

#### IFAE 2016 Genova, 31/3

## Fenomenologia dei neutrini sterili leggeri

### Antonio Palazzo

#### Università di Bari & INFN

# Outline

Introduzione

#### Anomalie negli esperimenti short-baseline: una review critica

Neutrini sterili e CPV: una nuova sfida per gli esperimenti long-baseline

Conclusioni

# Introduzione

# Neutrini Sterili

Molte estensioni del Modello Standard comportano singoletti del suo gruppo di gauge

Neutrini sterili studiati in diversi contesti:

- GUT, modelli see-saw, leptogenesi
- TeV, produzione a LHC e impatto su EWPOs
- keV, candidati di dark matter
- eV, anomalie negli esperimenti di oscillazione SBL
  - sub-eV, reattori LBL e neutrini solari

#### Neutrini sterili leggeri

#### Grande interesse nella comunità scientifica

arXiv:1204.5379v1 [hep-ph] 18 Apr 2012

#### Light Sterile Neutrinos: A White Paper

K. N. Abazajian<sup>a</sup>,<sup>1</sup> M. A. Acero,<sup>2</sup> S. K. Agarwalla,<sup>3</sup> A. A. Aguilar-Arevalo,<sup>2</sup> C. H. Albright,<sup>4,5</sup> S. Antusch,<sup>6</sup> C. A. Argüelles,<sup>7</sup> A. B. Balantekin,<sup>8</sup> G. Barenboim<sup>a</sup>,<sup>3</sup> V. Barger,<sup>8</sup> P. Bernardini,<sup>9</sup> F. Bezrukov,<sup>10</sup> O. E. Bjaelde,<sup>11</sup> S. A. Bogacz,<sup>12</sup> N. S. Bowden,<sup>13</sup> A. Boyarsky,<sup>14</sup> A. Bravar,<sup>15</sup> D. Bravo Berguño,<sup>16</sup> S. J. Brice,<sup>5</sup> A. D. Bross,<sup>5</sup> B. Caccianiga,<sup>17</sup> F. Cavanna,<sup>18, 19</sup> E. J. Chun,<sup>20</sup> B. T. Cleveland,<sup>21</sup> A. P. Collin,<sup>22</sup> P. Coloma,<sup>16</sup> J. M. Conrad,<sup>23</sup> M. Cribier,<sup>22</sup> A. S. Cucoanes,<sup>24</sup> J. C. D'Olivo,<sup>2</sup> S. Das,<sup>25</sup> A. de Gouvêa,<sup>26</sup> A. V. Derbin,<sup>27</sup> R. Dharmapalan,<sup>28</sup> J. S. Diaz,<sup>29</sup> X. J. Ding,<sup>16</sup> Z. Djurcic,<sup>30</sup> A. Donini,<sup>31,3</sup> D. Duchesneau,<sup>32</sup> H. Ejiri,<sup>33</sup> S. R. Elliott,<sup>34</sup>
 D. J. Ernst,<sup>35</sup> A. Esmaili,<sup>36</sup> J. J. Evans,<sup>37,38</sup> E. Fernandez-Martinez,<sup>39</sup> E. Figueroa-Feliciano,<sup>23</sup> B. T. Fleming<sup>a</sup>, <sup>18</sup> J. A. Formaggio<sup>a</sup>, <sup>23</sup> D. Franco, <sup>40</sup> J. Gaffiot, <sup>22</sup> R. Gandhi, <sup>41</sup> Y. Gao, <sup>42</sup> G. T. Garvev, <sup>34</sup> V. N. Gavrin, <sup>43</sup> P. Ghoshal, <sup>41</sup> D. Gibin, <sup>44</sup> C. Giunti, <sup>45</sup> S. N. Gninenko, <sup>43</sup> V. V. Gorbachev,<sup>43</sup> D. S. Gorbunov,<sup>43</sup> R. Guenette,<sup>18</sup> A. Guglielmi,<sup>44</sup> F. Halzen,<sup>46,8</sup> J. Hamann,<sup>11</sup> S. Hannestad,<sup>11</sup> W. Haxton,<sup>47,48</sup> K. M. Heeger,<sup>8</sup> R. Henning,<sup>49,50</sup> P. Hernandez,<sup>3</sup> P. Huber<sup>b</sup>, <sup>16</sup> W. Huelsnitz, <sup>34,51</sup> A. Ianni, <sup>52</sup> T. V. Ibragimova, <sup>43</sup> Y. Karadzhov, <sup>15</sup> G. Karagiorgi, <sup>53</sup> G. Keefer,<sup>13</sup> Y. D. Kim,<sup>54</sup> J. Kopp<sup>a</sup>,<sup>5</sup> V. N. Kornoukhov,<sup>55</sup> A. Kusenko,<sup>56,57</sup> P. Kyberd,<sup>58</sup> P. Langacker,<sup>59</sup> Th. Lasserre<sup>a</sup>,<sup>22,40</sup> M. Laveder,<sup>60</sup> A. Letourneau,<sup>22</sup> D. Lhuillier,<sup>22</sup> Y. F. Li,<sup>61</sup> M. Lindner,<sup>62</sup> J. M. Link<sup>b</sup>,<sup>16</sup> B. L. Littlejohn,<sup>8</sup> P. Lombardi,<sup>17</sup> K. Long,<sup>63</sup> J. Lopez-Pavon,<sup>64</sup> W. C. Louis<sup>a</sup>,<sup>34</sup> L. Ludhova,<sup>17</sup> J. D. Lykken,<sup>5</sup> P. A. N. Machado,<sup>65,66</sup> M. Maltoni,<sup>31</sup> W. A. Mann,<sup>67</sup> D. Marfatia,<sup>68</sup> C. Mariani,<sup>53,16</sup> V. A. Matveev,<sup>43,69</sup> N. E. Mavromatos,<sup>70,39</sup> A. Melchiorri,<sup>71</sup> D. Meloni,<sup>72</sup> O. Mena,<sup>3</sup> G. Mention,<sup>22</sup> A. Merle,<sup>73</sup> E. Meroni,<sup>17</sup> M. Mezzetto,<sup>44</sup> G. B. Mills,<sup>34</sup> D. Minic,<sup>16</sup> L. Miramonti,<sup>17</sup> D. Mohapatra,<sup>16</sup> R. N. Mohapatra,<sup>51</sup> C. Montanari,<sup>74</sup> Y. Mori, 75 Th. A. Mueller, 76 H. P. Mumm, 77 V. Muratova, 27 A. E. Nelson, 78 J. S. Nico, 77 E. Noah,<sup>15</sup> J. Nowak,<sup>79</sup> O. Yu. Smirnov,<sup>69</sup> M. Obolensky,<sup>40</sup> S. Pakvasa,<sup>80</sup> O. Palamara,<sup>18,52</sup> M. Pallavicini,<sup>81</sup> S. Pascoli,<sup>82</sup> L. Patrizii,<sup>83</sup> Z. Pavlovic,<sup>34</sup> O. L. G. Peres,<sup>36</sup> H. Pessard,<sup>32</sup> F. Pietropaolo,<sup>44</sup> M. L. Pitt,<sup>16</sup> M. Popovic,<sup>5</sup> J. Pradler,<sup>84</sup> G. Ranucci,<sup>17</sup> H. Ray,<sup>85</sup> S. Razzaque,<sup>86</sup> B. Rebel,<sup>5</sup> R. G. H. Robertson,<sup>87,78</sup> W. Rodejohann<sup>a</sup>,<sup>62</sup> S. D. Rountree,<sup>16</sup> C. Rubbia,<sup>39,52</sup> O. Ruchayskiy,<sup>39</sup> P. R. Sala,<sup>17</sup> K. Scholberg,<sup>88</sup> T. Schwetz<sup>a</sup>,<sup>62</sup> M. H. Shaevitz,<sup>53</sup> M. Shaposhnikov,<sup>89</sup> R. Shrock,<sup>90</sup> S. Simone,<sup>91</sup> M. Skorokhvatov,<sup>92</sup> M. Sorel,<sup>3</sup> A. Sousa,<sup>93</sup> D. N. Spergel,<sup>94</sup> J. Spitz,<sup>23</sup> L. Stanco,<sup>44</sup> I. Stancu,<sup>28</sup> A. Suzuki,<sup>95</sup> T. Takeuchi,<sup>16</sup> I. Tamborra,<sup>96</sup> J. Tang,<sup>97,98</sup> G. Testera,<sup>81</sup> X. C. Tian,<sup>99</sup> A. Tonazzo,<sup>40</sup> C. D. Tunnell,<sup>100</sup> R. G. Van de Water,<sup>34</sup> L. Verde, <sup>101</sup> E. P. Veretenkin, <sup>43</sup> C. Vignoli, <sup>52</sup> M. Vivier, <sup>22</sup> R. B. Vogelaar, <sup>16</sup> M. O. Wascko, <sup>63</sup> J. F. Wilkerson,<sup>49,102</sup> W. Winter,<sup>97</sup> Y. Y. Y. Wong<sup>a</sup>,<sup>25</sup> T. T. Yanagida,<sup>57</sup> O. Yasuda,<sup>103</sup> M. Yeh,<sup>104</sup> F. Yermia,<sup>24</sup> Z. W. Yokley,<sup>16</sup> G. P. Zeller,<sup>5</sup> L. Zhan,<sup>61</sup> and H. Zhang<sup>62</sup>

<sup>1</sup>University of California, Irvine

<sup>2</sup>Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México

<sup>3</sup>Instituto de Fisica Corpuscular, CSIC and Universidad de Valencia

<sup>4</sup>Northern Illinois University

<sup>5</sup>Fermi National Accelerator Laboratory

<sup>6</sup>University of Basel

<sup>a</sup>Section editor <sup>b</sup>Editor and corresponding author (pahuber@vt.edu and jmlink@vt.edu)

### Anomalie agli esperimenti short-baseline: una review critica

# Le anomalie agli acceleratori SBL (apparizione di $v_e$ in un fascio di $v_{\mu}$ )



### Anomalie dei reattori e del gallio

#### (sparizione di $v_e$ )



Mention et al. arXiv:1101:2755 [hep-ex]

SAGE coll., PRC 73 (2006) 045805

#### Entrambe sono discrepanze nel rate totale

#### Sistematici ignoti potrebbero essere responsabili

# Nessuna sparizione SBL di $\nu_{\mu}$



#### Solo limiti superiori (sino ad ora)

### È l'ipotesi del neutrino sterile in grado di spiegare simultaneamente tutte le osservazioni effettuate nei tre canali?

### **Come introdurre un neutrino sterile**



## **Tensione apparizione/sparizione**





arXiv:1107.1452



$$\sin^2 2\theta_{e\mu} \simeq \frac{1}{4} \sin^2 2\theta_{ee} \sin^2 2\theta_{\mu\mu} \simeq 4|U_{e4}|^2 |U_{\mu4}|^2$$

# Un problema "indecidibile"



Apparizione e sparizione compatibili solo a livello  $2\sigma$ 

Tuttavia, la loro combinazione migliora di ben 6σ il fit rispetto al caso 3-flavor standard

Difficile prendere una decisione sui neutrini sterili !

Solo nuovi e più sensibili esperimenti potranno farlo ...

Figure from Giunti & Zavanin, arXiv:1508:03172



# Neutrini sterili e CPV: una nuova sfida per gli esperimenti long-baseline

# Matrice di mixing nello schema 3+1

$$U = \tilde{R}_{34} R_{24} \tilde{R}_{14} R_{23} \tilde{R}_{13} R_{12}$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} c_{ij} & s_{ij} \\ -s_{ij} & c_{ij} \end{bmatrix} \qquad \tilde{R}_{ij} = \begin{bmatrix} c_{ij} & \tilde{s}_{ij} \\ -\tilde{s}_{ij}^* & c_{ij} \end{bmatrix} \qquad \begin{array}{c} s_{ij} = \sin \theta_{ij} \\ c_{ij} = \cos \theta_{ij} \\ \tilde{s}_{ij} = s_{ij} e^{-i\delta_{ij}} \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} 3_{V} & \left\{ \begin{matrix} 3 \text{ angoli di mixing} \\ 1 \text{ fase di Dirac} \\ 2 \text{ fasi di Majorana} \end{matrix} \right. \begin{array}{c} 3+1 \\ 3 \\ \end{matrix} \right. \left\{ \begin{matrix} 6 \\ 3 \\ 3 \end{matrix} \right. \begin{array}{c} 3+N \\ 3 \\ \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} 3+3N \\ 1+2N \\ 2+N \end{matrix} \right\}$$

#### In generale abbiamo più sorgenti di CPV

# Una limitazione intrinseca degli SBL

#### Agli SBL le oscillazioni atm/sol sono trascurabili



Impossibile osservare fenomeni di interferenza tra la nuova frequenza ( $\Delta_{14} \sim 1$ ) e le frequenze atm/sol

Questo è rilevante perché abbiamo bisogno di osservare tali fenomeni per misurare le nuove fasi di CP indotte dagli stati sterili

Gli esperimenti long-baseline (LBL) ci vengono incontro

### Esperimenti LBL: T2K & NOvA



### Probabilità di transizione in 3-flavor

(come misuriamo  $\delta$ )

$$P^{3\nu}_{\nu_{\mu} \to \nu_{e}} = P^{\text{ATM}} + P^{\text{SOL}} + P^{\text{INT}}$$

#### nel vuoto:

$$P^{\text{ATM}} = 4s_{23}^2 s_{13}^2 \sin^2 \Delta$$
  

$$P^{\text{SOL}} = 4c_{12}^2 c_{23}^2 s_{12}^2 (\alpha \Delta)^2$$
  

$$P^{\text{INT}} = 8s_{23}s_{13}c_{12}c_{23}s_{12}(\alpha \Delta) \sin \Delta \cos(\Delta + \delta_{CP}).$$

$$\Delta = \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}, \qquad \alpha = \frac{\Delta m_{21}^2}{\Delta m_{31}^2} \qquad \qquad \Delta \sim \pi/2$$
$$\alpha \sim 0.03$$

**PATM** leading  $\rightarrow \theta_{13} > 0$ 

**PINT subleading**  $\rightarrow$  dipendenza da  $\delta$ 

**P<sup>SOL</sup>** trascurabile

#### Gli effetti di materia rompono la degenerazione tra NH & IH



### Prime indicazioni su CPV & MH



A.P., arXiv: 1509.03148 to appear in PLB

- Lieve preferenza per CPV (90% C.L.)
- IH leggermente sfavorita rispetto a NH (90% C.L.)

### Probabilità di transizione nello schema 3+1

- $\Delta_{14}$  >> 1 : oscillazioni veloci sono mediate
- Informazione su  $\Delta m_{14}^2$  persa (differentemente dagli SBL)
- Differentemente da SBL, interferenza di  $\Delta_{14}$  &  $\Delta_{13}$  osservabile

$$P_{\mu e}^{4\nu} \simeq P^{\text{ATM}} + P_{\text{I}}^{\text{INT}} + P_{\text{II}}^{\text{INT}}$$

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{13} \sim \mathbf{S}_{14} \sim \mathbf{S}_{24} \sim 0.15 \sim \varepsilon \\ \alpha = \delta \mathbf{m}^2 / \Delta \mathbf{m}^2 \sim 0.03 \sim \varepsilon^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} P^{\text{ATM}} \simeq 4s_{23}^2 s_{13}^2 \sin^2 \Delta & \mathbf{O}(\varepsilon^2) \\ P_{\text{I}}^{\text{INT}} \simeq 8s_{13} s_{23} c_{23} s_{12} c_{12}(\alpha \Delta) \sin \Delta \cos(\Delta + \delta_{13}) & \mathbf{O}(\varepsilon^3) \\ P_{\text{II}}^{\text{INT}} \simeq 4s_{14} s_{24} s_{13} s_{23} \sin \Delta \sin(\Delta + \delta_{13} - \delta_{14}) & \mathbf{O}(\varepsilon^3) \end{cases}$$

#### Sensibilità alla nuova fase di CP $\delta_{14}$

#### Un nuovo termine di interferenza nello schema 3+1





 $3\nu$  limit

### Impatto sul numero di eventi attesi



Figura da Agarwalla, Chatterjee, Dasgupta, A.P., JHEP 02 (2016) 111



- Per  $\delta_{14} = \frac{1}{\pi}/2$  perfetto accordo tra LBL & Reattori
- Quindi la preferenza per NH svanisce nello schema 3+1
- Neutrini sterili -> fragilità dei LBL nella ricerca della MH? ...

### T2K+NOvA: Potenziale di scoperta della MH





#### Sostanziale deterioramento nello schema 3+1

### DUNE: Potenziale di scoperta della MH



Agarwalla, Chatterjee, A.P., arXiv: 1603.03759

#### **Deterioramento ma sensibilità a livello di 4** $\sigma$ preservata

### Fasi di CP: stato presente (dati esistenti)



- Simile sensibilità a  $\delta_{13} e \, \delta_{14}$
- Valori di best fit:  $\delta_{13} \sim \delta_{14} \sim -\pi/2$
- Questa informazione non può essere estratta dagli SBL!

### Quale potrebbe essere lo stato futuro?



Agarwalla, Chatterjee, A.P., arXiv: 1603.03759

### **T2K+NOVA: CPV discovery potential**



#### Sostanziale deterioramento nello schema 3+1

# **DUNE: CPV discovery potential**





- Sensibilità alla CPV  $\delta_{13}$ -indotta ridotta nello schema 3+1
- Potenziale sensibilità anche alle nuove fasi  $\delta_{14} e \delta_{34}$
- Gerarchia nelle sensibilità:  $\delta_{13}$ > $\delta_{14}$ > $\delta_{34}$  per  $\theta_{14}$ = $\theta_{24}$ = $\theta_{34}$ = $\theta_{34}$ = $\theta_{90}$

# Conclusioni

- Diverse anomalie osservate agli esperimenti SBL suggeriscono l'esistenza di neutrini sterili leggeri
- L'interpretazione delle anomalie non è chiara
- Nuovi esperimenti SBL sono necessari. Essi daranno presto nuove preziose informazioni
- I neutrini sterili sono sorgenti addizionali di CPV
- Gli esperimenti LBL (presenti e futuri) offrono l'opportunità di studiare le nuove fasi di CPV

### Stiamo all'erta in vista di nuove scoperte!



Gianini & Luzzati, Omaggio a Rossini, L'italiana in Algeri (1968)

31/03/16

# **Back up slides**

### New-generation detectors confirm deficit

Daya Bay @ Neutrino 2014 & ICHEP 2014



Definitive results appeared 3 weeks ago on arXiv:1508.04233

However, the same detectors give us a warning...

### Understanding of rea. spectrum is incomplete



Shoulder at 4-6 MeV observed in all the three experiments Identical at Near & Far sites: not imputable to new osc. physics  $\theta_{13}$  extraction is unaffected (based on near/far comparison)

# Discrepancy under active investigation



- Systematics in reactor spectra not entirely under control
- Dissimilar results with two different nuclear databases
- Normalization & spectral issues not necessarily related
- New SBL experiments needed to shed light on both issues

### Other potential windows onto sterile vs

# What solar exp. have to say on vss?



• Solar +  $\theta_{13}$  reactors:

 $\sin^2 \theta_{14} < 0.04 \quad (90\% \text{ C.L.})$ 

- Bound indep. of reactor fluxes (KamLAND only shape)
- It constitutes the only robust information on  $|U_{e4}|^2$

### Information from atmospheric v in IceCube

#### Smoking gun: Dip at E ~ TeV due to MSW resonance

Nunokawa, Peres, Zuchanovich-Funchal PLB 562, 279 (2003)  $\Delta m^2_{41} = 1 \ {
m eV}^2$ 



Figures from Esmaili & Smirnov JHEP 1312, 014 (2013)

# Impact of a light sterile neutrino in $\beta$ -decay





$$m_{\beta\beta} = \left| \sum U_{ei}^2 m_i \right| = \left| c_{12}^2 c_{13}^2 c_{14}^2 m_1 + s_{12}^2 c_{13}^2 c_{14}^2 m_2 e^{i\alpha} + s_{13}^2 c_{14}^2 m_3 e^{i\beta} + s_{14}^2 m_4 e^{i\gamma} \right|$$





# What cosmology tells us?

Planck (2015)



Small room for extra relativistic content

- A "standard" eV sterile neutrino fully thermalizes ( $\Delta N_{eff} = 1$ )
- $\Delta N_{eff} = 0$  requires a mechanism that prevents thermalization
- Several possibilities (lepton asymmetry, self-interactions, ...)

The 3-flavor scheme



# Fitting the reactor anomaly with sterile vs



Mention et al., PRD 83 073006 (2011)



$$\Delta_{ij} = \frac{\Delta m^{2}_{ij} L}{4E} \begin{bmatrix} A_{\alpha\beta}^{CP} \equiv P(\nu_{\alpha} \to \nu_{\beta}) - P(\bar{\nu}_{\alpha} \to \bar{\nu}_{\beta}) \\ A_{\alpha\beta}^{CP} = -16J_{\alpha\beta}^{12} \sin \Delta_{21} \sin \Delta_{13} \sin \Delta_{32} \end{bmatrix}$$

$$J_{\alpha\beta}^{ij} \equiv \operatorname{Im} \left[ U_{\alpha i} U_{\beta j} U_{\alpha j}^* U_{\beta i}^* \right] \equiv J \sum_{\gamma = e, \mu, \tau} \epsilon_{\alpha\beta\gamma} \sum_{k=1,2,3} \epsilon_{ijk}$$

J is parameterization independent (Jarlskog invariant)

#### In the standard parameterization:

 $J = \frac{1}{8}\sin 2\theta_{12}\sin 2\theta_{23}\sin 2\theta_{13}\cos \theta_{13}\sin \delta$ 

Conditions for CPV:  
- No degenerate 
$$(v_i, v_j)$$
 /  
- No  $\theta_{ij} = (0, \pi/2)$  /  
-  $\delta \neq (0, \pi)$  ?

$$A_{\alpha\beta}^{\rm CP} \equiv P(\nu_{\alpha} \to \nu_{\beta}) - P(\bar{\nu}_{\alpha} \to \bar{\nu}_{\beta})$$

$$\begin{split} A^{\rm CP}_{\alpha\beta} &= -16J^{12}_{\alpha\beta}\sin\Delta_{21}\sin\Delta_{13}\sin\Delta_{32} \\ \text{if} \quad \Delta \equiv \Delta_{13} \simeq \Delta_{23} \gg 1 \\ \text{Osc. averaged out by finite E resol.} \quad \rightarrow \quad \langle \sin^2 \Delta \rangle = 1/2 \\ \text{It can be:} \quad A^{\rm CP}_{\alpha\beta} \neq 0 \quad \text{(if sin } \delta \neq \text{o}) \end{split}$$

The bottom line is that if one of the three v<sub>i</sub> is ∞ far from the other two ones this does not erase CPV (relevant for the 4v case)

Numerical examples of 4v probability





The fast oscillations get averaged out due to the finite energy resolution Different line styles  $\Leftrightarrow$ Different values of  $\delta_{14}$ 

The modifications induced by  $\delta_{14}$  are as large as those induced by the standard CP-phase  $\delta_{13}$ Pure Conversion Probability : NH,  $s_{14}^2 = s_{24}^2 = 0.025$  the standard CP-phase  $\delta_{13}$ Pure Conversion Probability analog and conclusions for NOvA Antonio Palazzo, UNIBA & INFN  $\delta_{15} = \pi$   $\delta_{15} = -\frac{\pi}{2}$ 



- LBL combination more stable than T2K alone