parton–Impulsverteilung

■ Strukturfunktion $F_2(x)$

- Modell–Ausgangslage:
**3 interagierende
Valenz-Quarks mit
 x – Verteilung**

interagierende
Valenzquarks



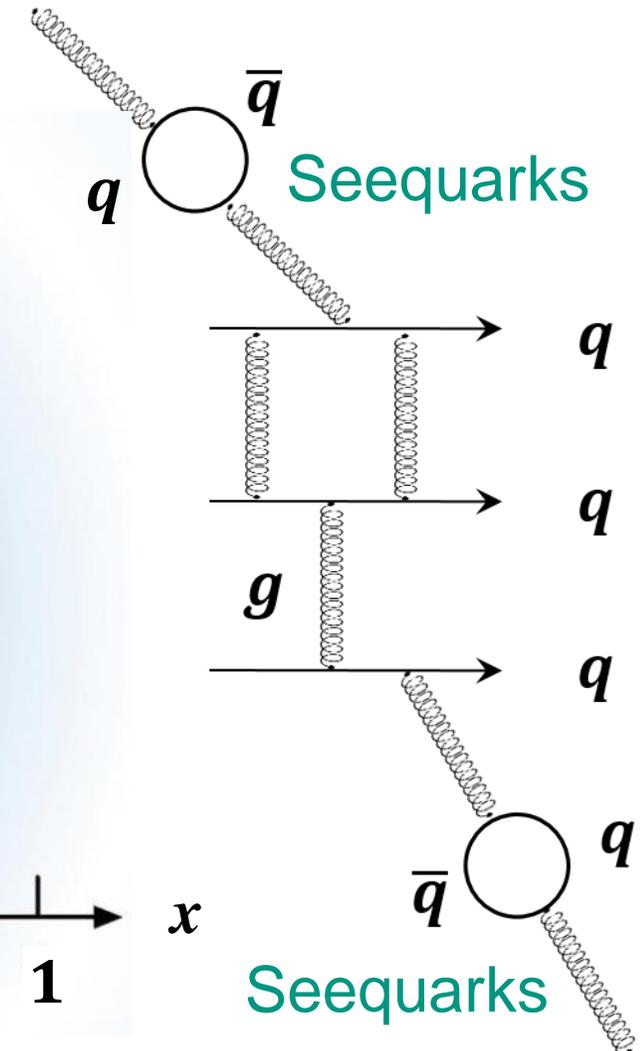
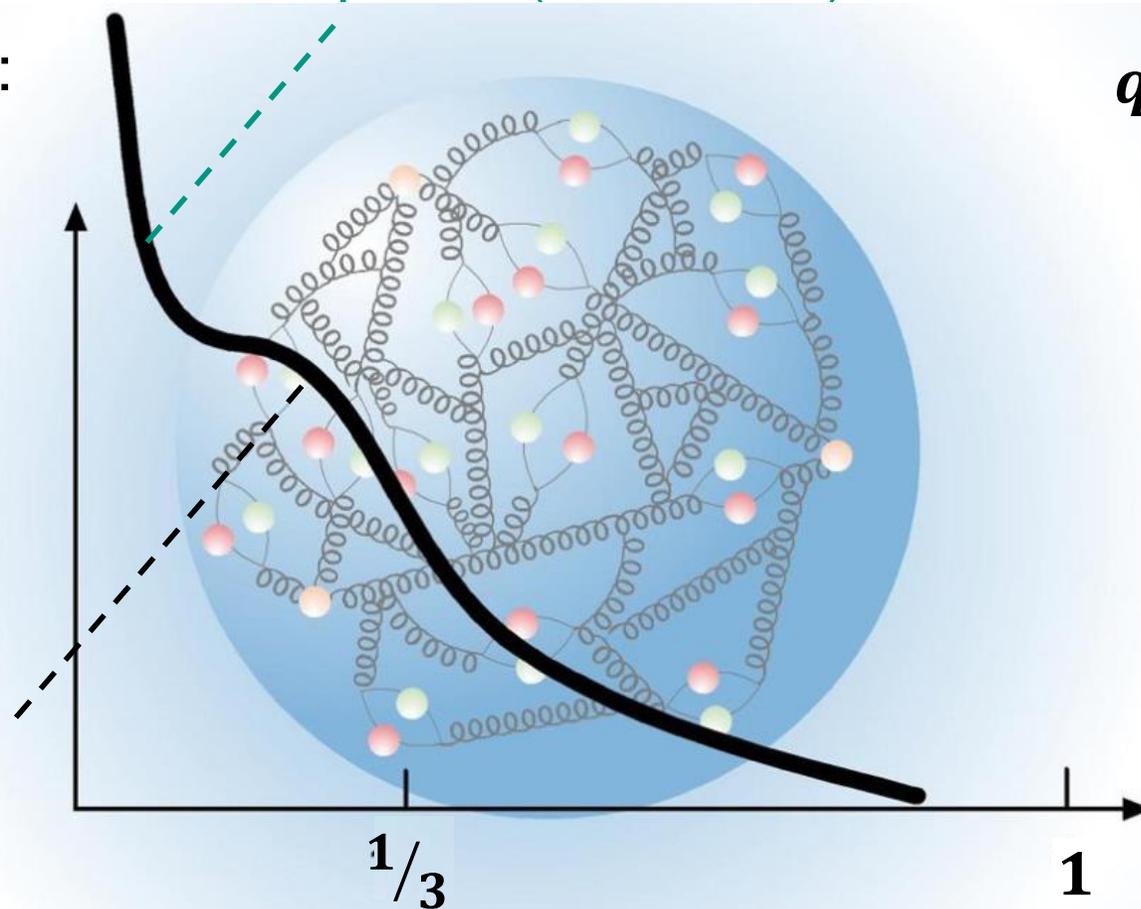
Gemessene Parton-Impulsverteilung

■ Strukturfunktion $F_2(x)$

- Modell-Ausgangslage:
3 interagierende Valenz-Quarks (via Gluonen) & Seequarks \Rightarrow breite x - Verteilung

interagierende Valenzquarks

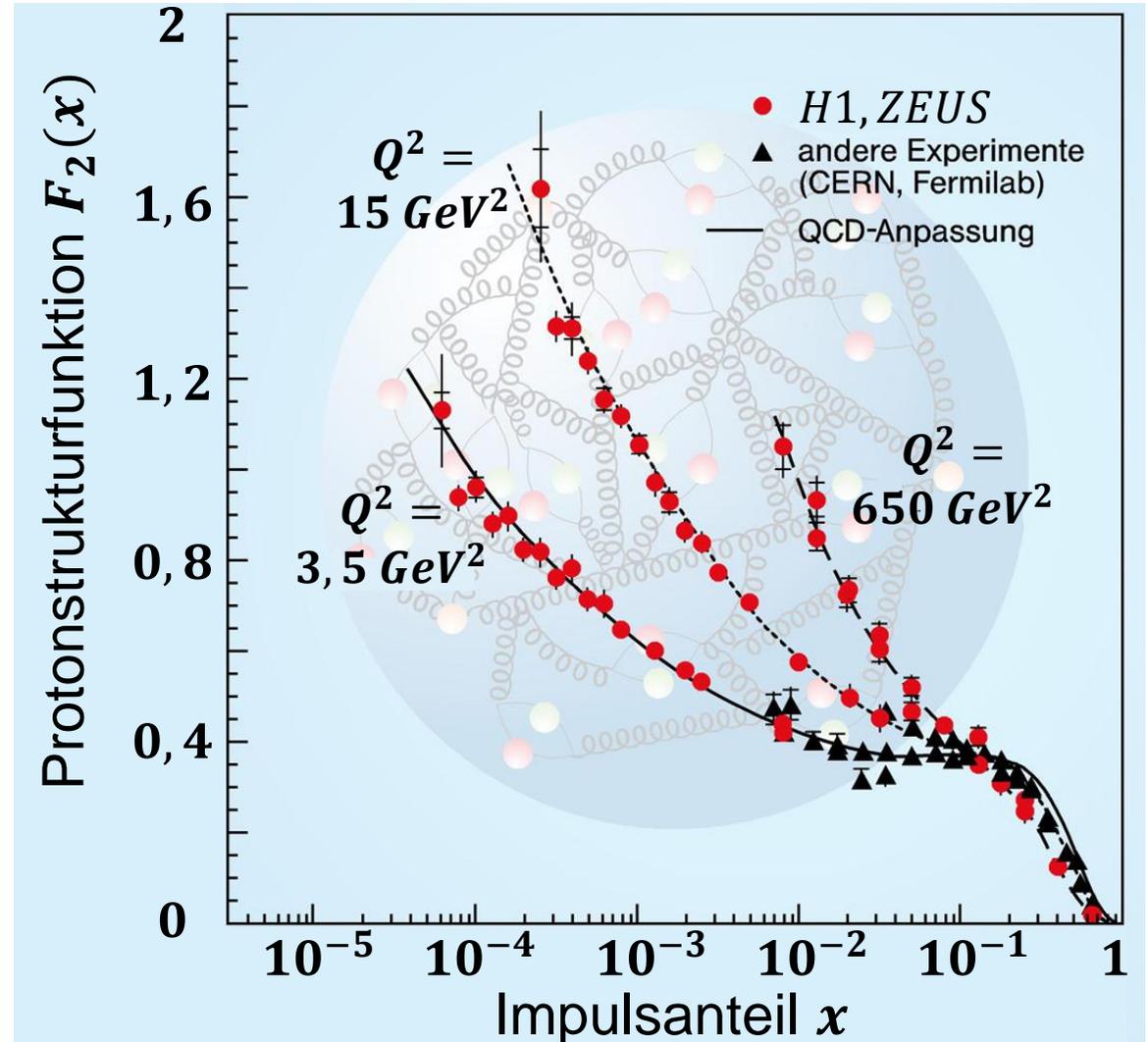
Seequarks ($u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$)



Strukturfunktion $F_2(x)$ bei sehr hohem Q^2

■ Verhalten bei sehr hohem Impulsübertrag Q^2 :

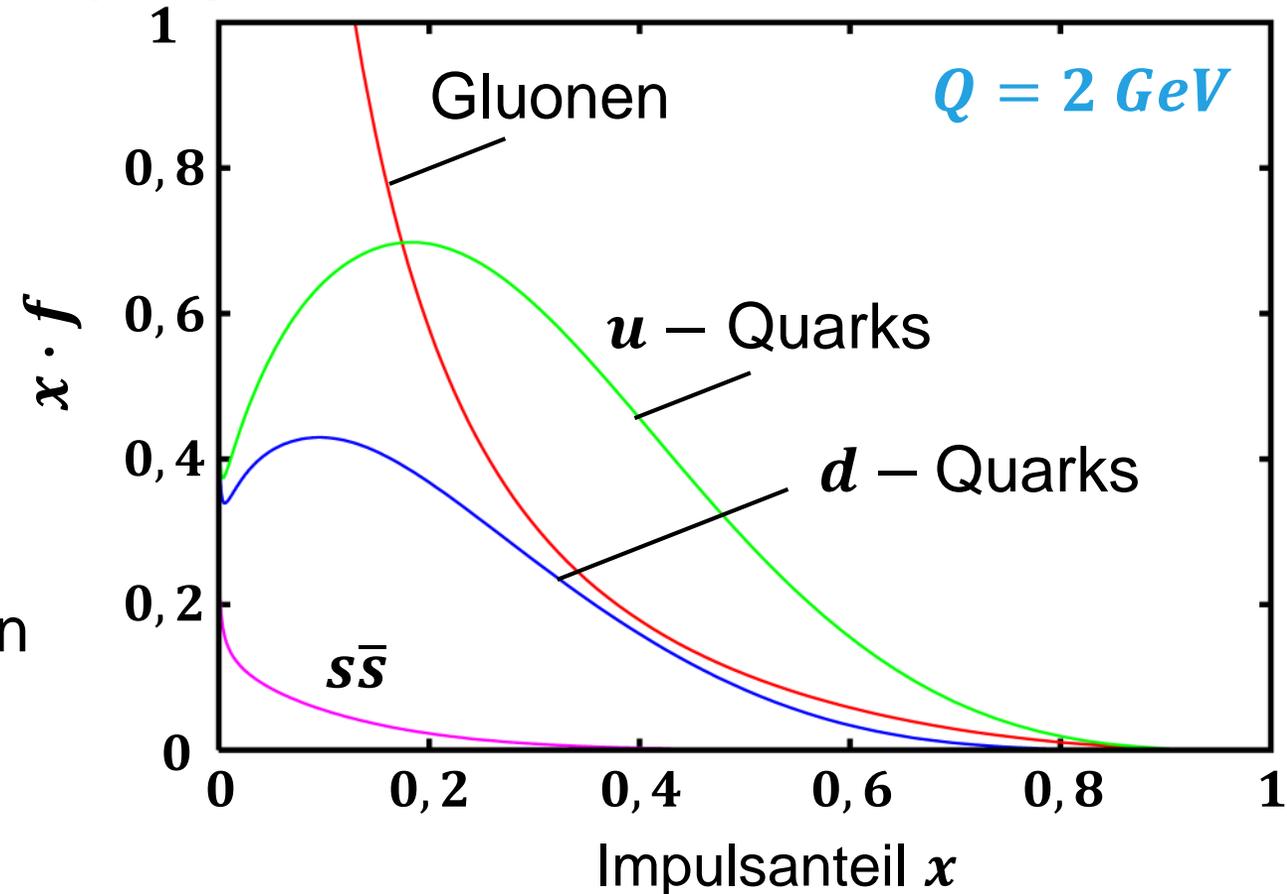
- Verletzung der Skaleninvarianz via **Glukonen** & **Seequarks**: $F_2(x)$ wird abhängig von Q^2
- kleines x : deutlicher Effekt der **Seequarks** (via Glukonen)

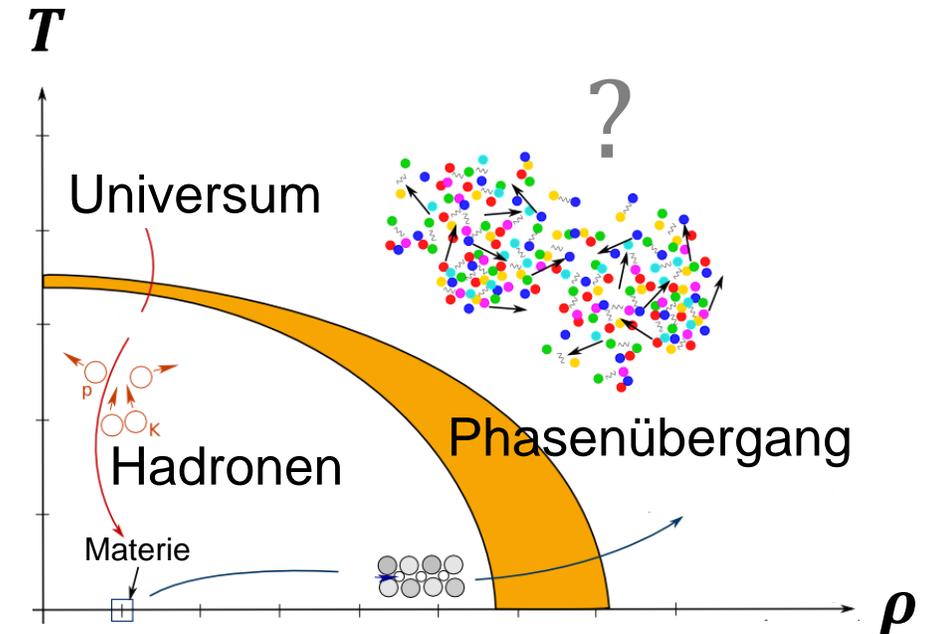
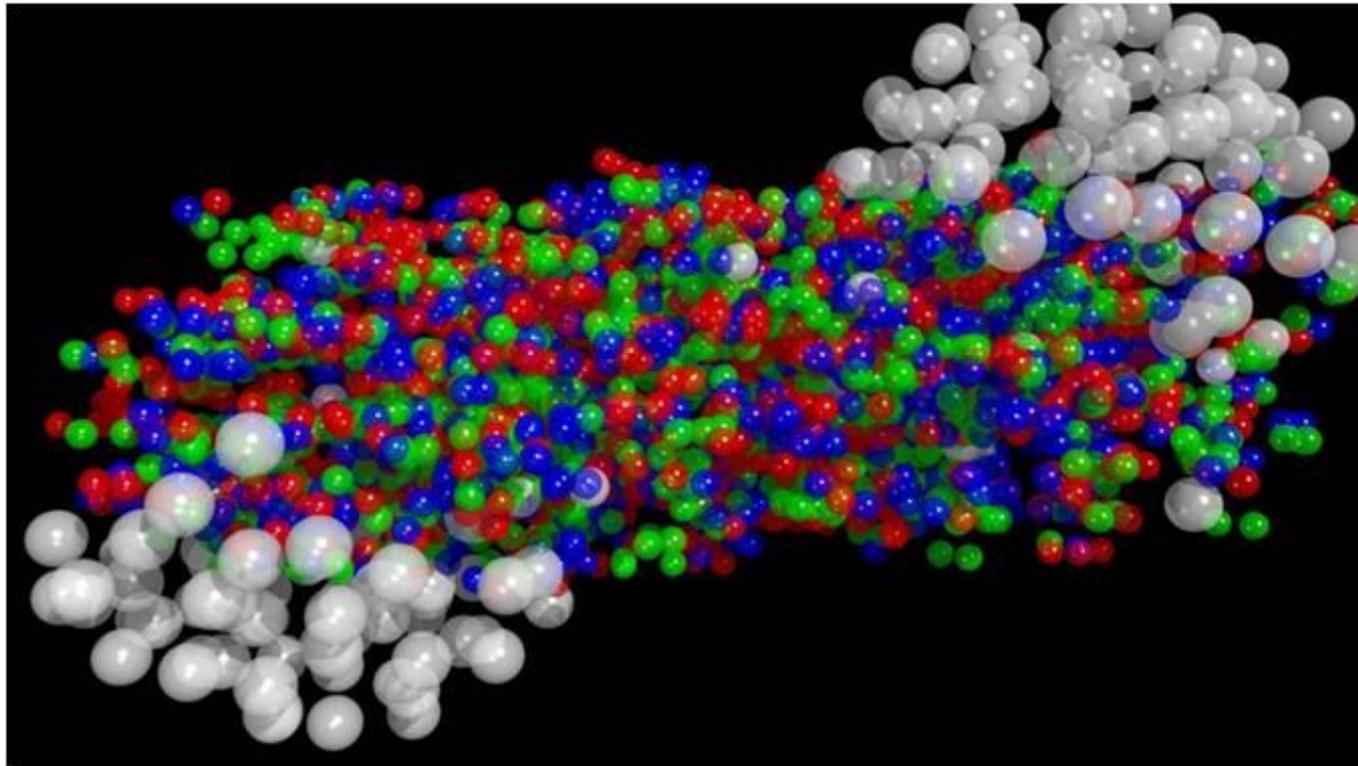


Parton–Dichteverteilungen (PDF^*)

■ $PDFs$ beschreiben die (berechnete) **Wahrscheinlichkeit f** , ein Parton mit einem bestimmten (longitudinalen) Impulsanteil x zu finden

- Darstellung als Produkt $x \cdot f$ für alle Partonen in einem p : u – Quarks, d – Quarks, s – Quarks, Gluonen
- kleines $x \cdot f$: deutlichster Effekt der Gluonen
- Parton-Verteilungen müssen mit den Messungen abgeglichen werden
- Parton-Verteilungen ($PDFs$) wichtig für pp – Streuprozesse am **LHC**



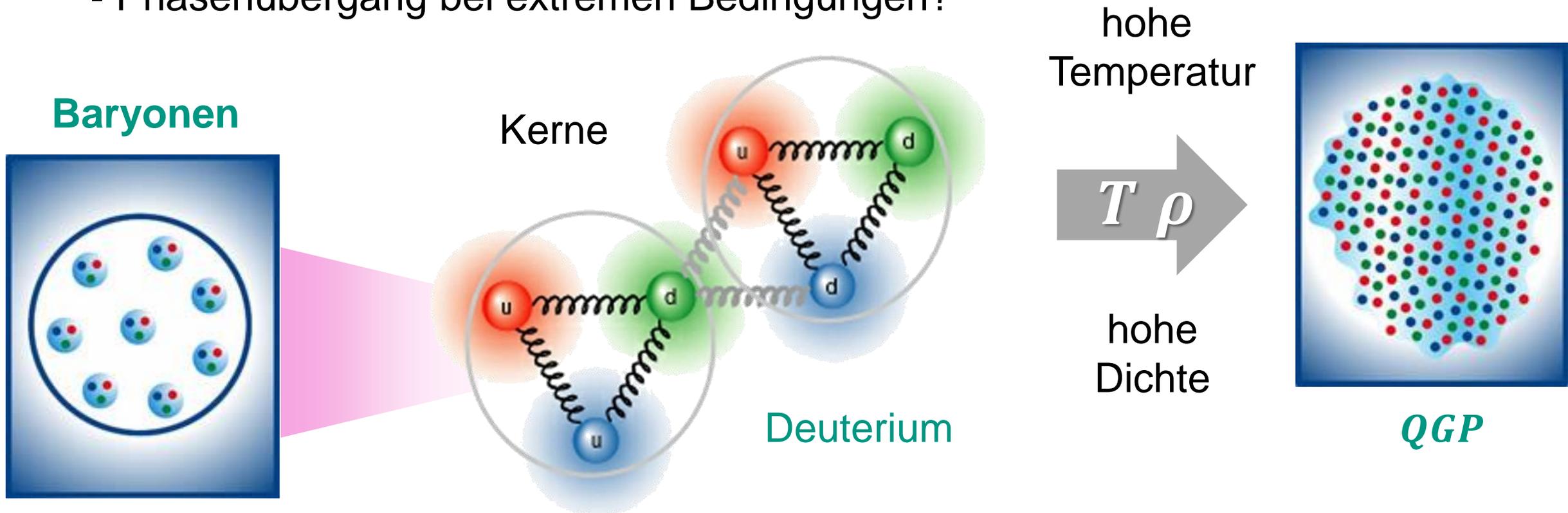


AUSBLICK: QUARK–GLUON PLASMA – EIN 5. ZUSTAND DER MATERIE?

Quark–Gluon Plasma (*QGP*): Eigenschaften

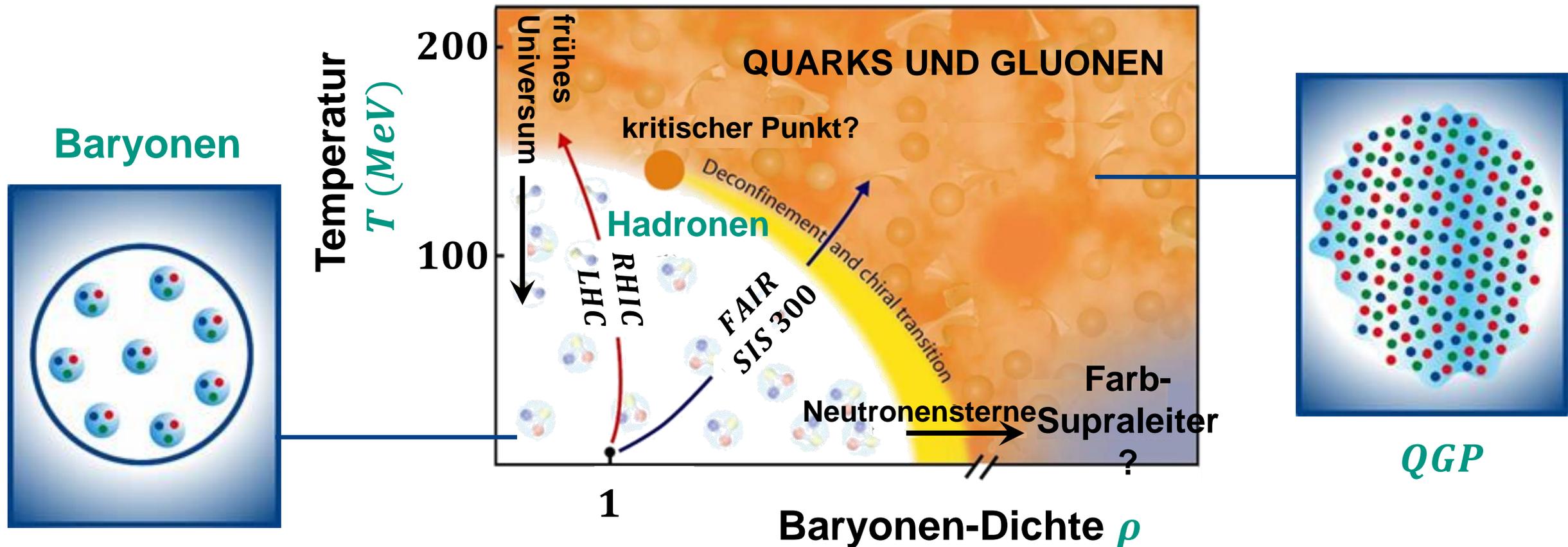
- Hadronen/Kernmaterie unter normalen Bedingungen: Quarks und Gluonen bilden Baryonen und Kerne wie **Deuterium**

- Phasenübergang bei extremen Bedingungen?



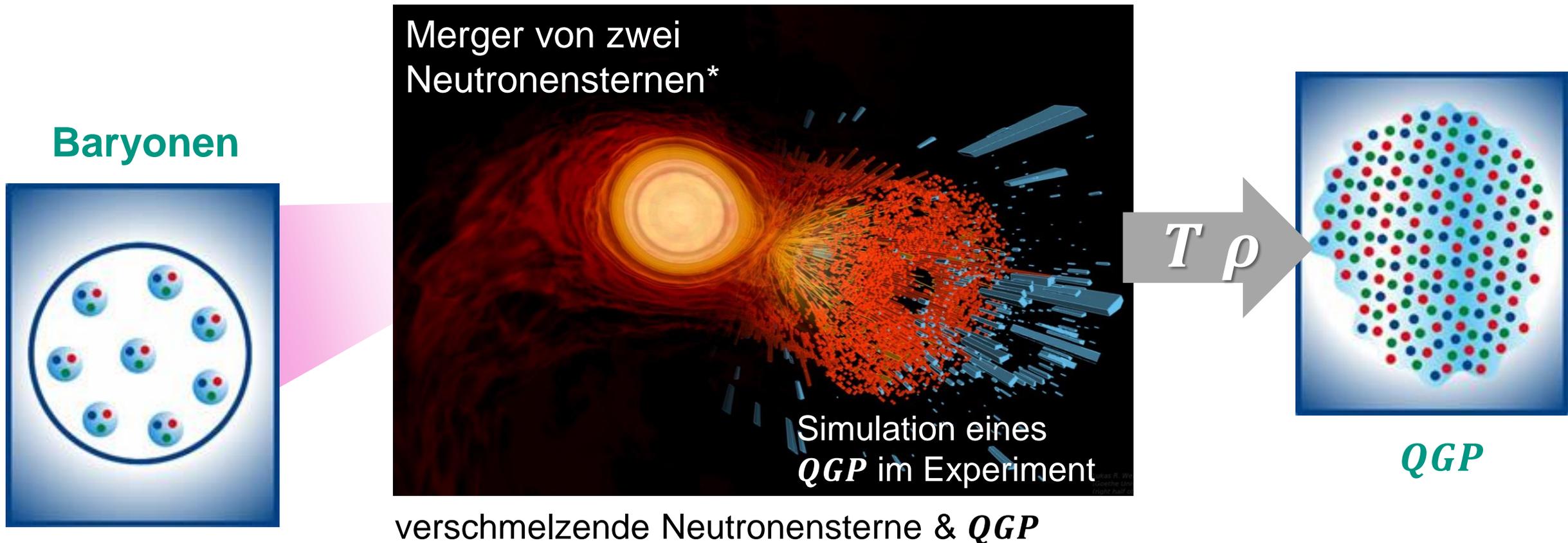
Quark–Gluon Plasma (QGP): Phasendiagramm

- Hadronen/Kernmaterie unter extremen Bedingungen: Quarks und Gluonen durchlaufen einen Phasenübergang von **Baryonen** hin zu einem **QGP**



Quark–Gluon Plasma (*QGP*): Orte im Universum

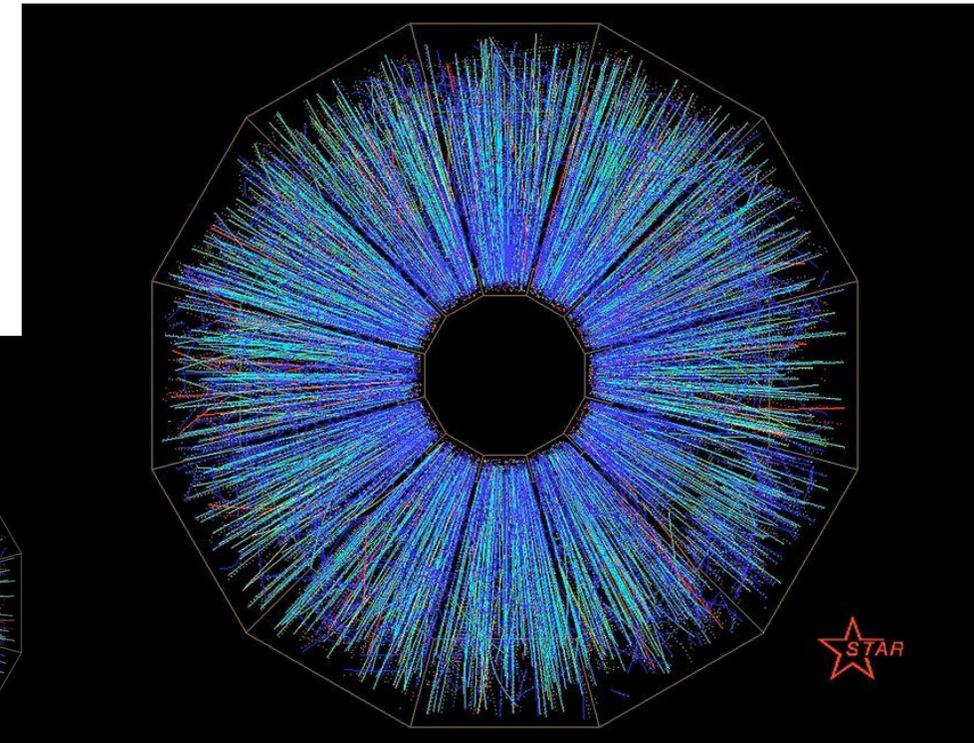
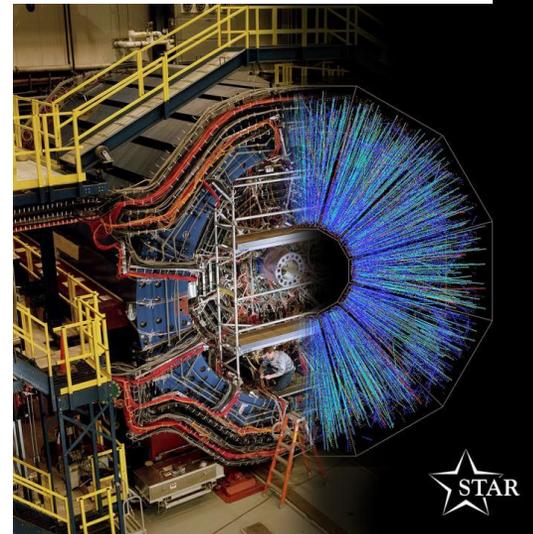
- Hadronen/Kernmaterie unter extremen Bedingungen: Quarks und Gluonen durchlaufen einen Phasenübergang von **Baryonen** hin zu einem *QGP*



Quark–Gluon Plasma (*QGP*): Orte im Labor

■ Hadronen/Kernmaterie unter extremen Bedingungen: Suche nach dem *QGP* in ultra–relativistischen **Schwerionen–Reaktionen**

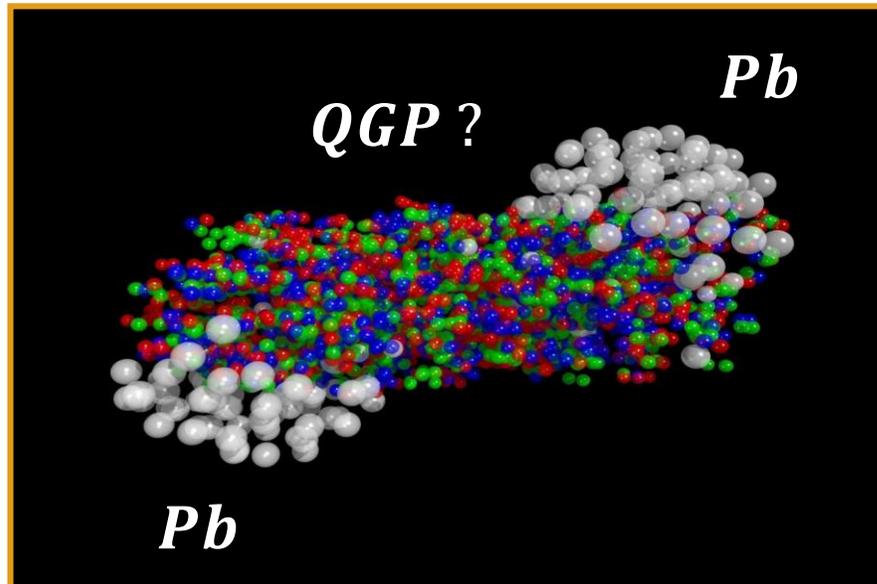
- niedriges T & niedriges ρ :
‘**Kondensat**’ von farbneutralen Hadronen
3 Quarks & Gluonen gebunden in Nukleonen
(Protonen, Neutronen)
- hohes T und/oder hohes ρ :
‘**freie**’ Quarks und Gluonen,
experimentelles Studium
des **Phasen–Übergangs**
im frühen Universum



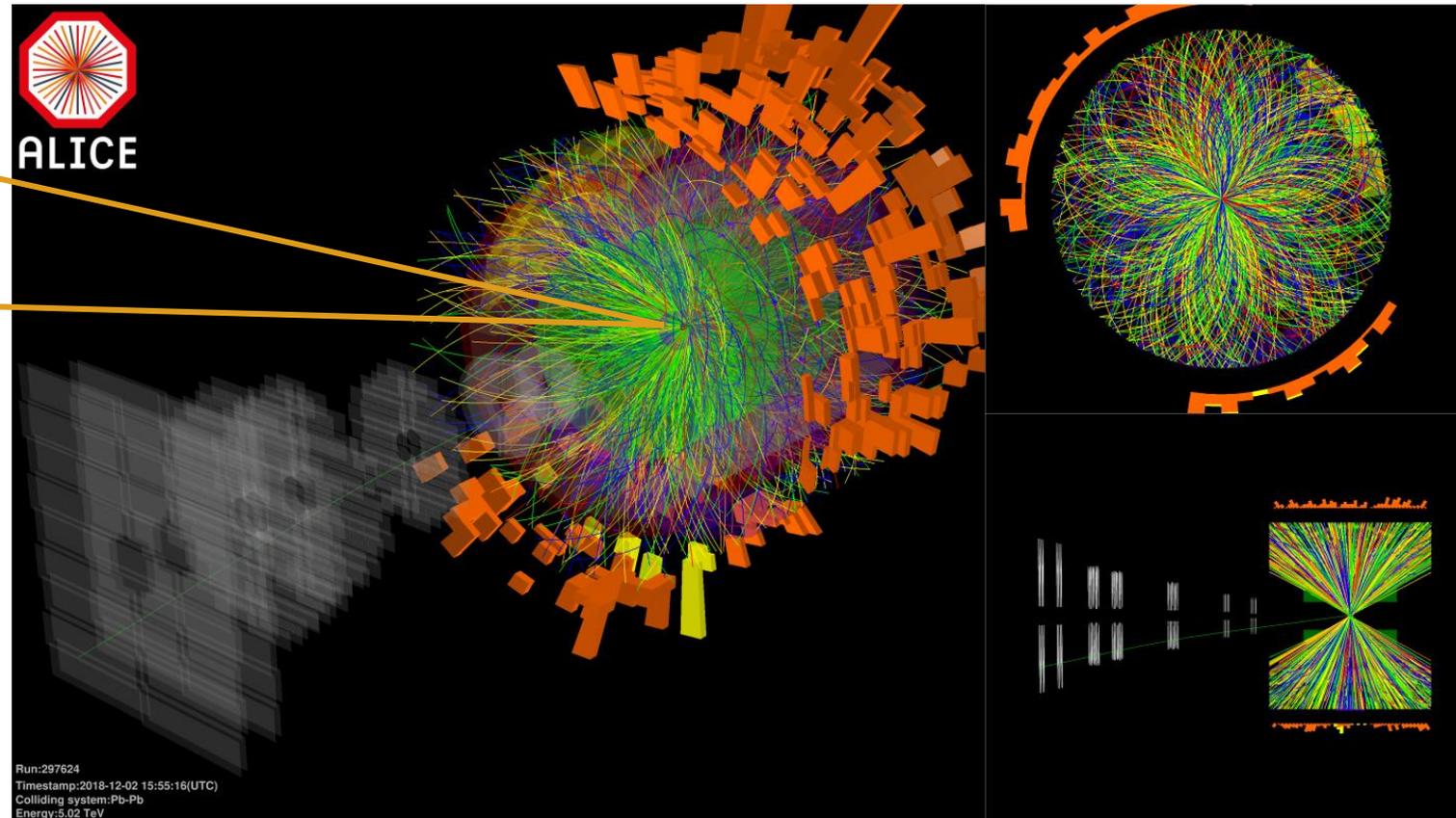
STAR Experiment am **Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC)** am **BNL**

Quark–Gluon Plasma (*QGP*): Orte im Labor

- Hadronen/Kernmaterie unter extremen Bedingungen: Suche nach dem *QGP* in ultra–relativistischen **Schwerionen–Reaktionen** am *LHC*



ALICE –
A Large Ion Collider Experiment



Ausblick: Elektroschwache Wechselwirkung

■ Von Schlüsselexperimenten zur modernen *WSG* – Theorie

