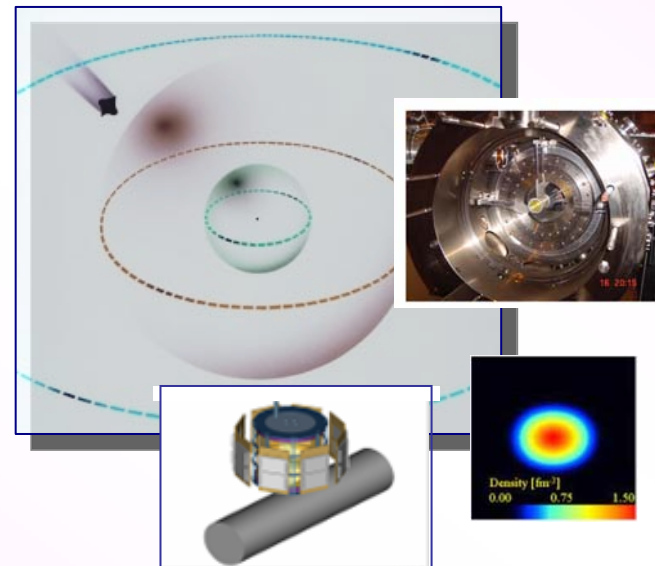
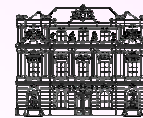


# Exotische Atome: Rosen aus dem Blumengarten der subatomaren Physik

Paul Kienle  
Stefan Meyer Institut/ÖAW  
und TU München



# Übersicht



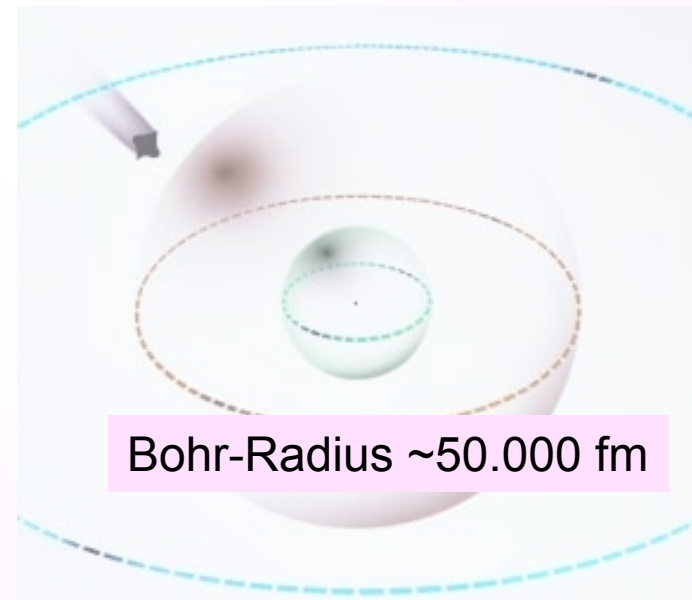
- Was sind (exotische) Atome
- Exotische Atome in der Hadronenphysik
- Pionische Wasserstoffatome
- Tief-gebundene pionische Kernzustände
- Kaonische Wasserstoffatome
- Tief-gebundene kaonische Kernzustände

*Rosa Campanulata alba. Rosier Campanule à fleurs blanches*  
P. J. Redouté pinx. Langlet sculp.

# Was sind Atome?

Verbindungen von Kerne und Elektronen. Die negativ geladenen Elektronen sind im Coulomb-Feld der positiv geladenen Kerne mit einer Bindungsenergie  $B$  gebunden.

$$B_e = -\alpha^2 m_e c^2 / 2$$
$$\alpha = e^2 / (\hbar c)$$
$$m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$
$$R_B = (\hbar c) / (\alpha m_e c^2)$$



# Was sind exotische Atome?

Ersetzt man das Elektron mit einem „exotischen“, negativen Teilchen, entsteht ein „exotisches Atom“

Ist das Teilchen ein „schwereres Elektron“, ein Myon, so entsteht ein **myonisches Atom** mit der Bindungsenergie  $B_\mu$

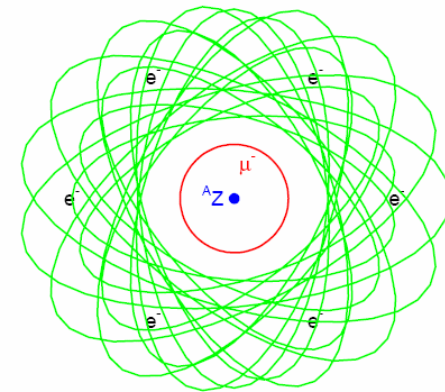
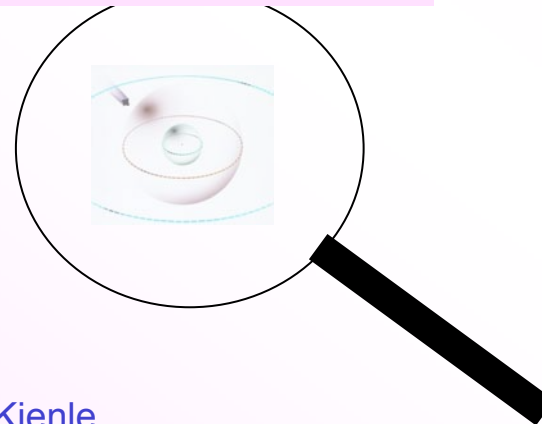
$$B_\mu = -\alpha^2 m_\mu c^2 / 2$$

$$m_\mu c^2 = 105.66 \text{ MeV},$$

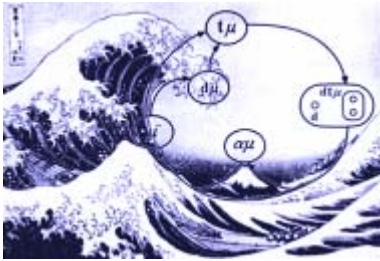
$$m_\mu \sim 200 \times m_e$$

$$t_{1/2}(\mu) = 2.2 \times 10^{-6} \text{ s}$$

Bohr-Radius  $\sim 250 \text{ fm}$



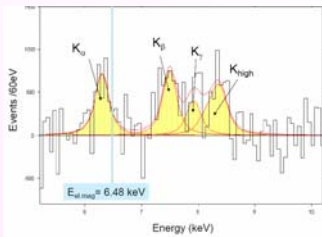
# ... ein Gebiet mit vielen Überraschungen



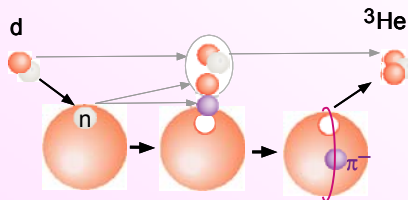
**Myon-katalysierte Fusion:  
Katalyse von Fusionsprozessen  
auch bei tiefen Temperaturen**



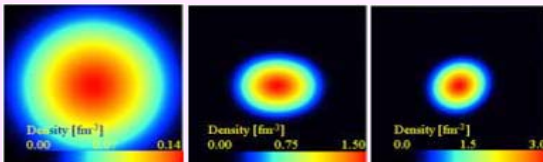
**Erzeugung von Antimaterieatomen  
(Antiwasserstoff) am LEAR-AD/CERN**



**Kaonischer Wasserstoff – Puzzle:  
Wechselwirkung  
anziehend oder abstoßend ?**

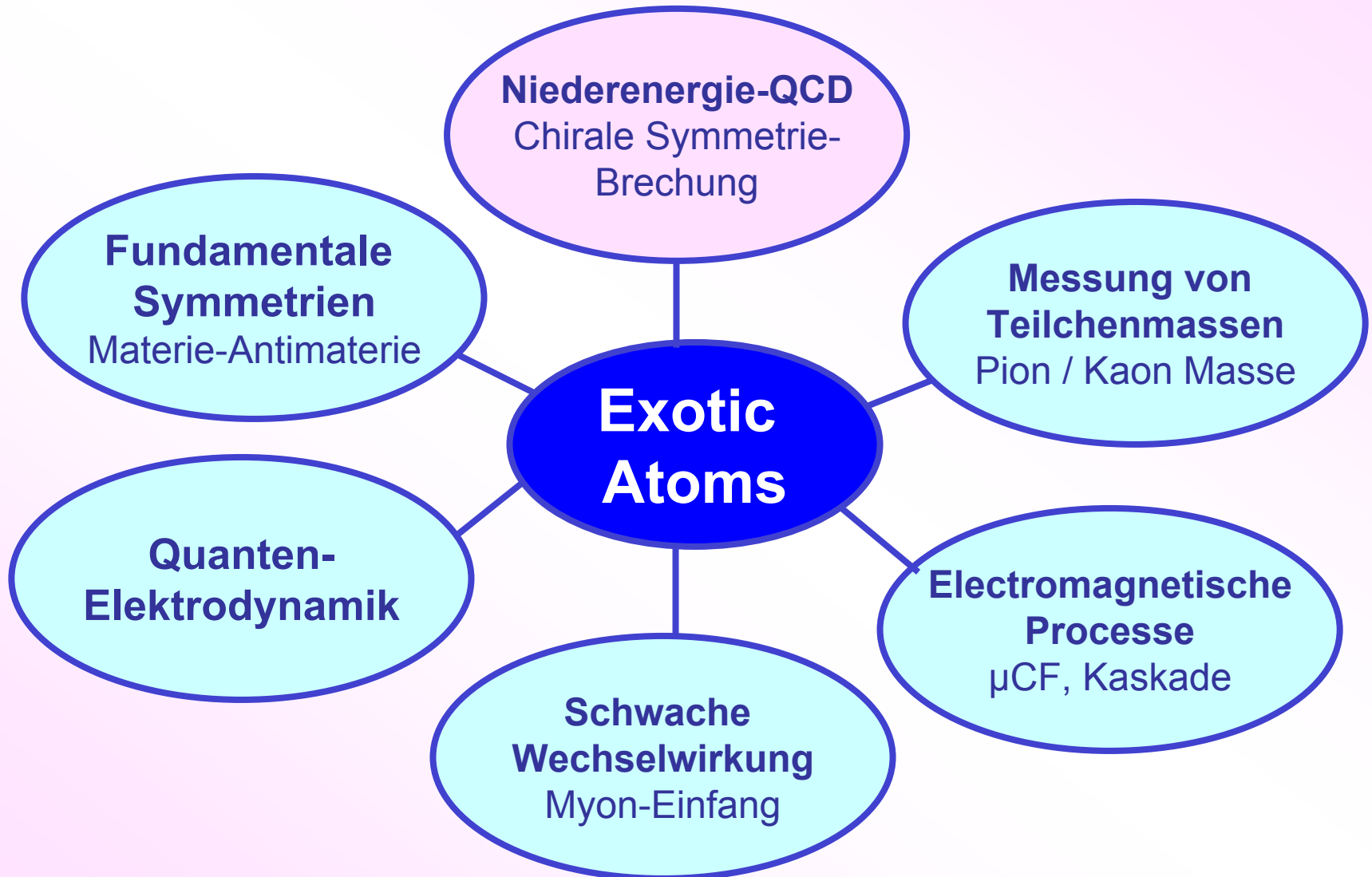


**Entdeckung tiefgebundener  
pionischer Kernzustände**



**Tiefgebundene, dichte  
kaonische Kernzustände**

# ... ein Gebiet mit vielfältigen Forschungsthemen





## Antiwasserstoff: ein exotisches Antimaterieatom



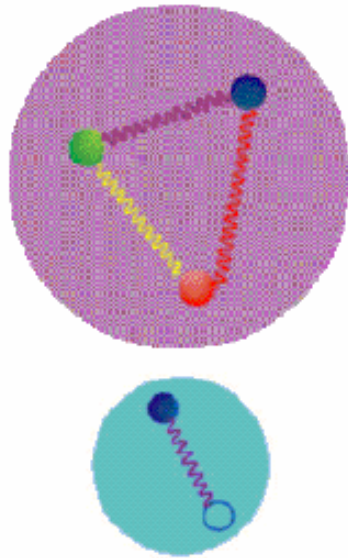
- Antiwasserstoff, die Orchidee der exotischen Atome (Antiproton+Positron)
- Fast wie Wasserstoff, aber im Universum nicht nachgewiesen
- Wo ist er geblieben?
- Suche nach Teilchen-Antiteilchen Symmetriebrechung im Spektrumsvergleich
- Laufende Experimente am AD des CERN und zukünftige Experimente an FLAIR der GSI

# Hadronische Atome: Pionische und Kaonische Atome

- Ersetzt man Elektronen mit negativ geladenen Pionen oder Kaonen so entstehen **pionische oder kaonische** Atome.
- Pionen und Kaonen sind Mesonen, gebundene Quark-Antiquark Systeme, die neben der Coulomb-Anziehung auch **starke Wechselwirkung** mit Kerne zeigen, die anziehend oder abstoßend sein kann.



# Quarks und Gluonen – die Bausteine der Hadronen

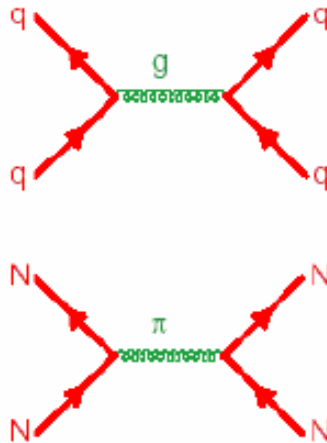


## Nukleon:

- besteht aus 3 Quarks
- uud: Proton,  $Q(p) = 1e$
- udd: Neutron,  $Q(n) = 0e$
- $Q(u) = +2/3 e$ ,  $Q(d) = -1/3 e$
- Farbladung: rbg

## Meson:

- besteht aus Quark und Antiquark



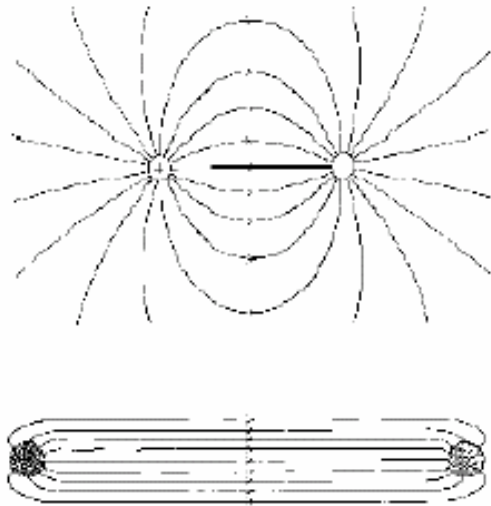
## Quark-Quark Wechselwirkung

- Austausch von Gluonen mit Farbladung

## Nukleon-Nukleon Wechselwirkung

- Austausch von  $\pi$  Mesonen

# Besonderheiten der Hadronen



## Unterschied der elektromagnetischen und starken Wechselwirkung:

- Gluonen ziehen sich an
- Kräfte nehmen mit Abstand zu

## 1) Einschlußproblem:

- Hadronen lassen sich nicht in Quarks zerlegen
- Keine Teilchen mit  $1/3$  zahliger elektrischer Ladung beobachtet

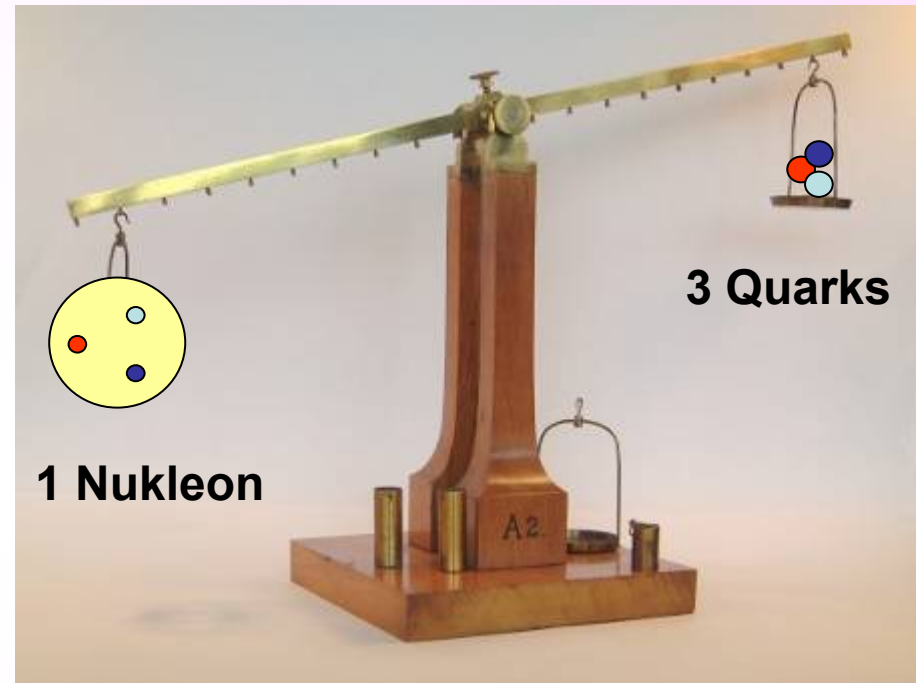
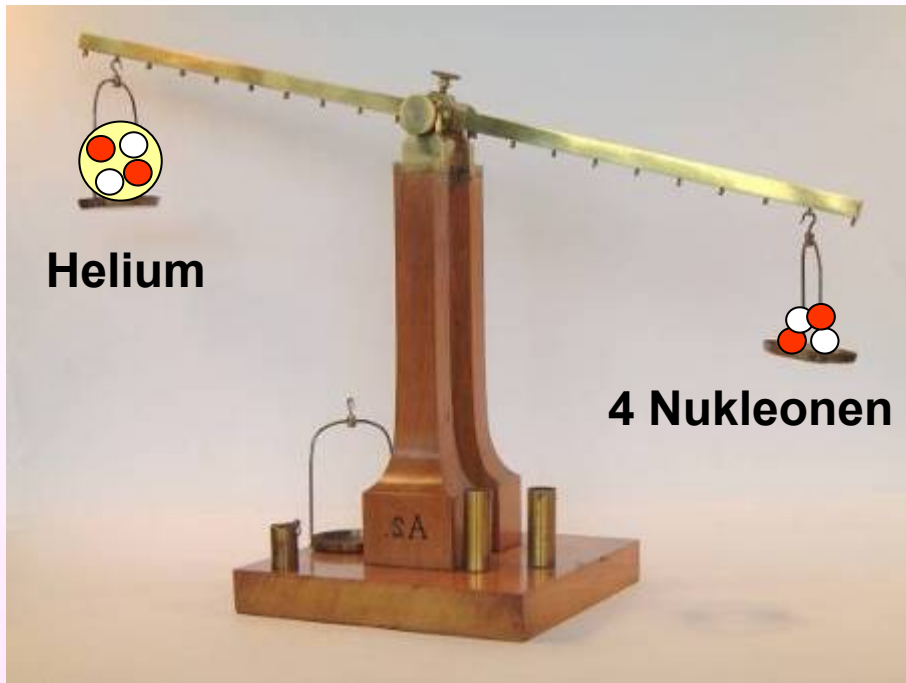
## 2) Massenproblem:

- Die Summe der Massen der Quarks ist nur einige Prozent der Massen der Hadronen

$$m_{\text{quark}} = (5 - 10) \text{MeV} / c^2$$

$$m_{\text{Nukleon}} \sim 1000 \text{MeV} / c^2$$

# Problem der Hadronenmassen

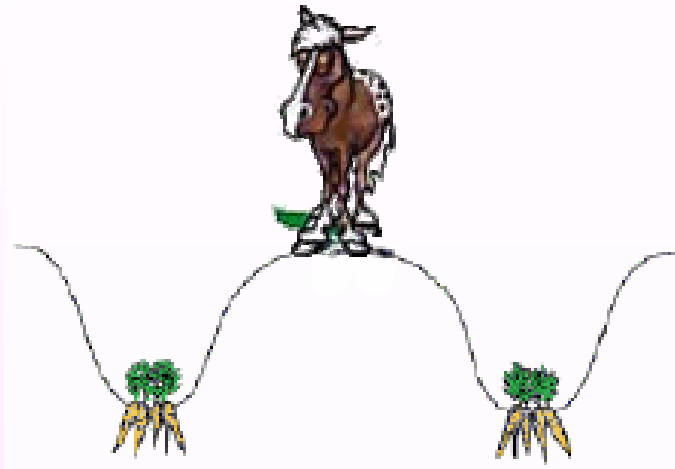


$$3 \times m_{\text{quark}} \sim 3 \times 10 = 30 \text{ MeV}/c^2$$

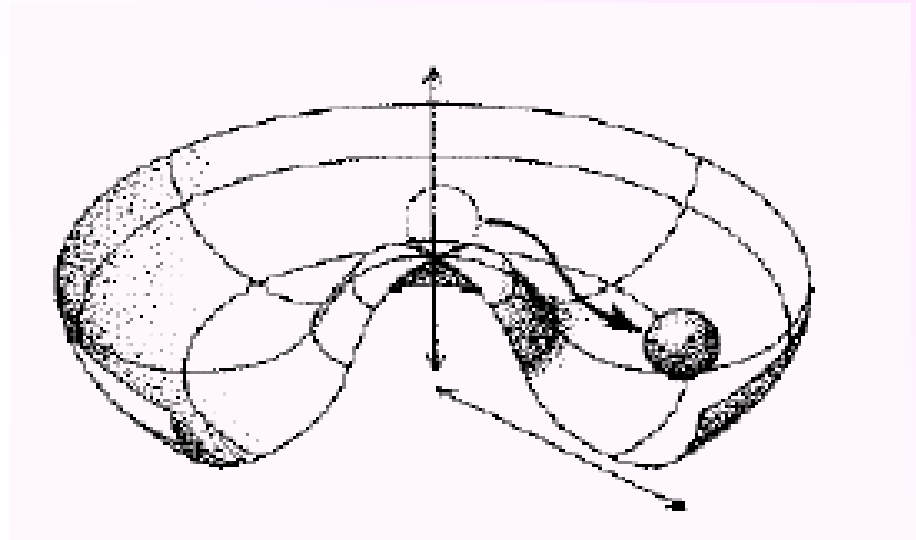
**viel kleiner als**

$$m_{\text{nucleon}} \sim 1000 \text{ MeV}/c^2 !$$

# Spontane Symmetriebrechung



Buridians Esel  
verhungert er ?



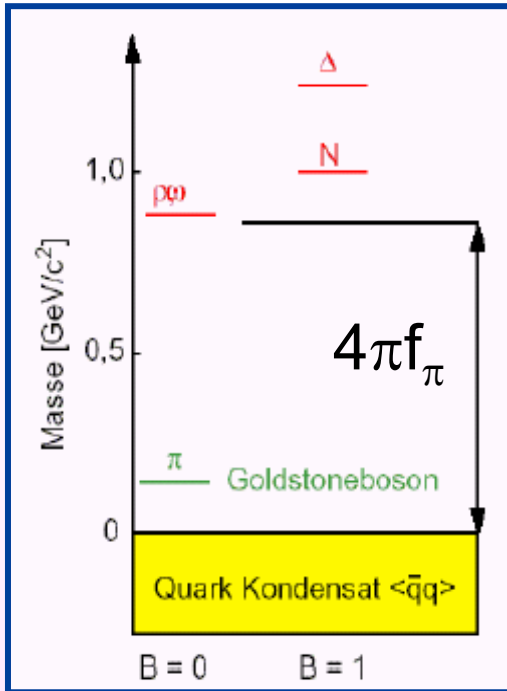
Mexikanisches Hut-Potential

# Erzeugung der Hadron-Massen

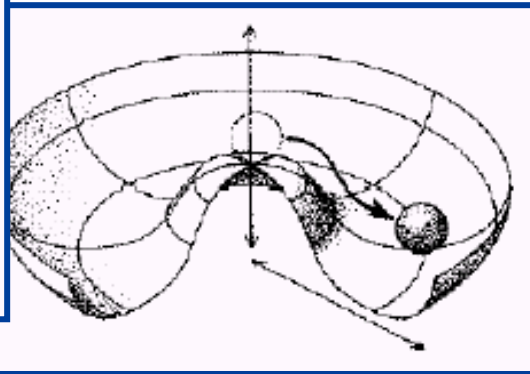
Dynamische Erzeugung der Hadron-Massen  
auf Grund **chiraler Symmetrie-Brechung**

GOR Relation:

$$m_\pi^2 f_\pi^2 = -\langle m_q \rangle \langle \bar{q}q \rangle$$

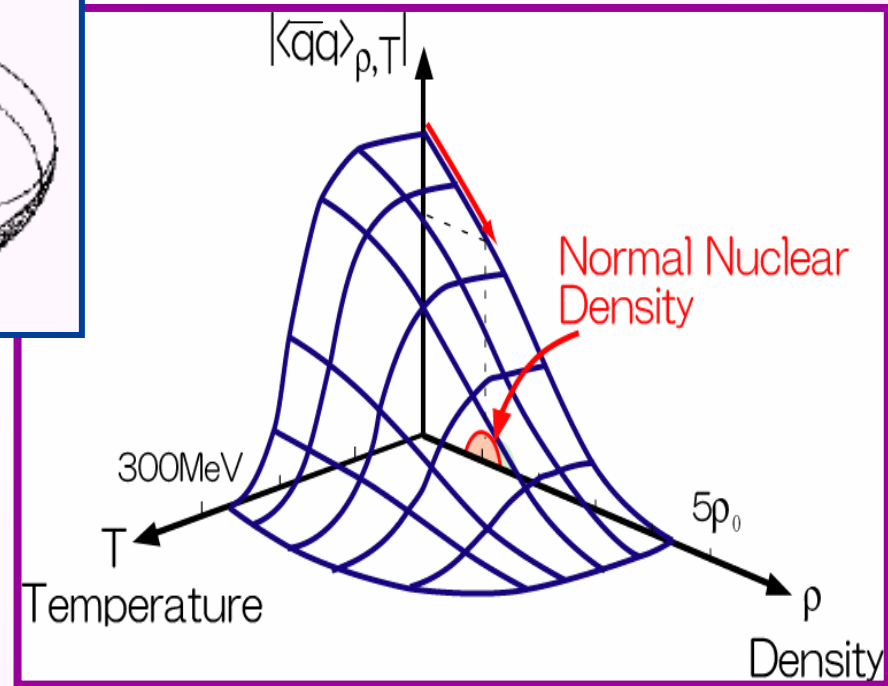


**Hadron-Spektrum**  
**Chirale Symmetrie-**  
**Brechung**  
 $\langle \bar{q}q \rangle = -1,5 \text{ fm}^{-3}$



**Neuer Grundzustand**

**Quark-Kondensat als**  
**Funktion von T,  $\rho$**

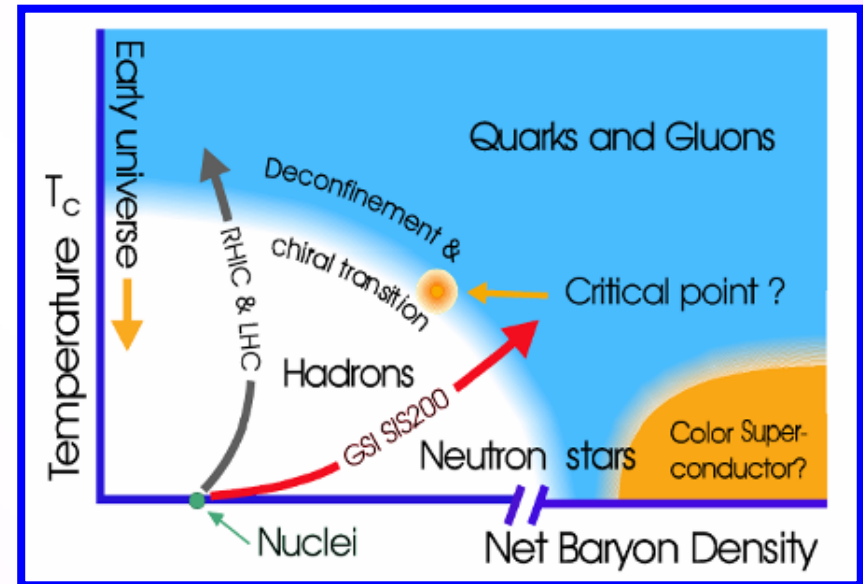


# Forschungsthemen

- Studien zu grundlegenden Problemen der Hadronenphysik
  - **Entstehung der Hadronenmassen und Quarkeinschluss**
  - **Phasendiagramm der Materie**

- **Werkzeuge und Methoden**

- Exotische Atome
- Tiefgebundene pionische und kaonische Kernzustände
- Untersuchung des Phasendiagrammes entlang der Dichtelinie

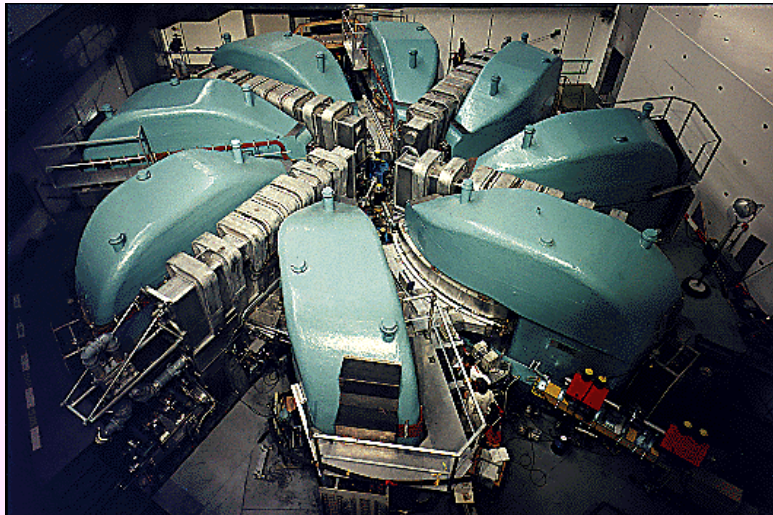
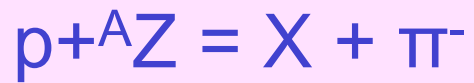


# Pionischer Wasserstoff

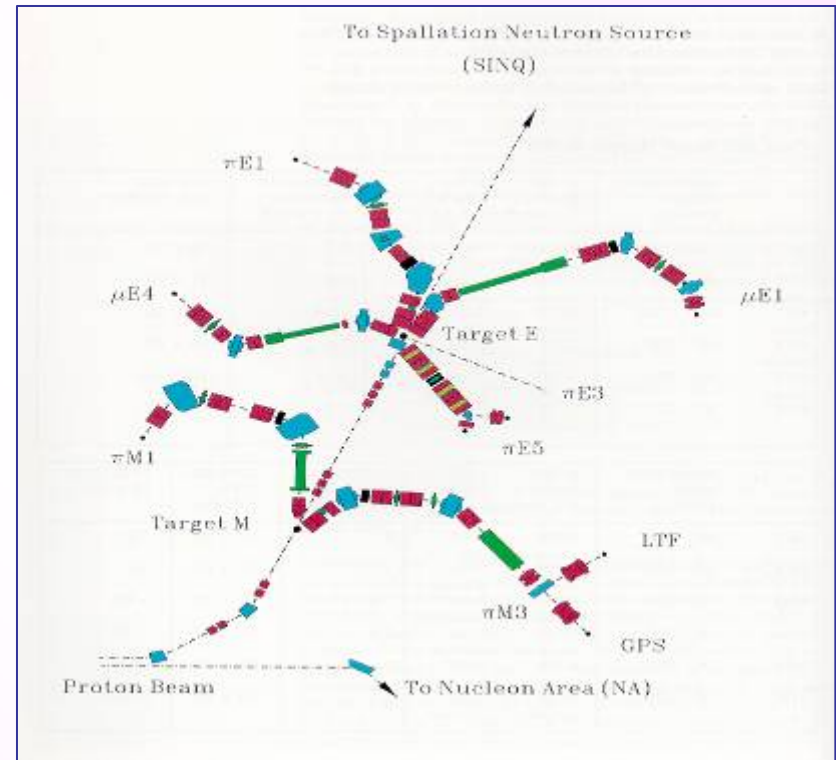
- Pionischer Wasserstoff ist das elementarste gebundene System zur **Untersuchung der Niederenergie Pion–Nukleon Wechselwirkung durch Spektroskopie der Röntgen-Übergängen**
- **Bestimmung der Stärke der Pion-Nukleon Wechselwirkung und Vergleich mit Theorie (Tomozawa-Weinberg Theorem)**

# Erzeugung von $\pi$ -Mesonen

## Erzeugung von negativen Pionen



PSI-Zyklotron

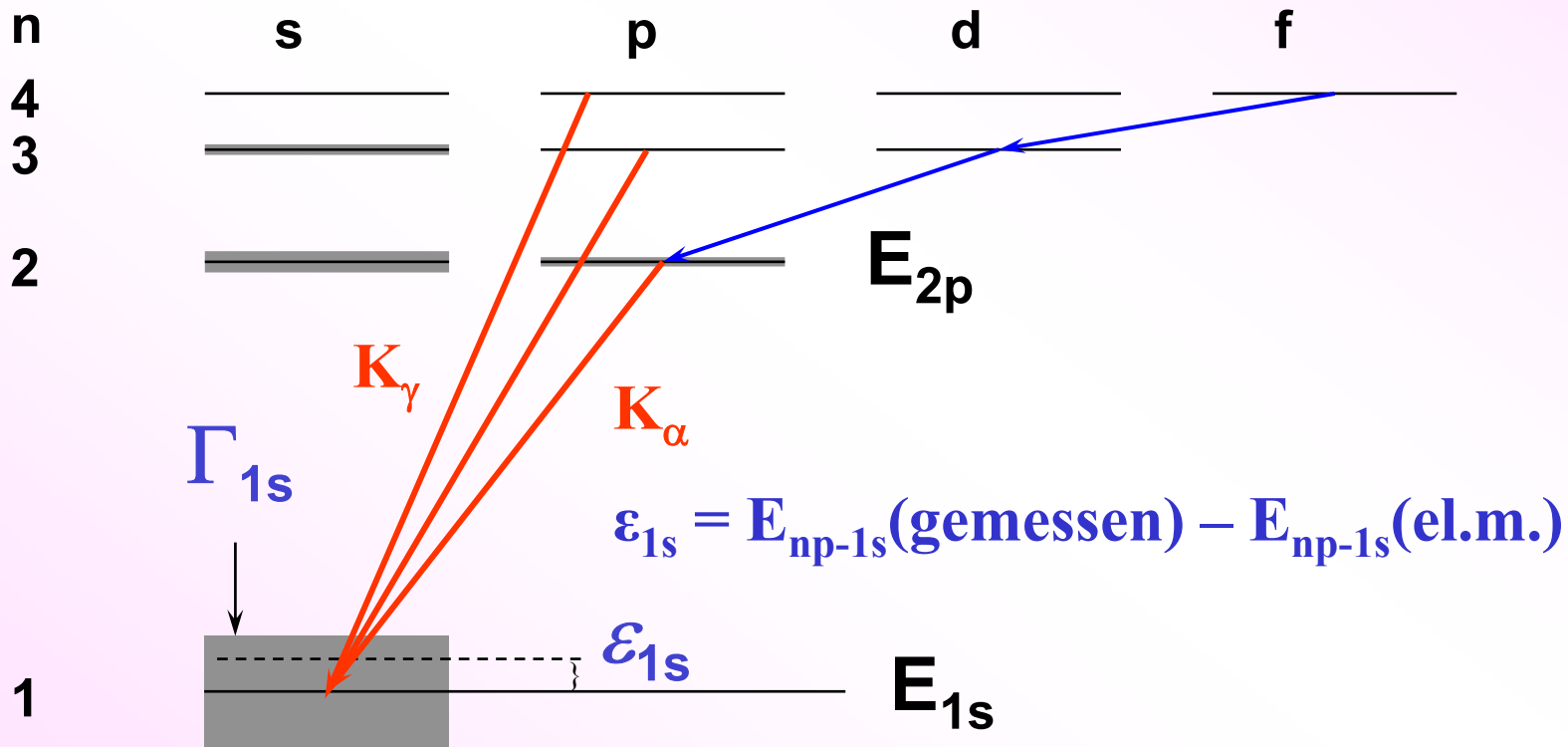


PSI Myon-/Pion-Strahlen



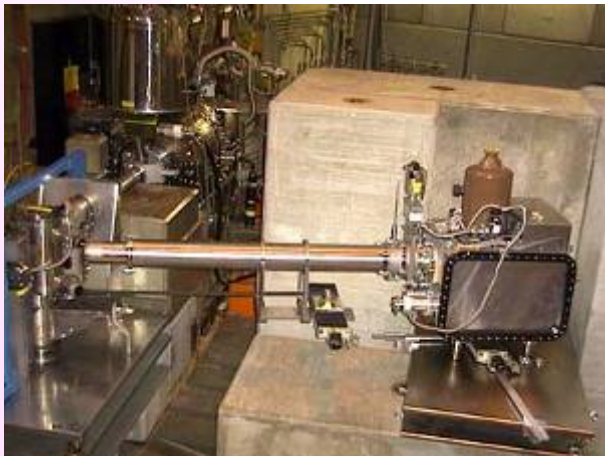
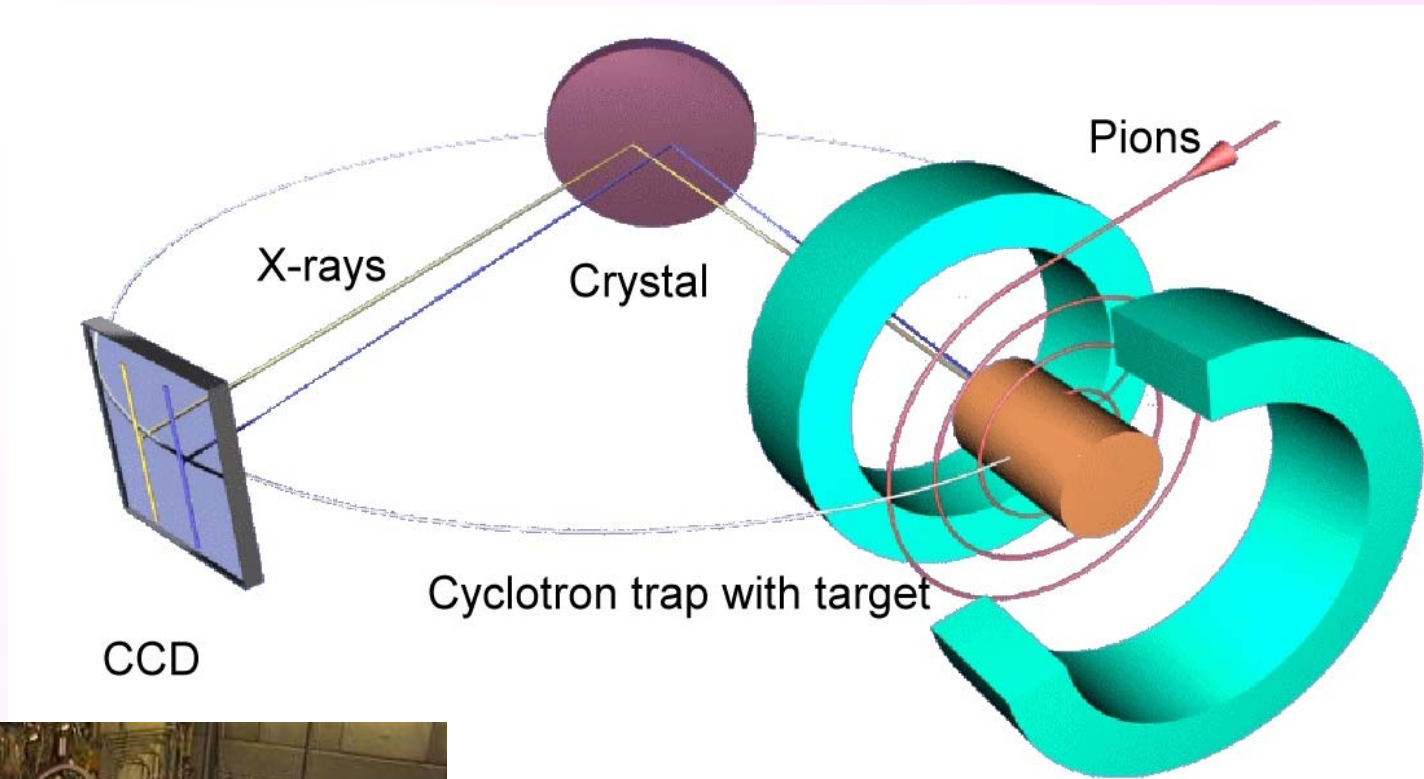
# Exotischer Wasserstoff – Starke Wechselwirkung

Negative Pionen gestoppt in  $H_2 \rightarrow$  atomarer Einfang  $\rightarrow$   
 $\rightarrow$  elektromagnetische Kaskade  $\rightarrow$  Röntgenstrahlungsübergänge

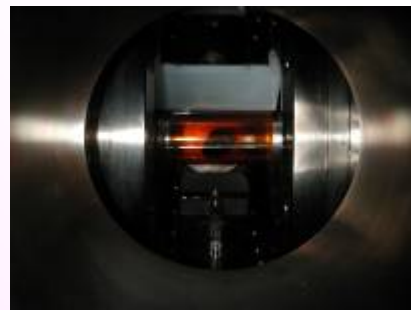


Durch die starke Wechselwirkung Pion-Kern wird das Grundzustandsniveau ( $1s$ ) verschoben ( $\epsilon_{1s}$ ) und verbreitert ( $\Gamma_{1s}$ )

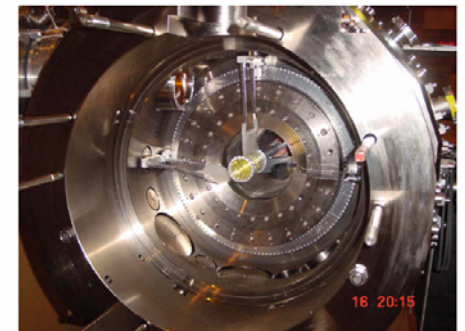
# Pionischer Wasserstoff – Experimentelle Methode



EXA05



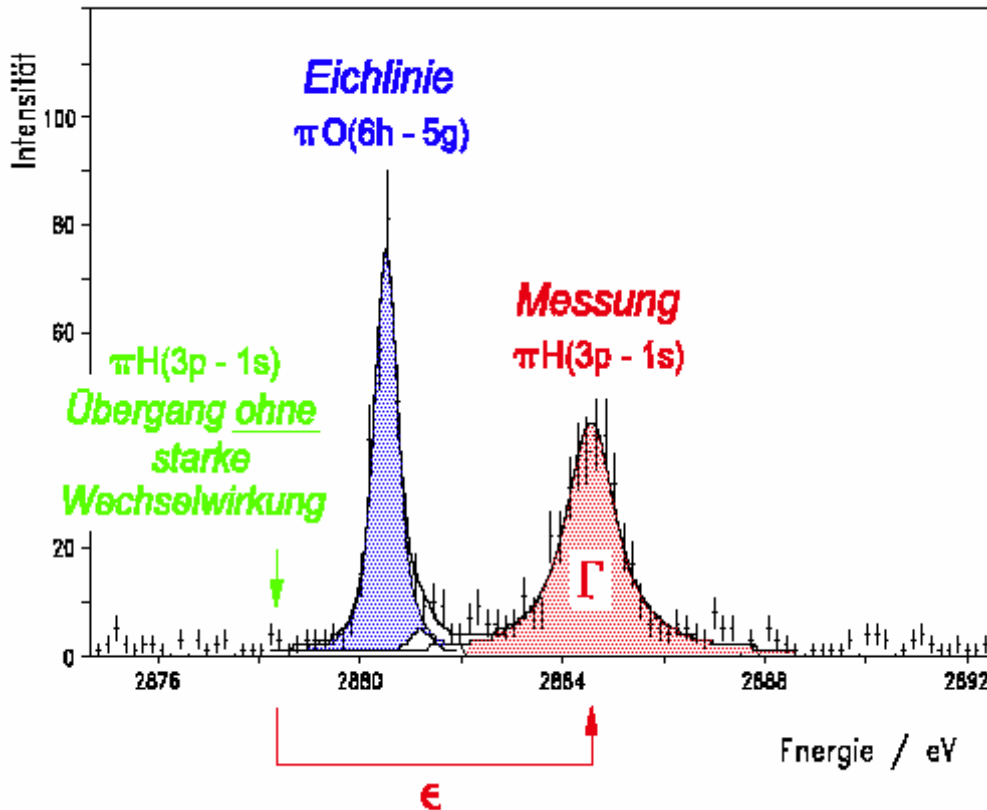
Paul Kienle



# Hadronische Verschiebung und Breite in Pionischem Wasserstoff

$$\mathcal{E}_{1s} = E_{np-1s}^{meas.} - E_{np-1s}^{e.m.}$$

anziehende Wechselwirkung



Ziel: Höchstpräzision  
Verschiebung: 0.2%  
Breite: 1%

Systematische Studien  
erforderlich:

- Molekulare Effekte
- Doppler Verbreiterung  
Coulomb-Abregung
- Stabilität & Kalibration


# Pion-Nukleon Wechselwirkung

## Chirales Niederenergie-Theorem (Tomozawa-Weinberg)

$$T^{(+)} = \frac{1}{2} \left( T_{\pi^- p} + T_{\pi^- n} \right) \equiv 4\pi\varepsilon_1 b_0 = 0 \quad \text{isoskalar}$$

$$T^{(-)} = \frac{1}{2} \left( T_{\pi^- p} - T_{\pi^- n} \right) \equiv -4\pi\varepsilon_1 b_1 = \frac{\omega}{2f_\pi^2} \quad \text{isovektor}$$

Verbesserung der  
Genauigkeit ist  
unterwegs (PSI)



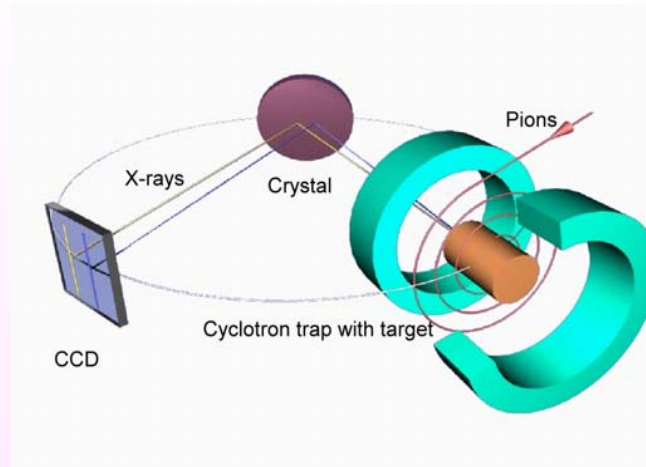
## Experimentelle Ergebnisse (pionischer Wasserstoff)

$$b_0 = (-1,6 \pm 1,3) \times 10^{-3} m_\pi^{-1}$$

$$b_1 = (-86,8 \pm 1,4) \times 10^{-3} m_\pi^{-1}$$

# $\pi$ p – Status und weiteres Vorgehen

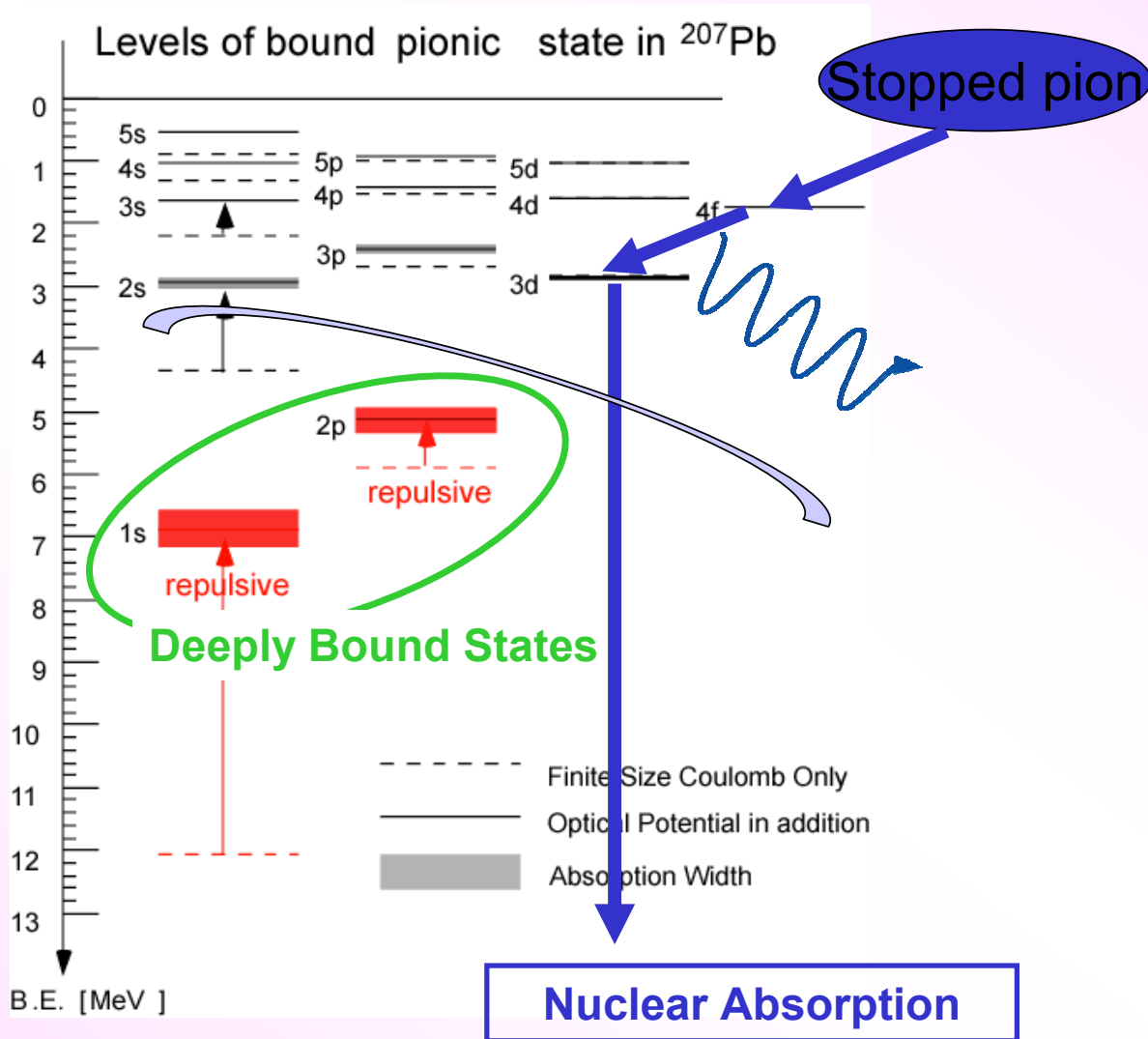
- Genauigkeit in der Verschiebung: Ziel erreicht.
- Genauigkeit der hadronischen Breite  $\sim 1\%$   
in Arbeit



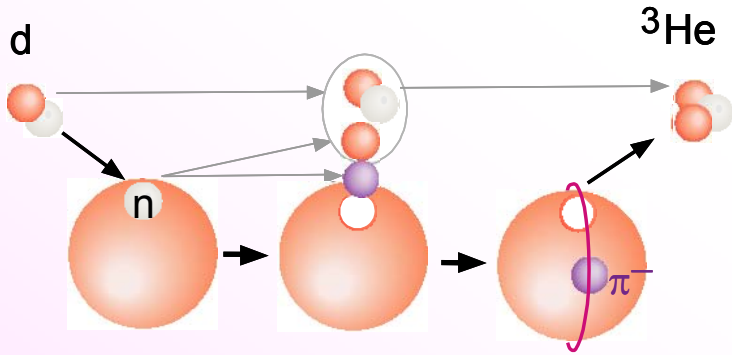
# Pion im Kern

- Untersuchung der Niederenergie Pion-Kern Wechselwirkung durch Spektroskopie pionischer Atome
- Vergleich der Wechselwirkung mit der von pionischem Wasserstoff
- Suche nach Modifizierung von  $f_\pi^2$  der Pion-Zerfallskonstante, ein Maß für die spontane Brechung der chiralen Symmetrie und für die Reduzierung des chiralen Kondensats

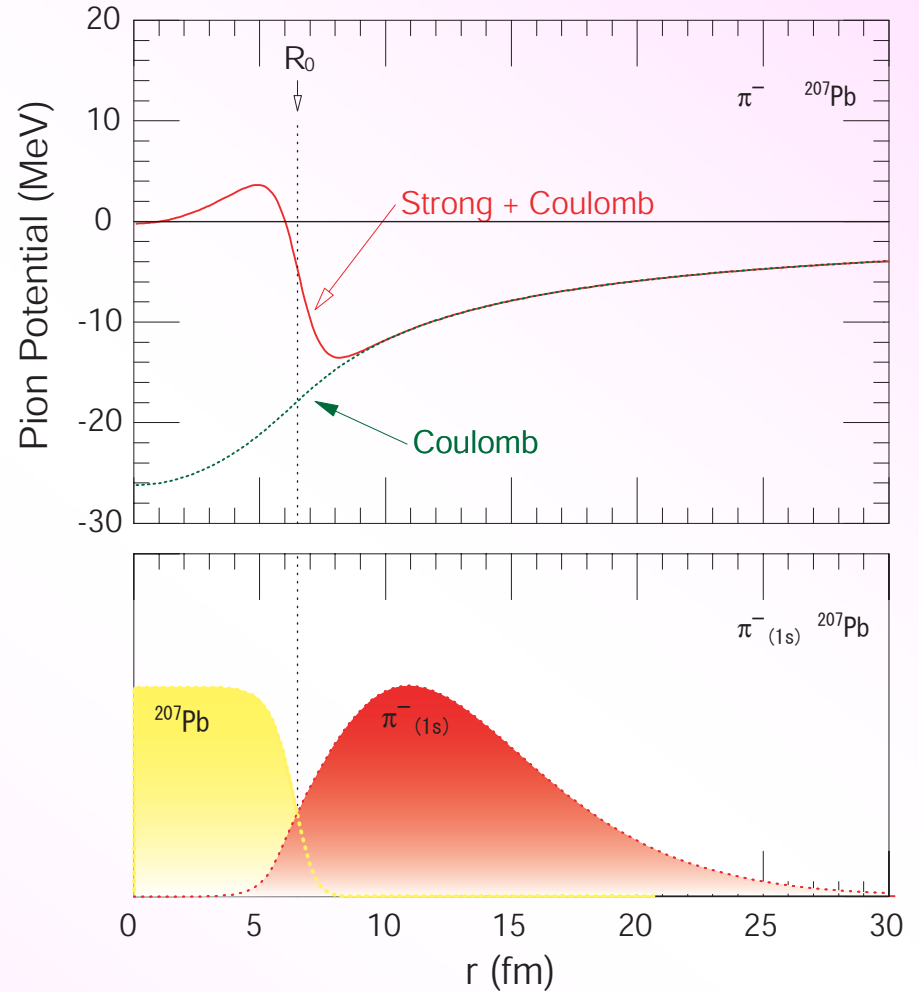
# Tiefgebundene pionische (Kern-) Zustände



# Pionische Transfer-Reaktion

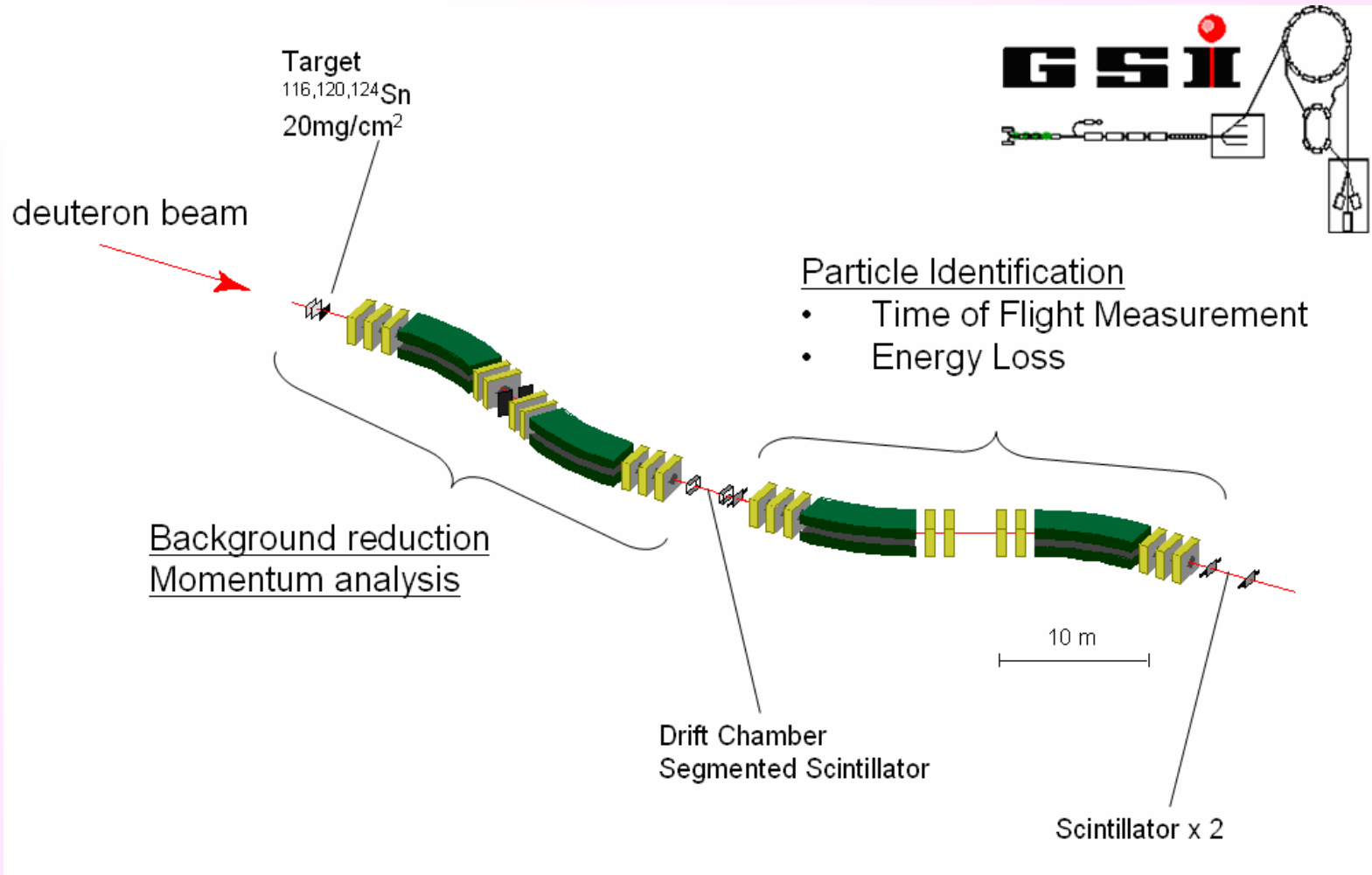


# Pionischer Halo-Zustand



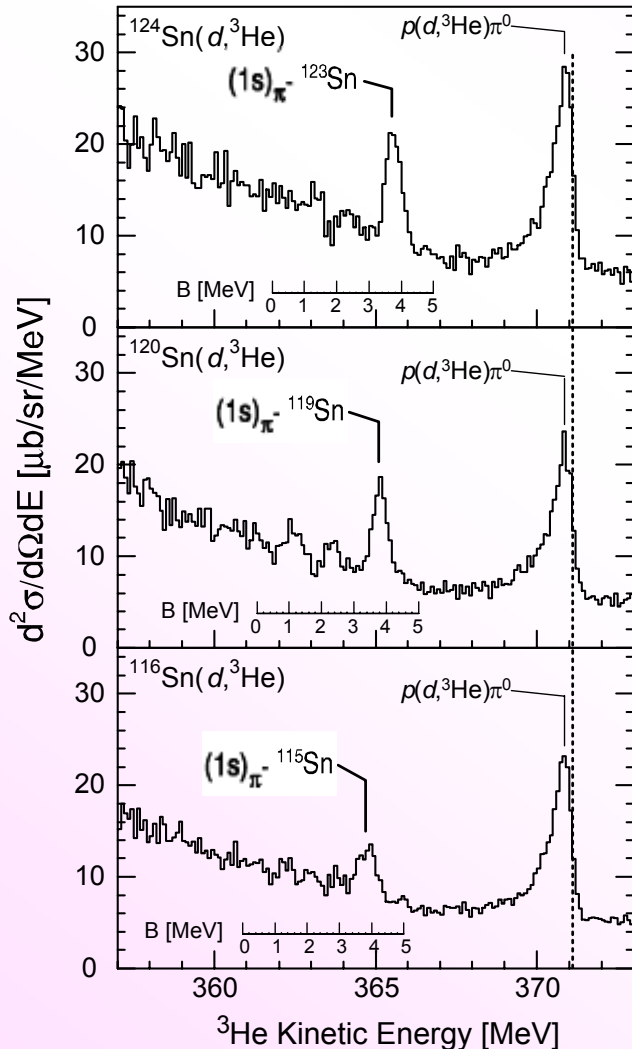


# Experimentelle Technik



# Pionische 1s-Zustände von Sn-Isotopen

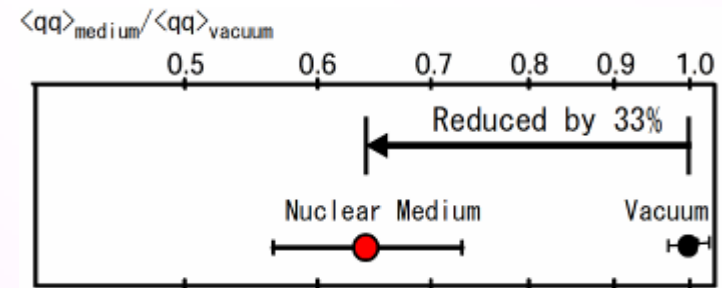
# Reduktion des Pion-Kondensats im Kernmedium



$$R = \frac{b_1^{\text{free}}}{b_1} = \frac{f_\pi^*(\rho_\varepsilon)^2}{f_\pi^2} = 0.78 \pm 0.05$$

$$\frac{f_\pi^*(\rho_0)^2}{f_\pi^2} = 0.64$$

$$\frac{\langle \bar{q}q \rangle_{\rho_0}}{\langle \bar{q}q \rangle_0} \approx \left( \frac{m_\pi^*}{m_\pi} \right)^2 \cdot \frac{f_\pi^*(\rho_0)^2}{f_\pi^2} = 0.67 \quad \rho_\varepsilon \approx 0.6\rho_0$$

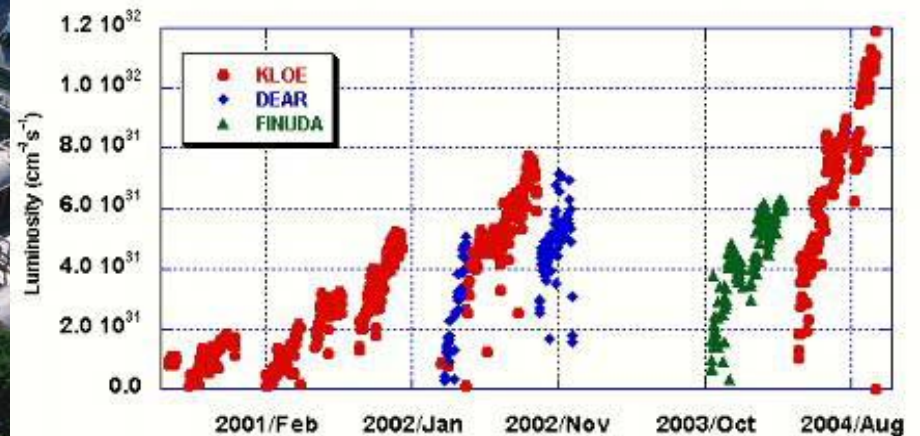
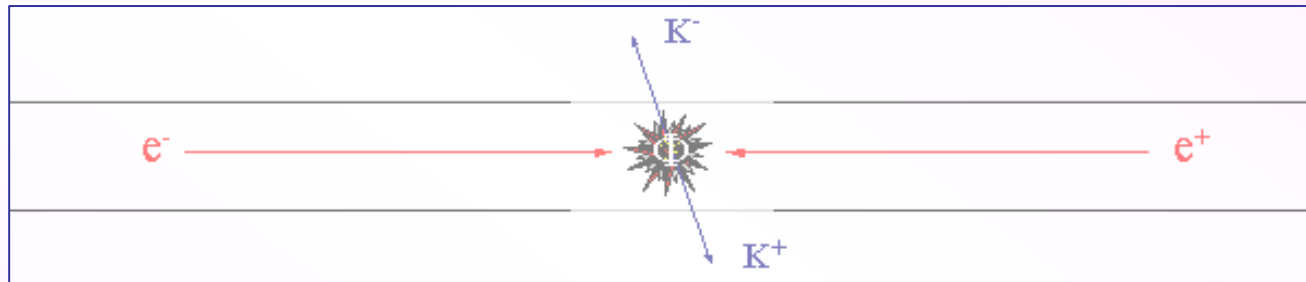


# Kaonischer Wasserstoff

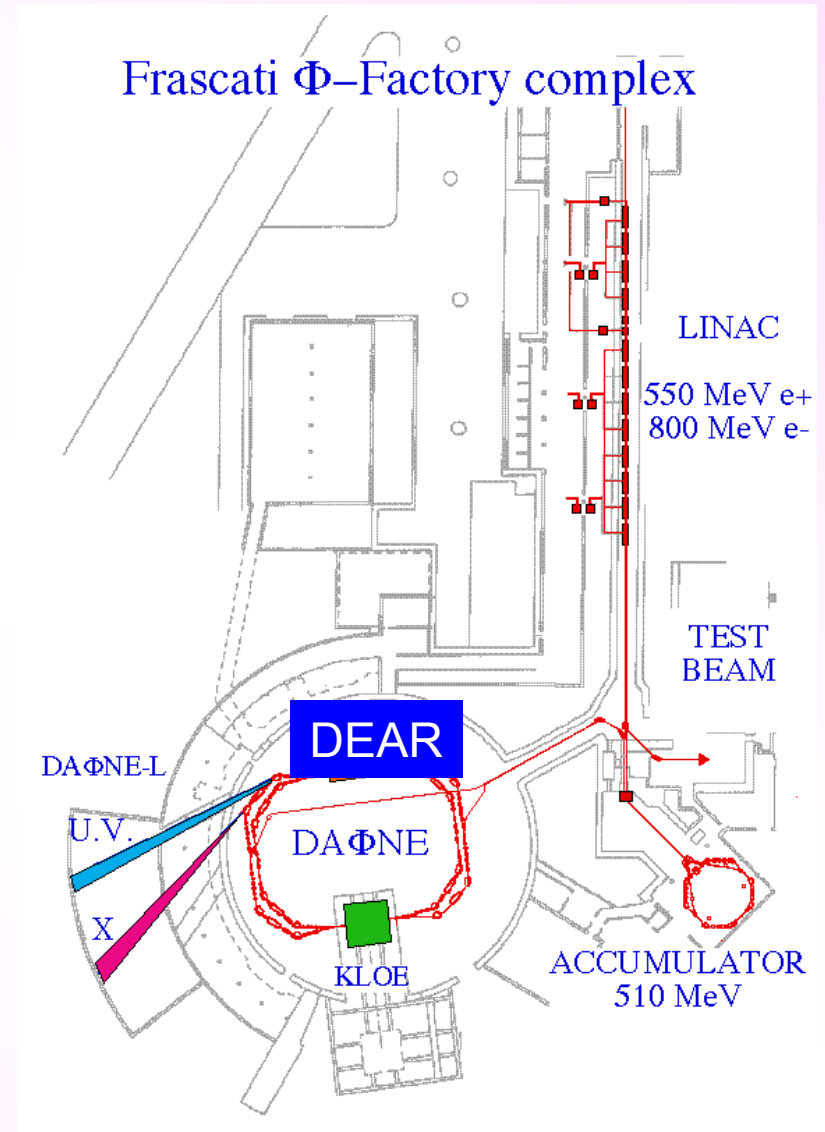
- Kaonischer Wasserstoff dient zur Untersuchung der Wechselwirkung Antikaon - Nukleon
- Elementares gebundenes System mit einem „seltsamen“ Quark
- Untersuchung der Rolle von „Seltsamkeit“ in der starken Wechselwirkung

# Erzeugung von K Mesonen

Erzeugung von  $K^-$  Mesonen (DAΦNE /LNF)



# Kaonischer Wasserstoff

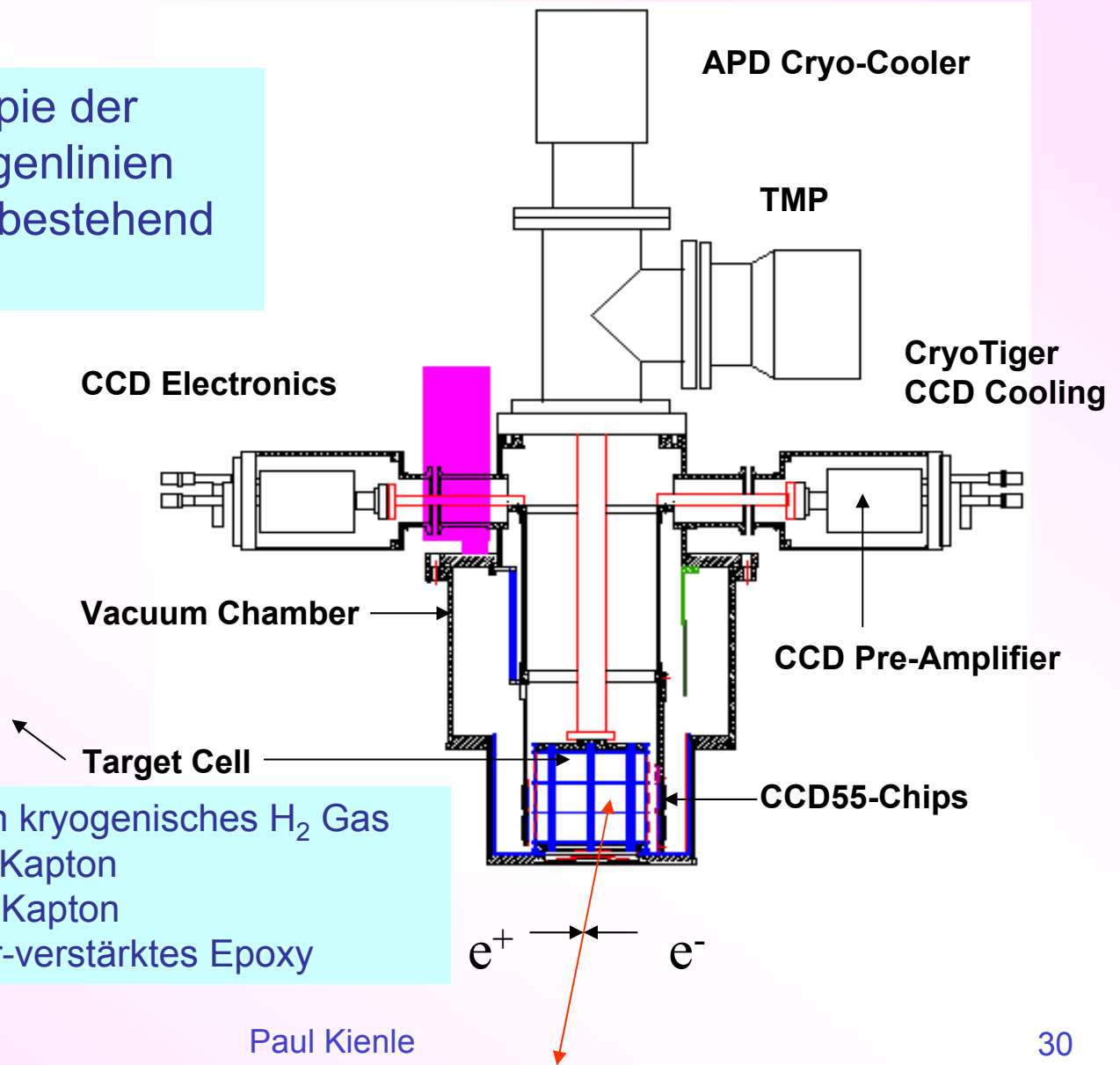


# Experimenteller Aufbau von DEAR

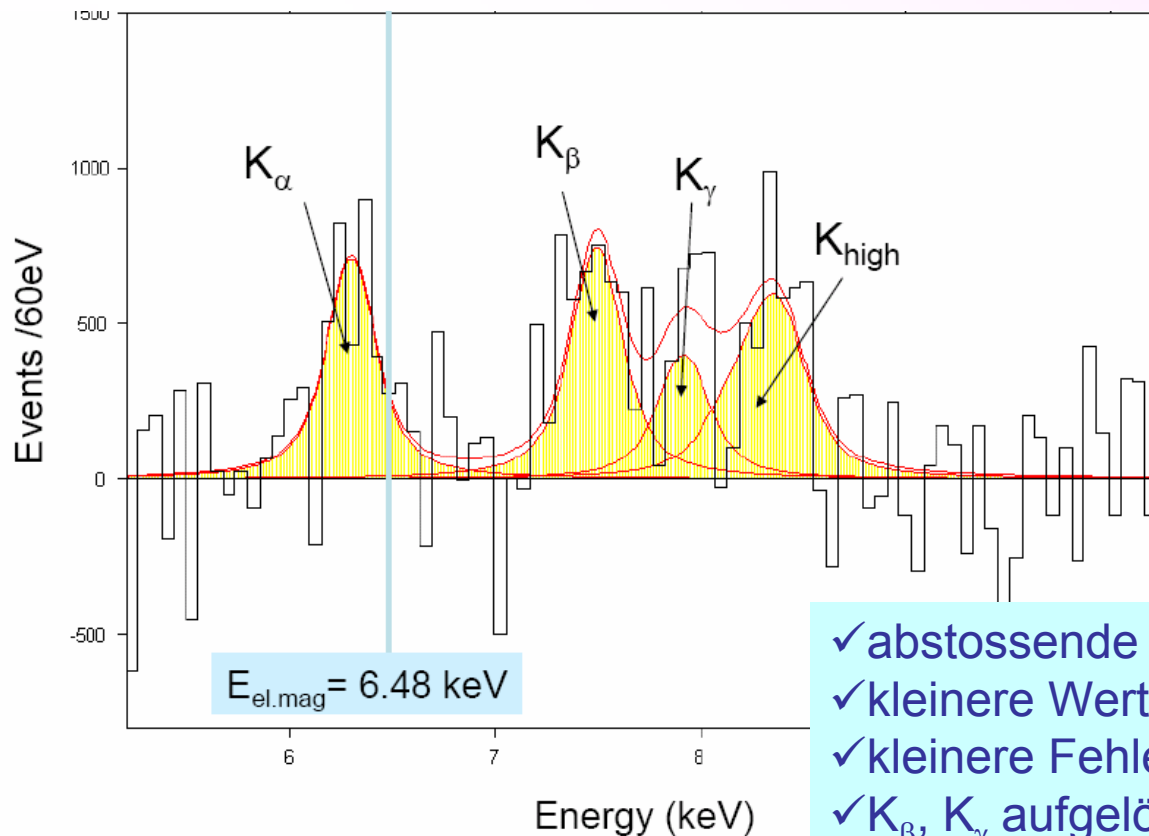
Röntgenspektroskopie der kaonischen K-Röntgenlinien mit einem Detektor bestehend aus 16 CCD-Chips



Volumen: 1150 ccm kryogenisches H<sub>2</sub> Gas  
Seitenwand: 75 µm Kapton  
Eintrittsfenster: 125 µm Kapton  
Gitterstruktur: Glasfiber-verstärktes Epoxy



# Röntgen-Spektrum von kaonischem Wasserstoff



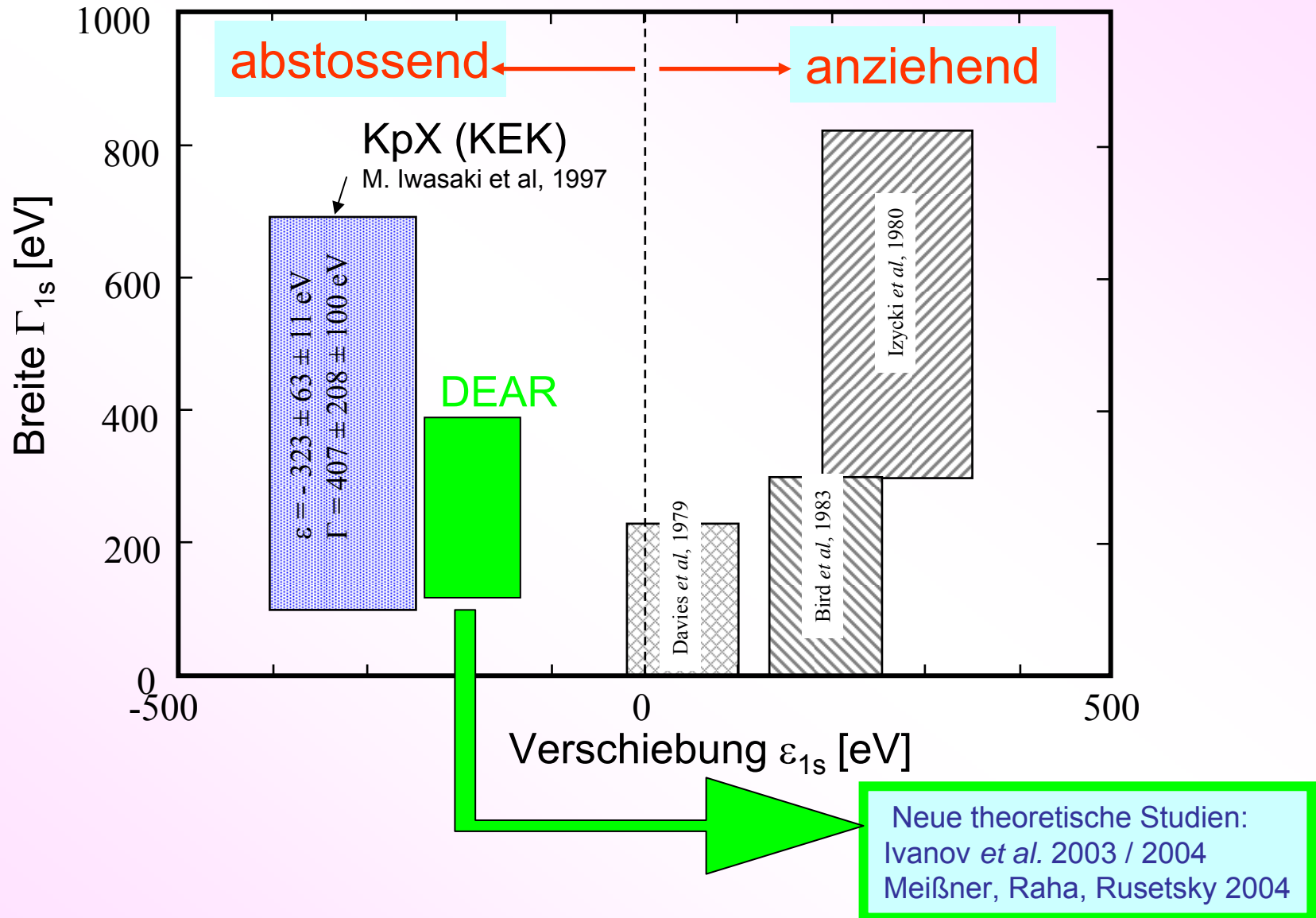
- ✓ abtossende Wechselwirkung
- ✓ kleinere Werte für Verschiebung und Breite
- ✓ kleinere Fehlerbalken
- ✓  $K_\beta$ ,  $K_\gamma$  aufgelöst

Resultate für Verschiebung und Breite:

$$\text{Verschiebung: } \varepsilon_{1s} = -193 \pm 46 \text{ eV}$$

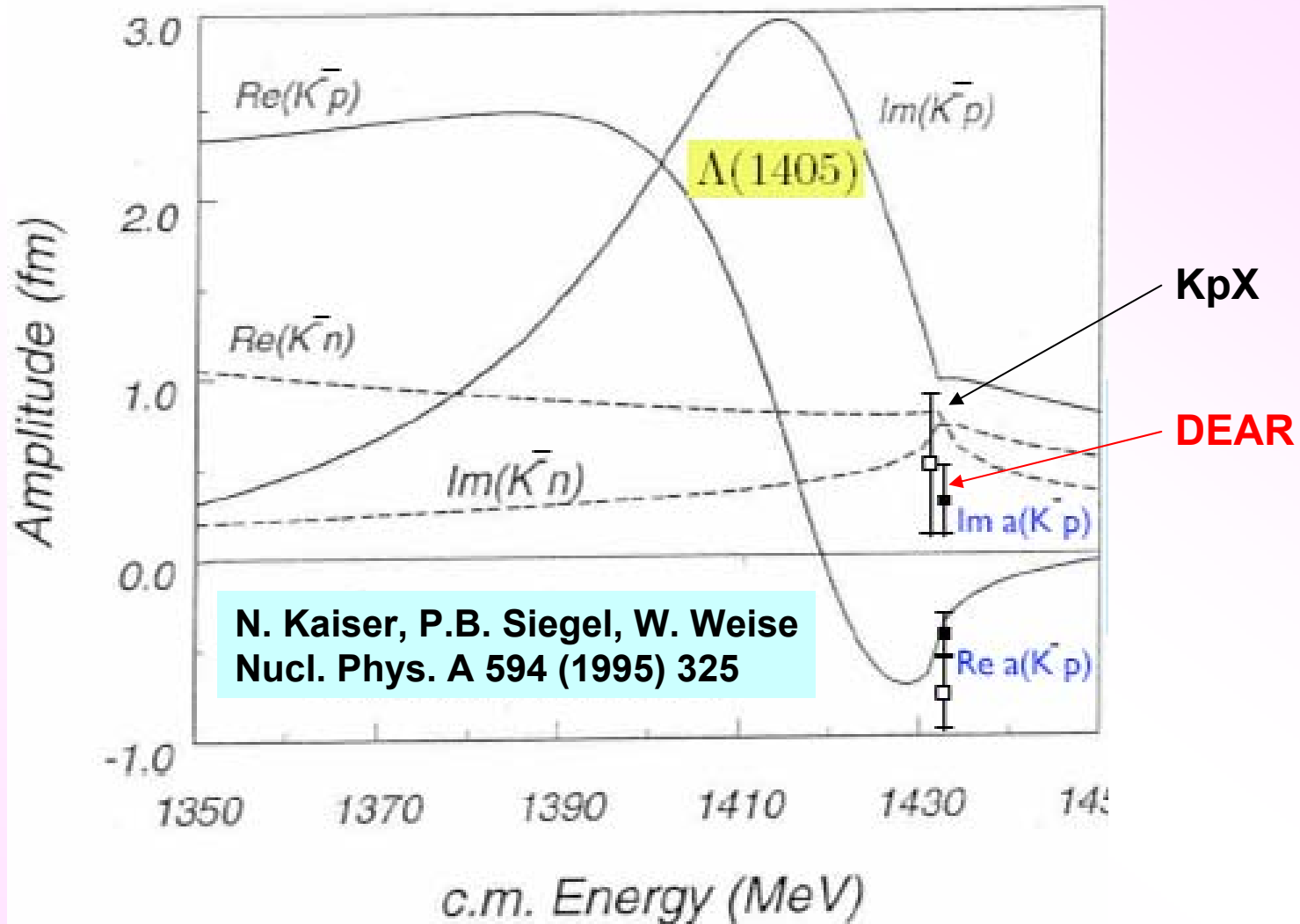
$$\text{Breite: } \Gamma_{1s} = 249 \pm 132 \text{ eV}$$

# DEAR Resultate



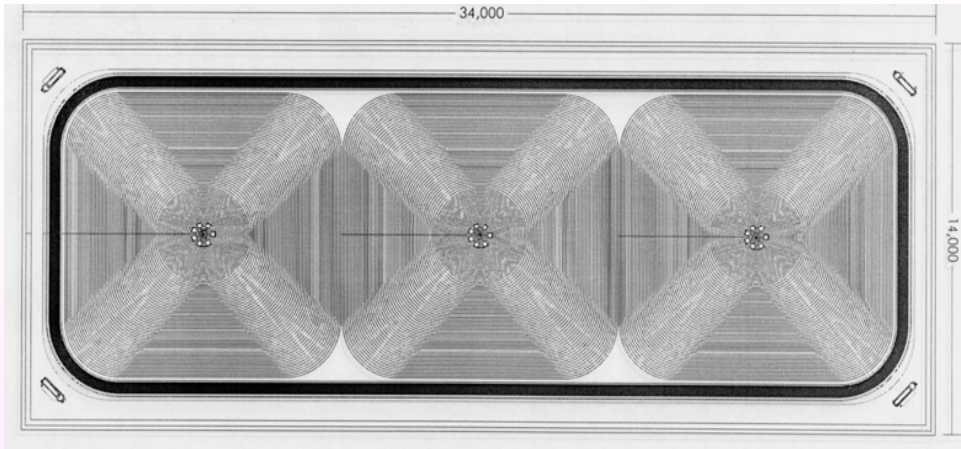


# Antikaon-Nukleon Wechselwirkung



# Weiteres Vorgehen

- Nächste Präzisionsexperimente erfordern neue Detektor-Technik (Silicon-Drift Detektoren)

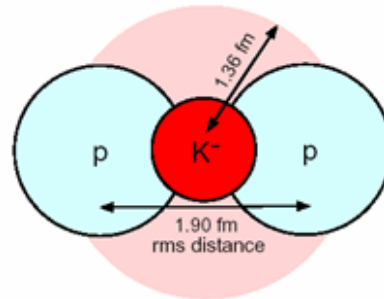


6. EU-Rahmenprogramm  
13-HadronPhysics

- Messung von kaonischem Wasserstoff und Deuterium  
→ Kaon-Nukleon Streulängen
- Weitere zukünftige Experimente: Kaonisches Helium, Kaon-Masse

# Antikaon im Kern

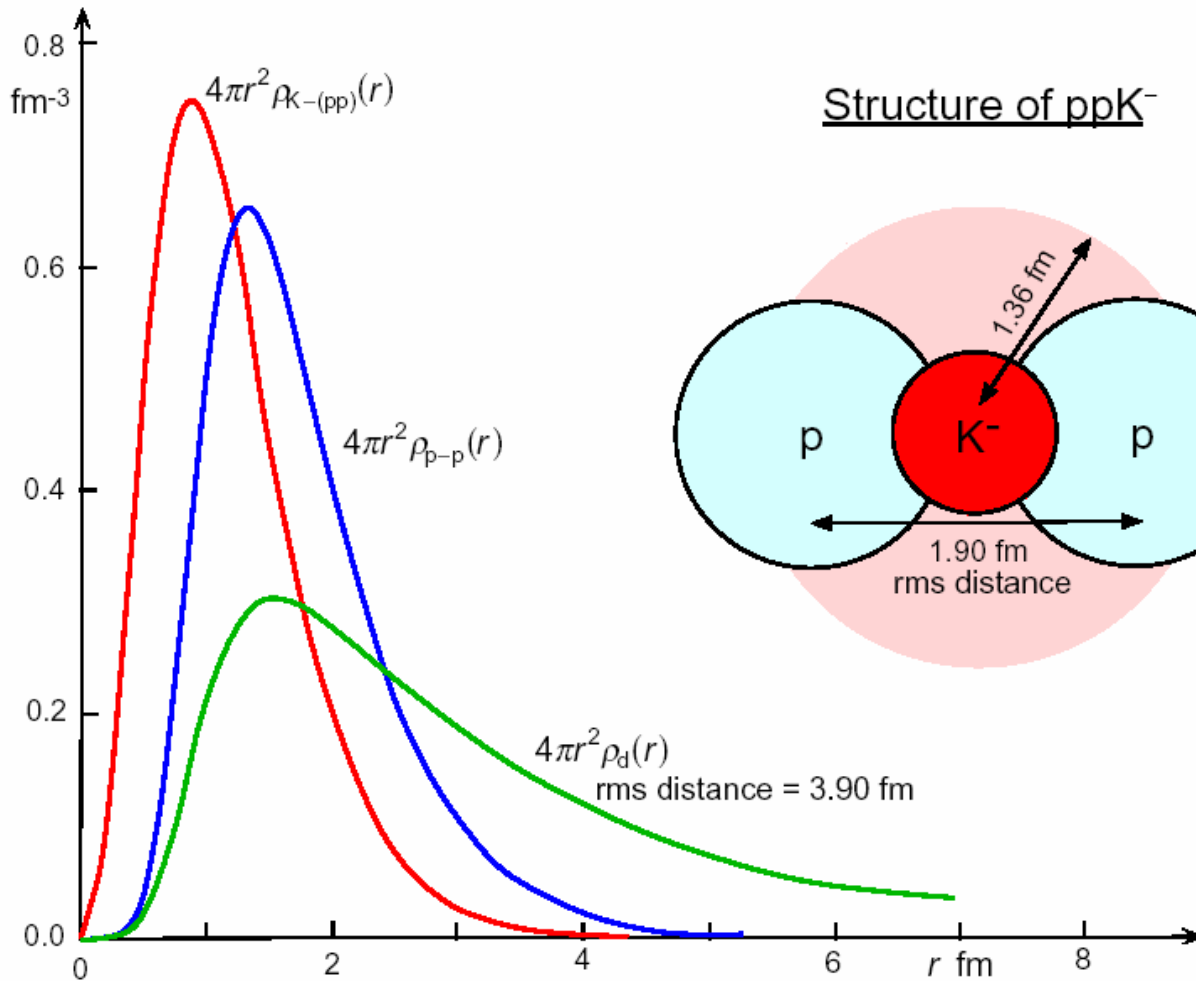
- Suche nach protonenreichen Kernen, die mit der starken  $K^-p$  Wechselwirkung gebunden sind



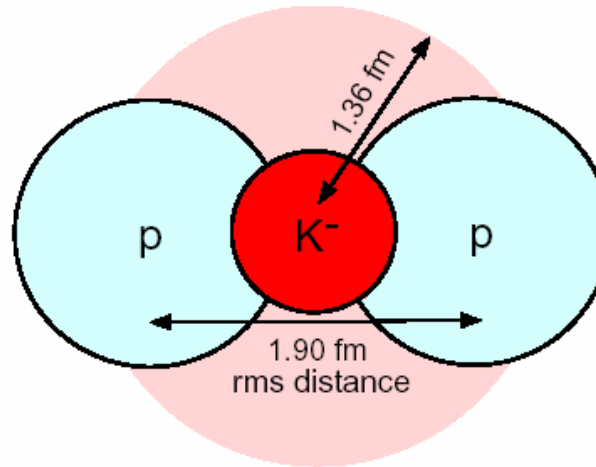
- Antikaonen bestehen aus  $\bar{u}/\bar{d}$ -Quarks und einem s-Quark und werden daher auf Grund des Pauli Prinzips von Nukleonen nicht abgestoßen (kein „Hard Core“)
- Hohe Bindungsenergien und Dichten in Kernen mit Antikaonen erwartet

# ppK<sup>-</sup> gebundenes System

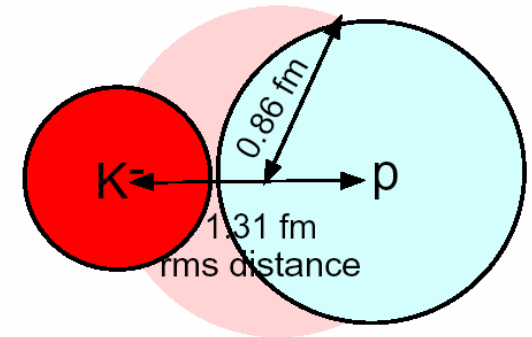
- kaonisches "Wasserstoffmolekül"



Structure of ppK<sup>-</sup>



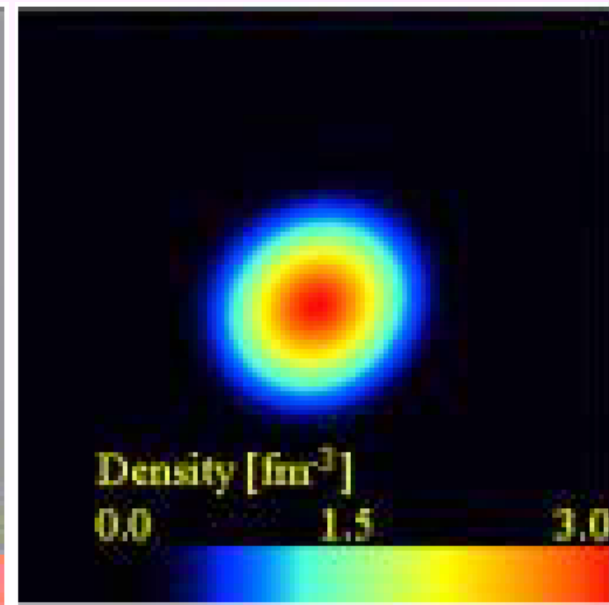
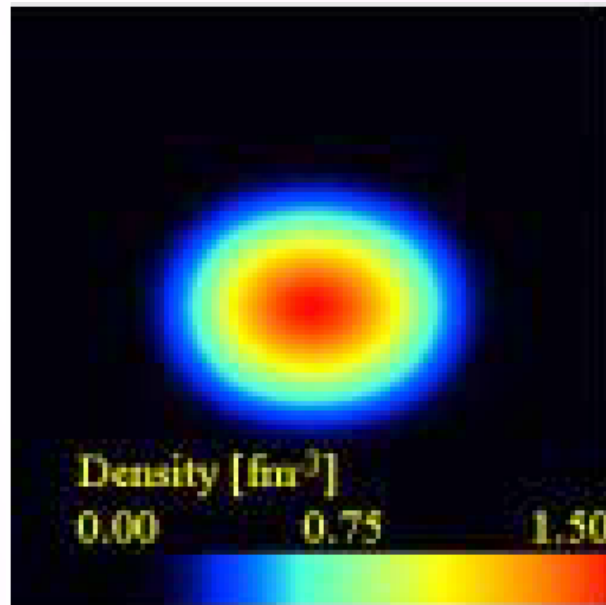
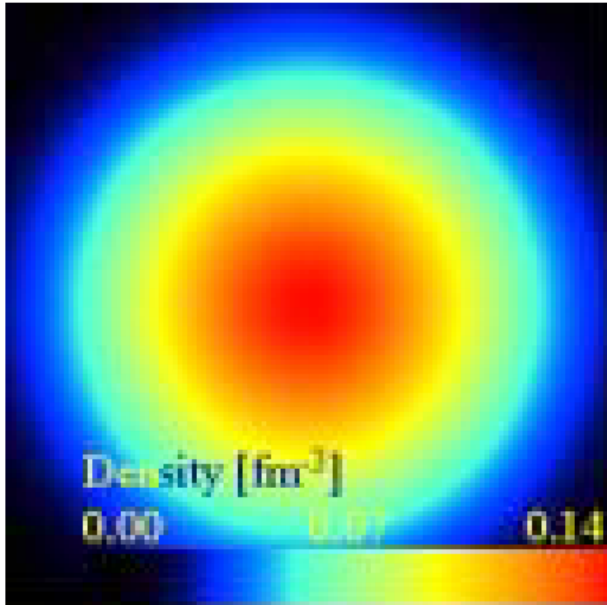
Structure of  $\Lambda(1405)$



Dote et al. 2002

Single-K<sup>-</sup>

Double-K<sup>-</sup>



${}^3\text{He}$

$\rho(0)=0.14$

$B = 20 \text{ MeV}$

$\text{K}^-$ ppn

$\rho(0)\sim 1.5$

$B \sim 118 \text{ MeV}$

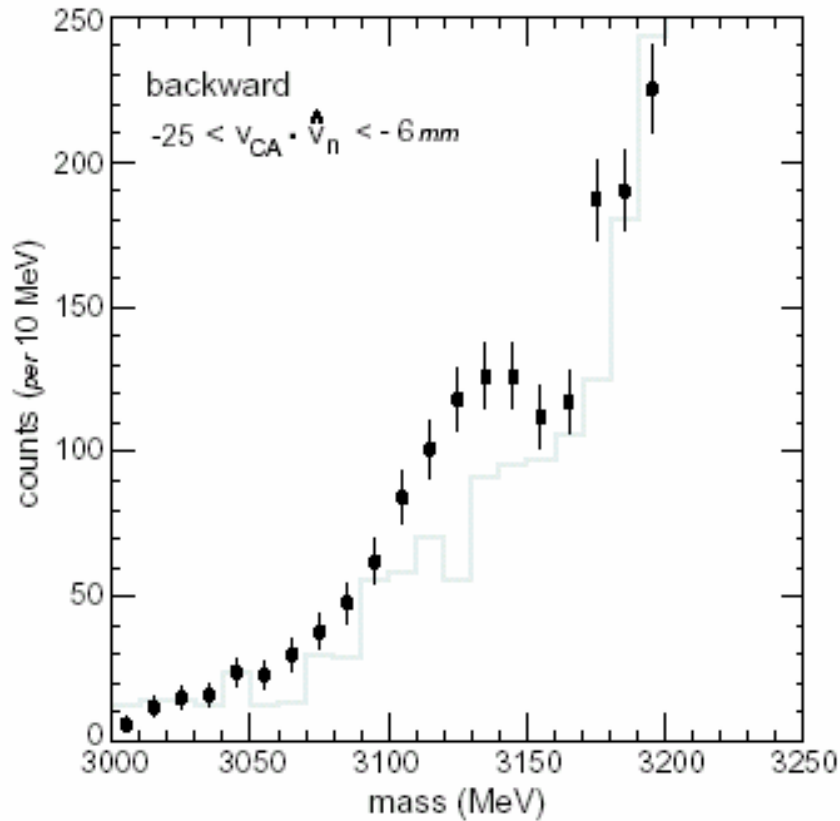
$\text{K}^-$  $\text{K}^-$ ppn

$\rho(0)\sim 3.0$

$B \sim 221 \text{ MeV}$

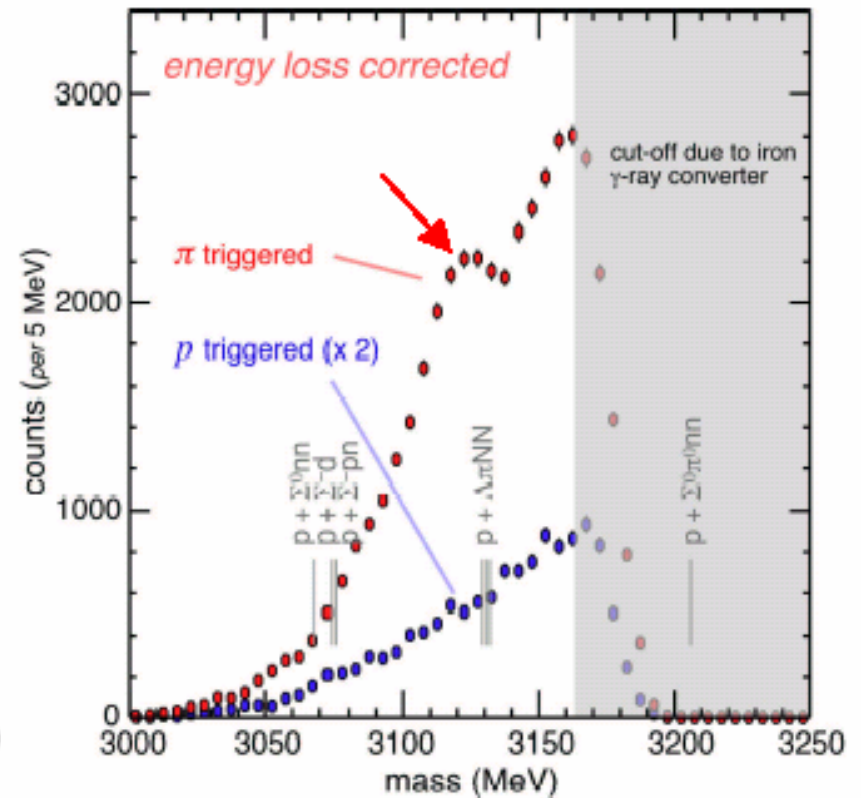
# (K<sup>-</sup>, N) Reaktionen @ KEK

<sup>4</sup>He (K<sup>-</sup>,n) ppnK<sup>-</sup>



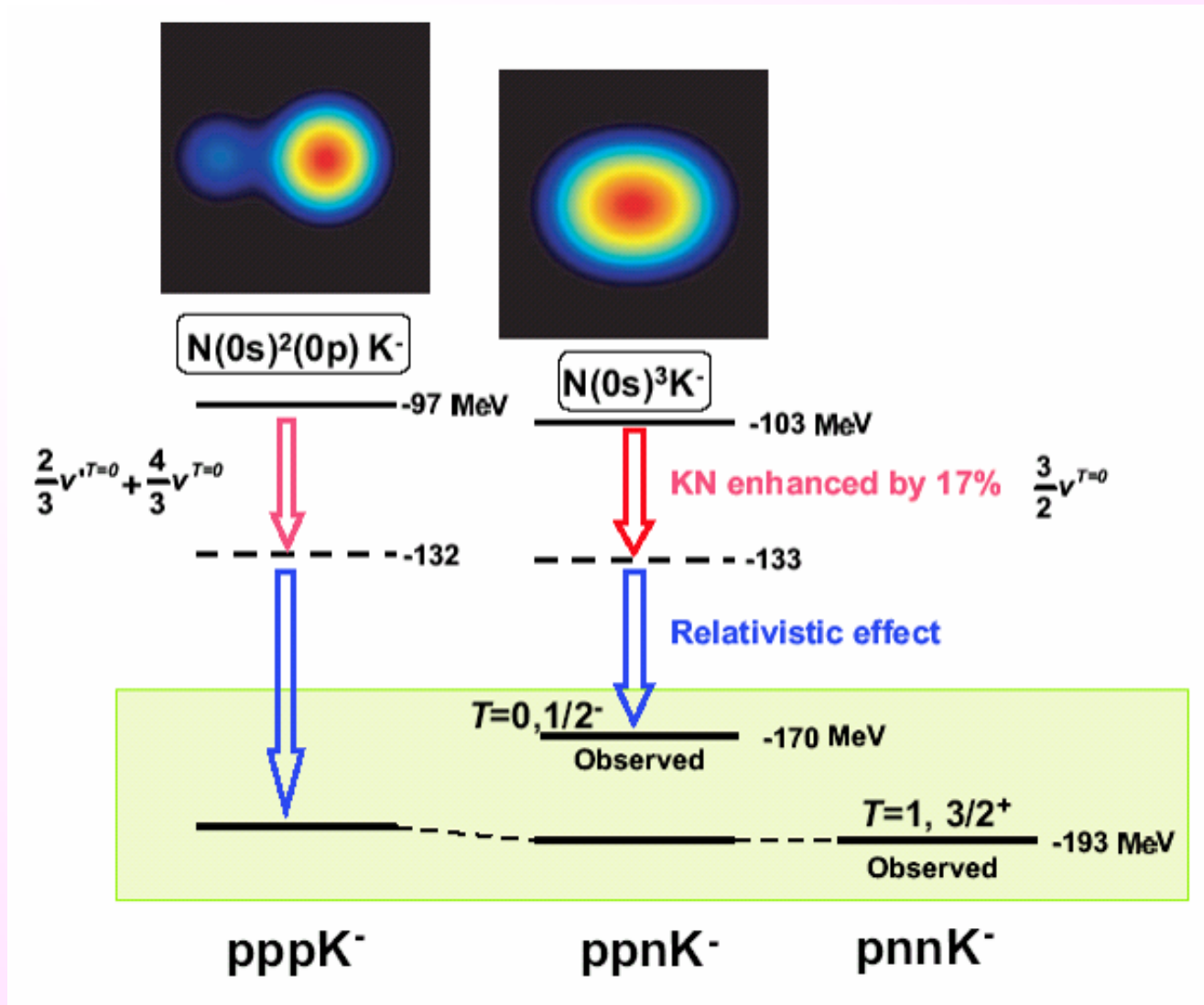
$B_K = 173 \text{ MeV}, \Gamma < 20 \text{ MeV}$

<sup>4</sup>He (K<sup>-</sup>,p) pnnK<sup>-</sup>



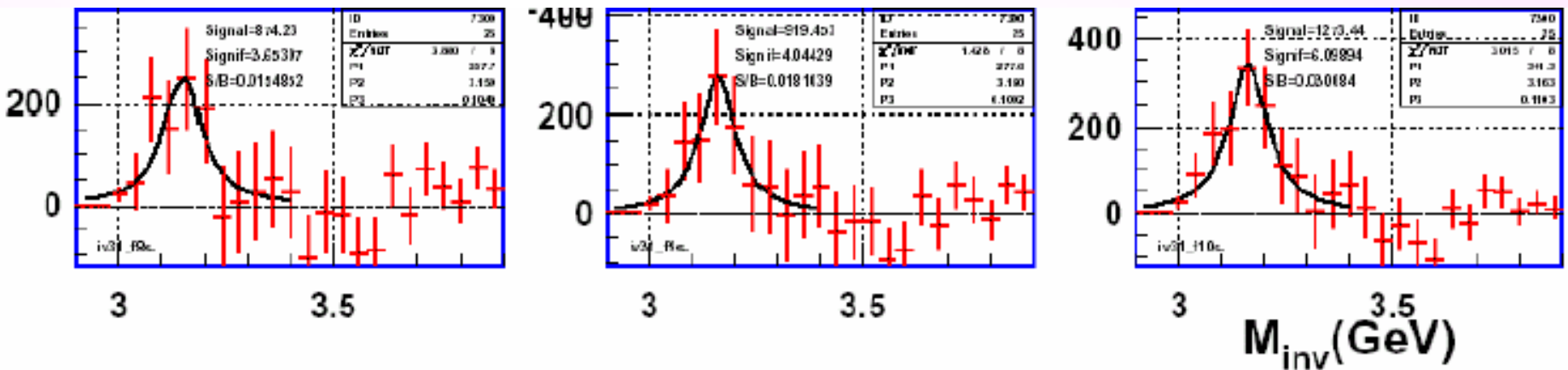
$B_K = 194 \text{ MeV}, \Gamma < 20 \text{ MeV}$

# Kaonische gebundene Systeme mit 3 Nukleonen



# d- $\Lambda$ - Korrelationen in 1.9A GeV Ni-Ni-Kollisionen

N. Herrmann (sehr vorläufig)

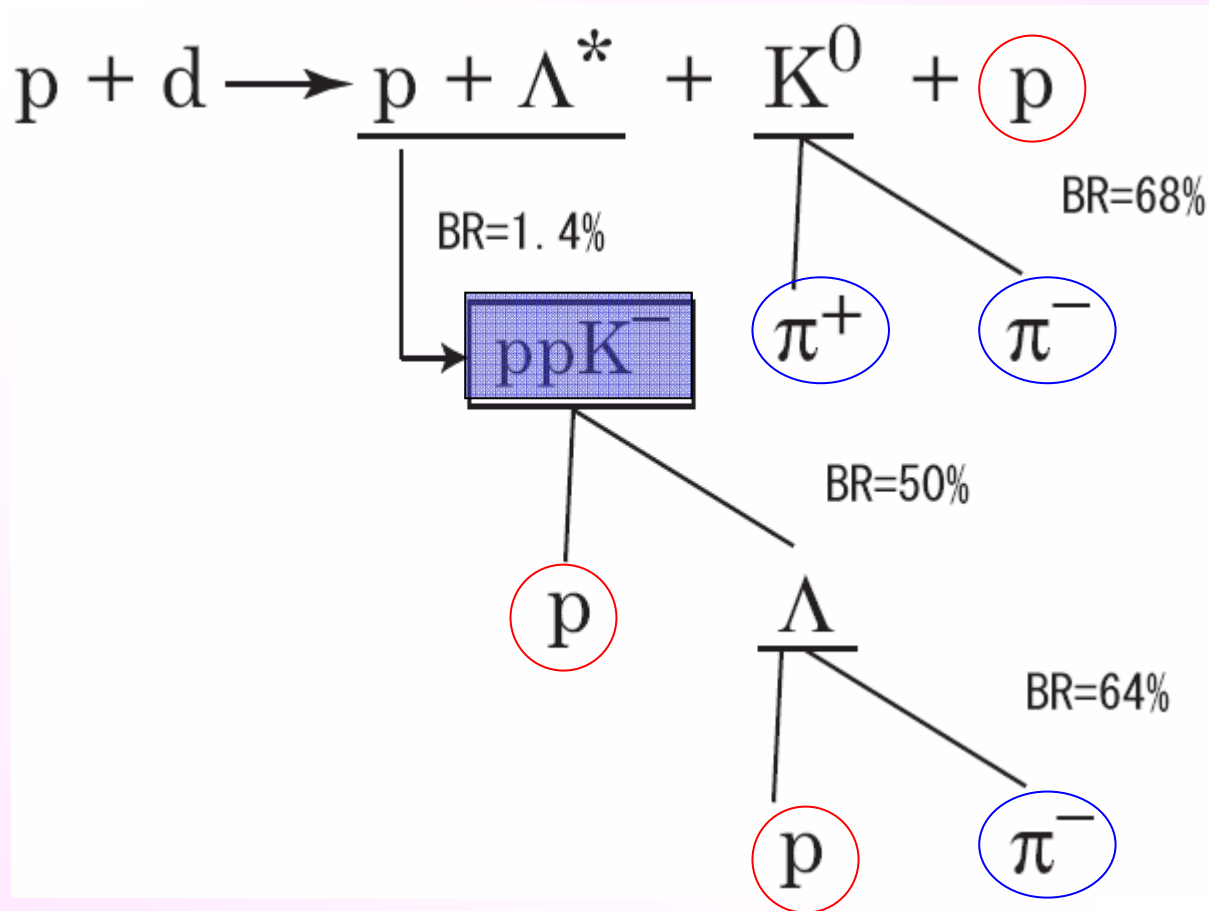


Ergebnis:  $M = 3.14 \text{ GeV}/c^2$   $\Gamma = 0.11 \text{ GeV}$

Untersuchung von Al-Al Kollisionen bei 2A GeV mit besserem Signal/Untergrund Verhältnis zur Bestätigung des Ni Ergebnisses (in Vorbereitung bei GSI)

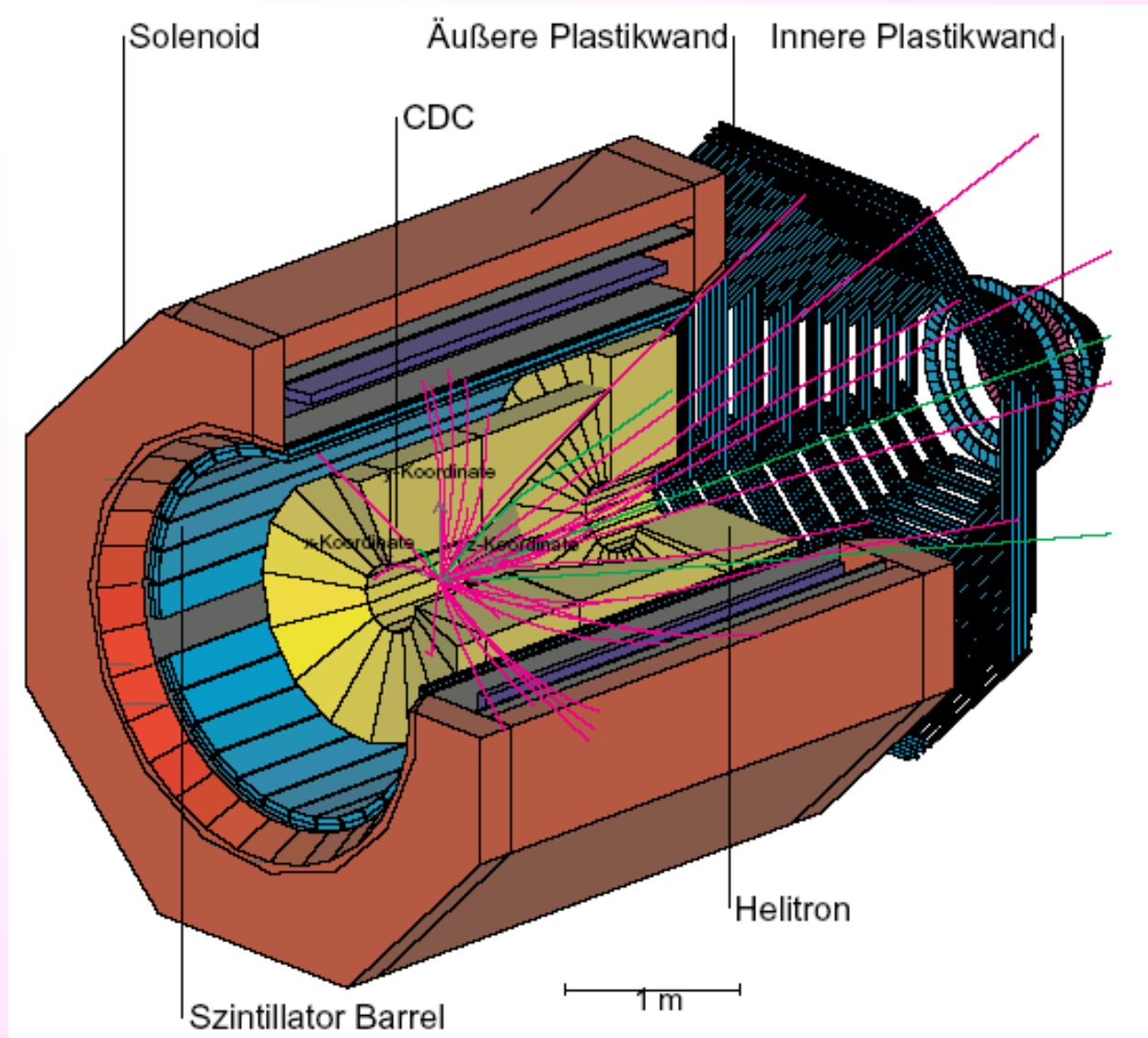


# Erzeugung von $ppK^-$ in $(p,d)$ Reaktionen (3.5-4.5 GeV)



Exklusive Messung der Impulse von  $3p$ ,  $2\pi^-$ ,  $\pi^+$   
im FOPI-Detektor der GSI

# Nachweis in FOPI @ GSI

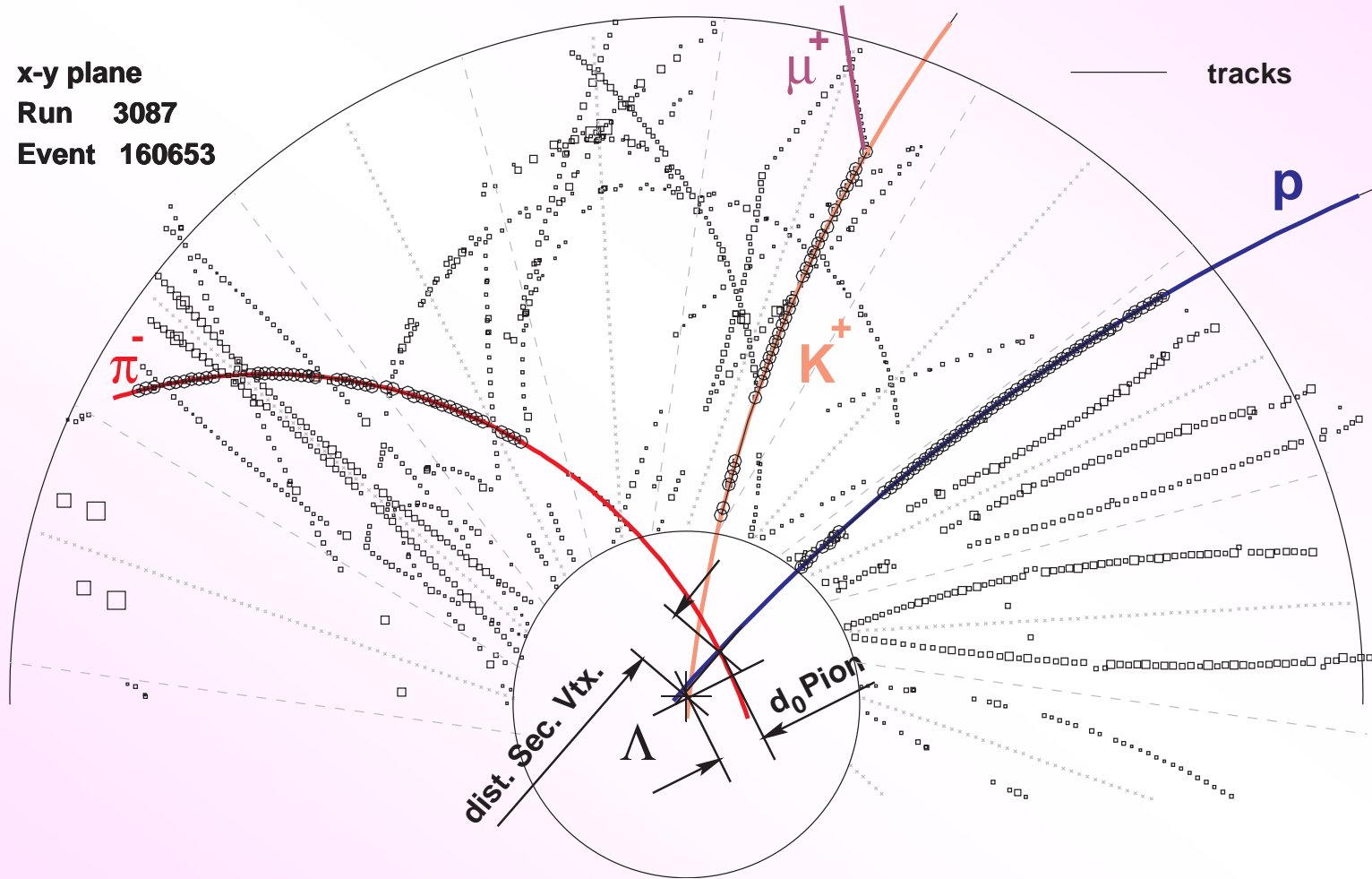


# Nachweis von $K^+$ und $\Lambda$ in 1.9A GeV Ni+Ni Stöße

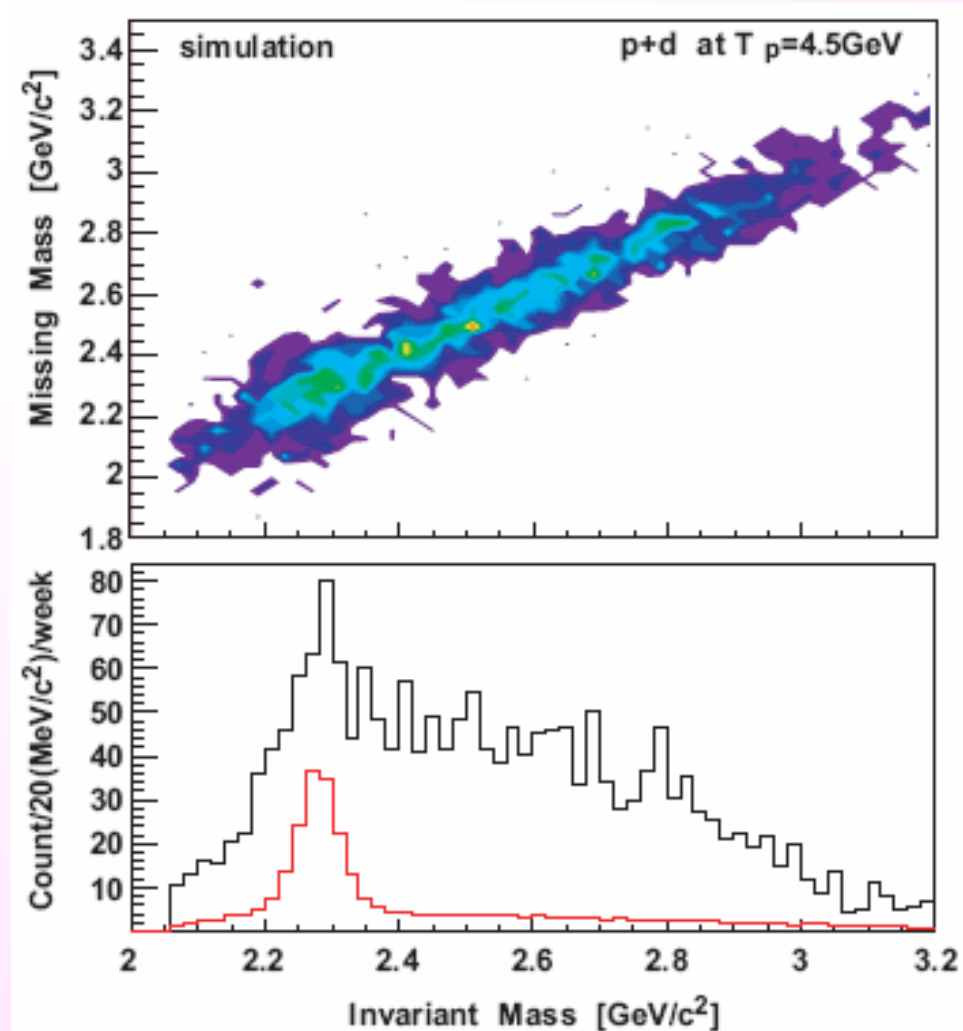
x-y plane

Run 3087

Event 160653



# Simulation des exklusiven Nachweises von $ppK^-$ mit FOPI



# Ausblick

- Exotische Atome
  - Präzisions-Werkzeuge der Hadronen Physik durch neue Methoden und Techniken
- Neue Beschleunigeranlagen (FAIR/GSI, J-PARC)
  - neue Impulse für Studien mit exotischen Atomen
- Studien zu tief-gebundenen Zuständen
  - Zugang zu neuem Gebiet der Hadronenphysik
- Erzeugung superdichter Kerne
  - mit 2 Antikaonen (Farbsupraleitende Quark-Gluon Materie ???)

# Epilog

Wenn es Rosen sind, werden sie blühen

