

中性子検出について

新学術「地下素核研究」
第3回B02班若手ミニ研究会

2015年5月17日

東北大学ニュートリノ科学研究センター

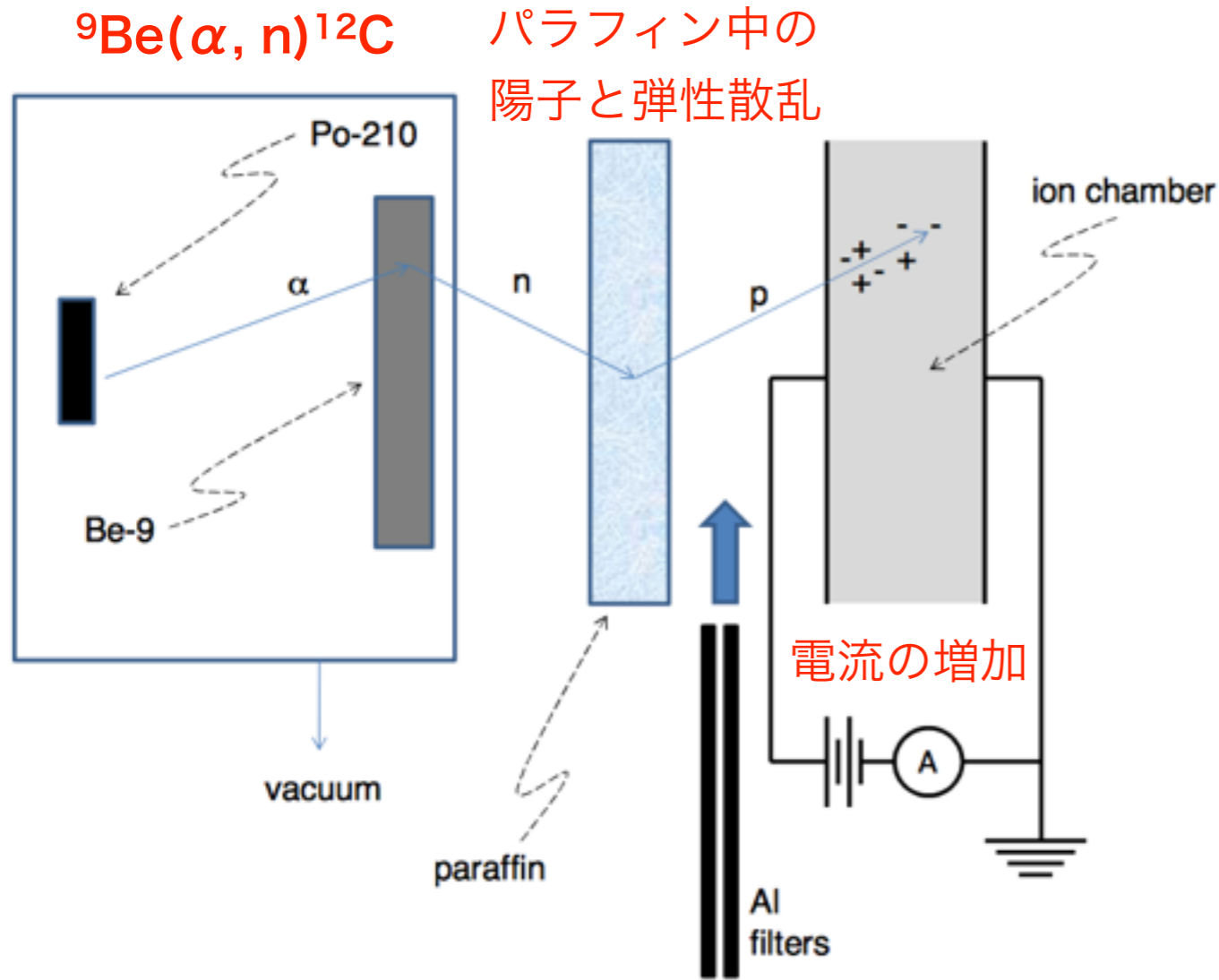
清水 格

中性子の生成

中性子の発見

1932 チャドウィックが電離箱を用いて検出

(α, n)反応で生成された中性子



- α -Be線源

α 線をベリリウムに照射 ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$

- 光中性子源

γ 線を重水素に照射 ${}^2\text{H}(\gamma, n){}^1\text{H}$

- 自発核分裂

小分岐比での核分裂 ${}^{252}\text{Cf}$ 線源

- 原子炉

連鎖的に核分裂 **高強度の中性子源**

放射性同位体の生成に利用

- 原子核反応

核融合反応 (D-T) ${}^3\text{H}(\text{d}, n){}^4\text{He}$

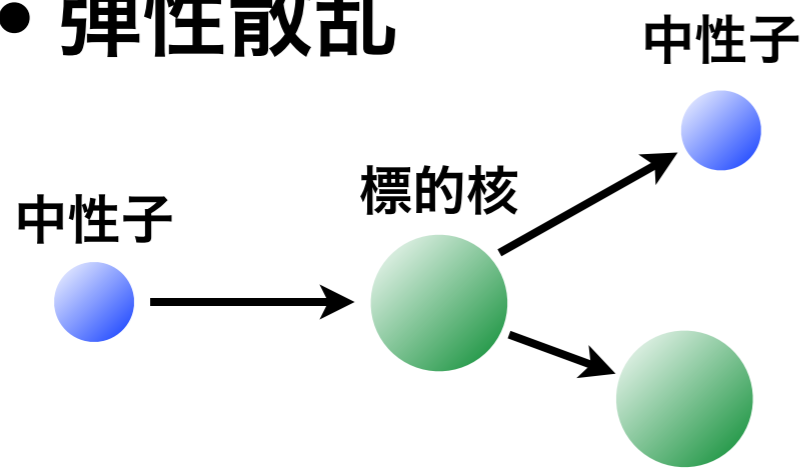
原子核破砕反応 $X(\text{p}, n)Y$ 主に重元素

環境中でも天然の放射線 (宇宙線、ウラン、トリウムなど) によって自然に生成される

中性子と物質の相互作用

電氣的に中性である中性子は**核力**のみによって物質と相互作用をする

● 弾性散乱



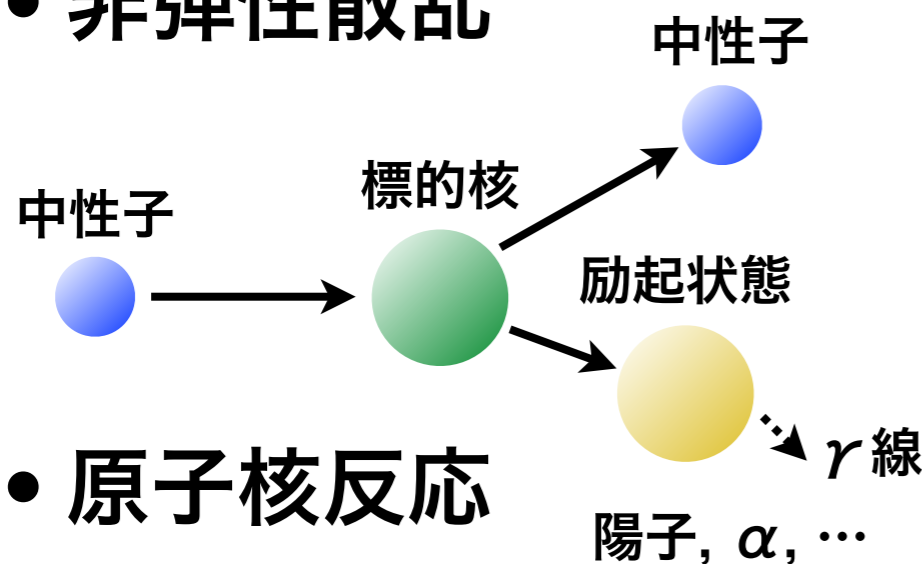
$X(n, n)X$ 始状態と終状態の粒子種が同じ

反跳原子核の運動エネルギー

$$T_X = T_n \frac{4M_n M_X}{(M_n + M_X)^2} \cos^2 \theta \quad \text{標的が陽子のとき最大}$$

水素原子を多く含む物質は中性子を減速しやすい

● 非弾性散乱

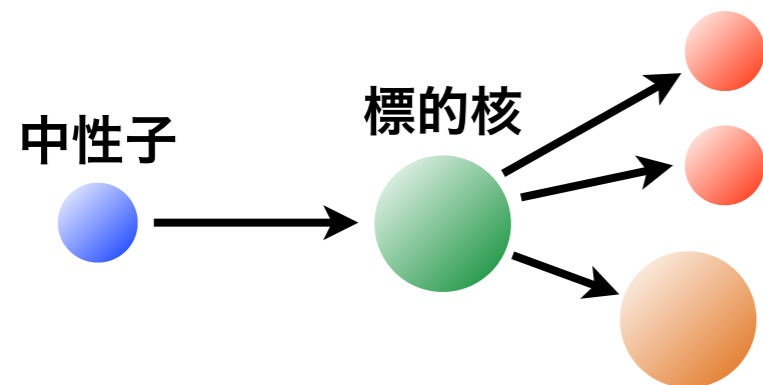


$X(n, n)X^*$ 終状態の原子核のエネルギーが変化

運動エネルギーの合計が変化

励起状態から γ 線などが放出される

● 原子核反応



$X(n, p), X(n, \alpha), X(n, 2n), X(n, 2\alpha),$ 核分裂, ...

反応によって不安定核が作られる

熱中性子の場合には $X(n, \gamma)$ などで原子核に捕獲される

反応の起こりやすさは中性子のエネルギーに依存

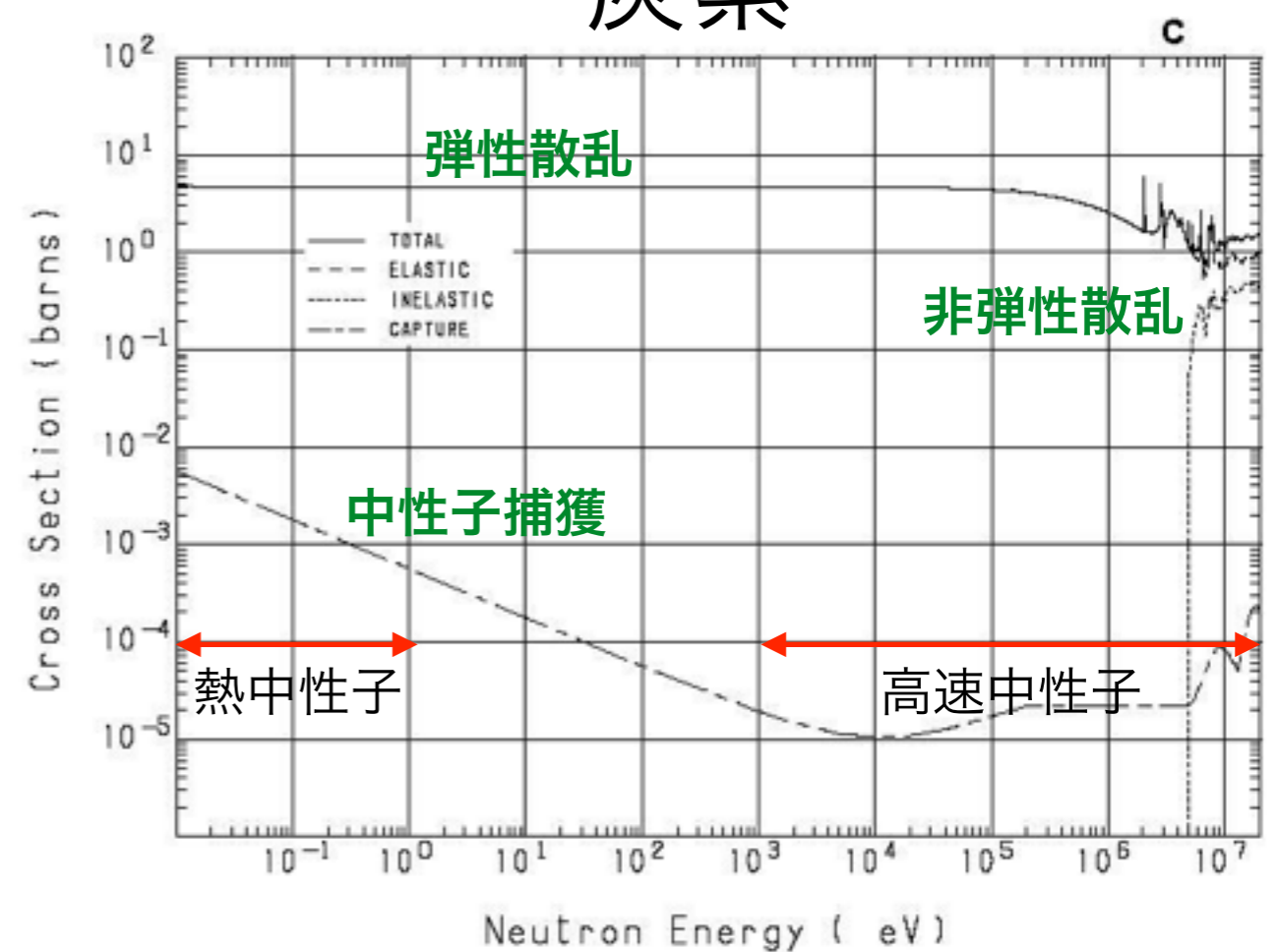
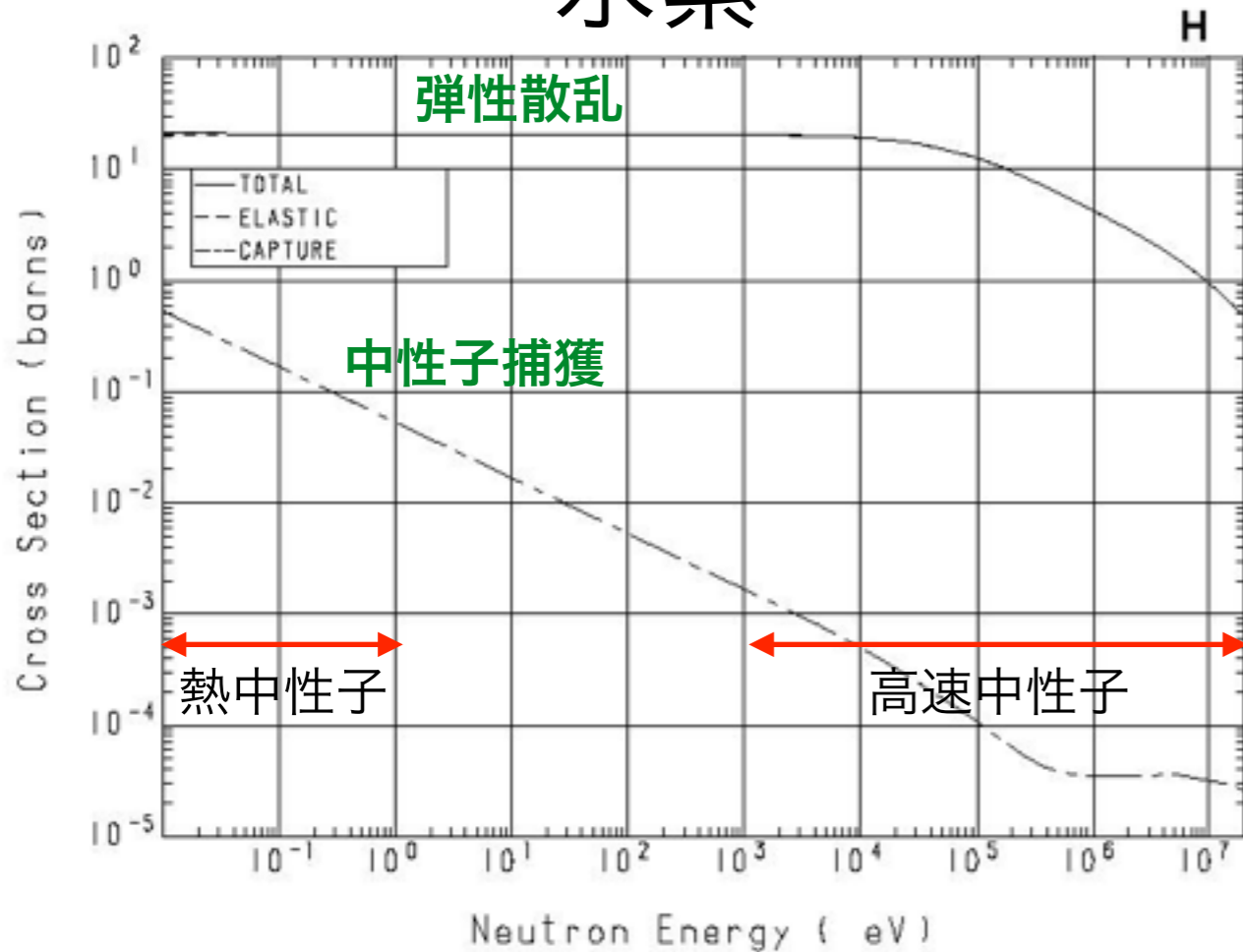
中性子の反応断面積

JENDL核データライブラリ

"Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3," J. Nucl. Sci. Technol. 39, 1125 (2002).

水素

炭素



原子核反応によって作られた中性子のエネルギー \sim MeV



物質中で弾性散乱によってエネルギーが失われていき、最後は中性子捕獲を起こす

熱中性子化 $< \mu s$

平均捕獲時間 $\sim 10-100 \mu s$

高エネルギー ($>$ 数MeV) では非弾性散乱を起こしやすくなる

中性子捕獲断面積

LBNL熱中性子捕獲データベース

<http://ie.lbl.gov/ngdata/sig.htm>

S.F Mughabghab, M. Divadeenam and N.E. Holden, Academic Press (1981)

	A	E1	Z	Type		Sigma	Unc.	Resonance	Int.	Unc.
¹ H	1H	1	1	sigma(0)	0.33 barn	3.3260E-01	7.0000E-04	0.0000E+00	0.0000E+00	
	1H	1	1	sigma(s)		2.0491E+01	1.4000E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	
	2H	1	1	sigma	熱中性子	5.1900E-04	7.0000E-06	0.0000E+00	0.0000E+00	
	2H	1	1	sigma(s)	平均エネルギー	3.3900E+00	1.2000E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	
	3H	1	1	sigma	0.025 eV	<6.0000E-06	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	
	3H	1	1	sigma(s)	(2200 m/sec)	1.7000E+00	3.0000E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	
	3HE	2	2	sigma	に対する捕獲断面積	3.1000E-05	9.0000E-06	0.0000E+00	0.0000E+00	
³ He	3HE	2	2	sigma(s)		3.1000E+00	1.3000E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	
	3HE	2	2	sigma(P)	5333 barn	5.3330E+03	7.0000E+00			
	4HE	2	2	sigma(s)		7.6000E-01	1.0000E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	
⁶ Li	6LI	3	3	sigma(s)		7.5000E-01	2.0000E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	
	6LI	3	3	sigma		3.8500E-02	3.0000E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	
	6LI	3	3	sigma(a)	940 barn	9.4000E+02	4.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	
	7LI	3	3	sigma(s)		9.7000E-01	4.0000E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	
	7LI	3	3	sigma		4.5400E-02	3.0000E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	
	7BE	4	4	sigma(p)		4.8000E+04	9.0000E+03			
¹⁰ B	7BE	4	4	sigma(a)		<1.0000E-01	0.0000E+00			
	9BE	4	4	sigma(s)		6.1510E+00	5.0000E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	
	9BE	4	4	sigma		7.6000E-03	8.0000E-04	4.0000E-03	4.0000E-04	
	10BE	4	4	sigma		<1.0000E-03	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	
	10B	5	5	sigma		5.0000E-01	2.0000E-01	0.0000E+00	0.0000E+00	
	10B	5	5	sigma(A)	3837 barn	3.8370E+03	9.0000E+00	1.7220E+03	5.0000E+00	
	10B	5	5	sigma(s)		2.2300E+00	6.0000E-02	0.0000E+00	0.0000E+00	

天然存在比
捕獲断面積
が大きい

高速中性子の遮蔽のコツ

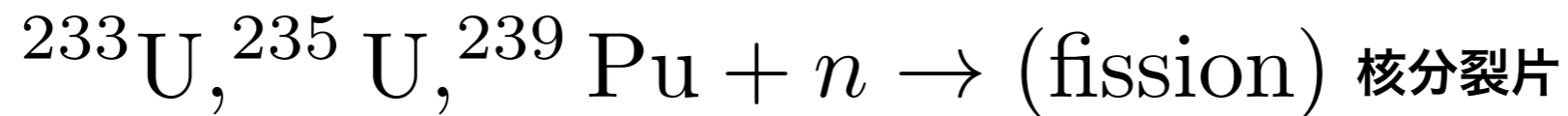
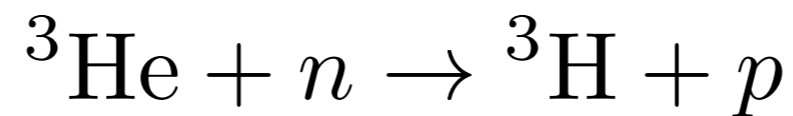
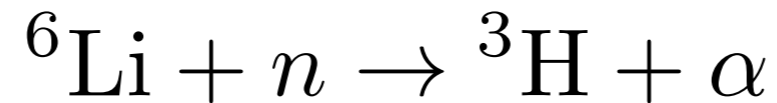
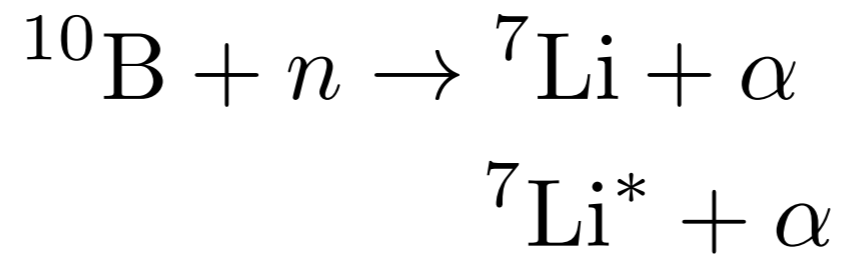
水素原子を多く含む物質で中性子を熱中性子化



リチウム・ホウ素などを含む物質で中性子を捕獲

熱中性子の検出方法

熱中性子に対して大きな断面積を持つ原子核反応を利用



発熱反応 → **MeV程度の荷電粒子を放出**

例) ^3He 比例計数管

荷電粒子 (^3H , p) のエネルギー: **0.764 MeV**

^3He ガスの比例計数管でエネルギーを測定

減速材と組み合わせることで高速中性子も検出可能

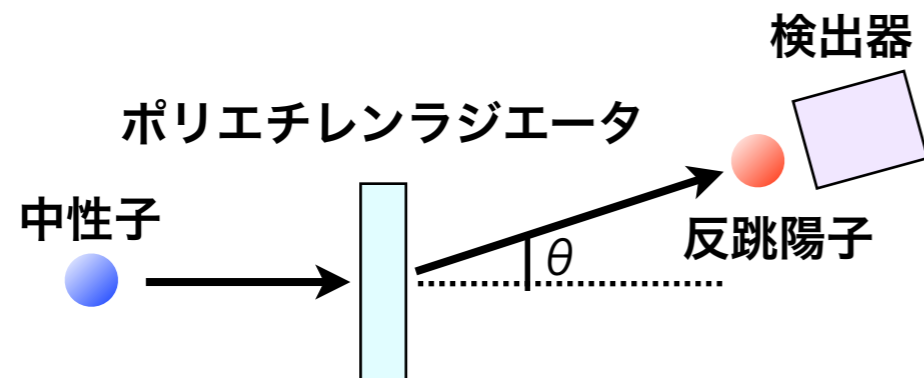


高速中性子の検出方法

エネルギー情報が不要であれば減速材で減速 → 熱中性子の検出

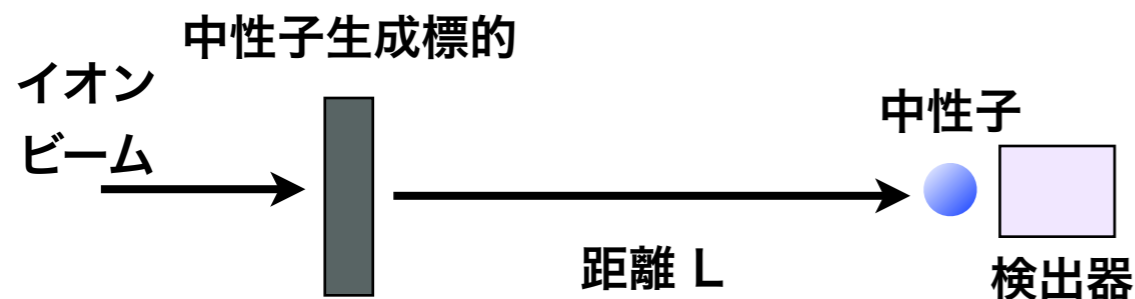
中性子のエネルギー測定

- 高速中性子による反跳陽子の測定



弾性散乱断面積の不定性は小さい
2次粒子の影響の評価は困難

- 飛行時間法 (TOF法)



運動エネルギー $E_n = \frac{1}{2} M_n \left(\frac{L}{T} \right)^2$

シンプルで精度が高い
中性子の発生時間の情報が必要

- 高速中性子による放射化反応

しきい値を持つ放射化反応

核分裂反応、原子核破砕反応

$^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$, $^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$ などで生成された核種の崩壊を測定

核分裂片などが作る信号を測定

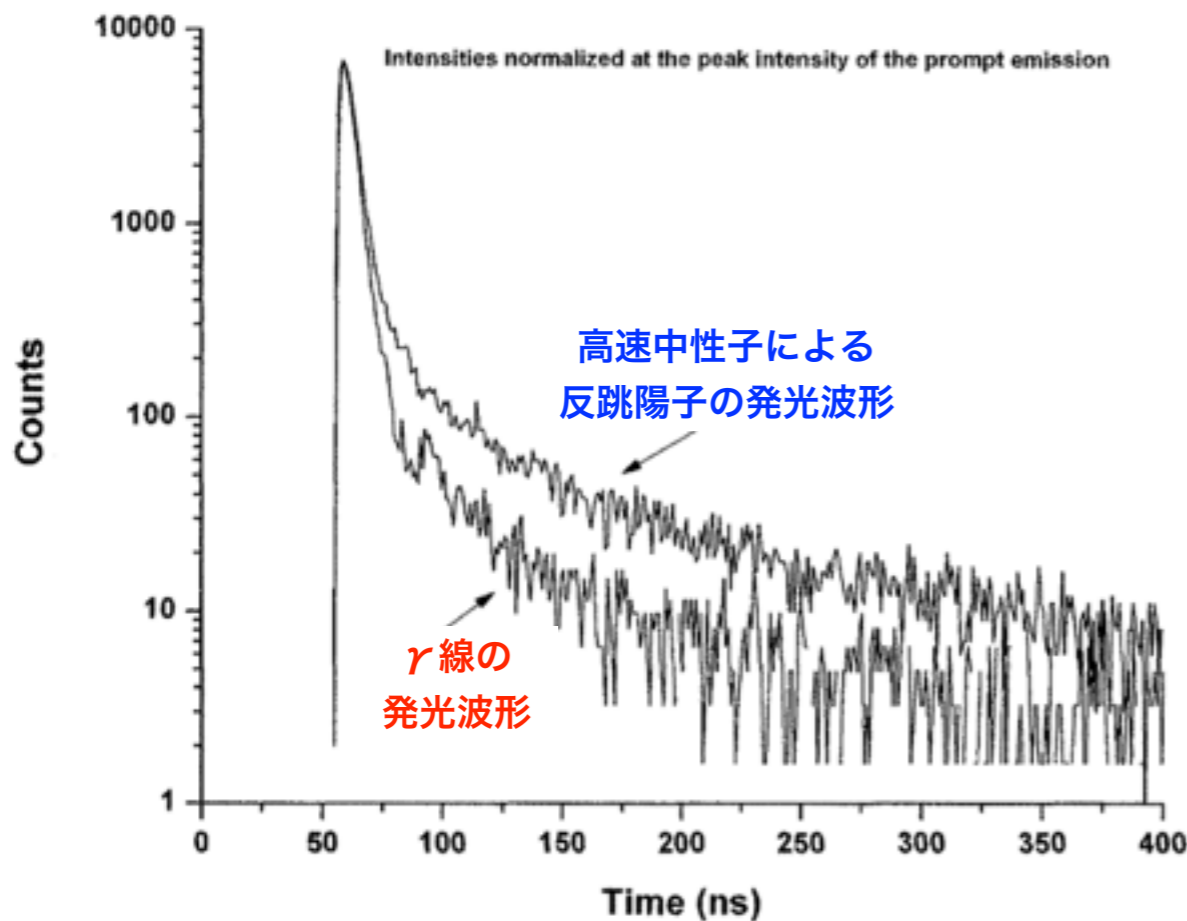
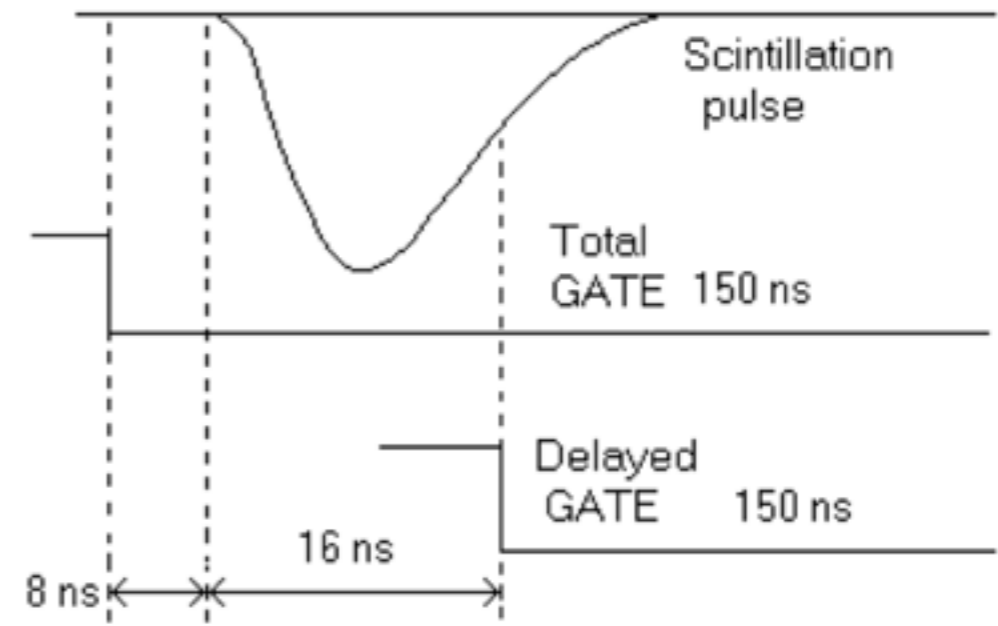
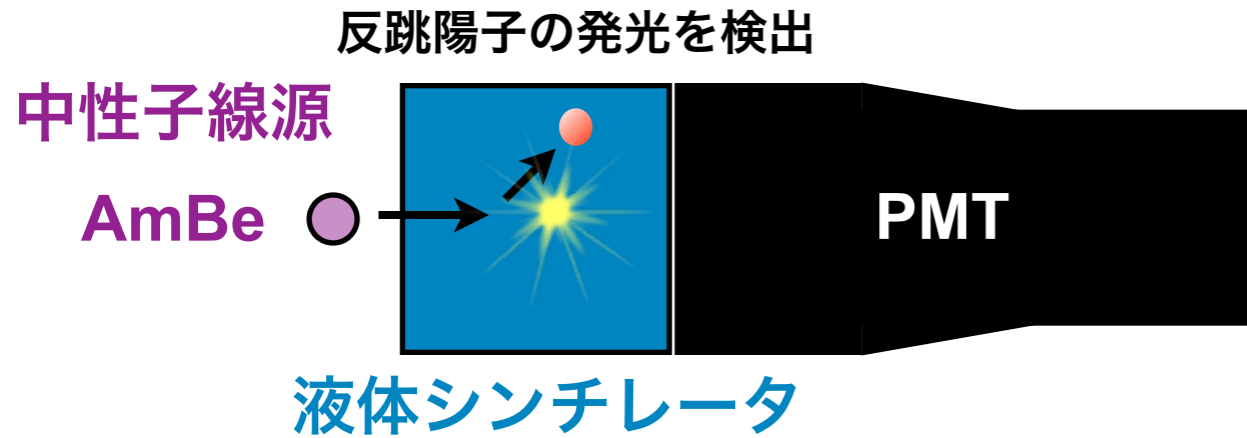
主な中性子検出器の分類

放射線計測基礎論, KEK 佐々木慎一,

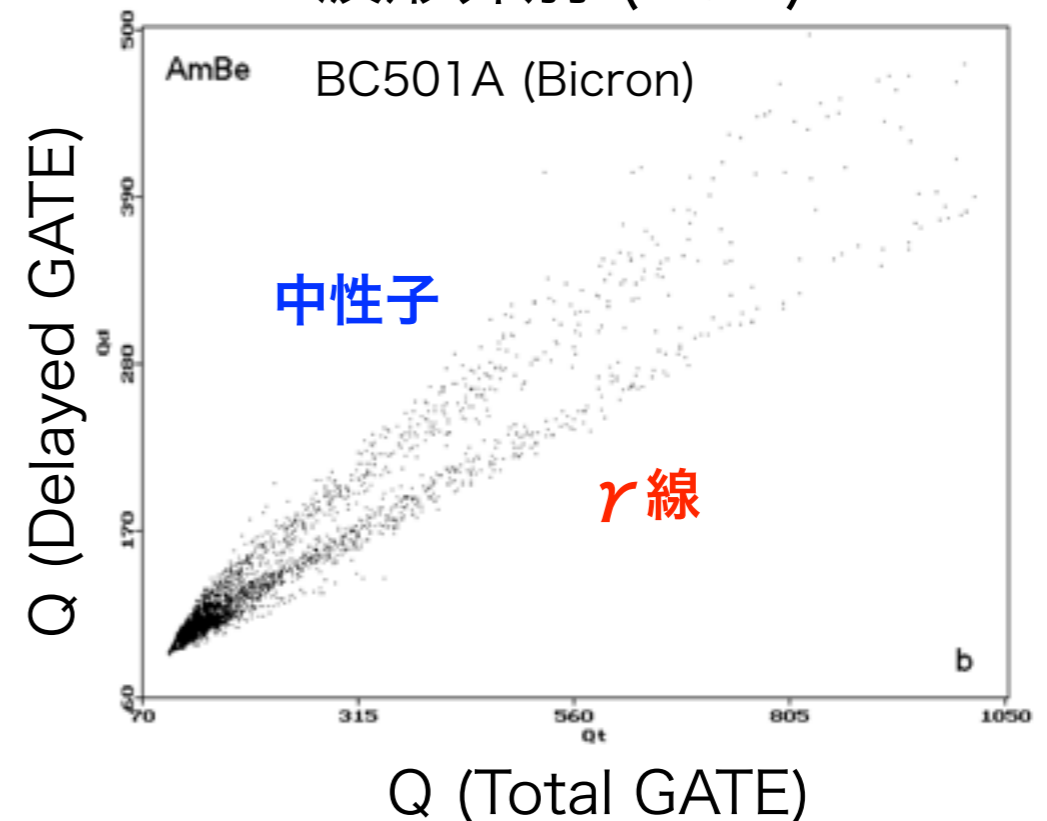
検出器名	動作原理	用途	エネルギー域
BF ₃ 比例計数管	荷電粒子放出反応 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ $Q=2.79, 2.31\text{MeV}$	熱中性子計測、線量計	0.025~1eV
³ He比例計数管	荷電粒子放出反応 $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$ $Q=0.764\text{MeV}$	熱中性子計測	0.025~1eV
	反跳法 $^3\text{He}(n, n)^3\text{He}$	高速中性子スペクトロメータ	100keV~10MeV
水素比例計数管	反跳陽子法 $\text{H}(n, n)\text{H}$	中速中性子スペクトロメータ	10keV~2MeV
核分裂計数管	核分裂反応 $^{235}\text{U}(n, f), ^{238}\text{U}(n, f)$ 等	熱中性子計測(原子炉計測)	0.025~1eV
		高速中性子計測	1MeV~100MeV
有機シンチレータ (液体シンチレータを含む)	反跳陽子法 $\text{H}(n, n)\text{H}$	中・高速中性子スペクトロメータ	500keV~100MeV
⁶ Li(Eu)シンチレータ	荷電粒子放出反応 $^7\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ $Q=4.78\text{MeV}$	熱中性子計測用	0.025~1eV
放射化検出器 (熱、熱外中性子)	中性子捕獲反応 (n, g)	熱中性子計測	0.025~1eV
放射化検出器 (高速中性子)	しきい核反応 (n, α), (n, p), (n, 2n)等	高速中性子(MeV領域)計測	1MeV~50MeV
放射化検出器 (高速中性子)	核破砕反応 (n, sp)	高速中性子(100MeV以上)計測	50MeV~500MeV
⁶ Li熱蛍光線量計 (LiF, Li ₂ B ₄ O ₇)	荷電粒子放出反応 $^7\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ $Q=4.78\text{MeV}$	熱中性子計測用、個人線量計	0.025~1eV
トラック検出器 (CR-39)	反跳陽子法 $\text{H}(n, n)\text{H}$	高速中性子(MeV領域)計測、個人線量計	100keV~10MeV

液体シンチレータによる測定

発光波形による n- γ 識別 arXiv:0311022



波形弁別 (PSD)



陽子による電離 \rightarrow 高密度 (dE/dX 大)

長時定数 (3重項状態に由来) の発光が増える

地下での中性子フラックス

ヨーロッパの地下実験

arXiv:0503054

	Neutron flux [$10^{-6} n cm^{-2} s^{-1}$]	Energy	Ref.
LNGS	1.08 ± 0.02	0 - 0.05 eV	[6] [7]
	1.84 ± 0.20	0.05 eV - 1 keV	
	0.54 ± 0.01	1 keV - 2.5 MeV	
	0.27 ± 0.14	2.5 MeV - 5 MeV	
	0.05 ± 0.01	5 MeV - 10 MeV	
LSM	1.6 ± 0.1	0 - 0.63 eV	[12]
	4 ± 0.1	2 - 6 MeV	
LSC	3.82 ± 0.44 $(1.73 \pm 0.22 \pm 0.69) 10^{-3}$	neutrons from radioactivity muon-induced neutrons in rock	[8]
IUS *	≈ 2	> 100 keV	[9]
	≈ 1	> 1 MeV	
SUL	< 2.7	not specified	[14]

$\sim 10^{-6} cm^{-2}s^{-1}$

* calculated neutron flux

神岡地下実験

南野さん修士論文 (2004)

表 4.1: 中性子フラックス (単位: $n cm^{-2} s^{-1}$)、誤差は統計誤差

場所	熱中性子	熱以外の中性子
神岡鉱山内 (2700 <i>m.w.e.</i>)	$8.26(\pm 0.58) \times 10^{-6}$	$1.15(\pm 0.12) \times 10^{-5}$
神岡鉱山内遮蔽体中	$< 4.80 \times 10^{-7}$ (95% <i>C.L.</i>)	$< 3.42 \times 10^{-6}$ (95.45% <i>C.L.</i>)
大谷氏の測定		
地上 (本郷キャンパス)[48]	1.4×10^{-3}	1.2×10^{-2}
神岡鉱山内 (2700 <i>m.w.e.</i>)[48]	1.4×10^{-5}	2.8×10^{-5}
地上 [49]	1.4×10^{-3}	1.2×10^{-2}
Gran Sasso(3950 <i>m.w.e.</i>)[49]	$2.05(\pm 0.06) \times 10^{-6}$	$3.84(\pm 0.58) \times 10^{-6}$

原子核反応による中性子生成

岩盤のウラン・トリウムに起因する生成

- 自発核分裂 ^{238}U $5.45 \times 10^{-5}\%$ **大きい**
- (γ, n) 反応 断面積データを基に計算
- (α, n) 反応 断面積データを基に計算 **大きい**

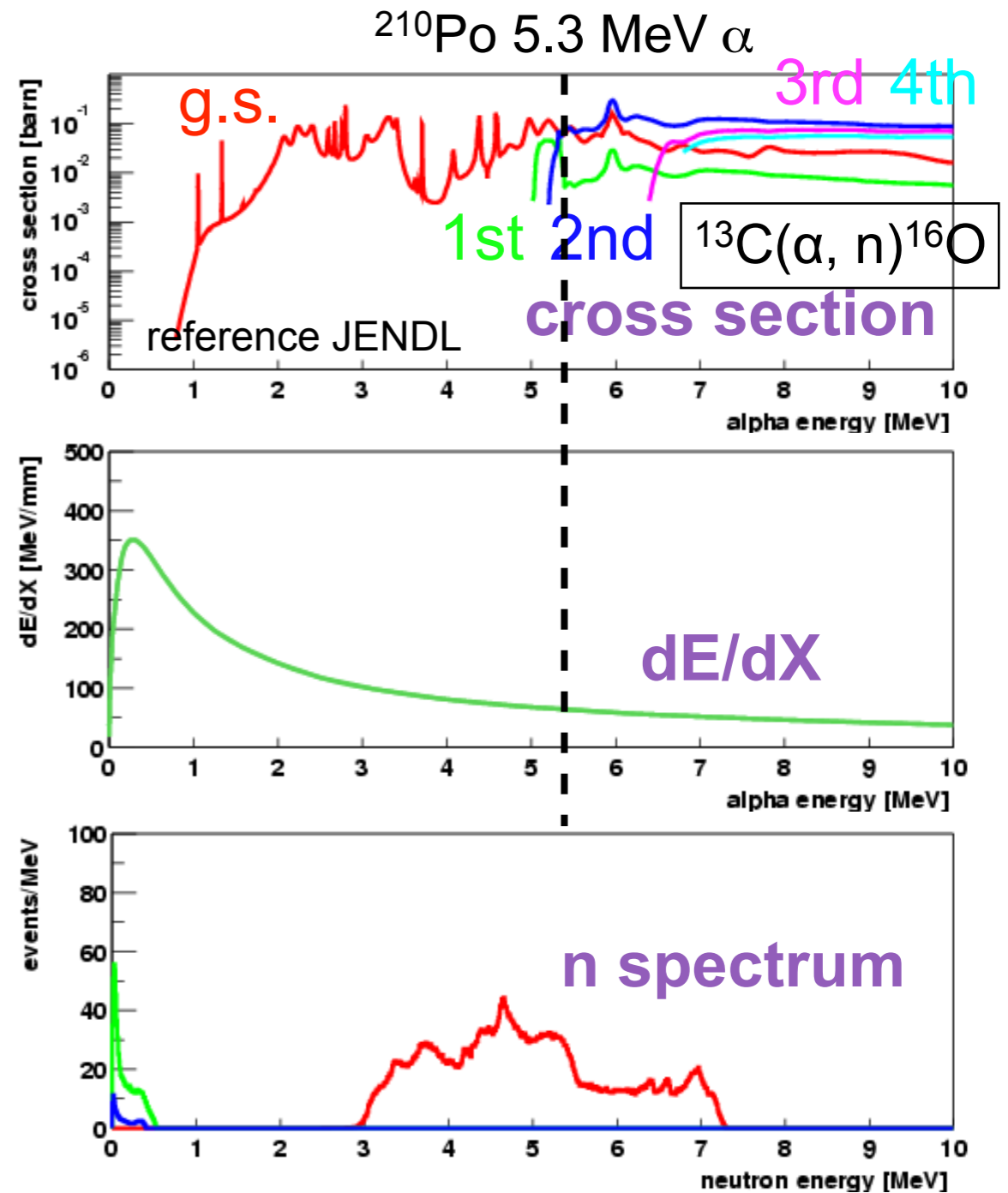
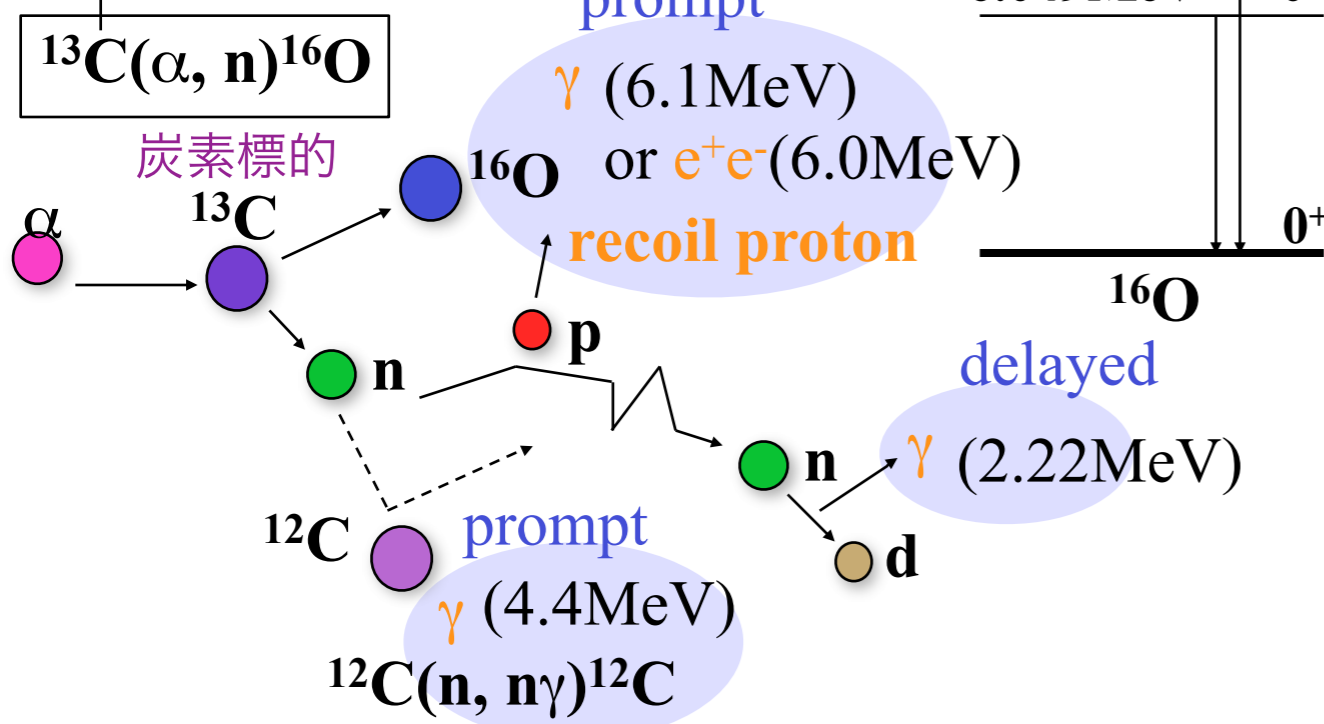
α 線源：ウラン・トリウム娘核 (4~9 MeV)

標的核：岩盤中の原子核

例) 液体シンチレータ中で起こる (α, n) 反応

natural abundance

1.1% $Q = 2.2\text{MeV}$

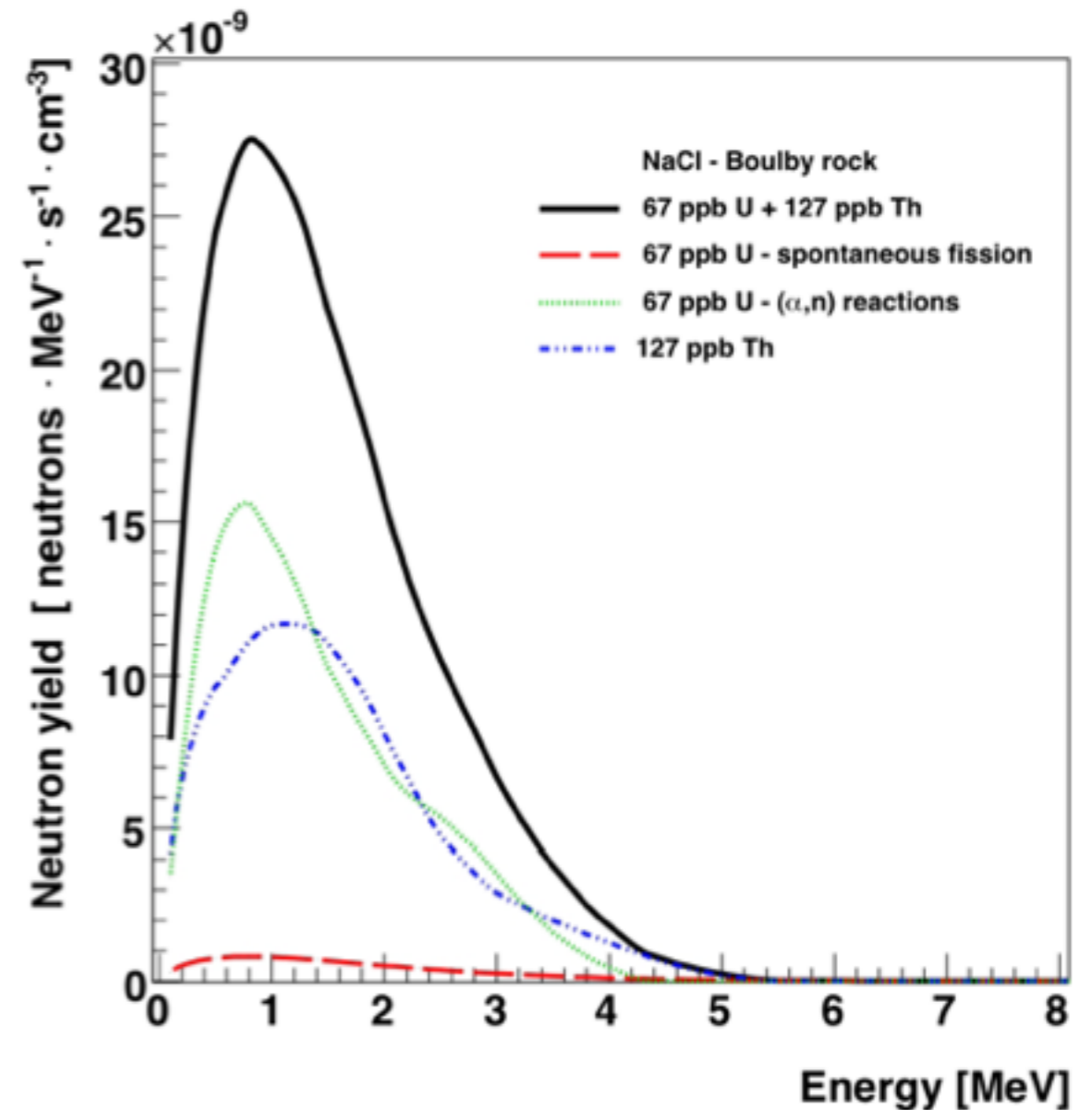
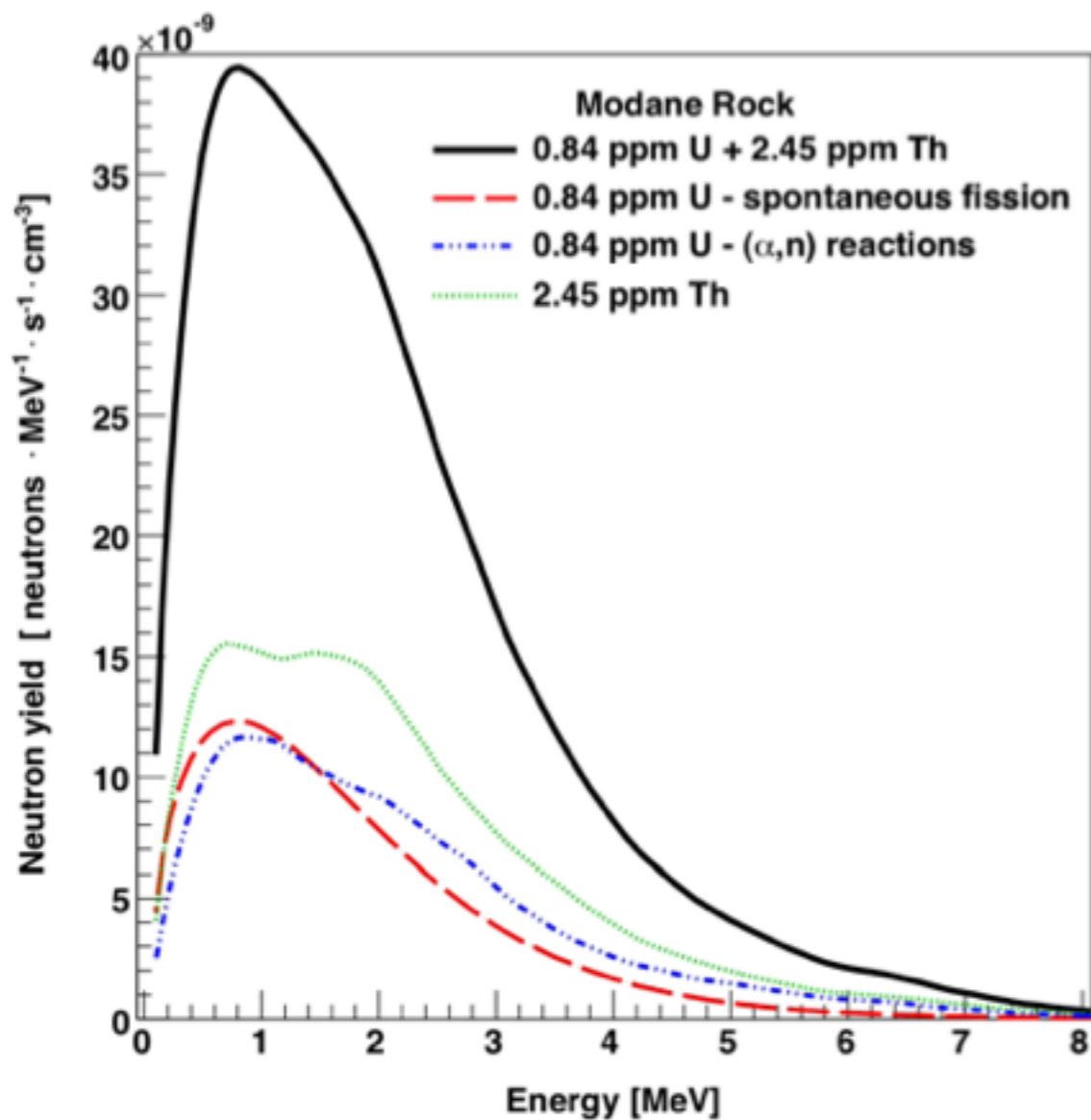


< 10 MeVの中性子が作られる

地下実験環境ではミュオン起源の中性子フラックスよりも2-3桁大きい寄与となる

中性子エネルギースペクトル

原子核反応による中性子生成：岩の組成を基にした計算



Vitaly. A. Kudryavtsev, LNGS, 2010

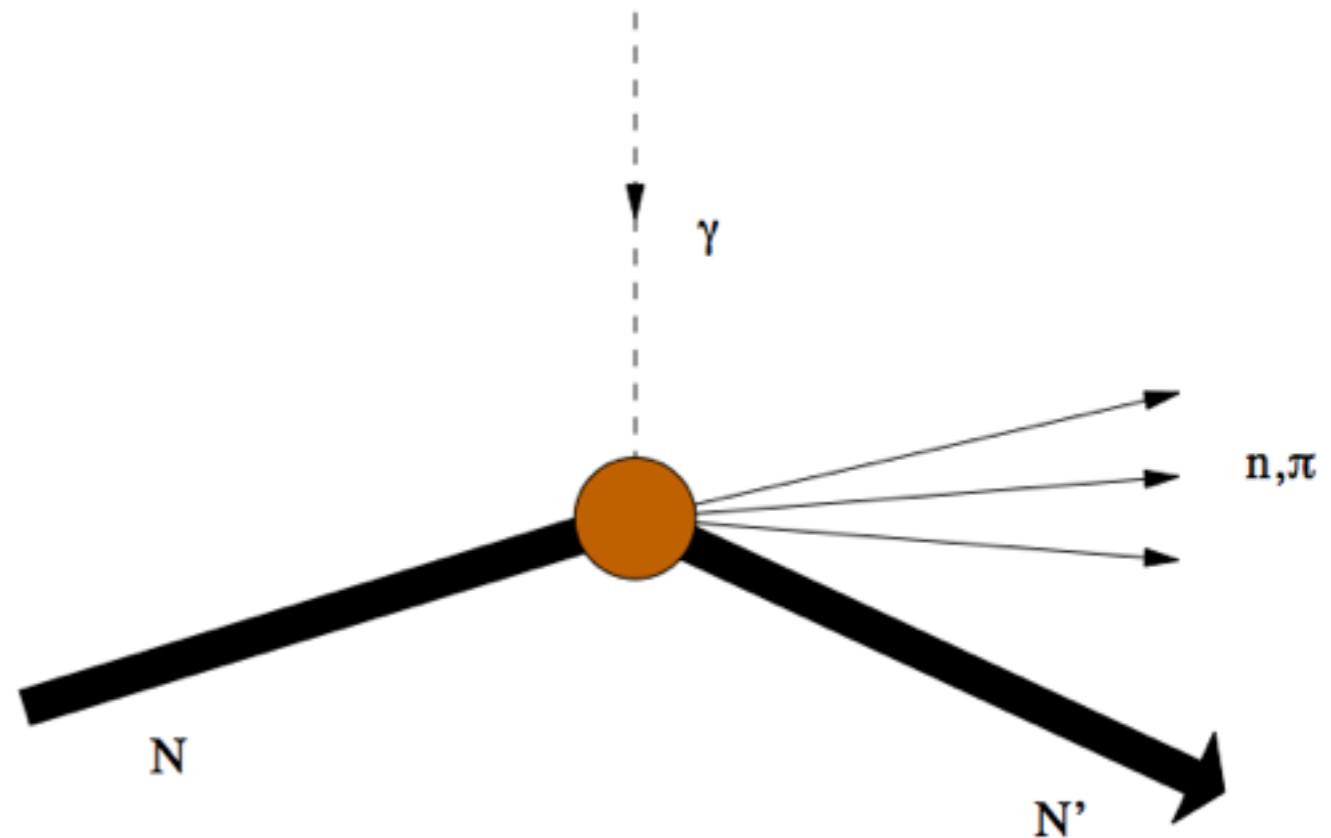
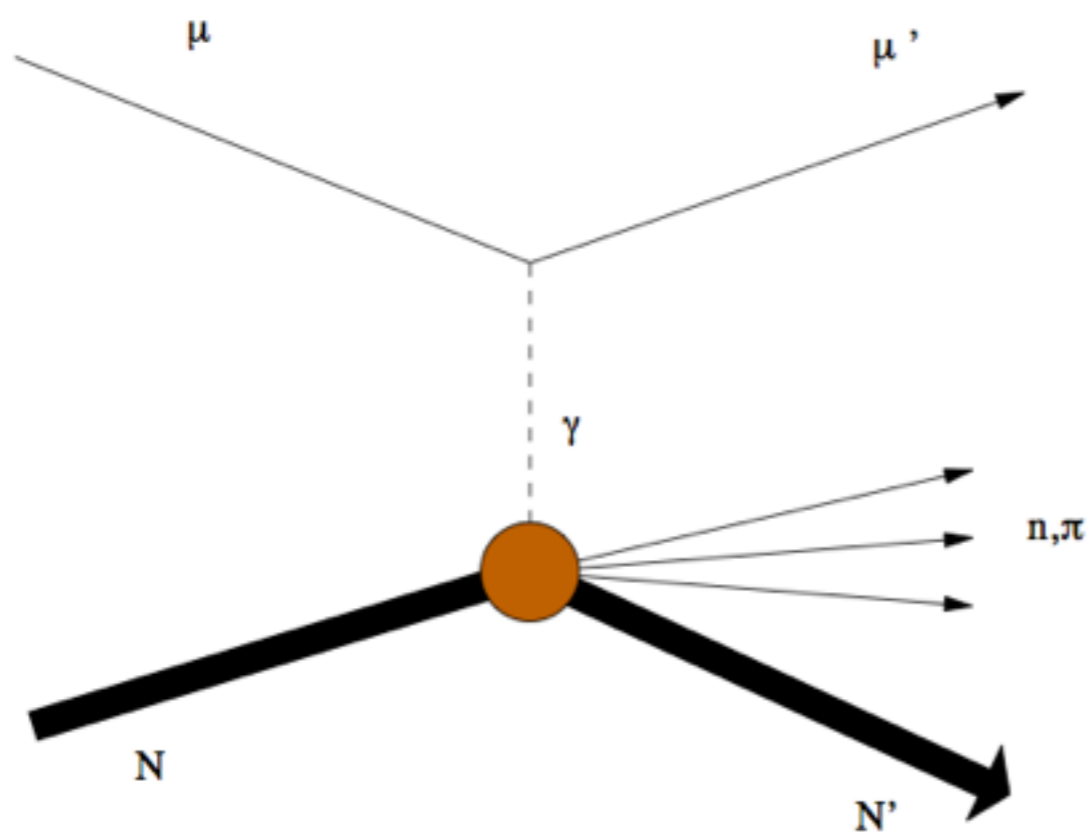
中性子発生レート・スペクトルは岩の種類に強く依存

含水量によって岩の表面での中性子フラックスは変化 (季節変動)

ミューオンによる中性子生成

- ミューオンの仮想光子を媒介とした
原子核破砕 (muon spallation)

- ミューオンの電磁シャワーの γ 線を
原子核が吸収 (photo-absorption)



Neutron Production by Muon Spallation I: Theory, T. Luu, C. Haggmann (2006)

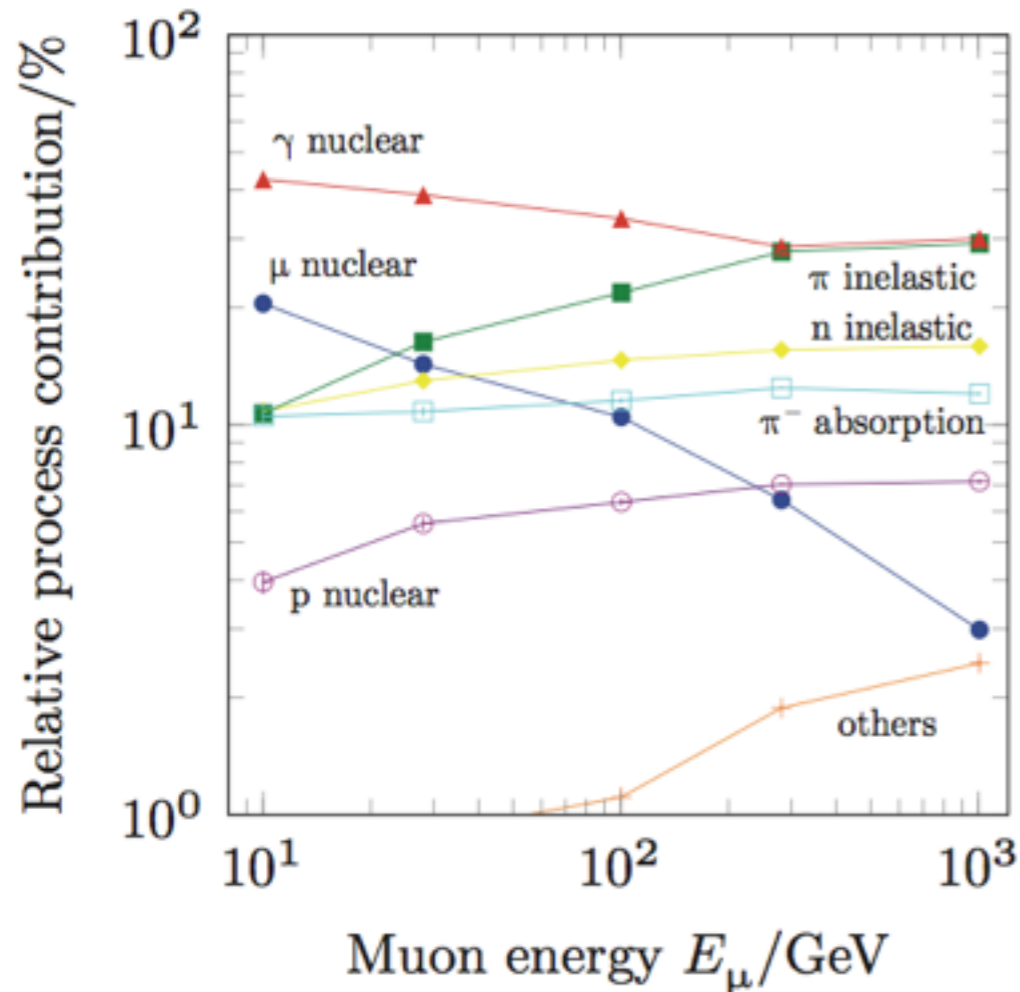
- その他：二次生成された粒子(p, n, π^\pm , α , e^\pm , γ)による反応

電磁シャワー
ハドロンシャワー

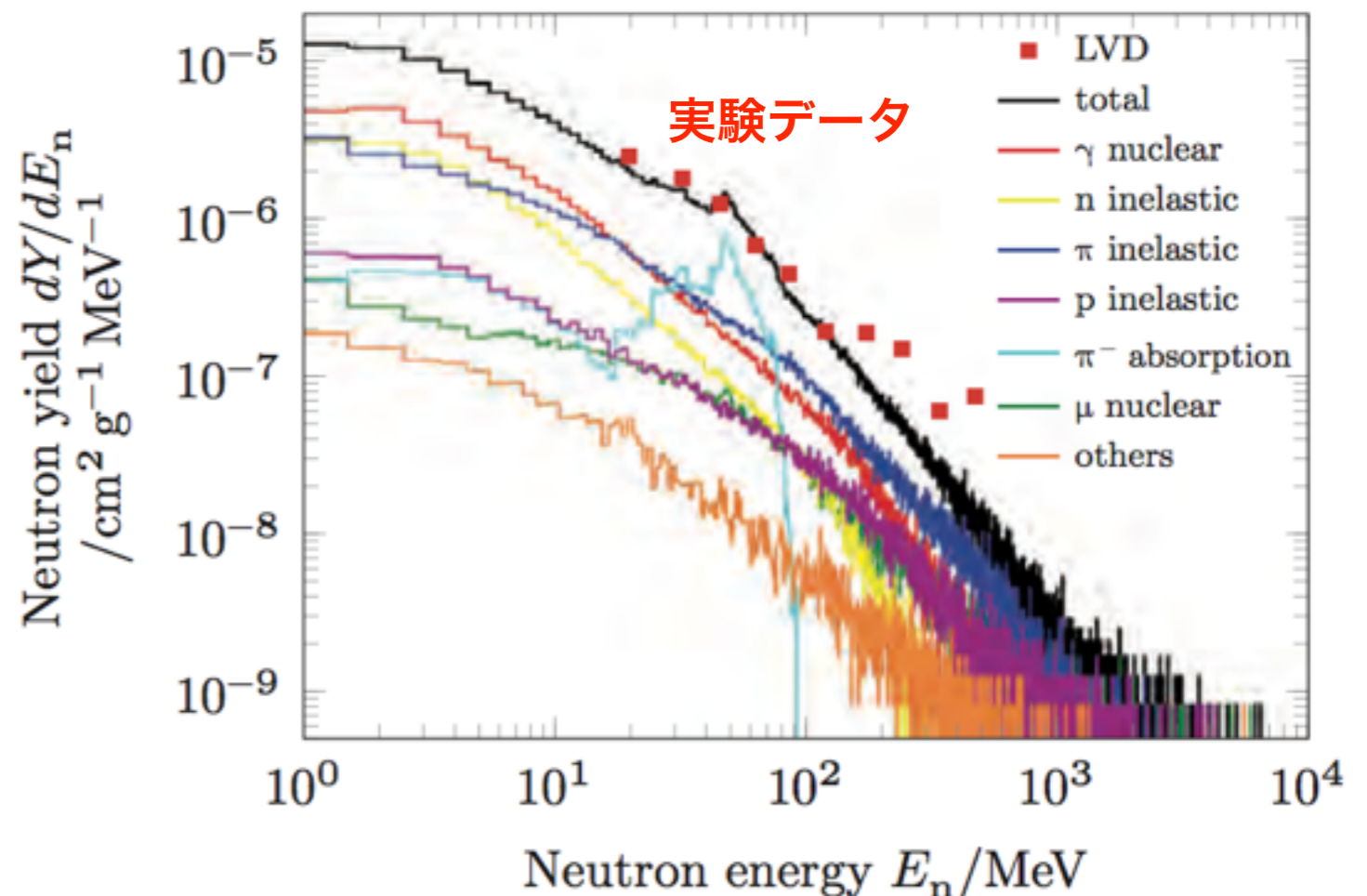
ミューオン起源の中性子エネルギー

シミュレーションによって中性子のフラックス・エネルギーを計算できる

生成割合 v.s. ミューオンエネルギー



中性子エネルギー



M. Horn, [http:// bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7391.pdf](http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7391.pdf)

photo-absorptionの寄与が大きい

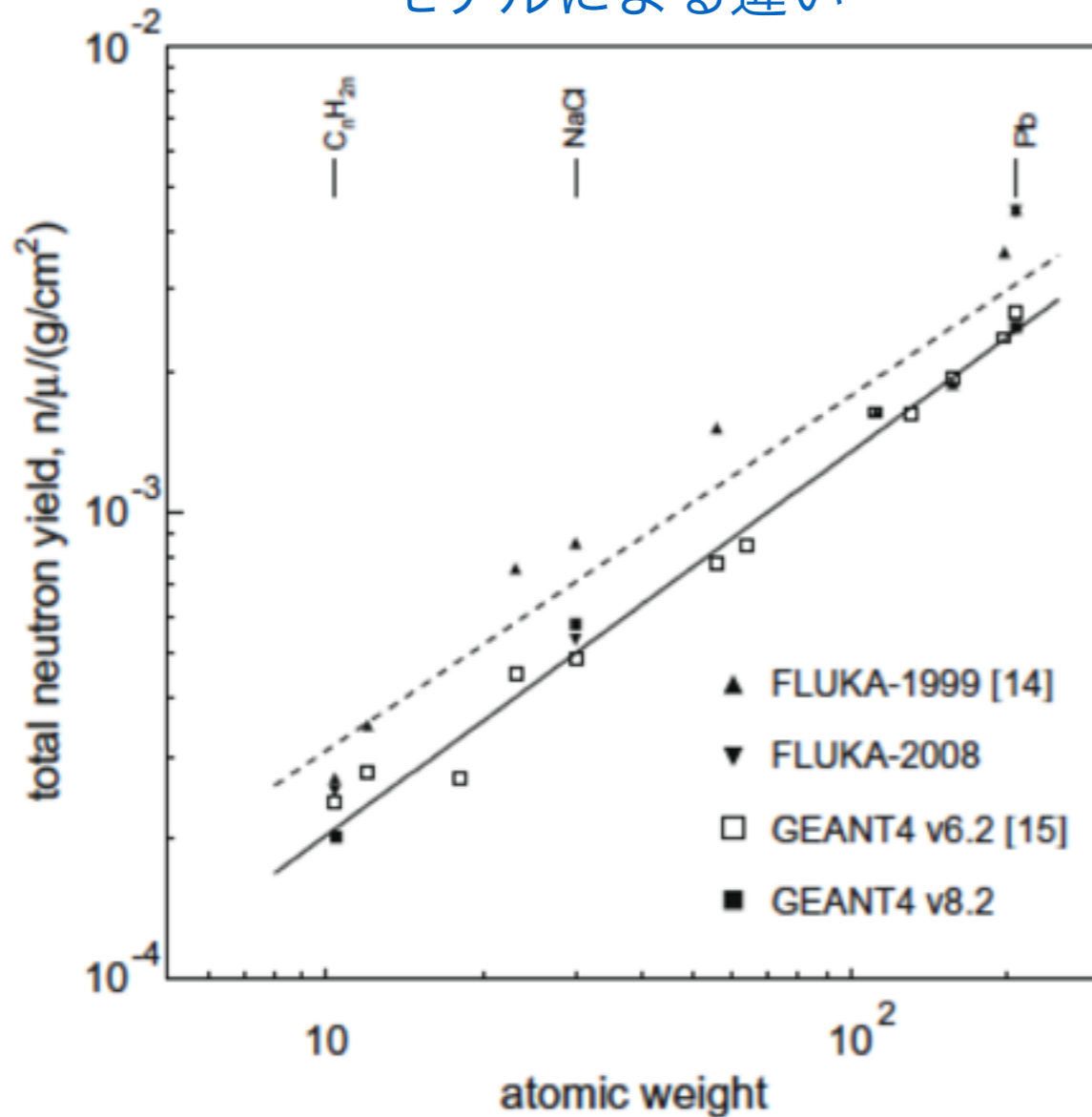
地下実験環境ではGeV
付近までの中性子が生成

シールド内部の検出器まで侵入しやすい!!

物質による中性子生成率の違い

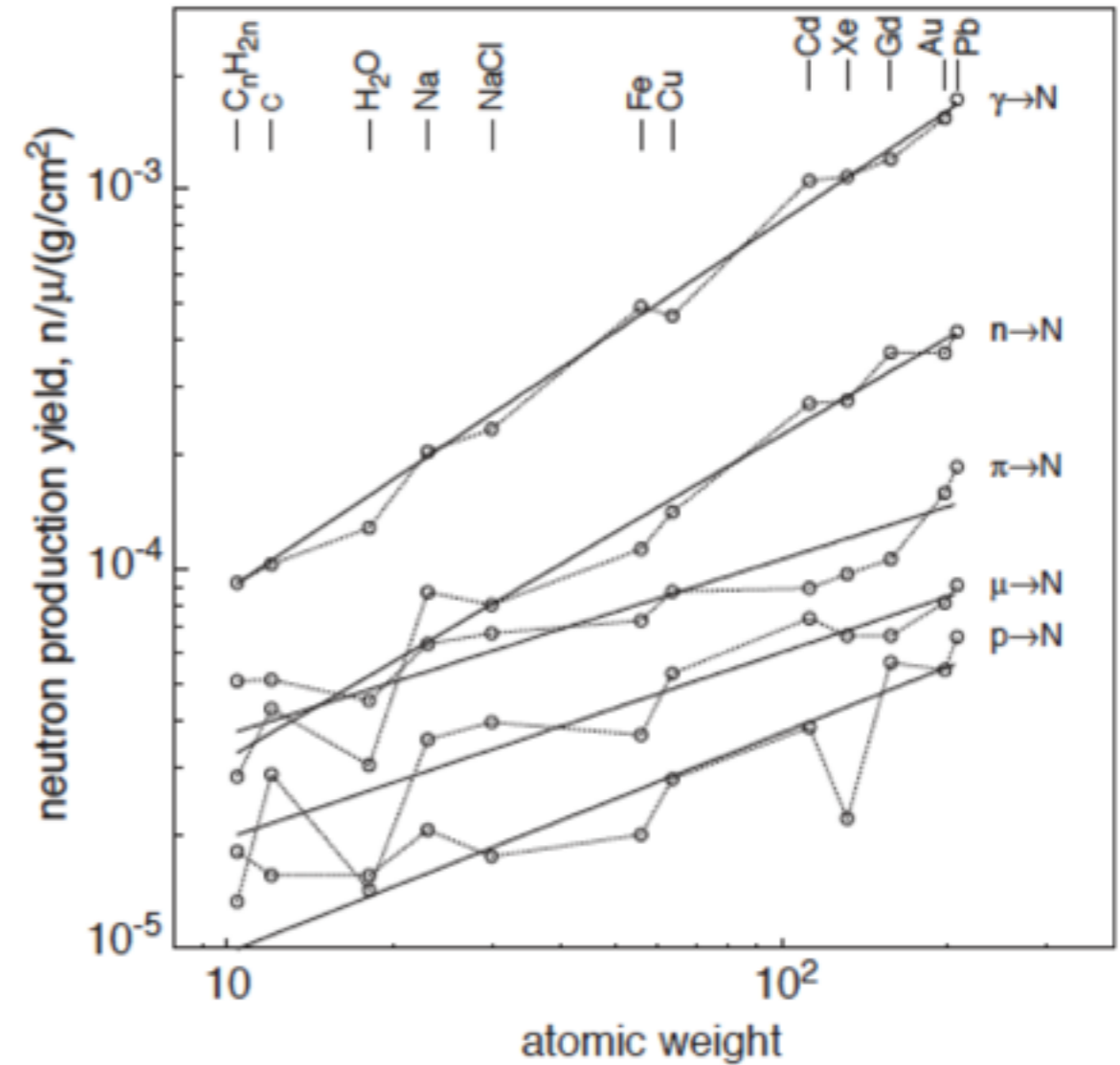
中性子生成率 v.s. 質量数

モデルによる違い



中性子生成率 v.s. 質量数

各プロセスの寄与



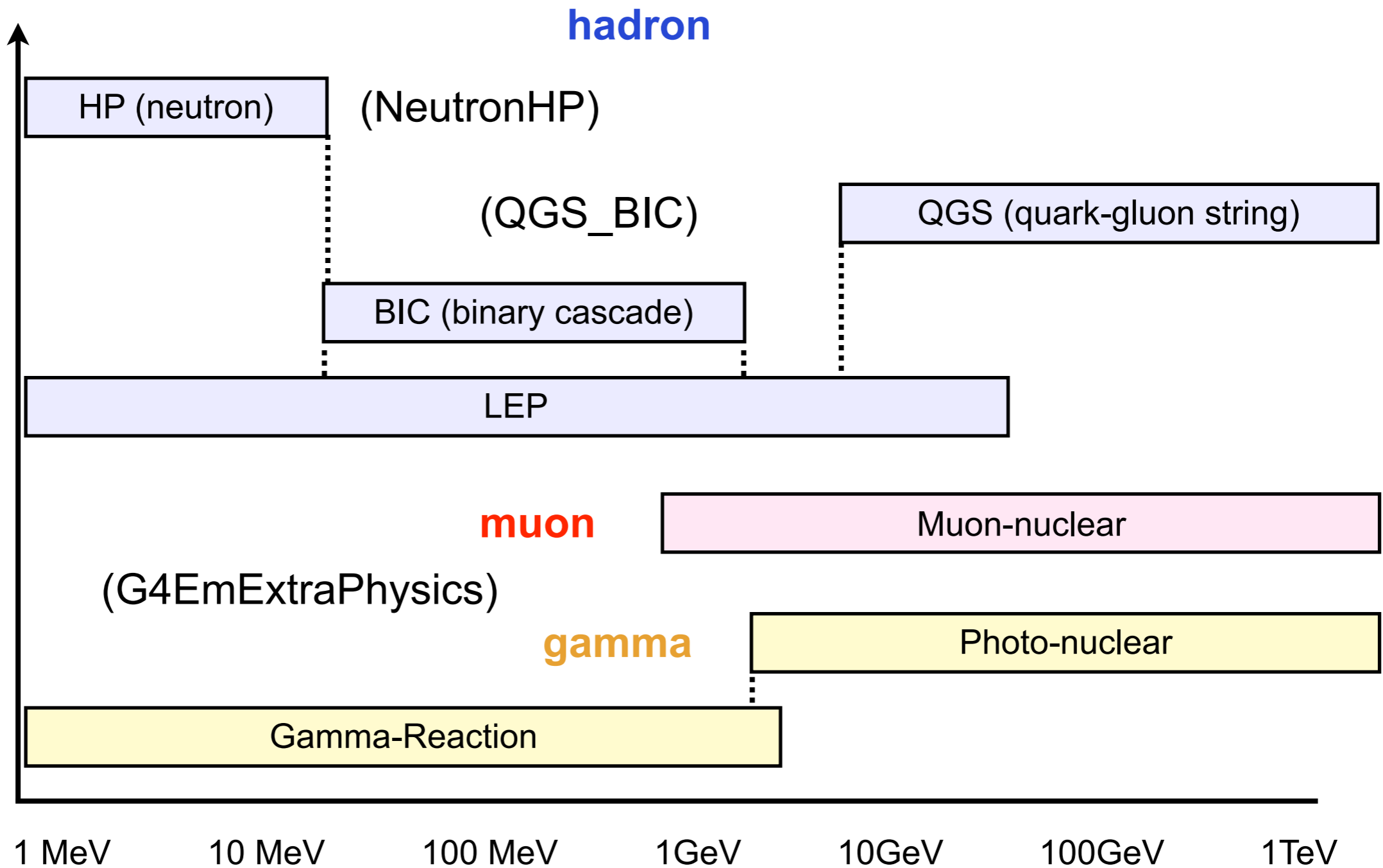
Vitaly. A. Kudryavtsev, LNGS, 2010

FLUKA, Geant4の傾向は一致

質量数が大きいくほど中性子生成率が増える

Geant4 : 物理モデル

ロードする順番



後でロードした断面積が優先される

シミュレーションツール

MUSIC

- ミューオンに特化したシミュレーション
- ミューオンが物質を通過した後の存在確率とエネルギーを計算

FLUKA

- 物質中の粒子の飛跡をシミュレーション
- 中性子線量計算において実績、ミューオン原子核破砕のモデル化
- プログラム言語 Fortranを用いて、CERNにおいて開発

Geant4

- 物質中の粒子の飛跡をシミュレーション
- 目的に応じてユーザーが物理プロセスを定義できる
- オブジェクト指向プログラム言語 C++を用いて、CERNやKEKにおいて開発

ミュオンシミュレーション

MUSIC (MUon SI mulation Code)

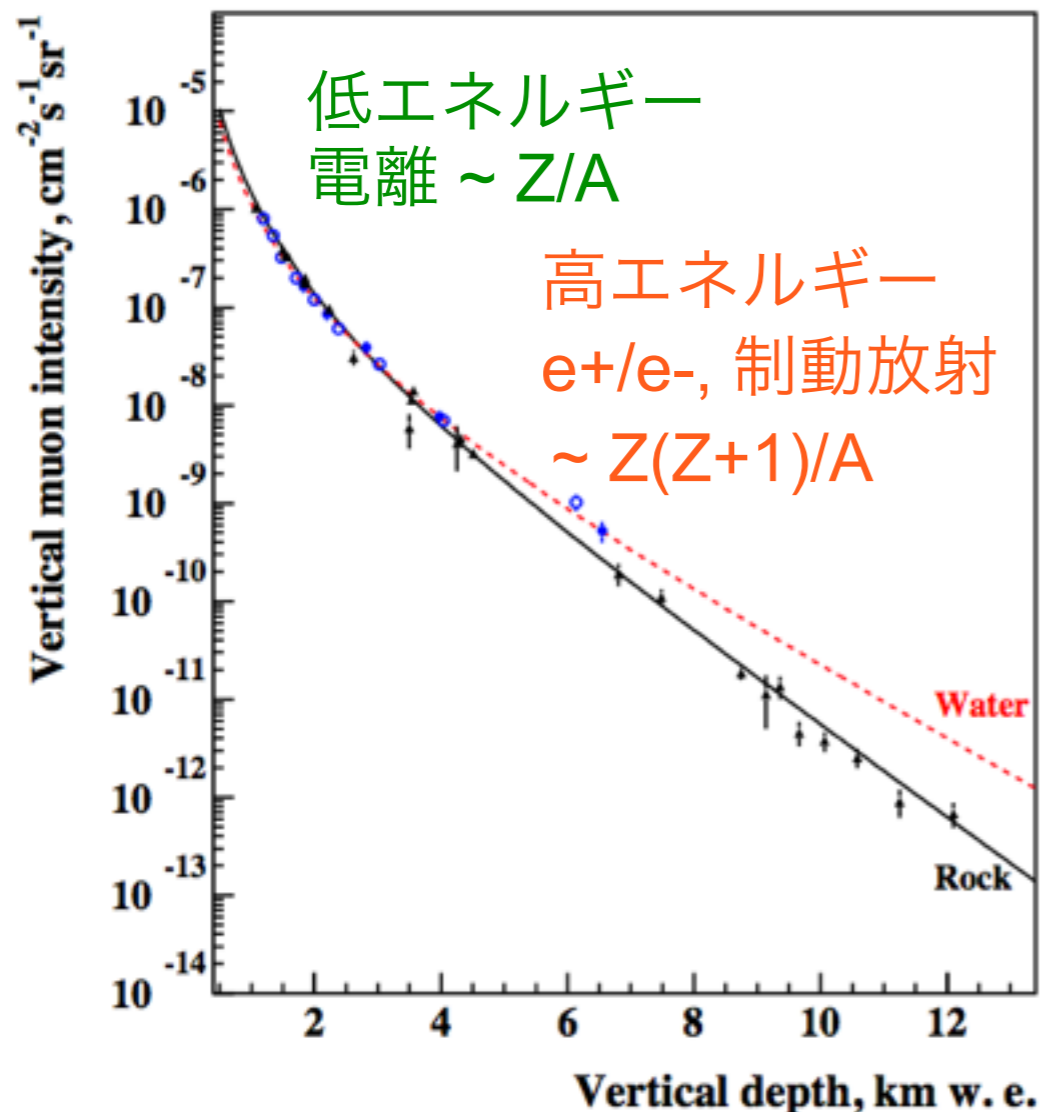
V.A. Kudryavtsev, arXiv:0810.4635

物質中でのミュオン伝搬に特化した3次元MCシミュレーションツール

- (1) 電離 (Bethe-Blochの式)
- (2) 制動放射
- (3) e^-/e^+ 対生成
- (4) ミュオン・原子核非弾性散乱

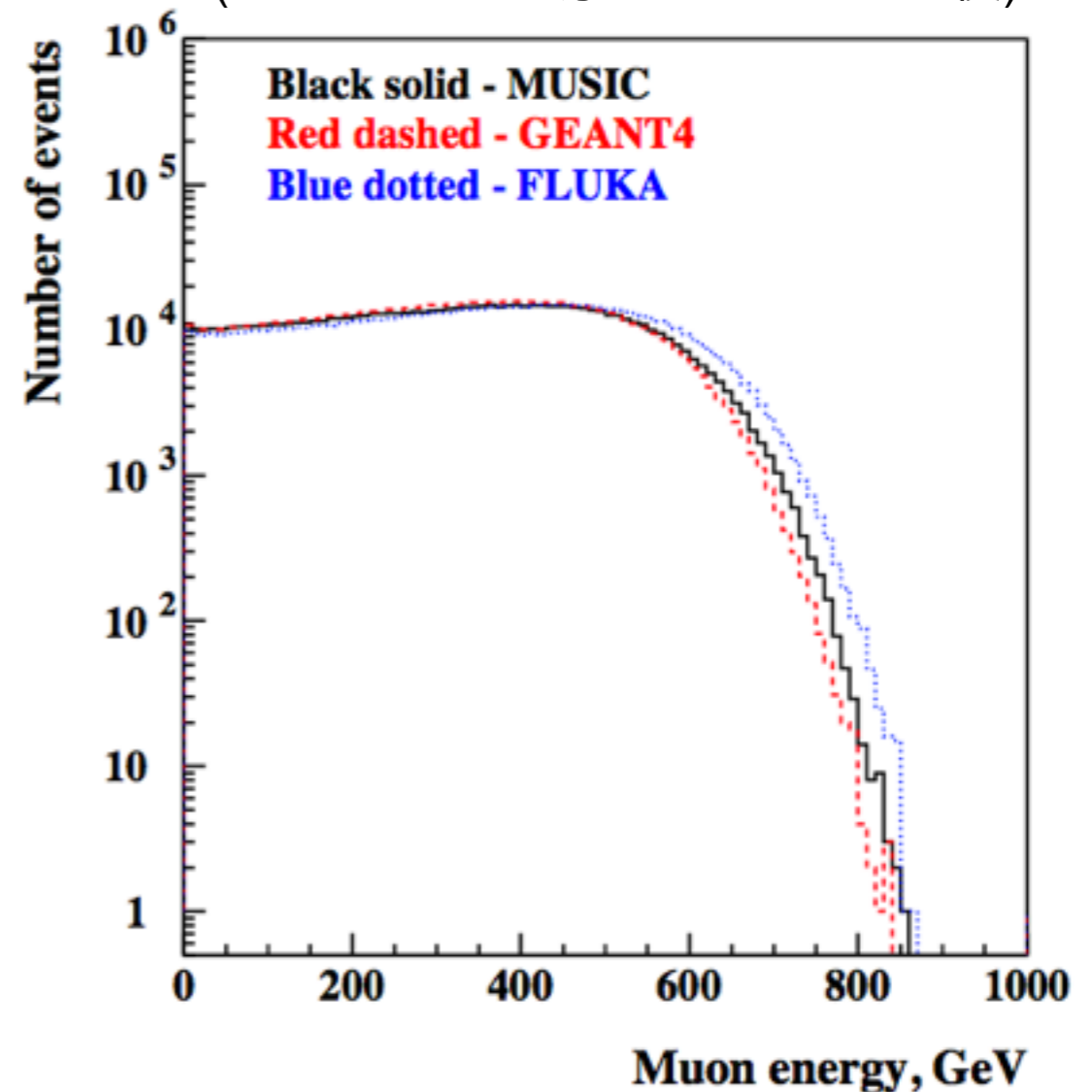
V.A. Kudryavtsev, arXiv:0810.4635

鉛直ミュオンフラックス



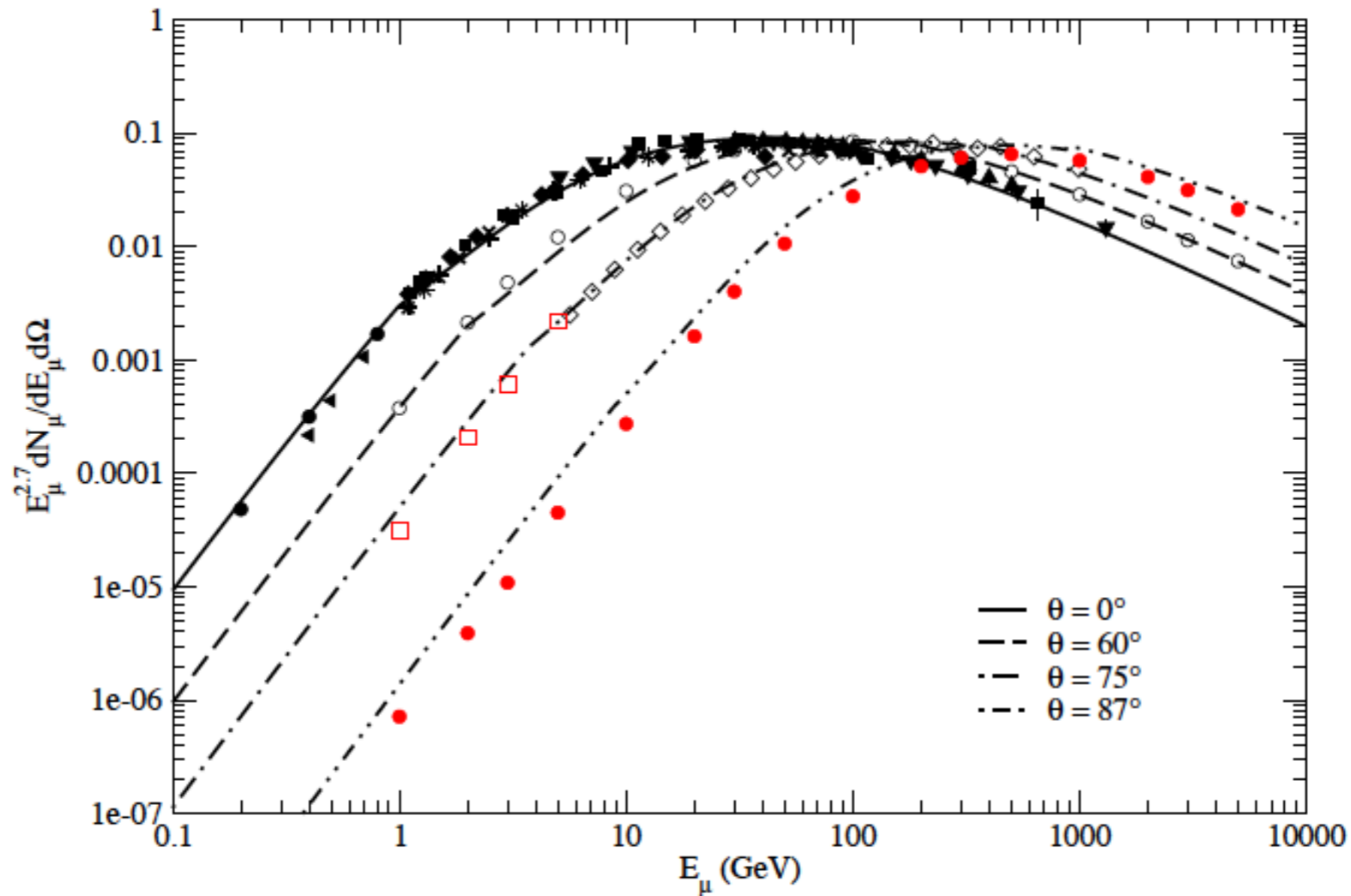
ミュオンエネルギー

(2 TeV : 3 kmの厚みの水を通った後)



地上のミュオンシフフラックス

ミュオンフラックス v.s. ミュオンエネルギー



Alfred et al., arXiv:0604078

$$\frac{dN_{\mu 0}}{dE_{\mu 0} d\Omega} \simeq A \frac{0.14 E_{\mu 0}^{\gamma}}{\text{cm}^2 \text{ sr s GeV}} \left\{ \frac{1}{1 + \frac{1.1 \tilde{E}_{\mu 0} \cos \theta}{115}} + \frac{.054}{1 + \frac{1.1 \tilde{E}_{\mu 0} \cos \theta}{850}} + r_c \right\}$$

Gaisser parameterization \longrightarrow 実験データに合うように補正

岩盤の密度・組成

ミュオンに特化した3次元シミュレーションツール

MUSIC (MUon SI-mulation Code)

標準的な岩の密度 $2.65 \sim 2.75 \text{ g/cm}^{-3}$

山の形のデータ (国土地理院の標高数値地図)

ミュオンフラックス・エネルギー @ KamLAND

	$J_{\mu} \text{ (m}^{-2} \text{ h}^{-1}\text{)}$	$E_{\mu} \text{ (GeV)}$
伊西岩	5.66 ~ 6.71	262 ~ 268
標準岩	4.95 ~ 5.83	256 ~ 262
スカルン	4.90 ~ 5.82	254 ~ 260
測定データ	5.37 ± 0.41	—

岩盤による遮蔽効果

地表

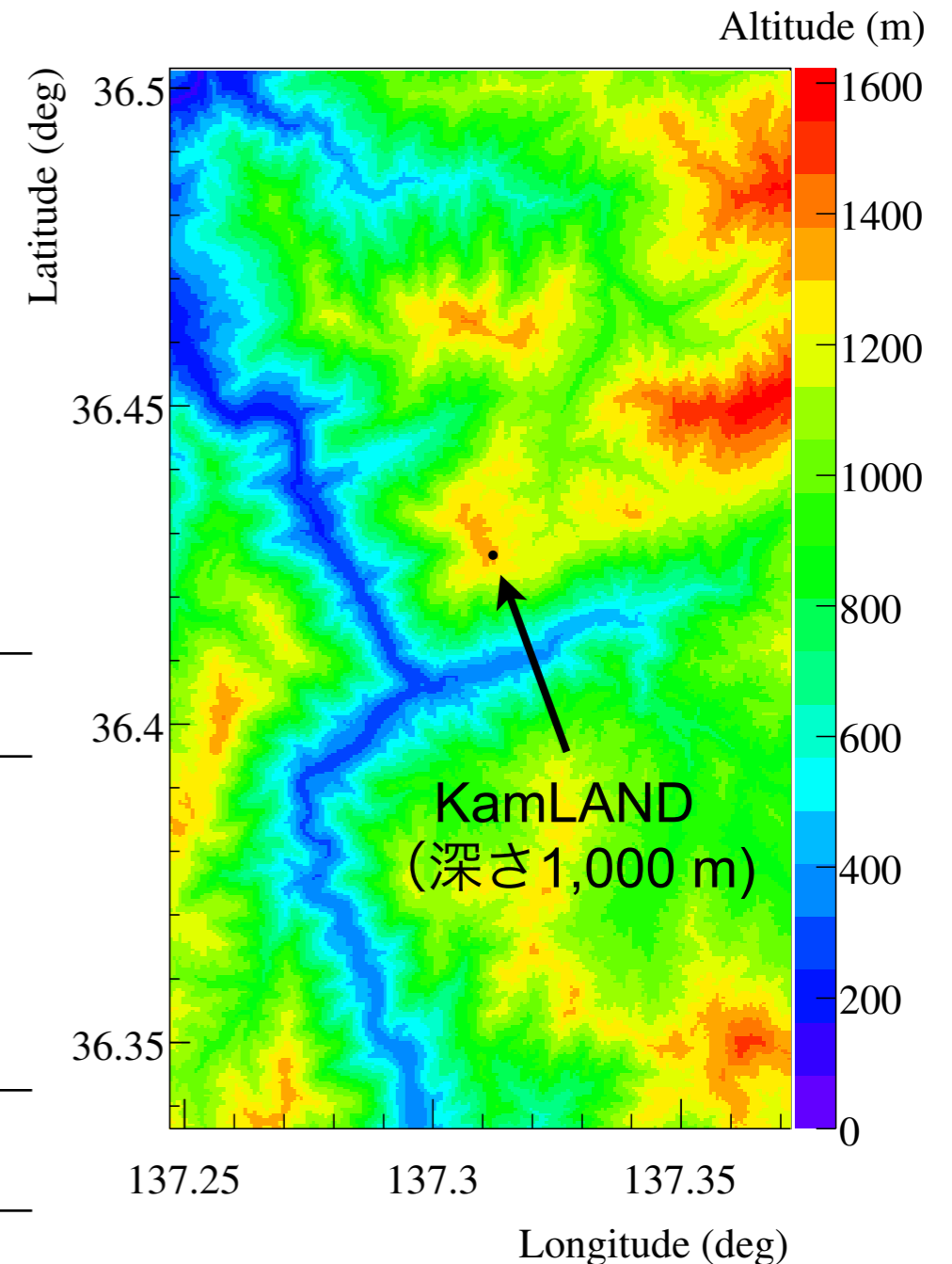
フラックス (測定値)
 $(1.90 \pm 0.12) \times 10^{-2} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

平均エネルギー
 $\sim 7 \text{ GeV}$

KamLAND (2,700 m.w.e)

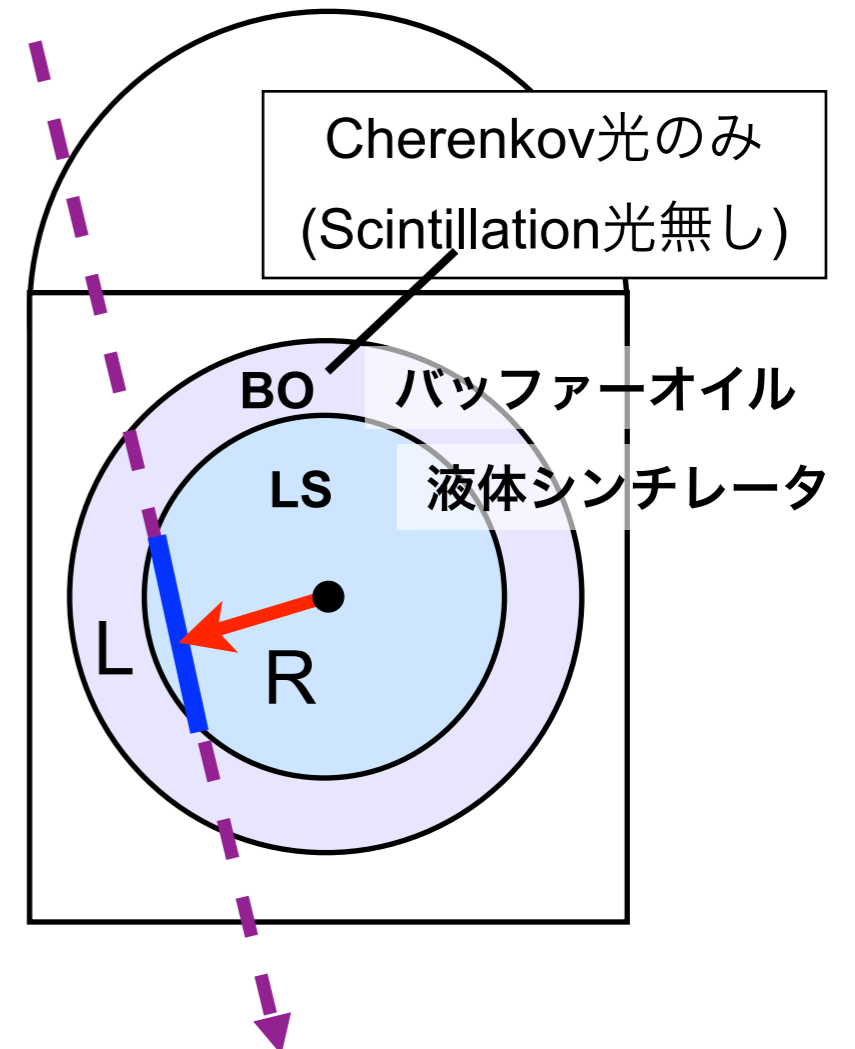
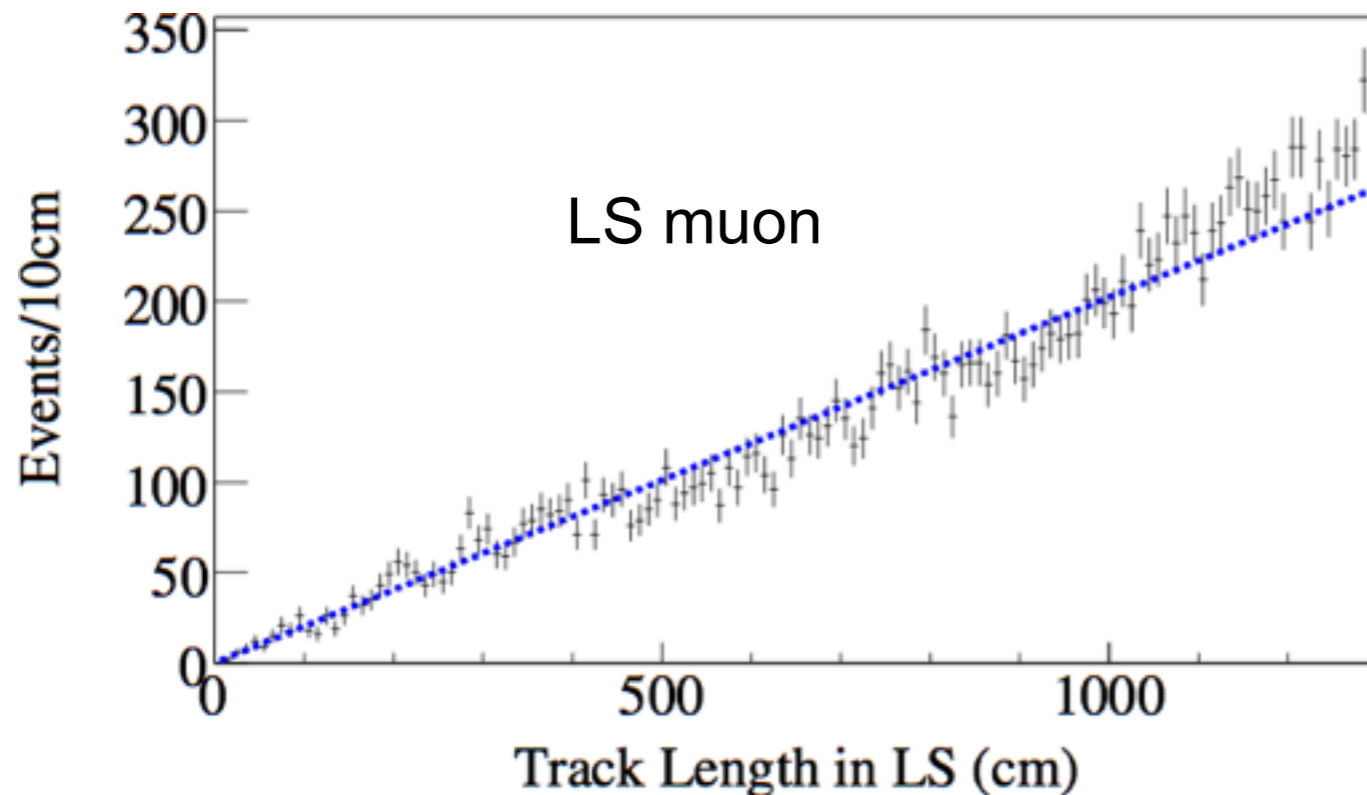
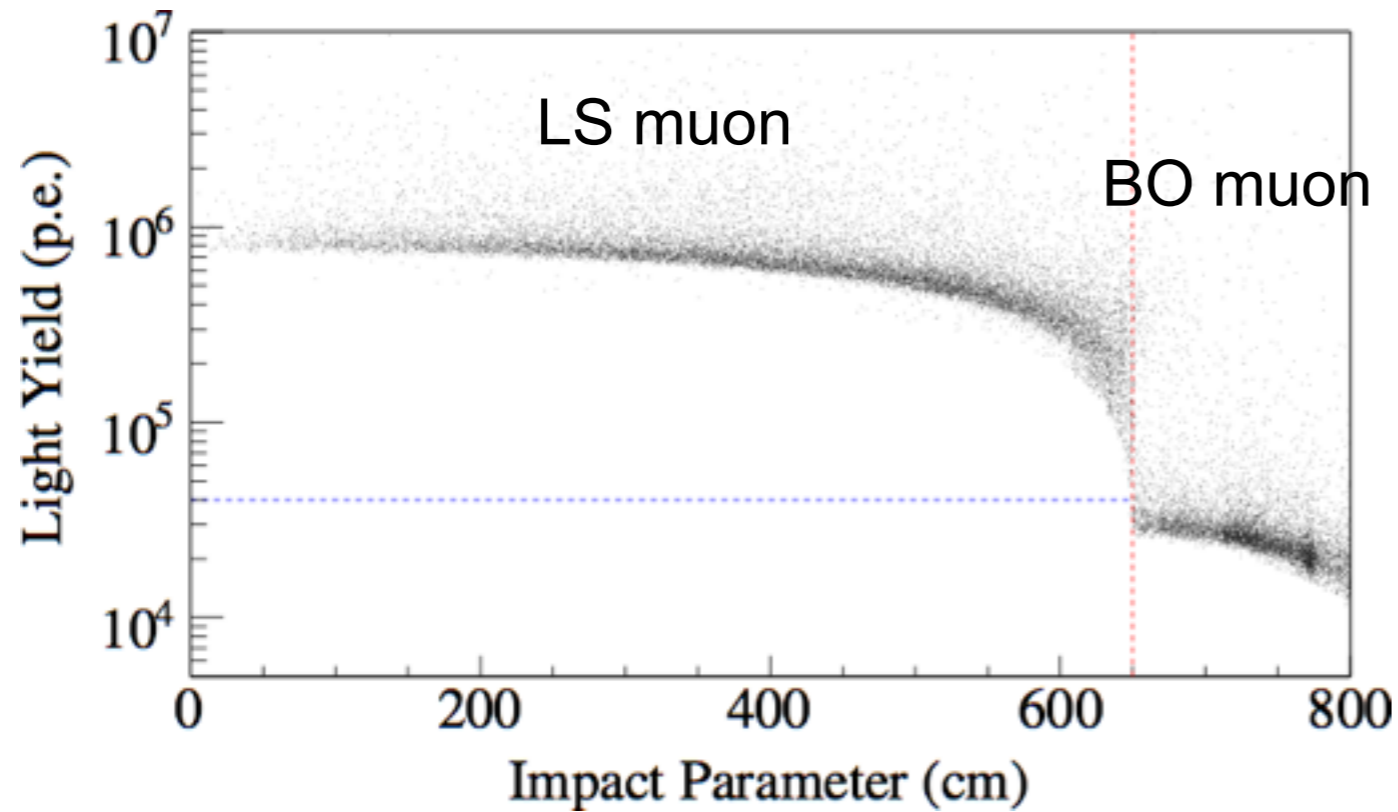
$(1.49 \pm 0.11) \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$\sim 260 \text{ GeV}$



KamLANDでのミュオン測定

宇宙線ミュオン



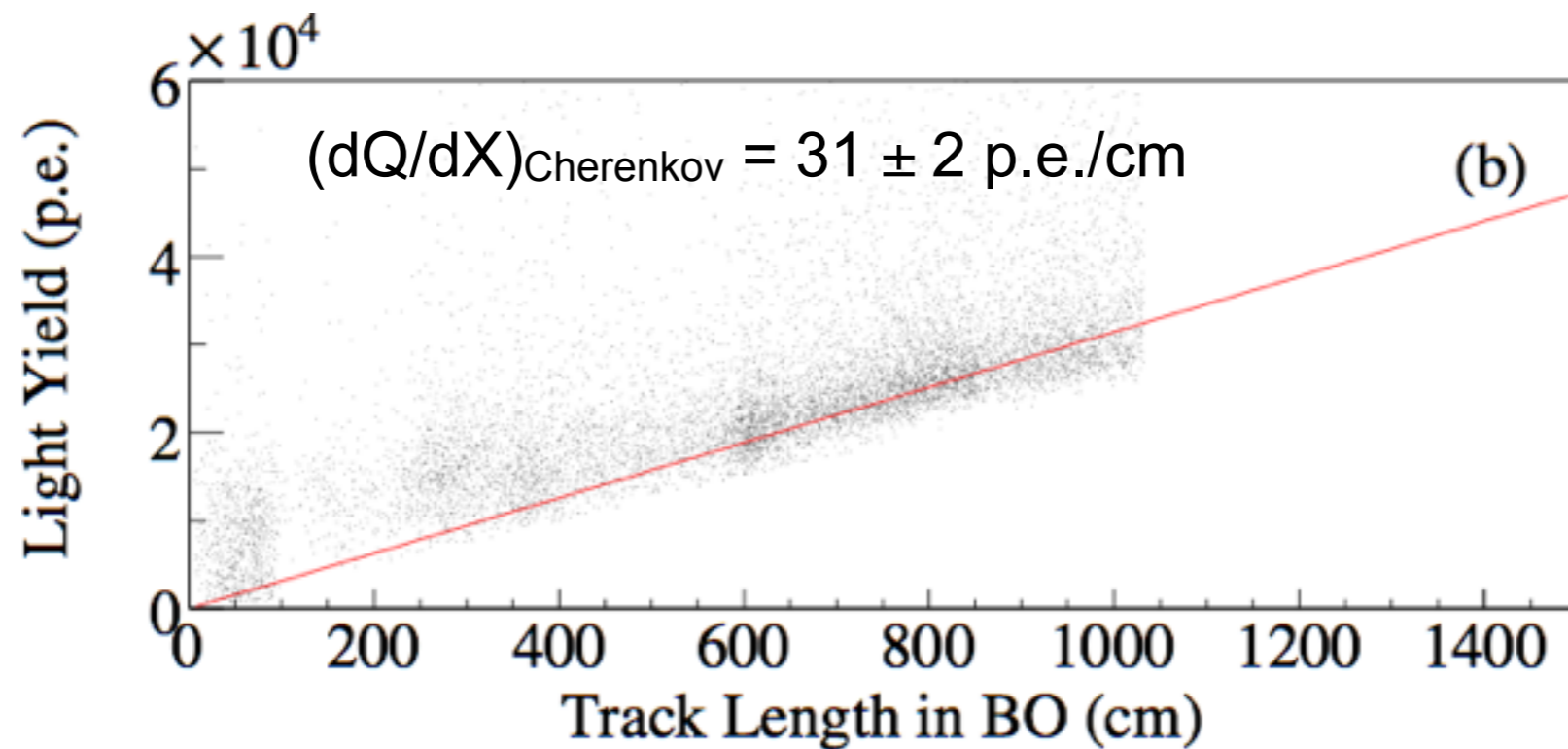
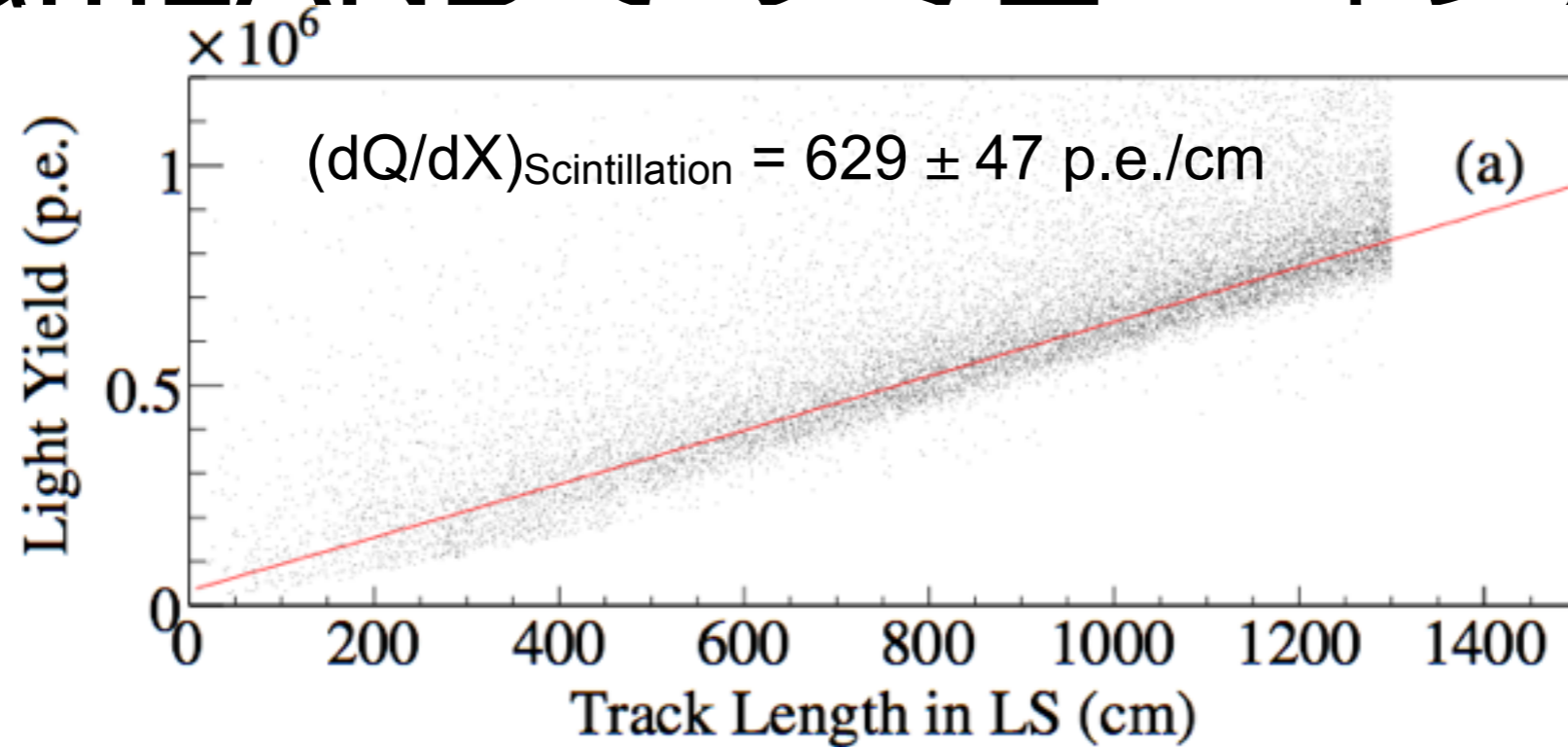
R : impact parameter

L : track length in LS

測定平均距離 $L = 878$ cm

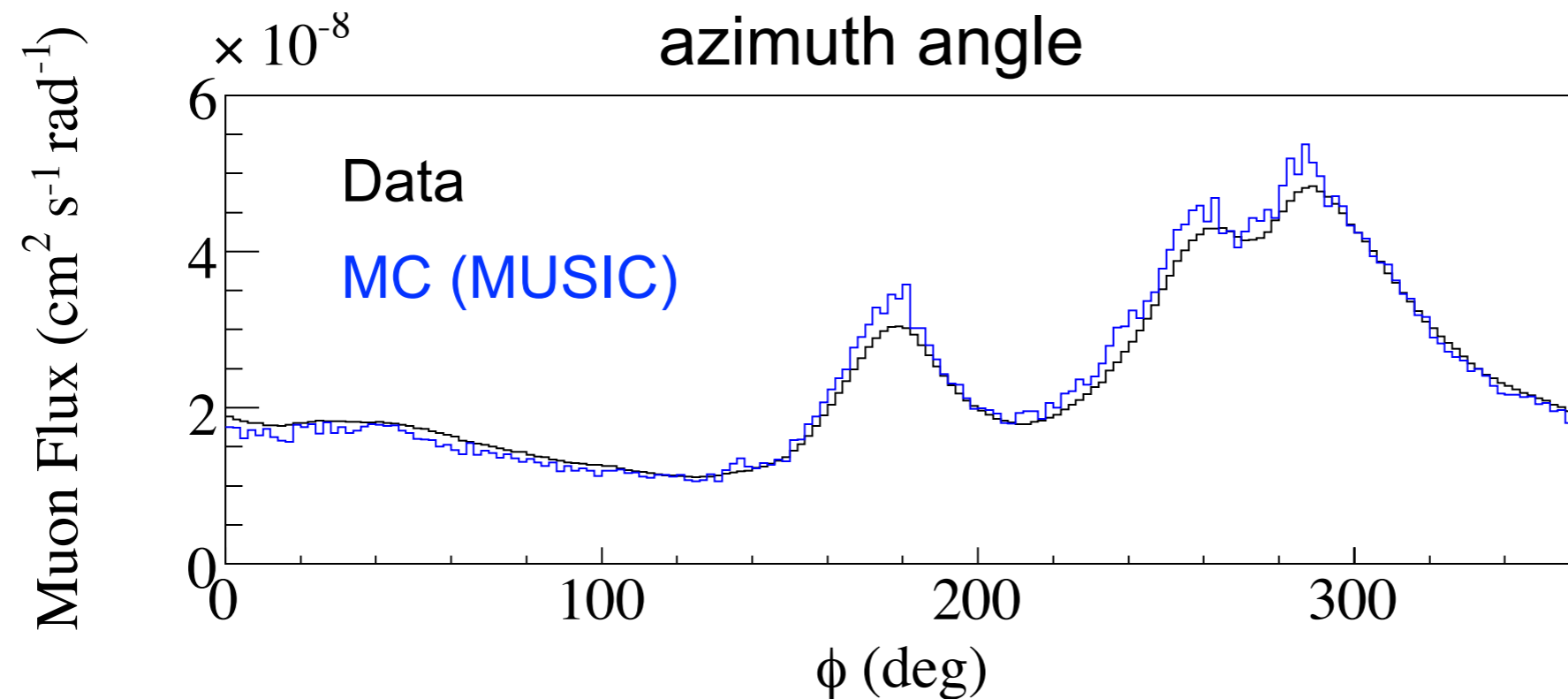
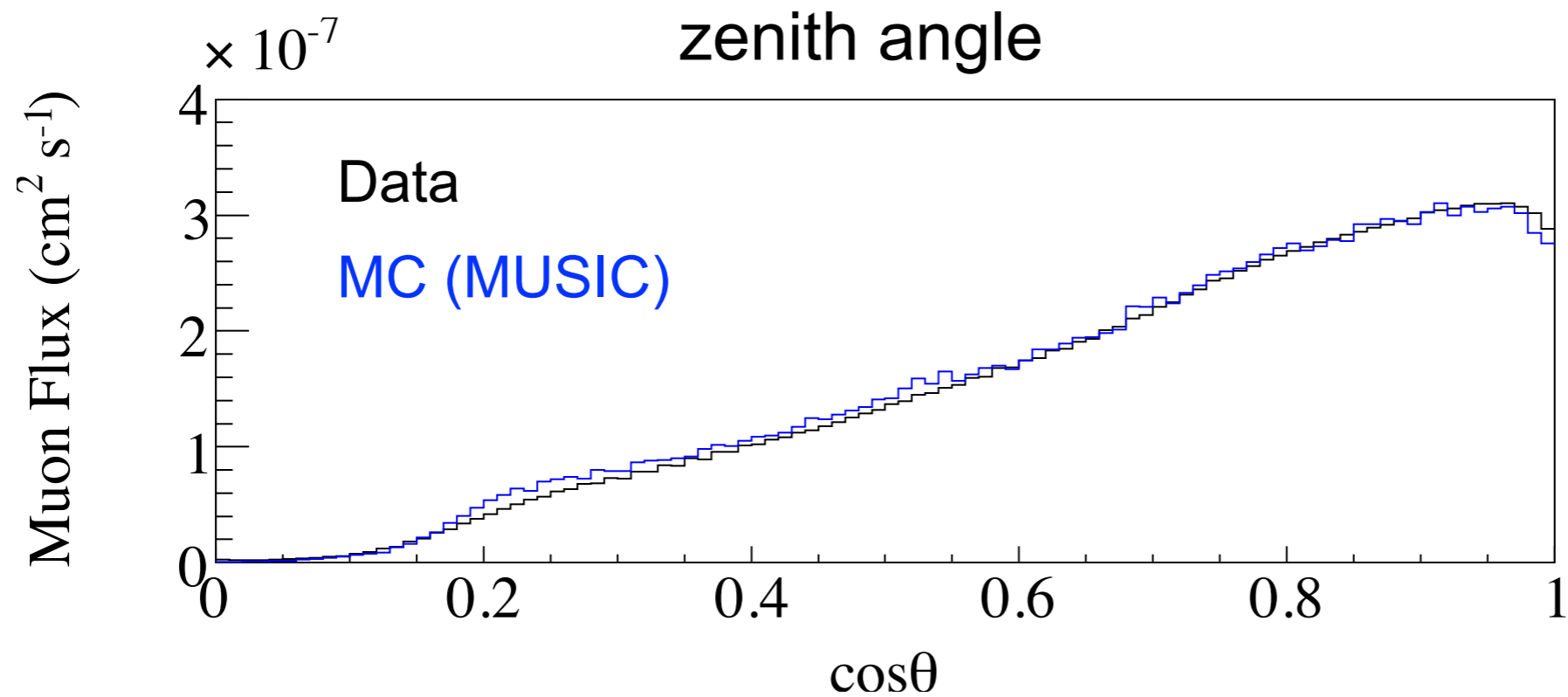
計算平均距離 $L = 874 \pm 13$ cm

KamLANDでのミューオン測定



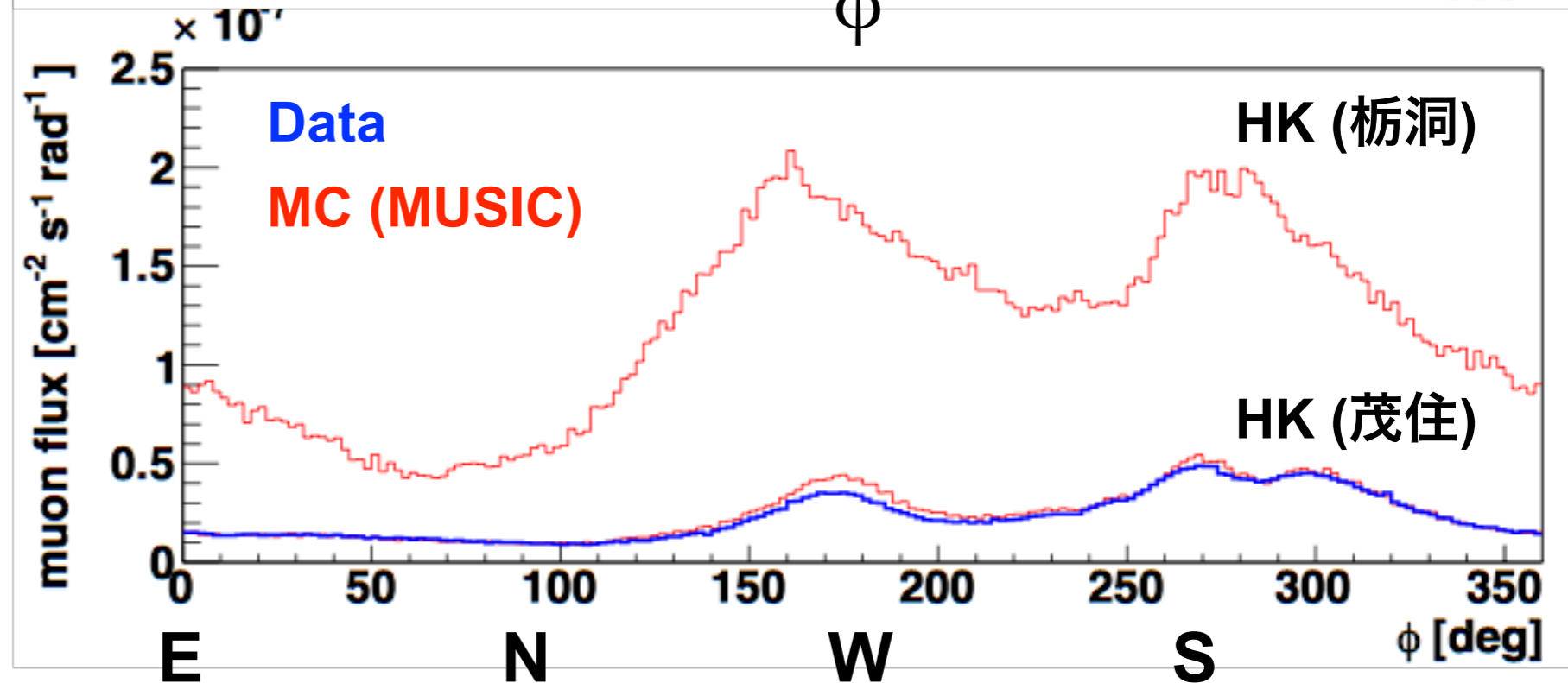
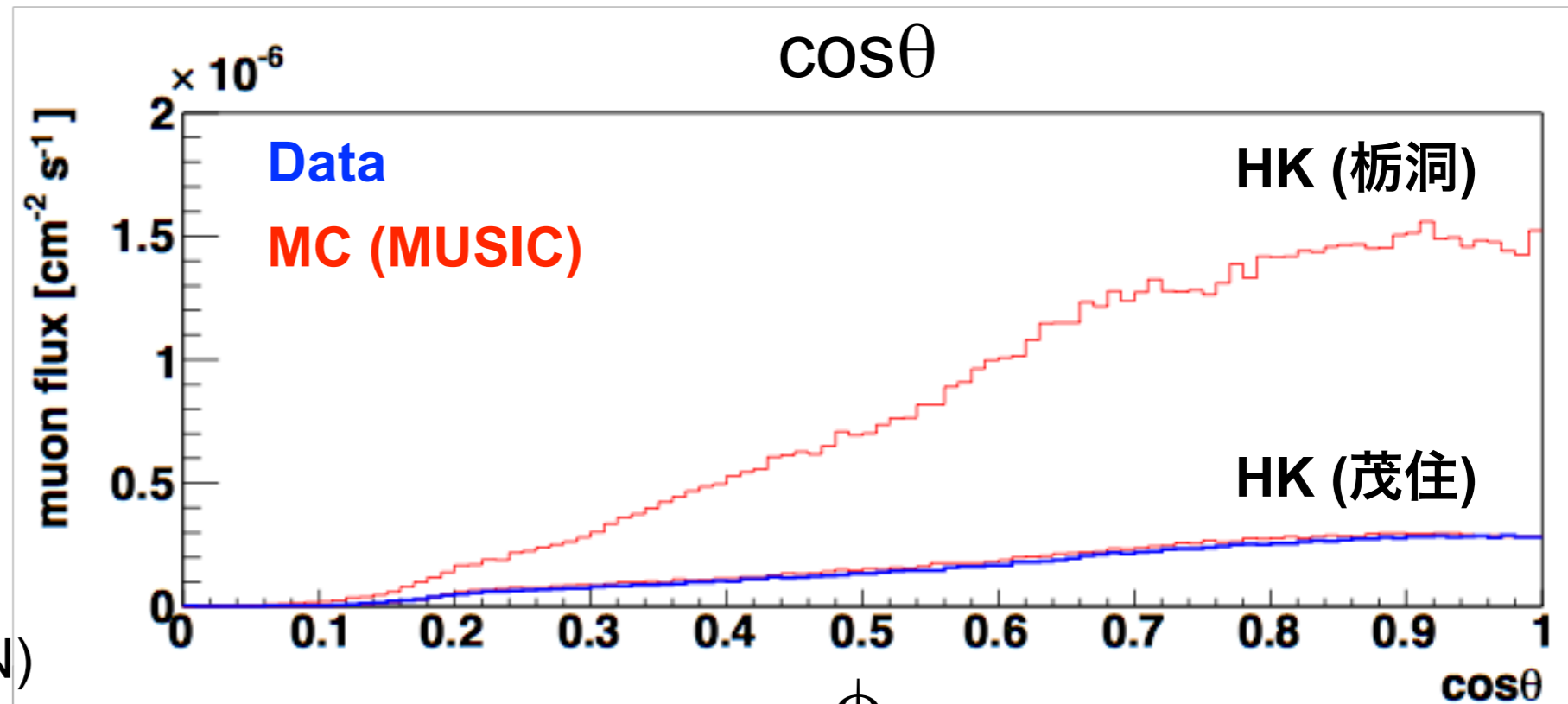
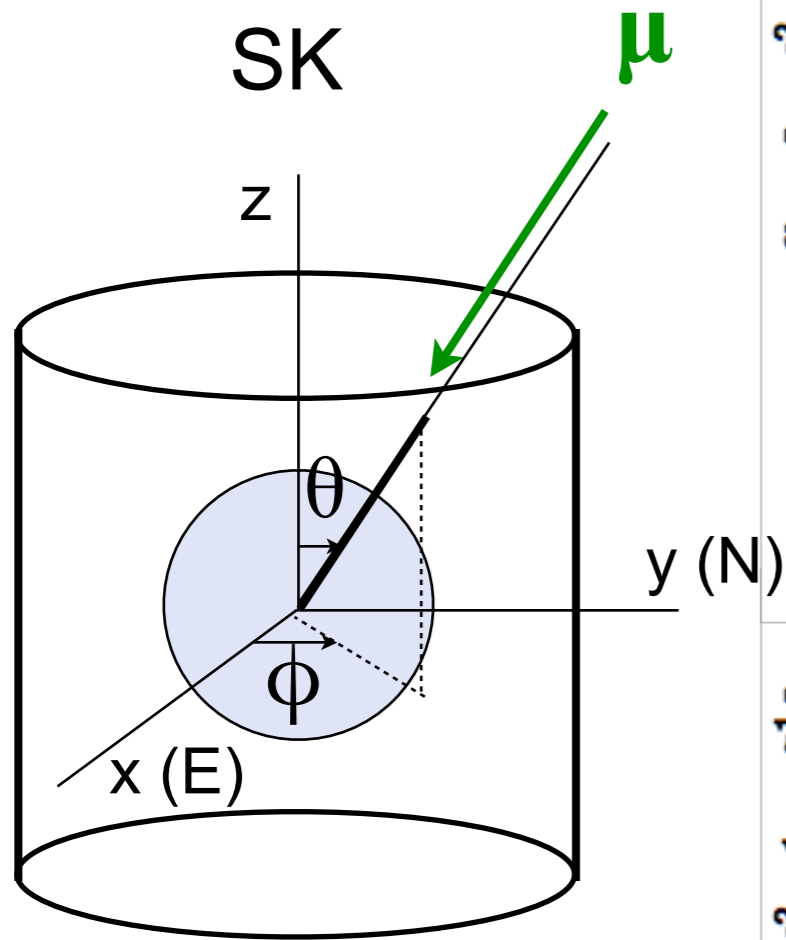
Scintillation/Cherenkov 比 ~ 20

KamLANDでのミュオン測定



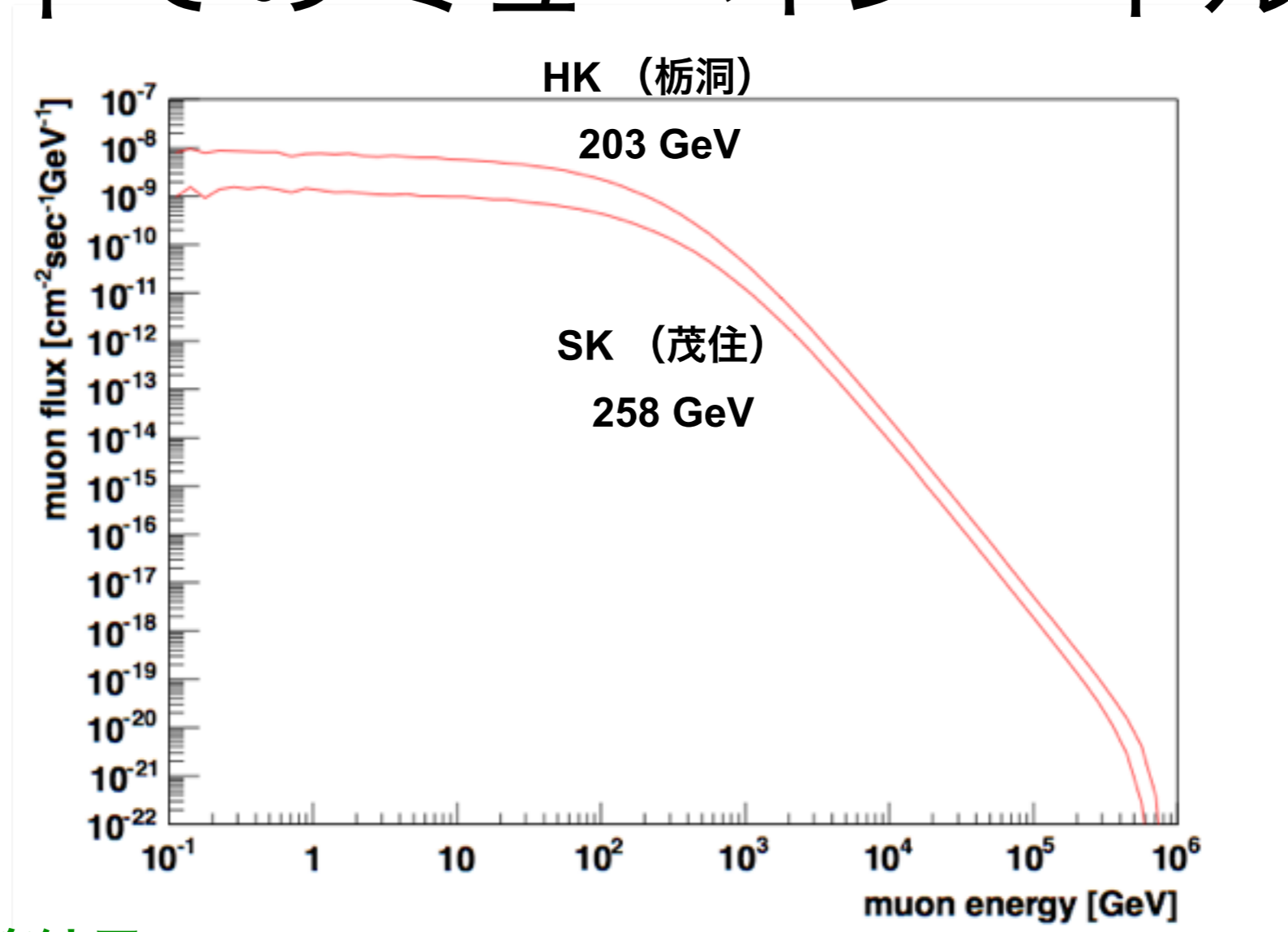
山の形から期待される
分布を良く再現

神岡地下でのミュオンフラックス



ミュオンフラックスは岩盤の厚さ（深さ）に大きく依存

神岡地下でのミュオンエネルギー



MUSICの計算結果

	HK (栃洞)	SK (茂住)
ミュオンフラックス	$7.55 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$1.54 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
ミュオン平均エネルギー	203 GeV	258 GeV

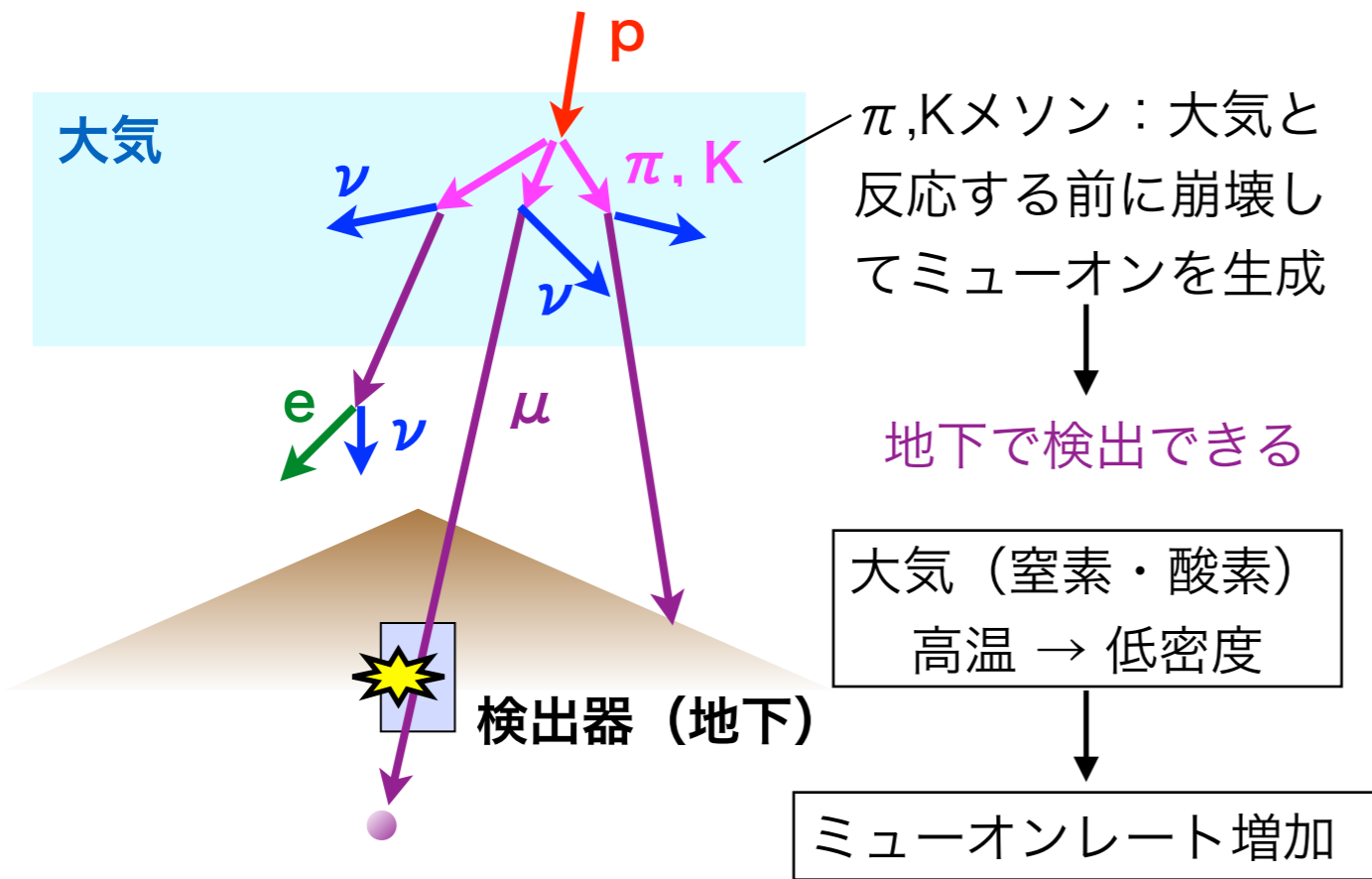
エネルギースペクトルは、muon spallationのシミュレーションに使用

ミューオンレートの季節変動

MINOS Far detector

Soudan Underground Mine @ 2,080 m.w.e.

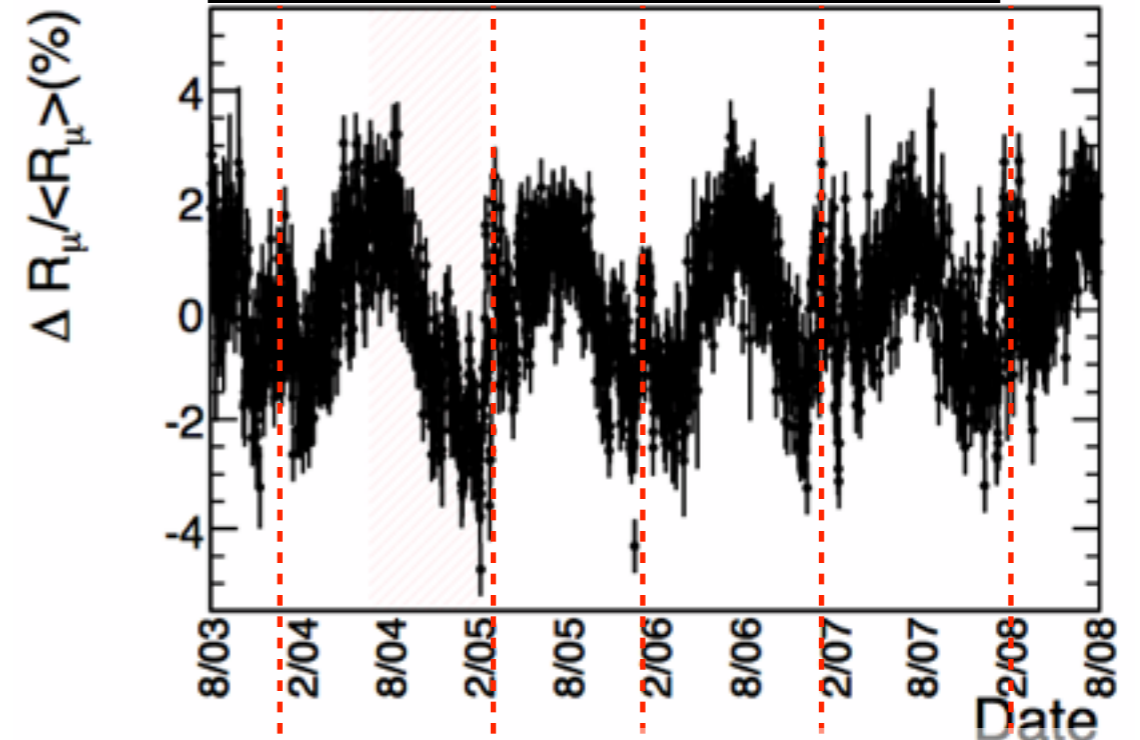
岩盤シールド → 0.73 TeV以上の高エネルギー
ミューオンのみが届く (銀河宇宙線起源)



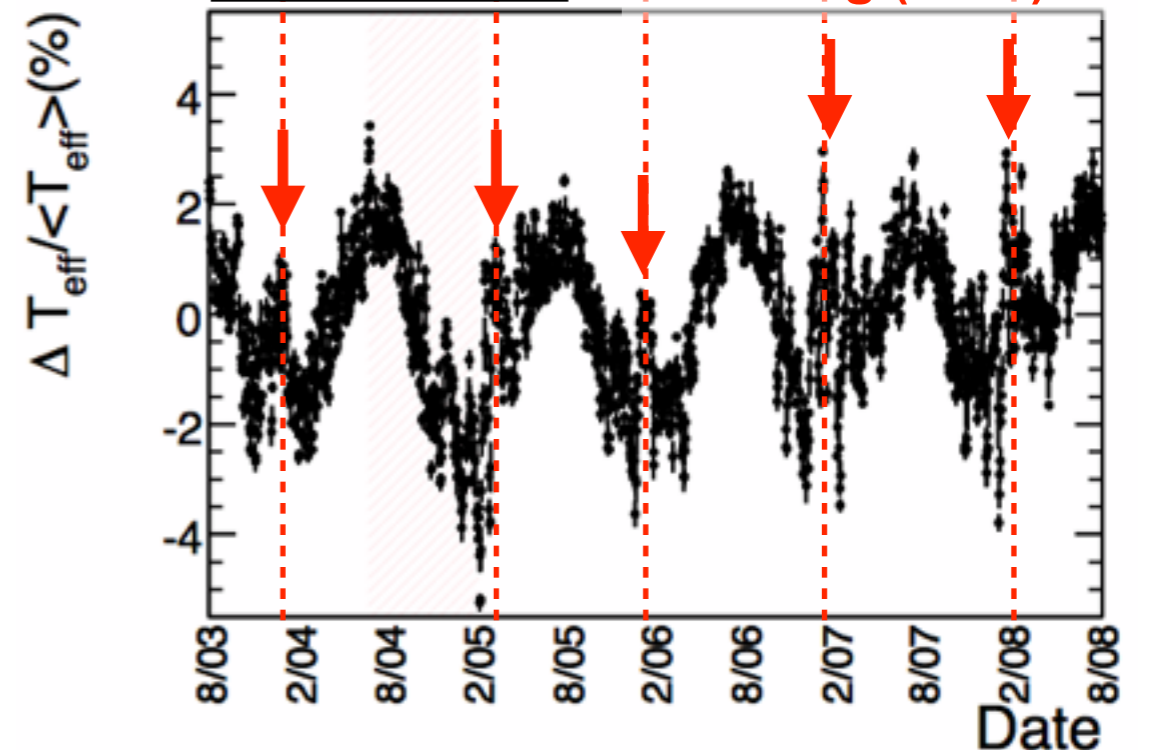
Soudan上空 (成層圏) の気温変化：
測定データを基にした計算結果を利用

European Centre for Medium-Range Weather
Forecasts (ECMWF)

ミューオンレート変化



温度変化



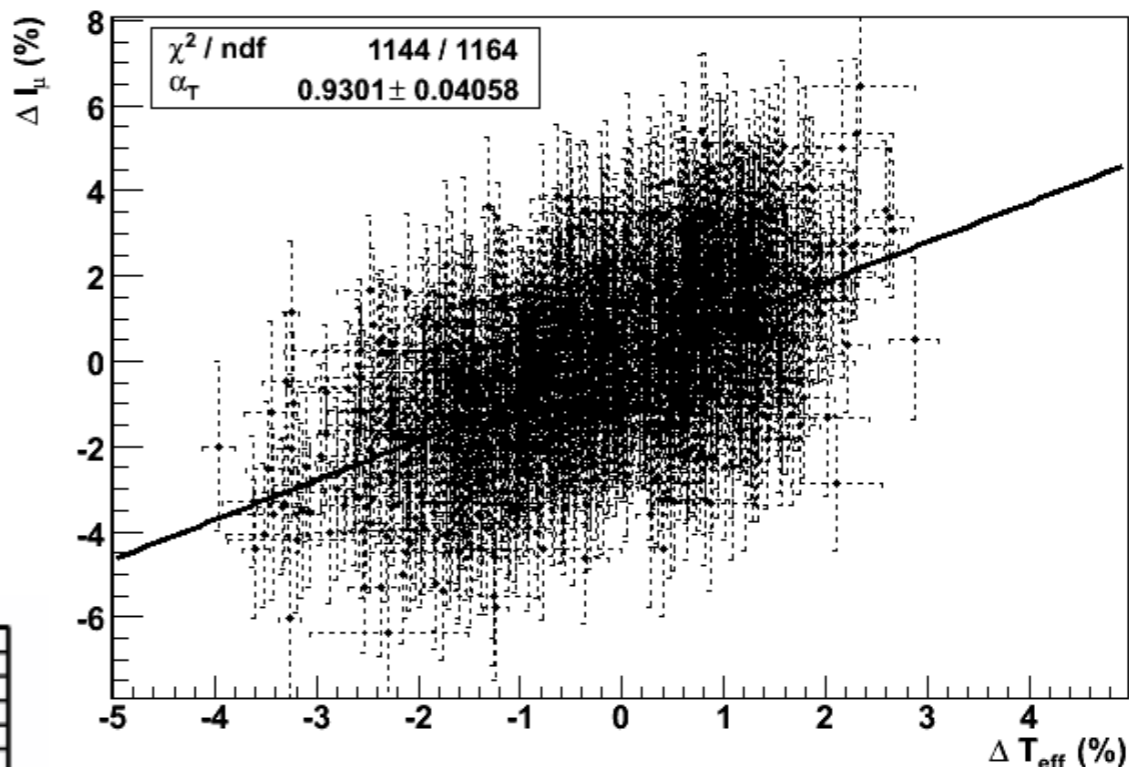
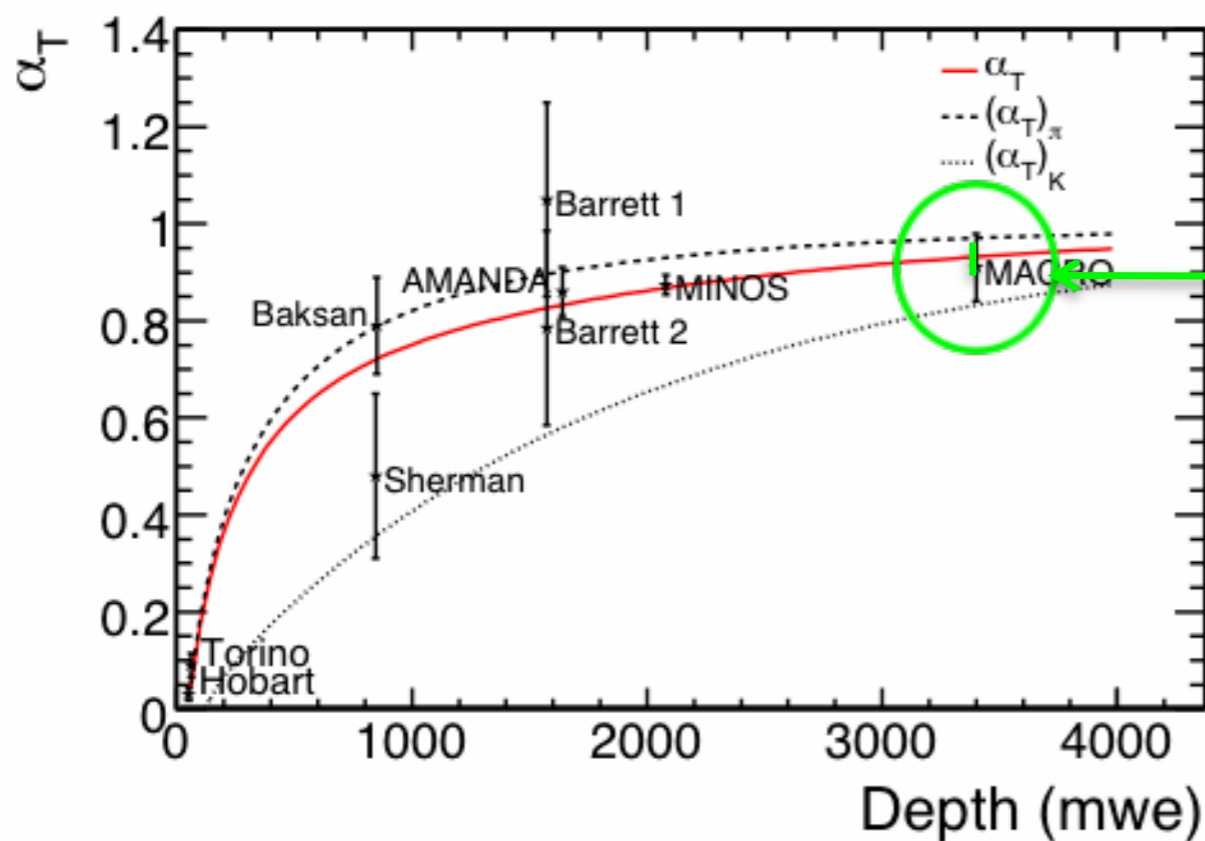
ミュオンレイト：温度の相関

Linear regression accounting for errors on both axes

Achieved correlation :

Pearson coefficient

(R-value) = 0.62



$$\alpha_T = 0.93 \pm 0.04_{stat}$$

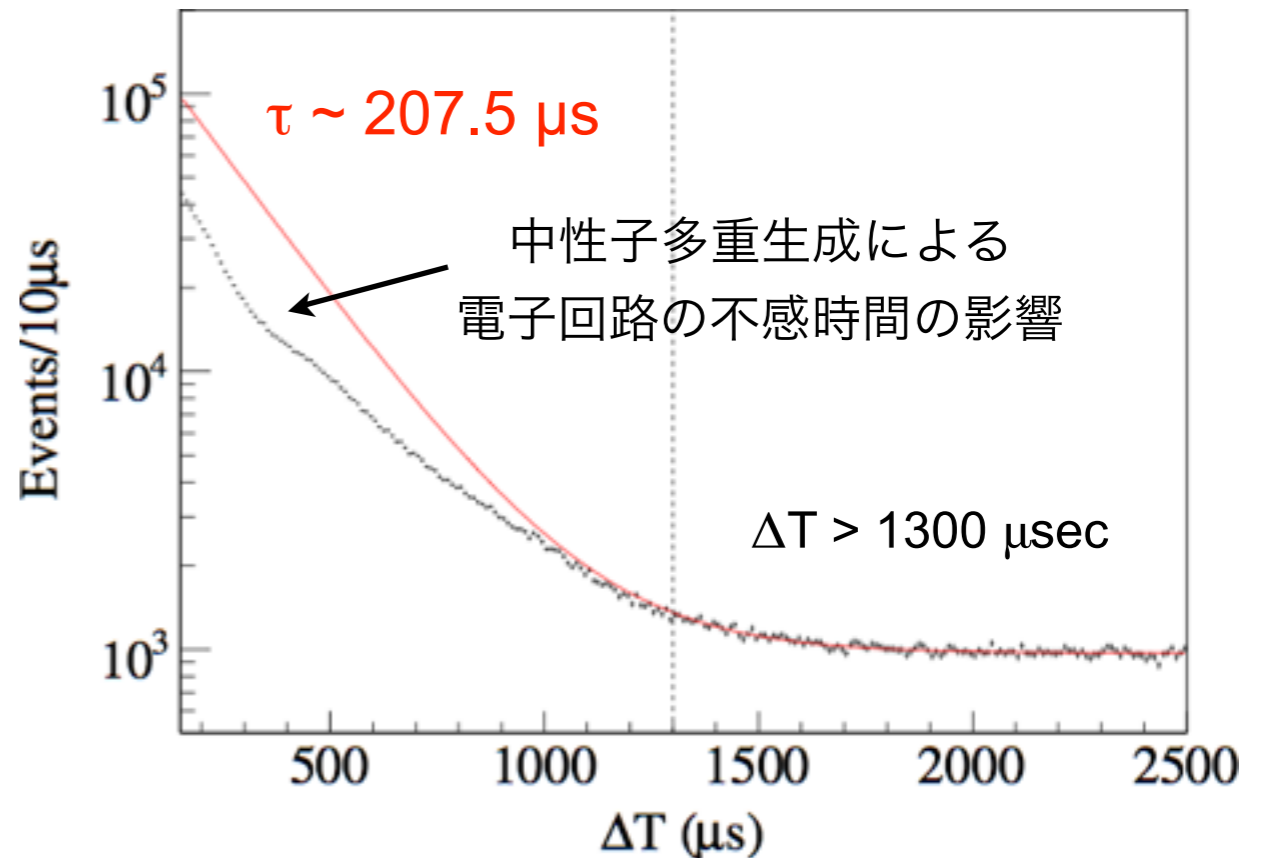
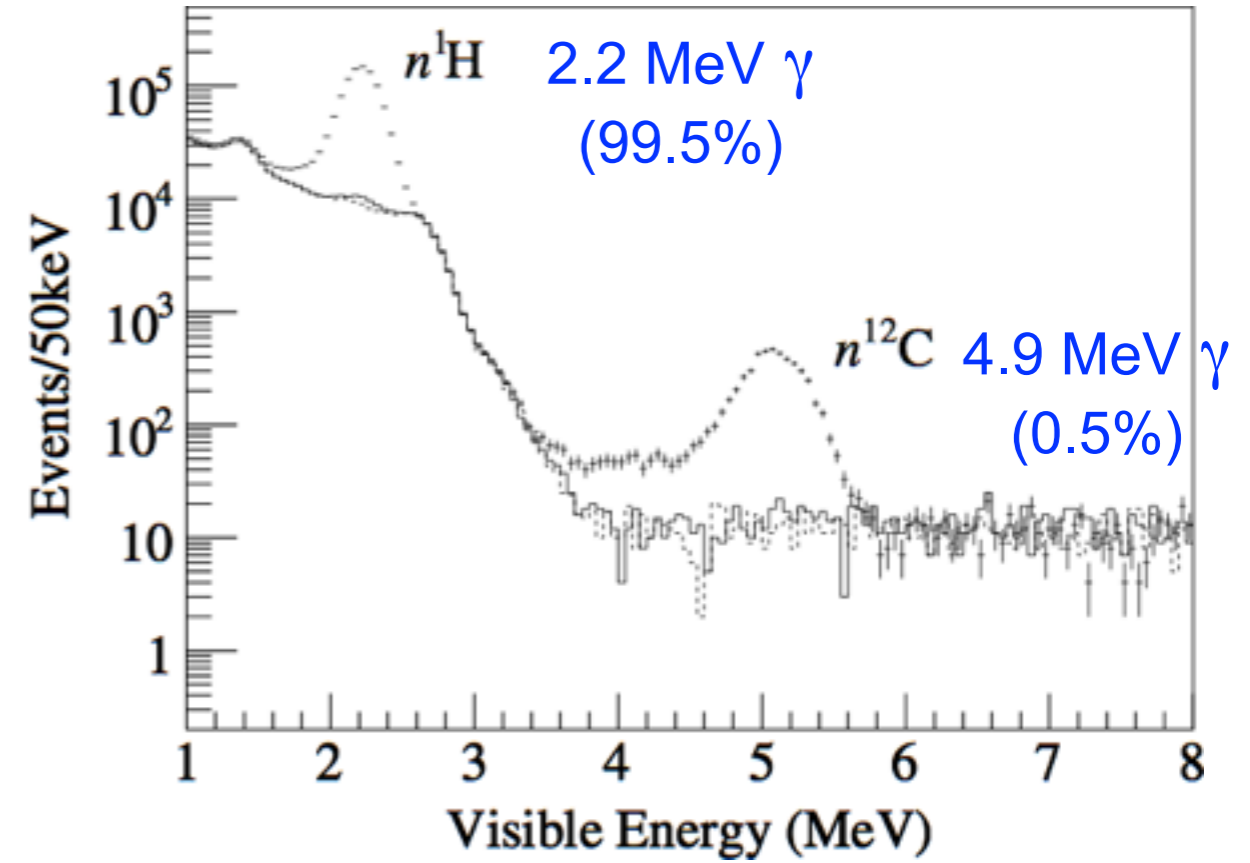
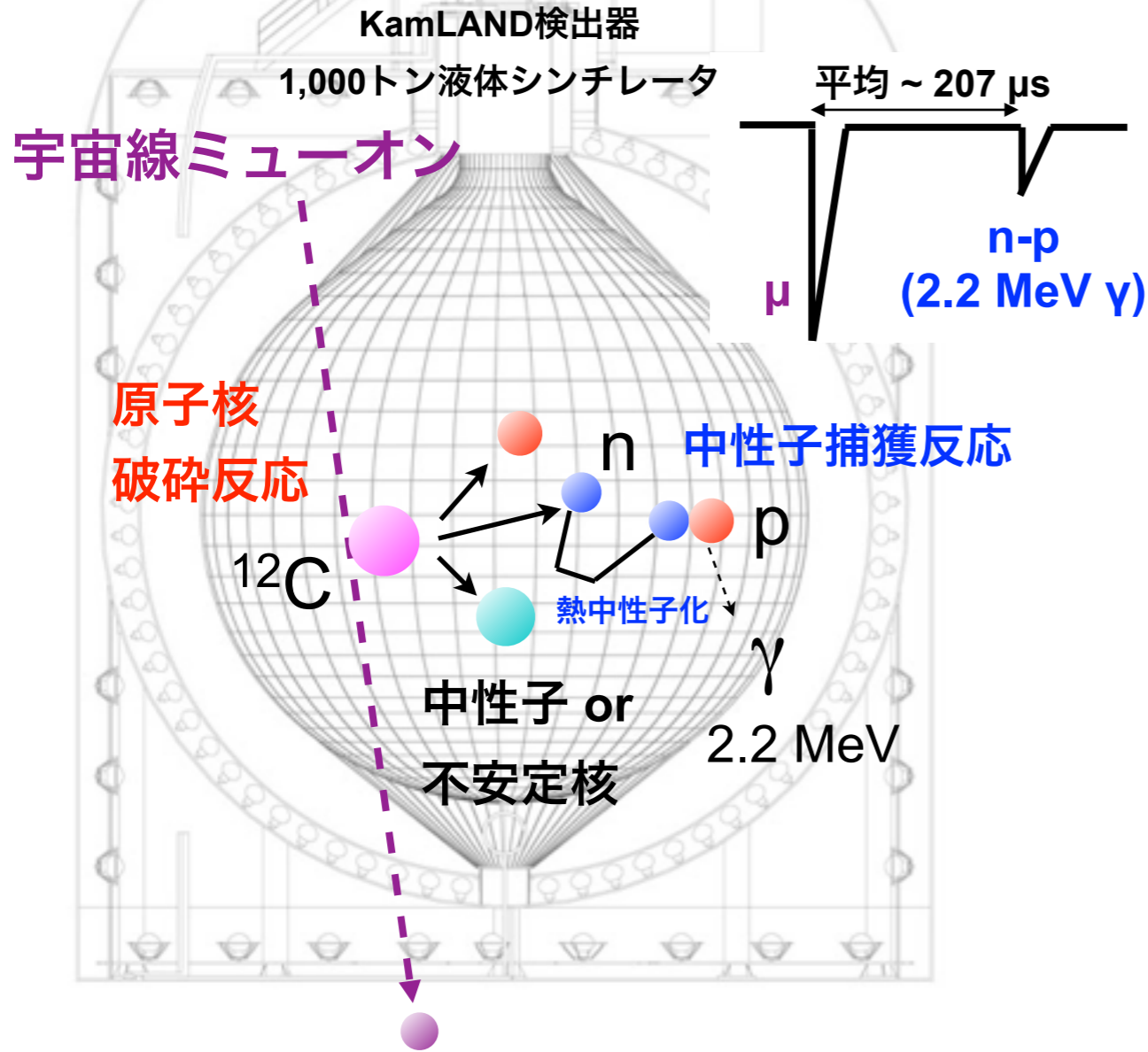
previous measurement at LNGS:

$$\alpha_T = 0.94 \pm 0.07 \text{ (MACRO `03)}$$

predicted value at LNGS depth:

$$\alpha_T = 0.92 \pm 0.02 \text{ (MINOS `10)}$$

KamLANDでの中性子検出



ミュオンイベントと中性子捕獲
イベントとの時間相関をフィット

中性子生成率 (μ トラック長さ当たり)

$$Y_n = (2.8 \pm 0.3) \times 10^{-4} n / (\mu \cdot (\text{g}/\text{cm}^2))$$

中性子生成率

中性子生成率 v.s. ミューオンエネルギー

KamLAND

2700 m.w.e

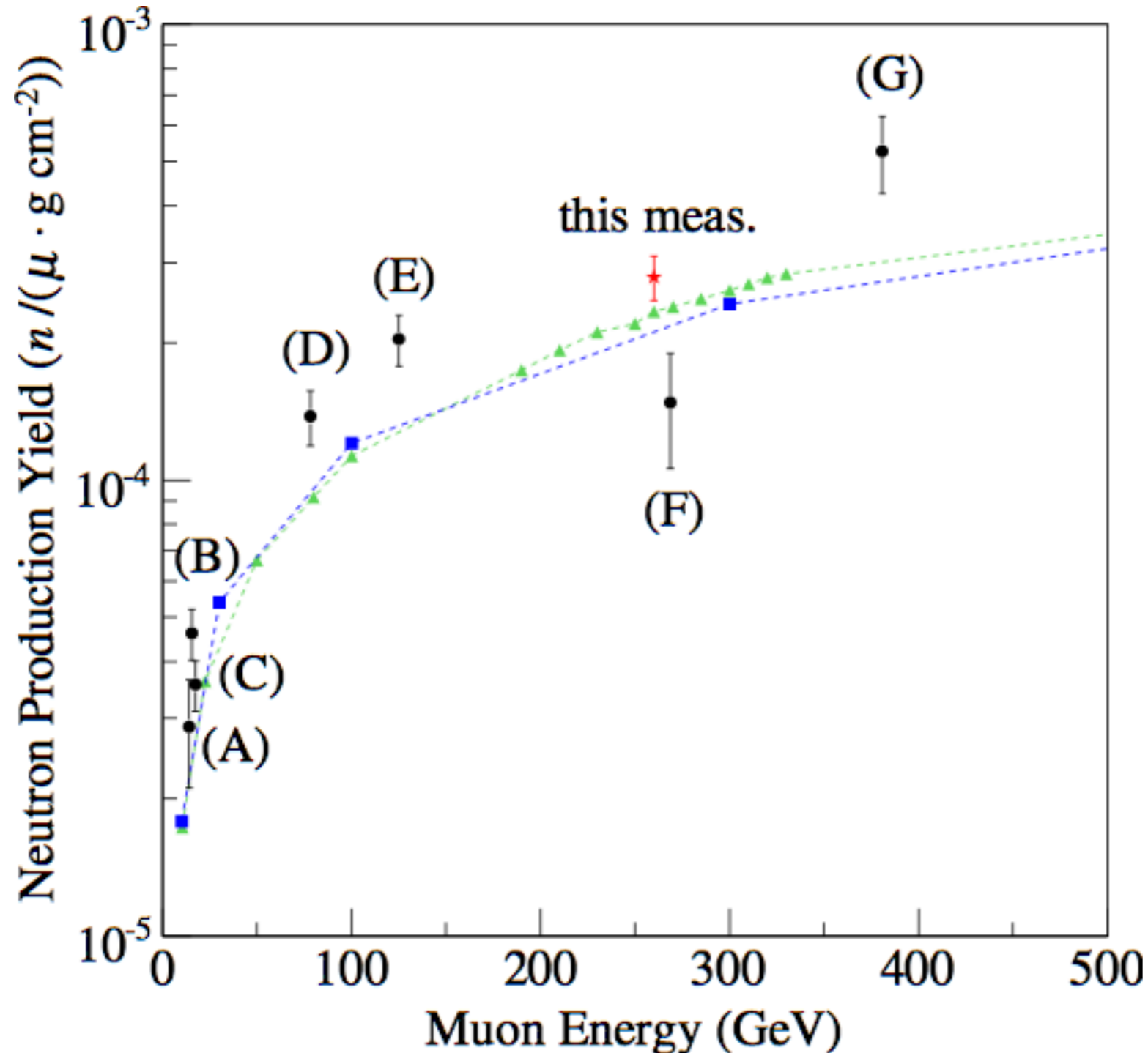
Others

- (A) 20 m.w.e
- (B) 25 m.w.e
- (C) 32 m.w.e (Palo Verde)
- (D) 316 m.w.e
- (E) 570 m.w.e
- (F) 3000 m.w.e (LVD)
- (G) 5200 m.w.e (LSD)

MC (Geant4)

MC (FLUKA)

target C_nH_{2n}
 $\rho = 0.8 \text{ g/cm}^3$



シミュレーションのほうがデータよりも中性子生成率が低い

中性子の空間的広がり

ミューオン・中性子の距離分布

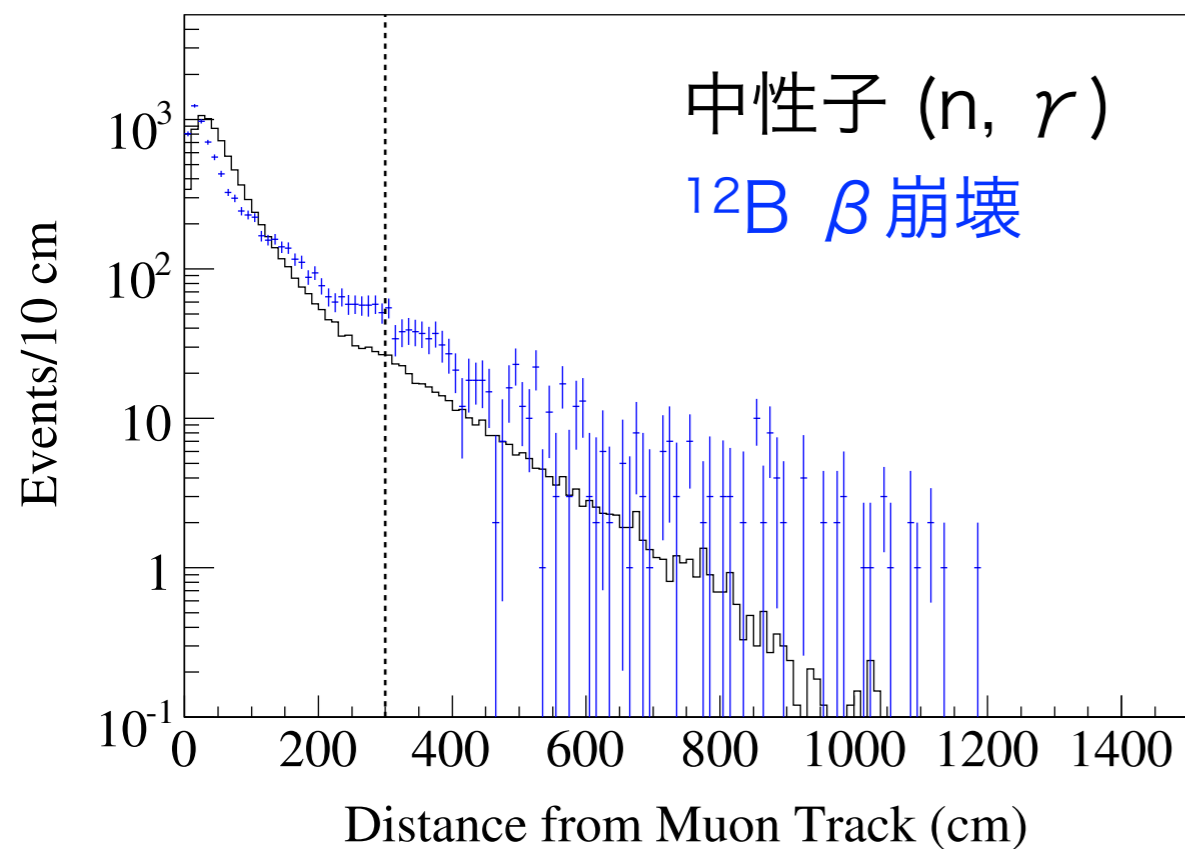
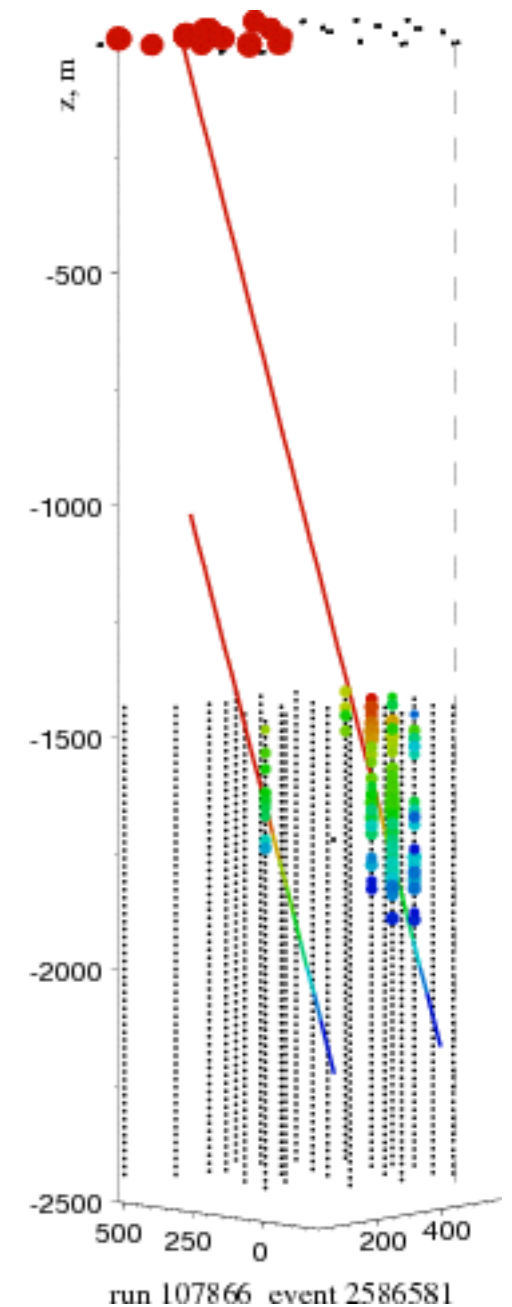
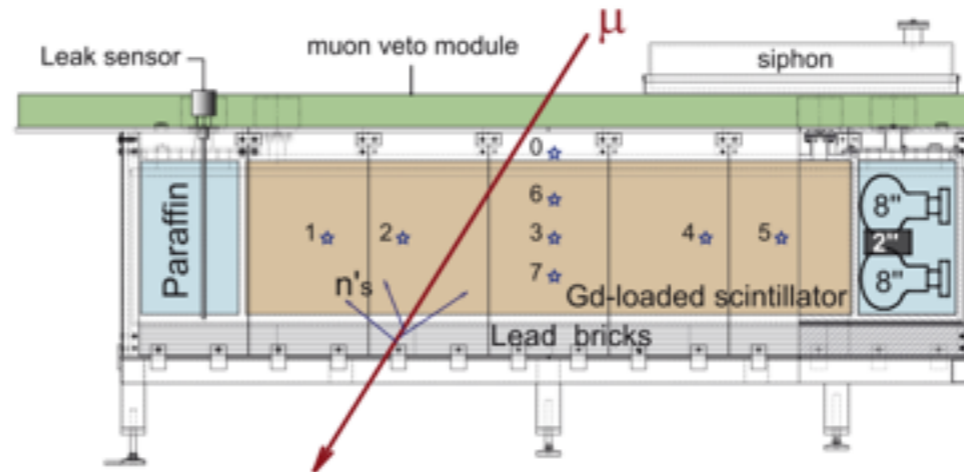
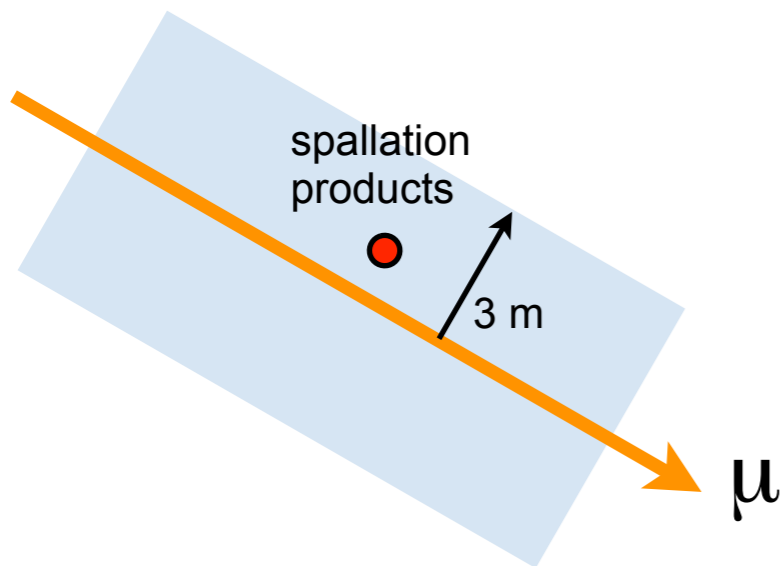
中性子の多重生成

ミュー束

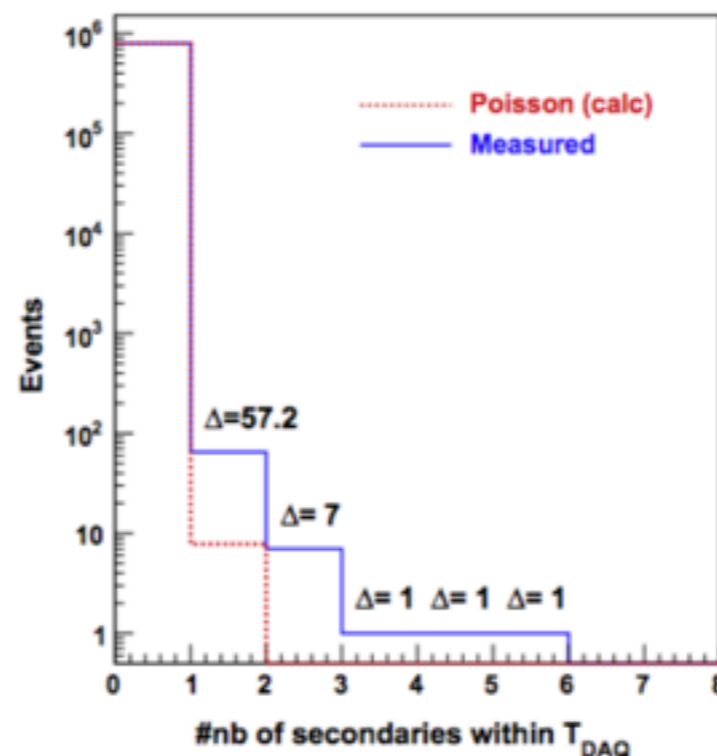
KamLAND

Neutron Counter @ LSM

IceCube

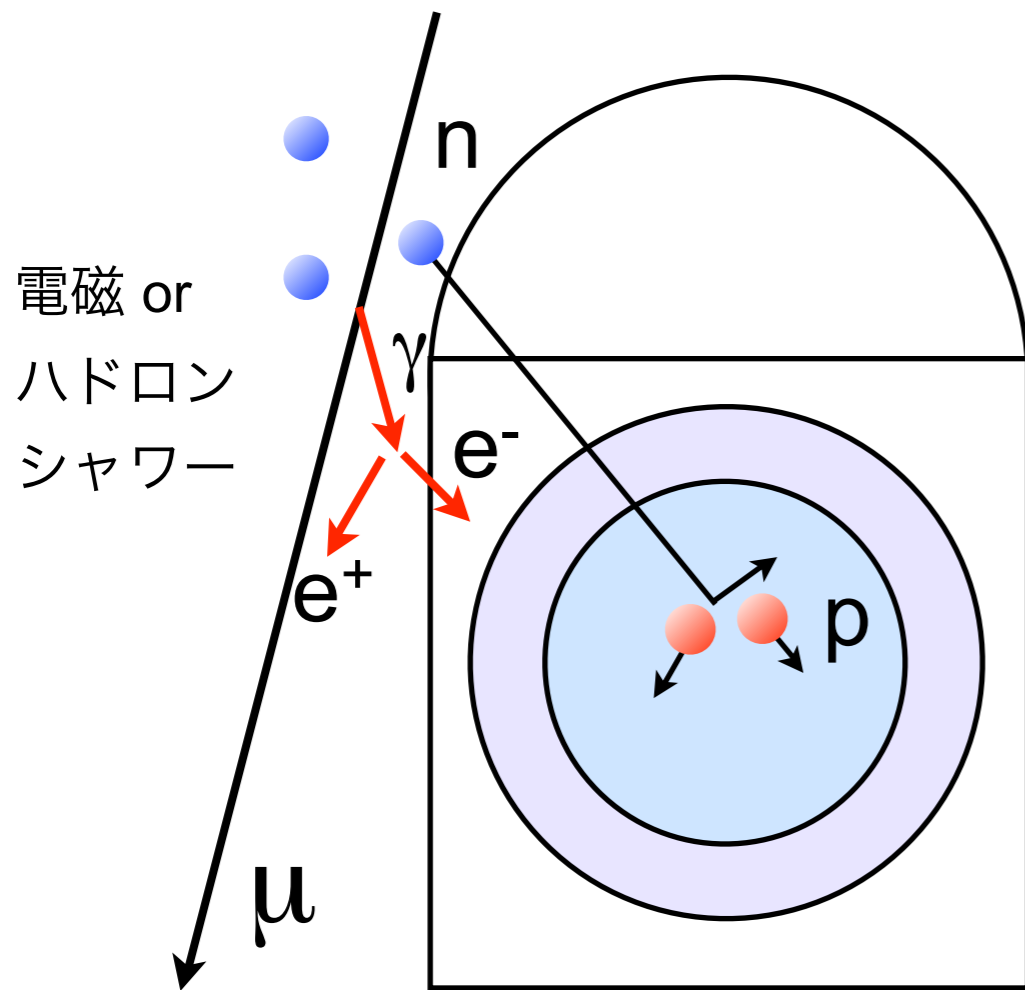


中性子多重度



外部検出器からの中性子検出

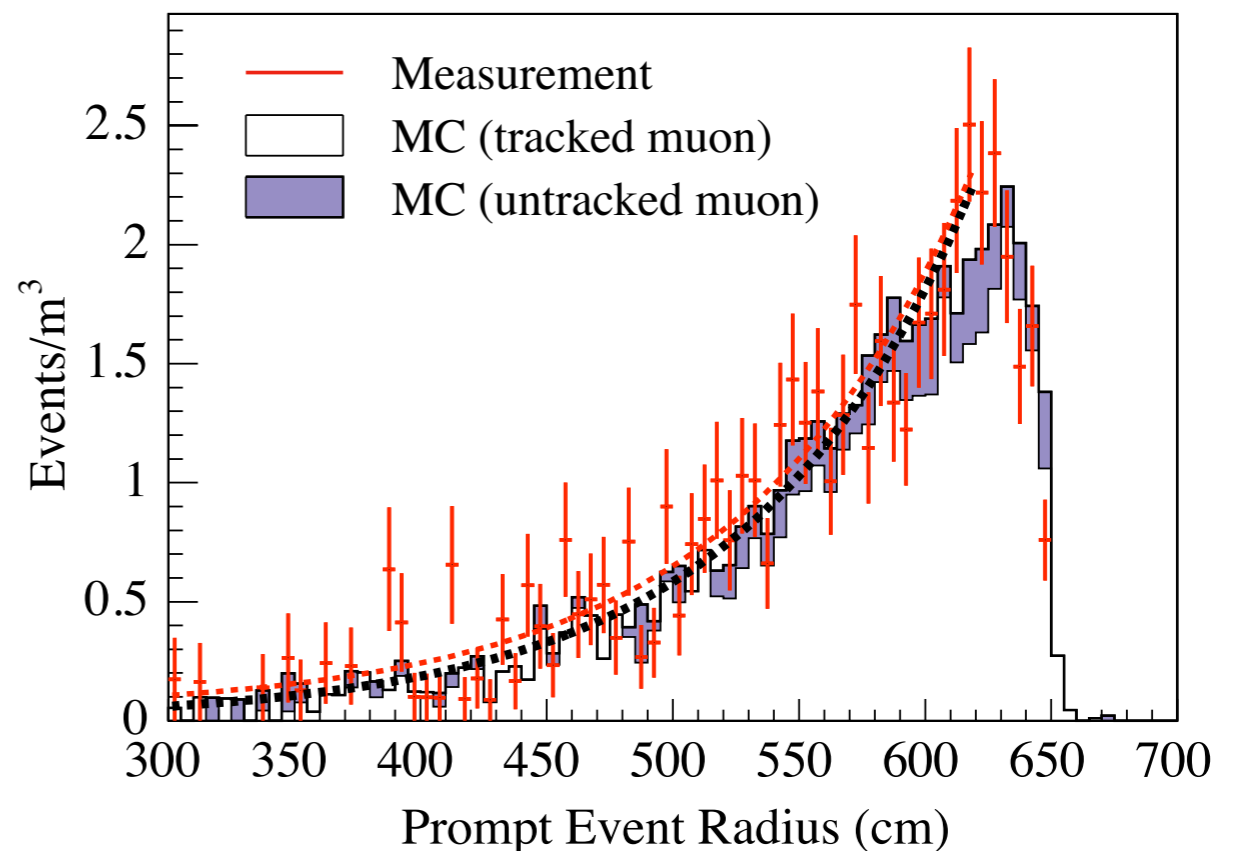
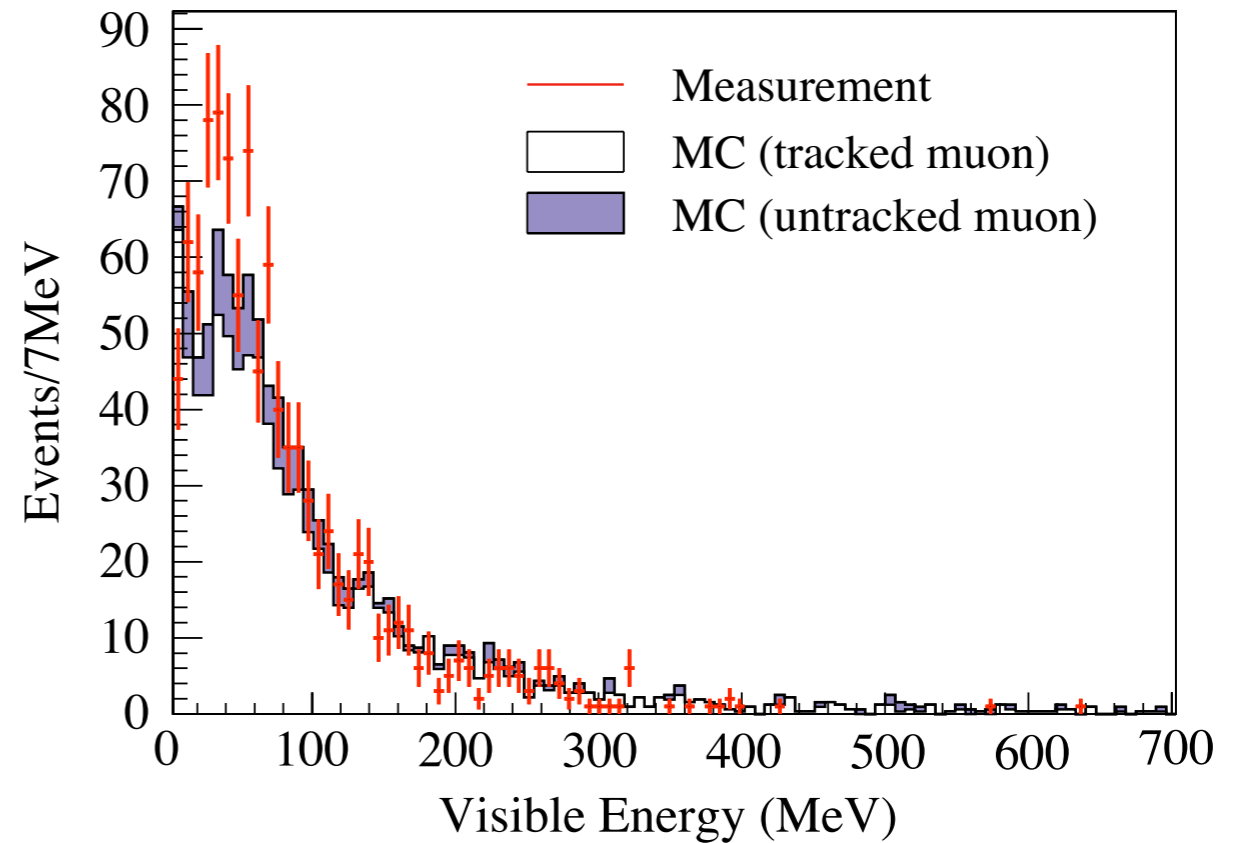
外部検出器でタグされるミュオン



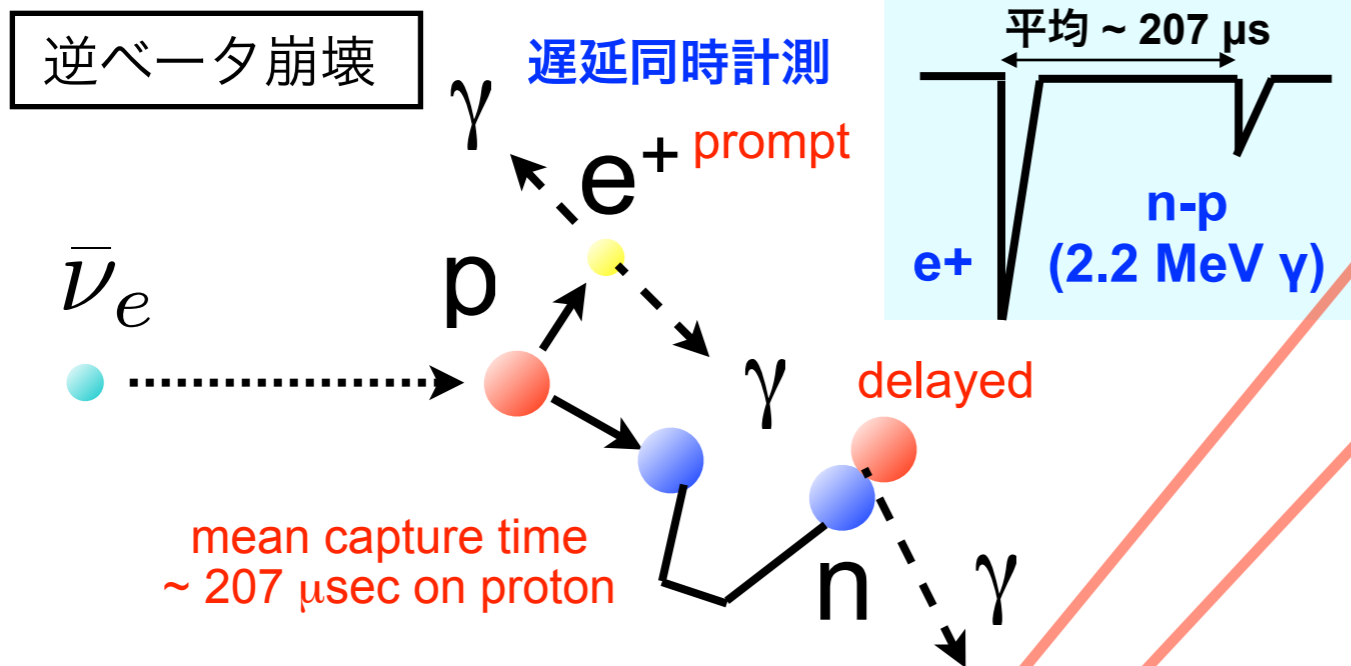
中性子の減衰長

データ	$70 \pm 2 \text{ g/cm}^2$
MC (Geant4)	$69 \pm 2 \text{ g/cm}^2$

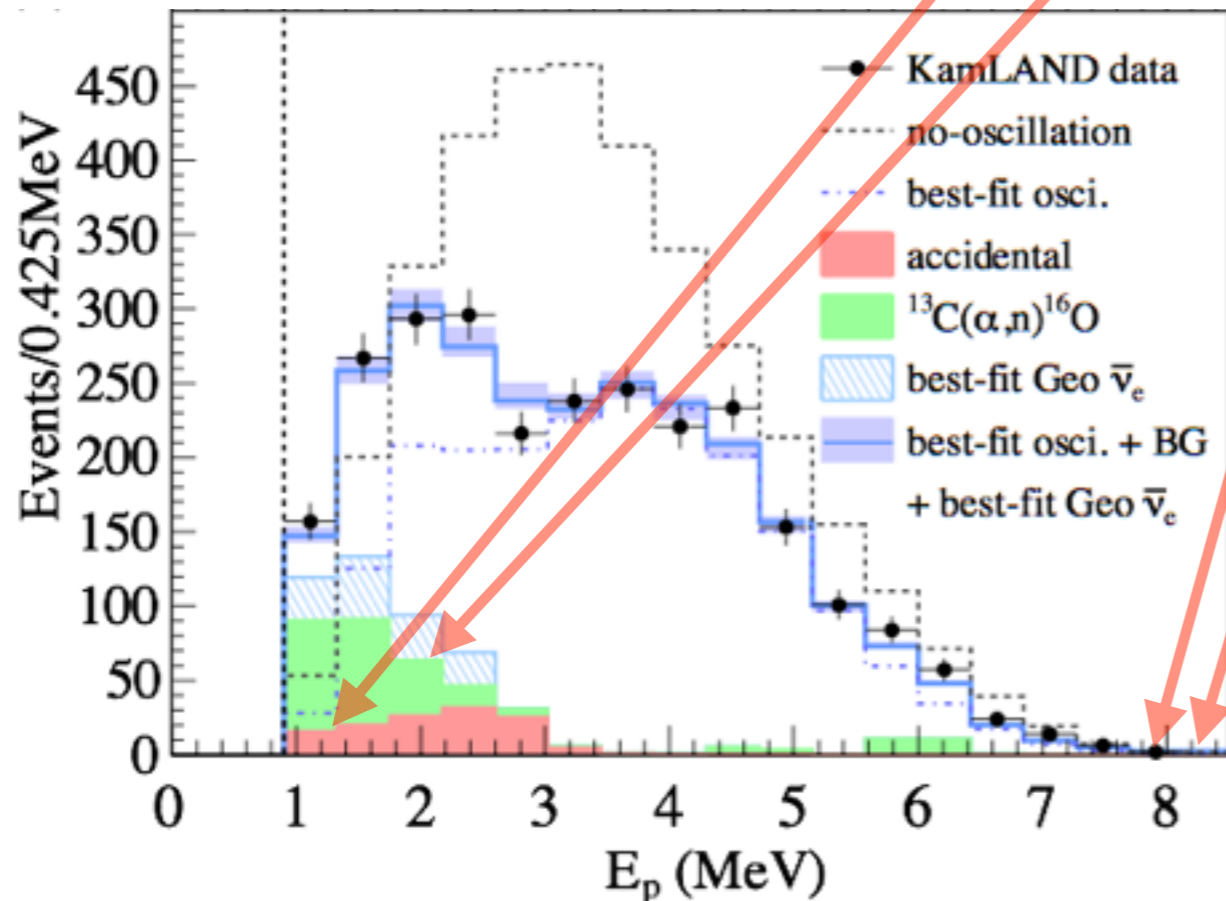
誤差の範囲内で一致



KamLAND : 反ニュートリノ測定



原子炉・地球ニュートリノ測定



反 ν 測定バックグラウンド

- 偶発イベント

検出器内部・外部の放射線起源

- (α, n)

液体シンチレータ中の α 線起源

- $^9\text{Li} / ^8\text{He}$

ミューオン起源・中性子放出 β 崩壊核

- 高速中性子

液体シンチレータ

→ ミューオン後 2 msec veto

外部検出器 (水) ・ 岩盤

→ 外部検出器でタグ

有効体積カット

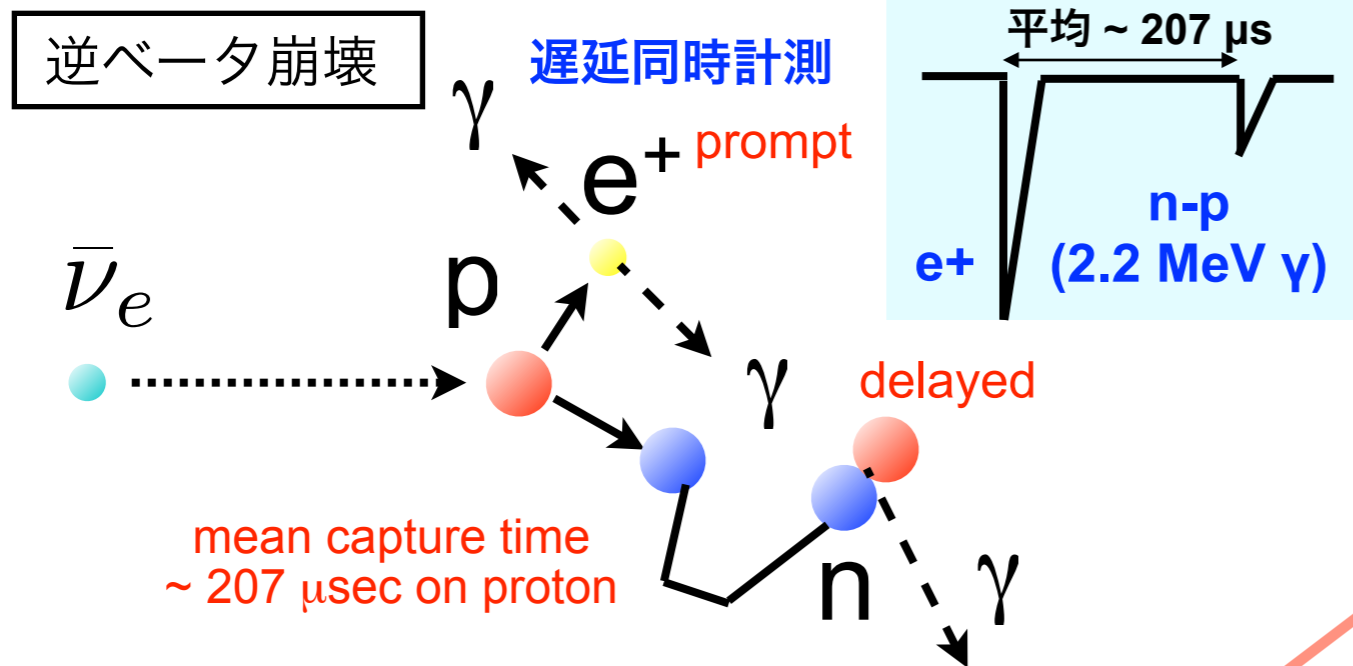
タグしきれないイベントがバックグラウンドとなる

- 大気ニュートリノ

主に中性カレント反応による
ニュートリノ・核子弾性散乱

偶発イベント以外は中性子に由来するバックグラウンド

KamLAND : 反ニュートリノ測定



反 ν 測定のバックグラウンド

- 偶発イベント

検出器内部・外部の放射線起源

- (α , n)

液体シンチレータ中の α 線起源

- ${}^9\text{Li} / {}^8\text{He}$

ミューオン起源・中性子放出 β 崩壊核

- 高速中性子

液体シンチレータ

→ ミューオン後 2 msec veto

外部検出器 (水) ・岩盤

→ 外部検出器でタグ

有効体積カット

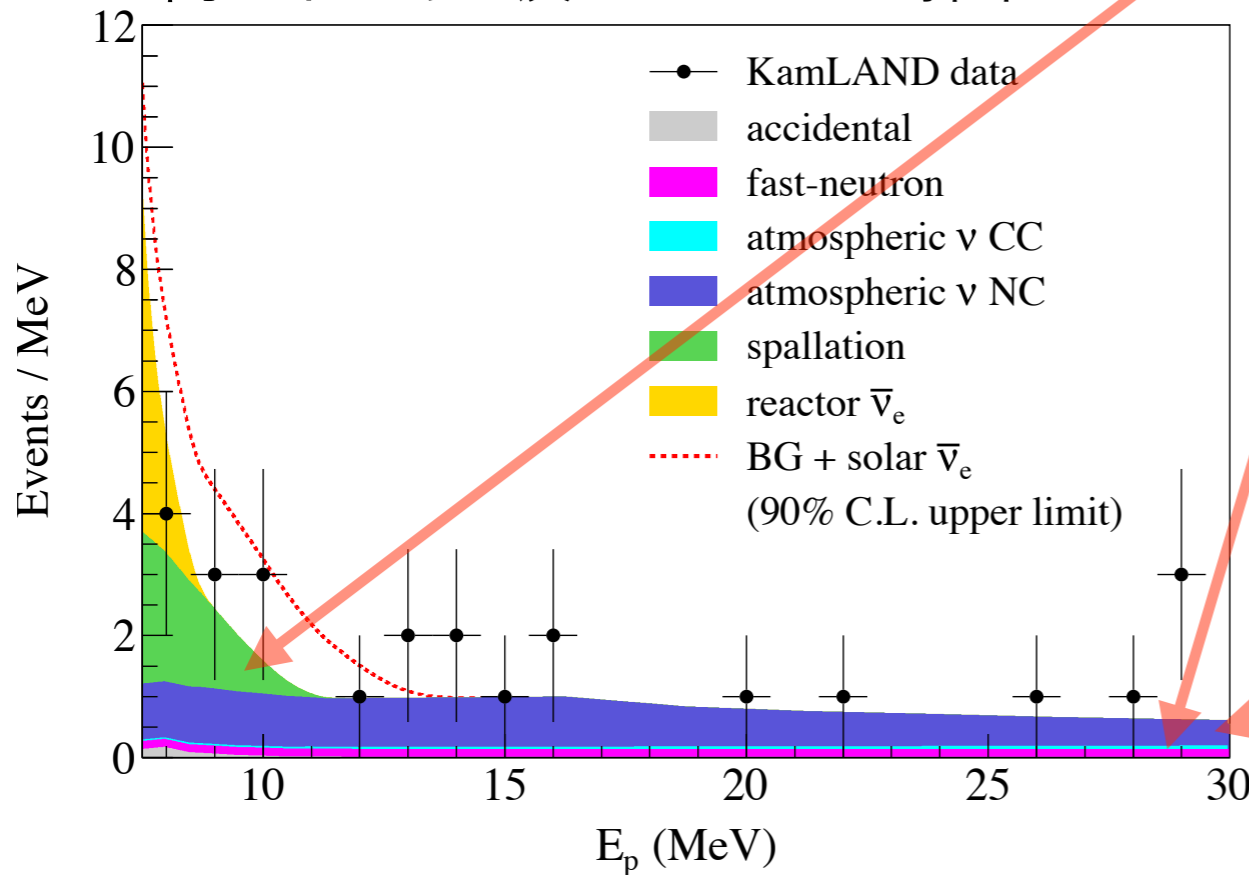
タグしきれないイベントがバックグラウンドとなる

- 大気ニュートリノ

主に中性カレント反応による

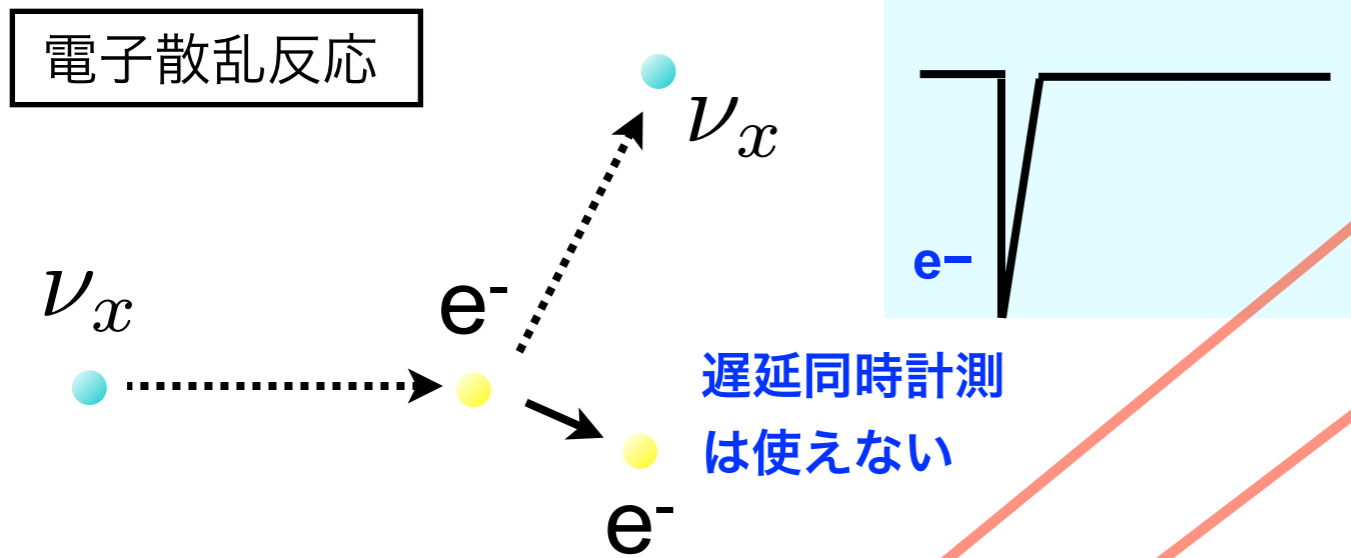
ニュートリノ・核子弾性散乱

高エネルギー反ニュートリノ探索



偶発イベント以外は中性子に由来するバックグラウンド

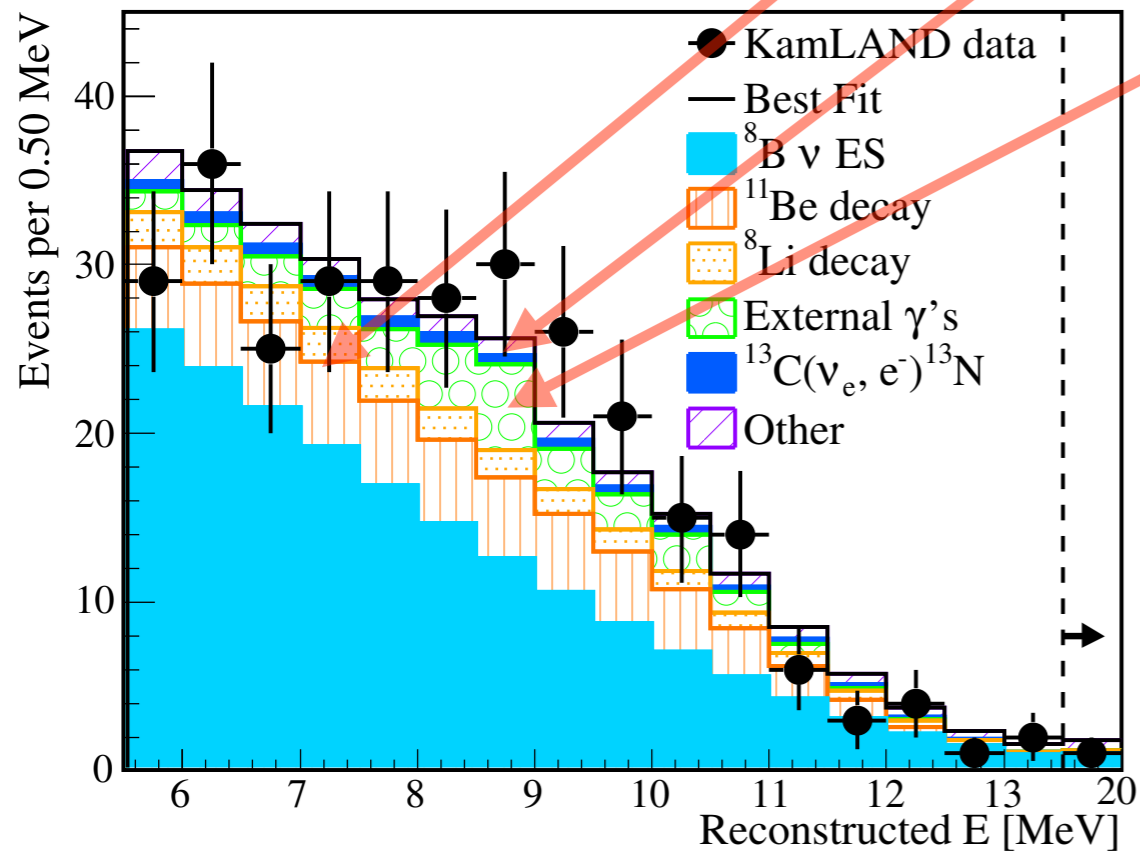
KamLAND : 太陽ニュートリノ測定



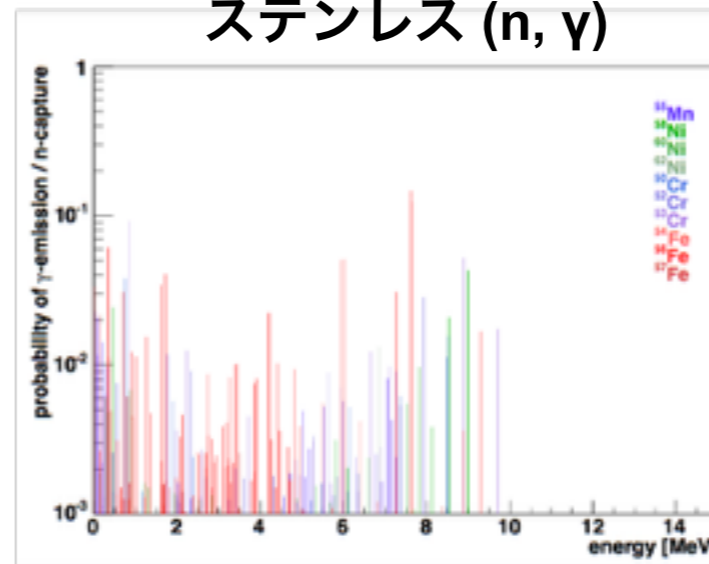
ν 測定のバックグラウンド

- $^{11}\text{Be} / ^8\text{Li}$
ミューオン起源・ β 崩壊核
- $^{13}\text{C}(\nu_e, e^-)^{13}\text{N}$
荷電カレント反応による
ニュートリノ捕獲反応
- 外部 γ 線
ステンレス・岩盤 (n, γ)
中性子捕獲 γ 線
→ 有効体積カット

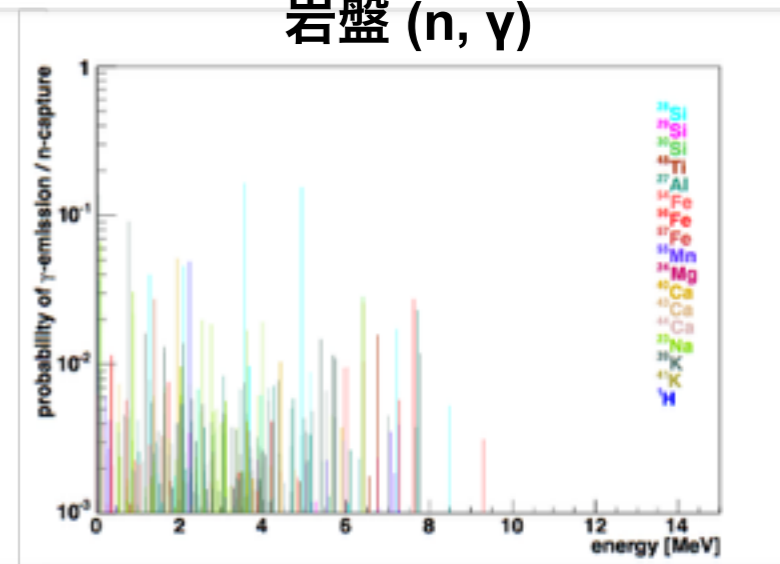
^8B 太陽ニュートリノ測定



ステンレス (n, γ)

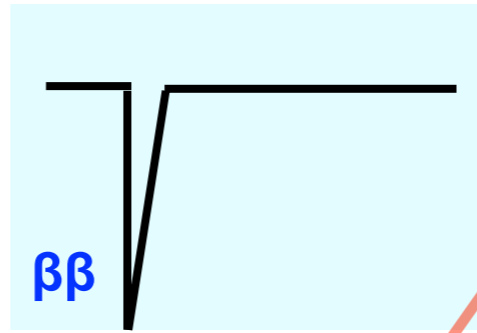
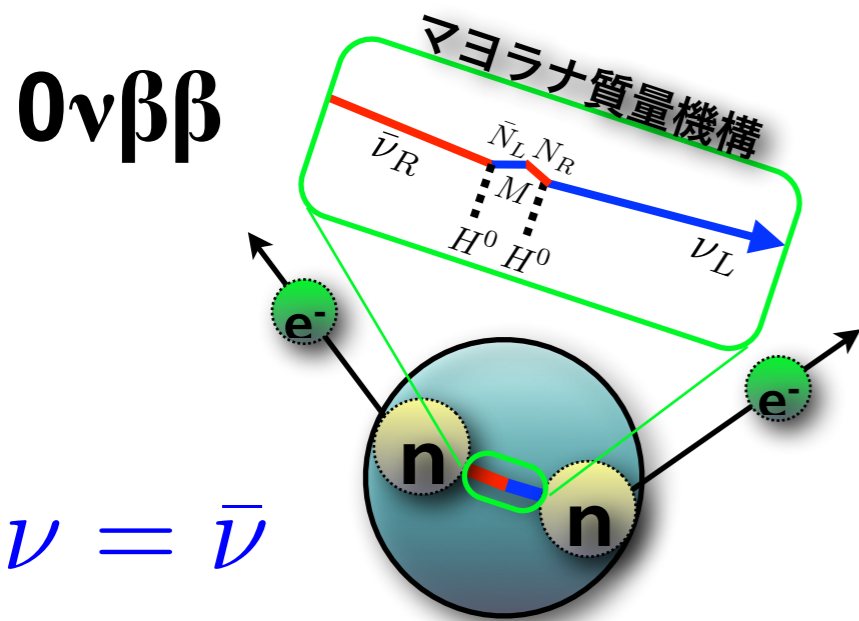


岩盤 (n, γ)



有効体積を制限しているのは中性子に由来するバックグラウンド

KamLAND-Zen : 二重ベータ崩壊探索



$0\nu\beta\beta$ 探索のバックグラウンド

- **$2\nu\beta\beta$**

^{136}Xe $\beta\beta$ 崩壊核

- **^{110m}Ag**

液体シンチレータ中の β 崩壊核

- **^{214}Bi**

ミニバルーン上の β 崩壊核 (^{238}U 系列)

- **^{137}Xe**

ミューオン起源中性子捕獲・ β 崩壊核

→ 中性子捕獲信号でタグ

- **^{10}C**

ミューオン起源・ β^+ 崩壊核

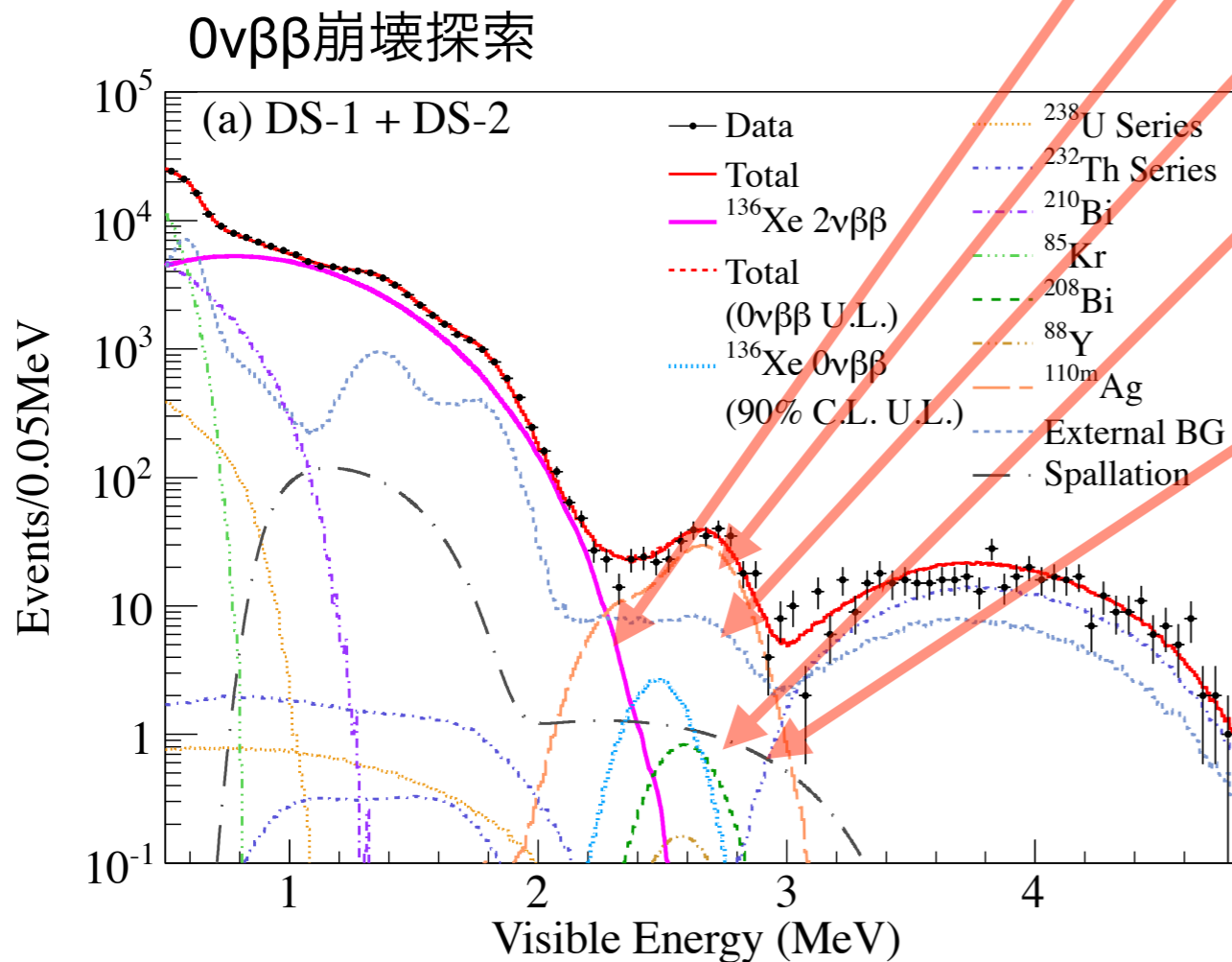
→ 中性子捕獲信号でタグ

高確率で ^{10}C と同時に中性子生成

ミューオンイベント後の中性子の

検出効率が重要

不感時間の無い新電子回路で対応

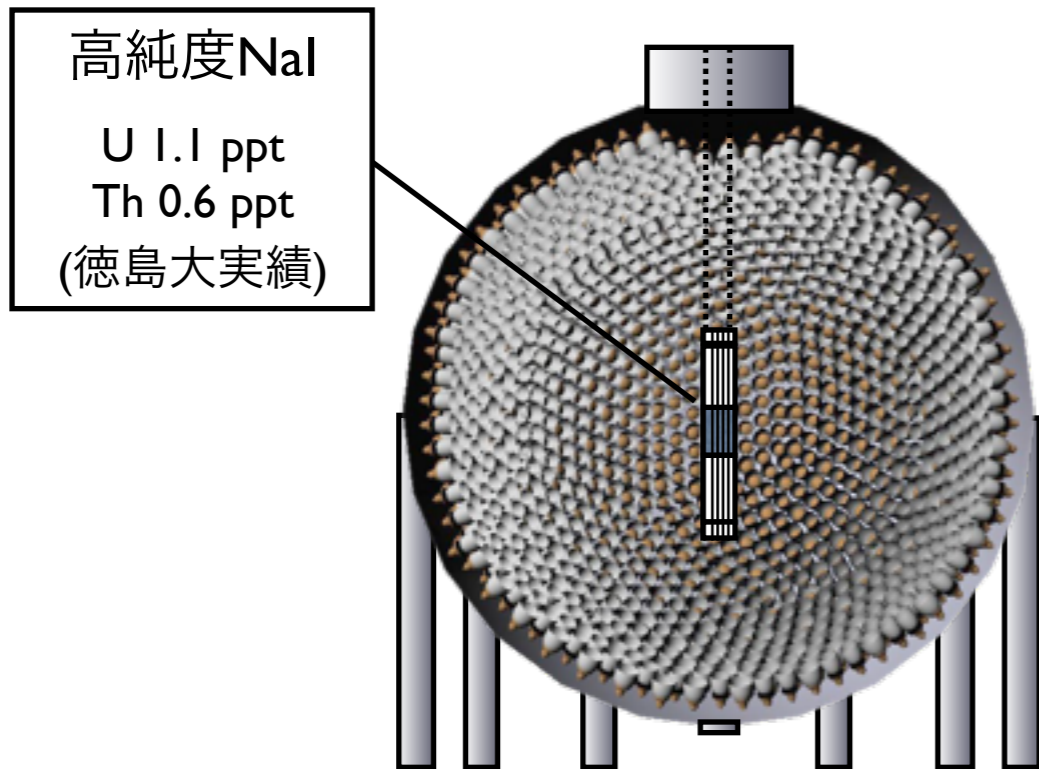


KamLANDを利用した新しい研究

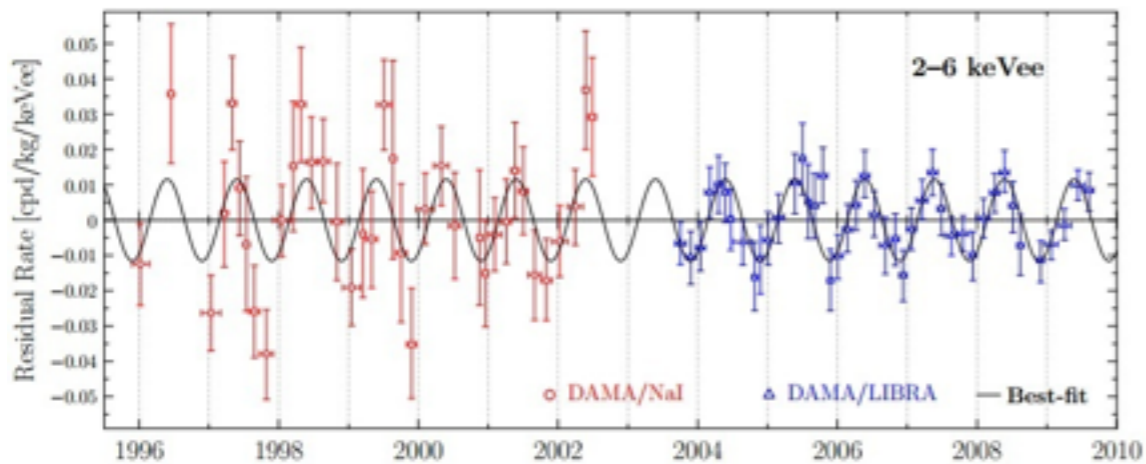
暗黒物質探索

KamLAND-PICO

~1000 kg NaI(Tl) @ the center of KamLAND2

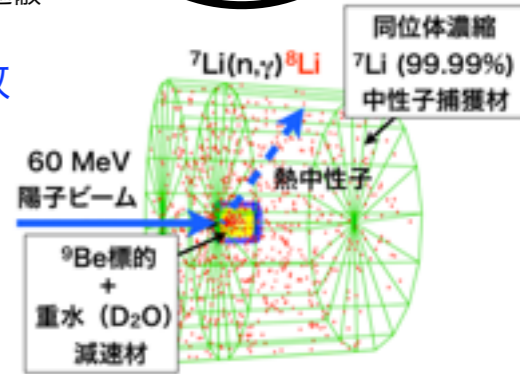
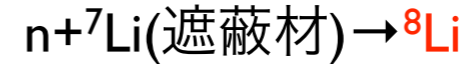
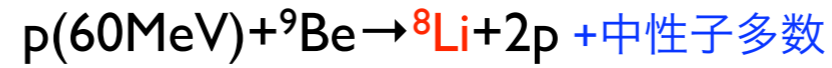
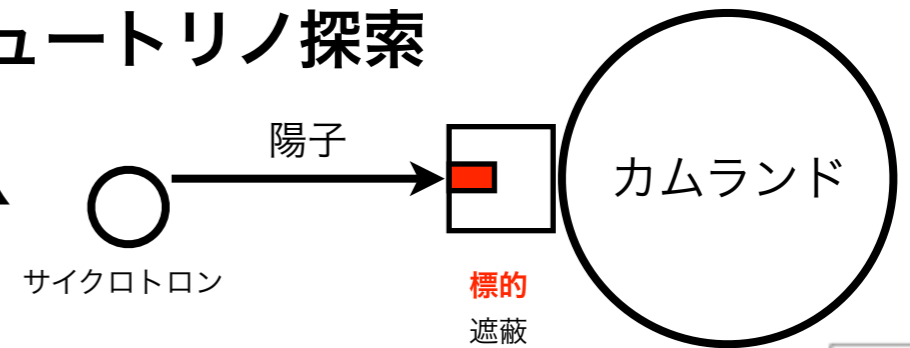


DAMAの季節変動検証

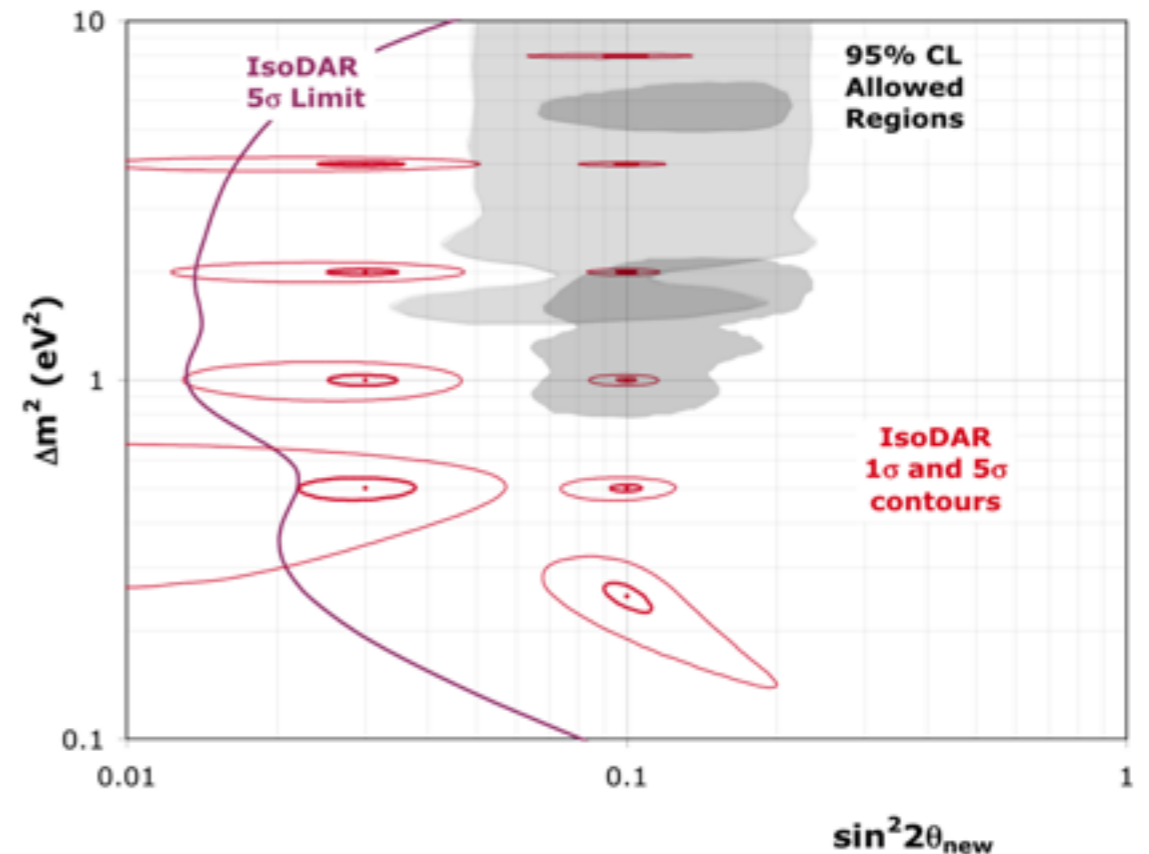


第4世代ニュートリノ探索

IsoDAR

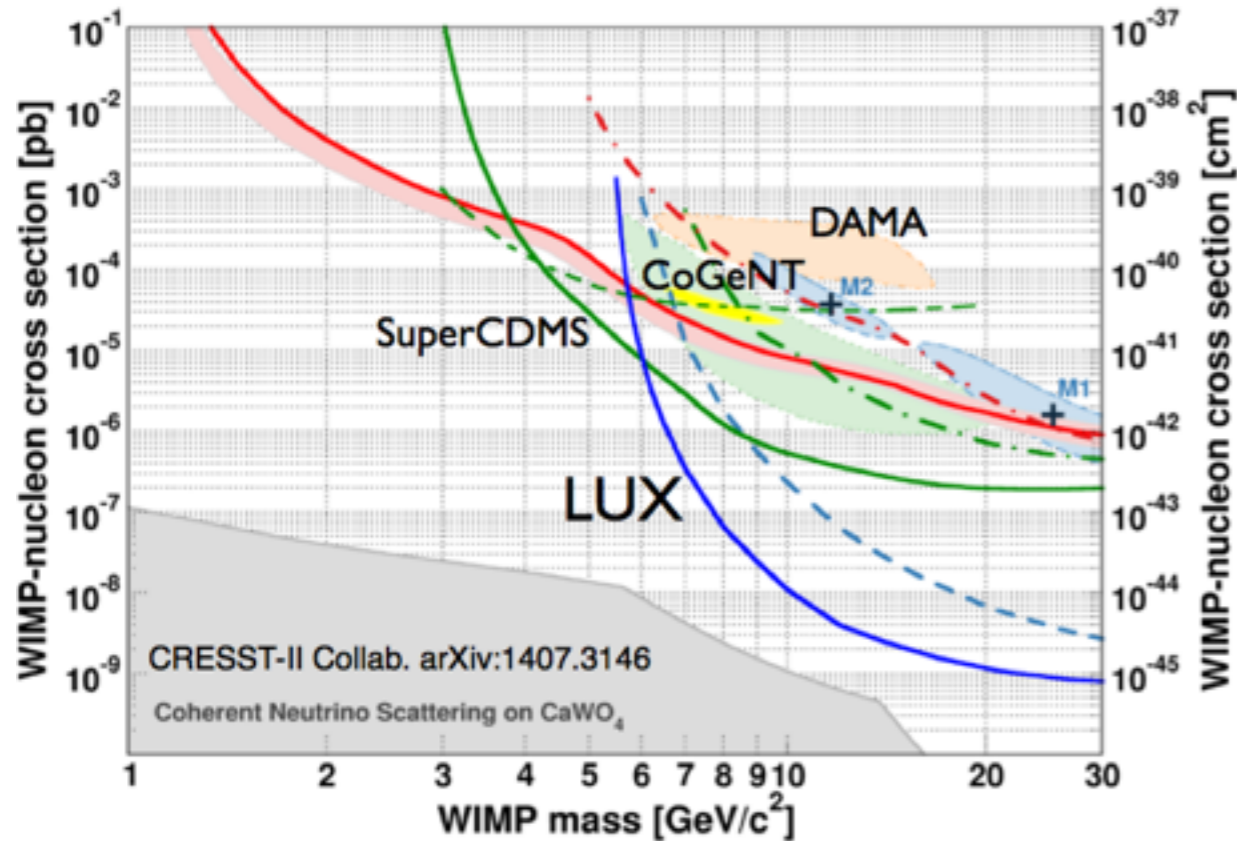


~1 eV² 短距離振動探索

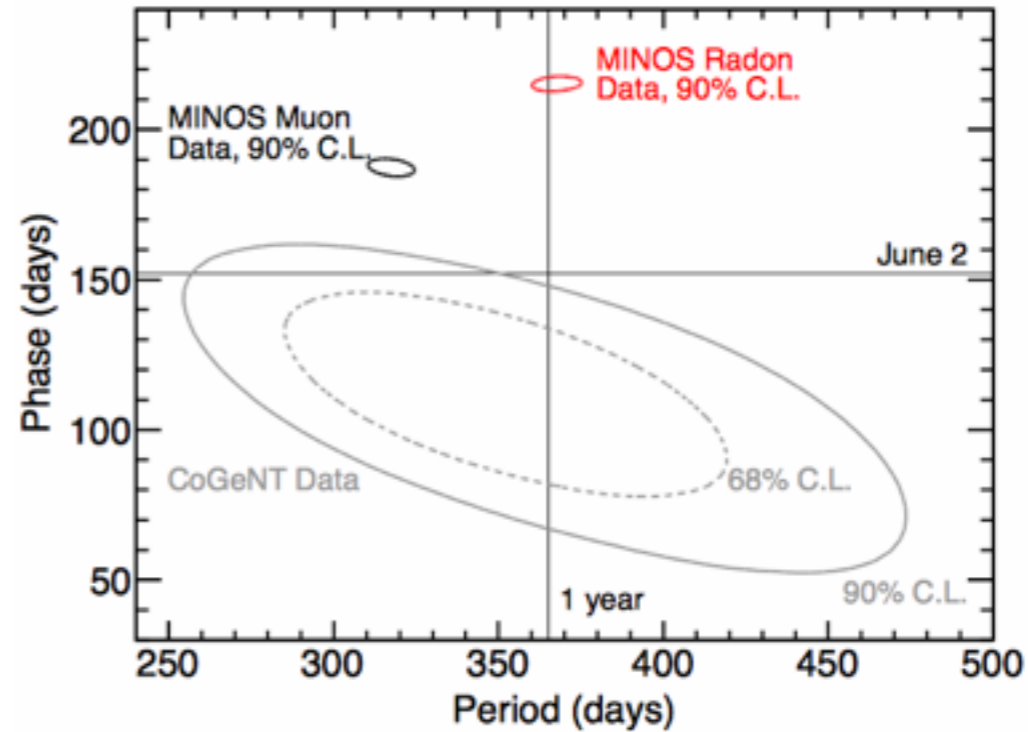


DAMA / CoGeNTの季節変動

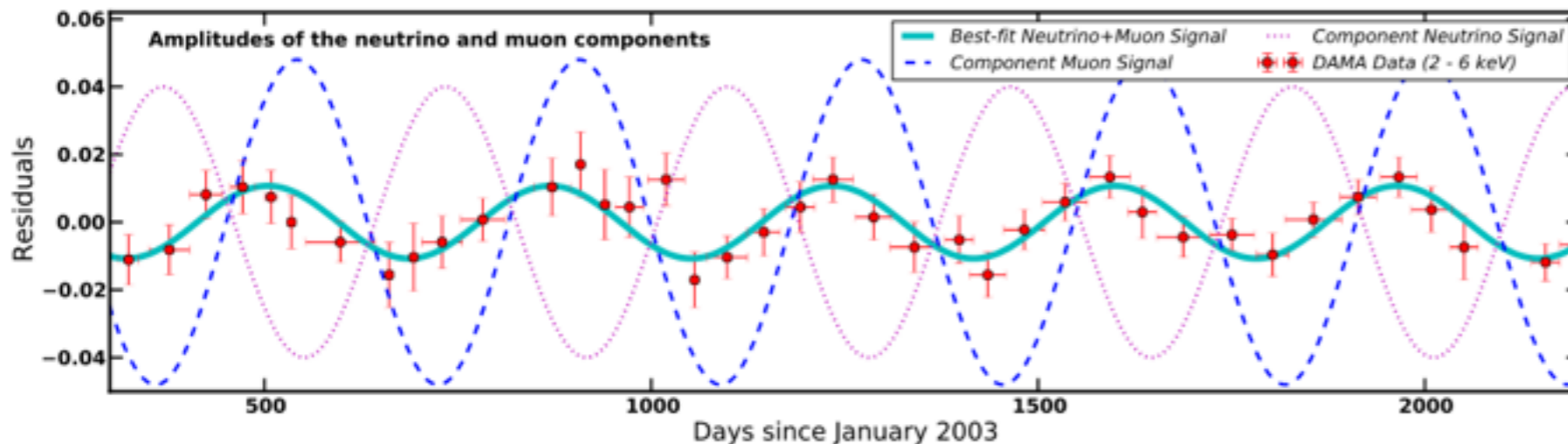
他の実験との矛盾があるので暗黒物質以外で説明が試みられている



MINOS Muon and Radon arXiv:1212.1776



ラドン濃度の季節変化
ミューオンの季節変化



ミューオン +
太陽ニュートリノによる
中性子生成?

J. Davis, COSPA Meeting
PRL 113, 081302 (2014)

はっきりとした結論は出ていない → 他の暗黒物質探索実験 (季節変動) で検証

まとめ

- 地下実験では中性子がやっかいなバックグラウンド源となることがあるため、あらかじめ中性子測定によって影響を評価しておくことが重要。
- 宇宙線ミュオンによる原子核破砕、岩盤での(α , n)反応、ウラン自発核分裂によって中性子が生成され、検出器での中性子フラックスは季節変動する。
- バックグラウンド源となり得るミュオン起源の高エネルギーの中性子は測定だけでは評価が困難なので、シミュレーション (MUSIC, FLUKA, Geant4) の助けが必要。
- 神岡地下での中性子測定のデータが増えて欲しい。