

Hadronenphysik mit COMPASS

Jan Friedrich

Physik-Department
Technische Universität München

für die COMPASS-Kollaboration

Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft
Dresden, 7. März 2013

unterstützt von Maier-Leibnitz-Labor der TU und LMU München,
Exzellenzcluster "Origin and Structure of the Universe", BMBF

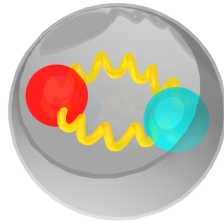


Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

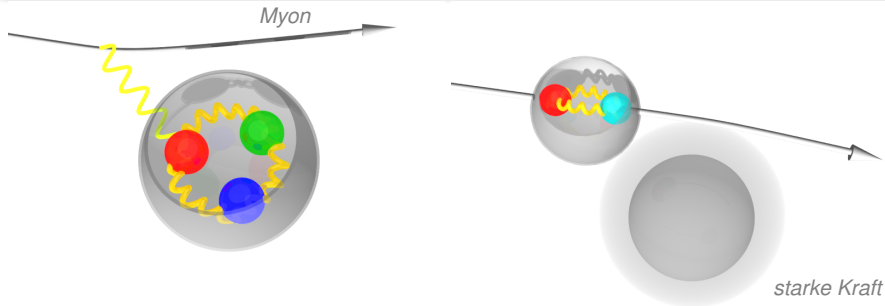


Hadroneigenschaften auf unterschiedlichen Skalen

Quanten Chromo Dynamik stark wechselwirkender Teilchen

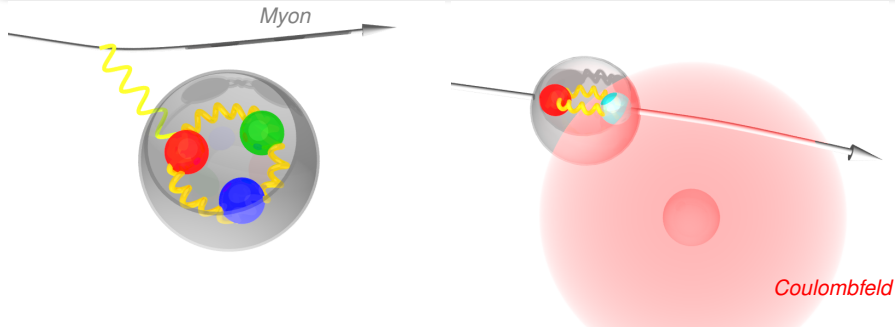


- Spinstruktur des Nukleons: longitudinale und transversale Komponenten
bei hoher Auflösung $Q^2 > 1 \text{ GeV}^2/c^2$
- Anregungsspektrum der Hadronen: Meson- und Baryonresonanzen
bei mittlerem $0.1 < Q^2 < 1 \text{ GeV}^2/c^2$
- Mesoneigenschaften: Pion-Polarisierbarkeit, el.-magn. Kopplungen
bei kleinsten $Q^2 < 0.001 \text{ GeV}^2/c^2$



- Streuung hochenergetischer polarisierter Myonen an polarisierten Proton- und Deuteron-Targets
- Diffraktive Streuung von hochenergetischen π , K , p , ($\bar{p}$) an Protonen
- Hochenergetische Streuung am Coulombfeld schwerer Kerne

mit Strahlenergie 100 – 200 GeV

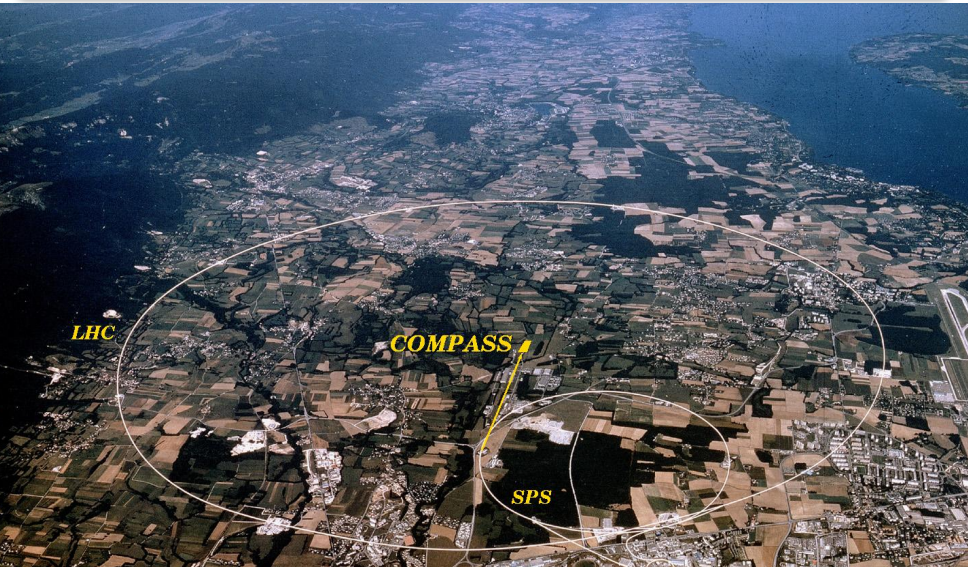


- Streuung hochenergetischer polarisierter Myonen an polarisierten Proton- und Deuteron-Targets
- Diffraktive Streuung von hochenergetischen π , K , p , ($\bar{p}$) an Protonen
- Hochenergetische Streuung am Coulombfeld schwerer Kerne

mit Strahlenergie 100 – 200 GeV



Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy





Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy

CERN SPS: 400 GeV Protonen (5 – 10 s spills)

- sekundärer Hadronstrahl (π , K , p , $\bar{p}$): $2 \cdot 10^7$ / s
Nov. 2004, 2008-09, 2012
- tertiärer, polarisierter Myonstrahl: $4 \cdot 10^7$ / s
2002-04, 2006-07, 2010-11

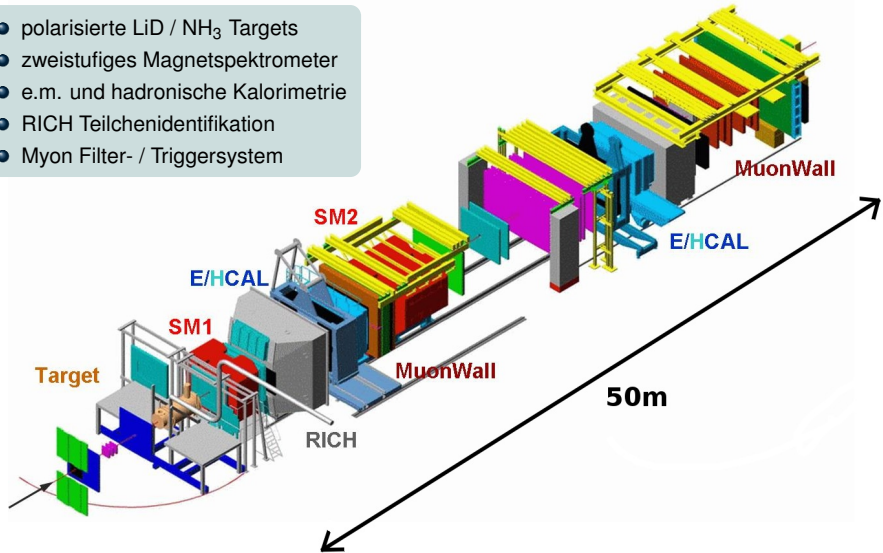
LHC

COMPASS

SPS



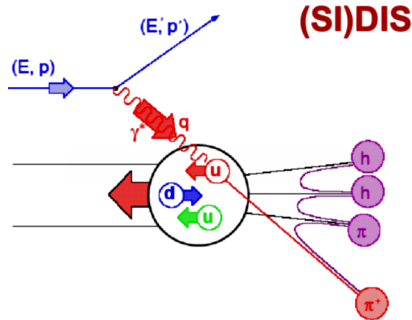
- polarisierte LiD / NH_3 Targets
- zweistufiges Magnetspektrometer
- e.m. und hadronische Kalorimetrie
- RICH Teilchenidentifikation
- Myon Filter- / Triggersystem



-

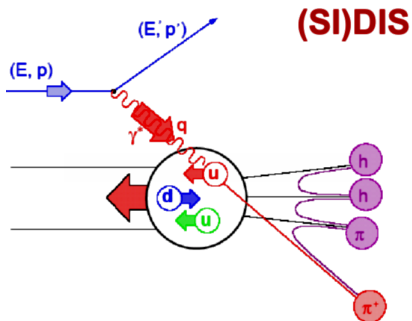


Tiefinelastische Myonstreuung



$$x_{Bj} = \frac{Q^2}{2M\nu} < 1 \quad \text{Massen-/ Impuls-Bruchteil, der (quasi)elastisch streut}$$

$$z = E_h/\nu \quad \text{Energiebruchteil des produzierten Hadrons}$$

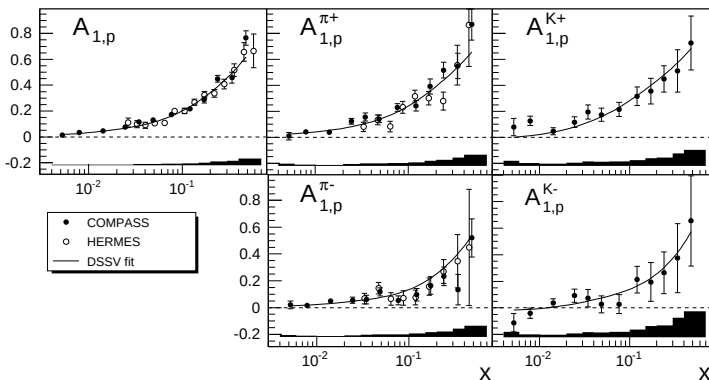


Spinzusammensetzung: $\frac{1}{2} = \frac{1}{2}\Delta\Sigma + \Delta G + L$

COMPASS: $\Delta\Sigma = 0.30 \pm 0.01_{\text{stat}} \pm 0.02_{\text{evol}}$ $Q^2 = 3 \text{ (GeV/c)}^2$



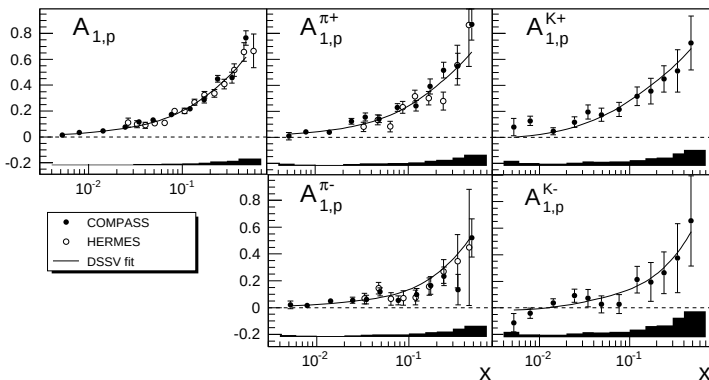
$$A_1^h(x, Q^2, z) = \frac{\sum_q e_q^2 \Delta q(x) D_q^h(z)}{\sum_q e_q^2 q(x) D_q^h(z)}$$



10 Asymmetrien ($A_{1,p,d}^{incl}$, $A_{1,p,d}^{\pi^\pm}$, $A_{1,p,d}^{K^\pm}$) $\rightarrow$ (Δu , Δd , $\Delta \bar{u}$, $\Delta \bar{d}$, Δs)



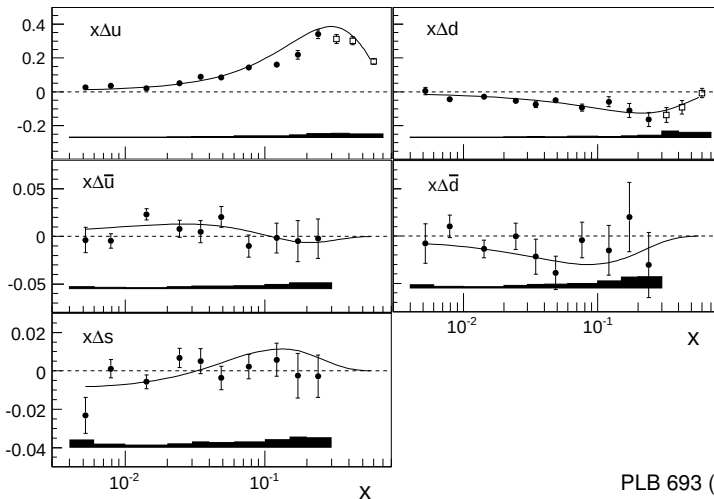
$$A_1^h(x, Q^2, z) = \frac{\sum_q e_q^2 \Delta q(x) D_q^h(z)}{\sum_q e_q^2 q(x) D_q^h(z)}$$



10 Asymmetrien ($A_{1,p,d}^{incl}$, $A_{1,p,d}^{\pi^\pm}$, $A_{1,p,d}^{K^\pm}$) $\rightarrow$ (Δu , Δd , $\Delta \bar{u}$, $\Delta \bar{d}$, Δs)



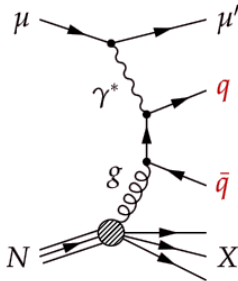
Quark Helizitäts-Verteilungen



PLB 693 (2010) 227



Gluon-Polarisation durch Photon-Gluon-Fusion



$q = c$ Open-charm, Skala durch c -Masse, (Produktion von D -Mesonen)

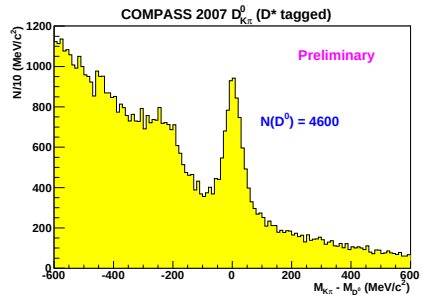
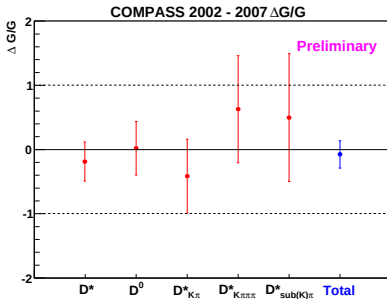
$q = u, d$ high-pT Hadronpaare, $Q^2 > 1$



Gluon Polarisation - Open Charm Result

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{1}{P_T P_B f a_{LL} \frac{S}{S+B}} A_{raw}^{\mu N}$$

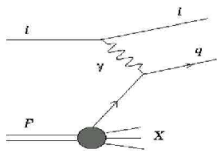
$$= -0.08 \pm 0.21 \pm 0.11$$



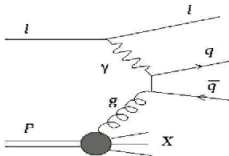


Gluon Polarisation - high- p_T hadron pairs

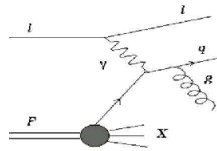
much larger statistics than in the open charm analysis (*c.a.* 7.3M)
 perturbative scale is defined by $Q^2 > 1 \text{ (GeV}^2\text{)}$



LP



PGF



QCDC

$$\Delta G/G = 0.125 \pm 0.060 \pm 0.063$$

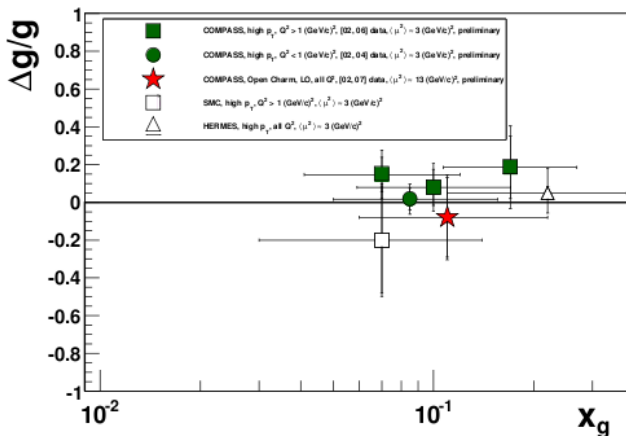
$$\langle x_G \rangle = 0.09,$$

$$\mu^2 = 3 \text{ (GeV/c)}^2$$

$\langle x_G \rangle$	$\Delta G/G$
$0.07^{+0.05}_{-0.03}$	$0.147 \pm 0.091 \pm 0.088$
$0.10^{+0.07}_{-0.04}$	$0.079 \pm 0.096 \pm 0.081$
$0.17^{+0.10}_{-0.06}$	$0.185 \pm 0.165 \pm 0.143$

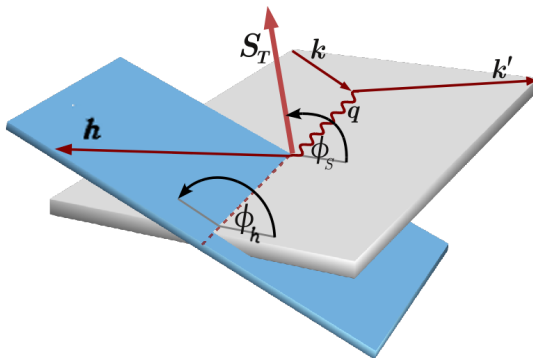


Gluon Polarisation - Result



COMPASS $\rightarrow |\Delta G| < 0.2 - 0.3$

...weitere Komponenten zum Nukleonspin?



HK27.8
Di 16:00
C. Braun
HK42.2
Di 17:15
C. Adolph

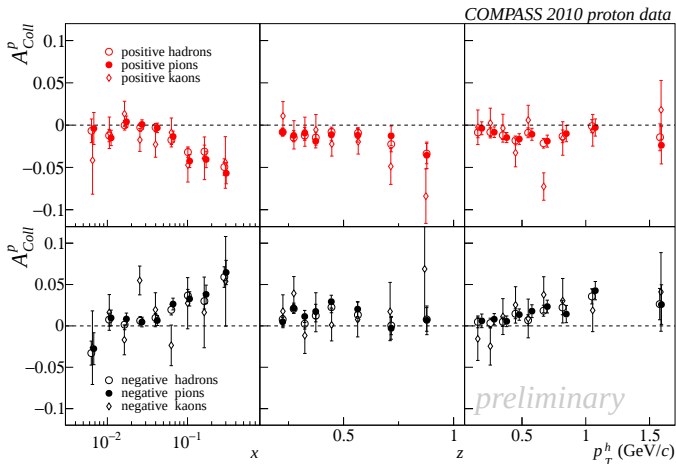
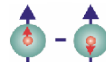
COMPASS: volle Strahlzeit 2010 mit transversalem Targetspin
azimutale Asymmetrien in $\phi_h \pm \phi_S$



Collins Asymmetry

Transversity $\Delta_T q$ und entsprechende Analysierfunktion

$$A_{UT}^{h,\sin(\phi_h+\phi_S)} \propto \sum e_q^2 \Delta_T q(x, k_T^2) \otimes \Delta^N D_q^h(z, p_T^2)$$

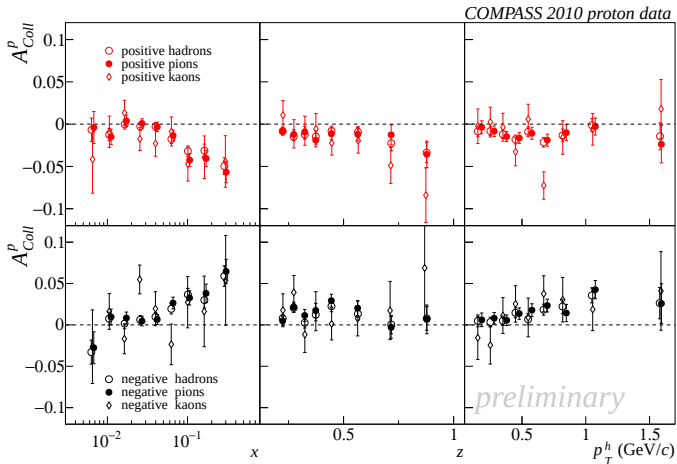
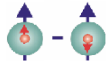




Collins Asymmetry

Transversity $\Delta_T q$ und entsprechende Analysierfunktion

$$A_{UT}^{h,\sin(\phi_h+\phi_S)} \propto \sum e_q^2 \Delta_T q(x, k_T^2) \otimes \Delta^N D_q^h(z, p_T^2)$$

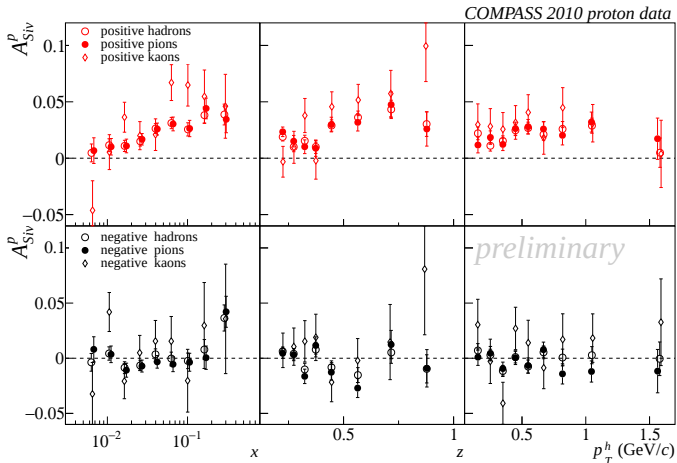




Sivers Asymmetry

k_T des unpolarisierten Quarks im polarisierten Nukleon

$$A_{UT}^{h,\sin(\phi_h - \phi_S)} \propto \sum e_q^2 \Delta^N f_q(x, k_T^2) \otimes D_q^h(z, p_T^2)$$

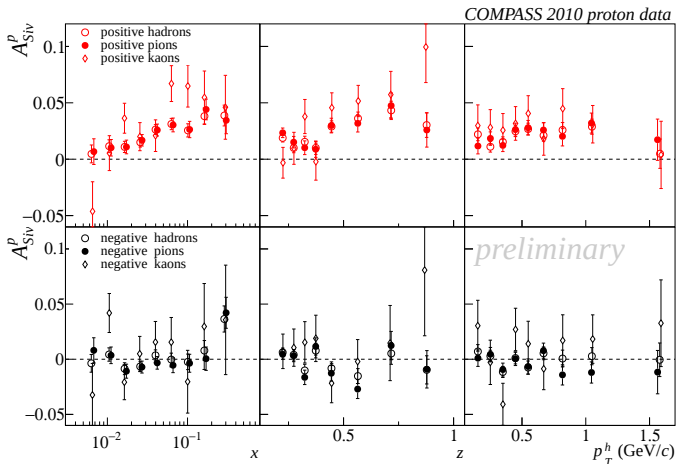




Sivers Asymmetry

k_T des unpolarisierten Quarks im polarisierten Nukleon

$$A_{UT}^{h,\sin(\phi_h - \phi_S)} \propto \sum e_q^2 \Delta^N f_q(x, k_T^2) \otimes D_q^h(z, p_T^2)$$





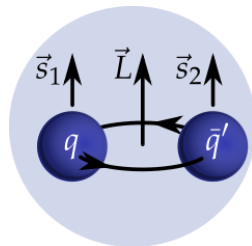
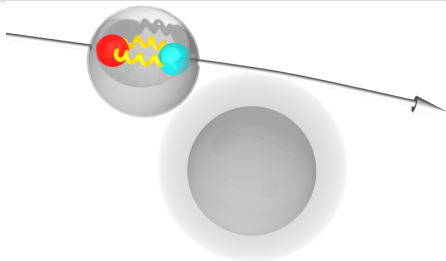
- Quarkspinverteilungen Δu positiv, Δd negativ, $\Delta \bar{u}$, $\Delta \bar{d}$, $\Delta s \approx 0$
- Gluon Spinbeitrag ΔG klein, Vorzeichen unsicher
 $|\Delta G| < 0.2 - 0.3$
- transversale Freiheitsgrade
 → signifikante Effekte, interessant als Input für Theorie
 Sivers: Verbindung zum Bahndrehimpuls der Quarks

Untersuchung von Bahndrehimpulskomponenten durch COMPASS II:

GPd's in DVCS: $\bar{\mu} p \rightarrow p \gamma, p \rho$

pol. Drell-Yan: $\pi^- p^\uparrow \rightarrow \mu^+ \mu^- X$

HK 42.3
 Di 17:30
 K. Schmidt



Hochenergetische Hadronstreuung:

- Beschreibung durch Regge-Theorie
- ab Energien ~ 100 GeV dominiert Pomeron-Austausch
- nicht-resonante Beiträge: Deck-Amplituden
- Ziel: genaueres Verständnis stark gebundener Zustände

Konstituenten-Quarkmodell:

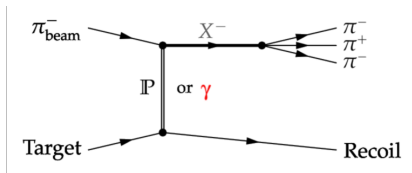
$$\text{Meson-Spin } \vec{J} = \vec{S} + \vec{L}$$

$$\text{Parität } P = (-1)^{L+1}$$

$$\text{C-Parität } C = (-1)^{L+S}$$

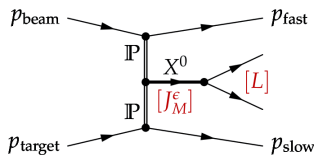
verbotene J^{PC} :

$0^{--}, 0^{+-}, 1^{-+}, 2^{+-}, \dots$



Diffraktion
in isovektorielle X^-

- Suche nach $q\bar{q}g$ Hybriden
- Meson-**Photon**-Kopplung
 - el-magn. Übergänge
 - chirale Dynamik
- 3π , $\pi\eta\eta$, 5π , πKK , $\pi\eta$, $\pi\gamma$, ...



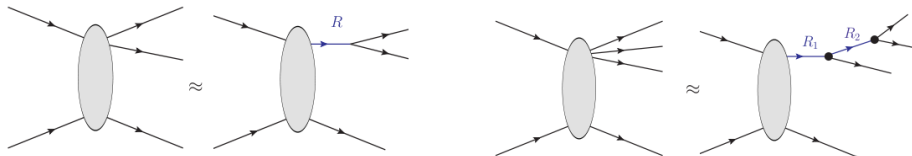
zentrale Produktion
isoskalarer $X^0(f_0, f_2, \dots)$

- Suche nach Glueball-Kandidaten
- zugängliche Systeme:

$$\pi^- \pi^+, \pi^0 \pi^0, \eta\eta, K^- K^+, K^0 K^0$$



Partialwellenzerlegung - Isobarenmodell



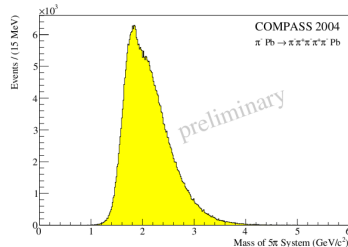
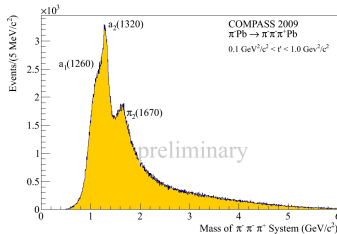
- Zerlegung in 2-Teilchen-Zerfallskette mit Isobaren-Zwischenzuständen
- “Welle”: einzelne Kombination von J^{PC} mit Isobaren
- Reichhaltiges Spektrum mit überlappenden / interferierenden Beiträgen

$$\sigma = \sum_{\text{rank}, \epsilon} \left| \sum_{\text{waves}} T(m_X) A_i(\tau, m_X) \right|^2$$

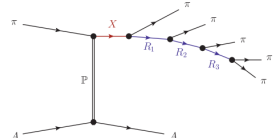
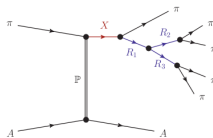
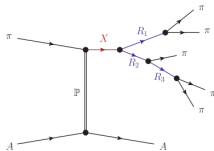
- Phasenbewegung der Resonanzen durch Interferenzen sichtbar
- Phasenraum für 3π : 5-dim., für 5π : 11-dim.



Isobaren für 5π

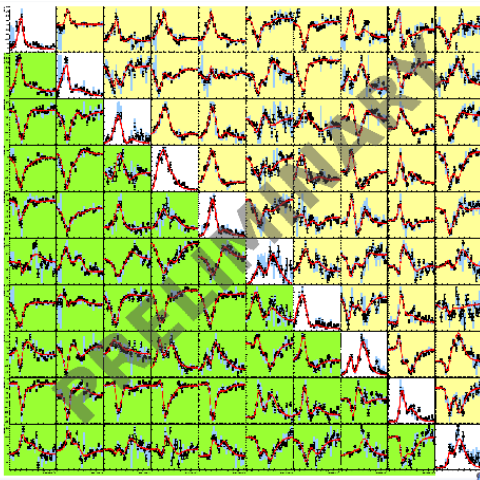


- komplexes Modell: höhere Massen mit Zerfall in schwere Isobare zugänglich
- automatisierte Auswahl der beitragenden Wellen: $\sim 300 \rightarrow 32$



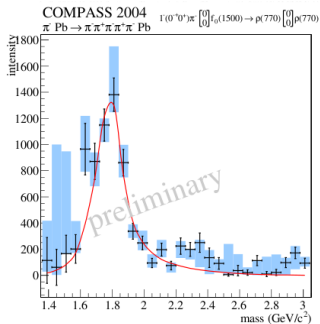
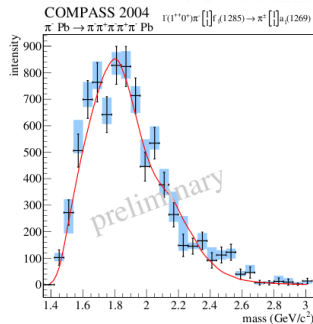


PWA of $\pi^- \text{Pb} \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+ \text{Pb}$ (2004 data)

 $0^{-+} \pi^- f_0(1500) S$
 $0^{-+} \rho a_1(1260) S$
 $1^{++} \pi^- f_0(1370) P$
 $1^{++} \pi^- f_1(1285) P$
 $1^{++} \rho \pi(1300) S$
 $1^{++} (\pi \pi)_S a_1 D$
 $2^{-+} \pi^- f_2(1270) S$
 $2^{-+} \rho a_1(1260) S$
 $2^{-+} \rho a_2(1320) S$
 $2^{-+} \rho a_1(1260) D$


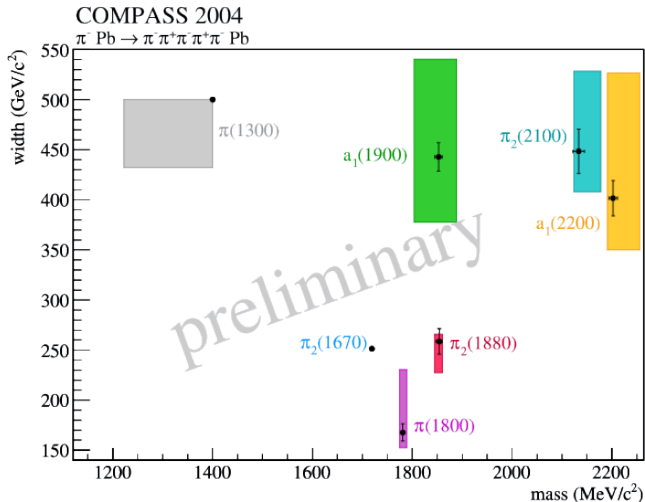


PWA of $\pi^- \text{Pb} \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+ \text{Pb}$ (2004 data)

(a) $0^-+\pi f_0(1500)$ S-wave(b) $1^{++}\pi f_1(1285)$ P-wave

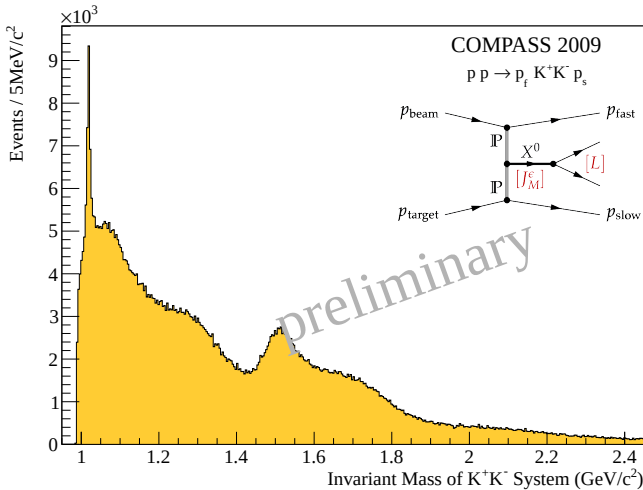


PWA of $\pi^- \text{Pb} \rightarrow \pi^- \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+ \text{Pb}$ (2004 data)





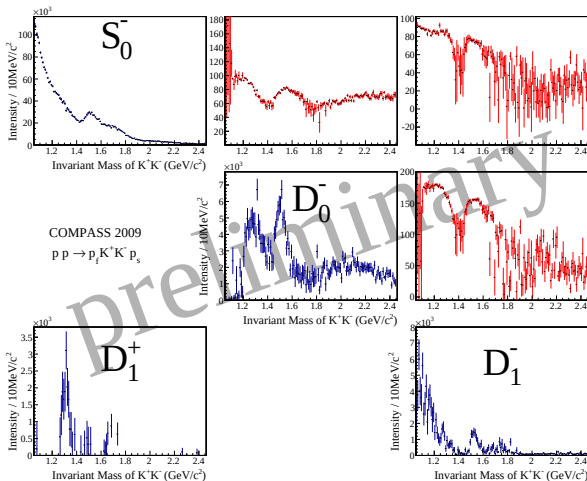
Zentrale Produktion: $pp \rightarrow p_{fast} K^+ K^- p_{slow}$





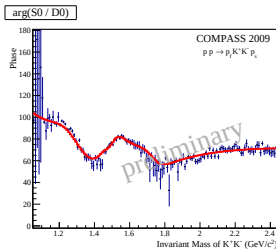
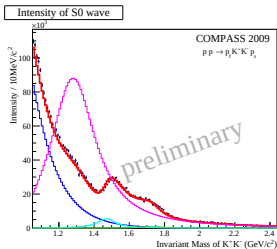
Zentrale Produktion: $pp \rightarrow p_{fast} K^+ K^- p_{slow}$

Phasenraum durch 2 Winkel definiert

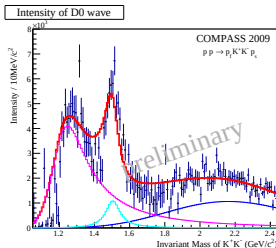




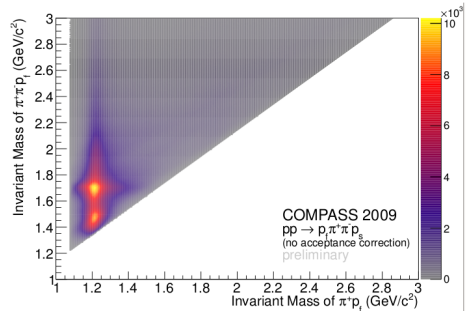
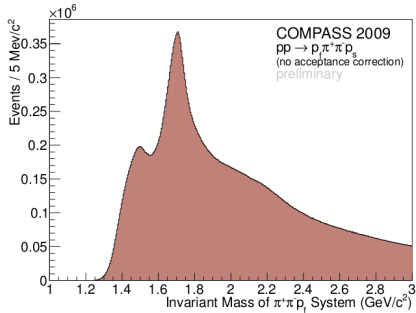
Zentrale Produktion: $pp \rightarrow p_{fast} K^+ K^- p_{slow}$



- Klare Signatur der bekannten $f_0(1500)$ und $f_0(1710)$
- Hinweis auf $f_0(1370)$?
- **Glueball**-Kandidat
- Systematik zu untersuchen: Resonanz-BW-Parametrisierung, Untergrundbeschreibung

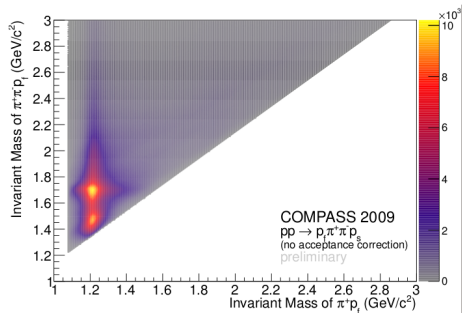
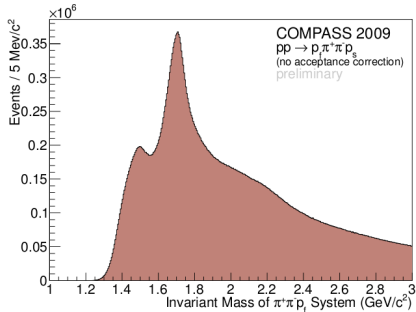


HK2.5
Mo 12:15
A. Austregesilo



technisch (noch) anspruchsvoller, PWA in Vorbereitung

HK77.2
Do 17:15
T. Weisrock



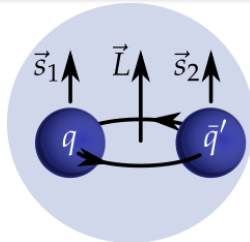
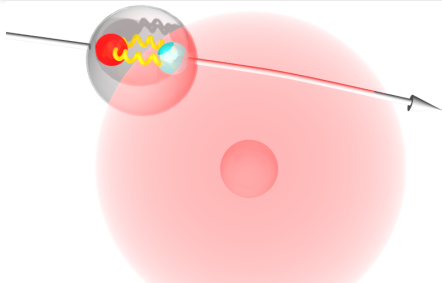
technisch (noch) anspruchsvoller, PWA in Vorbereitung

HK77.1
 Do 16:45
 B. Grube
 (Gruppenbericht)

HK77.2
 Do 17:15
 T. Weisrock

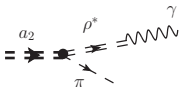


Radiative Kopplung von Mesonen $\pi\gamma \longleftrightarrow X$



Elektromagnetischer Übergang

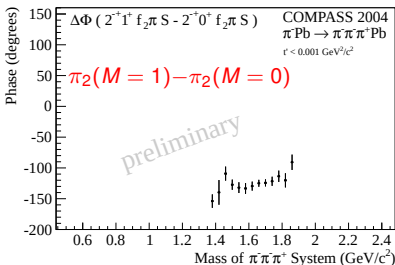
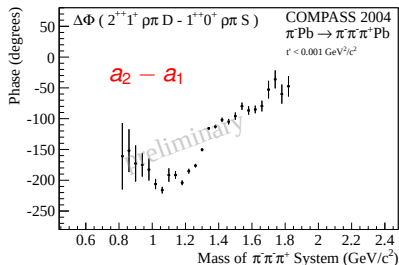
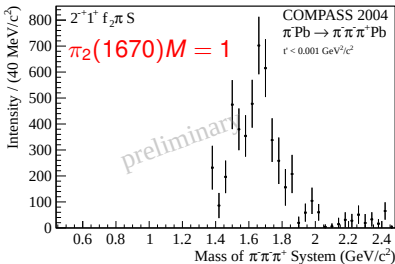
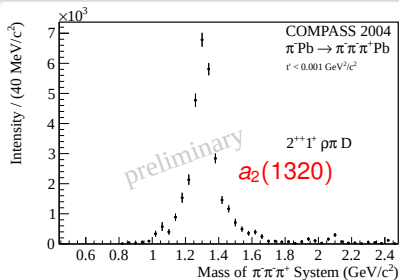
- Operator wohlverstanden
- Bestimmung der internen Struktur / Wellenfunktionen
- Vorhersagen z.B. VMD

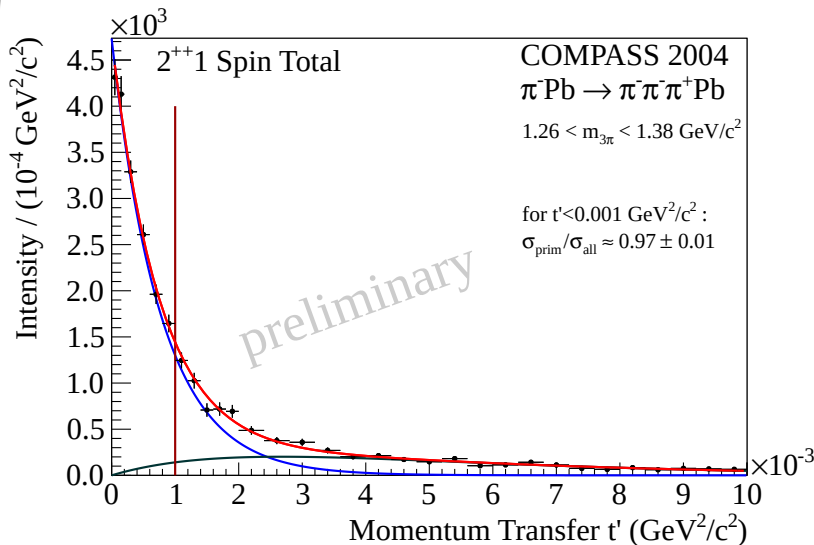


E1	$\Delta J = 1$ $\Delta P \neq 0$	$J^{PC} = 1^{++} \rightarrow 0^{-+}$
E2	$\Delta J = 2$ $\Delta P = 0$	$J^{PC} = 2^{-+} \rightarrow 0^{-+}$ $(\pi_2(1670) \rightarrow \pi)$
M1	$\Delta J = 1$ $\Delta P = 0$	
M2	$\Delta J = 2$ $\Delta P \neq 0$	$J^{PC} = 2^{++} \rightarrow 0^{-+}$ $(a_2(1320) \rightarrow \pi)$



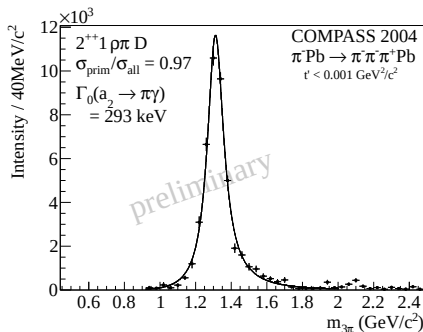
PWA in Massenbins ($t' < 0.001 \text{ (GeV/c)}^2$)





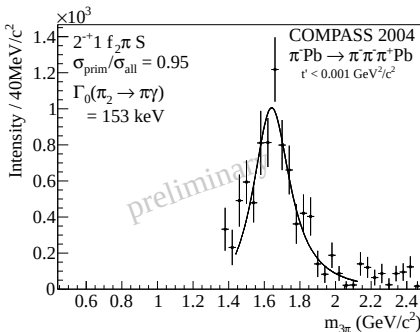


Radiative Breiten von $a_2(1320)$ und $\pi_2(1670)$



$$\Gamma_0(a_2(1320) \rightarrow \pi\gamma) =$$

$$(293 \pm 5_{\text{stat}} \pm 26_{\text{syst}}) \text{ keV}$$



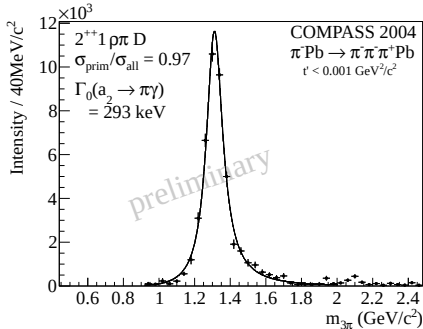
$$\Gamma_0(\pi_2(1670) \rightarrow \pi\gamma) = \frac{BR_{\text{model}}}{BR_{\text{true}}} \cdot$$

$$(153 \pm 10_{\text{stat}} \pm 21_{\text{syst}}) \text{ keV}$$

erste Messung!



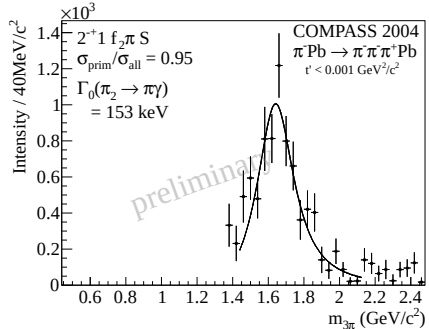
Radiative Breiten von $a_2(1320)$ und $\pi_2(1670)$



$$\Gamma_0(a_2(1320) \rightarrow \pi\gamma) =$$

$$(293 \pm 5_{\text{stat}} \pm 26_{\text{syst}}) \text{ keV}$$

HK77.7
Do 18:30
S. Grabmüller



$$\Gamma_0(\pi_2(1670) \rightarrow \pi\gamma) = \frac{BR_{\text{model}}}{BR_{\text{true}}} \cdot$$

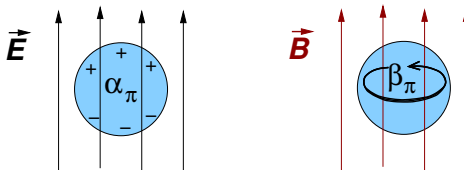
$$(153 \pm 10_{\text{stat}} \pm 21_{\text{syst}}) \text{ keV}$$

erste Messung!



Dipol $E1$, $M1$ -Kopplungen bei niedriger Energie

$$\pi + \gamma \rightarrow \pi + \gamma$$



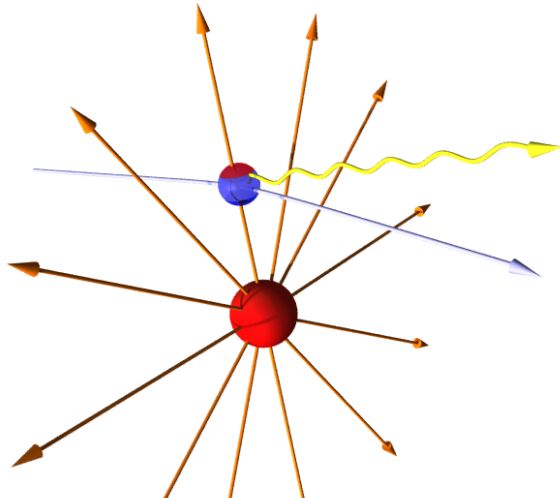
Polarisierbarkeiten α_π und β_π [10^{-4} fm^3]

ChPT (2-loop) Vorhersage: $\alpha_\pi = 2.93$, $\beta_\pi = -2.77$

frühere Experimente: $2 - 7$ ($\beta_\pi \approx -\alpha_\pi$)

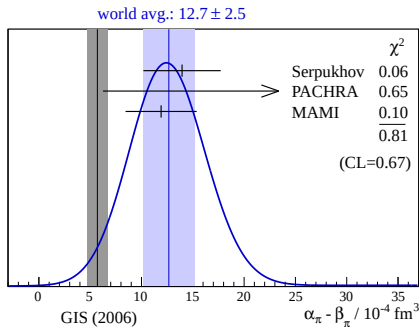
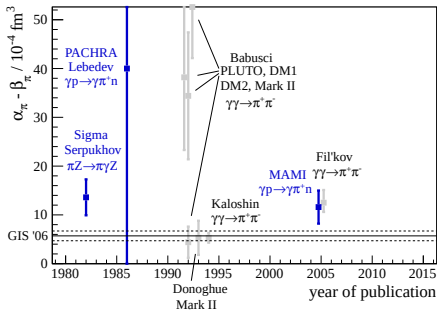
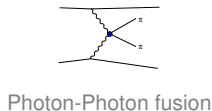
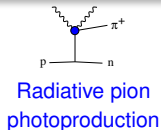
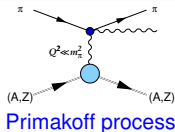


- typische Feldstärke $r = 5R_{Ni}$:
 $E \sim 300 \text{ kV/fm}$
- *Äquivalent-Photonen-Näherung*
(Weizsäcker-Williams):
Bremsstrahlung verknüpft
mit Pion (oder Myon)
Compton-Streuung
- WQ wird i.a. reduziert
- Ladungstrennung (für α_{π}^{ChPT})
 $\sim 10^{-5} \text{ fm} \cdot e$





Pion-Polarisierbarkeit: Datenlage vor COMPASS

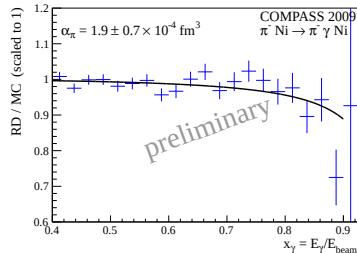
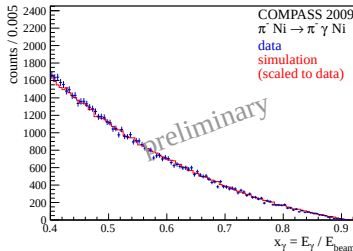


GIS'06: ChPT prediction, Gasser, Ivanov, Sainio, NPB745 (2006)

plots from Thiemo Nagel, PhD thesis, TUM 2012



$$R = \frac{\sigma(x_\gamma)}{\sigma_{\alpha_\pi=0}(x_\gamma)} = \frac{N_{meas}(x_\gamma)}{N_{sim}(x_\gamma)} = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{m_\pi^3}{\alpha} \cdot \frac{x_\gamma^2}{1-x_\gamma} \alpha_\pi$$



HK77.4
 Do 17:45
 S. Huber

COMPASS vorläufig:

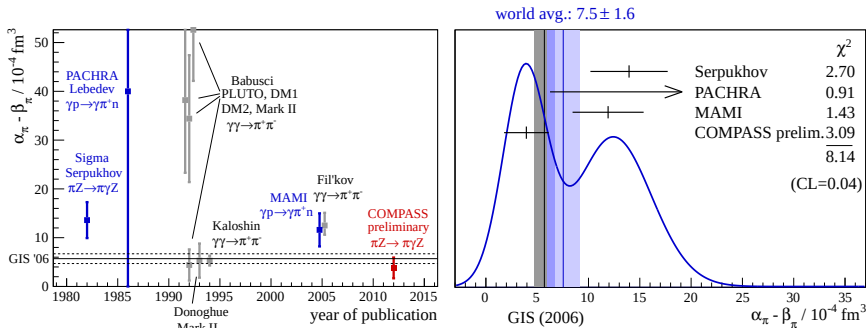
$$\alpha_\pi = 1.9 \pm 0.7_{\text{stat}} \pm 0.8_{\text{syst}} \times 10^{-4} \text{ fm}^3$$

Systematik durch Kontroll-Messungen mit Myonstrahl



Einordnung des COMPASS-Resultats

zur Pion-Polarisierbarkeit



- Das COMPASS-Resultat weicht signifikant von den früheren Messungen ab
- Gute Übereinstimmung mit der ChPT-Vorhersage



- zahlreiche wichtige Beiträge zur **Nukleon-Spinstruktur**
 - **Gluon**beitrag zum Nukleonspin ist **klein**
 - präzise Information zur **transversalen** Spinstruktur
 - Bahndrehimpulsbeiträge → Messungen in **COMPASS II**
- Hadron-Resonanzspektrum
 - **weltweit größtes Datensample** für zahlreiche Endzustände bis zu $\times 50$
 - **diffraktiv**: Untersuchung des gesamten Mesonspektrums **bis ca. 2.5 GeV**, Klärung offener Fragen zu stark gebundenen Zuständen
 - **zentrale** Produktion: Suche nach **Gluebällen**, $f_0(1370)$?
→ **gekoppelte $\pi\pi - KK$ Analyse**
- Primakoff-Prozesse
 - **genaueste Bestimmung** der Pion-Polarisierbarkeit

$$\alpha_\pi = (1.9 \pm 0.7 \pm 0.8) \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$$
 → weitere Präzisionsbestimmung von $\alpha_\pi, \beta_\pi, \alpha_K$ mit COMPASS 2012 Daten
 - Bestimmung radiativer Breiten von Mesonresonanzen,
erstmalig von $\Gamma(\pi_2(1670) \rightarrow \pi\gamma) = 153 \pm 10 \pm 23 \text{ keV}$ (vorl.)
 - weitere Tests von chiraler Störungsrechnung