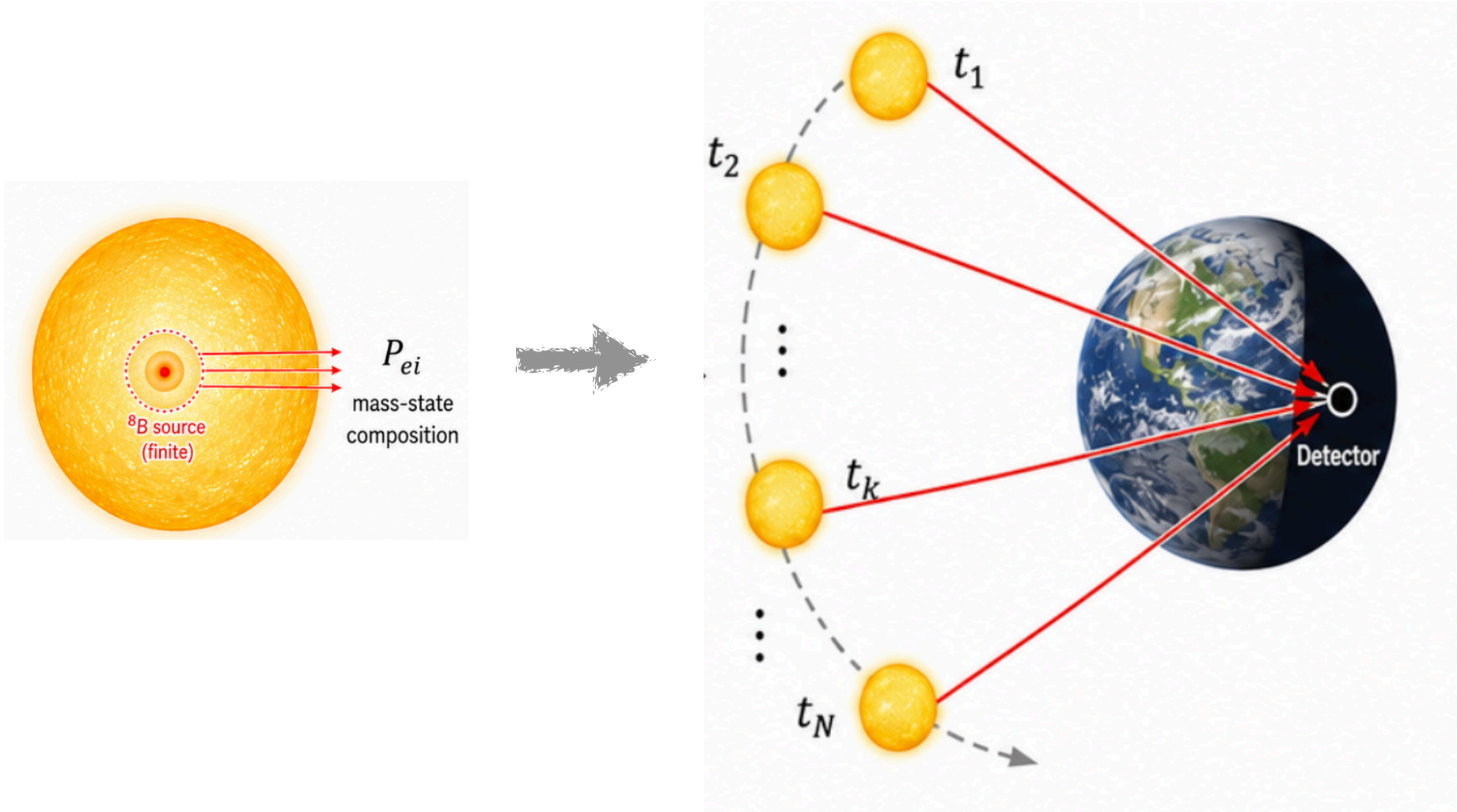


太阳中微子的高精度快速计算框架与各站点预测



Keyu Han
Shaomin Chen
清华大学工程物理系
2026年7月17日

随着实验探测精度的提升，对数值计算预测的要求也相应提高，例如引入3D地球模型、振荡参数的MC传播…

传统计算：

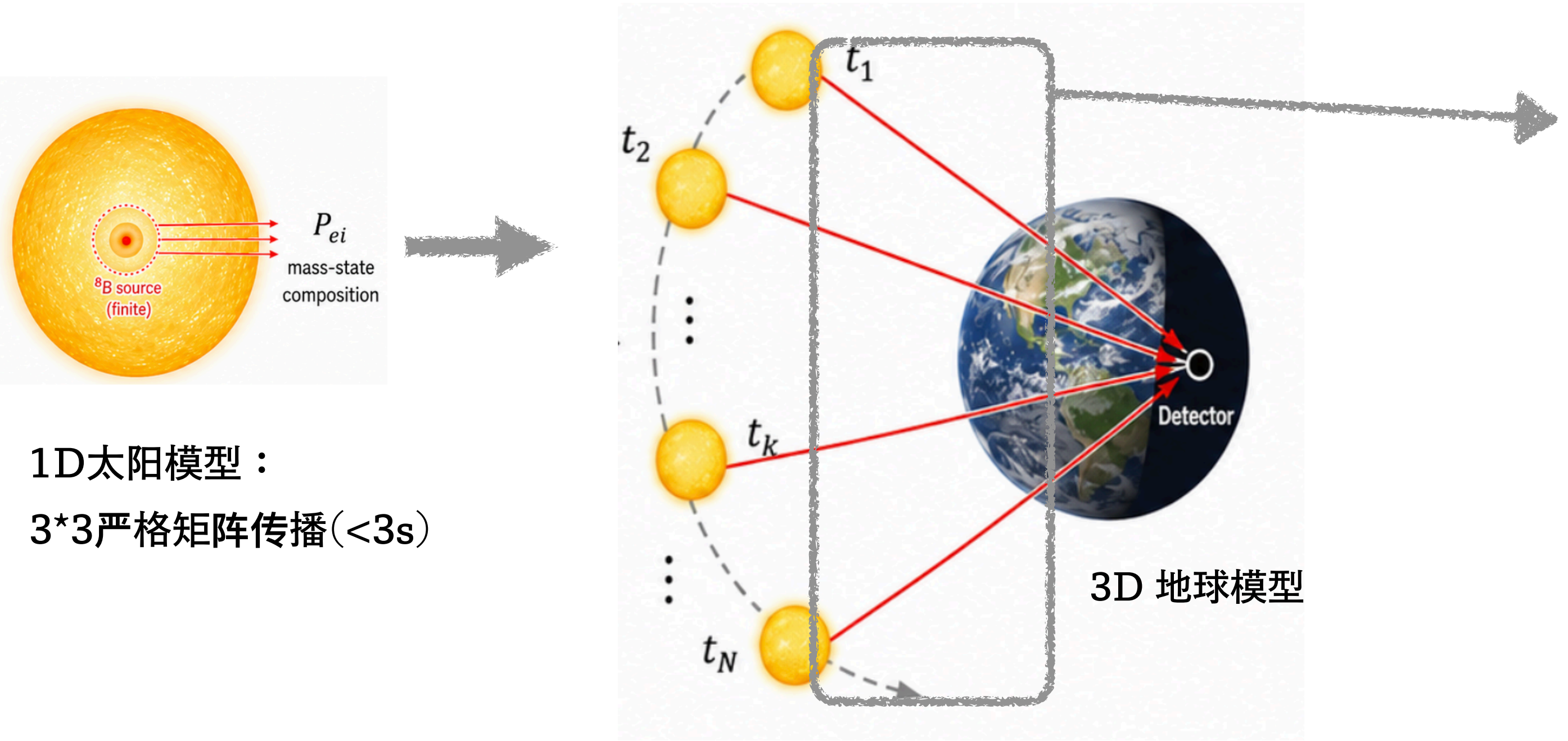
- 1D地球密度模型(PREM)
- 解析近似的日地位置
- 地球MSW传播计算：一阶近似，解ODE…
- 太阳MSW：绝热解析近似
- 难以给出振荡参数的MC误差传播



目前实现：

- 3D地球密度模型
- 高精度星历
- 地球MSW传播计算：矩阵分裂算法，适合并行计算
- 太阳MSW： 3×3 指数矩阵严格传播
- 给出振荡参数的MC误差传播

计算思路概览

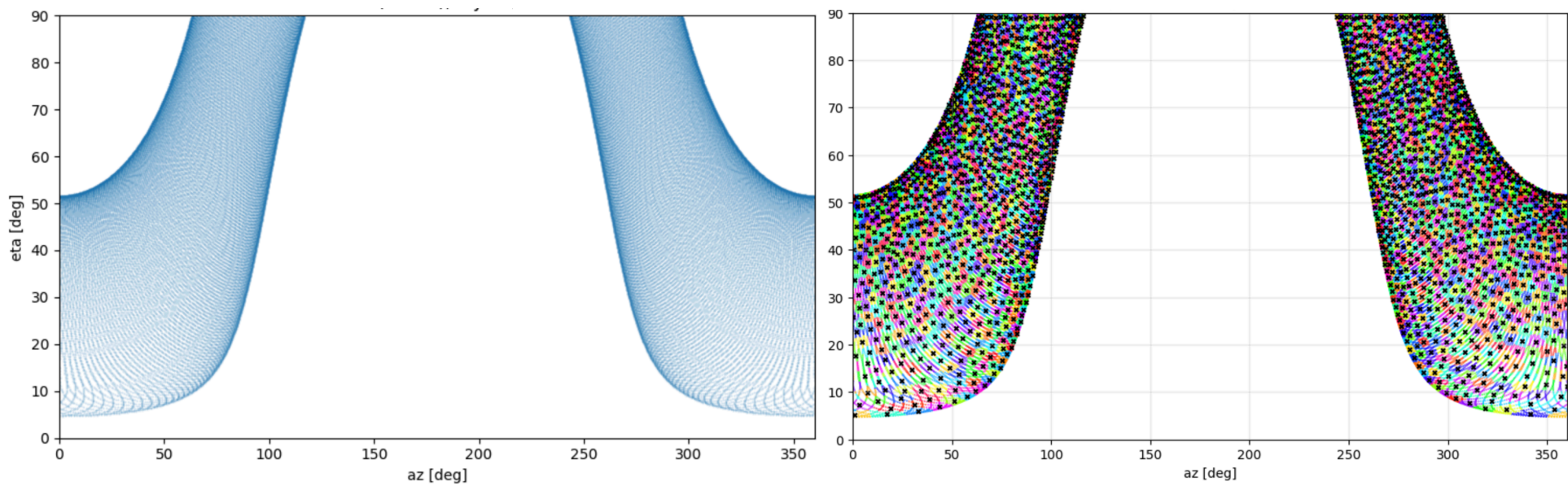


1D太阳模型：
3*3严格矩阵传播(<3s)

高精度天文模型
Astropy：高精度星历，分钟级的
一年路径总样本

无监督机器学习：K-medoids路径压缩

2.6×10^5 总夜晚样本数 $\rightarrow$ 10000 条代表性路径



地球侧传播：

矩阵分裂算法Strang-splitting:

$$|\psi_{n+1}\rangle = e^{-iH_{\text{vac}}\Delta x_n/2} \left[I + \left(e^{-iV_n\Delta x_n} - 1 \right) P_e \right] e^{-iH_{\text{vac}}\Delta x_n/2} |\psi_n\rangle .$$

适合并行，使用GPU高速并行计算(<1s)。

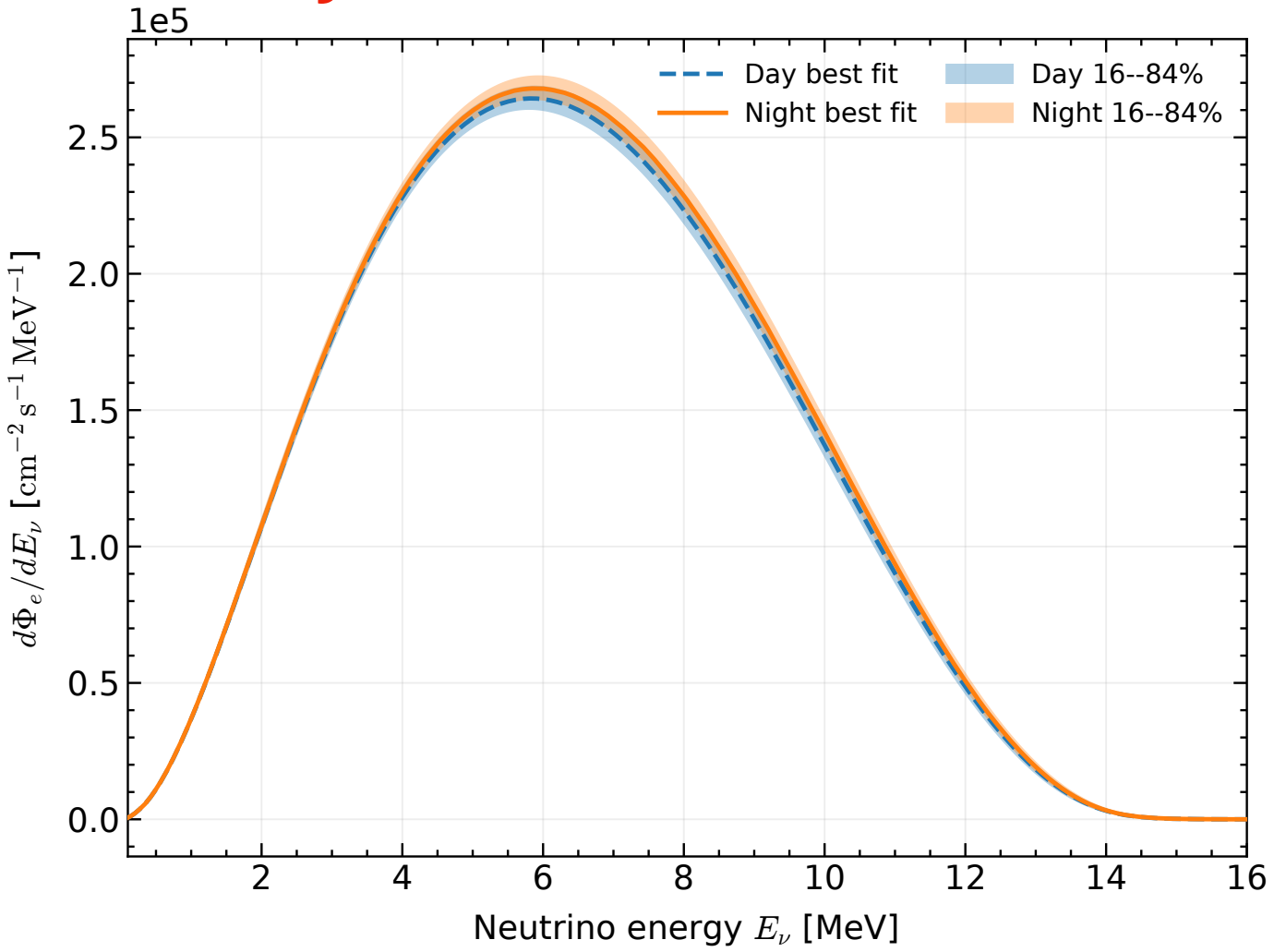
各站点计算结果：

Lab	通量预测		不对称度
	Φ_e^D	Φ_e^N	$A_{\text{DN}}^{\text{flux}}$
ANDES	$2.036^{+0.031}_{-0.027}$	$2.054^{+0.031}_{-0.026}$	$0.898^{+0.083}_{-0.072}$
Baksan	$2.022^{+0.030}_{-0.026}$	$2.066^{+0.031}_{-0.027}$	$2.157^{+0.080}_{-0.069}$
Boulby	$2.018^{+0.030}_{-0.026}$	$2.071^{+0.031}_{-0.027}$	$2.622^{+0.079}_{-0.069}$
CallioLab	$2.010^{+0.030}_{-0.026}$	$2.080^{+0.031}_{-0.027}$	$3.397^{+0.080}_{-0.070}$
CJPL	$2.026^{+0.030}_{-0.026}$	$2.062^{+0.031}_{-0.026}$	$1.775^{+0.079}_{-0.068}$
JUNO	$2.027^{+0.030}_{-0.027}$	$2.064^{+0.031}_{-0.026}$	$1.824^{+0.088}_{-0.076}$
Kamioka	$2.024^{+0.030}_{-0.026}$	$2.066^{+0.031}_{-0.027}$	$2.052^{+0.084}_{-0.073}$
LNGS	$2.022^{+0.030}_{-0.026}$	$2.067^{+0.031}_{-0.027}$	$2.161^{+0.082}_{-0.071}$
LSC	$2.022^{+0.030}_{-0.026}$	$2.068^{+0.031}_{-0.027}$	$2.249^{+0.085}_{-0.074}$
LSM	$2.022^{+0.030}_{-0.026}$	$2.068^{+0.031}_{-0.027}$	$2.266^{+0.082}_{-0.071}$
SNO	$2.021^{+0.030}_{-0.026}$	$2.069^{+0.031}_{-0.027}$	$2.332^{+0.083}_{-0.072}$
SUPL	$2.038^{+0.031}_{-0.027}$	$2.053^{+0.031}_{-0.026}$	$0.759^{+0.086}_{-0.075}$
SURF	$2.022^{+0.030}_{-0.026}$	$2.068^{+0.031}_{-0.027}$	$2.258^{+0.082}_{-0.071}$
Yemilab	$2.024^{+0.030}_{-0.026}$	$2.066^{+0.031}_{-0.026}$	$2.074^{+0.085}_{-0.074}$

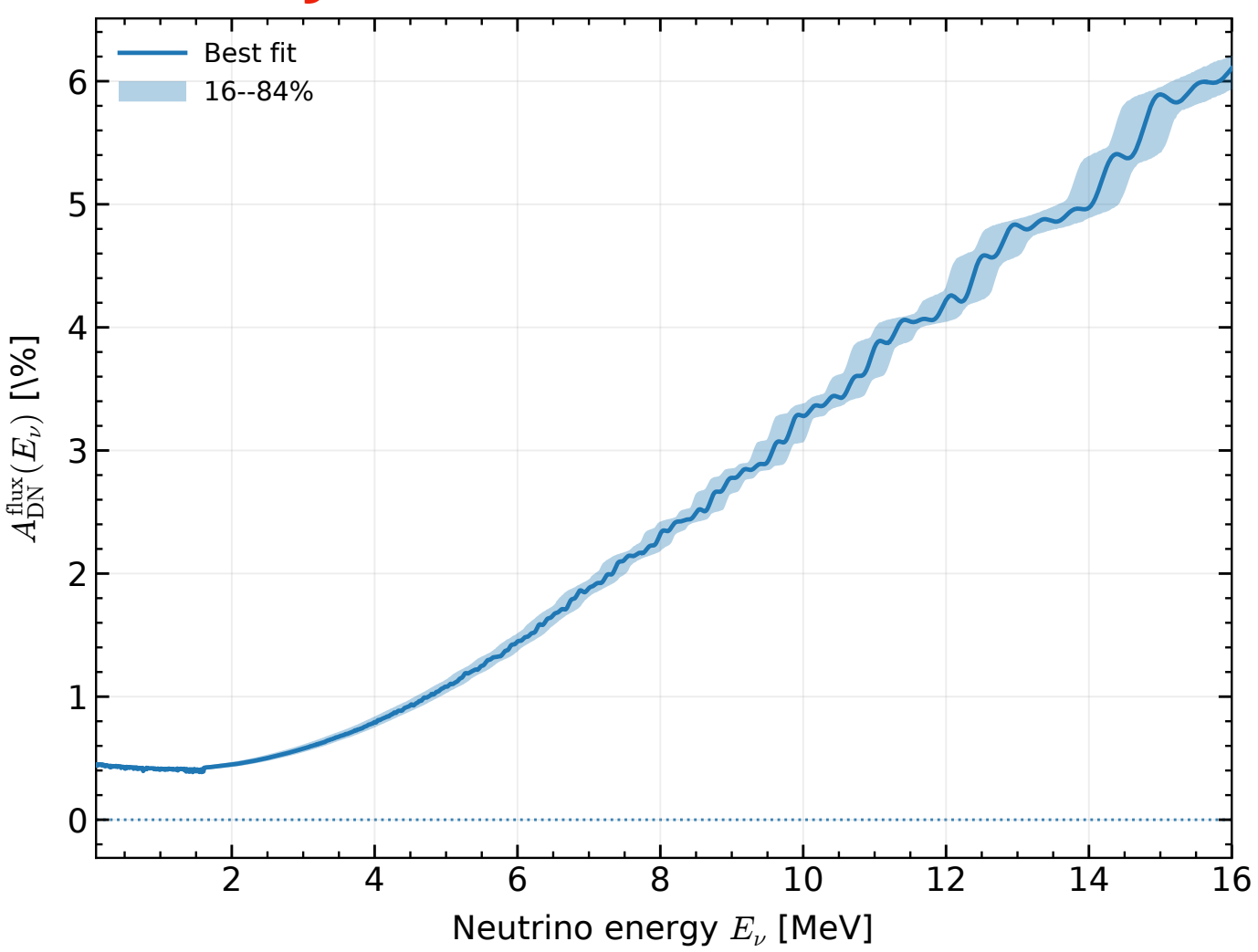
白天flux

夜晚flux

CJPL的通量谱以及MC散布



CJPL的不对称度谱以及MC散布



地球侧对比: Strang solver vs. nuSQuIDS

达到相同的精度 $\mathcal{O}(10^{-5})$. 提速: 35--42 ×

L [km]	Core crossing	t_{Strang} [s]	t_{nuSQuIDS} [s]	Speedup	$\max \Delta P $
1000	No	2.30×10^{-2}	8.00×10^{-1}	34.8×	2.36×10^{-5}
6000	No	1.39×10^{-1}	5.53	39.9×	1.22×10^{-5}
11000	Yes	2.62×10^{-1}	10.97	41.9×	3.04×10^{-5}