

DIE CABIBBO-ANOMALIE



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

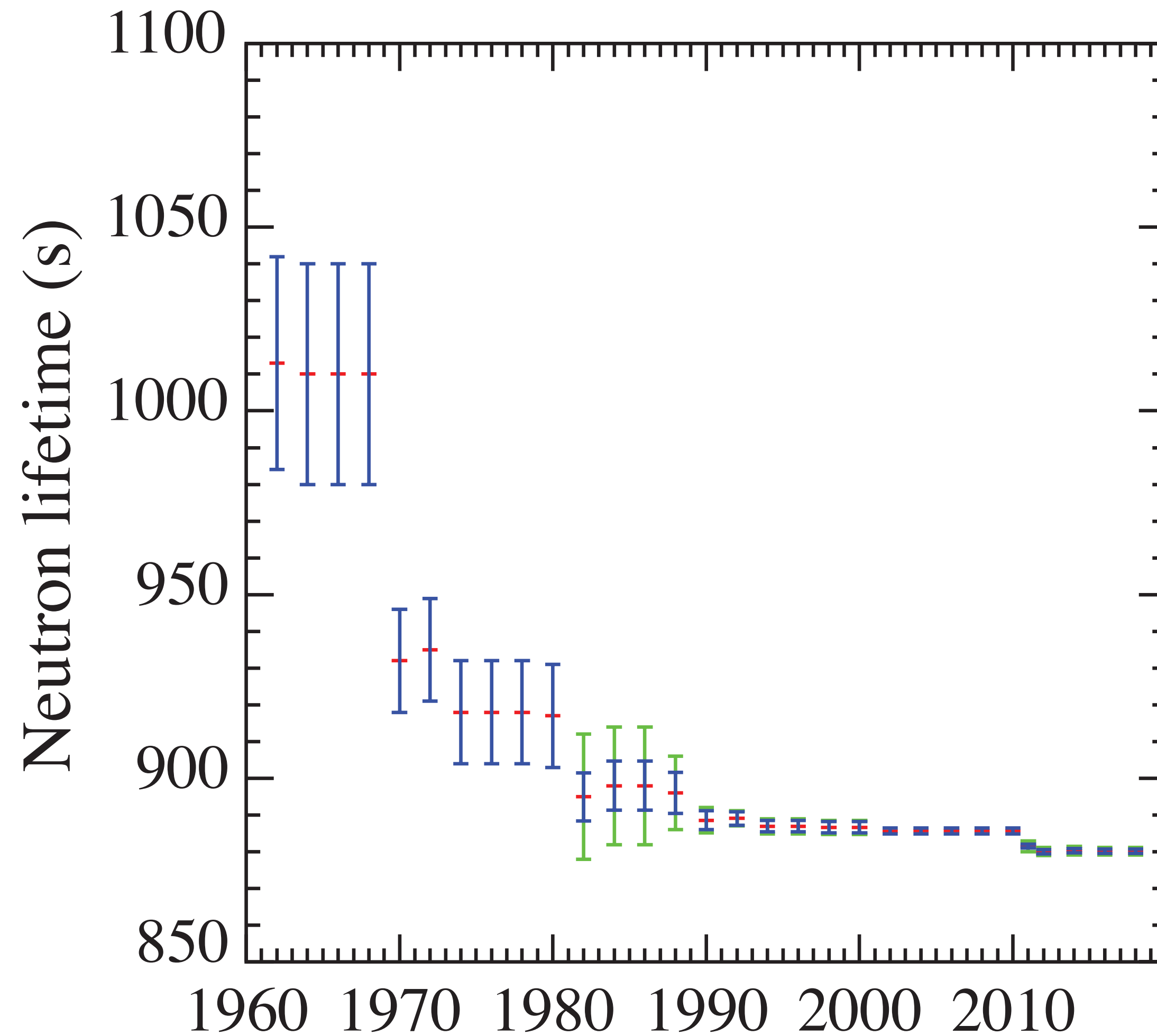
Misha Gorshteyn, Rainer Wanke
Institut für Physik

Bachelor-Vortragsreihe

14. Mai 2024

Neutronen

Neutron-Lebensdauer



(Particle Data Group, PTEP 2020 (2020) 083C01)

Neutron-Zerfall

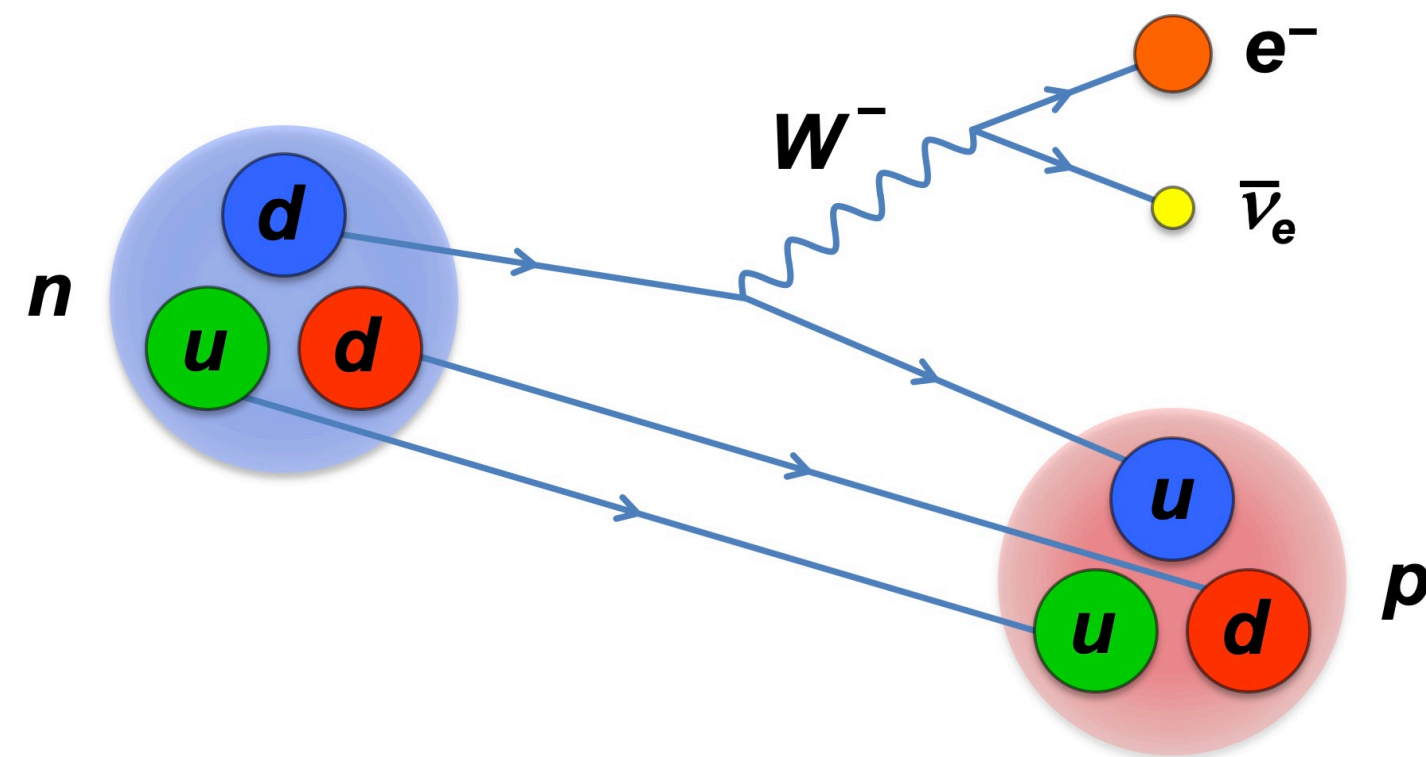
Fermis Goldene Regel:

Zerfallsrate = (Lebensdauer)⁻¹ = $2\pi/\hbar \times$ **Übergangswahrscheinlichkeit**
 × **Zahl der Zustände**

$$\Gamma = 1/\tau = 2\pi/\hbar \times |\text{Matrixelement}|^2 \times \text{Phasenraumfaktor}$$

Physik
Kinematik

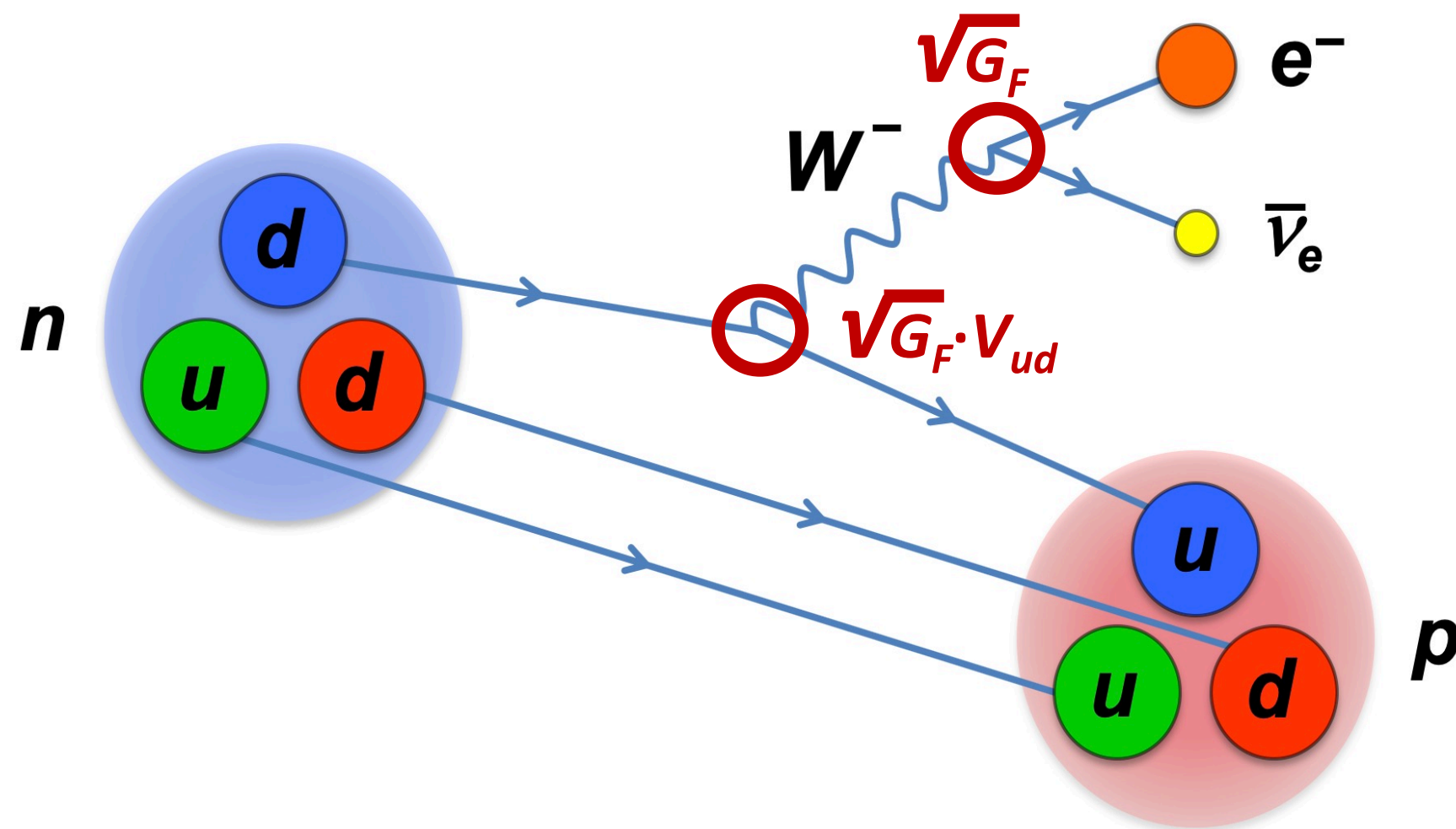
Beim Neutronzerfall $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}$:



$$\tau_n^{-1} = \frac{G_F^2 (mc^2)^5}{2\pi^3 \hbar (\hbar c)^6} V_{ud}^2 (1 + 3\lambda^2) f (1 + \delta'_R) (1 + \Delta_R)$$

(Fornal, Grinstein, MPL A 35 (2020) 31, 2030019)

Neutron-Zerfall



$$\tau_n^{-1} = \frac{G_F^2 (mc^2)^5}{2\pi^3 \hbar (\hbar c)^6} V_{ud}^2 (1 + 3\lambda^2) f (1 + \delta'_R) (1 + \Delta_R)$$

↓ *Das muss gemessen werden!* ↓ *Das wollen wir wissen!*

Schwache Wechselwirkung = (8611,25 s)⁻¹ Zerfalls-Asymmetrie (zu messen!) Photonabstrahlung (≈1) Phasenraumdichte = 1,75337(4)

$$\tau_n^{-1} = \frac{V_{ud}^2 (1 + 3\lambda^2)}{4911,3(1) \text{ s}}$$

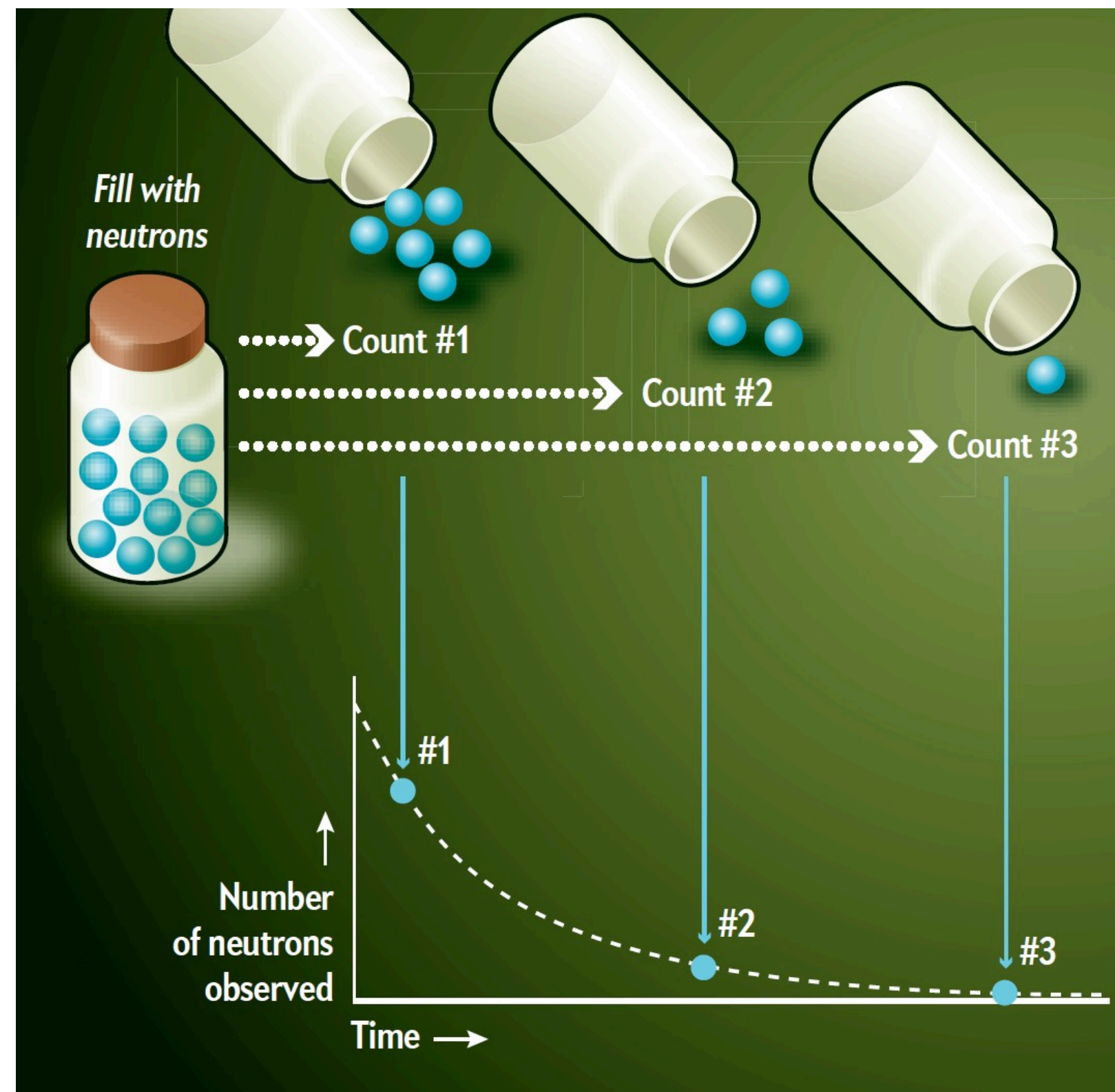
Gemessen aus Zerfallsasymmetrie:
 $\lambda = 1,2762(5)$

$$V_{ud}^2 = \frac{834,4(4) \text{ s}}{\tau_n}$$

Bottle versus Beam

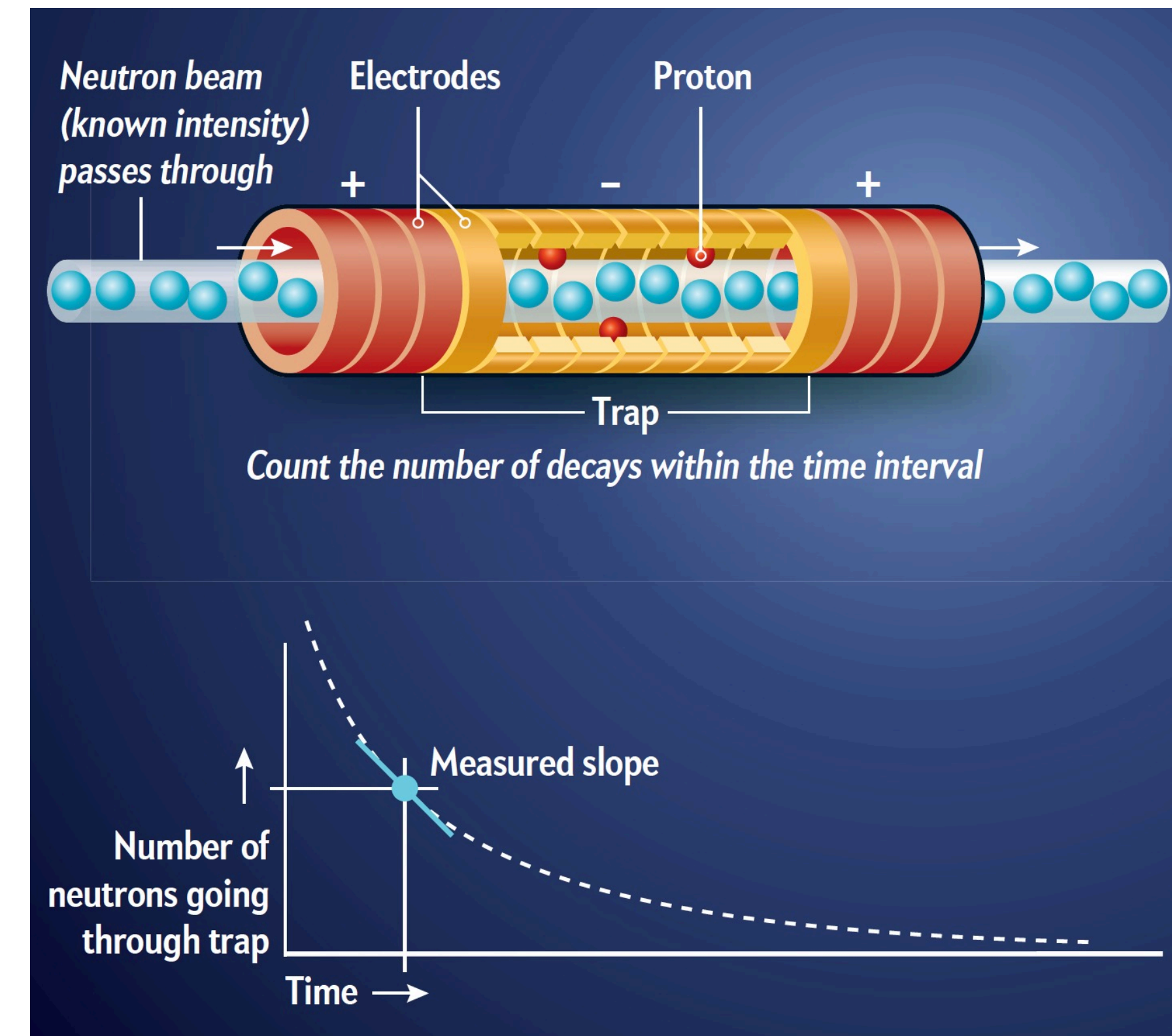
Bottle

Neutronen werden in eine Flasche gefüllt und nach einiger Zeit nachgezählt.



Beam

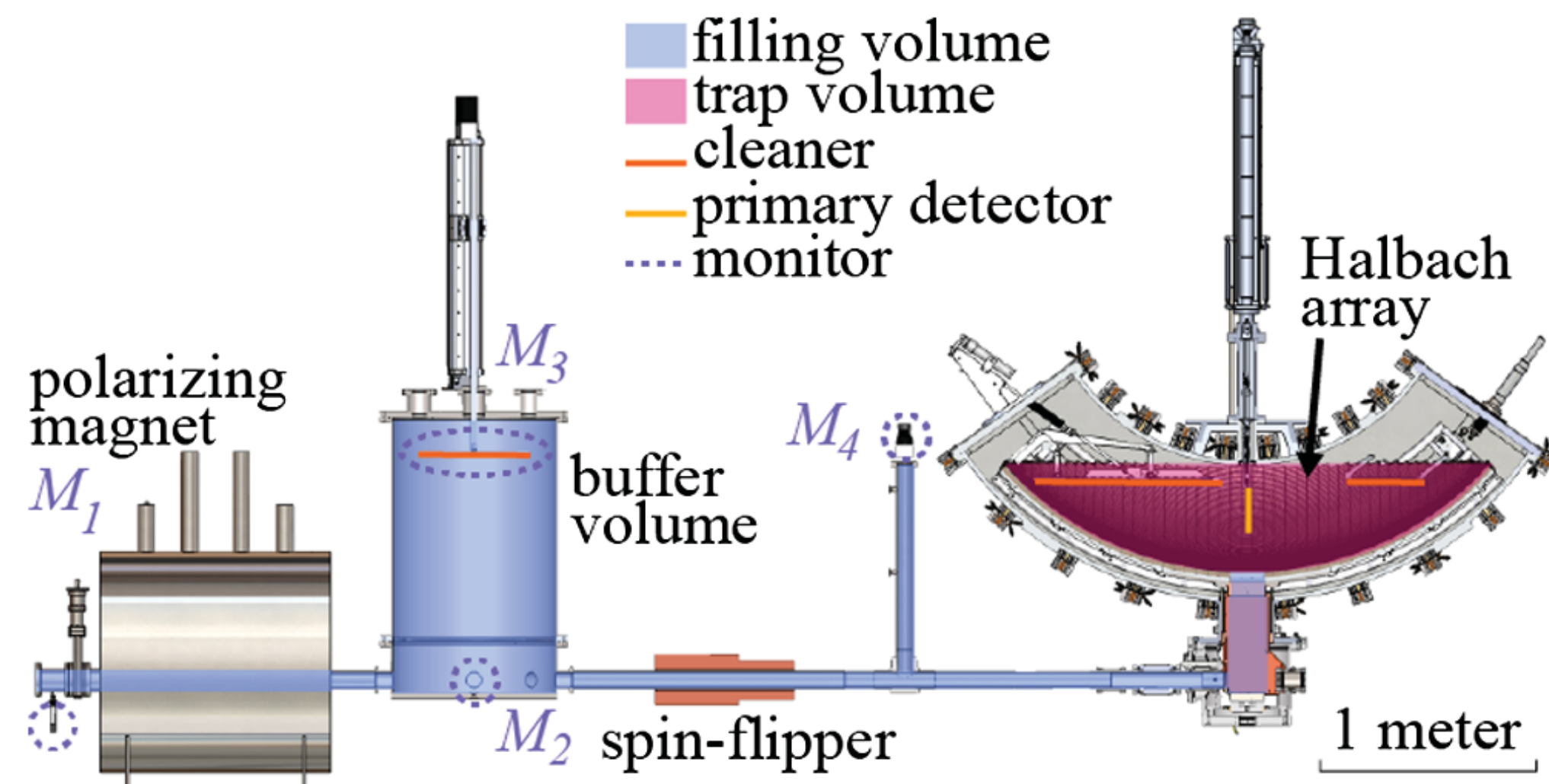
„Ultrakalte“ Neutronen werden kollimiert und gezählt, wie viele Protonen entstehen.



Bottle versus Beam

Bottle

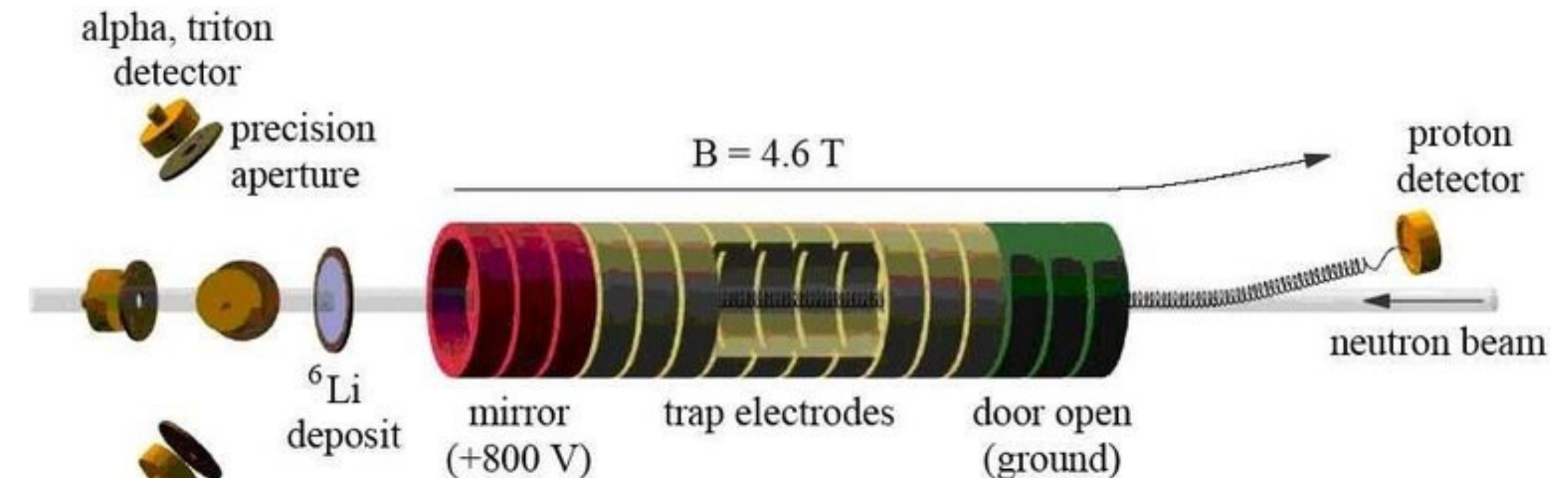
Neutronen werden in einen Behälter gefüllt und ständig nachgezählt.



(UCNt Collaboration, PRL 127 (2021) 162501)

Beam

Neutronen werden kollimiert und gezählt, wie viele Protonen entstehen.

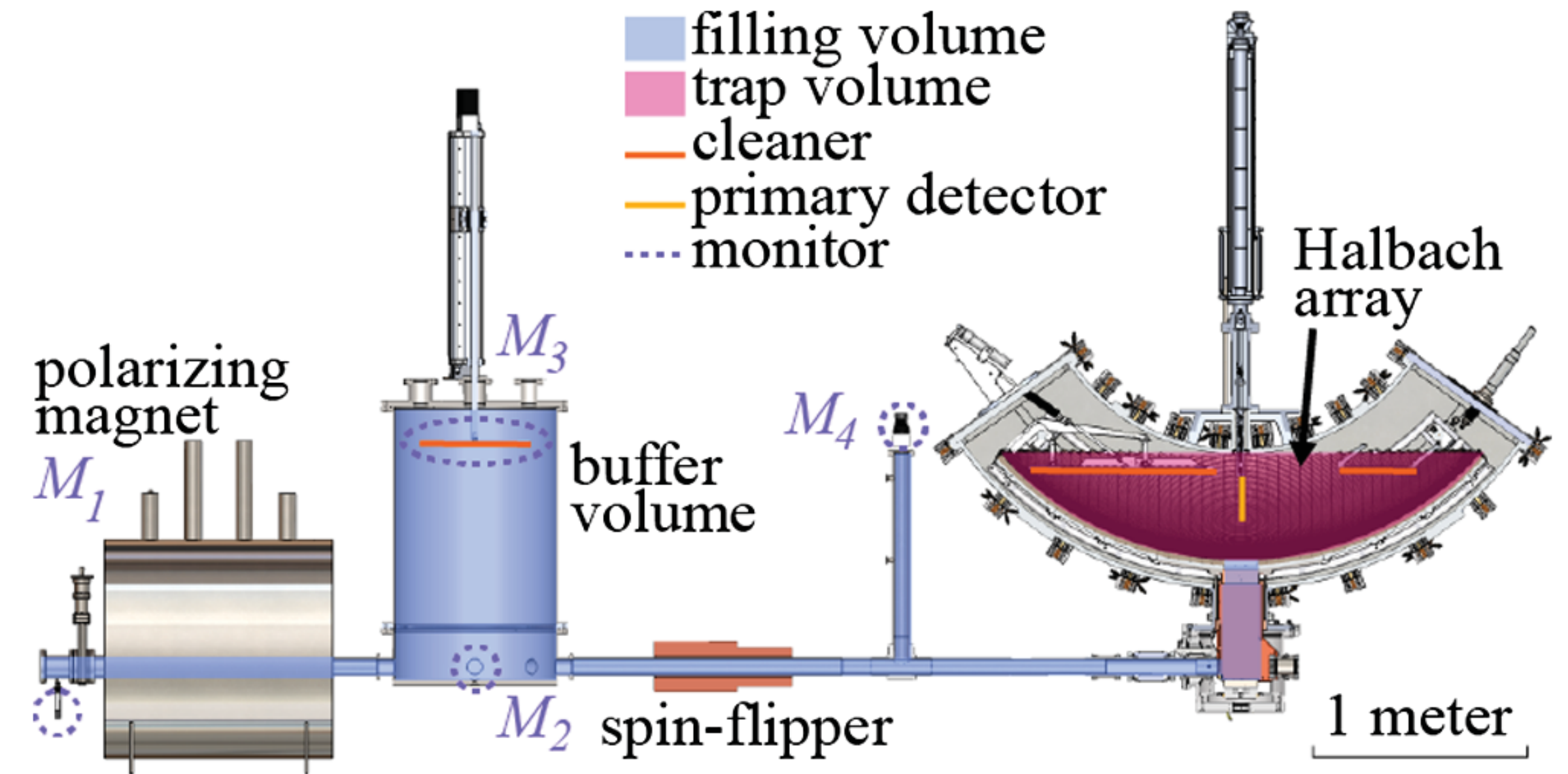



(Nico *et al.*, PRC 71 (2005) 055502)

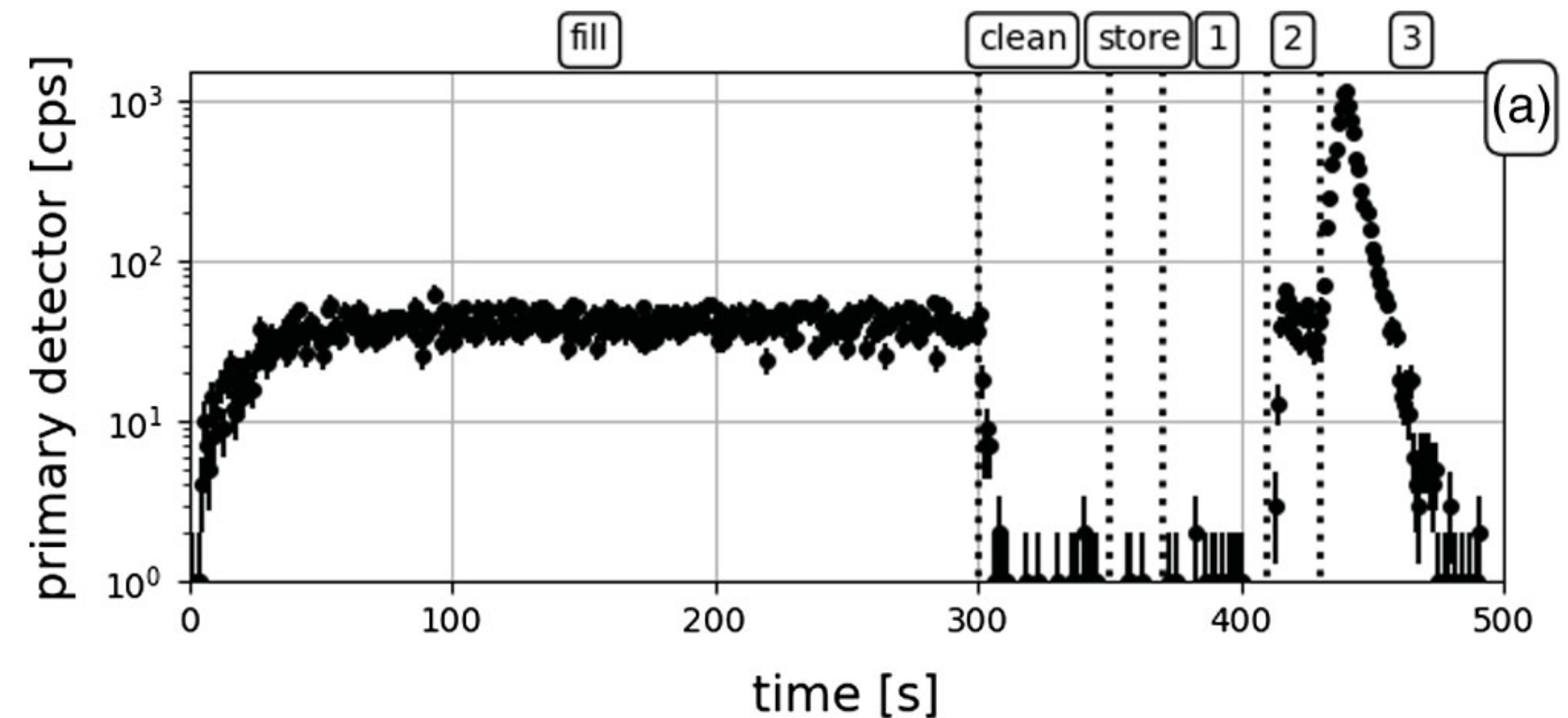
Neutrons in the Bottle

UCN τ -Experiment in Los Alamos (USA):

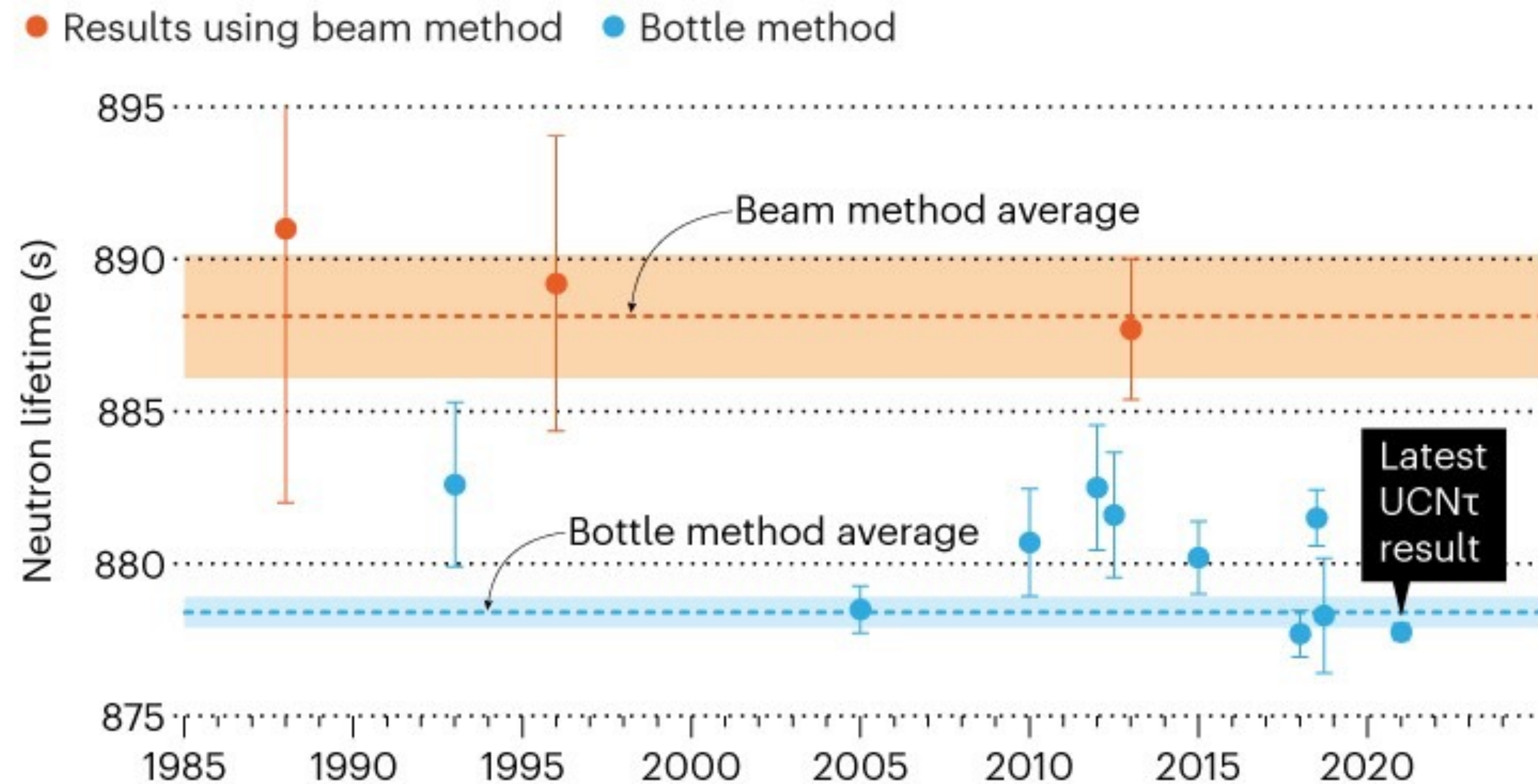
ultrakalte Neutronen
 $E_{\text{kin}} \approx 180 \text{ neV}$ ($\triangleq 6 \text{ m/s}$)



- (1) Neutronen werden polarisiert und in ein „Halbach Array“ gefüllt (*fill*).
- (2) Neutronen mit $E_{\text{kin}} > 38 \text{ neV}$ ($\triangleq 2,7 \text{ m/s}$) werden entfernt (*clean*).
- (3) Kurze Speicherzeit (*store*).
- (4) Szintillator-Array wird in drei Stufen heruntergefahren zum **Zählen der verbleibenden Neutronen** (*1,2,3*).



Bottle versus Beam



(Nature, 598 (2021) 549)

Warum ist der Unterschied interessant?

Wenn es kein experimentelles Problem gibt:

Es gibt eine physikalische Ursache.

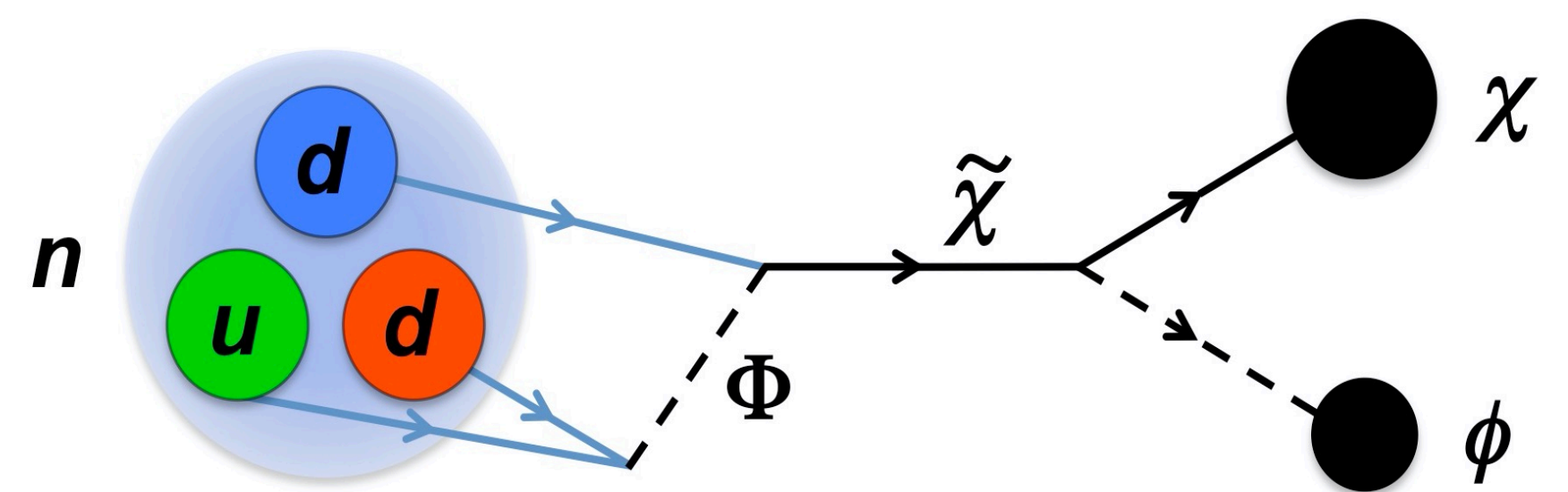
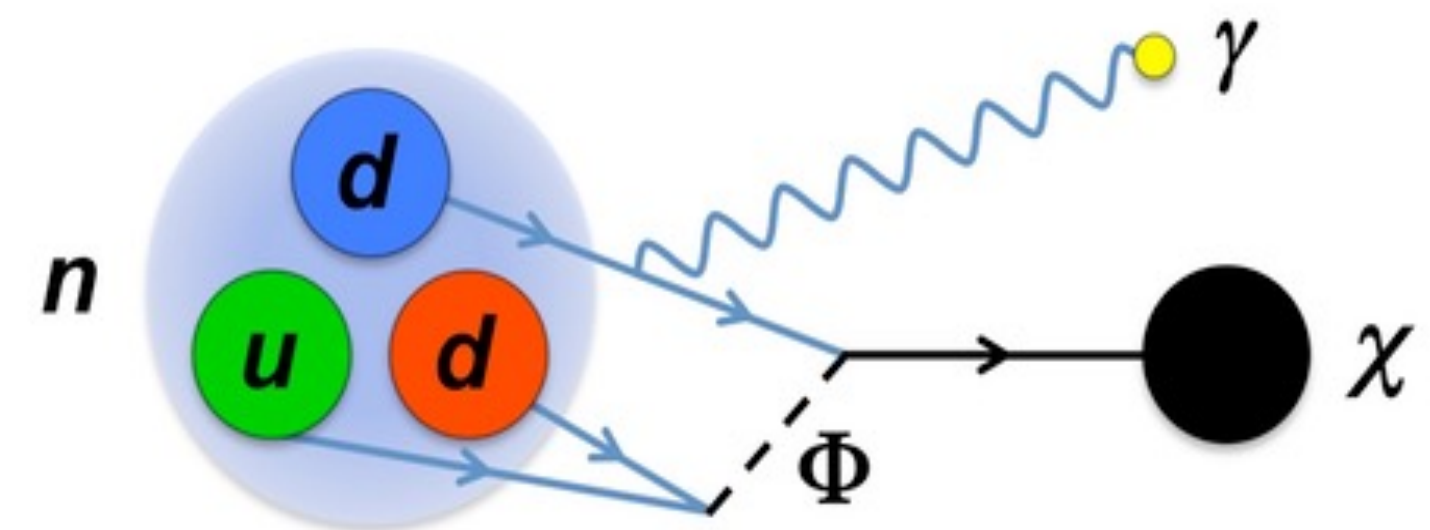
- *Bottle* zählt alle zerfallenen Neutronen.
- *Beam* zählt entstandene Protonen.

Was, wenn Neutronen auch in unbekannte, nicht sichtbare Teilchen zerfallen?

Nicht bei jedem Zerfall (gemessen in Bottle) tritt ein Proton auf (gemessen in Beam).

Weniger $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}$ als alle Zerfälle ergeben zu lange gemessene Lebensdauer!

Mögliche Zerfälle in Dunkle-Materie-Teilchen:



(Fornal, Grinstein)

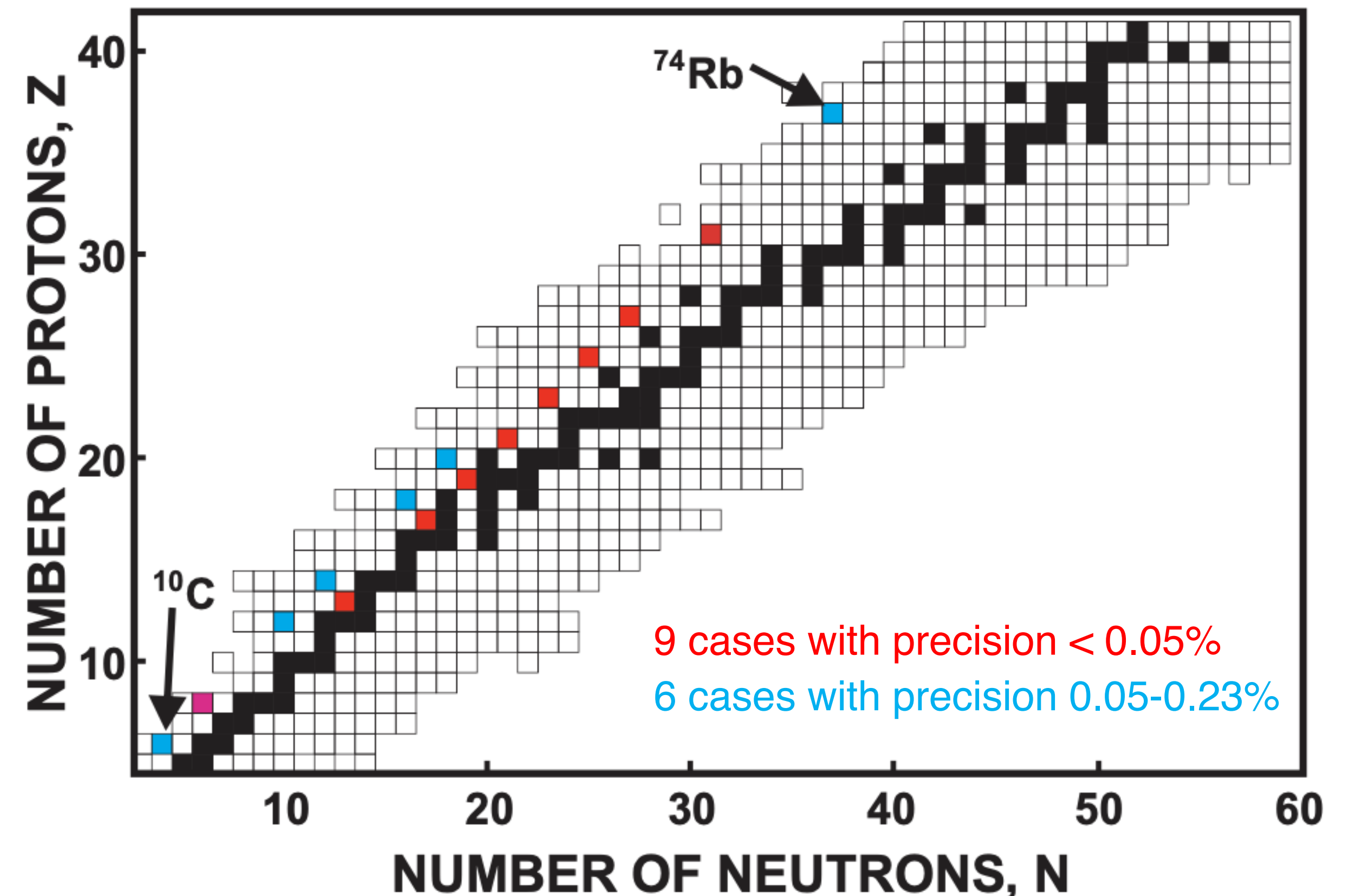
$|V_{ud}|$ von $0^+ \rightarrow 0^+$ -Übergängen

$0^+ \rightarrow 0^+$: β -Zerfälle von Kernen mit Spin 0 und Parität + („Supererlaubte Zerfälle“).

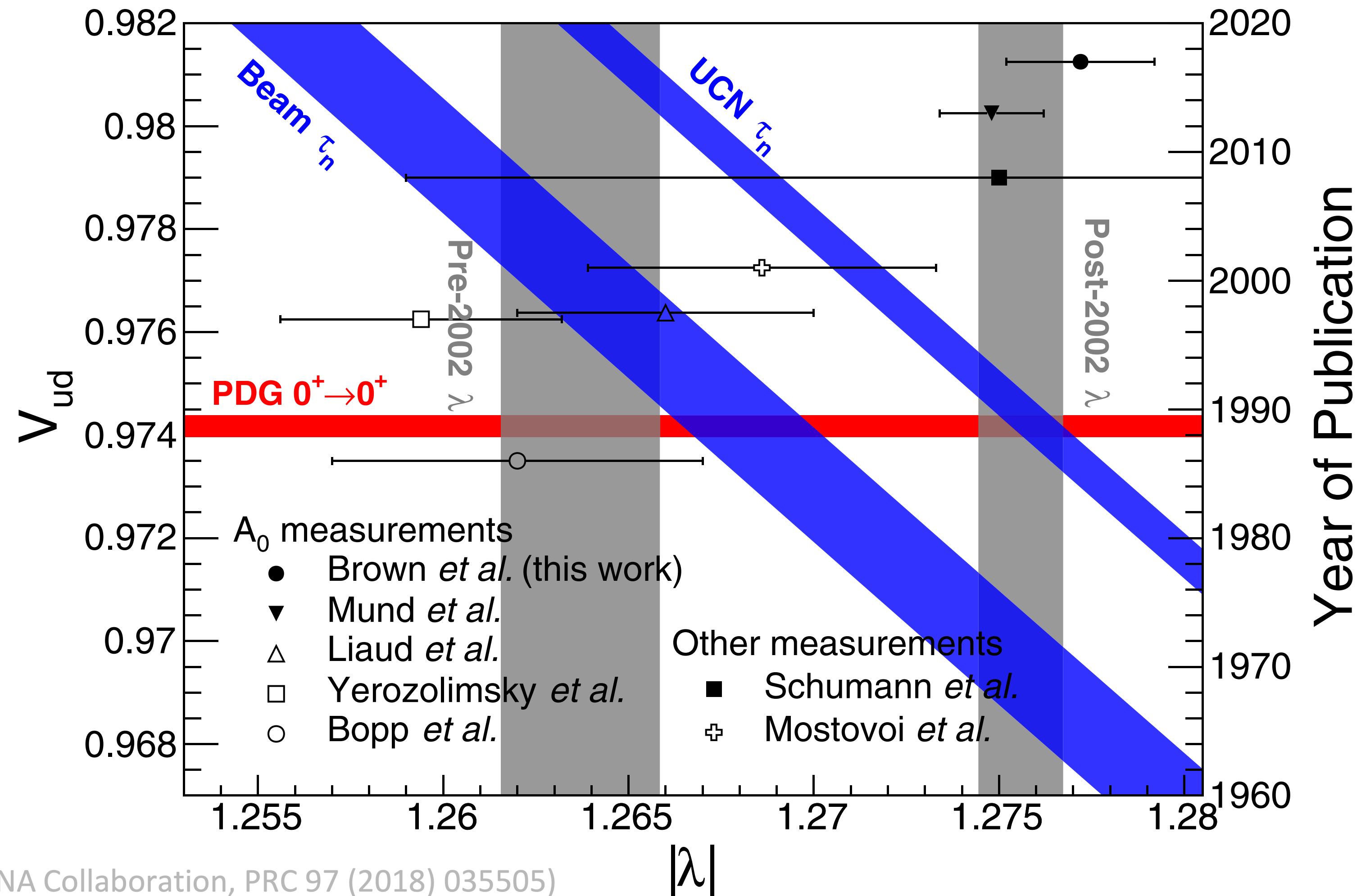
- Details sehr kompliziert, aber grundsätzlich:

Halbwertszeit $t_{1/2} \propto (G_F^2 |V_{ud}|^2)^{-1}$

- 220 unterschiedliche Messungen von insgesamt 15 Kernübergängen mit Halbwertszeiten zwischen 0.08 s und 70 s.
- **Zurzeit noch die genaueste $|V_{ud}|$ -Bestimmung.**



V_{ud} aus Neutronzerfall

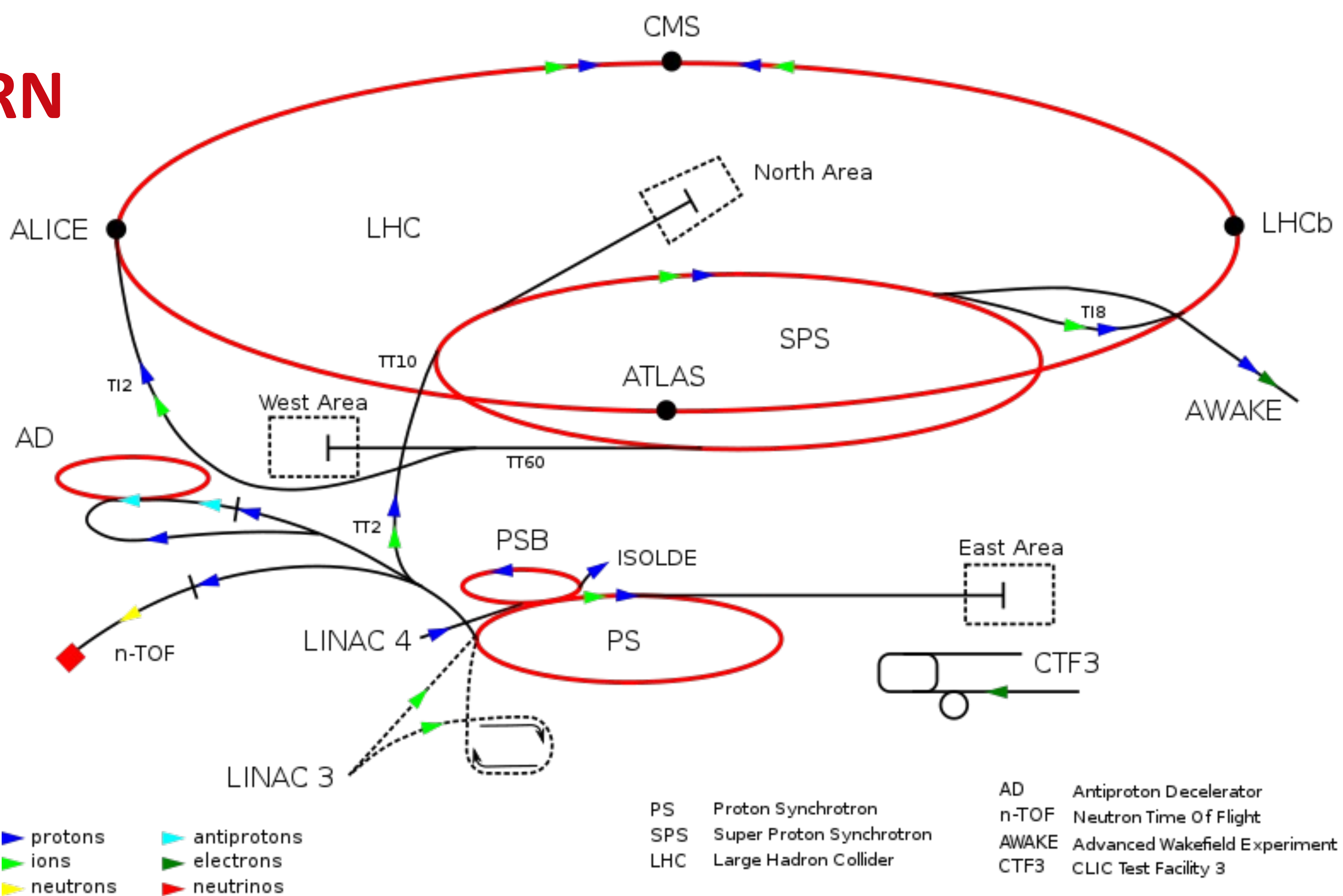


- Bottle:
 $|V_{ud}| = 0.9741(4)$
- Beam:
 $|V_{ud}| = 0.9685(8)$
- $0^+ \rightarrow 0^+$:
 $|V_{ud}| = 0.9737(3)$

(UCNA Collaboration, PRC 97 (2018) 035505)

Kaonen

CERN



CERN



CERN

LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

SPS 7 km

PS 628 m

SUISSE
FRANCE

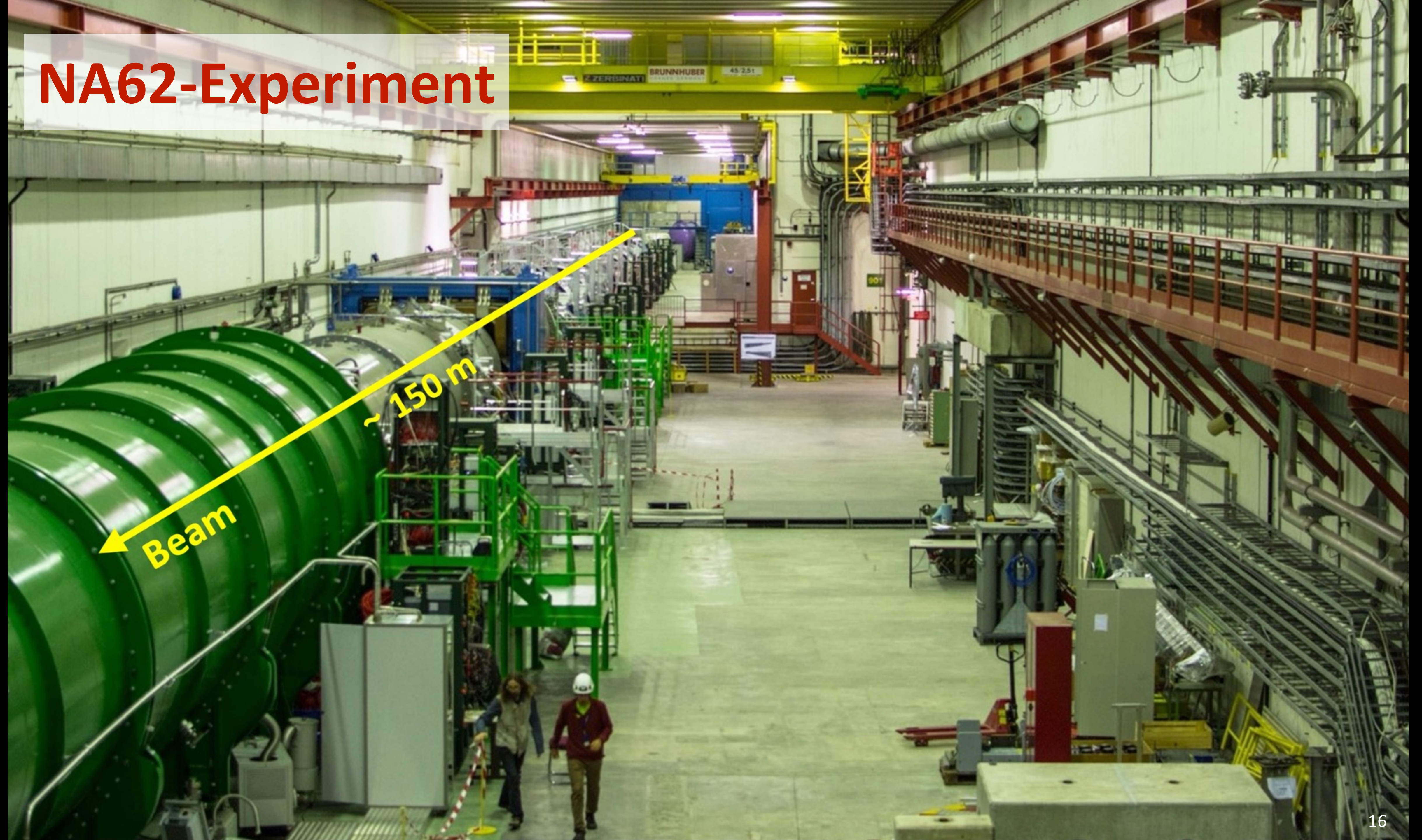
CMS

Protonen
400 GeV

ALICE

LHC 27 km

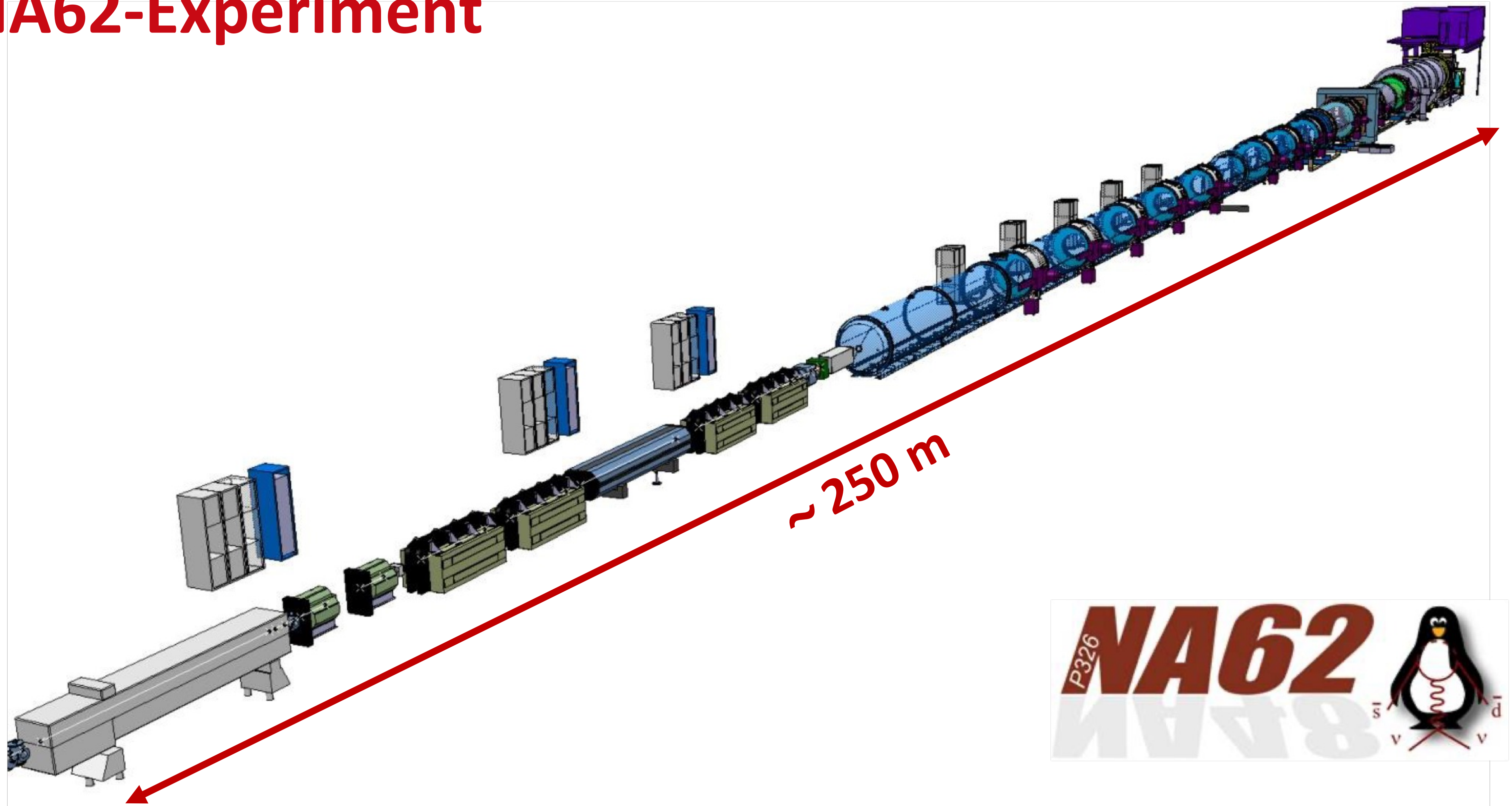
NA62-Experiment



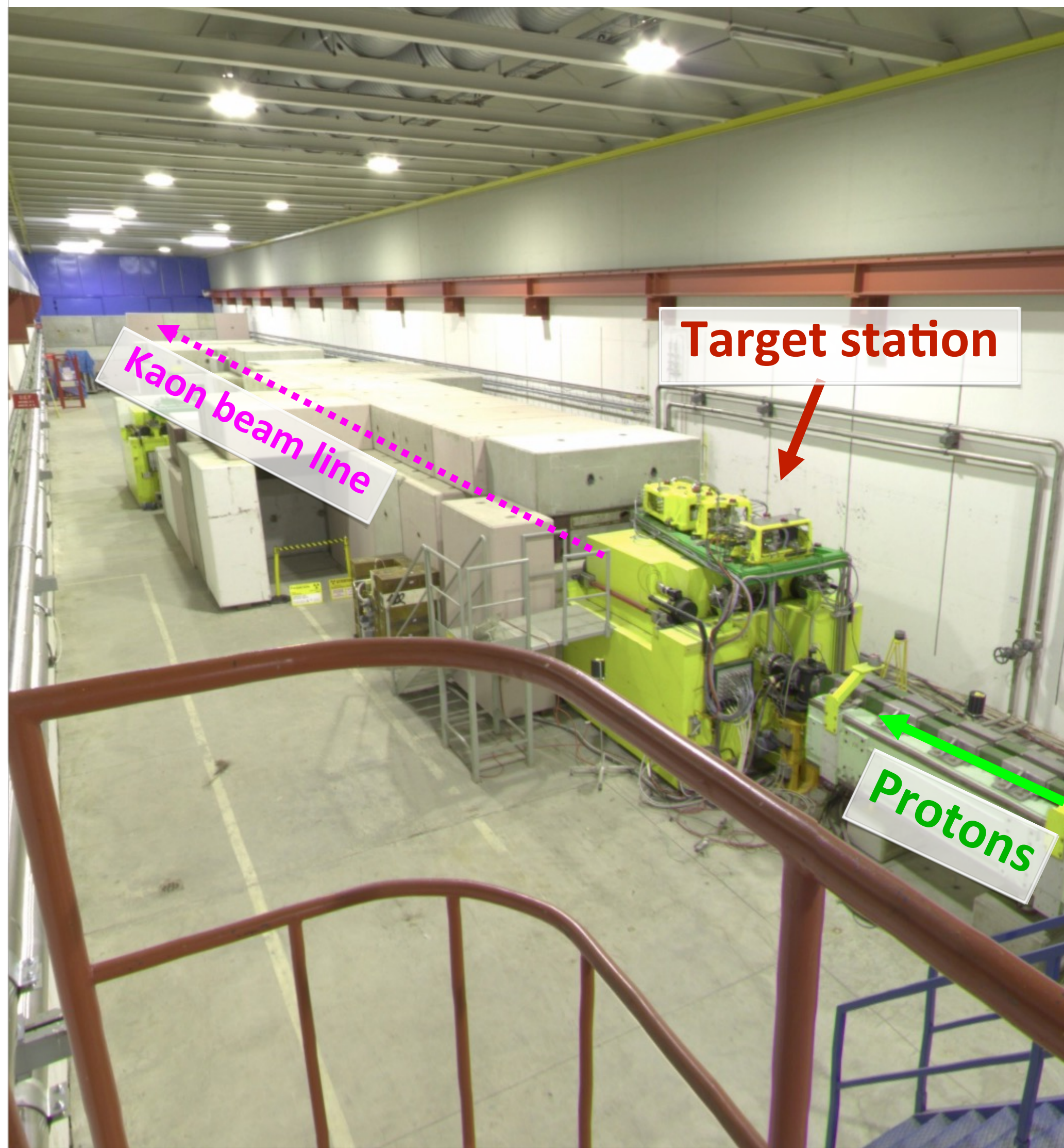
Beam

~ 150 m

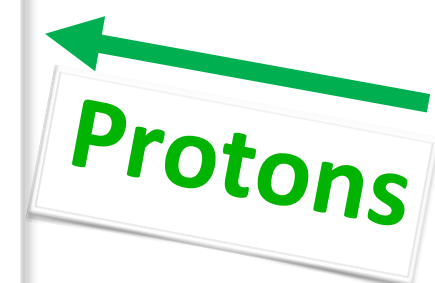
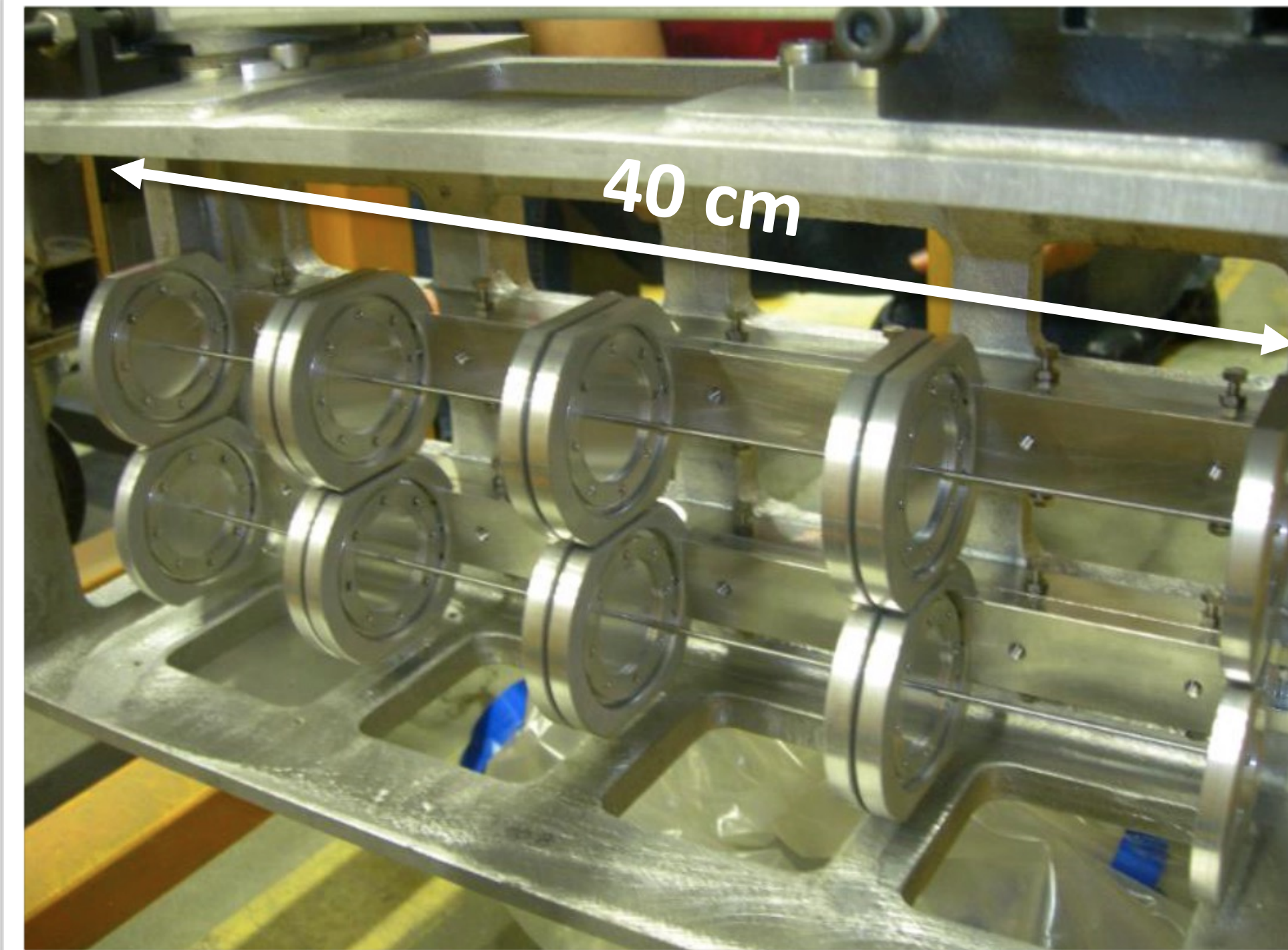
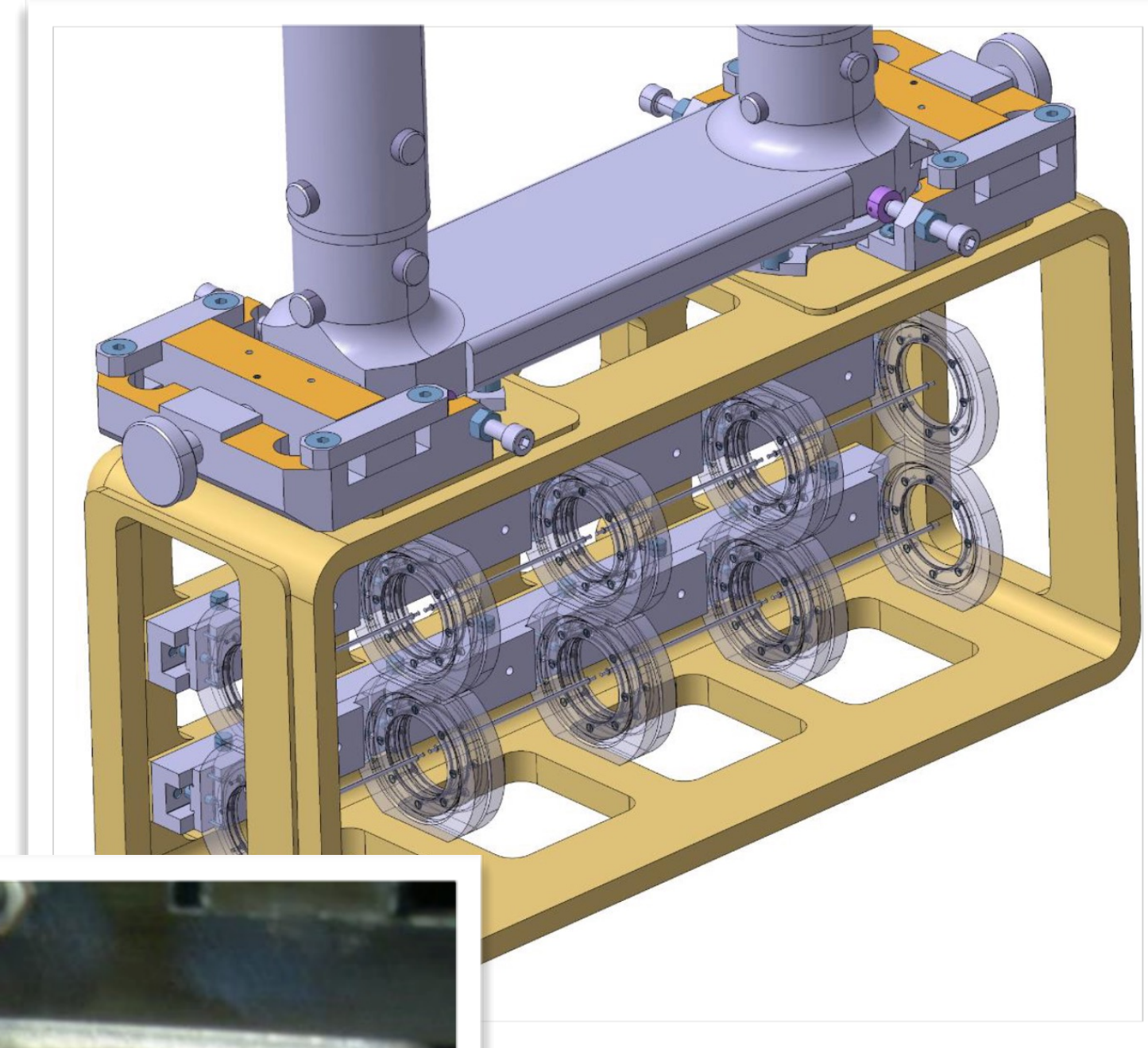
NA62-Experiment



Proton-Target

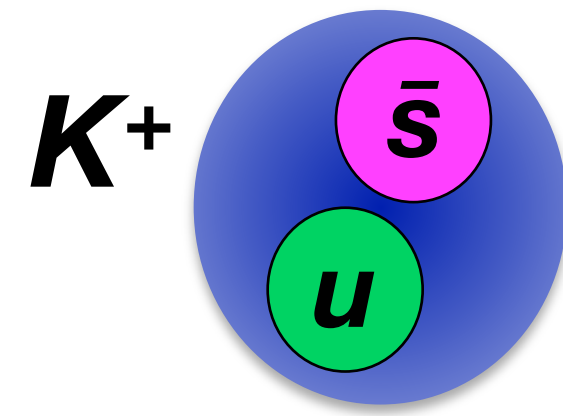


- ▶ Beryllium-Stab mit 40 cm Länge und 2 mm Durchmesser.



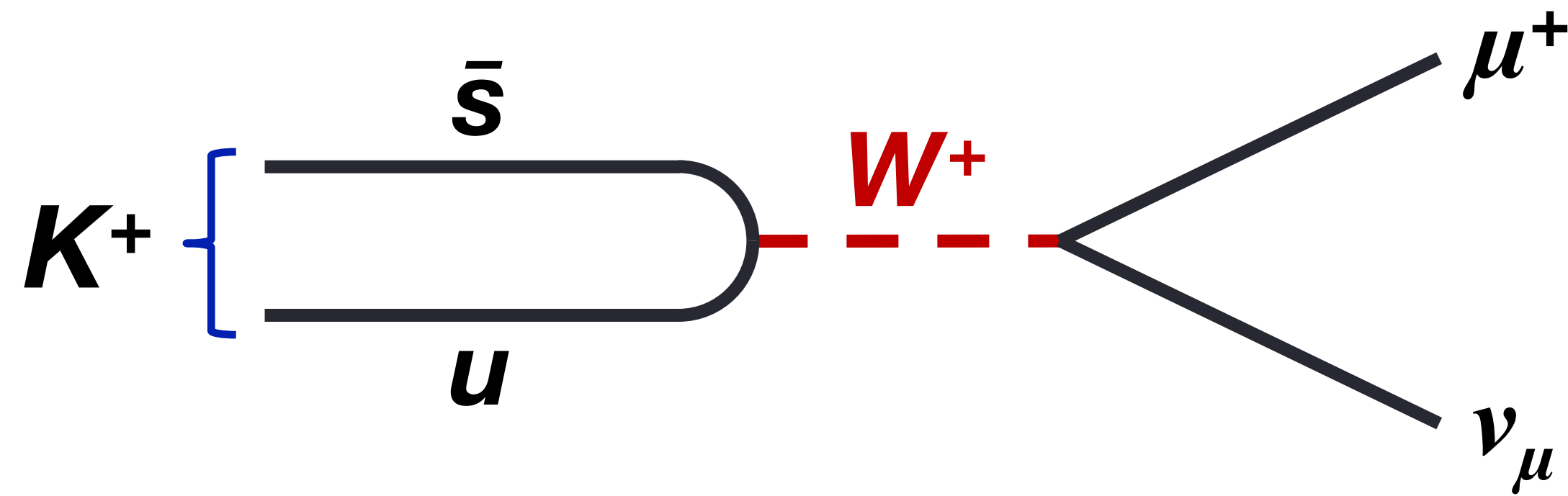
Kaon-Zerfälle

Das K^+ -Meson zerfällt fast ausschließlich über 6 verschiedene Weisen:



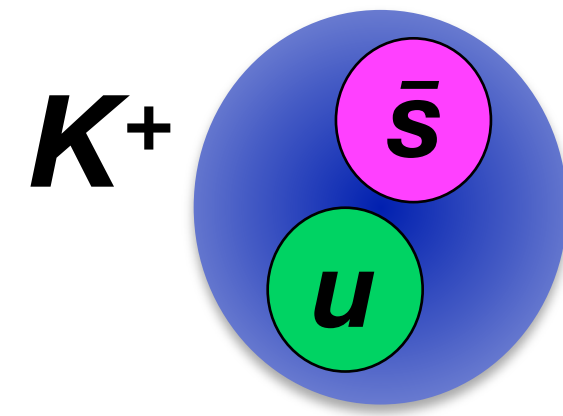
$K^+ \rightarrow \text{Myon} + \text{Neutrino}$

Zerfallskanal	Häufigkeit
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$	$(63.56 \pm 0.11) \%$



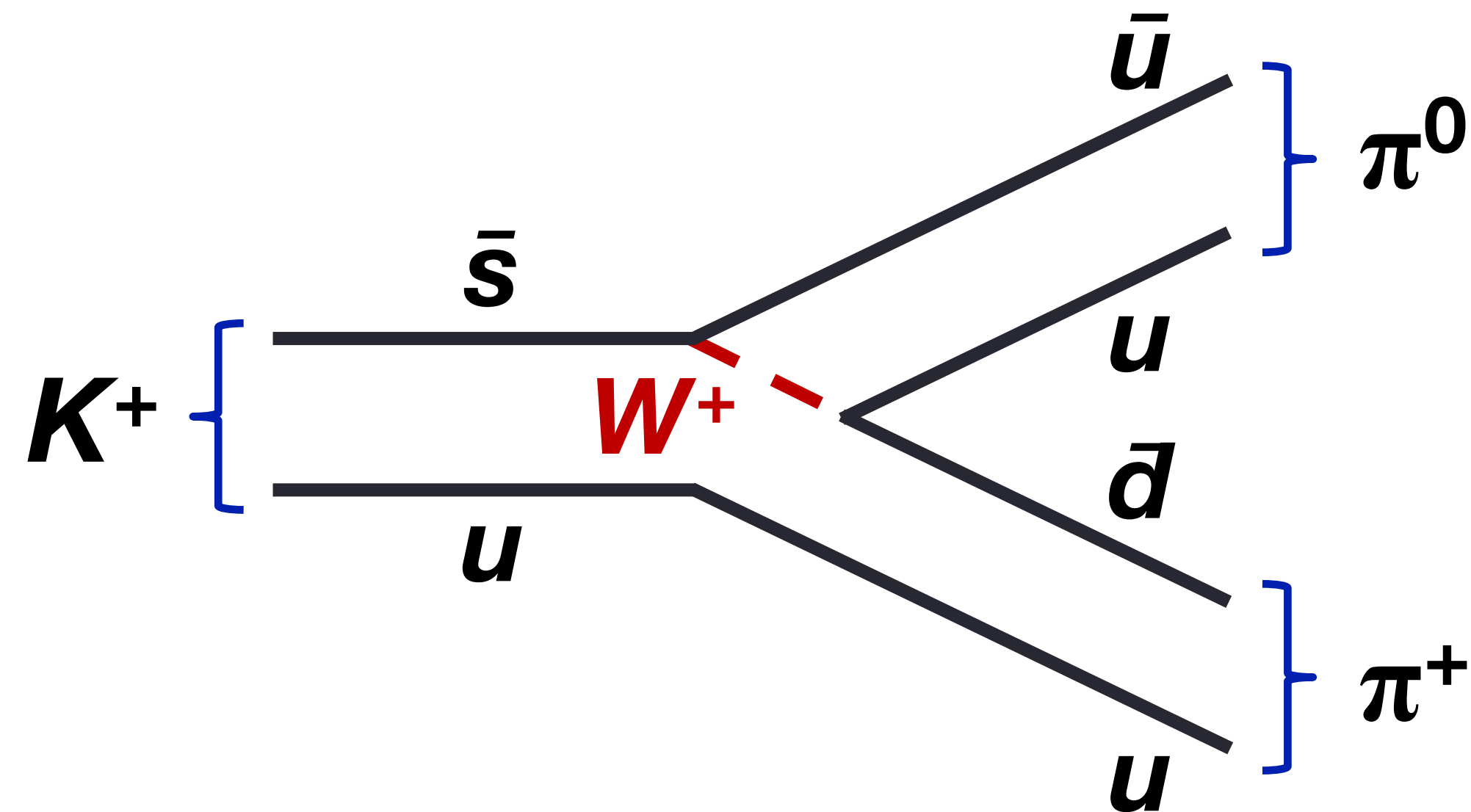
Kaon-Zerfälle

Das K^+ -Meson zerfällt fast ausschließlich über 6 verschiedene Weisen:



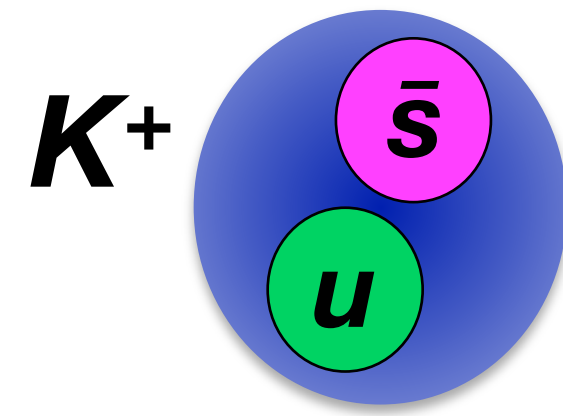
$K^+ \rightarrow 2$ Pionen

Zerfallskanal	Häufigkeit
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$	$(63.56 \pm 0.11) \%$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	$(20.67 \pm 0.08) \%$

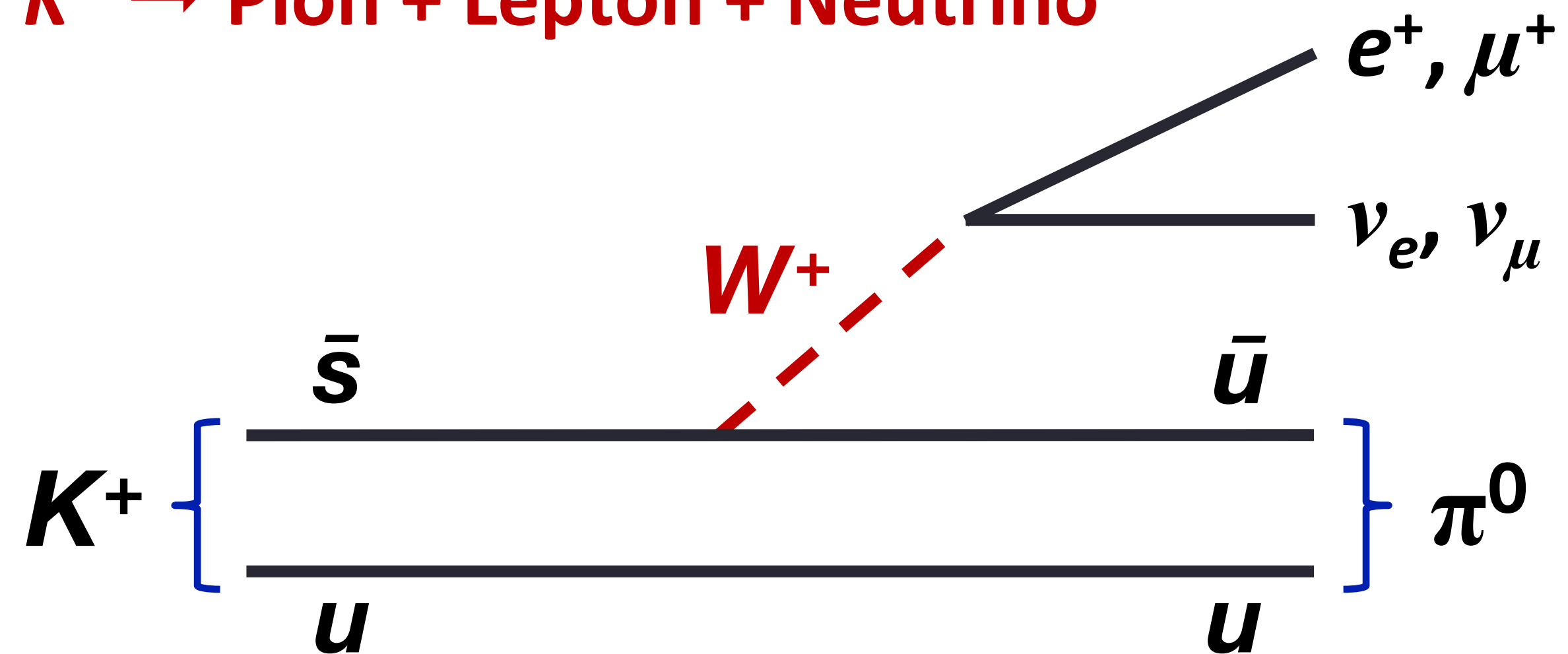


Kaon-Zerfälle

Das K^+ -Meson zerfällt fast ausschließlich über 6 verschiedene Weisen:



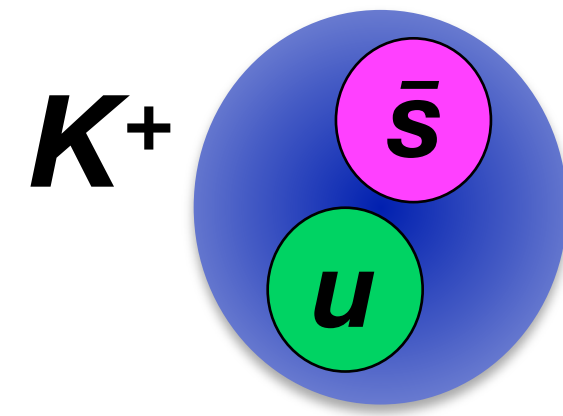
$K^+ \rightarrow$ Pion + Lepton + Neutrino



Zerfallskanal	Häufigkeit
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$	$(63.56 \pm 0.11) \%$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	$(20.67 \pm 0.08) \%$
$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$	$(5.07 \pm 0.04) \%$
$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$	$(3.35 \pm 0.03) \%$

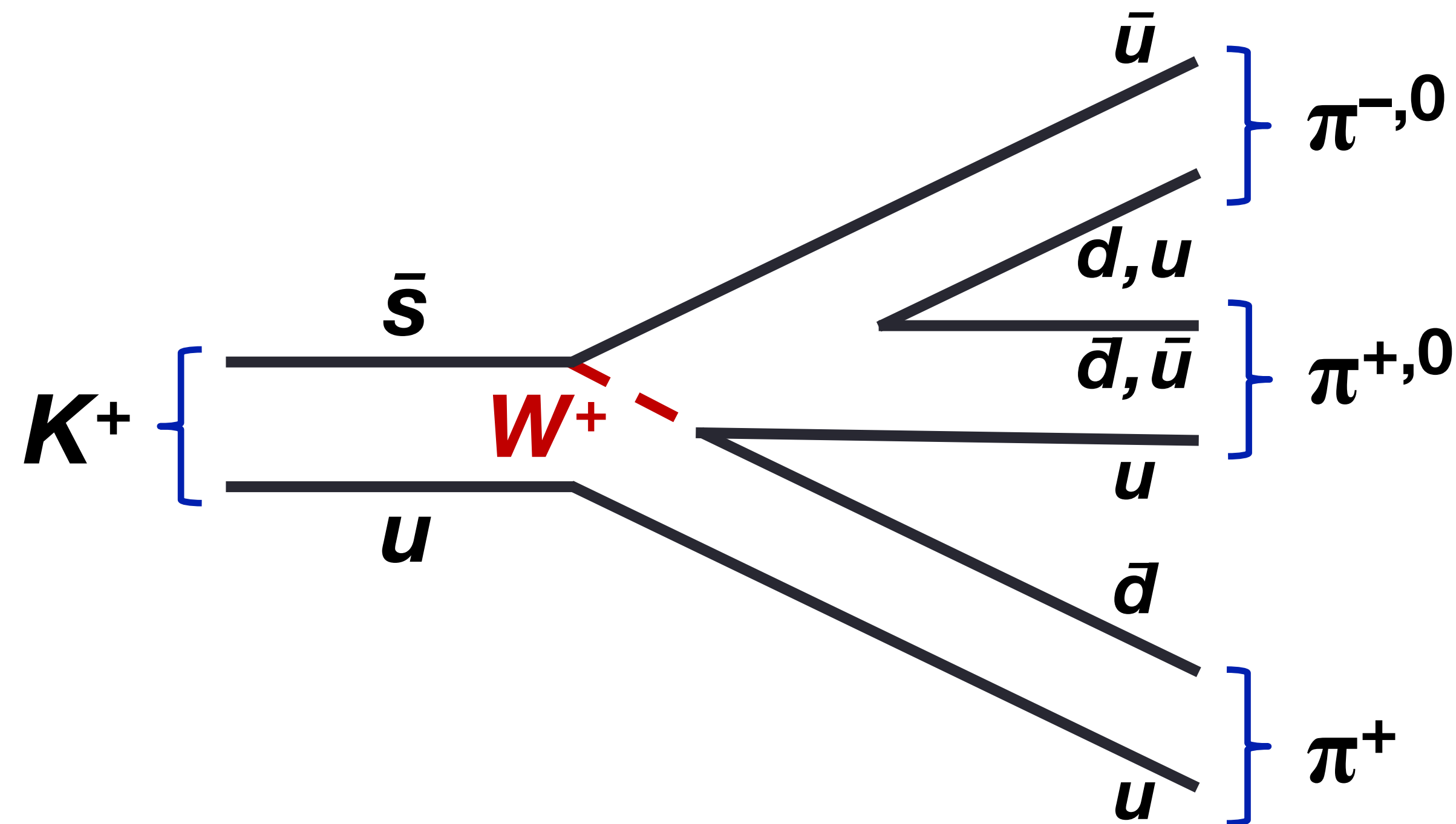
Kaon-Zerfälle

Das K^+ -Meson zerfällt fast ausschließlich über 6 verschiedene Weisen:

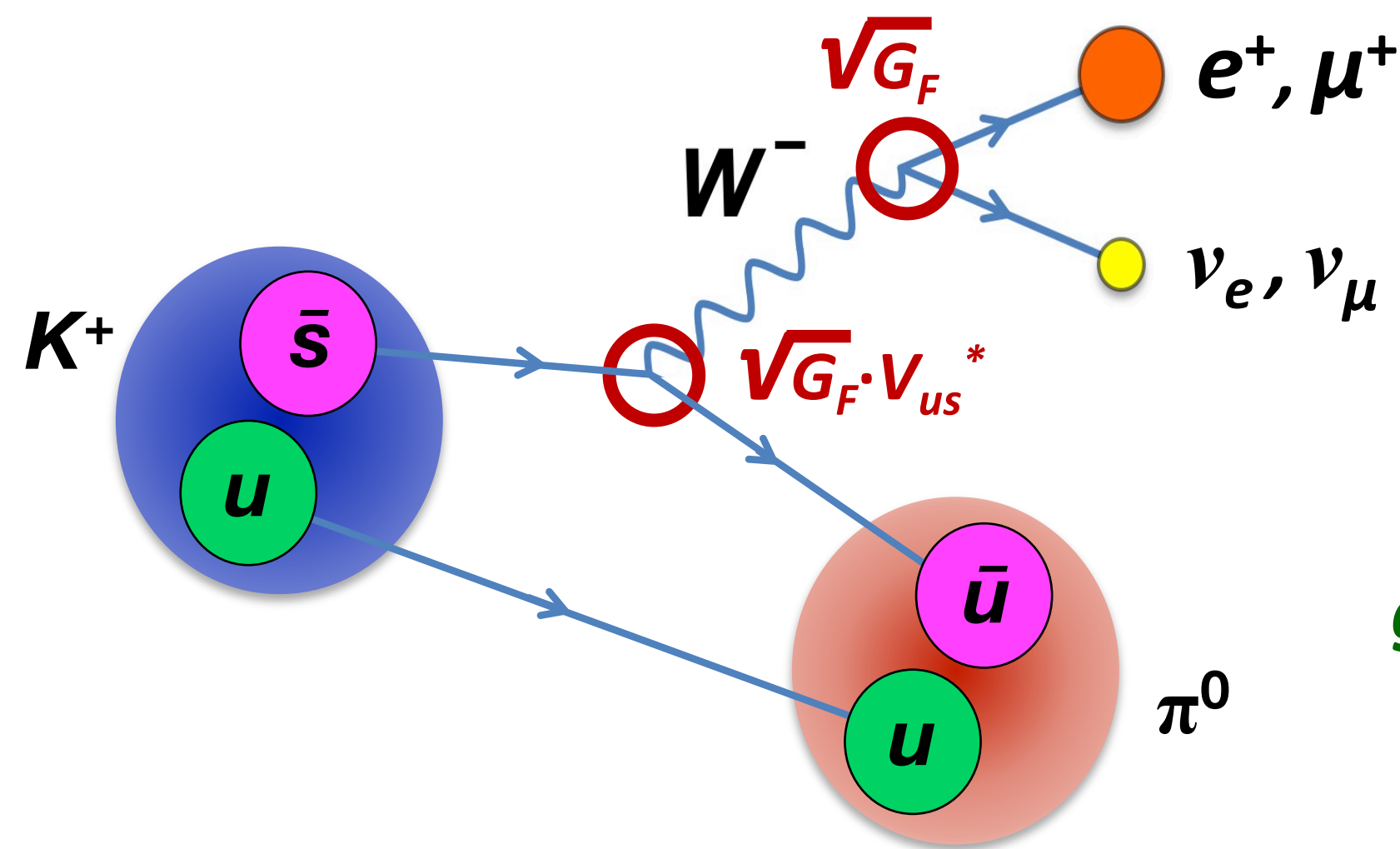


$K^+ \rightarrow 3$ Pionen

Zerfallskanal	Häufigkeit
$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$	$(63.56 \pm 0.11) \%$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$	$(20.67 \pm 0.08) \%$
$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$	$(5.07 \pm 0.04) \%$
$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$	$(3.35 \pm 0.03) \%$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$(5.58 \pm 0.02) \%$
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$	$(1.76 \pm 0.02) \%$



Kaon-Zerfälle $K \rightarrow \pi e \nu$, $K \rightarrow \pi \mu \nu$



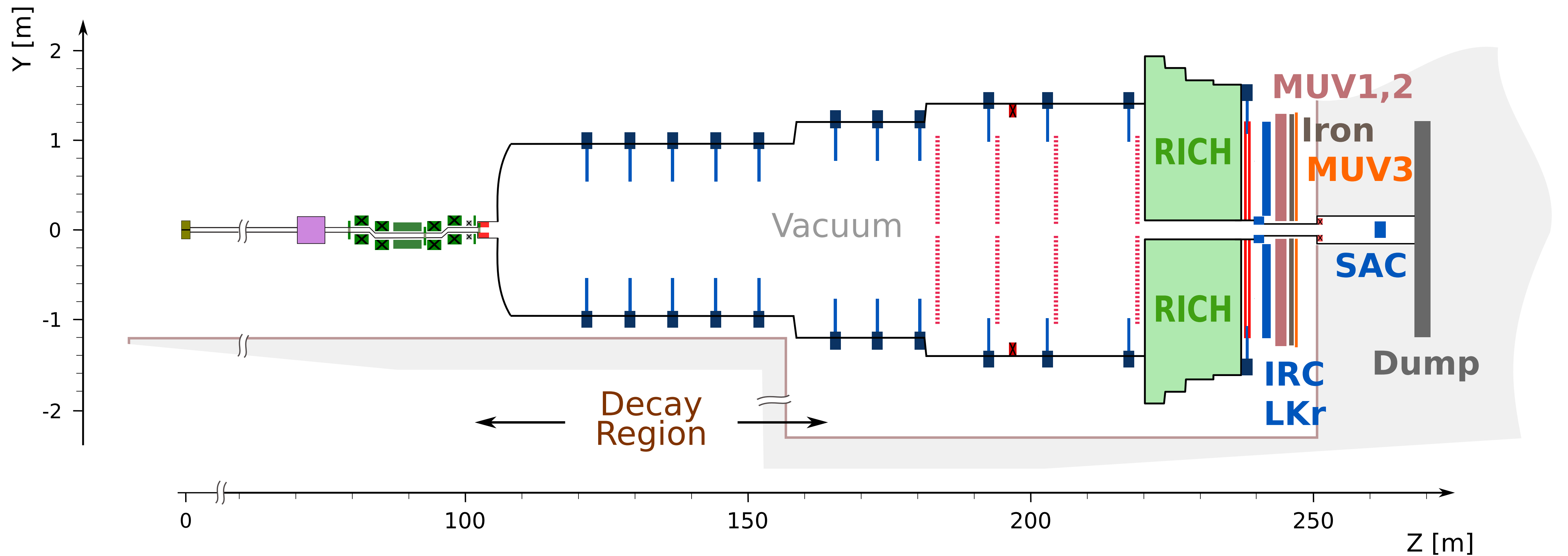
$$\Gamma_{\text{partial}} = \underbrace{\frac{G_F^2 (m_K c^2)^5}{384 \pi^3 \hbar (\hbar c)^6}}_{\text{Schwache Wechselwirkung}} \underbrace{|V_{us}|^2}_{\text{Formfaktor } (\rightarrow \text{Theorie}) = 0.9698(17)} |f_+(0)|^2 \underbrace{I_K S_{EW} (1 + \delta_K)^2}_{\text{Korrekturen } (\approx 1) \text{ Phasenraumdichte}}$$

↓ *Das muss gemessen werden!*

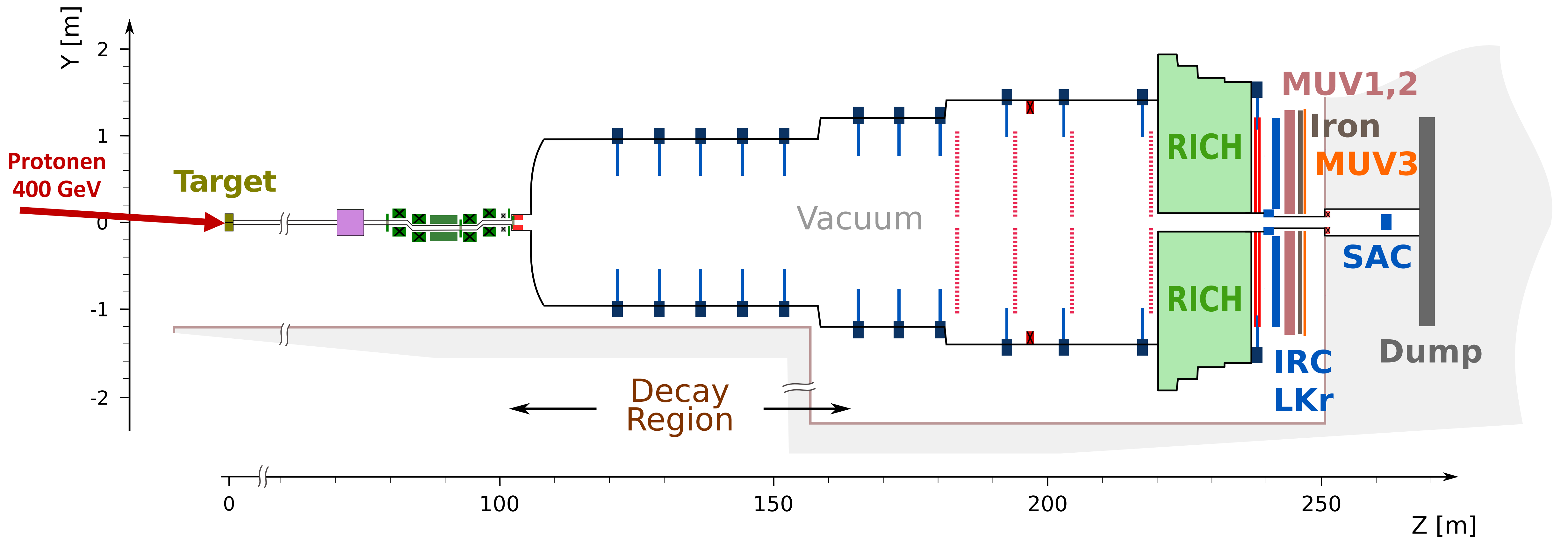
$$\Gamma_{\text{partial}} = \frac{\text{Verzweigungsverhältnis } K \rightarrow \pi e \nu}{\text{Kaonlebensdauer}} = \frac{Br(K \rightarrow \pi e \nu)}{\tau_K}$$

↓ *Das wollen wir wissen!*

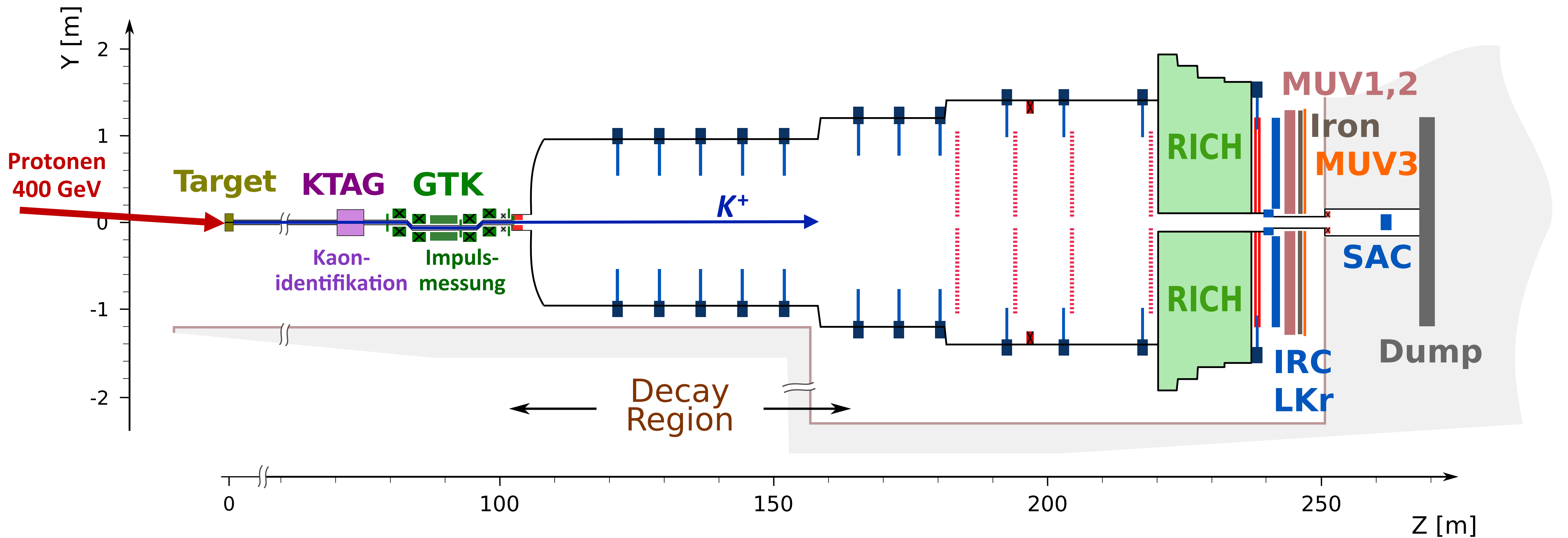
Kaon-Zerfälle im Detektor



Kaon-Zerfälle im Detektor



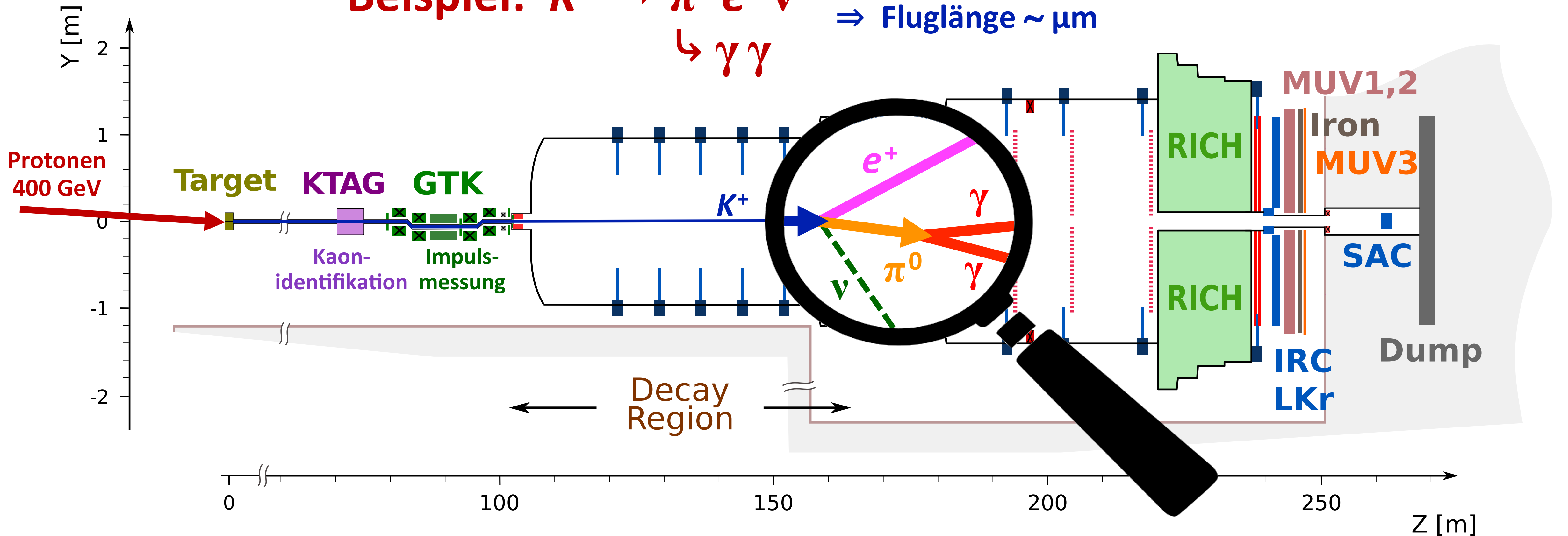
Kaon-Zerfälle im Detektor



Kaon-Zerfälle im Detektor

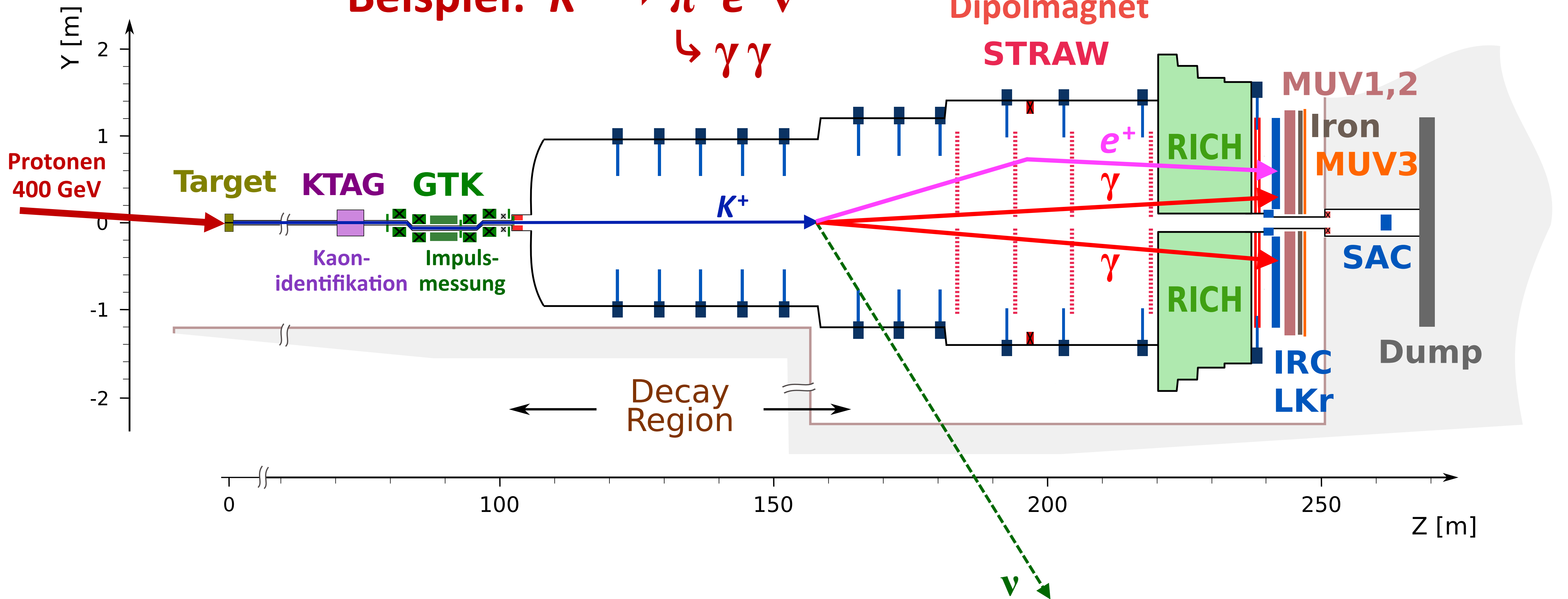
Beispiel: $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$
 $\hookrightarrow \gamma\gamma$

π^0 -Lebensdauer $\sim 10^{-17}$ s
 \Rightarrow Fluglänge $\sim \mu\text{m}$



Kaon-Zerfälle im Detektor

Beispiel: $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$
 $\hookrightarrow \gamma\gamma$



Ein bisschen spezielle Relativitätstheorie...

Klassisch:

$$\text{Energie: } E = \frac{1}{2} m v^2 = p^2 / (2m)$$

Spezielle Relativitätstheorie:

Ruhemasse und Ruheenergie sind äquivalent: $E_0 = m c^2$ (mit m = Ruhemasse)

$$\text{Gesamtenergie: } E = \gamma m c^2 = E_0 + E_{kin}$$

$$\text{Impuls: } p = \gamma m v = \beta \gamma m c$$

$$\begin{aligned} \text{Damit: } E^2 &= \gamma^2 m^2 c^4 = m^2 c^4 + (\gamma^2 - 1) m^2 c^4 \\ &= m^2 c^4 + (1 - (1 - \beta^2)) / (1 - \beta^2) m^2 c^4 = m^2 c^4 + \beta^2 / (1 - \beta^2) m^2 c^4 \\ &= m^2 c^4 + \beta^2 \gamma^2 m^2 c^4 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \end{aligned}$$

Energie-Impuls-Beziehung für relativistische Teilchen

Ein bisschen spezielle Relativitätstheorie...

Energie-Impuls-Beziehung für relativistische Teilchen:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

In der Teilchenphysik zumeist: Lichtgeschwindigkeit $c := 1$

$$E^2 = m^2 + p^2$$

Einheiten: $[Energie] = [Impuls] = [Masse] = \text{GeV}$ (auch: $[Impuls] = \text{GeV}/c$, $[Masse] = \text{GeV}/c^2$)

Beispiel: $m_{\text{Proton}} \approx 1 \text{ GeV}$, $p_{\text{Proton}} = 400 \text{ GeV}$ im CERN SPS $\Rightarrow E_{\text{Proton}} \cong 400 \text{ GeV} = p_{\text{Proton}}!$

Ein bisschen spezielle Relativitätstheorie...

Radioaktive Zerfälle:

Teilchen **A** (Masse m_A) zerfällt in Teilchen **B** (Masse m_B) und Teilchen **C** (Masse m_C):

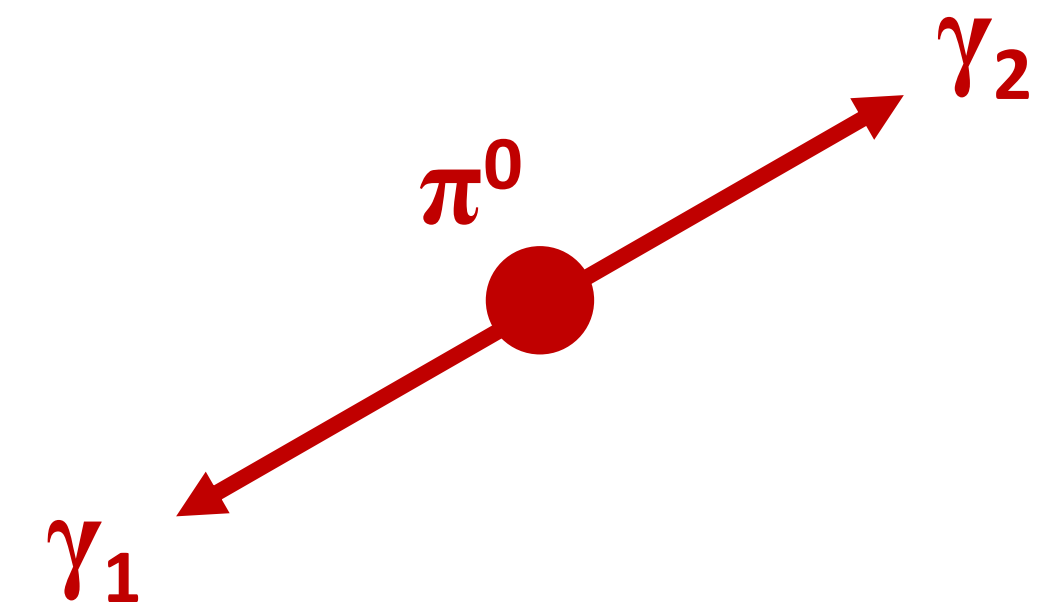
$$A \rightarrow B + C \quad \text{mit } m_A \geq m_B + m_C \text{ wegen Energieerhaltung.}$$

Beispiel: Zerfall in Ruhe von $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ (2 Photonen)

$$m_\pi = 135 \text{ MeV}, m_\gamma = 0$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow m_\pi^2 &= E_\pi^2 = (E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2})^2 = E_{\gamma 1}^2 + E_{\gamma 2}^2 + 2 E_{\gamma 1} E_{\gamma 2} \\ &= p_{\gamma 1}^2 + p_{\gamma 2}^2 + 2 |p_{\gamma 1}| |p_{\gamma 2}| = 4 p_\gamma^2 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow p_\gamma = \frac{1}{2} m_\pi = 67,5 \text{ MeV}$$



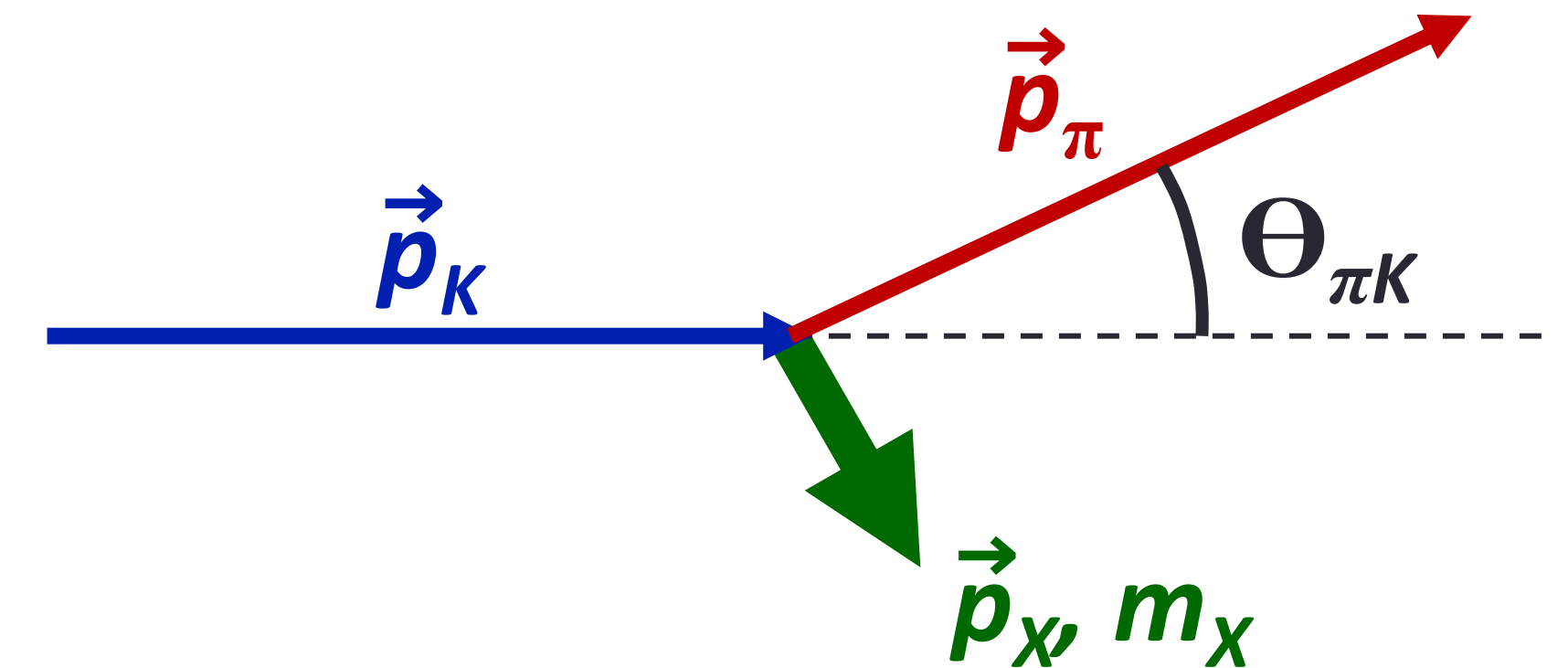
Kaon-Zerfälle im Detektor

Weiteres Beispiel: Zerfall in Ruhe von $K^+ \rightarrow \pi^+ X$ (X nicht gemessen)

$\Rightarrow m_X^2 = \dots$ längere Rechnung \dots

$= \dots$

$$m_X^2 \approx m_K^2 \left(1 - \frac{p_\pi}{p_K}\right) + m_\pi^2 \left(1 - \frac{p_K}{p_\pi}\right) - p_K p_\pi \cdot \theta_{\pi K}^2$$



Wichtig:

Falls **Tochtereilchen kein π^+** , funktioniert die Rechnung die Rechnung nicht mehr! Stattdessen muss die Masse des tatsächlichen Tochtereilchens eingesetzt werden.

\rightarrow Die Teilchensorte muss identifiziert werden!

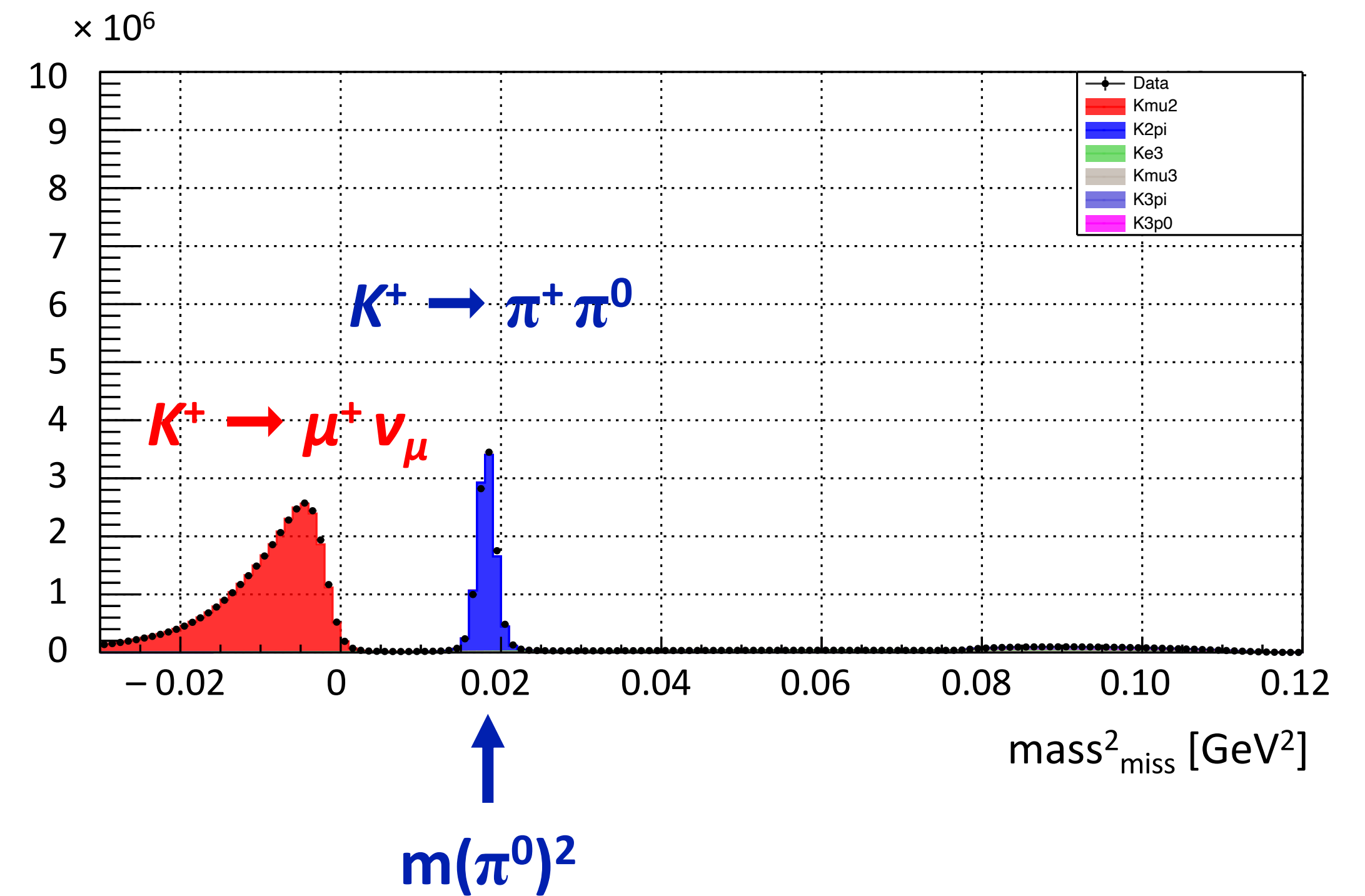
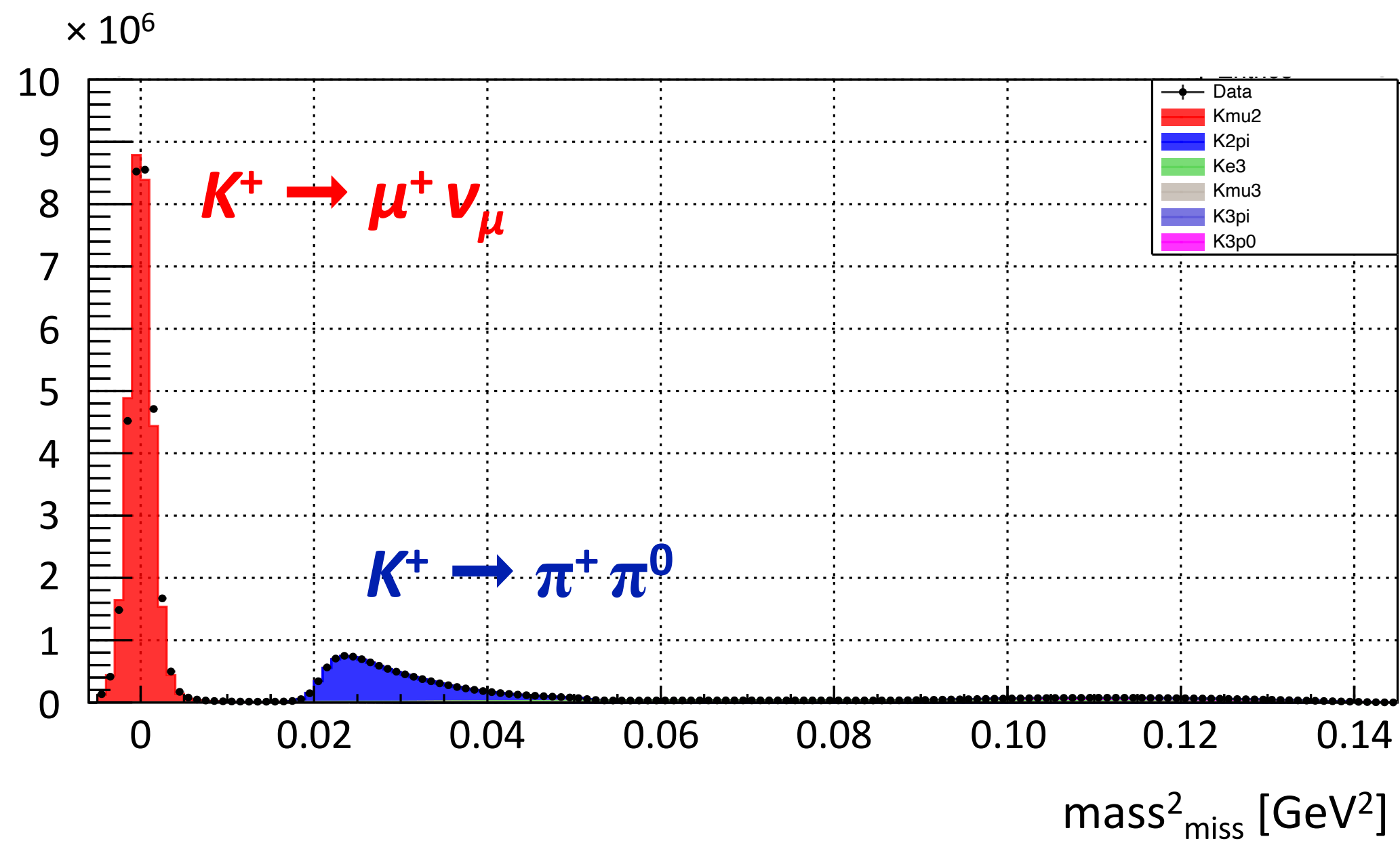
Was sehen wir?

Annahme:

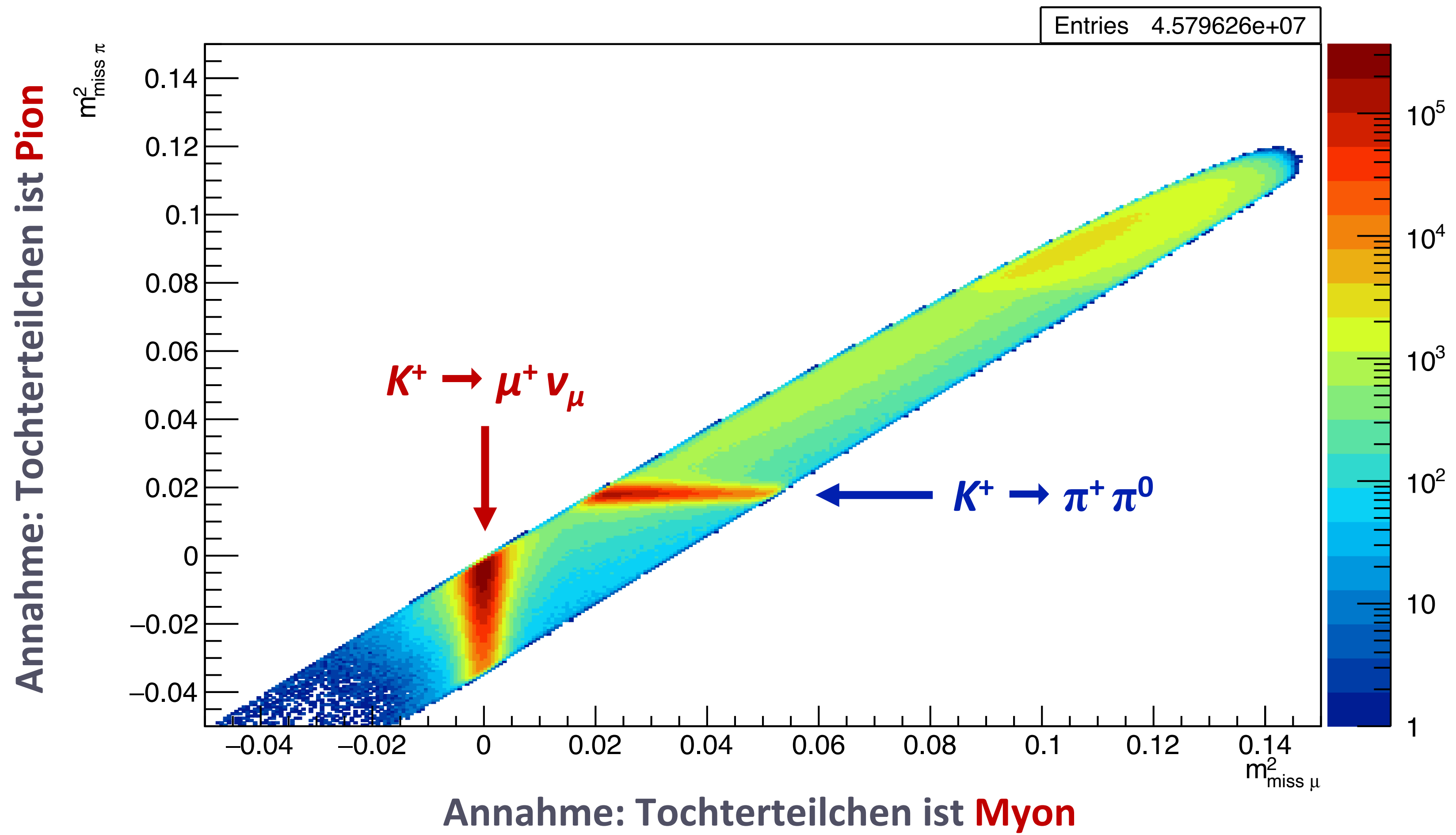
Tochterteilchen ist ein **Myon**.

Annahme:

Tochterteilchen ist ein **Pion**.



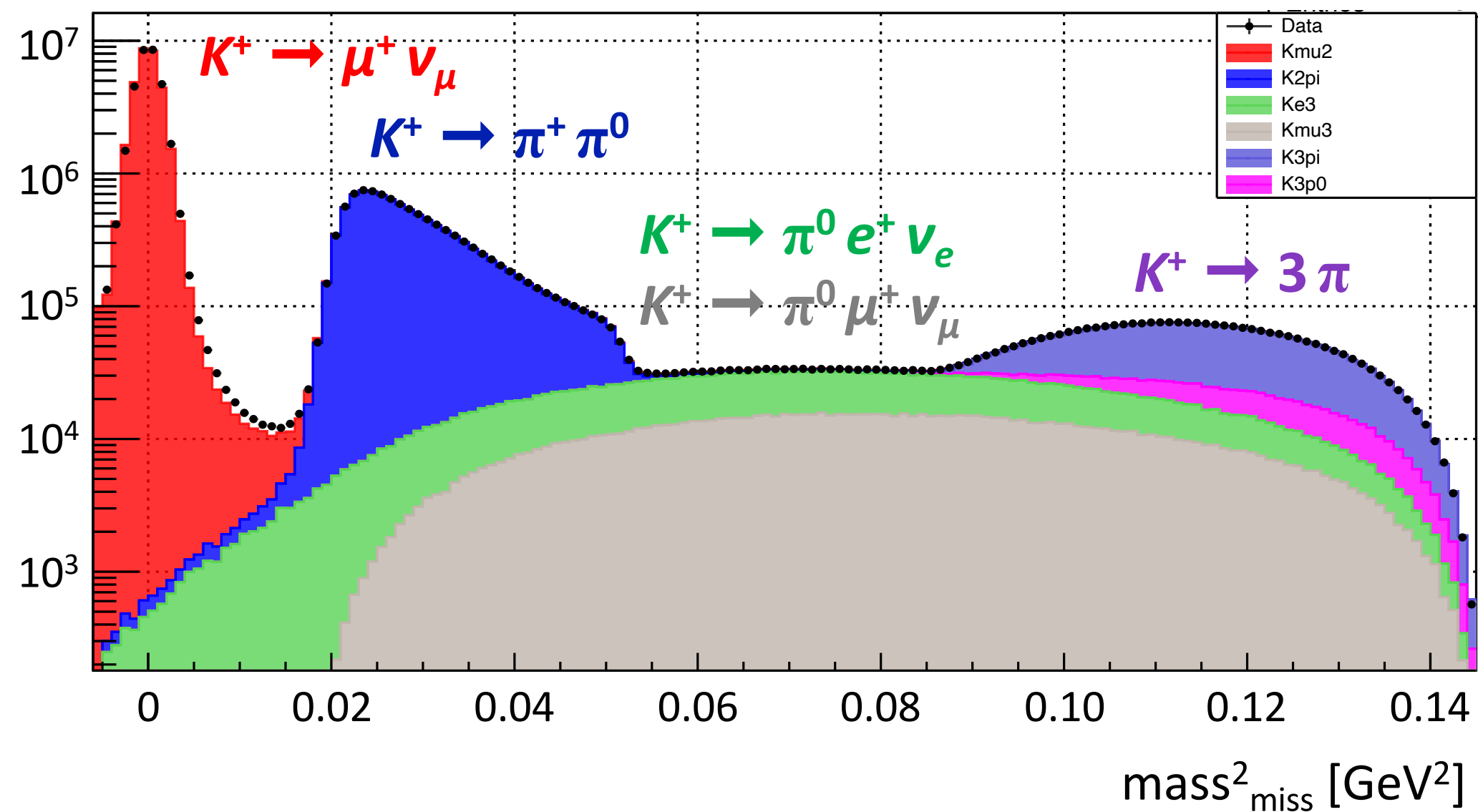
Was sehen wir?



Was sehen wir, wenn wir genauer hinschauen?

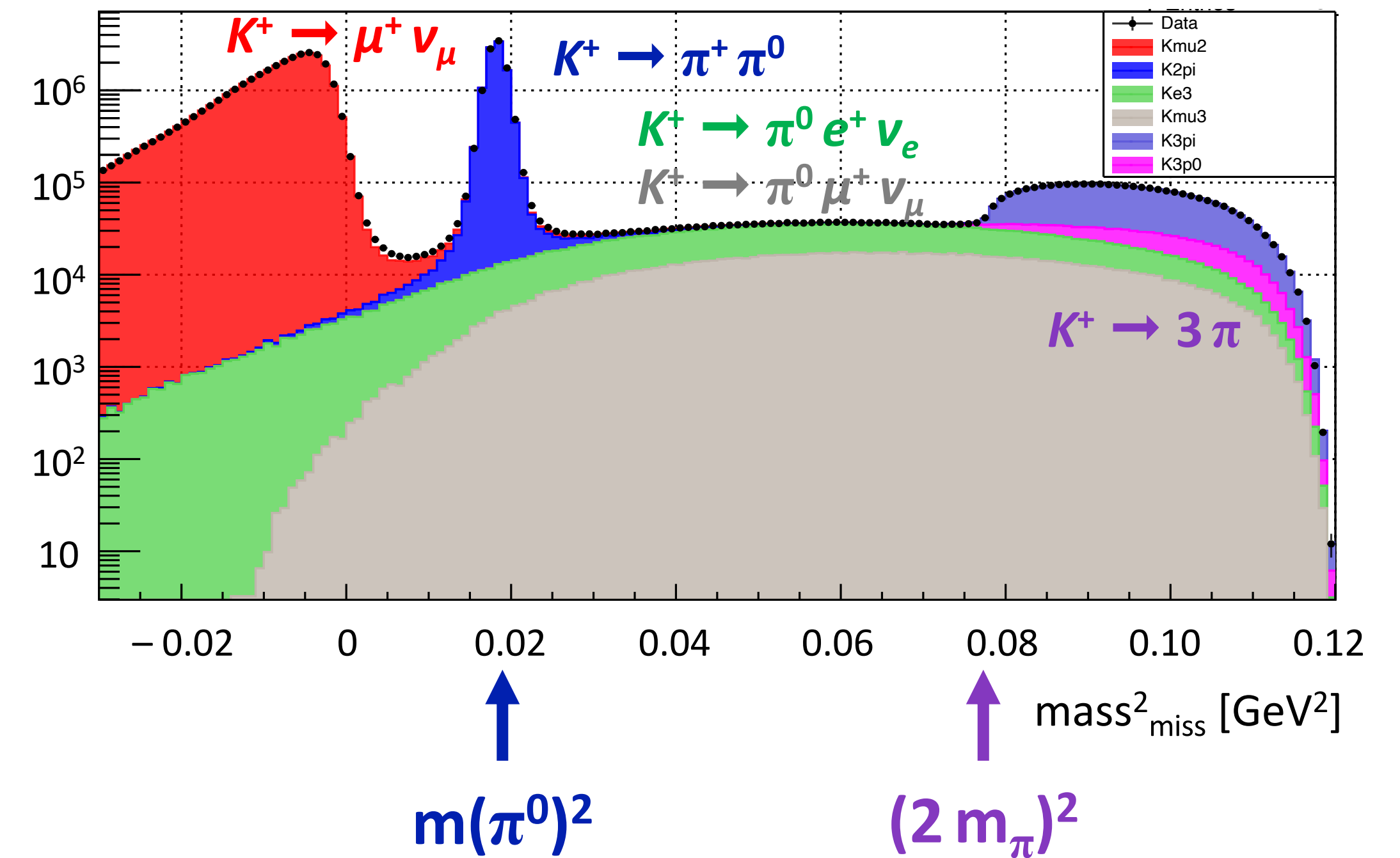
Annahme:

Tochtereilchen ist ein **Myon**.



Annahme:

Tochtereilchen ist ein **Pion**.



Wie sieht's aus?

- **Messung von NA62** noch nicht fertig (Mainzer Doktorand schuftet noch...)
→ Wird genaueste Messung der $K \rightarrow \pi e \nu$ -, $K \rightarrow \pi \mu \nu$ -Zerfallsraten.

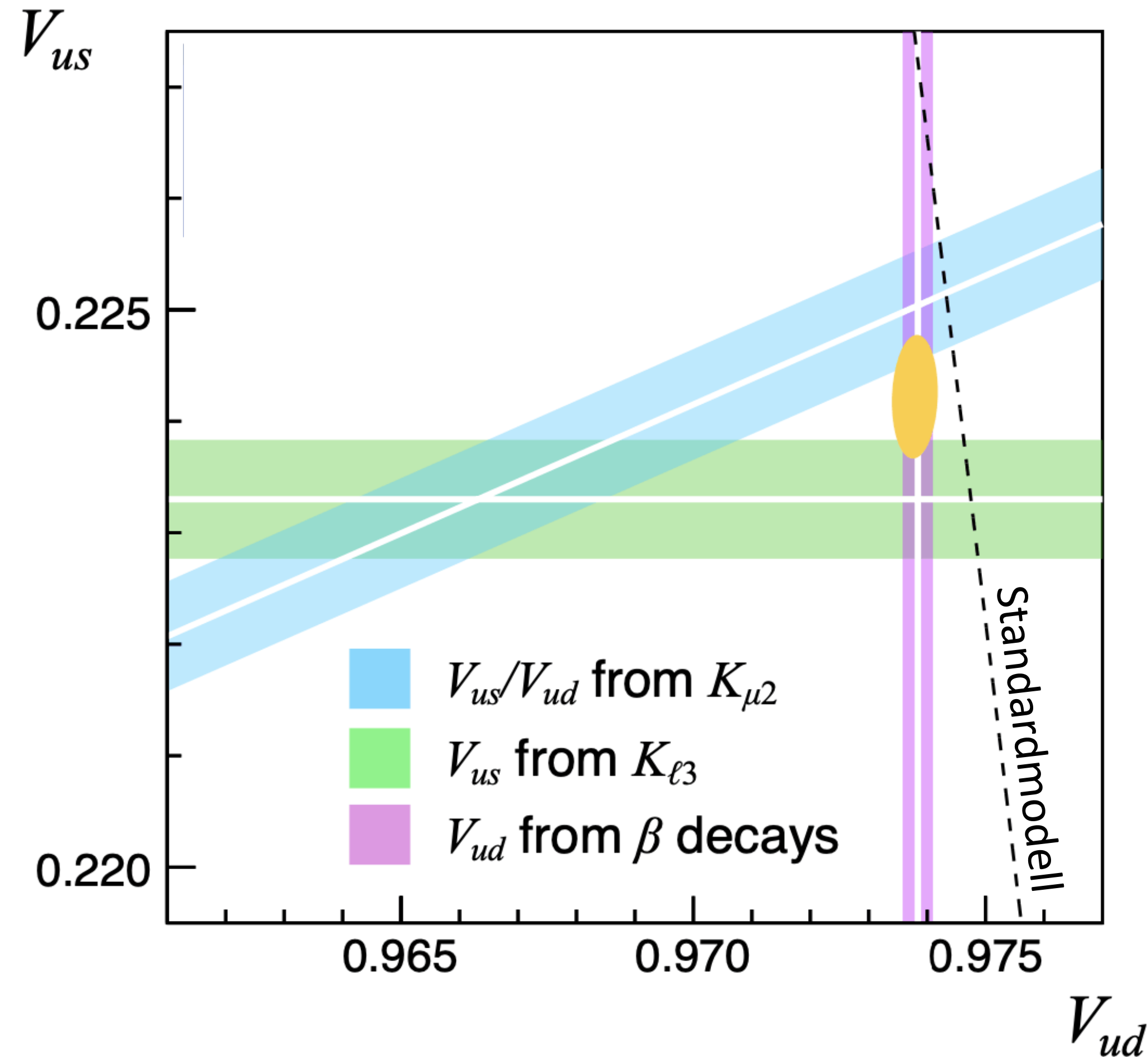
- **Bisherige Messungen** auch schon sehr gut:

$$|V_{us}| = 0.22330(53)$$

- Weitere Messung: $K \rightarrow \mu \nu$ - und $\pi \rightarrow \mu \nu$ -Zerfallsraten → Ergibt $|V_{us}|/|V_{ud}|$:

$$|V_{us}/V_{ud}| = 0.23108(51)$$

Und nun alles zusammen gepackt...:



- $|V_{ud}| = 0.97384(26)$ aus β -Zerfällen
- $|V_{us}| = 0.22330(53)$ aus $K \rightarrow \pi e \nu$ ($\pi \mu \nu$)
- $|V_{us}/V_{ud}| = 0.23108(51)$ aus $K \rightarrow \mu \nu / \pi \rightarrow \mu \nu$

Globaler Fit:

$$\begin{aligned}
 V_{ud} &= 0.97378(26) \\
 V_{us} &= 0.22422(36) \\
 \chi^2/\text{ndf} &= 6.4/2 \quad (4.1\%) \\
 \Delta_{\text{CKM}} &= -0.0018(6) \\
 &\quad \mathbf{-2.8\sigma}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 |V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2 + |V_{ub}|^2 &\stackrel{\approx 0}{=} 1 + \Delta_{\text{CKM}} \\
 &\quad \downarrow \\
 &\mathbf{Abweichung vom Standardmodell}
 \end{aligned}$$

Es bleibt spannend...