

# SHIP: verso una proposta di esperimento di beam dump al CERN-SPS per la ricerca di Hidden Particles

Walter M. Bonivento  
CERN/INFN Cagliari

a rappresentare la Collaborazione SHIP



CERN, Universität Zürich, EPFL Lausanne, INFN Cagliari,  
Università Federico II and INFN Napoli, Imperial College London

(per ora)

**WN 21/03/2014**

# Problemi aperti

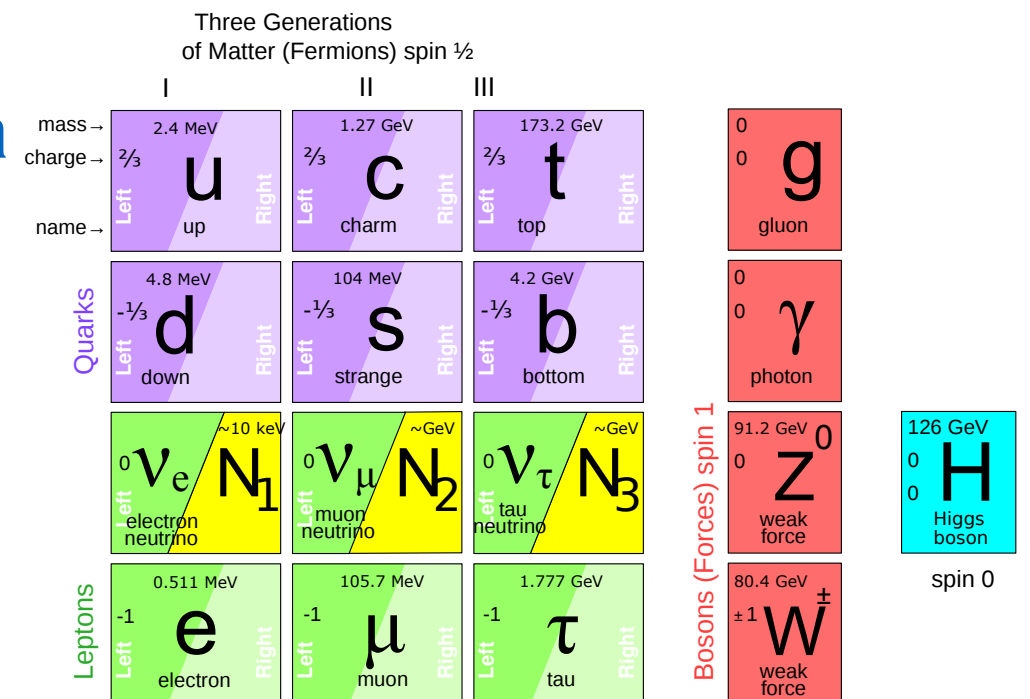
**Nonostante tutte le misure siano in accordo con il MS finora, rimangono sul tavolo almeno 3 “problemi” sperimentali dello SM (+altri teorici):**

- **massa dei neutrini (dall'esistenza delle oscillazioni)**
- **asimmetria barioni-antibarioni universo (BAU)**
- **materia oscura**

# Possibile soluzione: $\nu$ MSM

**Soluzione dei tre problemi suddetti con estensione minimale dello SM, cioè senza introdurre nuovi principi fisici (SUSY or ED) o nuove scale di energia (GU):**

**3 partner di Majorana (HNL) destrorsi e sterili dei neutrini ordinari**



T.Asaka e M.Shaposhnikov, PLB620 (2005) 17

# Caratteristiche $\nu$ MSSM

- **Punto di partenza: la Lagrangiana see-saw (tipo 1)**

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \sum_{\substack{I=1,2,3; \\ \ell=1,2,3(e,\mu,\tau)}} i\bar{N}_I \partial_\mu \gamma^\mu N_I - Y_{I\ell} \bar{N}_I \Phi^\dagger L_\ell - m_I^R \bar{N}_I^c N_I + h.c$$

mixing con neutrini attivi

- **Imponendo i vincoli di tipo osservativo su BBN, BAU, oscillazioni neutrini attivi, materia oscura, si ottengono:**
  - **N1 di massa O(10 keV) con un piccolo mixing con gli altri due —>candidato Dark Matter (ne parlo dopo...piatto caldo!)**
  - **N2 e N3 quasi degeneri in massa e con massa  $\gg eV$  e  $<$  della scala EW —>oggetto di questa proposta; spiegano la asimmetria materia-antimateria (attraverso oscillazioni dei neutrini sterili con violazione di CP seguiti da una transizione con sphalerons) e danno massa ai neutrini tramite il meccanismo see-saw (type 1)**
- **NB: per un seminario di cosmologia sui dettagli di tutto questo, M. Shaposhnikov e' la persona giusta a cui chiedere**

# Interazioni dei N

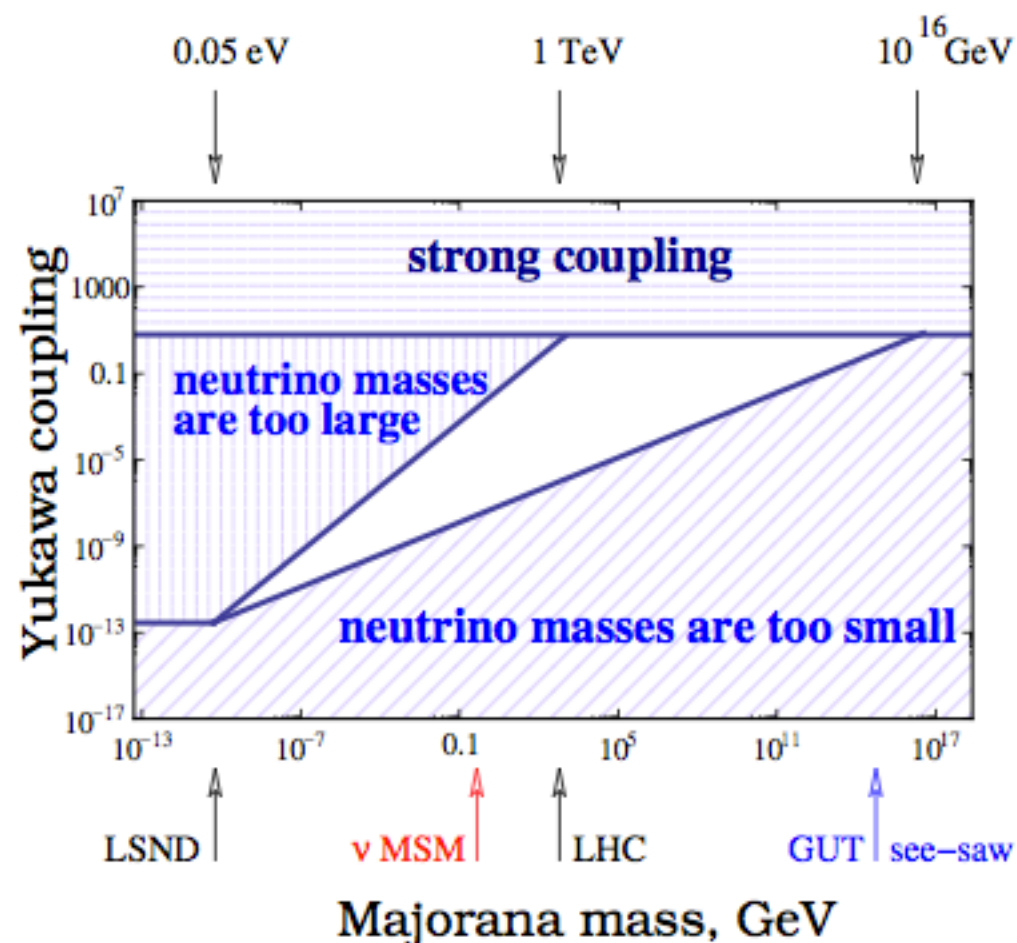
- queste particelle sono sterili, ovvero non si accoppiano con le interazioni note; unicamente mescolano con i neutrini attivi → “partecipano” in tutti i diagrammi di Feynman in cui sono coinvolti i neutrini attivi purché cinematicamente possibili
- il mixing con i neutrini attivi è dato da  $U_{\ell i} = Y_{\ell i} v / \sqrt{2} m_{iN}$

$$U^2 = \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \sum_{I=1,2} |U_{\ell I}|^2$$

- la relazione tra  $U_e$ ,  $U_\mu$  e  $U_\tau$  dipende dal mescolamento tra sapori

# HNL e see-saw

- In questo modello il see-saw e' ottenuto con HNL di massa relativamente piccola (e quindi con Yukawa piccoli). In realta' il range di masse e accoppiamenti permessi e' dato da:



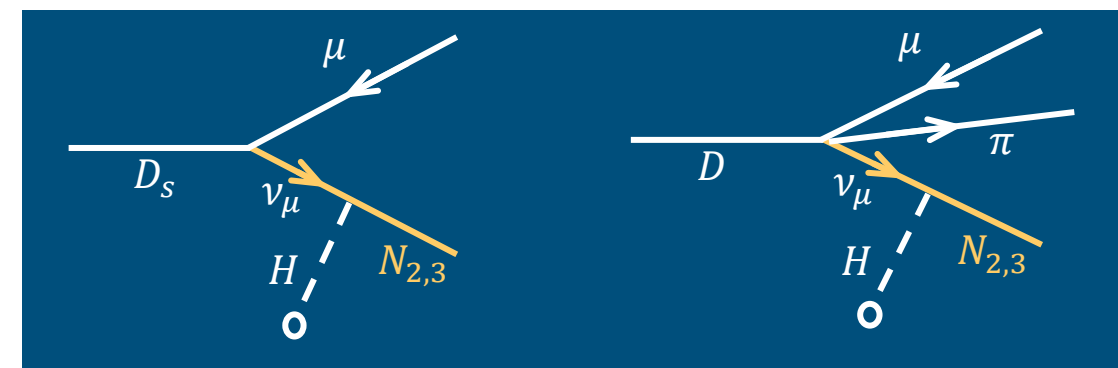
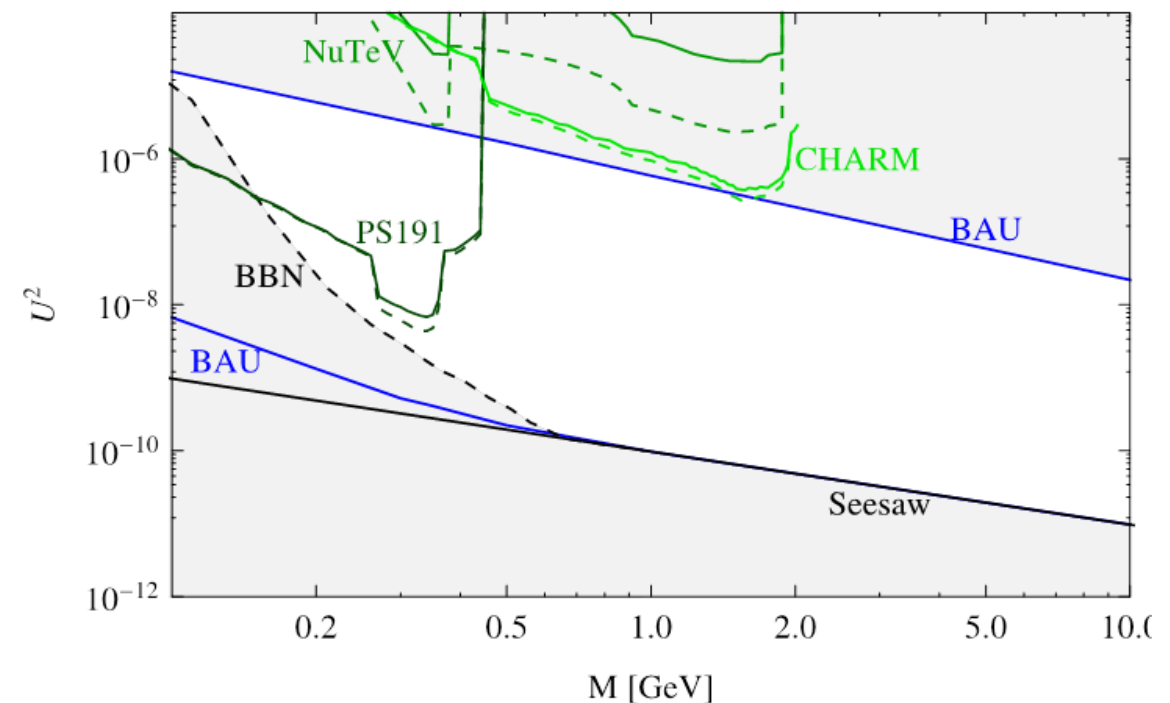
	N mass	$\nu$ masses	eV $\nu$ anomalies	BAU	DM	$M_H$ stability	direct search	experiment
GUT see-saw	$10^{-16}$ - $10^{16}$ GeV	YES	NO	YES	NO	NO	NO	-
EWSB	2-3 - $10^{16}$ GeV	YES	NO	YES	NO	YES	YES	LHC
$\nu$ MSM	keV - GeV	YES	NO	YES	YES	YES	YES	a'la CHARM
$\nu$ scale	eV	YES	YES	NO	NO	YES	YES	a'la LSND

arXiv:1204.5379

# Produzione di $N_{2,3}$

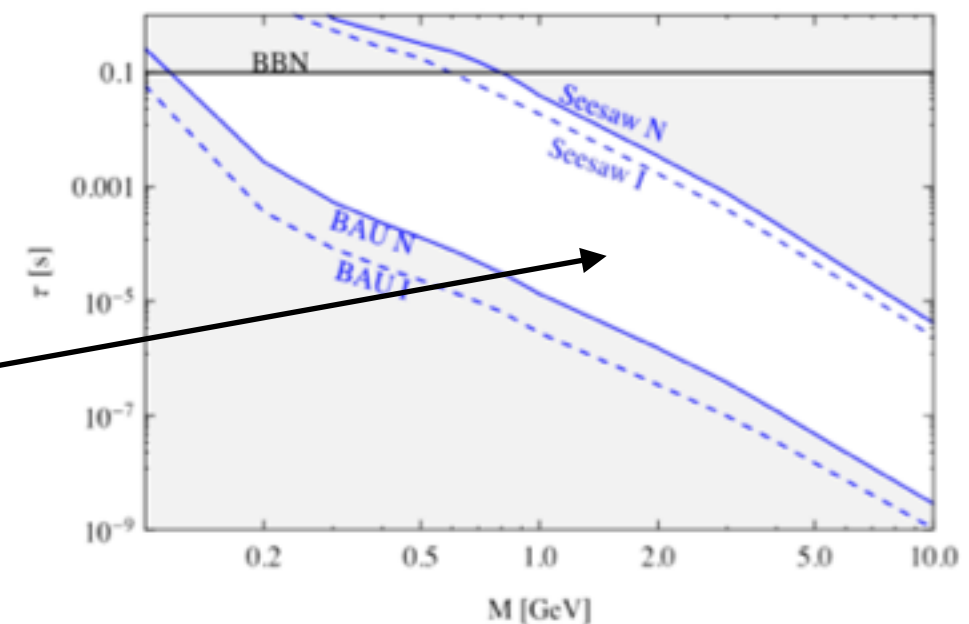
gerarchia inversa di massa dei neutrini

- nel vMSM forti limitazioni nello spazio dei parametri ( $U^2, m$ )
- molte ricerche di HNL in passato ma, per  $m > m_K$ , con **sensibilità' non di interesse cosmologico** (es LHCb in decadimenti del B raggiunge  $U^2 \approx 10^{-4}$ , arXiv:1401.5361)
- **questa proposta: ricerca in decadimenti dei mesoni D (prodotti ad alta statistica nella collisione di p di 400 GeV su bersaglio fisso)**
- **Lo scopo di questa collaborazione e' di progettare un esperimento che ottimizzi tutti i parametri sperimentali, dato il fascio (che esiste, SPS).**

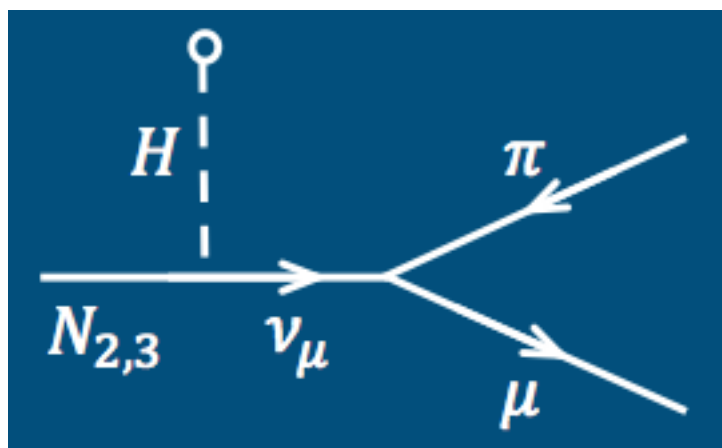


# Decadimenti del $N_{2,3}$

- Accoppiamento HNL- $\nu$  attivo molto debole  
 $\rightarrow N_{2,3}$  hanno vita media molto lunga
  - distanze di decadimento O(km)!: per  $U_\mu^2 = 10^{-7}$ ,  $\tau_N = 1.8 \times 10^{-5}$  s
- Vari modi di decadimento : i BR's dipendono dal mescolamento tra sapori
- Probabilita' che  $N_{2,3}$  decada nel volume fiduciale dell'esperimento  $\propto U_\mu^2$   
 $\rightarrow$  numero di eventi  $\propto U_\mu^4$

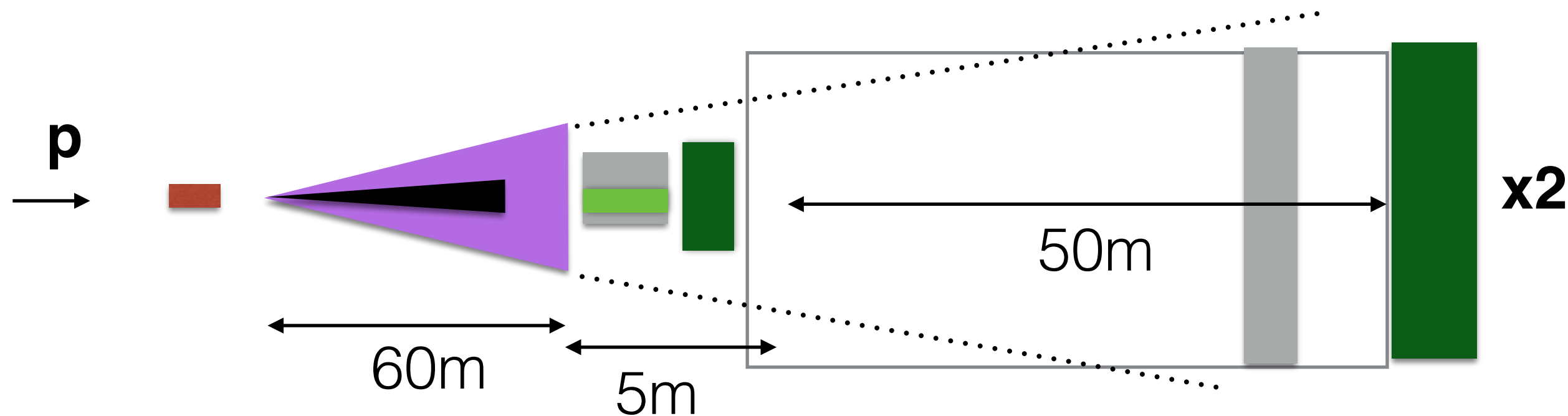


Decay mode	Branching ratio
$N_{2,3} \rightarrow \mu/e + \pi$	0.1 - 50 %
$N_{2,3} \rightarrow \mu^-/e^- + \rho^+$	0.5 - 20 %
$N_{2,3} \rightarrow \nu + \mu + e$	1 - 10 %





# Concetto



lead/iron



tungsten



magnet/spectrometers

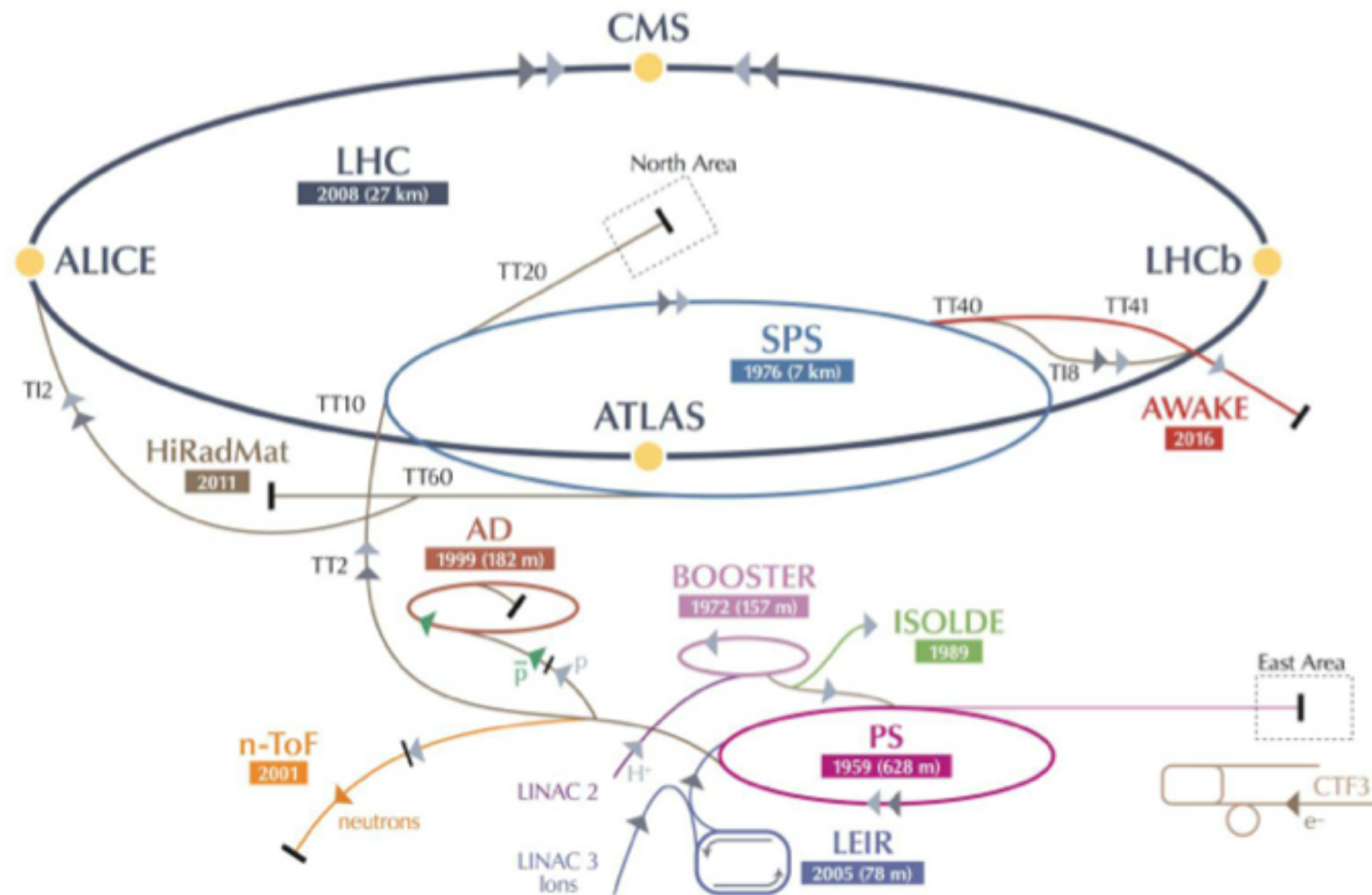


PID



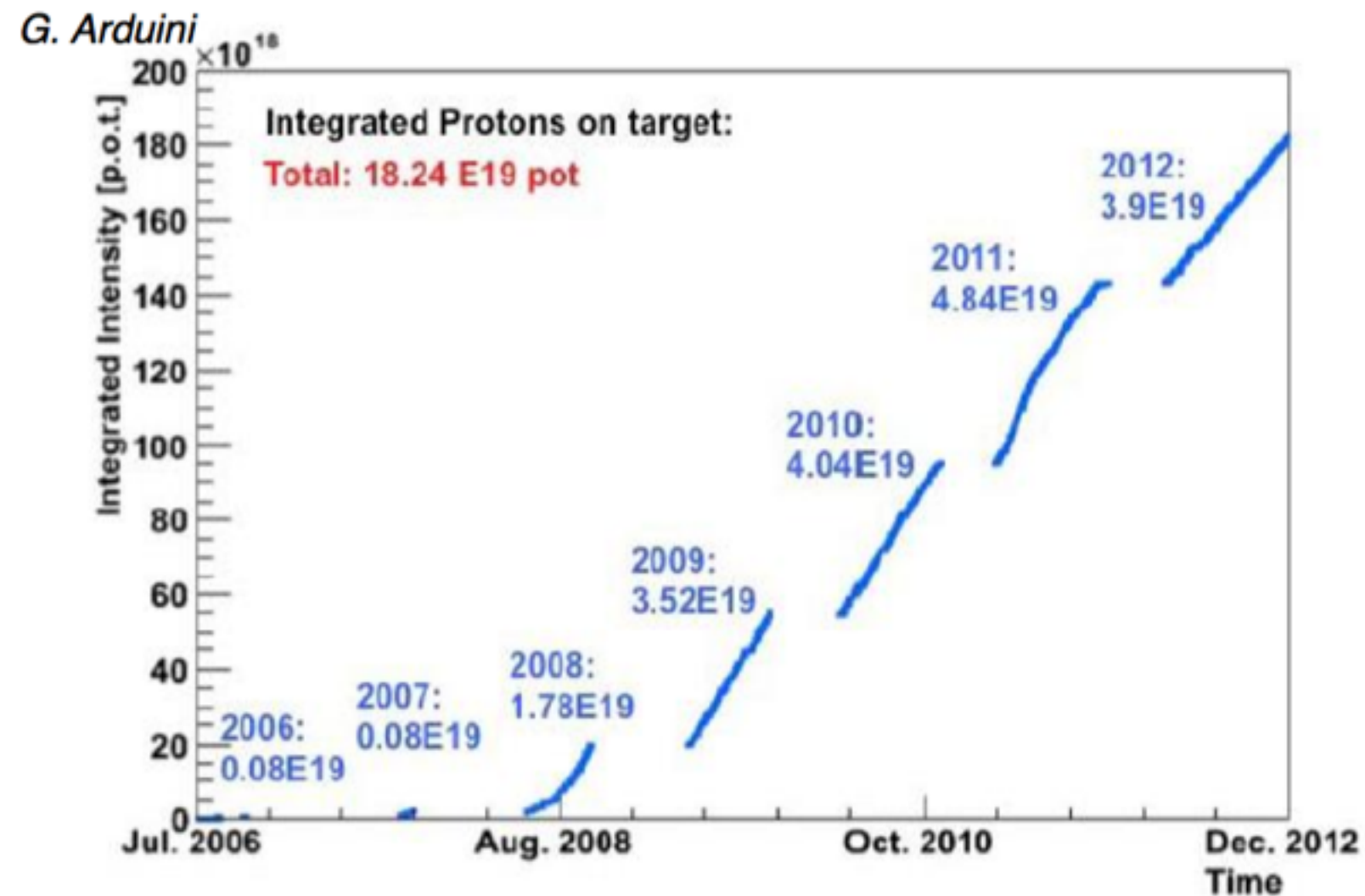
rivelatore  $v_\tau$

# Il complesso degli acceleratori del CERN



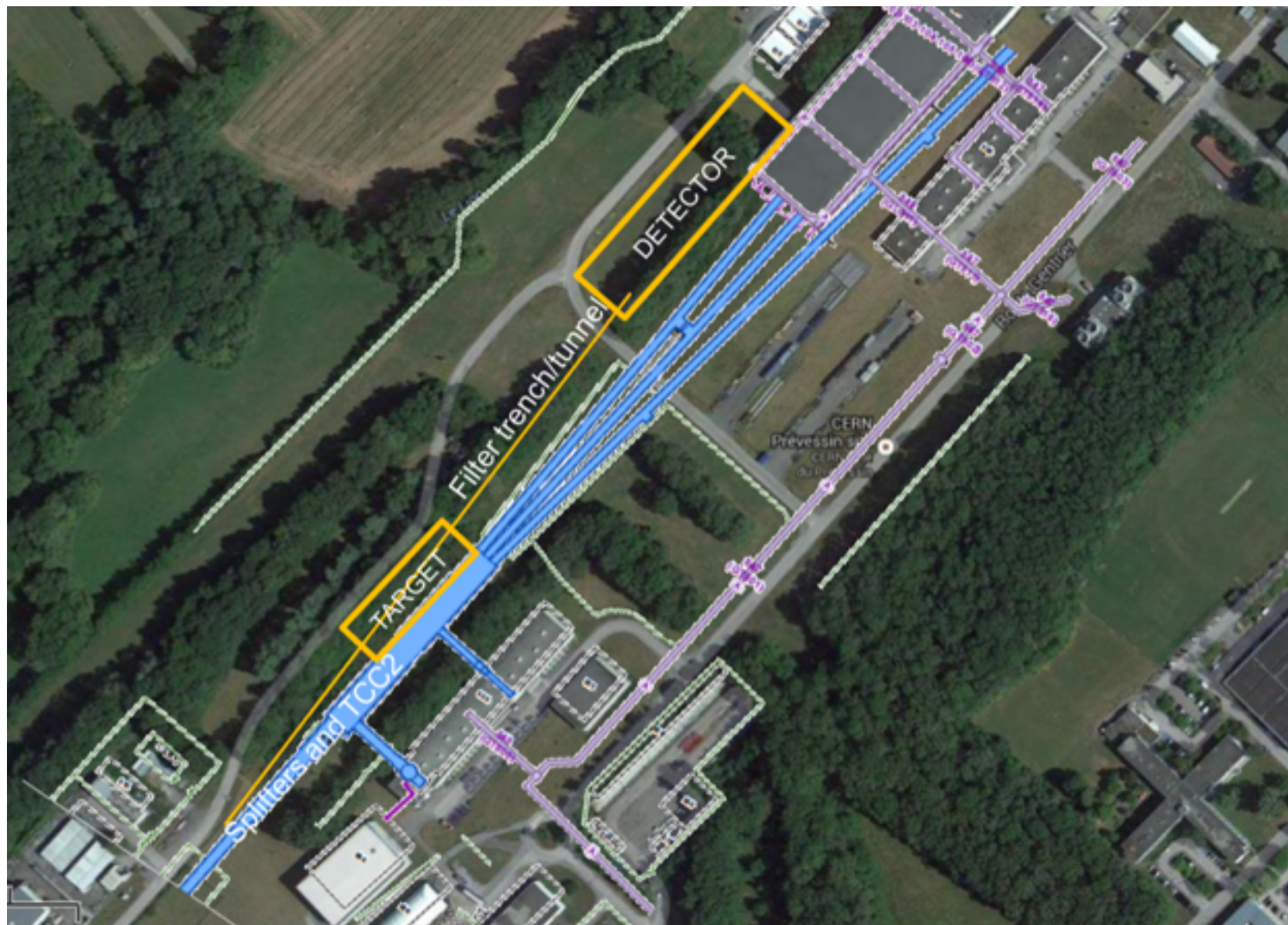
# Il fascio

- Fascio SPS estratto 400GeV; intensità' come CNGS  $4.5 \times 10^{19}$  pot/anno.
- Se upgrade PS si puo' arrivare a  $7 \times 10^{19}$
- caratteristiche dei fasci discusse in grande dettaglio con esperti del CERN —> design realistico —> 5 anni di run SENZA UPGRADE:  $2 \times 10^{20}$  pot





# Possibile zona sperimentale



Rivelatore  
posto IN  
SUPERFICIE

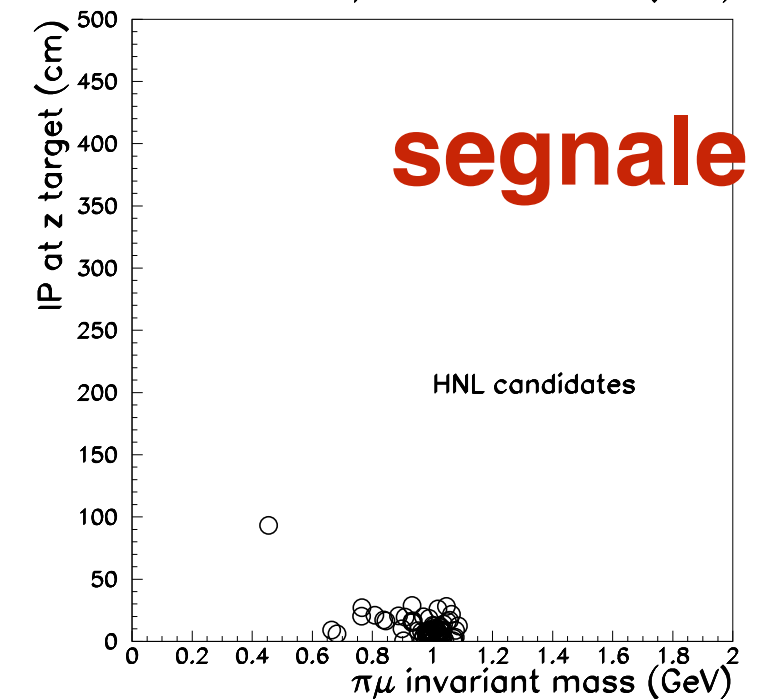
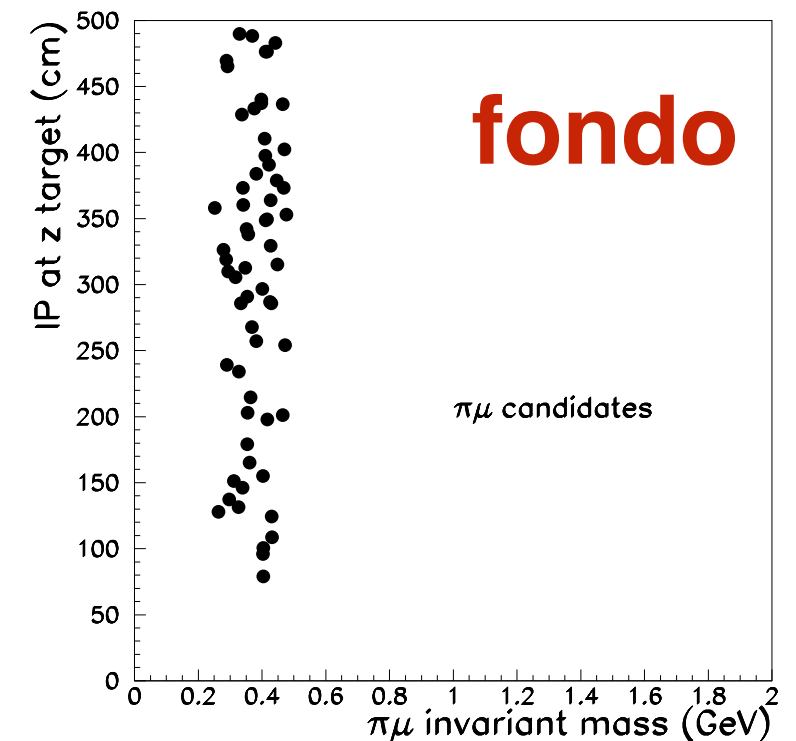
Estrazione in SPS-LSS2, beam switch lungo la transfer line (TT20) alla posizione dei magneti di splitting MSSB2117. Studio di fattibilit  in corso al CERN.  
gli studi effettuati per il proposal della facility del neutrino molto utili per noi

# Rivelatori proposti

- **Quasi nessun R&D da fare: ce la possiamo fare con rivelatori di tipo tradizionale, ottimizzando i parametri**
  - **—>questo significa che dall'approvazione si puo' iniziare subito a costruire il rivelatore**
- **Camere a mu e filtri (x3)—> da progettare. Si potrebbe recuperare da OPERA, almeno parzialmente. Stiamo considerando anche WPC a' la LHCb e eventualmente RPC di nuova generazione.**
- Camere di tracciamento e di veto (x2): straw tubes come per NA62, bassa  $X_0$ , 0.5% per 4 stazioni!
- Rivelatore per  $\nu_\tau$  (vedi dopo)
- trigger e acquisizione dati: pensiamo di utilizzare il modello HLT dell'upgrade di LHCb (i.e. no L0)

# Soppressione fondi

- Interazioni di neutrini attivi
  - nel tunnel di decadimento: a pressione atmosferica  $2 \times 10^4$  interazioni  $\rightarrow$  vuoto  $10^{-8}$  bar (molto meno di NA62 che usa  $10^{-8}$  bar!)
- nell'ultima lunghezza di interazione del dump  $\rightarrow$  produzione di  $K_L \rightarrow \mu \pi \nu$ 
  - in  $2 \times 10^{20}$  pot 600k CC interazioni di  $\nu_\mu$
  - 150 eventi con entrambe le particelle cariche che escono dallo spettrometro  $\rightarrow$  rigettate da tagli cinematica sul parametro di impatto
  - inoltre un altro fattore 10-40 si può ottenere equipaggiando l'ultima parte del dump con un rivelatore attivo per "taggare" le interazioni di neutrino





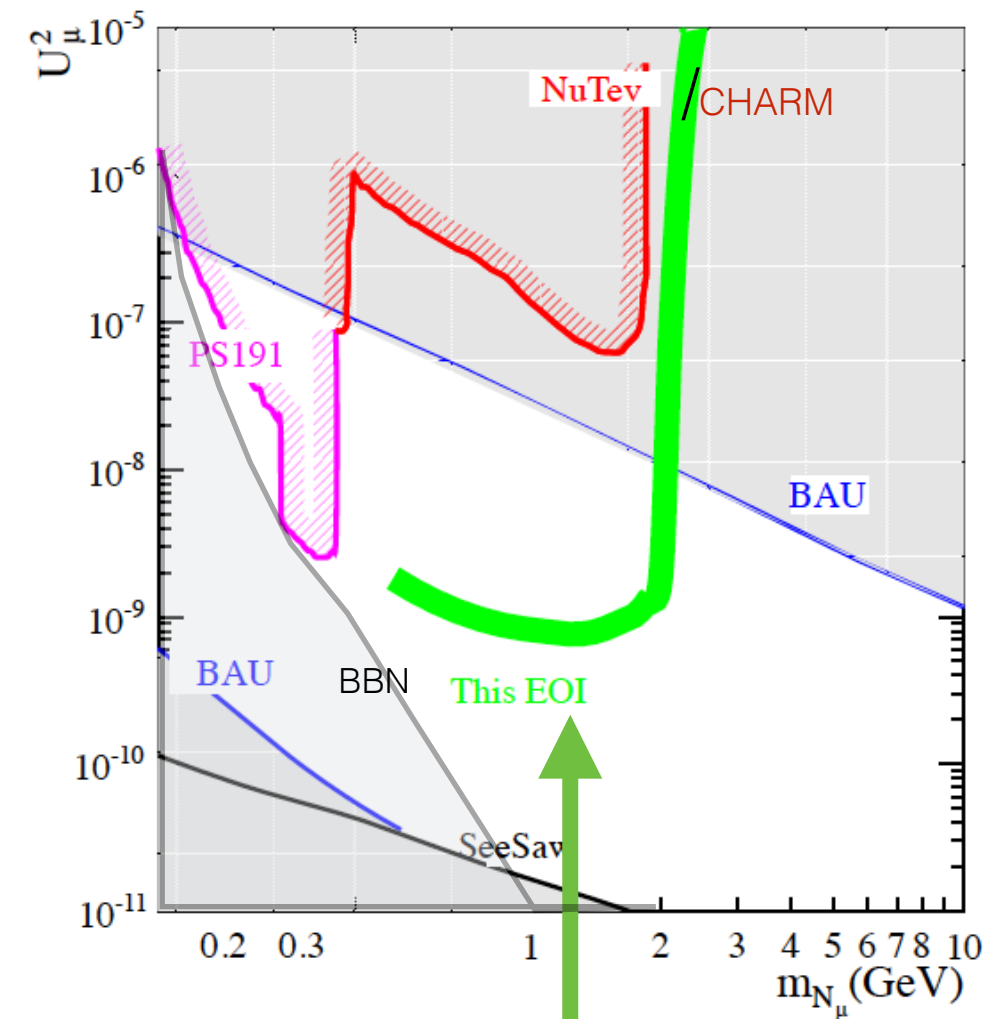
# Sensibilita'

(gerarchia di massa  
dei neutrini attivi inversa)

**Assumendo 0 fondo (che pare ben giustificato dai nostri studi)**

**—> finestra di opportunità' per questo esperimento di sondare la zona di interesse cosmologico**

- se si rinuncia a spiegare la Dark Matter —> modello molto meno vincolato, spazio dei parametri di interesse cosmologico più esteso, HNL non degeneri

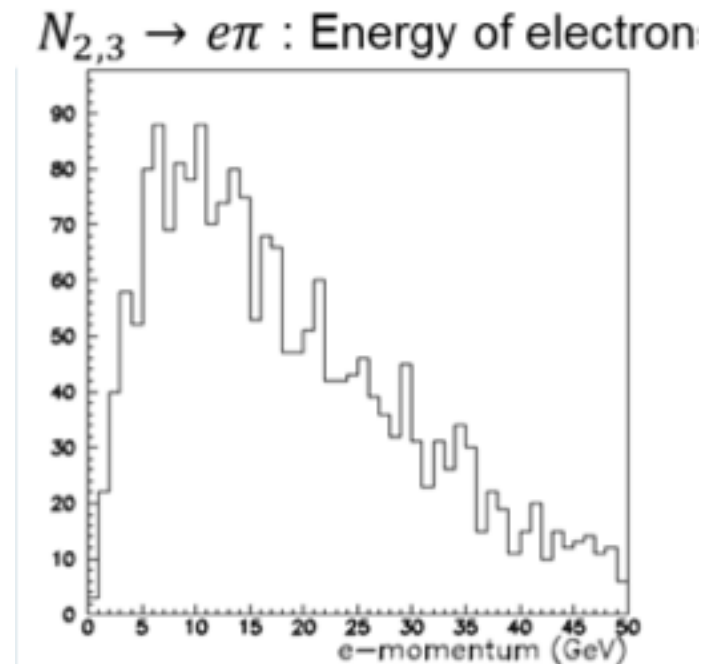


solo con  $N \rightarrow \mu\pi$

**(in uno scenario in cui l'accoppiamento  
al sapore muonico e' dominante)**

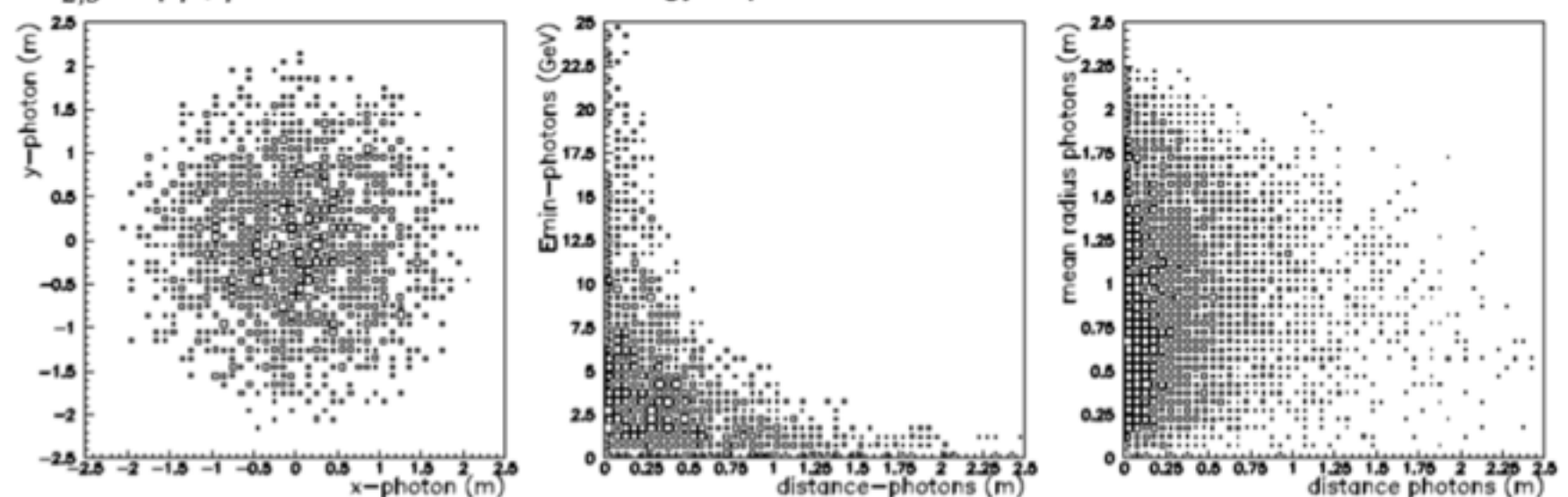
# Altri canali HNL

- Un calorimetro e.m. permetterebbe la ricostruzione di modi addizionali di decadimento:
  - $N \rightarrow e^+ \pi^-$  che permetterebbe di accedere al limite su  $U_e$
  - $N \rightarrow \mu^+ \rho^-$  con  $\rho^- \rightarrow \pi^- \pi^0$  che permetterebbe di migliorare il limite su  $U_\mu$  (tipicamente lo stesso BR di  $\mu + \pi^-$ , per  $m > 1 \text{ GeV}$ )



- Assumendo celle calorimetriche di 10cm

$N_{2,3} \rightarrow \mu\rho, \rho \rightarrow \pi\pi^0$ : Position and energy of photons

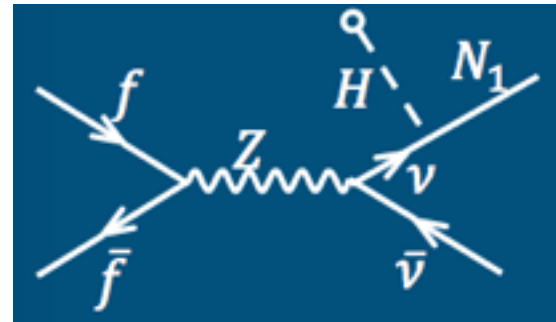




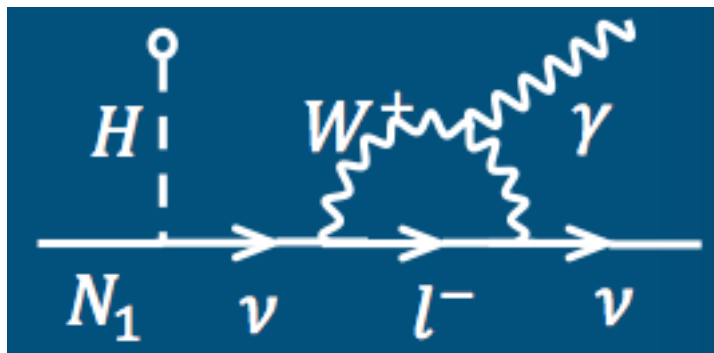
# N<sub>1</sub>

- Stabilità'  $\rightarrow \tau > \tau(\text{universo})$
- Produzione  $\rightarrow$  creato nell'Universo nella fase iniziale nelle reazioni  $ll \rightarrow \nu N_1$ ,  $qq \rightarrow \nu N_1$

deve fornire la corretta abbondanza di DM

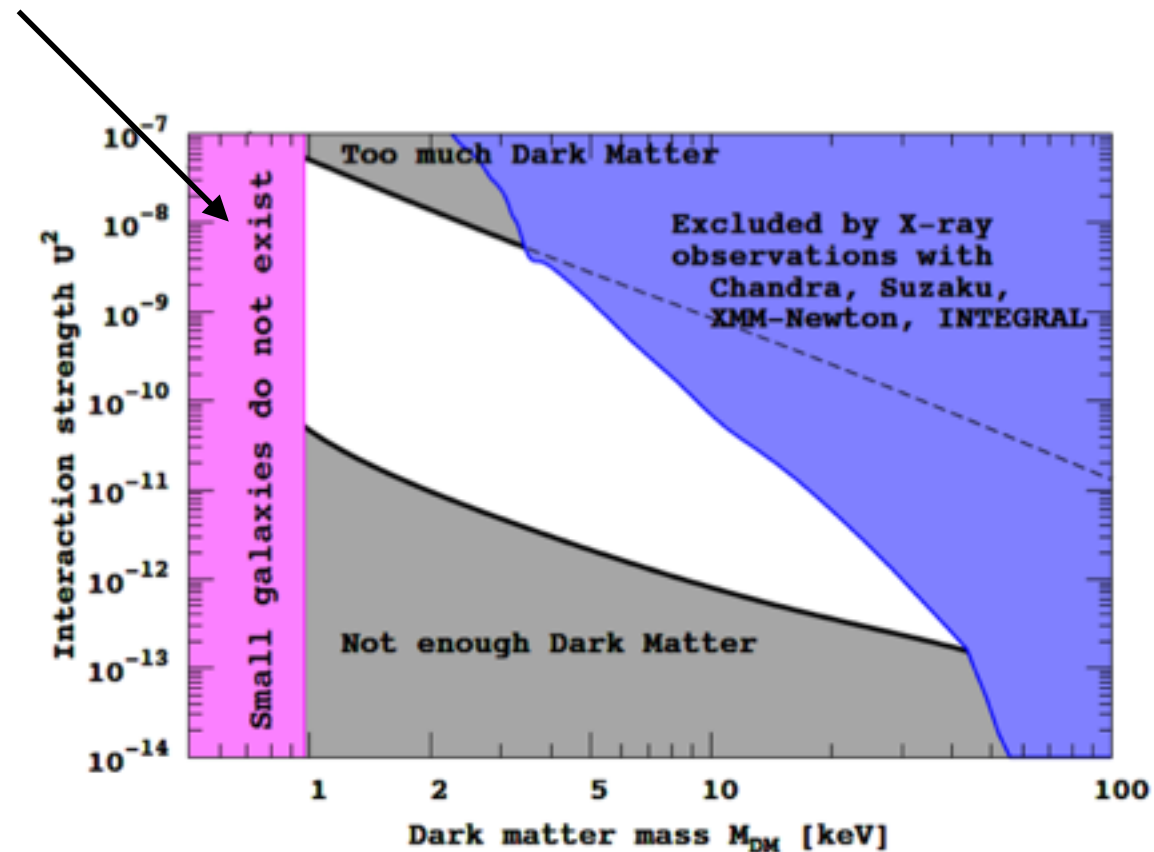


- Decadimento  $\rightarrow$  il decadimento radiativo  $N_1 \rightarrow \gamma \nu$  fornisce una linea nello spettro X a  $E(\gamma) = m_{N_1}/2$



- Allargamento linea da Doppler e da effetti strumentali vari

limite dal Principio di Pauli



**zona di esclusione  
(OTTENUTA CON MISURE  
SU SINGOLE GALASSIE)**

# CNN breaking news

DETECTION OF AN UNIDENTIFIED EMISSION LINE IN THE STACKED X-RAY SPECTRUM OF GALAXY CLUSTERS

ESRA BULBUL<sup>1,2</sup>, MAXIM MARKEVITCH<sup>2</sup>, ADAM FOSTER<sup>1</sup>, RANDALL K. SMITH<sup>1</sup> MICHAEL LOEWENSTEIN<sup>2</sup>, AND  
SCOTT W. RANDALL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden Street, Cambridge, MA 02138.

<sup>2</sup> NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA.

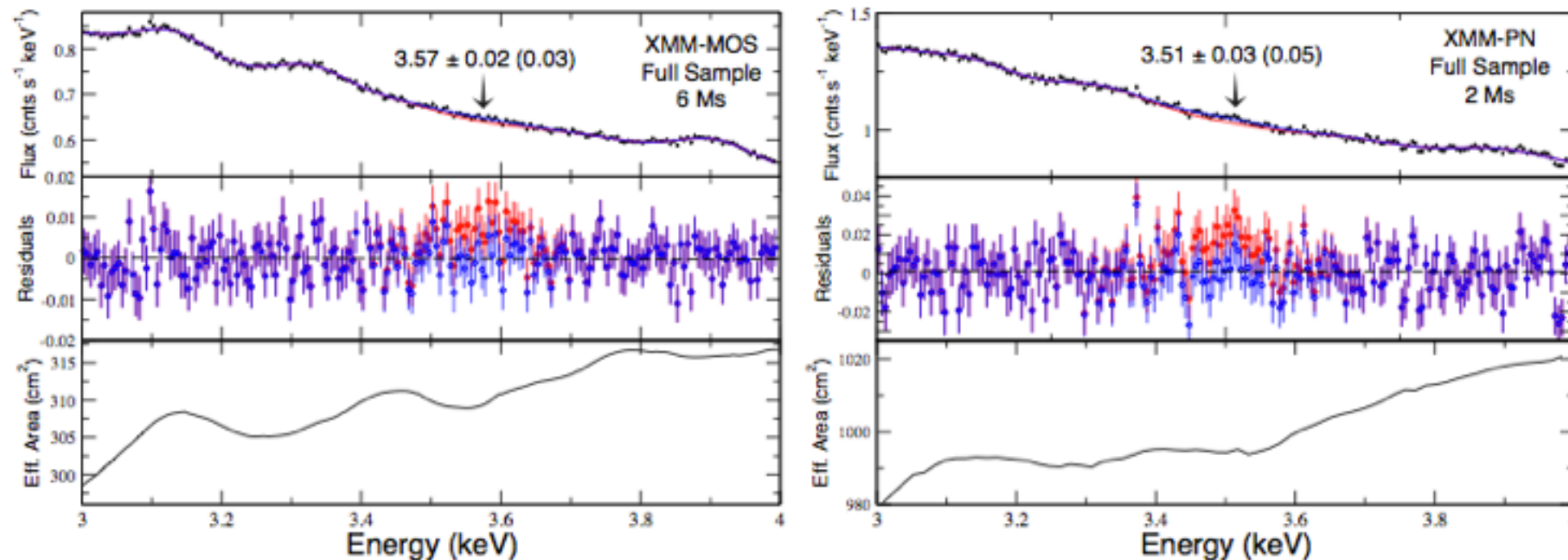
*Submitted to ApJ, 2014 February 10*

arXiv:1402.2301v1 [astro-ph.CO] 10 Feb 2014

there should be no atomic transitions in thermal plasma at this energy. An intriguing possibility is the decay of sterile neutrino, a long-sought dark matter particle candidate. Assuming that all dark matter is in sterile neutrinos with  $m_s = 2E = 7.1$  keV, our detection in the full sample corresponds to a neutrino decay mixing angle  $\sin^2(2\theta) \approx 7 \times 10^{-11}$ , below the previous upper limits. However, based on the cluster masses and distances, the line in Perseus is much brighter than expected in this model

- idea: mettere insieme 73 osservazioni di cluster di galassie per aumentare la statistica: analizzate le osservazioni di XMM-Newton e Chandra. Correzioni per il red-shift (0.01-0.35)

# Un esempio di plot



- incompatibile, dicono gli autori, con linee atomiche note e con possibili effetti strumentali (non sono un esperto per giudicare se hanno ragione)
- la significanza dichiarata e'  $3\sigma$  in vari sub-campioni — >pertanto e' il caso di aspettare ed essere cauti.

# Un altra breaking news!

## An unidentified line in X-ray spectra of the Andromeda galaxy and Perseus galaxy cluster

A. Boyarsky<sup>1</sup>, O. Ruchayskiy<sup>2</sup>, D. Iakubovskiy<sup>3,4</sup> and J. Franse<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup>Instituut-Lorentz for Theoretical Physics, Universiteit Leiden, Niels Bohrweg 2, Leiden, The Netherlands

<sup>2</sup>Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, FSB/ITP/LPPC, BSP, CH-1015, Lausanne, Switzerland

<sup>3</sup>Bogolyubov Institute of Theoretical Physics, Metrologichna Str. 14-b, 03680, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup>National University “Kyiv-Mohyla Academy”, Skovorody Str. 2, 04070, Kyiv, Ukraine

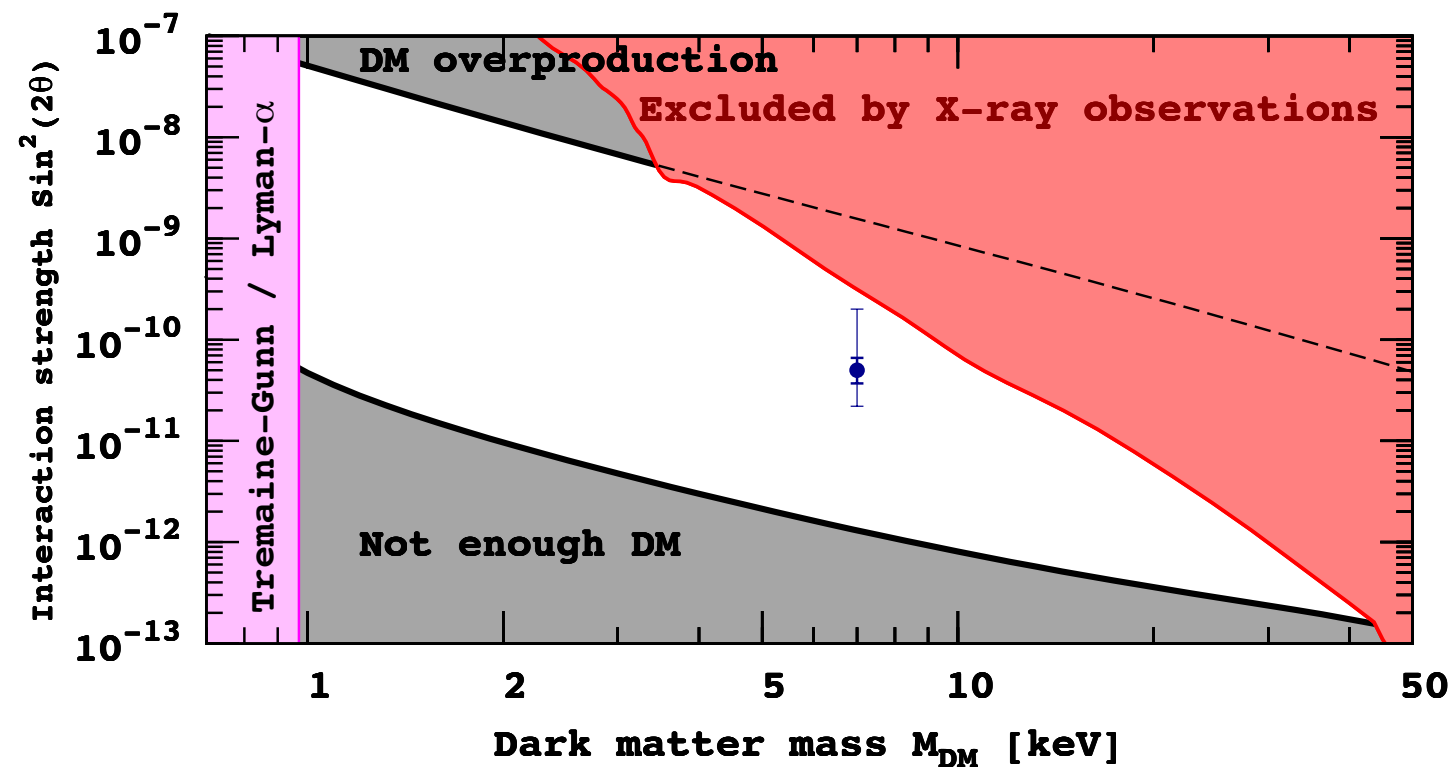
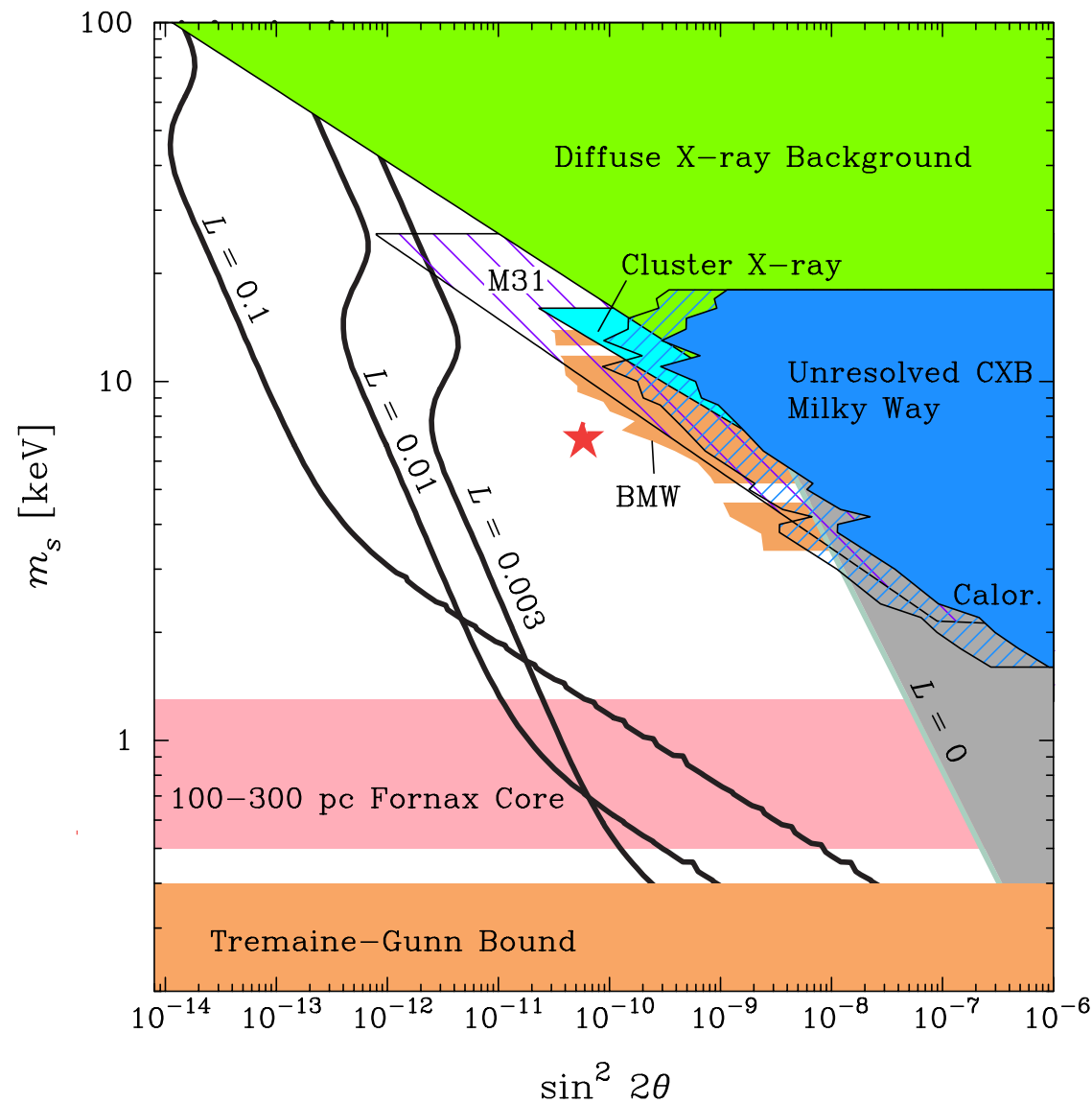
<sup>5</sup>Leiden Observatory, Leiden University, Niels Bohrweg 2, Leiden, The Netherlands

We identify a weak line at  $E \sim 3.5$  keV in X-ray spectra of the Andromeda galaxy and the Perseus galaxy cluster – two dark matter-dominated objects, for which there exist deep exposures with the XMM-Newton X-ray observatory. Such a line was not previously known to be present in the spectra of galaxies or galaxy clusters. Although the line is weak, it has a clear tendency to become stronger towards the centers of the objects; it is stronger for the Perseus cluster than for the Andromeda galaxy and is absent in the spectrum of a very deep “blank sky” dataset. Although for individual objects it is hard to exclude the possibility that the feature is due to an instrumental effect or an atomic line of anomalous brightness, it is consistent with the behavior of a line originating from the decay of dark matter particles. Future detections or non-detections of this line in multiple astrophysical targets may help to reveal its nature.

arXiv:1402.4119v1 [astro-ph.CO] 17 Feb 2014

- Osservazione consistente di una linea at 3.5KeV with 3-4  $\sigma$  significance
- Analisi diversa dalla precedente e su dati diversi, con controlli anche sulla dipendenza radiale e sul contenuto relativo di DM
- **Molte analisi in corso che potranno chiarire la situazione**
- **Missione Astro-H sara' lanciata nel 2015 e aiuterà a chiarire la situazione**

# For fun: nel grafico bi-dimensionale



**Boyarski et al.**

**Harvard, NASA ecc.**

Tuttavia questo e' un  
esperimento sia per atei  
sia per credenti!

(ndr:nella SUSY)

these studies are starting!

## Other BSM physics to be tested

### Portals to the secluded sector

- light, very weakly interacting, yet unstable particles:

produced (in)directly on target, then decaying in the detector fiducial volume

LSP

- ▶ light sgoldstinos (superpartners of goldstino in SUSY models)

e.g., D.S. Gorbunov (2001)

e.g.  $D \rightarrow \pi X$ , then  $X \rightarrow l^+ l^-$

- ▶ R-parity violating neutralinos in SUSY models

e.g., A. Dedes, H.K. Dreiner, P. Richardson (2001)

e.g.  $D \rightarrow l \tilde{\chi}$ , then  $\tilde{\chi} \rightarrow l^+ l^- \nu$

- ▶ massive paraphotons (in secluded dark matter models)

e.g., M. Pospelov, A. Ritz, M.B. Voloshin (2008)

e.g.  $\Sigma \rightarrow p V$ , then  $V \rightarrow l^+ l^-$

- light, fairly weakly interacting, unstable particles:

produced in beam dump (rock), right in front of detector, then decaying in the detector fiducial volume

- ▶ sterile neutrinos with transition dipole moments

e.g., S.N. Gninenko (2009,2010)

$\nu A \rightarrow N A$ , then  $N \rightarrow \nu \gamma$

as compared to CHARM

longer lifetimes and smaller couplings will be accessible

# s-Goldstinos

$$\tau_X = 10^{-6} \text{ s} \times \left( \frac{\sqrt{F}}{1000 \text{ TeV}} \right)^4 \left( \frac{3 \text{ TeV}}{M_{\lambda_g}} \right)^2 \left( \frac{1 \text{ GeV}}{m_X} \right)^3$$

- axion-like and dilaton-like particle in SUSY
- coupling to gluons dominant  $\rightarrow$  decay to  $\pi\pi$
- lifetimes O(Km)

- for a light scalar s-G with 2e20 pot  
$$N_{\pi^+\pi^-} \simeq 2 \times \left( \frac{1000 \text{ TeV}}{\sqrt{F}} \right)^8 \left( \frac{M_{\lambda_g}}{3 \text{ TeV}} \right)^4 \left( \frac{m_X}{1 \text{ GeV}} \right)^2$$



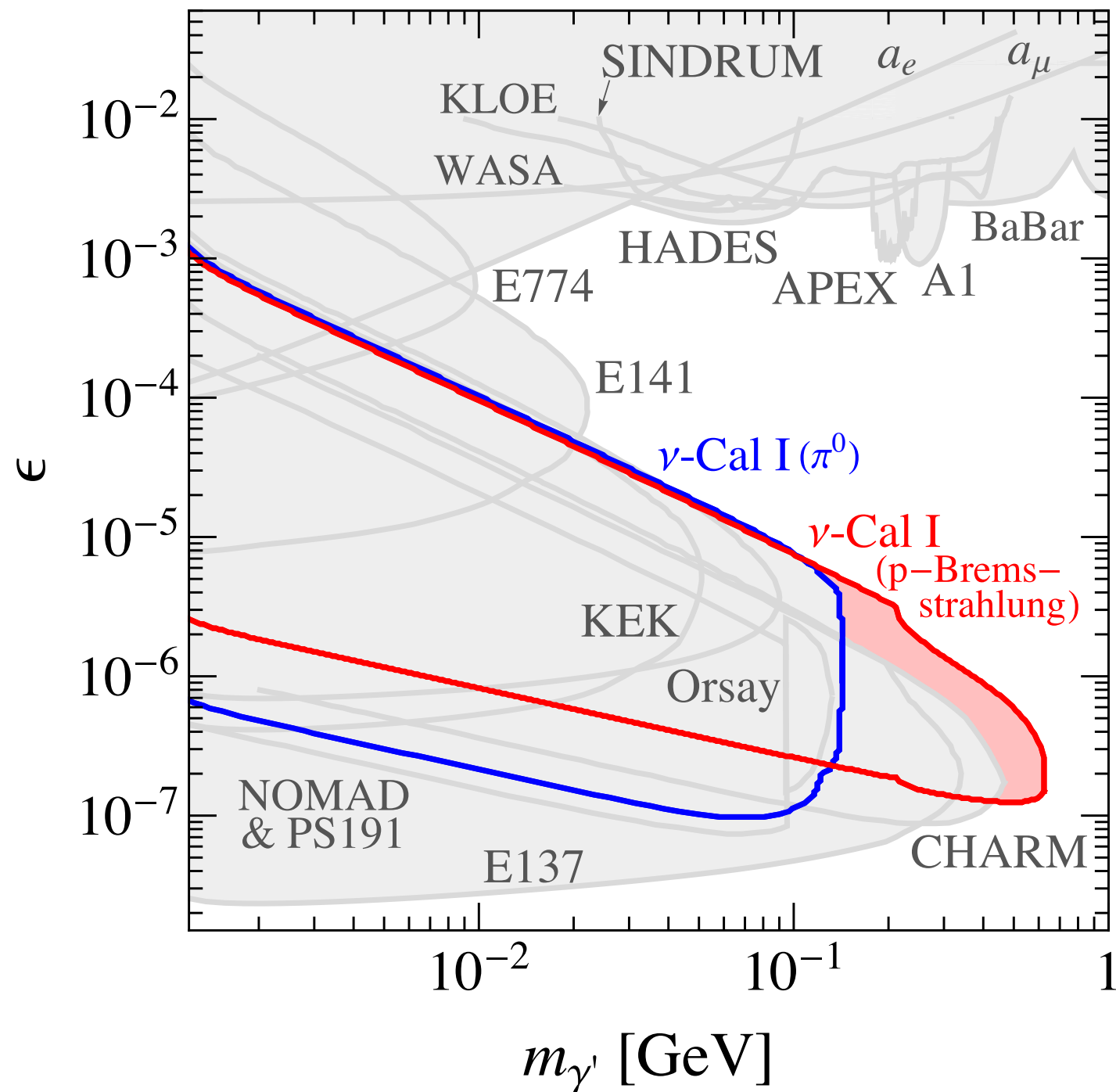
# LSP

$$N \simeq 20 \times \left( \frac{m_{\chi_0}}{1 \text{ GeV}} \right)^6 \left( \frac{\lambda}{10^{-8}} \right)^2 \left( \frac{\text{Br}(D \rightarrow \chi_0 + \dots)}{10^{-10}} \right)$$

- with 2e20 pot

- while  $\Gamma \propto \lambda^2 m_{\chi_0}^5$

# For massive vectors



# Conclusioni

- **Test di una spiegazione alternativa rispetto ai soliti modelli (SUSY, ED) di importanti fenomeni osservati non compatibili con il Modello Standard**
- **Tecniche complementari rispetto a esperimenti esistenti —>lunghe vite medie**
- **Il fascio c'e' e il rivelatore si puo' costruire in breve tempo appena data l'approvazione. Tutte le tecnologie proposte esistono e funzionano! Non ci sono R&D cruciali per l'esperimento che necessitano anni di studi preliminari.**
- **Una proposta che il CERN sta valutando molto seriamente. Nessuna altra facility al mondo ha (e aggiungerei avra', viste le proposte in circolazione) le potenzialita' per effettuare questa misura con sensibilita' competitive o comunque in grado di sondare la regione di interesse cosmologico, per  $m > m_K$**