



PROGETTO SHiP AL CERN

Antonia Di Crescenzo
INFN Napoli

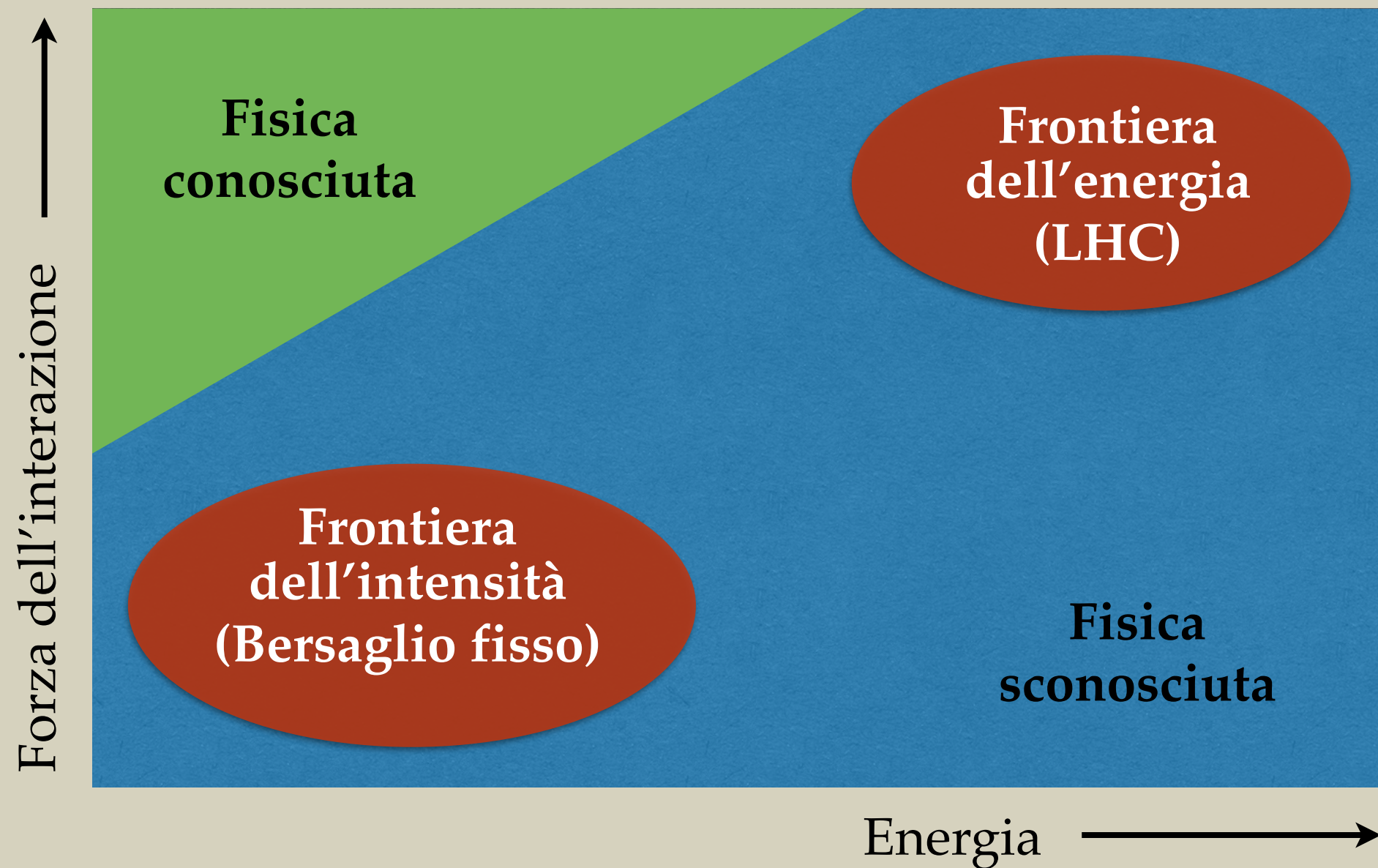
IFAE
8-10 Aprile 2015

INTRODUZIONE

- ▶ Il Modello Standard delle particelle elementari ha fornito una descrizione consistente dei costituenti della Natura e delle sue leggi fondamentali
- ▶ Predizioni confermate da numerosi esperimenti
- ▶ La scoperta del bosone di Higgs con una massa di circa 126 GeV fa sì che il Modello Standard possa essere una teoria effettiva fino alla scala di Plank
- ▶ Il MS non è una teoria completa: manca la spiegazione di fenomeni sperimentalmente osservati “Oltre il Modello Standard”
 - ▶ **Massa dei neutrini ed oscillazioni:** quale meccanismo genera le masse dei neutrini? See-saw? Con quali accoppiamenti di Yukawa che forniscano masse così piccole?
 - ▶ **Asimmetria barionica dell'Universo (BAU):** quale meccanismo ha creato l'asimmetria materia-antimateria nell'Universo?
 - ▶ **Materia oscura:** qual è la forma principale di materia dell'Universo?

INTRODUZIONE

- E' necessario ipotizzare l'esistenza di nuove particelle non ancora osservate. Dove cercarle?



La **Frontiera dell'Intensità** rende accessibile il **Settore Nascosto**

SETTORE NASCOSTO

- ▶ Il Settore Nascosto può essere accessibile in esperimenti alla frontiera dell'intensità attraverso particelle leggere che si accoppiano con il MS attraverso "portali" rinormalizzabili



- ▶ **SHiP**: nuovo esperimento alla frontiera dell'intensità in grado di esplorare regioni di parametri interessanti per numerosi modelli "Oltre il MS" che descrivono i portali
- ▶ Studi di fisica del ν_τ

AMPIO PROGRAMMA DI FISICA

CERN-SPSC-2015-017
(SPSC-P_350-ADD-1)

<http://cds.cern.ch/record/2007686>

A facility to search for hidden particles (SHiP) at the
SPS: the physics case

Contents

60 teorici
200 pagine

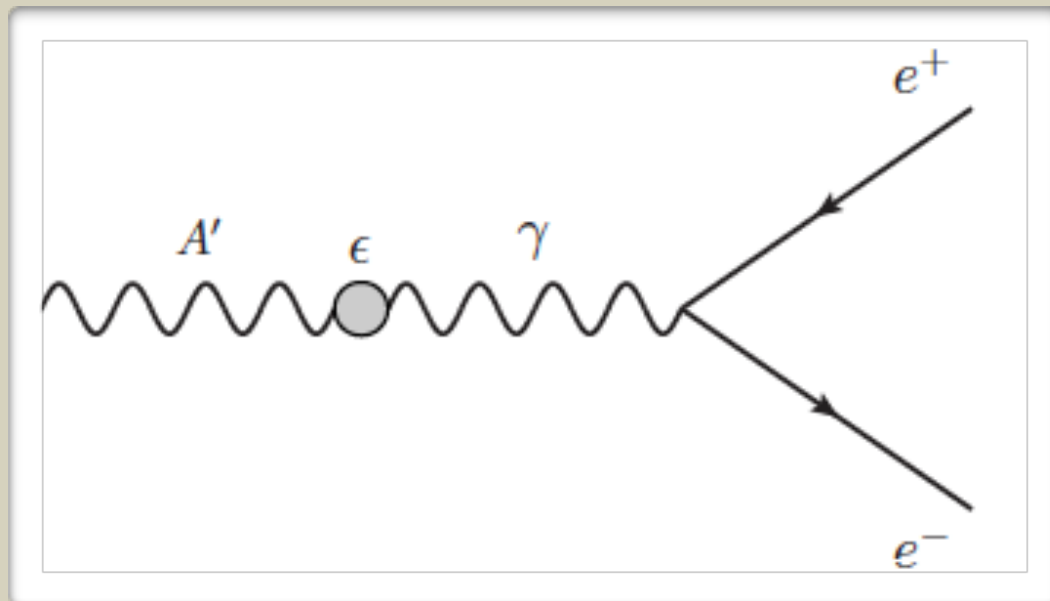
- 1 Introduction
- 2 Vector portal
 - 2.1 Classification of vector portals
 - 2.1.1 Kinetic mixing
 - 2.1.2 Anomaly-free gauge groups ($B - L$, $L_u - L_\tau$ etc)
- 3 Scalar portal
 - 3.1 The scalar sector of the Standard Model and Beyond
 - 3.1.1 Scalar portal effective Lagrangian
 - 3.1.2 Hidden valleys
 - 3.1.3 Light scalars in supersymmetry
 - 3.2 Linear scalar portals: Higgs-scalar mixing
- 4 Neutrino portal
 - 4.1 Heavy neutral leptons
 - 4.2 Active neutrino phenomenology
 - 4.2.1 Three-flavour neutrino oscillations. A theoretical overview
 - 4.2.2 Present experimental status of neutrino masses and mixings
 - 4.2.3 Short-Baseline neutrino anomalies
 - 4.2.4 Future neutrino experiments
- 5 ALPs (and other PNGBs) at SHiP
 - 5.1 ALPs and why they are interesting
 - 5.1.1 ALP origins
 - 5.1.2 Connection to Dark Matter
 - 5.2 Interactions, phenomenological features and existing limits
 - 5.3 ALPs coupled to two gauge bosons
- 6 SUSY
 - 6.1 Introduction
 - 6.2 A Very Light Supersymmetric Neutralino and R-Parity Violation
 - 6.2.1 Motivation for a very light neutralino
 - 6.2.2 R-parity Violation
 - 6.2.3 Finding Neutralinos at SHiP via R-Parity violation
- 7 Tau neutrino physics
 - 7.1 Physics case
 - 7.1.1 Tau neutrino physics
 - 7.1.2 Deep inelastic muon and electron neutrino scatteri
 - 7.1.3 Electron neutrino cross section at high energy
 - 7.1.4 Tau neutrino magnetic moment
- 8 Searches of lepton flavour violating processes $\tau \rightarrow 3\mu$
 - 8.1 Motivation as a null-test of the standard model
 - 8.2 $\tau \rightarrow 3\mu$ in seesaw scenarios
 - 8.3 Supersymmetric models

PORTALE VETTORIALE

(Dim: GeV^2)

Fotone massivo oscuro (dark, hidden, para-)

- ▶ Permette connessione tra Materia Oscura e MS
- ▶ Possibile soluzione all'anomalia $g-2$ del muone



L'interazione avviene attraverso lo scambio di un propagatore mescolato γ - A'

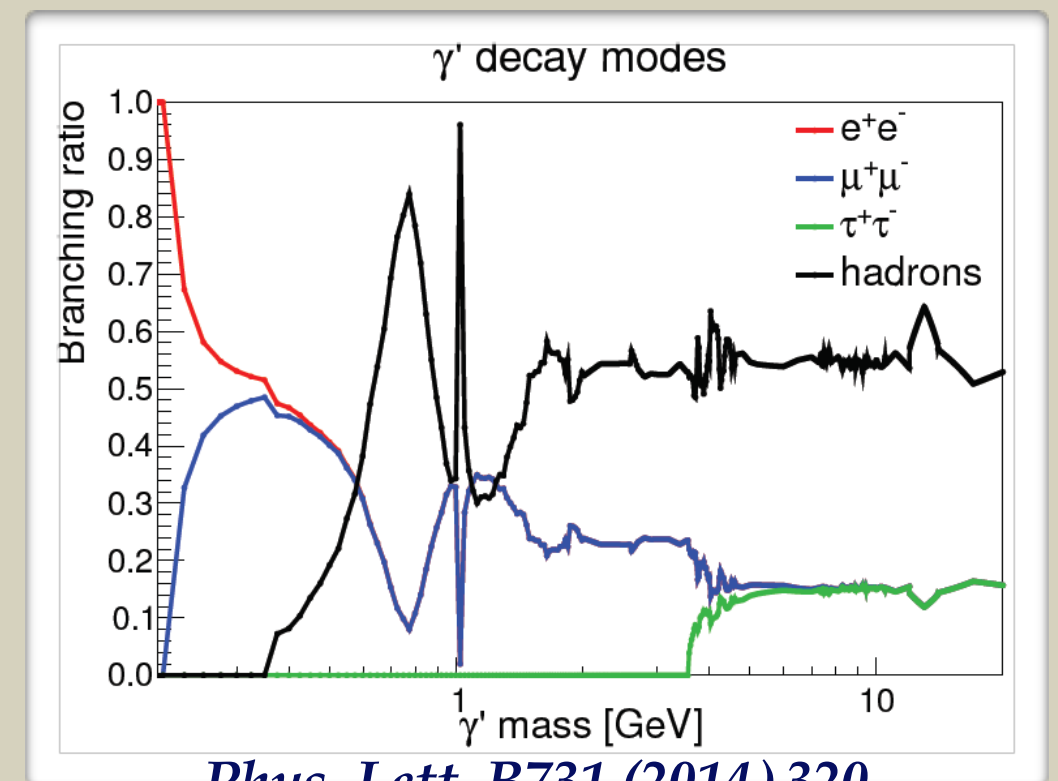
ϵ : angolo di mescolamento

Produzione di fotone oscuro all'SPS:

- ▶ Bremsstrahlung di protone
- ▶ Decadimenti di mesoni pseudo-scalari
- ▶ Produzione QCD

Decadimenti di fotoni oscuri:

- ▶ e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $q\bar{q}$



Phys. Lett. B731 (2014) 320

PORTALE DELL'HIGGS

Singoletto scalare leggero

(Dim: GeV^2)

- Si accoppia con l'Higgs dello SM con matrice di mescolamento

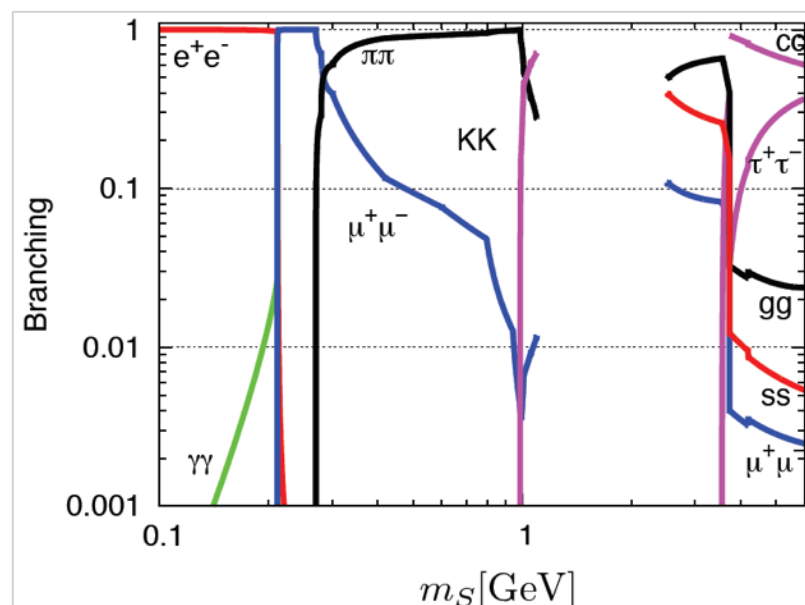
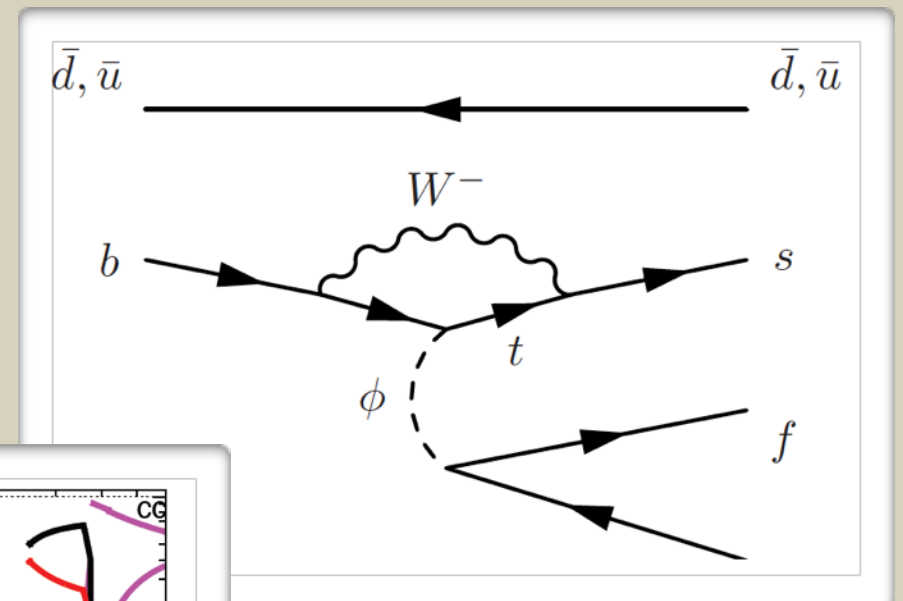
$$\begin{pmatrix} H \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \rho & -\sin \rho \\ \sin \rho & \cos \rho \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi'_0 \\ S' \end{pmatrix}$$

ρ angolo di mescolamento

- Possibile interpretazione come inflatone (Berzukov et al. JHEP05 (2010) 010)

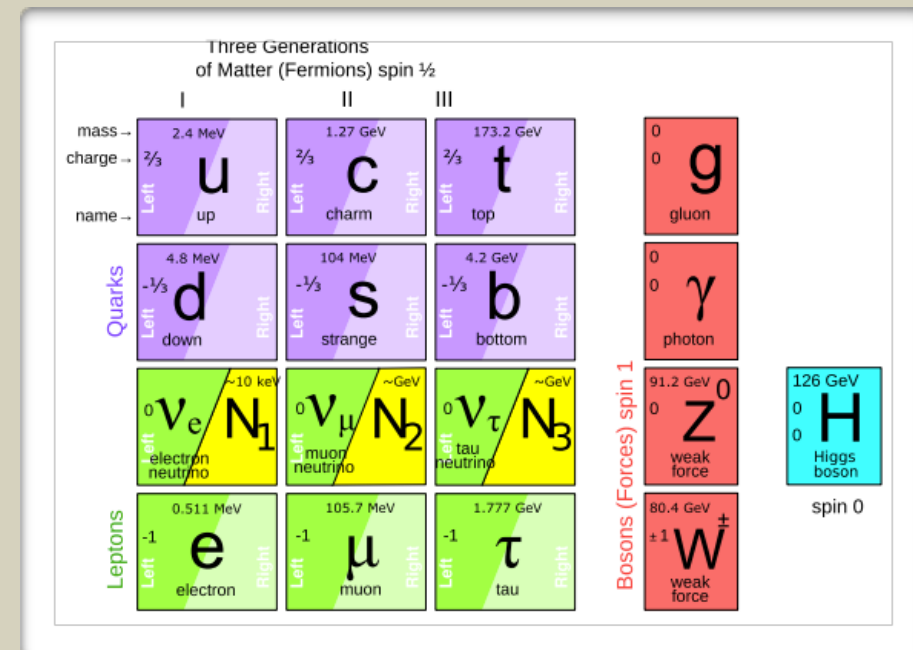
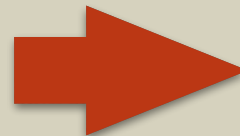
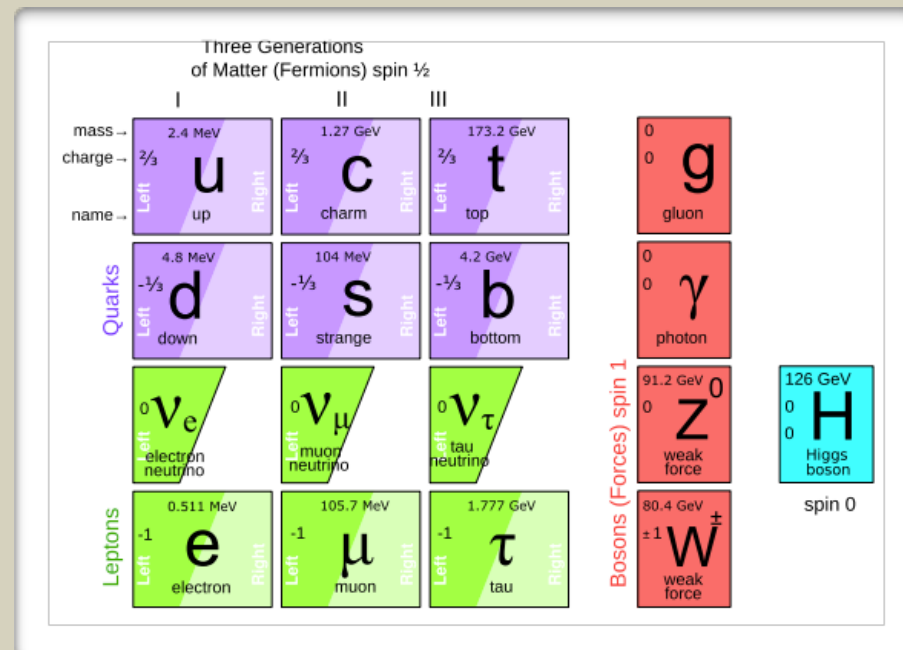
Meccanismo principale di produzione

- Decadimento raro del mesone B mediato dallo scalare leggero ϕ
- Vita media $\tau \propto \sin^{-2} \rho$



PORTALE DEL NEUTRINO

- **vMSM: v-Modello Standard Minimale** (Dim: $\text{GeV}^{5/2}$)
 Aggiunta di 3 Leptoni Neutri Pesanti di Majorana destrorsi



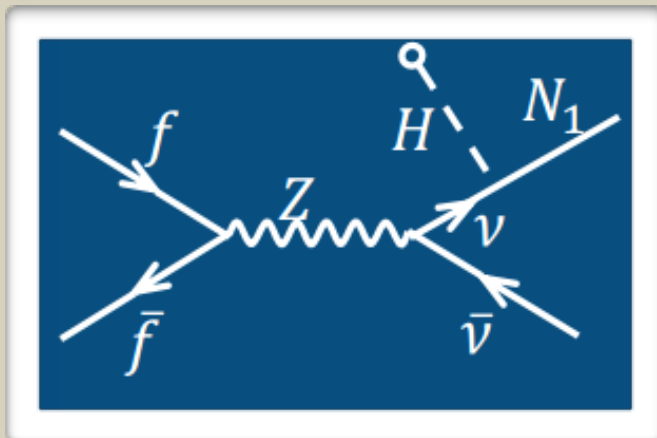
- **N₁** : candidato di Materia Oscura
- **N_{2,3}** : danno massa ai neutrini attraverso il meccanismo see-saw producono asimmetria barionica dell'Universo

T.Asaka, M.Shaposhnikov PL B620 (2005) 17
M.Shaposhnikov Nucl. Phys. B763 (2007) 49

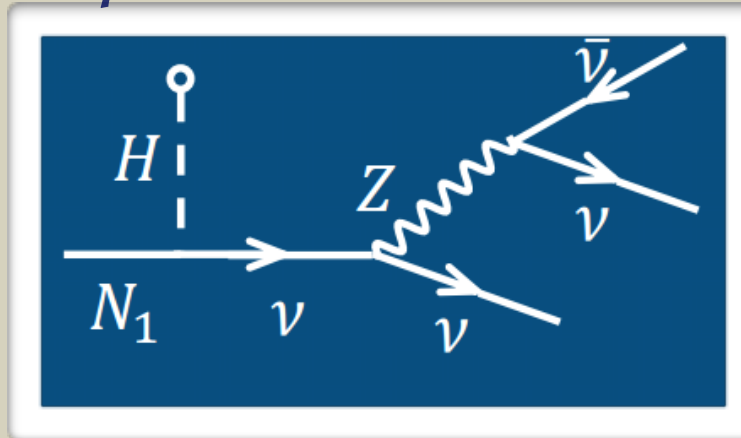
N_1 : CANDIDATO DI MATERIA OSCURA

- ▶ Debole mescolamento con altri leptoni
- ▶ Massa(N_1) ~ 10 keV
- ▶ Sufficientemente stabile per essere candidato di Materia Oscura
- ▶ Principali modi di decadimento:

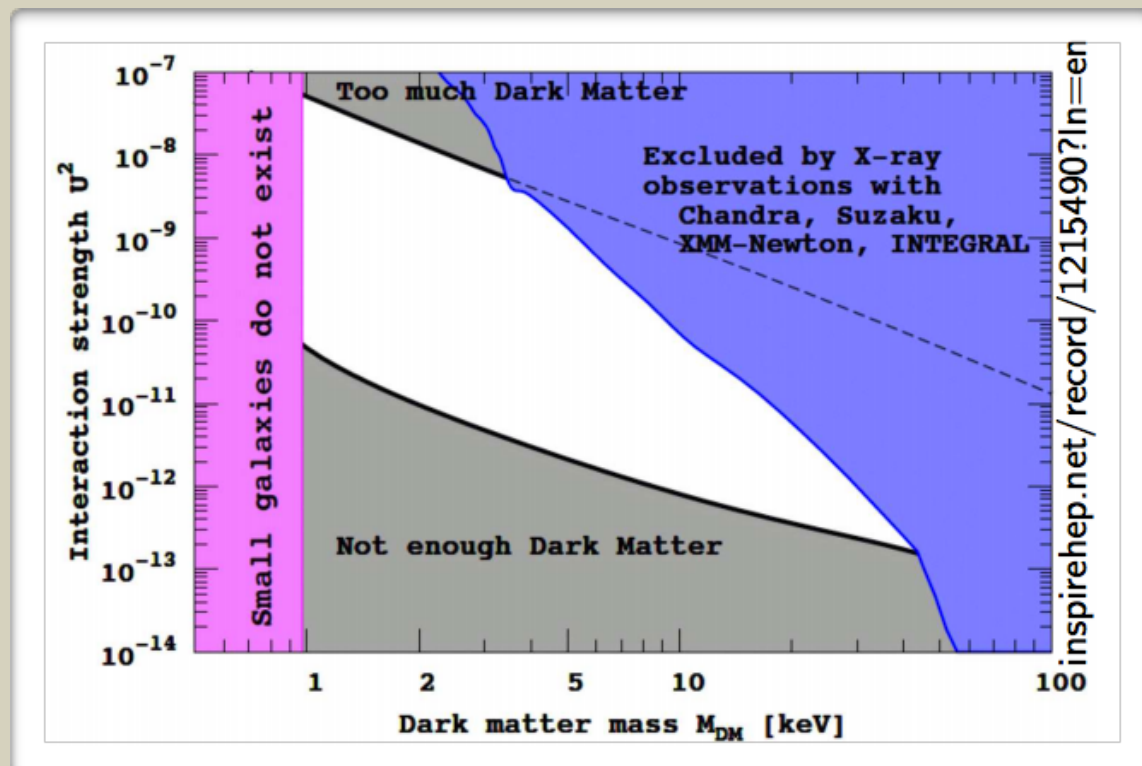
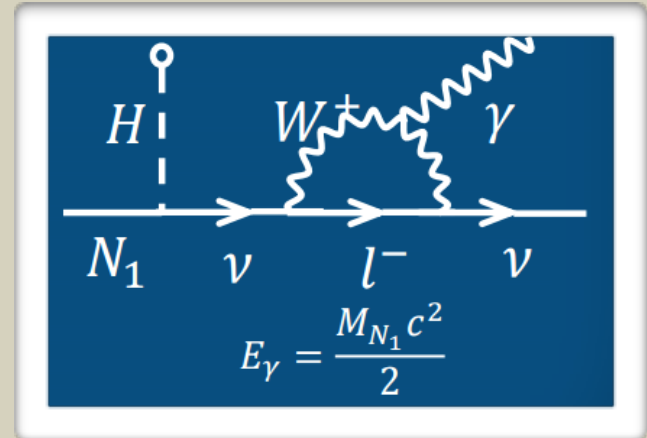
mescolamento ν -N



processo dominante



*decadimento radiativo
sottodominante*



INDIZI GALATTICI

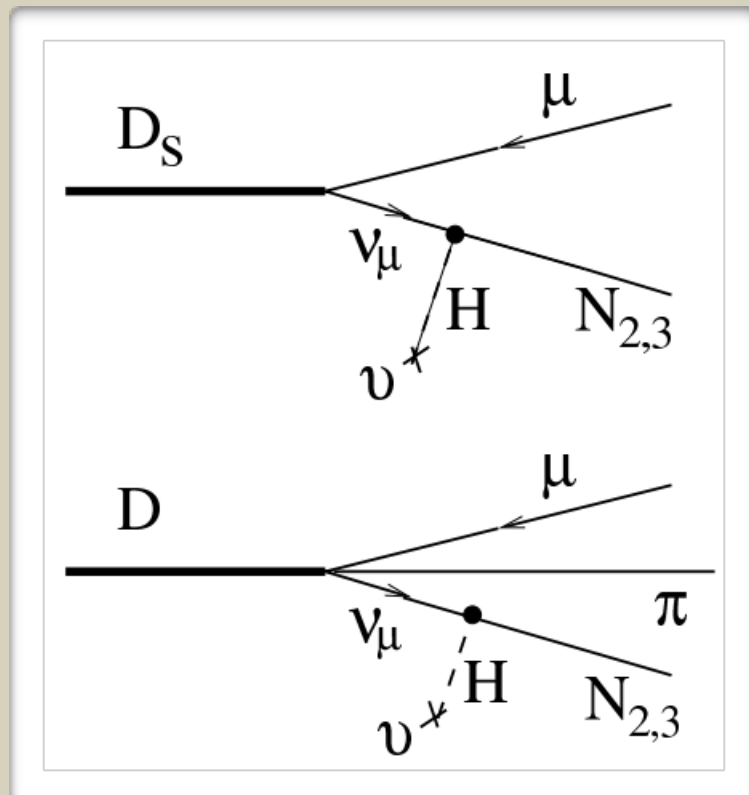
- ▶ *Astrphys. J.* 789 (2014) 13,
Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 251301:
- ▶ Linea non identificata nello spettro di raggi-X delle galassie Andromeda e Perseus a $E_\gamma \sim 3.5$ keV

$N_{2,3}$ PRODUZIONE E DECADIMENTO

- ▶ $\text{Massa}(N_2) \sim \text{Massa}(N_3) \sim \text{pochi GeV}$
- ▶ Mescolamento con il neutrino molto debole
 - Vita media molto lunga rispetto particelle di SM $> 10 \mu\text{s}$
 - Lunghezza di volo $\sim \text{Km}$

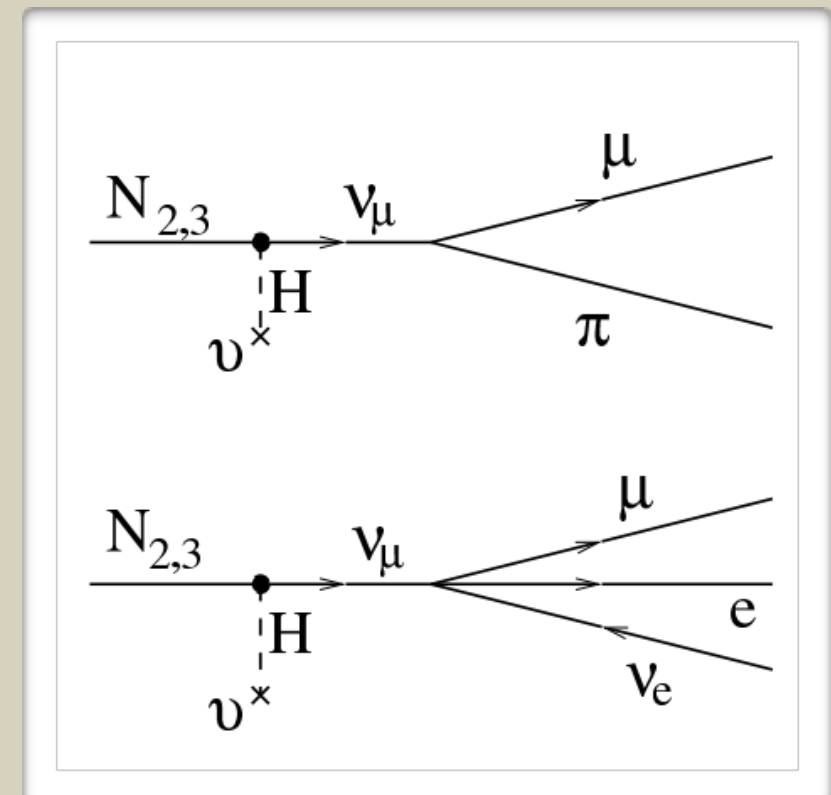
PRODUZIONE

- ▶ Mescolamento con neutrino attivo
- ▶ Prodotto in decadimenti semi-leptonici



DECADIMENTO

- ▶ $\text{Br}(N \rightarrow \mu / e \pi) \sim 0.1 - 50 \%$
- ▶ $\text{Br}(N \rightarrow \mu / e \rho) \sim 0.5 - 20\%$
- ▶ $\text{Br}(N \rightarrow \nu \mu e) \sim 1 - 10\%$



PROPOSTA DI ESPERIMENTO

EUROPEAN ORGANIZATION FOR NUCLEAR RESEARCH (CERN)



<http://cds.cern.ch/record/2007686>

CERN-SPSC-2015-016
SPSC-P-350
8 April 2015

Technical Proposal

A Facility to Search for Hidden Particles (SHiP) at the CERN SPS

The SHiP Collaboration¹

234 autori
44 istituti
13 nazioni

Abstract

A new general purpose fixed target facility is proposed at the CERN SPS accelerator which is aimed at exploring the domain of hidden particles and make measurements with tau neutrinos. Hidden particles are predicted by a large number of models beyond the Standard Model. The high intensity

PROGETTO DELLA LINEA DI FASCIO

- Proposal accompagnato da documenti redatti dalla Divisione Acceleratori del CERN che descrivono il progetto della linea di fascio

List of support documents

Annex 1: An experiment to Search for Hidden Particles (SHiP) at the SPS North Area

EDMS: <https://edms.cern.ch/document/1369559> (SHiP-TP-2015-A1)

Annex 2: The SPS beam parameters, the operational cycle, and proton sharing with the SHiP facility

EDMS: <https://edms.cern.ch/document/1498984> (SHiP-TP-2015-A2)

Annex 3: Extraction and beam transfer for the SHiP facility

EDMS: <https://edms.cern.ch/document/1495859> (SHiP-TP-2015-A3)

Annex 4: Design of the SHiP target and target complex

EDMS: <https://edms.cern.ch/document/1465053> (SHiP-TP-2015-A4)

Annex 5: Radiation protection studies for the SHiP facility

EDMS: <https://edms.cern.ch/document/CERN-RP-2015-020-REPORTS-TN> (SHiP-TP-2015-A5)

Annex 6: Civil engineering for the SHiP facility

EDMS: <https://edms.cern.ch/document/1499253> (SHiP-TP-2015-A6)

RICHIESTE SPERIMENTALI

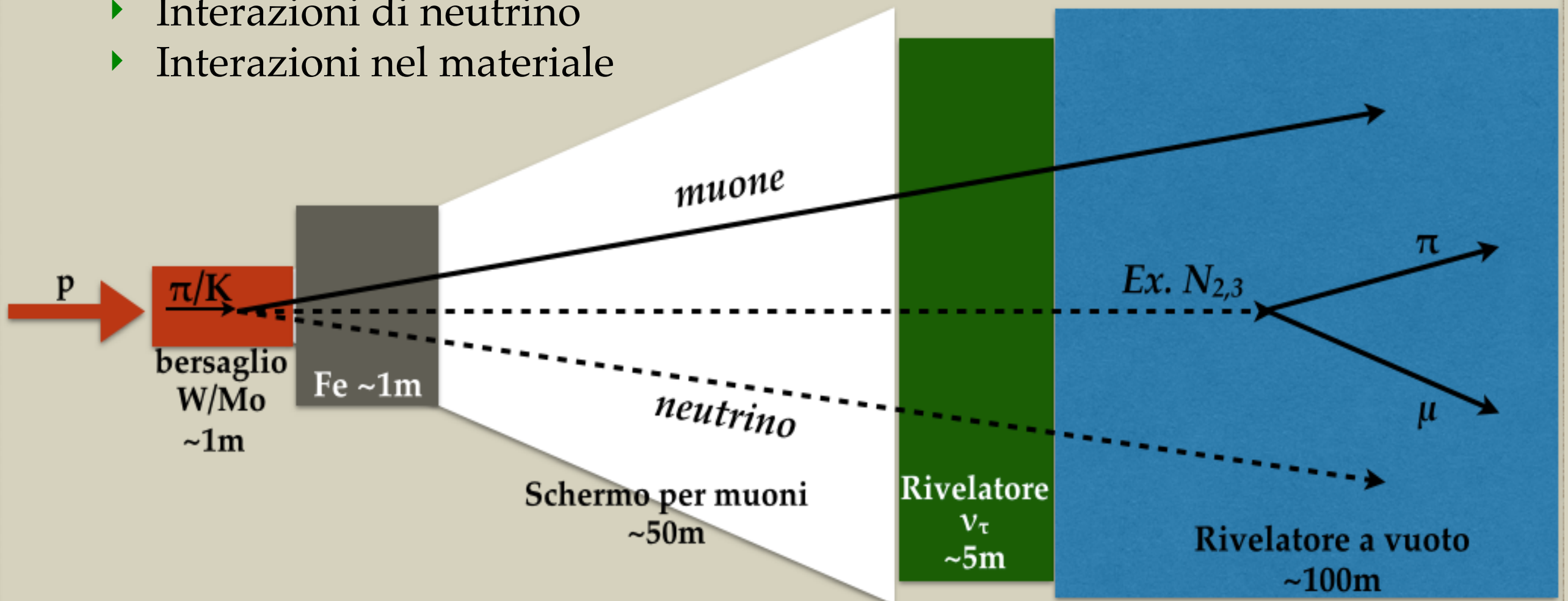
- ▶ Proposta: esperimento a bersaglio fisso all'SPS del CERN
- ▶ SPS: 4×10^{13} protoni per spill @ 400 GeV $\rightarrow$ 2×10^{20} pot in 5 anni (analogo a CNGS)

1) REIEZIONE DEL FONDO

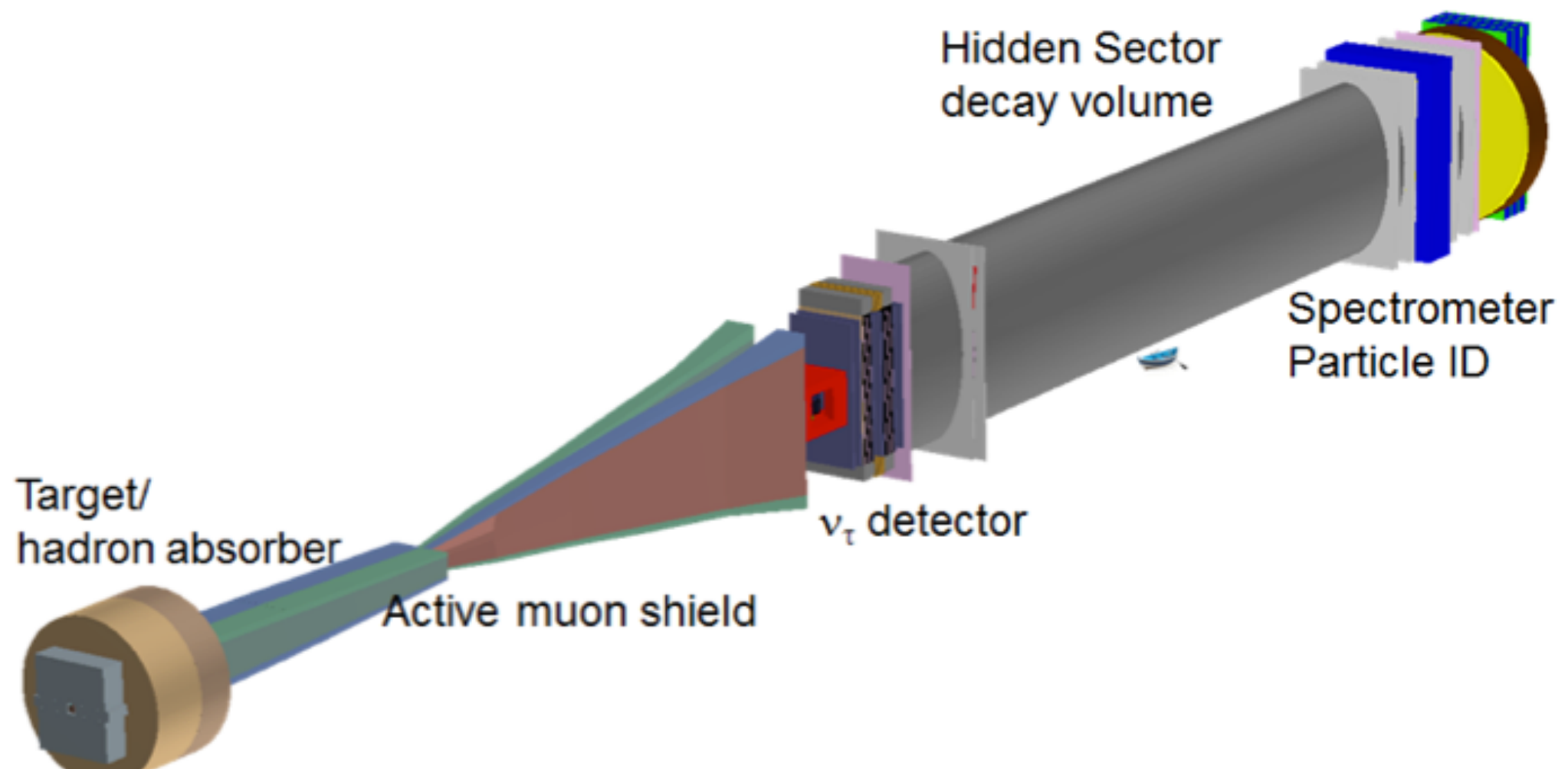
- ▶ Fondo combinatorio
- ▶ Flusso di neutrini
- ▶ Flusso di muoni
- ▶ Interazioni di neutrino
- ▶ Interazioni nel materiale

2) MASSIMA SENSIBILITA'

- ▶ Accettanza geometrica
- ▶ Ricostruzione dei decadimenti
- ▶ Elevata sensibilità



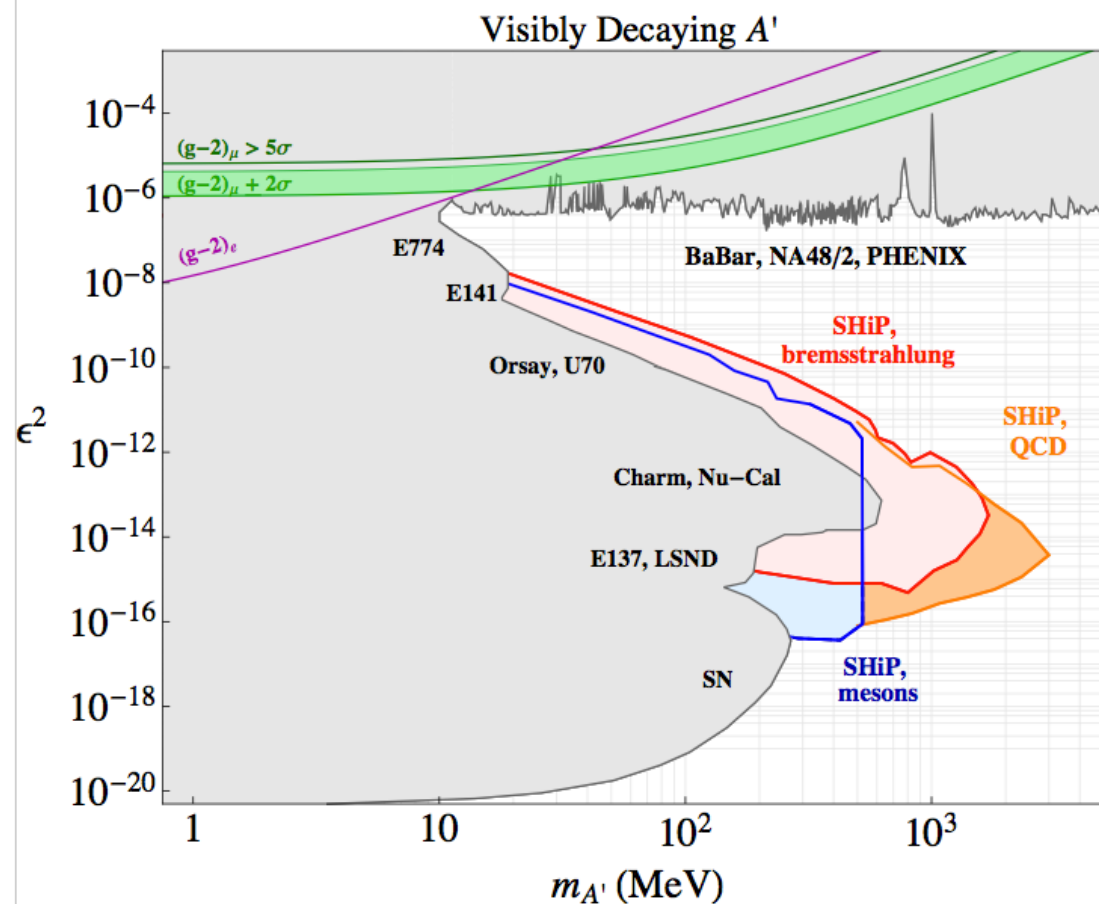
SETUP SPERIMENTALE



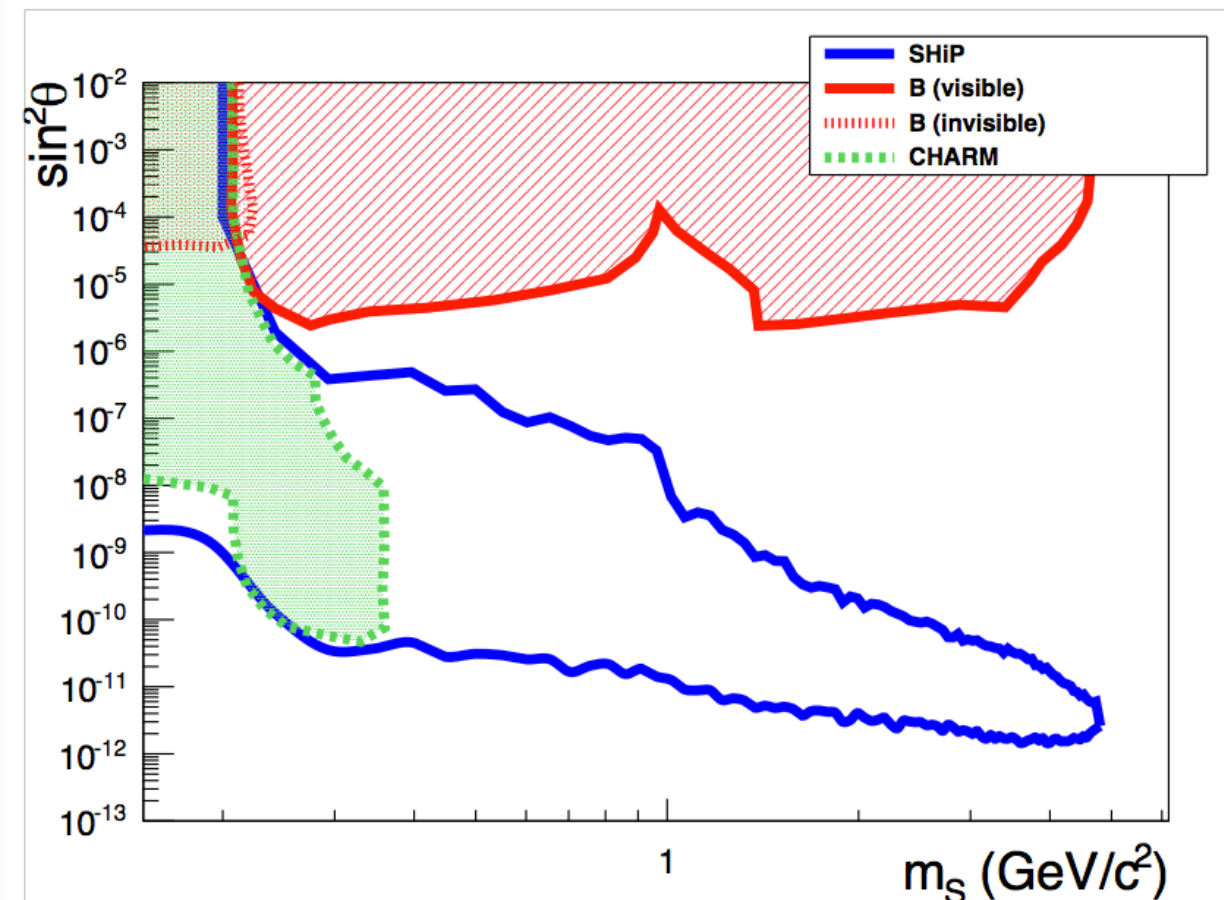
SENSIBILITA'

PORTALE VETTORIALE

- Sensibilità basata su 2×10^{20} pot @400 GeV in 5 anni



PORTALE SCALARE

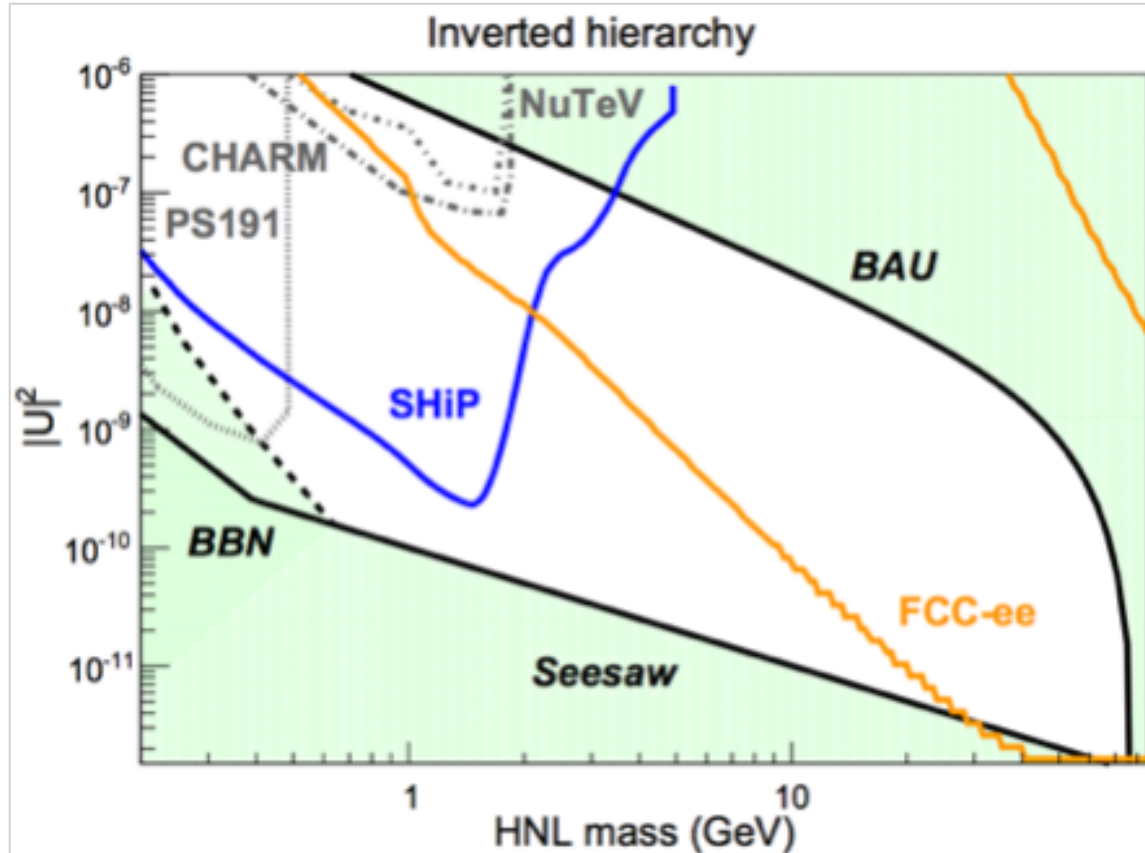


Canali considerati: e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, $\pi^+\pi^-$, K^+K^-

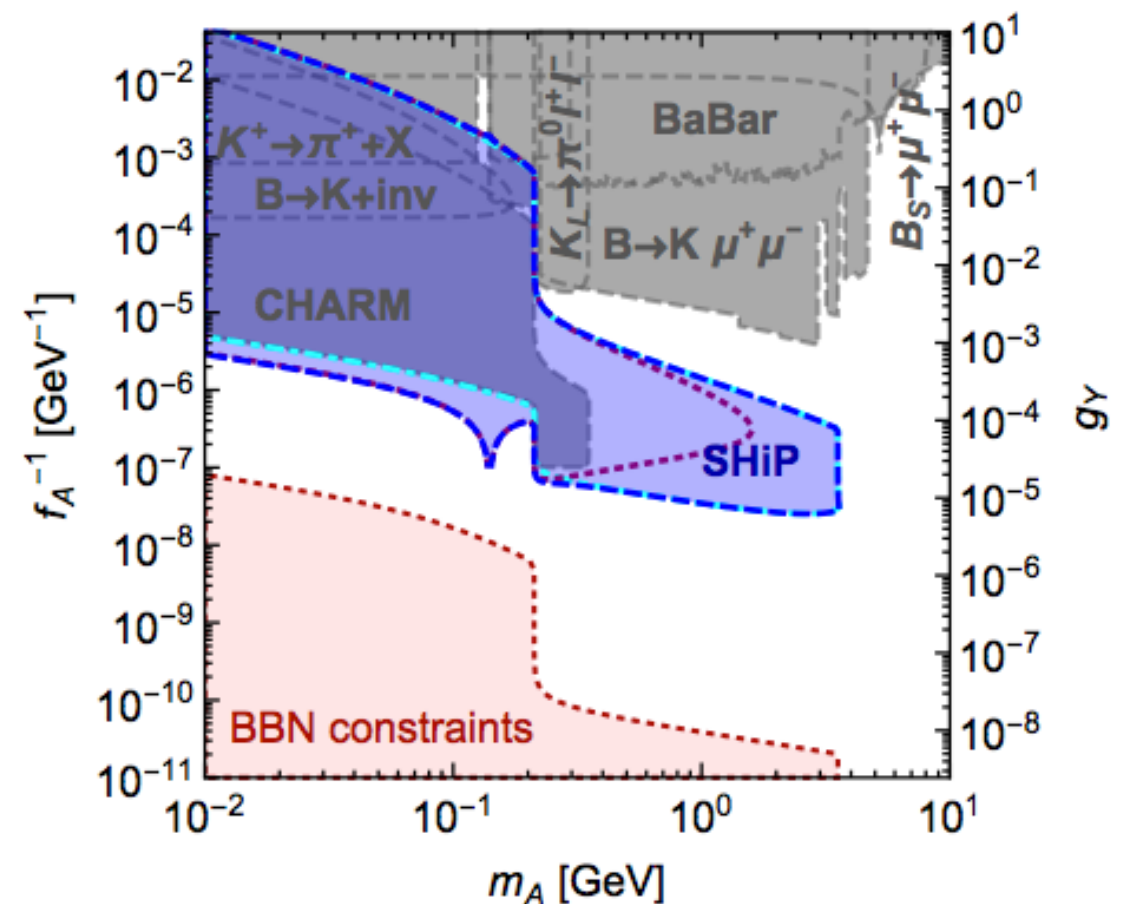
SENSIBILITA'

PORTALE DEL NEUTRINO

- Sensibilità basata su 2×10^{20} pot @400 GeV in 5 anni



PORTALE DELL'ASSIONE



RICERCA DIRETTA DI SUPERSIMMETRIA

- **Neutralini supersimmetrici leggeri** $\longrightarrow$ **che violano R-parità** (*hep-ph/0106199*)

$B/D \rightarrow X\chi_0$, $\chi_0 \rightarrow \mu^+\mu^-\nu$; $\chi_0 \rightarrow K\nu$; K^+e^-

Particelle SUSY leggere con violazione di R-parità

$\tau < 0.1$ s

- **Sgoldstini supersimmetrici leggeri** (*hep-ph/000735*)

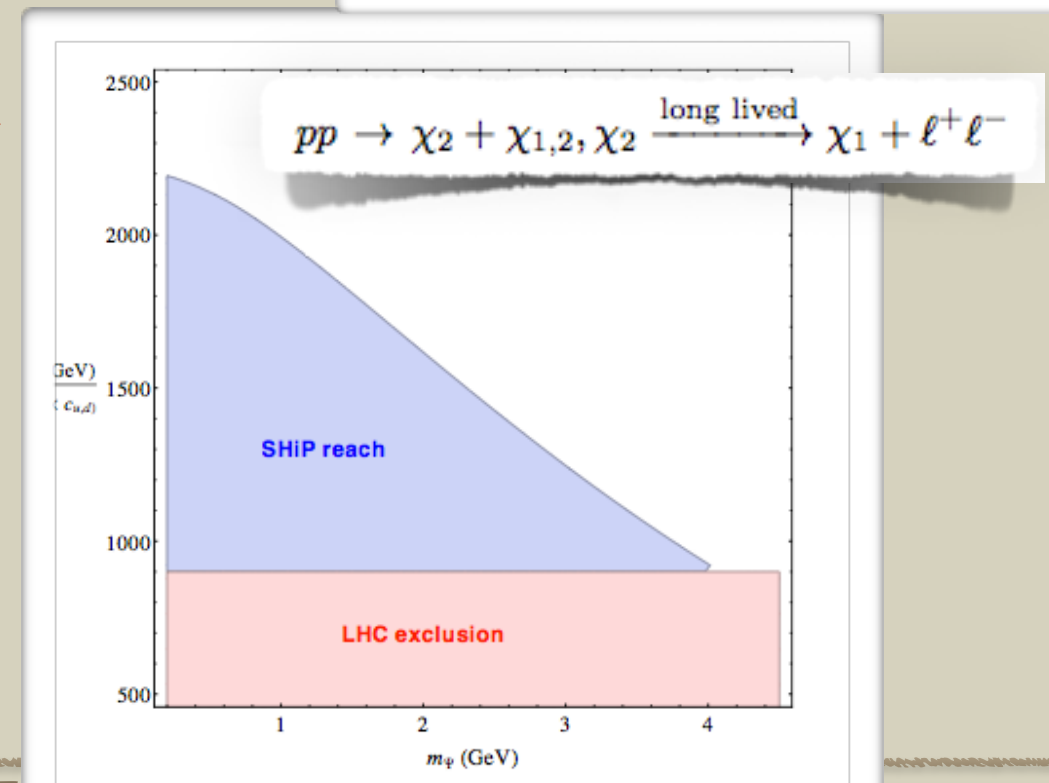
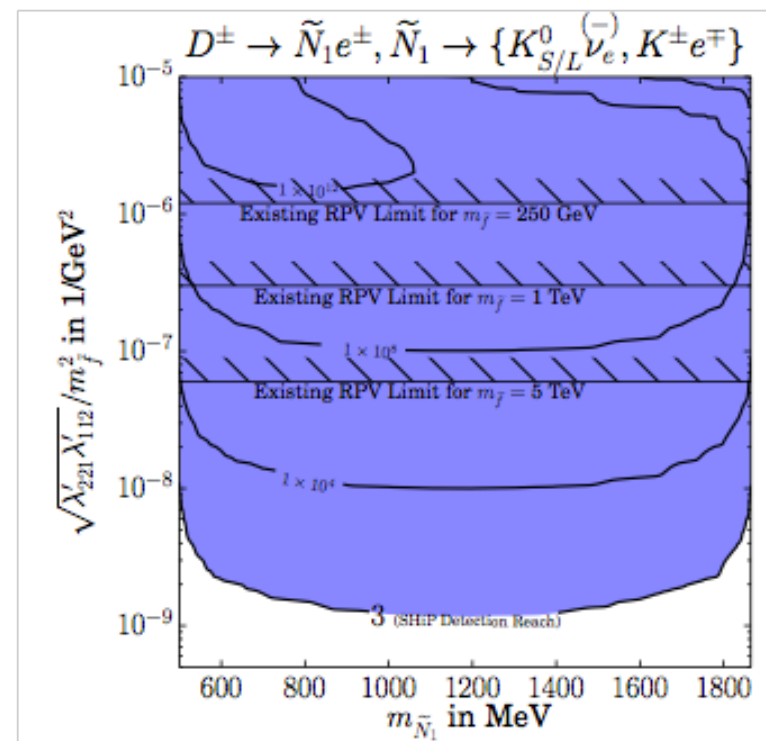
Produzione e decadimento simili ai leptoni neutri pesanti

- **Gaugini leggeri pseudo-Dirac** $\longrightarrow$

Previsti in teorie SUSY con R-simmetria U(1)

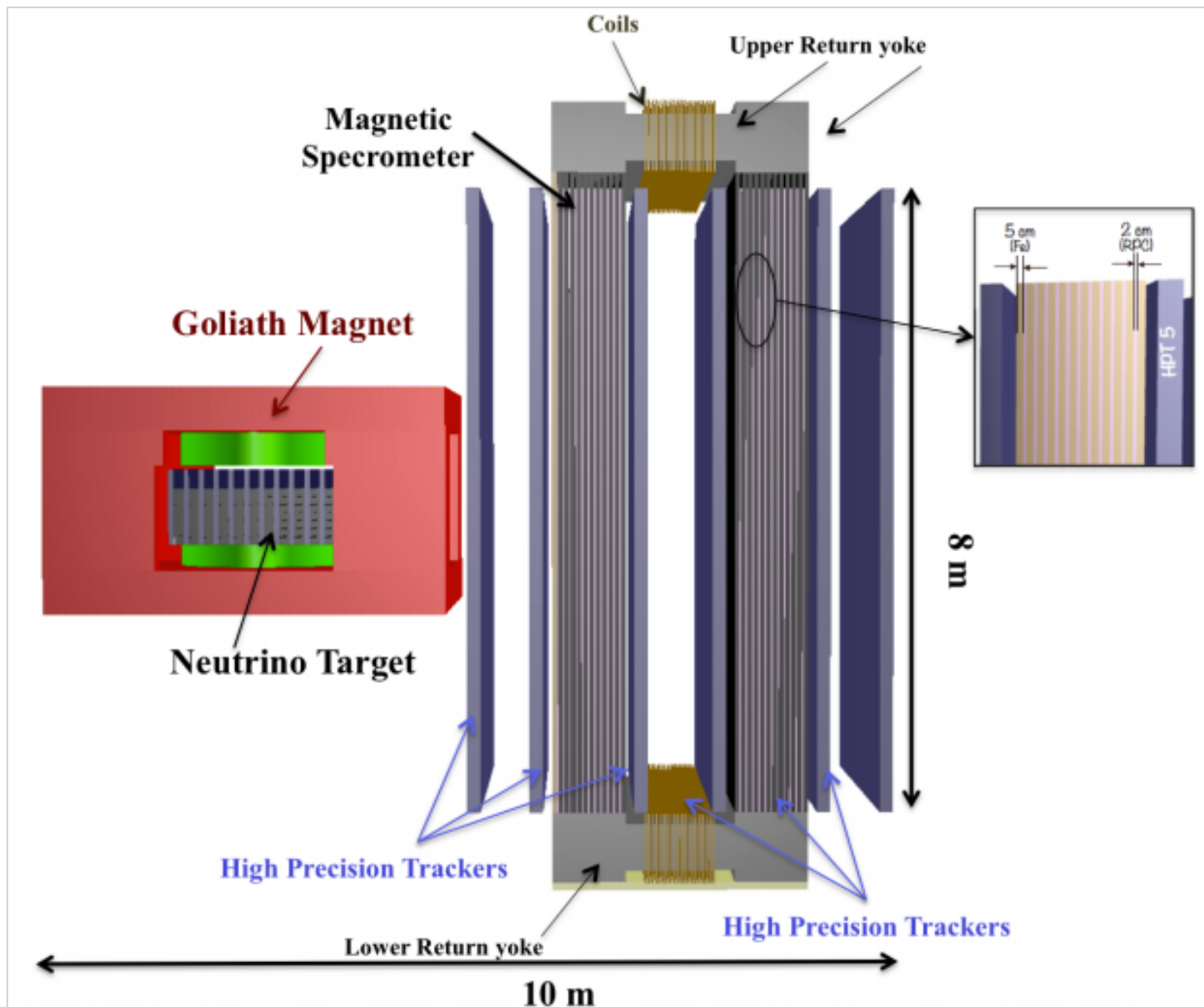
- **Portale Chern-Simons**

Nuovo bosone vettoriale accoppiato con il bosone del MS con interazioni di tipo Chern-Simons



RIVELATORE DI NEUTRINI

- ▶ Attese in SHiP circa 7000 interazioni di ν_τ e 3000 di anti- ν_τ in rivelatore di ~10 ton

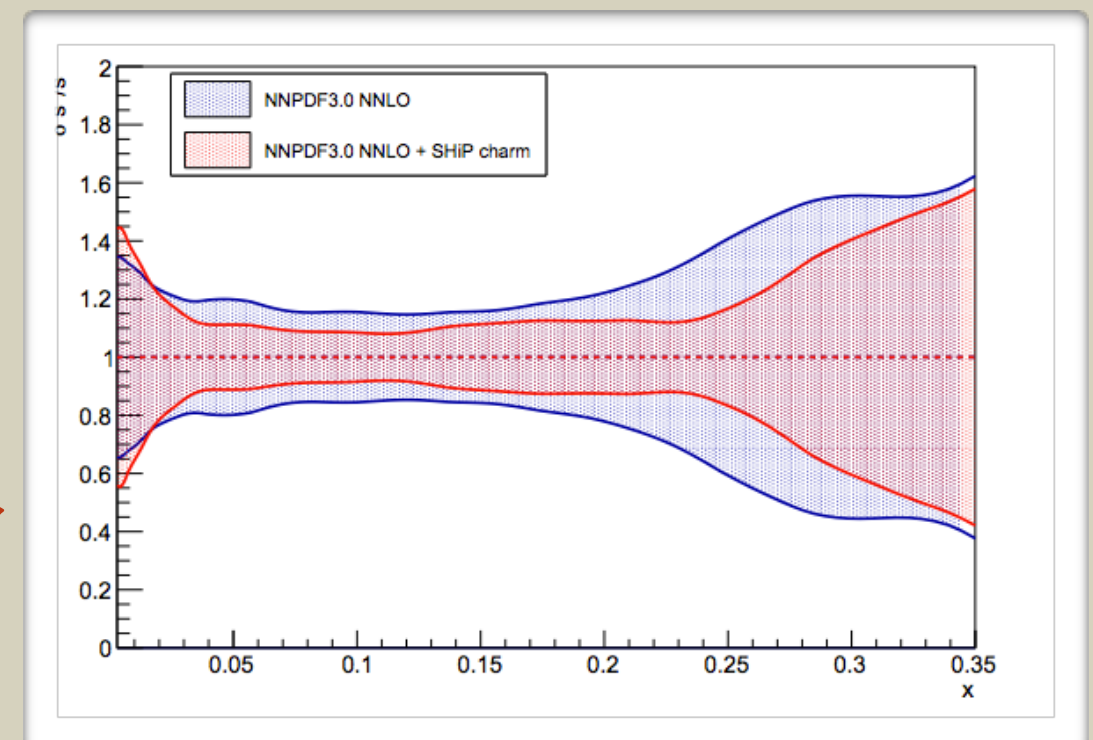
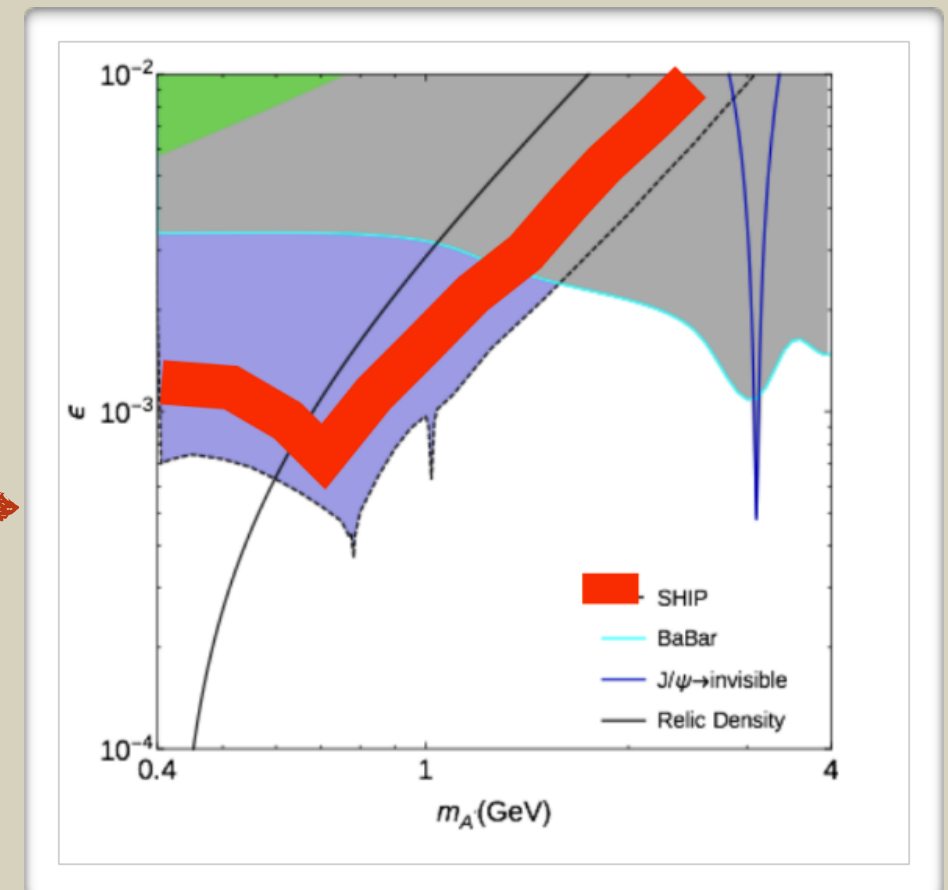


- ▶ Elevata risoluzione spaziale per osservare il decadimento del τ (~1 mm)
 - *EMULSIONI NUCLEARI*
- ▶ Rivelatori elettronici per informazioni temporali
 - *PIANI TRACCIANTI*
- ▶ Bersaglio magnetizzato per la misura della carica dei prodotti del τ
 - *MAGNETE DIPOLARE*
- ▶ Spettrometro magnetico per identificazione del muone e misura di quantità di moto
 - *SPETTOMETRO A MUONI*

SENSIBILITA'

RIVELATORE DI NEUTRINI

- ▶ **Prima** osservazione dell'**anti- ν_τ**
 - ▶ Studi di sezione d'urto di ν_τ e anti- ν_τ
 - ▶ Fisica del charm con statica elevata
 - ▶ Ricerca diretta di materia oscura
-
- ▶ Sensibilità alle funzioni di struttura F_4 ed F_5 , mai misurate prima perché trascurabili in interazioni di ν_μ e ν_e
 - ▶ Sensibilità al contenuto di quark s del nucleone

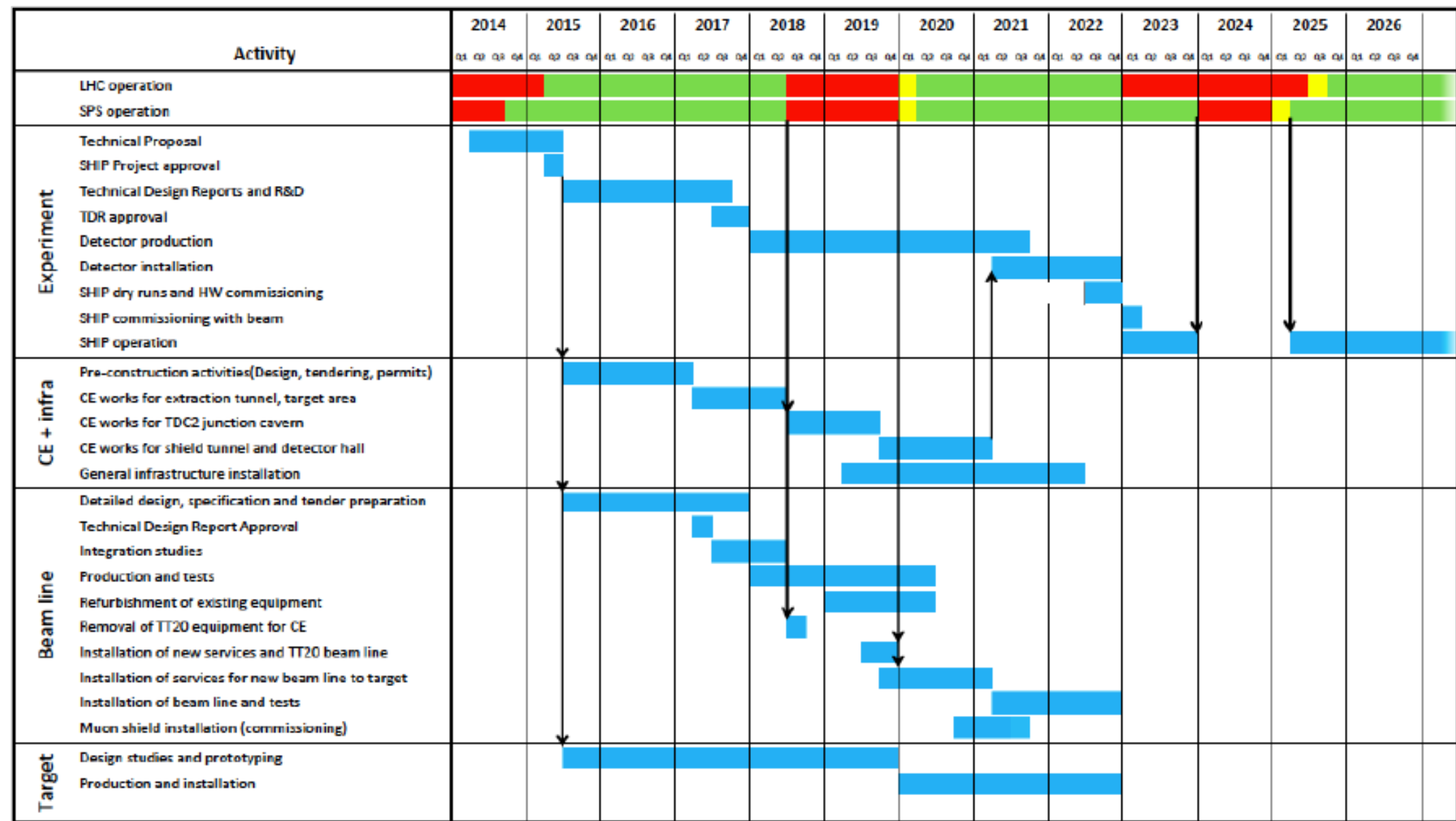


CONCLUSIONI

- ▶ L'esperimento SHiP è complementare alle ricerche condotte ad LHC
- ▶ Ricerca di Fisica **oltre il Modello Standard** alla frontiera dell'intensità
- ▶ Fisica del Modello Standard "garantita": scoperta dell'**anti- ν_τ** , fisica del ν_τ e altro ancora
- ▶ **Proposta** dell'esperimento sottomessa **ieri** all'SPSC
- ▶ Materiale di supporto redatto dalla Divisione Acceleratori del CERN
- ▶ Parallelamente sottomesso anche un articolo contenente il programma di Fisica completo

GRAZIE
PER L'ATTENZIONE

SCALA TEMPORALE

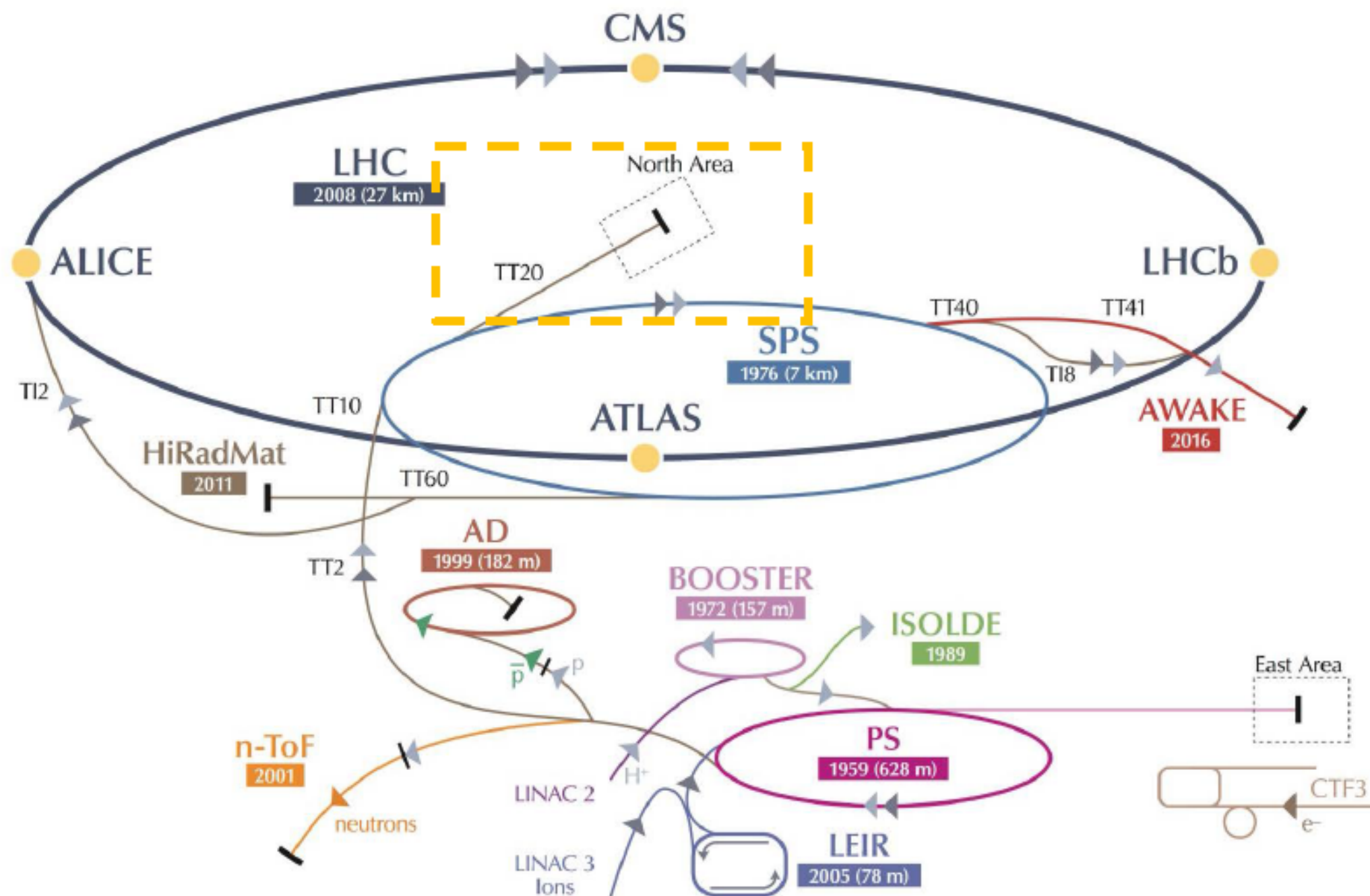


- **Formazione della Collaborazione SHiP** Dicembre 2014 ✓
- **Sottomissione del Technical Proposal** Aprile 2015 ✓
- Sottomissione del Technical Design Report 2018
- Costruzione e installazione 2018-2022
- Commissioning 2022
- Presa dati e analisi 2023-2027

ACCELERATORE

CERN Accelerator complex

proposed location by CERN beams and support department



PORTALE DELL'ASSIONE

(Dim: GeV⁴)

- ▶ Particelle pseudo-scalari (bosone pseudo-Nambu-Goldstone o assione)
- ▶ Nascono dalla rottura spontanea della simmetria ad alta scala di massa F
- ▶ Interazione proporzionale all'inverso di F
- ▶ Accoppiamento con particelle dello SM proporzionale as m_X/F

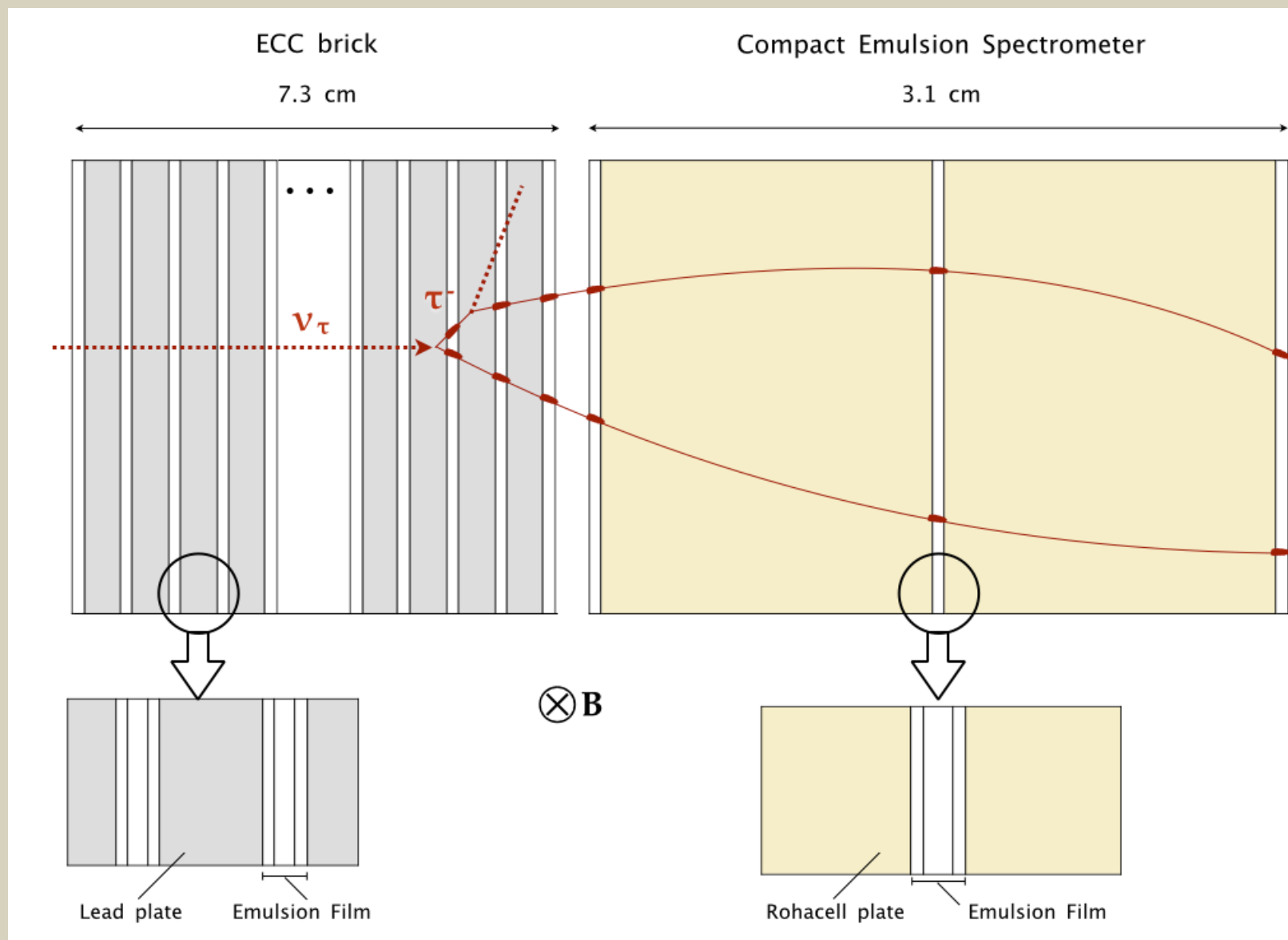
PRODUZIONE

- ▶ Indiretta: decadimento dei mesoni B
- ▶ Diretta: mescolamento con pione neutro

DECADIMENTO

- ▶ Canali: e^+e^- , $\mu^+\mu^-$, adroni oltre 1 GeV

FISICA DEL NEUTRINO



τ DECAY CHANNEL	BR (%)
$\tau \rightarrow \mu$	17.7
$\tau \rightarrow e$	17.8
$\tau \rightarrow h$	49.5
$\tau \rightarrow 3h$	15.0

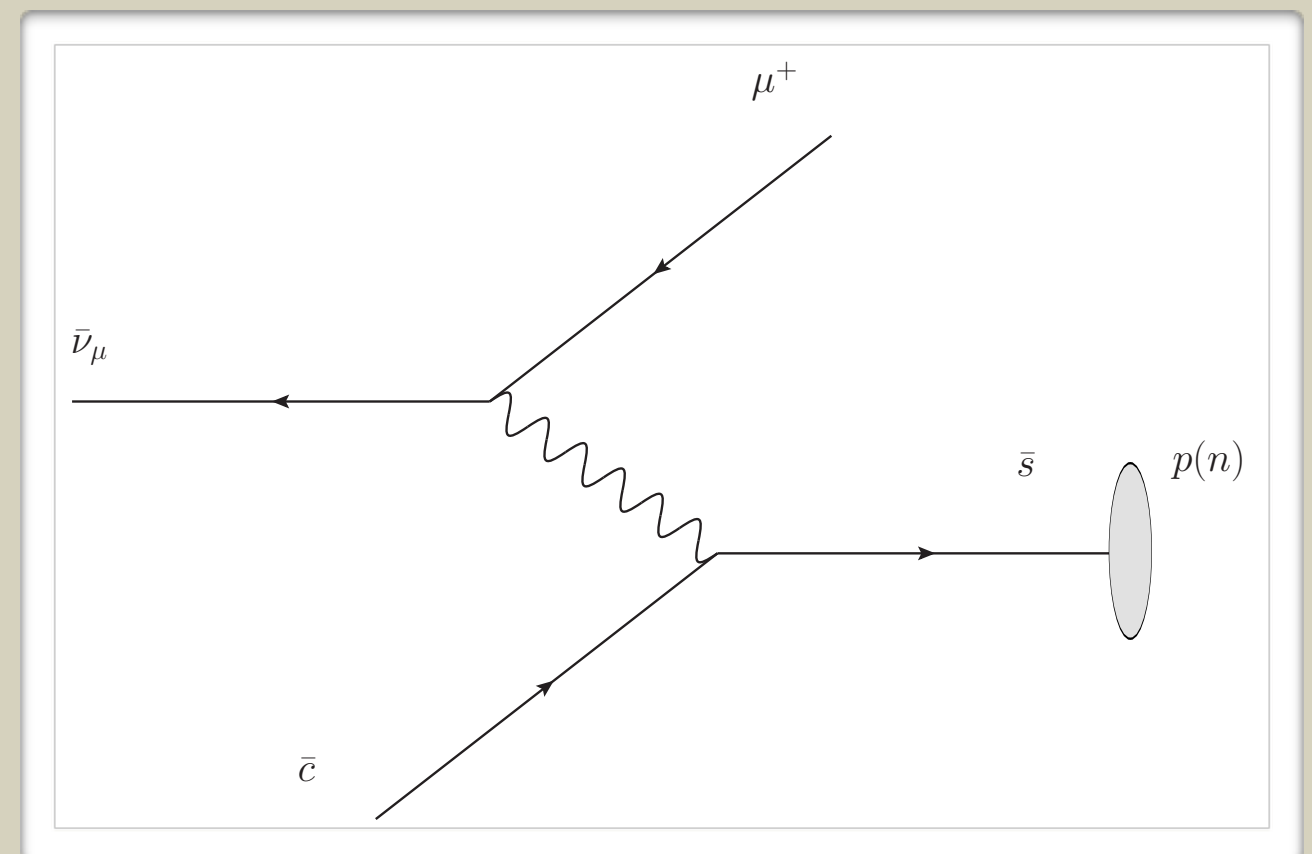
FISICA DEL NEUTRINO

Neutrino

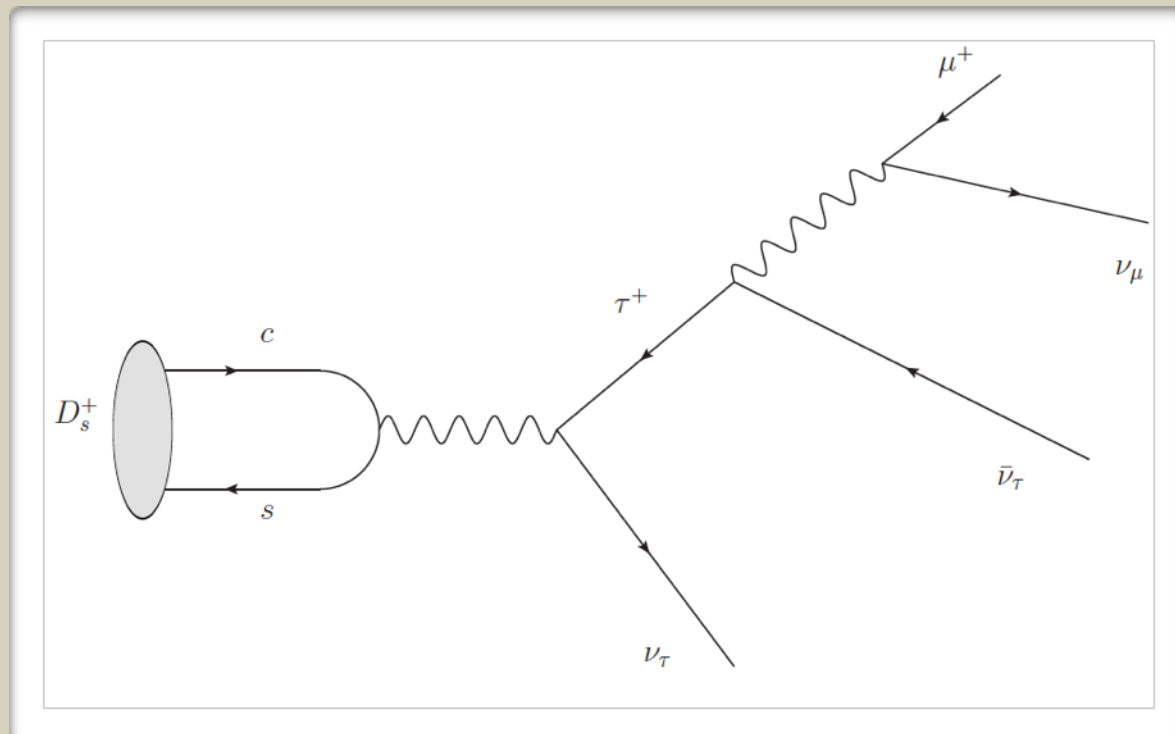
Anti-neutrino

$$\frac{d^2\sigma}{dx dy} = \frac{G_F^2 M_N E_\nu}{\pi} \left(\frac{M_W^2}{Q^2 + M_W^2} \right)^2 \left[\left(xy^2 + \frac{m_l^2 y}{2E_\nu M_N} \right) F_1 + \left(1 - y - \frac{M_N xy}{2E_\nu} - \frac{m_l^2}{4E_\nu^2} \right) F_2 \right. \\ \left. \pm \left(xy \left(1 - \frac{y}{2} \right) - \frac{m_l^2 y}{4E_\nu M_N} \right) F_3 + \frac{m_l^2 (m_l^2 + Q^2)}{4E_\nu^2 M_N^2 x} F_4 - \frac{m_l^2}{E_\nu M_N} F_5 \right]$$

- La produzione di adroni charmati in interazioni di anti-neutrino seleziona gli anti-quark strani contenuti nel nucleone
- La misura della massa del W dipende dalla conoscenza del contenuto di stranezza del protone



FISICA DEL NEUTRINO

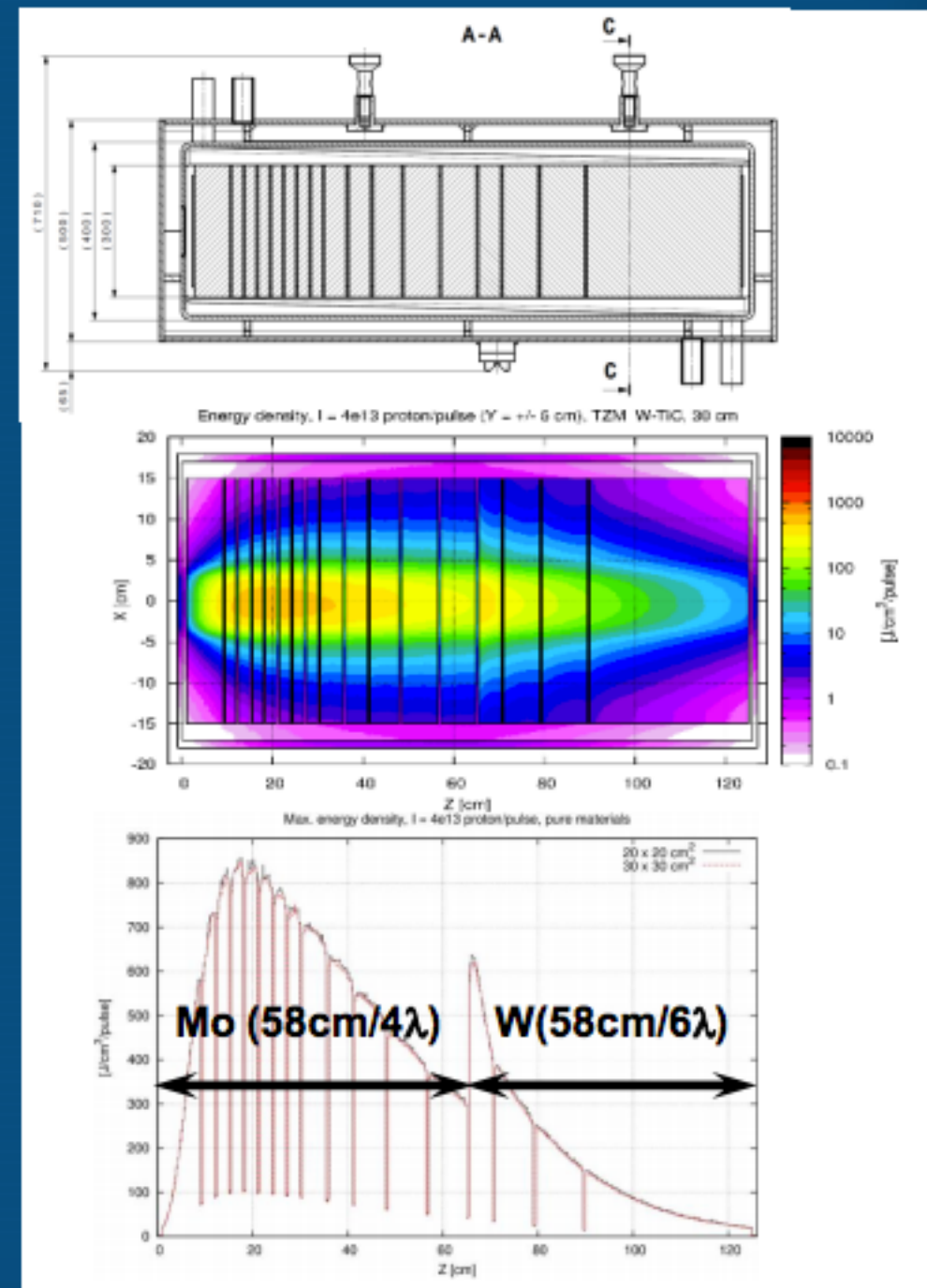
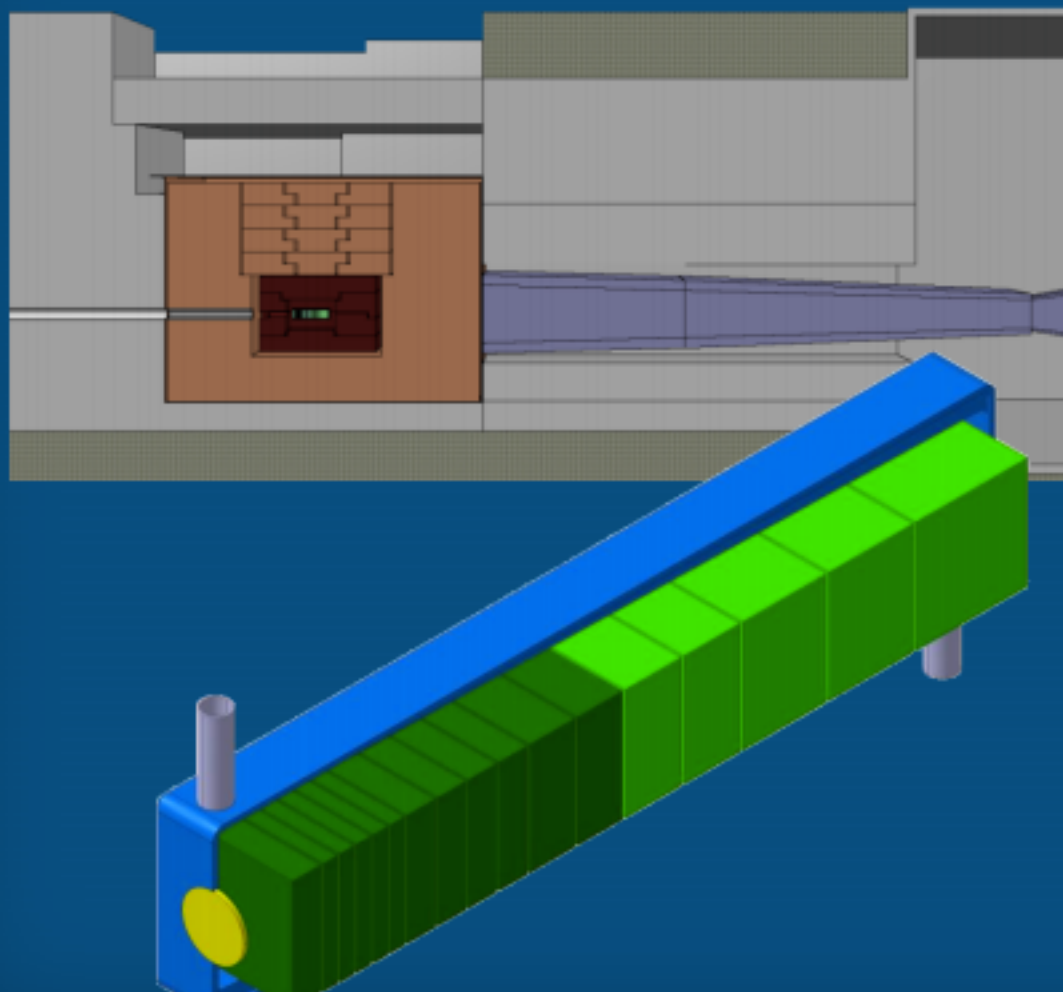


$$N_{\nu_\tau + \bar{\nu}_\tau} = N_p \frac{2\sigma_{c\bar{c}}}{\sigma_{pN}} f_{D_s} Br(D_s \rightarrow \tau) 2 = 2.85 \times 10^{-5} N_p$$

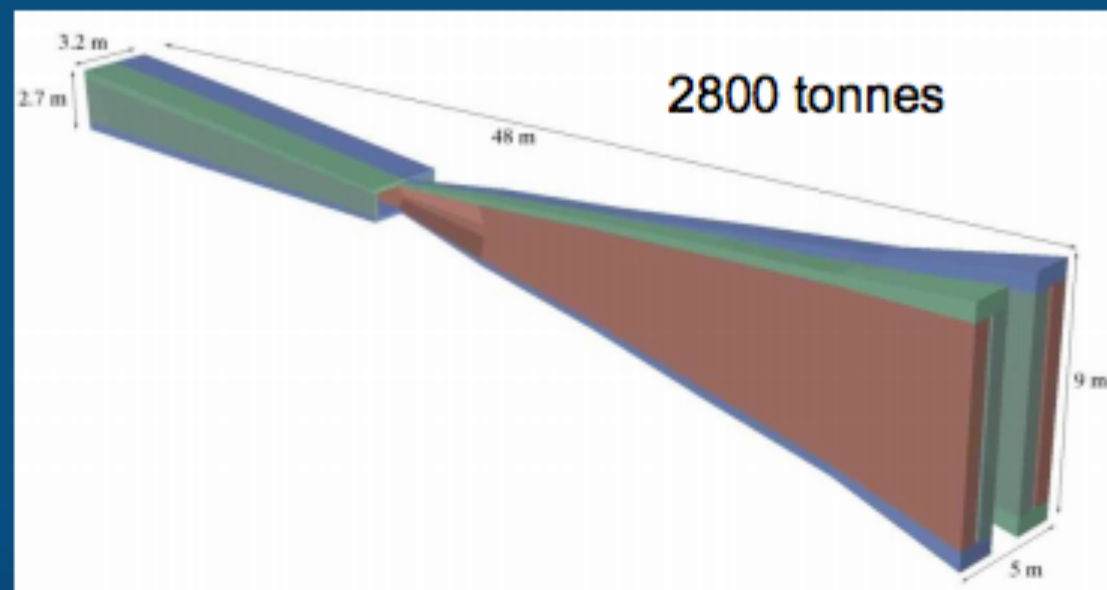
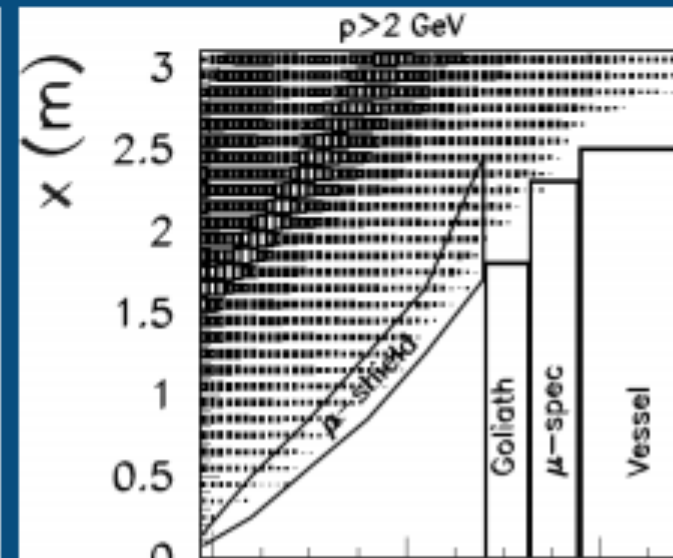
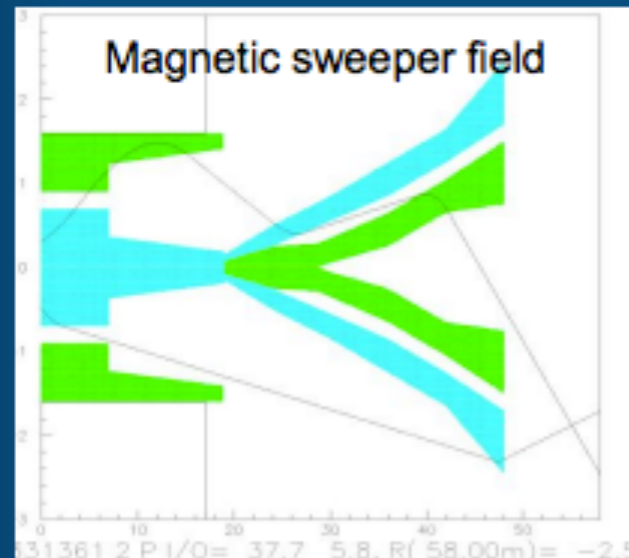
CONFIGURAZIONE DEL TARGET

Design considerations with 4×10^{13} p / 7s $\rightarrow$ 400 kW

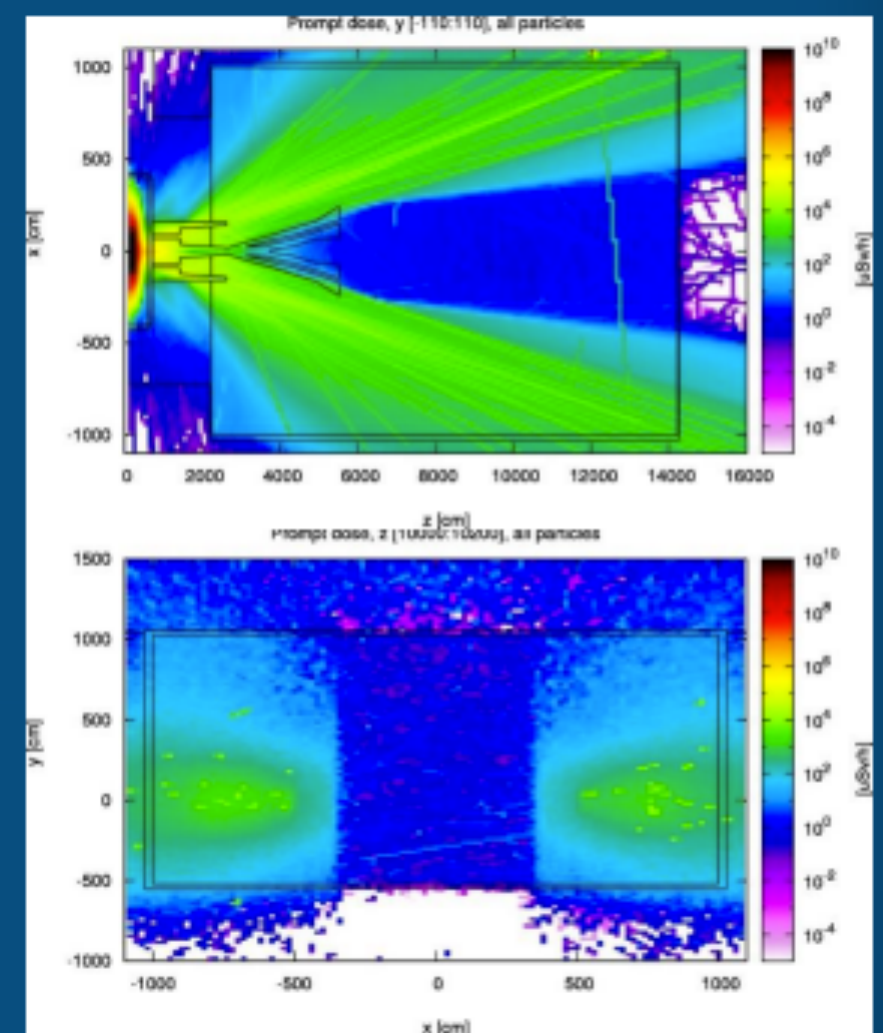
- High temperature
- Compressive stresses
- Atomic displacement
- Erosion/corrosion
- Material properties as a function of irradiation
- Remote handling (Initial dose rate of 50 Sv/h...)



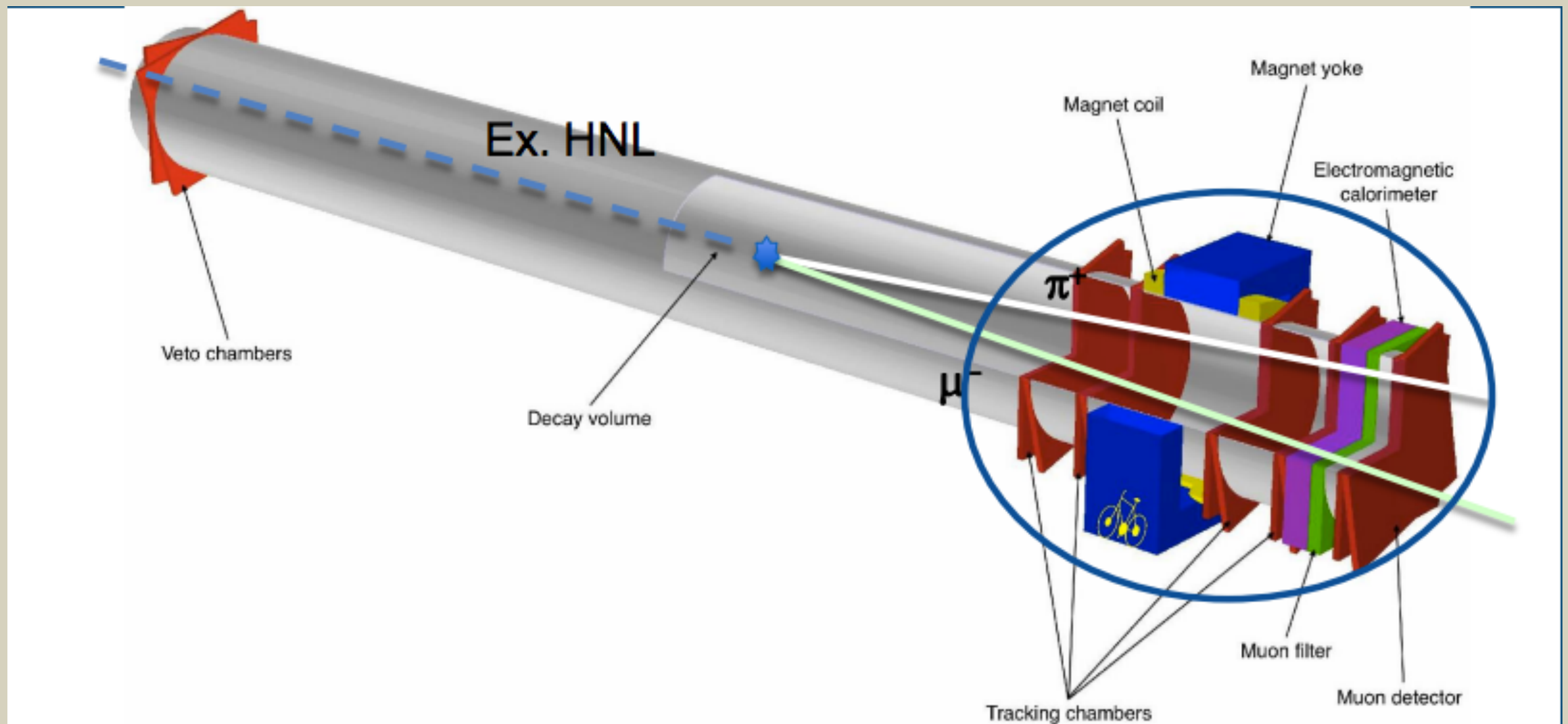
SCHERMO MAGNETICO PER MUONI



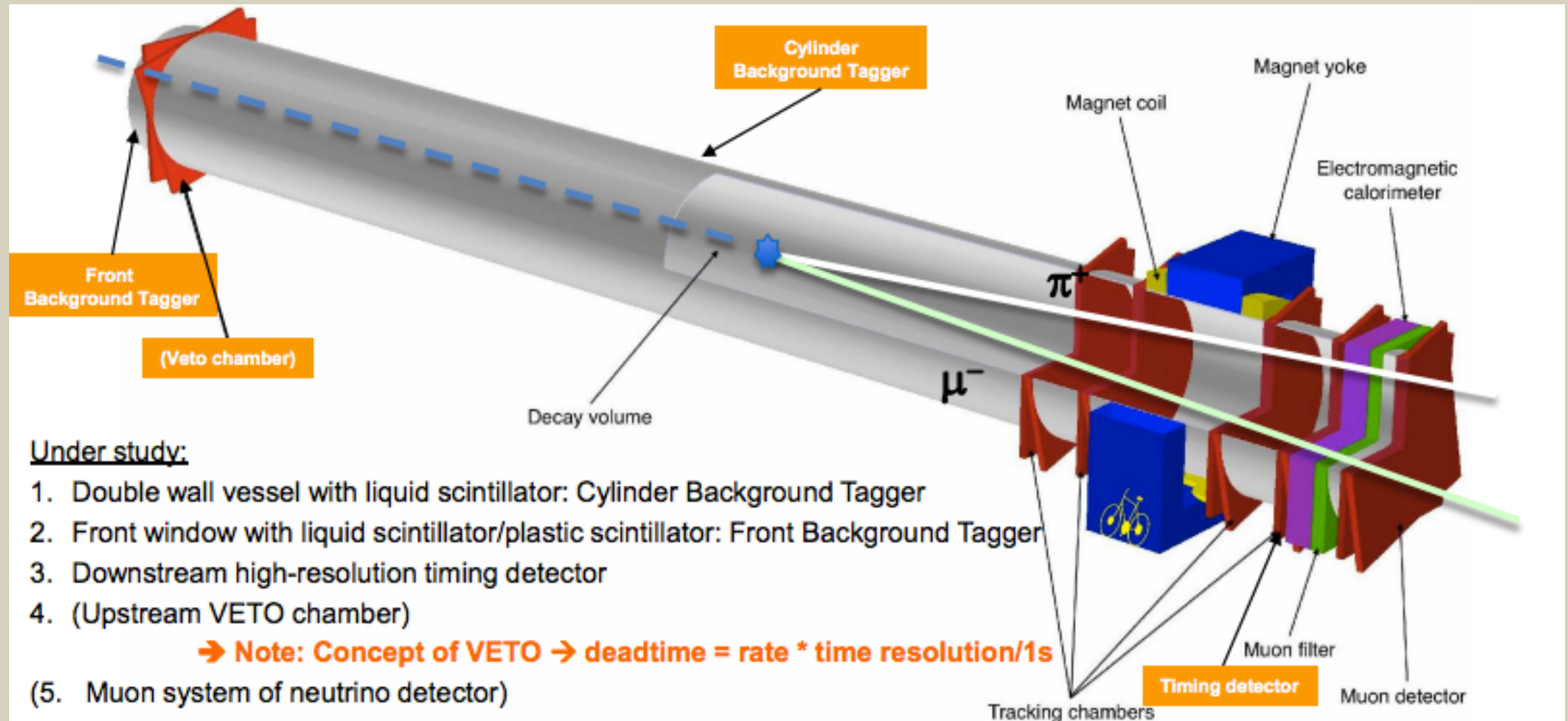
experimental hall 4x13 p.o.t. / 7s



SISTEMA TRACCIANTE



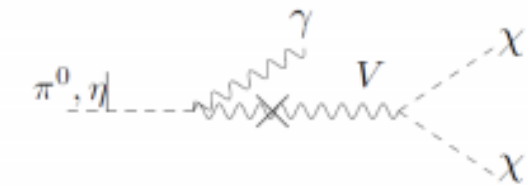
SISTEMA TRACCIANTE



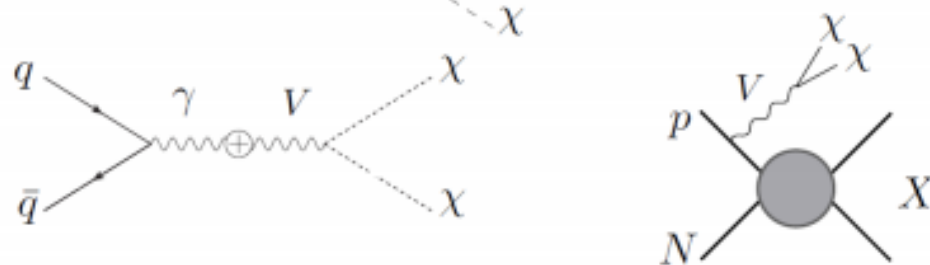
RICERCA DIRETTA DI MATERIA OSCURA

Production of the Dark Matter beam

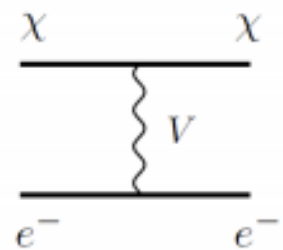
Hadron decays



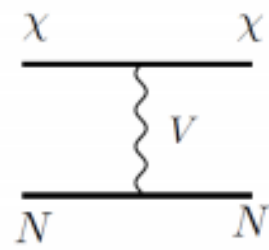
Direct production



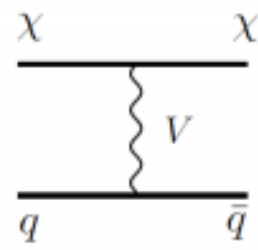
Detection via scattering - anomalous neutral currents



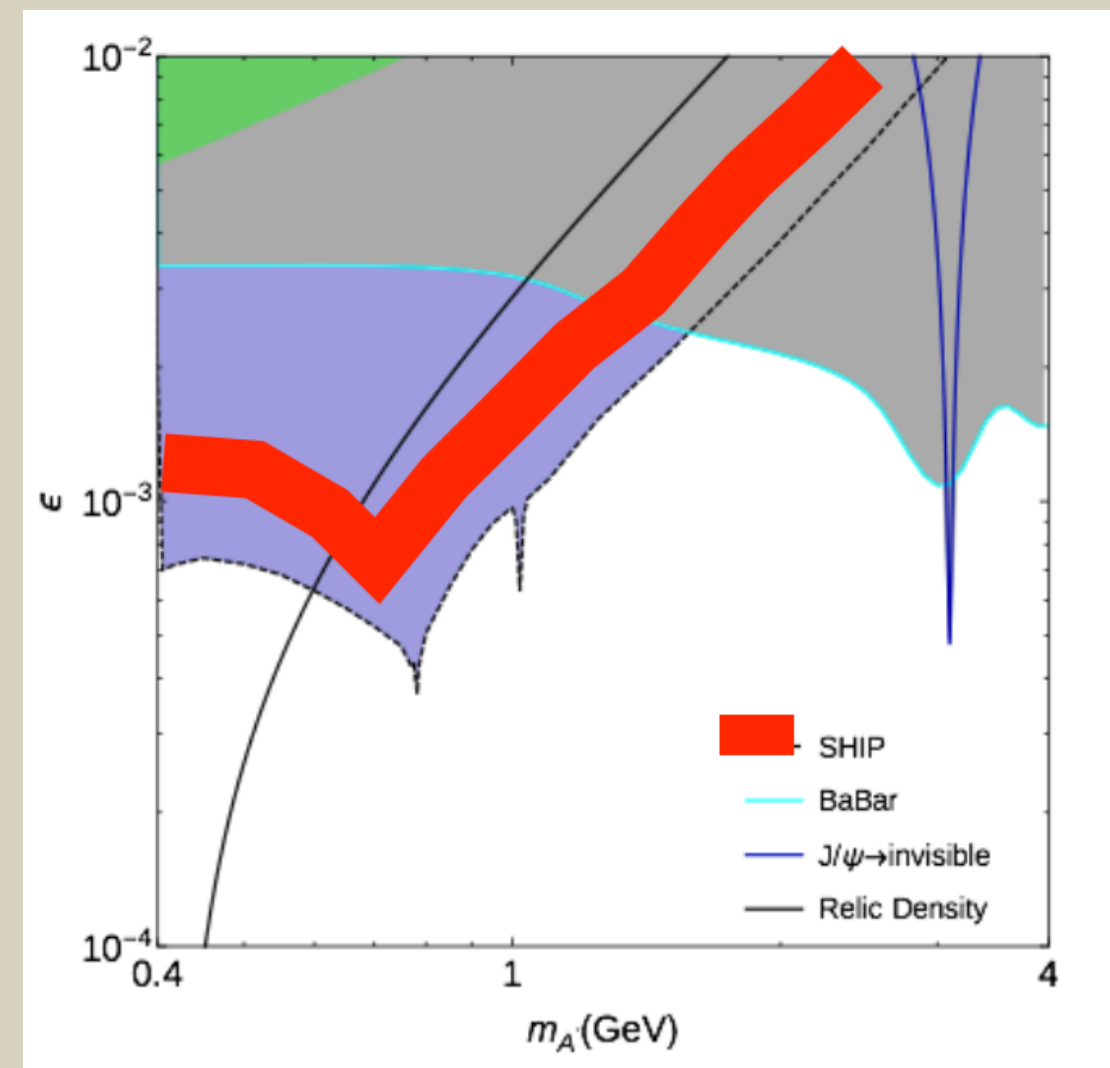
$\chi-e^-$ elastic



χ -nucleon elastic



deep inelastic



SEZIONE D'URTO

- Diffusione di corrente carica neutrino-nucleone

neutrino

anti-neutrino

$$\frac{d^2\sigma}{dx dy} = \frac{G_F^2 M_N E_\nu}{\pi} \left(\frac{M_W^2}{Q^2 + M_W^2} \right)^2 \left[\left(xy^2 + \frac{m_l^2 y}{2E_\nu M_N} \right) F_1 \mp \left(1 - y - \frac{M_N xy}{2E_\nu} - \frac{m_l^2}{4E_\nu^2} \right) F_2 \right. \\ \left. \pm \left(xy \left(1 - \frac{y}{2} \right) - \frac{m_l^2 y}{4E_\nu M_N} \right) F_3 + \frac{m_l^2 (m_l^2 + Q^2)}{4E_\nu^2 M_N^2 x} F_4 - \frac{m_l^2}{E_\nu M_N} F_5 \right]$$

Funzioni di struttura

- F_1
 - F_2
 - F_3
 - F_4
 - F_5
- Stime precise da altre esperimenti
- Segno opposto di ν e **anti- ν**
- Dipende dalla massa del lepton. Soppresso in caso di interazioni di ν_μ , diventa rilevante per interazioni di ν_τ
- Stima di F_3
 - Prima stima di F_4 ed F_5 , non accessibili con neutrini più leggeri

FISICA DEL CHARM

- ▶ Large charm production in ν_μ^{CC} and ν_e^{CC} interactions
- ▶ Fraction of neutrino-induced charm events:

$$\nu_\mu^{CC} \quad f(charm) = \frac{\int \Phi_{\nu_\mu} \sigma_{\nu_\mu}^{CC} \left(\frac{\sigma_{charm}}{\sigma_{\nu_\mu}^{CC}} \right) dE}{\int \Phi_{\nu_\mu} \sigma_{\nu_\mu}^{CC} dE} \approx 2\%$$

$$\nu_e^{CC} \quad f(charm) = \frac{\int \Phi_{\nu_e} \sigma_{\nu_e}^{CC} \left(\frac{\sigma_{charm}}{\sigma_{\nu_e}^{CC}} \right) dE}{\int \Phi_{\nu_e} \sigma_{\nu_e}^{CC} dE} \approx 4.6\%$$

- ▶ Expected ν_μ -induced charm events:

$$N_{charm} = N_{\nu int} \times f_{charm} \times \frac{CC}{NC + CC} \times \epsilon_{decay}$$

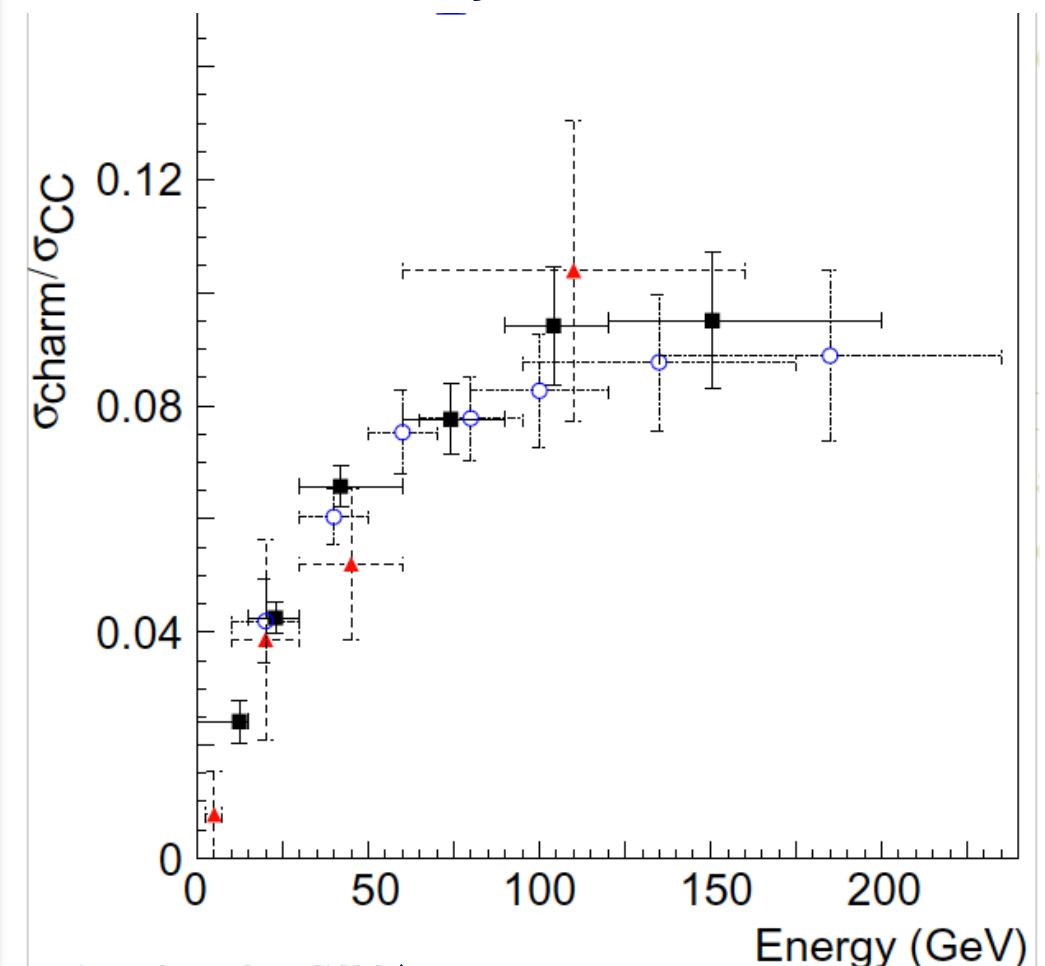
$$= (2 \times 10^6) \times 0.02 \times 0.7 \times 0.4 \sim 11000 \quad (\sim 2000 \text{ in CHORUS})$$

- ▶ Expected anti- ν_μ -induced charm events: $\longrightarrow$ separate the contribution of valence (absent in the anti-neutrino case) and sea quarks

$$N_{anti-charm} = N_{charm} \times \frac{\Phi_{\bar{\nu}_\mu}}{\Phi_{\nu_\mu}} \times \frac{\sigma_{\bar{\nu}_\mu}}{\sigma_{\nu_\mu}}$$

$$= 11000 \times 0.63 \times 0.5 \sim 3500 \quad (\sim 32 \text{ in CHORUS})$$

CHORUS, New J. Phys. 13 (2011) 093002



INTERAZIONI DI NEUTRINO

ATTESI

	$\langle E \rangle$ (GeV)	Beam dump	$\langle E \rangle$ (GeV)	Neutrino target	$\langle E \rangle$ (GeV)	CC DIS interactions
N_{ν_μ}	1.4	4.4×10^{18}	8	5.2×10^{16}	29	1.7×10^6
N_{ν_e}	3	2.1×10^{17}	28	3.6×10^{15}	46	2.5×10^5
N_{ν_τ}	9	2.8×10^{15}	28	1.4×10^{14}	59	6.7×10^3
$N_{\bar{\nu}_\mu}$	1.5	2.8×10^{18}	8	4.0×10^{16}	28	6.7×10^5
$N_{\bar{\nu}_e}$	4	1.6×10^{17}	27	2.7×10^{15}	46	9.0×10^4
$N_{\bar{\nu}_\tau}$	8	2.8×10^{15}	26	1.4×10^{14}	58	3.4×10^3

charm fractions	(%)
$\sigma_{charm}/\sigma_{\nu_\mu CC}$	4.1
$\sigma_{charm}/\sigma_{\bar{\nu}_\mu CC}$	4.1
$\sigma_{charm}/\sigma_{\nu_e CC}$	6.0
$\sigma_{charm}/\sigma_{\bar{\nu}_e CC}$	6.0

decay channel	ν_τ			$\bar{\nu}_\tau$		
	N^{exp}	N^{bg}	R	N^{exp}	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

STIME DEI COSTI

Table 6.2: Overall cost of the SHiP facility and the detectors.

Item	Cost (MCHF)
Facility	135.8
Civil engineering	57.4
Infrastructure and services	22.0
Extraction and beamline	21.0
Target and target complex	24.0
Muon shield	11.4
Detector	58.7
Tau neutrino detector	11.1
Hidden Sector detector	46.8
Computing and online system	0.2
Grand total	194.5