

C01:超新星背景ニュートリノ観測による 星形成の歴史の研究

作田誠(岡山大学理)

■ C01班メンバー:

- **実験**: 研究代表者 作田 誠(岡山大学)
研究分担者 池田一得(東京大学)
連携研究者 中畑雅行(東京大学)
連携研究者 関谷洋之(東京大学)
連携研究者 小汐由介(岡山大学)
- **理論**: 研究分担者 鈴木英之(東京理科大学)
連携研究者 中里健一郎(東京理科大学) →招待講演
連携研究者 住吉光介(沼津工高専)

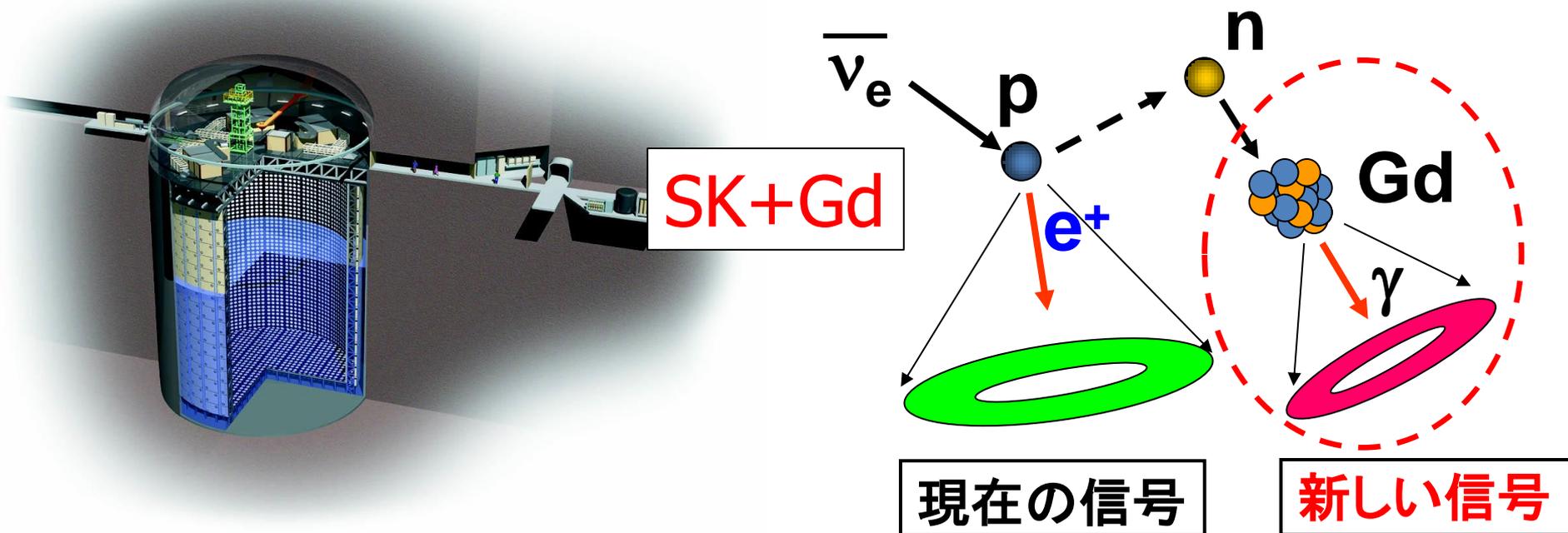
1. 目的・意義
2. 研究計画・現状
3. まとめ

1. 研究目的・意義

- C01では、スーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウムを導入するために必要な**低放射能技術開発**と**超新星背景ニュートリノ (Supernova Relic Neutrino, SRN)の理論研究**を同時に進める。
 - **実験研究**:計画研究「極低放射能技術」(D01)との連携により、市販の硫酸ガドリニウム $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ からウラン、トリウム、その娘核種を0.3mBq/kg(Gd)以下]まで取り除く開発研究を行う。
 - **理論研究**:重元素量の進化に伴う星形成率や初期質量関数などの変化を考慮した超新星背景ニュートリノのより精度の良い理論開発を行う。
 - Nakazato, Sumiyoshi, Suzuki, Totani, Umeda and Yamada, APJ.Suppl.Ser.205,2(2013).. [[Supernova Neutrino Database](#)]
 - K.Nakazato, PRD88, 083012(2013).

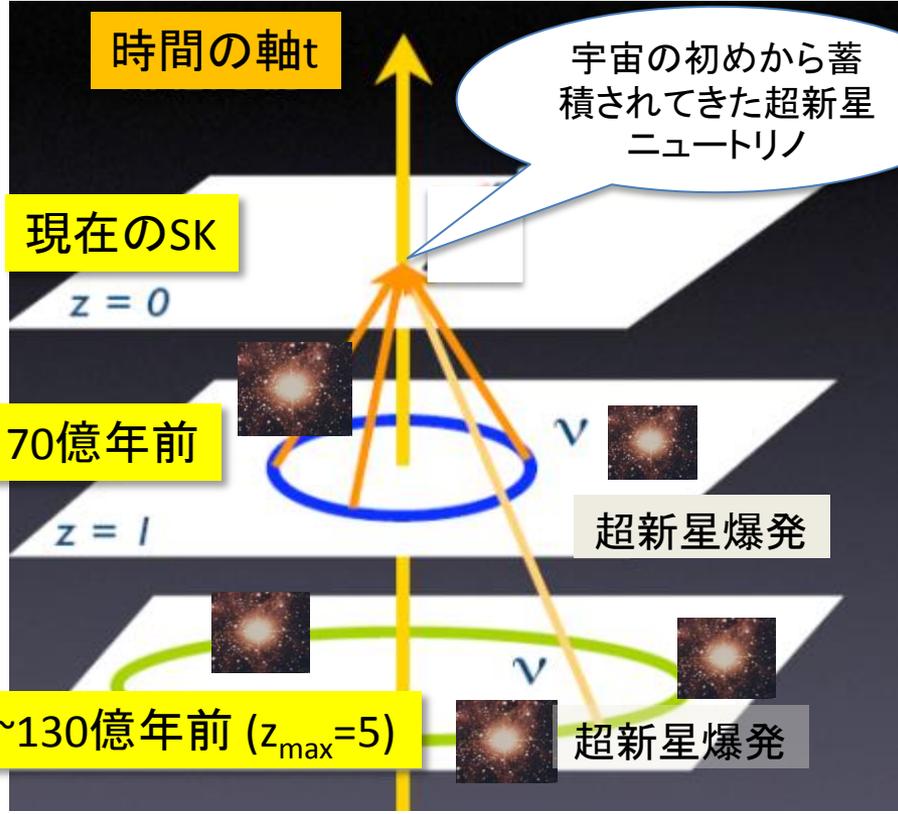
SKにGdを加え中性子検出機能付加 (GADZOOKS)

- 新たな検出方法 Vagins and Beacom, PRL93, 171101 (2004).
 - $Gd_2(SO_4)_3$ は水溶性で、Gdは元素中で中性子捕獲断面積最大
 - 逆 β 反応で発生する陽電子とGdによる中性子捕獲で生じるガンマ線を同時計測しバックグラウンドを低減
 - SRN事象数: 年間約0.8~5イベント($E_e=10-30MeV$),
0.3 -1.9イベント($E_e=18-30MeV$)



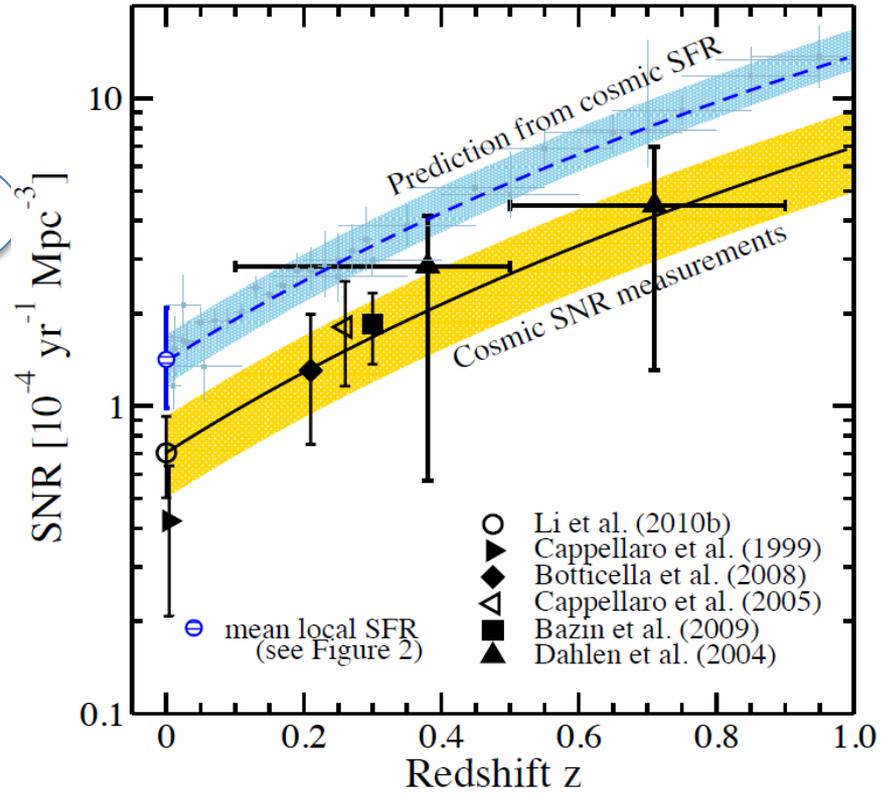
超新星背景ニュートリノ(未発見)の意義

宇宙の初めから約1秒毎に爆発してきた超新星ニュートリノ(超新星背景ニュートリノ)を世界で初めて観測する。



宇宙の晴れ上がり (z=1089)

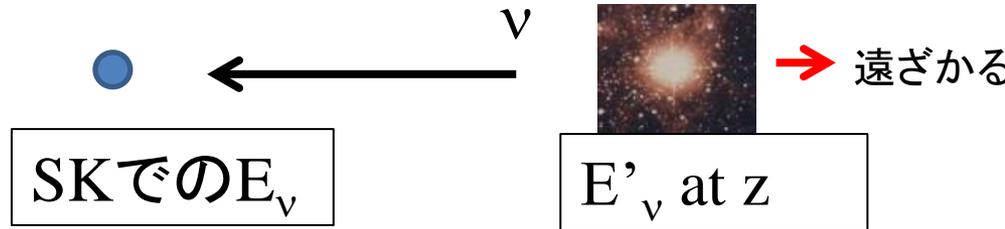
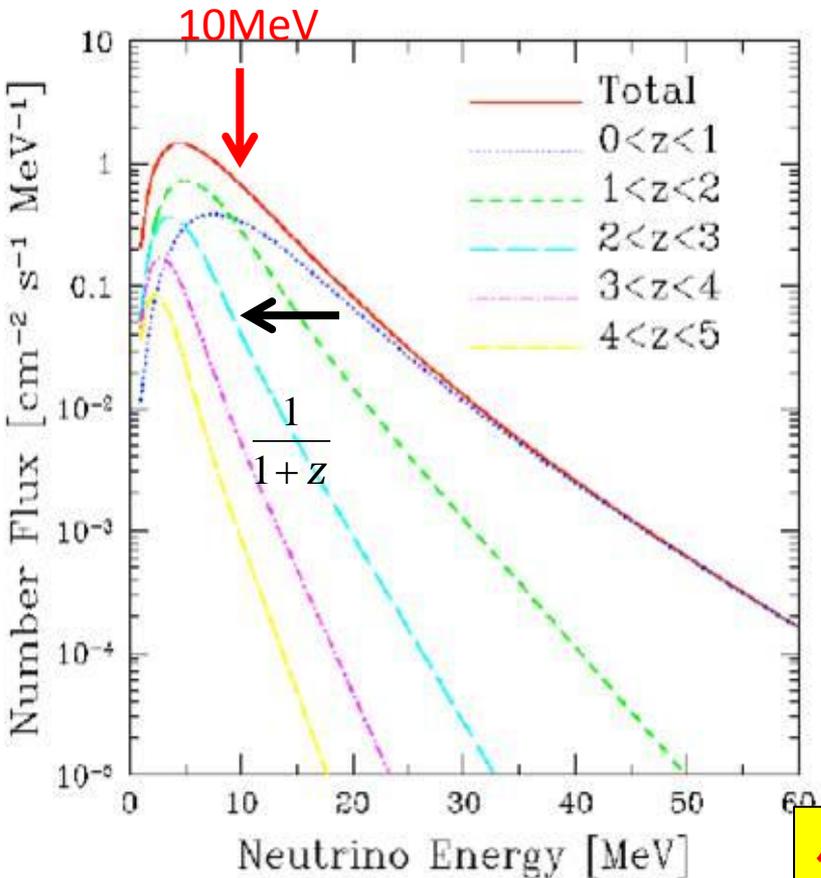
赤方偏移zの関数として超新星爆発の頻度



星形成率(Star Formation Rate(SFR))から予想される超新星発生頻度と実際の超新星爆発の観測結果に違いがあり、その謎をニュートリノによって解明する。

超新星背景ニュートリノの予想束

Ref. S.Ando, Astrophys.J.607:20-31,2004.



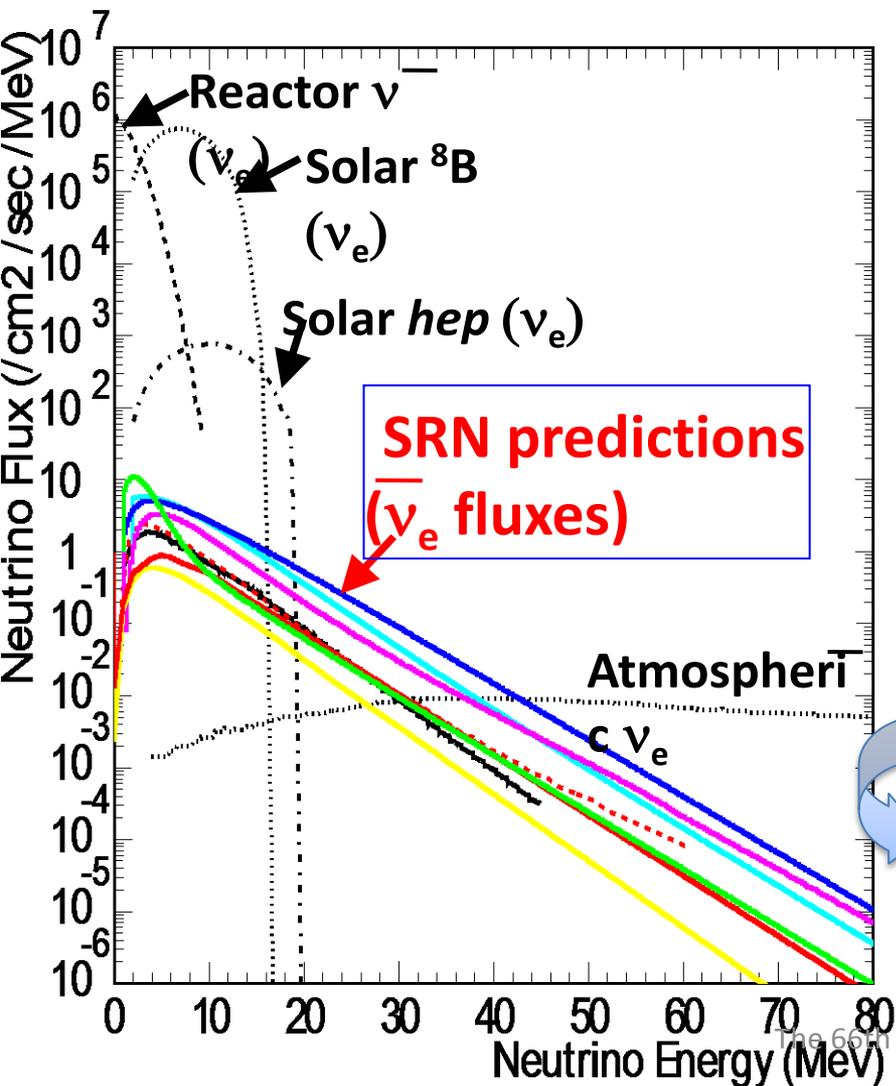
$$E_\nu = \frac{1}{1+z} E'_\nu : \text{redshift}$$

$$\frac{dF(E_\nu)}{dE_\nu} = \int_0^{z_{\max}} R_{SN}(z) \frac{dF(E'_\nu)}{dE'_\nu} \frac{cdz}{H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\Lambda}}$$

低エネルギーの事象の観測により、より宇宙の過去に迫る。

Cf. $E=10\text{MeV}$ ぐらいで、 $0<z<1$ と $1<z<2$ の寄与が同じぐらいになる。

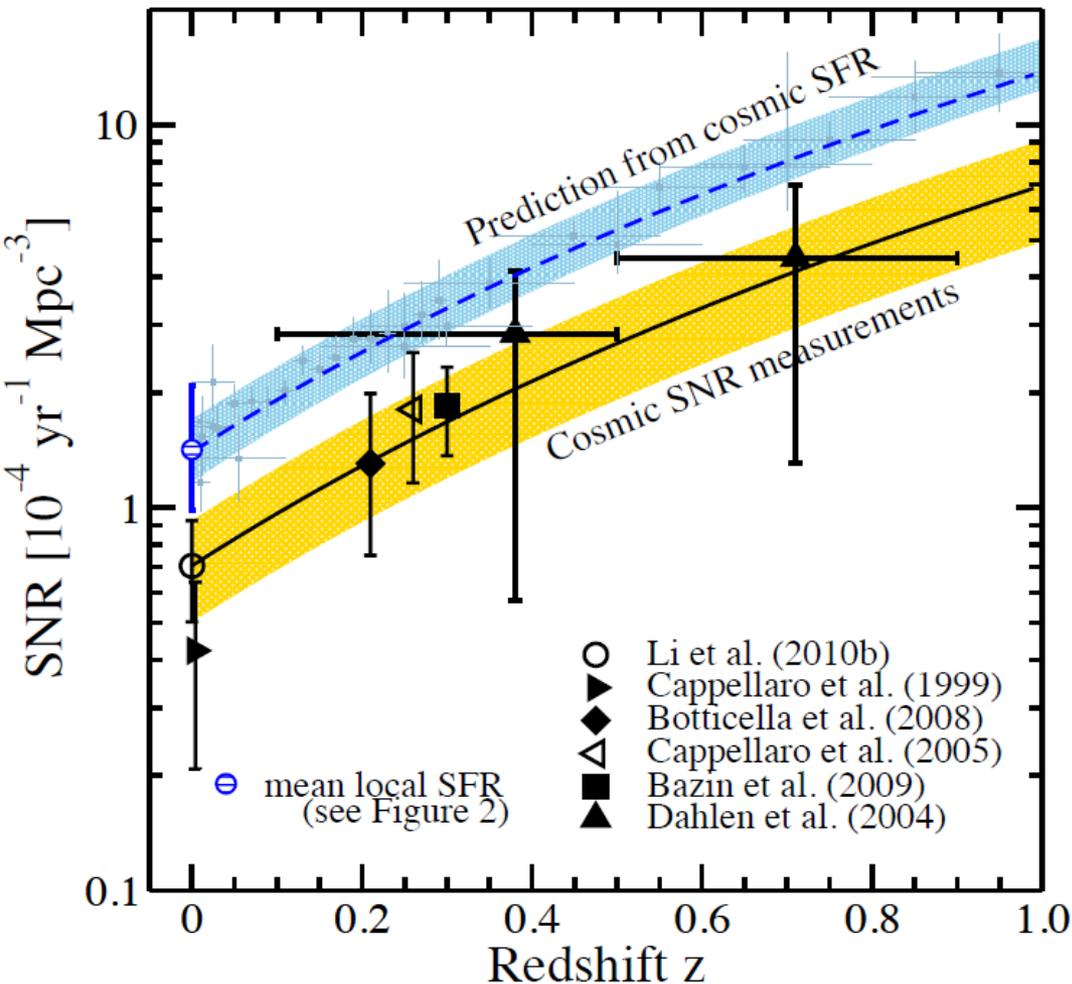
超新星背景ニュートリノ(SRN)の予想束



$E < 10 \text{ MeV}$ は、原子炉からのニュートリノがあるので、SRNの測定可能範囲は、 $10 < E < 30 \text{ MeV}$ 。

SKでの期待されるSRN事象数:
- 0.8 - 5.0 events/year/22.5kton
(10-30MeV)

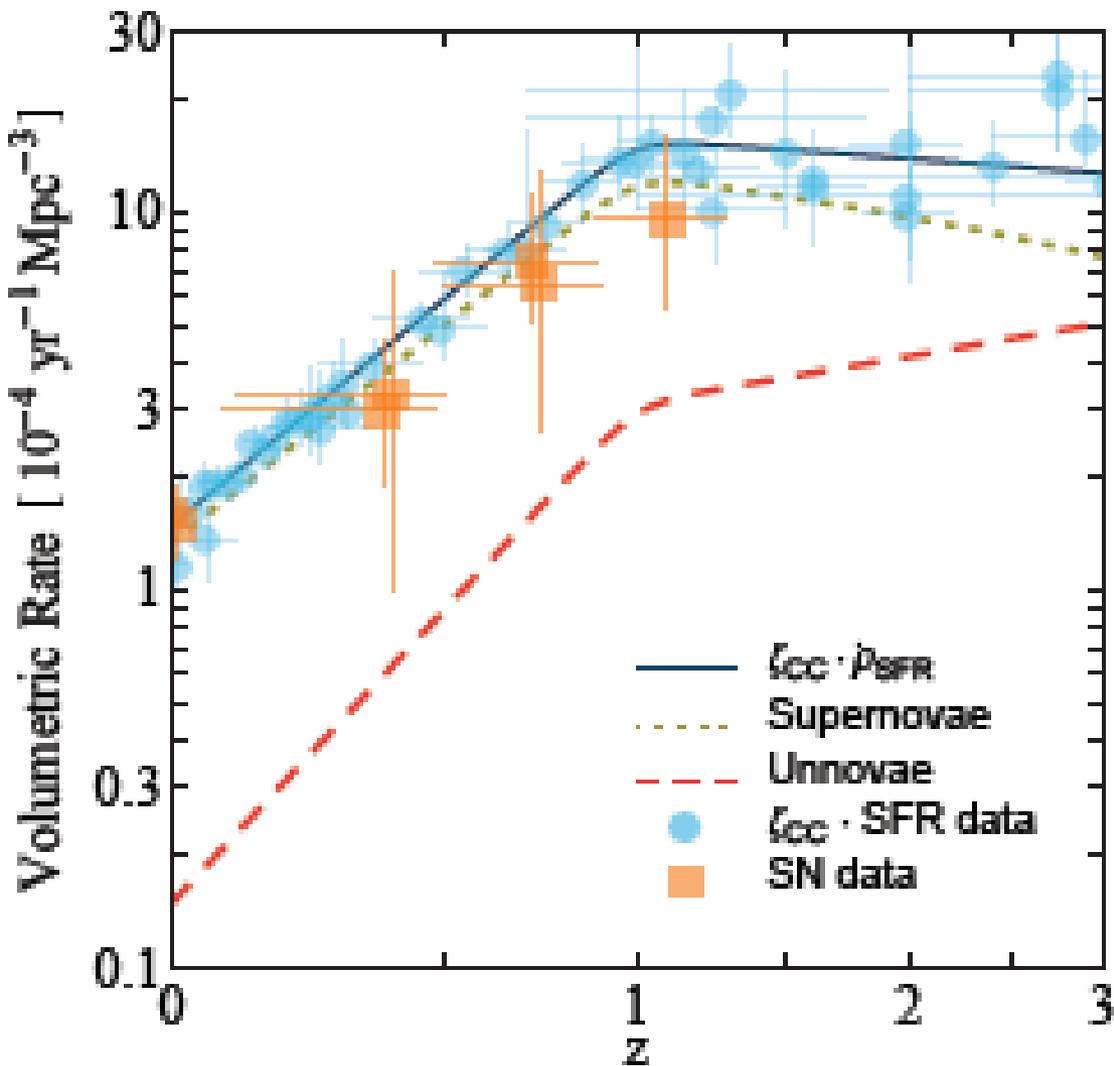
超新星の頻度



- ◆ 観測された超新星頻度は、SFRから予想される頻度に対して半分ぐらいしかない。
- ◆ この原因は何か？
 - 明るさが暗い超新星があるのか？
 - 光を遮るものがあるから観測できていないのか？

ニュートリノ観測によってこれらの疑問に答える。

超新星の頻度 ($z > 1$)



2. 理論研究：超新星背景ニュートリノ

-鈴木英之(東京理科大) →中里講演

過去の超新星で放出されたニュートリノが、宇宙膨張により赤方偏移しながら、宇宙空間を(ほぼ)一様に満たしているはず。

現在のフラックス

$$\frac{dF_\nu(E_\nu, t_0)}{dE_\nu} = c \int_0^{z_{\max}} \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \int_0^{Z_{\max}} \frac{d^2 R_{\text{CC}}(z, M, Z)}{dM dZ} \frac{dN_\nu(E'_\nu, M, Z)}{dE'_\nu} dZ dM \frac{dz}{H(z)}$$
$$E'_\nu \equiv E_\nu(1+z)$$

$H(z)$: 宇宙膨張モデルに依存する宇宙の膨張率

$R_{\text{CC}}(z, M, Z)$: 赤方偏移 z の時期に重元素量 Z 、初期質量 M の星が重力崩壊する単位共動体積あたりの頻度

$\frac{dN_\nu(E'_\nu, M, Z)}{dE'_\nu}$: 重元素量 Z 、初期質量 M の星が重力崩壊したとき放出される超新星ニュートリノのエネルギー分布

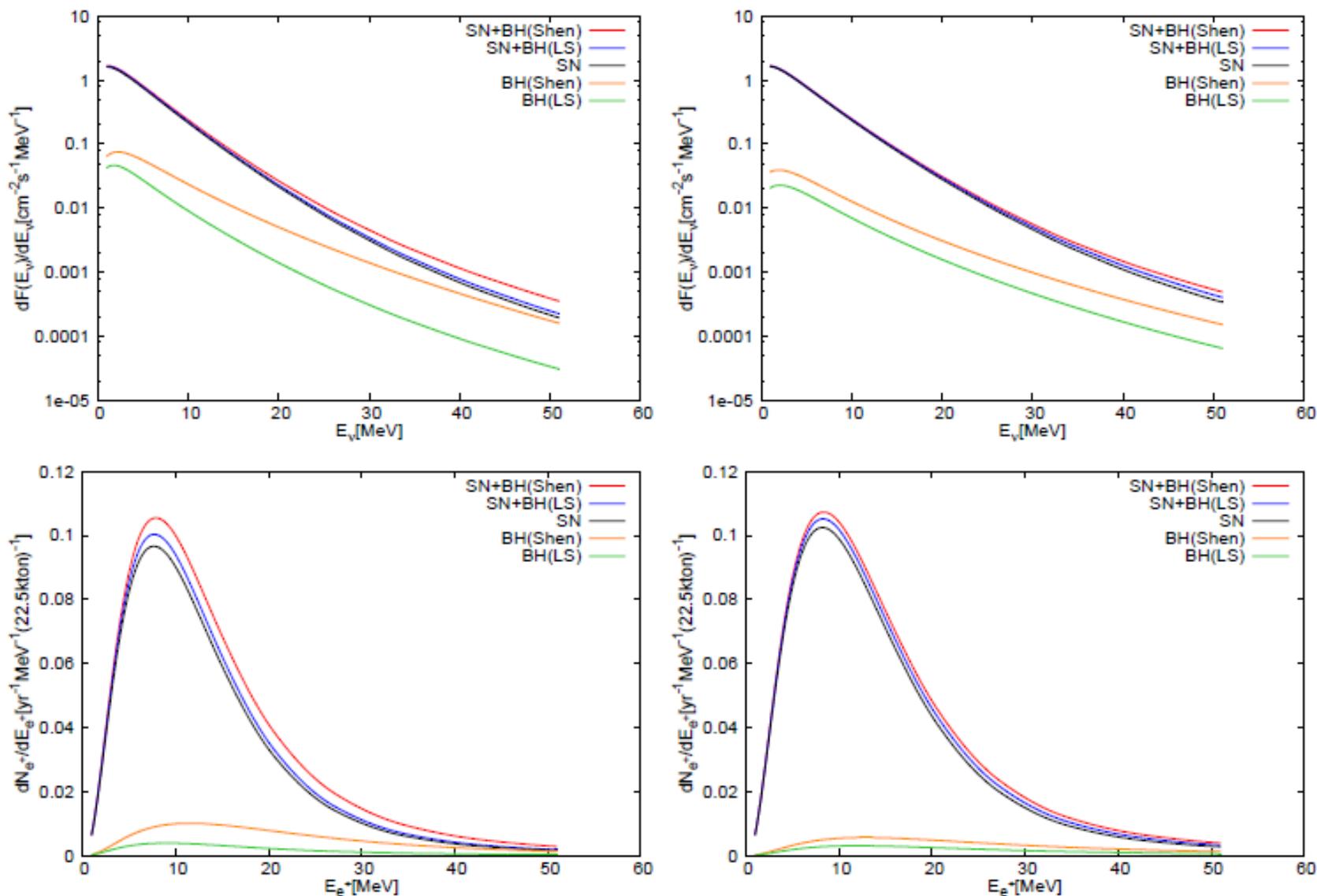
■ 理論研究の年度計画

-鈴木英之(理科大)

2014年度：超新星背景ニュートリノに対するこれまでの多くの理論計算では、星の初期質量 M 、金属量 Z の依存性を考慮していなかったため、まずこれらを考慮する。その際、中里らが作成した超新星ニュートリノデータベース(異なる初期質量、金属量、コアの爆発タイムスケール毎に計算された超新星ニュートリノフラックス $\frac{dN_\nu(E'_\nu, M, Z)}{dE'_\nu}$) を用いて、爆発しないでブラックホールになるケースの寄与も含めて議論する。

2015年度以降：さまざまな天文学の観測結果をベースに、星形成史モデルに対応する超新星発生率の時間発展モデル ($R_{CC}(z, M, Z)$) を構築し、超新星背景ニュートリノのデータから得られる星形成史に関する知見を議論する。

理論研究 -鈴木英之(理科大)- →中里講演



超新星背景ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) のエネルギー分布 (質量階層 normal (左)、inverted (右)): BH の寄与, Mochida *et al.*'14

現状SK(水)でのSRN探索

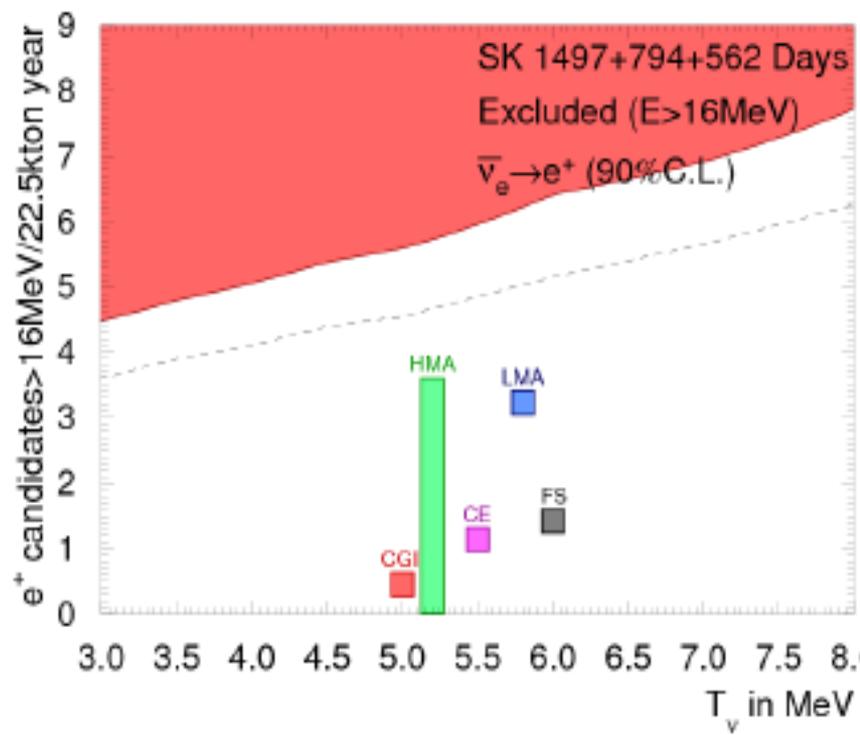
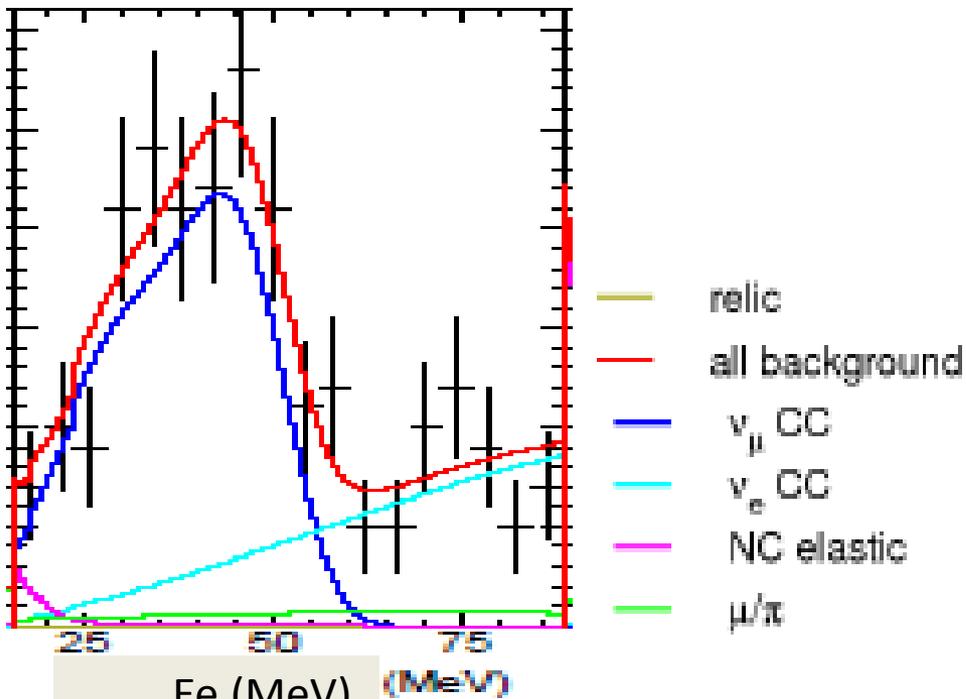
K.Bays et al., PRD85(2012), H.Zhang et al., Astropart.Phys.60(2015)

Bays et al.(2012): flux $2.9 \bar{\nu}_e$ (1/cm²/sec)

この解析は、すでに統計でなく、系統誤差で制限される。大気ニュートリノバックグラウンドを除かないとSRNには届かない。
→Gd (=中性子タグ) 必要。

Linear Scale!

- Ando = Ando et al (LMA model)
- KSW = Kaplinghat, Steigman, Walker (heavy metal abundance)
- Mala = Malaney (cosmic gas infall)
- Fail = Lunardini (failed SN model)
- H/W = Hartmann/Woosley (chemical evolution)



2. 年度計画(実験)

2014年度:

- ・Gd化合物溶液中の放射性不純物測定技術の開発

2015年度以降:

- ・放射性不純物除去樹脂の開発
 - ・2014年度に開発したセットアップで、樹脂を評価
 - ・評価をもとに、樹脂の開発を企業との共同で行う
- ・SKに導入する際の、システムの設計
 - ・評価された樹脂の放射性不純物除去能力に基づいて、SKで運用するシステムを設計
- ・SKにシステムを導入し、放射性不純物濃度の評価

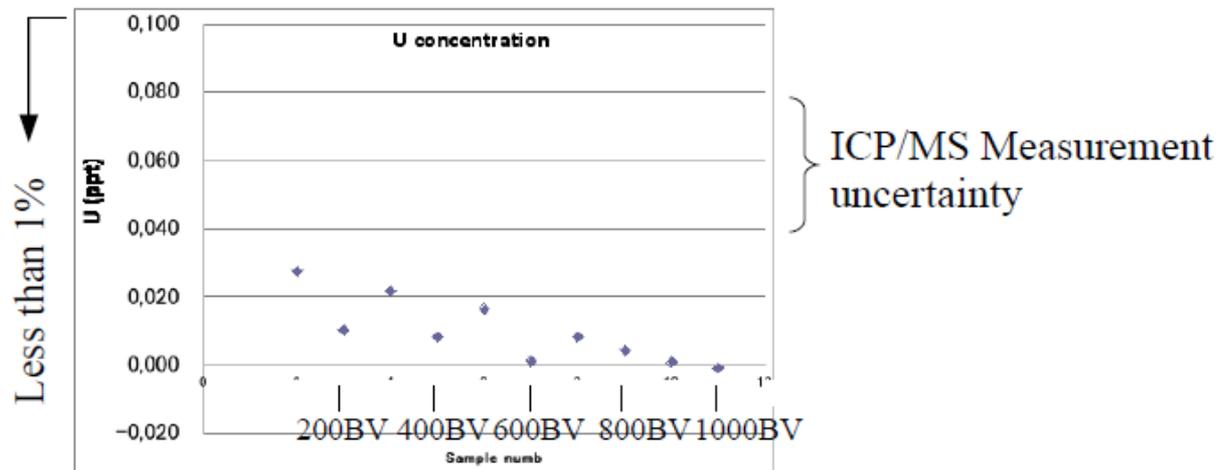
^{238}U 除去

- ^{238}U は樹脂AJ4400で1/100に落とせることが分かった。

Uranium reduction

The Organo company provided us with samples were they used this resin and we measured the Uranium concentration with the ICP/MS.

The input water was also measured: 10 ppt



A sample with ~10ppt U can be reduced to less than 1%.

市販Gd₂(SO₄)₃化合物製造番号毎の放射性不純物 (U,Th,Ra)測定 @ Canfranc Lab



Chain	Main sub-chain isotope	Radioactive concentration (mBq/kg)
²³⁸ U	²³⁸ U	50
	²²⁶ Ra	5
²³² Th	²²⁸ Ra	10
	²²⁸ Th	100
²³⁵ U	²³⁵ U	32
	²²⁷ Ac/ ²²⁷ Th	300

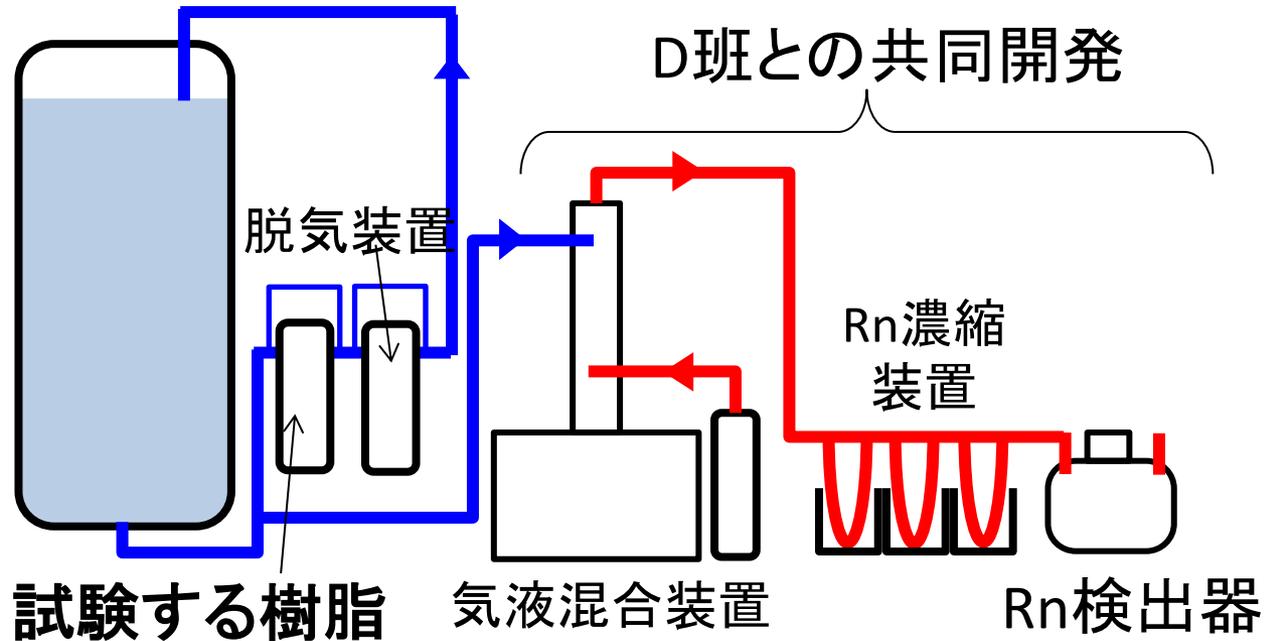
Chain	sub-chain	Gd-0904	Gd-1008	Gd-1208	Gd-1302	Gd-1303	Gd-1308	Gd-1307a	Gd-1307b
²³⁸ U	²³⁸ U	51±21	< 33	292±67	74±28	242±60	71±20	47±26	73±27
	²²⁶ Ra	8±1	2.8±0.6	74±2	13±1	13±2	8±1	5±1	6±1
²³² Th	²²⁸ Ra	11±2	270±16*	1099±12	205±6	21±3	6±1	14±2	3±1
	²²⁸ Th	28±3	86±5	504±6	127±3	374±6	159±3	13±1	411±5
²³⁵ U	²³⁵ U	< 32	< 32	< 112	< 25	< 25	< 32	<12	<30
	²²⁷ Ac	214±10	1700±20	2956±30	1423±21	175±42	295±10	<6	<18
Other	⁴⁰ K	29±5	12±3*	101±10	60±7	18±8	3±2	3±2	8±4
	¹³⁸ La	8±1	<	683±15	3±1	42±3	5±1	<1	<2
	¹⁷⁶ Lu	80±8	21±2	566±6	12±1	8±2	30±1	1.6±0.3	<2

Results in mBq/kg

低バックグラウンドGd溶液 R&D システム(今年度)

Gd化合物溶液
1m³タンク

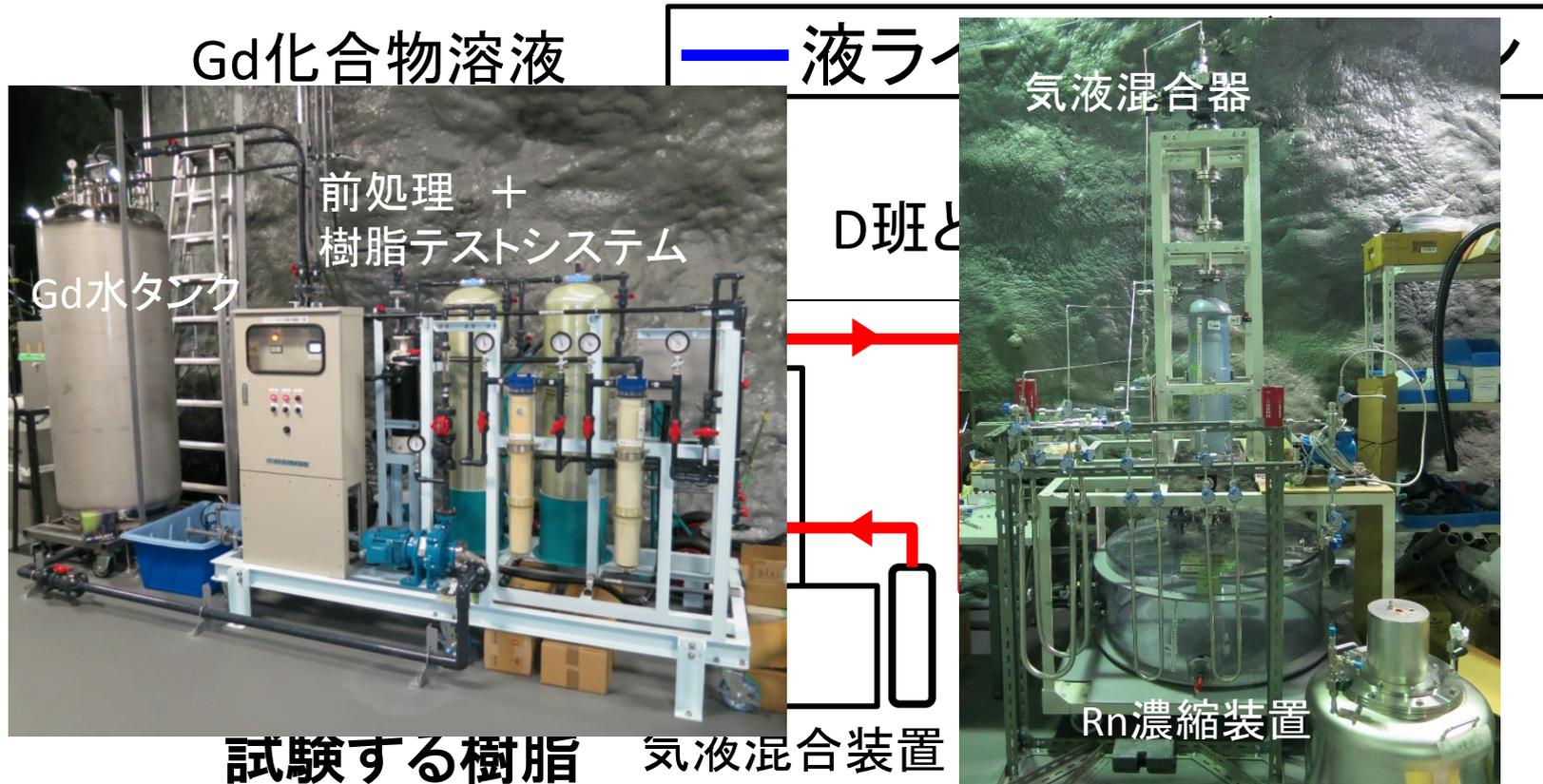
— 液ライン — ガスライン



特に問題となる放射性不純物:ラジウム

- ・ラジウム崩壊の娘核であるラドン(希ガス)を測定する。
- ・Gd溶液と純空気を混合し、純空気に混ざったラドン濃度を測定する。

低バックグラウンドGd溶液 R&D システム(今年度)



特に問題となる放射性不純物:ラジウム

- ・ラジウム崩壊の娘核であるラドン(希ガス)を測定する。
- ・Gd溶液と純空気を混合し、純空気に混ざったラドン濃度を測定する。

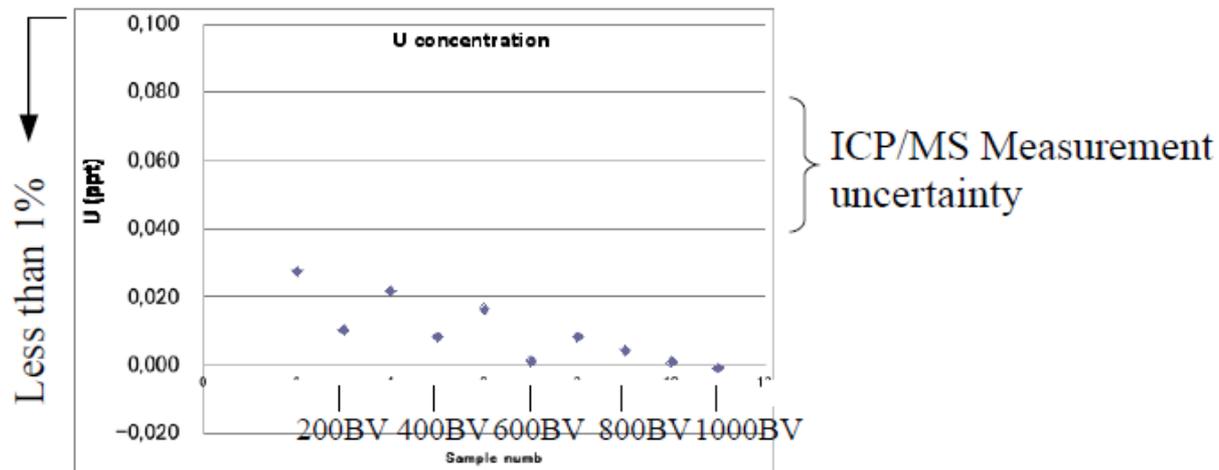
^{238}U 除去

- ^{238}U は樹脂AJ4400で1/100に落とせることが分かった。

Uranium reduction

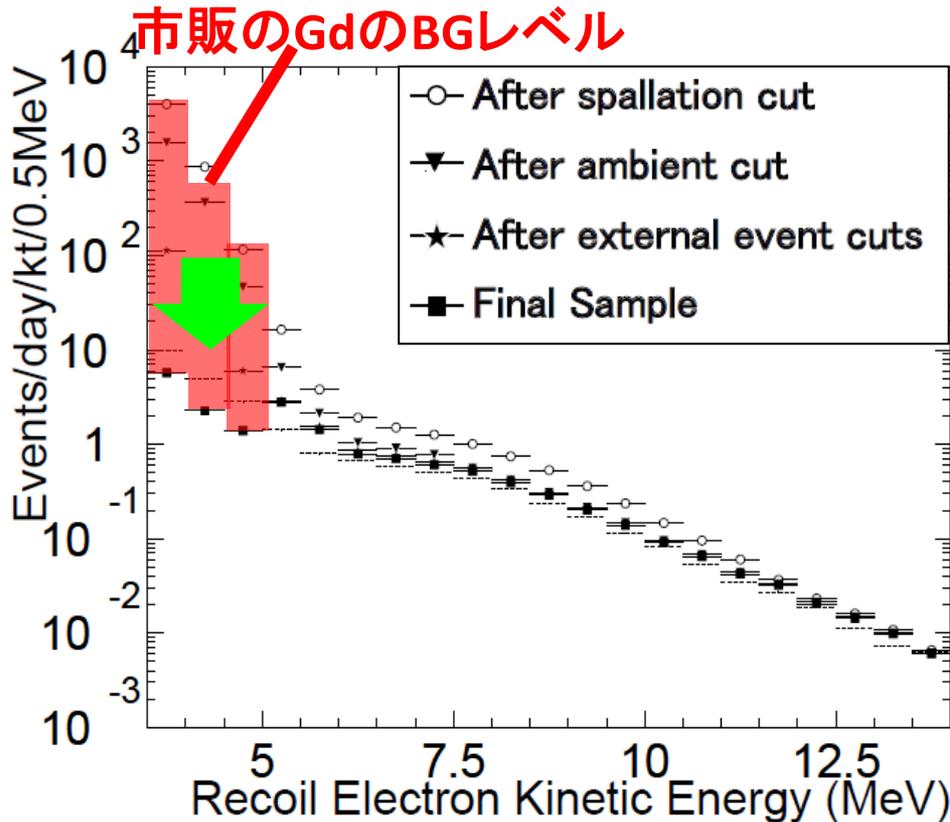
The Organo company provided us with samples were they used this resin and we measured the Uranium concentration with the ICP/MS.

The input water was also measured: 10 ppt

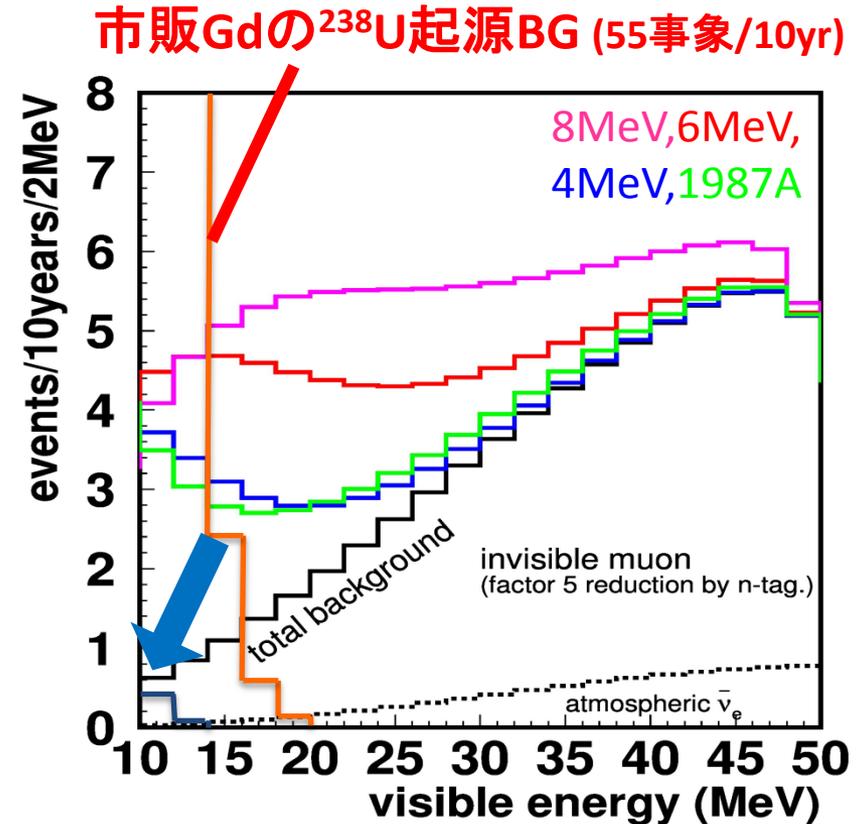


A sample with ~10ppt U can be reduced to less than 1%.

Gd中の放射性不純物の削減の物理への影響

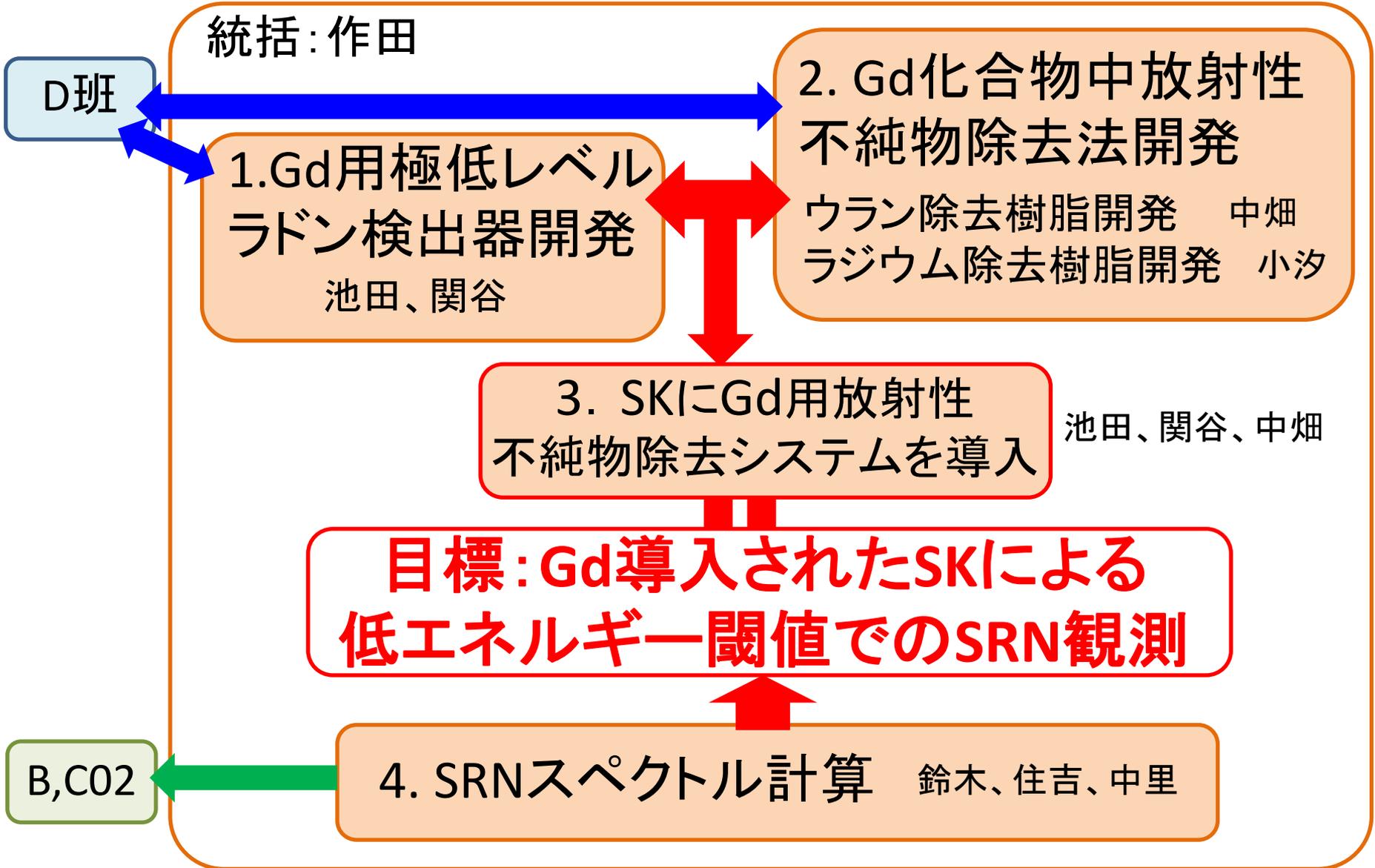


例:SKにおける太陽ニュートリノサンプル
5MeV以下の低エネルギー領域は放射性不純物によるバックラウンド。現在のSKと同じレベルにするには市販Gd中の放射性不純物(トリウム・ラジウムが問題)を1/100~1/1000にする必要がある。



^{238}U の自発核分裂では十数MeVの γ 線と中性子が放出され、SRNの直接的なBGとなる。図は ^{238}U が50mBq/kg(Gd)を1/100にした場合

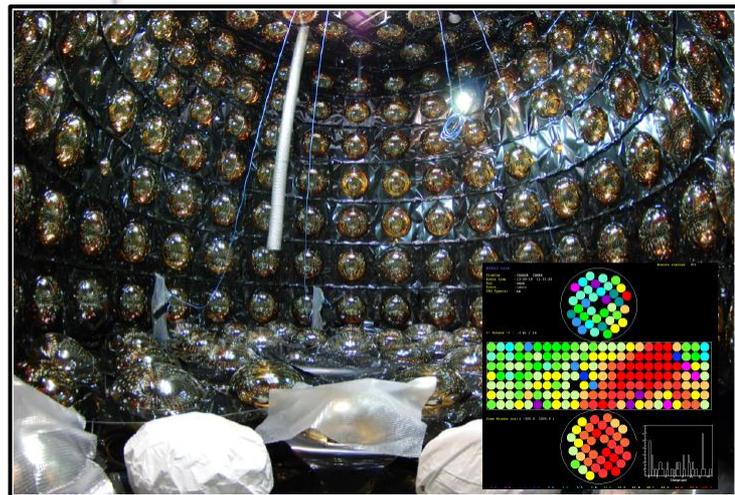
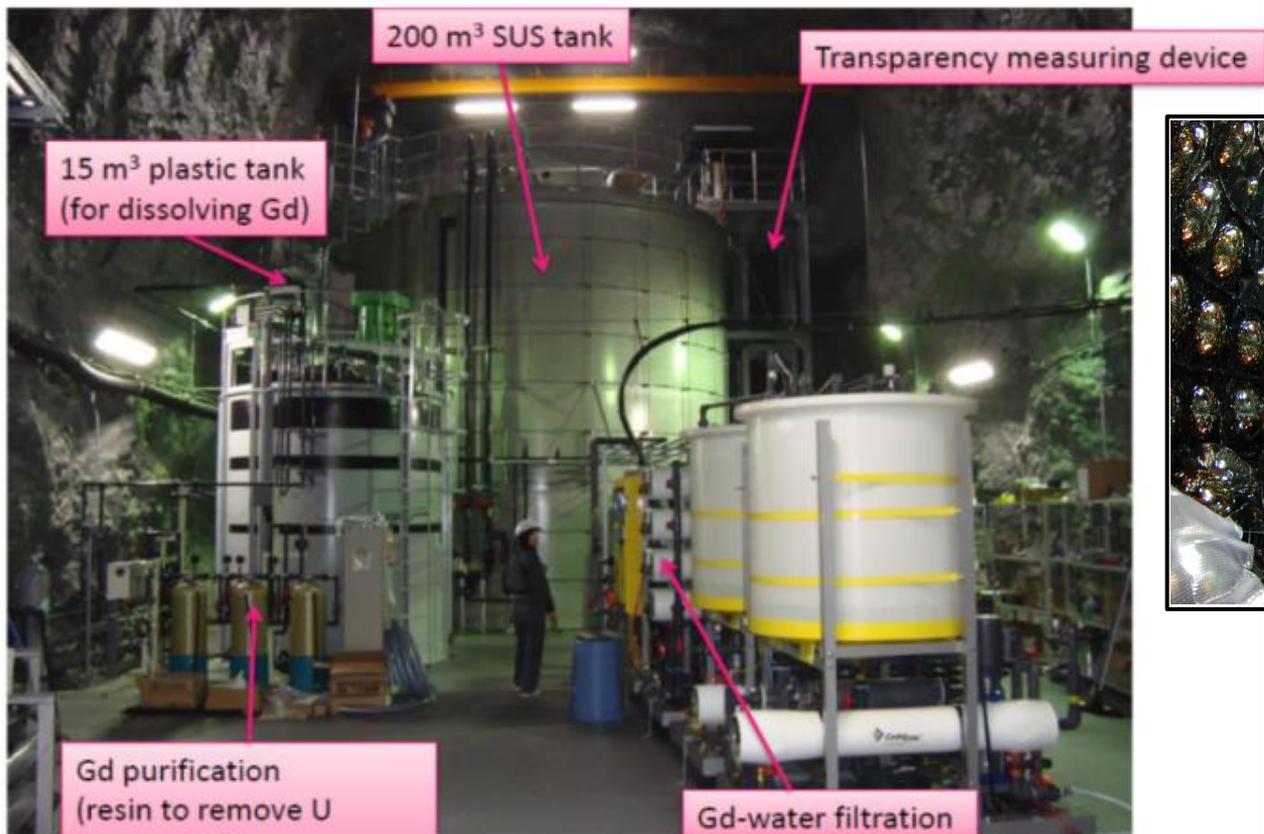
C01: 超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究



Gd入り200トン水チェレンコフ検出器(EGADS)での実証 (基盤S、中畑雅行、2009-2013)

- 2013年8月完成。

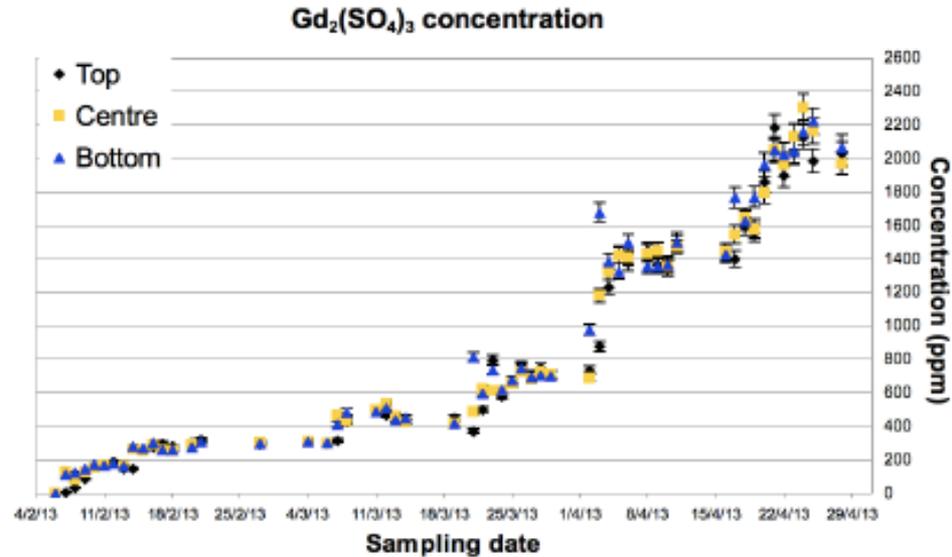
EGADS Lab. In Kamioka Mine



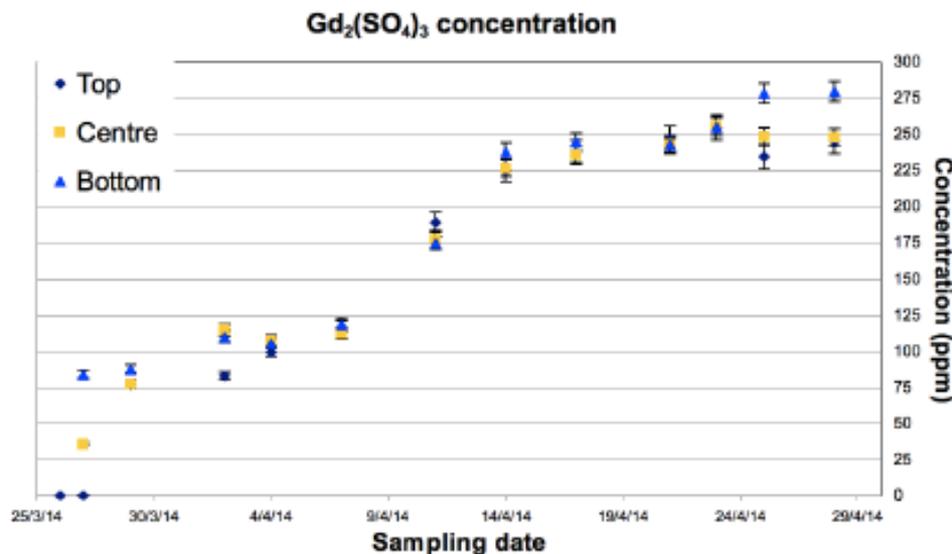
Feb.16, 2011

EGADSに $Gd_2(SO_4)_3$ を溶かし循環

- PMTなしの状況で、
0.2%まで溶かし、
循環できた。
(2013,2-4月)

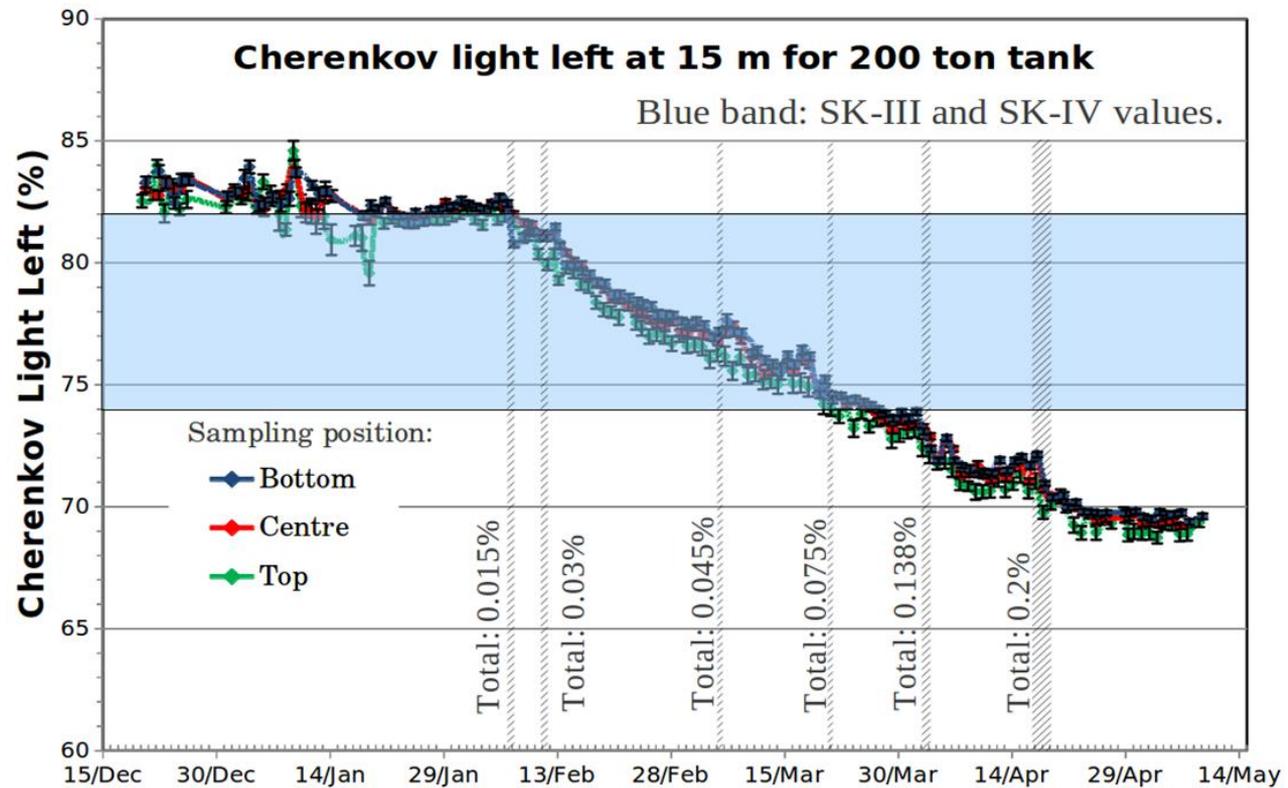


- PMTあり(完成後)で、
0.02%まで溶かし循環、
データ収集した。
(2014,3-4月)



UDEAL装置による光の透過率測定

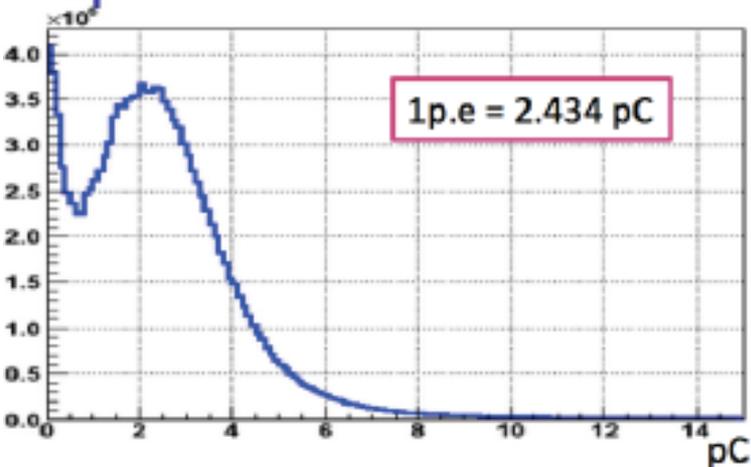
- SK(純水)と比べてSK(Gd0.1%)で15%光量減少. 物理への影響は少ない(許容される範囲)。



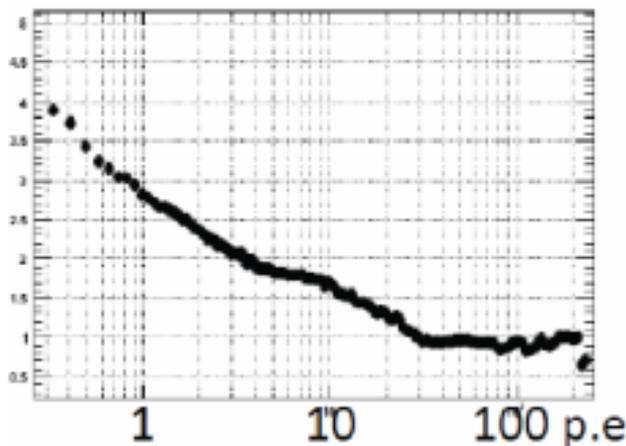
EGADS完成後のPMT240本較正

- PMT較正 (1pe, timing, Q) 済

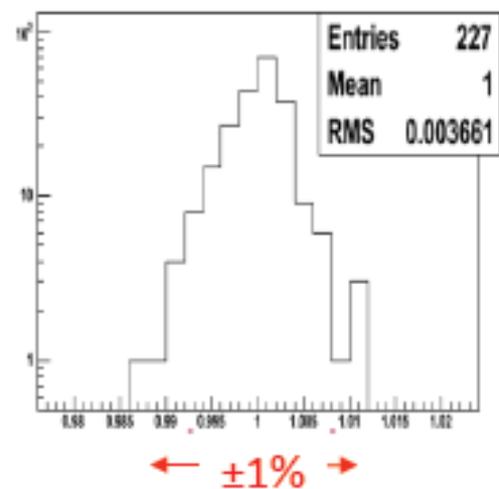
• 1photo-electron



• Timing resolution



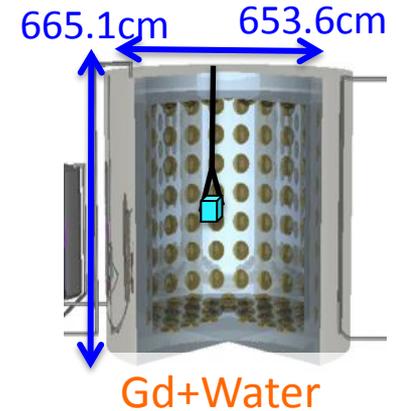
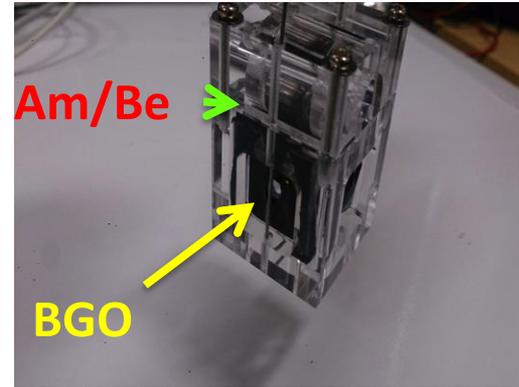
• PMT Q uniformity



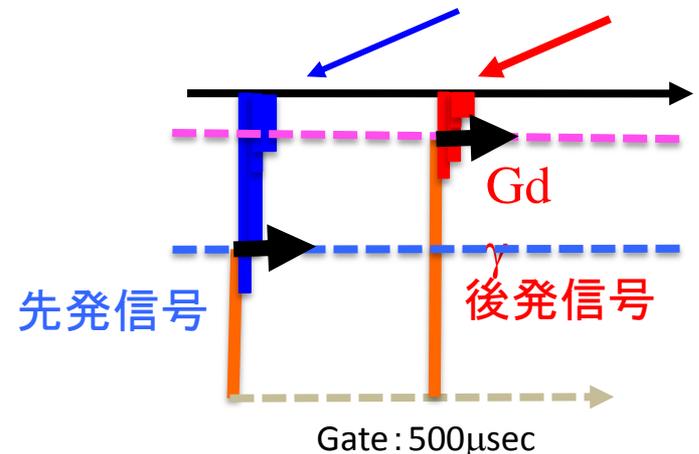
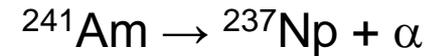
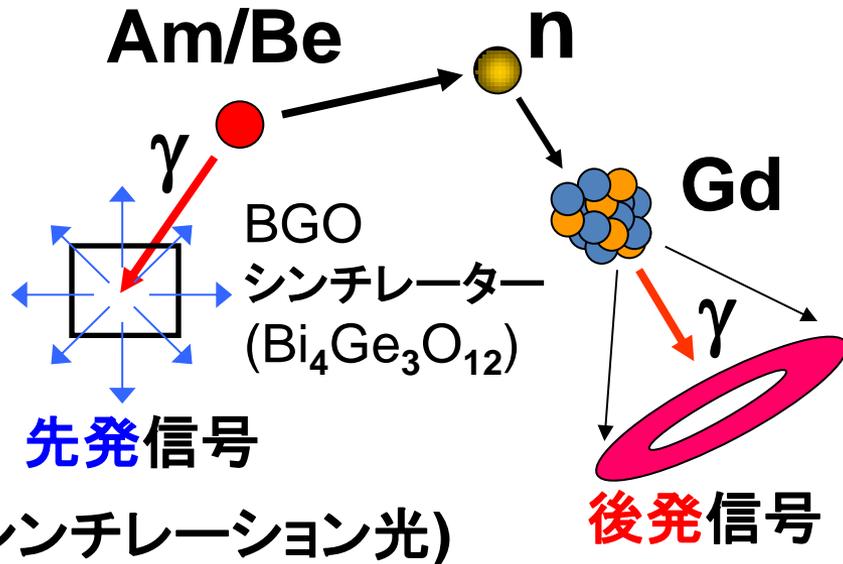
- Auto Xenon によるモニターもできている。

EGADS中性子検出の状況

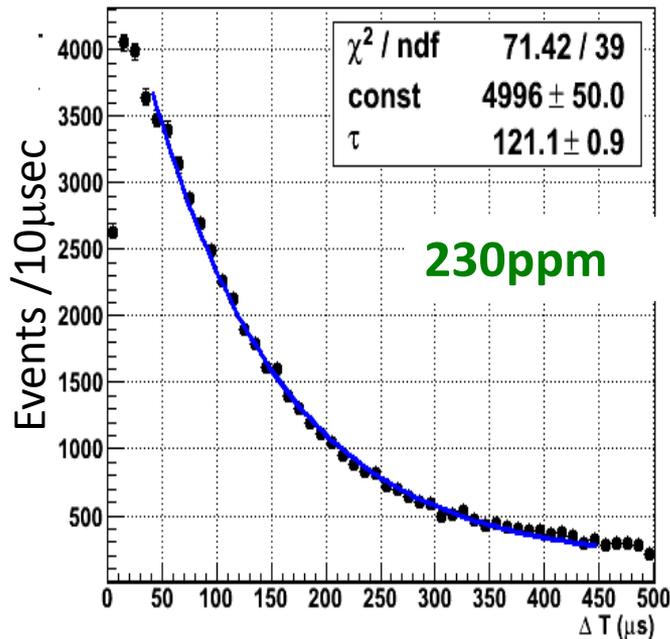
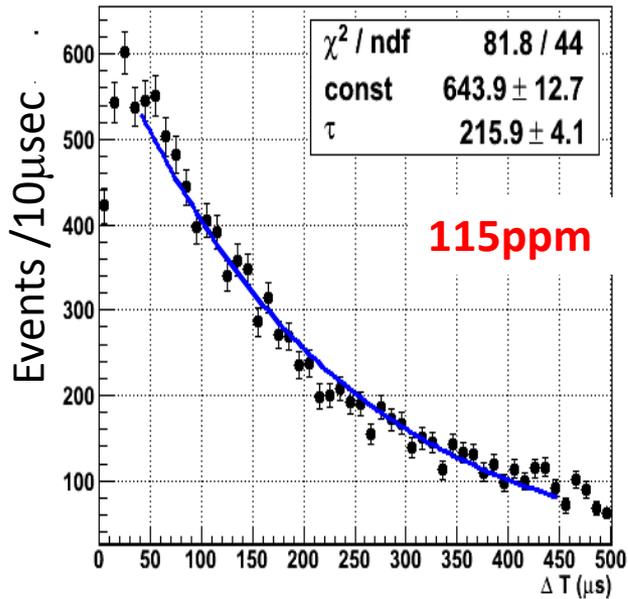
Am/ Be 線源 (疑似ニュートリノ反応) による中性子検出テスト



[模倣ニュートリノ反応]



EGADSでGd γ 信号は見えている。

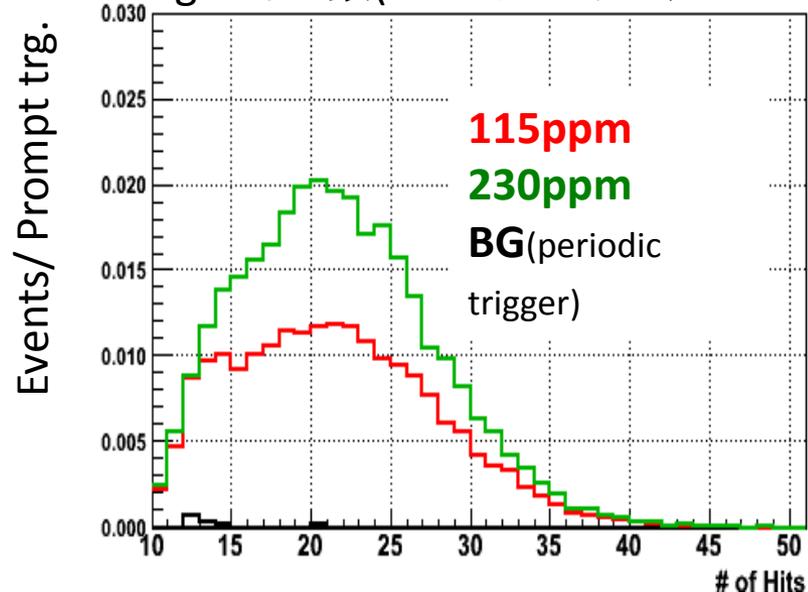


Gd ₂ (SO ₄) ₃	Data [μsec]	MC [μsec]
115ppm	215.6 ± 4.1	221.8 ± 2.3
230ppm	121.1 ± 0.9	124.8 ± 2.1

- Delay 信号分布 ΔT はData とMCとでConsistent .
 →Gdの中性子捕獲は捕まえられている。

- **検出効率の定量的評価はこれから。**

- e.g. ヒット数(\propto エネルギー)

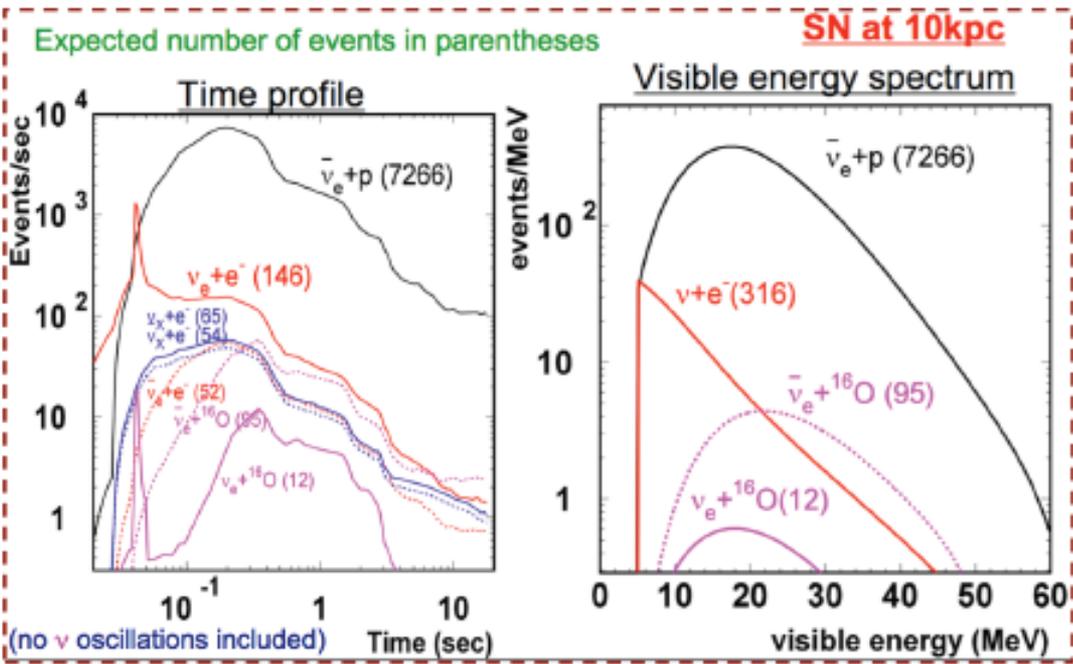
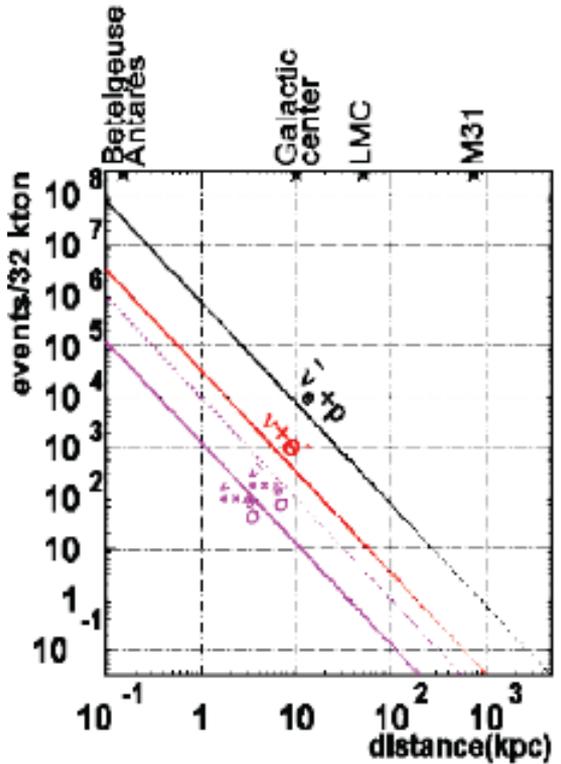


近傍銀河での超新星爆発ニュートリノ観測

- P.Fernandez (SK)@ ICHEP

- 時間ごとに ν_e , 反 ν_e 事象が区別できる。

With neutron tagging, we can extract the $\bar{\nu}_e$ and ν_e spectra
 Provides much more detailed information about the core-collapse process than that without neutron tagging



3. まとめ

- C01では、スーパーカミオカンデ(SK)にガドリニウムを導入するために必要な**低放射能技術開発**と**超新星背景ニュートリノの理論開発**を同時に進める。
- **この新学術C01後の将来**: SKのGd化(Gadzooks)が実現した時に、まず、世界最初のSRN発見を行う。それを理論計算と比較し、モデルの検証をする。さらに、低エネルギーの統計を増やすことにより、より過去 $z>1$ からのニュートリノを検出し、星の形成の歴史を研究する。
- その研究中に、近傍銀河での超新星が爆発すれば(期待する)、SK-Gd実験により、より詳細な超新星爆発機構の解明もできる。

参考：超新星爆発のSi燃焼過程からのニュートリノ

- 極近傍(例：ベテルギウス0.13kpc)の超新星爆発の際、爆発の24時間前からSi燃焼過程によりニュートリノが放出されると予想される。
- SK+Gdで予想される事象数 in 22.5kt
： ~800事象
- 市販のGd(例：10mBq/kg(Gd))のBG数：
： ~8000事象

BG数は統計的なふらつきだけでなく、水の透過率等、検出器の状態により変動するため、なるべく少なくしなければ、有意な信号の観測はできない。

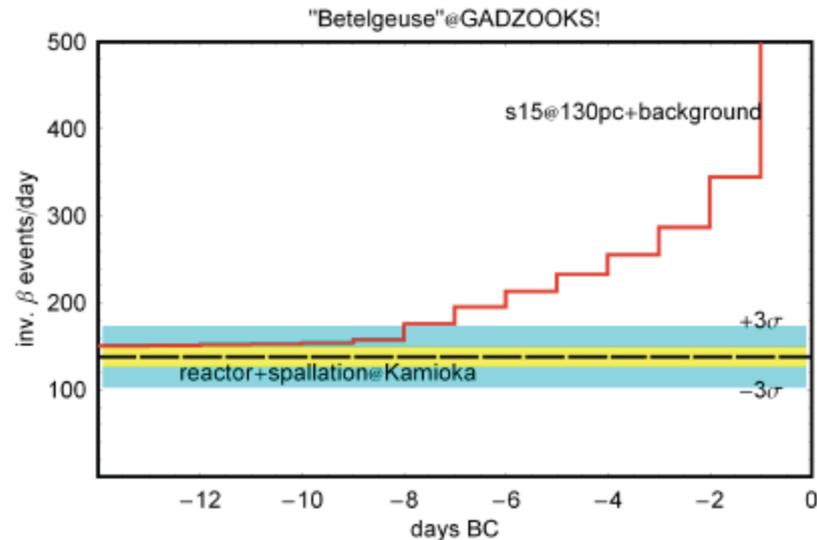
目標は、1/100~1/1000に削減すること。

前兆ニュートリノ

- P.Fernandez (SK)@ ICHEP

Pre-Supernova

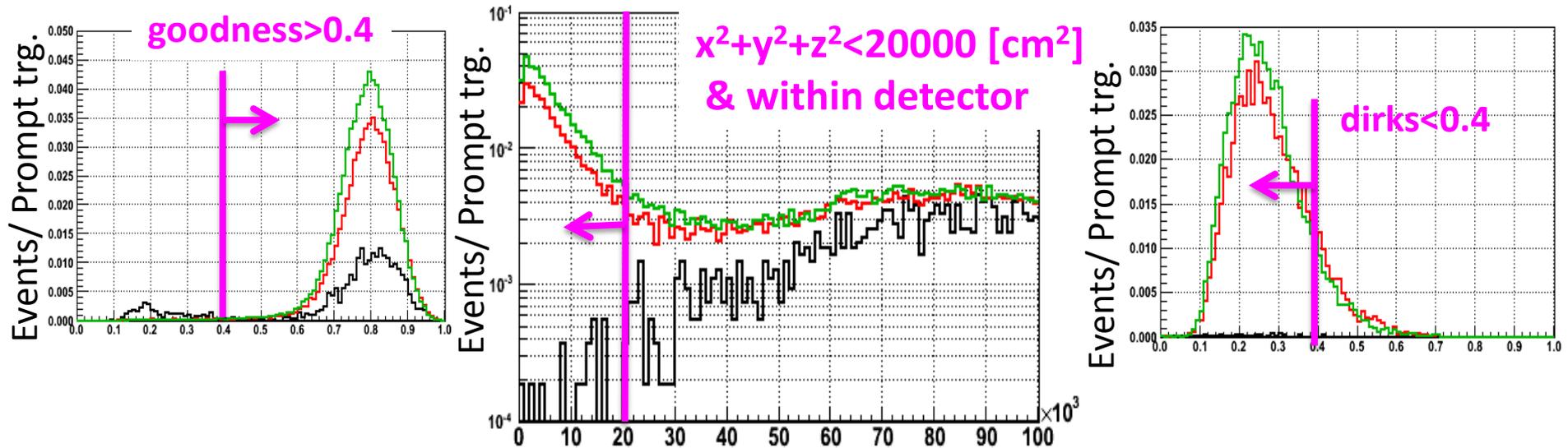
Detection of $\bar{\nu}_e$ produced during late Si burning stage of nearby (≤ 2 kpc) stars, a few days before core-collapse



Detector	Target mass	Min. $\bar{\nu}_e$ energy	Events 48-24 hours before collapse	Events 24-0 hours before collapse	Events 3-0 hours before collapse
Super-K	32 kt	5 MeV	0.6	173	158
GADZOOKS!	22.5 kt	3.8(1.8) MeV	9 (204)	442 (1883)	345 (1130)

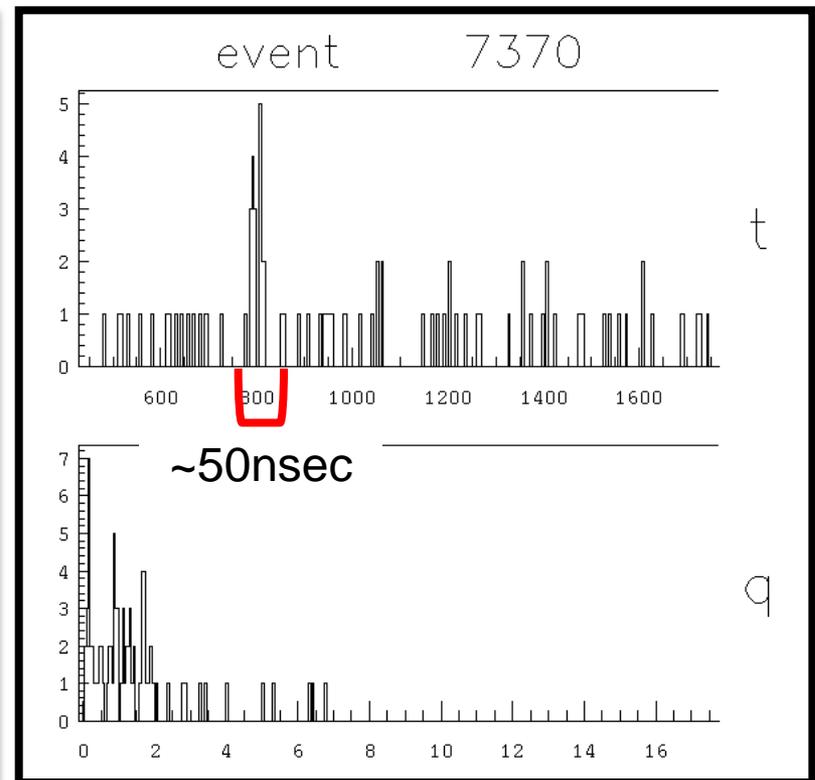
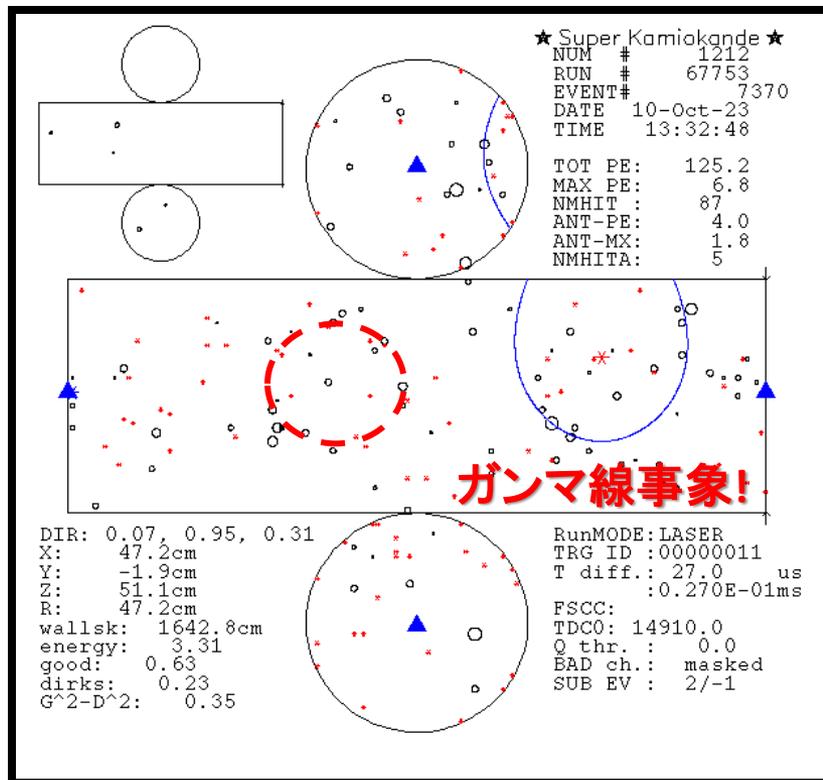
Event selection

115ppm **230ppm** **BG** (Prompt: 1 Hz periodic trigger, Delayed:
500 μ sec gate)

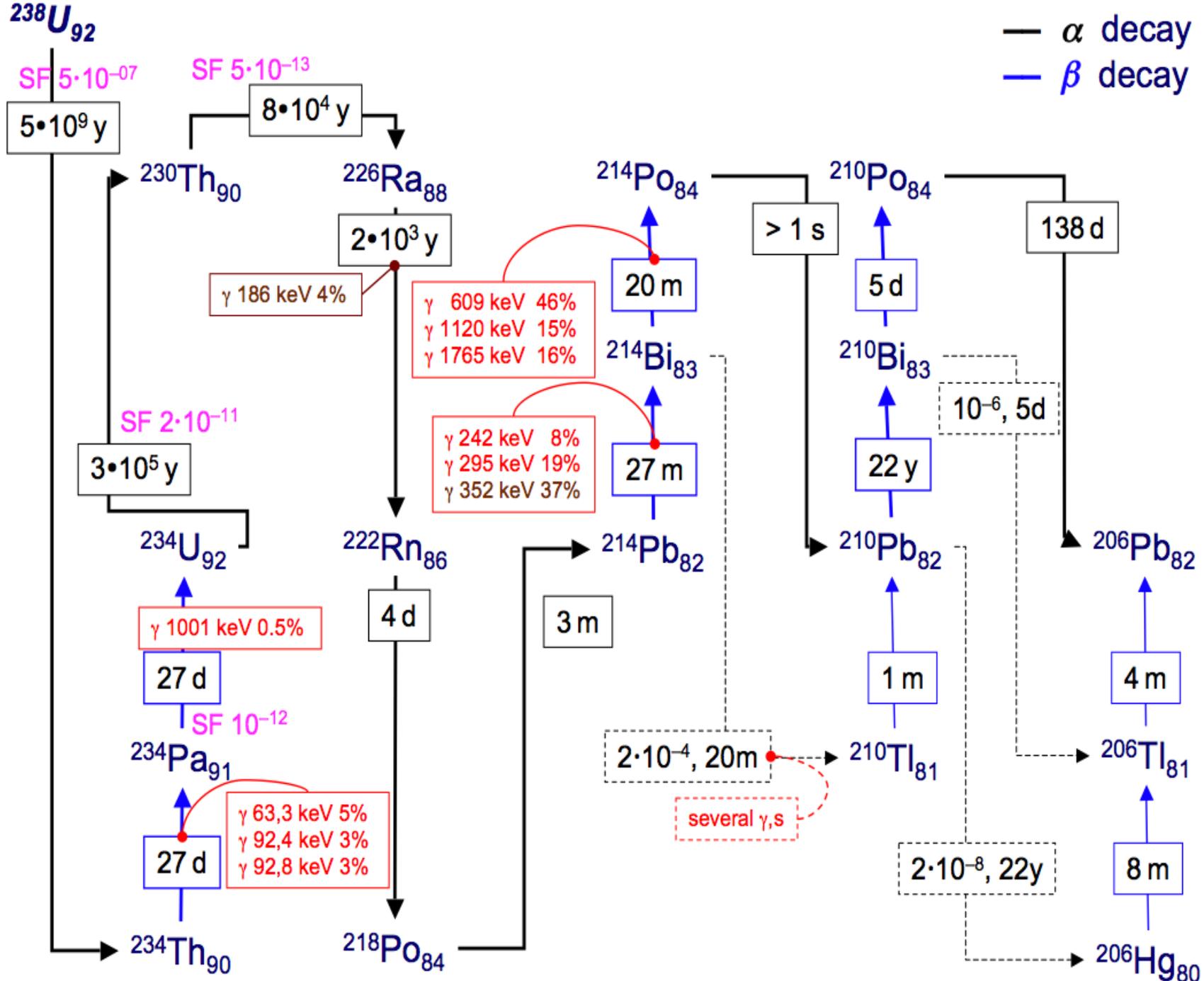


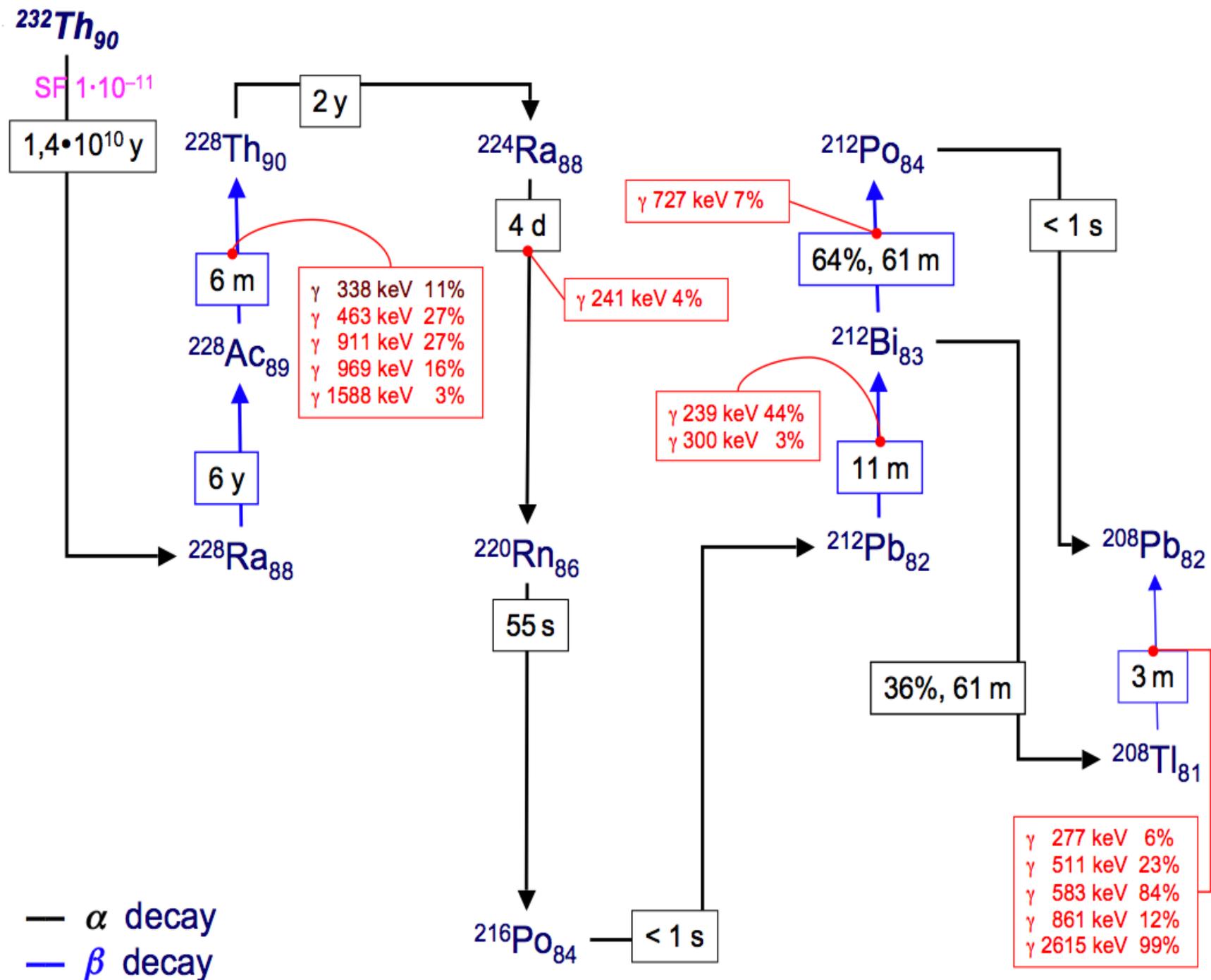
SK検出器を用いた2.4 Qテスト検出器中での Gdの中性子捕獲に伴うガンマ線事象観測

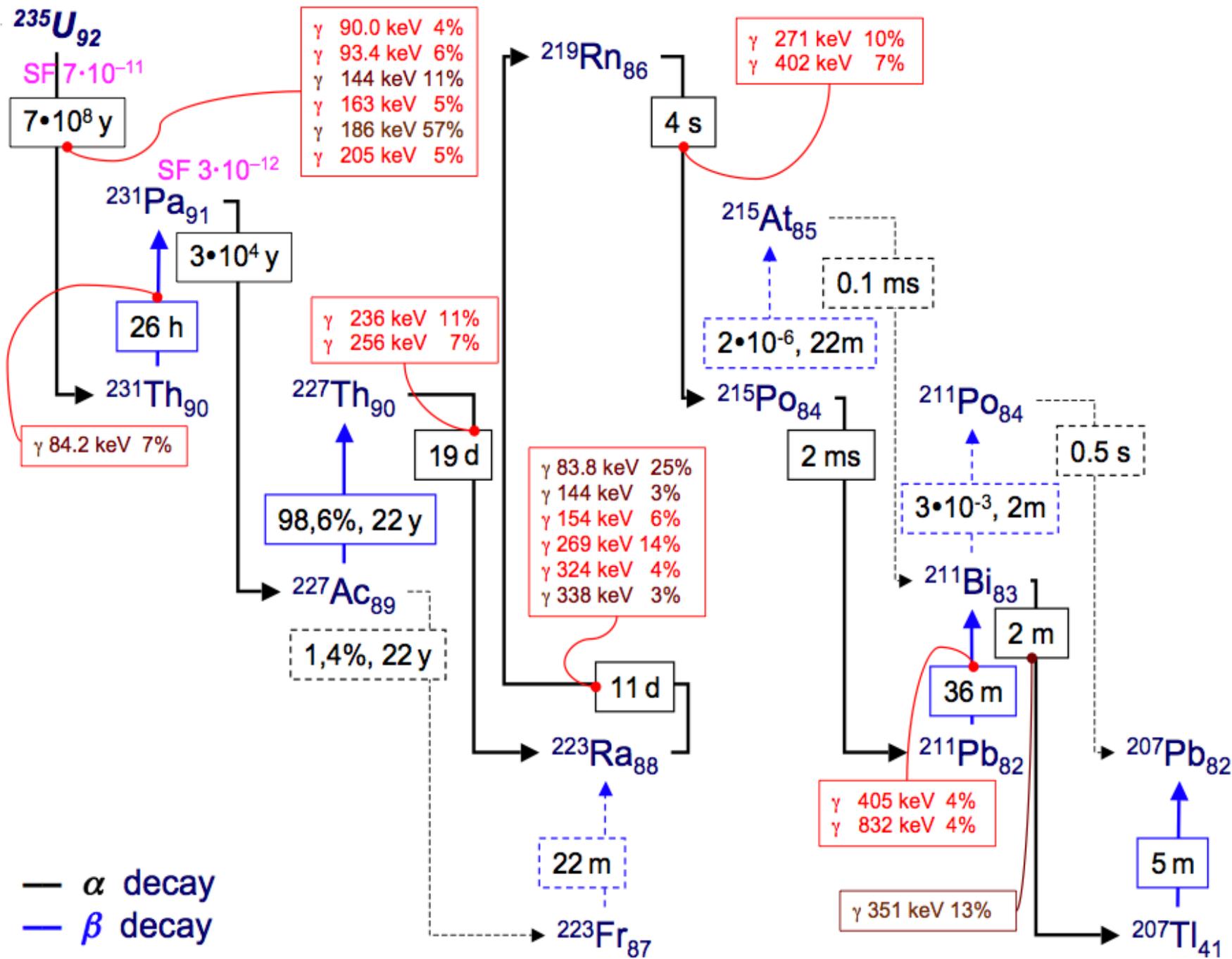
- 青線はGdからのガンマ線によるチェレンコフリングを表わす
 - Gdから放出されるガンマ線は平均3~4本であり他にもガンマ線のリングが見えるはず



— α decay
 — β decay







■ 超新星爆発からのニュートリノ観測

■ SN1987A (地球から16.8万光年の距離) ニュートリノの観測(カミオカンデ)

■ 全放出エネルギー = $2.5 \pm 1.2 \times 10^{53}$ erg
(46億年分の太陽エネルギーのさらに500倍)

■ 原始中性子星の表面温度 = $5.2 \pm 1.2 \times 10^{10}$ 度

■ 原始中性子星の半径 = 23 ± 20 km

■ 放出時間 = 12秒も重力崩壊のモデルに矛盾しない。

→ 小柴昌俊2002年ノーベル物理学賞



- 日付 : 23 Feb 1987
- 時刻 : 07:35:35(UT)
- 捕らえた現象数 : 11
- 時間幅 : 13sec
- 装置の有効体積 : 2140 tons

二次電子のエネルギー (MeV)

