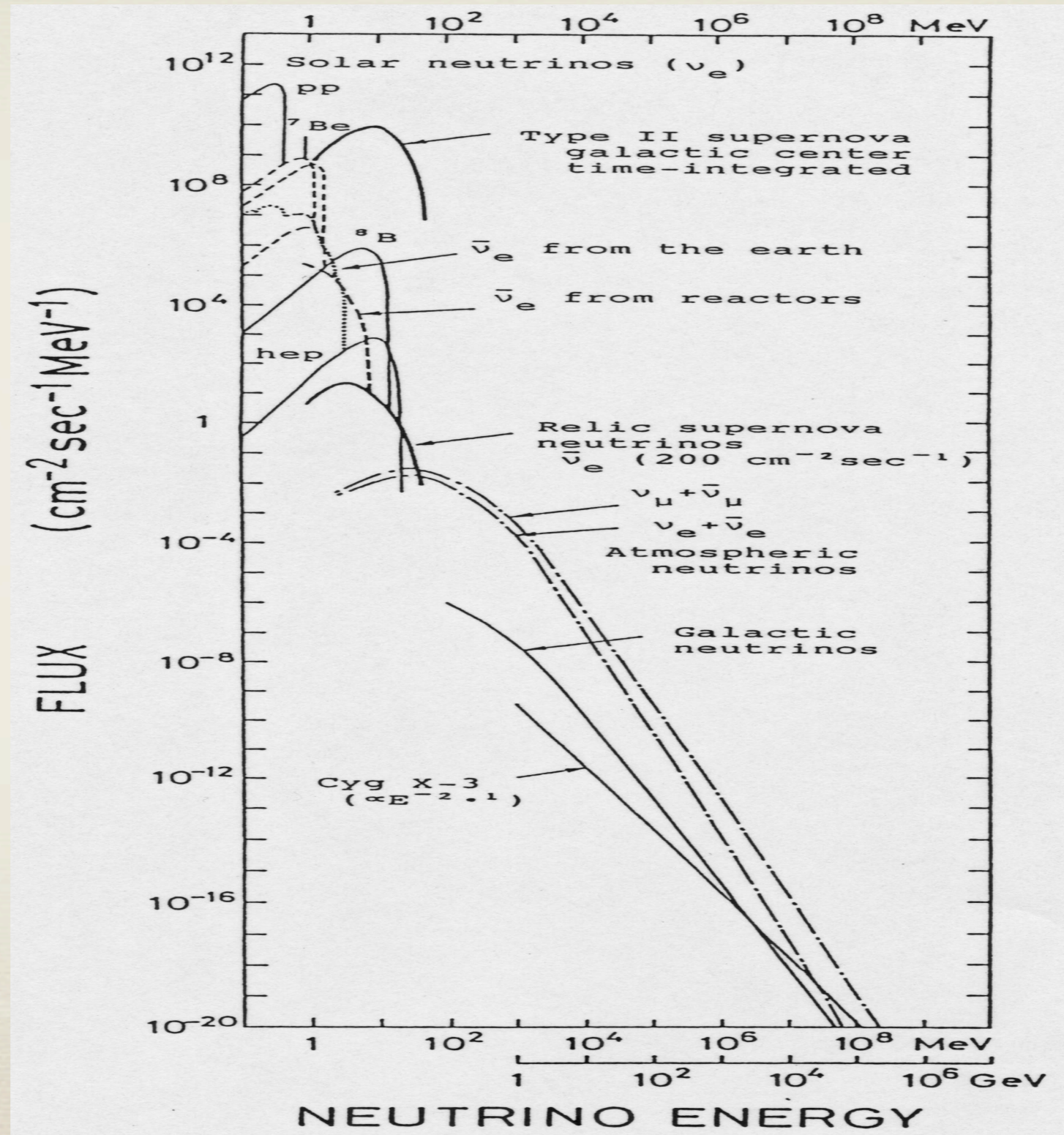


ニュートリノ天文学の 進展と今後の展望

東京大学宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子研究施設
小汐由介

様々なニュートリノ源



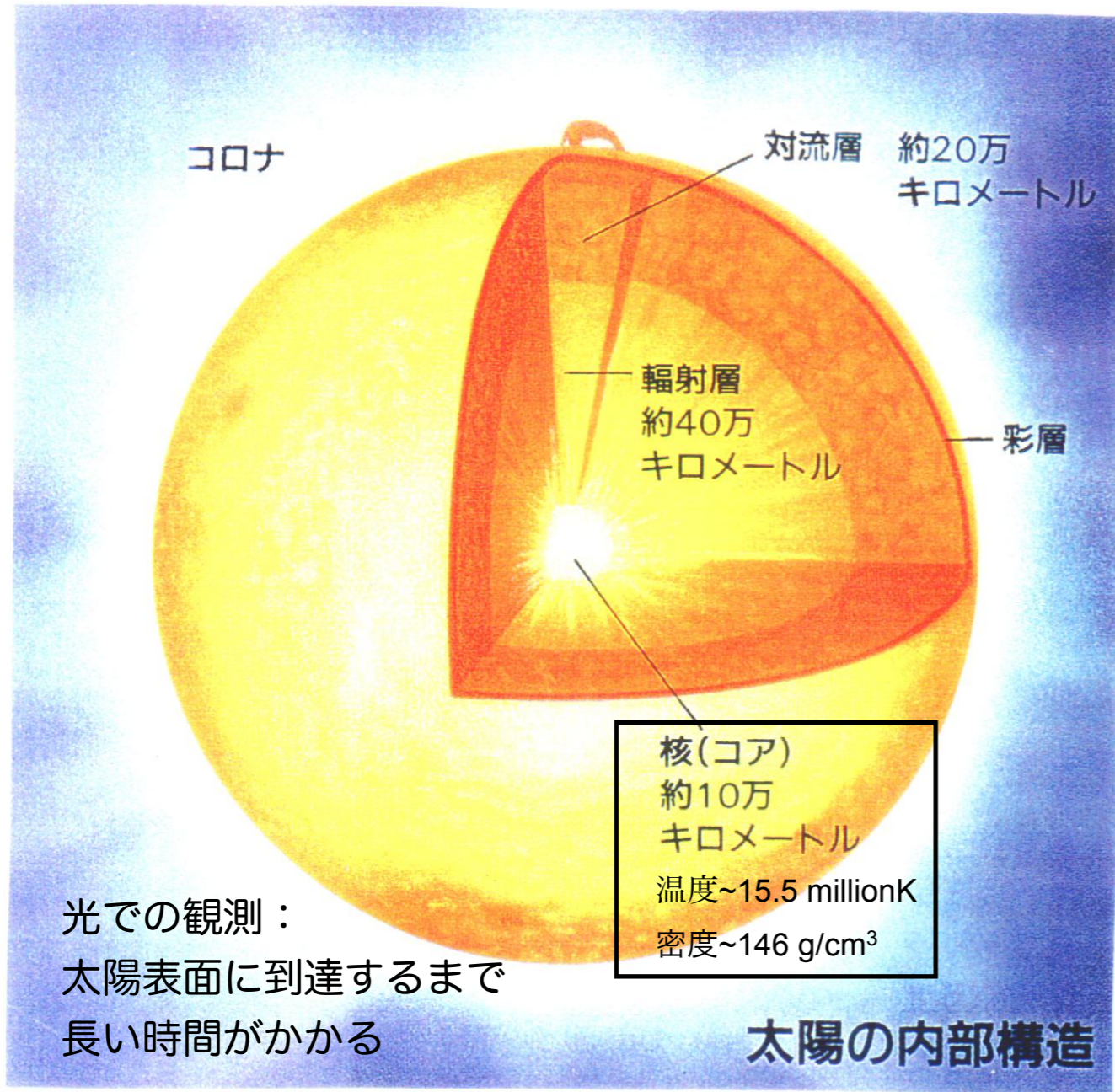
太陽／超新星

ニュートリノ天文学の 進展と今後の展望

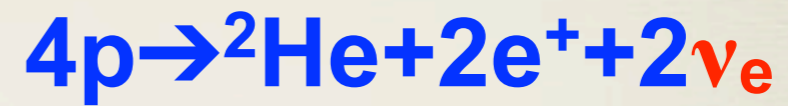
東京大学宇宙線研究所
神岡宇宙素粒子研究施設
小汐由介

太陽ニュートリノ

太陽ニュートリノ



太陽内部での核融合反応



($\sim 6.6 \times 10^{10}$ neutrinos/sec/cm²)

太陽ニュートリノ観測の特徴／意義

発生後、約8分で地球に到達



太陽内部を‘リアルタイム’で観測できる

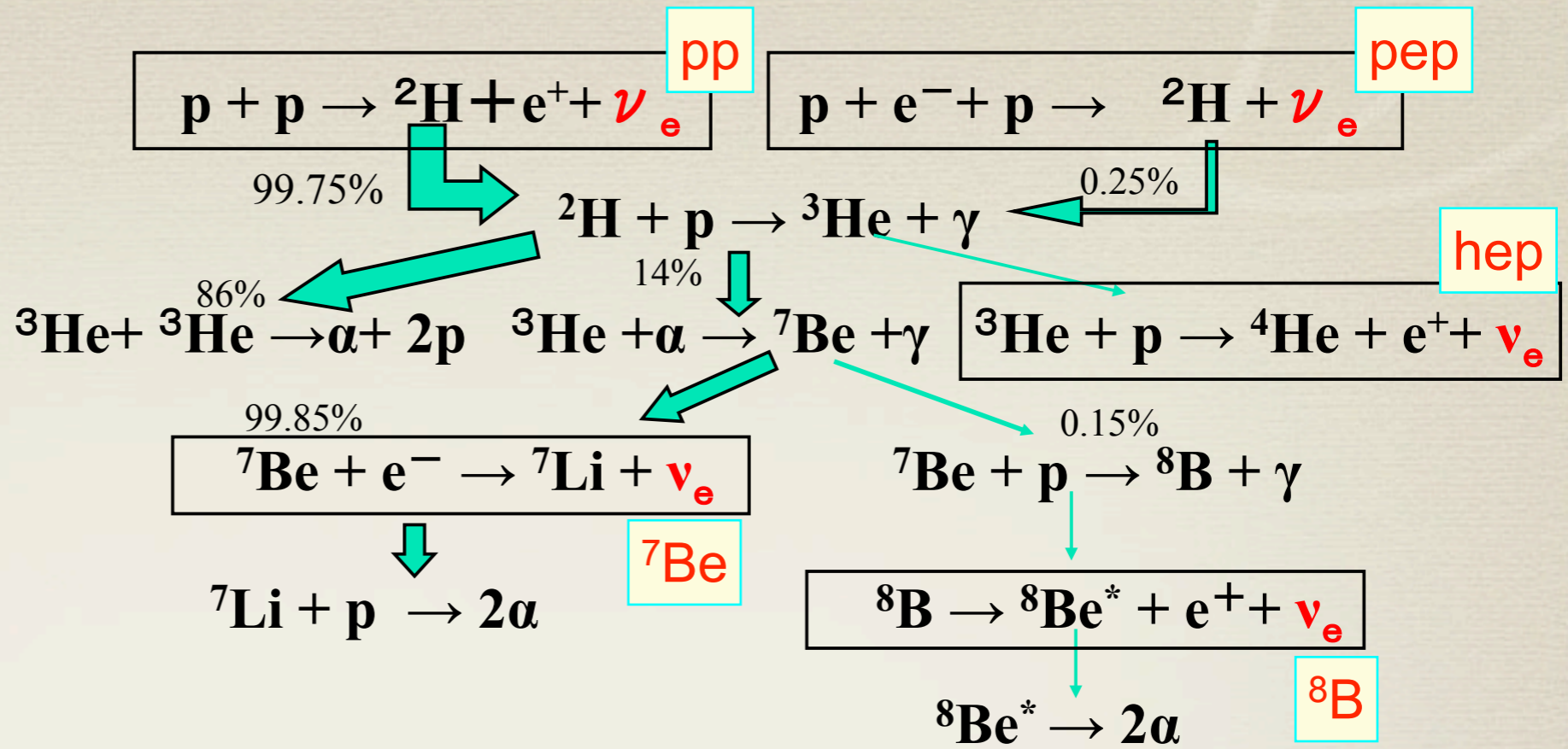
太陽（恒星）のエネルギー発生
メカニズムの解明に不可欠

素粒子ニュートリノ自身の性質の解明

実際には pp chain, CNO cycle を通して起こる

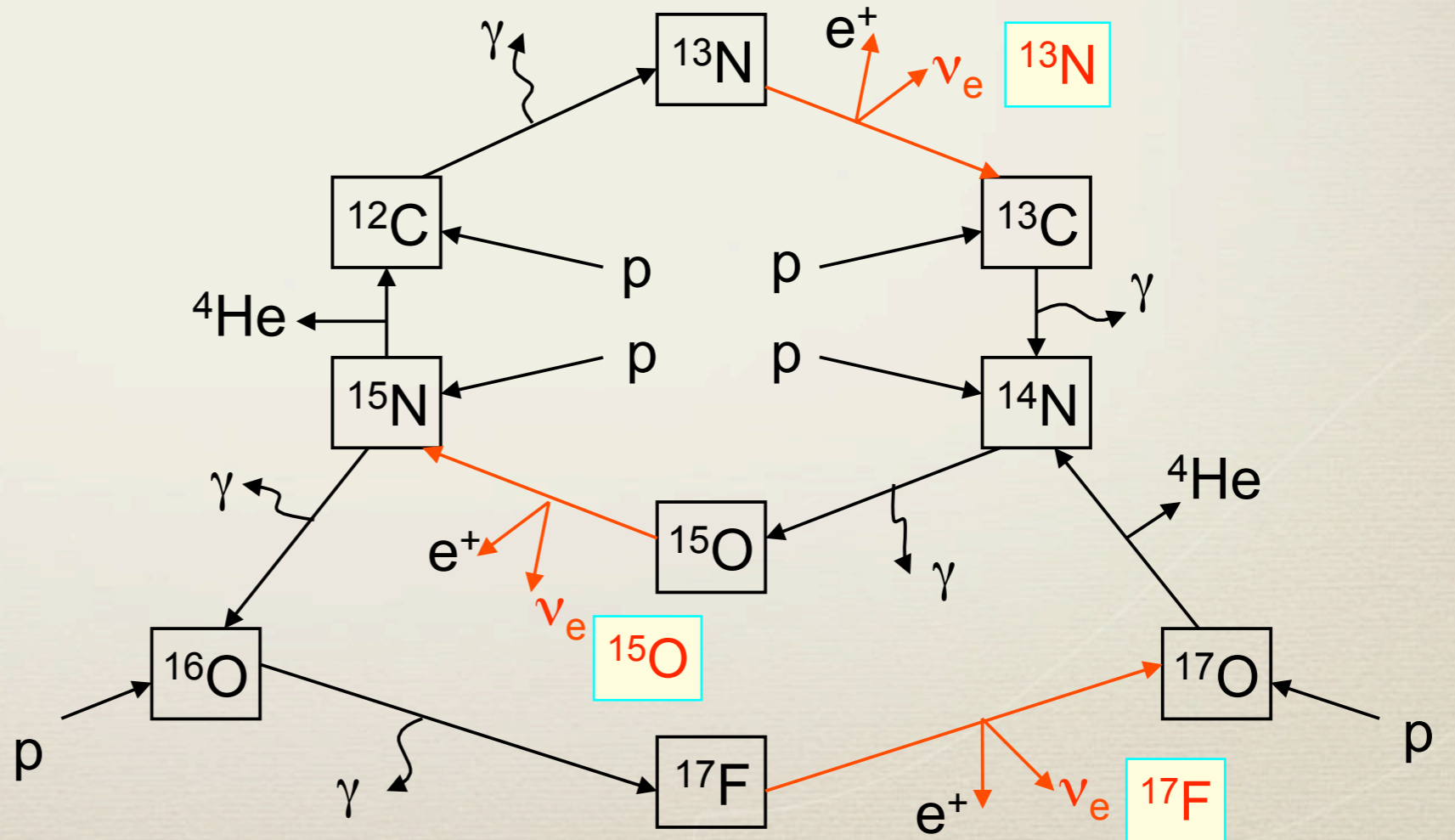
<pp-chain>

太陽では支配的

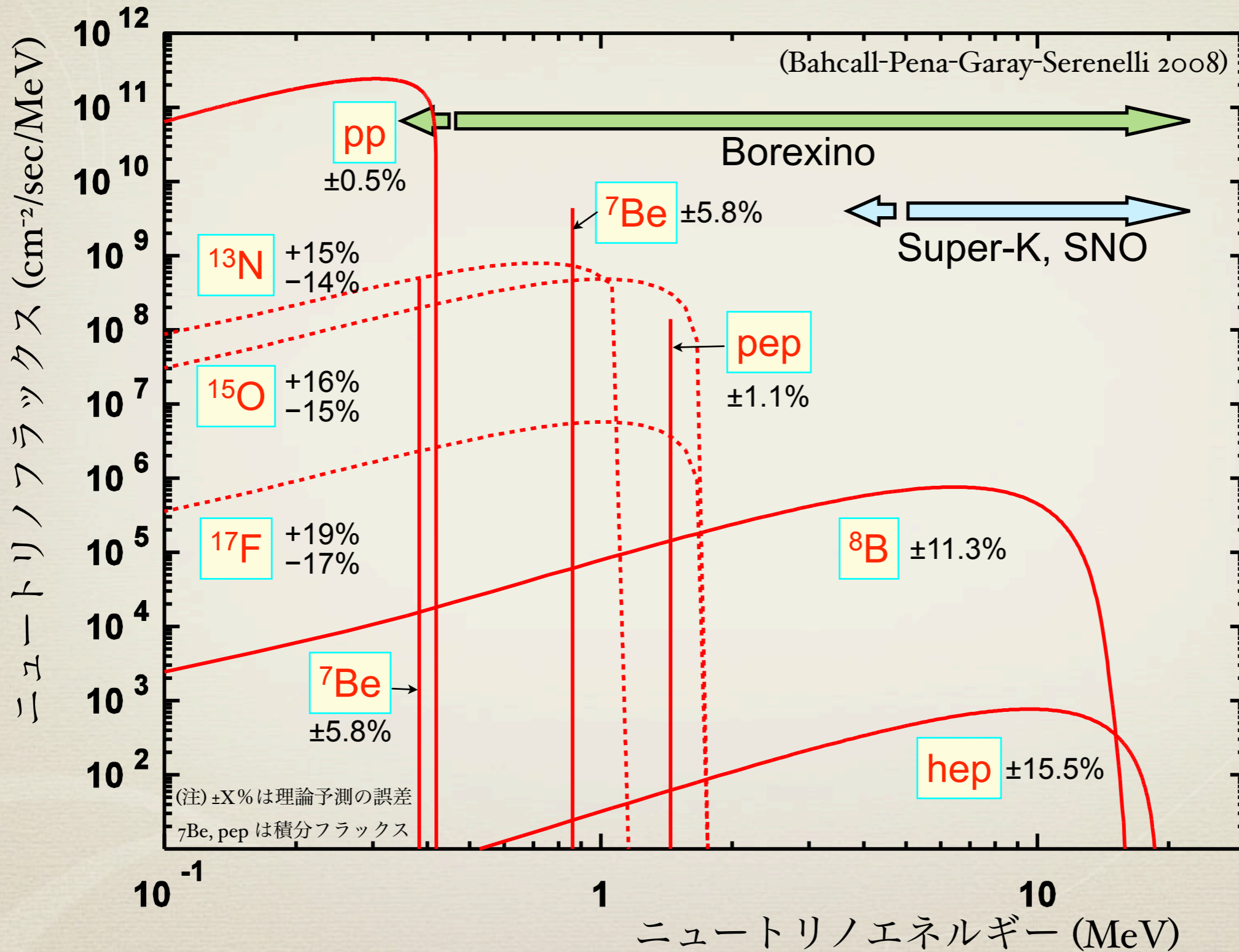


<CNO cycle>

大質量星で重要

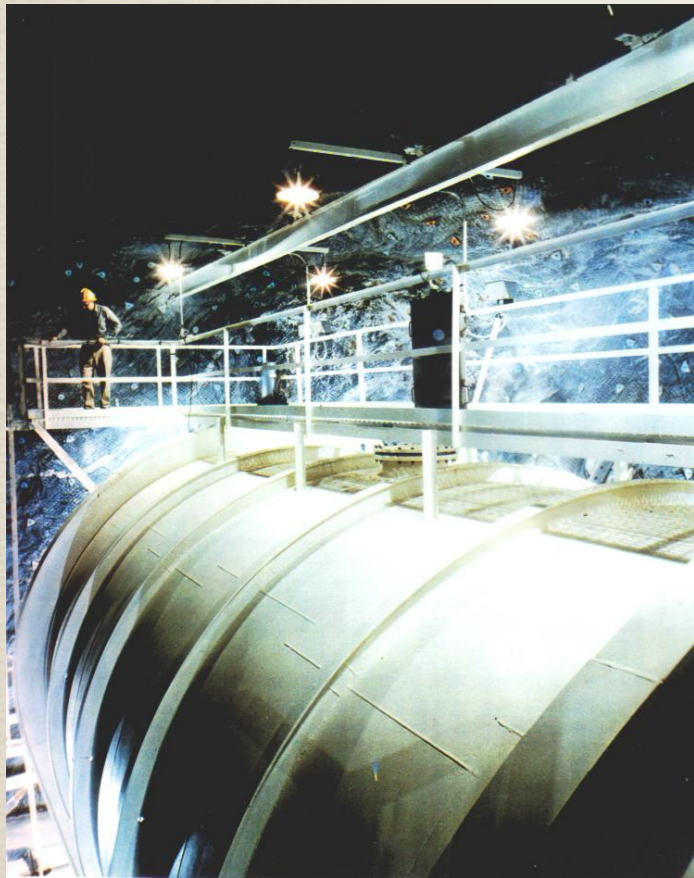


太陽ニュートリノスペクトル

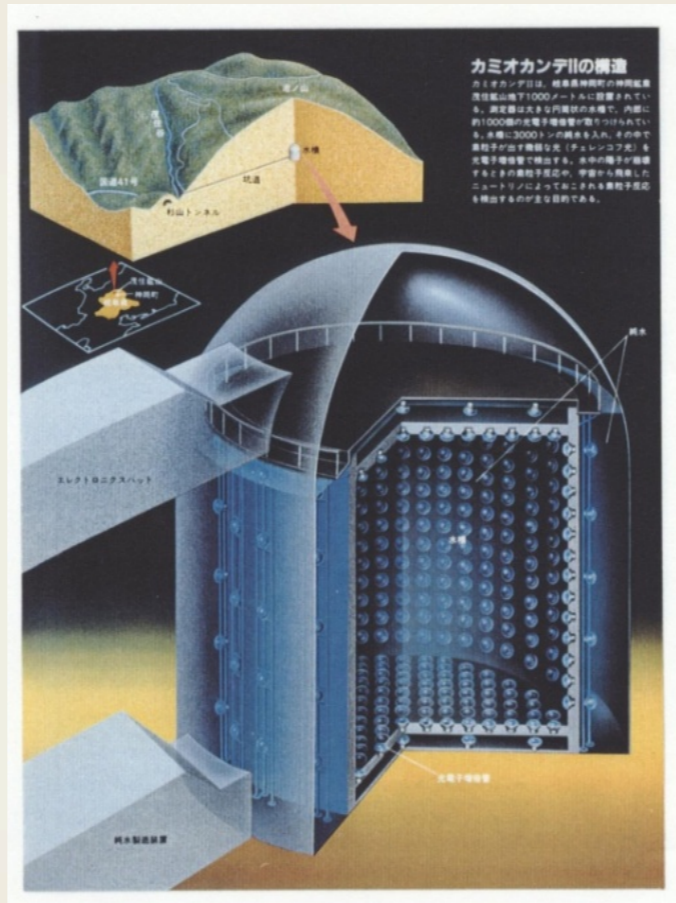


太陽ニュートリノ問題

1970~90年代の太陽ニュートリノ実験



Chlorine (US)



Kamiokande (Japan)



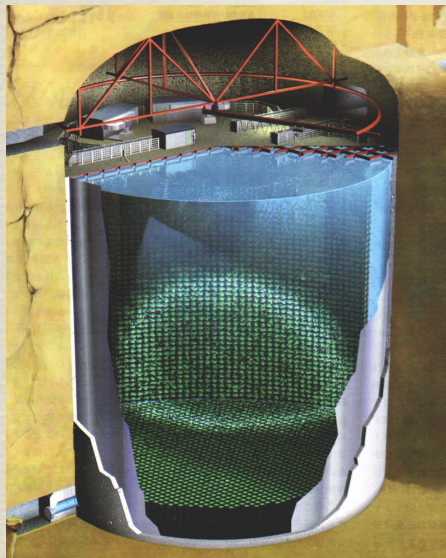
Gallium (Italy / Russia)

全ての実験において観測された太陽ニュートリノフラックスが理論予測値に比べ少なかった

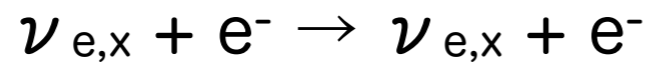
ニュートリノ振動

2000年代

Super-Kamiokande



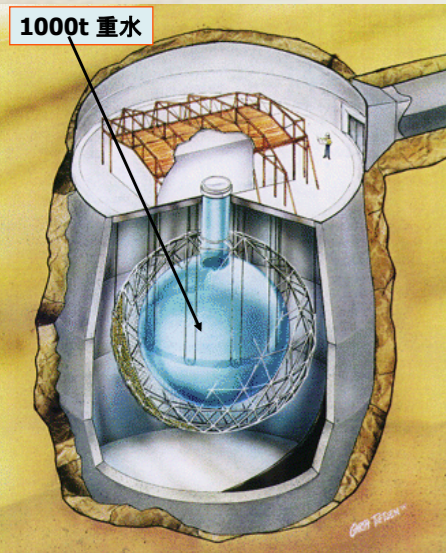
電子弾性散乱 (ES)



入射ニュートリノの方向を保存
高統計、高精度の測定

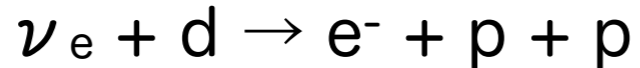
電子ニュートリノ反応断面積は
他のニュートリノの~7倍

SNO

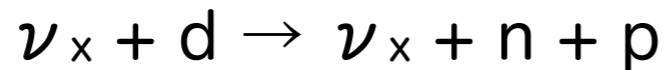


ニュートリノの種類を区別できる

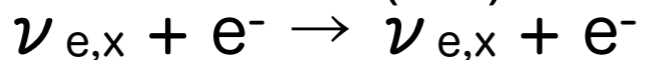
荷電カレント (CC)



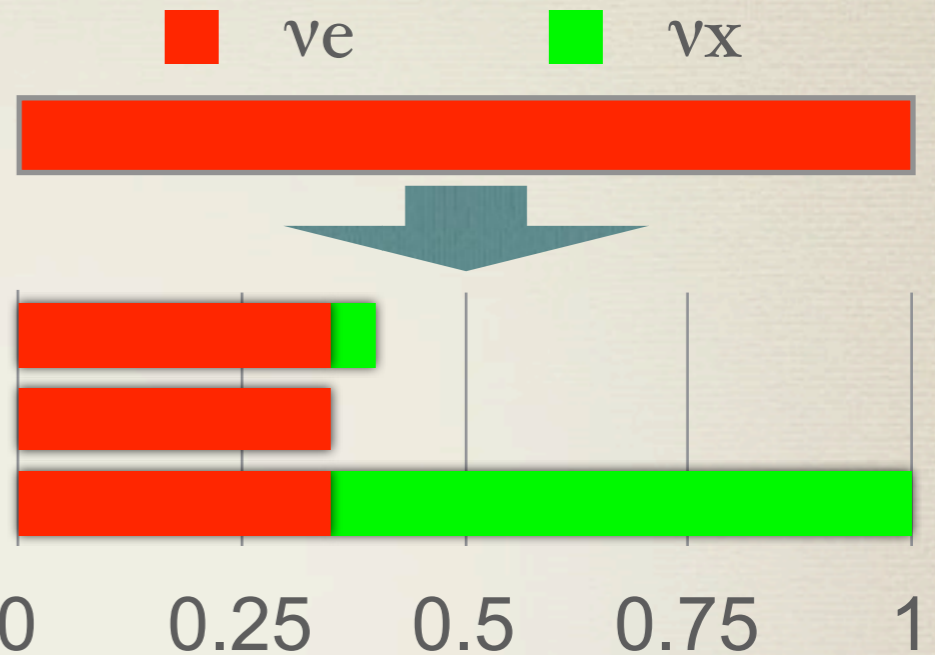
中性カレント (NC)



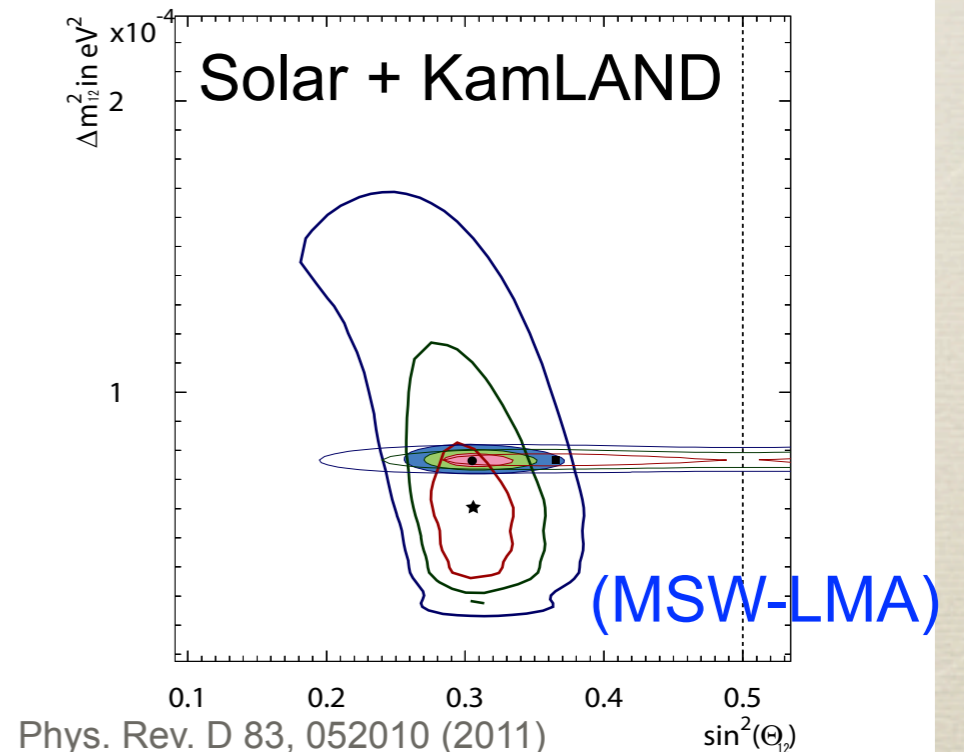
電子弾性散乱 (ES)



太陽内部で
発生時



ニュートリノ振動パラメータ



現在／今後の課題

ニュートリノの性質

- * ニュートリノ振動パラメータの精密測定
- * ${}^7\text{Be}$, pep太陽ニュートリノ測定→Borexino
- * スペクトルの歪み／フラックス昼夜変動→Super-K
(横澤さん)
- * エキゾチックなモデルの検証
- * Sterile neutrino? Neutrino vs anti-neutrino? etc.

現在／今後の課題

天体物理学の観点から

* 太陽モデルの検証

* 重い元素の量に大きな不定性
→CNOサイクルの測定が重要

* 太陽ニュートリノの大部分を
占めるppニュートリノの直接
測定

重元素量比の異なるモデルによる
太陽ニュートリノフラックスの違い

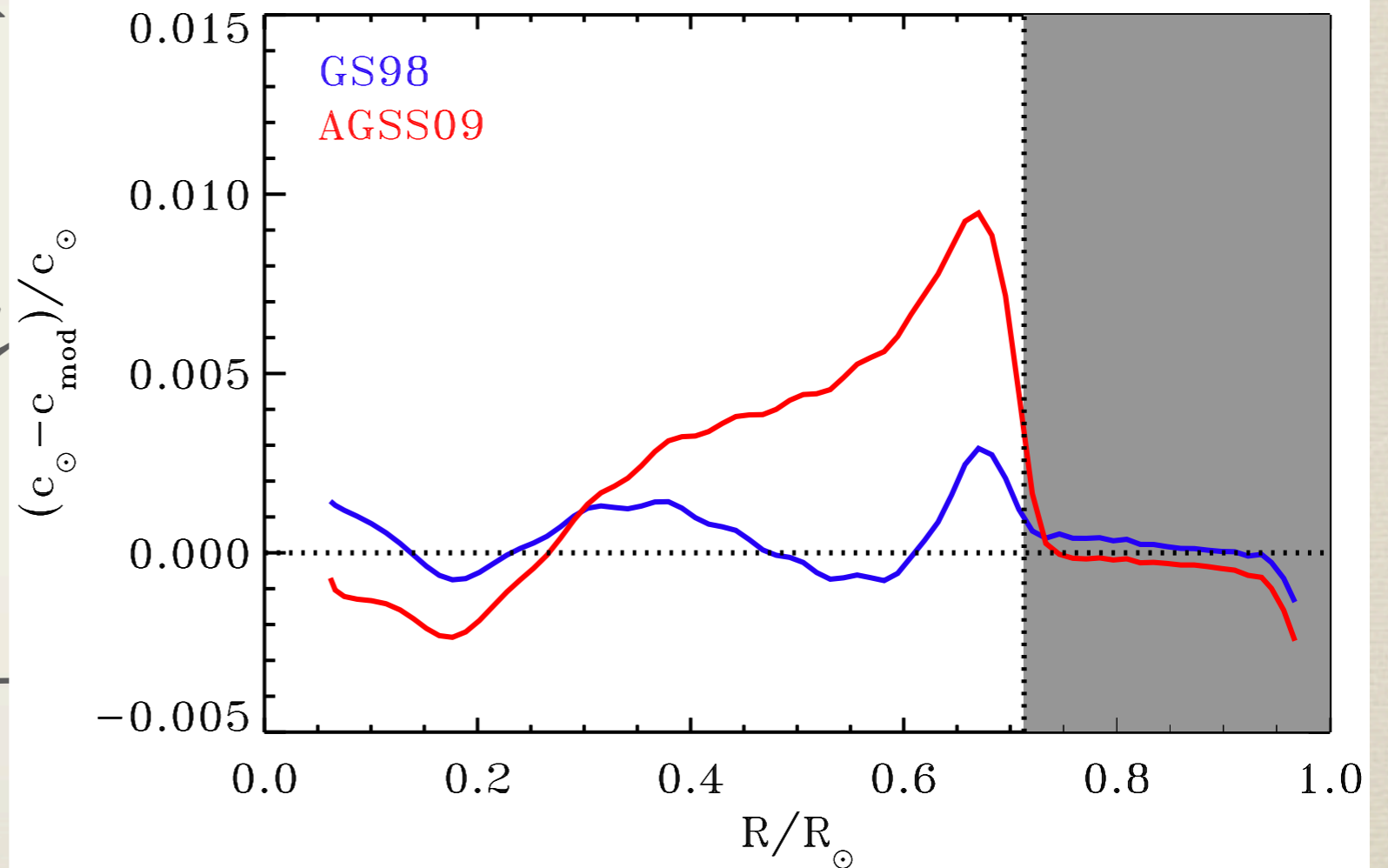
	(z/x	0.0229	0.0165)
		GS98	AGS05
	pp	5.97×10^{10}	6.04×10^{10}
	pep	1.41×10^8	1.45×10^8
	hep	7.90×10^3	8.22×10^3
~10%	${}^7\text{Be}$	5.07×10^9	4.55×10^9
	${}^8\text{B}$	5.94×10^6	4.72×10^6
~30%	${}^{13}\text{N}$	2.88×10^8	1.89×10^8
	${}^{15}\text{O}$	2.15×10^8	1.34×10^8
	${}^{17}\text{F}$	5.84×10^6	3.25×10^6

現在／今後の課題

天体物理学の観点から

日震学との比較

- * 太陽モデルの検証
- * 重い元素の量に
→CNOサイクル
- * 太陽ニュートリノ
占めるpp ニュートリノ
測定



現在／今後の課題

天体物理学の観点から

* 太陽モデルの検証

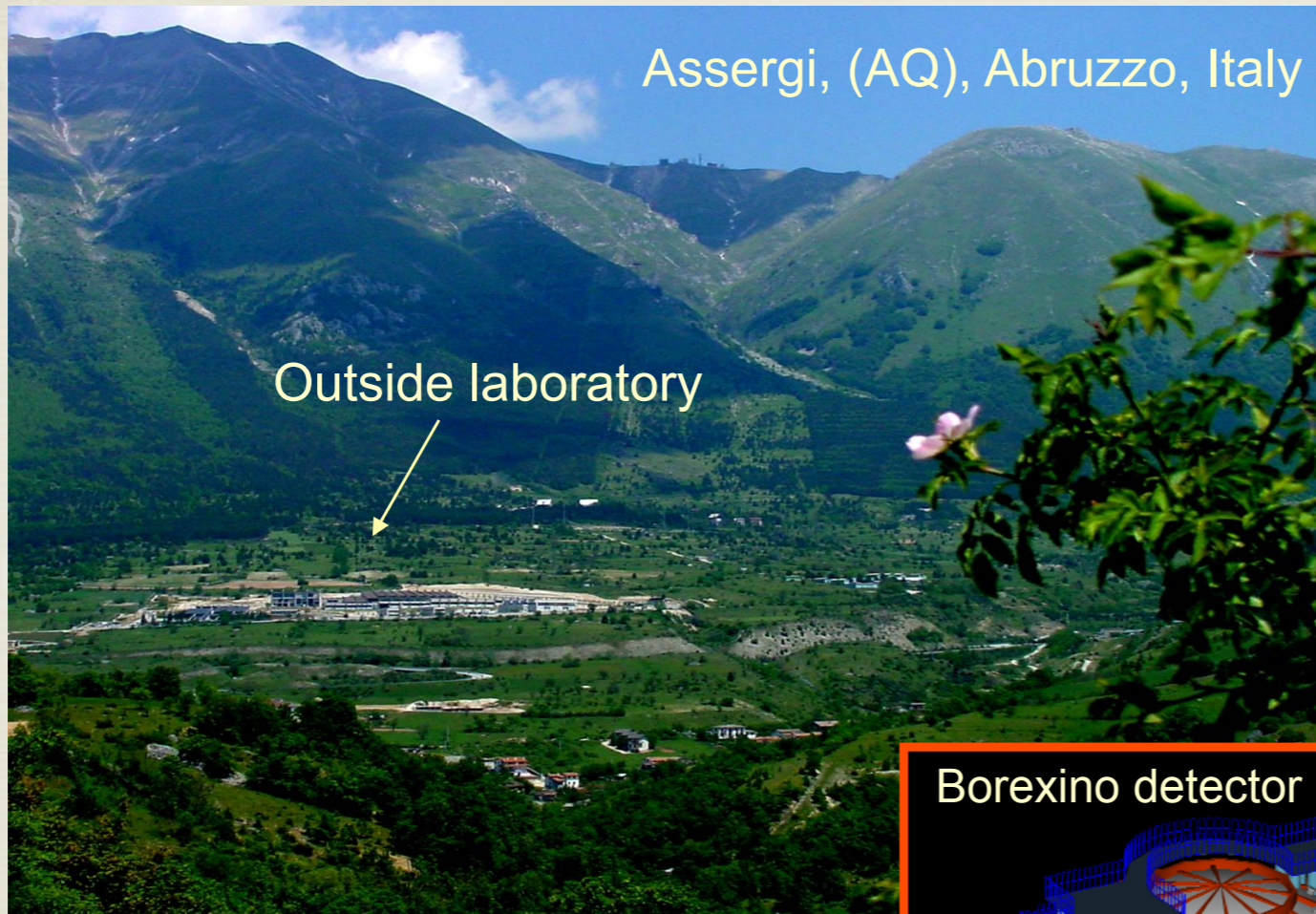
* 重い元素の量に大きな不定性
→CNOサイクルの測定が重要

* 太陽ニュートリノの大部分を
占めるppニュートリノの直接
測定

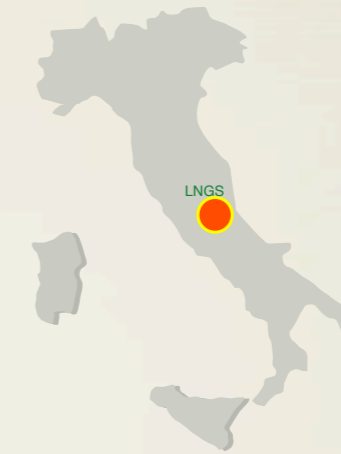
重元素量比の異なるモデルによる
太陽ニュートリノフラックスの違い

	(z/x	0.0229	0.0165)
		GS98	AGS05
	pp	5.97×10^{10}	6.04×10^{10}
	pep	1.41×10^8	1.45×10^8
	hep	7.90×10^3	8.22×10^3
~10%	${}^7\text{Be}$	5.07×10^9	4.55×10^9
	${}^8\text{B}$	5.94×10^6	4.72×10^6
~30%	${}^{13}\text{N}$	2.88×10^8	1.89×10^8
	${}^{15}\text{O}$	2.15×10^8	1.34×10^8
	${}^{17}\text{F}$	5.84×10^6	3.25×10^6

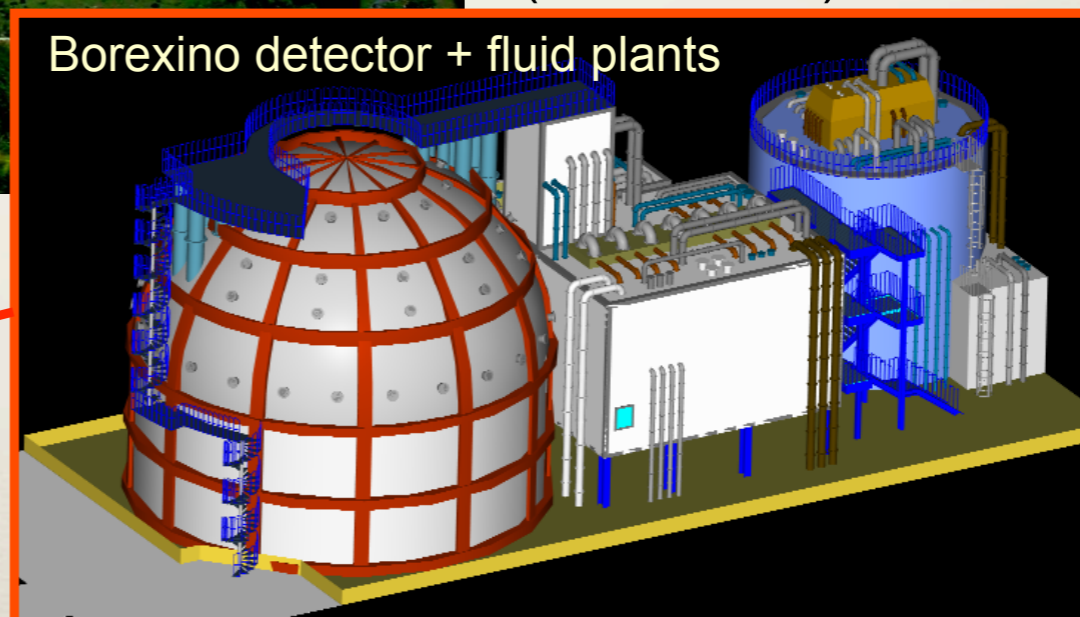
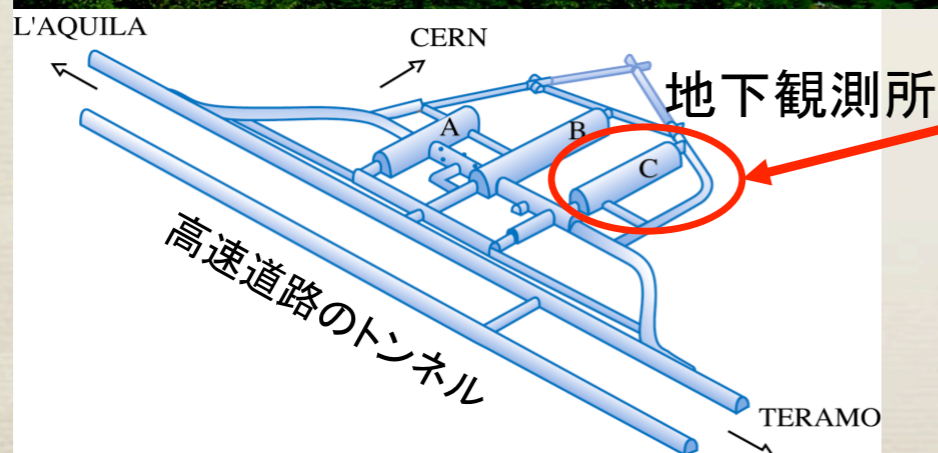
Laboratori Nazionali del Gran Sasso



120km from Roma



1300m underground
(3500m w.e.)

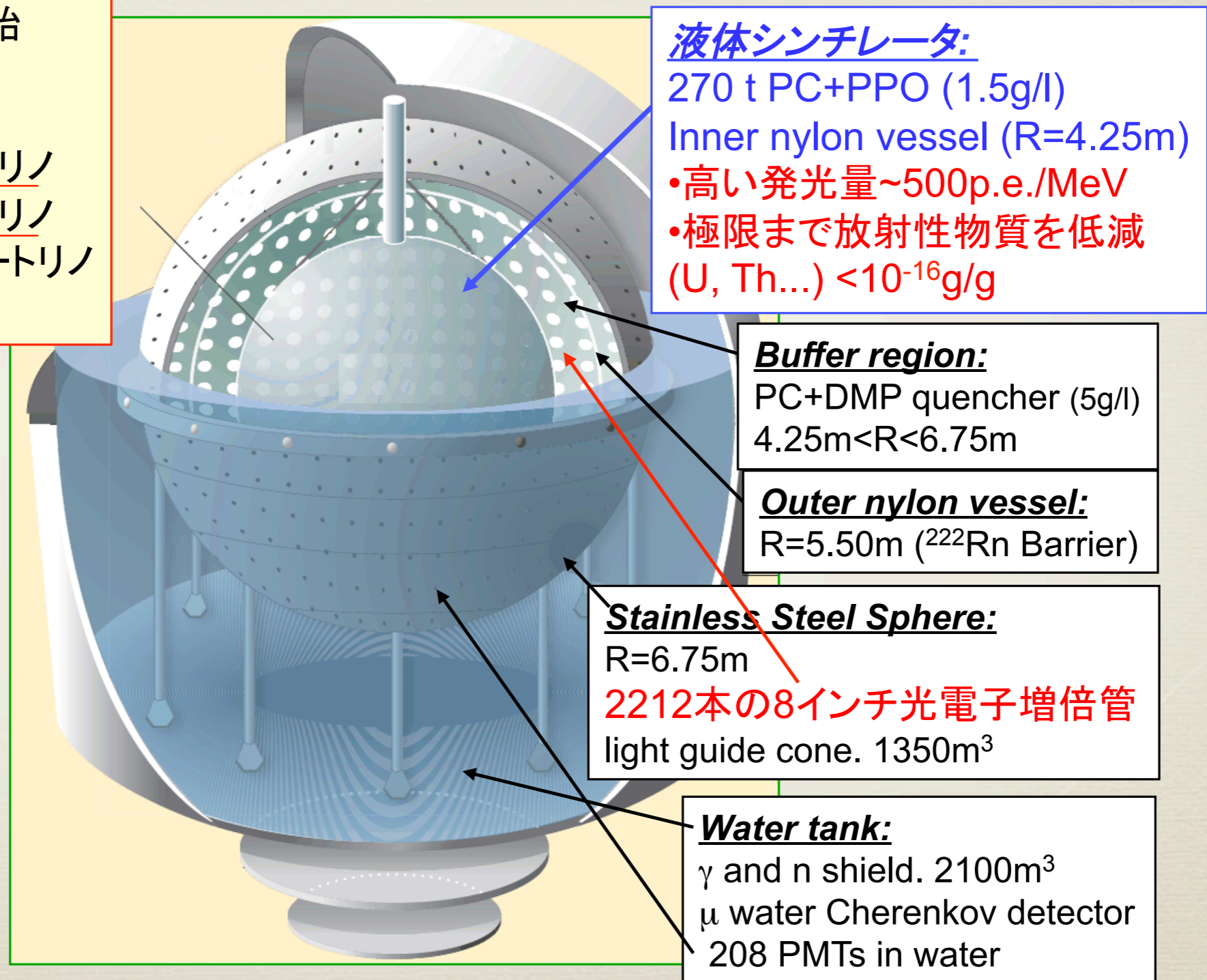


Borexino

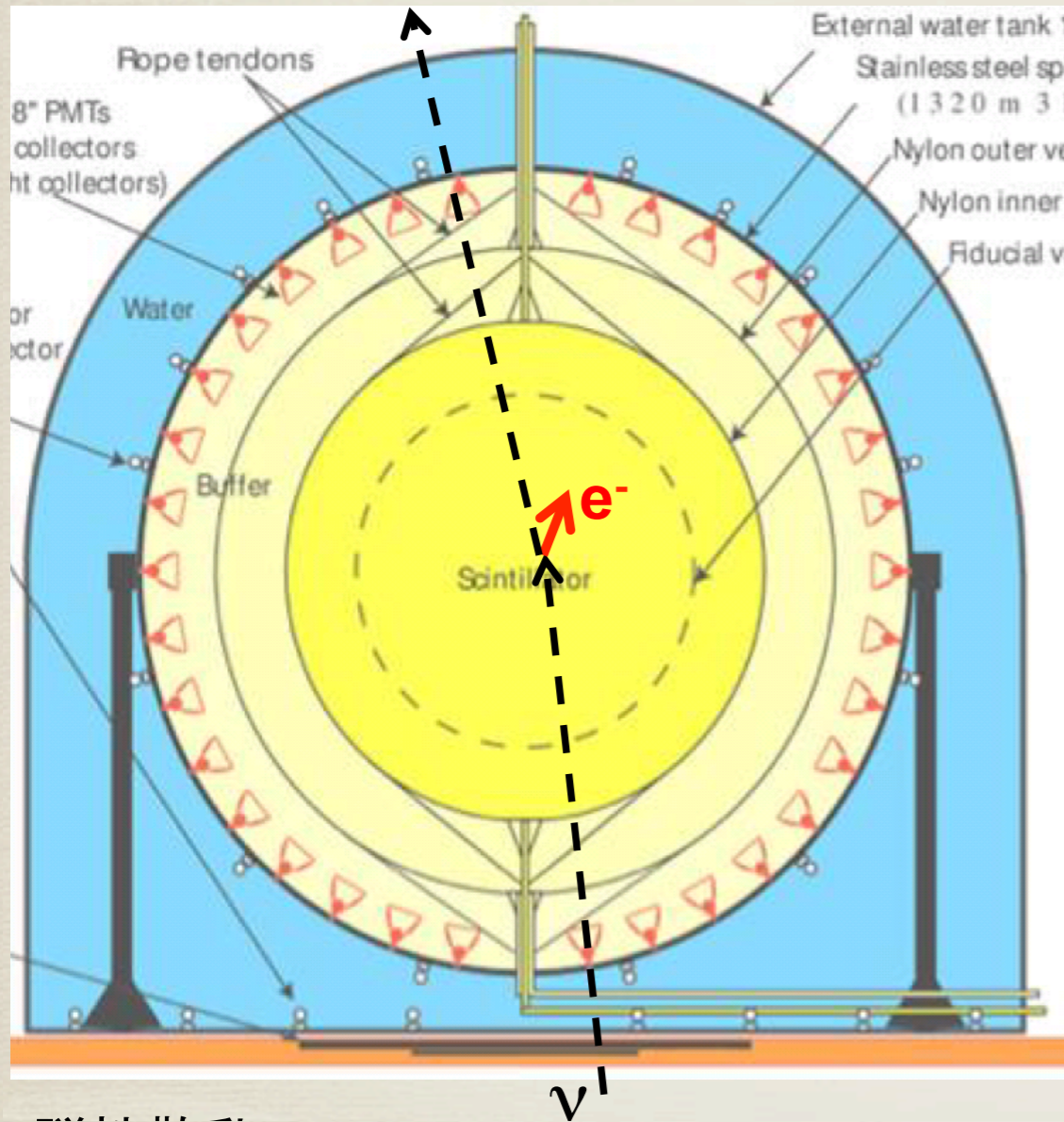
2007年実験開始

観測対象

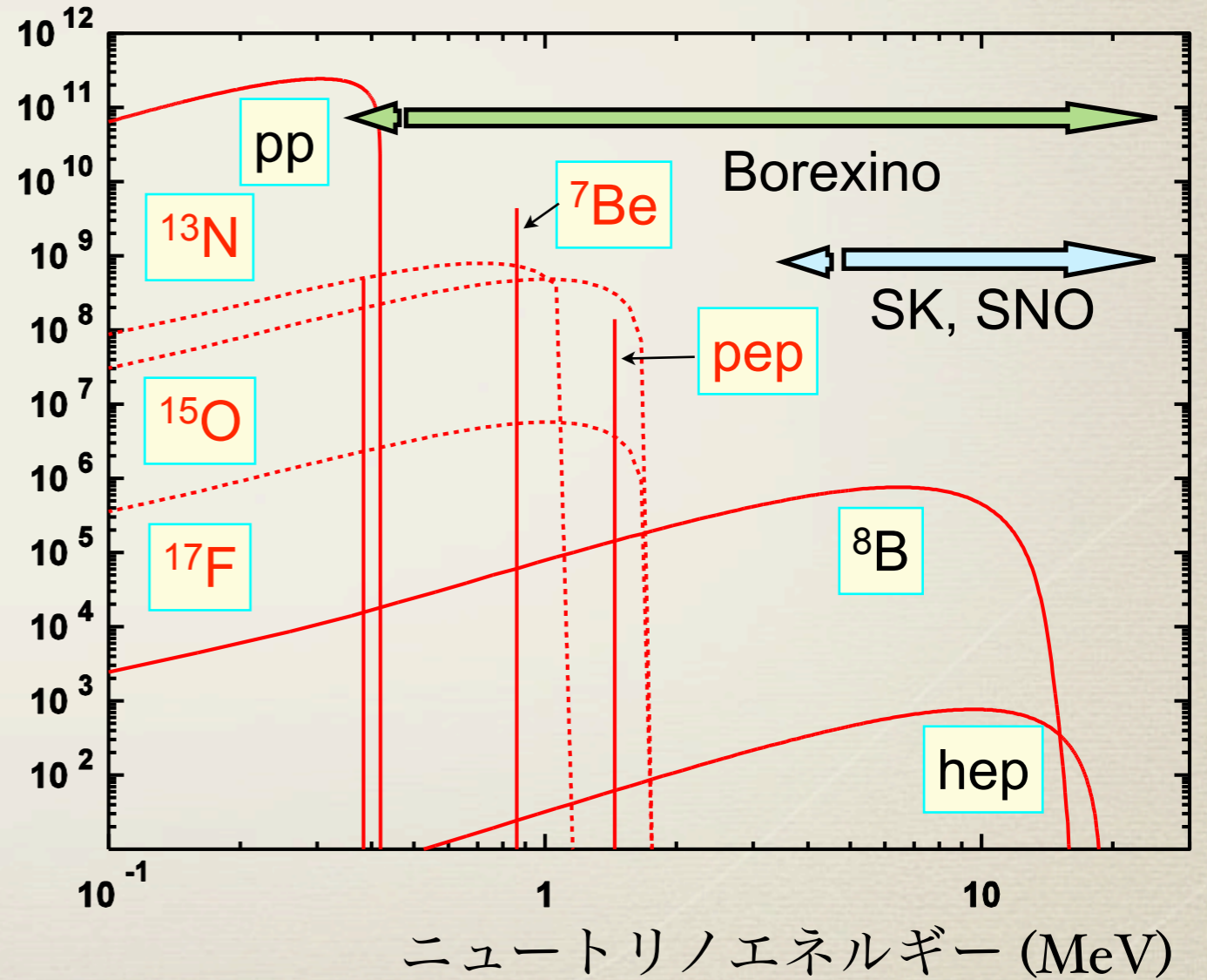
- ✓ 太陽ニュートリノ
 - ✓ 地球ニュートリノ
 - ✓ 超新星ニュートリノ
- 等々



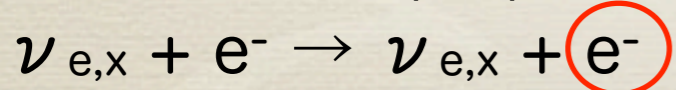
太陽ニュートリノ観測



~1 MeV 以下領域での精密測定



電子弾性散乱 (ES)



入射ニュートリノの方向を保存しない

観測結果

Phys. Rev. Let 107, 141302 (2011)

Phys. Rev. Let 108, 051302 (2012)

${}^7\text{Be}$ ニュートリノ

$46.0 \pm 1.5^{+1.5}_{-1.6}$ cnts/day/100ton

First realtime measurement with high precision. (<5% uncertainties)

pepニュートリノ

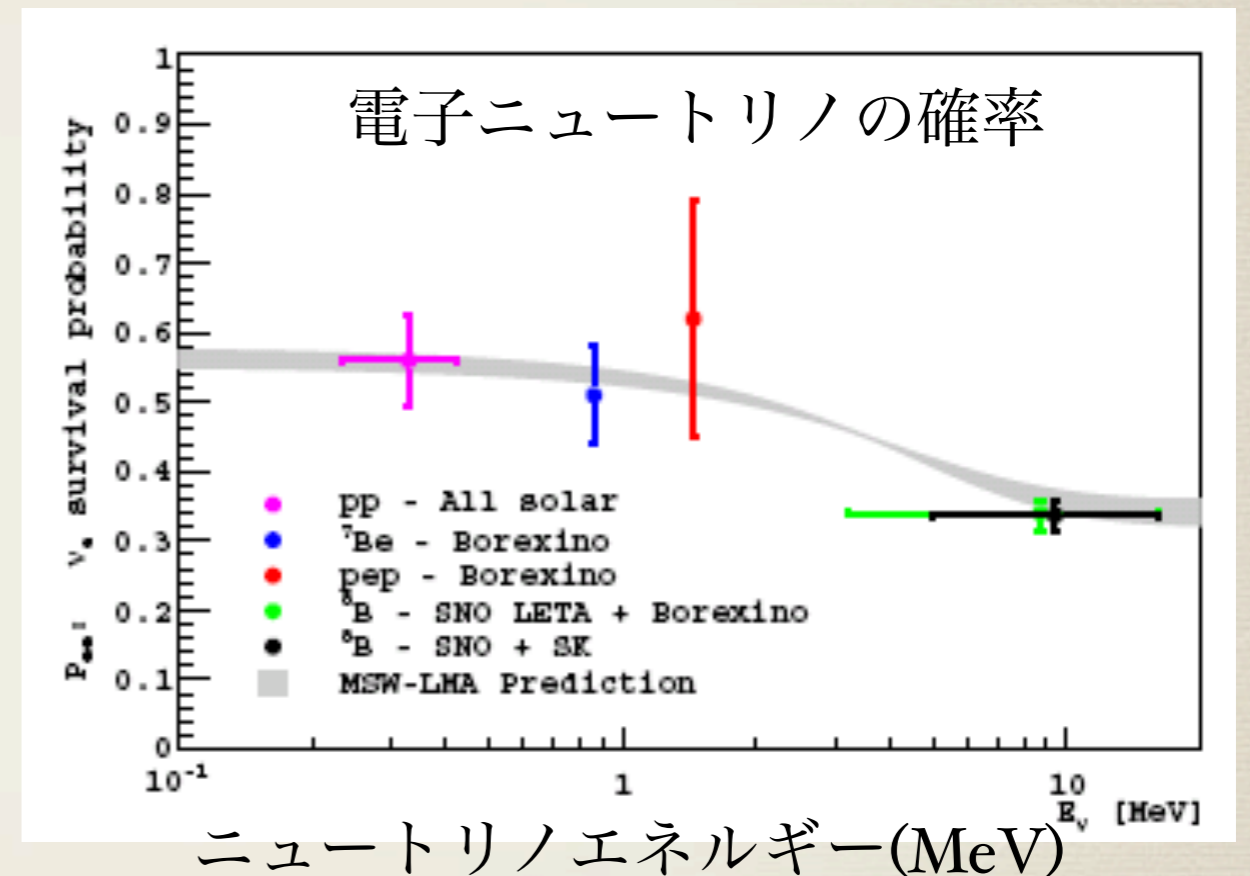
$3.1 \pm 0.6 \pm 0.3$ cnts/day/100ton

First direct observation (98% C.L.)

CNOニュートリノ

< 7.9 cnts/day/100ton

Strongest constraint ($f_{\text{CNO}} < 1.4$)



MSW-LMAシナリオと合致

観測結果

Phys. Rev. Let 107, 141302 (2011)

Phys. Rev. Let 108, 051302 (2012)

${}^7\text{Be}$ ニュートリノ

$46.0 \pm 1.5^{+1.5}_{-1.6}$ cnts/day/100ton

First realtime measurement with high precision. (<5% uncertainties)

pepニュートリノ

$3.1 \pm 0.6 \pm 0.3$ cnts/day/100ton

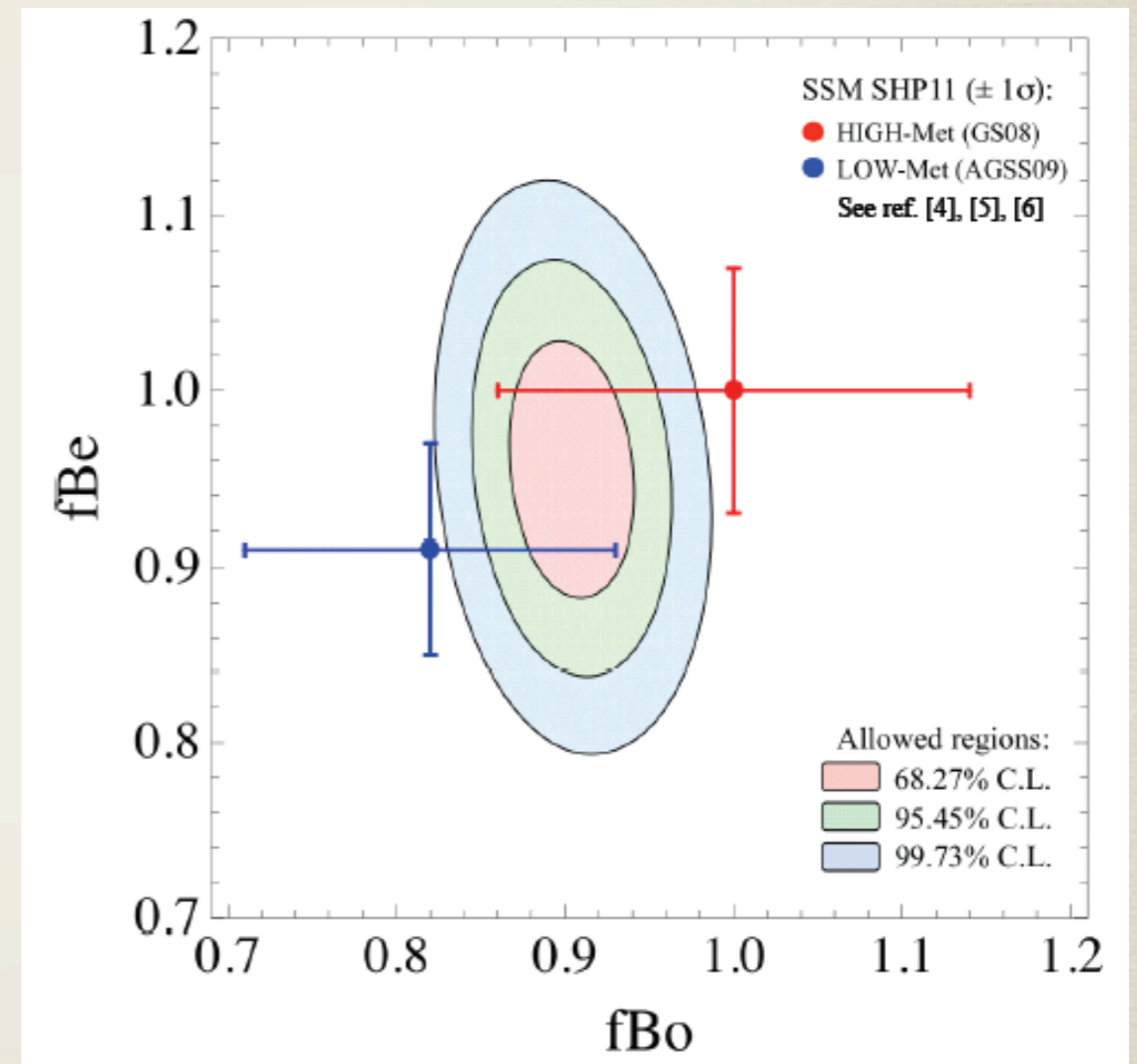
First direct observation (98% C.L.)

CNOニュートリノ

< 7.9 cnts/day/100ton

Strongest constraint ($f_{\text{CNO}} < 1.4$)

重元素量比の異なるモデルによる
 ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{B}$ フラックスの比較



モデルの決定は難しい。。

将来の実験

project	target for solar ν	current status / recent information
pep/CNO (ES)		
SNO+	1kt LS	under construction (cf. M.Chen's talk)
KamLAND2	1kt LS	will be after KamLAND-Zen (cf. Y.Gando's talk)
pp(ES)		
XMASS	10 ton(FV) Lq. Xe	commissioning of XMASS-I (total 1ton, ~0.1ton FV)
CLEAN	50 ton Lq. Ne	MiniCLEAN is under construction
HERON	10 ton Lq. He	will not built a full detector (Astropart. Phys. 30, 1 (2008))
pp/7Be(CC)		
LENS	10ton 115In	R&D (In loaded LS)
IPNOS	115In	R&D (InP cell + Lq. Xe detector)
MOON	1.5~3ton 100Mo	R&D (EC branch of 100Tc was measured)
Next generation		
Water Cherenkov	Megaton water	LOI from Hyper-K (arXiv:1109.3262)
Lq. Scintillator	~0.1Mton LS	white paper from LENA (arXiv:1104.5620)
Lq. Argon	~0.1Mton Lq. Ar	

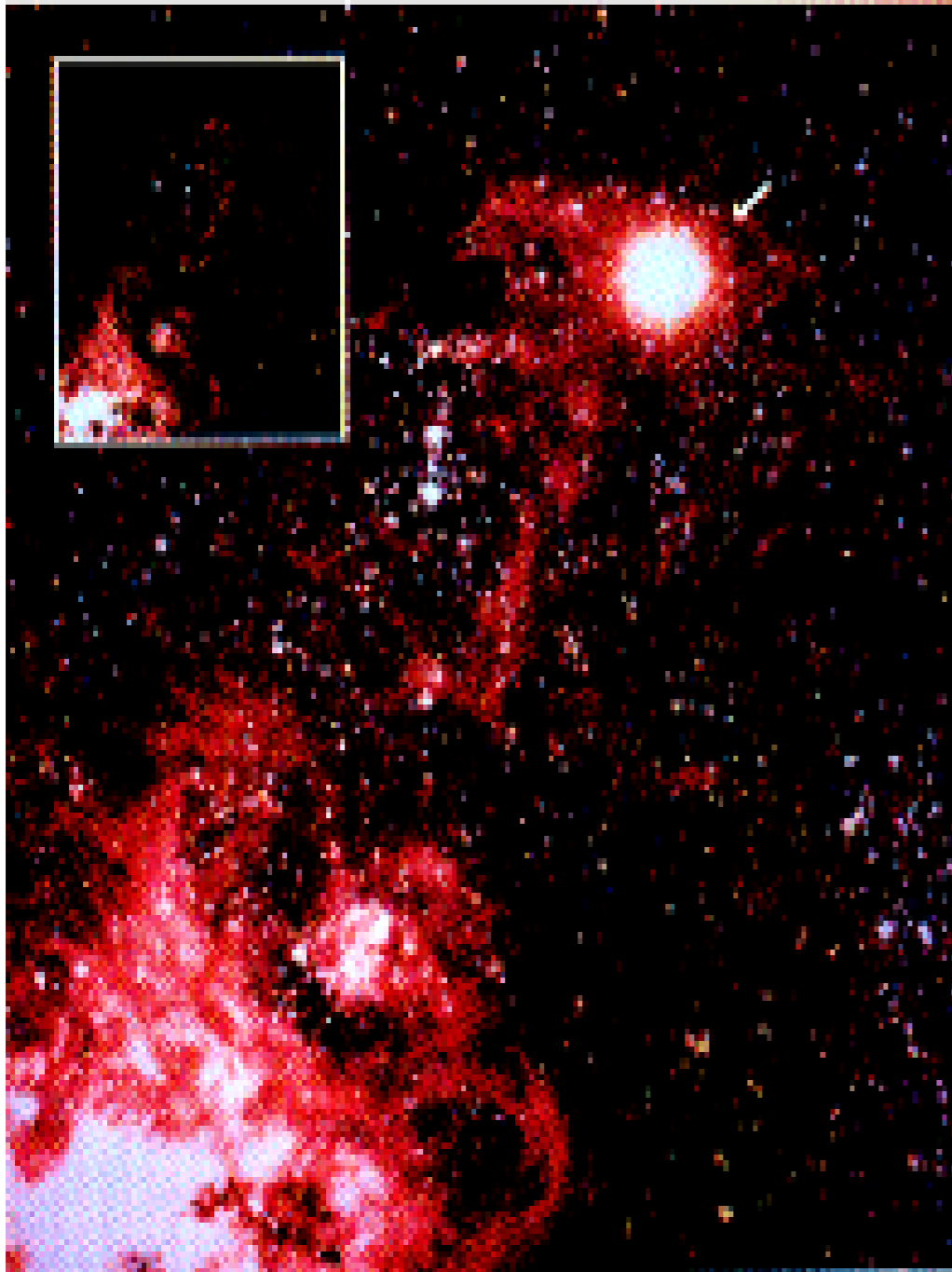
ES: elastic scattering, CC: charged current, LS: liquid scintillator

(Y.Takeuchi, LowNu2002, Seoul, Korea)

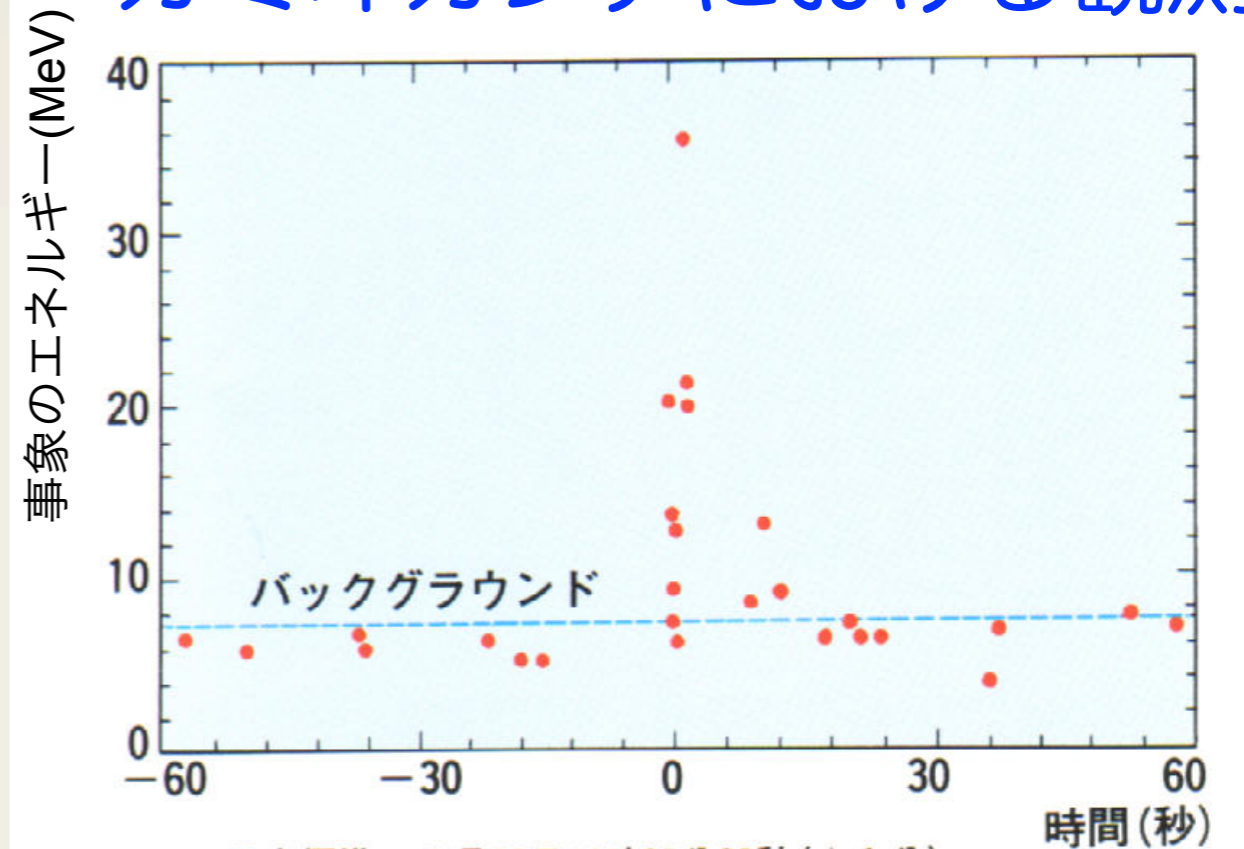
超新星ニュートリノ

超新星1987A

大マゼラン星雲



カミオカンデにおける観測



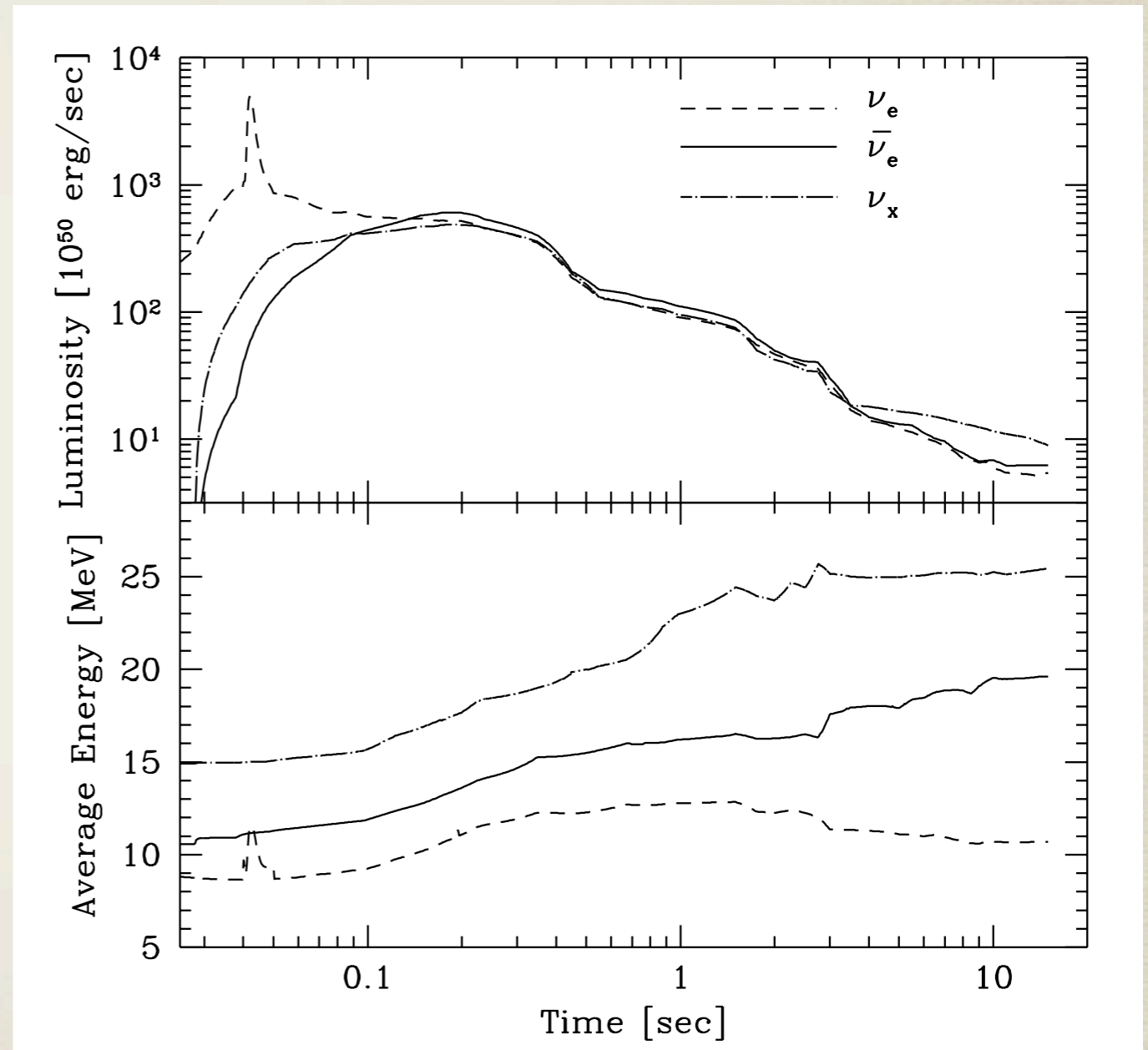
日本標準 2月23日16時35分35秒(±1分)

グリニッジ標準時 2月23日7時35分35秒(±1分)

超新星爆発のメカニズム
が実証された

超新星爆発ニュートリノ

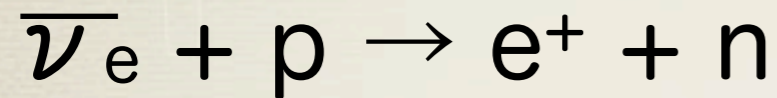
- * ニュートリノは重力崩壊型の超新星爆発で放出される。
- * 解放される重力エネルギー ($\sim 3 \times 10^{53} \text{erg}$) の大部分 ($\sim 99\%$) はニュートリノにより放出される。
- * 全タイプのニュートリノ
- * エネルギー: $\sim 10 \text{MeV}$
- * 放出時間: $\sim 10 \text{sec}$.



T.Totani et. al., Astrophys. J. 496, 216 (1998)

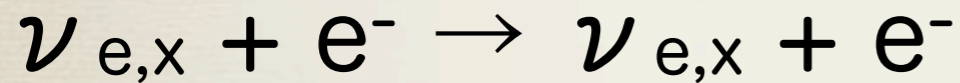
ニュートリノ反応

逆ベータ崩壊



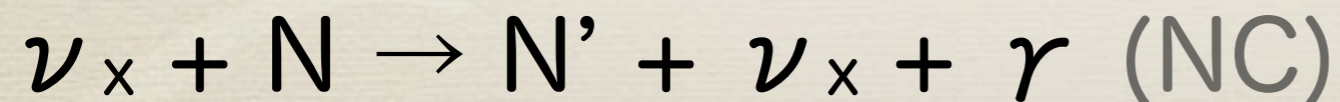
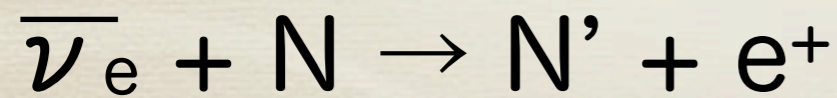
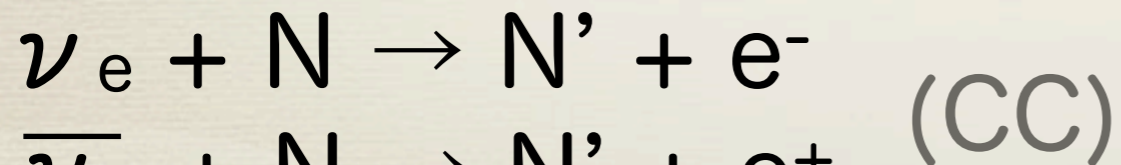
反応断面積が大きい

電子弾性散乱

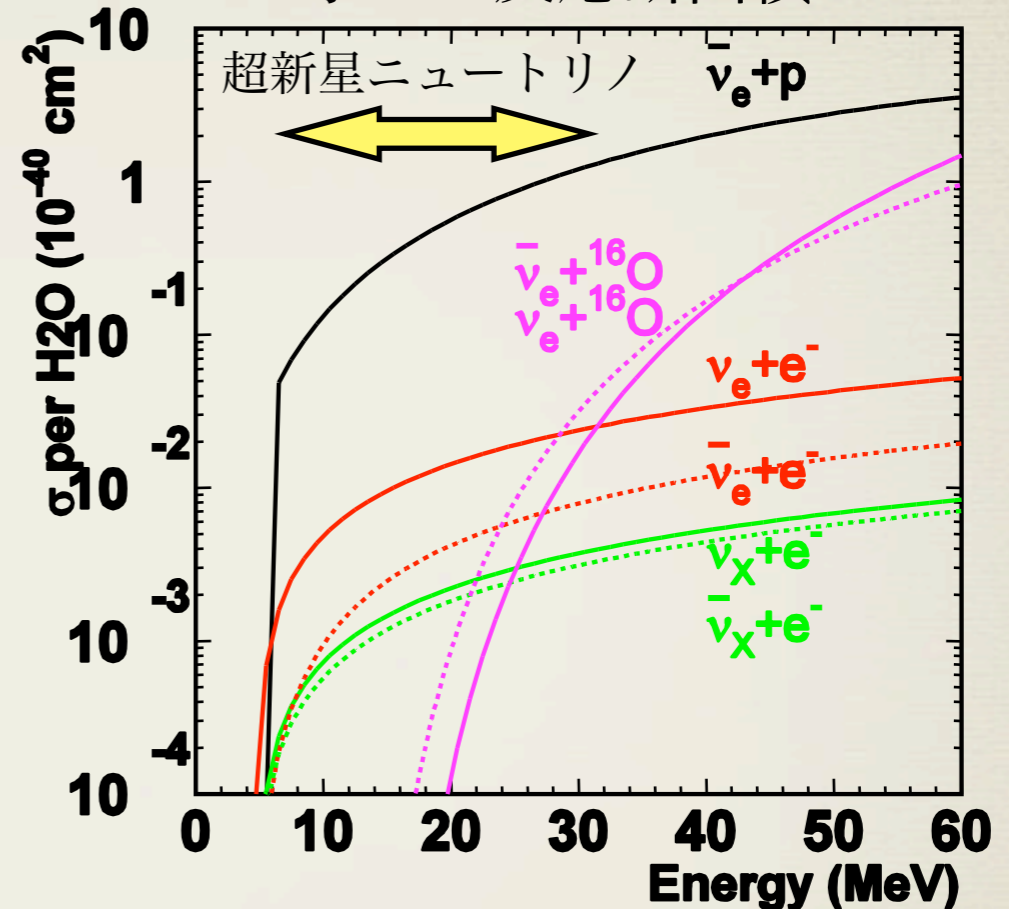


入射ニュートリノの方向を保存

原子核との反応



水との反応断面積



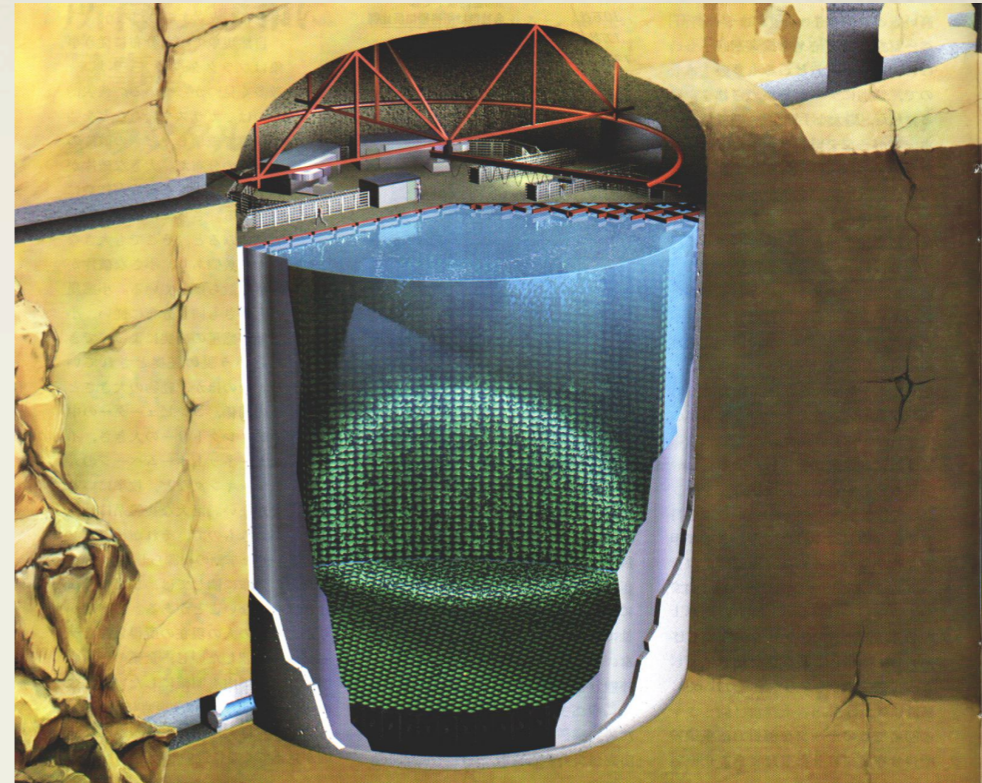
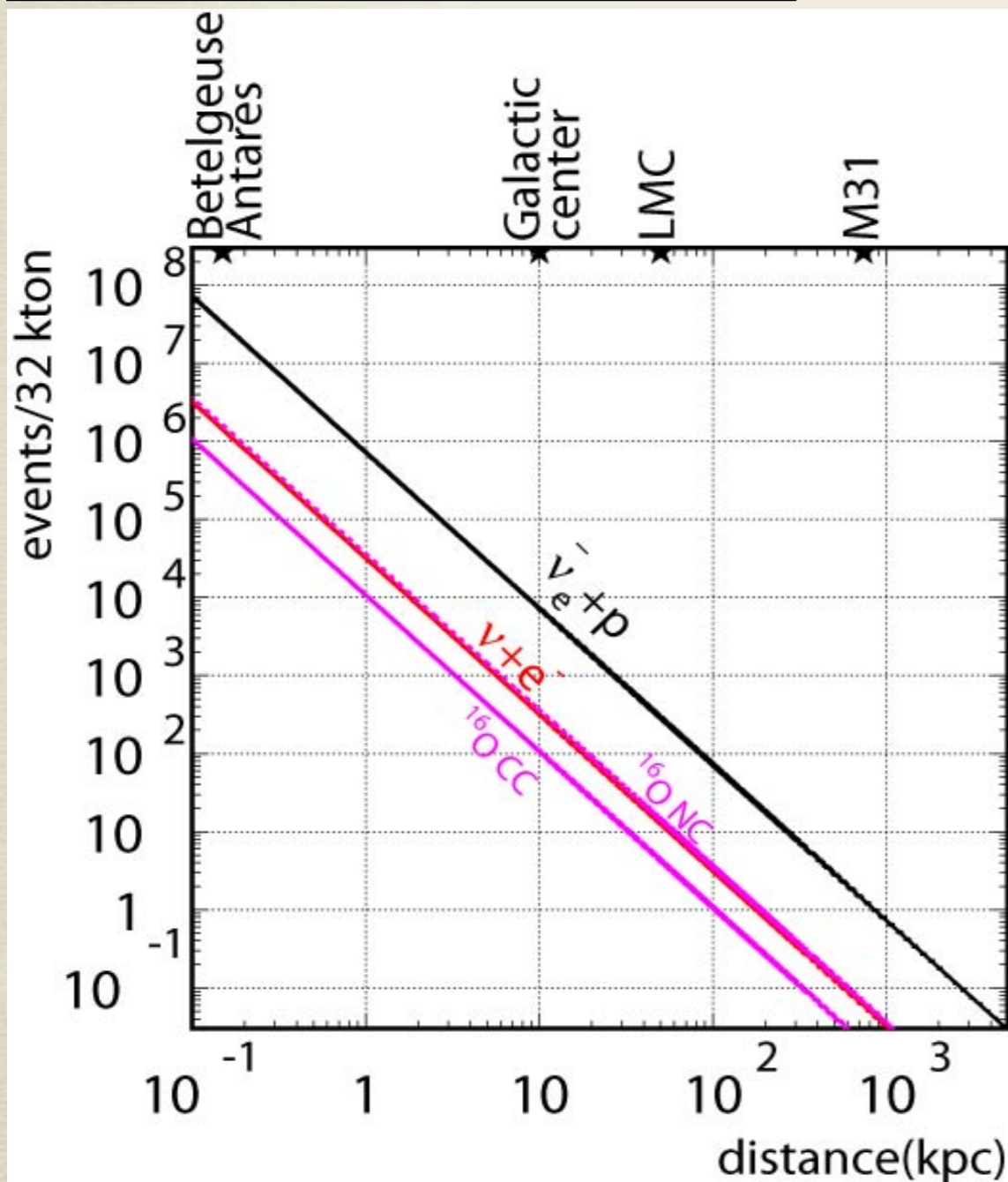
超新星ニュートリノ検出器

Detector	Type	Location	Mass (kton)	Events @ 10 kpc	Status
Super-K	Water	Japan	32	8000	Running (SK IV)
LVD	Scintillator	Italy	1	300	Running
KamLAND	Scintillator	Japan	1	300	Running
Borexino	Scintillator	Italy	0.3	100	Running
IceCube	Long string	South Pole	(600)	(10^6)	Running
Baksan	Scintillator	Russia	0.33	50	Running
Mini-BOONE	Scintillator	USA	0.7	200	Running
Icarus	Liquid argon	Italy	0.6	60	Running
HALO	Lead	Canada	0.079	20	Under construction
NOvA	Scintillator	USA	15	3000	Construction started
SNO+	Scintillator	Canada	1	300	Under construction

(K.Scholberg, LowNu2002, Seoul, Korea)

スーパーカミオカンデ

期待される事象数

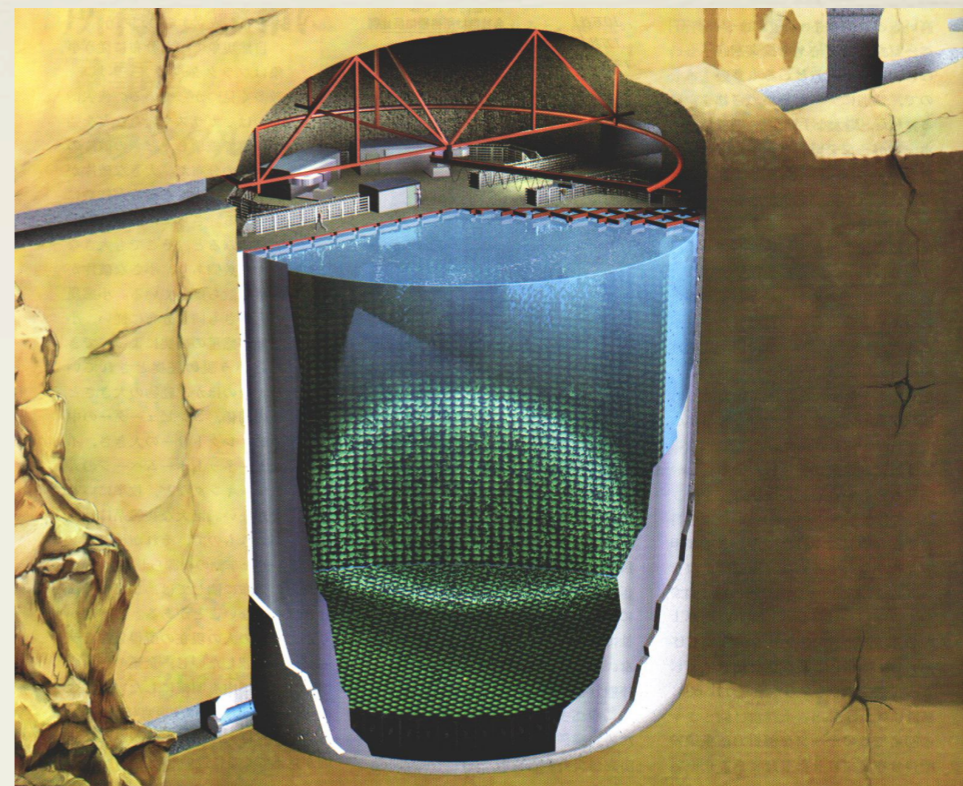
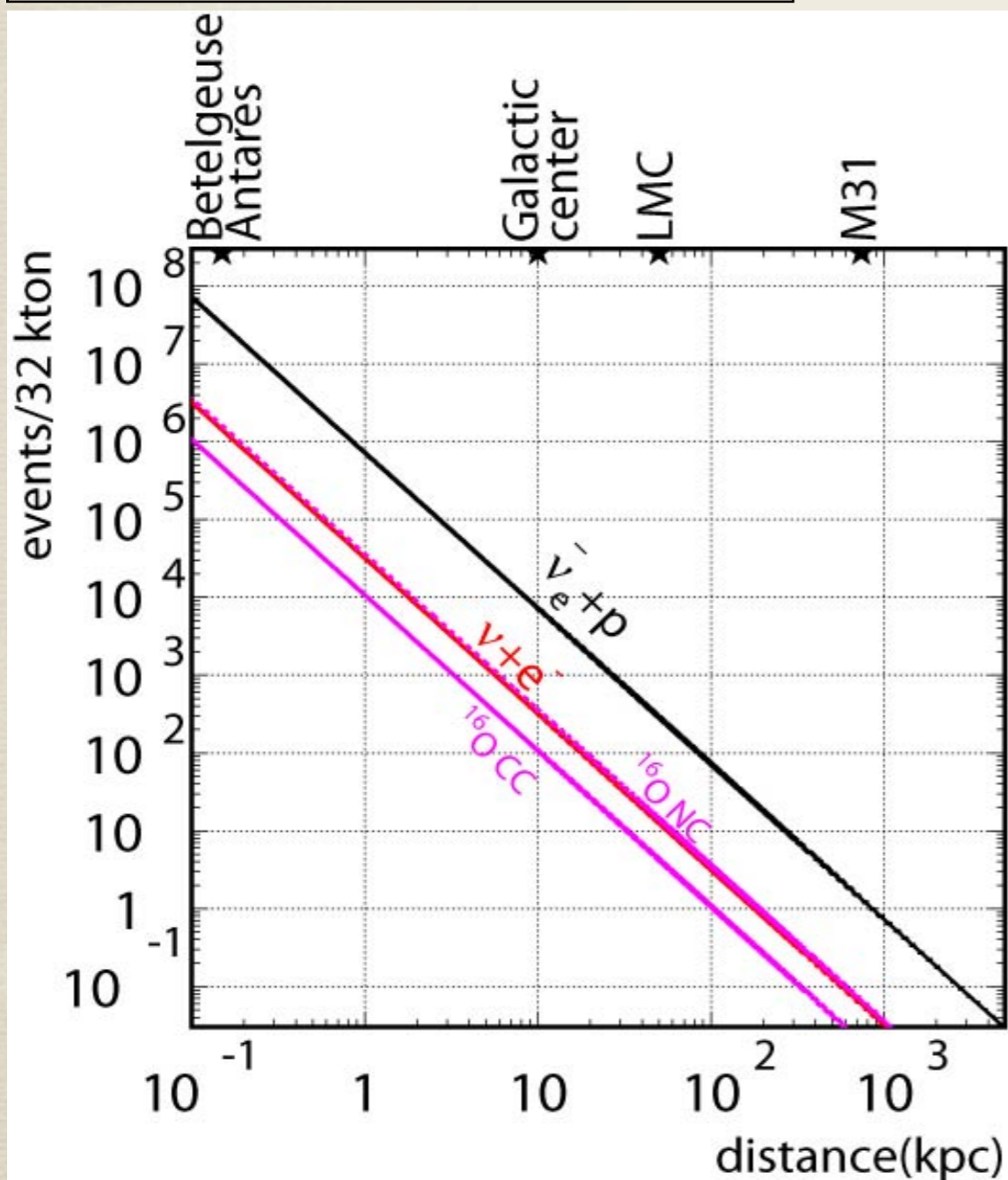


- ~7300 ev (逆ベータ崩壊)
- ~300 ev (電子弾性散乱)
- ~360 ev ($^{16}\text{O NC } \gamma$)
- ~100 ev ($^{16}\text{O CC}$)

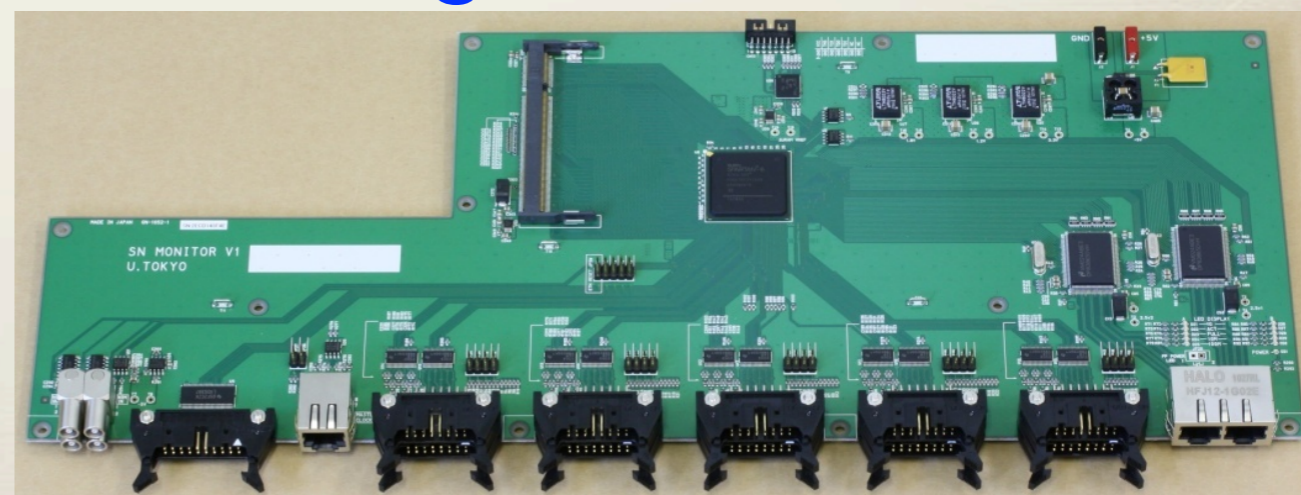
@10kpc SuperNova, 5MeV threshold

スーパーカミオカンデ

期待される事象数



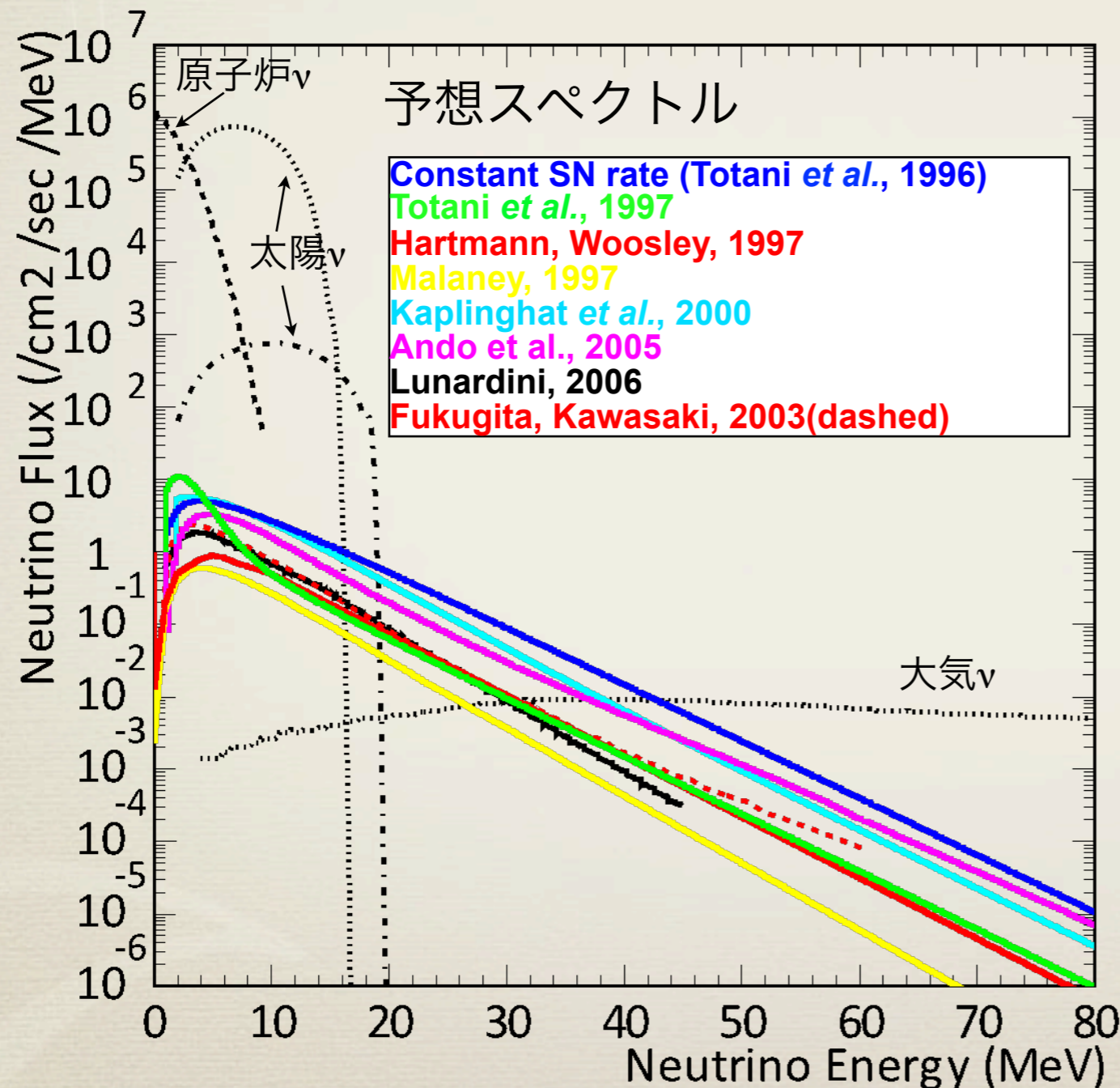
For Betelgeuse



新エレクトロニクス (横澤さん開発)

超新星背景ニュートリノ

宇宙開闢からの超新星爆発によるニュートリノ



期待される信号数

0.8~5.0 ev/year/22.5kton
(10~30MeV)

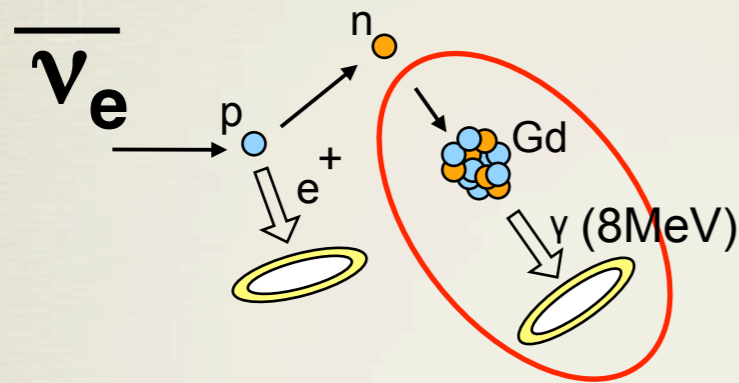


現在は上限値のみ

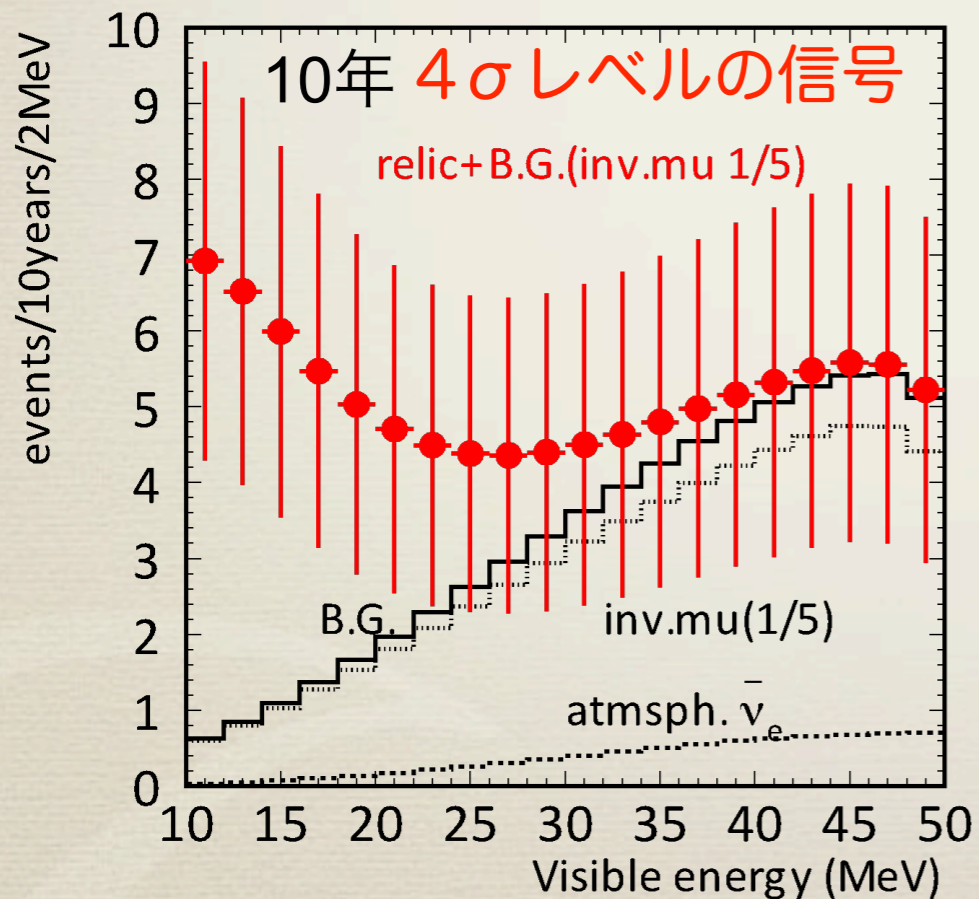
理論予測値の3倍程度
のところまで来ている

GADZOOKS!

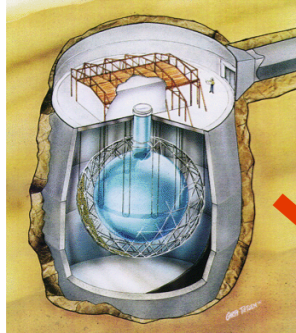
SKにGdを溶かすことで、バックグラウンドを落とす



テストタンクによるR&D中



SNEWS: SuperNova Early Warning System



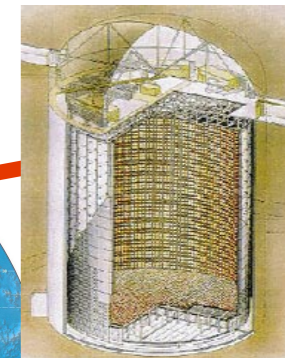
SNO
(until 2006)



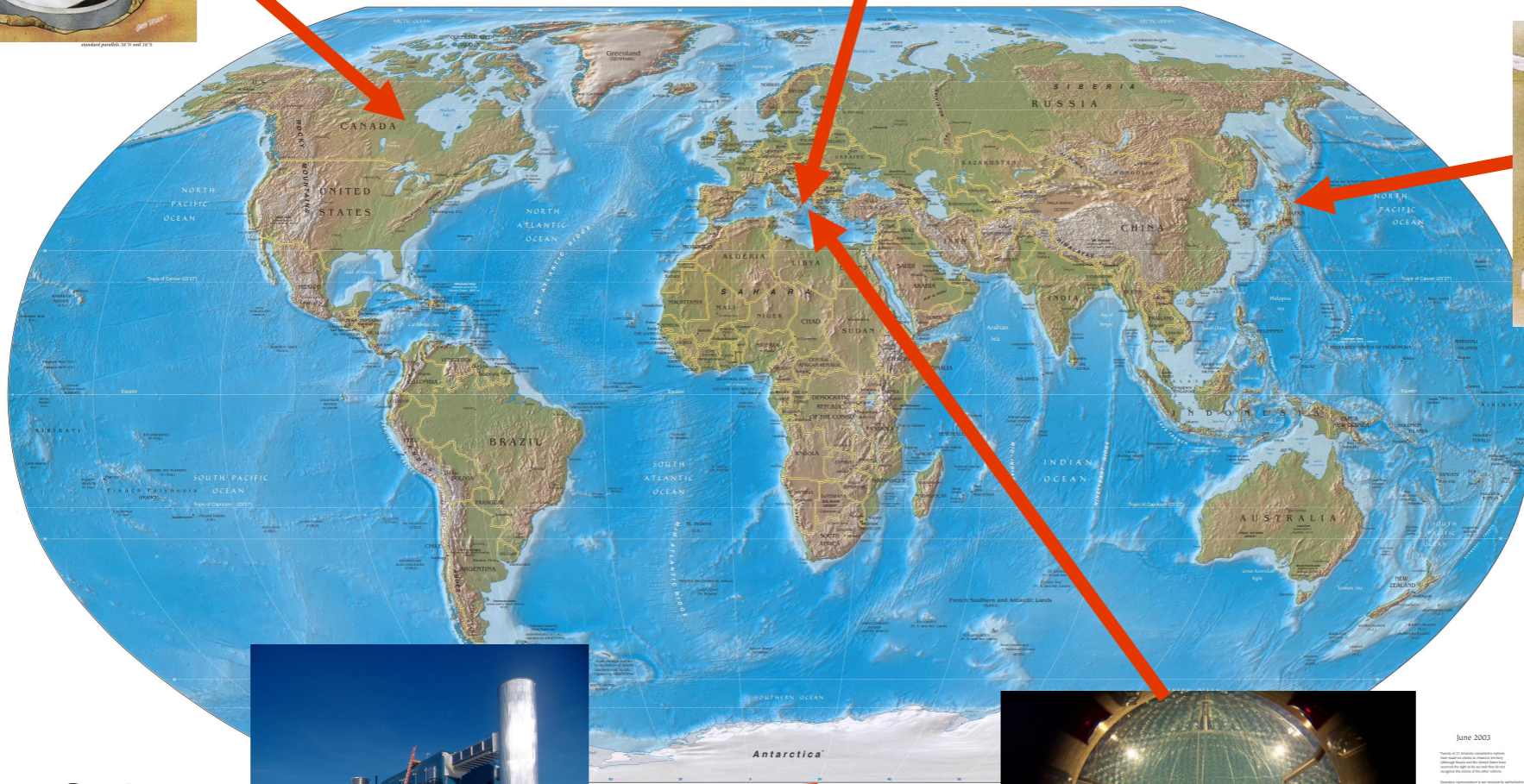
LVD



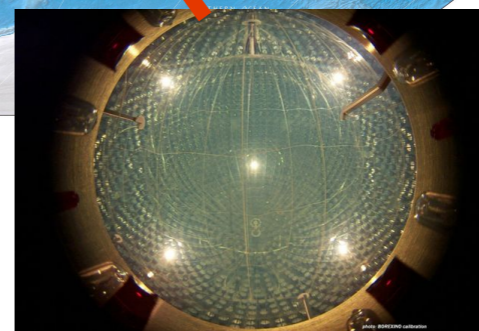
snews.bnl.gov



Super-K



IceCube



Borexino

(K.Scholberg, LowNu2002, Seoul, Korea)