スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ振動と陽子崩壊探索の最新結果

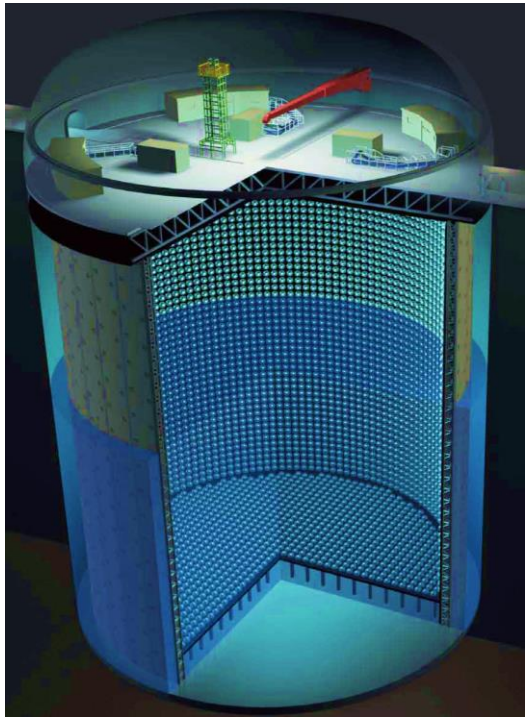
片岡洋介
東京大学宇宙線研究所

東京大学宇宙線研共同利用発表会
2019年12月14日

スーパーカミオカンデ

- 世界最大の地下水チェレンコフ検出器
- 岐阜県神岡鉱山の地下1000mに設置
- 1996年運転開始~現在 SK-Vとして稼働中

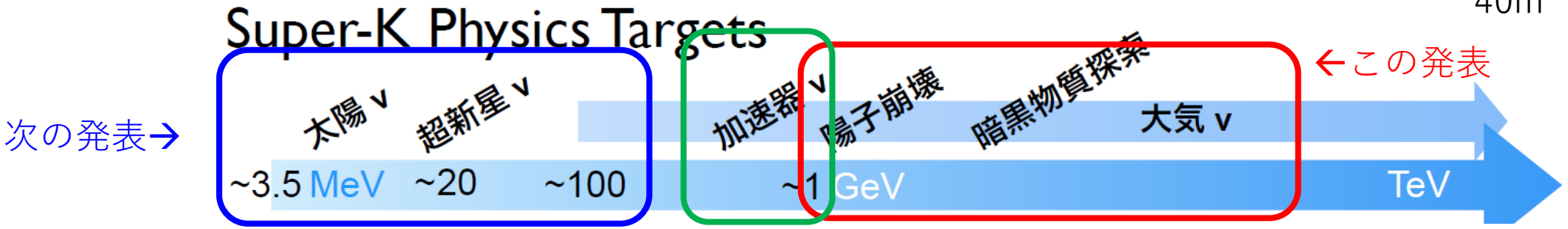
スーパーカミオカンデ検出器



高さ 41.4m　直径 40m
体積 50,000トンの純水
内水槽検出器 (32kton)　11,129本の50cm径 PMT
外水槽検出器 (18kton)　1885本の20cm径 PMT

20'' PMT

幅広いエネルギー領域で
様々なニュートリノ源を探索することができる



Publications in 2019

発表済み論文:

- Atmospheric Neutrino Oscillation Analysis With Improved Event Reconstruction in Super-Kamiokande IV, M. Jiang et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053F01, arXiv: 1901.03230 ←大気ニュートリノ (新しい事象再構成)
- Search for Astronomical Neutrinos from Blazar TXS0506+056 in Super-Kamiokande, K. Hagiwara et al. (The Super-Kamiokande Collaboration), The Astrophysical Journal Letters, arXiv: 1910.07680 ←コインシデンス探索 (IceCube)

準備中論文:

- Search for proton decay into three charged leptons in 0.37 megaton-years exposure of the Super-Kamiokande ←陽子崩壊 (trilepton)
- Search for neutrinos from dark matter annihilation in the earth's core with the Super-Kamiokande detector
- Indirect Search for Dark Matter from the Galactic Center and Halo with the Super-Kamiokande Detector ←暗黒物質 (地球、銀河中心)

カンファレンス用のPreliminaryな結果:

- Search for proton decay into $e^+\pi^0$, $\mu^+\pi^0$ with 450kton x year ←陽子崩壊 ($e^+\pi^0$, $\mu^+\pi^0$)
- Coincidence search for gamma ray burst ←コインシデンス探索 (GRB)

SK解析の方向性

SK約20年分のデータ解析が完了(SK-I~IV)

- Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV, The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. D 97, 072001 (2018), arXiv: 1710.09126 — 大気ニュートリノ
- Search for proton decay via p→e+π^0 and p→$\mu+\pi^0$ in 0.31 megaton·years exposure of the Super-Kamiokande water Cherenkov detector, The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. D 95, 012004 (2017), arXiv: 1610.03597 — 陽子崩壊

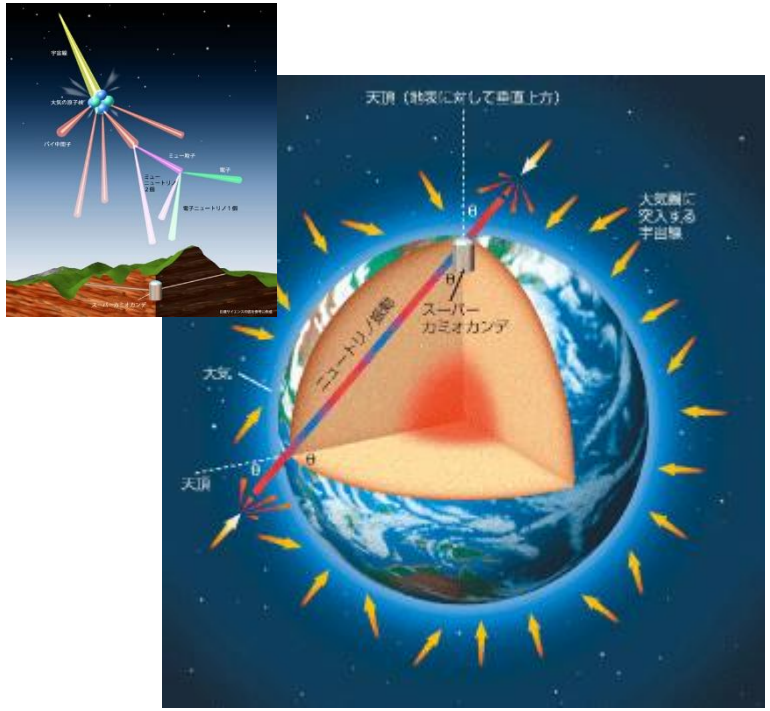
事象再構成アルゴリズムの改良、
その上で、Fiducial Volumeの拡大 (壁から200cm → 50cm, 統計+30%)

- Atmospheric Neutrino Oscillation Analysis With Improved Event Reconstruction in Super-Kamiokande IV, M. Jiang et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053F01, arXiv: 1901.03230 — 大気ニュートリノ → まずSK-IVのデータで、今日の話
- Search for proton decay into $e^+\pi^0$, $\mu^+\pi^0$ with 450kton x year — 陽子崩壊 → 来週公表 (NuPhys 2019)

大気ニュートリノ

幅広いエネルギー領域・飛来距離を
持つためニュートリノ振動の研究に最適

大気中で生成される
ニュートリノ



ニュートリノ3世代混合

$$\begin{pmatrix}\nu_e\\ \nu_\mu\\ \nu_\tau\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & c_{23} & s_{23}\\ 0 & -s_{23} & c_{23}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta}\\ 0 & 0 & 0\\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}c_{12} & s_{12} & 0\\ -s_{12} & c_{12} & 0\\ 0 & 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\nu_1\\ \nu_2\\ \nu_3\end{pmatrix}$$

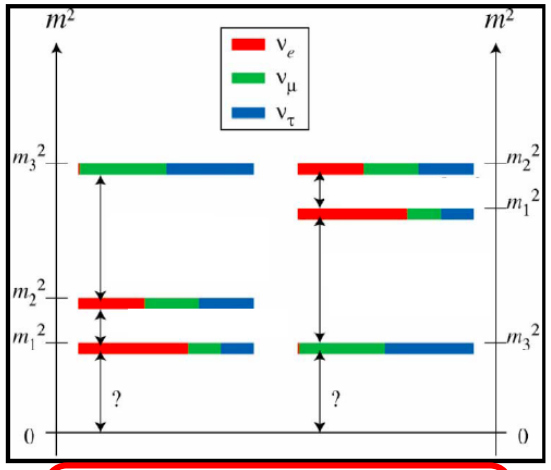
$c_{ij} \equiv \cos\theta_{ij}$, $s_{ij} \equiv \sin\theta_{ij}$

- 現在までに３つの全ての混合角が有限の値として測定されている
  - $\theta_{12} = 33.6 \pm 1.0°$
  - $\theta_{13} = 9.1 \pm 0.6°$
  - $\theta_{23} = 45 \pm 6°$ (最大混合?(θ_{23}=45°?))

②

- ２つの質量二乗差
  - $\Delta m^2_{12} \sim 7.6 \times 10^{-5}$ eV^2
  - $|\Delta m^2_{32}| \sim 2.4 \times 10^{-3}$ eV^2 (Δm^2_{23}の正負)

①
- CP位相 δ_{CP} はまだ決定されていない



順質量階層 逆質量階層
(Δm^2_{32}>0) (Δm^2_{32}<0)

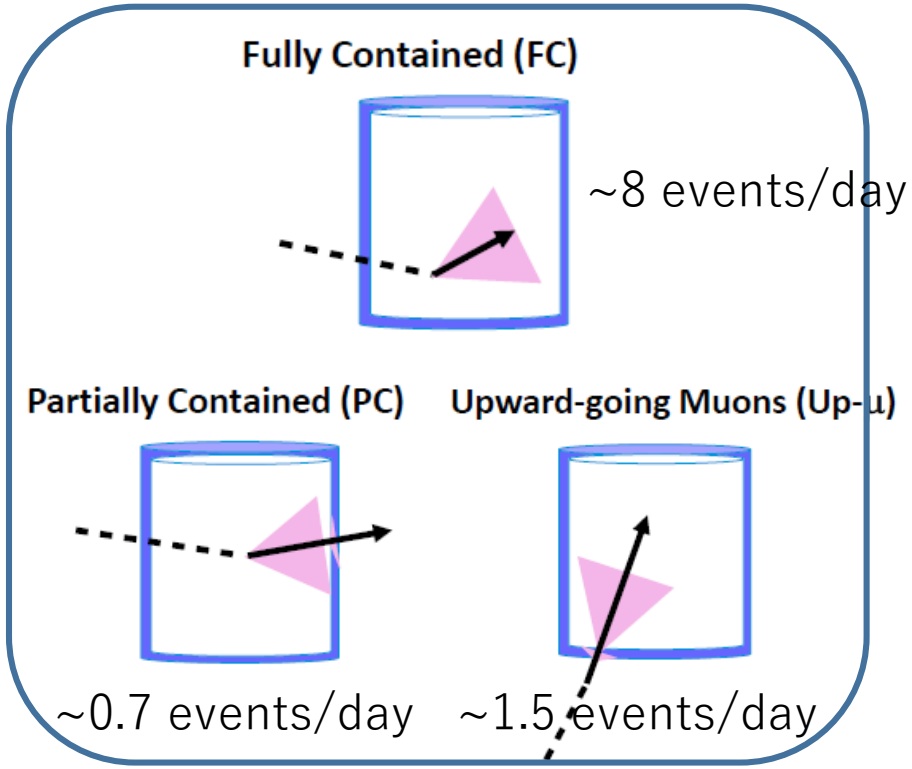
③

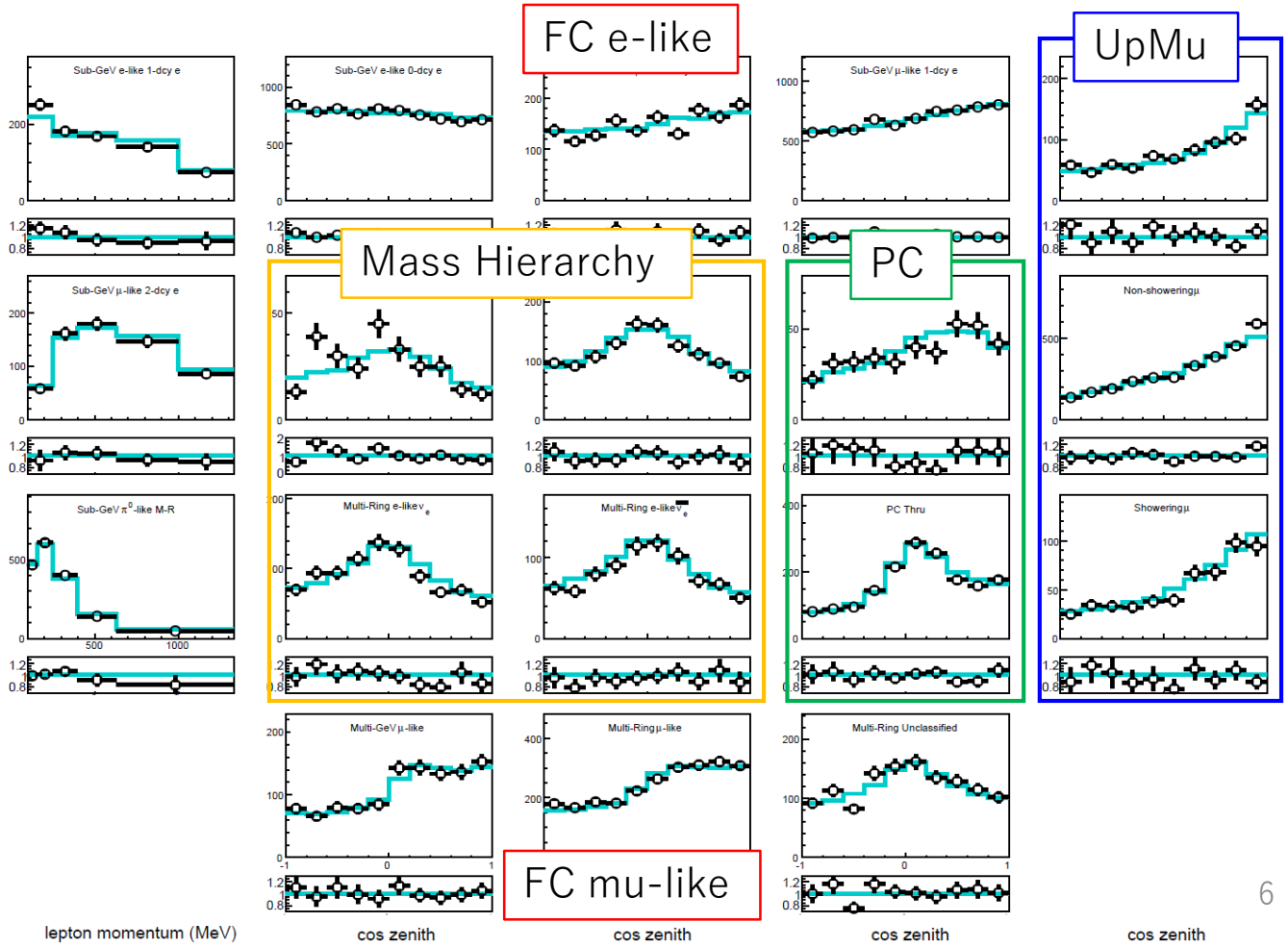
未解決問題：δ_{CP}とθ_{23}オクタント、質量階層性
→ 大気ニュートリノが感度をもつ

ニュートリノ振動解析

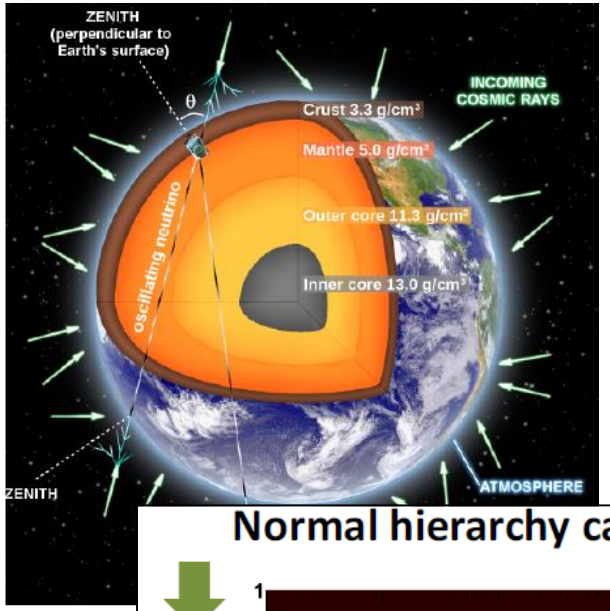
- 飛来距離に相関のある天頂角分布を3世代ニュートリノ振動を仮定してフィット
- ニュートリノの種類(e, μ)、エネルギー、トポロジーで分割（各振動パラメータに対する感度を上げる）

ニュートリノ事象のトポロジー





物質効果による質量階層性の測定

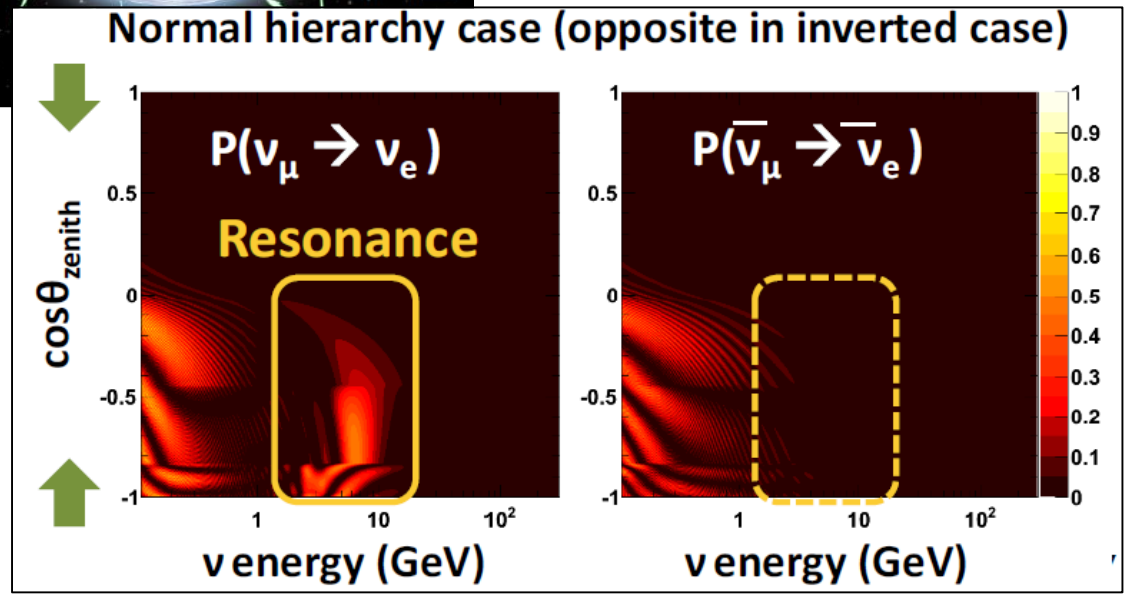


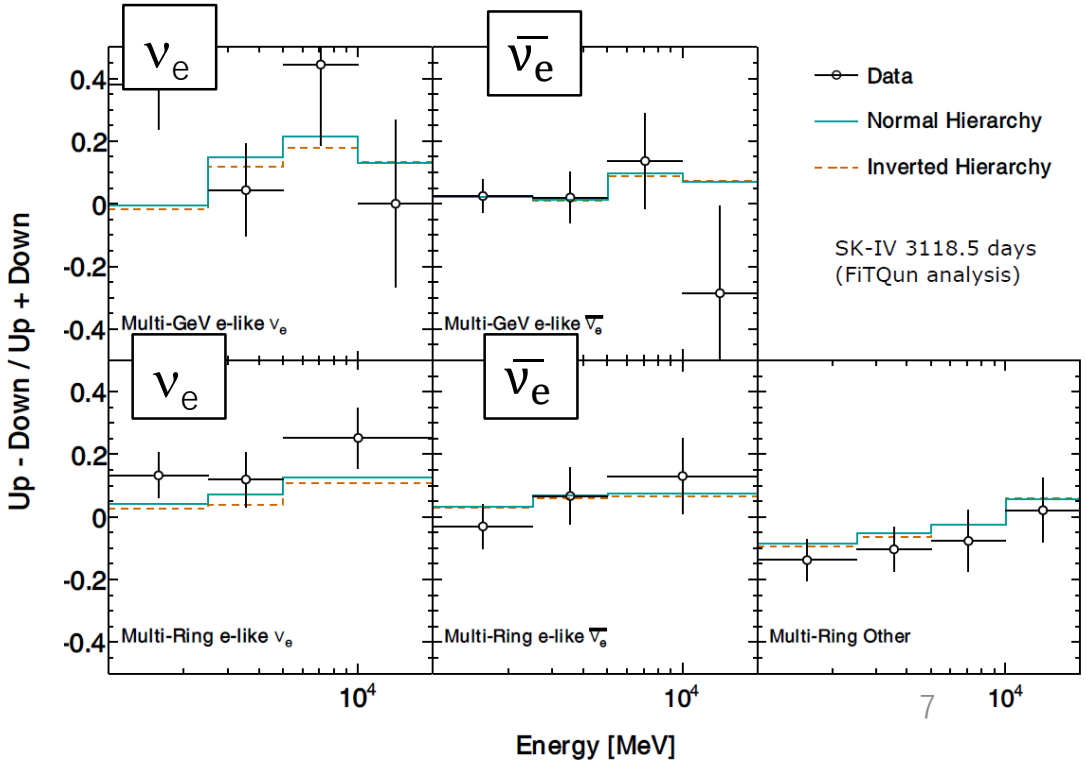
- 地球コアの物質との相互作用による共鳴(振動確率のエンハンス)

質量階層性(順・逆)によってニュートリノ又は反ニュートリノが選択的に共鳴

→ 2~10GeVの上向きν_e、$\bar{\nu}_e$を比較

(SKは電荷不感なため難しい解析)





再構成アルゴリズムの改良

従来の手法 (APFIT):

Step by Stepで再構築

1. vertexの決定 (時間情報)
2. リング数の決定
3. 粒子識別
4. 運動量の決定

新しい手法 (FiTQun):

Maximum-likelihood estimation

(同時フィット)

Use information from sensors both with and without registered hits in the event

$$L(\mathbf{x}) = \prod_{i_{unhit}} \mathrm{P}(i_{unhit}|\mathbf{x}) \prod_{i_{hit}} \mathrm{P}(i_{hit}|\mathbf{x}) f_q(q_i|\mathbf{x}) f_t(t_i|\mathbf{x})$$

Build likelihood function for event hypothesis x

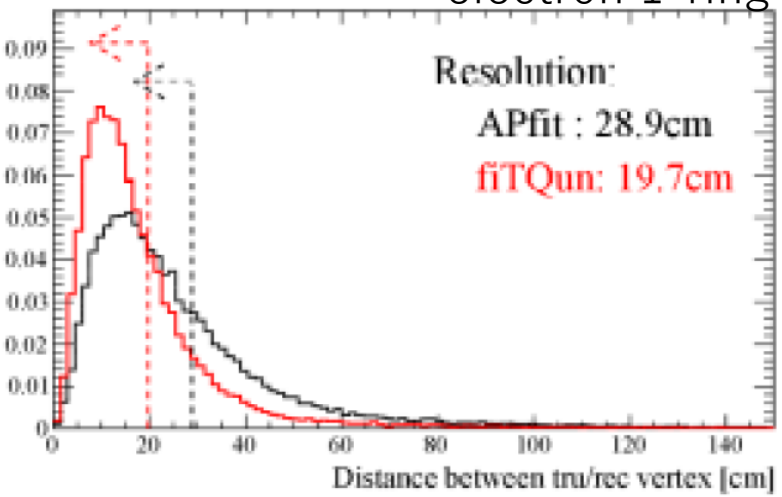
For hit photosensors:

Compare observed charge to prediction and Compare hit time to prediction

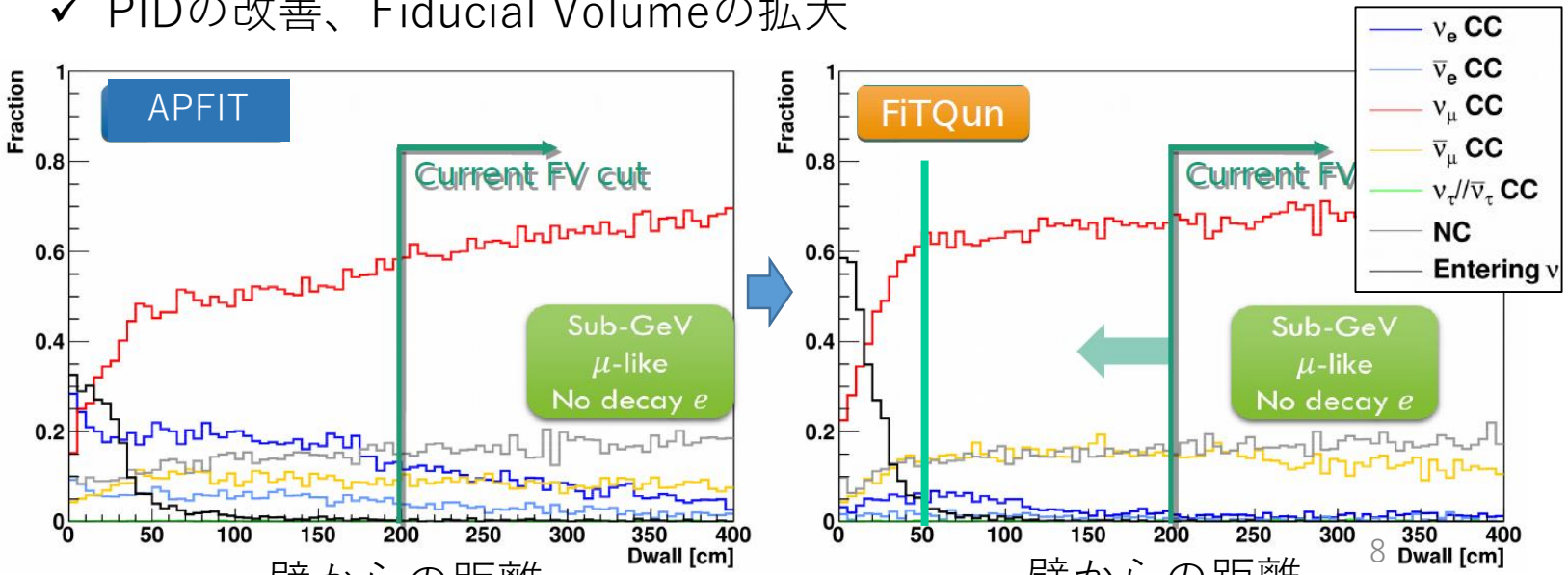
電荷PDF (e or μ)　時間PDF (e or μ)

✓ Vertex resolutionの改善

electron 1-ring



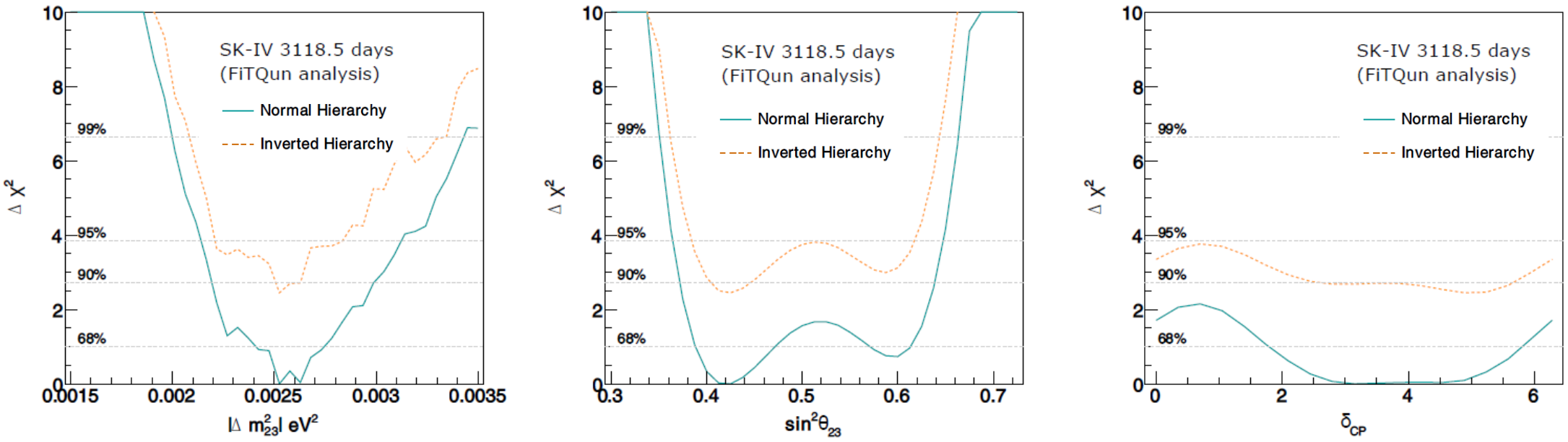
✓ PIDの改善、Fiducial Volumeの拡大

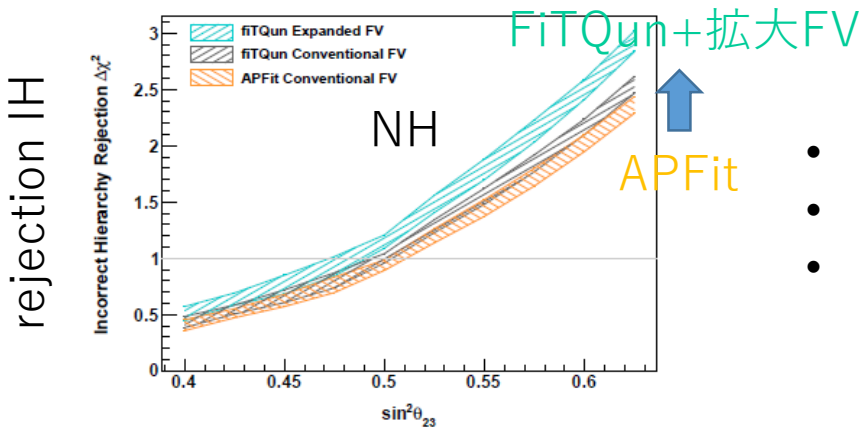


壁からの距離　壁からの距離

解析結果

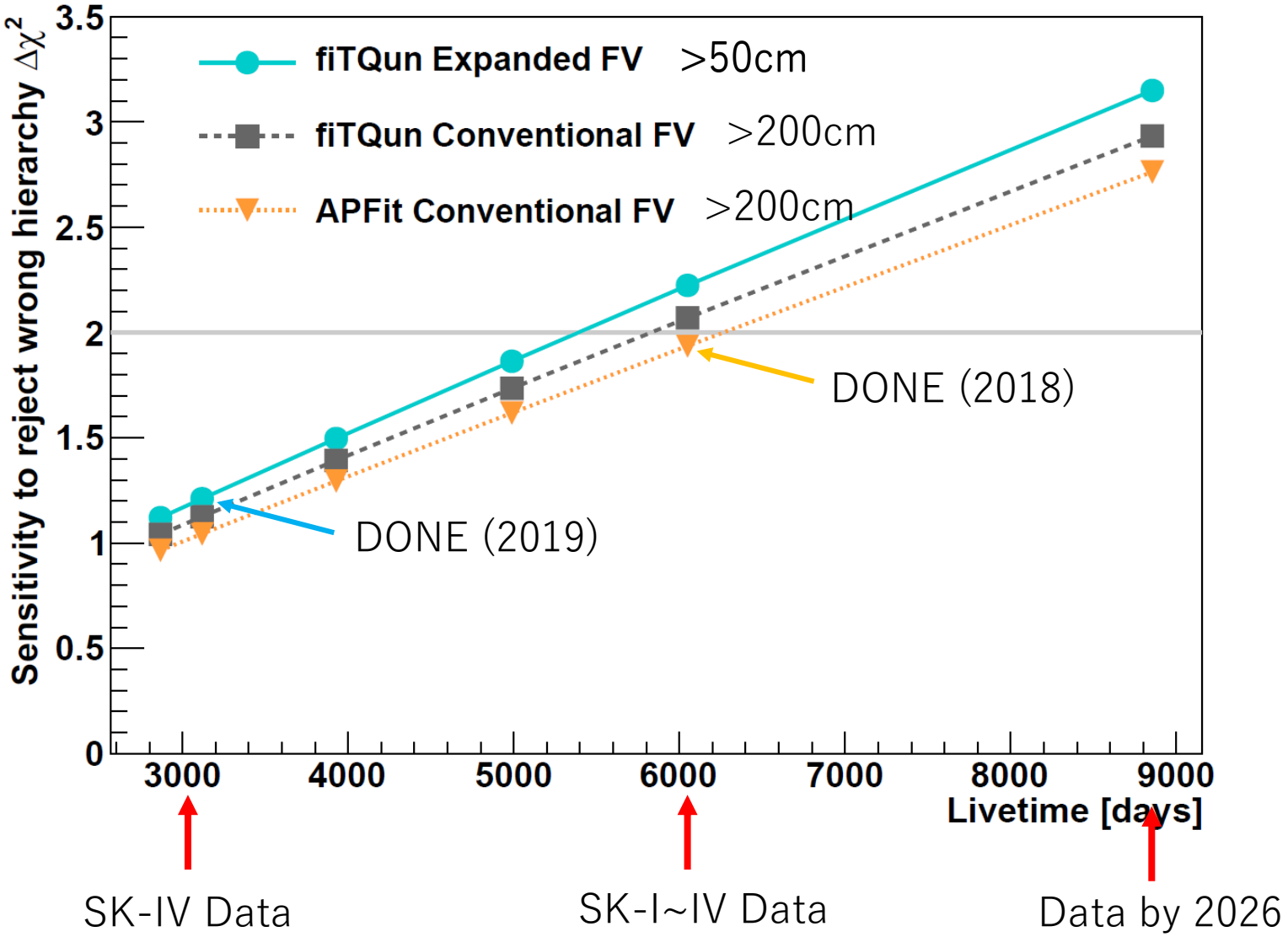
- SK-IV 3118.5 days (SKのみ、 θ_{13} constraint)
- FiTQun (新しい事象再構成), FV 200cm → 50cm (30%の統計量向上)





- fitQun+FV拡大によりsensitivityの向上
- Normal Hierarchyを示唆 69.2% ~ 85.7% (depend on $\sin^2\theta_{23}$)
- CP対称性が最大限(δ_{CP}=270°)に破れている可能性を示唆

今後の見通し



質量階層性

- 統計dominant
- fiTQun+FV拡大の解析を進める
- HKまでに$\Delta X^2>3$

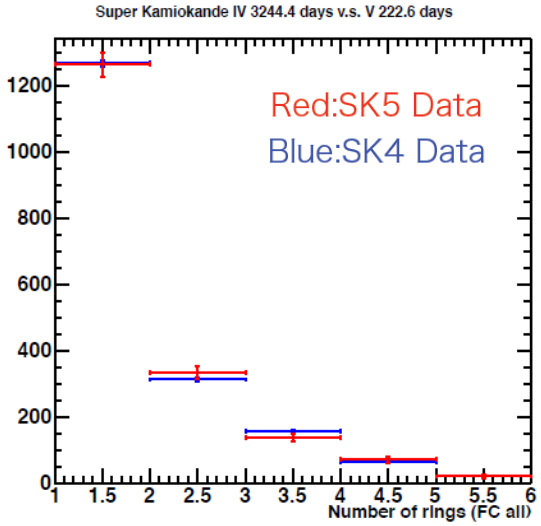
SK-V Data

- 2019年2月よりタンクオープン＆注水後のSK-V開始
- 検出器校正、HV調整など完了
- Reduction, Reconstructionなどの再点検
  → SK4とコンシステント(MCは準備中)

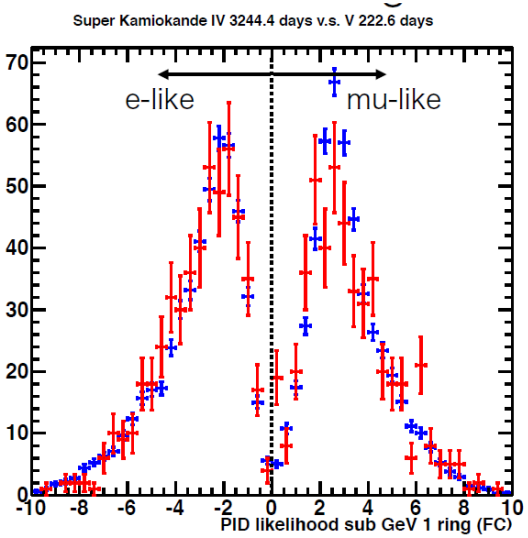
SK無事再始動！

(220days, FV>200cm)

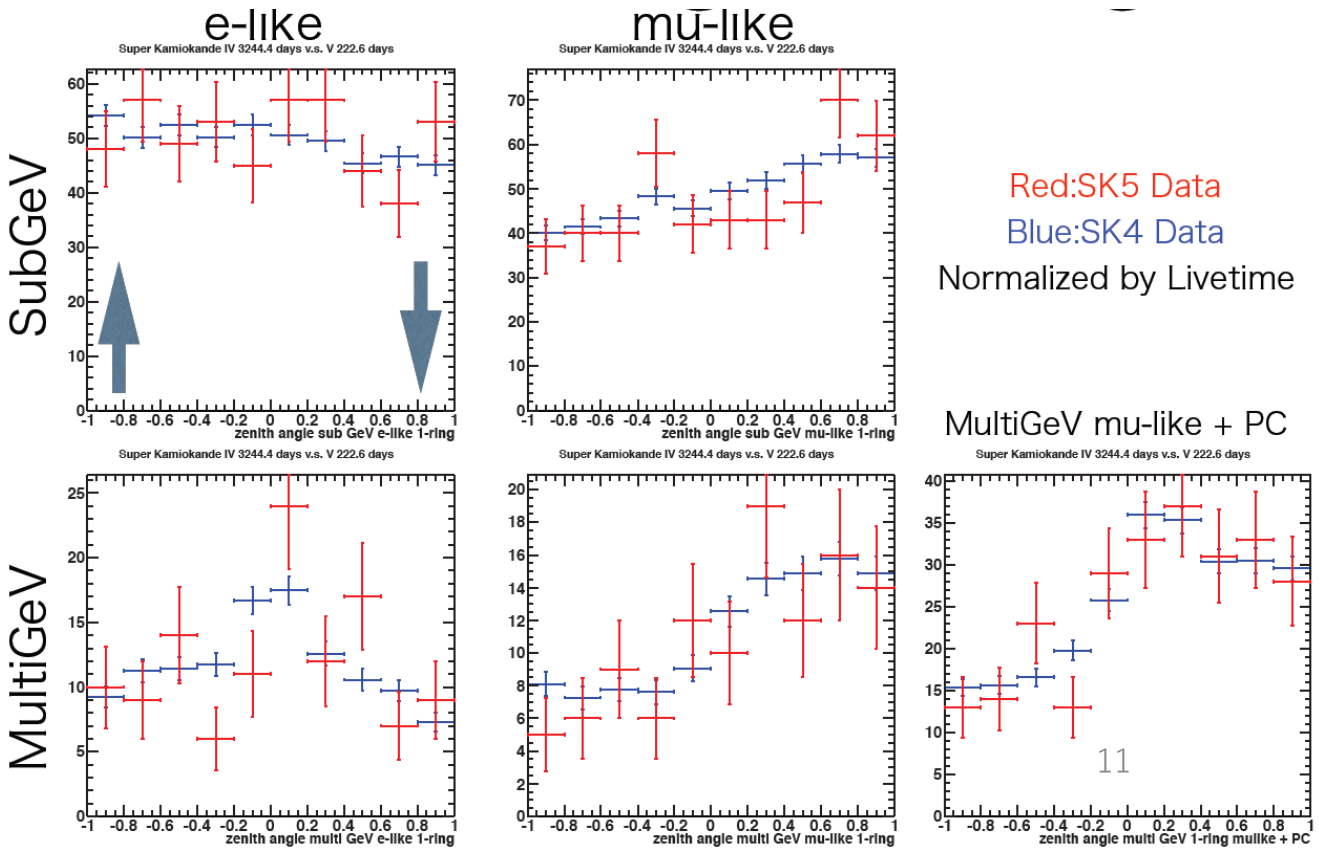
Ring Counting



Particle ID



Zenith Angle



Red:SK5 Data
Blue:SK4 Data
Normalized by Livetime

SK-Gd

- 来春、SK-Gd開始予定
- Neutron Taggingの飛躍的向上 20% → 90%

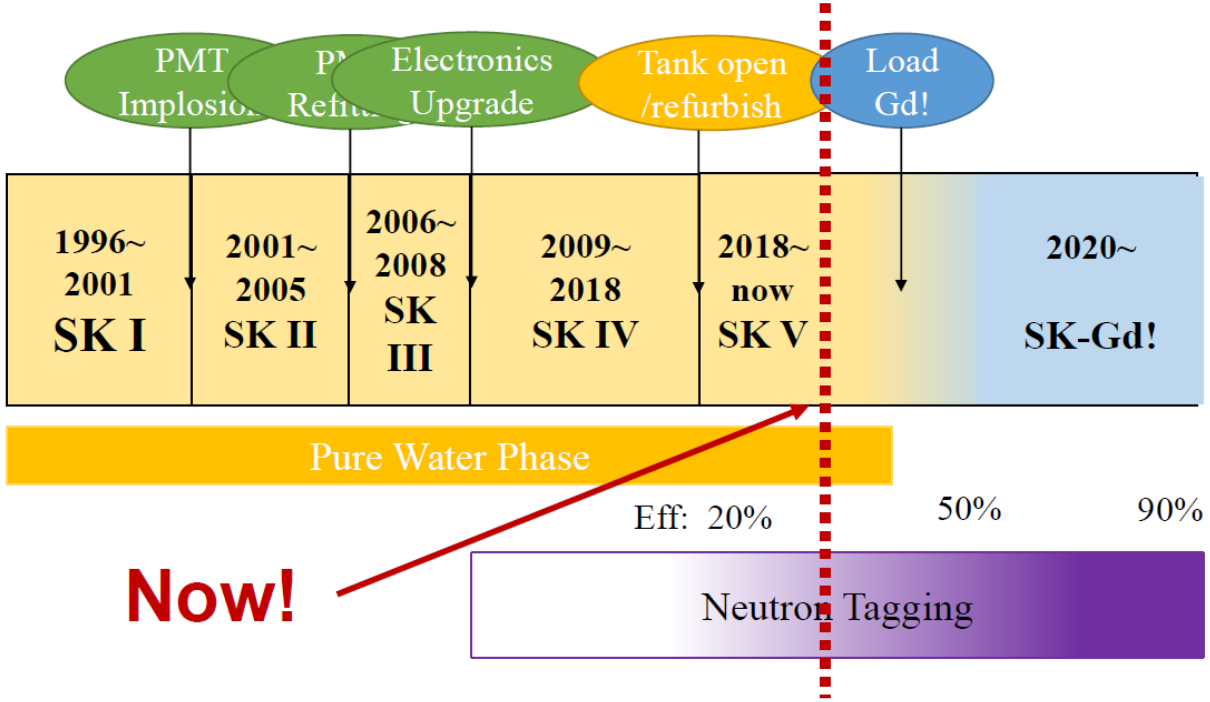
反ニュートリノ識別が可能に

→ 質量階層性感度の向上

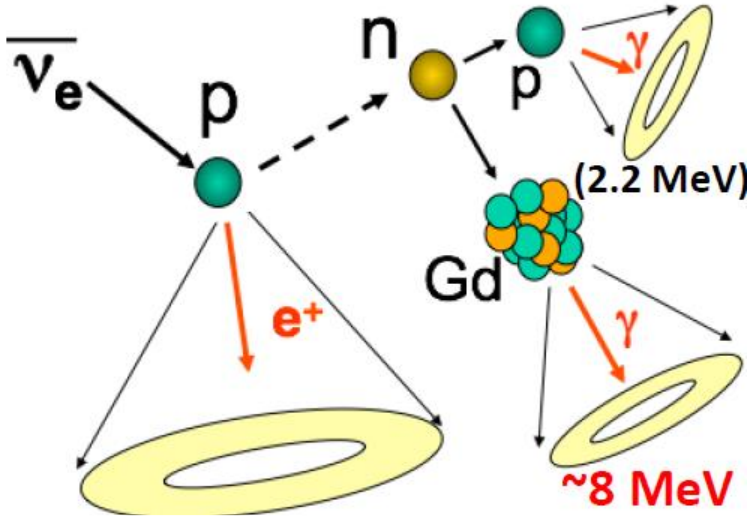
→ 陽子崩壊バックグラウンドの削減

→ 超新星レリックニュートリノ

乞うご期待！



Gd=0.02% → 0.2%



Gdの中性子捕獲
$\tau = 30\,\mu s$
E_γ=8.0MeV

まとめ

大気ニュートリノ振動解析を新しい事象再構築アルゴリズムで更新 (SK-IV分)

- Normal Hierarchyを69.2% ~ 85.7%で示唆
- CP対称性が最大限(δ_{CP}=270°)に破れている可能性を示唆

その他の解析も進展

- 陽子崩壊解析の更新 (→$e^+\pi^0$, → $\mu^+\pi^0$, → trilepton)
- 天体ニュートリノ探索 (Blazer, GRB)
- 暗黒物質探索 (Earth, GC)

タンクオープン後SK-Vを再開

- データはSK4とコンシステントであり無事再始動した
- 先月、T2Kランも再開
- 来春SK-Gdを目指す