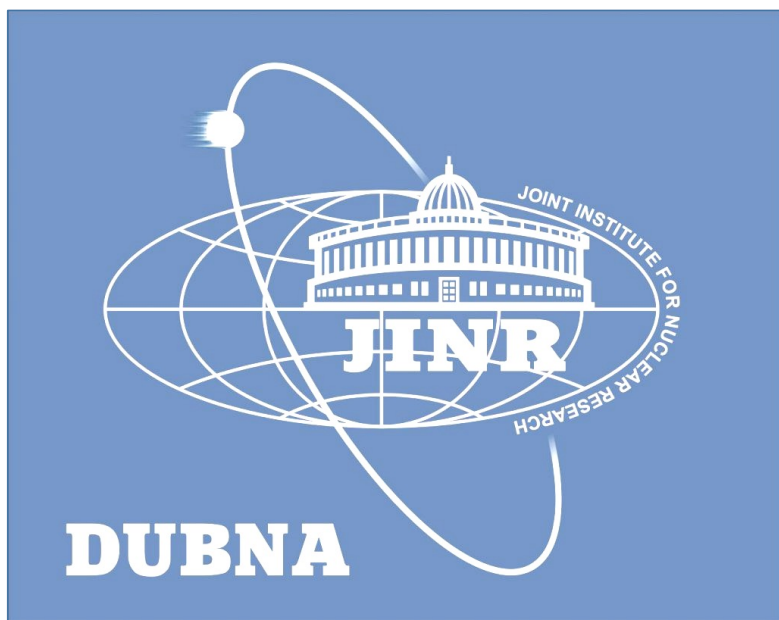


Status of known and unknown 3ν parameters, circa 2018

Eligio Lisi
INFN, Bari, Italy



JINR, Dubna, Russia (Sept. 21st, 2018) - 124th Session of the Scientific Council

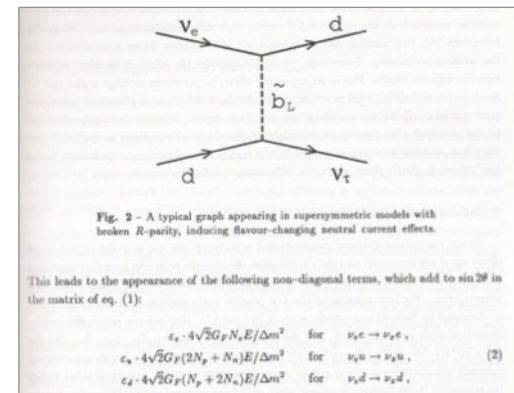
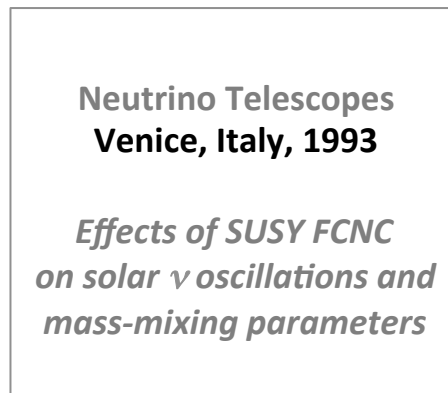
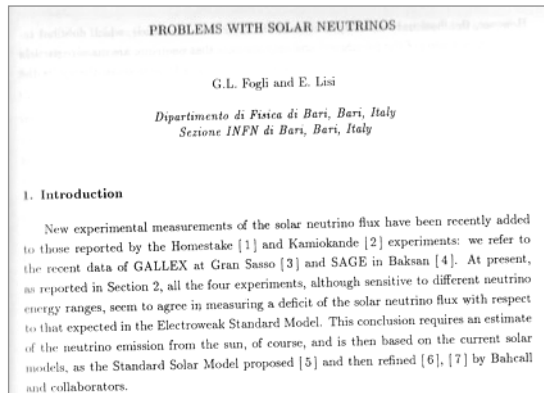
PROLOGUE

I am deeply honored to receive the Bruno Pontecorvo Prize together with Gianluigi Fogli, for our contributions to the global analysis of neutrino oscillation data from different experiments.

PROLOGUE

I am deeply honored to receive the Bruno Pontecorvo Prize together with Gianluigi Fogli, for our contributions to the global analysis of neutrino oscillation data from different experiments.

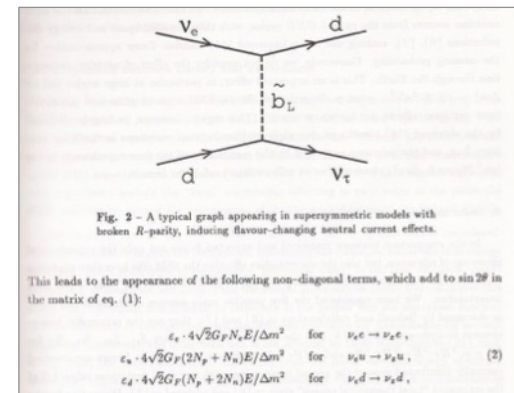
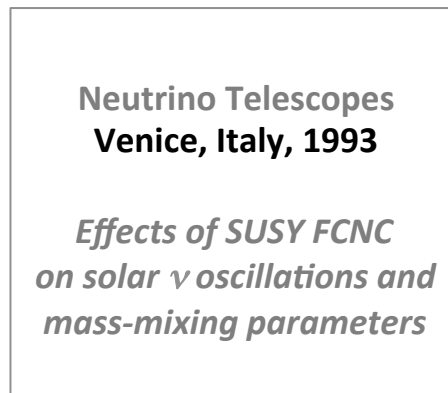
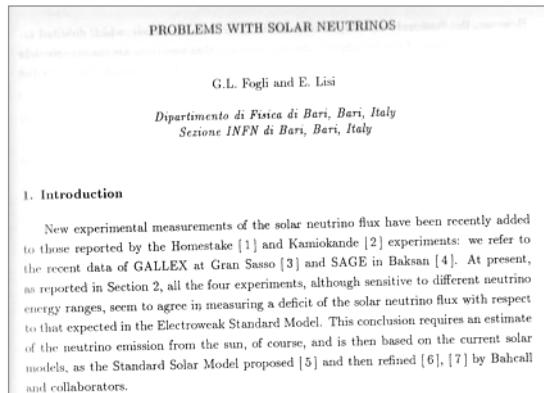
Our journey in ν physics started 25 years ago, at the end of my PhD [that had been dedicated to (non)standard EW precision data analyses at 1-loop]
The absence of hints for new physics at LEP led us to explore ν 's ...



PROLOGUE

I am deeply honored to receive the Bruno Pontecorvo Prize together with Gianluigi Fogli, for our contributions to the global analysis of neutrino oscillation data from different experiments.

Our journey in ν physics started 25 years ago, at the end of my PhD [that had been dedicated to (non)standard EW precision data analyses at 1-loop] The absence of hints for new physics at LEP led us to explore ν 's ...



... and to attract a number of outstanding students – that have become accomplished researchers or professionals – forming the so-called “Neutrino Bari Group”, as mentioned in the Jury’s extended motivation:

*“The International Jury... has resolved to award the Bruno Pontecorvo Prize for 2017 to a group of authors including: Professor **FOGLI Gianluigi** (University and INFN, Bari, Italy) and Professor **LISI Eligio** (INFN, Bari, Italy) for pioneering contribution to the development of global analysis of neutrino oscillation data from different experiments”*

*“The International Jury... has resolved to award the Bruno Pontecorvo Prize for 2017 to a group of authors including: Professor **FOGLI Gianluigi** (University and INFN, Bari, Italy) and Professor **LISI Eligio** (INFN, Bari, Italy) for pioneering contribution to the development of global analysis of neutrino oscillation data from different experiments”*

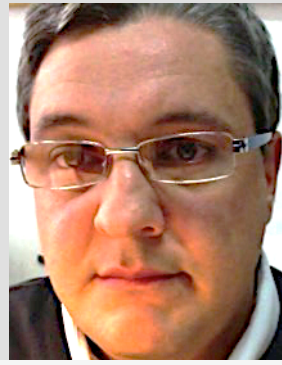
“Neutrino Bari Group”



G.L. FOGLI



E. LISI



D. MONTANINO



G. SCIOSCIA



A. MARRONE



A. PALAZZO



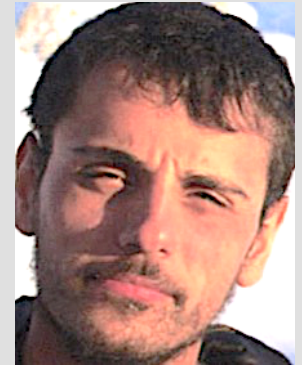
A.M. ROTUNNO



A. MIRIZZI



I. TAMBORRA



F. CAPOZZI

*“The International Jury... has resolved to award the Bruno Pontecorvo Prize for 2017 to a group of authors including: Professor **FOGLI Gianluigi** (University and INFN, Bari, Italy) and Professor **LISI Eligio** (INFN, Bari, Italy) for pioneering contribution to the development of global analysis of neutrino oscillation data from different experiments”*

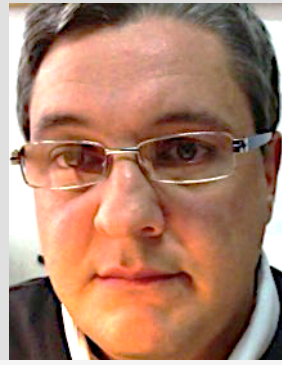
“Neutrino Bari Group”



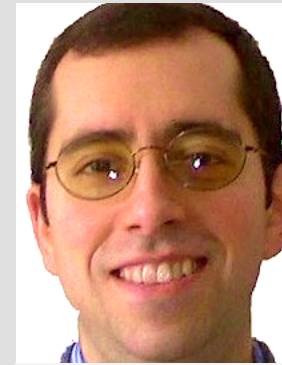
G.L. FOGLI



E. LISI



D. MONTANINO



G. SCIOSCIA



A. MARRONE



A. PALAZZO



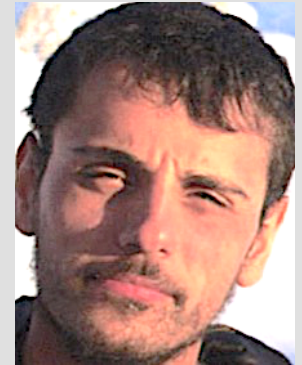
A.M. ROTUNNO



A. MIRIZZI



I. TAMBORRA



F. CAPOZZI

Today's award is a great honor for the whole group!

In the 90's, the Bari research activity in the theory and phenomenology of neutrino masses and mixings was built from scratch.

However, there was already an experimental tradition in neutrino physics: Gargamelle and MACRO detectors, CHORUS proposal...

In the 90's, the Bari research activity in the theory and phenomenology of neutrino masses and mixings was built from scratch.

However, there was already an experimental tradition in neutrino physics: Gargamelle and MACRO detectors, CHORUS proposal...

Indeed, the experimental groups had also invited **Bruno Pontecorvo in Bari**, where he gave a public Colloquium at the Piccinni Theater on **March 23rd, 1990**

He talked about his experience as one of the “Via Panisperna boys” (“ragazzi”) - the famous group led by Enrico Fermi in Rome.



from Gazzetta del Mezzogiorno

14 Martedì 20 Marzo 1990

A

A Bari, domani, Bruno Pontecorvo

Il ragazzo Enrico tra i ragazzi

Il grande fisico ricorderà il sodalizio con Fermi e gli altri «di via Panisperna»

di Carlo De Marzo

Ricca e affascinante è la biografia di Bruno Pontecorvo, uno dei protagonisti della Fisica di questo secolo. Pontecorvo si laureò a Roma nel 1933 sotto la guida di Fermi, con cui continuò a lavorare fino alla partenza del maestro per gli Stati Uniti, nel '38. La conferenza su «Fermi e la Fisica di oggi» che Pontecorvo terrà domani a Bari per i «mercoledì letterari» è pertanto una testimonianza di prima mano su un aspetto importante di quel mitico periodo della storia scientifica nazionale, che vide la nascita della scuola nazionale di Fisica.

Come molti suoi allievi hanno testimoniato, l'efficacia dell'insegnamento di Fermi nella formazione scientifica dei giovani fisici era straordinaria. Giunto a Roma alla fine del 1926, vincitore della cattedra di Fisica teorica presso quella Università, Fermi, partendo praticamente dal nulla, diede vita ad un gruppo di ricerca destinato ad acquistare risonanza internazionale. A quel tempo egli aveva più di venticinque anni, ossia praticamente coetaneo dei suoi primi allievi, da cui si distingueva per la maturità, il prestigio e quella grande passione per la scienza che sapeva comunicare, appagato, da maestro.

Sotto la guida di Fermi il metodo di lavoro all'Istituto fisico di Roma era particolarmente informale. Trascorrea la giornata negli impegni dell'attività sperimentale, nel tardo pomeriggio ci si riuniva nello studio del maestro per l'attività seminariale. Prendendo spunto dai fatti correnti la conversazione si tradiva

ma presto in una lezione. Gli argomenti allora di frontiera della ricerca in Fisica erano naturalmente i preferiti. In questo modo Fermi, che si teneva aggiornato attraverso la lettura regolare delle principali riviste scientifiche e soprattutto attraverso i contatti interpersonali con altri scienziati, informava gli ascoltatori sulle ultime novità e al tempo stesso dava le sue valutazioni e la sua interpretazione delle scoperte man mano che queste venivano annunciate.

Via via che il gruppo di Fermi acquistava notorietà internazionale, ai seminari dell'Istituto si aggiunsero partecipanti di altre sedi ed anche visitatori stranieri, tra cui non mancavano scienziati tra i più attivi nel settore della Fisica moderna. Un ruolo particolare vi svolse Ettore Majorana, che cominciò a frequentare il gruppo a partire dal '27, quando era ancora studente. Majorana era forse l'unico in grado di discutere con Fermi di problemi di fisica su un piano di parità. Di lui Fermi aveva la più alta opinione, ritenendolo il più grande fisico teorico dei nostri tempi. Ma il suo carattere difficile e scontroso impedì a Majorana di emergere tra i fondatori della fisica nucleare. Dopo il '32 lo si vide sempre più di rado fin quando, nel '38, sparì letteralmente, lasciando dietro di sé il mistero della sua scomparsa.

Apparve nel 1934 uno dei più fondamentali contributi



Domani a Bari (teatro Piccinni, ore 18), il fisico Bruno Pontecorvo parlerà sul tema: «Enrico Fermi e la fisica di oggi» nell'ambito dei «mercoledì letterari», organizzati dall'Associazione culturale italiana (Aci).

alla fisica nucleare, pubblicato da Fermi. Nacque allora la teoria della radioattività di tipo «beta», in cui entrò in gioco una delle forze fondamentali della natura, la forza nucleare debole». In questo lavoro, seguendo un suggerimento di Pauli, Fermi introdusse in Fisica il «neutrino» di cui prevede proprietà e modi di comportamento, si trattò di una previsione della tutto teorica, che dovette attendere più di vent'anni per essere verificata grazie a un esperimento di fisica subnucleare che rivelò concretamente come i neutrini fossero una realtà fisica.

Lo sviluppo delle ricerche nel campo della fisica moderna portarono il gruppo di Roma ad interessarsi sempre più alla fisica nucleare che divenne il suo principale tema di ricerca dopo il 1933. Ben presto il laboratorio dell'Istituto acquistò una posizione di primo piano in campo internazionale, producendo continue scoperte sul comportamento fisico dei «neutrini» e sulla possibilità di rallentarli. Sulle proprietà fisiche dei «neutrini rallentati» si baserà poi ogni sfruttamento dell'energia nucleare e gran parte dell'impegno scientifico e tecnico di Fermi dopo il suo trasferimento in America.

Come si sa Fermi si decise a lasciare l'Italia dopo la promulgazione delle leggi fasciste sulla razza nel luglio del 1938. La moglie Laura era di famiglia ebrea. Per questo, quando in ottobre si recò in Svezia per ritirare il premio Nobel, portò con sé tutta la famiglia. A cerimonia finita, anziché tornare in Italia, i Fermi si imbarcarono tutti per gli Stati Uniti. Non sarebbero tornati che dopo la fine della guerra e del regime.

In the 90's, the Bari research activity in the theory and phenomenology of neutrino masses and mixings was built from scratch.

However, there was already an experimental tradition in neutrino physics: Gargamelle and MACRO detectors, CHORUS proposal...

Indeed, the experimental groups had also invited **Bruno Pontecorvo in Bari**, where he gave a public Colloquium at the Piccinni Theater on **March 23rd, 1990**



He talked about his experience as one of the "Via Panisperna boys" ("ragazzi") - the famous group led by Enrico Fermi in Rome.

Unfortunately I missed that unique event, being committed elsewhere as Officer of the Italian Army, during the military service.

I'm glad to ideally meet Bruno here today!

from Gazzetta del Mezzogiorno

14 Martedì 20 Marzo 1990

A Bari, domani, Bruno Pontecorvo

Il ragazzo Enrico tra i ragazzi

Il grande fisico ricorderà il sodalizio con Fermi e gli altri «di via Panisperna»

di Carlo De Marzo

Ricca e affascinante è la biografia di Bruno Pontecorvo, uno dei protagonisti della Fisica di questo secolo. Pontecorvo si laureò a Roma nel 1933 sotto la guida di Fermi, con cui continuò a lavorare fino alla partenza del maestro per gli Stati Uniti, nel '38. La conferenza su «Fermi e la Fisica di oggi» che Pontecorvo terrà domani a Bari per i «mercoledì letterari» è pertanto una testimonianza di prima mano su un aspetto importante di quel mitico periodo della storia scientifica nazionale, che vide la nascita della scuola nazionale di Fisica.

Come molti suoi allievi hanno testimoniato, l'efficacia dell'insegnamento di Fermi nella formazione scientifica dei giovani fisici era straordinaria. Giunto a Roma alla fine del 1928, vincitore della cattedra di Fisica teorica presso quella Università, Fermi, partendo praticamente dal nulla, diede vita ad un gruppo di ricerca destinato ad acquistare risonanza internazionale. A quel tempo egli aveva più di venticinque anni, ossia praticamente coetaneo dei suoi primi allievi, da cui si distingueva per la maturità, il prestigio e quella grande passione per la scienza che sapeva comunicare, appunto, da maestro.

Sotto la guida di Fermi il metodo di lavoro all'Istituto fisico di Roma era particolarmente informale. Trascorrea la giornata negli impegni dell'attività sperimentale, nel tardo pomeriggio ci si riuniva nello studio del maestro per l'attività seminariale. Prendendo spunto dai fatti correnti la conversazione si trasferiva presto in una lezione. Gli argomenti allora di frontiera della ricerca in Fisica erano naturalmente i preferiti. In questo modo Fermi, che si teneva aggiornato attraverso la lettura regolare delle principali riviste scientifiche e soprattutto attraverso i contatti internazionali con altri scienziati, informava gli ascoltatori sulle ultime novità e al tempo stesso dava le sue valutazioni e la sua interpretazione delle scoperte man mano che queste venivano annunciate.

Via via che il gruppo di Fermi acquistava notorietà internazionale, ai seminari dell'Istituto si aggiunsero partecipanti di altre sedi ed anche visitatori stranieri, tra cui non mancavano scienziati tra i più attivi nel settore della Fisica moderna. Un ruolo particolare vi svolse Ettore Majorana, che cominciò a frequentare il gruppo a partire dal '27, quando era ancora studente. Majorana era forse l'unico in grado di discutere con Fermi di problemi di fisica su un piano di parità. Di lui Fermi aveva la più alta opinione, ritenendolo il più grande fisico teorico dei nostri tempi. Ma il suo carattere difficile e scontroso impedì a Majorana di emergere tra i fondatori della fisica nucleare. Dopo il '32 la si vide sempre più di rado fin quando, nel '38, sparì letteralmente, lasciando dietro di sé il mistero della sua scomparsa.

Appare nel 1934 uno dei più fondamentali contributi



Domani a Bari (teatro Piccinni, ore 18), il fisico Bruno Pontecorvo parlerà sul tema: «Enrico Fermi e la fisica di oggi» nell'ambito dei «mercoledì letterari», organizzati dall'Associazione culturale italiana (Aci).

alla fisica nucleare, pubblicata da Fermi. Nacque allora la teoria della radioattività di tipo «beta», in cui entrò in gioco una delle forze fondamentali della natura, la forza nucleare debole». In questo lavoro, seguendo un suggerimento di Pauli, Fermi introdusse in Fisica il «neutrino» di cui prevede proprietà e modi di comportamento, si trattò di una previsione del tutto teorica, che dovette attendere più di vent'anni per essere verificata grazie a un esperimento di fisica subnucleare che rivelò concretamente come i neutrini fossero una realtà fisica.

Lo sviluppo delle ricerche nel campo della fisica moderna portarono il gruppo di Roma ad interessarsi sempre più alla fisica nucleare che divenne il suo principale tema di ricerca dopo il 1933. Ben presto il laboratorio dell'Istituto acquistò una posizione di primo piano in campo internazionale, producendo continue scoperte sul comportamento fisico dei «neutroni» e sulla possibilità di rallentarli. Sulle proprietà fisiche dei «neutroni rallentati» si baserà poi ogni sfruttamento dell'energia nucleare e gran parte dell'impegno scientifico e tecnico di Fermi dopo il suo trasferimento in America.

Come si sa Fermi si decise a lasciare l'Italia dopo la promulgazione delle leggi fasciste sulla razza nel luglio del 1938. La moglie Laura era di famiglia ebrea. Per questo, quando in ottobre si recò in Svezia per ritirare il premio Nobel, partì con sé tutta la famiglia. A cerimonia finita, anziché tornare in Italia, i Fermi si imbarcarono tutti per gli Stati Uniti. Non sarebbero tornati che dopo la fine della guerra e del regime.

3ν paradigm: parameters

Mixings and phases: **CKM** → **PMNS** (Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata)

$$U_{\alpha i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha/2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\beta/2} \end{bmatrix}$$

2-3 rotation

1-3 rotation
+ CPV “Dirac” phase

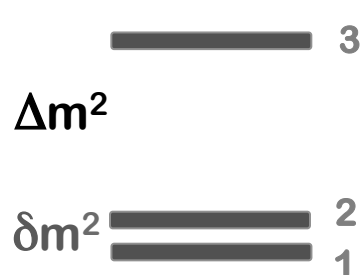
1-2 rotation

Extra CPV phases
[if Majorana]
not tested in oscillat.

Mass [squared] spectrum

($E \sim p + m^2/2E + \text{“interaction energy”}$)

“Normal”
Ordering
N.O.

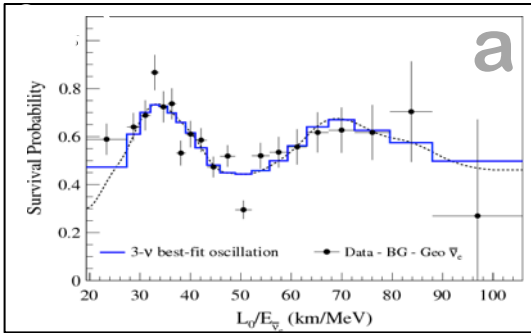


“Inverted”
Ordering
I.O.

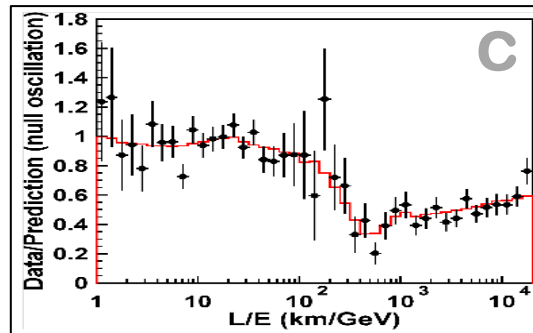
+ interactions in matter → effective terms $\sim G_F \cdot E \cdot \text{density}$
+ absolute mass scale (not tested in oscillations)

ν flavor oscillation experiments: $\alpha \rightarrow \beta$ in vacuum and matter

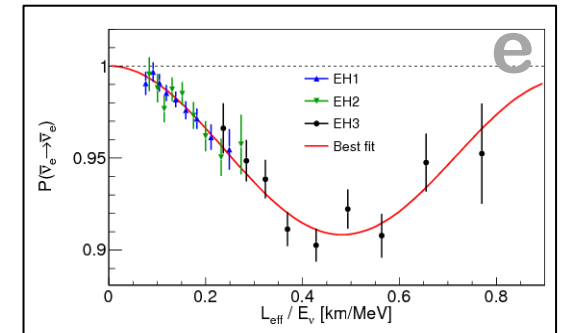
$e \rightarrow e$ (KamLAND)



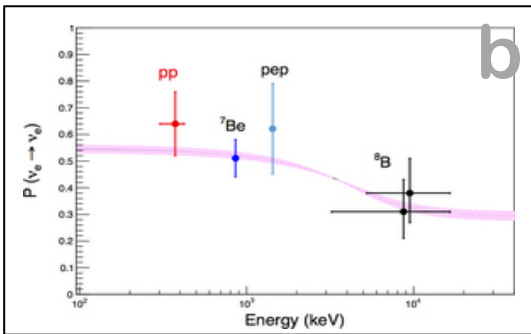
$\mu \rightarrow \mu$ (Atmospheric)



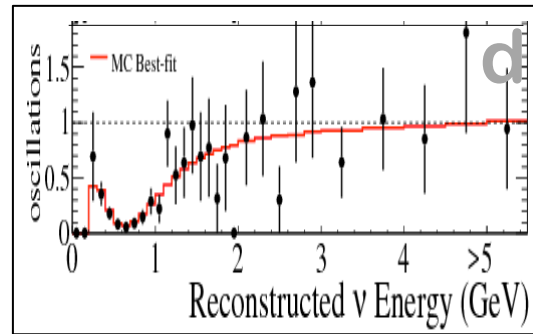
$e \rightarrow e$ (SBL Reac.)



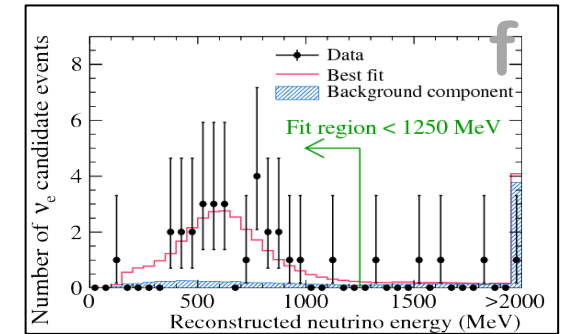
$e \rightarrow e$ (Solar)



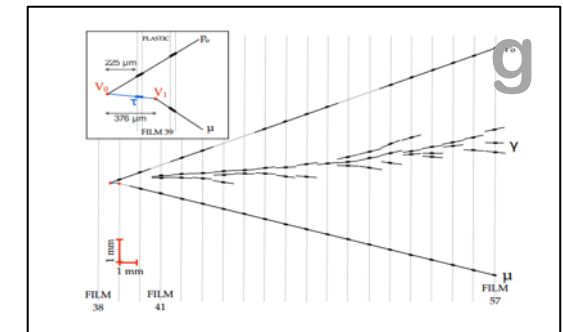
$\mu \rightarrow \mu$ (LBL Accel)



$\mu \rightarrow e$ (LBL Accel)



$\mu \rightarrow \tau$ (OPERA, SK)

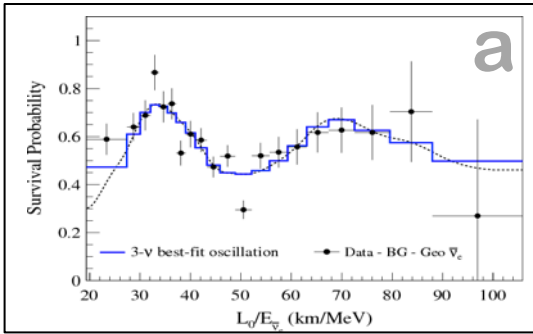


Data from various types of neutrino experiments: (a) solar, (b) long-baseline reactor, (c) atmospheric, (d) long-baseline LBL accelerator, (e) short-baseline SBL reactor, (f,g) long baseline accelerator (and, in part, atmospheric).

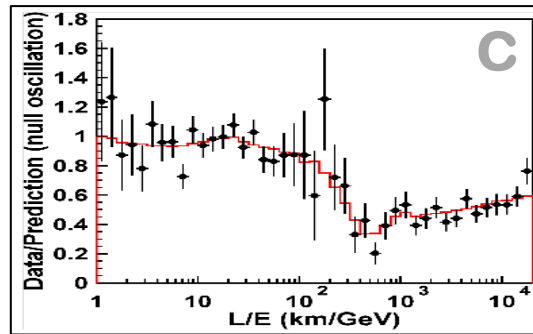
(a) KamLAND [plot]; (b) Borexino [plot], Homestake, Super-K, SAGE, GALLEX/GNO, SNO; (c) Super-K atmosph. [plot], DeepCore, MACRO, MINOS etc.; (d) T2K (plot), NOvA, MINOS, K2K; (e) Daya Bay [plot], RENO, Double Chooz; (f) T2K [plot], MINOS, NOvA; (g) OPERA [plot], Super-K atmospheric.

Leading sensitivities to 3ν oscillation parameters:

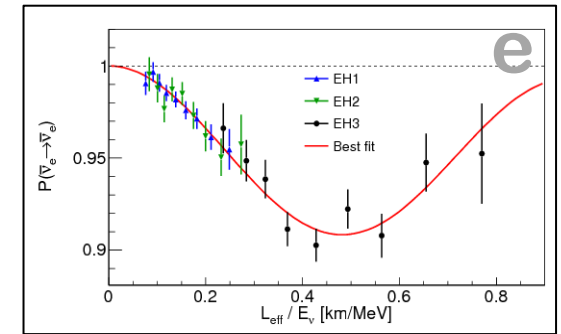
$e \rightarrow e$ ($\delta m^2, \theta_{12}$)



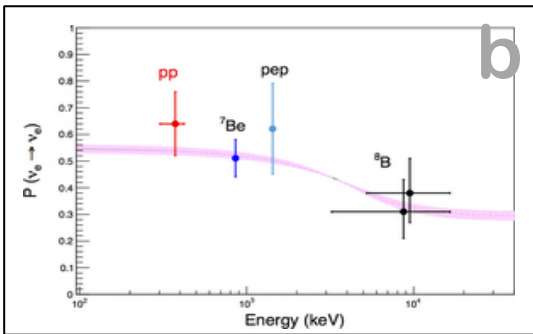
$\mu \rightarrow \mu$ ($\Delta m^2, \theta_{23}$)



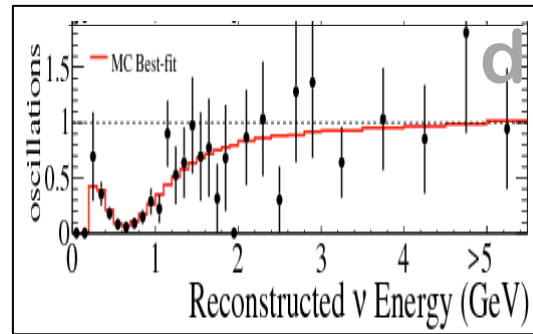
$e \rightarrow e$ ($\Delta m^2, \theta_{13}$)



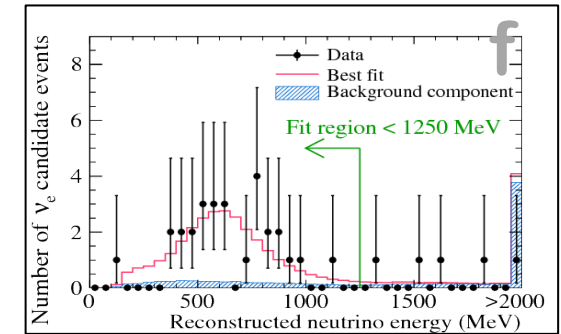
$e \rightarrow e$ ($\delta m^2, \theta_{12}$)



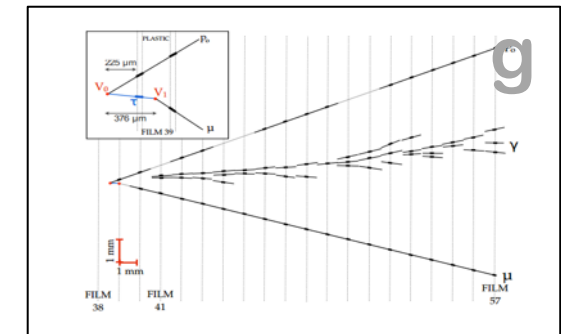
$\mu \rightarrow \mu$ ($\Delta m^2, \theta_{23}$)



$\mu \rightarrow e$ ($\Delta m^2, \theta_{13}, \theta_{23}$)



$\mu \rightarrow \tau$ ($\Delta m^2, \theta_{23}$)



... + subleading sensitivities to **CPV** and **NO vs IO** difference, essentially via $\mu \rightarrow e$ channel in LBL accel. and atmosph. expts

“Broad-brush” 3ν picture (with 1-digit accuracy)

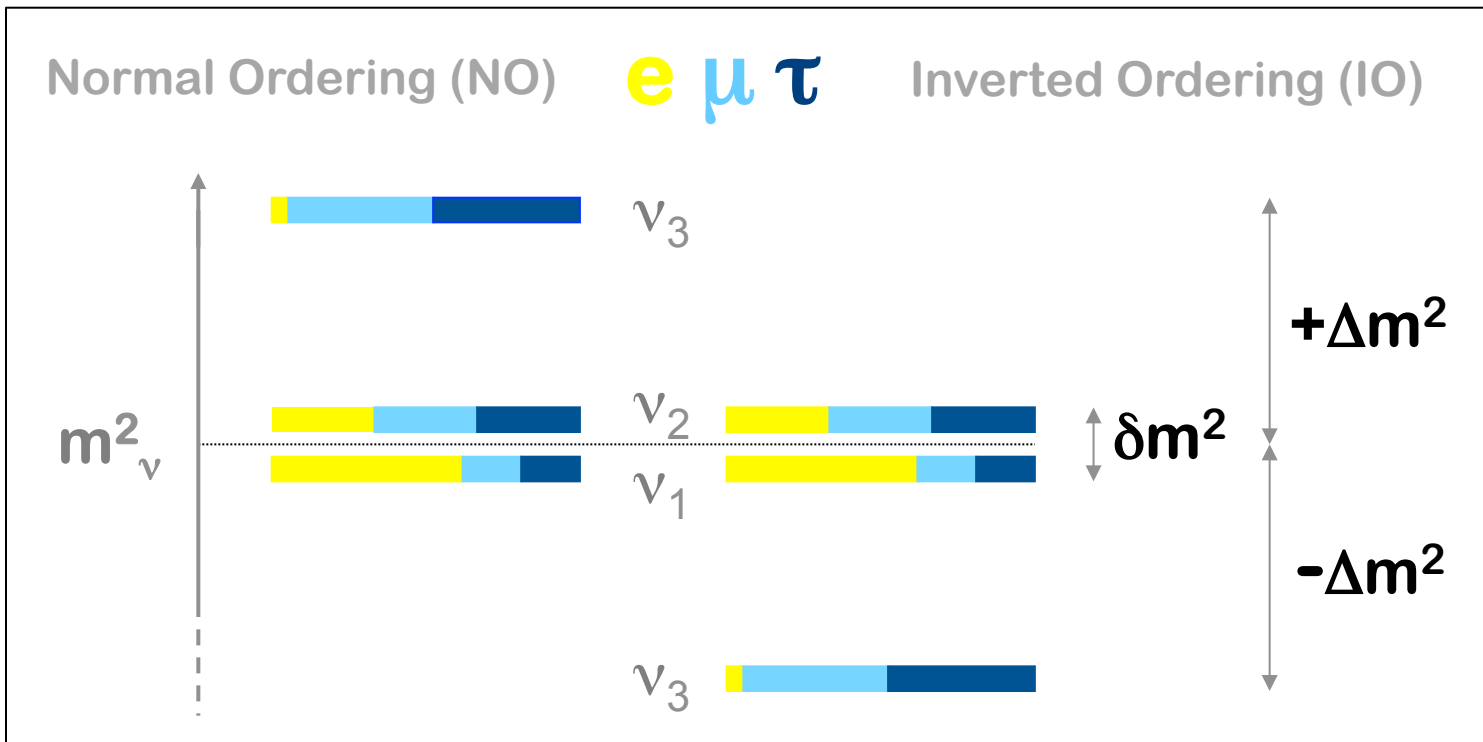
Knowns:

$\delta m^2 \sim 7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
 $\Delta m^2 \sim 2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 $\sin^2 \theta_{12} \sim 0.3$
 $\sin^2 \theta_{23} \sim 0.5$
 $\sin^2 \theta_{13} \sim 0.02$



Unknowns:

$\delta = \text{Dirac CPV phase}$
 $\text{sign}(\Delta m^2) = \text{ordering}$
 $\text{octant}(\theta_{23})$
 absolute mass scale
 Dirac/Majorana nature



Hi-res, larger picture → Global analysis of ν oscillation data



Analysis includes increasingly rich oscillation data sets:

LBL Accel + Solar + KL (KamLand)

LBL Accel + Solar + KL + SBL Reactor

LBL Accel + Solar + KL + SBL Reactor + Atmosph.

χ^2 metric adopted. Parameters not shown are marginalized away:

C.L.'s refer to $N\sigma = \sqrt{\Delta\chi^2} = 1, 2, 3, \dots$

LBL accelerators (T2K and NOvA) are dominantly sensitive to (Δm^2 , θ_{13} , θ_{23}) but also probe δ and **NO vs IO**, provided that (δm^2 , θ_{12}) are fixed by **solar+KL**.

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq & \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \left(\frac{\Delta m^2}{A - \Delta m^2} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{A - \Delta m^2}{4E} x \right) \\
 & + \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \left(\frac{\delta m^2}{A} \right) \left(\frac{\Delta m^2}{A - \Delta m^2} \right) \sin \left(\frac{A}{4E} x \right) \sin \left(\frac{A - \Delta m^2}{4E} x \right) \cos \left(\frac{\Delta m^2}{4E} x \right) \cos \delta \\
 & - \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \left(\frac{\delta m^2}{A} \right) \left(\frac{\Delta m^2}{A - \Delta m^2} \right) \sin \left(\frac{A}{4E} x \right) \sin \left(\frac{A - \Delta m^2}{4E} x \right) \sin \left(\frac{\Delta m^2}{4E} x \right) \sin \delta \\
 & + \cos^2 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \left(\frac{\delta m^2}{A} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{A}{4E} x \right) , \tag{13}
 \end{aligned}$$

where $A = 2\sqrt{2}G_F N_e E$ governs matter effects, with $A \rightarrow -A$ and $\delta \rightarrow -\delta$ for $\nu \rightarrow \bar{\nu}$, and $\Delta m^2 \rightarrow -\Delta m^2$ for normal to inverted ordering. At typical NOvA energies ($E \sim 2$ GeV) it is $|A/\Delta m^2| \sim 0.2$,

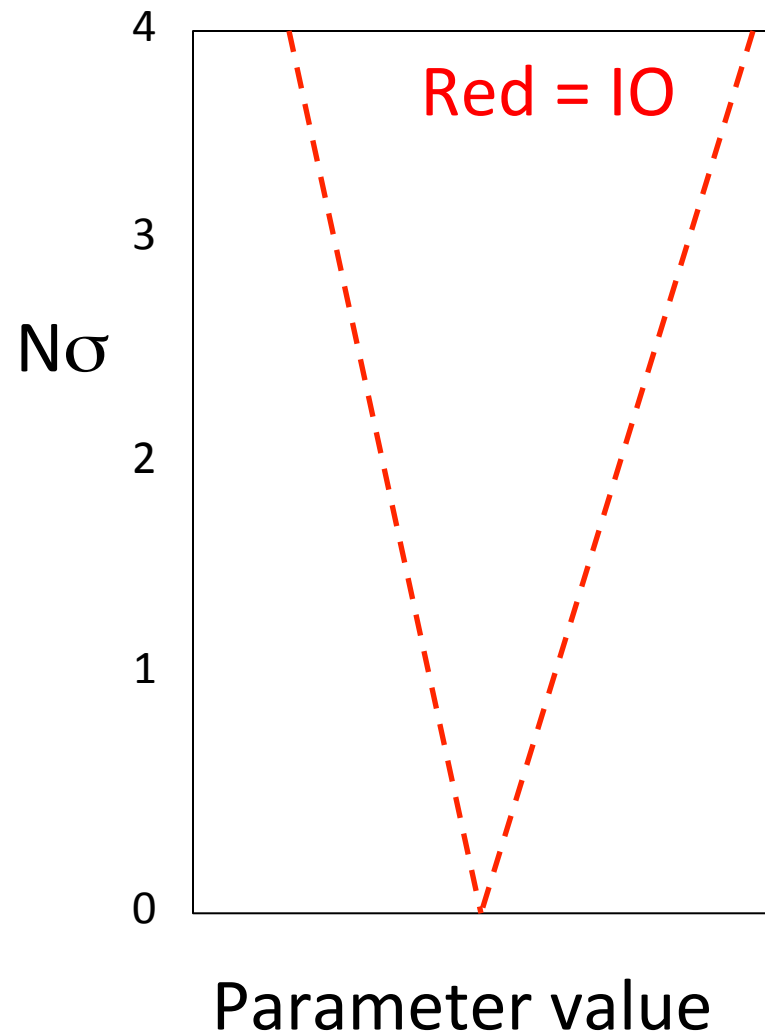
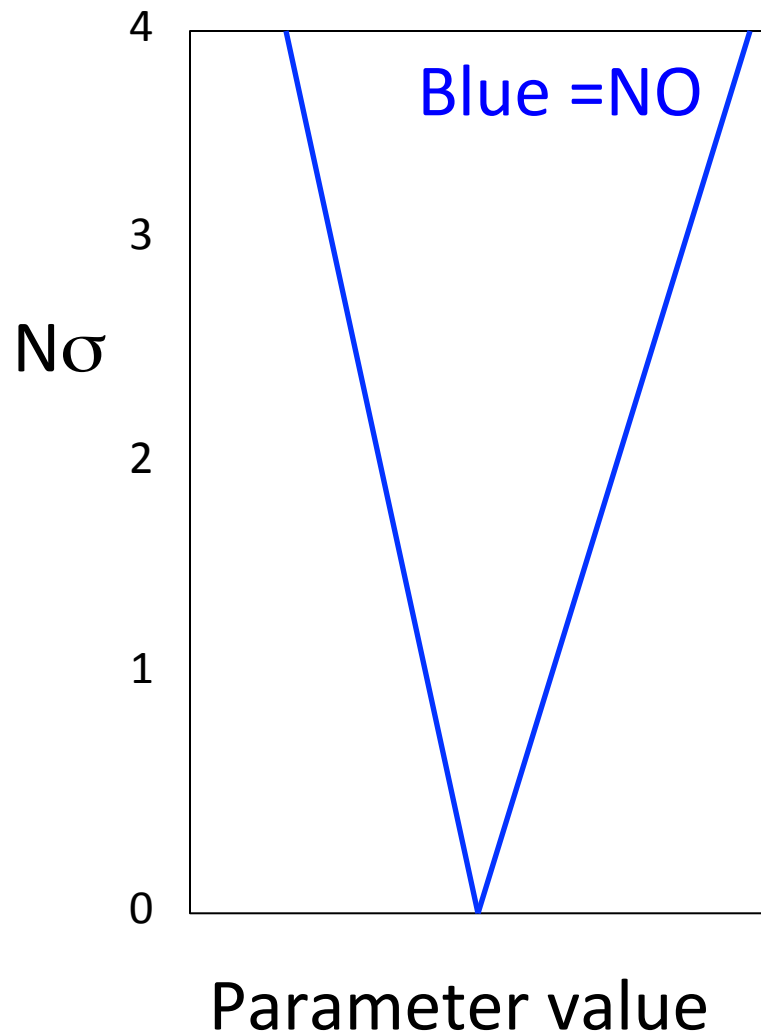
[Hereafter: $\Delta m^2 = (\Delta m^2_{31} + \Delta m^2_{32})/2$]

SBL reactors (Daya Bay, RENO, Double Chooz) are dominantly sensitive to (Δm^2 , θ_{13}) and shrink the θ_{13} range dramatically, with **correlated effects** on the other parameters

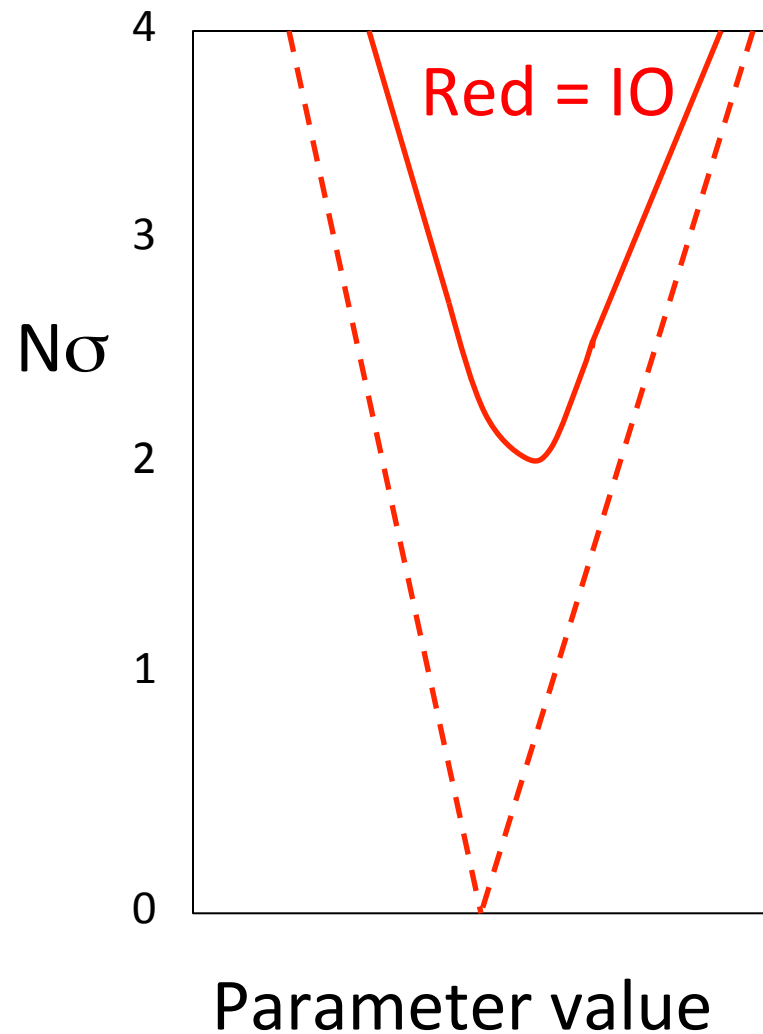
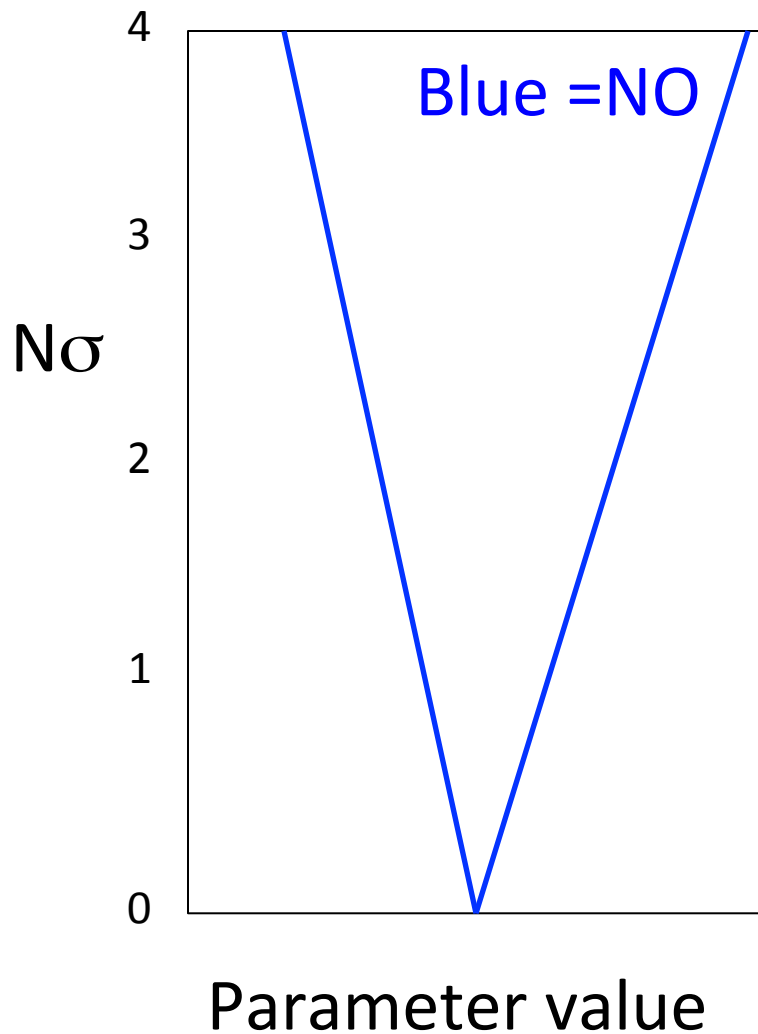
Atmospheric ν searches (mainly Super-Kamiokande) also contribute to probe and to constrain (Δm^2 , θ_{13} , θ_{23} , δ) as well as testing **NO vs IO**.

Relevant new result (2017-2018): Hints for CPV and Normal Ordering (NO)

In the following figures: Typical bounds would be \sim linear and symmetric for \sim gaussian errors around the **separate best fits for both NO and IO.**

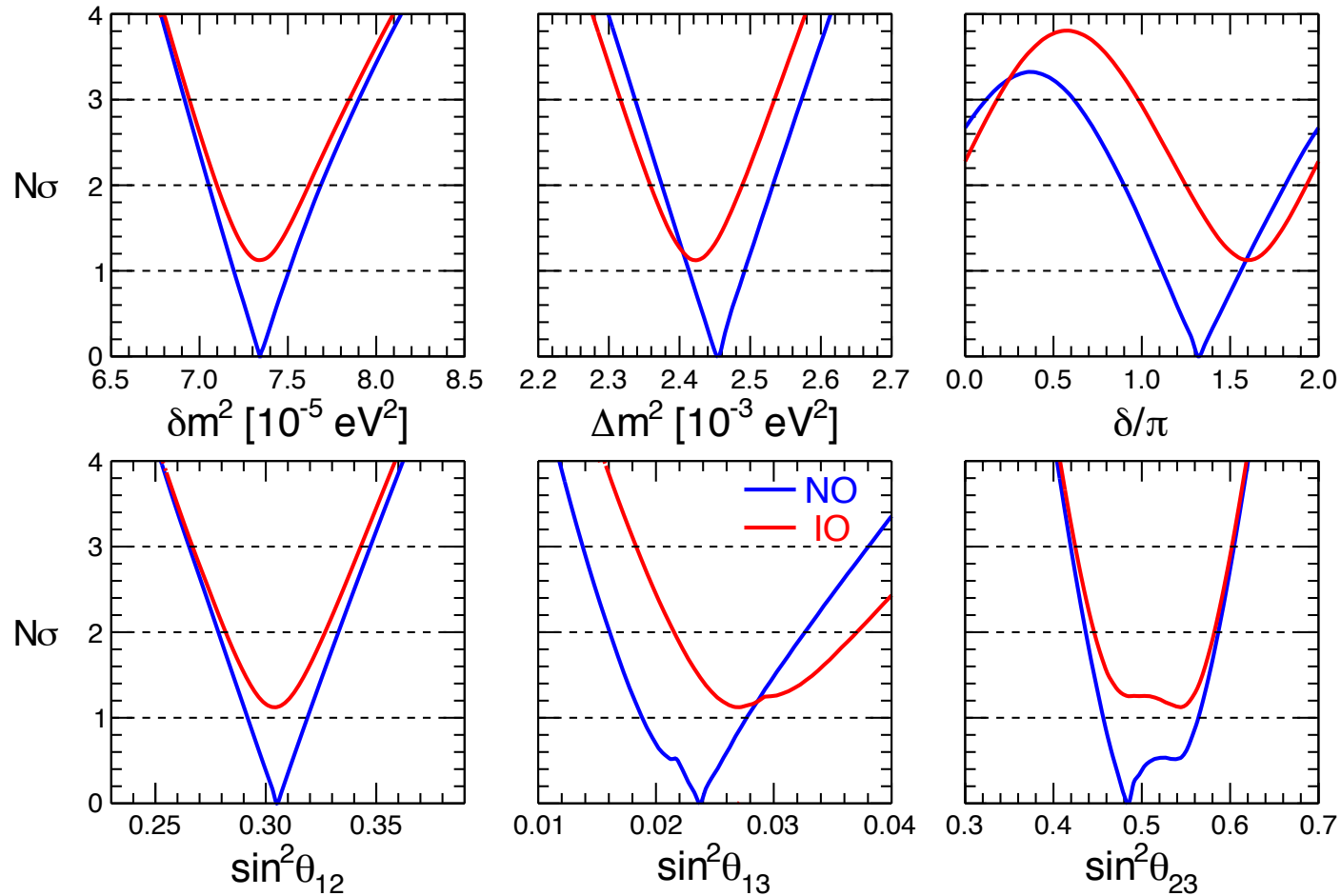


However, **bounds for IO move upwards** if one takes into account that currently **NO** gives the absolute best fit. Recall: $N\sigma = \sqrt{\Delta\chi^2} = 1, 2, 3\dots$



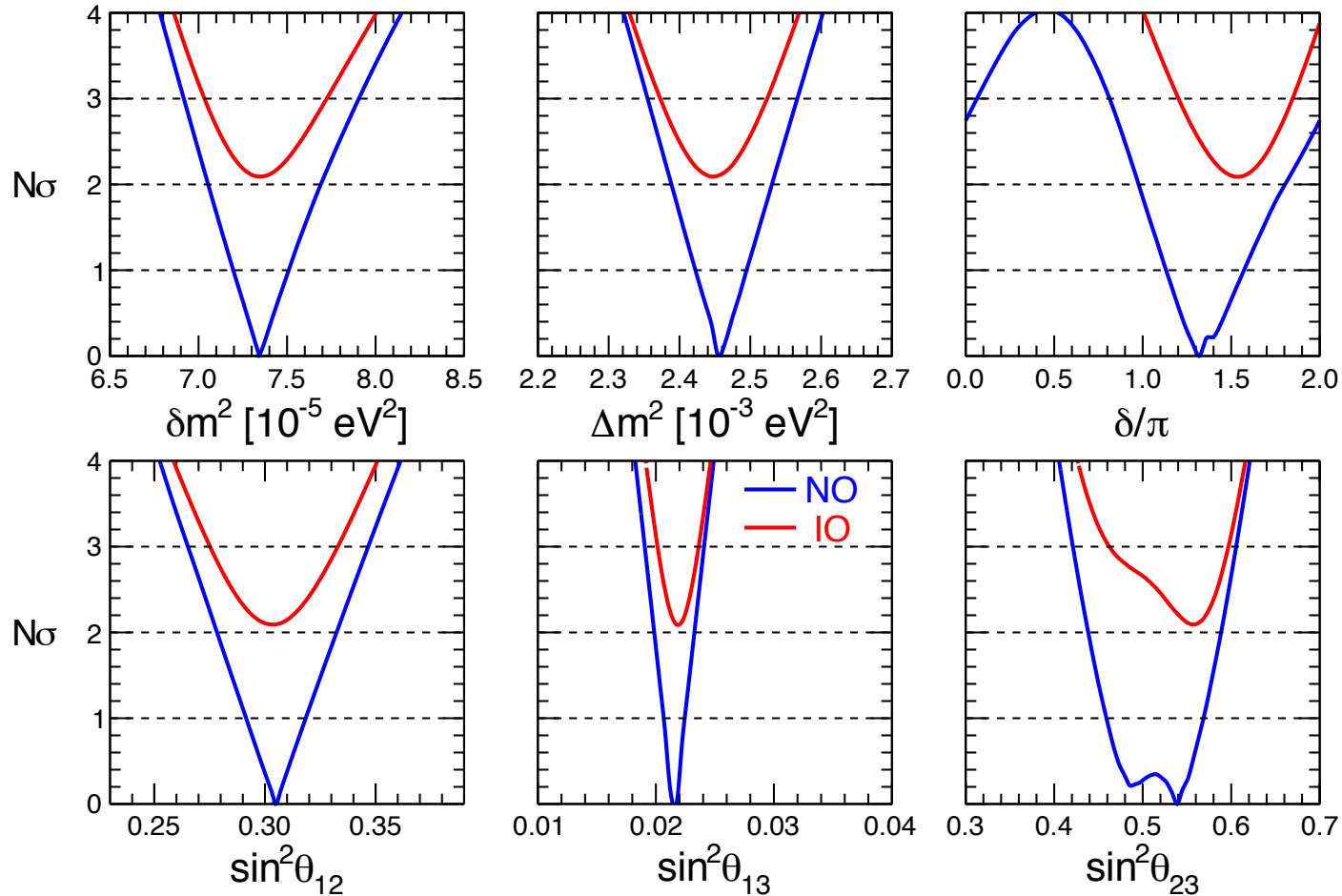
Results from real data →

LBL Acc + Solar + KamLAND



The 2 mass² parameters and the 3 mixing angles bound at $>4\sigma$ level.
 Largest mixing angle θ_{23} close to $\pi/4$, but octant undetermined at 1σ .
 CP phase favored around $3\pi/2$ (max CPV with $\sin\delta \sim -1$).
 IO slightly disfavored with respect to NO at $\sim 1\sigma$ level.

LBL Acc + Solar + KamLAND + SBL Reactors



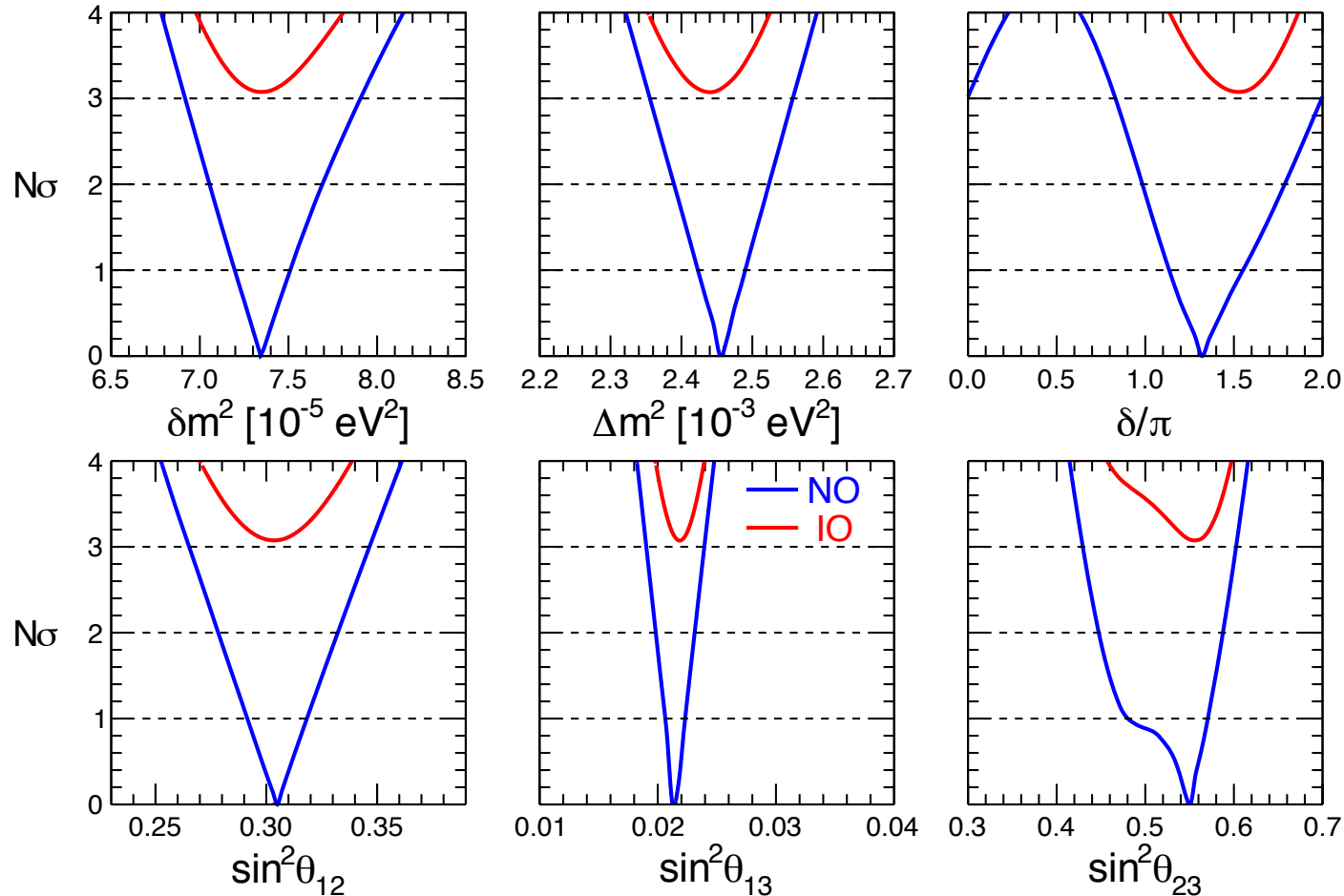
Range of smallest mixing angle θ_{13} dramatically reduced

Largest mixing angle θ_{23} close to $\pi/4$, but octant undetermined at 2σ .

Max CPV at $\sim 3\pi/2$ favored, CP conservation disfavored at $\sim 2\sigma$ in NO.

IO disfavored with respect to NO at $\sim 2\sigma$ level.

LBL Acc + Solar + KamLAND + SBL Reactors + Atmos



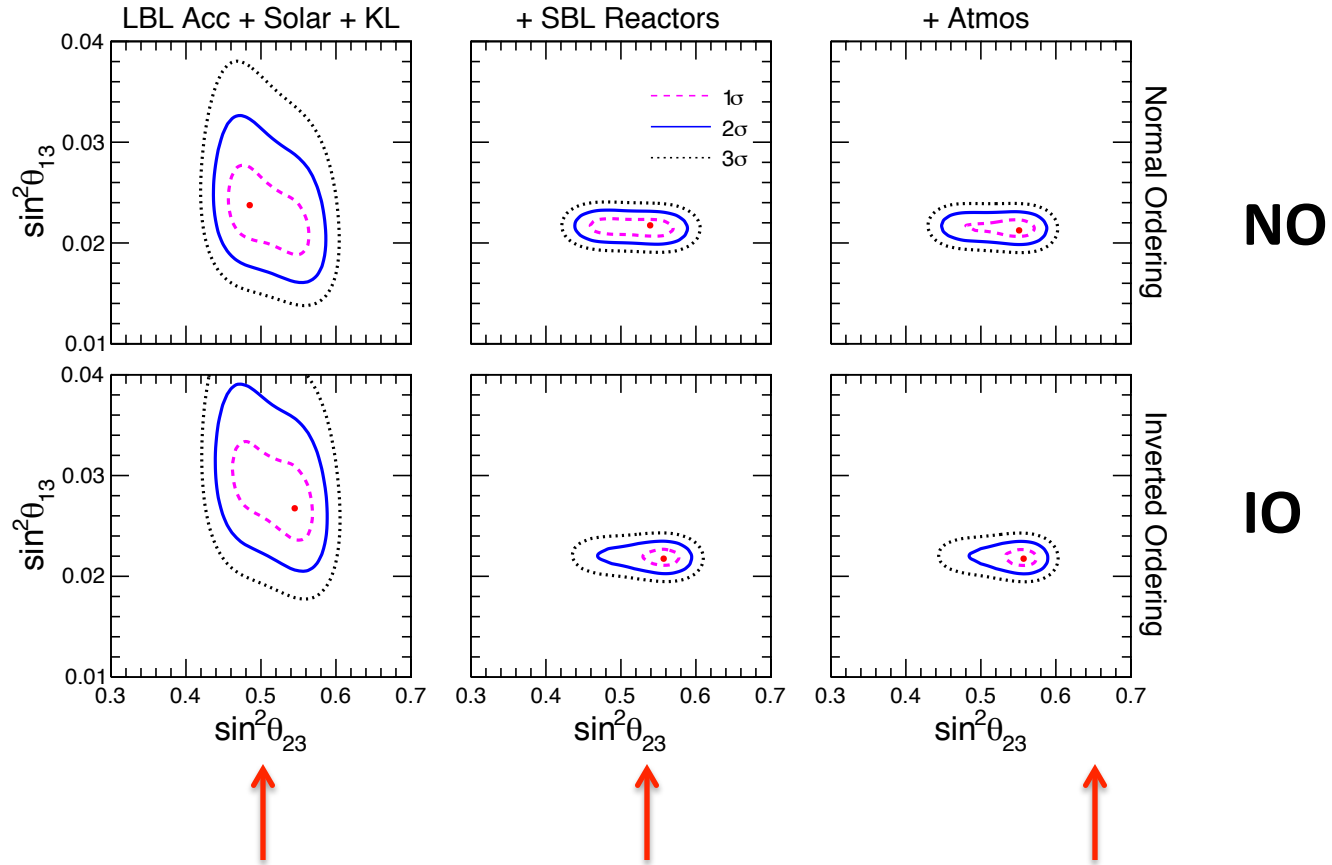
Further improvements for various parameters: 1σ bounds at few % level

Largest mixing angle (2-3) close to $\pi/4$, but octant undetermined at 2σ .

CPV: $\sin\delta \sim -1$ favored, ~ 0 disfavored, $\sim +1$ excluded. Meaningful bounds at $\sim 3\sigma$.

IO significantly disfavored with respect to NO, at $\sim 3\sigma$ level (but: caution!)

Understanding the accelerator + reactor (+atm.) impact on NO preference



Anticorrelation due to leading term in appearance channel at accelerators

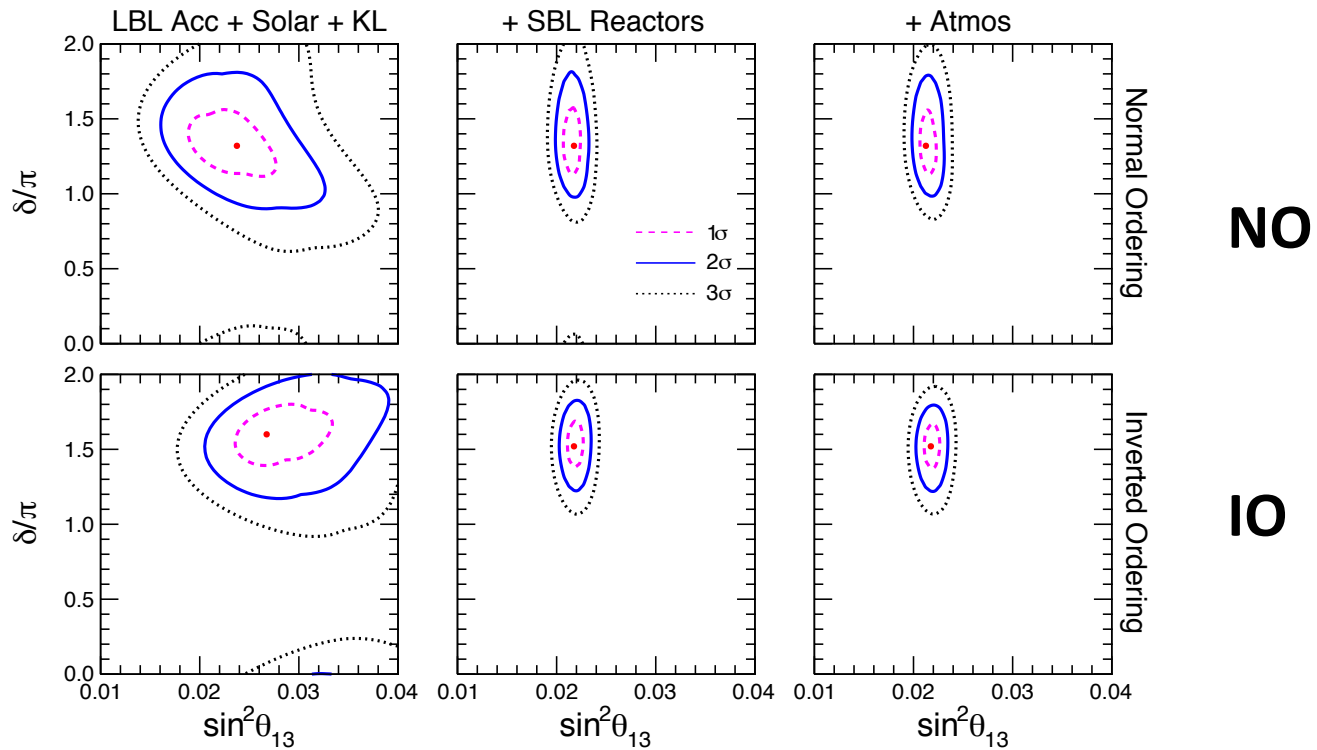
Better agreement with reactors on y-axis for NO

Atmosph. data also contribute (but in a less intuitive way)

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \left(\frac{\Delta m^2}{A - \Delta m^2} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{A - \Delta m^2}{4E} x \right)$$

Running experiments can further corroborate this picture (if true)

Understanding the accelerator + reactor (+atm.) impact on CPV preference



NO

IO

CPV tested by sub leading terms at accelerators (nu-antineu difference)

Reactors not sensitive to CPV, but sharpen range

Atmosph. contribute to test CPV (but in a less intuitive way)

$$\sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \left(\frac{\delta m^2}{A}\right) \left(\frac{\Delta m^2}{A - \Delta m^2}\right) \sin\left(\frac{A}{4E}x\right) \sin\left(\frac{A - \Delta m^2}{4E}x\right) \sin\left(\frac{\Delta m^2}{4E}x\right) \sin \delta$$

Running experiments can further corroborate this picture (if true)

3ν oscillation parameters, circa 2018

Table 1: Best fit values and allowed ranges at $N\sigma = 1, 2, 3$ for the 3ν oscillation parameters, in either NO or IO. The latter column shows the formal “ 1σ accuracy” for each parameter, defined as $1/6$ of the 3σ range divided by the best-fit value (in percent).

Parameter	Ordering	Best fit	1σ range	2σ range	3σ range	“ 1σ ” (%)
$\delta m^2/10^{-5} \text{ eV}^2$	NO	7.34	7.20 – 7.51	7.05 – 7.69	6.92 – 7.91	2.2
	IO	7.34	7.20 – 7.51	7.05 – 7.69	6.92 – 7.91	2.2
$\sin^2 \theta_{12}$	NO	3.04	2.91 – 3.18	2.78 – 3.32	2.65 – 3.46	4.4
	IO	3.03	2.90 – 3.17	2.77 – 3.31	2.64 – 3.45	4.4
$\sin^2 \theta_{13}/10^{-2}$	NO	2.14	2.07 – 2.23	1.98 – 2.31	1.90 – 2.39	3.8
	IO	2.18	2.11 – 2.26	2.02 – 2.35	1.95 – 2.43	3.7
$ \Delta m^2 /10^{-3} \text{ eV}^2$	NO	2.455	2.423 – 2.490	2.390 – 2.523	2.355 – 2.557	1.4
	IO	2.441	2.406 – 2.474	2.372 – 2.507	2.338 – 2.540	1.4
$\sin^2 \theta_{23}/10^{-1}$	NO	5.51	4.81 – 5.70	4.48 – 5.88	4.30 – 6.02	5.2
	IO	5.57	5.33 – 5.74	4.86 – 5.89	4.44 – 6.03	4.8
δ/π	NO	1.32	1.14 – 1.55	0.98 – 1.79	0.83 – 1.99	14.6
	IO	1.52	1.37 – 1.66	1.22 – 1.79	1.07 – 1.92	9.3

Known parameters constrained at few % level – Precision era!

“Unknown” CP phase maybe already “known” at O(10%) - if trend confirmed

Dramatic progress in the last two decades on the PMNS paradigm...

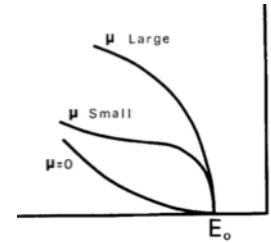
but still a long way to go to reach CKM-level accuracy and redundance!

Hints for nearly maximal CPV and NO will be at center stage in next years

3ν paradigm status via non-oscillation searches: absolute ν masses and observables ($m_\beta, m_{\beta\beta}, \Sigma$)

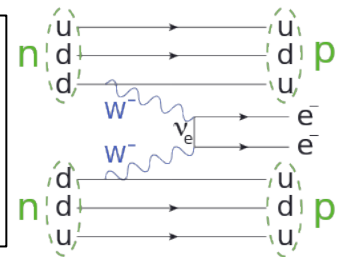
β decay, sensitive to the “effective electron neutrino mass”:

$$m_\beta = \left[c_{13}^2 c_{12}^2 m_1^2 + c_{13}^2 s_{12}^2 m_2^2 + s_{13}^2 m_3^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$



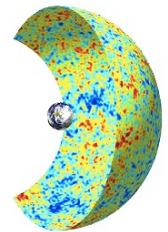
0νββ decay: only if Majorana. “Effective Majorana mass”:

$$m_{\beta\beta} = \left| c_{13}^2 c_{12}^2 m_1 + c_{13}^2 s_{12}^2 m_2 e^{i\phi_2} + s_{13}^2 m_3 e^{i\phi_3} \right|$$



Cosmology: Dominantly sensitive to sum of neutrino masses:

$$\Sigma = m_1 + m_2 + m_3$$

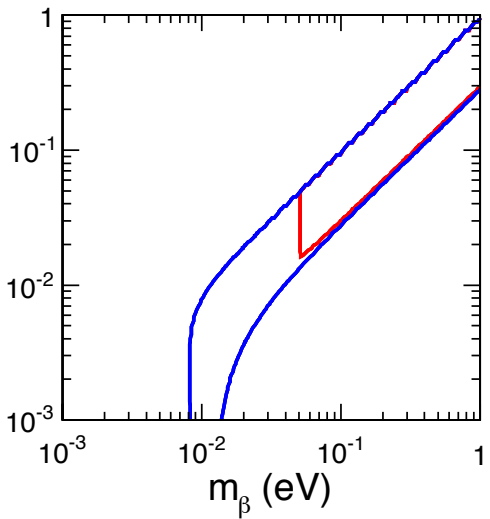
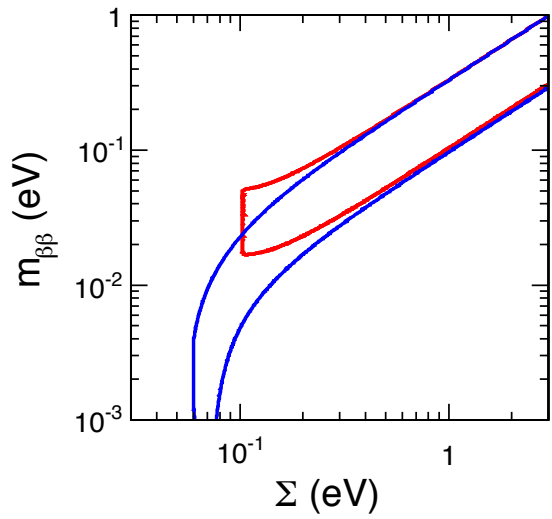
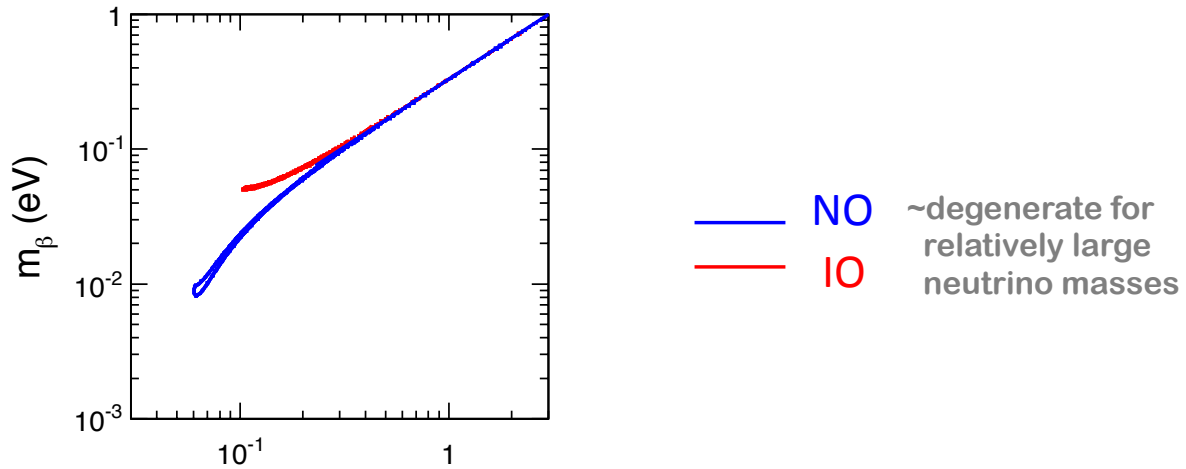


Note 1: These observables may provide handles to distinguish NO/IO.

Note 2: Majorana case gives a new source of CPV (unconstrained)

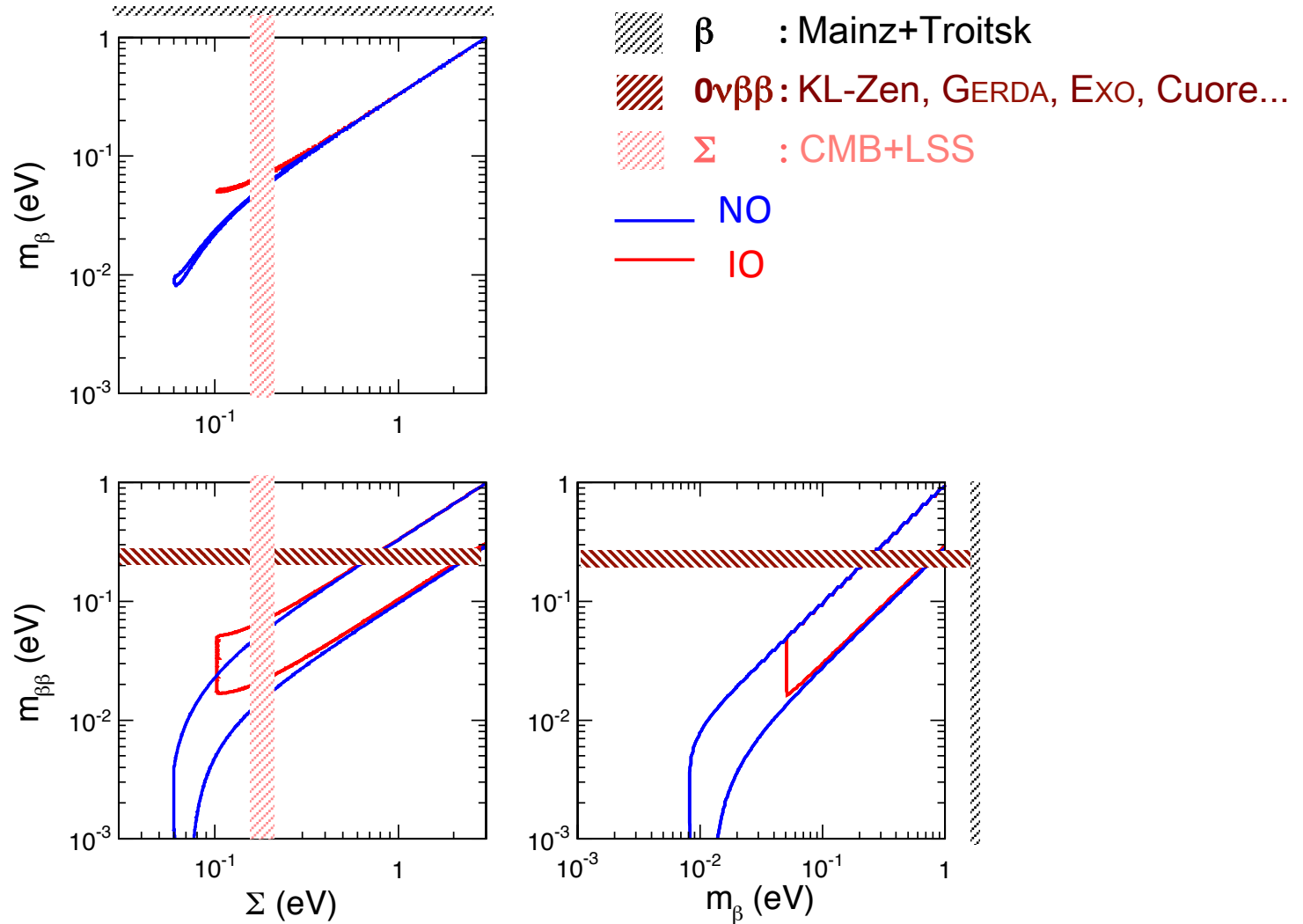
Note 2: The three observables are correlated by oscillation data →

Constraints on nonoscillation observables from oscillation data



\updownarrow
 $m_{\beta\beta}$ spread due to Majorana CP phase(s): accessible in principle

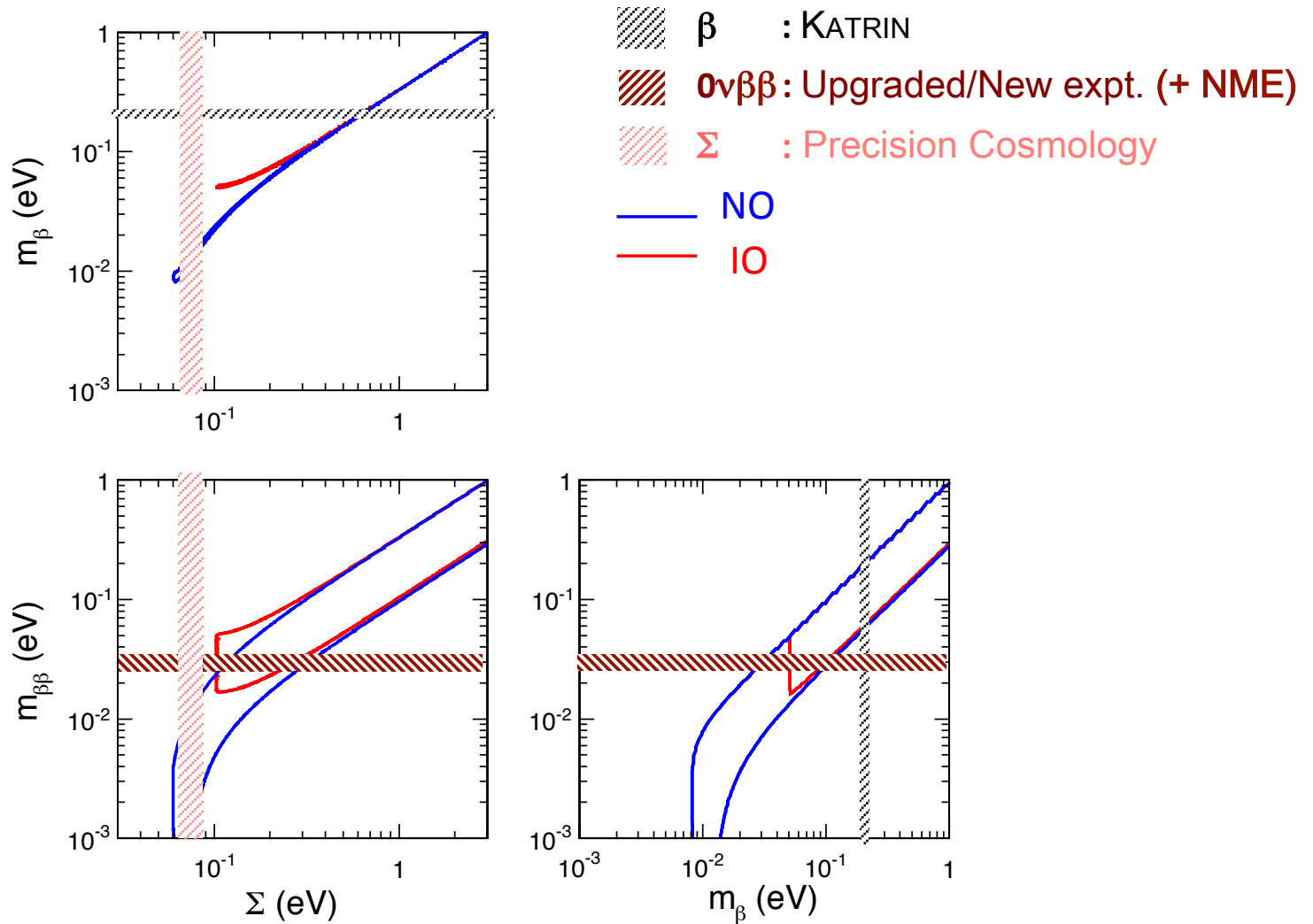
Upper limits on m_β , $m_{\beta\beta}$, Σ (up to some syst.) + osc. constraints



Cosmo data already contribute to put IO “under pressure”.

Major improvements expected in the next decade →

Upper limits on m_β , $m_{\beta\beta}$, Σ in ~ 10 years ?



Large phase space for **discoveries about ν mass and nature**
 (and for possible surprises! E.g., 4ν ?)

EPILOGUE

We are still in the middle of a transition from “unknown” to “known” in ν physics
Neutrino CPV, masses and nature are at the focus of worldwide expt+theo research
Global analyses of oscillation (+ nonoscillation) data will continue to play a role in deepening our understanding of the 3ν paradigm or... hinting at physics beyond it

Neutrinos will not cease to amaze us!



Thank you for your attention.