

Ultimi risultati da NA62

Dario Soldi a nome della collaborazione di NA62

SIF - 17 Settembre 2020



Argomenti del giorno

▶ L'esperimento, brevemente.



▶ Il decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$

▶ La strategia



▶ I risultati

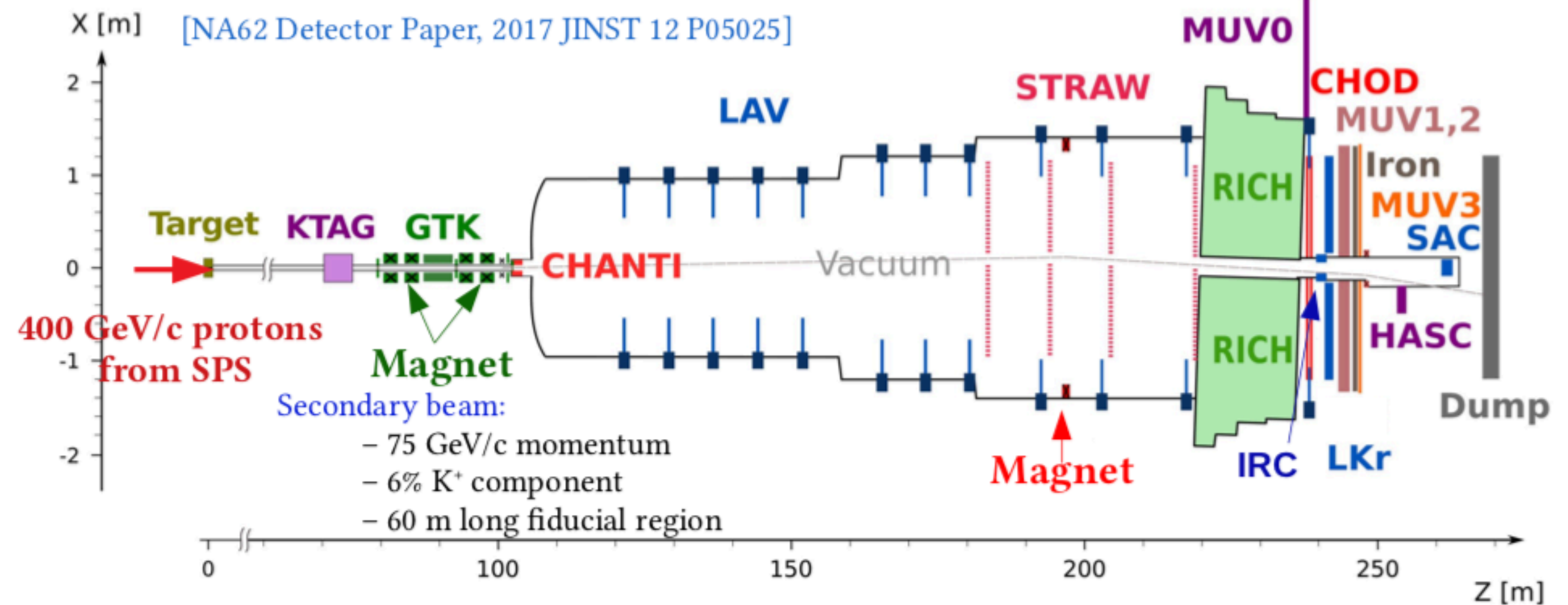
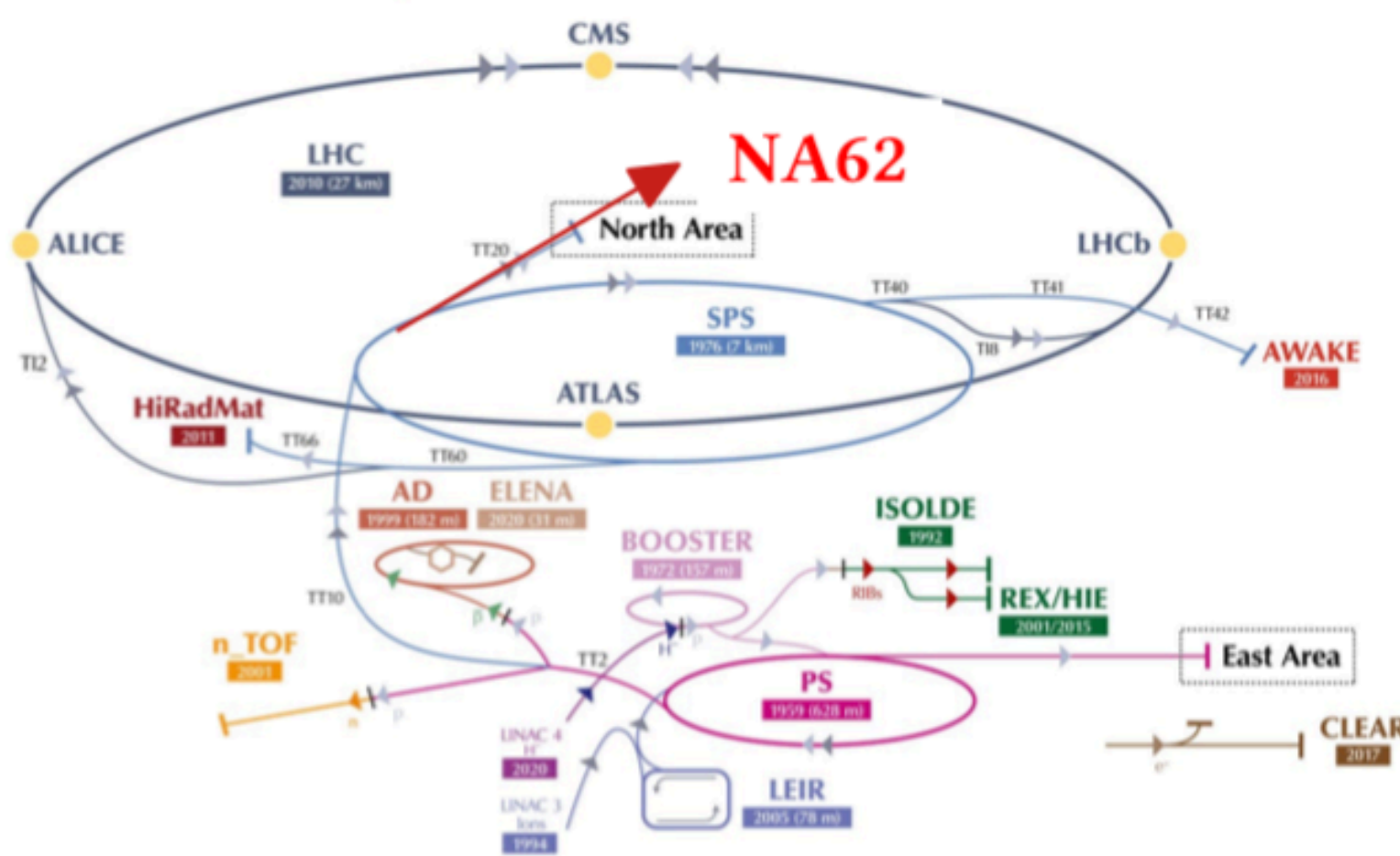


▶ Non solo $\pi \nu \nu$:

▶ $\pi \mu \mu$, HNL



L'esperimento, brevemente



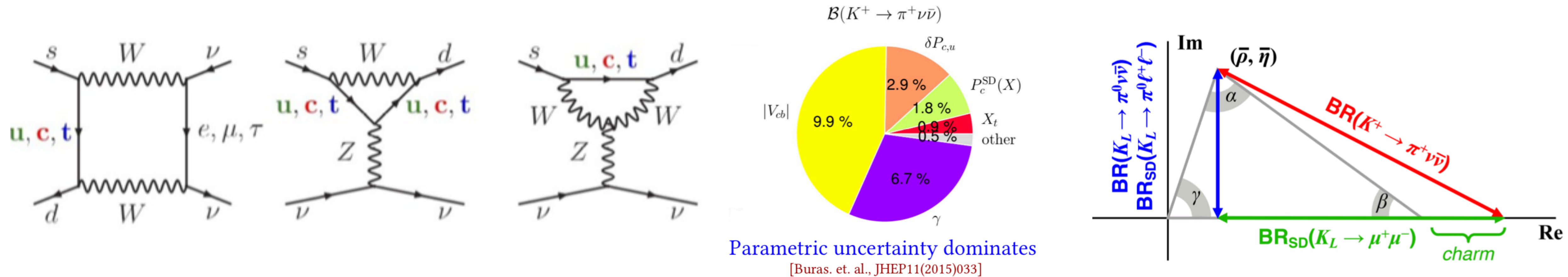
Rivelatori a monte (K⁺):

- ▶ **KTAG**: Contatore differenziale Cherenkov: identifica i K⁺;
- ▶ **GTK**: Spettrometro composto da 3 stazioni di pixel al silicio: Misura impulso e direzione delle particelle in arrivo;
- ▶ **CHANTI**: Veto per le interazioni inelastiche che avvengono nella terza stazione del GTK.

Rivelatori a valle (π⁺):

- STRAW**: Spettrometro composto da 4 camere a STRAW: Misura impulso e posizione dei prodotti di decadimento;
- CHOD**: Odoscopi a scintillazione;
- LKr/MUV1/MUV2**: Sistema calorimetrico;
- RICH**: Rivelatore Cherenkov per identificare π/μ/e;
- LAV/SAC/IRC**: Veto per fotoni a grande/piccolo angolo;
- MUV3**: Sistema di veto per i muoni.

Il decadimento $K \rightarrow \pi\nu\nu$

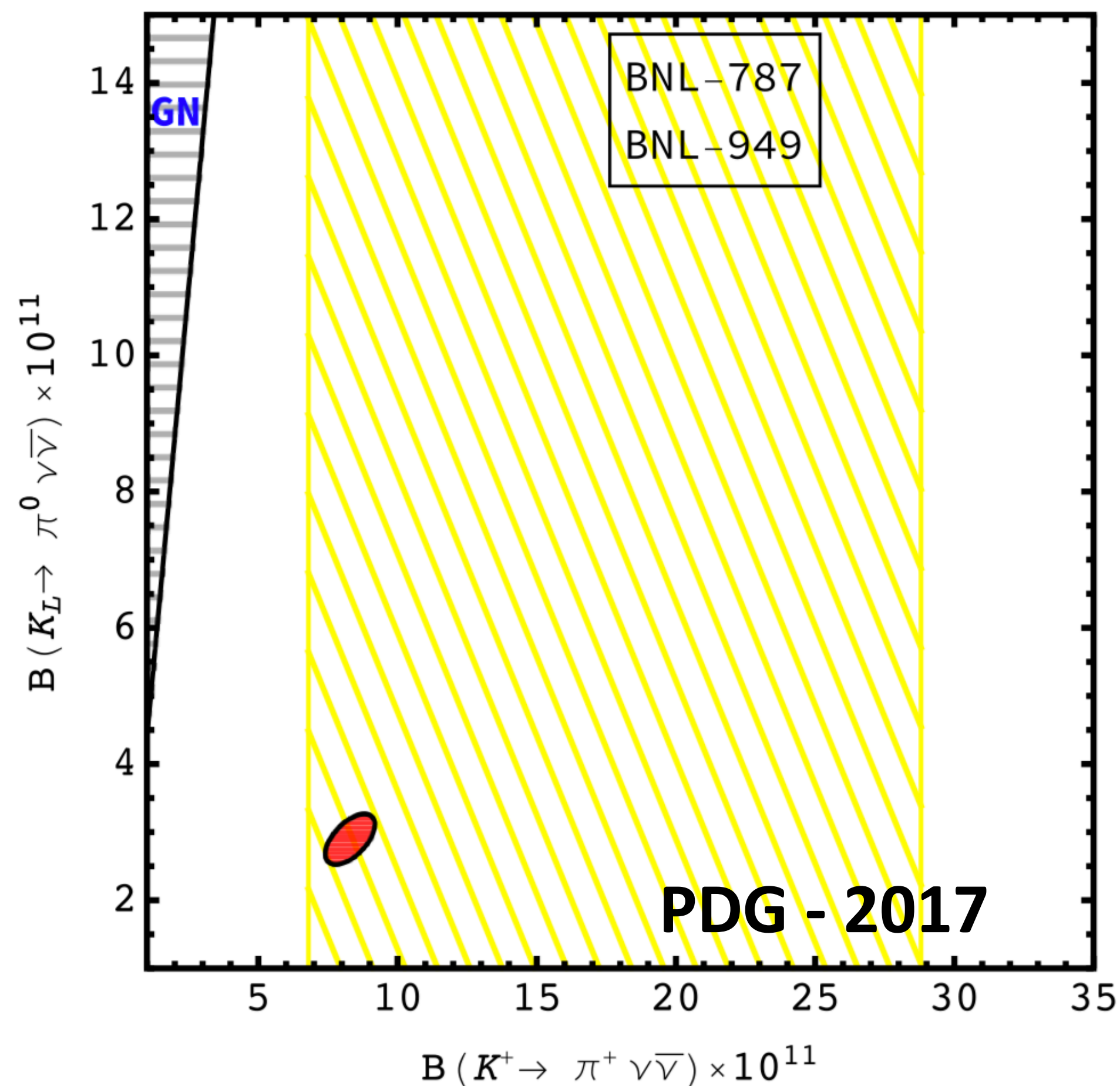


- **Possibile attraverso Flavour Changing Neutral Currents:** l'accoppiamento $s \rightarrow d$ avviene attraverso diagrammi a pinguino o box: grande soppressione dovuta al meccanismo di GIM.
- **Teoricamente molto ben calcolato nell'ambito dello standard model:**
 - Le incertezze nell'elemento della matrice adronica in gran parte si annullano quando calcolato dal rapporto del decadimento $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$, misurato con grande precisione.

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (0.84 \pm 0.03) \times 10^{-10} \left(\frac{|V_{cb}|}{0.0407} \right)^{2.8} \left(\frac{\gamma}{73.2^\circ} \right)^{0.74} = (0.84 \pm 0.10) \times 10^{-10}$$

$$BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = (0.34 \pm 0.05) \times 10^{-10} \left(\frac{|V_{ub}|}{0.00388} \right)^2 \left(\frac{|V_{cb}|}{0.0407} \right)^2 \left(\frac{\sin \gamma}{\sin 73.2^\circ} \right)^2 = (0.34 \pm 0.06) \times 10^{-10}$$

Stato dell'arte prima delle misure di NA62



Predizione teorica

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



Misura sperimentale pre NA62

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

Migliore misurazione ottenuta da **E787** e **E949** a **BNL**
con decadimenti da fermo (7 eventi)

Predizione teorica

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



Misura sperimentale

il decadimento neutro $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ non è stato mai misurato
Limiti dall'esperimento KOTO a JPARK

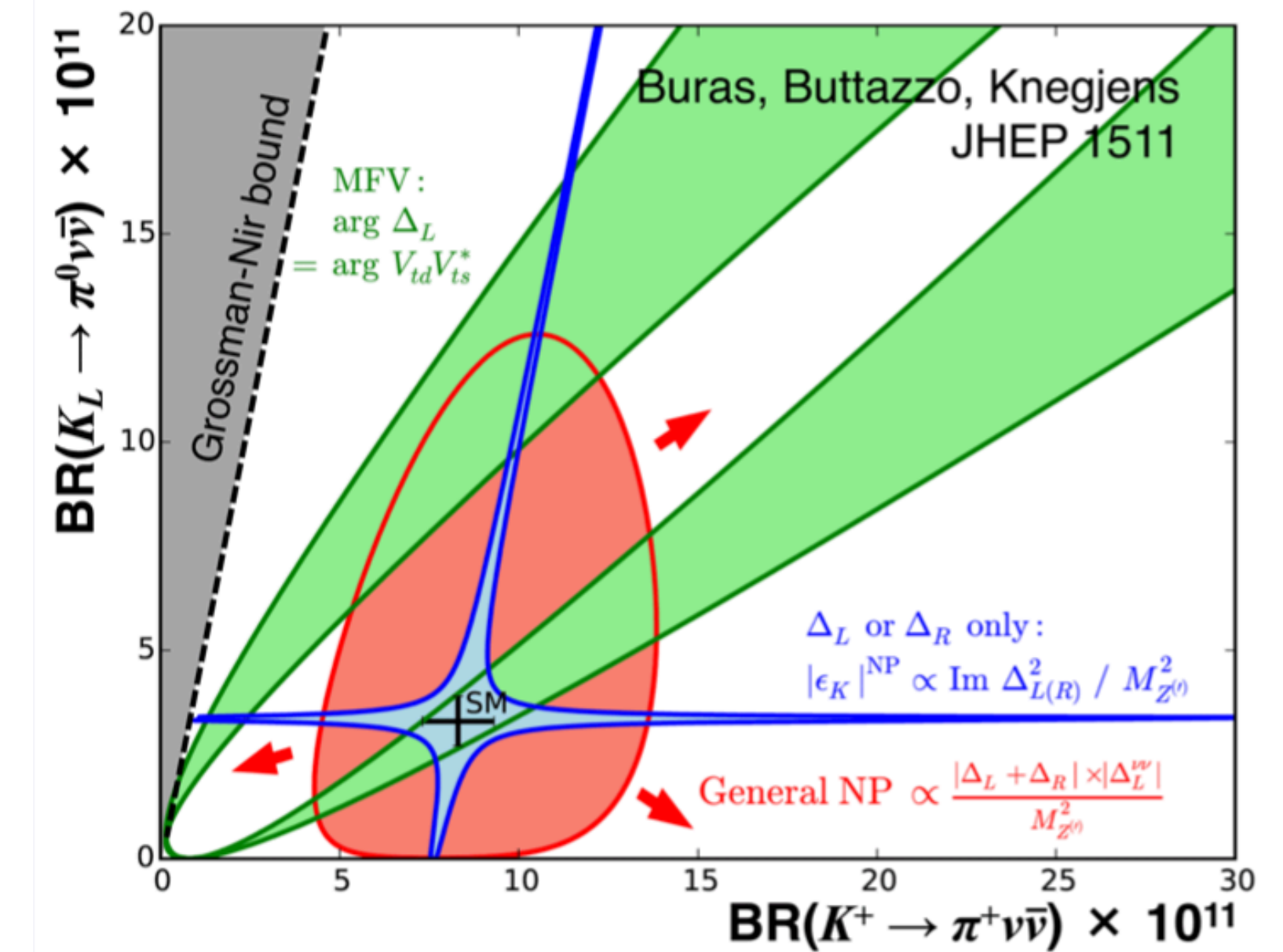
Il divario tra la precisione teorica e il grande errore sperimentale motiva un forte sforzo sperimentale. È possibile ottenere nuovi vincoli significativi.

Oltre il modello standard...

| Model | Λ [TeV] | Effect on $\text{BR}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$ | Effect on $\text{BR}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu})$ | Refs. |
|--|-----------------|--|--|-------|
| Leptoquarks, most models | 1–20 | Very large enhancements; mainly ruled out | | [25] |
| Leptoquarks, U_1 | 1–20 | +10% to +60% | +100% to +800% | [25] |
| Vector-like quarks | 1–10 | –90% to +60% | –100% to +30% | [26] |
| Vector-like quarks + Z' | 10 | –80% to +400% | –100% to 0% | [26] |
| Simplified modified Z , no tuning | 1 | –100% to +80% | –100% to –50% | [27] |
| General modified Z , cancellation to 20% | 1 | –100% to +400% | –100% to +500% | [27] |
| SUSY, chargino Z penguin | 4–6 TeV | | –100% to –40% | [28] |
| SUSY, gluino Z penguin | 3–5.5 TeV | 0% to +60% | –20% to +60% | [29] |
| SUSY, gluino Z penguin | 10 | Small effect | 0% to +300% | [30] |
| SUSY, gluino box, tuning to 10% | 1.5–3 | $\pm 10\%$ | $\pm 20\%$ | [31] |
| LHT | 1 | $\pm 20\%$ | –10% to –100% | [32] |

Table 1: Effects on BRs for $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ decays in various SM extensions, with constraints from other kaon observables, including in particular $\text{Re } \epsilon'_K / \epsilon_K$.

- [25] C. Bobeth and A. J. Buras, JHEP **1802** (2018) 101
- [26] C. Bobeth, A. J. Buras, A. Celis and M. Jung, JHEP **1704** (2017) 079
- [27] M. Endo, T. Kitahara, S. Mishima and K. Yamamoto, Phys. Lett. B **771** (2017) 37
- [28] M. Endo, S. Mishima, D. Ueda and K. Yamamoto, Phys. Lett. B **762** (2016) 493
- [29] M. Endo, T. Goto, T. Kitahara, S. Mishima, D. Ueda and K. Yamamoto, JHEP **1804** (2018) 019
- [30] M. Tanimoto and K. Yamamoto, PTEP **2016** (2016) 123B02
- [31] A. Crivellin, G. D'Ambrosio, T. Kitahara and U. Nierste, Phys. Rev. D **96** (2017) 015023
- [32] M. Blanke, A. J. Buras and S. Recksiegel, Eur. Phys. J. C **76** (2016) 182



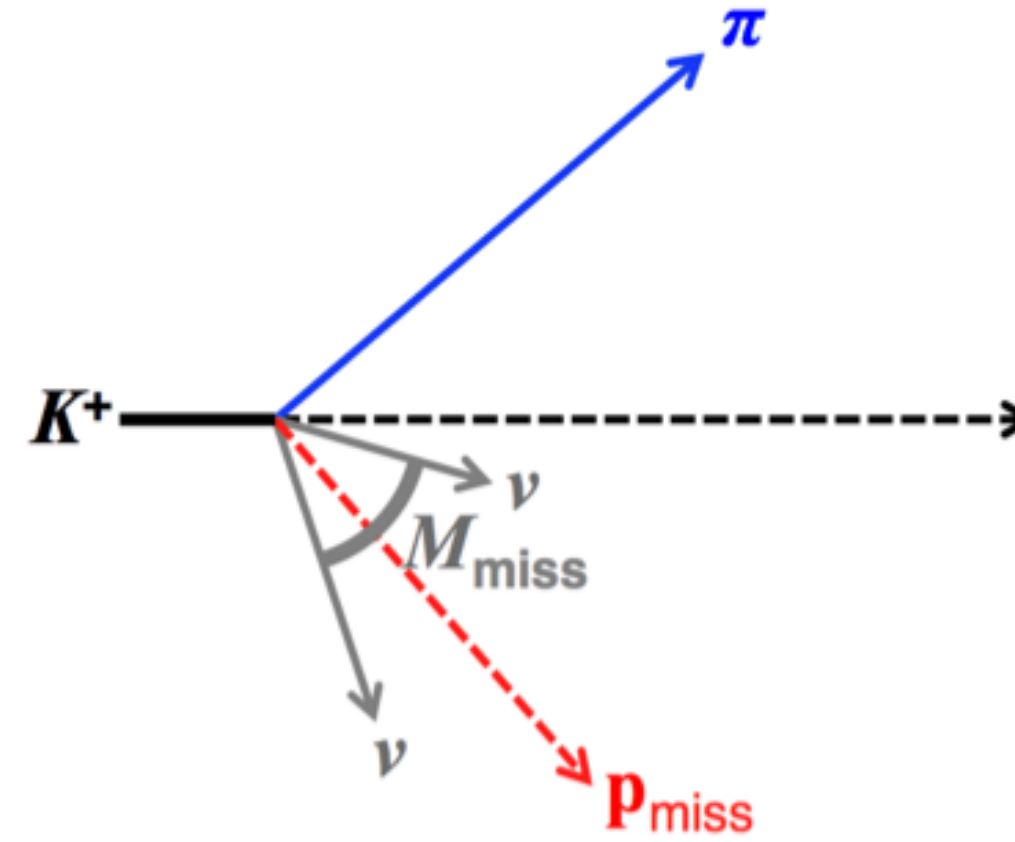
- Models with CKM-like flavor structure
 - Models with MFV
- Models without above constraints
 - Randall-Sundrum
- Models with new flavor-violating interactions in which either LH or RH couplings dominate
 - Z/Z' models with pure LH/RH couplings
 - Littlest Higgs with T parity

La strategia di NA62 per misurare $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$

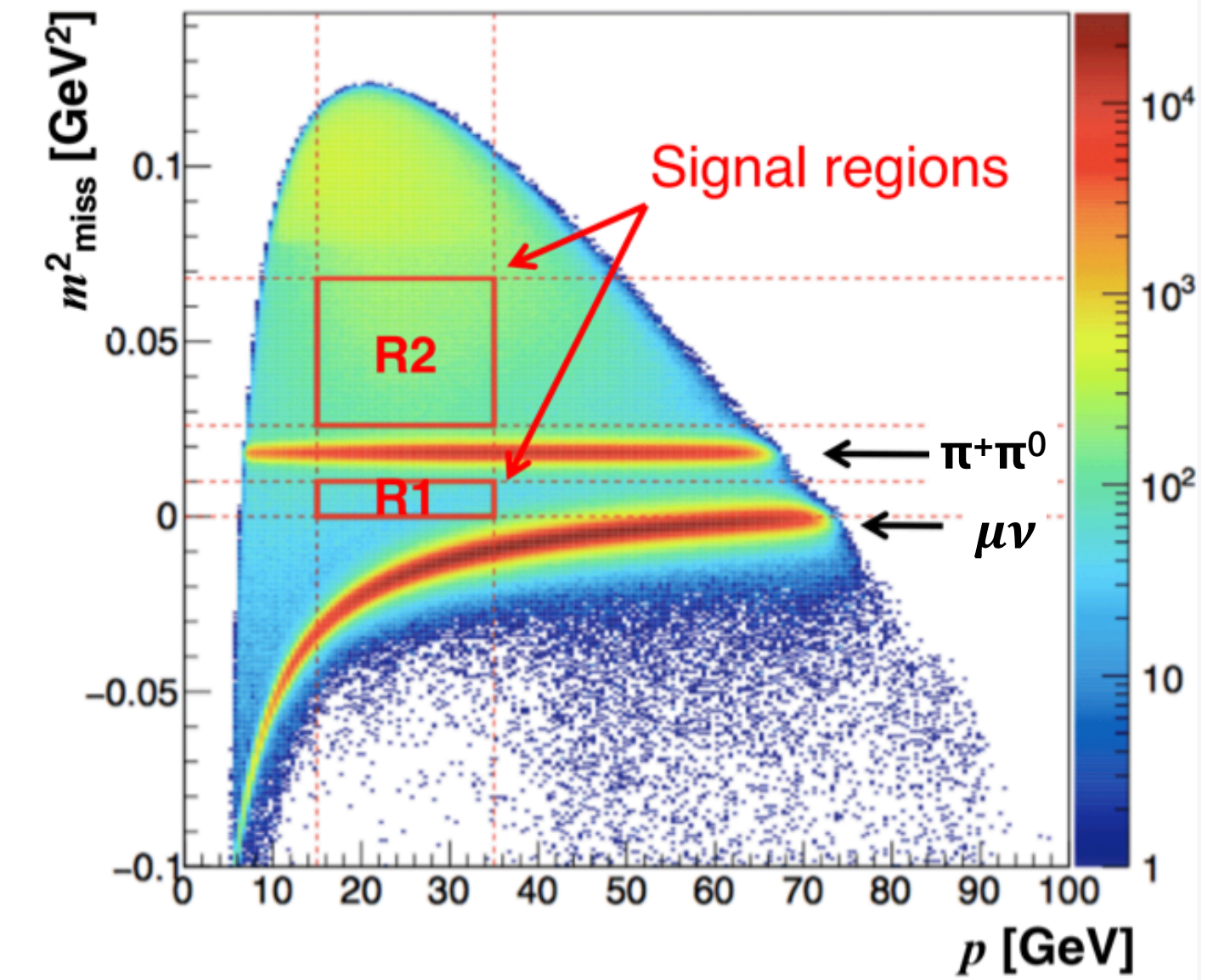


Decadimento del K in volo:

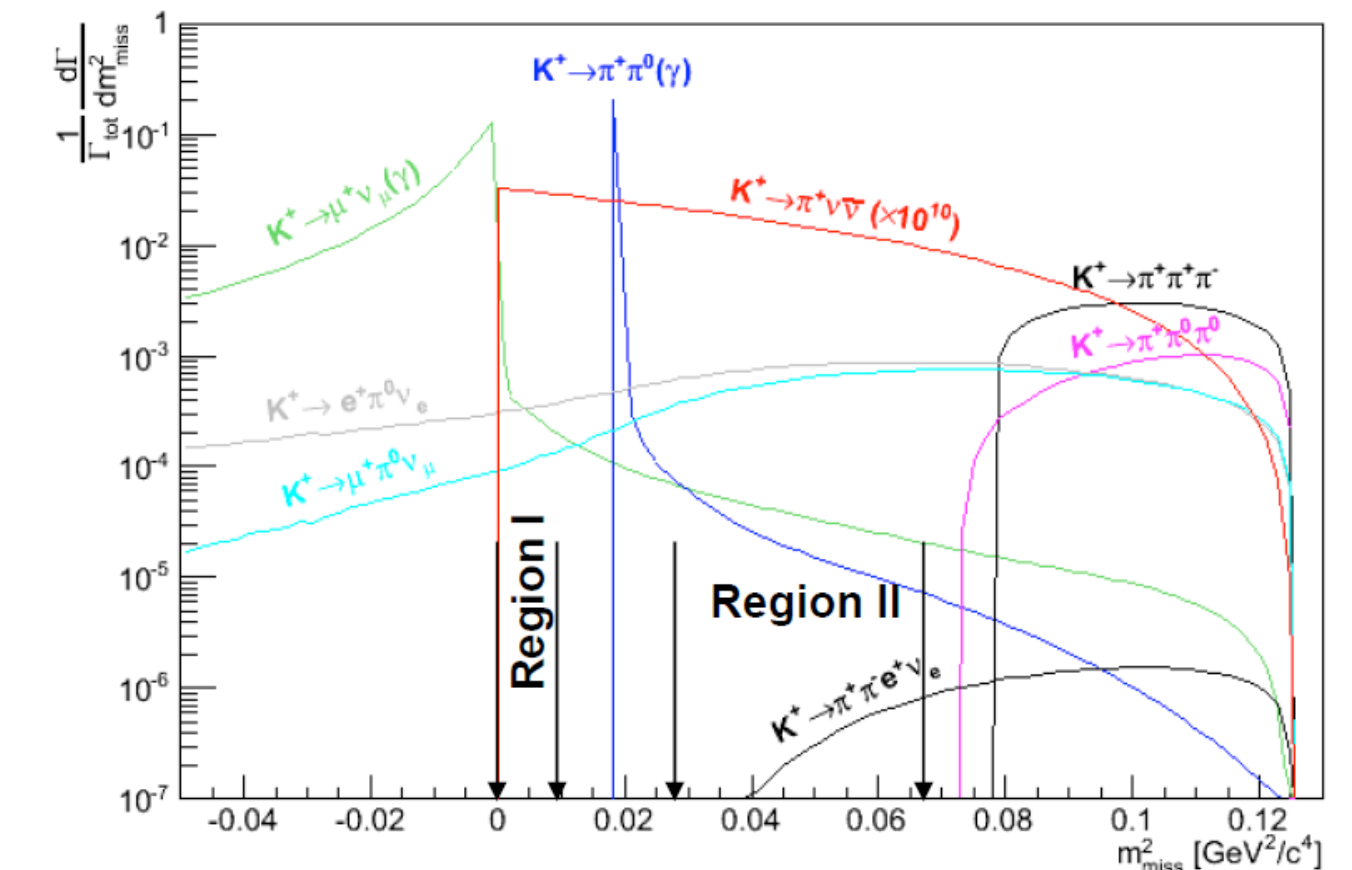
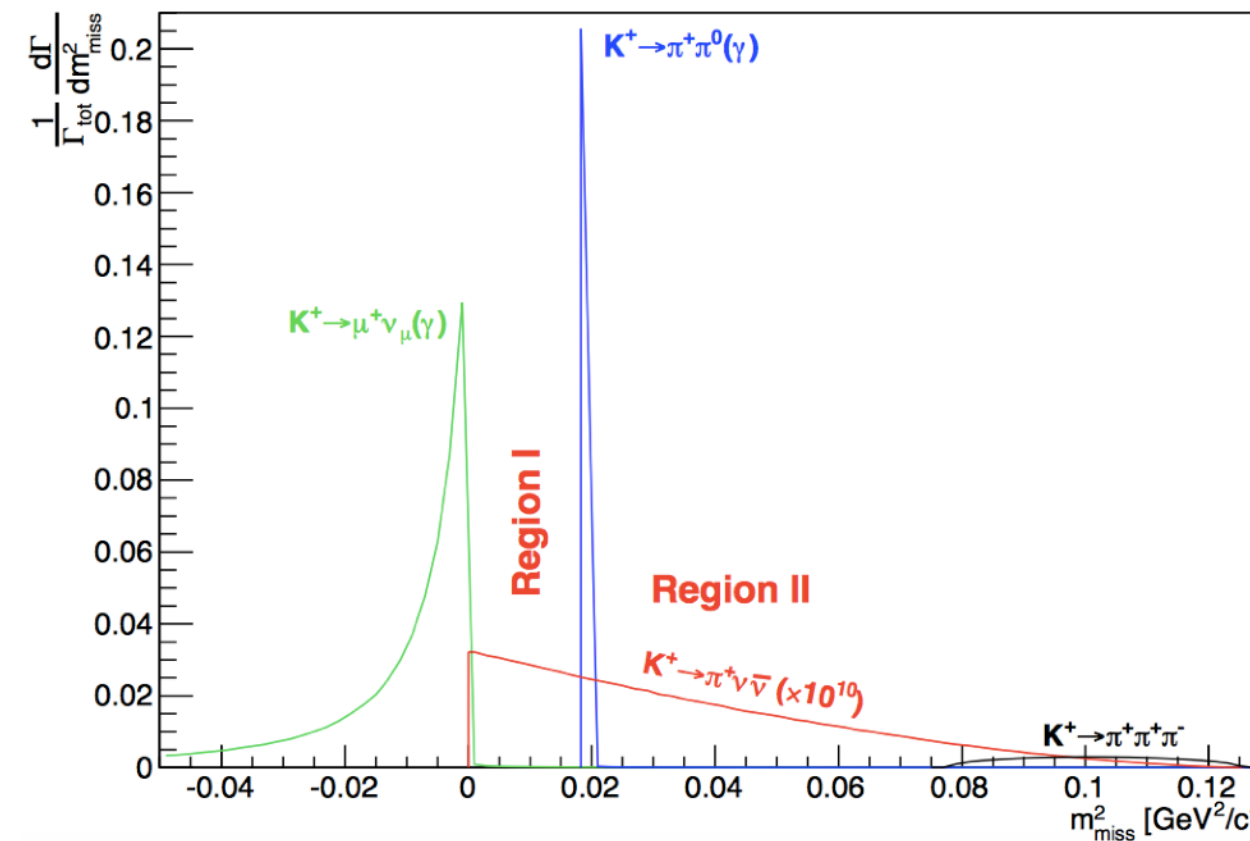
- ▶ K^+ : Particella in ingresso, indentificata nella regione a monte
- ▶ π^+ particella figlia identificata nella regione a valle
- ▶ Nessun'altra particella: energia mancante: $M^2_{\text{miss}} = (p_K - p_\pi)^2$



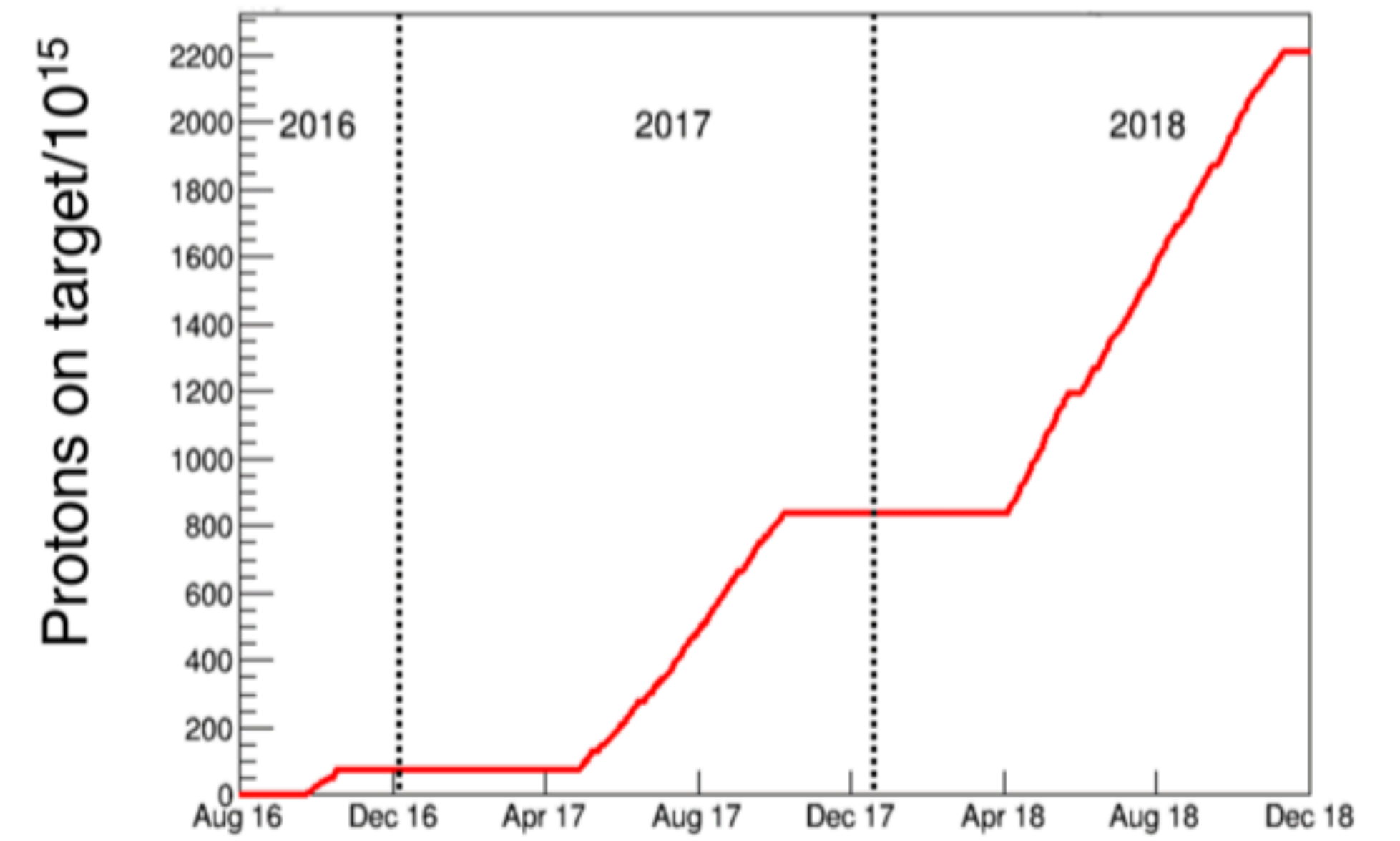
| Decay | BR | Main Rejection Tools |
|--|-----|-----------------------------|
| $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu (\gamma)$ | 63% | μ -ID + kinematics |
| $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 (\gamma)$ | 21% | γ -veto + kinematics |
| $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ | 6% | multi-track + kinematics |
| $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$ | 2% | γ -veto + kinematics |
| $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ | 5% | e -ID + γ -veto |
| $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu$ | 3% | μ -ID + γ -veto |



- ▶ $O(100 \text{ ps})$ precisione temporale tra i diversi rivelatori
- ▶ $O(10^4)$ rimozione dei fondi grazie alla cinematica
- ▶ $O(10^8)$ potenza di reiezione dei μ ($K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$)
- ▶ $O(10^8)$ potenza di reiezione dei π (es: $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$, $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$)

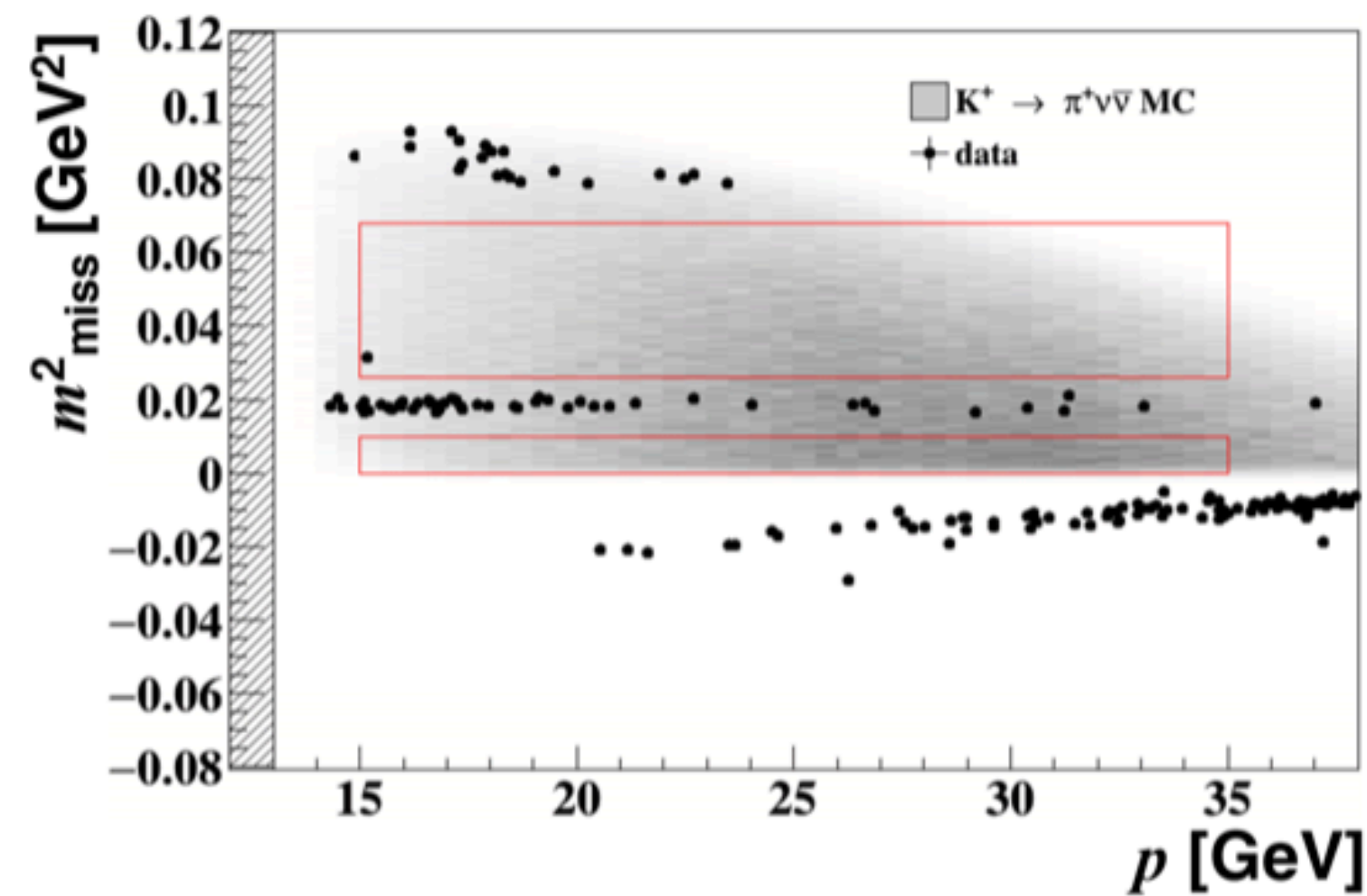


NA62 Run 1



NA62 Run 1

2016 data



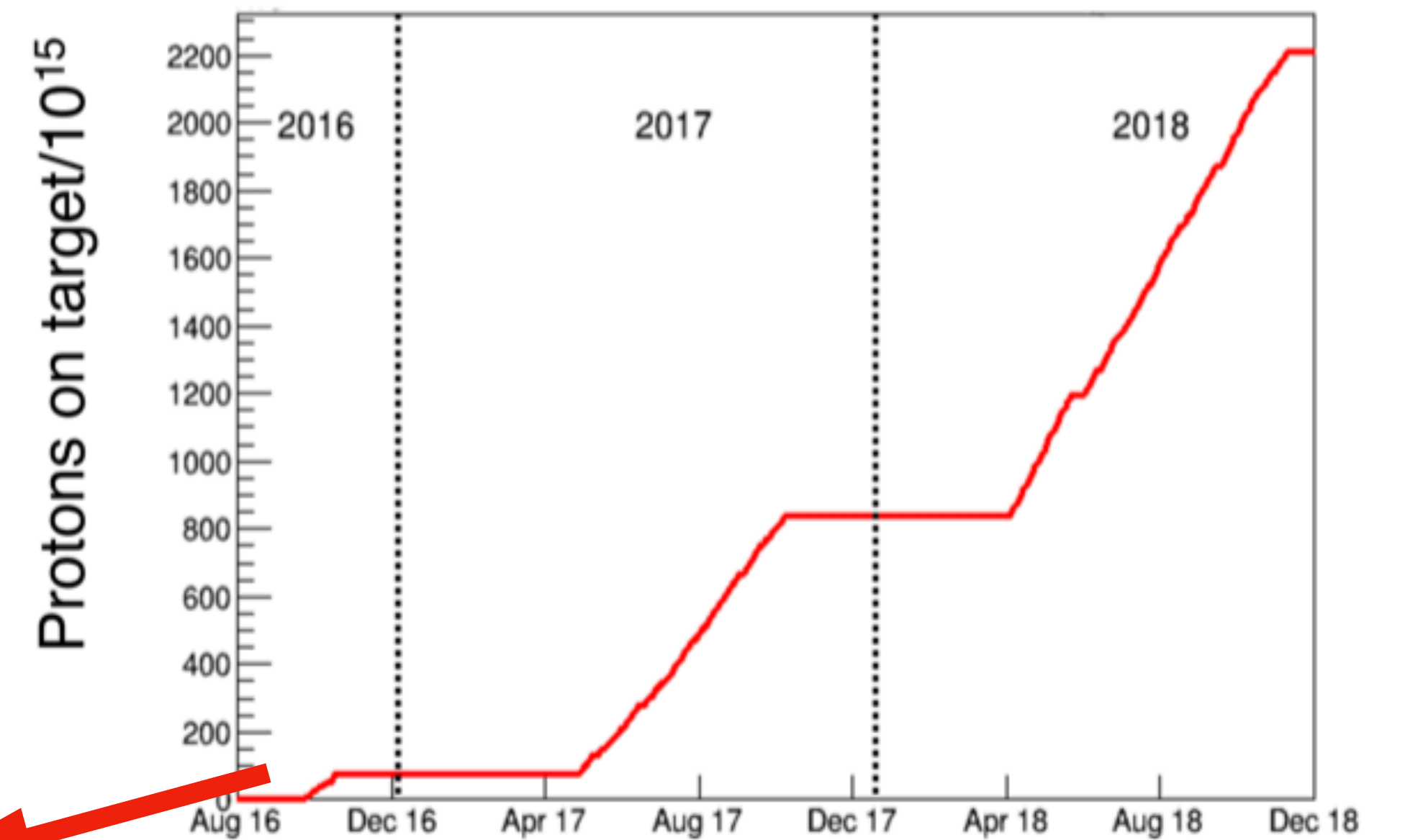
SES: $(3.15 \pm 0.24) \times 10^{-10}$

Expected signal: 0.27 ± 0.38 evts

Expected bkg: 0.15 ± 0.09 evts

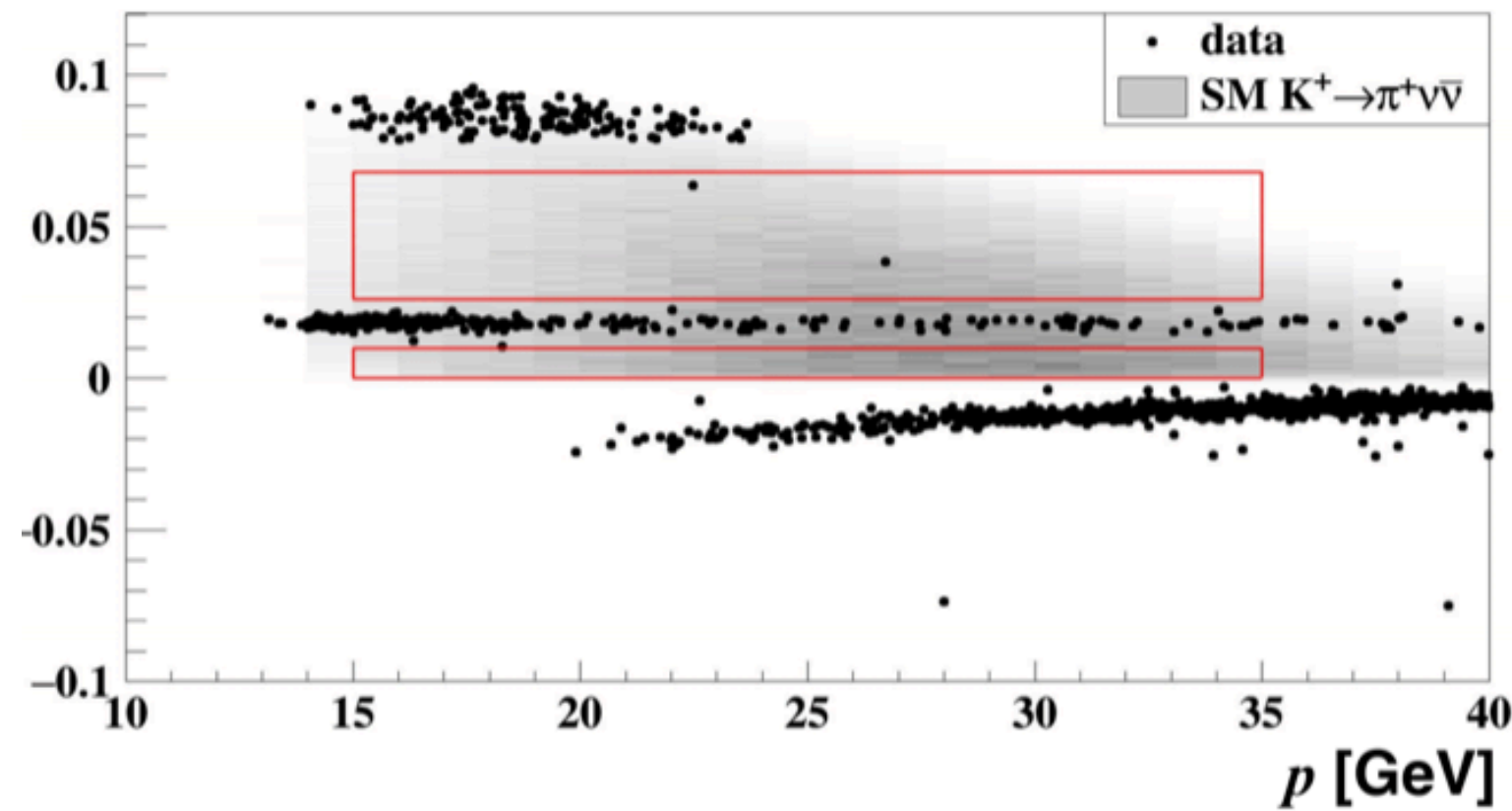
1 event observed

PLB 791(2019)156



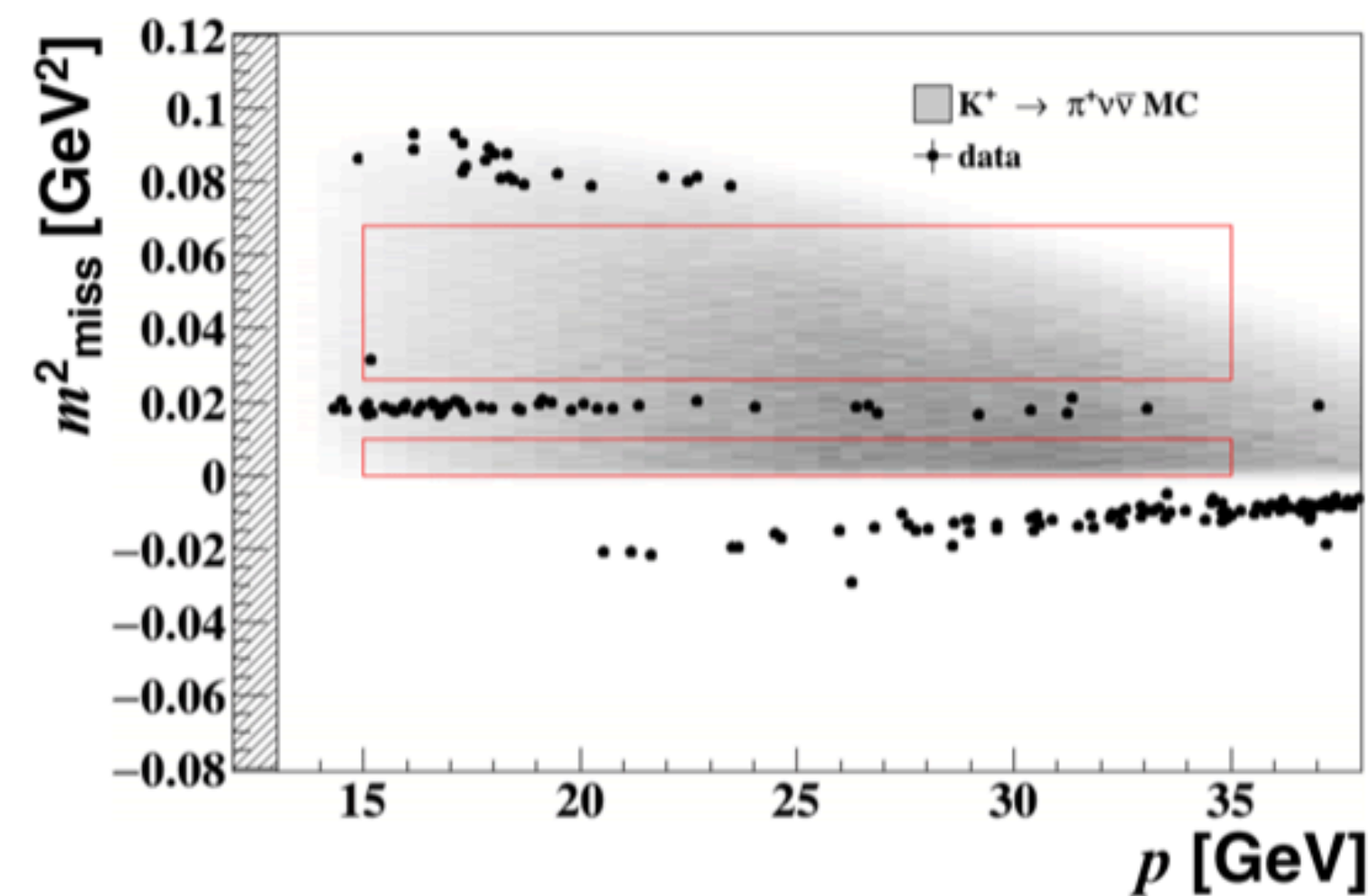
NA62 Run 1

2017 data



SES: $(0.389 \pm 0.024) \times 10^{-10}$
 Expected signal: 2.16 ± 0.29 evts
 Expected bkg: 1.46 ± 0.30 evts
2 event observed
arXiv:2007.08218

2016 data

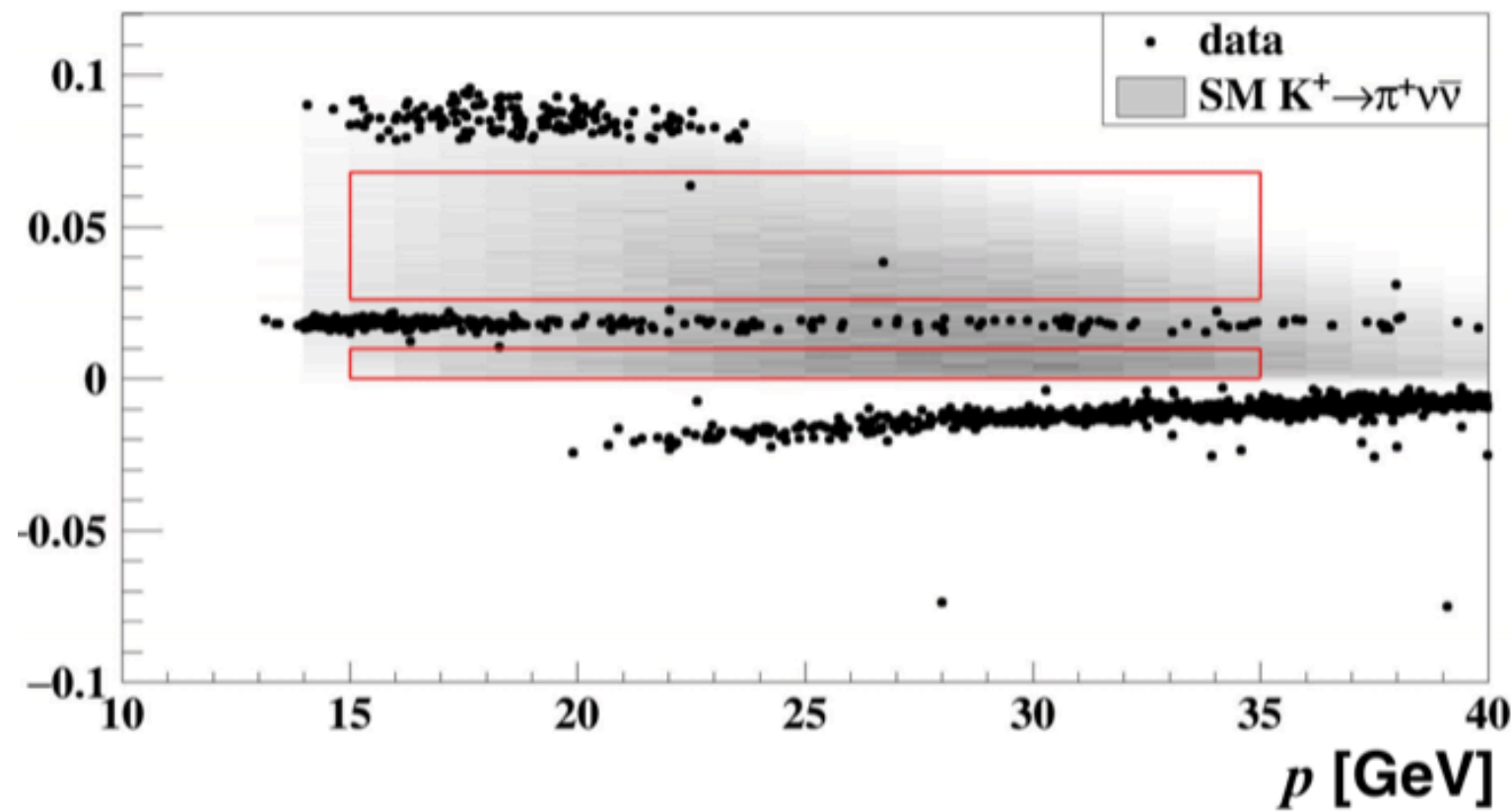


SES: $(3.15 \pm 0.24) \times 10^{-10}$
 Expected signal: 0.27 ± 0.38 evts
 Expected bkg: 0.15 ± 0.09 evts
1 event observed
PLB 791(2019)156



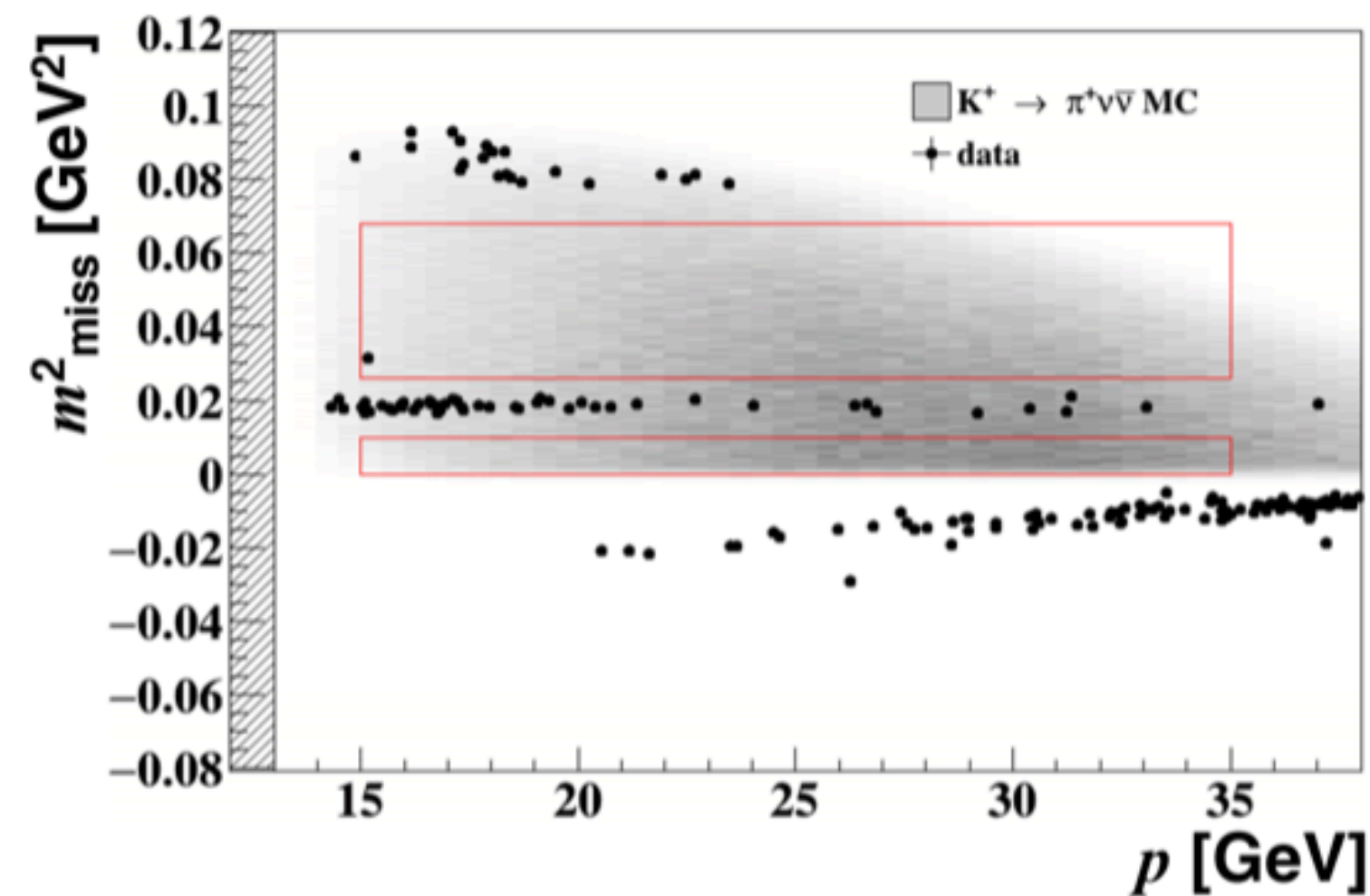
NA62 Run 1

2017 data

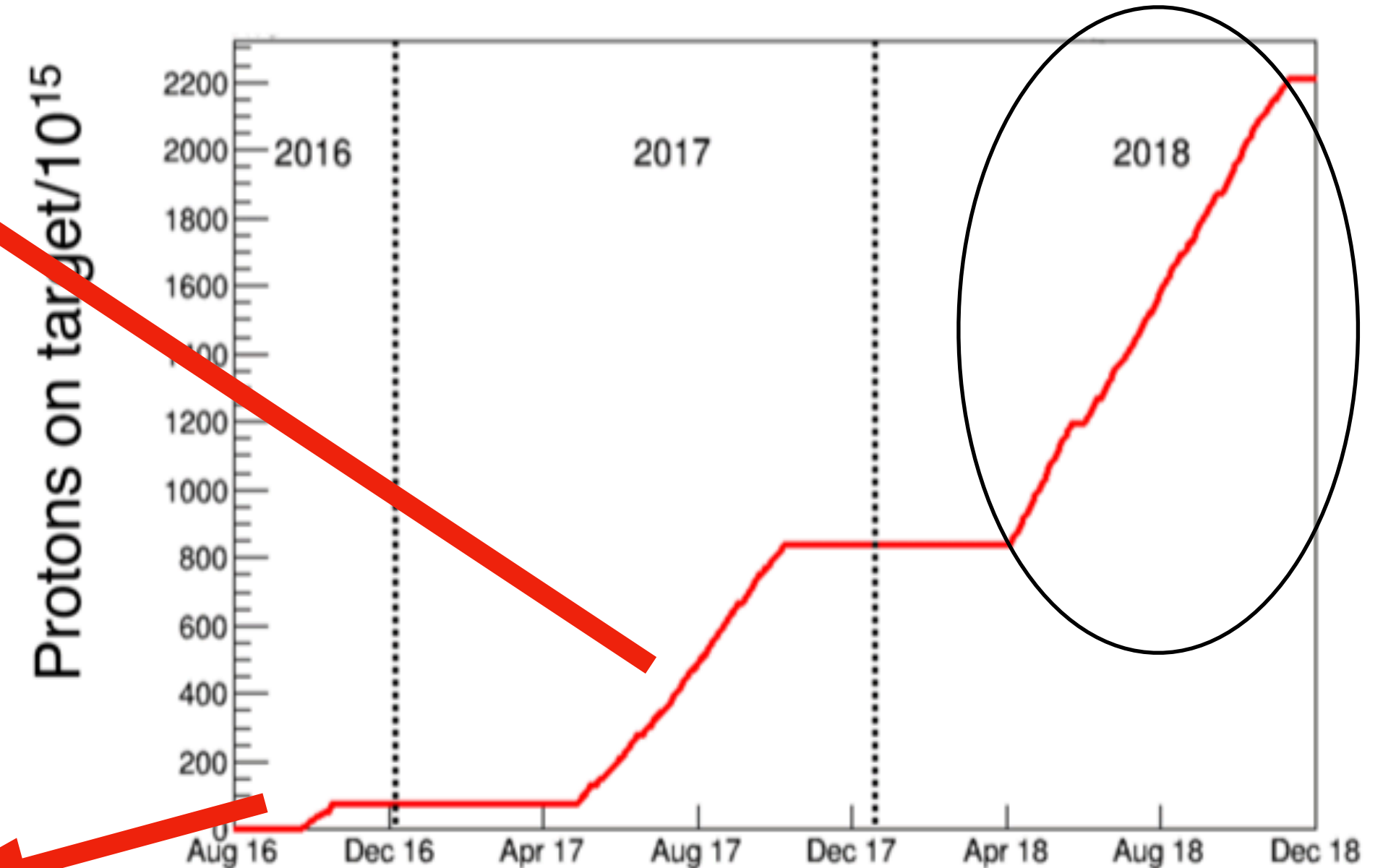


SES: $(0.389 \pm 0.024) \times 10^{-10}$
 Expected signal: 2.16 ± 0.29 evts
 Expected bkg: 1.46 ± 0.30 evts
2 event observed
arXiv:2007.08218

2016 data

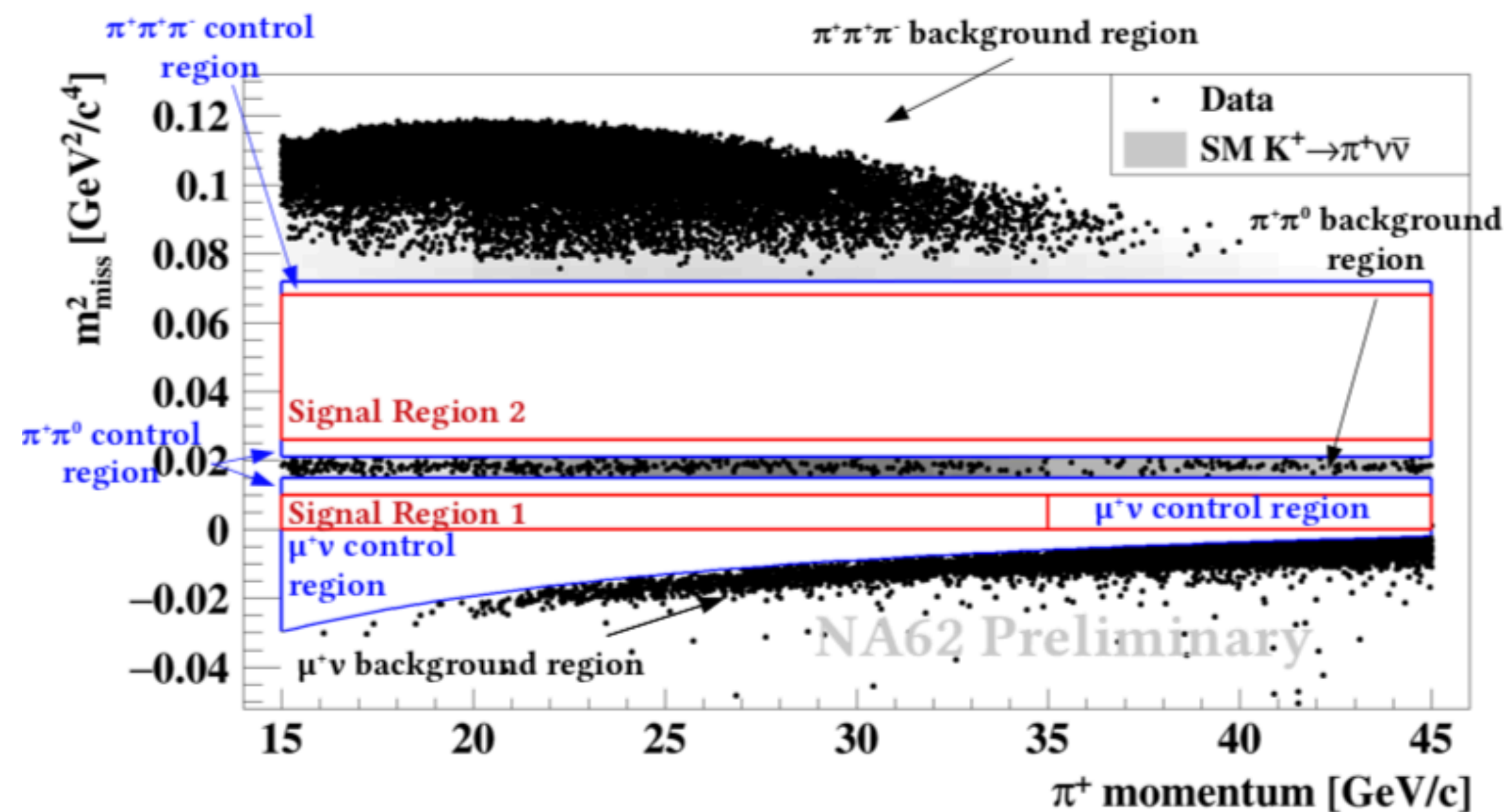


SES: $(3.15 \pm 0.24) \times 10^{-10}$
 Expected signal: 0.27 ± 0.38 evts
 Expected bkg: 0.15 ± 0.09 evts
1 event observed
PLB 791(2019)156



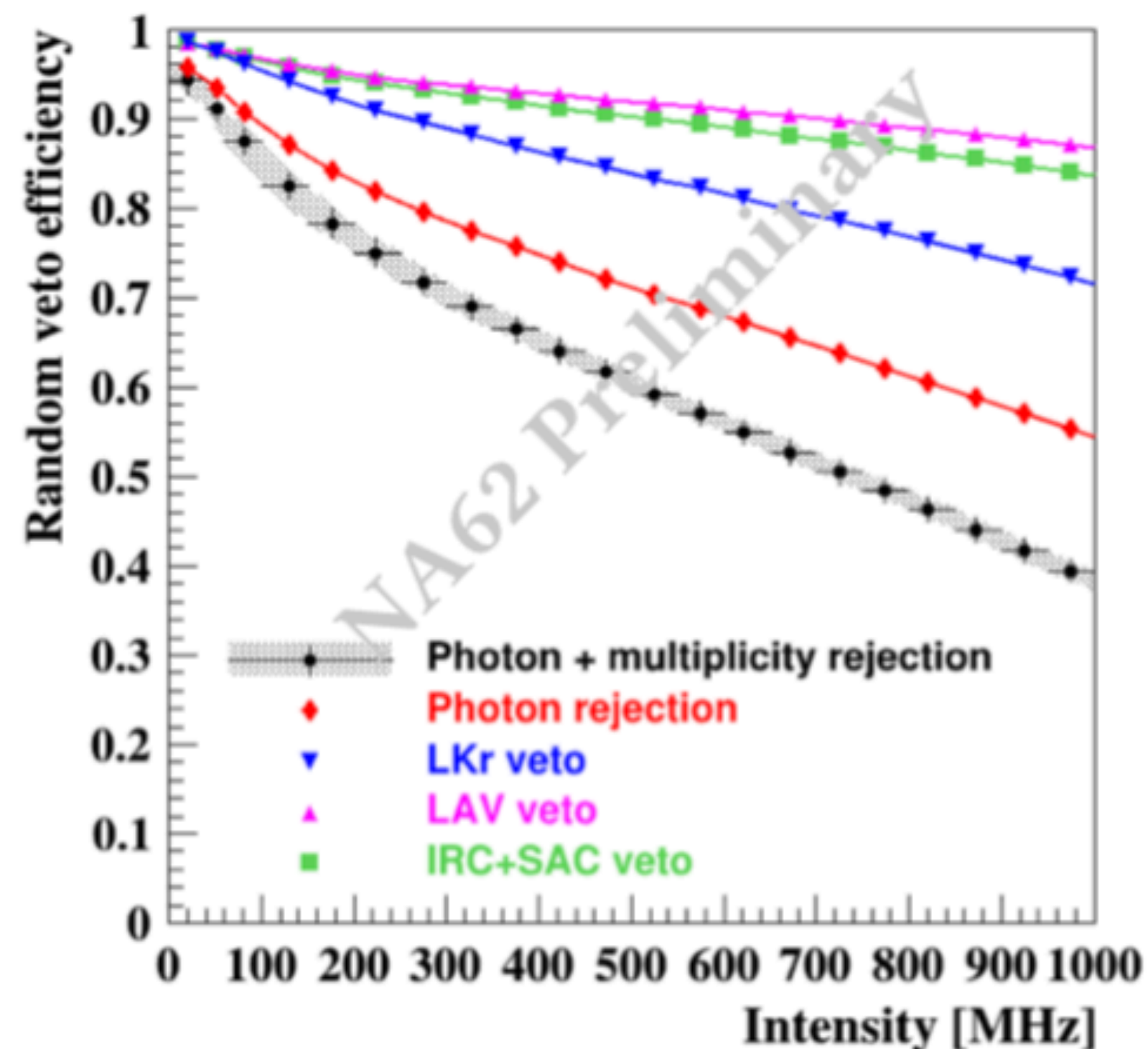
Analisi dati 2018

- ▶ Analisi eseguita in 7 categorie separate
- ▶ La definizione della categoria dipende dalle configurazioni hardware e dalla quantità di moto
- ▶ Selezione ottimizzata separatamente per ciascuna categoria
- ▶ Sensibilità al segnale migliorata rispetto all'analisi del 2017
- ▶ Identificazione delle particelle e rigetto del fondo a monte utilizzando MVA



Signal Event Sensitivity

$$N_{\pi\nu\nu}^{exp} \approx N_{\pi\pi} \epsilon_{trigger} \epsilon_{RV} \frac{A_{\pi\nu\nu}}{A_{\pi\pi}} \frac{Br(\pi\nu\nu)}{Br(\pi\pi)} \implies S.E.S. = \frac{Br(\pi\nu\nu)}{N_{\pi\nu\nu}^{exp}}$$



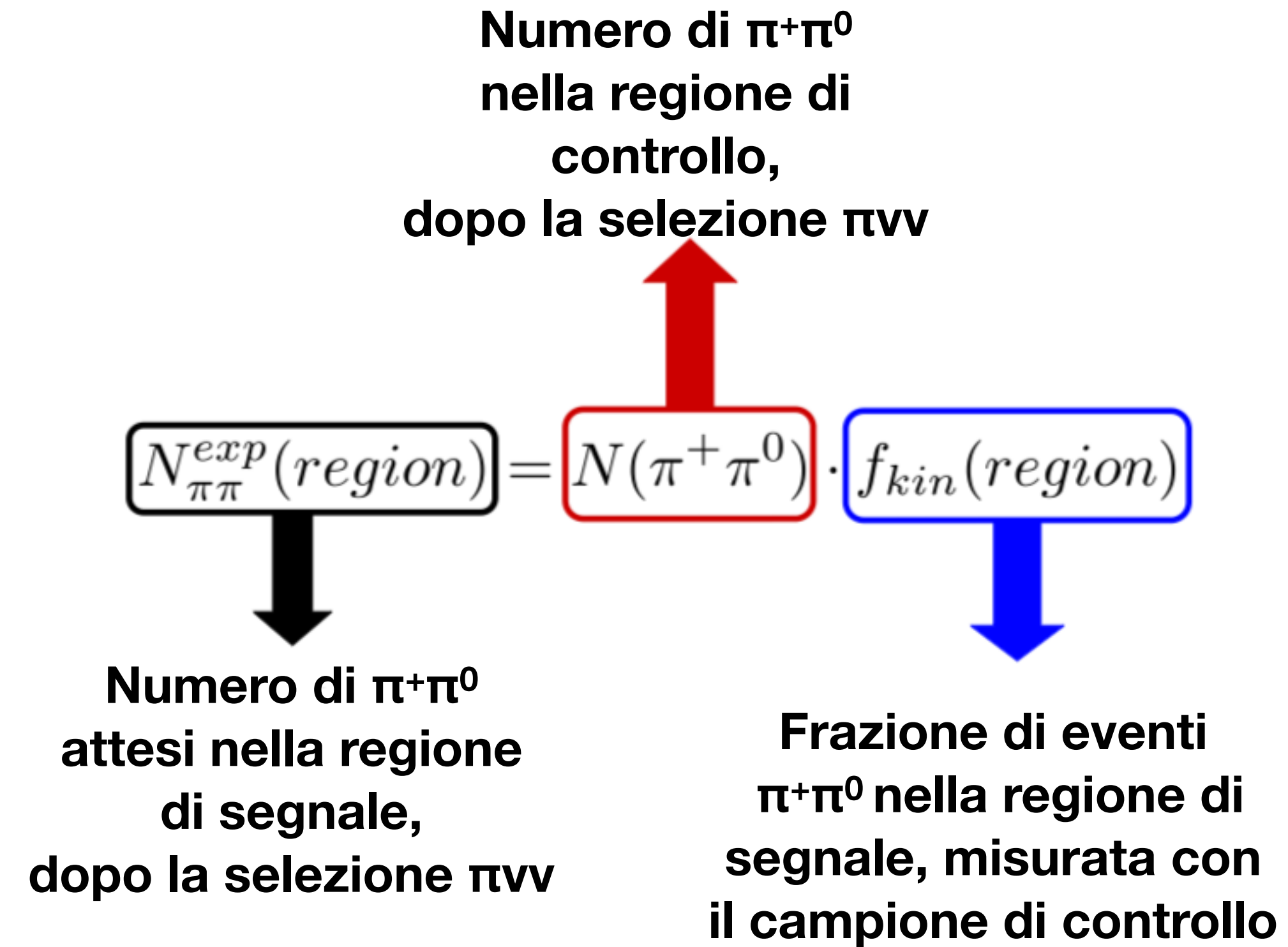
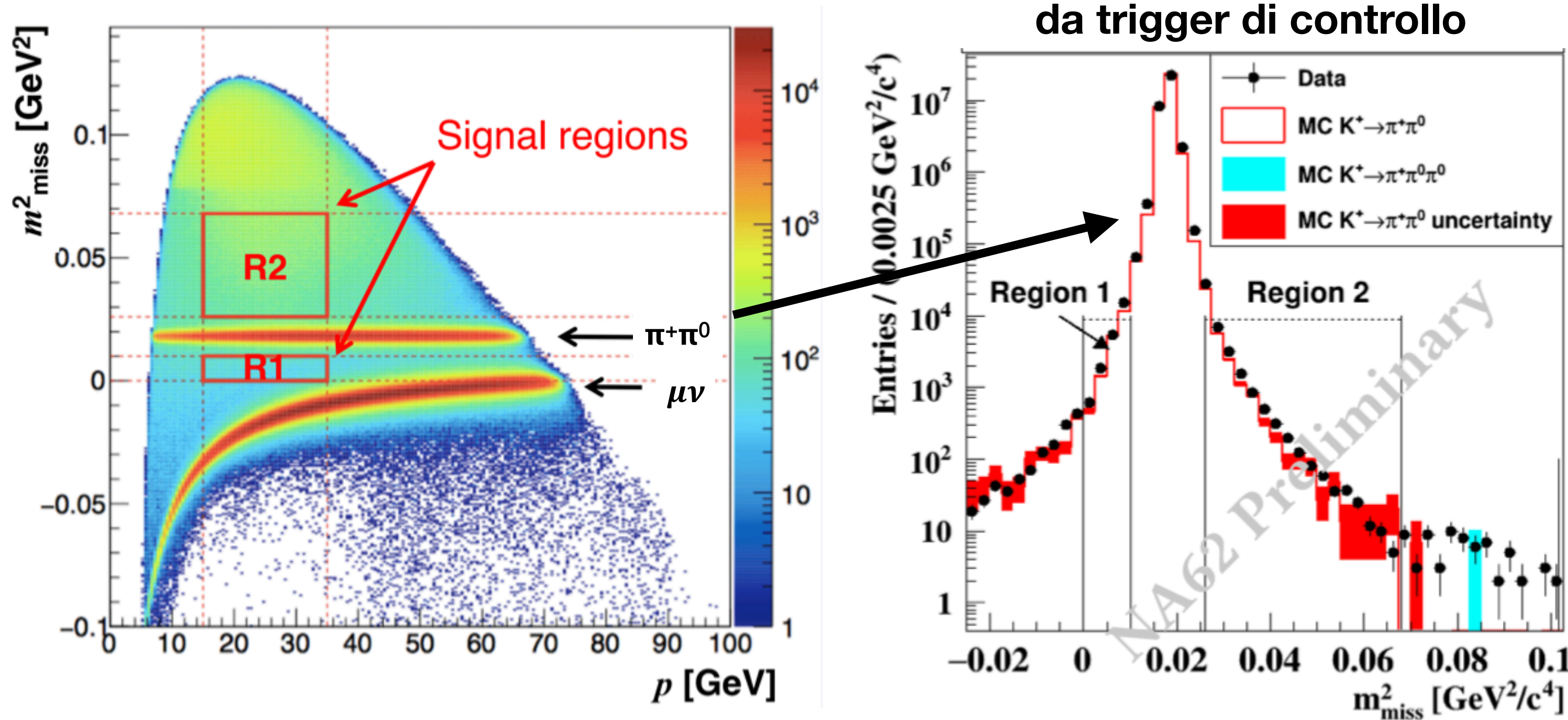
| | Error budget S.E.S. |
|---------------------------|---------------------|
| Trigger efficiency | 5% |
| MC acceptance | 3.5% |
| Random Veto | 2% |
| Background(normalization) | 0.7% |
| Instantaneous intensity | 0.7% |
| Total | 6.5% |

- ▶ Normalizzazione effettuata utilizzando il decadimento $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$
- ▶ Questo permette la cancellazione di effetti sistemati (PID, efficienze del rivelatore, identificazione del K, e perdite di accettazione dovute alla configurazione del fascio)

$$S.E.S. = (1.11 \pm 0.07_{syst.}) \times 10^{-11}$$

Fondi dai decadimenti del K

Code della distribuzione di $\pi^+\pi^0$ che entrano nelle regioni di segnale. Dati da trigger di controllo

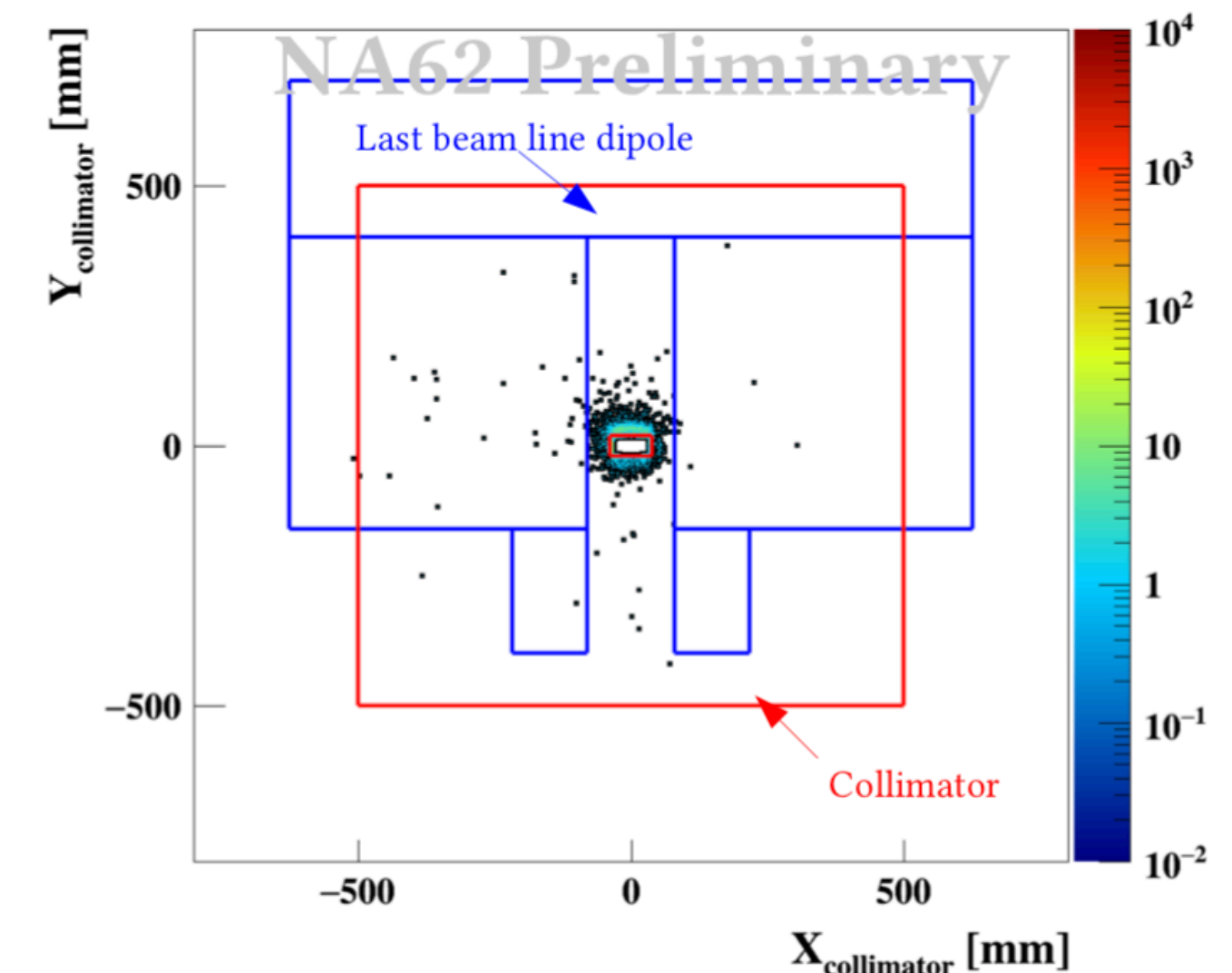


- ▶ La stessa procedura e' usata per i fondi $K^+ \rightarrow \mu+\nu$ e $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$
- ▶ La stima del fondo $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ è stata fatta calcolata utilizzando il Montecarlo normalizzandolo per la SES.

Decadimenti a monte

▶ π^+ prodotti a monte del volume fiduciale (FV):

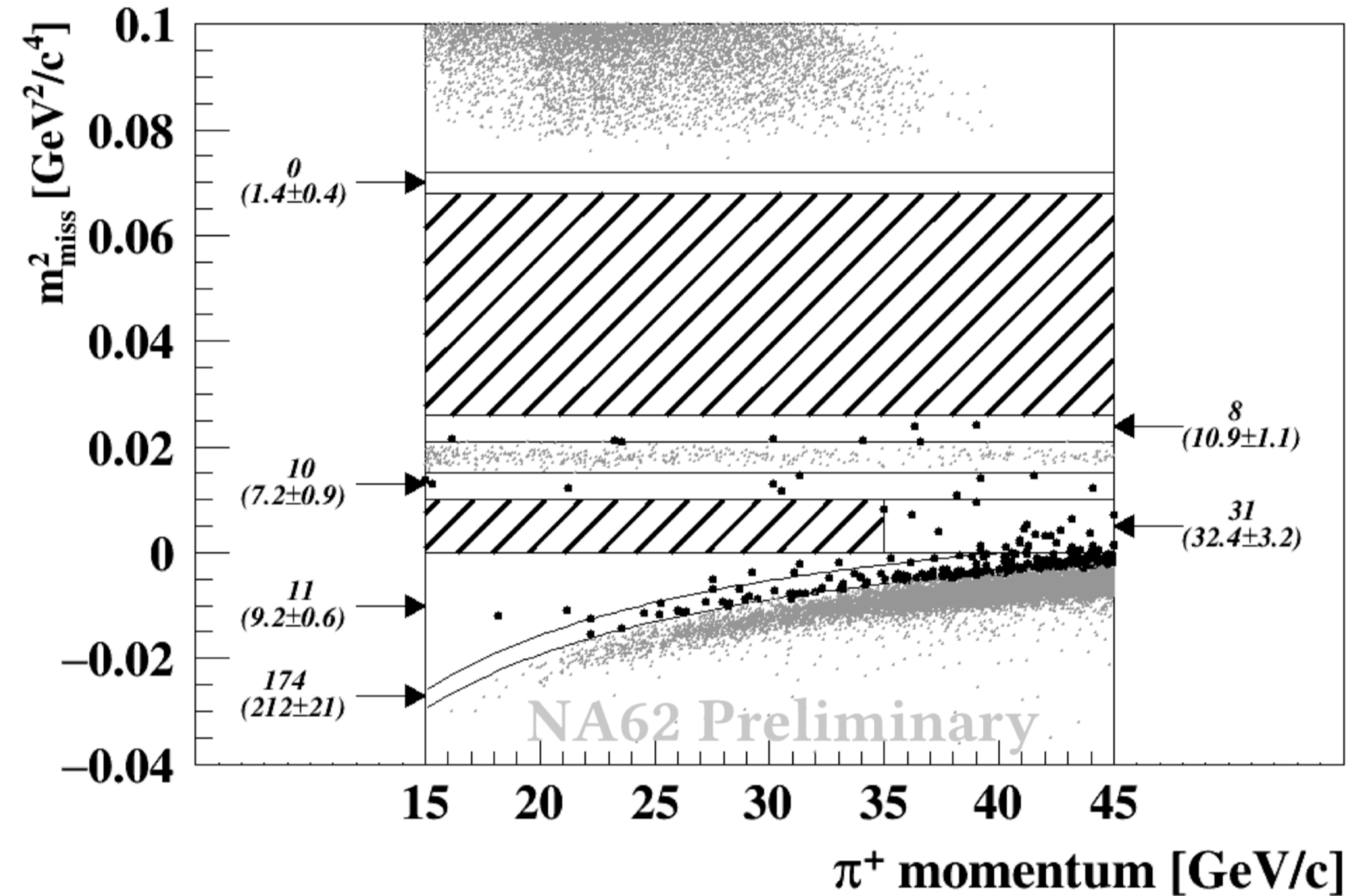
- Decadimenti dei K^+ a monte del FV;
 - Interazioni delle particelle del fascio con il materiale dello spettrometro del fascio;
- ▶ I pioni rilevati sono associati a una particella accidentale entrante in coincidenza temporale;
- ▶ Lo scattering di pioni nella prima camera dello spettrometro puo' modificare la direzione del π^+ eludendo i tagli di protezione;
- ▶ L'Associazione Kaone (accidentale) - pione (prodotto a monte) soddisfa i criteri di selezione;
- ▶ L'origine geometrica di questi eventi ci consente di definire campioni per la convalida in background
- ▶ Stima del background basata sui dati



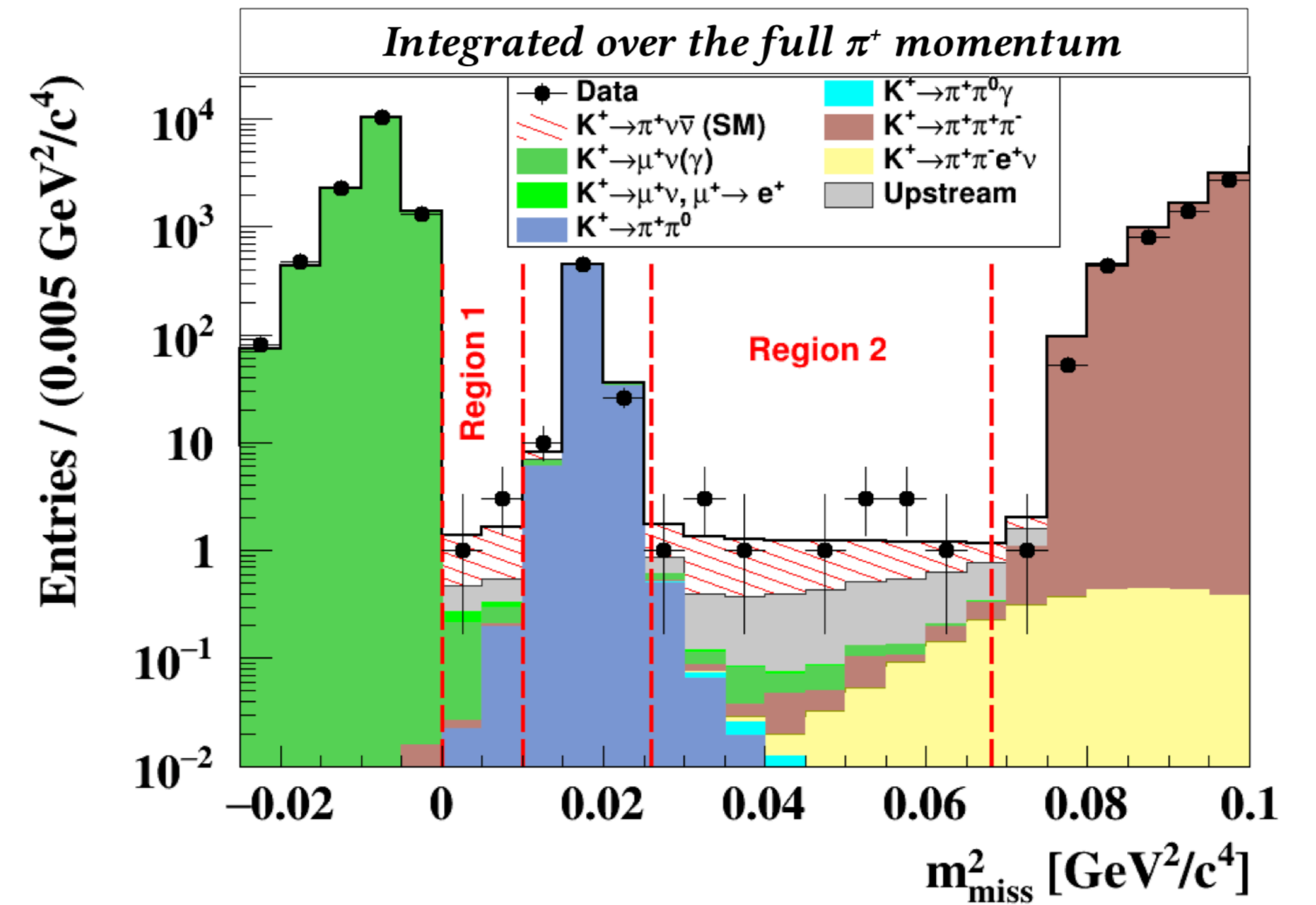
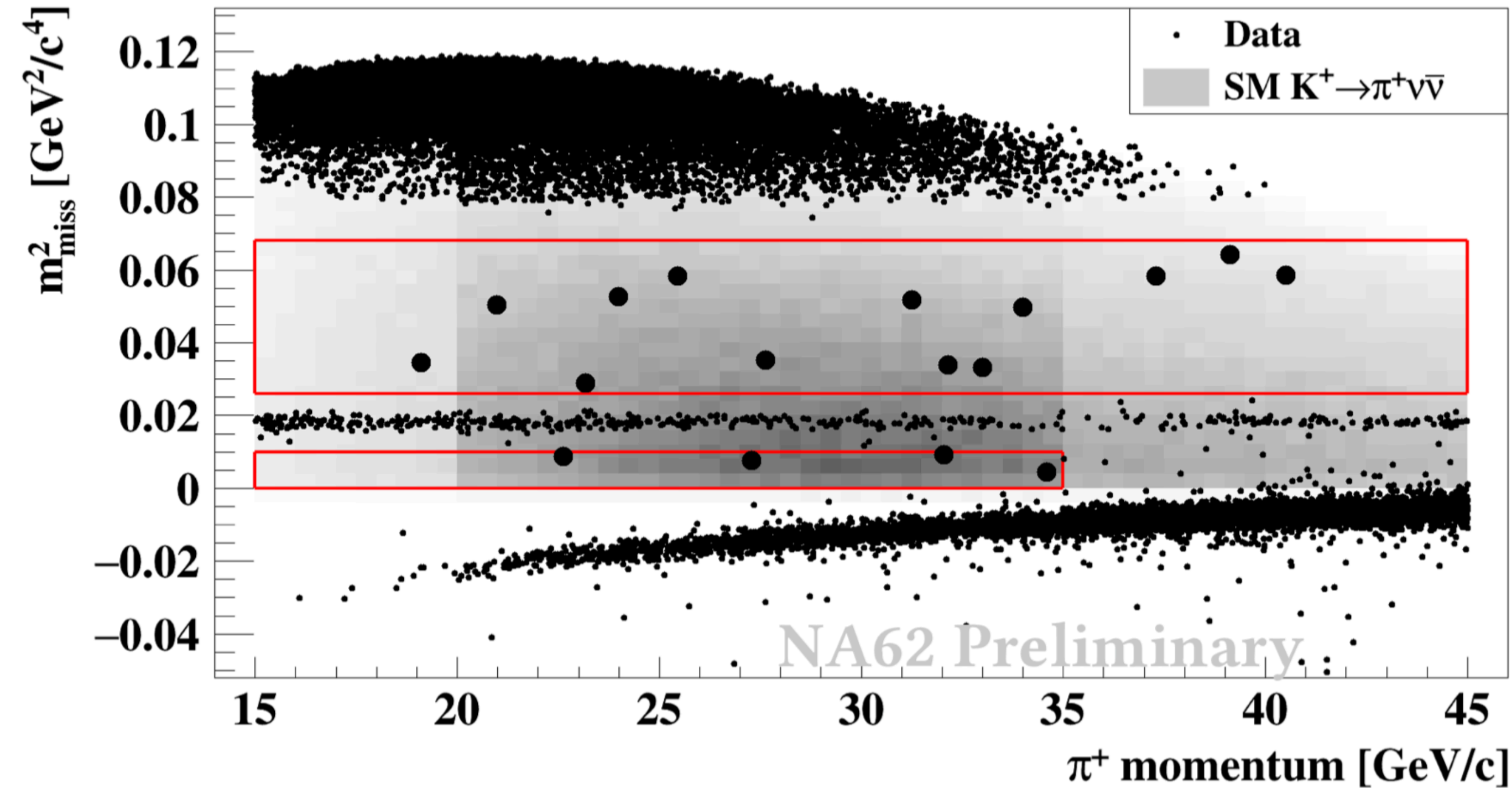
Fondi e eventi di controllo

Fondi attesi

| | 2018 data |
|--------------------------------------|---|
| Expected SM signal | 7.58(40)_{syst} (75)_{ext} |
| $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0(\gamma)$ | 0.75(4) |
| $K^+ \rightarrow \mu^+\nu(\gamma)$ | 0.49(5) |
| $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^-e^+\nu$ | 0.50(11) |
| $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^+\pi^-$ | 0.24(8) |
| $K^+ \rightarrow \pi^+\gamma\gamma$ | < 0.01 |
| $K^+ \rightarrow \pi^0l^+\nu$ | < 0.001 |
| Upstream | $3.30^{+0.98}_{-0.73}$ |
| Total background | $5.28^{+0.99}_{-0.74}$ |



Apertura delle regioni di segnale, risultato

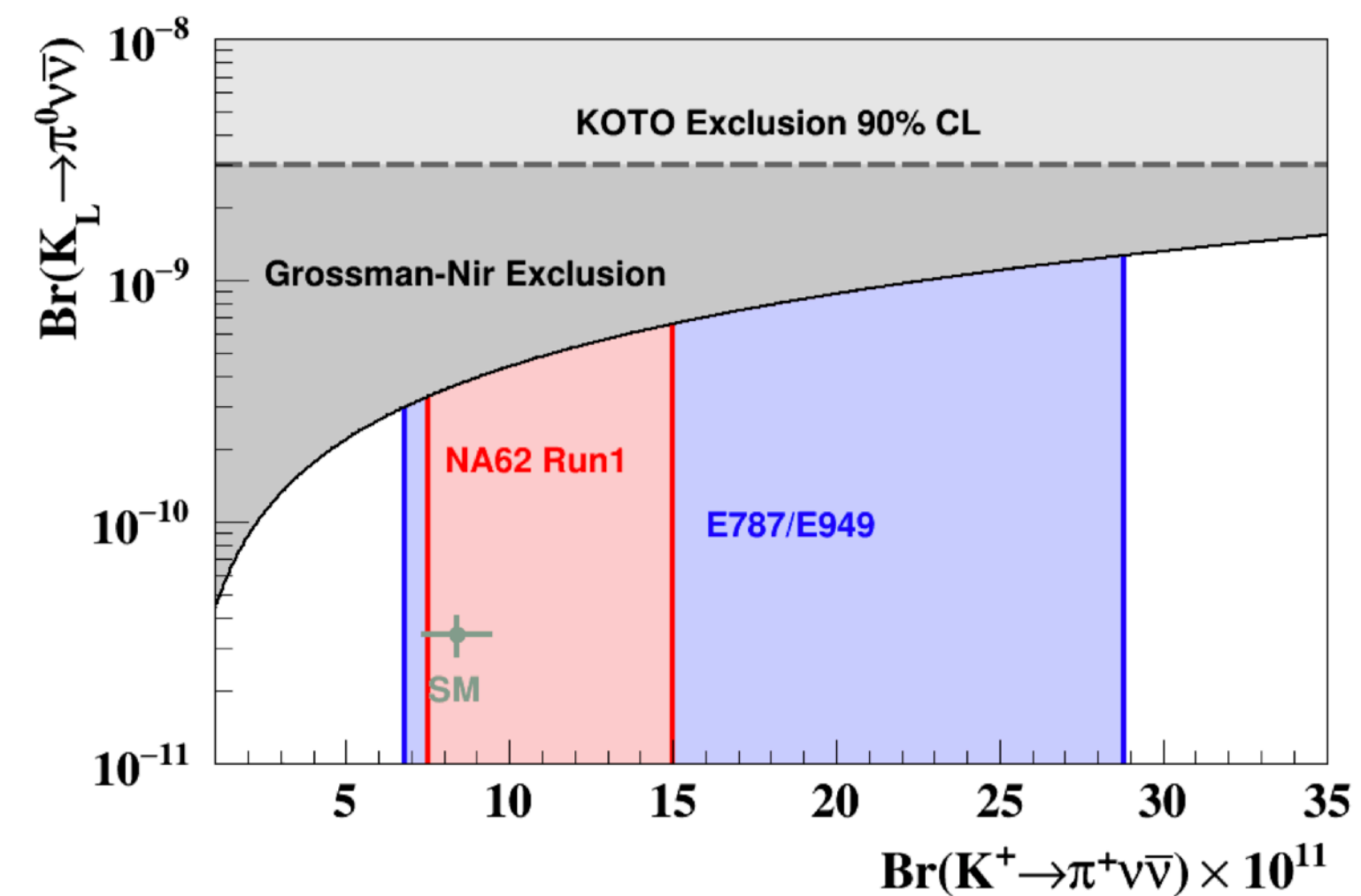
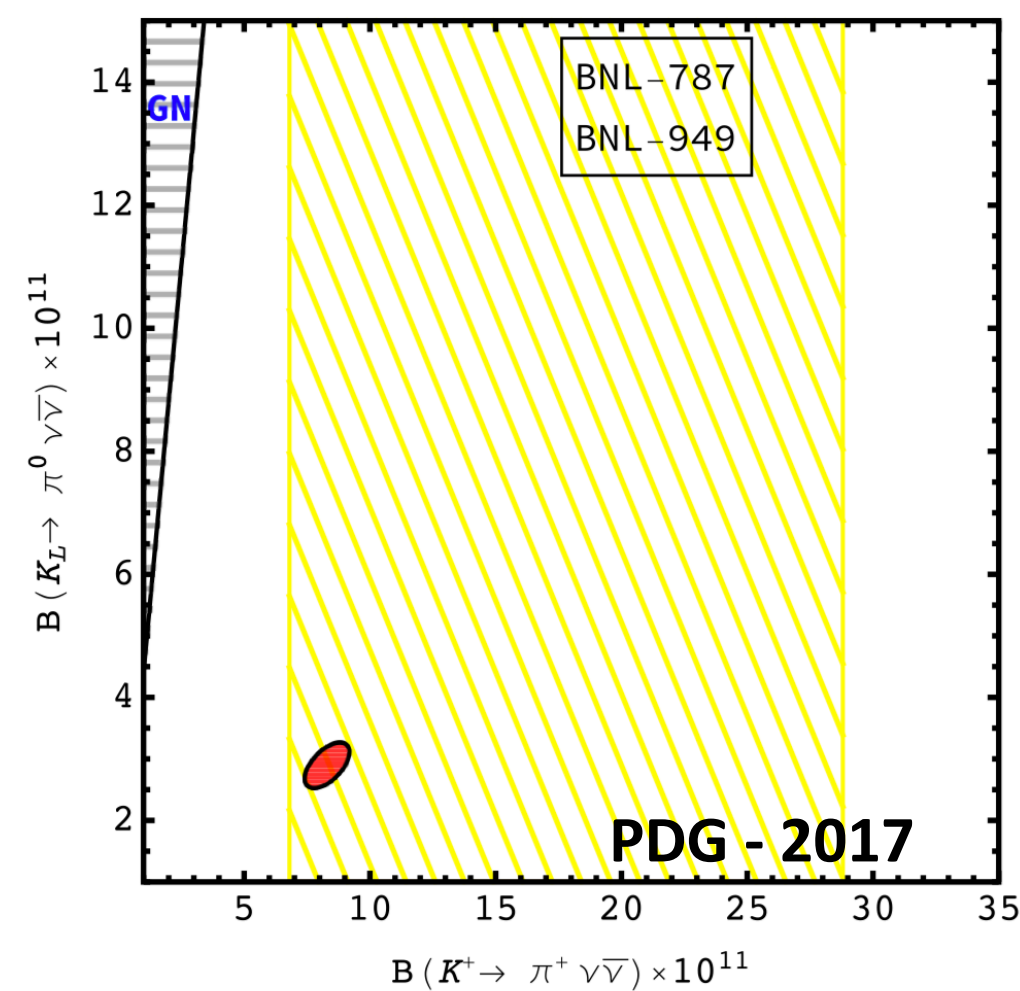
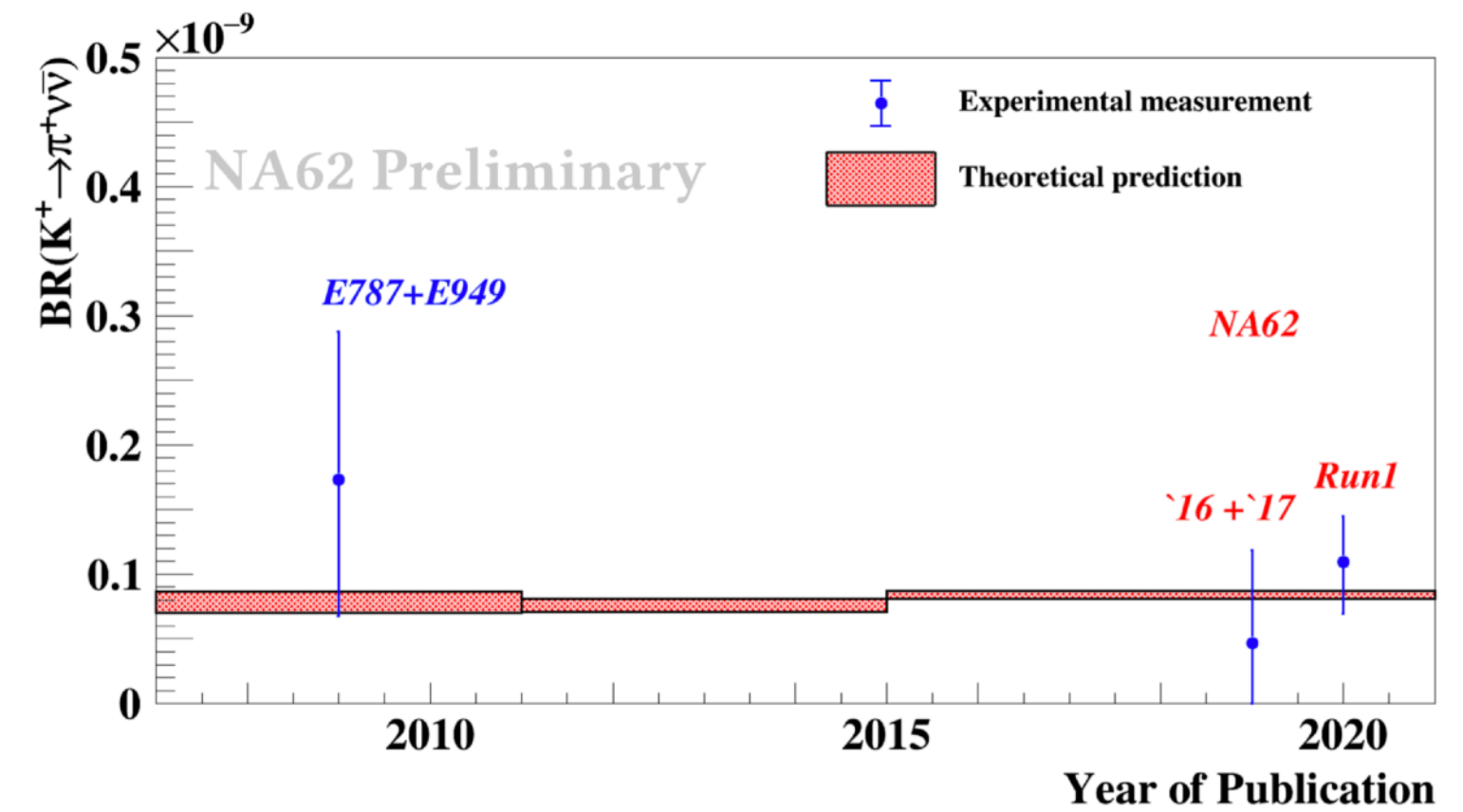
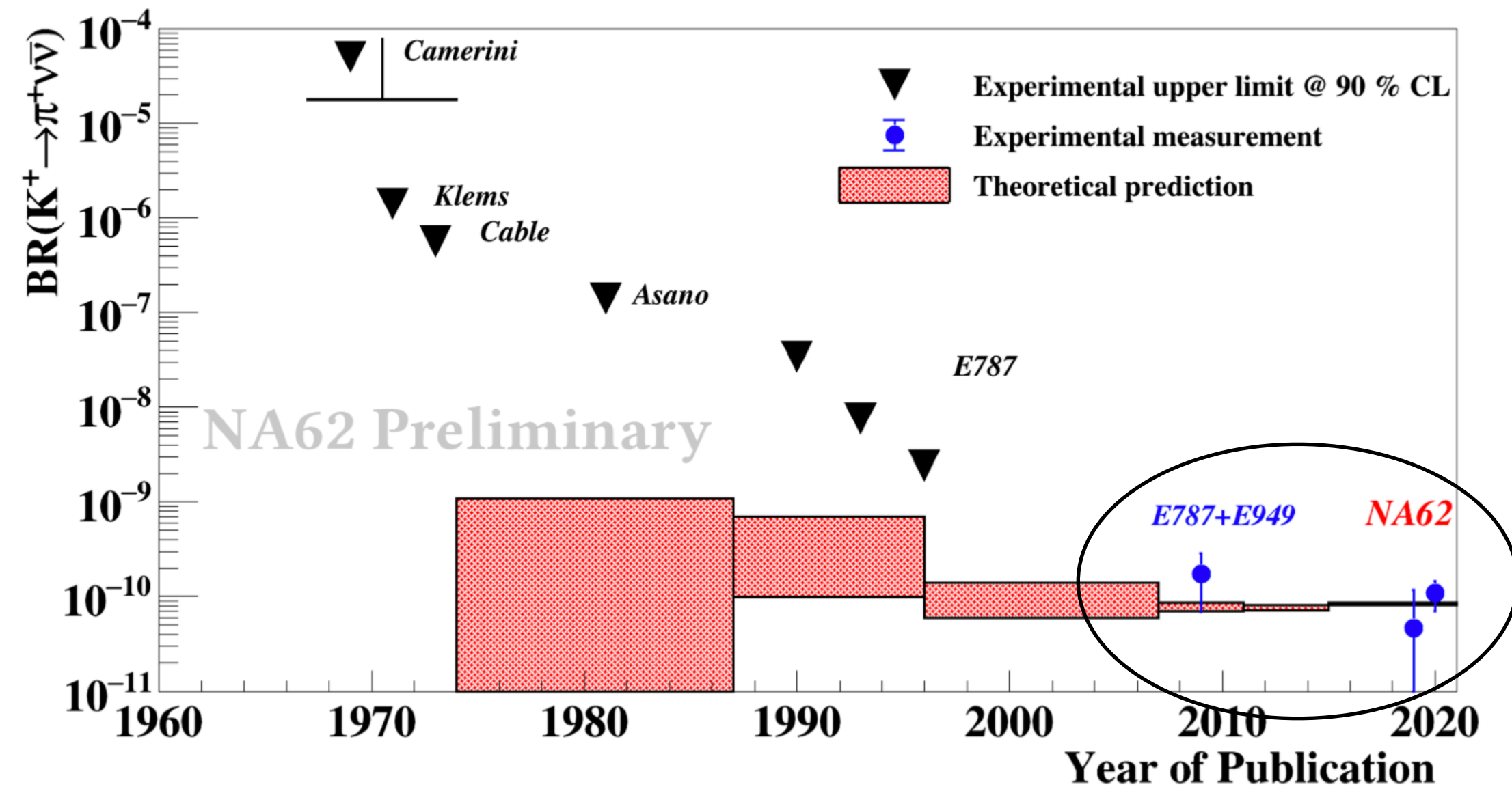


- Fondo atteso: 5.3;
- Segnale SM atteso: 7.6
- Eventi osservati 17

NA62 Run1(2016 + 2017 + 2018) result:

★ $Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (11.0_{-3.5}^{+4.0}{}_{stat.} \pm 0.3_{syst.}) \times 10^{-11}$ (3.5 σ significance)

Si entra nell'era della misura del Branching Ratio

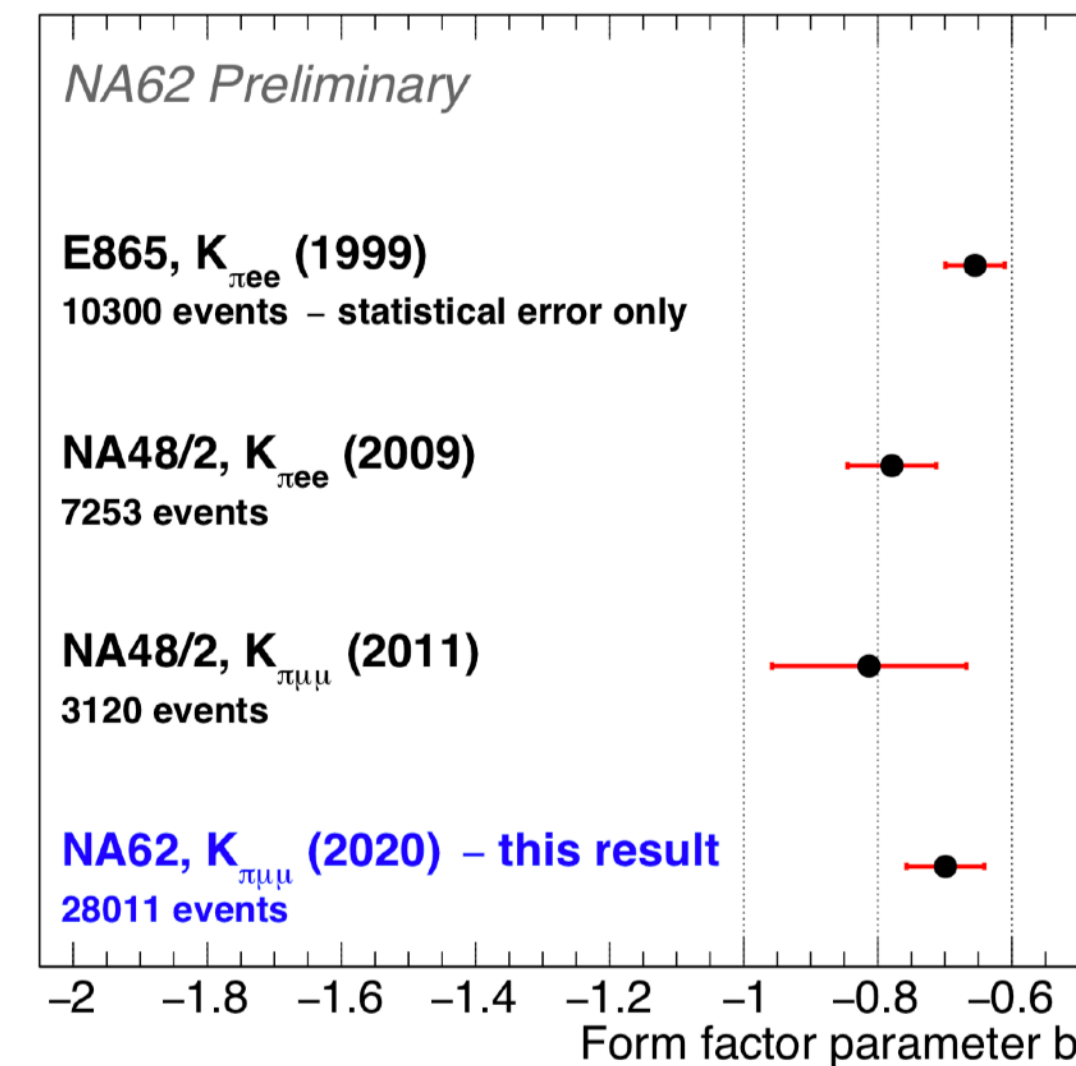
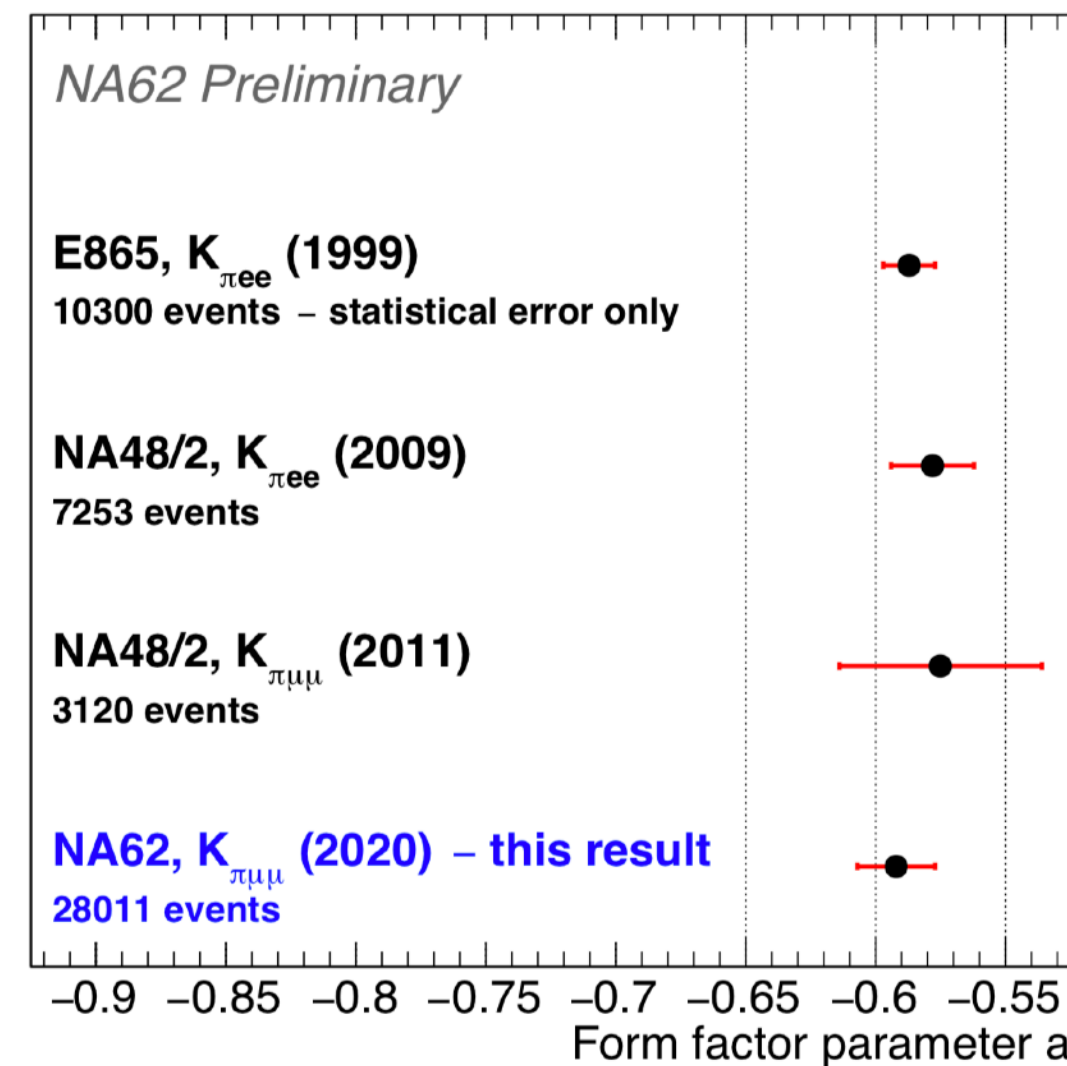
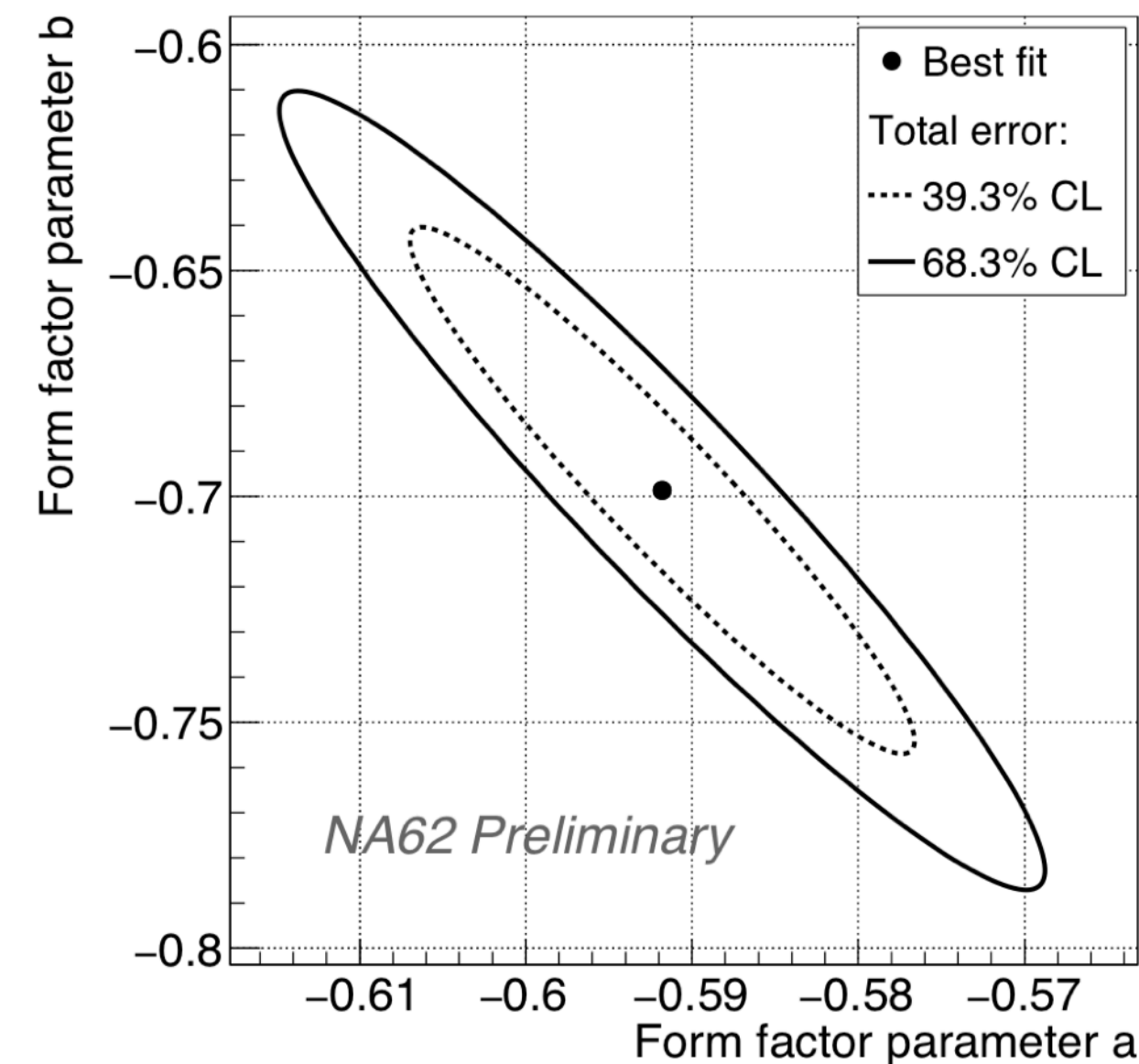
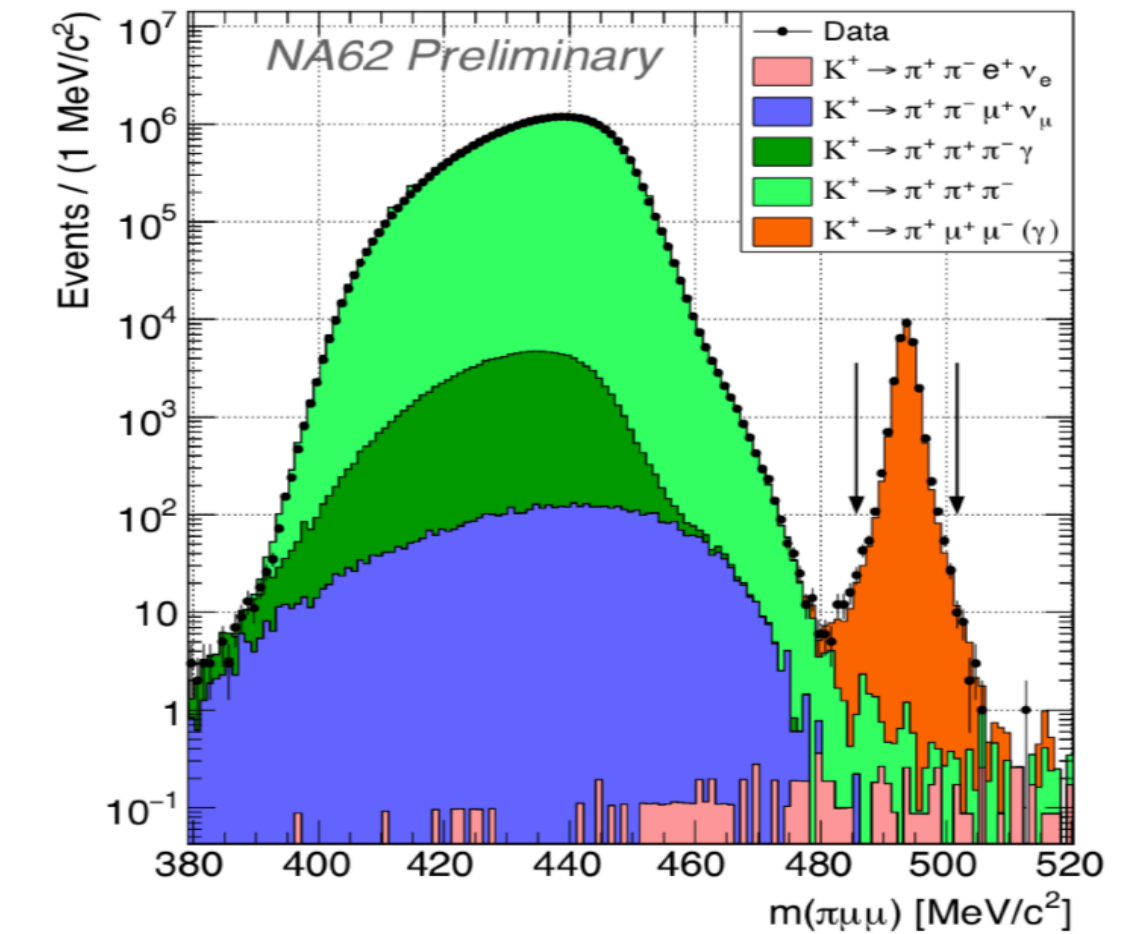
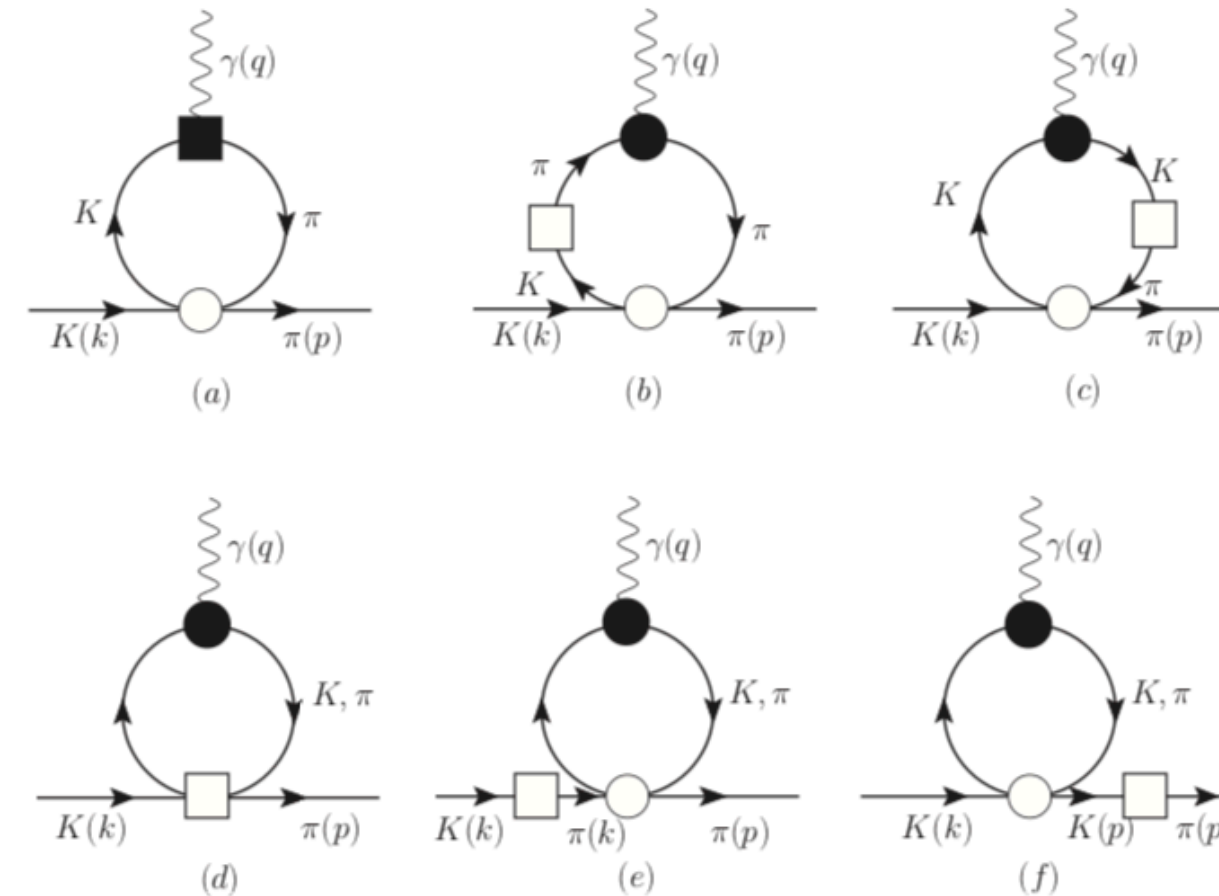


Non solo $\pi\nu\nu$



Κπμ

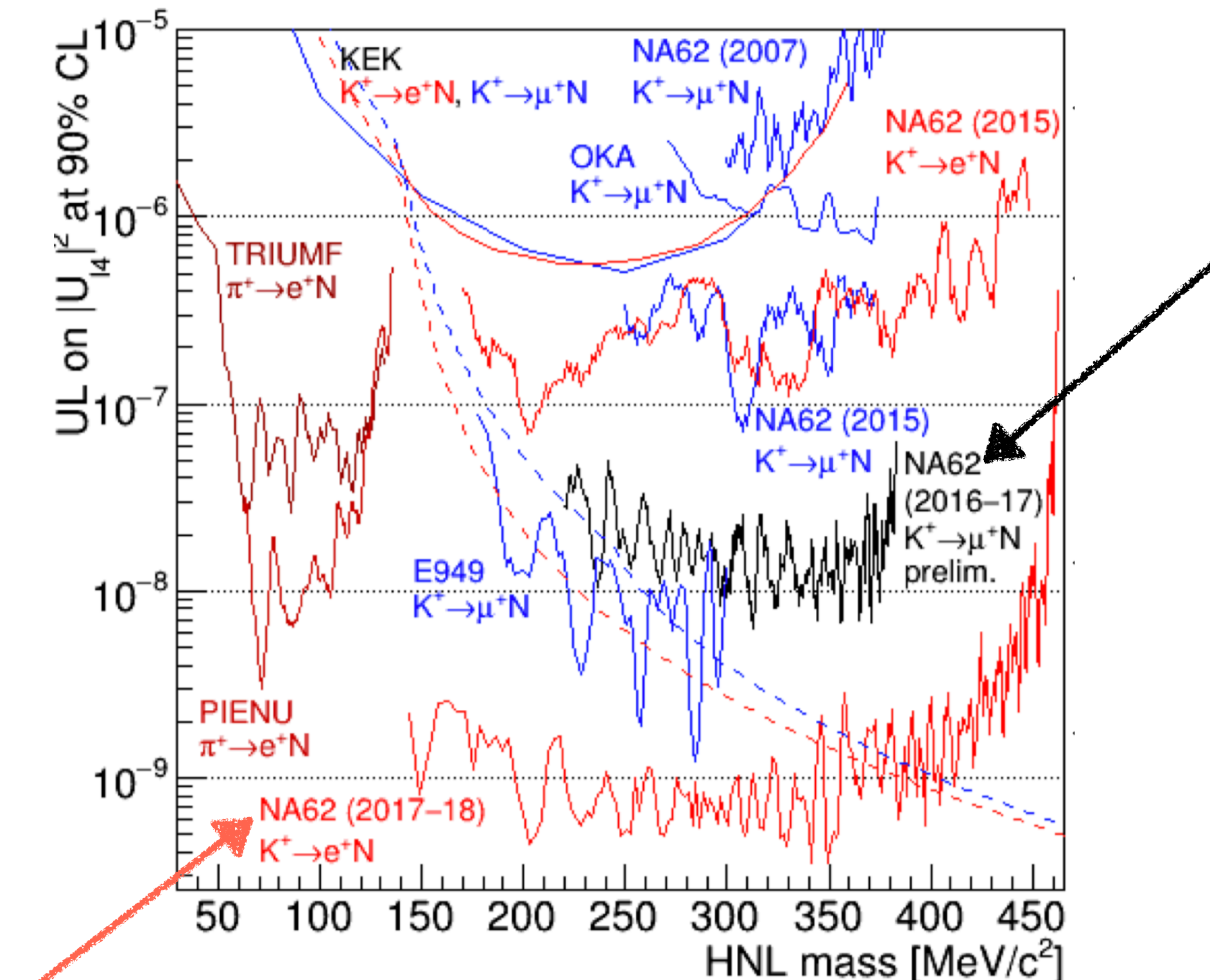
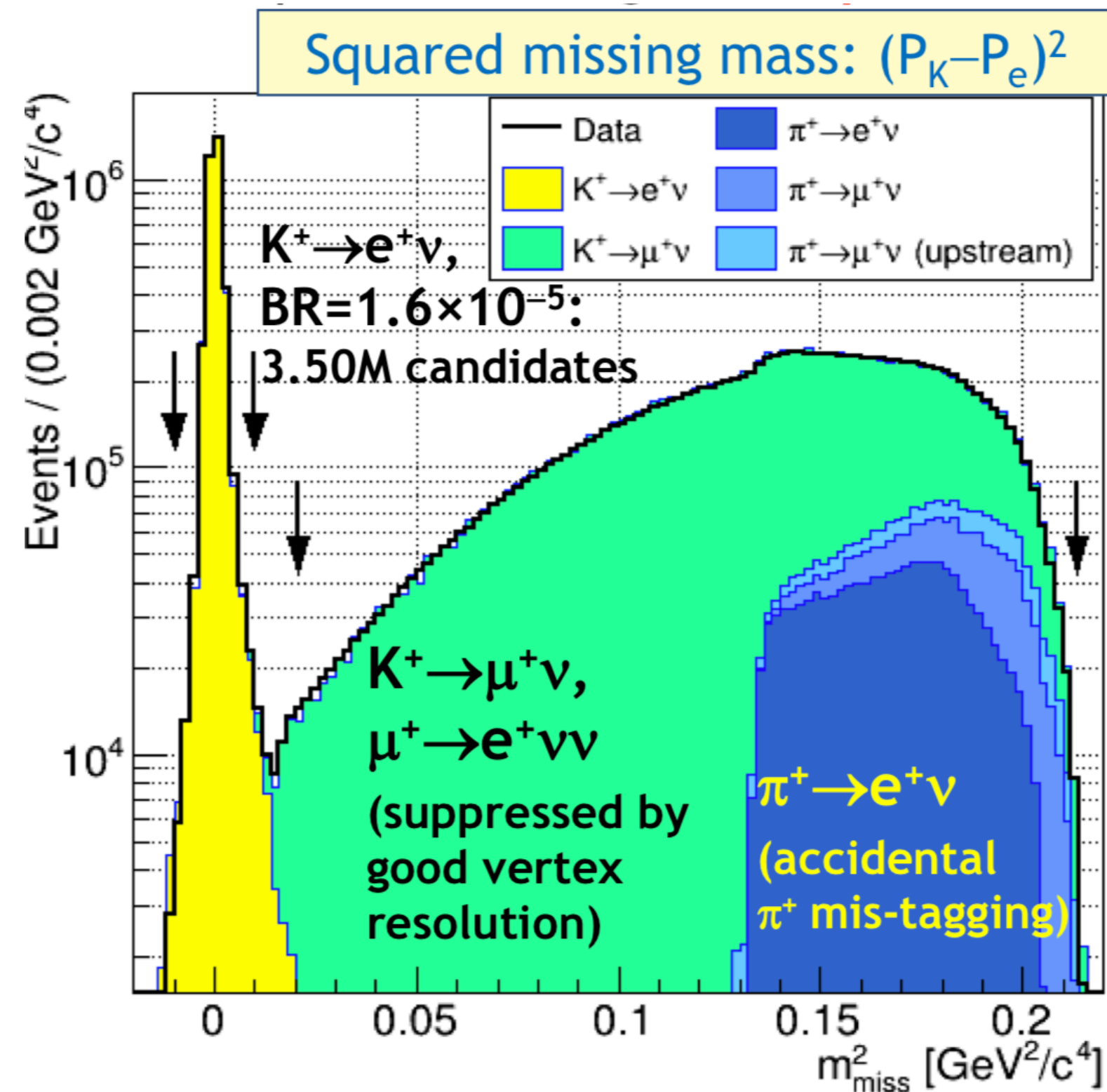
- ▶ Decadimento descritto nell'ambito della ChPT
- ▶ Insieme a $K\pi ee$ permette la misura della LFU
- ▶ Misura dei fattori di forma e confronto con $K\pi ee$



Nessuna tensione rispetto a $K\pi ee$ trovata

Heavy Neutral Leptons

- ▶ Nuovi limiti da $K \rightarrow eN$, $K \rightarrow \mu N$
 - ▶ limite di $O(10^{-9})$ per $|U_{e4}|^2$ utilizzando l'intero data set [2016-2018]
 - ▶ limite di $O(10^{-8})$ per $|U_{\mu 4}|^2$ utilizzando 1/3 dei dati



Conclusioni

- ▶ NA62 ha misurato il Branching Ratio del decadimento ultra-raro $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ con una precisione del 35%, e una significatività di 3.5σ ;
- ▶ E' la misura piu' precisa mai ottenuta questo decadimento;
- ▶ Il risultato e' compatibile con il modello Standard entro una deviazione standard;
- ▶ Il programma di fisica e' vario ed altre analisi proseguono in parallelo

Previsioni per il run 2021

- ▶ NA62 riprenderà l'acquisizione dei dati nel 2021
- ▶ Modifiche alla linea di fascio NA62, installazione di una stazione del GTK aggiuntiva e un contatore di veto per ridurre il fondo a monte
- ▶ Nuovo calorimetro a valle del MUV per sopprimere ulteriormente i fondi dei decadimenti del K.



Additional Material

Trattamento statistico delle categorie

$$-\ln\lambda(S + B) = \sum_{i=0}^{N_{categories}} \ln \left[\frac{LH(\mu_i(S + B)|n_{obs}^i)}{LH(n_{obs}^i|n_{obs}^i)} \right]$$

- ▶ Minimizzazione eseguita con Minuit
- ▶ Il rapporto di verosimiglianza viene utilizzato come funzione di ottimizzazione
- ▶ L'incertezza su fondo atteso viene utilizzata come parametro di nuisance
- ▶ $\mu(S + B) = \text{par0} * S_{\text{expected}} + \text{par1} * B_{\text{expected}}$
- ▶ fit a due parametri
- ▶ $\text{Par0} = \text{Br}^{\pi\nu\nu} / \text{BR}_{\text{SM}}^{\pi\nu\nu}$ equivalente alla potenza del segnale
- ▶ Questa procedura permette di aggiungere anche 2016 e 2017 come categorie separate

KOTO 2015

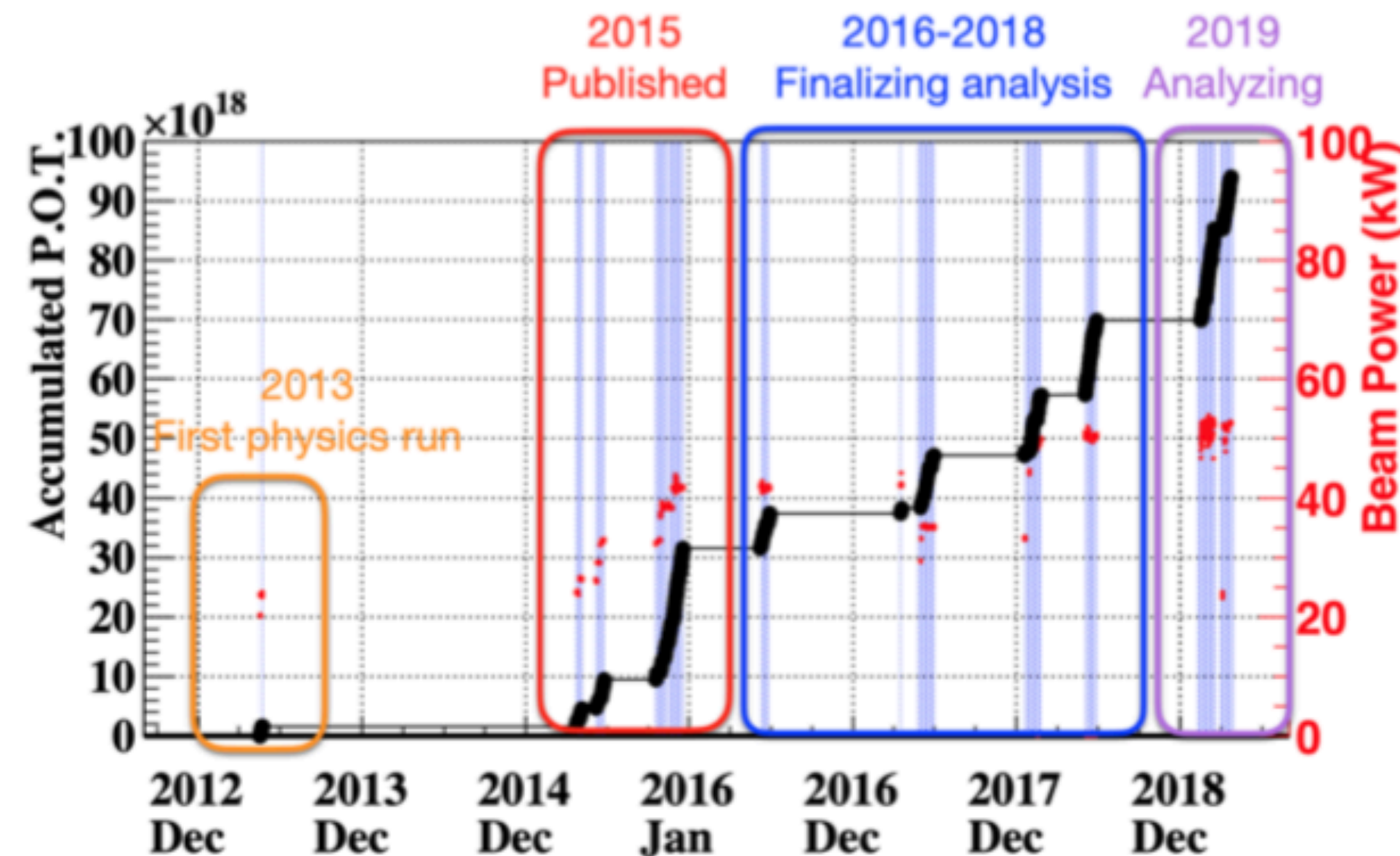
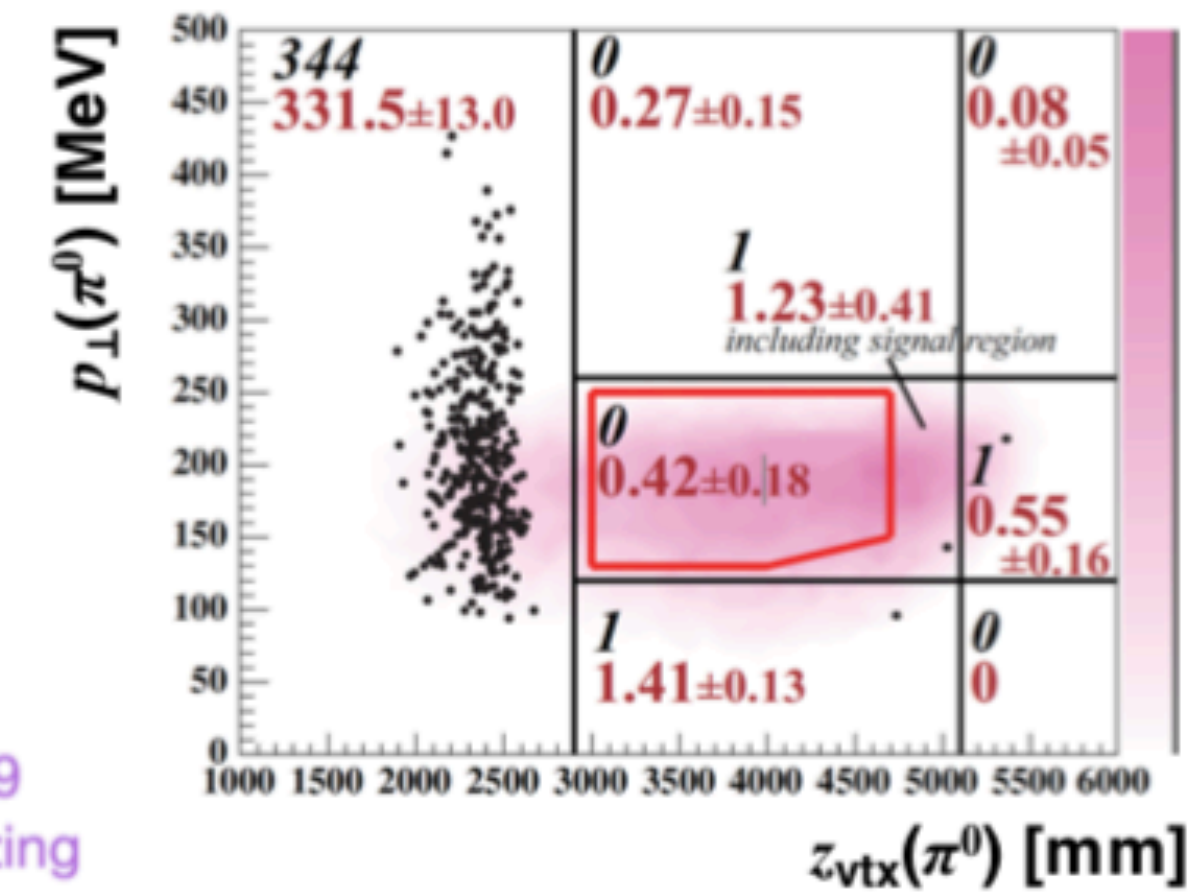
KOTO status and timeline



2015 run

- Reached **40 kW** slow-extracted beam power
- 3×10^{19} pot collected
- **$\text{BR}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu) < 5.1 \times 10^{-8}$ (90%CL)**

PRL 122 (2019) 021802



2016-2018 runs

- Reached **50 kW beam power**
- 4×10^{19} pot collected
- Preliminary results at KAON19

2019 run

- Analysis in progress

KOTO 2016-2018

Preliminary results: 2016-2018 data



Several important detector upgrades and analysis improvements compared to 2015 data

KOTO preliminary (KAON, Sep 2019)

SES: 6.9×10^{-10} (0.05 SM evts)

Expected bkg: 0.05 ± 0.02 evts

4 candidates observed in signal region:

- One event to discard: in-time veto hit was reconstructed with wrong parameter
- One event from pileup in NCC: accounted for in background estimate

3 good signal candidates

Note! Pending ongoing studies
KOTO did not calculate a BR
from these 3 events

