



HIGH INTENSITY KAON EXPERIMENTS ALL'SPS DEL CERN

RENATO FIORENZA

renato.fiorenza@cern.ch

IFAE 2023

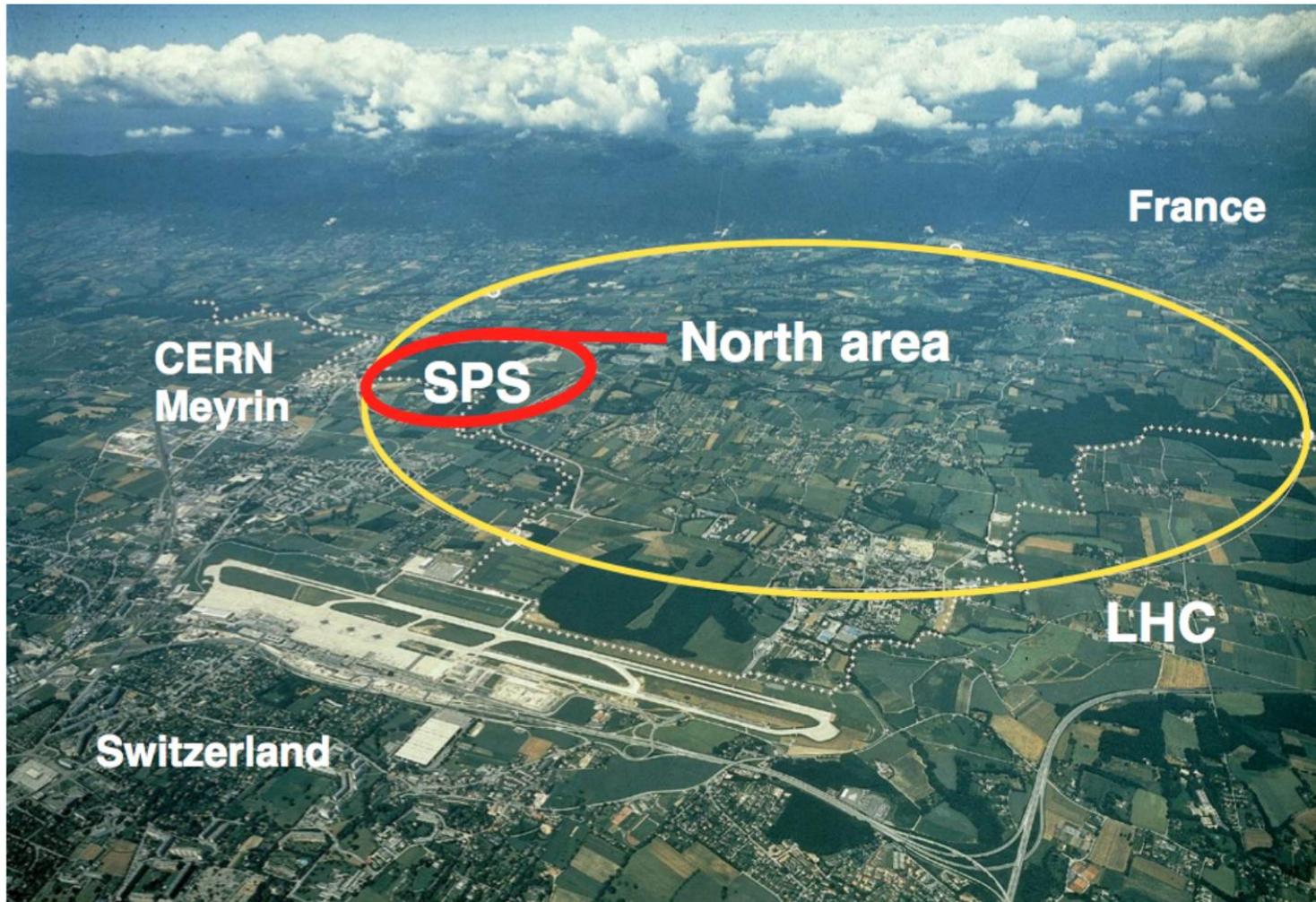
13/04/2023



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI
FEDERICO II



UNA STORIA DI IMPORTANTI SCOPERTE



NA3 I: K_S / K_L (1984-1990)

Prima prova di CPV nel settore K

NA48, NA48/I: K_S / K_L (1997-2002)

$\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$, decadimenti rari di K_S e iperoni

NA48/2: K^+ / K^- (2003-2004)

Violazione diretta di CP, decadimenti rari di K^\pm

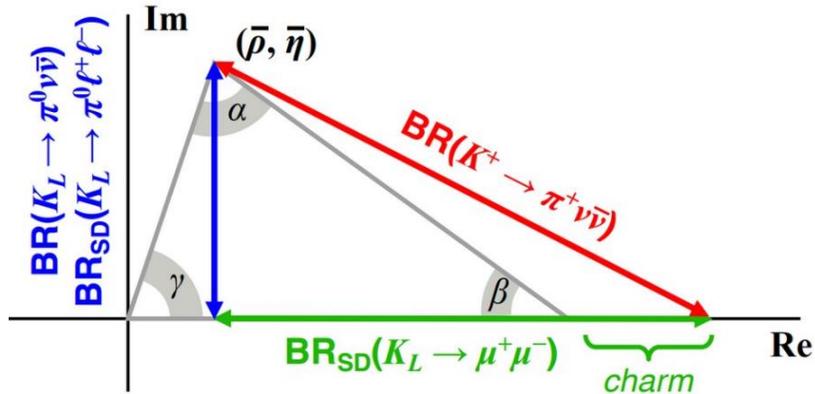
NA62: K^+ / K^- (2007-2008)

$R_K = \Gamma(K \rightarrow e\nu) / \Gamma(K \rightarrow \mu\nu)$

NA62: K^+ (2016-LS3)

$\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu})$,
misure di precisione, ...

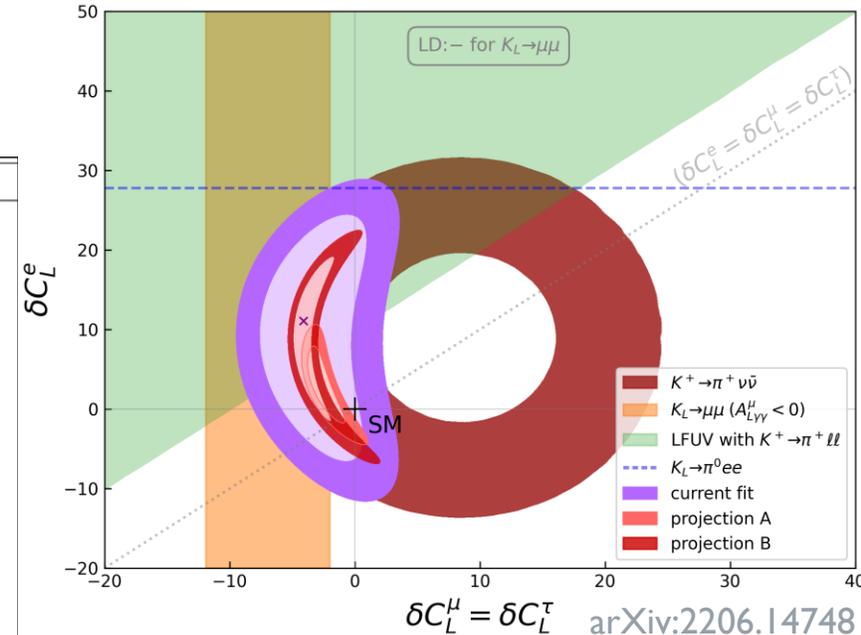
DECADIMENTI RARI DEI MESONI K



- Frazioni di decadimento strettamente legate alla CKM, calcolate con grande precisione
- Grande sensibilità a nuova fisica
- Capacità di discriminare tra diversi modelli di fisica oltre il Modello Standard

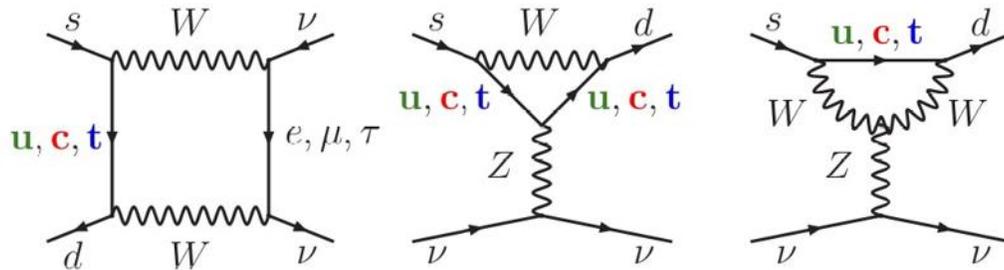
- Transizioni $s \rightarrow d\nu\bar{\nu}$, $s \rightarrow d\ell^+\ell^-$, soppresse dal meccanismo GIM
- Vincoli sul triangolo di unitarietà indipendenti dalla fisica dei mesoni B e D

NP scenarios	Process
Z-FCNC	$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$, ϵ'/ϵ
Z'	$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$, ϵ'/ϵ , ΔM_K
Simplified models	$K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$, ϵ'/ϵ
LHT	All K decays
331 models	Small effects in $K \rightarrow \pi \nu\bar{\nu}$
Vector-like quarks	$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$, ΔM_K
Supersymmetry	$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$
2HDM	$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$
Universal extra dimensions	$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$
Randall-Sundrum models	All rare K decays
Leptoquarks	All rare K decays
SMEFT	Several processes in K system
SU(8)	$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$
Diquarks	$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$, ϵ_K
Vector-like compositeness	$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu}$, $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\bar{\nu}$, ϵ_K



$\delta C_L^\mu = \delta C_L^\tau$ arXiv:2206.14748

$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$: IL CANALE D'ORO



- Dominato da corta distanza
- Fattore di forma adronico ottenuto dai decadimenti semileptonici

Predizioni teoriche

$$\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (8.4 \pm 1.0) \times 10^{-11}$$

$$\text{BR}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = (3.4 \pm 0.6) \times 10^{-11}$$

JHEP 11 (2015) 033

Precedenti risultati sperimentali

BNL E787/E949 Phys. Rev. D 79 (2009) 092004

$$\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (17.3_{-10.5}^{+11.5}) \times 10^{-11}$$

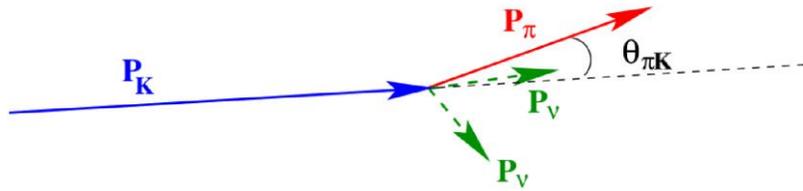
recentemente superato da NA62

KOTO, J-PARC Phys.Rev.Lett. 122 (2019), 021802

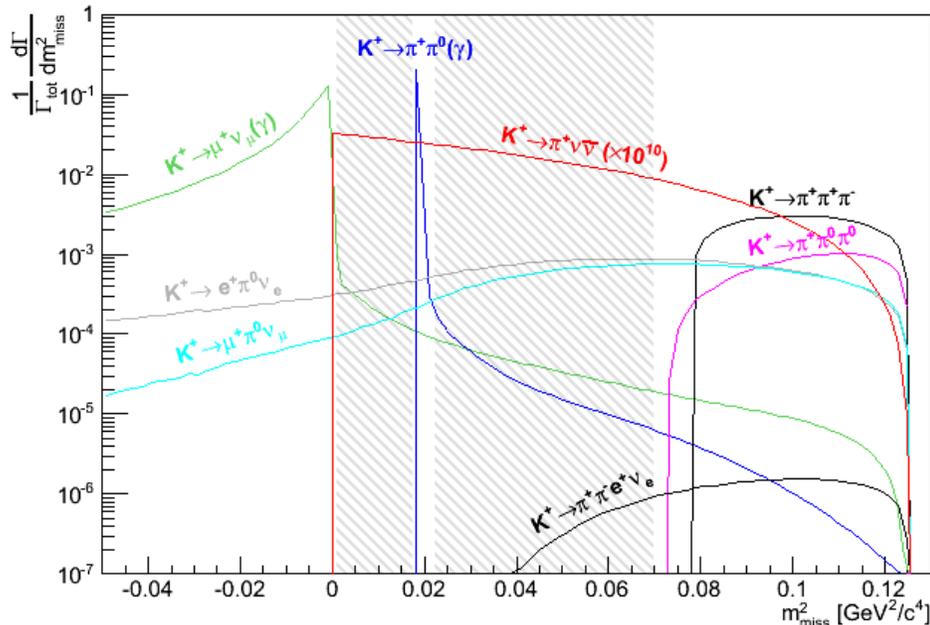
$$\text{BR}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 300 \times 10^{-11} @ 90\% \text{ CL}$$

in fase di presa dati

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ A NA62

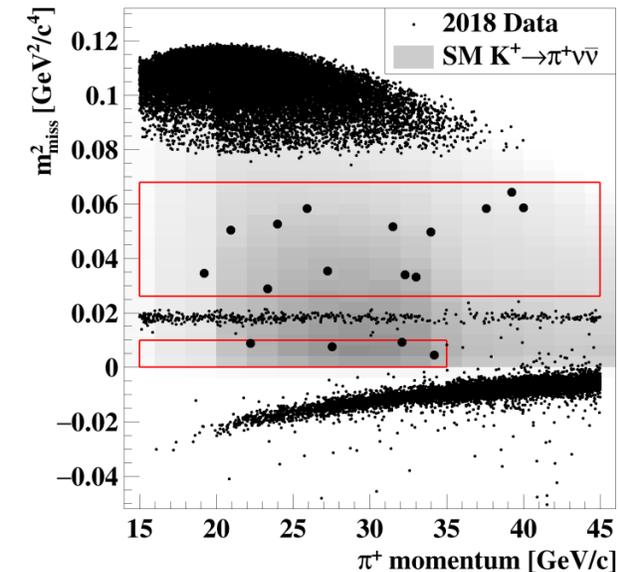


$$m_{miss}^2 = (P_K - P_\pi)^2$$



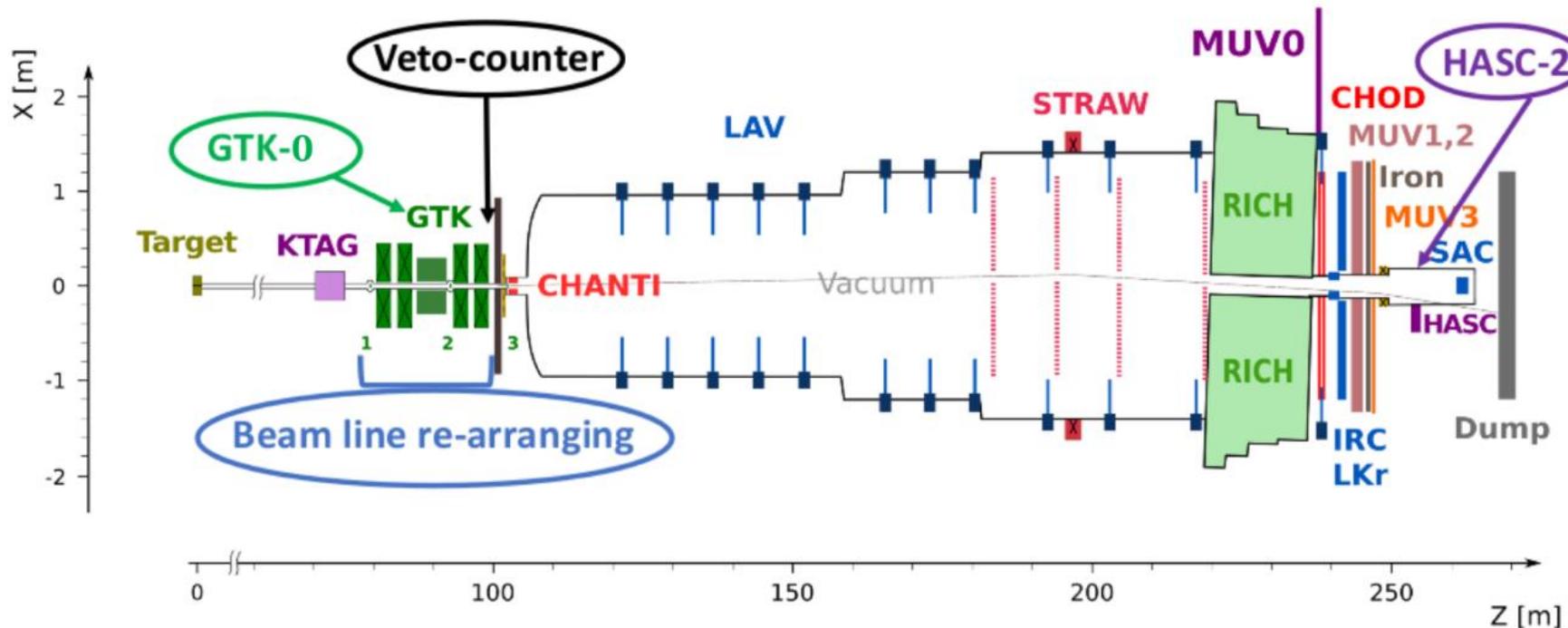
NA62 Run I (2016-2018):

- Single Event Sensitivity: $(0.839 \pm 0.053_{\text{syst}}) \times 10^{-11}$
- Eventi attesi dal MS: $10.01 \pm 0.42_{\text{syst}} \pm 1.19_{\text{ext}}$
- Eventi di fondo attesi: $7.03^{+1.05}_{-0.82}$
- Eventi osservati: 20
- Significanza: 3.4σ
- Misura di questo BR più precisa di sempre



$$\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10.6^{+4.0}_{-3.4} |_{\text{stat}} \pm 0.9_{\text{syst}}) \times 10^{-11}$$

NA62 DAL 2021 A LS3



- Miglioramenti nella ricostruzione del calorimetro elettromagnetico
- Ottimizzazioni nell'analisi

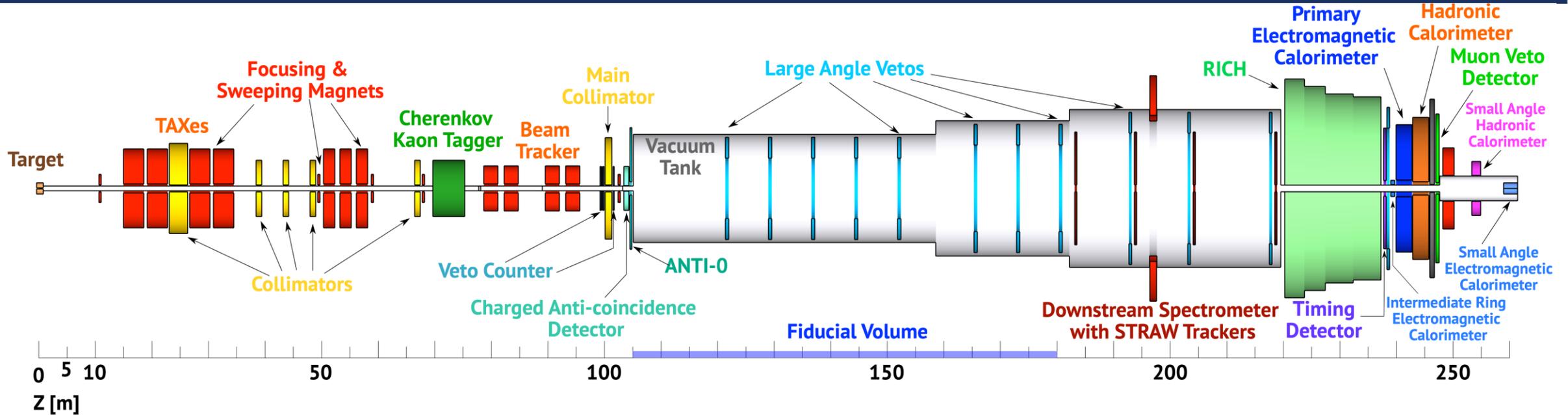
- Intensità aumentata da 60% a 100%
- Nuova stazione GTK
- VetoCounter rileva decadimenti a monte
- HASC-2 migliora reiezione $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$

Obiettivo: precisione $O(10\%)$ entro LS3

IL PROGRAMMA HIKE

- **Fase 1: Misura di $\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$ alla precisione $\mathcal{O}(5\%)$**
 - Studio dell'universalità leptonica: $R_K = \Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \nu) / \Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu)$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \ell \ell$, $K^+ \rightarrow \pi^- \ell^+ \ell^+$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu e$
- **Fase 2: Decadimenti rari del K_L con particelle visibili nello stato finale**
 - Studio di $K_L \rightarrow \pi^0 \ell \ell$: ricerca del segnale sfruttando ottima risoluzione per m_{π^0}
 - Fascio neutro, studio di flussi di K_L , n , Λ per caratterizzare il fascio
- **Fase 3 (KLEVER): Misura di $\text{BR}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$ alla precisione $\mathcal{O}(20\%)$**
- **Beam dump**: raccolta dati in modalità "dump", periodicamente durante fasi 1 e 2, per raccogliere fino a 5×10^{19} pot

HIKE, FASE I



Obiettivo: Misura di $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$ alla precisione $O(5\%)$

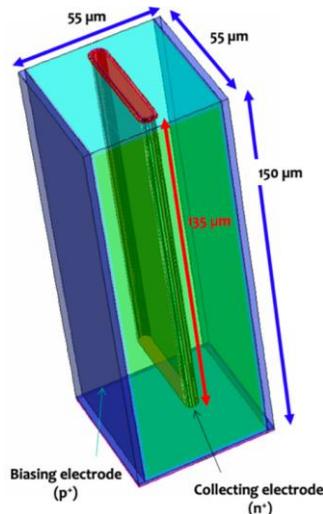
- Necessità di aumentare intensità (4x NA62)
- Schema NA62 per l'apparato, ma con rivelatori a risoluzione temporale $\sim 4x$ migliore
- Tenere sotto controllo random veto, budget di materiale, ecc.
- Caratteristiche necessarie anche durante le fasi successive

ALCUNE DELLE SFIDE TECNOLOGICHE

Gigatracker: tracciatore di fascio

- Deve sostenere **3 GHz** di intensità
- Risoluzione temporale < 50 ps per piano
- Pixel $< 300 \times 300 \mu\text{m}^2$
- Spessore $< 0.5\% X_0$
- Intensità locale massima 8 MHz/mm^2
- Resistenza alla radiazione

- Forte candidato:
TimeSPOT
- Pixel al silicio con 3D-trench
- Altre opzioni: LGAD o sensori monolitici

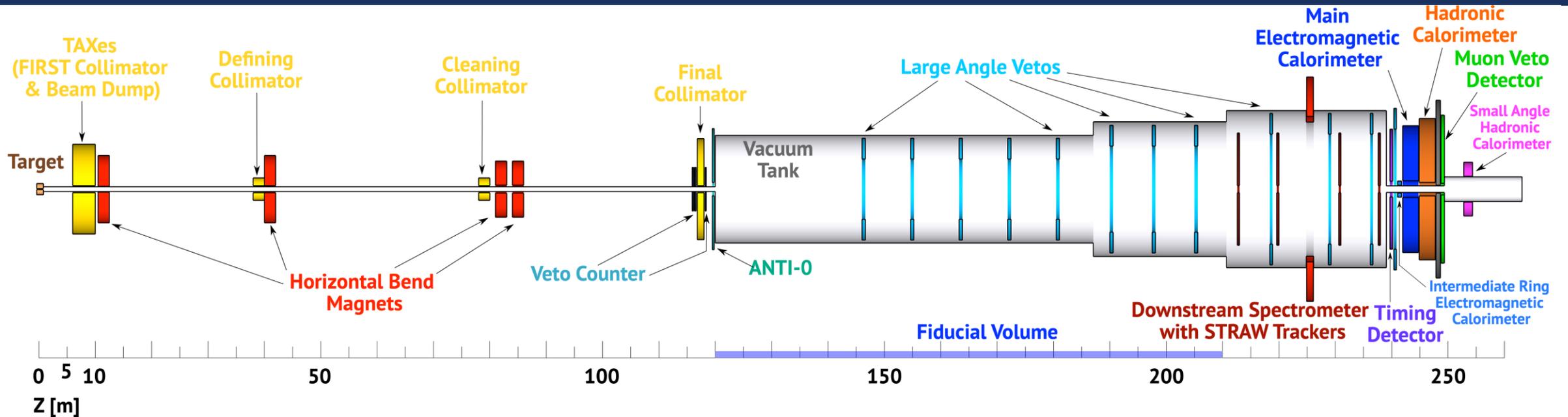


Spettrometro STRAW

- Ridotto diametro delle straw
- Miglioramento risoluzione spaziale e temporale
- Miglioramento resistenza a flussi elevati
- Studi di disegno al CERN e a Dubna
- 5mm diametro
- $\sigma_t^{\text{trailing}} \sim 6$ ns
- Spessore $< 1.5\% X_0$
- Potenzialmente risoluzione momento e angolo 10-20% migliore



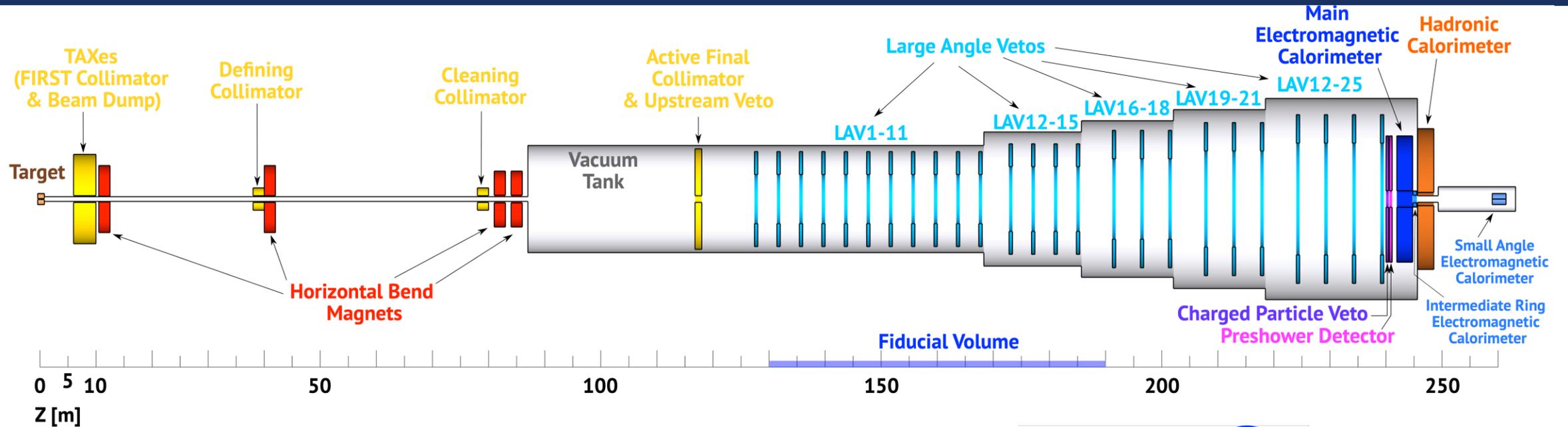
HIKE, FASE 2



Obiettivo: studio dei decadimenti rari del K_L con particelle visibili nello stato finale

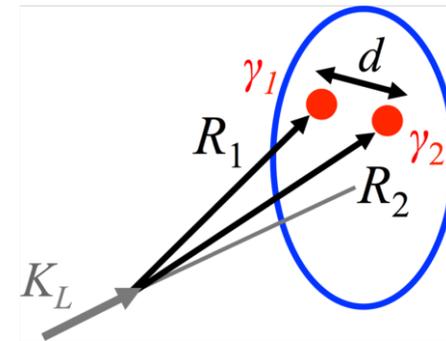
- Fascio neutro + tracciamento e identificazione di particelle nello stato finale
- $K_L \rightarrow \pi^0 \ell \ell$: sensibilità a frazioni di decadimento $O(10^{-11})$, probabile prima osservazione
- $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$: misura del BR con precisione statistica dell'ordine del permille
- Misure di precisione, violazione del sapore leptonic, decadimenti verso stati esotici
- Studio del fascio neutro, cruciale per la fase successiva

HIKE, FASE 3



Obiettivo: Misura di $BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$ alla precisione $O(20\%)$

- ~60 eventi MS con $S/B \sim 1$
- Intensità circa 6x NA62
- Complementare a KOTO (maggiore energia dei K_L)
- Necessità di estendere la linea di fascio di 150 m per sopprimere $\Lambda \rightarrow n\pi^0$



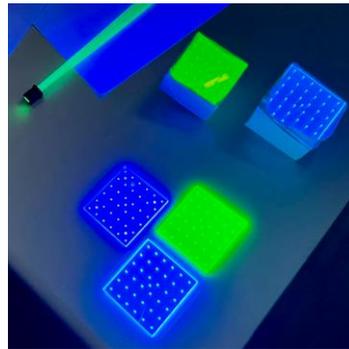
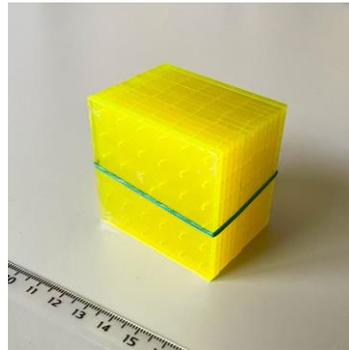
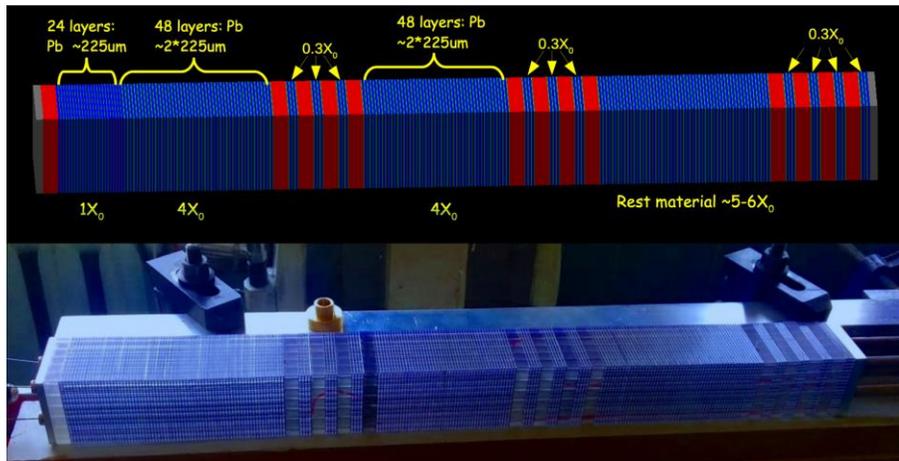
$$R_1 \approx R_2 \equiv R = \frac{d\sqrt{E_1 E_2}}{m_{\pi^0}}$$

$$m_{\pi^0}^2 = 2E_1 E_2 (1 - \cos \theta)$$

SFIDE DI CALORIMETRIA

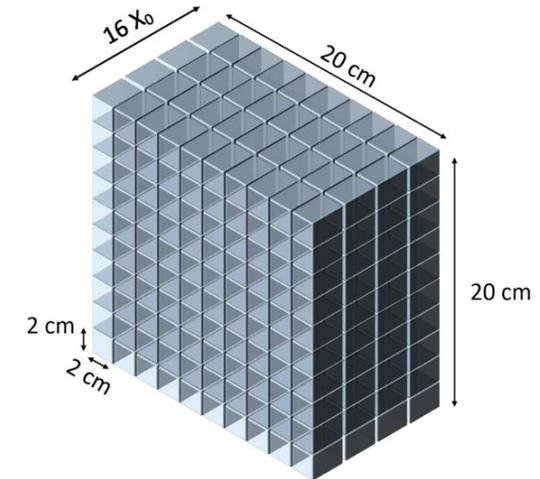
Main Electromagnetic Calorimeter

- Utilizzo di "spy tiles": campionamento longitudinale dello sciame
- Possibile utilizzo di NanoCal: scintillatori innovativi nanocompositi a base di quantum dot (luminosi, veloci, resistenti)



Small Angle Calorimeter

- Efficiente per fotoni (>99%), insensibile a neutroni del fascio (430 MHz)
- Cristallo ultra-rapido ad alto Z
- Segmentazione longitudinale per distinguere fotoni da neutroni



CONCLUSIONE

Fase 1: K^+	Obiettivo
$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$	5%
Fattori di forma $K^+ \rightarrow \pi^+ \ell \ell$	1%
$K^+ \rightarrow \pi^- \ell^+ \ell^+$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu e$	Sensibilità $O(10^{-12})$
$R_K = \Gamma(K \rightarrow e \nu) / \Gamma(K \rightarrow \mu \nu)$	0.1%
Fase 2: ibrida	
$K_L \rightarrow \pi^0 \ell \ell$	osservazione
$BR(K_L \rightarrow \mu \mu)$	< 1%
$K_L \rightarrow (\pi^0) \mu e$	Sensibilità $O(10^{-12})$
Fase 3 (KLEVER): K_L	
$BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$	20%

- I decadimenti rari dei mesoni K sono estremamente sensibili a nuova fisica ad alta energia
- K^+ e K_L sono complementari per discriminare tra modelli di nuova fisica
- Alta intensità è necessaria per poter raggiungere sensibilità estreme
- Lo sviluppo di nuovi rivelatori con tecnologie all'avanguardia sarà cruciale per la ricerca di fisica oltre il Modello Standard

HIKE, High Intensity Kaon Experiments
at the CERN SPS

Letter of Intent

The HIKE Collaboration



Abstract

A timely and long-term programme of kaon decay measurements at a new level of precision is presented, leveraging the capabilities of the CERN Super Proton Synchrotron (SPS). The proposed programme is firmly anchored on the experience built up studying kaon decays at the SPS over the past four decades, and includes rare processes, CP violation, dark sectors, symmetry tests and other tests of the Standard Model. The experimental programme is based on a staged approach involving experiments with charged and neutral kaon beams, as well as operation in beam-dump mode. The various phases will rely on a common infrastructure and set of detectors.

arXiv:2211.16586

CERN-SPSC-2022-031 / SPSC-I.257
07/11/2022

CONCLUSIONE

Fase 1: K^+	Obiettivo
$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$	5%
Fattori di forma $K^+ \rightarrow \pi^+ \ell \ell$	1%
$K^+ \rightarrow \pi^- \ell^+ \ell^+$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \mu e$	Sensibilità $O(10^{-12})$
$R_K = \Gamma(K \rightarrow e \nu) / \Gamma(K \rightarrow \mu \nu)$	0.1%
Fase 2: ibrida	
$K_L \rightarrow \pi^0 \ell \ell$	osservazione
$BR(K_L \rightarrow \mu \mu)$	< 1%
$K_L \rightarrow (\pi^0) \mu e$	Sensibilità $O(10^{-12})$
Fase 3 (KLEVER): K_L	
$BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$	20%

- I decadimenti rari dei mesoni K sono estremamente sensibili a nuova fisica ad alta energia
- K^+ e K_L sono complementari per discriminare tra modelli di nuova fisica
- Alta intensità è necessaria per poter raggiungere sensibilità estreme
- Lo sviluppo di nuovi rivelatori con tecnologie all'avanguardia sarà cruciale per la ricerca di fisica oltre il Modello Standard

GRAZIE!

HIKE, High Intensity Kaon Experiments
at the CERN SPS

Letter of Intent

The HIKE Collaboration



Abstract

A timely and long-term programme of kaon decay measurements at a new level of precision is presented, leveraging the capabilities of the CERN Super Proton Synchrotron (SPS). The proposed programme is firmly anchored on the experience built up studying kaon decays at the SPS over the past four decades, and includes rare processes, CP violation, dark sectors, symmetry tests and other tests of the Standard Model. The experimental programme is based on a staged approach involving experiments with charged and neutral kaon beams, as well as operation in beam-dump mode. The various phases will rely on a common infrastructure and set of detectors.

arXiv:2211.16586



BACKUP



PROGRESSI TEORICI RECENTI

$$\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (8.60 \pm 0.42) \times 10^{-11}$$

$$\text{BR}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = (2.94 \pm 0.15) \times 10^{-11}$$

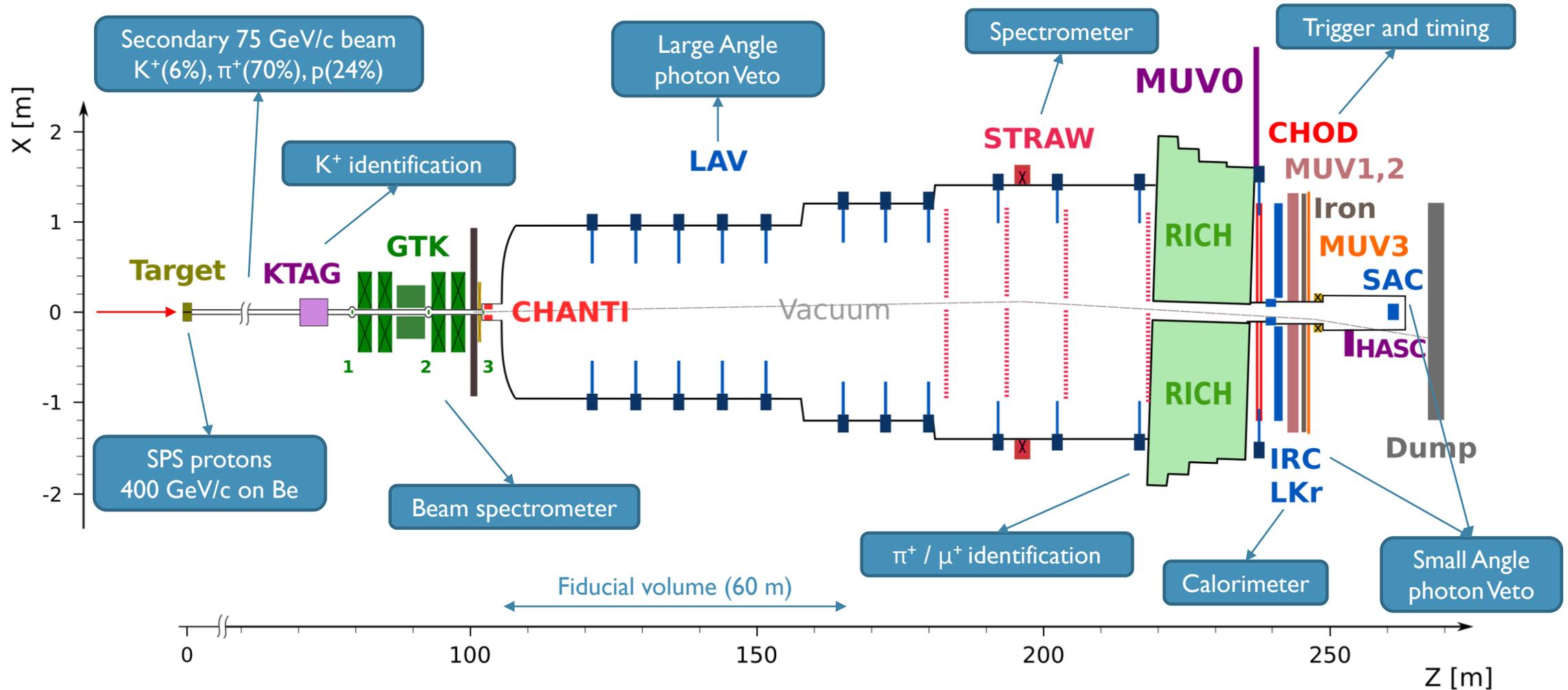
Acta Phys. Polon. B 53.6 (2021) A1

$$\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (7.73 \pm 0.61) \times 10^{-11}$$

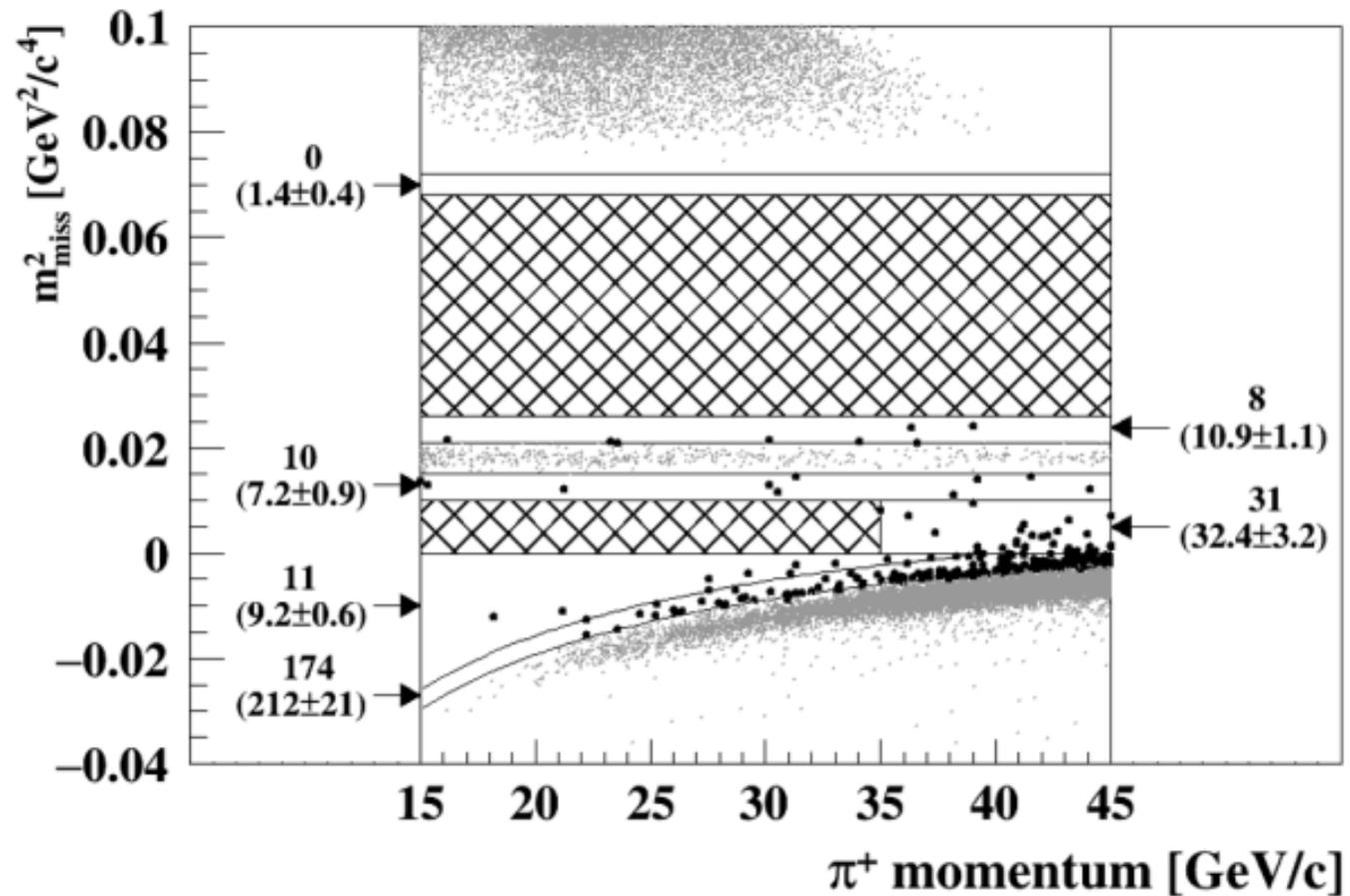
$$\text{BR}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = (2.59 \pm 0.29) \times 10^{-11}$$

PoS BEAUTY2020 (2021) 056

APPARATO SPERIMENTALE DI NA62



EXPECTED BACKGROUND SUMMARY



Background	Subset S1	Subset S2
$\pi^+\pi^0$	0.23 ± 0.02	0.52 ± 0.05
$\mu^+\nu$	0.19 ± 0.06	0.45 ± 0.06
$\pi^+\pi^-\nu$	0.10 ± 0.03	0.41 ± 0.10
$\pi^+\pi^+\pi^-$	0.05 ± 0.02	0.17 ± 0.08
$\pi^+\gamma\gamma$	< 0.01	< 0.01
$\pi^0l^+\nu$	< 0.001	< 0.001
Upstream	$0.54^{+0.39}_{-0.21}$	$2.76^{+0.90}_{-0.70}$
Total	$1.11^{+0.40}_{-0.22}$	$4.31^{+0.91}_{-0.72}$

SINGLE EVENT SENSITIVITY

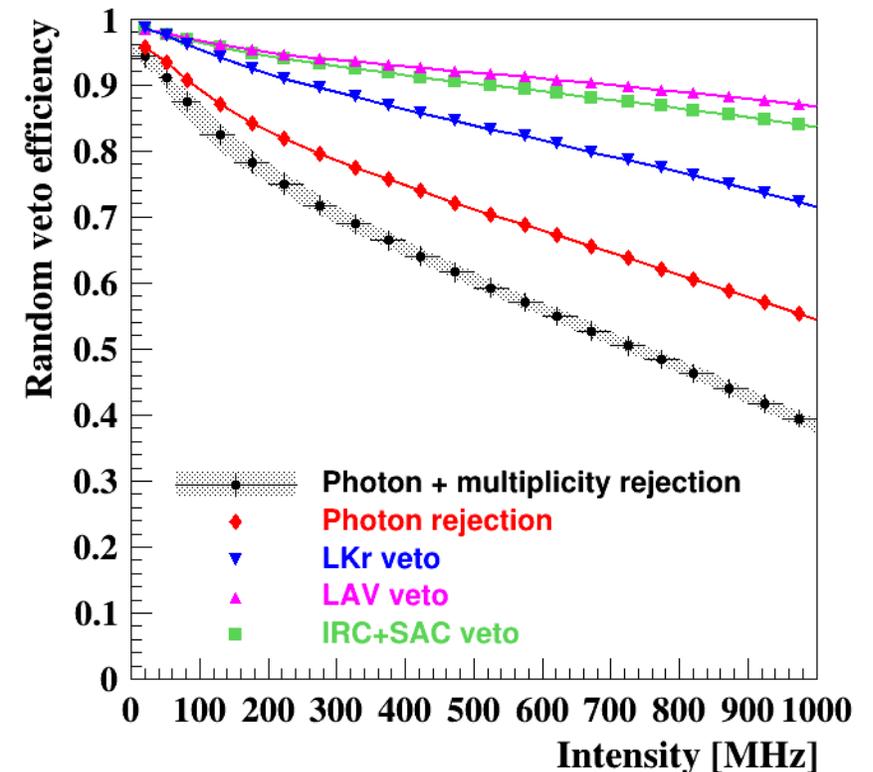
$$N_{\pi\nu\nu}^{\text{exp}} = N_{\pi\pi} \epsilon_{\text{trig}}^{\text{PNN}} \epsilon_{\text{RV}} \frac{A_{\pi\nu\nu}}{A_{\pi\pi}} \frac{\text{BR}(\pi\nu\nu)}{\text{BR}(\pi\pi)}$$

$$\text{SES} = \frac{\text{BR}(\pi\nu\nu)}{N_{\pi\nu\nu}^{\text{exp}}}$$

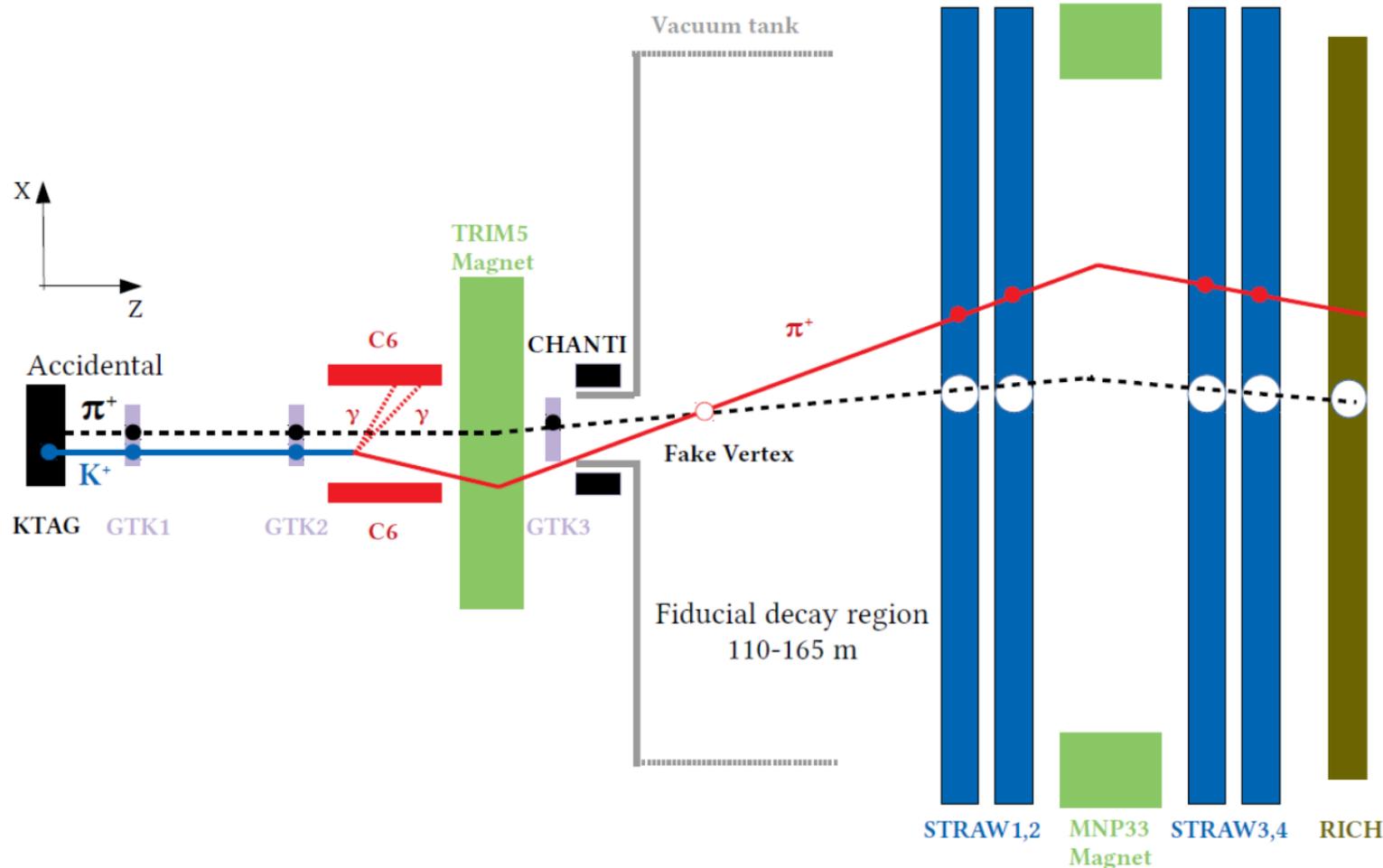
	Subset S1 *	Subset S2 *
$N_{\pi\pi} \times 10^{-7}$	3.14	11.6
$A_{\pi\pi} \times 10^2$	7.62 ± 0.77	11.77 ± 1.18
$A_{\pi\nu\nu} \times 10^2$	3.95 ± 0.40	6.37 ± 0.64
$\epsilon_{\text{trig}}^{\text{PNN}}$	0.89 ± 0.05	0.89 ± 0.05
ϵ_{RV}	0.66 ± 0.01	0.66 ± 0.01
$\text{SES} \times 10^{10}$	0.54 ± 0.04	0.14 ± 0.01
$N_{\pi\nu\nu}^{\text{exp}}$	$1.56 \pm 0.10 \pm 0.19_{\text{ext}}$	$6.02 \pm 0.39 \pm 0.72_{\text{ext}}$

* different hardware configurations

- $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ normalization channel
- Cancellation of systematic effects
- Random Veto: efficiency loss due to beam activity

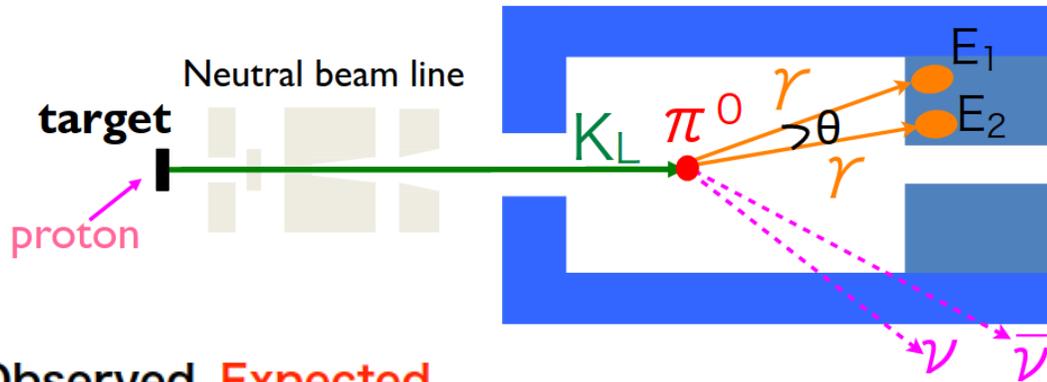


UPSTREAM BACKGROUND

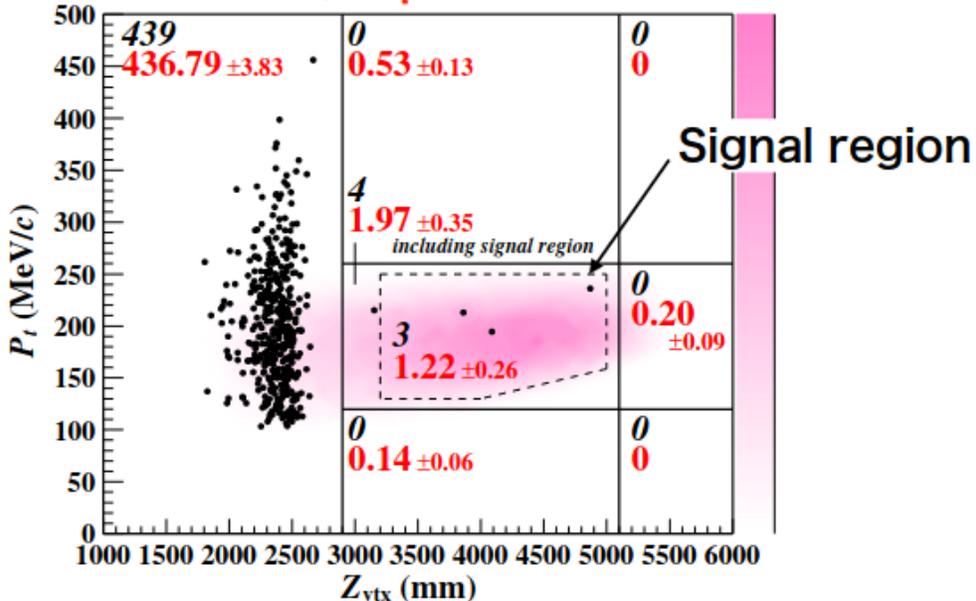


- Pions produced upstream of the fiducial volume
 - Early kaon decays
 - Interaction of beam particles with beam spectrometer material
- Fake association of detected pions to accidental particles
- New collimator installed in June 2018
- Geometrical cuts & BDT cut on backtracked pion position
- Kaon-pion association effective
- Data-driven background estimation

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$: THE KOTO EXPERIMENT AT J-PARC



Observed, Expected



2015 dataset Phys.Rev.Lett. 122, 021802

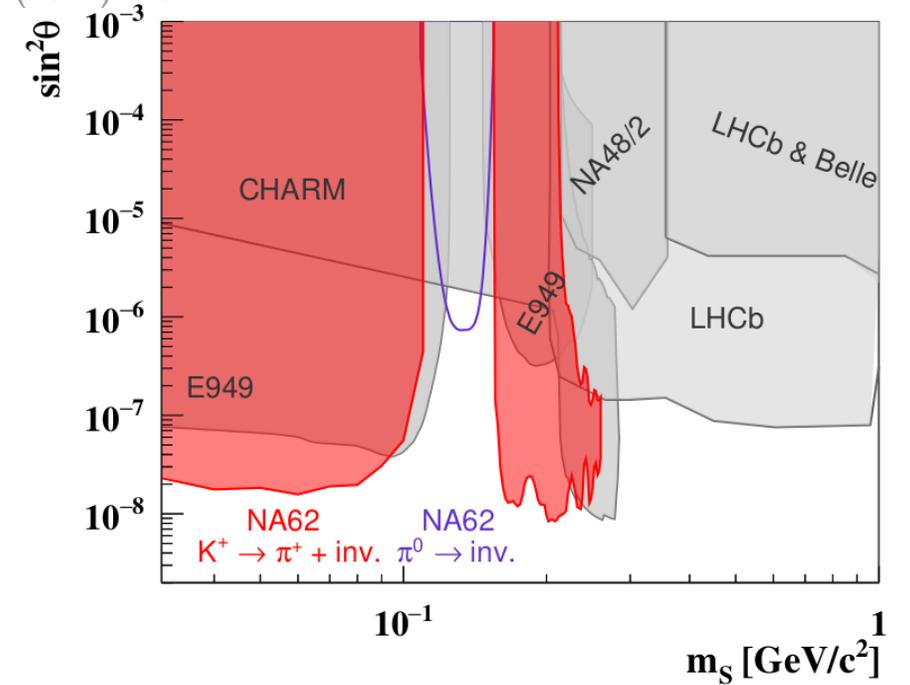
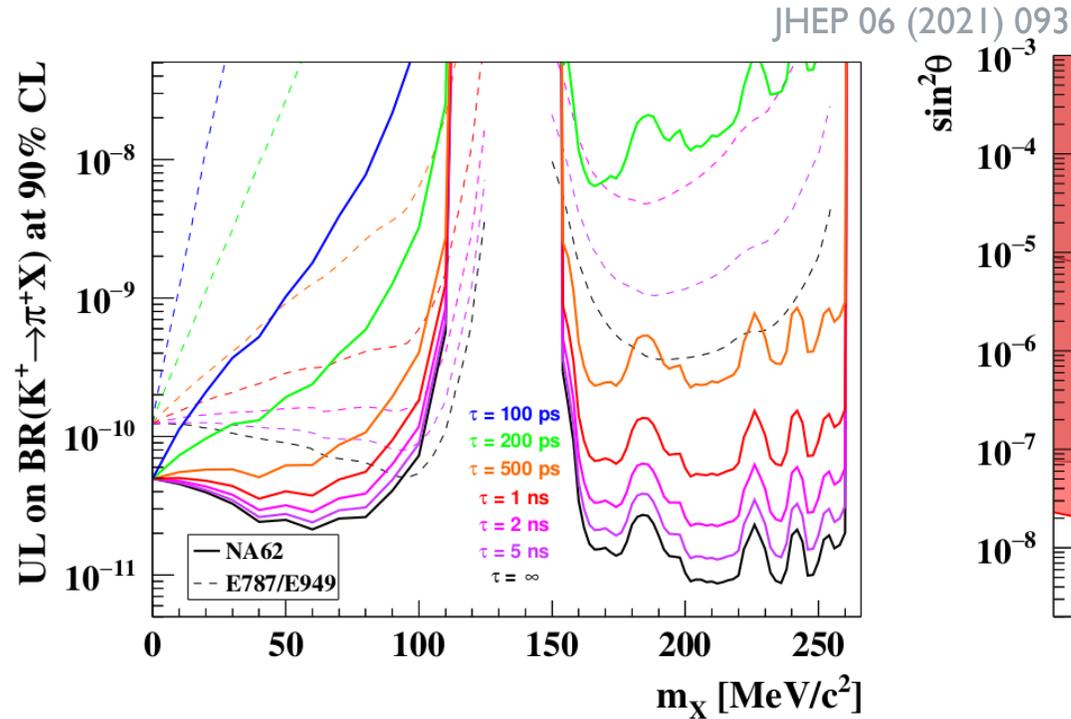
- $SES = (1.30 \pm 0.01_{\text{stat}} \pm 0.14_{\text{syst}}) \times 10^{-9}$
- 0 observed events
- $BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 3.0 \times 10^{-9}$ @ 90% C.L.

2016 – 2018 dataset Phys.Rev.Lett. 126, 121801

- $SES = (7.20 \pm 0.05_{\text{stat}} \pm 0.66_{\text{syst}}) \times 10^{-10}$
- 3 observed events
- 1.22 ± 0.26 expected background events
- $BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 4.9 \times 10^{-9}$ @ 90% C.L.

$$K^+ \rightarrow \pi^+ X$$

- Peak search in m^2_{miss} distribution
- Width from resolution
- Main background: SM $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$
- Acceptance from MC simulation



- Limits with **finite lifetime**: assume decay to visible particles in geometric acceptance
- Interpretation in **dark scalar** model with mixing with Higgs ($\sin^2 \theta$)