



IFAE 2024

Incontri di Fisica delle Alte Energie

Firenze, 3-5 Aprile 2024
Istituto degli Innocenti, Piazza SS. Annunziata



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
SEZIONE DI FIRENZE



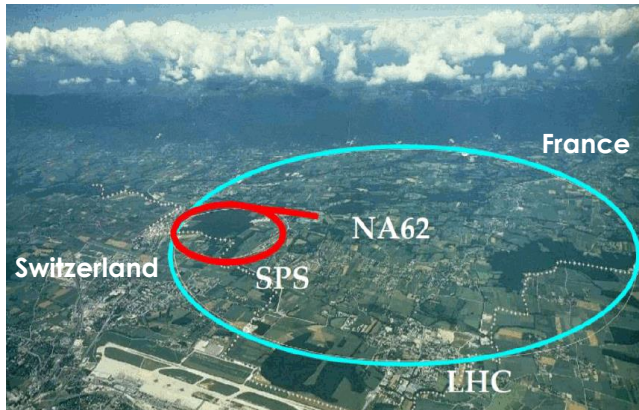
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

NUOVI RISULTATI DALLE ANALISI DEI DECADIMENTI RARI DEI K E DEI π ALL'ESPERIMENTO NA62

Ilaria Panichi

INFN and Università degli Studi di Firenze,
per la Collaborazione 

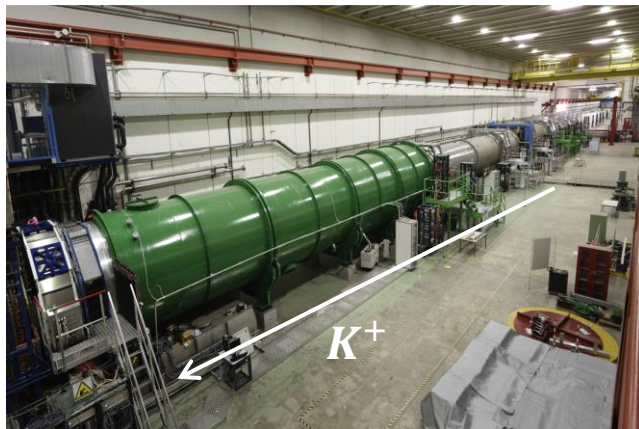
L'ESPERIMENTO NA62



- ❖ Esperimento a bersaglio fisso al SPS del CERN dedicato ai decadimenti rari del K^+
- ❖ Ricostruzione in volo dei decadimento del K^+
- ❖ Dati di fisica raccolti nel 2016-2017-2018 (Run1) e 2021-2022-2023 (a oggi – Run2)
- ❖ Scopo principale: misurare $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$, *golden channel* per la fisica del *flavour*

$$BR_{MS}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (7.86 \pm 0.61) \times 10^{-11} \quad [\text{JHEP09(2022)148, JHEP11(2015)033}]$$

$$BR_{NA62 \text{ Run1}}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10.6_{-3.4}^{+4.0} \text{stat} \pm 0.9_{\text{syst}}) \times 10^{-11} \text{ al } 68\% \text{ CL } (3.4 \sigma \text{ significance}) \\ [\text{JHEP06(2021)093}]$$



- ❖ ma il programma di fisica è molto più vasto, es:
 - **misure di precisione del MS:** $\pi^0 \rightarrow e^+ e^-$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma \rightarrow$ **OGGI**
 - ricerca di NF tramite i processi LFV ($K^+ \rightarrow \pi^+ l_1^+ l_2^-$) e LNV ($K^+ \rightarrow \pi^- l^+ l^+$)
 - fisica dell'Hidden Sector: ricerca diretta di NF al di sotto della scala elettrodebole nei decadimenti del K^+ e in un programma di *beam-dump* dedicato
 - ...

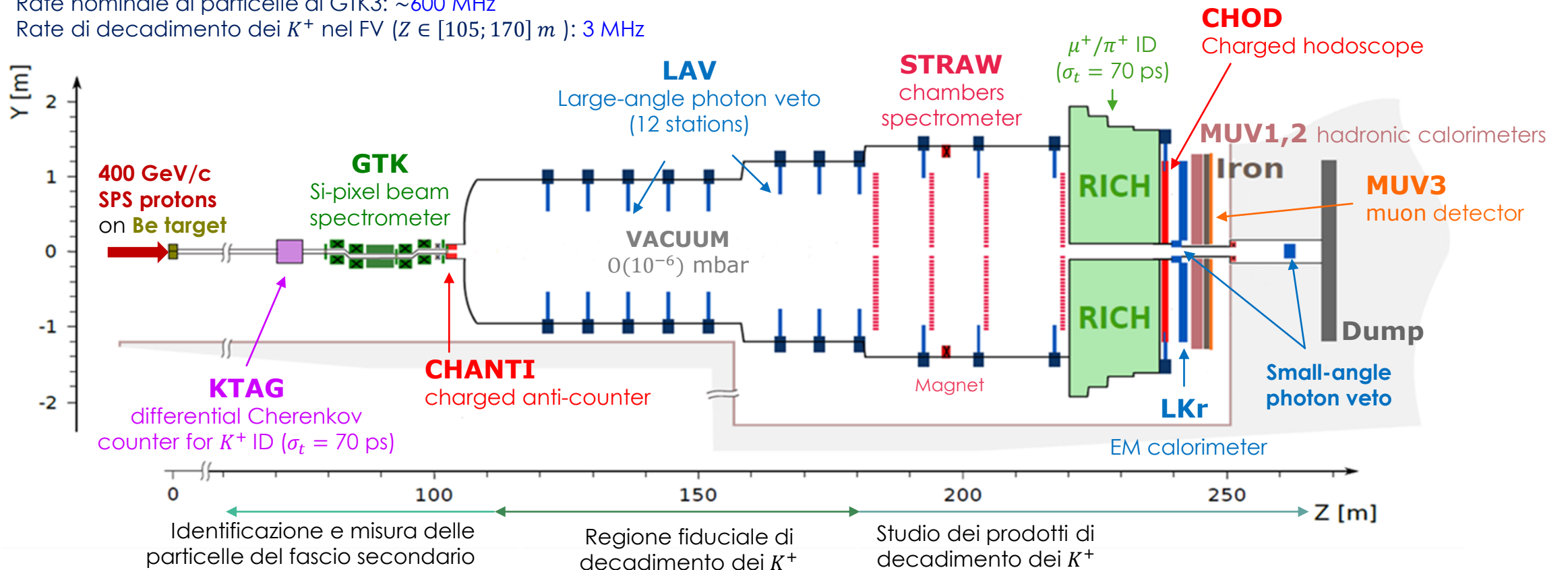
L'APPARATO SPERIMENTALE DI NA62

(PROGETTATO E OTTIMIZZATO PER LO STUDIO DEL $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$)

[JINST 12 (2017) P05025]

Fascio secondario:

- ❖ $(70\%)\pi^+, (24\%)p, (6\%)K^+$ non separati selezionati a $75 \text{ GeV}/c$ ($\Delta p/p \sim 1,1\%$)
- ❖ Rate nominale di particelle al GTK3: $\sim 600 \text{ MHz}$
- ❖ Rate di decadimento dei K^+ nel FV ($Z \in [105; 170] \text{ m}$): 3 MHz



RICERCA DEL DECADIMENTO $\pi^0 \rightarrow e^+ e^-$ A NA62
(RISULTATO PRELIMINARE)

$\pi^0 \rightarrow e^+ e^-$: STATO DELL'ARTE

❖ Osservabile sperimentale:

$$BR(\pi^0 \rightarrow e^+ e^-(\gamma), x > x_{taglio}), \quad x = (P_{e^+} + P_{e^-})^2 / m_{\pi^0}^2 = m_{ee}^2 / m_{\pi^0}^2$$

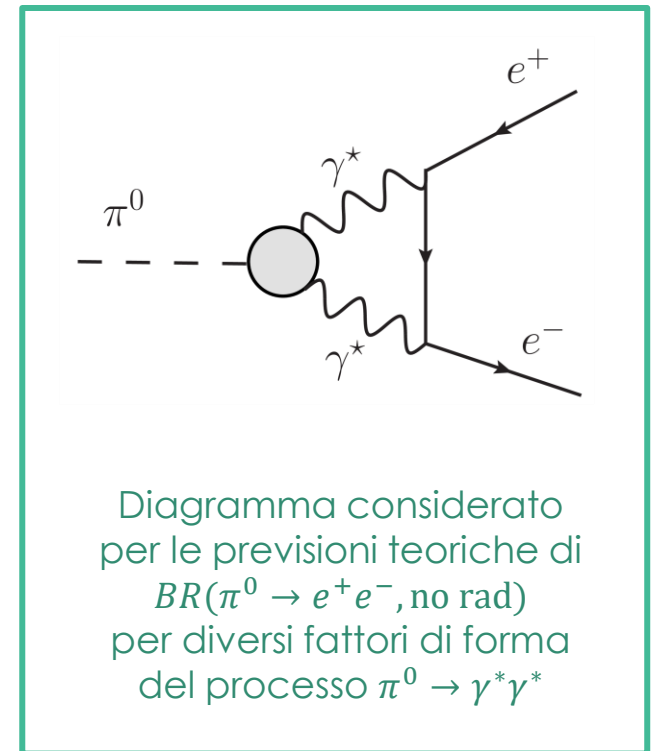
- ❖ il decadimento Dalitz del π^0 ($\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^- \equiv \pi_D^0$) domina a basse x
- ❖ per $x > x_{taglio} = 0.95$, π^0 Dalitz $\sim 3.3\%$ di $BR(\pi^0 \rightarrow e^+ e^-(\gamma))$

❖ Miglior misura presente ([Phys.Rev.D 75(2007)012004]):

$$BR_{KTeV}(\pi^0 \rightarrow e^+ e^-(\gamma), x > 0.95) = (6.44 \pm 0.25_{stat} \pm 0.22_{sys}) \times 10^{-8}$$

❖ Per confrontare il risultato sperimentale con la teoria è necessario considerare le correzioni radiative (calcoli più recenti in [JHEP10(2011)122], [Eur.Phys.J.C 74(2014)8,3010])

	$BR(\pi^0 \rightarrow e^+ e^-, \text{no rad}) \times 10^8$
KTeV, PRD 75 (2007)	6.84(35)
Knecht et al., PRL 83 (1999)	6.2(3)
Dorokhov and Ivanov, PRD 75 (2007)	6.23(9)
Husek and Leupold, EPJC 75 (2015)	6.12(6)
Hoferichter et al., PRL 128 (2022)	6.25(3)



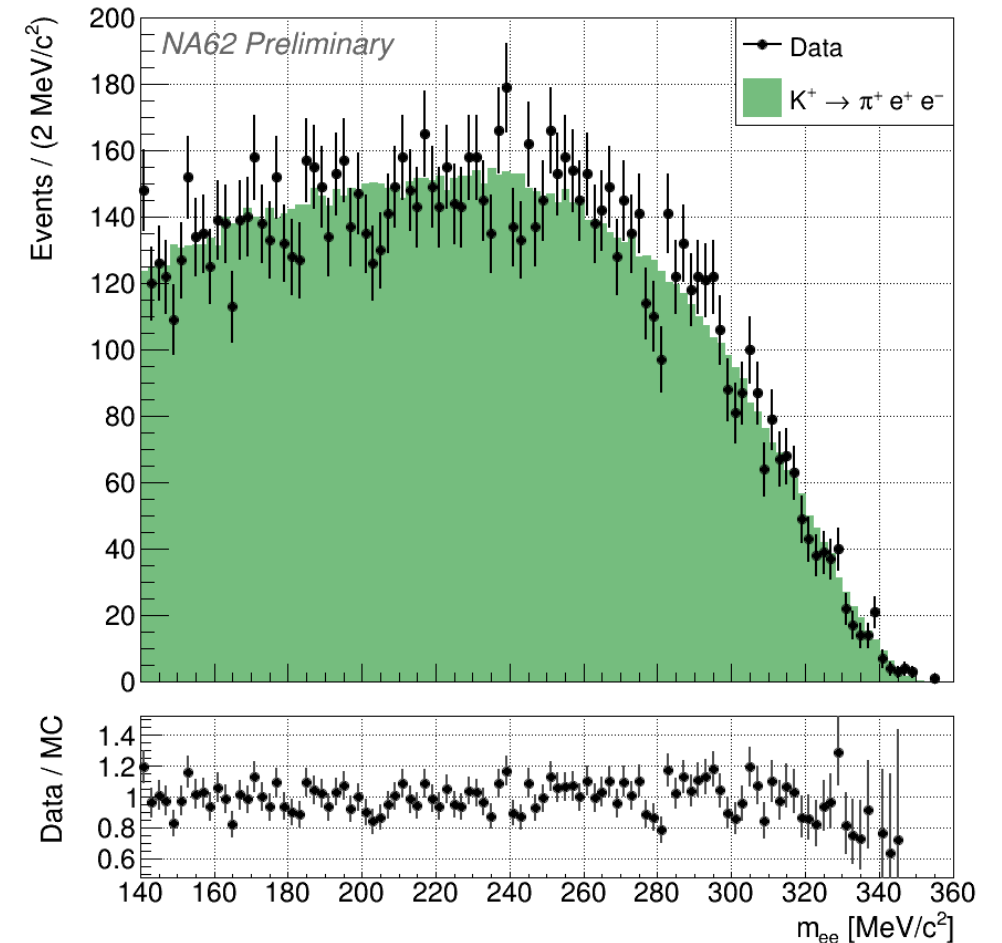
$\pi^0 \rightarrow e^+ e^-$ A NA62: STRATEGIA DI ANALISI

- ❖ Analisi dei dati raccolti da NA62 nel 2017 e 2018
- ❖ **Segnale:** $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \equiv K^+ \rightarrow \pi^+ \pi_{ee}^0$
 - Nella simulazione sono incluse le correzioni radiative più recenti
 - **Variabile discriminante: massa invariante $e^+ e^-$** ($m_{ee} = \sqrt{P_{e^-} + P_{e^+}}$)
- ❖ **Fondi** rispetto al segnale $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, $\pi^0 \rightarrow e^+ e^-$
 - $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$ (irriducibile): piatto nella regione attorno alla massa del π^0
 - $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^- \equiv K^+ \rightarrow \pi^+ \pi_D^0$
 - a) ha una lunga coda a grandi $x = m_{ee}^2 / m_{\pi^0}^2$ dovuta al π^0 Dalitz
 - b) il γ può convertire nelle STRAW e un e^\pm dalla conversione essere selezionato per ricostruire m_{ee}
 - $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- e^+ e^- \equiv K^+ \rightarrow \pi^+ \pi_{DD}^0$, in cui due tracce del decadimento Dalitz doppio del π^0 non sono rivelate
- ❖ Il BR è misurato relativamente a un canale di **normalizzazione**, il $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$
 - stesso stato finale del segnale + criteri di selezione comune \rightarrow cancellazione (al primo ordine) di effetti sistematici
- ❖ Selezione comune
 - Topologia di un vertice a tre tracce (STRAW)+ tagli temporali (CHOD, KTAG)
 - vincoli cinematici sull'impulso totale e trasverso del vertice
 - LKr+STRAW (E/p) e cinematica del decadimento ($m_{\pi ee}, m_{ee}$) per identificare le particelle di stato finale
 - *Hits* e segmenti nelle STRAW per ridurre il fondo da conversioni

CAMPIONE DI NORMALIZZAZIONE $K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-$

- ❖ Selezione comune
- ❖ Definizione di una regione di normalizzazione: $m_{ee} > 140 \text{ MeV}/c^2$
- ❖ Numero di eventi osservati: **12160**
- ❖ Accettanza della selezione di normalizzazione:
$$A(K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-) = (4.70 \pm 0.01_{stat})\%$$
- ❖ Purezza del campione $> 99.9\%$
- ❖ Numero effettivo di decadimenti del K^+ :
(incertezza esterna da $BR_{PDG}(K^+ \rightarrow \pi^+ e^+ e^-) = (3.00 \pm 0.09) \times 10^{-7}$)

$$N_k = (8.62 \pm 0.08_{stat} \pm 0.26_{ext}) \times 10^{11}$$



CAMPIONE DI SEGNALE $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0, \pi^0 \rightarrow e^+ e^-$

- ❖ Selezione comune
- ❖ Definizione di una regione di fit per l'estrazione del segnale:

$$m_{ee} \in (130, 140) \text{ MeV}/c^2$$

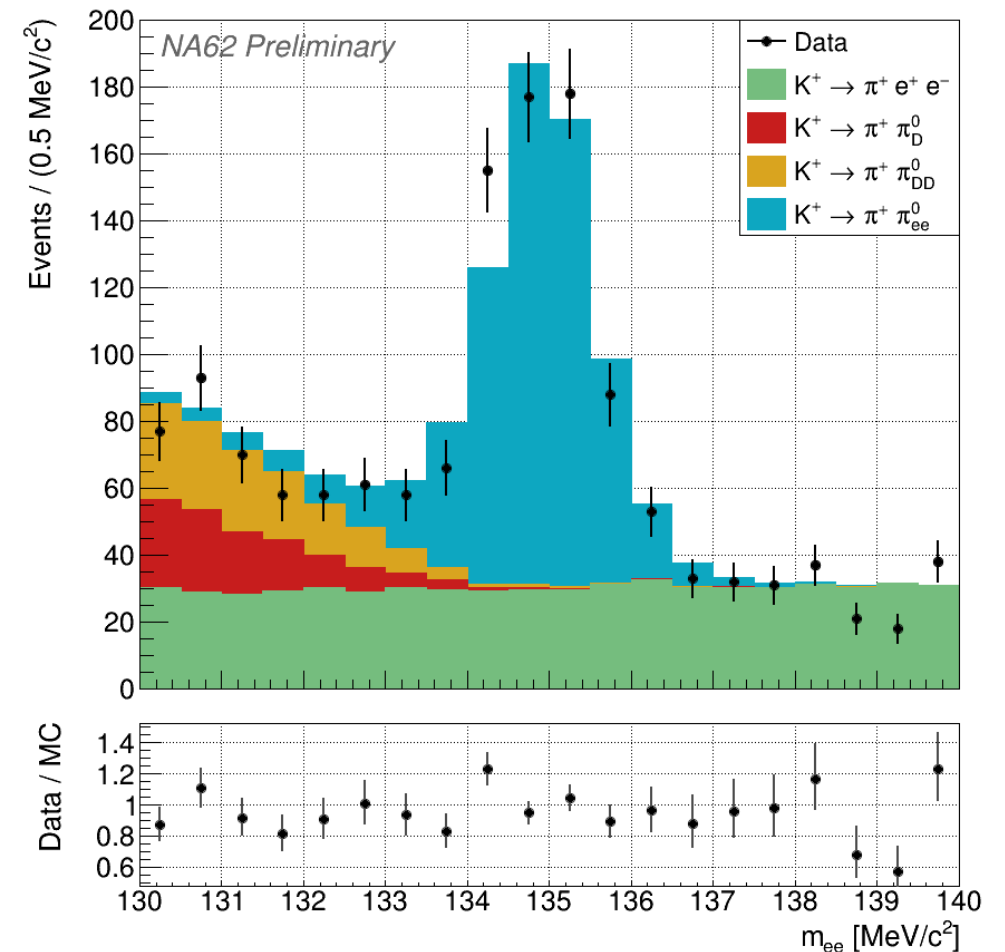
- ❖ Accettazione della selezione del segnale ($x_{vero} > 0.95$):

$$A(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi_{ee}^0) = (5.72 \pm 0.02_{stat})\%$$

- ❖ BR ottenuto tramite un fit di maximum likelihood ai dati dei campioni simulati:

$$BR(\pi^0 \rightarrow e^+ e^-(\gamma), x > 0.95) = (5.86 \pm 0.30_{stat}) \times 10^{-8}$$

- i BR dei fondi sono input esterni noti (da PDG 2023)
- il numero di eventi di segnale restituito dal fit è 597 ± 29
- $\chi^2/NDF = 25.3/19$, $p - value = 0.152$



$\pi^0 \rightarrow e^+ e^-$: RISULTATO (PRELIMINARE) E INCERTEZZE

$$BR_{NA62}(\pi^0 \rightarrow e^+ e^- (\gamma), x > 0.95) = (5.86 \pm 0.30_{stat} \pm 0.11_{syst} \pm 0.19_{ext}) \times 10^{-8} = (5.86 \pm 0.37) \times 10^{-8}$$

	$\delta BR [\times 10^{-8}]$	$\delta BR / BR$ [%]
Incertezza statistica	0.30	5.1
Incertezza esterna totale	0.19	3.2
Incertezza sistematica totale	0.11	1.9
Efficienza di trigger	0.07	1.2
Correzioni radiative $\pi^0 \rightarrow e^+ e^-$	0.05	0.9
Fondi	0.04	0.7
Ricostruzione e identificazione delle particelle	0.04	0.7
Simulazione del fascio	0.03	0.5

$\pi^0 \rightarrow e^+ e^-$: CONCLUSIONI E CONFRONTI

- ❖ Nuovo risultato preliminare basato sui dati raccolti da NA62 nel 2017 e 2018

$$BR_{NA62}(\pi^0 \rightarrow e^+ e^-(\gamma), x > 0.95) = (5.86 \pm 0.30_{stat} \pm 0.11_{syst} \pm 0.19_{ext}) \times 10^{-8} = (5.86 \pm 0.37) \times 10^{-8}$$

- ❖ Il valore centrale ottenuto è minore rispetto a quello di KTeV ma le due misure sono consistenti

$$BR_{KTeV}(\pi^0 \rightarrow e^+ e^-(\gamma), x > 0.95) = (6.44 \pm 0.25_{stat} \pm 0.22_{sys}) \times 10^{-8}$$

- ❖ Tenendo conto delle correzioni radiative, l'estrapolazione del risultato è in accordo con le previsioni teoriche:

$$BR_{NA62}(\pi^0 \rightarrow e^+ e^-, non\ rad) = (6.22 \pm 0.39) \times 10^{-8}$$

$$BR_{th(2022)}(\pi^0 \rightarrow e^+ e^-, non\ rad) = (6.25 \pm 0.03) \times 10^{-8}$$

RICERCA DEL DECADIMENTO $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ A NA62
(PHYS. LETT. B 850 (2024) 138513)

$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma$: LE MOTIVAZIONI

❖ **Test cruciale della Teoria perturbativa chirale (ChPT)**

❖ Il decadimento può essere descritto da due variabili cinematiche :

$$z = \frac{(q_1+q_2)^2}{M_K^2} = \left(\frac{m_{\gamma\gamma}}{M_K}\right)^2, \quad y = \frac{p \cdot (q_1 - q_2)}{M_K^2}$$

❖ In ChPT (al *leading-order* $\mathcal{O}(p^4)$ e includendo i contributi al *next-to-leading order* $\mathcal{O}(p^6)$) **la larghezza di decadimento e lo spettro dipendono da un unico parametro reale incognito a priori, \hat{c}** (di $\mathcal{O}(1)$)

$$\frac{\partial^2 \Gamma}{\partial y \partial z} = \frac{M_K^2}{2^9 \pi^3} \left[z^2 (|A(\hat{c}, z, y^2) + \mathbf{B}(z)|^2 + |C(z)|^2) + \left(y^2 - \frac{1}{4} \lambda(1, r_\pi^2, z) \right)^2 |\mathbf{B}(z)|^2 \right]$$

[Phys.Lett.B386(1996)403]

\mathbf{B} appare a $\mathcal{O}(p^6)$; domina a basse z

- C = *pole amplitude*; contributo di qualche % al tot ; \mathbf{A}, \mathbf{B} = *loop amplitudes*;
- a $\mathcal{O}(p^6)$ le ampiezze dipendono da parametri esterni [Phys.Lett.B835 (2022)137594]

❖ **Obiettivi dell'analisi:** determinare \hat{c} in ChPT ; misurare $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma)$

p = quadrimpulso del K^+
 $q_{1,2}$ = quadrimpulso del $\gamma_{1,2}$
 M_K = massa del K^+ , M_π = massa del π^+
 $m_{\gamma\gamma}$ = massa invariante dei due fotoni
 $\lambda(a, b, c) = a^2 + b^2 + c^2 - 2(ab + ac + bc)$
 $r_\pi = M_\pi/M_K$

$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ A NA62: STRATEGIA DI ANALISI

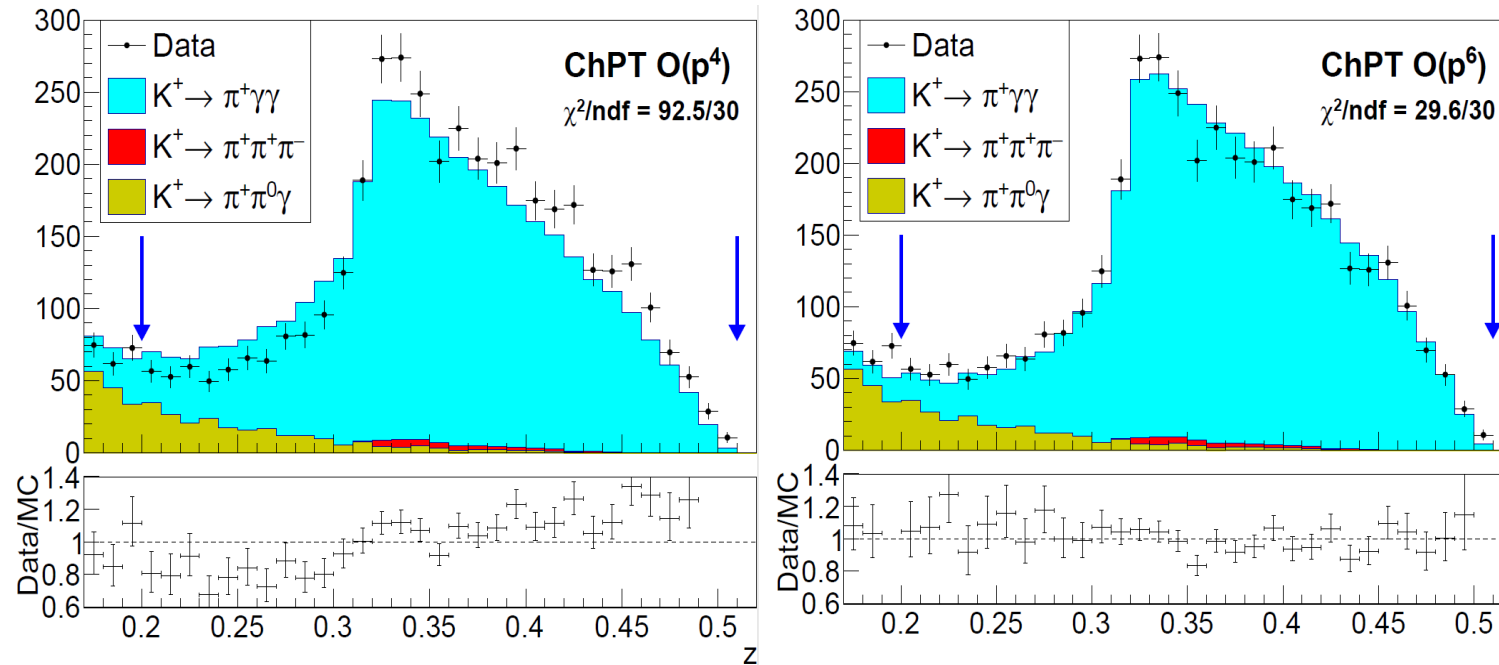
[PLB 850 (2024) 138513]

- ❖ Dati NA62 2017+2018
- ❖ Variabile cinematica discriminante: $z = (P_K - P_\pi)^2 / m_K^2$
 - ❖ **Regione di segnale:** $0.20 < z < 0.51$
- ❖ **Fondi** principali (stimati da MC, validati con regioni di controllo):
 - $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 (\gamma), \pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ per via del *merging* dei clusters prodotti dai γ nel calorimetro em LKr
 - $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ quando le tracce di π^+, π^- non sono ricostruite dallo spettrometro STRAW
- ❖ *BR* misurato rispetto a un canale di normalizzazione, $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 (\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma)$
 - stessa topologia del segnale + selezione comune \rightarrow cancellazione al prim'ordine di effetti sistematici
 - **Regione di normalizzazione:** $0.04 < z < 0.12$ ($m_{\gamma\gamma} = m_{\pi^0} \rightarrow z = 0.075$)
 - $N_k = (5.55 \pm 0.03) \times 10^{10}$
- ❖ Selezione comune
 - Singola traccia carica identificata come π^+ associata con una traccia K^+ + due *clusters* prodotti da γ nel LKr ben separati dall'extrapolazione della traccia all'LKr (250 mm) + tagli temporali
 - LKr+STRAW (E/p) + MUV3 in veto per identificare il π^+
 - Vincoli cinematici sulla massa invariante totale $m_{\pi\gamma\gamma}$ e sull'impulso totale $p_{\pi\gamma\gamma}$ per identificare lo stato finale
 - Taglio sull'rms della larghezza massima dei cluster per ridurre il fondo dovuto al *merging*

$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma: \hat{c}$ IN CHPT

[PLB 850 (2024) 138513]

- ❖ Dati NA62 2017+2018. Numero di eventi osservato: $N^{obs} = 3894$. Numero di eventi di fondo atteso: $N_{bkg}^{exp} = 291 \pm 14$.
- ❖ \hat{c} è stimato nelle descrizioni di ChPT $\mathcal{O}(p^4)$ e $\mathcal{O}(p^6)$ tramite fit del $min\text{-}\chi^2$ dello spettro di z ricostruito dei MC a quello dei dati
- ❖ $p\text{-value} = 2.7 \times 10^{-8}$ assumendo la descrizione ChPT $\mathcal{O}(p^4) \rightarrow$ non è sufficiente per descrivere lo spettro dei dati
- ❖ $p\text{-value} = 0.49$ assumendo la descrizione ChPT $\mathcal{O}(p^6)$;



$$\hat{c}_{ChPT \mathcal{O}(p^6)} = 1.144 \pm 0.069_{stat} \pm 0.034_{syst}$$

$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma)$

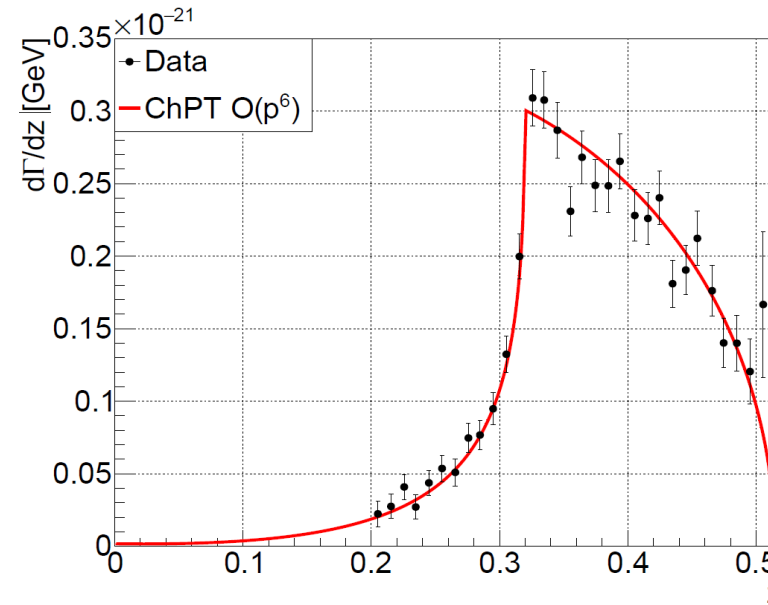
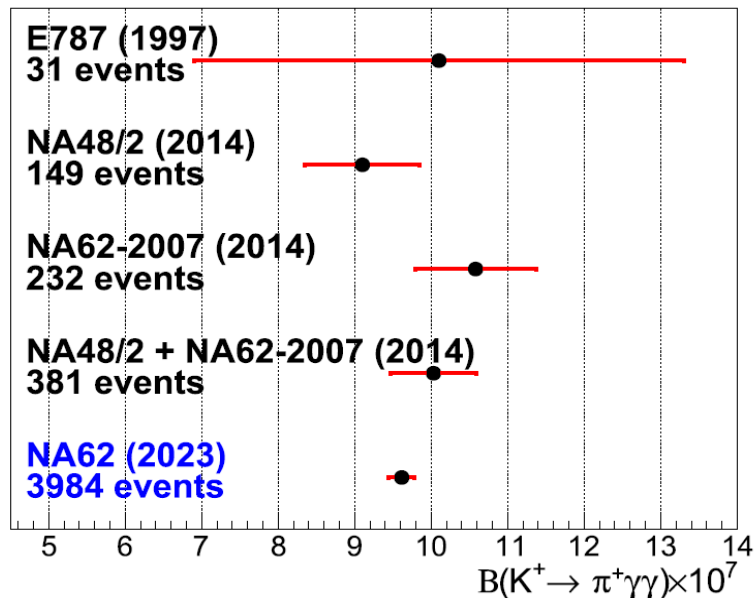
[PLB 850 (2024) 138513]

- ❖ Parametro \hat{c} misurato : $\hat{c}_{ChPT \mathcal{O}(p^6)} = 1.144 \pm 0.069_{stat} \pm 0.034_{syst}$
- ❖ BR che si ottiene integrando l'ampiezza differenziale della ChPT $\mathcal{O}(p^6)$ su tutto il range cinematico:

$$BR_{ChPT \mathcal{O}(p^6)}(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma) = (9.61 \pm 0.15_{stat} \pm 0.07_{syst}) \times 10^{-7}$$

- ❖ Stima *model-independent* di BR :

$$BR_{MI}(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma | z > 0.20) = (9.46 \pm 0.19_{stat} \pm 0.07_{syst}) \times 10^{-7}$$

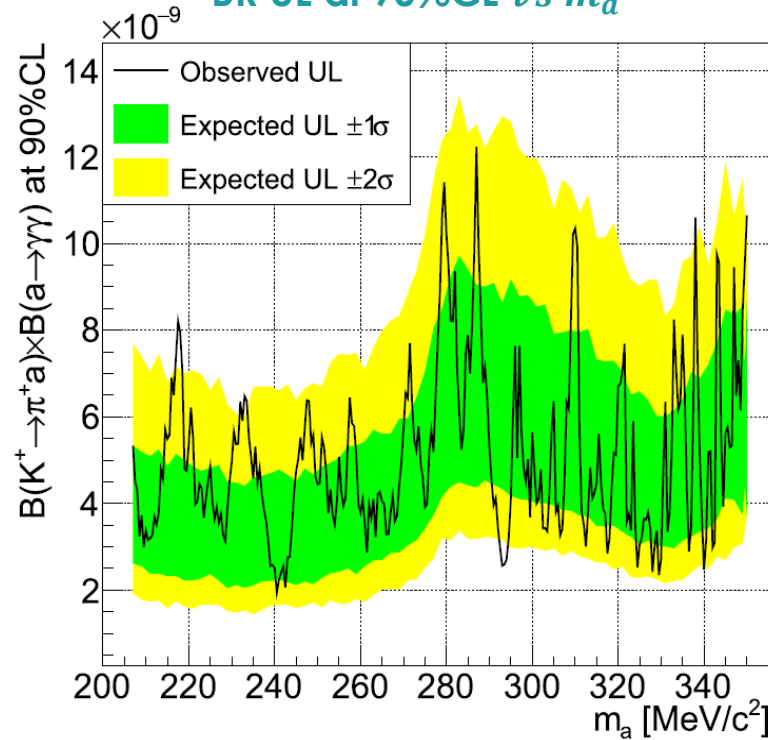


PRIMA RICERCA DI ALP NEL CANALE $K^+ \rightarrow \pi^+ a, a \rightarrow \gamma\gamma$

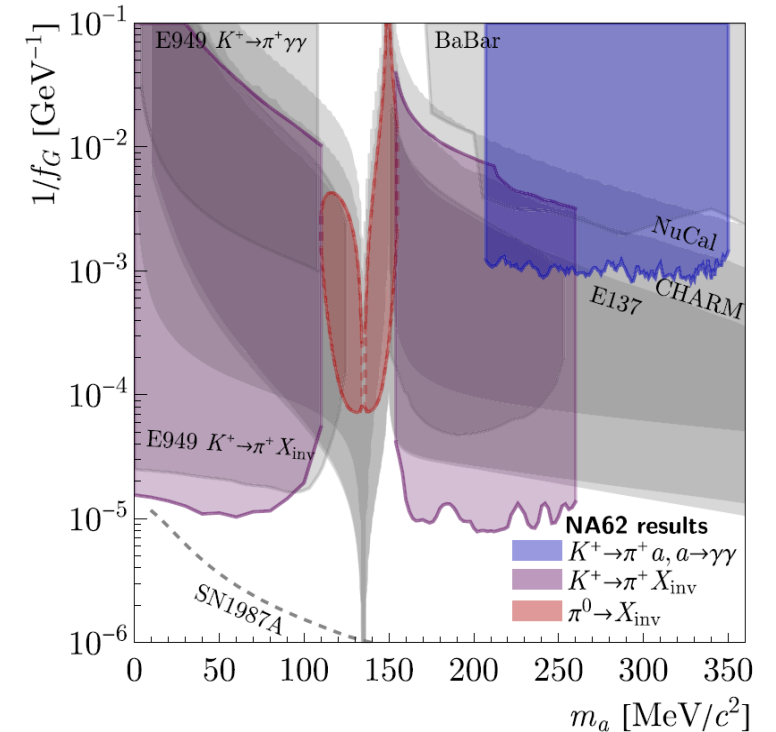
[PLB 850 (2024) 138513]

- ❖ a = ALP che si accoppia con i gluoni (scenario BC11; parametri liberi: massa ALP m_a e mixing $1/f_G$);
- ❖ Ricerca di una risonanza nella distribuzione di $m_{miss} = \sqrt{(\mathbf{P}_K - \mathbf{P}_{\pi^+})^2}$ nell'intervallo di massa (207 – 350 MeV/c^2)
- ❖ Per ogni ipotesi di massa dell'ALP:
 - selezione definita per il $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma + |m_{miss} - m_a| < 1.5\sigma_a$ (σ_a risoluzione in massa; va da 2.0 MeV/c^2 a 0.2 MeV/c^2 sul range di m_a considerate);
 - il fondo atteso e l'accettazione del segnale (< 8%) sono stimati dal MC
 - l'UL del numero di eventi di segnale è determinato tramite il metodo CLs

Decadimento $a \rightarrow \gamma\gamma$ prompt ($\tau_a = 0$)
BR UL al 90%CL vs m_a



Spazio dei parametri ALP BC11
 $1/f_G \sim \sqrt{\tau_a}$ vs m_a



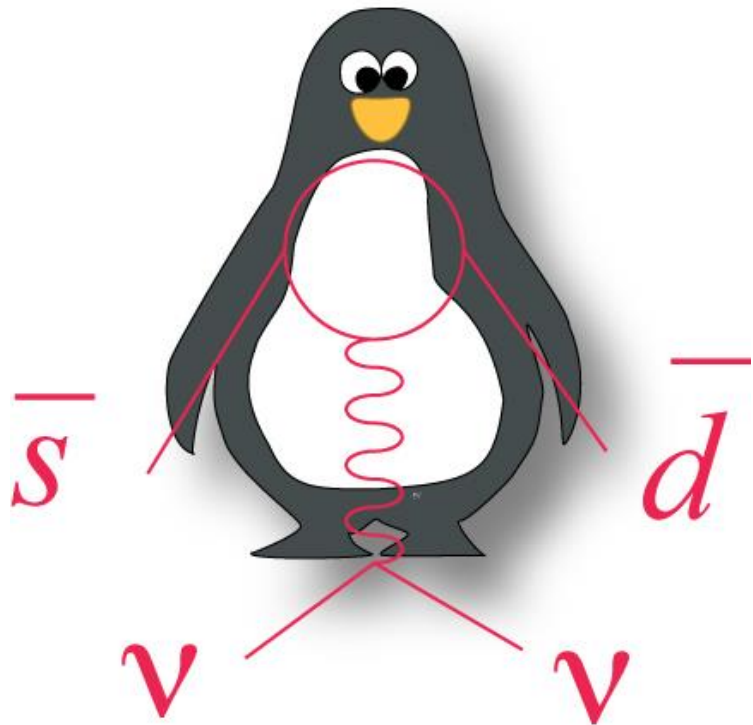
$K^+ \rightarrow \pi^+ X_{inv}$ in JHEP06(2021)093
 $\pi^0 \rightarrow X_{inv}$ in JHEP02(2021)201



CONCLUSIONI

CONCLUSIONI

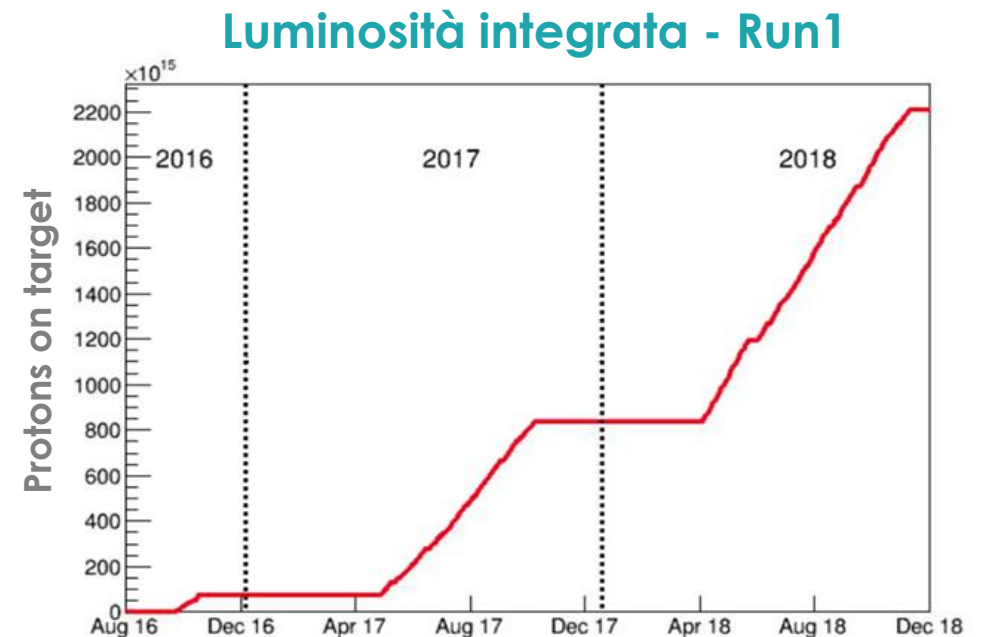
- ❖ NA62 è un esperimento dedicato alla misura dei decadimenti rari del K^+ ; è progettato per lo studio del decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ ($BR \sim \mathcal{O}(10^{-10})$) e ha un programma di fisica molto vasto
- ❖ Nuove misure di precisione sono state pubblicate da NA62 sui dati del Run1:
 - **$BR(\pi^0 \rightarrow e^+ e^-)$ (nuovo, preliminare)**
 - Precisione comparabile a quella della misura precedente, dominata dalla statistica
 - In pieno accordo con le previsioni teoriche
 - **$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma)$ [Phys. Lett. B 850 (2024) 138513]**
 - risultato consistente entro una deviazione standard dalle misure precedenti
 - ma con precisione maggiore ($\times 10$ candidati selezionati), dominata dalla statistica
 - prima evidenza sperimentale di una descrizione al *next-to-leading order* in ChPT
 - prima ricerca di ALP con accoppiamento con gluoni nel decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ a, a \rightarrow \gamma \gamma$
- ❖ Nel 2021 la presa dati di NA62 è ripartita (fino al LS3), rendendo disponibili campioni di dati più larghi da analizzare



Back-Up

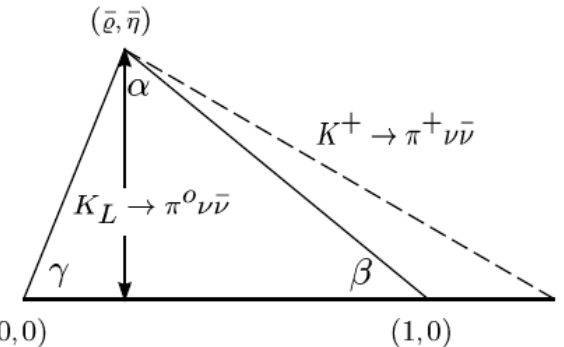
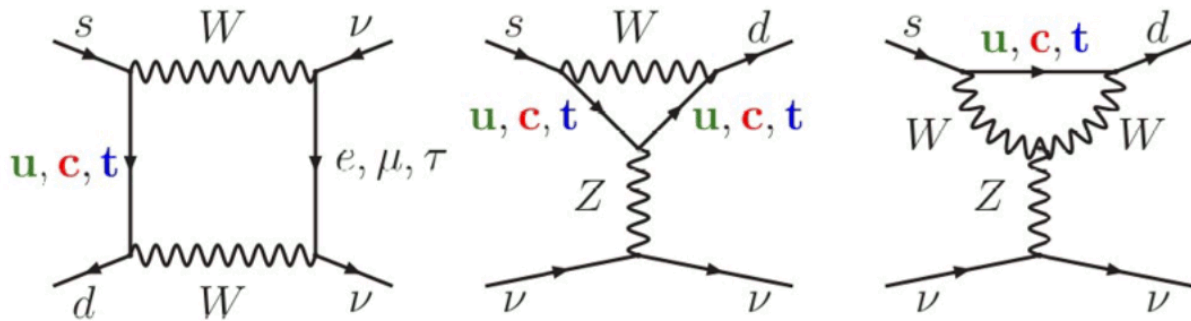
NA62 TIMELINE & DATASETS

- ❖ Approvazione: 2008
- ❖ R&D del rivelatore e installazione: 2009 → 2015
- ❖ Messa in opera e commissioning 2015
- ❖ **Run 1 (2016-2017-2018)**
 - 2016: $\sim 2 \times 10^{11}$ decadimenti del K^+
 - 2017: $\sim 2 \times 10^{12}$ decadimenti del K^+
 - 2018: $\sim 4 \times 10^{12}$ decadimenti del K^+
- ❖ **Run 2 (2021 - a oggi)**
 - fino al LS3



Rare kaon decays: $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$

[JHEP11(2015)033]



Independent determination of unitary triangle for K meson system

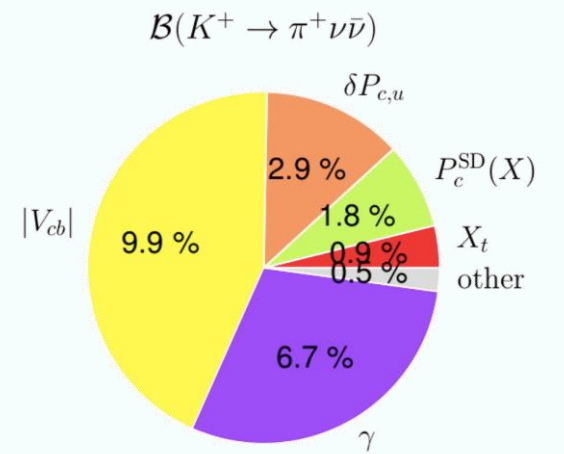
- ❖ Flavour changing neutral current process with high CKM suppression
- ❖ Dominated by short distances: clean theoretical prediction
- ❖ Hadronic matrix element from semi-leptonic data

Making the dependence of the CKM explicit:

$$\text{BR}_{\text{SM}}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (0.839 \pm 0.030) \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{|V_{cb}|}{40.7 \cdot 10^{-3}} \right)^{2.8} \cdot \left(\frac{\gamma}{73.2^\circ} \right)^{0.74}$$

Taking $|V_{cb}|_{\text{avg}} = (40.7 \pm 1.4) \times 10^{-3}$, $|V_{ub}|_{\text{avg}} = (3.88 \pm 0.29) \times 10^{-3}$ and $\gamma = (73.2^{+6.3}_{-7.0})^\circ$:

$$\text{BR}_{\text{SM}}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (0.84 \pm 0.10) \cdot 10^{-10}$$



Theoretical error budget

$\pi^0 \rightarrow e^+e^-$: CORREZIONI RADIATIVE

[EUR.PHYS.J.C 74 (2014) 8, 3010]

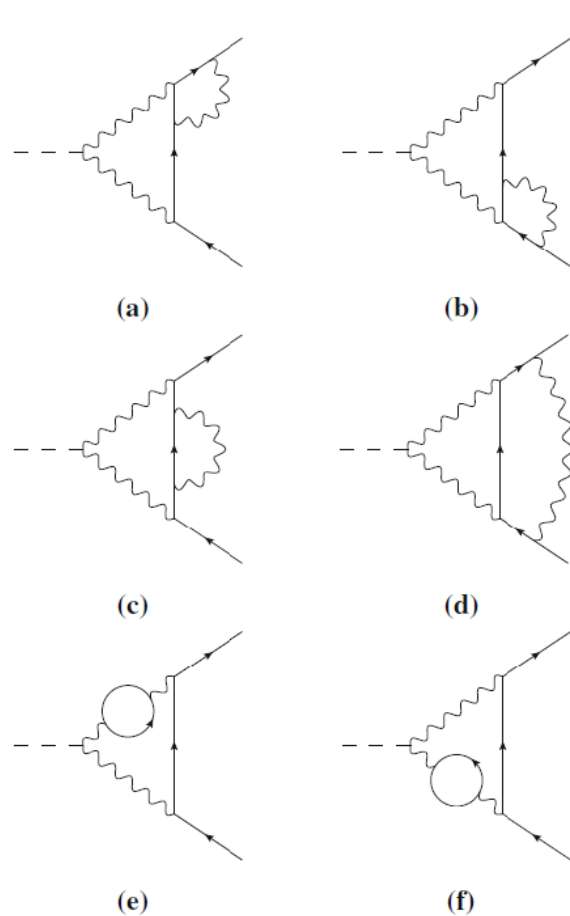


Fig. 2 Two-loop virtual radiative corrections for $\pi^0 \rightarrow e^+e^-$ process

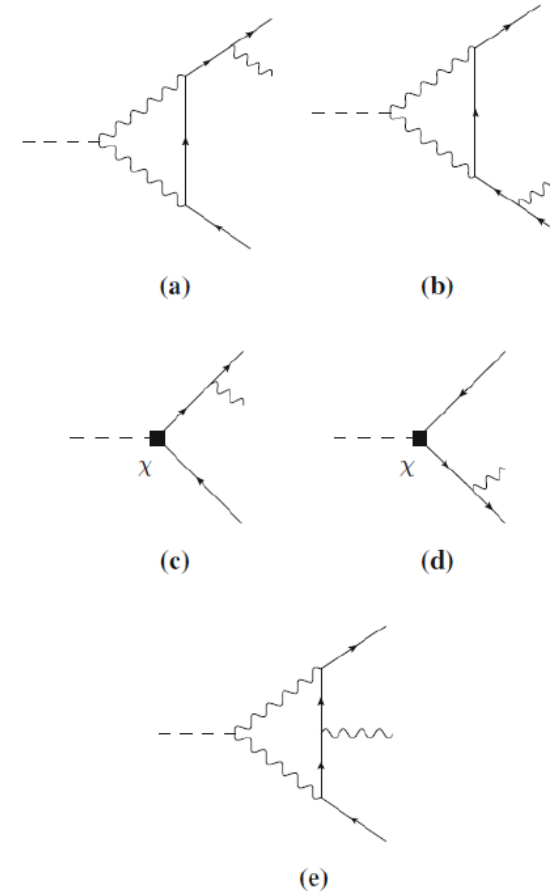
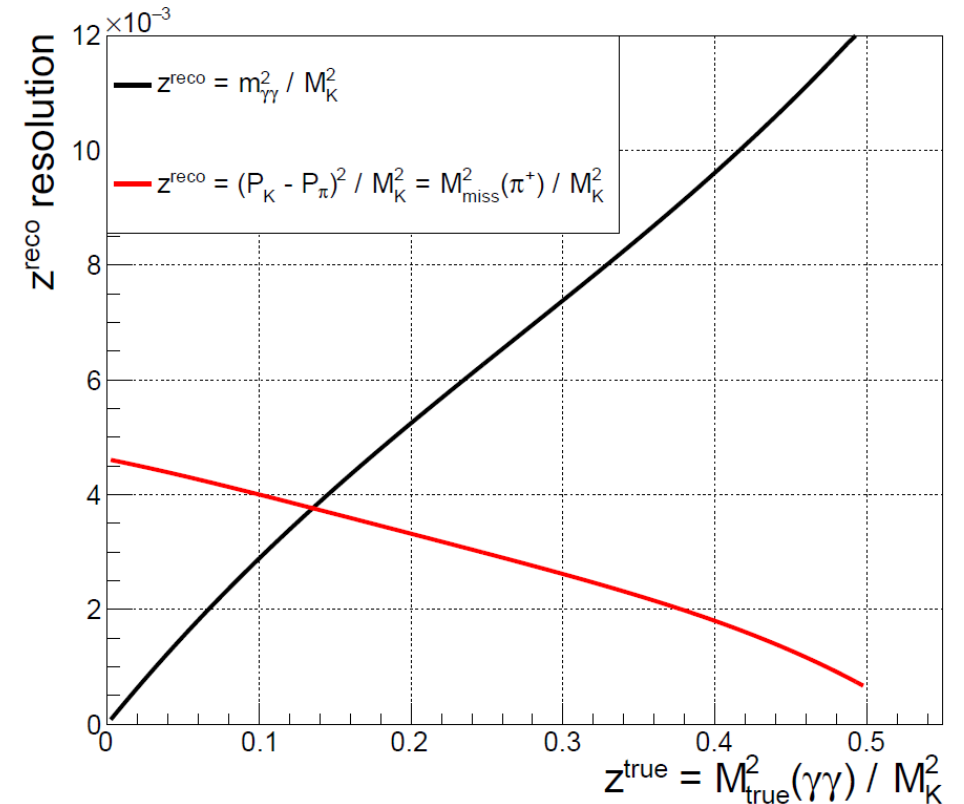


Fig. 3 Bremsstrahlung Feynman diagrams for $\pi^0 \rightarrow e^+e^-$ process including counterterms

$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma\gamma: z$ RESOLUTION

[PLB 850 (2024) 138513]

- ❖ $z = (m_{\gamma\gamma}/m_K)^2 = (P_K - P_\pi)^2/m_K^2$
- ❖ The photon candidates information is not used to determine the reconstructed z , which reduces systematic uncertainties and improves the z resolution
- ❖ the resolution varies from 3.5×10^{-3} at $z = 0.20$ to zero



$K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$: BACKGROUND AND ERROR BUDGET

[PLB 850 (2024) 138513]

- ❖ Background contributions in the $K_{\pi\gamma\gamma}$ sample are estimated from MC and validated in control regions

Source	Estimated background	
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \gamma$	$240 \pm 8_{\text{stat}} \pm 12_{\text{syst}}$	γ merging in LKr
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$35 \pm 1_{\text{stat}} \pm 1_{\text{syst}}$	out-of-acceptance tracks
$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$	$9 \pm 2_{\text{stat}}$	γ merging in LKr
$K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu(\gamma)$	$7 \pm 1_{\text{stat}}$	$e^+_{\text{mis}} - id$ as $\pi^+ + \gamma$ from the π^0 decay not detected
Total	$291 \pm 8_{\text{stat}} \pm 12_{\text{syst}}$	

- ❖ Systematic uncertainties for \hat{c} , $BR_{ChPT}(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma)$ and $BR_{MI}(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma, z > 0.2)$ measurements

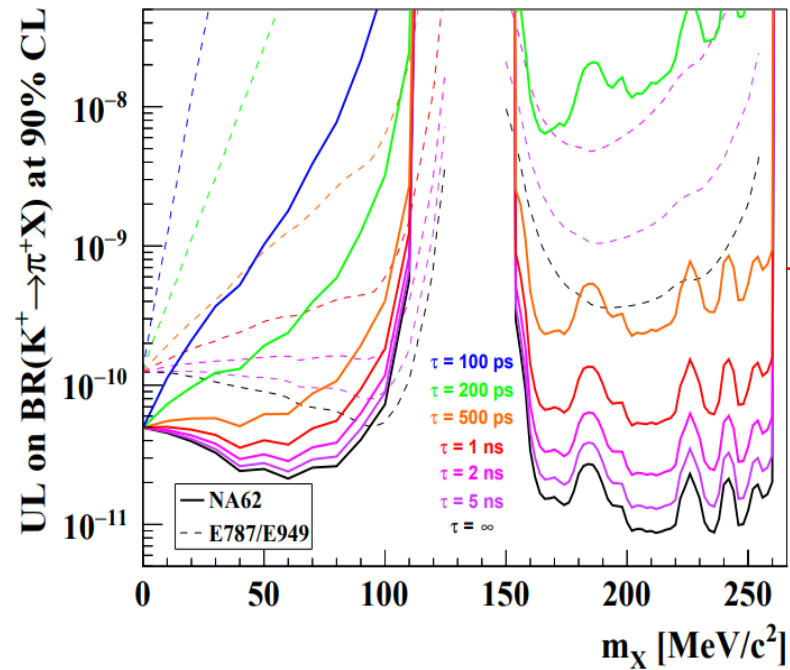
Source	$\delta \hat{c}$	$\delta B \times 10^7$	$\delta B_{MI}(z > 0.2) \times 10^7$
Number of kaon decays	0.026	0.056	0.064
Simulation of multi-photon backgrounds	0.016	0.034	0.026
Simulation of $K_{3\pi}$ background	0.001	0.002	0.003
Limited size of simulated samples	0.014	0.030	0.018
Total	0.034	0.072	0.072

$K^+ \rightarrow \pi^+ X$ AT NA62

[JHEP06(2021)093]

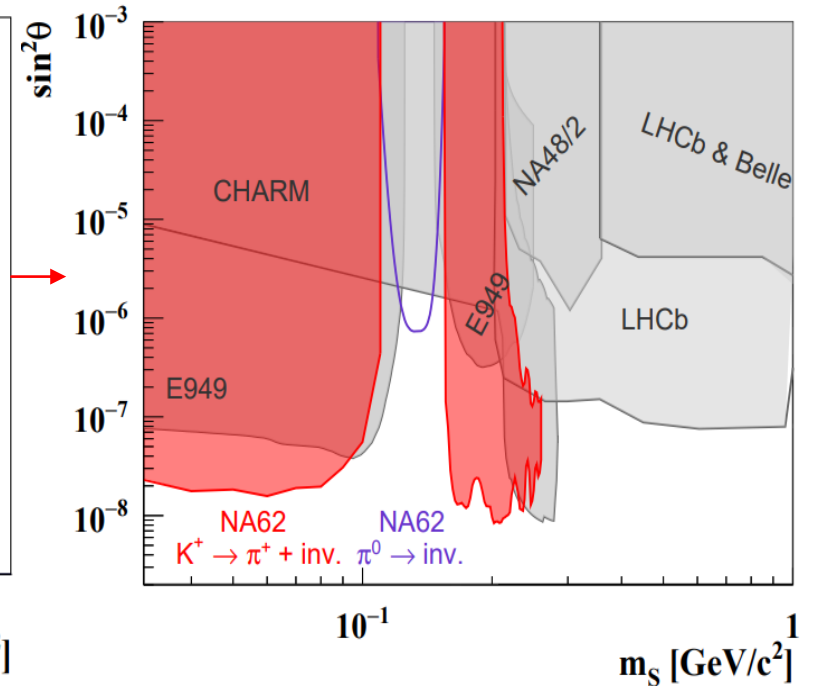
- ❖ $K^+ \rightarrow \pi^+ X$, with $X =$ invisible new particle: dark scalar, ALP, QCD Axion ... **decaying into invisible or long-lived**
- ❖ Same experimental signature as SM $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$
 - ❖ $K^+ \rightarrow \pi^+ X$: mainly analysis of the $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ spectrum
 - ❖ Main SM bkg: $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$
- ❖ Whole NA62 Run1 data set analysed
- ❖ New upper limits improve on BNL-E949 [PRD79 (2009) 092004] over most of m_X accessible range

Upper Limits at 90% CL vs m_X for different lifetimes (τ)



Model-independent results for X long-lived and decaying into SM

Searches for long-lived dark scalar decaying into SM



Results interpreted in a scenario where X is a dark scalar mixing with the SM Higgs; $\sin^2 \theta$ is the mixing parameter