

KOPIO: un nuovo esperimento per la misura del branching ratio del decadimento $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

A. Nappi
Università di Perugia
Roma 11/3/05

Sommario

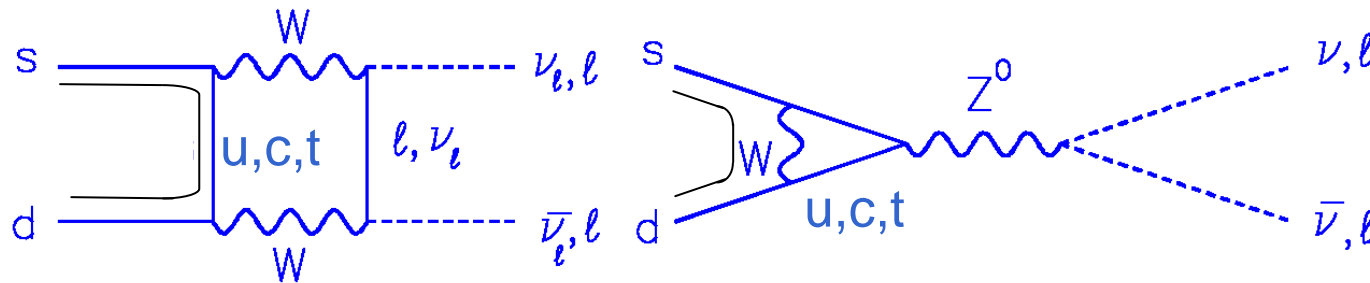
- Perché $K_L^0 \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$
 - ◆ Decadimenti FCNC
 - ◆ Aspetti "golden" del decadimento $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$
- Situazione sperimentale attuale
 - ◆ $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$
 - ❖ Limite di Grossman-Nir
 - ❖ Limiti di KTEV
 - ❖ KEK: E391a
- Il futuro
 - ◆ $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$
 - ❖ BNL KOPIO
 - La tecnica
 - Microbunching
 - Fasci
 - Rivelatori
 - Metodi di analisi e previsioni per la sensibilità
 - ❖ E391 a JPARC

Decadimenti di tipo FCNC

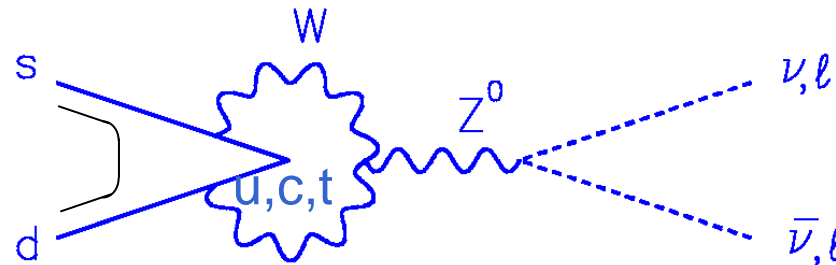
- Processi che cambiano flavour ma non carica dei quarks
 - ◆ Assenti al "tree" level nello standard model
 - ◆ Secondo ordine nelle interazioni deboli (loops)
 - ❖ L'unitarietà della matrice CKM fornisce soppressione aggiuntiva (meccanismo GIM)
 - ❖ Nei canali con violazione di CP effetto residuo solo attraverso le differenze di fase tra gli elementi della matrice CKM
- L'insieme di questi meccanismi di soppressione rende questi canali particolarmente sensibili ad effetti fuori dello standard model

Soppressione delle FCNC

$$K^0 \rightarrow 1 \bar{1}$$



$$K \rightarrow \pi 1 \bar{1}$$

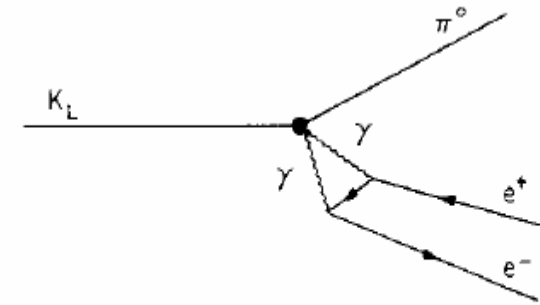


$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \\ V_{td} & V_{ts} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ub} \\ V_{cb} \\ V_{tb} \end{bmatrix}$$

$$V_{ud} V_{us}^* + V_{cd} V_{cs}^* + V_{td} V_{ts}^* = 0$$

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ - Un po' di storia

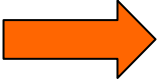
- $K_L^0 \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$
 - ◆ Gilmann-Wise (Phys.Rev.D21:3150, 1980)
 - ❖ Contributo di violazione diretta di CP (1γ exc
 - ❖ Stesso ordine di grandezza di quello di violaz mixing (cfr $\varepsilon'/\varepsilon \sim 10^{-3}$)
 - ◆ Difficoltà teoriche
 - ❖ Contributo CP conserving da scambio di due fotoni
 - ❖ Violazione diretta vs. violazione indiretta
 - La valutazione teorica di questi aspetti deve includere effetti di interazioni a long range
 - ◆ Difficoltà sperimentali
 - ❖ Fondo da $K_L^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma\gamma$ (Greenlee, Phys.Rev.D42:3724,1990)
- $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$
 - ❖ Dominato da interazioni short range
 - ❖ Contributo di violazione indiretta di CP trascurabile (Littenberg, Phys.Rev.D39:3322,1989)



The CP conserving two photon contribution to $K_L \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$

$K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$: elementi di matrice adronici

- Trattazione teorica basata su operator product expansion
 - ◆ Hamiltoniana efficace combinazione di operatori espressi in termini di campi di quarks con coefficienti calcolabili con QCD perturbativa.
 - ◆ Il calcolo delle ampiezze richiede
 - ❖ Calcolo dei coefficienti (di Wilson)
 - ❖ Calcolo degli elementi di matrice degli operatori tra stati adronici
- Peculiarità di questo processo
 - ◆ hamiltoniana efficace dominata dal solo operatore $\bar{s}\gamma^\mu(1-\gamma_5)d$
 - ◆ membro dello stesso doppietto di spin isotopico di quello che compare nella descrizione del decadimento $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ $\bar{s}\gamma^\mu(1-\gamma_5)u$



$$\langle \pi^0 | \bar{s}\gamma^\mu(1-\gamma_5)d | K^0 \rangle = \langle \pi^0 | \bar{s}\gamma^\mu(1-\gamma_5)u | K^+ \rangle$$
 - ◆ gli elementi di matrice adronici possono essere estratti dalle misure sul decadimento semileptonico del K
 - ◆ l'input teorico richiesto è solo il calcolo dei coefficienti di Wilson che può essere affidabilmente effettuato con tecniche perturbative

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$: violazione di CP



$$A(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \propto \varepsilon \left[A(K_1^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) + A(K_2^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \right]$$

CPconserving
Violazione indiretta
Violazione diretta

- ◆ Littenberg: U.L. all'ampiezza CP conserving dalle proprietà di spin isotopico ($I=1/2, I_z=+1/2$) dell'hamiltoniana efficace
- ◆ $\langle \pi^0 | \bar{s} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) d | K^0 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \langle \pi^+ | \bar{s} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) d | K^+ \rangle$



$$A(K_1^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = \text{Re} A(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$$

$$A(K_2^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = \text{Im} A(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$$

- ◆ Dal B.R. misurato di $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ ($\sim 10^{-10}$)

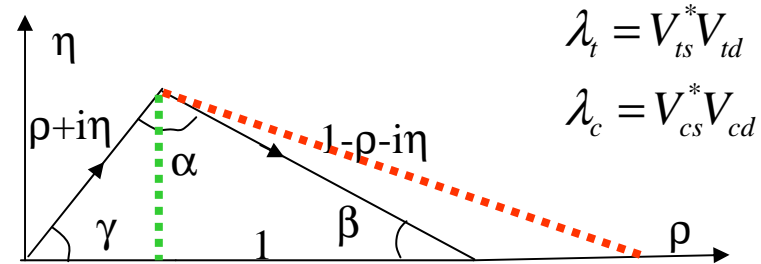
$$B.R._{CPind}(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = \tau_L |\varepsilon|^2 \Gamma(K_1^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \leq$$

$$\leq \tau_L |\varepsilon|^2 \Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = \frac{\tau_L}{\tau_+} |\varepsilon|^2 B.R.(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) \cong 2 \times 10^{-15}$$

K → π ν ν̄ nel modello standard

$$\begin{aligned}
 B.R.(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) &= \\
 &= \frac{\kappa_L}{|V_{us}|^2} B.R.(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu) \frac{\tau(K_L)}{\tau(K^+)} (X_t \text{Im} \lambda_t)^2 = \\
 &\cong 4.1 \times 10^{-10} A^4 \eta^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B.R.(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) &= \\
 &= \frac{\kappa_+}{|V_{us}|^2} B.R.(K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu) \{ (X_t \text{Im} \lambda_t)^2 + [X_c \text{Re} \lambda_c + X_t \text{Re} \lambda_t]^2 \} \\
 &\cong 1.0 \times 10^{-10} A^4 [\eta^2 + (\rho_0 - \rho)^2]
 \end{aligned}$$



- Vincoli su fasi ~~CP~~ della matrice CKM
 - ◆ Incertezze teoriche ~2-5%
 - ◆ Solo dalla fisica dei K

- Insieme alle misure golden dal sistema dei B
 - ◆ vincolo non banale sulla violazione di CP nelle interazioni con ΔS=1

$$\begin{aligned}
 \sin(2\beta) &= -2 \frac{\eta(1-\rho)}{(1-\rho)^2 + \eta^2} \\
 \frac{\Delta m(B_s)}{\Delta m(B_d)} &= \frac{|V_{ts}|^2}{|V_{td}|^2} = \frac{1}{\lambda^2} \frac{1}{(1-\rho)^2 + \eta^2}
 \end{aligned}$$

Riassunto su $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

- Motivi di interesse teorico
 - ◆ Dominato da violazione diretta di CP
 - ◆ Ampiezza di transizione legata, senza incertezze teoriche, ai parametri che caratterizzano il flavor mixing
 - ◆ $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ e $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$, insieme alle misure "golden" del sistema del B, forniscono vincoli sovradeterminati sul flavor mixing del modello standard
- Limite di Grossman-Nir
 - ◆ esiste già un vincolo teorico solido col quale l'esperimento deve confrontarsi
 - ◆ si deduce, con considerazioni di I-spin, dal B.R. ($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$)

$$B.R.(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = \tau_L \Gamma(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \leq \tau_L \Gamma(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = \frac{\tau_L}{\tau_+} B.R.(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$$

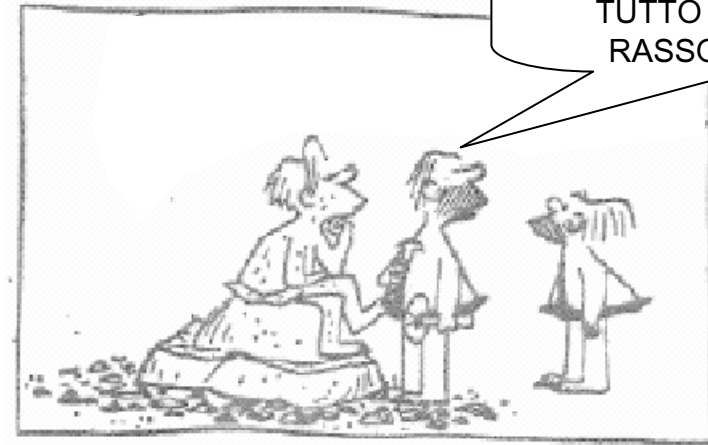
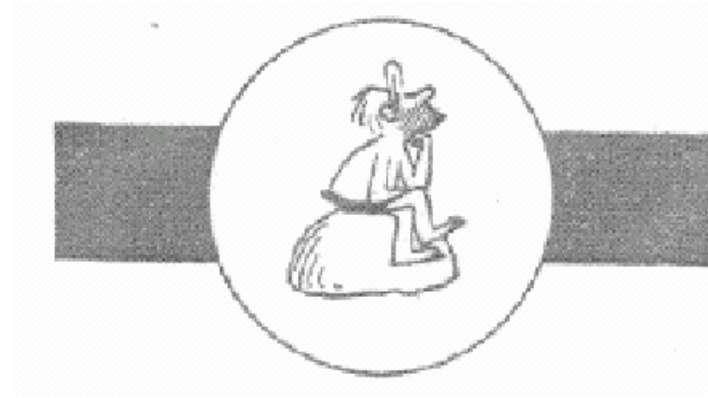
❖ Con correzioni di I-spin e usando E787 come U.L. al 90% C.L.:

$$B.R.(K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 1.4 \times 10^{-9}$$

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$: problematica sperimentale

- B.R. previsto nel modello standard: $(3.0 \pm 0.6) \times 10^{-11}$
- Segnatura sperimentale estremamente tenue
 - ◆ Solo due fotoni rivelati
 - ◆ Senza accorgimenti particolari non è noto il vertice di decadimento né l'energia del K^0
- Fondi dominanti:
 - ◆ Decadimenti del K
 - ❖ 34% dei decadimenti del K_L ha almeno un π^0
 - es. $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ (B.R.= 9.3×10^{-4})
 - $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$ (B.R. = 1.25×10^{-1})
 - ❖ ma anche, cattiva identificazione
 - es. $K_L \rightarrow e^+ \pi^- \nu$ (B.R.= 3.9×10^{-1})
 - $K_L \rightarrow e^+ \pi^- \nu \gamma$ (B.R.= 3.6×10^{-3})
 - ◆ Interazioni di neutroni del fascio
 - ◆ Decadimenti di iperoni, e.g. $\Lambda \rightarrow \pi^0 n$

Approccio "michelangiolesco" a $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

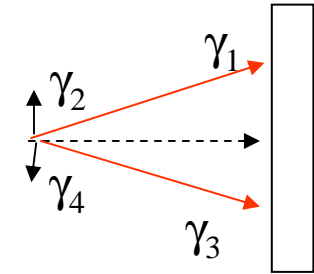


$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$: i requisiti sperimentali

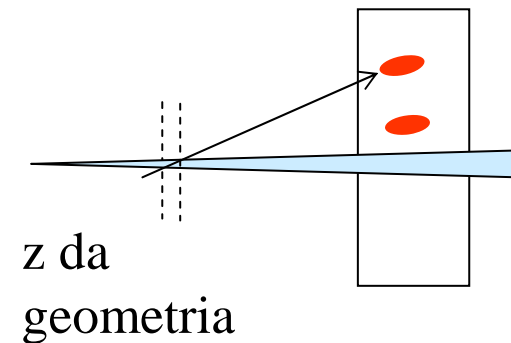
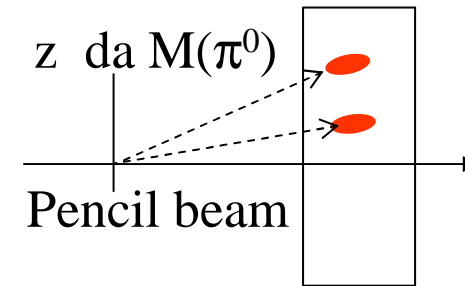
- 2 fotoni e niente altro
 - ◆ sistema di veto "ermetico"
- I due fotoni vengono dal decadimento del π^0
 - ◆ Richiede conoscenza del vertice ... v. in seguito ...
- Caratteristiche cinematiche
 - ◆ Fondo più importante è $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$.
 - ❖ energia del π^0 nel centro di massa
 - ❖ impulso trasverso del π^0 rispetto alla direzione di volo del K^0
 - entrambi hanno "end point" più alto che la maggior parte dei canali di fondo, ma la frazione di spettro "pulita" è piccola e dipende dalla risoluzione
- Minimizzare il materiale attraversato dai neutroni del fascio
 - ◆ vuoto di alta qualità
 - ◆ piccolo alone del fascio

Vincoli cinematici per $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

- Uso del p_T
 - ◆ $p_T > 209 \text{ MeV}/c$ (end point per π^0 da $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$) irrealistica
 - ❖ Solo 9.5% dei $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ hanno π^0 al di sopra
 - ❖ risoluzione
 - ◆ $p_T > x$ utile anche con $x < 209 \text{ MeV}/c$
 - ❖ rigetto eventi con fotone lento dei due π^0 non rivelato ($p_T \sim 0$)



- Misura p_T
 - ◆ Rivelazione calorimetrica "normale" dei π^0
 - ❖ Vincolo $m(\pi^0)$ non disponibile
 - ❖ Senza pencil beam cattiva risoluzione p_T
 - ◆ Misura della direzione di almeno un fotone
 - ❖ Permette uso vincolo $m(\pi^0)$
 - ❖ Permette buona determinazione p_T senza pencil beam
- La conoscenza dell'impulso del K permetterebbe la trasformazione al centro di massa



Esempio di KTEV

- Uso di $\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$ permette
 - ◆ vincolo sulla massa del π^0 (per $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ vertice non conosciuto)
 - ◆ miglioramento della risoluzione sulla misura del p_T (senza pencil beam)
- ma
 - ◆ B.R. ($\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$) = 1.2%

B.R. $< 5.9 \times 10^{-7}$ al 95% CL

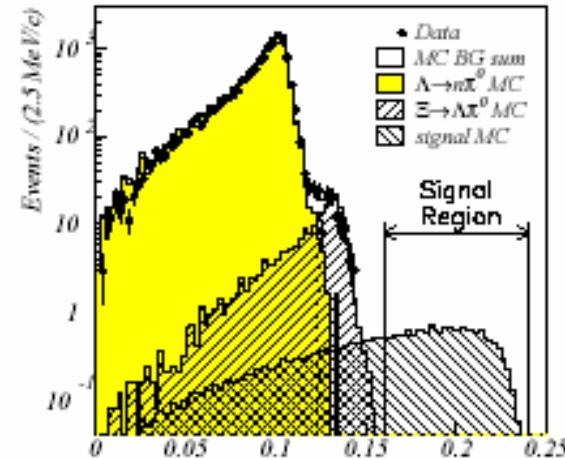
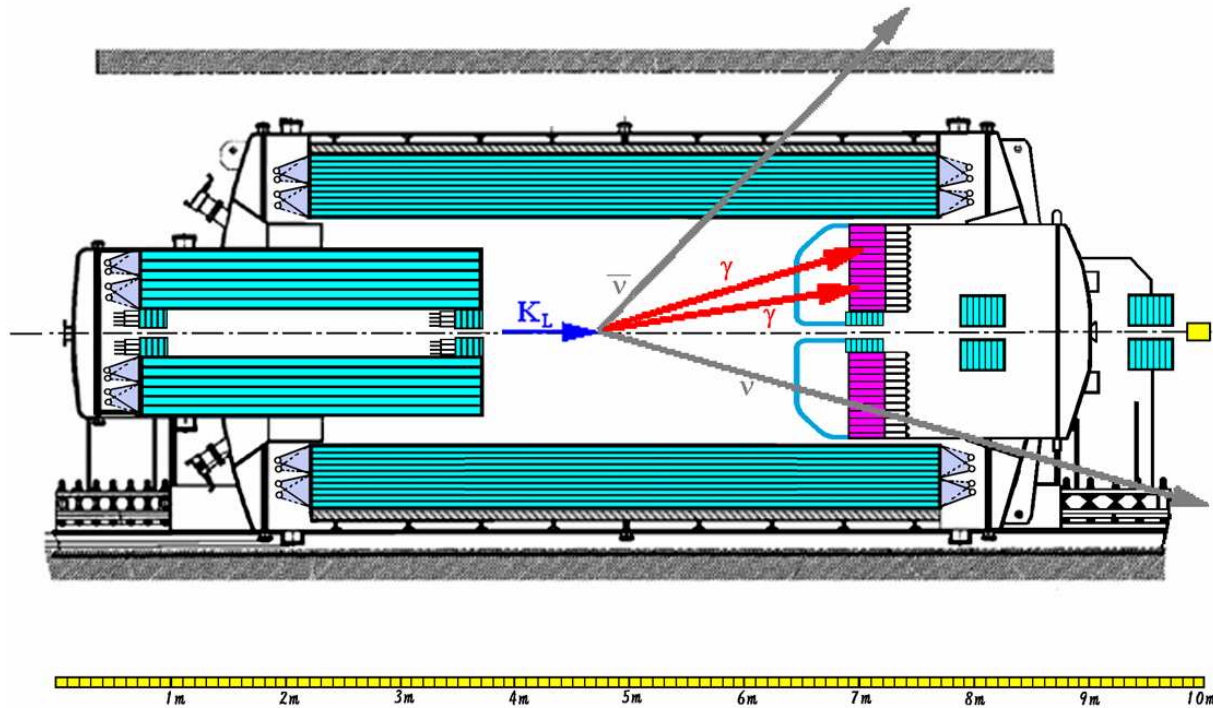



TABLE I. Summary of expected background contribution in the final signal region.

Decay mode	Expected number of events
$K_L \rightarrow \pi e \nu + \gamma$	0.02 ± 0.02
$K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi_D^0$	< 0.01
$\Lambda \rightarrow n \pi_D^0$	< 0.04
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 (\rightarrow p \pi^-) \pi_D^0$	$0.01^{+0.006}_{-0.004}$
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 (\rightarrow n \pi^0) \pi_D^0$	$0.01^{+0.006}_{-0.004}$
$\Xi^0 \rightarrow \Lambda^0 (\rightarrow n \pi_D^0) \pi^0$	0.01 ± 0.01
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi_D^0$	0.03 ± 0.03
$K_L \rightarrow \pi^0 \pi_D^0$	< 0.01
$n + X \rightarrow \pi^0 X'$	$0.04^{+0.04}_{-0.01}$
Total	$0.12^{+0.05}_{-0.04}$

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$: KEK E391a



- $\langle p \rangle_K \sim 2 \text{ GeV}/c$
- Pencil beam per misura accurata dell'impulso trasverso del π^0
- Calorimetro a CsI puro
- Doppia regione di veto per eliminare fondo da $3\pi^0$ che decadono prima della regione fiduciale

- Approvato nel '97, ha seguito un programma di sviluppo graduale, con uno studio sistematico dei problemi sperimentali rilevanti
 - ◆ Es: misure delle inefficienze dei rivelatori e dei loro limiti fisici 
- Sensibilità di progetto $\sim 1 \times 10^{-10}$.
- Esperimento pilota per futura iniziativa a JPARC per sensibilità 3×10^{-14}

Run 2004 di E391a

Expected sensitivity

$$S_{\pi \nu \nu} = (A_{3\pi} / A_{\pi \nu \nu} / Y_{3\pi}) \cdot Br_{3\pi},$$

$$A_{3\pi} / A_{\pi \nu \nu} \sim 1/20$$

$$Y_{3\pi} \sim 19(\text{spill}) \cdot 7.2 \times 10^3 (\text{spill/shift}) \cdot (300-80-3 \times 15)(\text{shifts})$$

• 80 shifts: cooling water trouble(30)+tuning with shared beam(30)+tuning with full beam(20)

• 3×15 shifts: 3 special runs (air, short bunch, π^0 calibration)

$$\sim 2.4 \times 10^7$$

$$Br_{3\pi} = 0.21$$

$$S_{\pi \nu \nu} \sim 4.4 \times 10^{-10} \text{ (without study for acceptance loss)}$$

- Prenderà dati anche nel 2005

KOPIO: approccio nuovo a $\pi^0 \nu \bar{\nu}$

- ◆ In aggiunta ai veto usare il maggior numero di vincoli cinematici possibili
 - ❖ Energia, posizione, direzione, tempo dei γ
 - ❖ Impulso del K_L mediante TOF per trasformazione al CM
- ◆ Vantaggi
 - ❖ manopola indipendente dal veto per variare la percentuale di fondo
 - ❖ complementare al veto perché permette di evitare regioni in cui l'efficienza è bassa

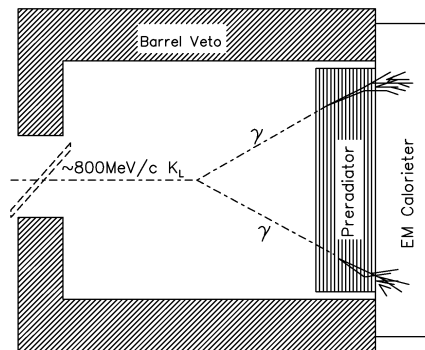
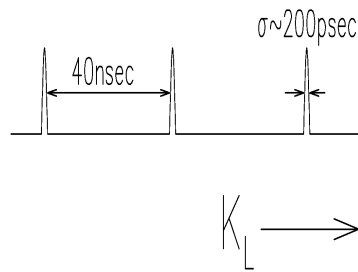
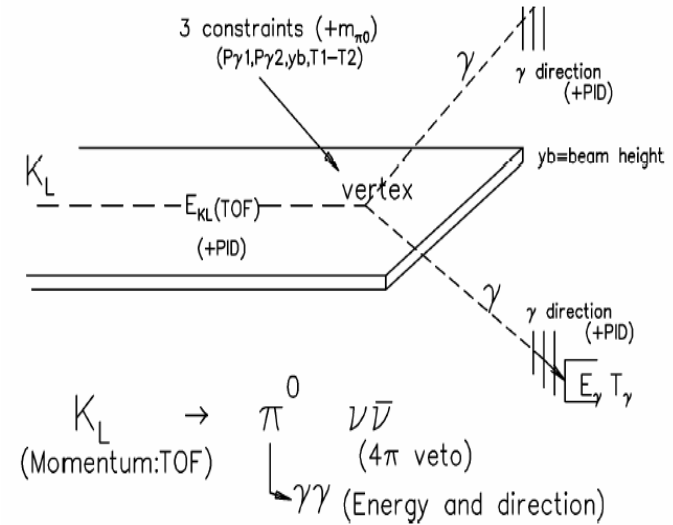


Fig. 4. Elements of the KOPIO concept : a pulsed primary beam produces low energy kaons whose time-of-flight reveals their momentum when the π^0 from $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ decay is reconstructed.

- ◆ Preradiatore tracciante per la misura della direzione dei γ
- ◆ Misura di E combinando prerad + Shashlik
- ◆ Copertura ermetica dei veto inclusa la regione del fascio

La tecnica del micro-bunching

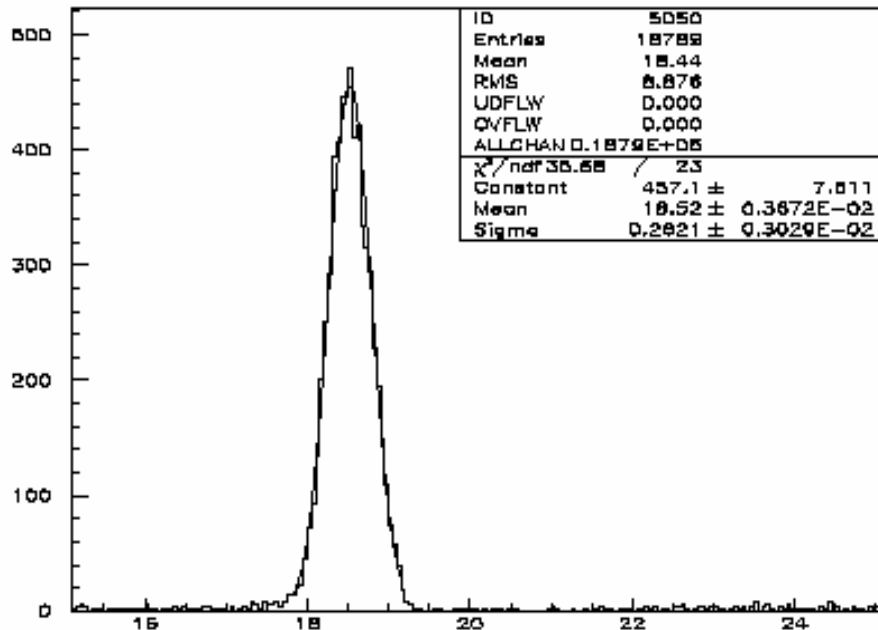
- Richieste

- ◆ Larghezza del bunch \sim risoluzione temporale: 150-250ps
- ◆ Separazione dei bunch per evitare ambiguità nella determinazione del tempo di volo: 40ns
 - ❖ Bunching factor=separazione/larghezza RMS: 160 - 260

- Tecnica di bunching all'estrazione

- ◆ Si *debuncha* il fascio circolante
- ◆ Si accende una radiofrequenza a 25 MHz non in risonanza con la frequenza di rivoluzione
- ◆ Diminuendo lentamente il campo magnetico si portano i protoni di impulso più alto vicini alla risonanza
 - ❖ I protoni in fase con la radiofrequenza ricevono una modulazione in energia sufficiente a farli entrare in risonanza con le oscillazioni trasversali

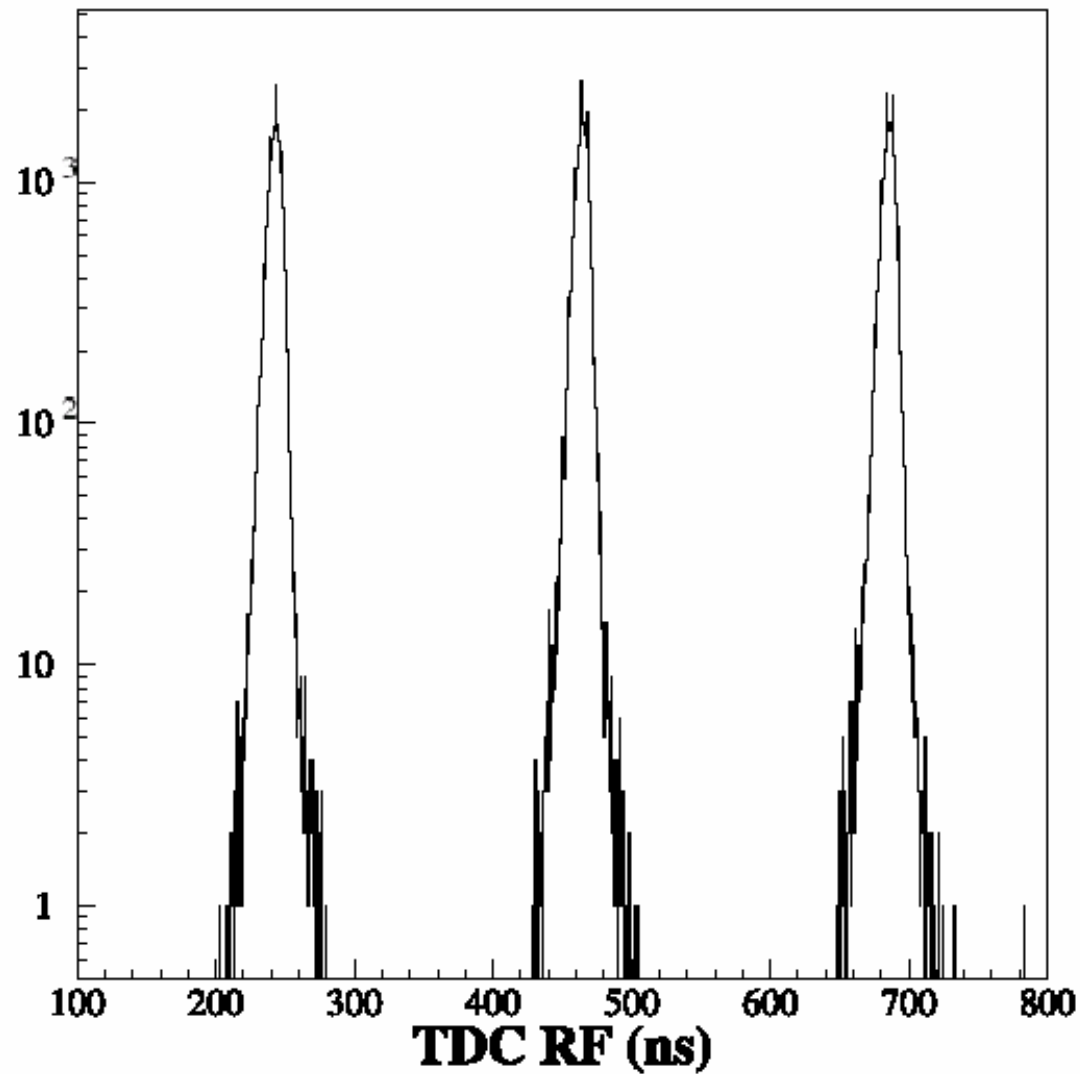
Misure e simulazioni del μ -bunching



- Test del principio con cavità a 93MHz, 25kV
 - ◆ larghezza rms: 245ps

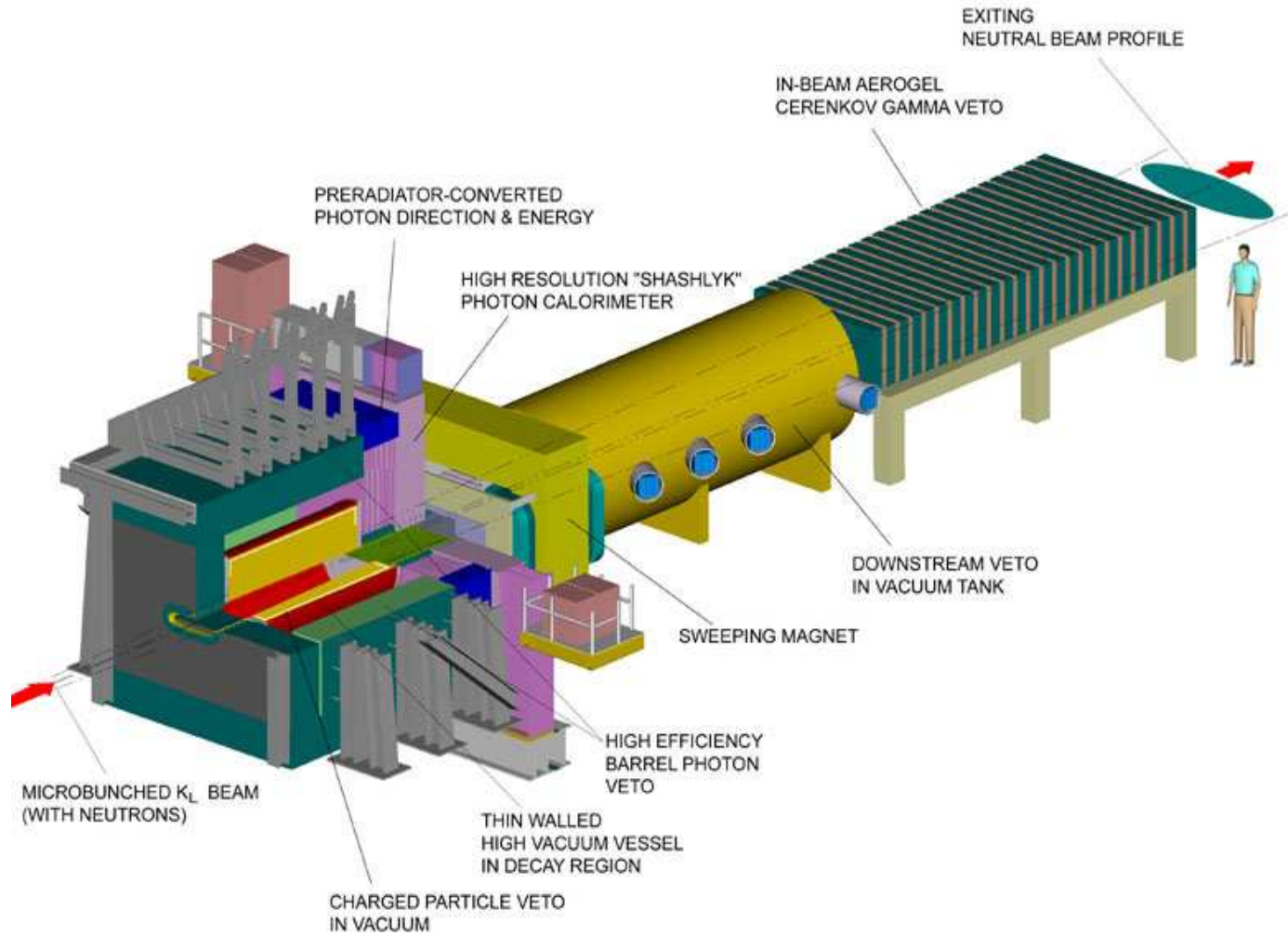
- Per stesso RMS a 25MHz richiesto RF voltage > 150kV
- Schema preferito
 - ◆ Due cavità armoniche
 - ❖ 25 MHz, 150 kV
 - ❖ 100 MHz, 150 kV

Test di estinzione a 4.5MHz



Estinzione $\sim 10^{-5}$

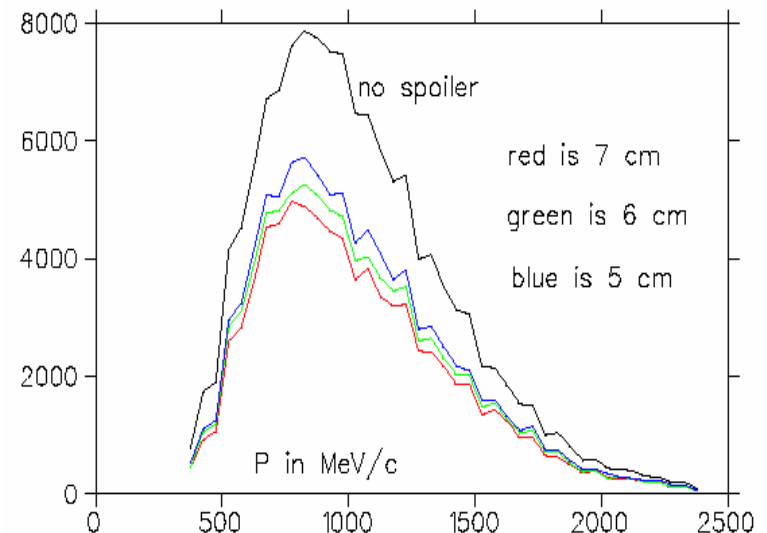
L'apparato sperimentale



Il fascio

- Angolo di produzione 42.5°
- Fascio ellittico
 - ◆ 4mrad in vert. \times 100mrad in orizz.
- Flussi di K_L con 10^{14} pot
 - ◆ 2.6×10^8 alla uscita dello spoiler per l'attenuazione dei fotoni
 - ◆ decadimenti tra ultimo collimatore e prerad: 4.8×10^7
 - ◆ Lunghezza μ bunch ottimizzata considerando le perdite dovute al rate
 - ❖ 4.87 s (2.3s interspill)
 - ❖ decadimenti/ μ bunch:0.25
 \Rightarrow (singoli: $e^{-0.25}=0.78$)

Spettro del fascio all'ingresso della regione di decadimento



Collimazione ed alone di neutroni

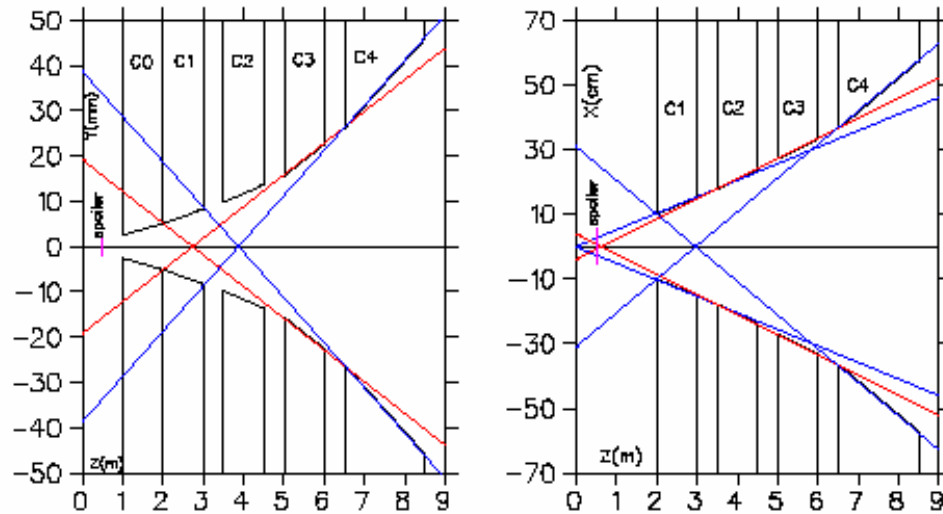


Fig. 22. The collimators in elevation view (left) and plan view (right). The lines indicate the determination of the vertical (left) and horizontal (right) downstream collimation surfaces.

- Neutroni su fascio
 - ◆ 3×10^{10}
 - ◆ $\sim 1000 \times$ decadimenti dei K
 - ◆ Alone $< 10^{-4}$

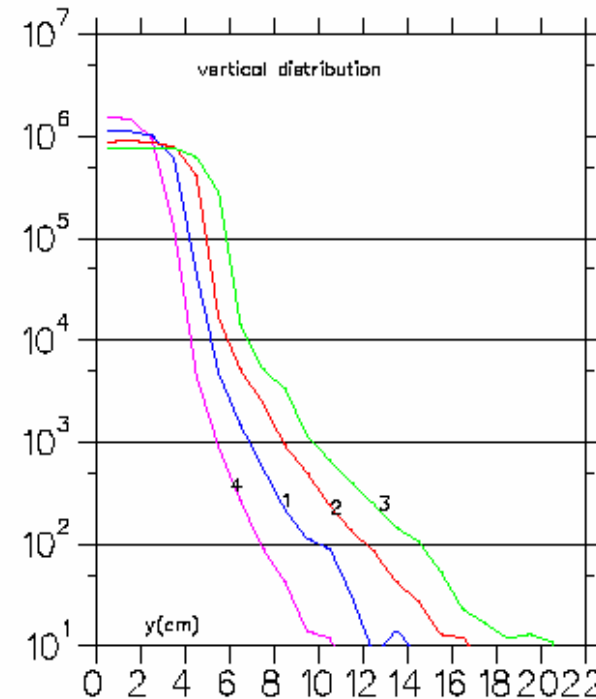


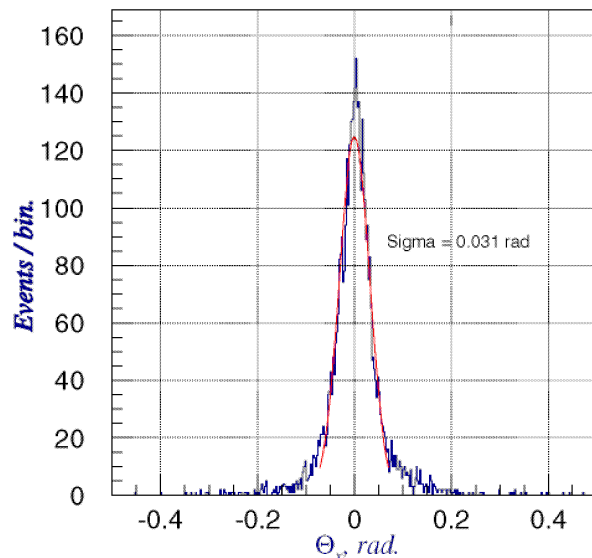
Fig. 23. Neutron intensities for four collimator aspect ratios that provide the same acceptance.

Misura dei γ

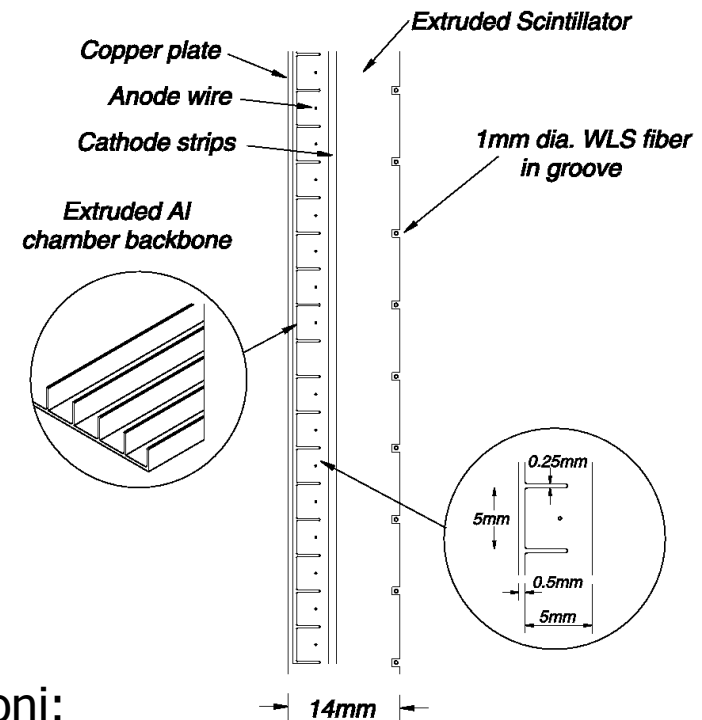
- Direzione
 - ◆ Preradiatore di bassa densità
 - ❖ Risoluzione 25mrad a 250MeV ($\propto E^{-0.7}$)
- Energia
 - ◆ Calorimetro Shashlik + preradiatore
 - ❖ Shashlik da solo, su test beam, ha dato 2.9%/√E
 - ❖ Combinando le due misure, studi Monte-Carlo indicano la possibilità di raggiungere una risoluzione del 2.7%/√E
- Tempo
 - ❖ $\sigma(t) \sim 0.2$ ns

Preradiatore

- ◆ 64 strati di $0.034 X_0$ ($3 \times 3 \text{ m}^2$)
 - ❖ Celle drift $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (lettura filo e strisce catodiche)
 - ❖ Scintillatore per misura E in congiunzione col calorimetro

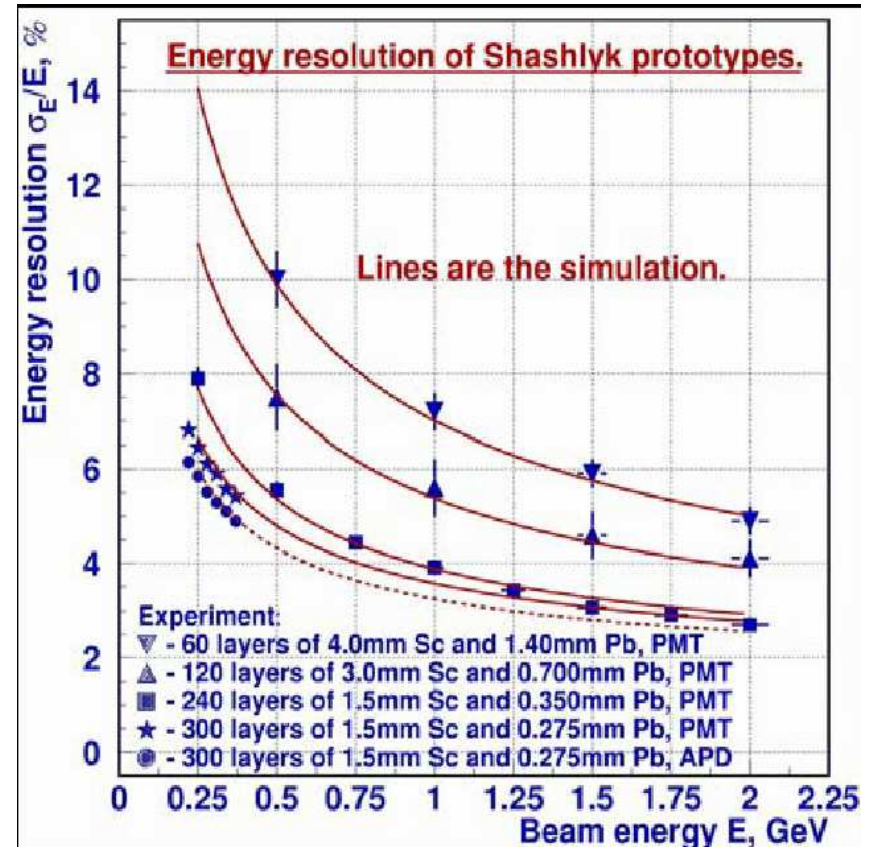
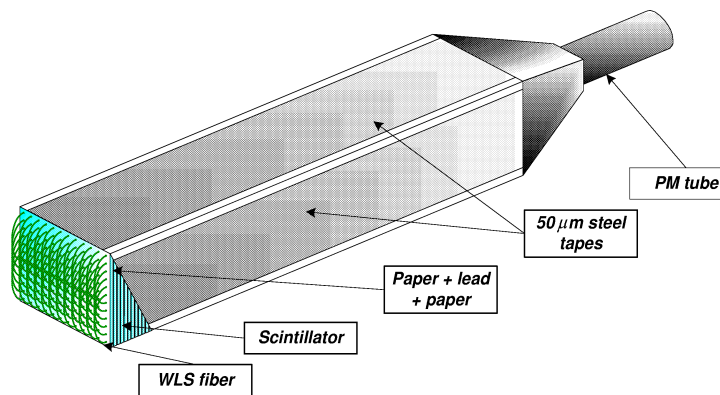


Θ_x distribution of detected photons. $E_\gamma = 150 \text{ MeV}$.



- ◆ Prestazioni:
 - ❖ Risoluzione angolare 25 mrad @250MeV ($\propto E^{-0.7}$)
 - ❖ Risoluzione in energia insieme a Shashlik $\frac{\sigma}{E} \cong 2.7\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$

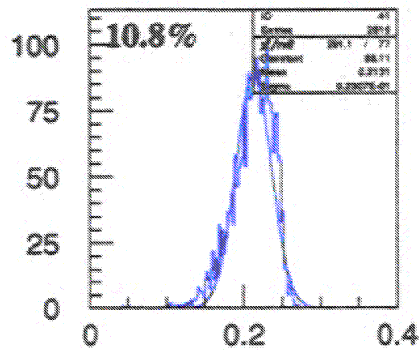
Shashlik



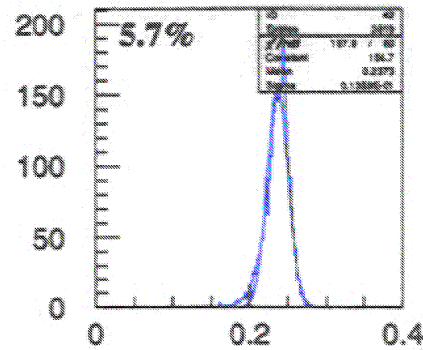
Preradiatore+Shashlik: GEANT

250 MeV photon, $\Theta_x = 0^\circ$. Shashlyk, 9mm

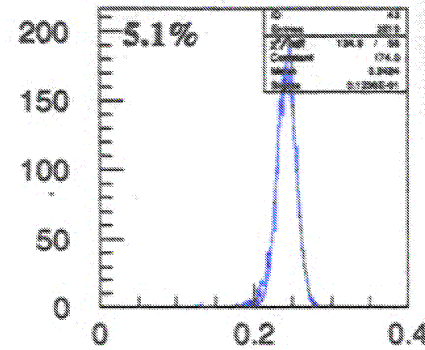
20/02/01



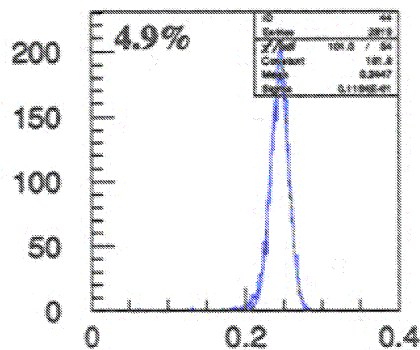
Etot(c), 1x1



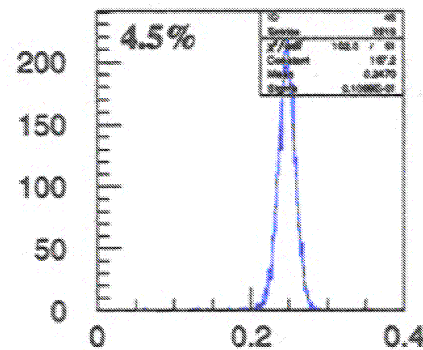
Etot(c), 2x2



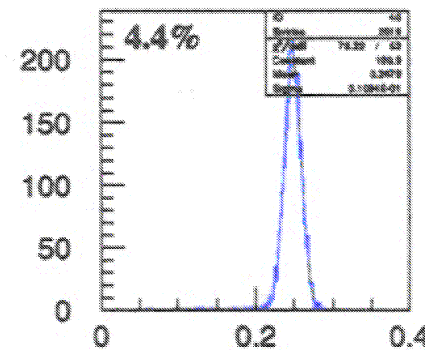
Etot(c), 3x3



Etot(c), 4x4



Etot(c), 5x5



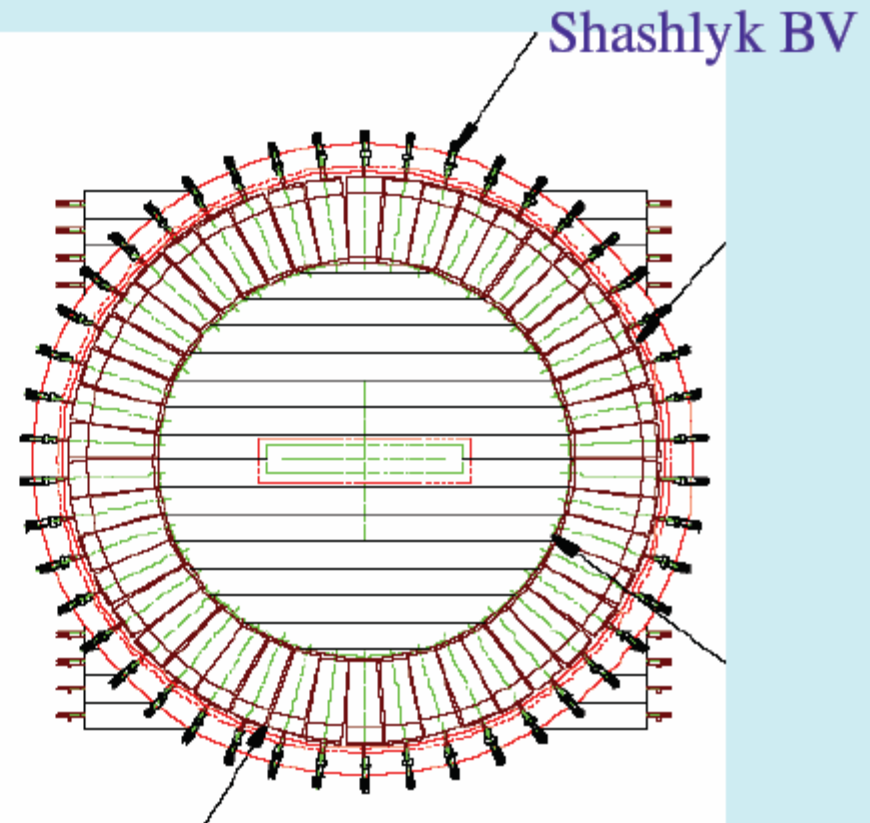
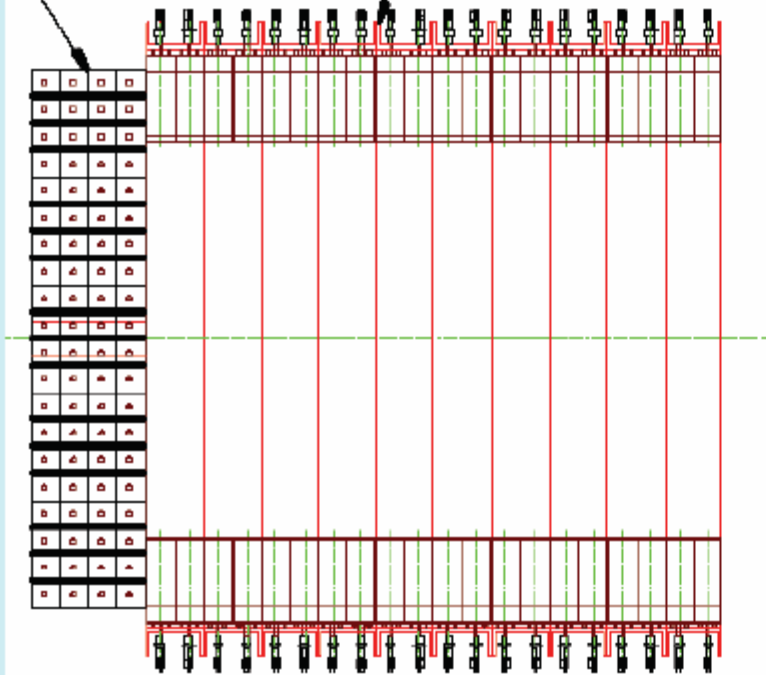
Etot(c), 6x6



Photon Veto subsystem for KOPIO

Upstream Veto

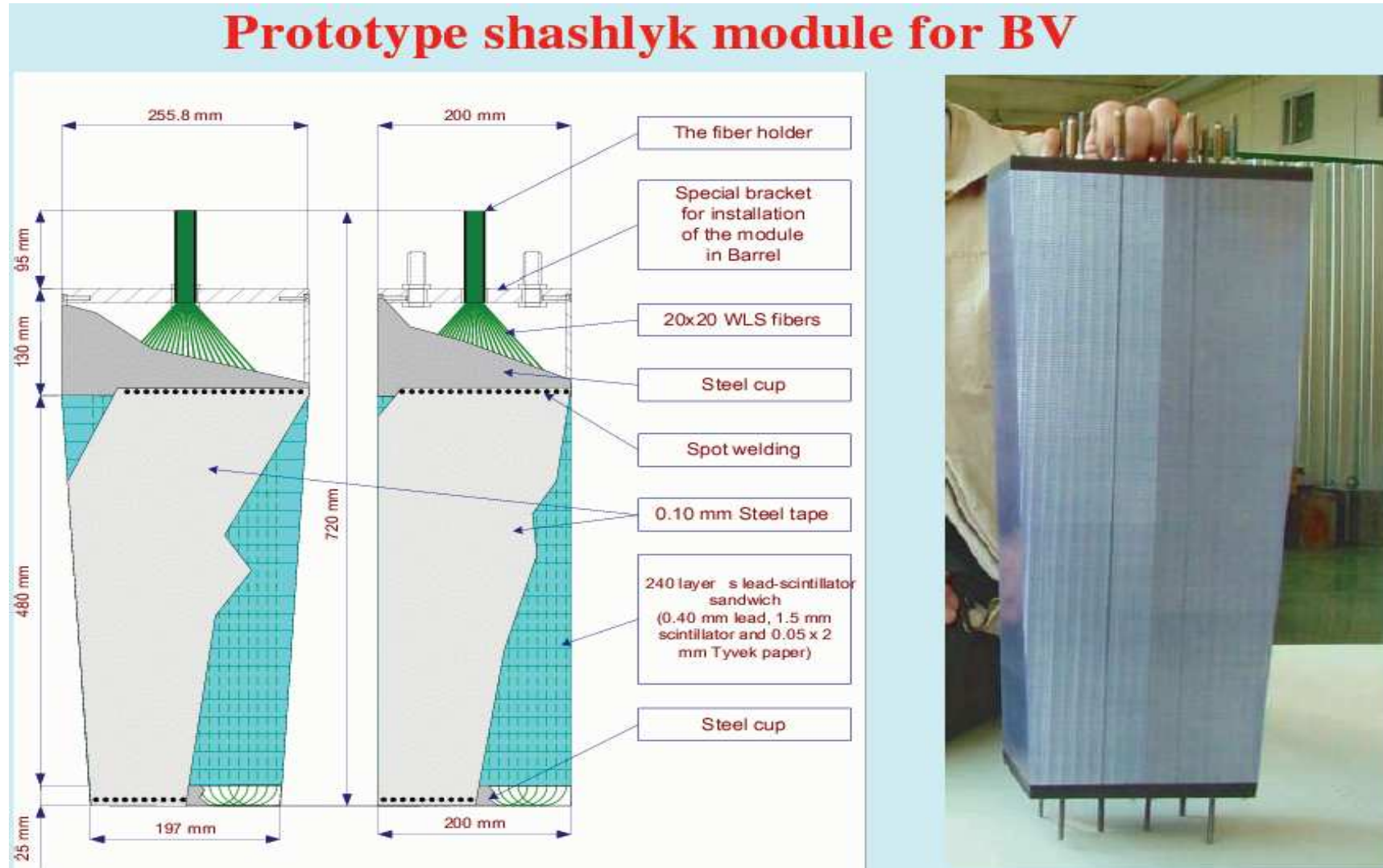
Shashlyk BV



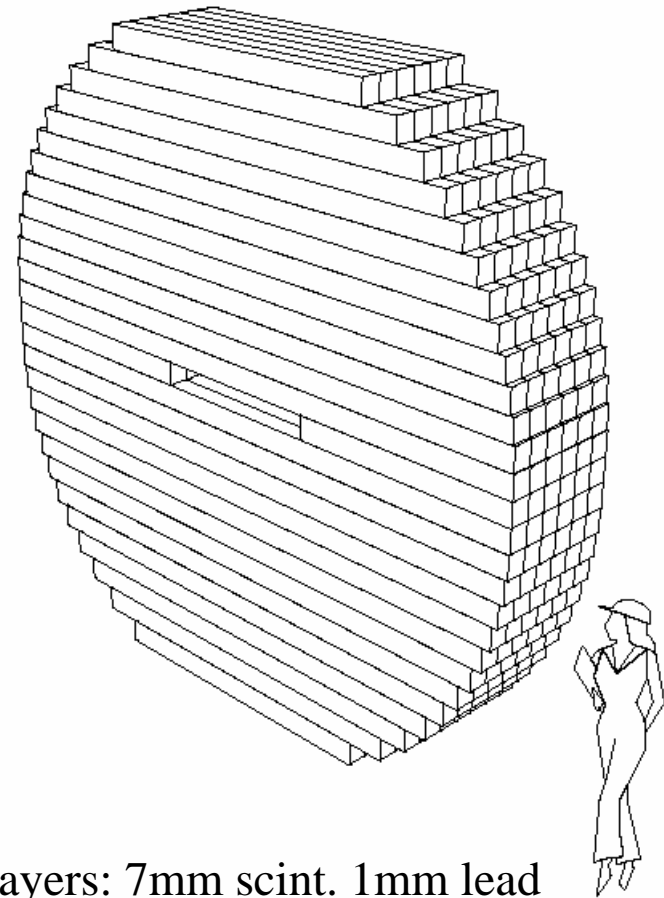
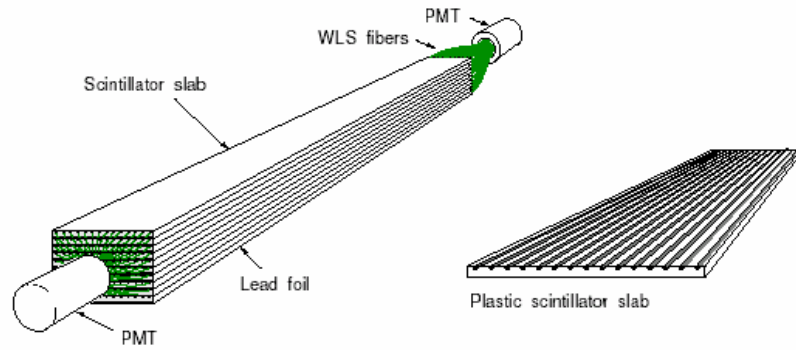
Shashlyk BV: cylindrical assembly, 900-1000 shashlyk modules
Upstream Veto: wall made of 160 logs
Size of BV: 4 m length, diameter between 3-4 m

Change from TDR2001: Log → shashlyk for BV

Veto per fotoni: barrel



Veto per fotoni: upstream



16 layers: 7mm scint. 1mm lead

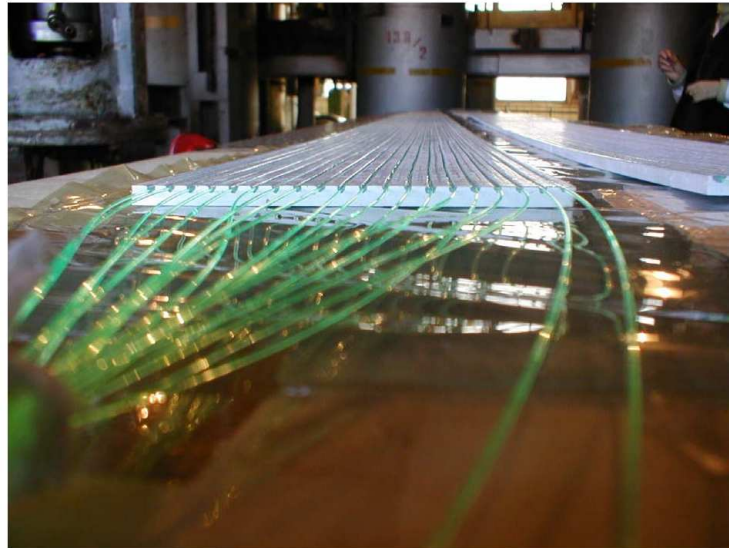
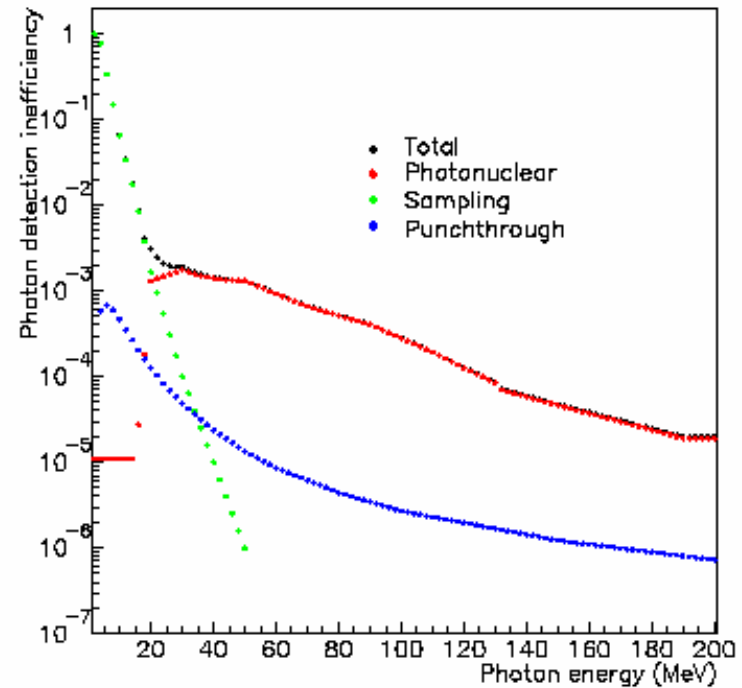
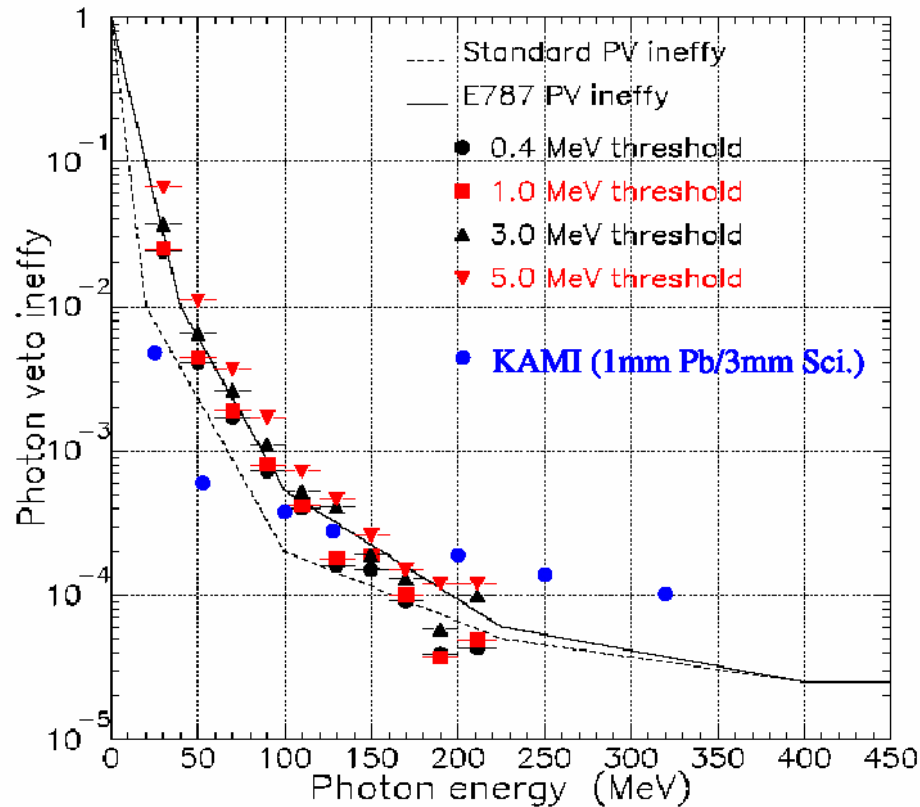


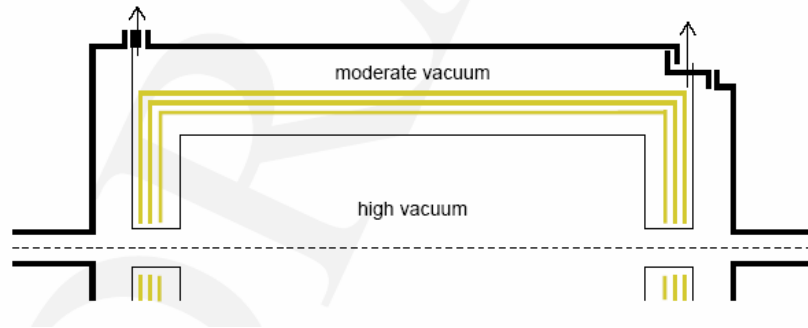
FIG. 2: Extruded polystyrene sheets with fibers. Detailed view of one end.

Efficienze di veto attese

- 3 contributi
 - ◆ Sampling
 - ◆ Fotonucleare
 - ◆ Punch through
- Vincolate da misure
 - ◆ E787
 - ◆ KAMI

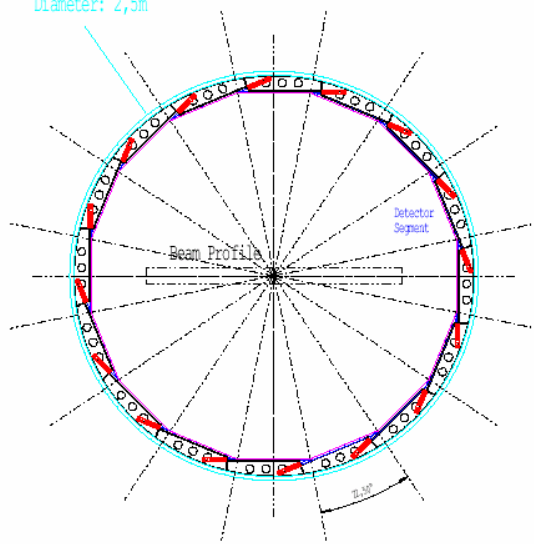


Veto per particelle cariche

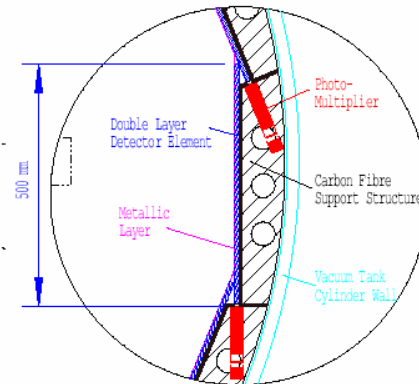


- Interni alla regione di decadimento evacuata
- Alto light yield per rivelazione in < 1mm

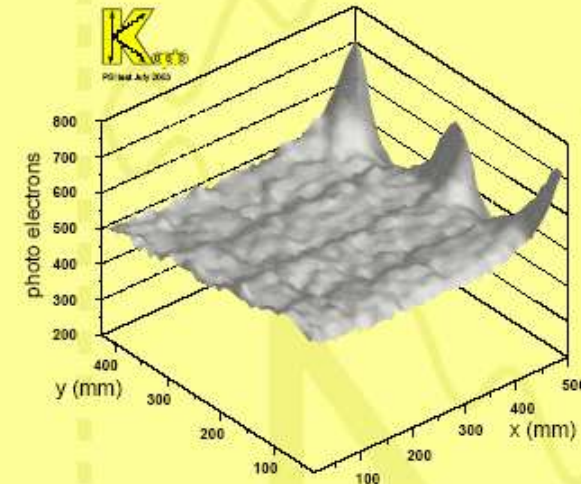
Vacuum Tank
Length: 4m
Diameter: 2,5m



CPV Barrel Detector Elements
Element Area: 500mm x 400mm
Number of Elements
for 1 Layer: 16 x 10

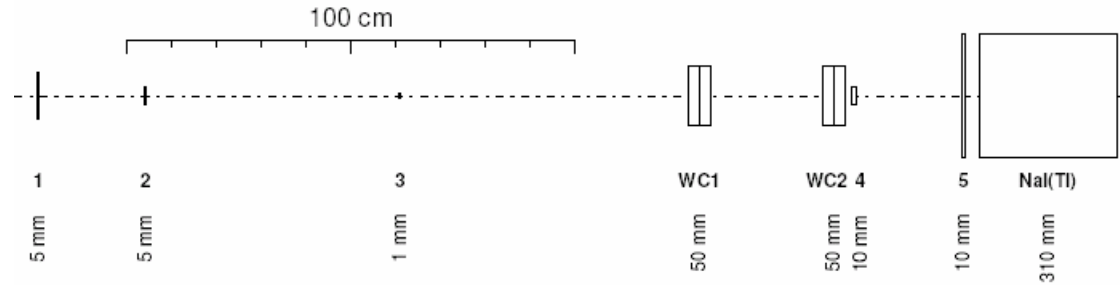


- detection threshold of ≈ 10 keV
- $\pm 5\%$ homogeneity over the detector surface

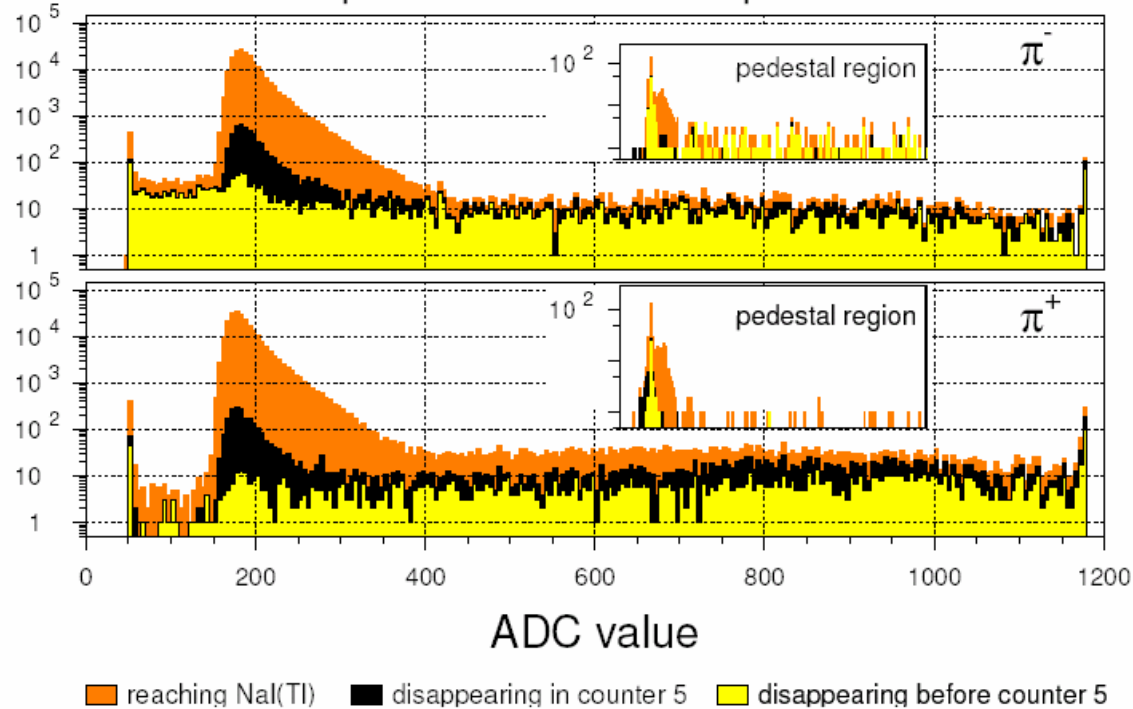


How a Version with PM's in the tank could be constructed.

Test dei veto carichi



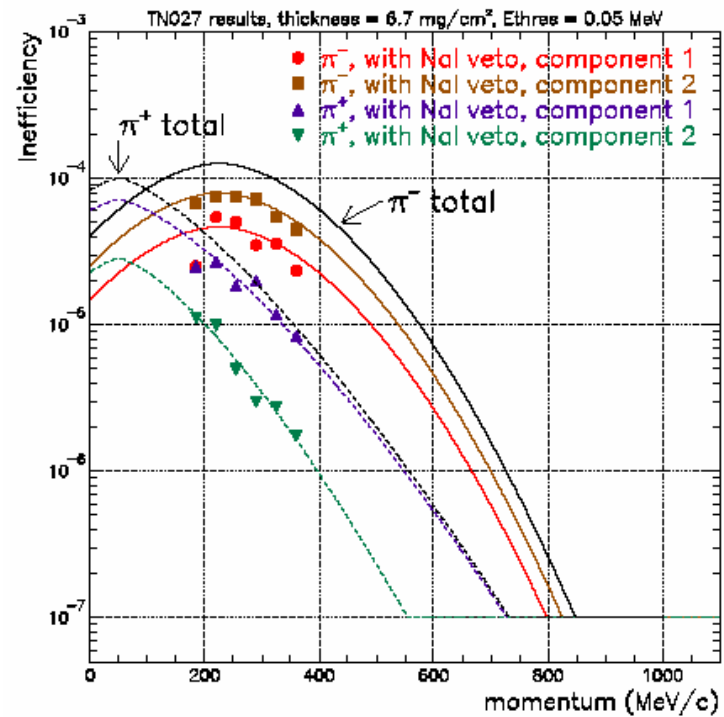
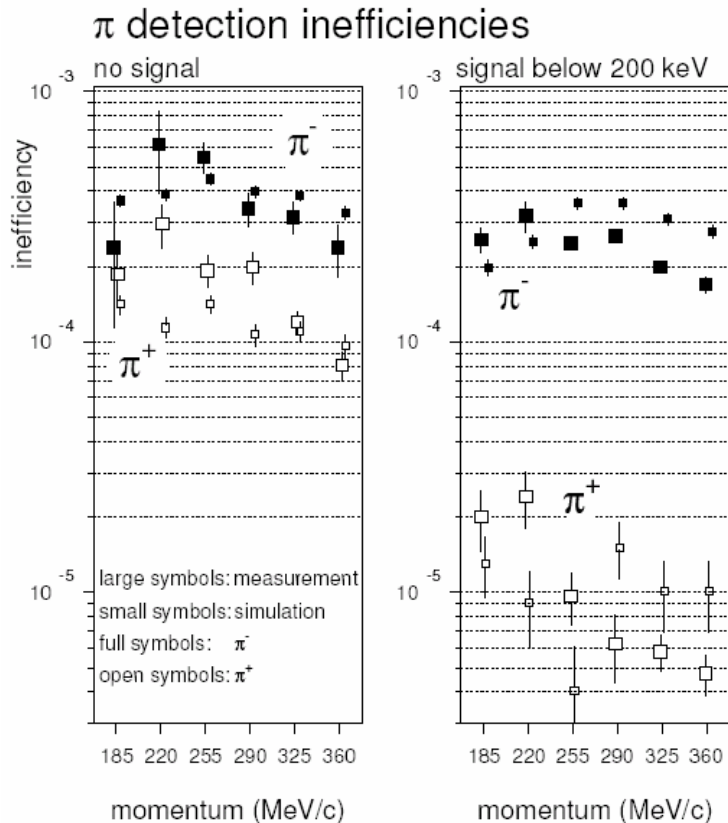
counter 4 response to 290 MeV/c pions



Prestazioni dei veto carichi

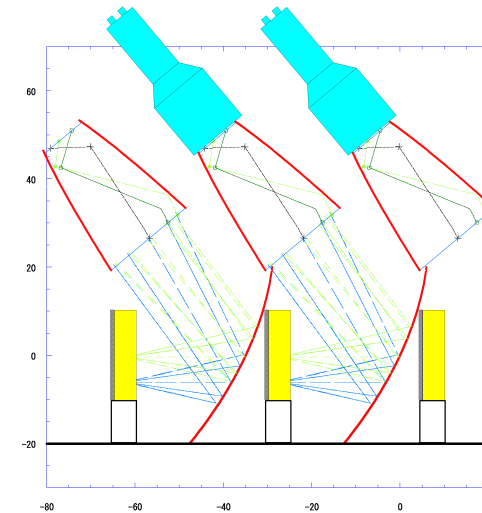
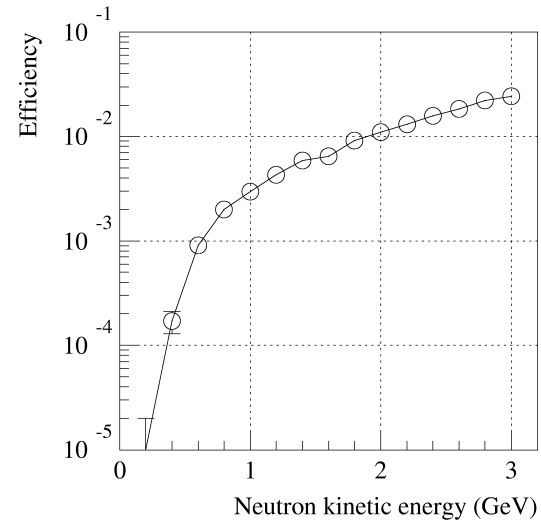
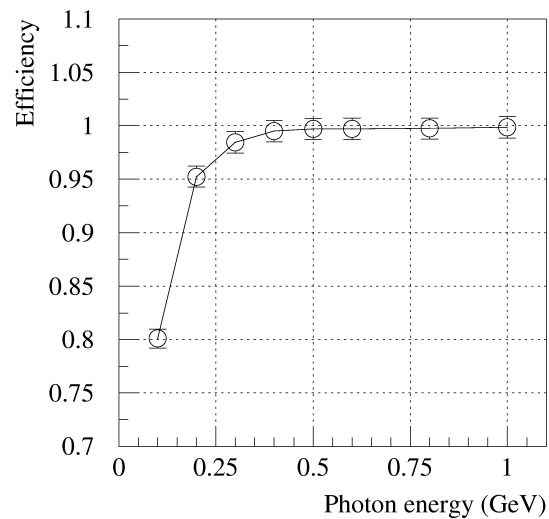
- Misure SIN
 - ◆ Soglia: 200 keV
 - ◆ Wrapping: 80mg/cm²
 - ◆ Rigetto dei veto per fotoni non incluso

- Estrapolazioni per
 - ◆ Soglia: 50 keV
 - ◆ Wrapping: 6.7mg/cm²
 - ◆ Include effetto veto per fotoni



Beam catcher

- Viene coperta con veto anche la regione del fascio (a valle)
 - ◆ Contatori di Cerenkov insensibili ai neutroni di bassa energia
 - ◆ 512 moduli in 25 righe



- Veto accidentali:
 - ◆ 1.8% n + 1.2% KL
- Inefficienza per DPR=10ns
 - ◆ 0.3% da n
 - ◆ < 0.1% da γ del fascio
 - ❖ Arrivano >4ns prima

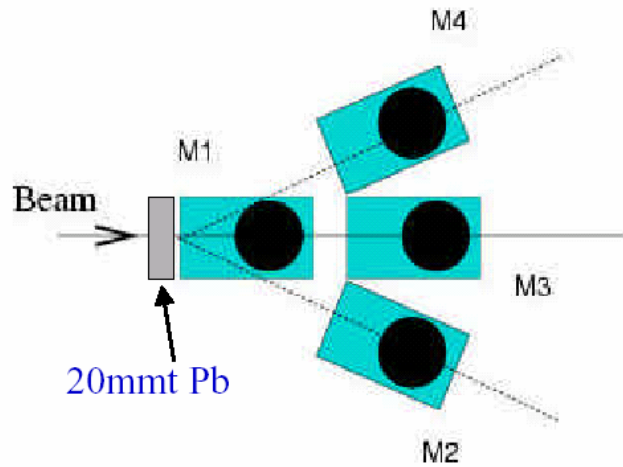
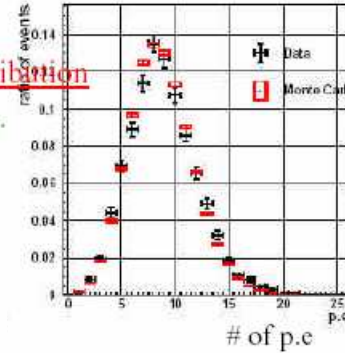
Test prototipi catcher (Kyoto)

- Light yield from π^+

Yield distribution

9 p.e.

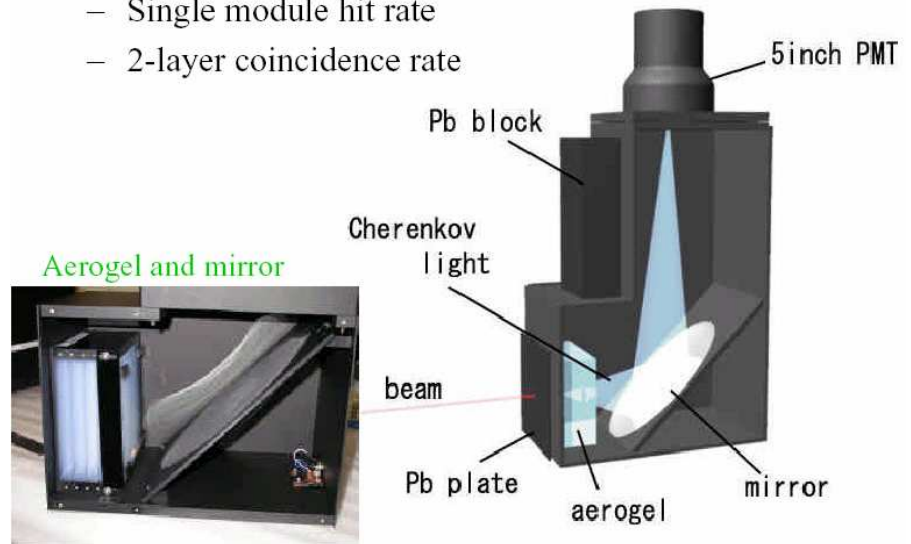
$1/\beta^2$ dependence



- Parabola mirror
- PMT located 30cm away from the beam
 - To prevent beam halo from hitting cathode
- Proton response
 - Single module hit rate
 - 2-layer coincidence rate

Requirements for the catcher

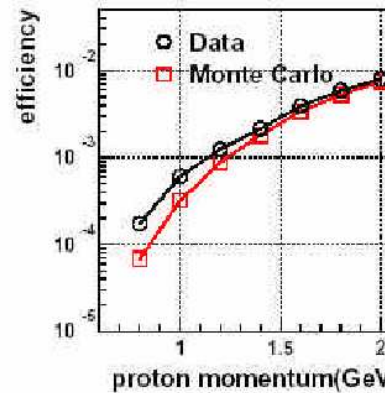
- >99% for 300 MeV photon
- $<3 \times 10^{-3}$ for 830 MeV neutron
- Timing resolution 1 nsec



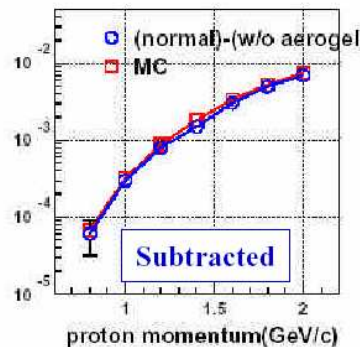
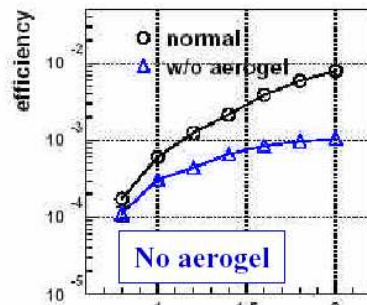
Risposta del catcher a protoni

- **Proton sensitivity**

- Data > MC at low momentum
- see comments below
- Agree well at high p

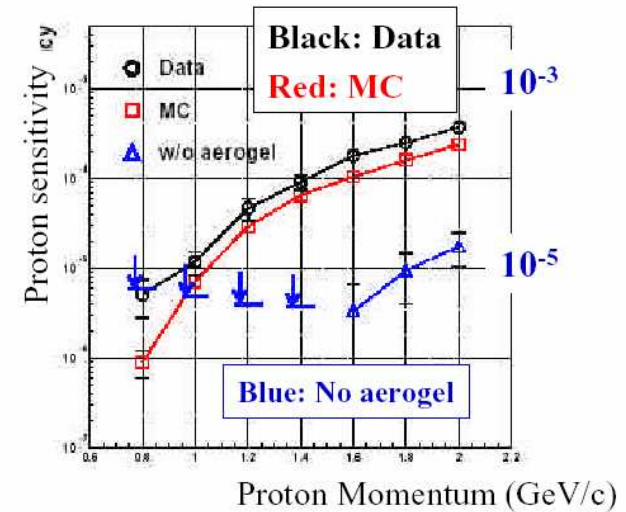


N2 Gas Scintillation



2-layer coincidence results

- Data > MC by 50%
- MC is reliable enough to predict hadron reactions with 50% accuracy.
- Our requirement for neutron sensitivity, $< 3 \times 10^{-3}$ for 830 MeV neutron, will be satisfied.

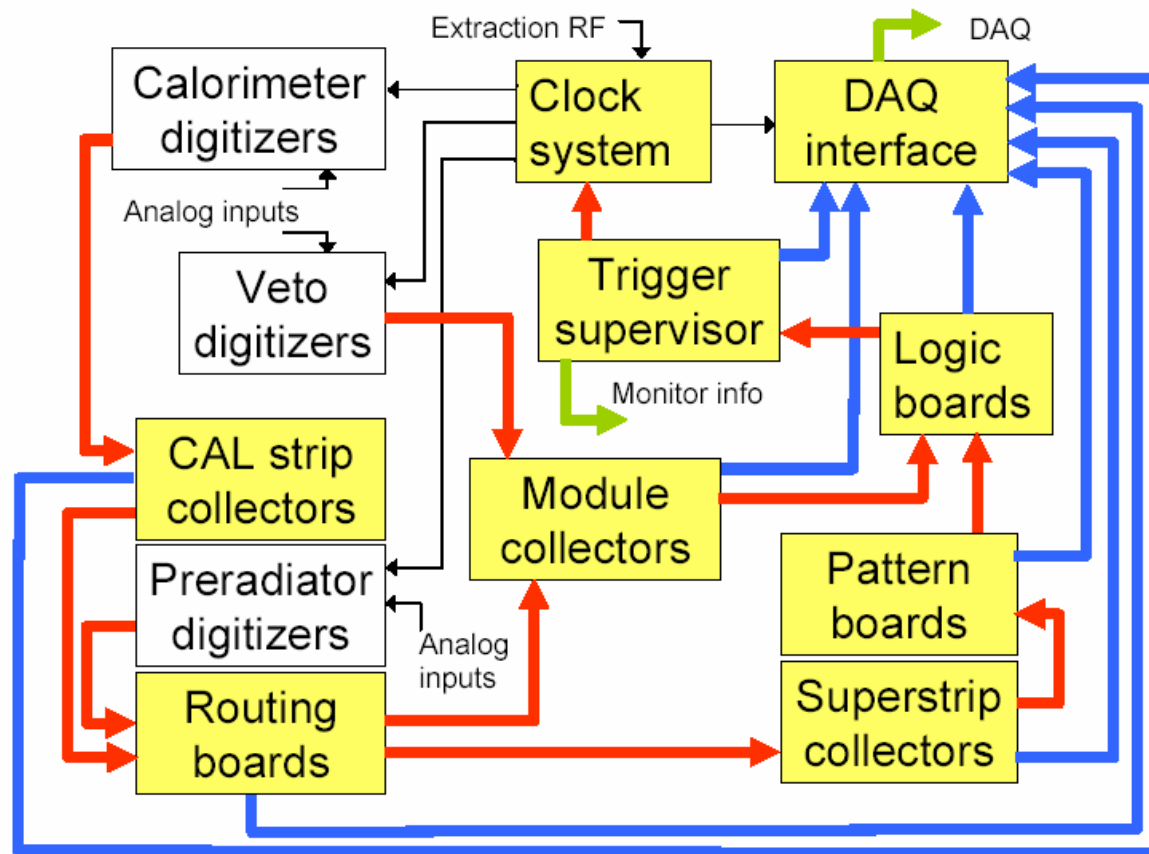


Il problema del trigger

- E' possibile realizzare un trigger sufficientemente selettivo ($\sim 100\text{kHz}$) ed efficiente ($\sim 90\%$) solo con segnali di scintillatori?
- Richieste
 - ◆ 2 fotoni nel PR – calorimetro
 - ❖ Soglie globali + algoritmi di clustering
 - ◆ Veto selezionati
- Prestazioni previste con simulazione M.C.
 - ◆ Rate: 63kHz
 - ◆ Perdite
 - ❖ 12% senza considerare effetti di accidentali
 - ❖ 22% con accidentali solo fuori della regione di decadimento
- E' in corso di valutazione una opzione "high rate"
 - ◆ I sistemi di front end sono progettati per accettare $> 1\text{MHz}$

La struttura del trigger

- LV1 + LV3
- Architettura in pipeline (sincrona)
- Interconnessioni seriali (300Mb/s)



Strategie di analisi (qualitativo)

- ◆ Richieste principali
 - ❖ 1 o 2 γ convertiti in prerad (42%+49%)
- ◆ Uso della cinematica
 - potere di rigetto diretto
 - per "scansare" regioni cinematiche con basse efficienze di veto
- ◆ Esempio di $\pi^0 \pi^0$
 - ❖ γ che soddisfano $m_{\gamma\gamma}=m_{\pi^0}$ provengono dallo stesso π^0 (EVEN)
 - $E_{\pi}^* = m_K/2$
 - ❖ γ che soddisfano $m_{\gamma\gamma}=m_{\pi^0}$ provengono da π^0 diversi (ODD)
 - E_{π}^* preferenzialmente alto (missing mass piccola) perché veto falliscono per piccole energie dei γ
- ◆ La tecnica di utilizzare condizioni cinematiche per evitare regioni in cui l'efficienza di veto è bassa viene usata anche per $\pi^+ \pi^- \pi^0$

KOPIO: uso della cinematica

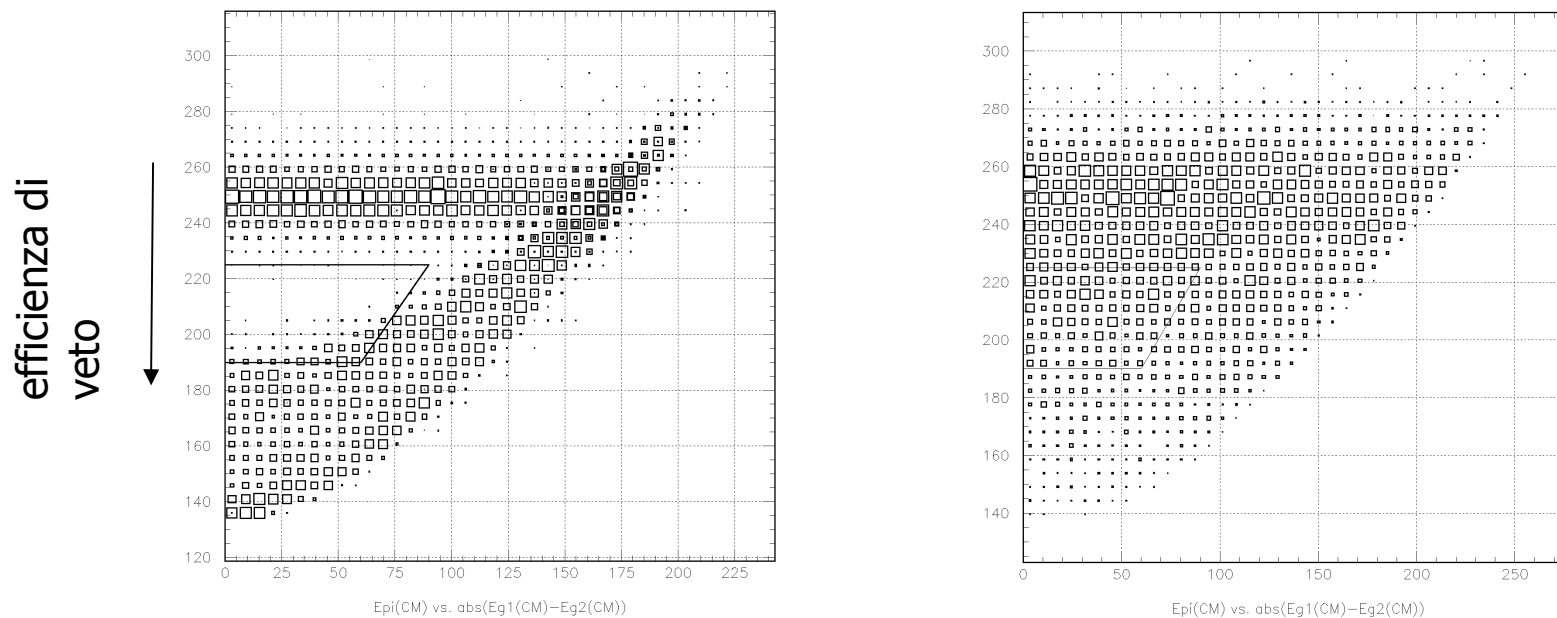


Fig. 9. Distributions of $E_{\pi^0}^*$ vs. $|E_{\gamma 1}^* - E_{\gamma 2}^*|$ after π^0 mass requirement for the $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ (left) and for the signal (right). The solid line encloses the signal region.

- La trasformazione al CM e la ricostruzione completa dei γ individuano una regione dove il fondo di $2\pi^0$ è trascurabile
- Cinematica complementare ai veto (piccole $E_{\pi^0}^* \rightarrow$ maggiore efficienza di veto)

Studi di sensibilità

- Monte-Carlo veloce con parametrizzazione delle risoluzioni dei rivelatori
 - ◆ Fit del vertice (3 vincoli)
 - ❖ Massa combinata dei due fotoni
 - ◆ Fit con vincolo della massa del π^0
- Efficienze dei veto applicate mediante parametrizzazioni basate su misure
- Altre perdite valutate separatamente mediante GEANT, includendo effetti di accidentali
 - ◆ Algoritmi di trigger
 - ◆ Auto veto
 - ◆ Perdite per accidentali nei veto

Sorgenti di fondo principali

Final state	Abbreviation	Branching fraction
$\pi^0\pi^0$	kp2	9.32×10^{-4}
$\pi^+\pi^-\pi^0$	kcp3	12.59%
$\pi^\pm e^\mp \nu \gamma$	ke3g	3.53×10^{-3}
$\pi^0\pi^\pm e^\mp \nu$	ke4	5.18×10^{-5}
$\pi^0\pi^0\pi^0$	kp3	21.05%
$\pi^0\gamma\gamma$	kpgg	1.41×10^{-6}
$\gamma\gamma$	kgg	5.90×10^{-4}
$\gamma e^+ e^-$	ke2g	1.00×10^{-5}

Condizioni cinematiche

- Variabili utilizzate: $E^*(\pi^0)$, $M(\gamma\gamma)$, E_{miss}

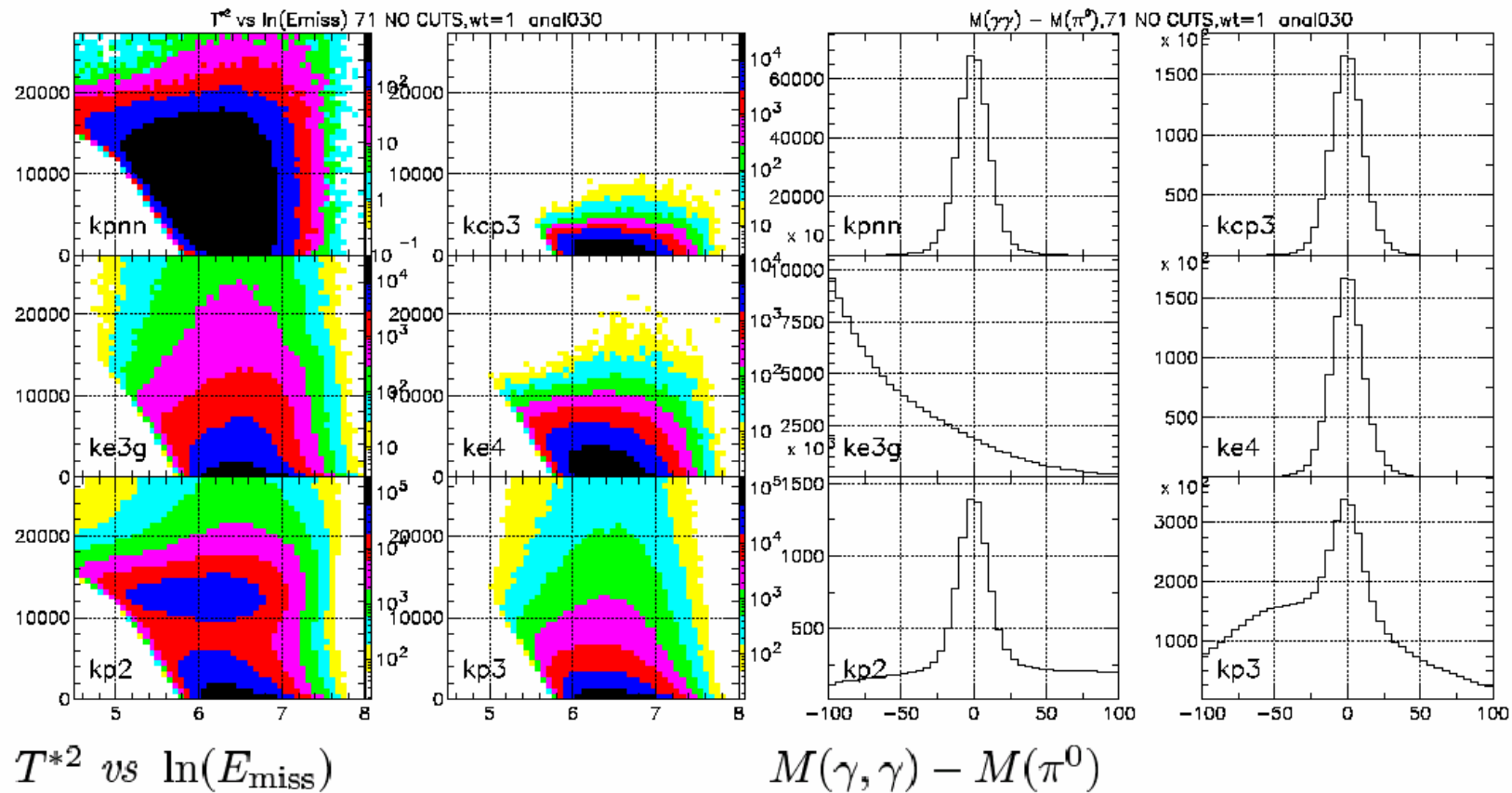
David E. Jaffe (RSVP Review)

16

11 Jan 2005

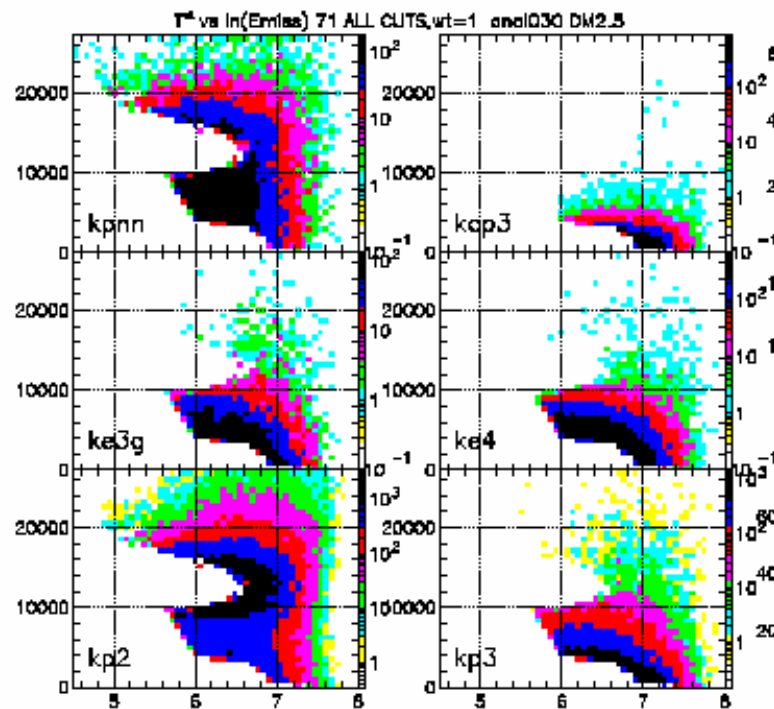
2005/01/09 00.56

2005/01/09 00.59

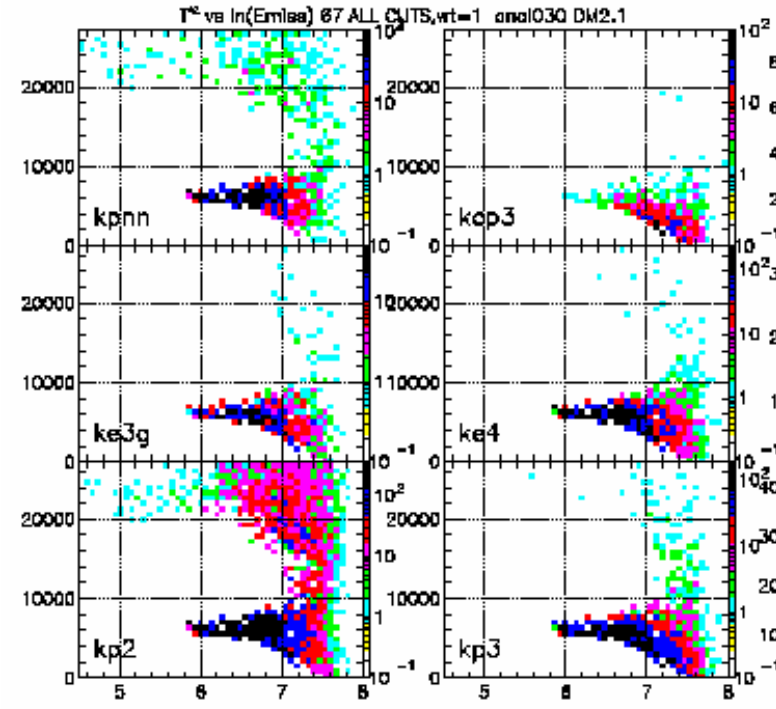


Tagli cinematici

- Basati sul rapporto segnale fondo previsto in ciascun bin tridimensionale



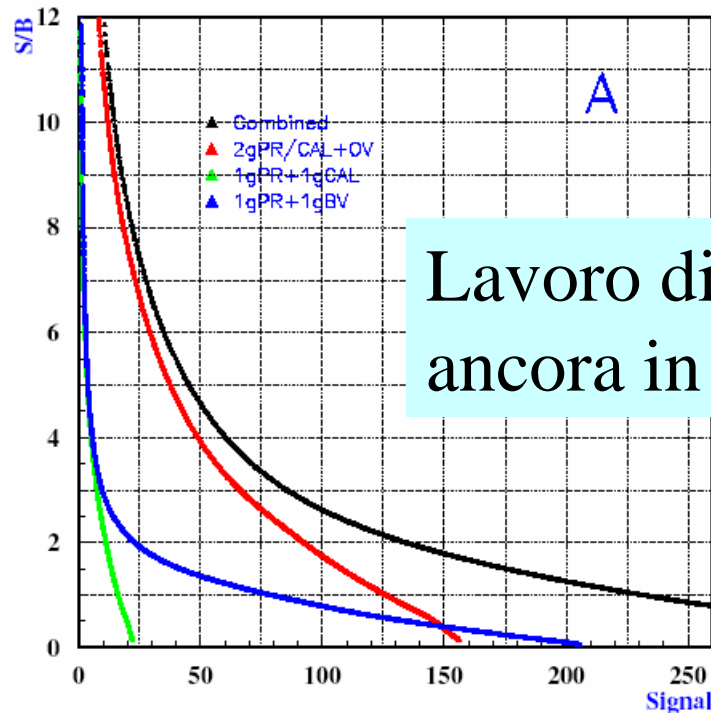
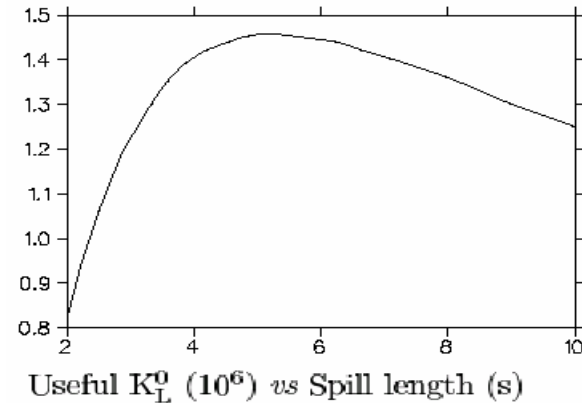
loosest



tightest

Risultati per 12000h di presa dati

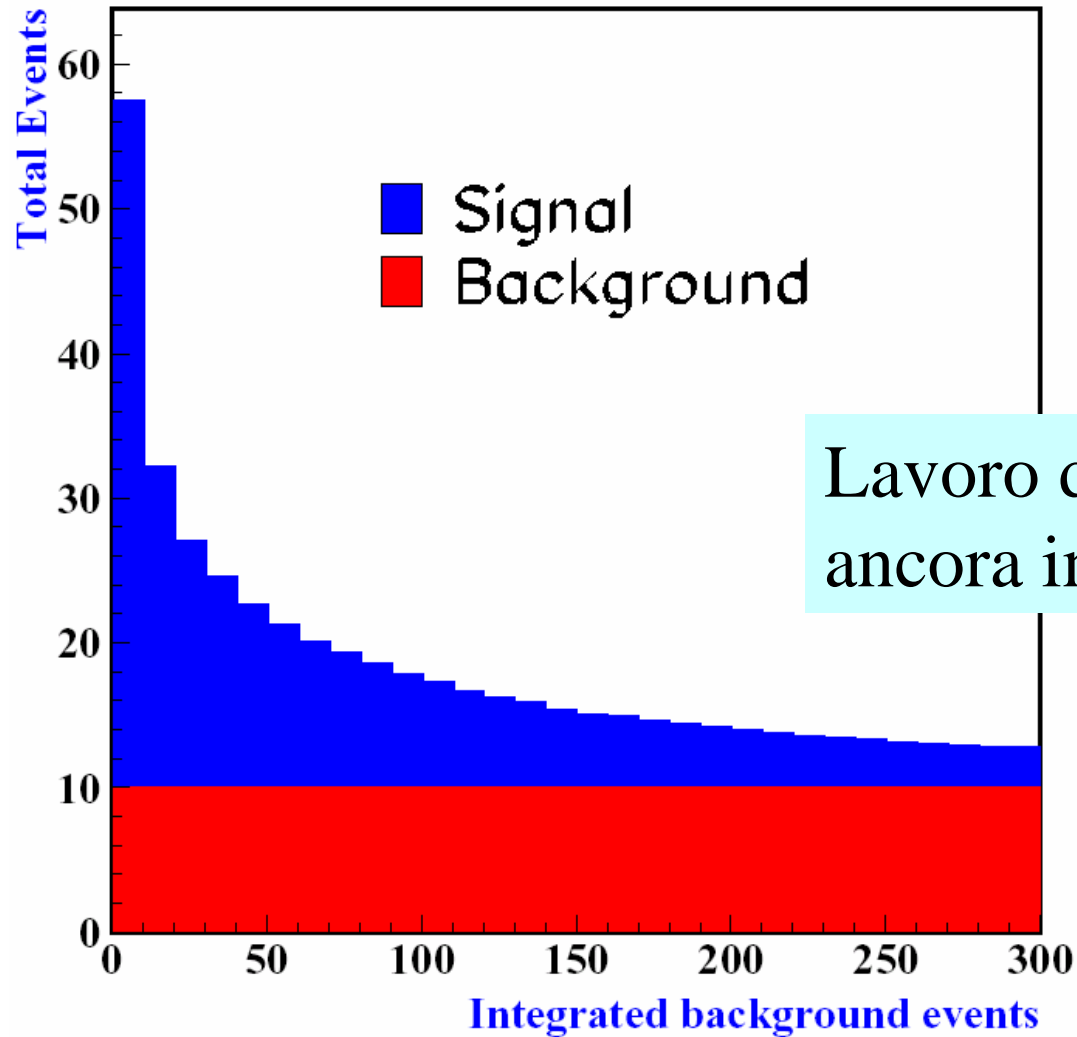
- $\sigma(\text{B.R.}) \approx 10\%$
 - ◆ Include valutazione di tutte le perdite (self veto + accidentali) ▶
 - ◆ Ottimizzando la lunghezza dello spill
 - ◆ Uso di tutti gli eventi fino a $S/B=0.3$ con tecnica di maximum likelihood



Lavoro di analisi ancora in corso

production angle	42.5°
aspect ratio	100 × 4 mrad ²
proton beam momentum	25.5 GeV/c
protons/spill	100TP
microbunch frequency	25MHz
interspill length	2.3s
spill length	4.9s
average number of $K_L^0/\mu\text{bunch}$ exiting spoiler	2.7
Hours of running	12000
K_L^0 survival factor	0.51
Useful K_L^0 decays exiting spoiler/calendar-second	1.86×10^7
Useful K_L^0 decays exiting spoiler/calendar-second takes into account all assumed losses (" K_L^0 survival factor").	

Un modo diverso di presentare i risultati



Lavoro di analisi ancora in corso



Altri esperimenti su $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$:

	KEK	
	E391A	JHF
Proton energy	12 GeV	50 GeV
Protons/pulse	2×10^{12}	2×10^{14}
Cycle time	2.5 sec	3.42 sec
Flat-Top	0.5 sec	0.75 sec
Ext.angle	4°	10°
Beam profile	4 mr ^ϕ	2.6 mr ^ϕ
Solid Angle	12.6 μstr	5.5 μstr
$Y_{K_L^0}/p/str$	5.9×10^{-2}	0.96
Av. K_L^0 mom.	2 GeV/c	2 GeV/c
Decay region	2.7 m	2.7 m
Decay prob.	4.3 %	4.3 %
$K_L^0/pulse$	1.5×10^6	1.1×10^9
K_L^0 -decay/pulse	6.5×10^4	4.7×10^7
Av. K_L^0 -decay/sec	2.6×10^4	1.4×10^7
Inst.decay-rate	130 kHz	63 MHz
Acceptance	8 %	16 %
Run Time	1×10^7 sec	3×10^7 sec
Running Eff.	50 %	50 %
Sensitivity	1.0×10^{-10}	3.0×10^{-14}
Events(3×10^{-11})		1000 events

- Upgrade di E391A per JPARC:
 - ◆ “JHF” (ora JPARC) assume fascio ottimizzato (linea B)
 - ◆ Con linea A si perde un ordine di grandezza:

with respect to the primary line as shown in Figure 4. A preliminary calculation tells that it reduces the K_L^0 /proton ratio by more than one order of magnitude. Assuming the average intensity of the primary beam in a few years from TIME (0) as 10% of the design value, the sensitivity goal is around the branching ratio predicted by the Standard Model. The value is worse than the goal described in KOPIO proposal. Therefore, this scenario strongly depends on their preparation as well as how much we can improve our detection system.

- ◆ Non esistono ancora le risorse per far partire l'esperimento a T(0)

Conclusioni

- Il decadimento $K_L \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ può "mettere alla prova" lo S.M. nel settore della violazione di CP
 - ◆ Insieme a $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ vincola, in maniera indipendente dal B, i parametri che nello S.M. descrivono la violazione di CP
- Lo studio di entrambi i canali è oggetto di un interesse sperimentale vigoroso. In particolare
 - ◆ $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ è passato dalla fantascienza alle sale sperimentali
 - ❖ E391 scenderà al di sotto del limite di Grossman-Nir ?
 - ❖ KOPIO punta ad una osservazione positiva → misura di η con $\sigma(\eta) \sim 5\%$
 - ◆ Diverse iniziative su $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ in formazione o in attesa di risorse
- KOPIO è stato finanziato e dovrebbe iniziare la costruzione alla fine di quest'anno
- Workshop a Frascati su "Experimental challenges in $K \rightarrow \pi \nu \bar{\nu}$ measurements" : 26-27 maggio 2005