



# L'esperimento SHiP all'SPS del CERN



**A. Paoloni (INFN-LNF)**  
**On behalf of the SHiP collaboration**

IFAE xv Incontri di Fisica delle Alte Energie

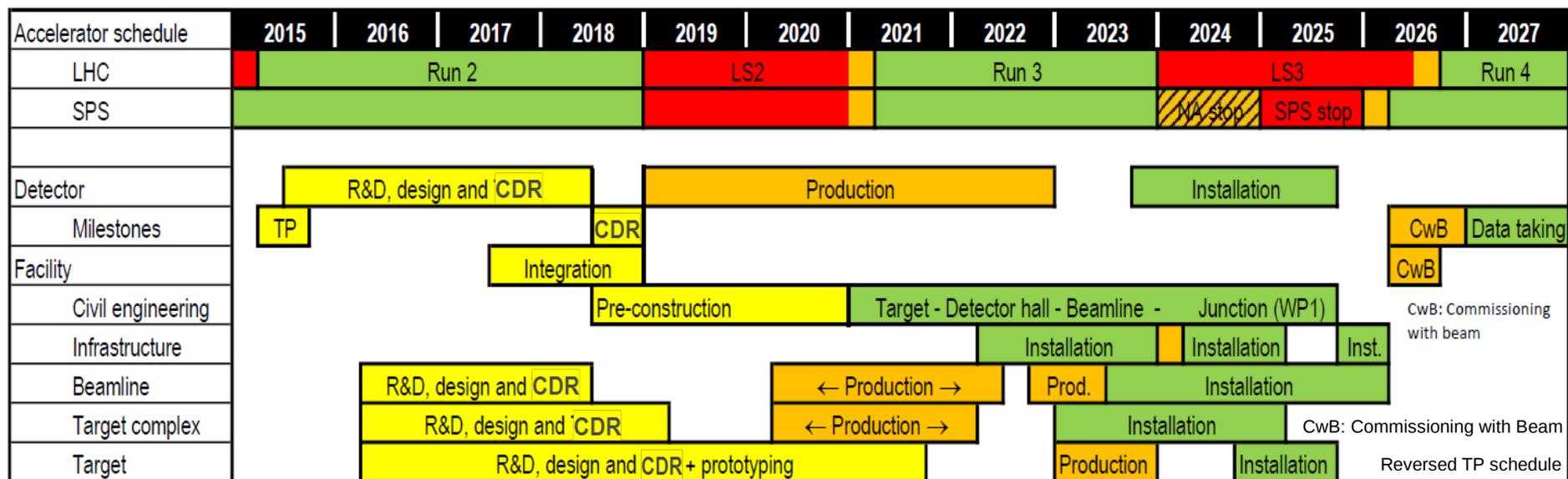
Genova, 30 Marzo – 1 Aprile 2016

# Search for Hidden Particles (SHiP)

SHiP e' una proposta per un esperimento a bersaglio fisso al CERN con fasci di protoni di alta intensita' dal SPS.

In Aprile 2015:

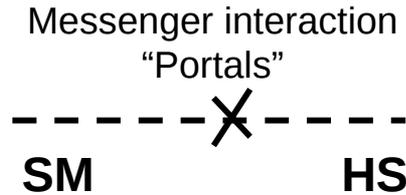
- Scrittura del Technical proposal (arXiv:1504.04956), firmato da 235 fisici per 45 istituzioni.
- Scrittura del Physics Proposal (arXiv:1504.04855), firmato da 80 fisici teorici.
- Sottomissione del progetto all'SPSC.



- Installazione linea di fascio e rivelatore a partire dal 2021.
- Inizio della presa dati nel 2026 (in contemporanea al quarto run di LHC)

# Uno sguardo oltre il “portale”.....

$$L_{\text{world}} = L_{\text{SM}} + L_{\text{interaction}} + L_{\text{HS}}$$

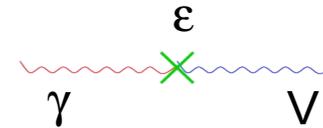


Diverse teorie prevedono l'esistenza di particelle al di là del Modello Standard (sette nascosto, HS), alcune delle quali possono accoppiarsi/mescolarsi con particelle del Modello Standard (SM).

Alcuni esempi:

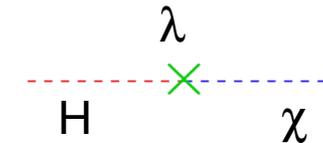
Portale vettoriale

Mixing cinetico con un fotone oscuro  $V$  :  $\frac{1}{2} \epsilon F_{\mu\nu}^{\text{MS}} F_{\mu\nu}^{\text{HS}}$



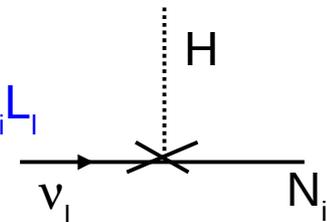
Portale scalare

Mixing con un singoletto scalare oscuro  $\chi$  :  $(gS + \lambda S^2) H^+ H$



Portale “neutrinico”

Vertice con neutrino right-handed  $N$  (Leptone neutro pesante):  $Y_{ij} H^+ N_i L_j$



Portale “assionico”

Vertice tra assioni e bosoni di gauge (o fermioni) del SM

# Un esempio: il leptone neutro pesante

$$L_{singlet} = i\bar{N}_I \partial_\mu \gamma^\mu N_I - Y_{I\alpha} \bar{N}_I^c \tilde{H} L_\alpha - M_I \bar{N}_I^c N_I + h.c. + L_{SM}$$

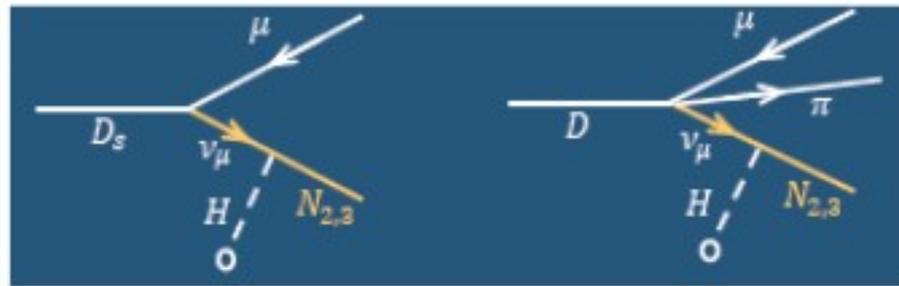
$N_I (I = 1, 2, \dots, n)$  gauge-singlet fermions

Majorana mass term

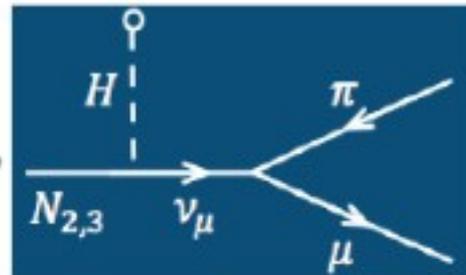
Yukawa term: **mixing with active neutrinos**

Se 3 leptoni neutri pesanti di massa  $< M_W$ , neutrino Minimal Standard Model (νMSM)  
 3 neutrini addizionali sterili e massivi (HNL), partner di Majorana dei tre neutrini standard.  
 $N_1$ , con massa nella regione del keV, e' un candidato di materia oscura.  
 $N_2, N_3$ , con massa nella regione del GeV, potrebbero essere alla base dell'asimmetria barionica dell'universo e fornire masse ai neutrini.

Quarks	2.4 MeV $\frac{2}{3}$ <b>u</b> up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ <b>c</b> charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ <b>t</b> top
	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>d</b> down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ <b>s</b> strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ <b>b</b> bottom
	$\sim 0.001$ eV 0 <b><math>\nu_e</math></b> <b><math>N_1</math></b> electron neutrino sterile neutrino	$\sim 0.01$ eV 0 <b><math>\nu_\mu</math></b> <b><math>N_2</math></b> muon neutrino sterile neutrino	$\sim 0.04$ eV 0 <b><math>\nu_\tau</math></b> <b><math>N_3</math></b> tau neutrino sterile neutrino
Leptons	0.511 MeV -1 <b>e</b> electron	105.7 MeV -1 <b><math>\mu</math></b> muon	1.777 GeV -1 <b><math>\tau</math></b> tau



Produzione da decadimento semi-leptonico di un mesone (K,D,B).



Accoppiamento con il neutrino attivo molto debole.  
 Lunghezza di decadimento o(km) per masse o(GeV).

# Linee guida per SHiP

Processi studiati da SHiP:

- Produzione di particelle del settore nascosto tramite decadimenti di adroni, accoppiamento a fotoni, etc.
- Decadimento di particelle del settore nascosto.

Models	Final states
Neutrino portal, SUSY neutralino	$\ell^\pm \pi^\mp, \ell^\pm K^\mp, \ell^\pm \rho^\mp, \rho^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$
Vector, scalar, axion portals, SUSY sgoldstino	$\ell^+ \ell^-$
Vector, scalar, axion portals, SUSY sgoldstino	$\pi^+ \pi^-, K^+ K^-$
Neutrino portal, SUSY neutralino, axino	$\ell^+ \ell^- \nu$
Axion portal, SUSY sgoldstino	$\gamma \gamma$
SUSY sgoldstino	$\pi^0 \pi^0$

Rates di produzione e decadimento fortemente soppressi rispetto al Modello Standard:

- Branching ratio di produzione  $\mathcal{O}(10^{-10})$
- Particelle con lunga vita media e poco interagenti con la materia ordinaria.

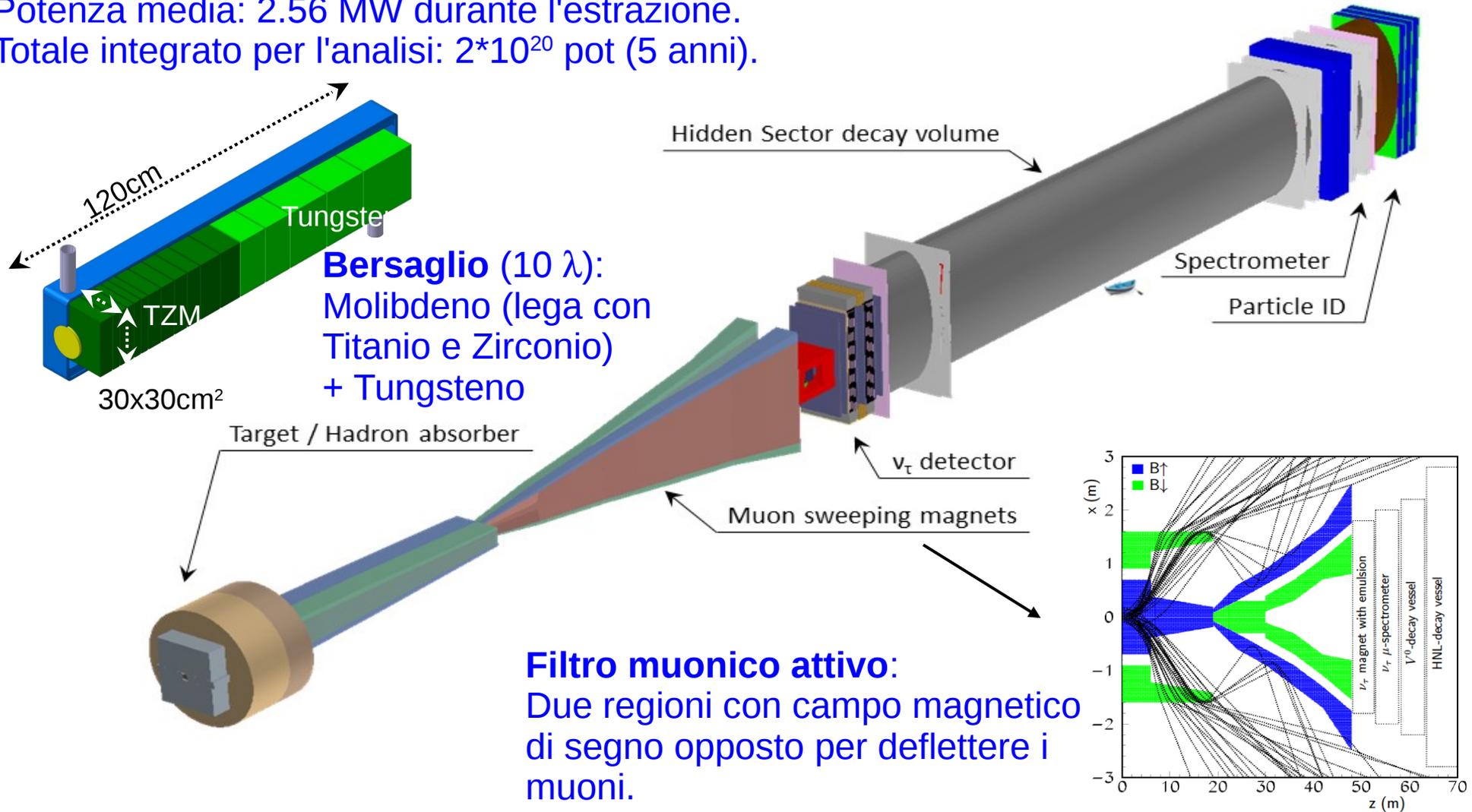
Richieste per l'apparato sperimentale:

- Identificazione delle particelle nello stato finale per riconoscere i processi in gioco.
- Esperimento a bersaglio fisso con un grande volume di decadimento.
- Forte soppressione dei fondi.

Ma anche opportunita' di studio di fisica del  $\nu_\tau$  nell'ambito del Modello Standard, dato che:  $BR(Ds \rightarrow \tau + \nu_\tau) = 5.6\%$  . Ci torneremo dopo.....

# L'esperimento SHiP

**Fascio:**  $2 \cdot 10^{13}$  pot/ciclo (7.2 sec) da SPS ( $E=400$  GeV).  
**Estrazione lenta:** 1 sec per ridurre fondo combinatorio.  
**Potenza media:** 2.56 MW durante l'estrazione.  
**Totale integrato per l'analisi:**  $2 \cdot 10^{20}$  pot (5 anni).



# Il rivelatore per il settore nascosto

Tubo ellittico di decadimento.

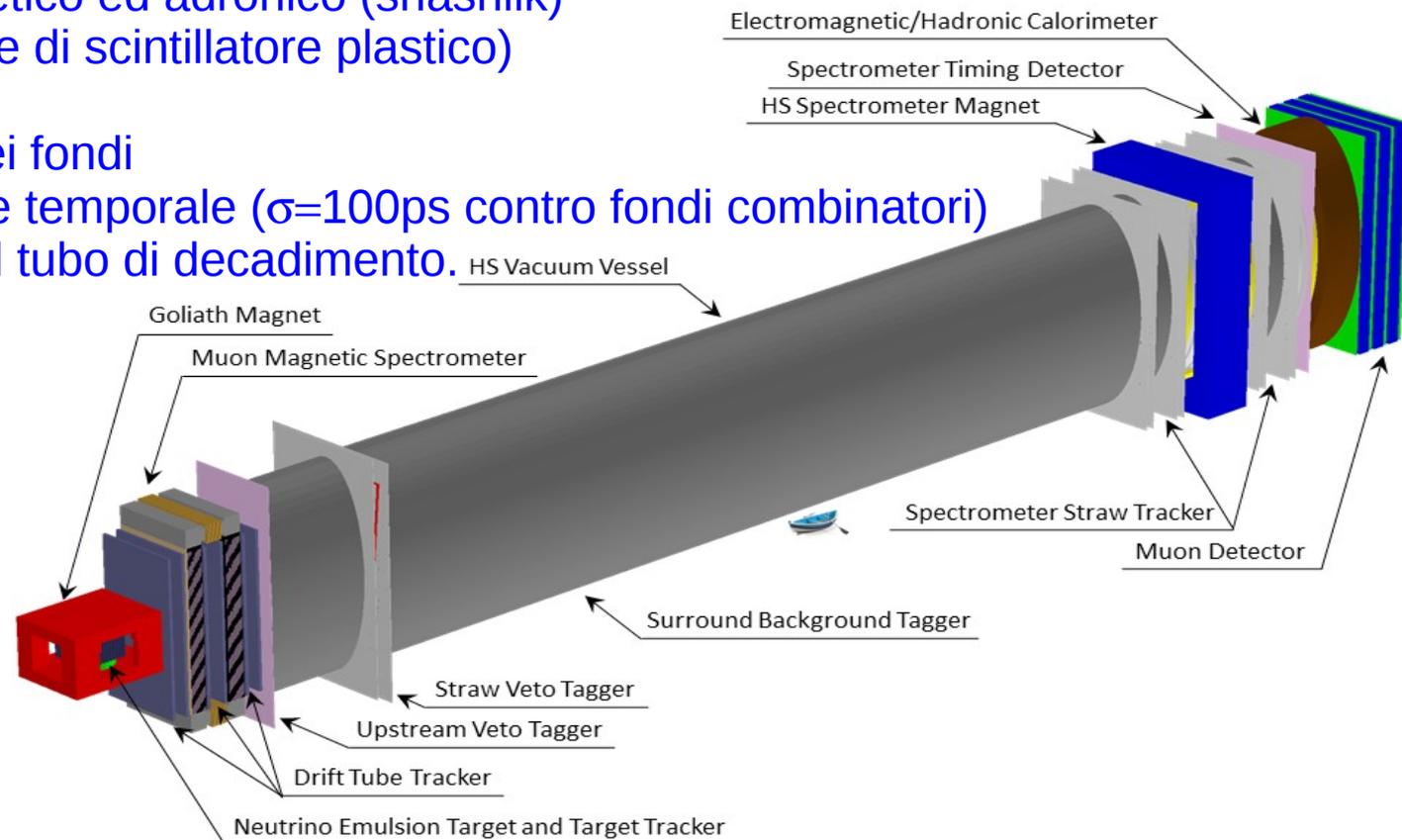
- 5m \* 10m \* 60m
- Pressione  $< 10^{-3}$  mbar (per minimizzare le interazioni DIS dei muoni e dei neutrini)

Ricostruzione ed identificazione delle particelle nello stato finale

- Spettrometro magnetico (magnete dipolare + straw tubes + rivelatori ad alta precisione temporale)
- Calorimetro elettromagnetico ed adronico (shashlik)
- Rivelatore di muoni (barre di scintillatore plastico)

Identificazione e reiezione dei fondi

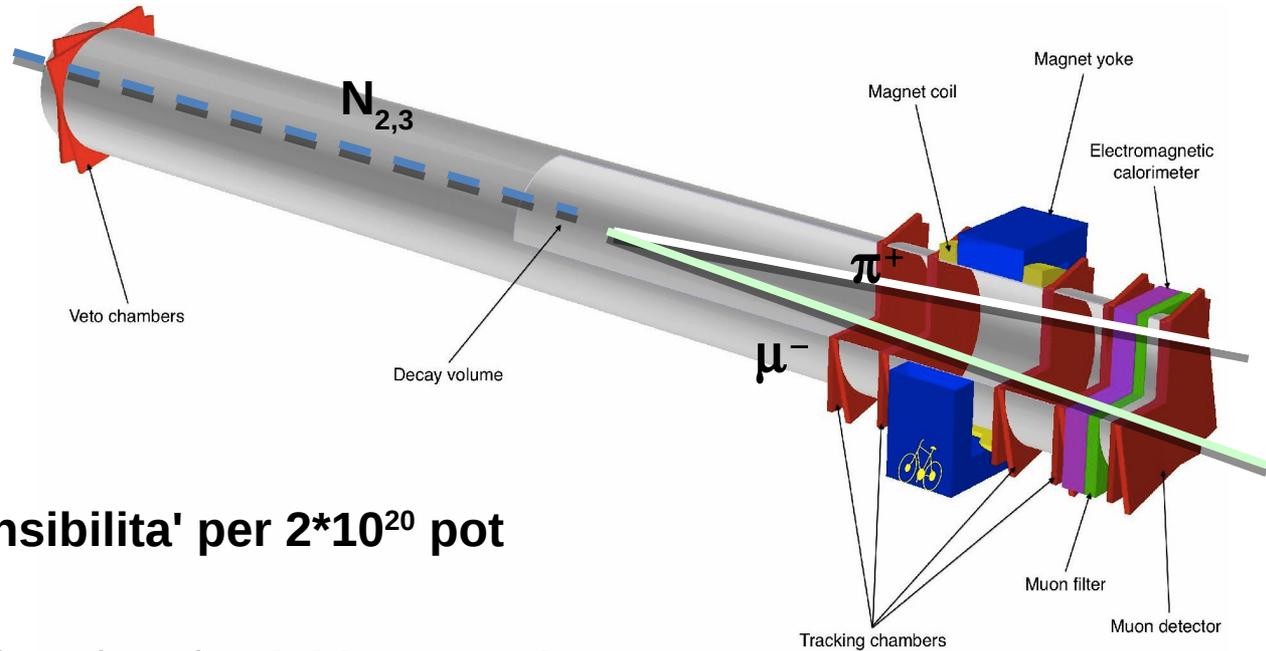
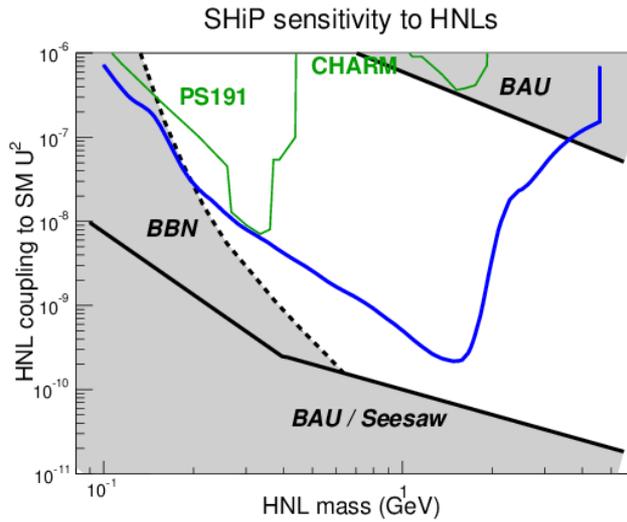
- Rivelatori ad alta precisione temporale ( $\sigma=100$ ps contro fondi combinatori)
- VETO frontale ed intorno al tubo di decadimento.



# Rivelazione del leptone neutro pesante

$$U_e^2 : U_\mu^2 : U_\tau^2 = 52 : 1 : 1$$

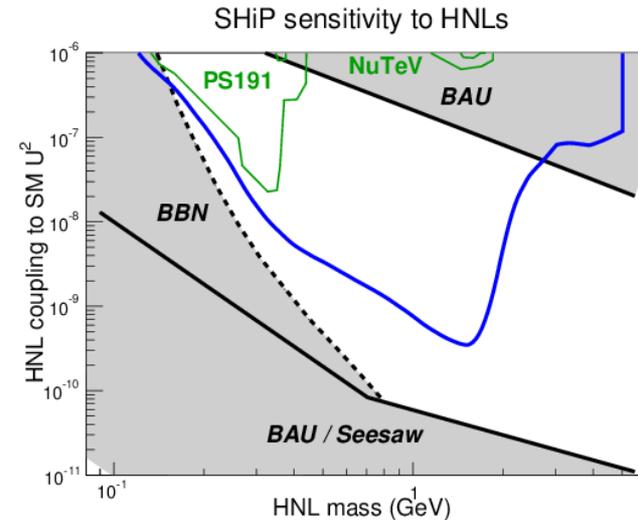
Gerarchia inversa



Sensibilita' per  $2 \cdot 10^{20}$  pot

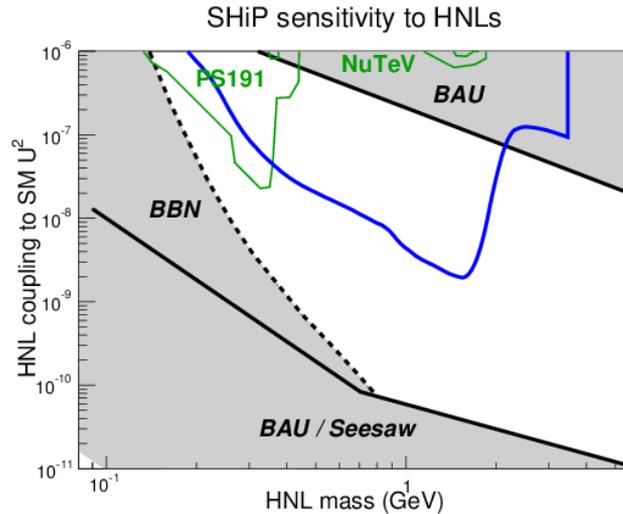
$$U_e^2 : U_\mu^2 : U_\tau^2 = 1 : 16 : 3.8$$

Gerarchia normale

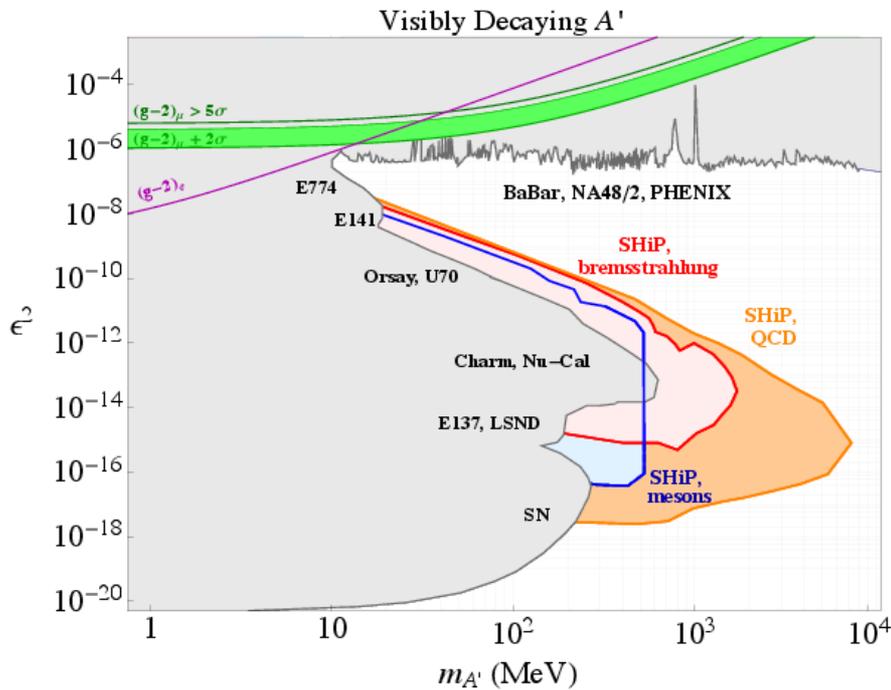


$$U_e^2 : U_\mu^2 : U_\tau^2 = 0.061 : 1 : 4.3$$

Gerarchia normale



# Non solo leptone neutro pesante....



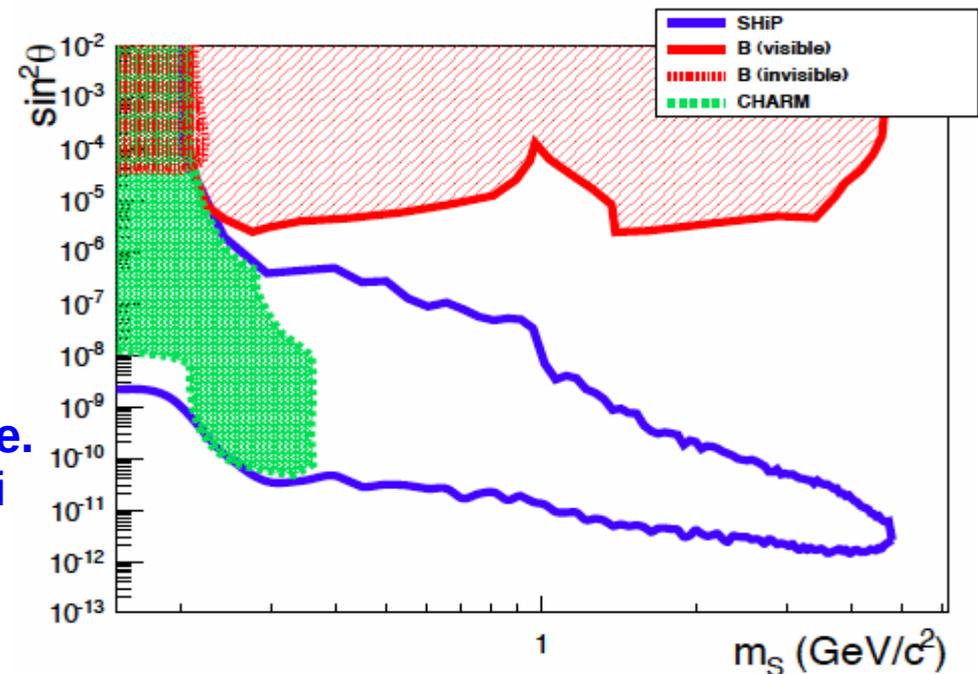
## Fotoni oscuri

### Produzione:

- Decadimenti  $\pi^0 \rightarrow V\gamma$  ;  $\eta \rightarrow V\gamma$  ;  $\omega \rightarrow V\pi^0$  ;  $\eta' \rightarrow V\gamma$
  - Bremsstrahlung di protoni/partoni
- Rivelazione: decadimento in coppie cariche.

## Scalari

Produzione: decadimenti di mesoni B.  
 Rivelazione: decadimento in coppie cariche.  
 I risultati di SHiP sarebbero complementari a quelli di Charm e B-factories, LHCb (e successivo upgrade).



Nel physics proposal studi di sensibilita' anche per modelli supersimmetrici ed assioni.

# Non solo settore nascosto.....

Opportunita' unica per studiare  $\nu_\tau$  ed anti- $\nu_\tau$ .

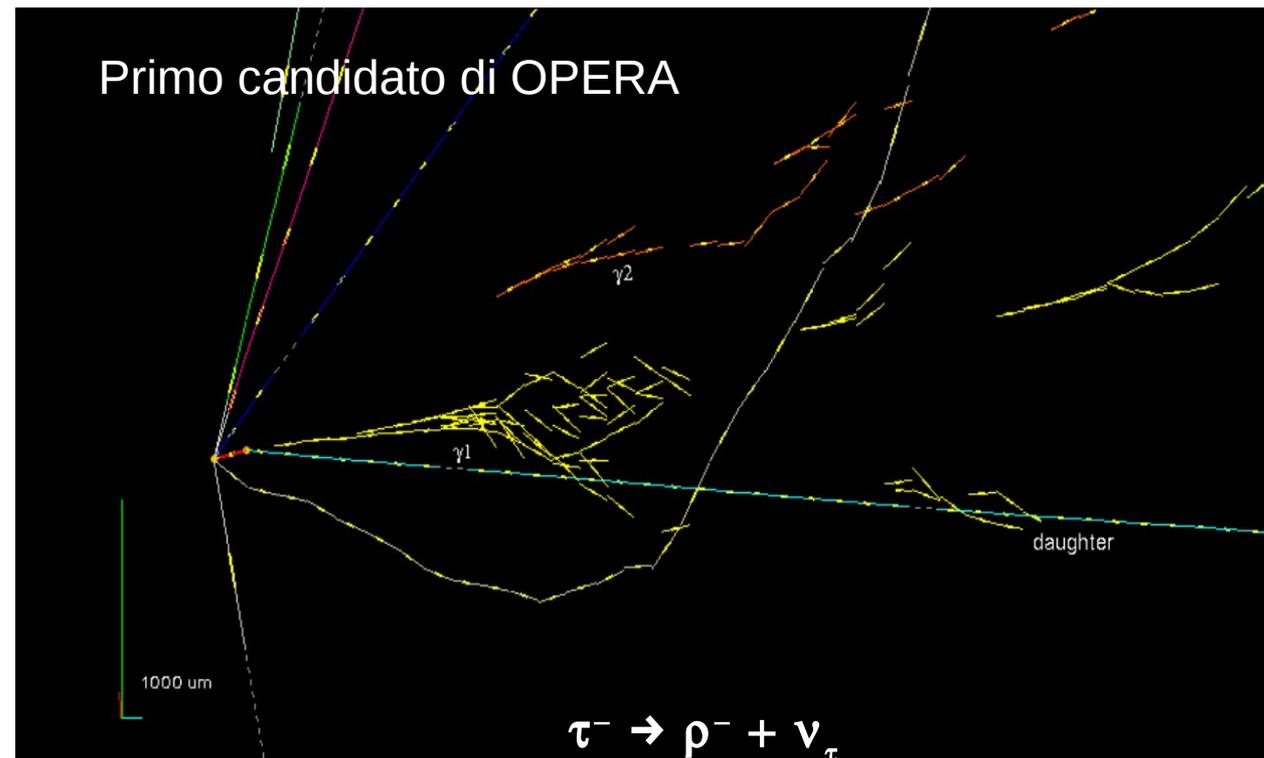
4  $\nu_\tau$  osservati per la prima volta da DONUT. *Phys. Lett. B504 (2001) 218-224*

9 eventi (con fondo stimato di 1.5) osservati da DONUT con tagli meno selettivi.

5 candidati  $\nu_\tau$  osservati da OPERA (5.1  $\sigma$  di significativita' statistica sull'oscillazione  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ).

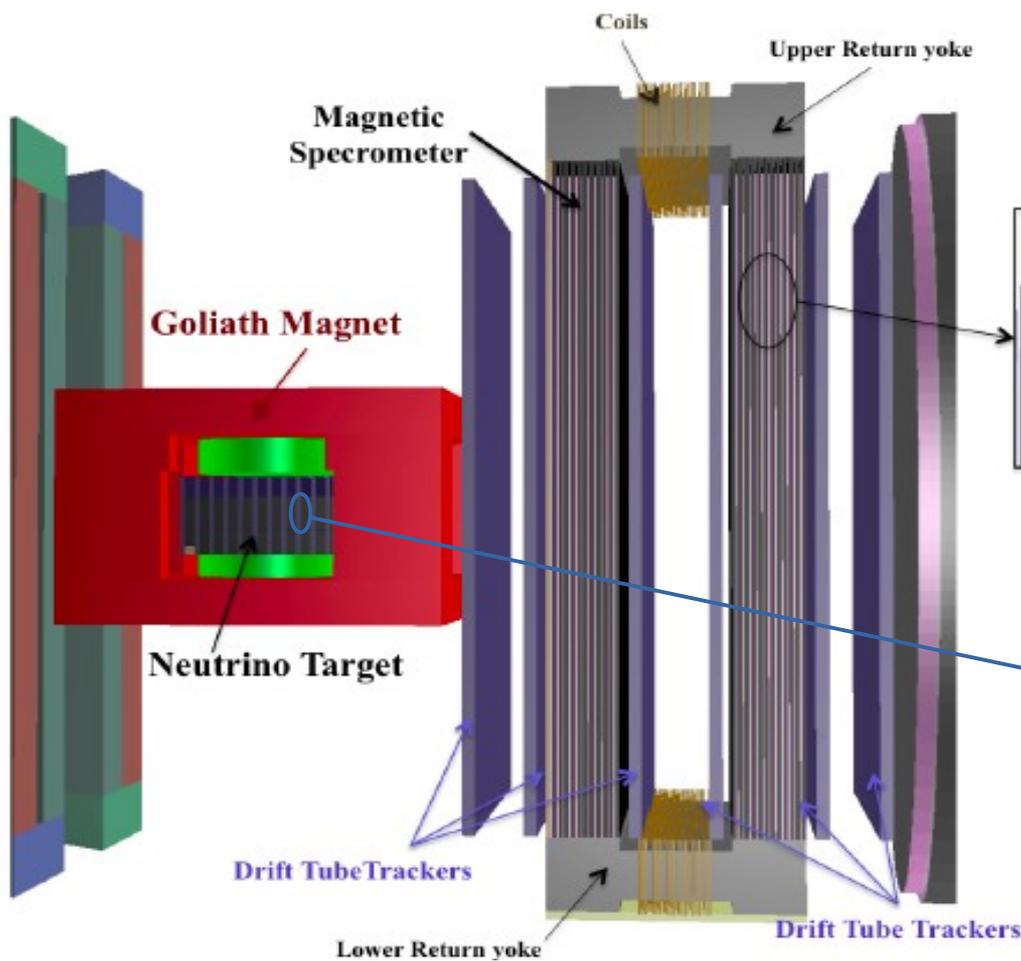
*Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 121802*

Anti- $\nu_\tau$  mai osservato.



# Rivelatore di neutrini tau

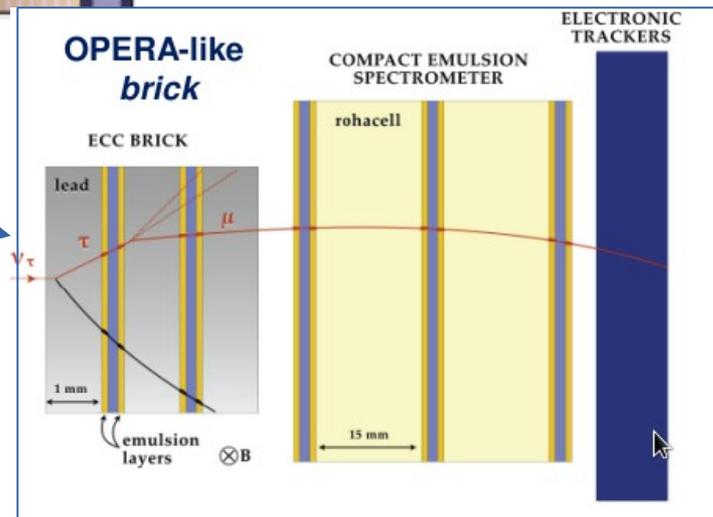
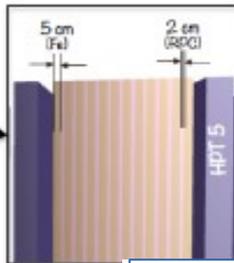
Basato sull'esperienza di OPERA: Bersaglio di piombo/emulsioni, cui vengono aggiunti un tracciatore elettronico ed uno spettrometro per muoni.



Mattoni simili a quelli di OPERA:  
56 lastre di piombo da 1mm  
57 lastre di emulsione nucleare.

Tracciatore elettronico:  
Fibre scintillanti/r-wells/MicroMegas.

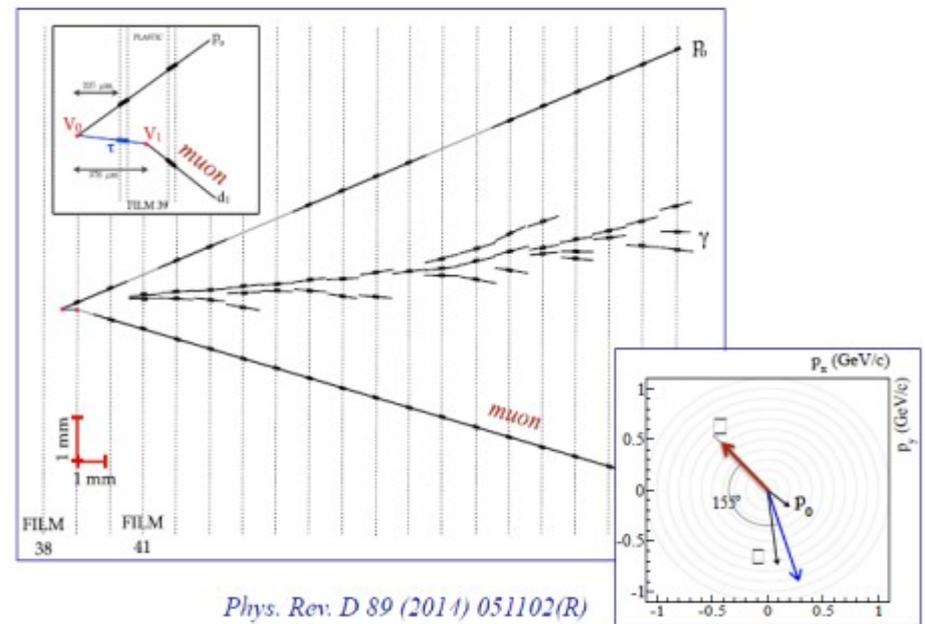
Bersaglio in campo magnetico (1T).



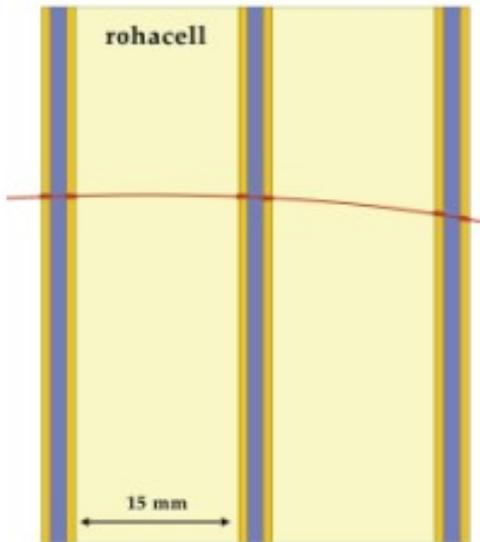
# Come rivelare i $\nu_\tau$

Precisione del  $\mu\text{m}$  nella ricostruzione del vertice di interazione del neutrino e del decadimento del tau. (**Mattone**)

Separazione  $\nu_\tau$ /anti- $\nu_\tau$  dalla misura della carica nello **Spettrometro compatto ad emulsioni (CEM)** ( $\tau \rightarrow \mu$ ,  $\tau \rightarrow h$ ).  
 $\Delta p/p < 20\%$  fino a 12 GeV.

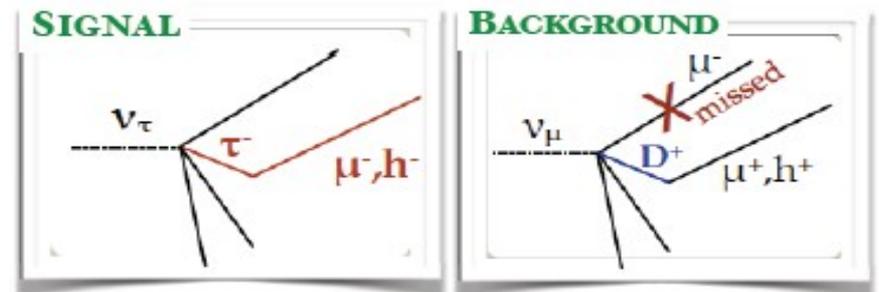


COMPACT EMULSION SPECTROMETER



**Tracciatore elettronico** alternato ai mattoni ed ai CEM, per ricostruzione delle tracce, spaziale (precisione richiesta 100  $\mu\text{m}$ ) e temporale.

**Spettrometro muonico** per massimizzare l'efficienza di rivelazione dei  $\mu$  prodotti nell'interazione dei  $\nu_\mu$  (soppressione del fondo di particelle con charm).



# Misura della sezione d'urto del $\nu_\tau$

$2 \cdot 10^{20}$  pot @ 400 GeV  
 5 anni di presa dati  
 Massa bersaglio 9.6 t

Numeri corretti per:

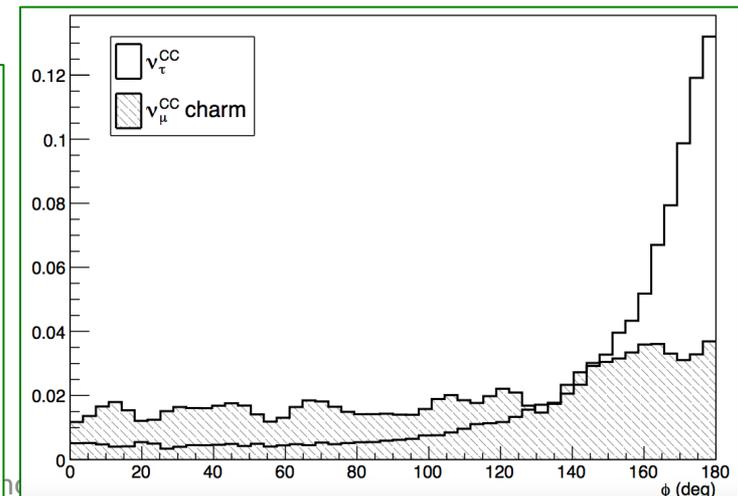
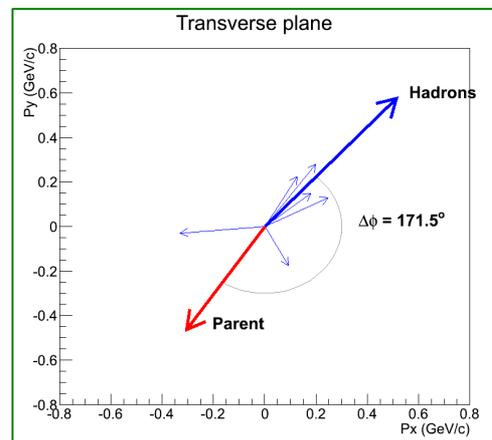
- efficienza
- ricostruzione della carica
- identificazione dei  $\mu$

SIGNAL EXPECTATION (red)  
 BACKGROUND (green)  
 R=S/B RATIO (blue)

decay channel	$N^{exp}$	$\nu_\tau N^{bg}$	$R$	$N^{exp}$	$\bar{\nu}_\tau N^{bg}$	$R$
$\tau \rightarrow \mu$	570	30	19	290	140	2
$\tau \rightarrow h$	990	80	12	500	380	1.3
$\tau \rightarrow 3h$	210	30	7	110	140	0.8
total	1770	140	13	900	660	1.4

Fondo principale: produzione di charm in eventi (anti)- $\nu_\mu$ ,  $\nu_e$  a corrente carica, se il leptone prodotto nel vertice primario non viene identificato.

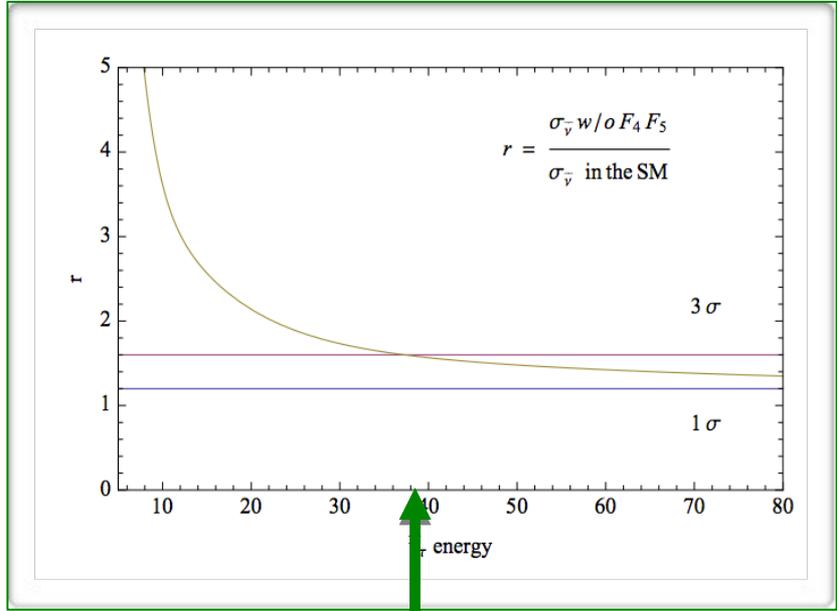
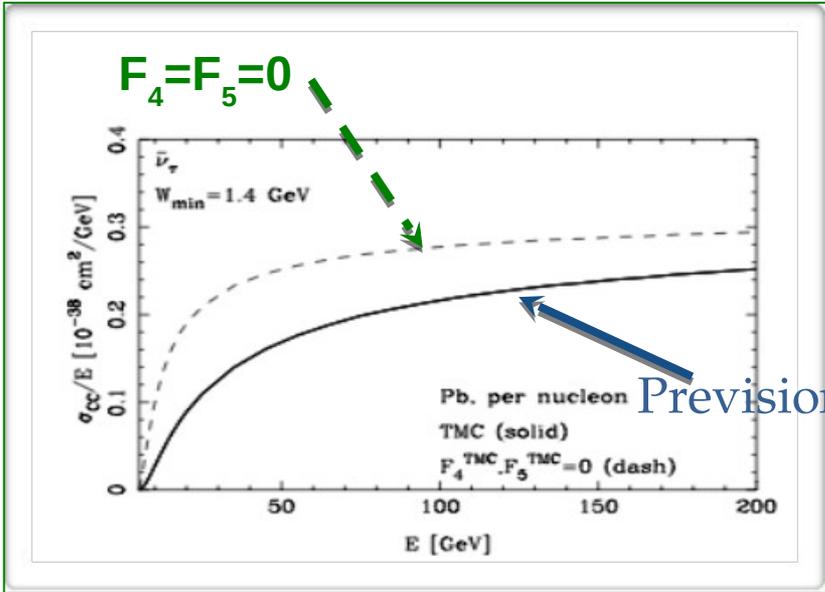
La soppressione del fondo di particelle con charm puo' essere migliorata con tagli cinematici.



# Funzioni di struttura

Prima misura delle funzioni di struttura  $F_4$  ed  $F_5$ , non accessibili con altri neutrini.

$$\frac{d^2\sigma^{\nu(\bar{\nu})}}{dxdy} = \frac{G_F^2 M E_\nu}{\pi(1 + Q^2/M_W^2)^2} \left( (y^2x + \frac{m_\tau^2 y}{2E_\nu M}) F_1 + \left[ (1 - \frac{m_\tau^2}{4E_\nu^2}) - (1 + \frac{Mx}{2E_\nu}) \right] F_2 \right. \\ \left. \pm \left[ xy(1 - \frac{y}{2}) - \frac{m_\tau^2 y}{4E_\nu M} \right] F_3 + \frac{m_\tau^2(m_\tau^2 + Q^2)}{4E_\nu^2 M^2 x} F_4 - \frac{m_\tau^2}{E_\nu M} F_5 \right),$$



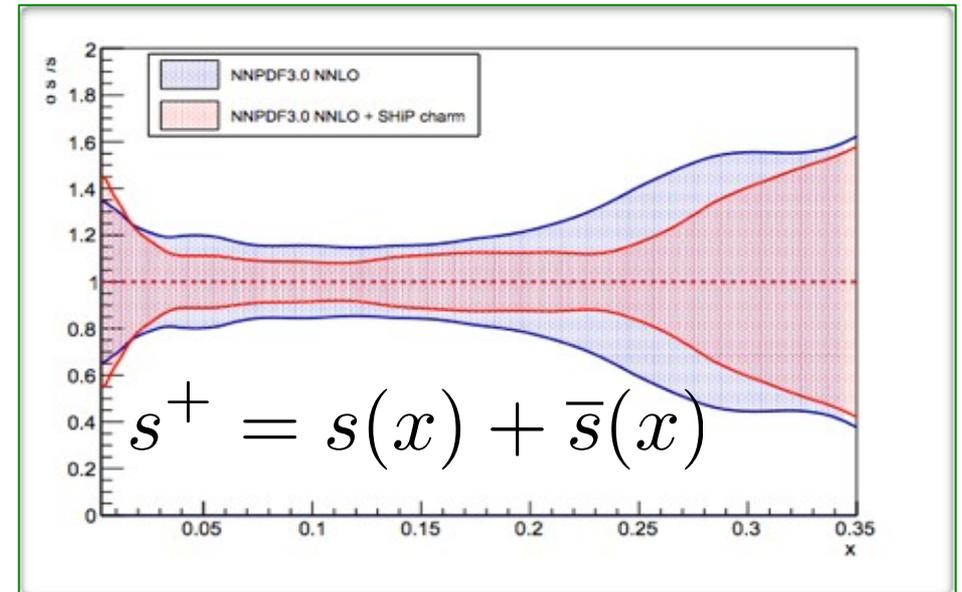
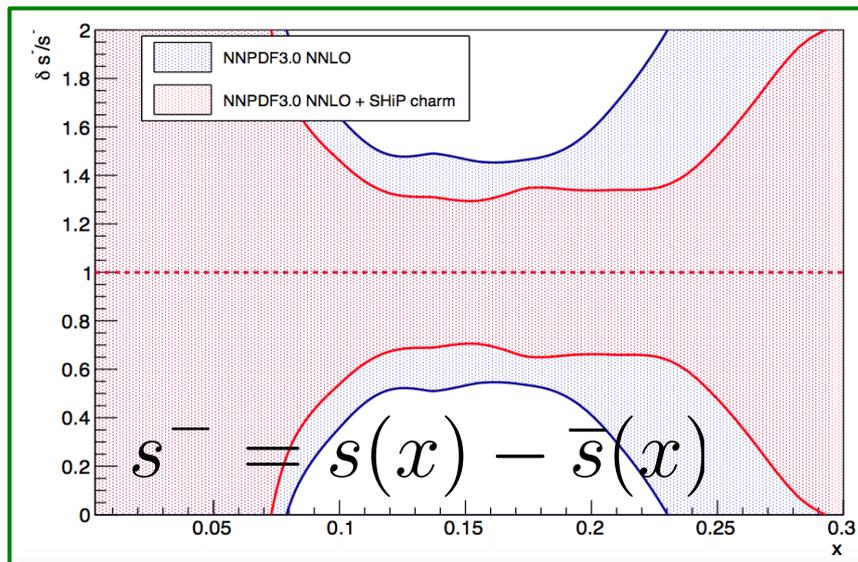
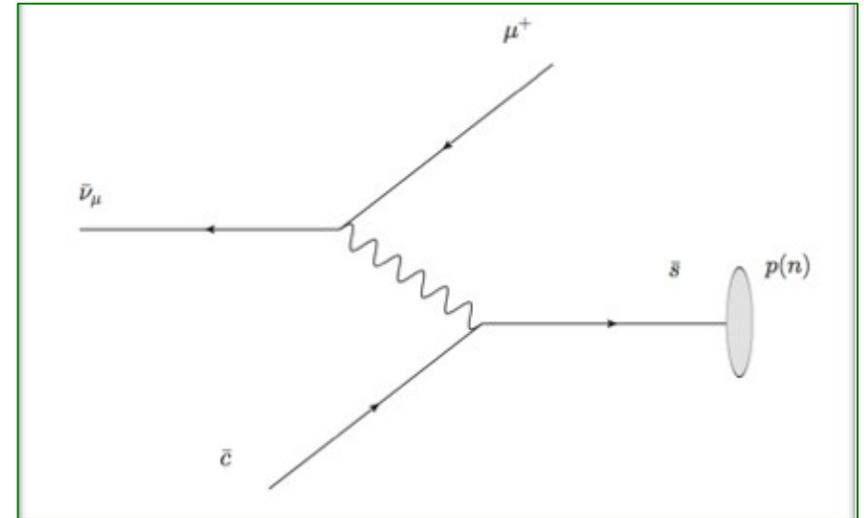
Al prim'ordine,  $F_4=0$ ,  $2 \cdot F_5 = F_2$ .  
All'ordine successivo,  $F_4 \sim 1\%$  a 10 GeV

# Produzione di Charm

$2 \cdot 10^6$  interazioni di  $\nu_\mu$  a Corrente Carica.

$10^5$  interazioni di neutrini con produzione di particelle con charm (un ordine di grandezza in piu' rispetto ai precedenti).

La produzione di charm nelle interazioni degli anti-neutrini seleziona anti-quark s nei nucleoni del bersaglio.



Miglioramento significativo per  $0.03 < x < 0.35$ .

# Valutazioni dell'SPSC

“ .....  
*The SPSC supports the motivation for the search for hidden particles, which will explore a domain of interest for many open questions in particle physics and cosmology, and acknowledges the interest of the measurements foreseen in the neutrino sector. SHiP could therefore constitute a key part of the CERN Fixed Target programme in the HL-LHC era. The SPSC supports the updated SHiP schedule, which takes into account the HL-LHC preparation constraints during LS2, and defers any significant civil engineering investments for SHiP to the period following full approval of SHiP. The SPSC notes that, in this updated schedule, the time scale for the SHiP comprehensive design study, required for a final decision, coincides with the expected revision of the EU HEP strategy. The Committee also notes the plans of the incoming CERN Management to set up a working group to prepare the future of the CERN Fixed Target programme after LS2, as input to the next EU strategy update. In this context the SPSC recommends that the SHiP proponents proceed with the preparation of a Comprehensive Design Report (CDR) , and that this preparation be made in close contact with the planned Fixed Target working group.*

”

**Siamo in attesa di indicazioni da parte del Research Board e del management del CERN su come procedere (novita' attese a breve).**

# Conclusioni

**SHiP e' un esperimento a bersaglio fisso proposto per l'SPS al CERN.**

**E' progettato per essere complementare a LHC, ricercando nuove particelle debolmente interagenti con masse o(GeV).**

**E' anche un'occasione unica per studiare la fisica dei  $\nu_\tau$  (misura delle sezioni d'urto) e delle funzioni di struttura dei nucleoni ( $F_4$ ,  $F_5$ , stranezza).**

**Technical e Physics proposal sottomessi in Aprile 2015.**

**Raccomandazioni dell'SPSC: produrre un "Comprehensive Design Report" nel triennio 2016-2018.**