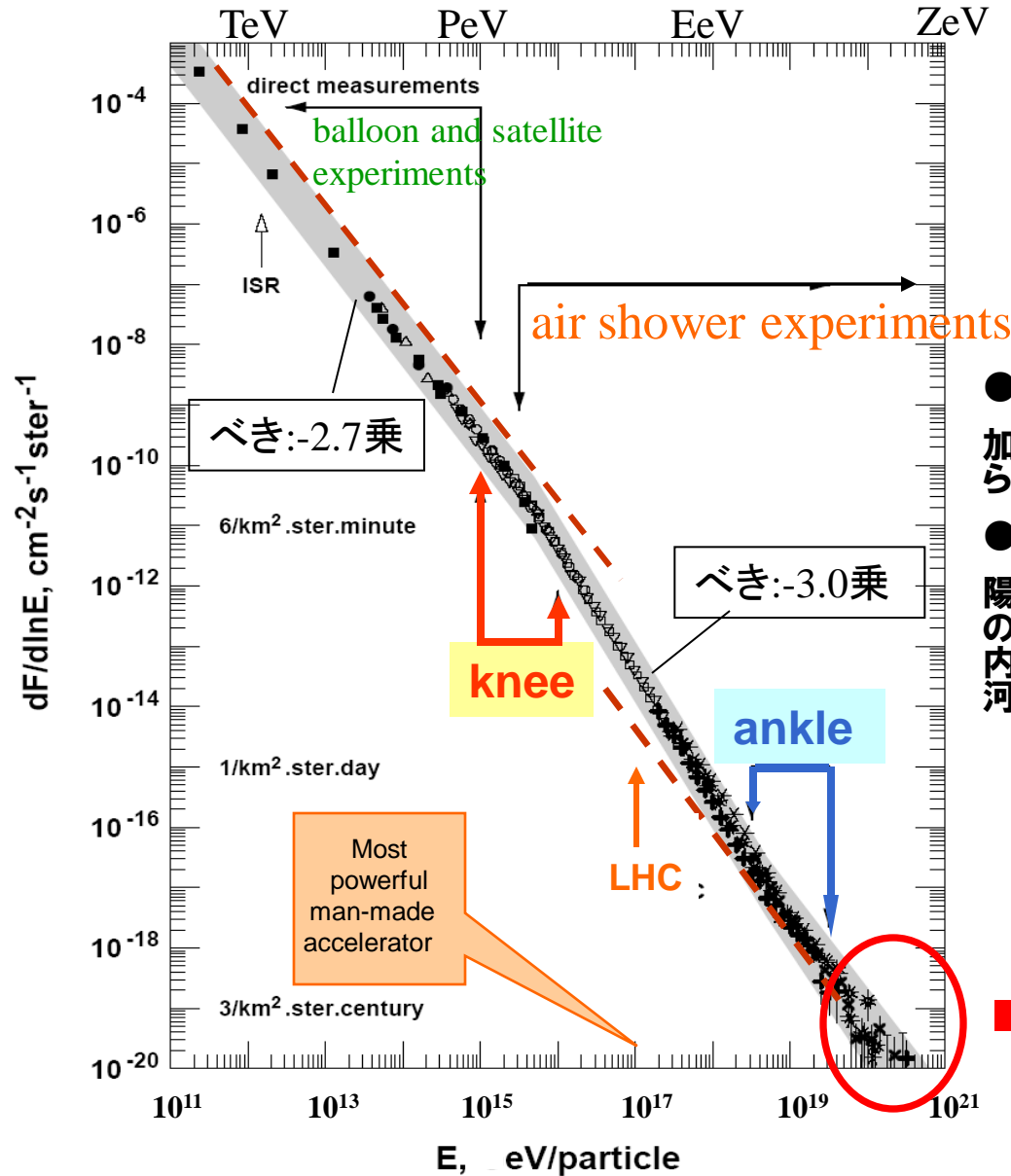


衛星軌道からの UHEニュートリノ観測

埼玉大学大学院理工学研究科
井上直也

宇宙線エネルギースペクトラム > 100 GeV



$$F(E) = K \times E^{-\alpha}$$

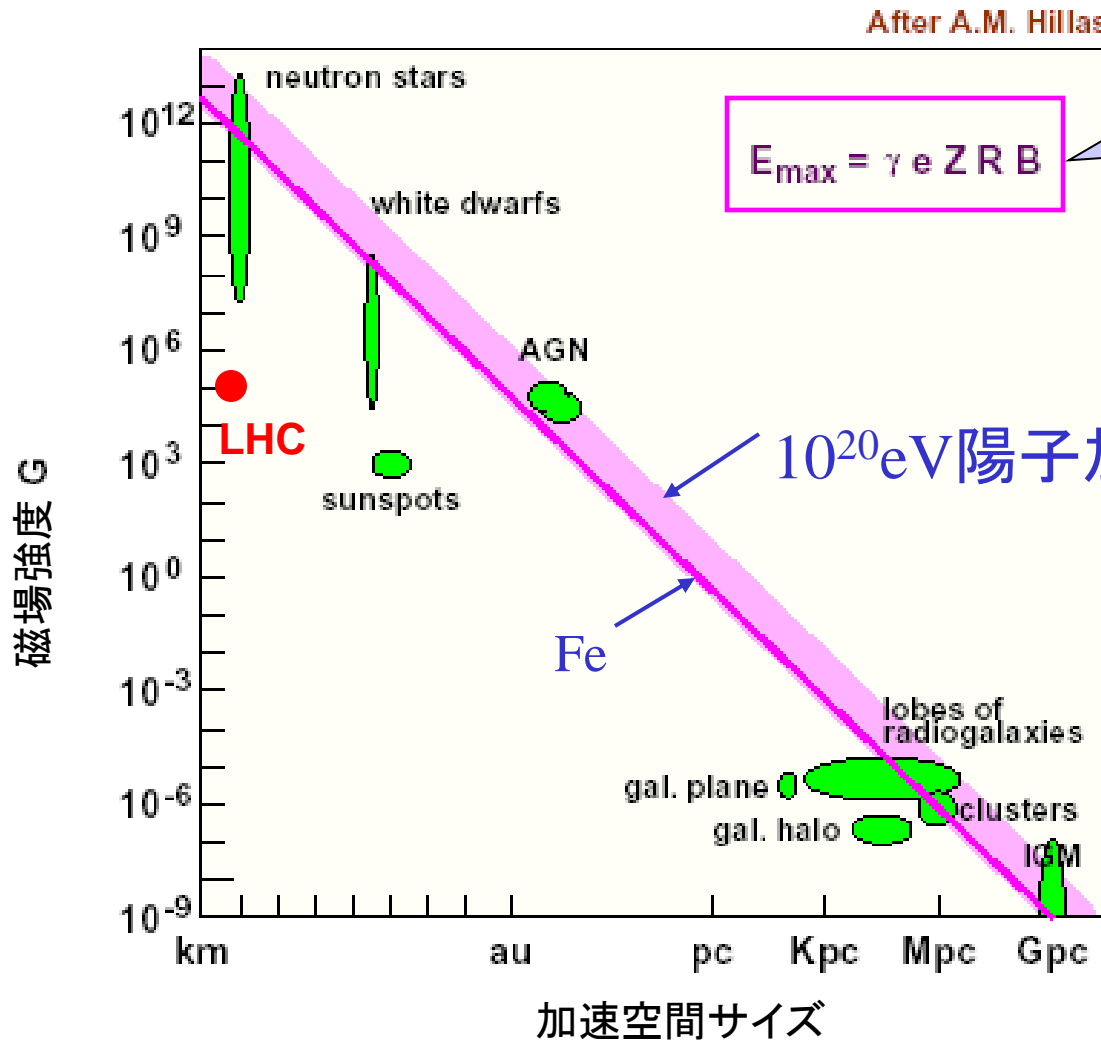
- knee
加速限界による理由 or 銀河から逃げ出す割合が増える
- ankle
陽子のラーモア半径が銀河系の半径より大きくなり銀河系内に閉じ込められなくなる。銀河系外起源

UHECR

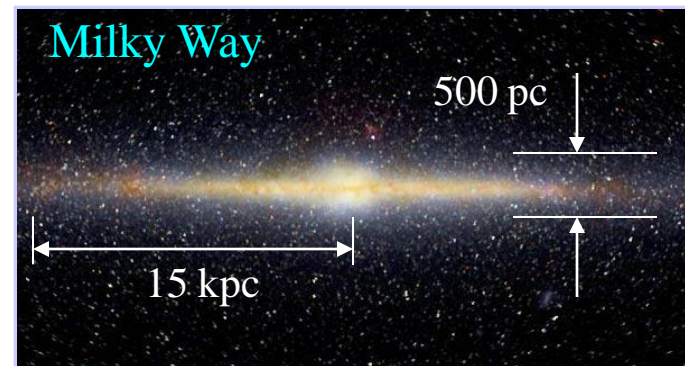
From T. Stanev paper

Hillas plot

加速磁場強度と加速空間→加速天体候補



Z: charge of particle
B: magnetic field
R: size of object
 γ : Lorentz factor of shock wave



超高エネルギー宇宙線の謎

- High Energy END ? GZK recovery?
- 起源天体の探索
- 加速メカニズム
- 質量組成

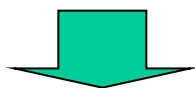
● Bottom-up: AGN, GRB

● Top-down: 位相欠陥

超高エネルギーニュートリノ生成

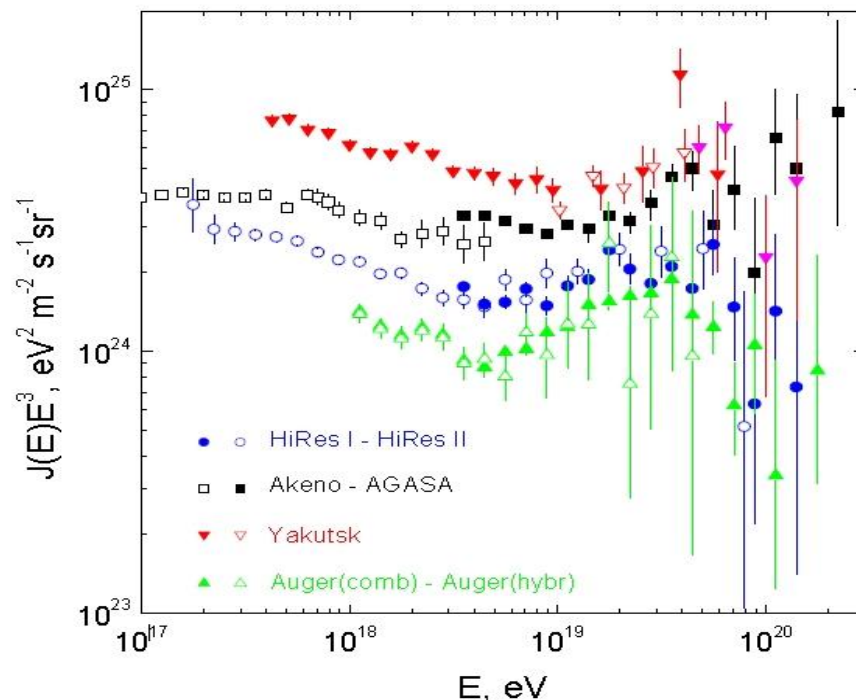
Bottom-up → 少ない

Top-down → 多い



“(荷電)粒子天文学”を超えて

超高エネルギーニュートリノ研究(検出)による**起源、加速メカニズムの解明**



Pierre Auger Collaboration, J. Abraham et al.
Physics Letters B 685 (2010) 239

Expected UHE-neutrino (ν) Flux

- Production in **AGN / Gamma-ray burst** etc..as high energy astrophysical objects.



as **Cosmogenic Neutrinos**

A. Cuoco et.al.
arXiv:0712.1830 [astro-ph]

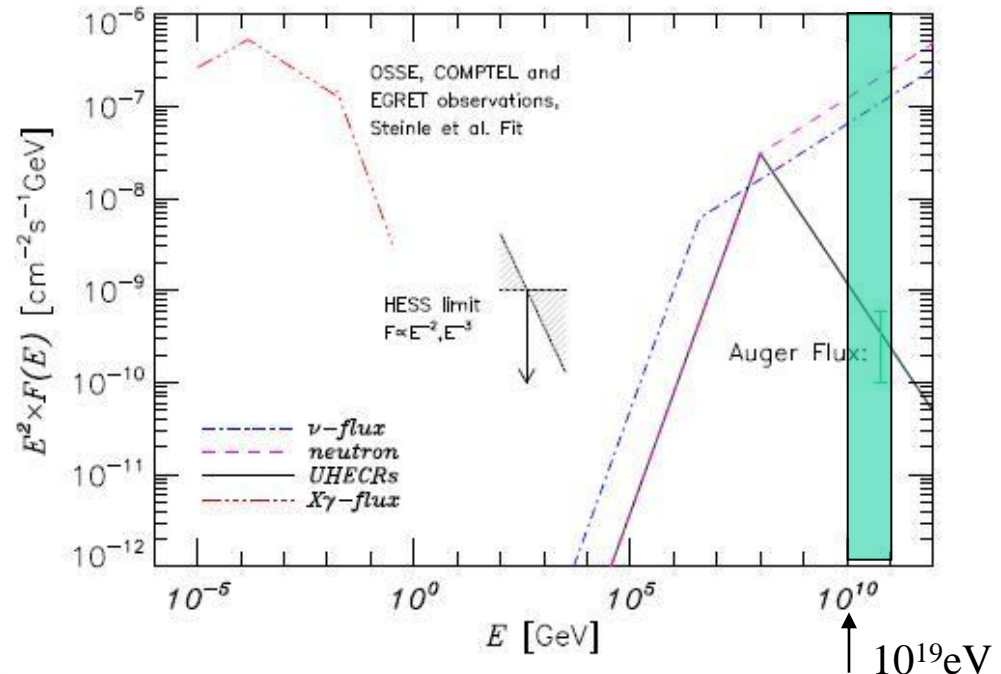
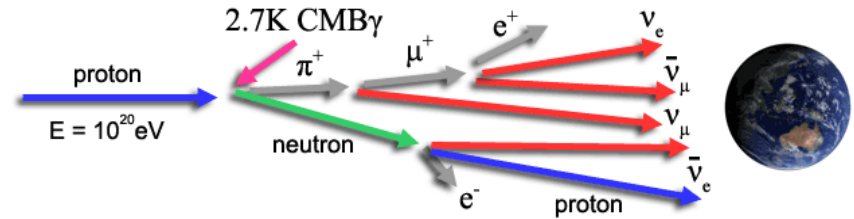
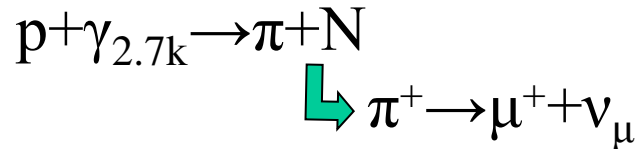


FIG. 2: Final neutron, UHECRs and total neutrino spectrum in the model of this work, normalized to the Auger observation at $E \approx 60$ EeV. The Cen A UHE- γ curve, not shown for

- **GZK ν**



- **UHE ν assumed in Z-burst model**

(Weiler 1982: $\text{UHE-}\nu + \text{CB}\nu \rightarrow Z^0$)

Bottom UP

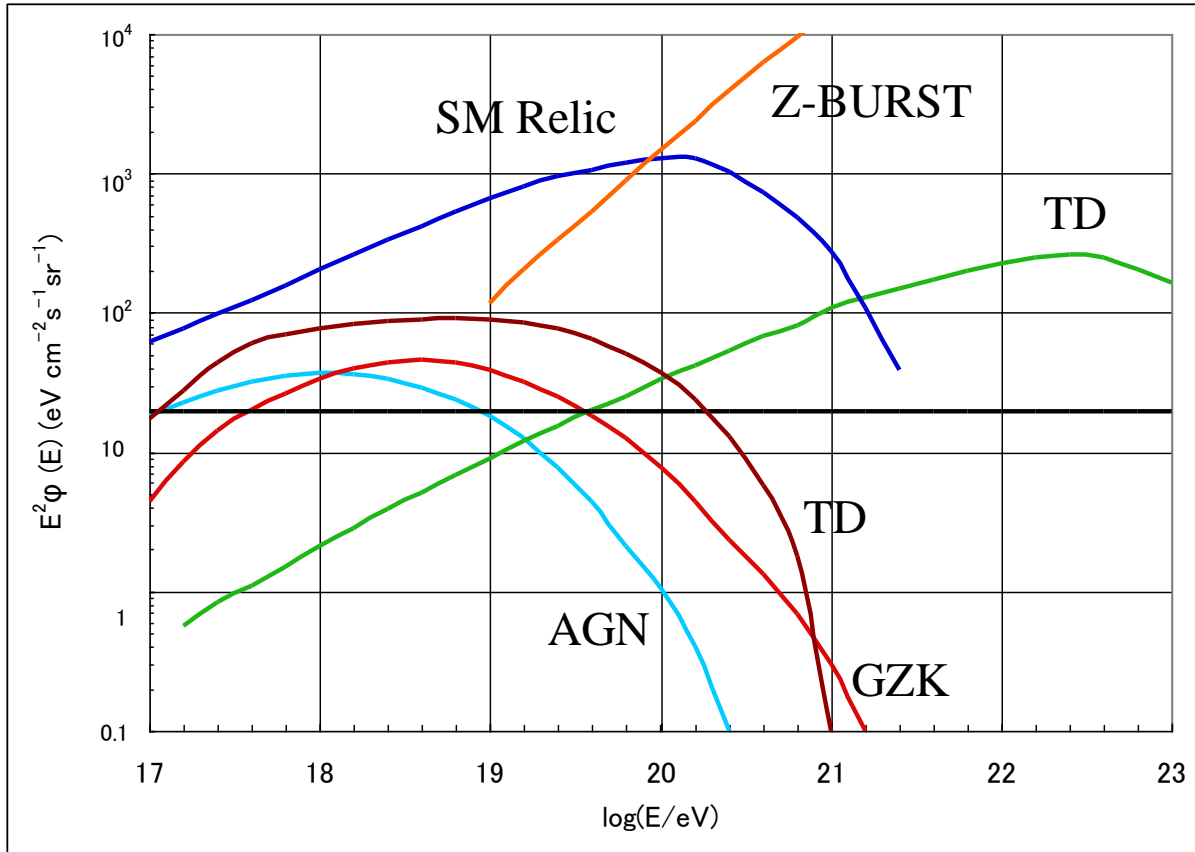
Top down

- **SHR / TD as CDM in top-down process**

(Berezinsky et al. 1998: $X \rightarrow \text{UHECRs etc.}$)

(cosmic strings, monopoles.. Sigl et al. 1999)

ニュートリノフラックス



UHEニュートリノ検出のために

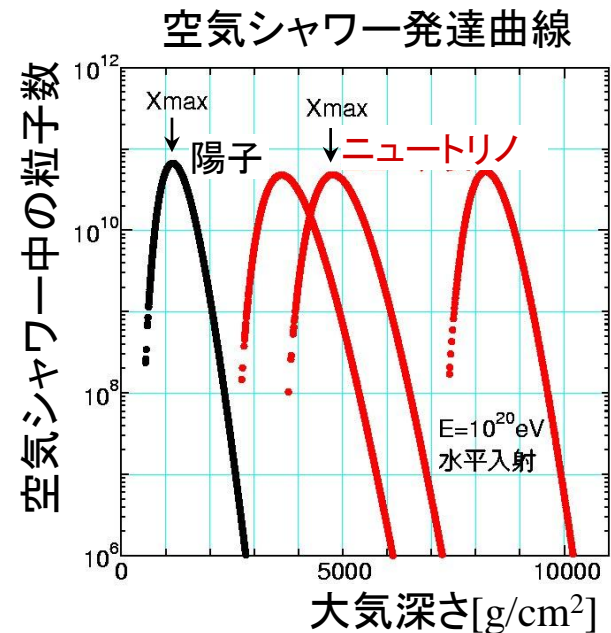
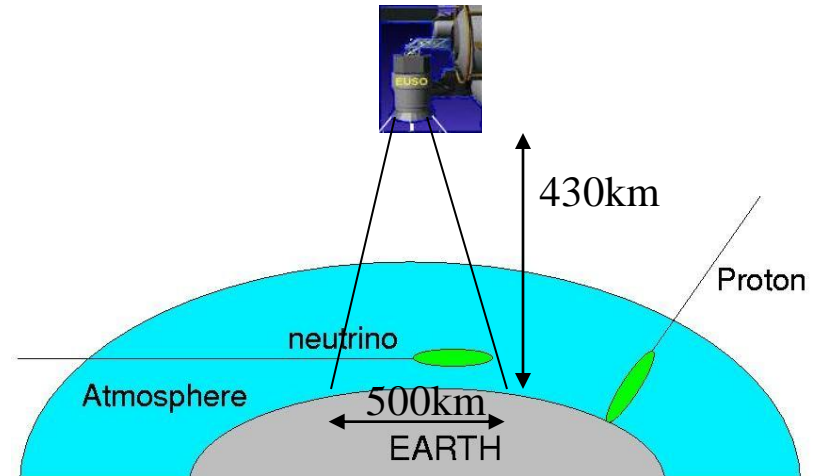
- 相互作用確率が小さいため、
大観測領域が必要=大きなtarget mass

→ JEM-EUSO実験=1.6Tton
TUS実験=0.06Tton

- 空気シャワー現象を観測
(水平・上向き入射現象も)

- ニュートリノ識別

→ シャワー最大発達深さ
(X_{max})の違い
LPM AS profile ($>10^{20}$ eV)



JEM-EUSOミッションの主な目的

- **極限エネルギー粒子による新天文学**
 - 異方性や起源天体の確認
 - 起源天体からのエネルギースペクトルの確認
 - GZK過程の最終確認
- **極限的エネルギー宇宙ニュートリノの検出と余剰次元理論への制限**
- **大型ハドロン衝突型加速器(LHC)を超えるエネルギーでの新物理の探求**
- **大気圏発光現象の研究**

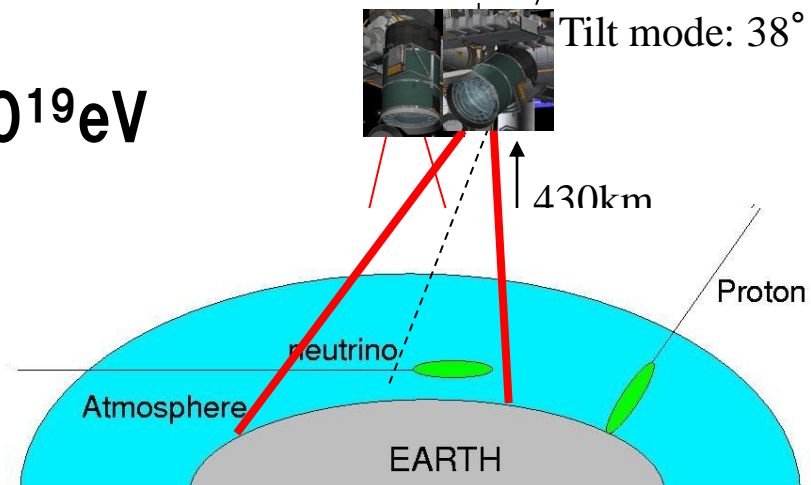
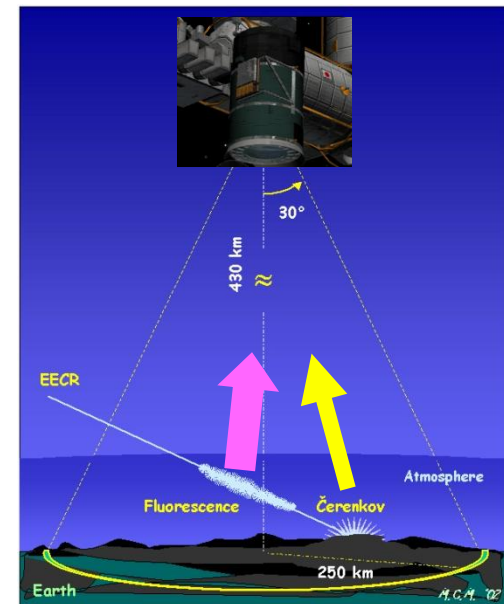
UHE- ν detection by JEM-EUSO

JEM-EUSO Telescope

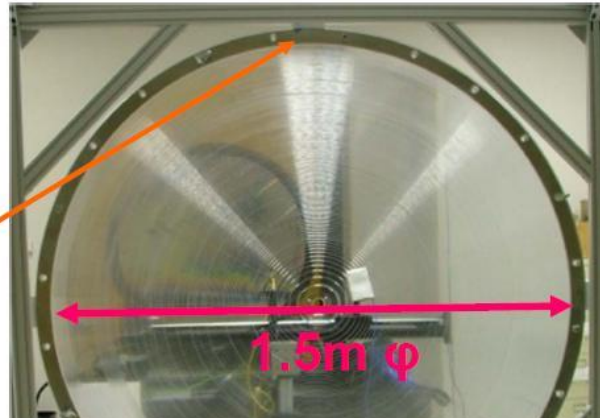
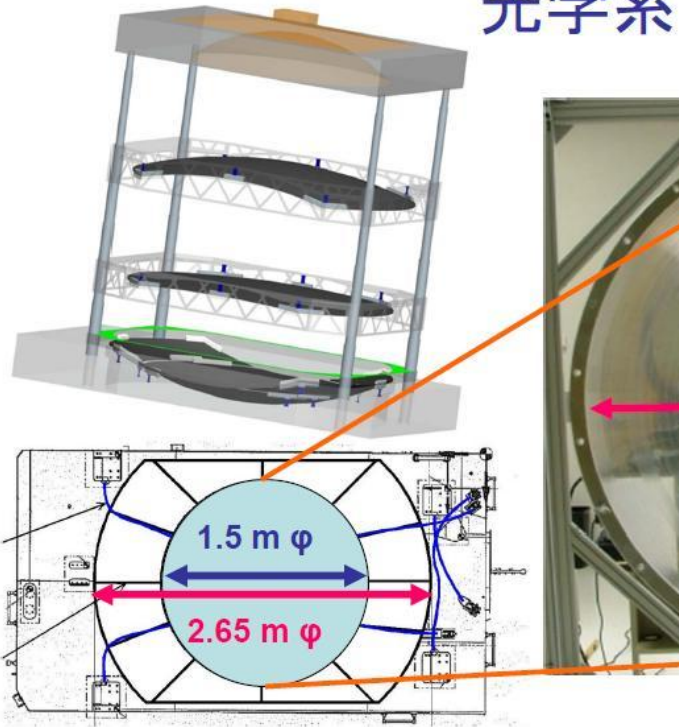
- Altitude : 430km
- Aperture : 2.65m side-cut
- F.O.V : $\pm 30^\circ$ (500x340km)
- Angular res.: 0.1°
- Time unit : $2.5 \mu\text{s}$
- Acceptance : $7.6 \times 10^5 \text{km}^2 \text{sr}$ (nadir)
 $5.1 \times 10^6 \text{km}^2 \text{sr}$ (Tilt 38°)
- Period : 5 years
- Threshold (50% trigger) : $3 \times 10^{19} \text{eV}$

JEM/EF 第2期ポート占有利用ミッション候補としてPhase Aを3年間継続。今年3月にシステム要求審査を受ける予定。

• 打ち上げは2016年以降を予定。

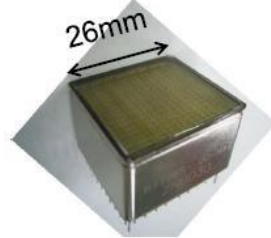


光学系

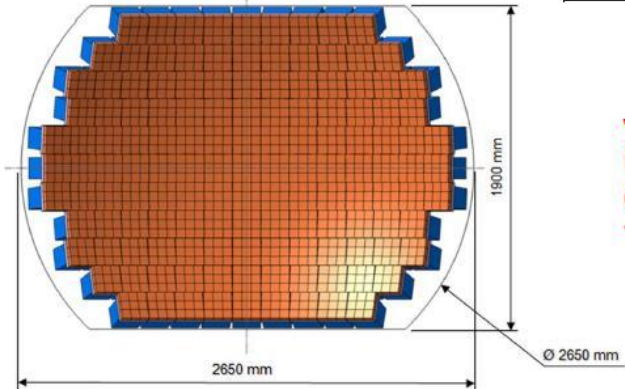


焦点面検出器

MAPMT (8x8 pixels)



Focal Surface detector

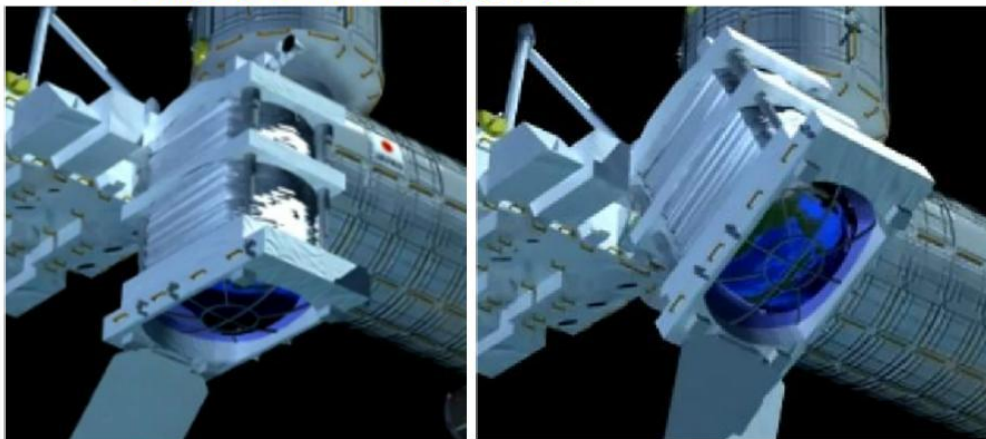


Detector Size	2.65 m x 1.9 m
Photo-detector	64ch MAPMT
Pixel size	3 mm
No. of MAPMTs	~5,000
No. of pixels	~3x10 ⁵
Sampling time	2.5 μs

JEM-EUSO検出器は連続的にフォトンカウンティングができる超高速の大型紫外線デジタルビデオカメラである。

JEM-EUSOの観測モード

2016年以降に打ち上げ、国際宇宙ステーションの外部プラットフォームに装着予定。



Vertical Mode

Tilted Mode

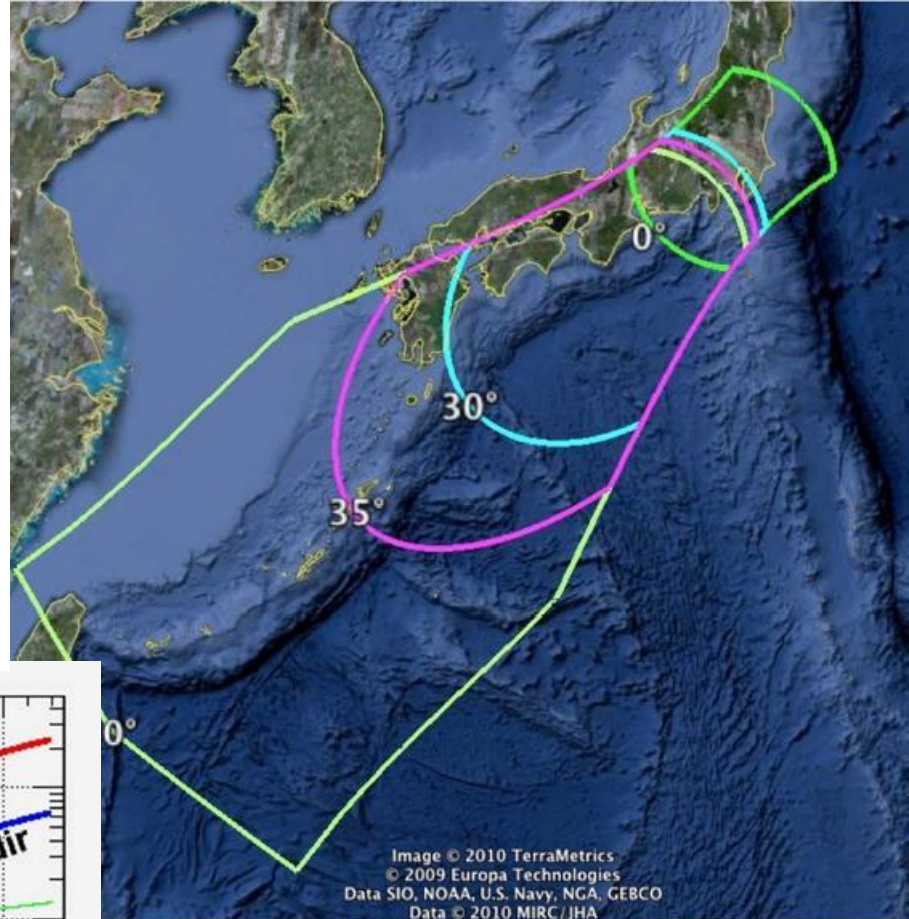
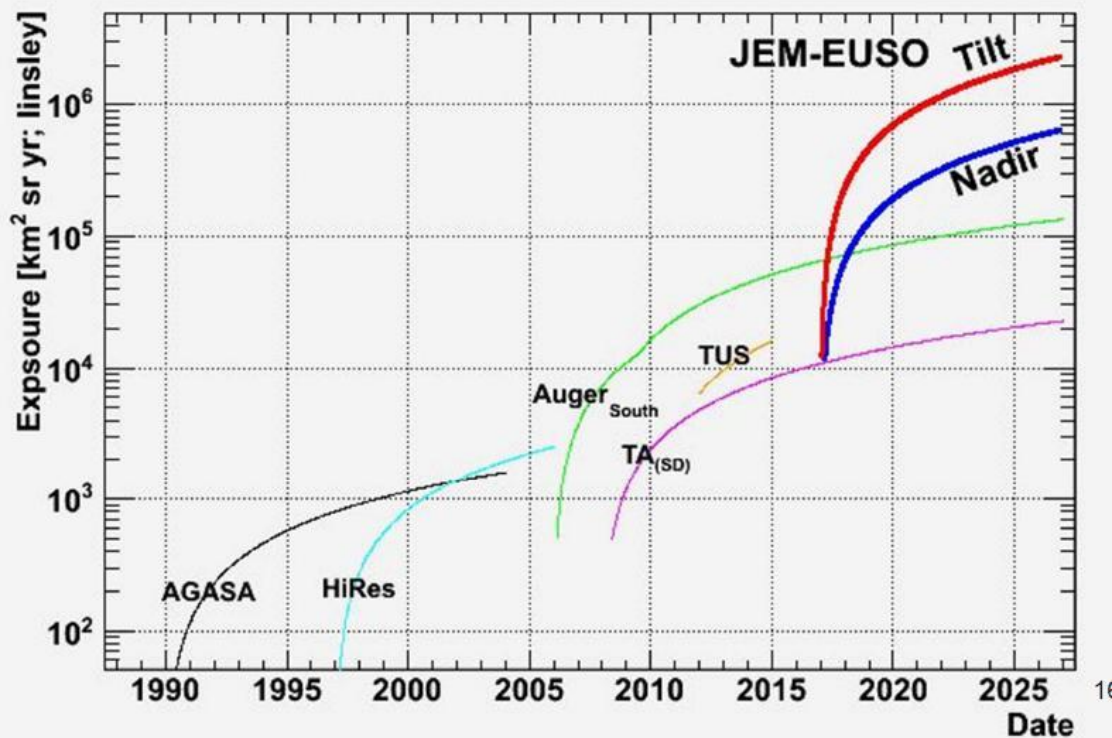


Image © 2010 TerraMetrics
 © 2009 Europa Technologies
 Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
 Data © 2010 MIRC/JHA

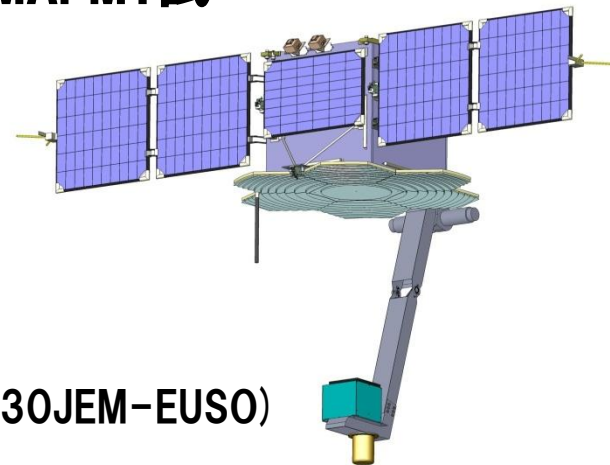


TUS実験

as MSU Space Project «Lomonosov»
D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics MSU
2011.Nov. 打ち上げ予定

JEM-EUSO との協力関係の中で、背景光測定、MAPMT試験等、パイロット的な意義を持つ。

- ・ 高度 : $550 \pm 10 \text{ km}$
- ・ ミラー径: 1.8 m (1.68 m^2)
- ・ 視野角 : $\pm 4.5^\circ$ 5000 km^2 (1/30 JEM-EUSO)
- ・ 角度分解能: 10 mrad ($16 \times 16 \text{ PMTs}$)
- ・ GTU : $0.8 \mu \text{ s}$
- ・ Acceptance: $4.2 \times 10^4 \text{ km}^2 \text{ sr}$ (1/20 JEM-EUSO)
- ・ 観測期間: 5年
- ・ エネルギー下限値: $5 \times 10^{19} \text{ eV}$



ニュートリノシミュレーションのプロセス

入力パラメータ
・エネルギー
・天頂角、方位角

Interaction point計算
+
大気中での相互作用イベント判定

●ニュートリノ散乱断面積

$$\sigma(\nu N) = 5.53 \times 10^{-36} (E_\nu / 1\text{GeV})^{0.363} [\text{cm}^2]$$

[R.Gandhi et al.Phys.Rev.D58(1998)]

●ニュートリノ相互作用長

$$L_{\text{int}}(E_\nu) = 1 / (\sigma_{\nu N}(E_\nu) N_A) [\text{cm we}]$$

N_A : アボガドロ数($6.0221367 \times 10^{23} [\text{mol}^{-1}]$)

大気中で相互作用したイベントの
・エネルギー
・Interaction point

空気シャワー
ジェネレータ

シャワー
データベース

・シャワープロファイルの決定
・荷電粒子による光子の生成
・検出器に到達する光子の計算

・シャワーの情報
・検出器に到達する光子の情報

シャワー中二次粒子の縦方向発達・横方向分布データ

Scat. Cross Section & Mean Free Path

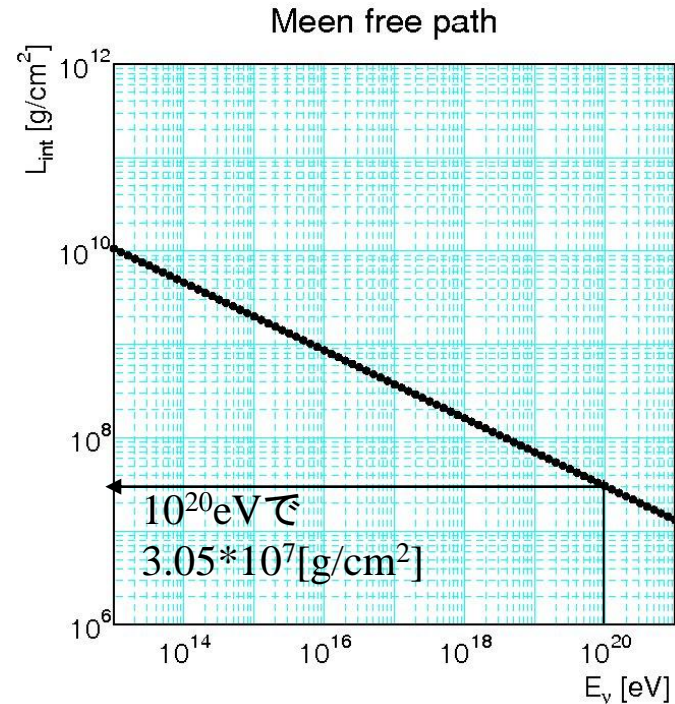
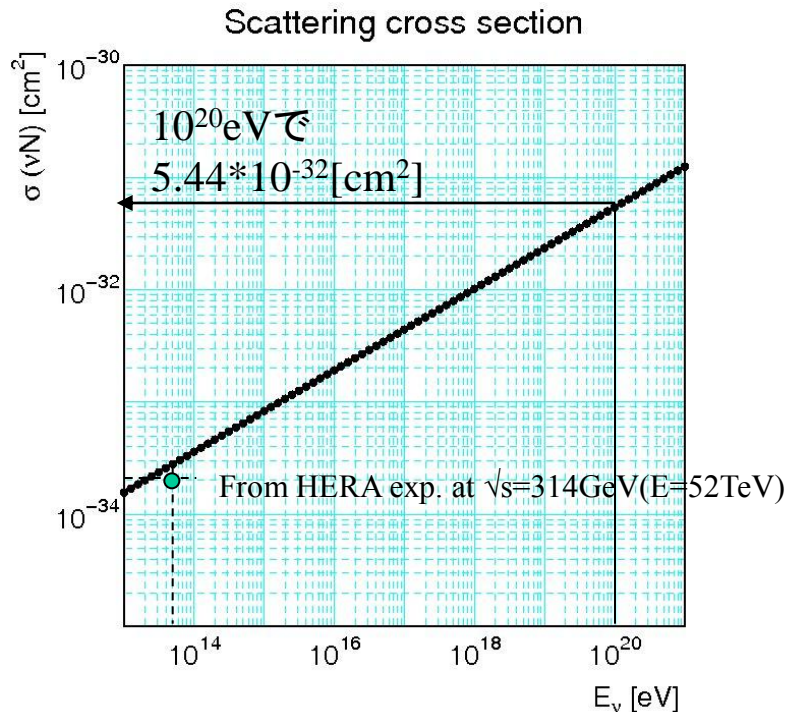
- Scattering cross section [R.Gandhi et al.Phys.Rev.D58 093009 (1998)]

$$\sigma_{cc}(\nu N) = 5.53 \times 10^{-36} (E_\nu / 1 \text{ GeV})^{0.363} [\text{cm}^2]$$

- Mean free path

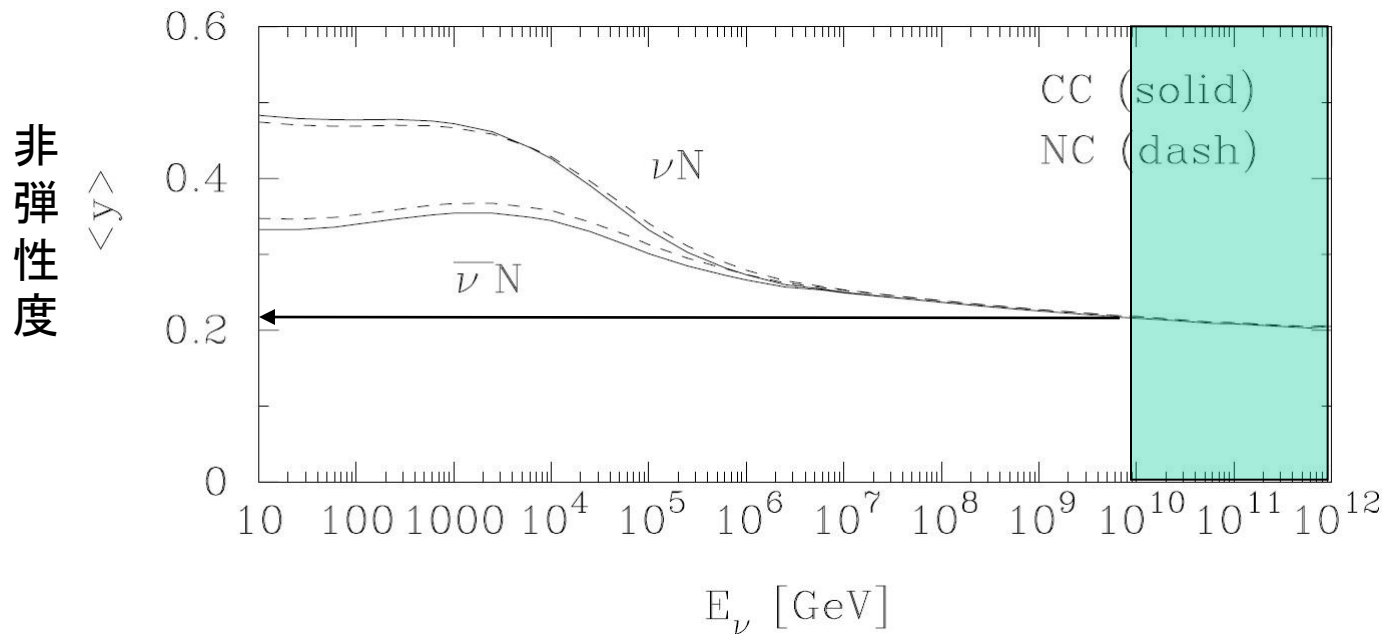
$$L_{\text{int}}(E_\nu) = 1 / (\sigma_{cc}(\nu N) \cdot N_A) [\text{g/cm}^2]$$

(N_A : Avogadro number ($6.0221367 \times 10^{23} [\text{mol}^{-1}]$))



エネルギー分配

$\nu_e + N \rightarrow e^- + \text{anything}$



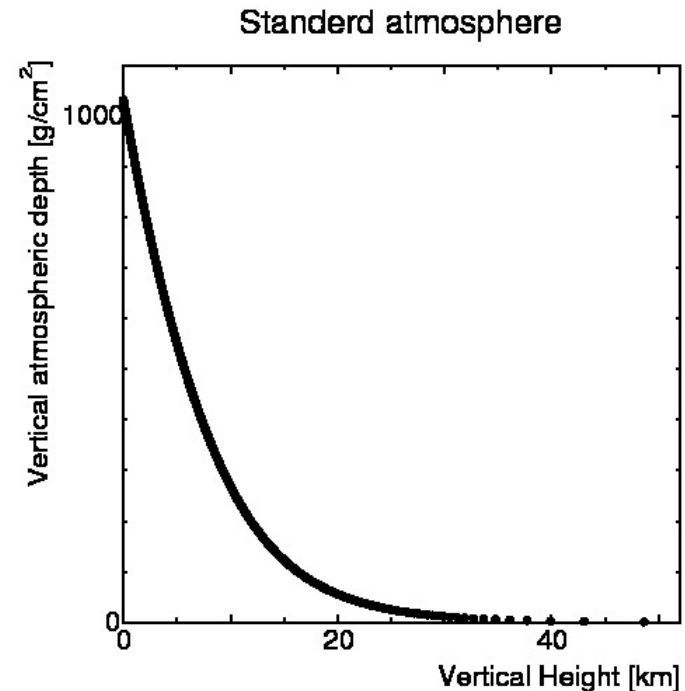
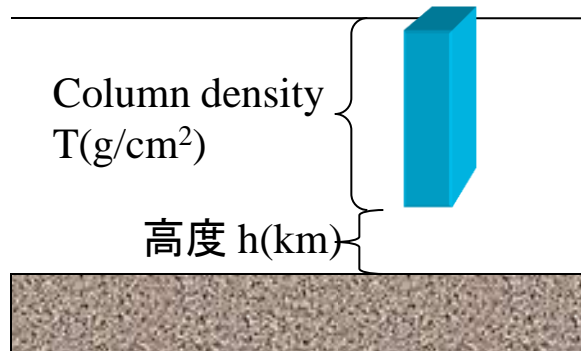
[R.Gandhi et al. Astropart. Phys.5 (1996) 81]

大気モデル

US standard atmospheric model

$$\begin{aligned} h \text{ (km)} &= 47.05 - 6.9 \ln(T) + 0.299 (\ln(1/10 \times T))^2 & T < 25 \text{ g/cm}^2 \\ &= 45.5 - 6.34 \ln(T) & 25 < T < 230 \text{ g/cm}^2 \\ &= 44.34 - 11.861 (T)^{0.19} & T > 230 \text{ g/cm}^2 \end{aligned}$$

h : 海面レベルからの高度 [km]
T : 大気 Top からの垂直方向の
大気深さ [g/cm²]



Earth density

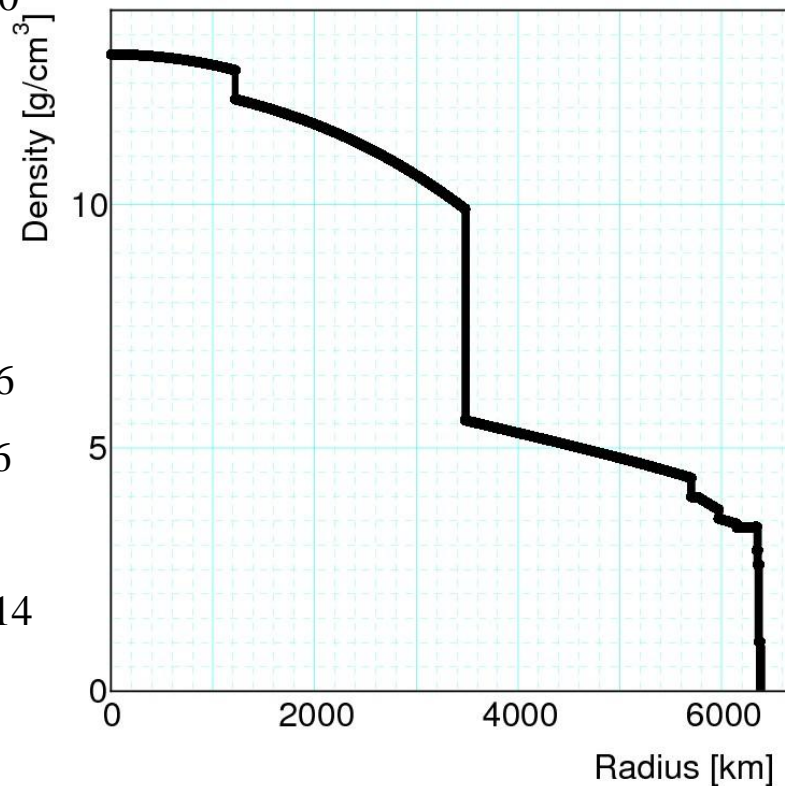
$$\rho(r) = \begin{cases} 13.0885 - 8.8381x^2 & r \leq 1221.5 \\ 12.5815 - 1.2638x - 3.6426x^2 - 5.5281x^3 & 1221.5 < r \leq 3480 \\ 7.9565 - 6.4761x + 5.5283x^2 - 3.0807x^3 & 3480 < r \leq 5701 \\ 5.3197 - 1.4836x & 5701 < r \leq 5771 \\ 11.2494 - 8.0298x & 5771 < r \leq 5971 \\ 7.1089 - 3.8045x & 5971 < r \leq 6151 \\ 2.691 + 0.6924x & 6151 < r \leq 6346.6 \\ 2.9 & 6346.6 < r \leq 6356 \\ 2.6 & 6356 < r \leq 6368 \\ 1.02 & 6368 < r \leq 6378.14 \end{cases}$$

$$x = r/R_e$$

r: 地球中心からの距離[km]

R_e: 地球半径[km]

Earth Density



["Earth Structure, Global" David E. James
(Van Nostrand Reinhold, New York, 1989)]

電磁カスケードシャワー

- ・ 電磁シャワーの基礎過程は制動輻射と対生成。この断面積はBethe-Heitlerによって計算された(1934年)。

- ・ 制動輻射: $W_r dv \cong \frac{dv}{3v} \{v^2 + 2[1 + (1 - v^2)]\}$

- ・ 対生成: $W_p du \cong \frac{du}{3} \{1 + 2[u^2 + (1 - u)^2]\}$

v は入射電子と輻射光子のエネルギーの比: $v = E_\gamma / E_e$

u は入射光子と生成電子のエネルギーの比: $u = E_e / E_\gamma$

LPM効果

- ・ **制動輻射、対生成における物質密度効果の事で、入射電子（光子）が制動輻射（対生成）を起こす場合、物質密度が大きくなる、又は、入射エネルギーが高くなると、その電子（光子）は一つ一つの原子と相互作用するというより原子の塊全体と相互作用することを考慮しなければならない。すなわち制動輻射（対生成）をする以前に原子全体として見立てた多重散乱が起きる。その結果電子が同じエネルギーを失うためには長い距離走ることになる。**

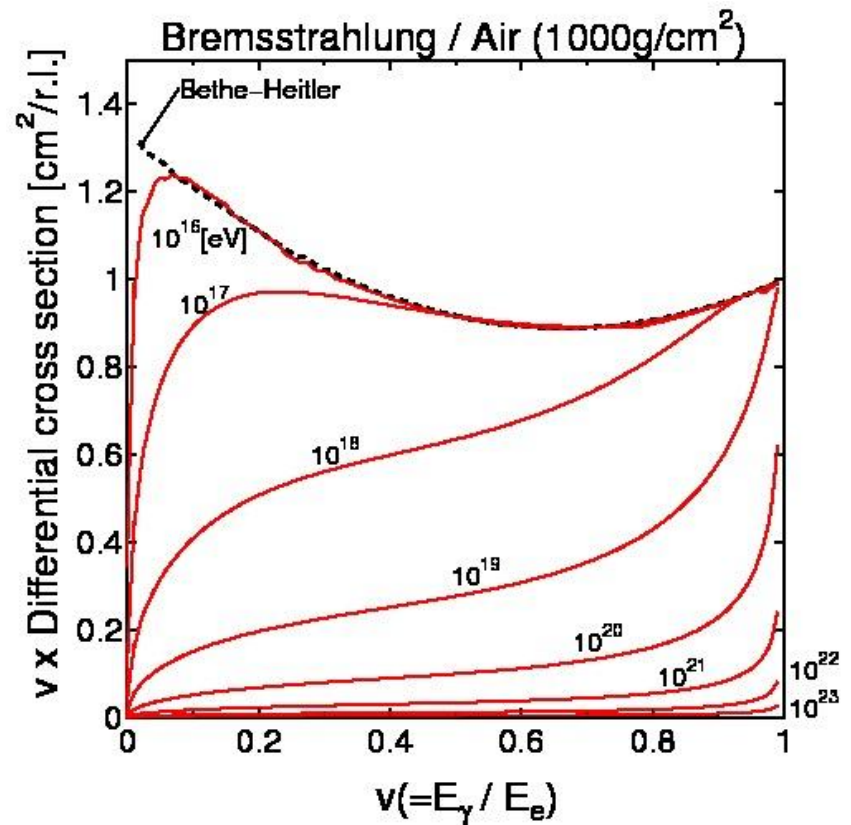
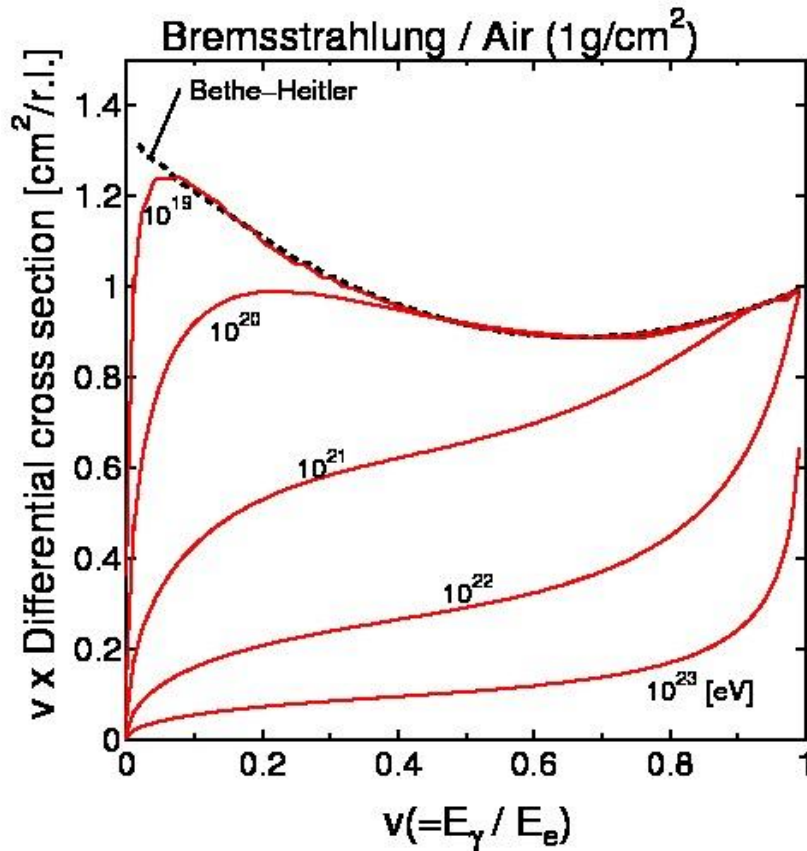
LPM効果の断面積

- 制動輻射: $W_r dv = \frac{\xi(s) dv}{3v} \{v^2 G(s) + 2[1 + (1-v)^2] \Phi(s)\}$ $s = 1.38 \times 10^3 \left[\frac{vt_0}{p_0(1-v)\xi(s)} \right]^{\frac{1}{2}}$
- 対生成: $W_u du = \frac{\xi(\bar{s}) du}{3} \{G(\bar{s}) + 2[u^2 + (1-u)^2] \Phi(\bar{s})\}$ $\bar{s} = 1.38 \times 10^3 \left[\frac{t_0}{k_0 u(1-u)\xi(\bar{s})} \right]^{\frac{1}{2}}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi(s) = 6s - 6\pi s^2 + 24s^3 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{(s+l)^2 + s^2} \\ G(s) = 12\pi s^2 - 48s^3 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{(s+l-1/2)^2 + s^2} \\ \xi(s) = \begin{cases} 2 & s < s_1 \\ 1 + \frac{\ln(1/s)}{2 \ln\left(190Z^{-\frac{1}{3}}\right)} & s_1 \leq s \leq 1 \\ 1 & 1 < s \end{cases} \quad s_1 = \left(Z^{\frac{1}{3}} / 190 \right)^2 \end{array} \right.$$

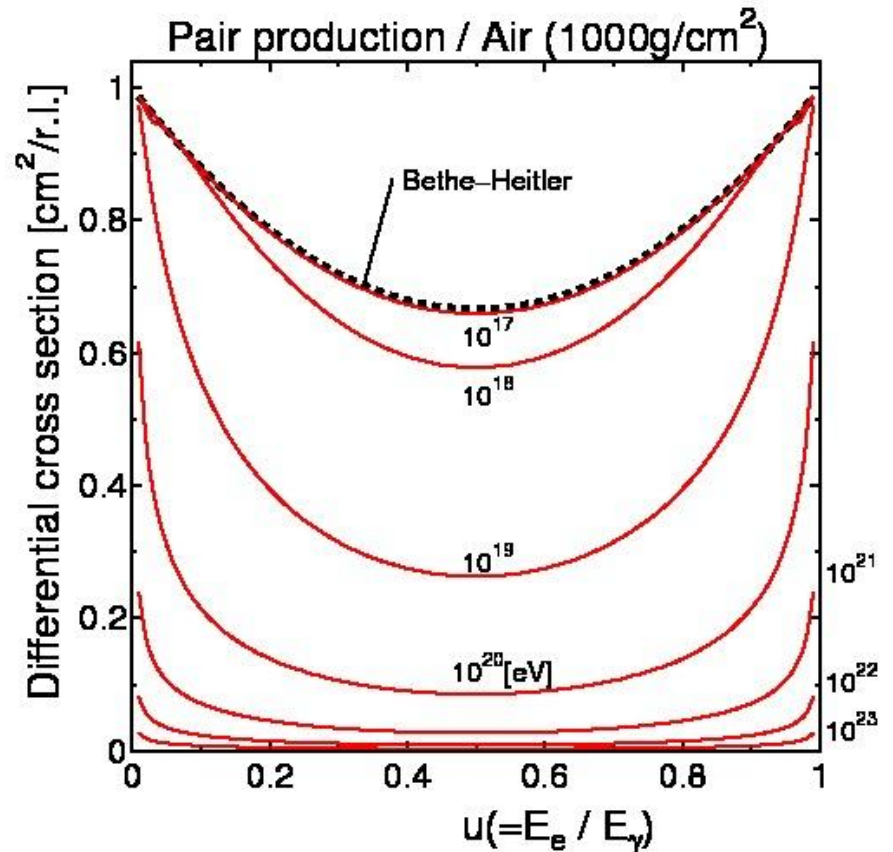
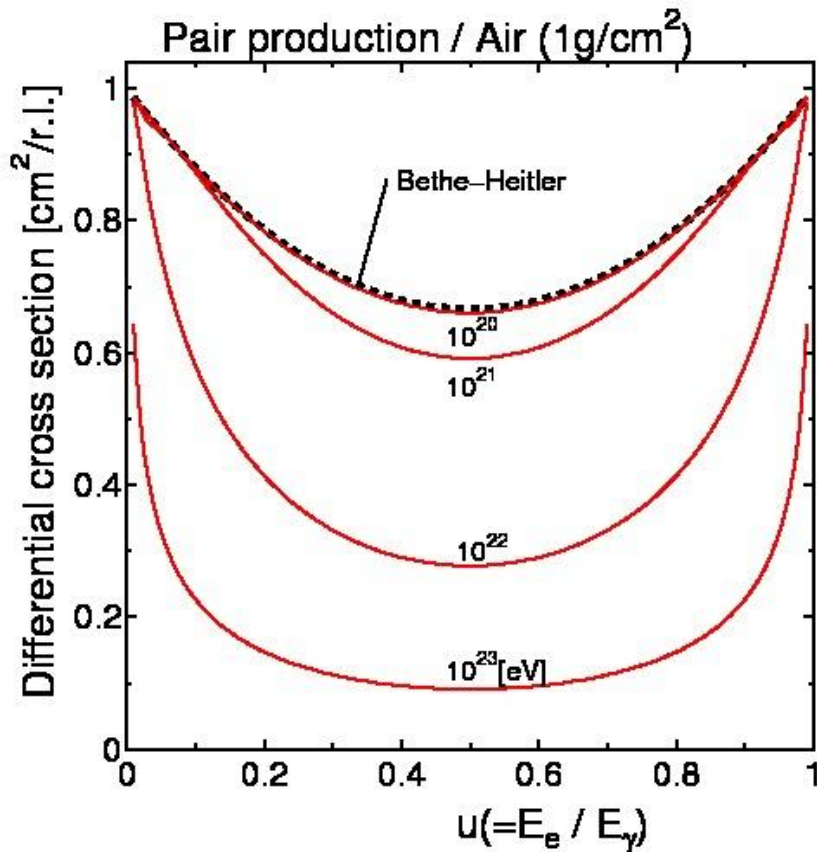
t_0 : radiation length [cm]
 p_0 : 入射電子のエネルギー
 k_0 : 入射ガンマのエネルギー

LPM効果の影響 (制動輻射の微分断面積)



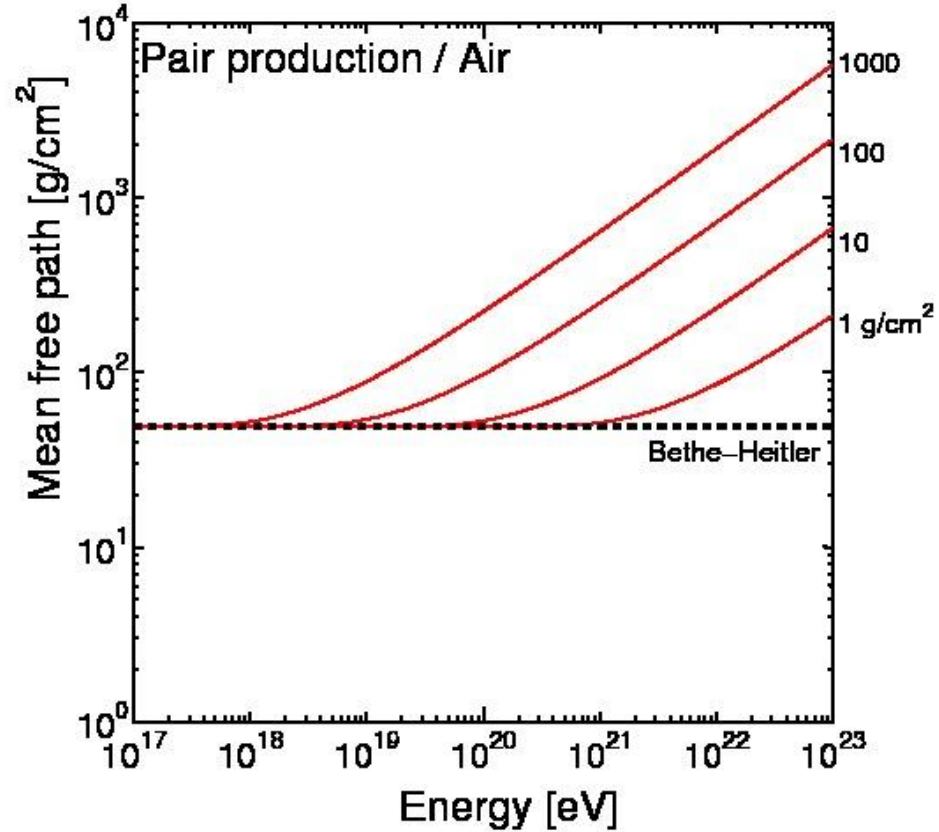
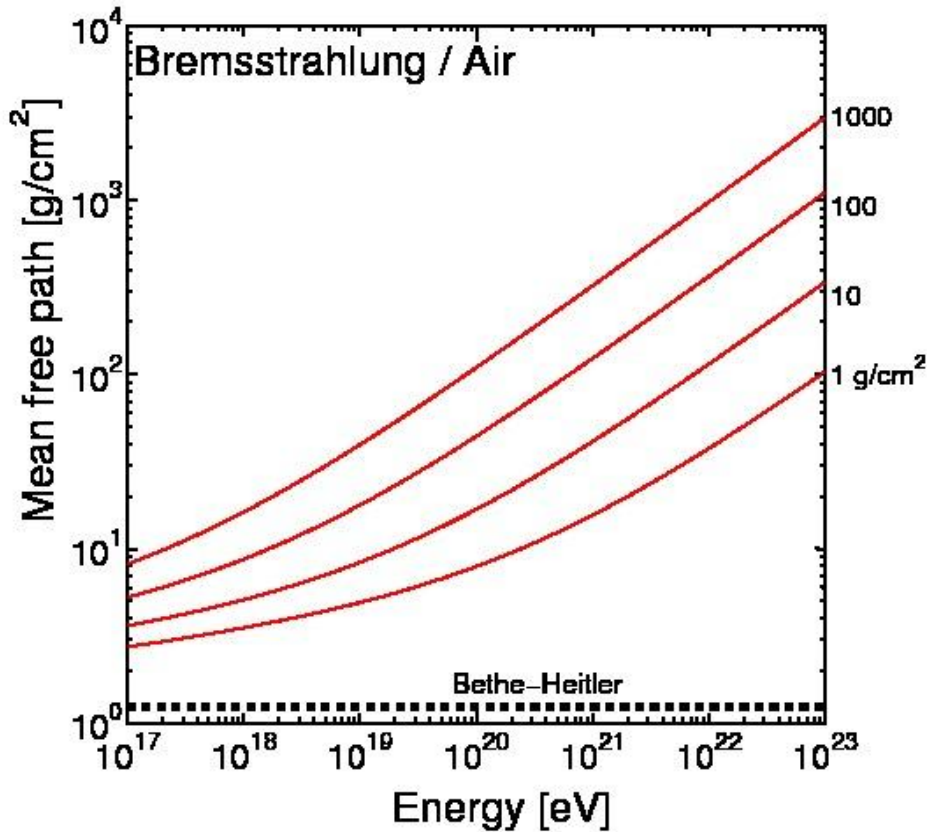
密度が高くなるに従ってLPMが効き始めるエネルギーが低くなる→
断面積が小さくなる

LPM効果の影響 (対生成の微分断面積)



密度が高くなるに従ってLPMが効き始めるエネルギーが低くなる→
断面積が小さくなる

LPM効果の影響 (平均自由行程)

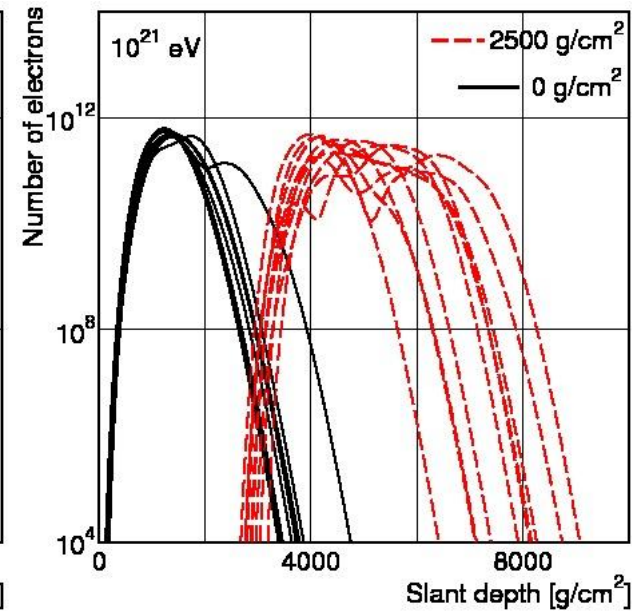
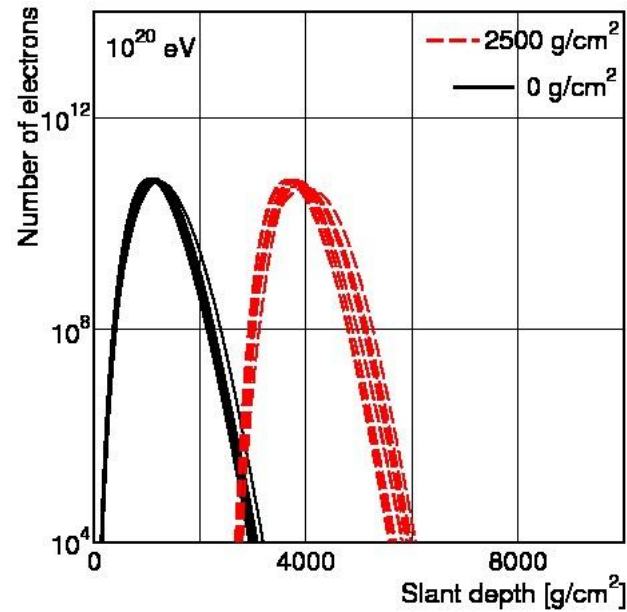
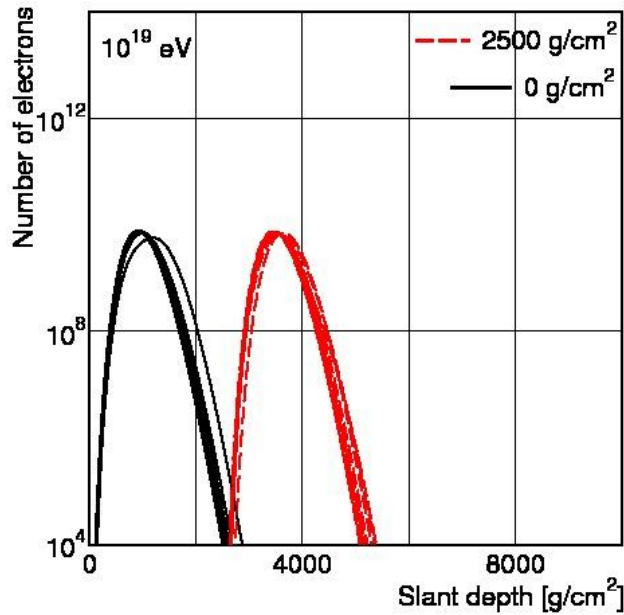


微分断面積が小さくなる→平均自由行程が長くなる

同じEnergyでは密度が高くなるに従って平均自由行程が長くなる

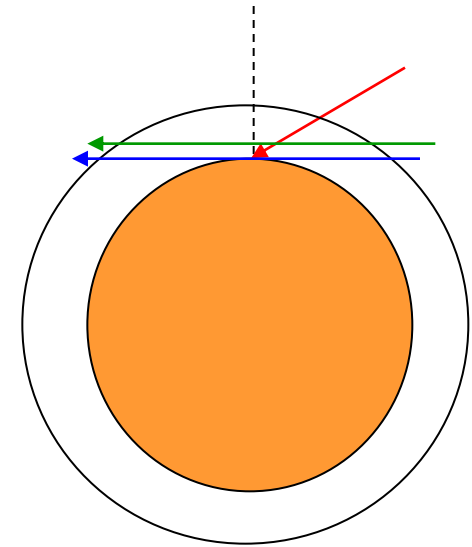
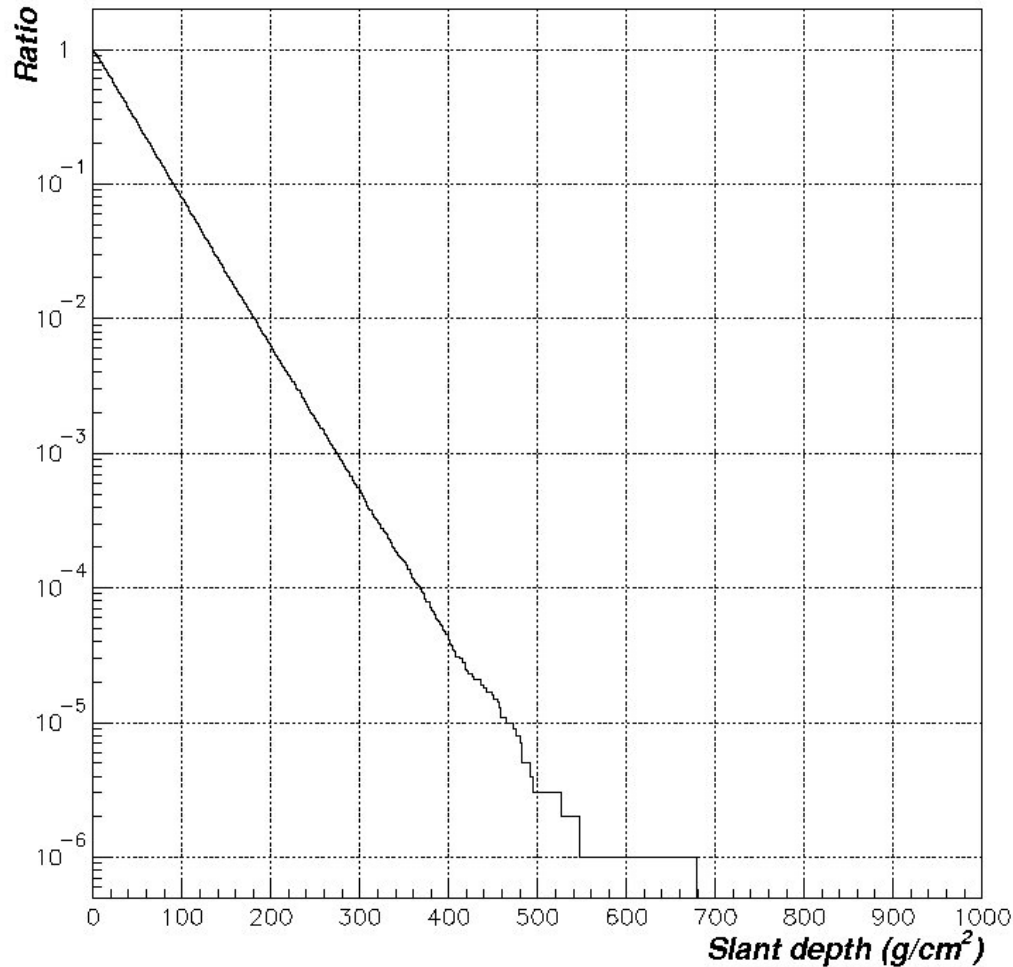
同じ密度の所ではEnergyと共に平均自由行程が長くなる

電磁(電子入射)シャワー (大氣中)



通過高度10km
 $\theta=90^\circ$

Distributions of F.I.D



Mean free path (g/cm^2)

$10^{19.5}\text{eV} : 4.6 \times 10^7$

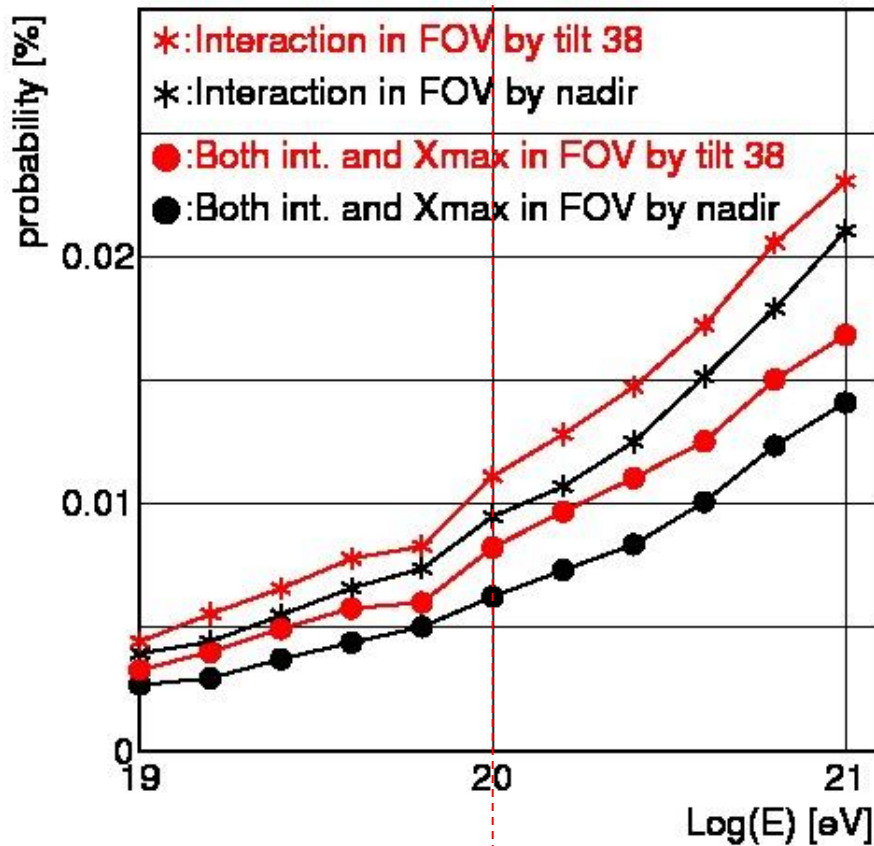
$10^{20.0}\text{eV} : 3.0 \times 10^7$

$10^{20.5}\text{eV} : 2.0 \times 10^7$

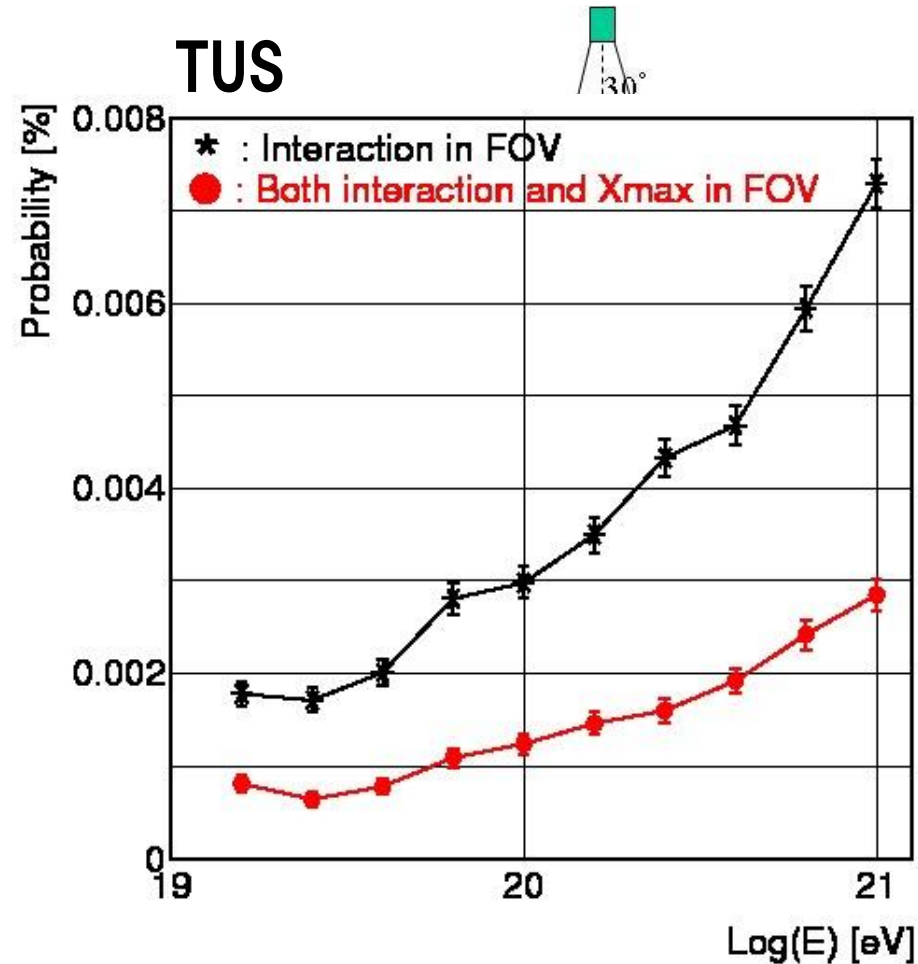
- $E = 10^{19}, 10^{19.5}, 10^{20}$ eV
- 各 10^6 event
- 通過高度 0km
- $\theta = 90\text{deg}$

Interaction Probability in F.O.V.

JEM-EUSO

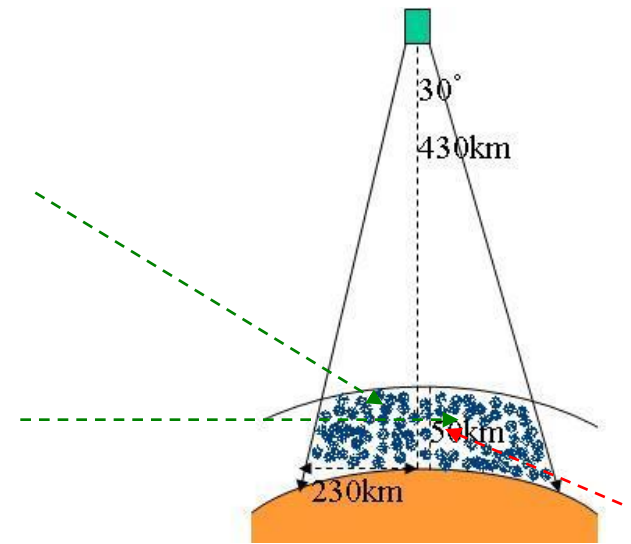


TUS

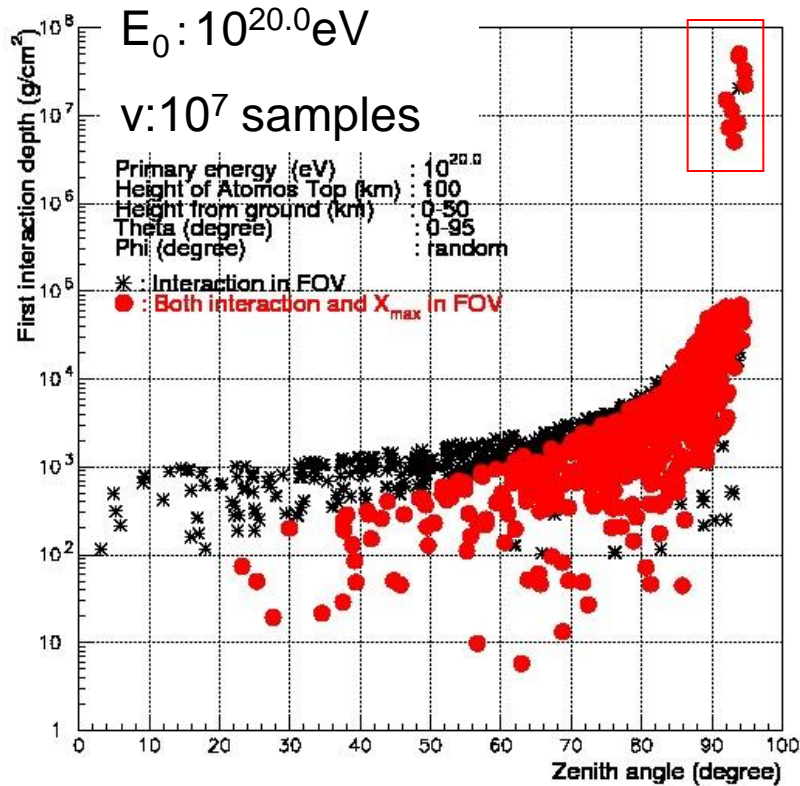


in 1M (Nadir) v of 10^{20} eV

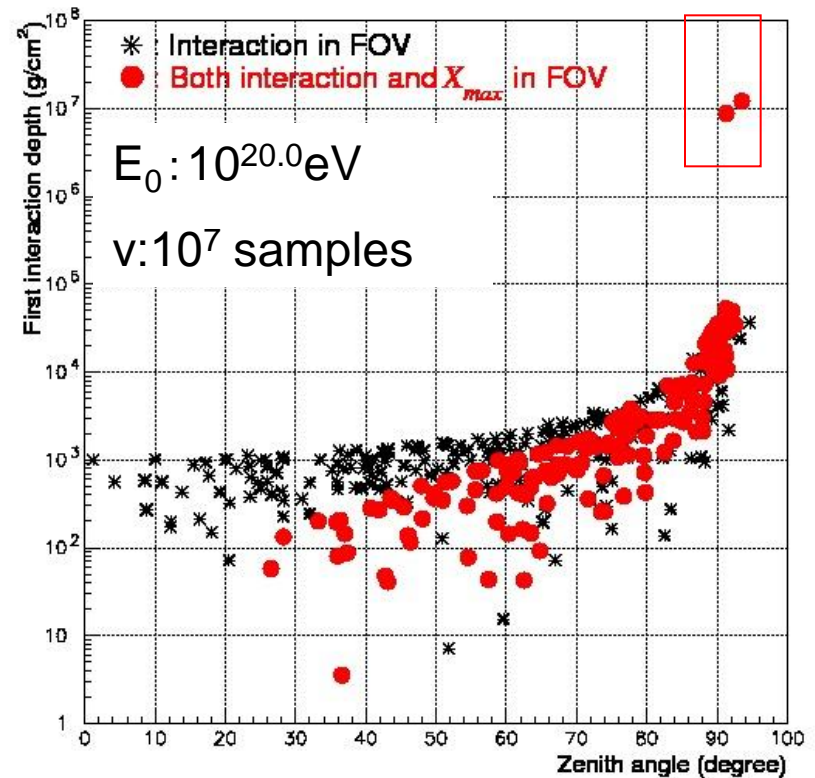
F.I.D vs zenith angle



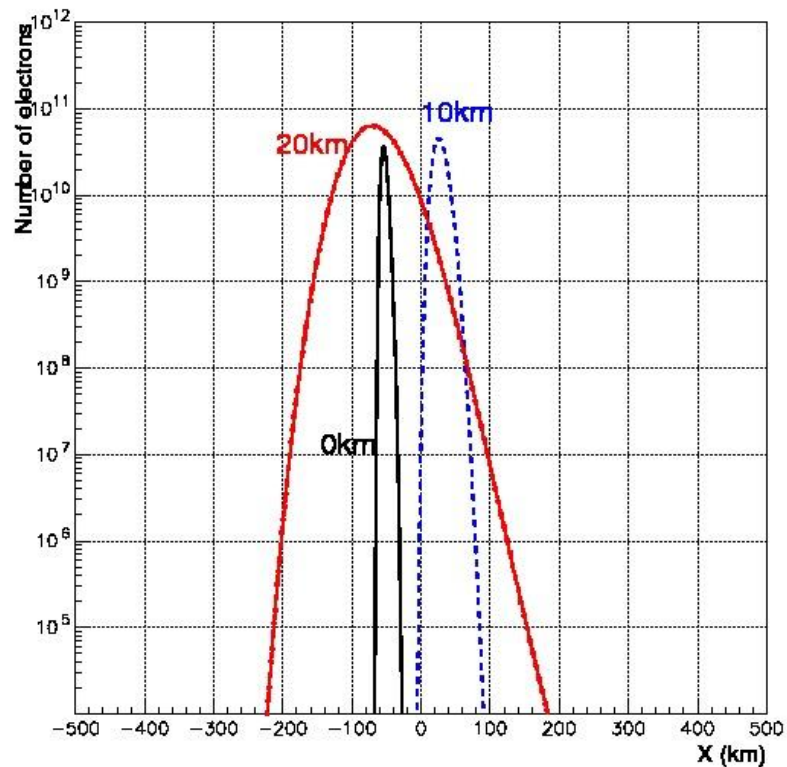
JEM-EUSO



TUS



電磁(電子入射)シャワー 平均profile



・ $E_v = 10^{20} \text{eV}$

・ $\theta = 90^\circ$

・ 100例の平均

・ シャワースタート位置

通過高度 0km:-70km

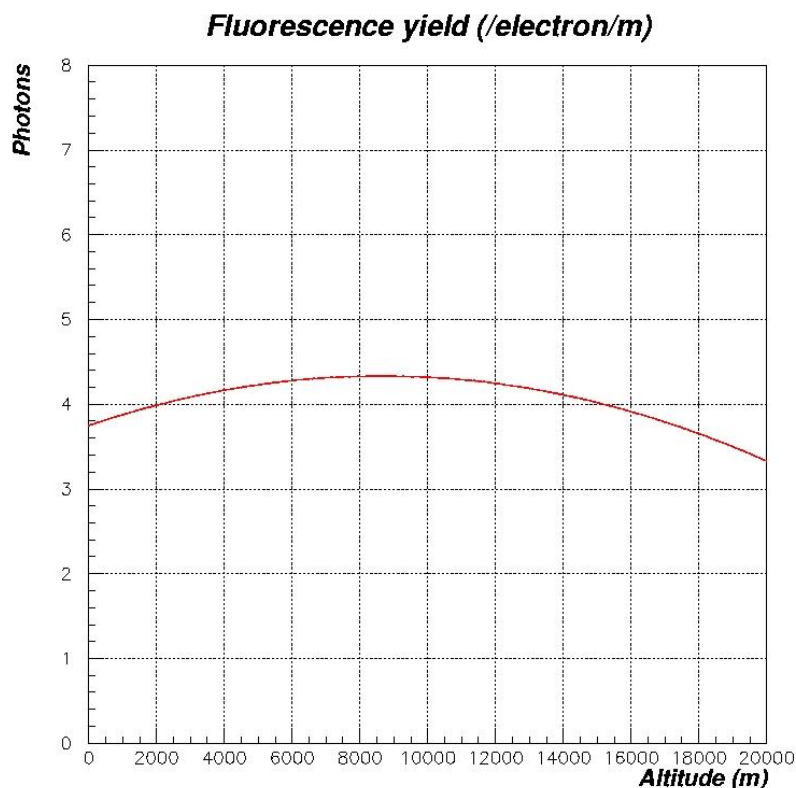
10km:-10km

20km:-220km

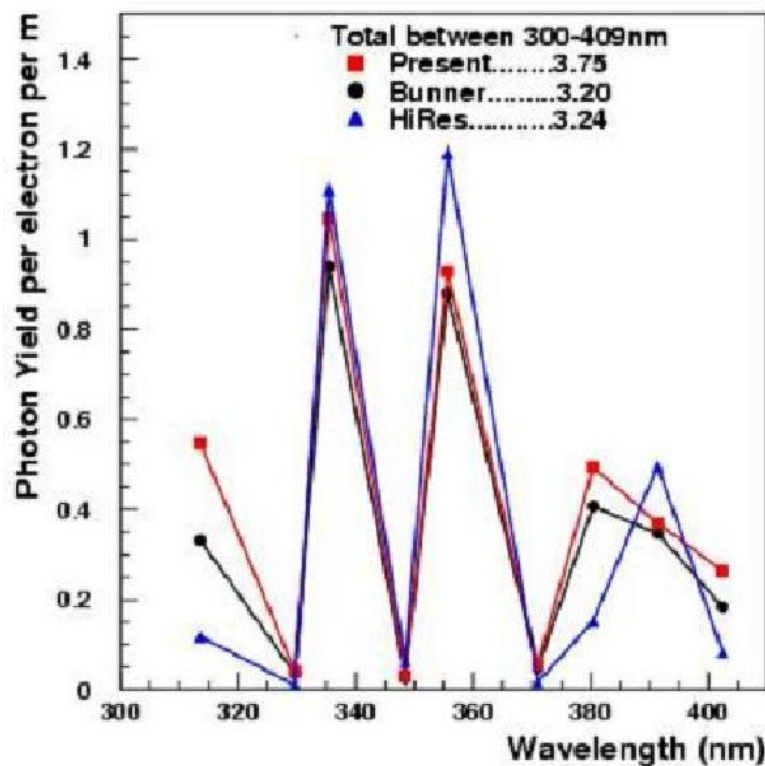
大気シンチレーション光の生成

1電子が1m走ると海面レベルで3.75個の光子を生成

$$N_{fluo}(h) = -7.80 \times 10^{-9} h^2 + 1.35 \times 10^{-4} h + 3.75$$

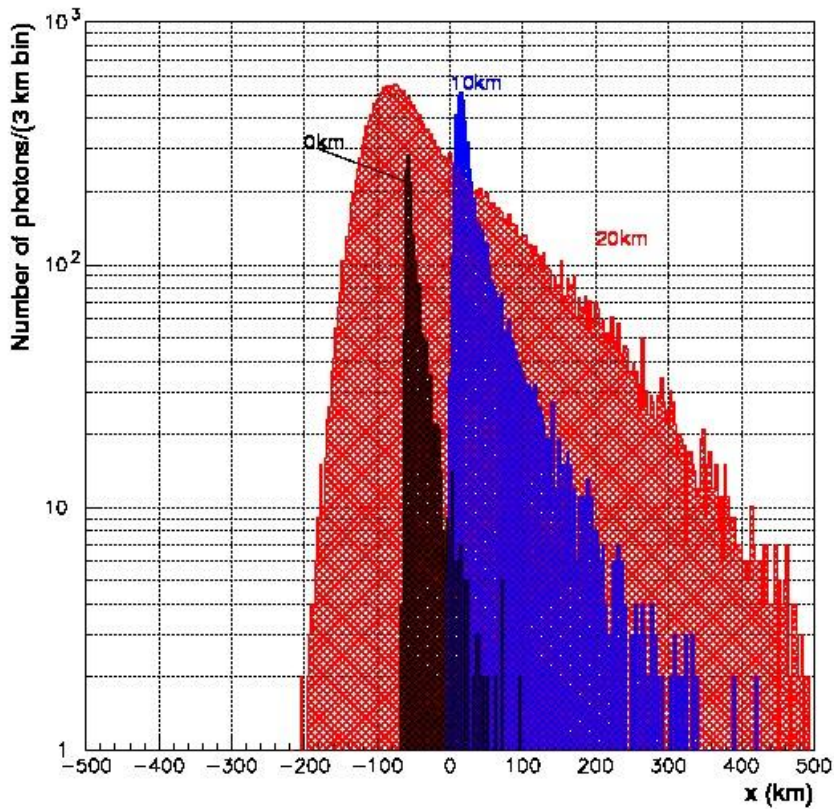


波長分布 Air

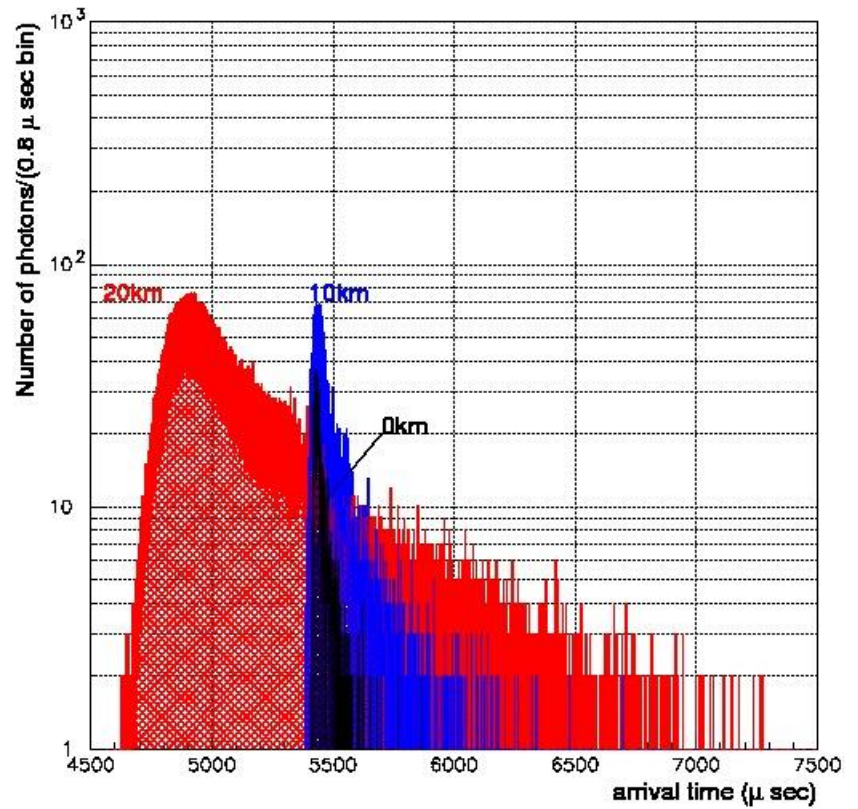


M. Nagano et.al.
Astroparticle Physics 22 (2004) 235

TUSに到達する光子数の分布



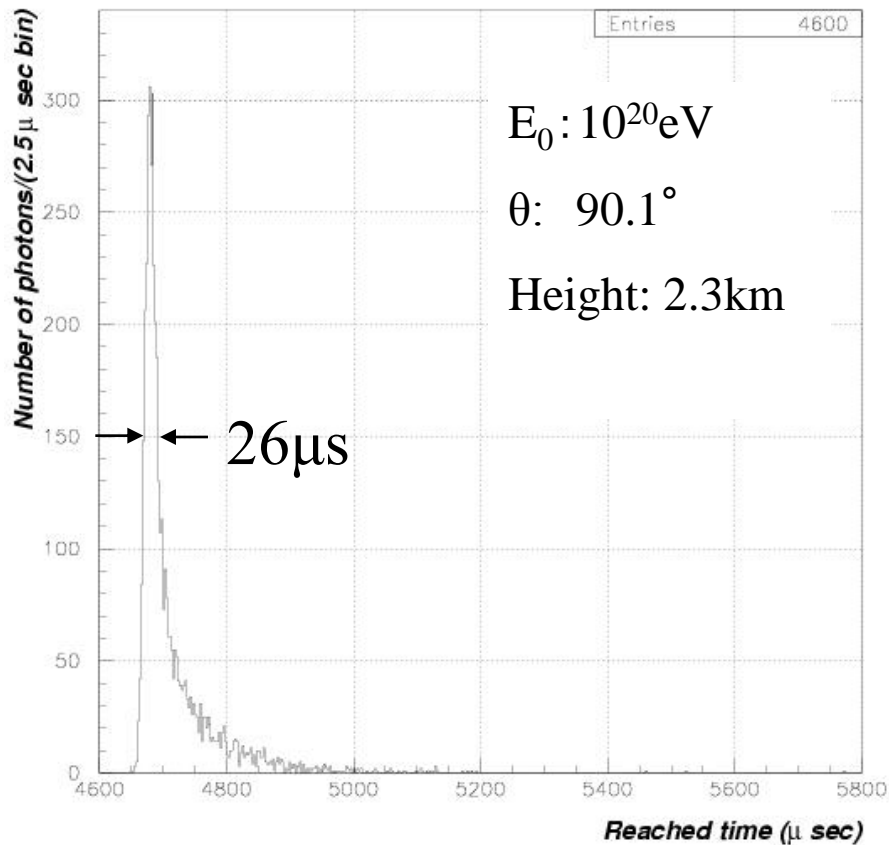
photons vs km



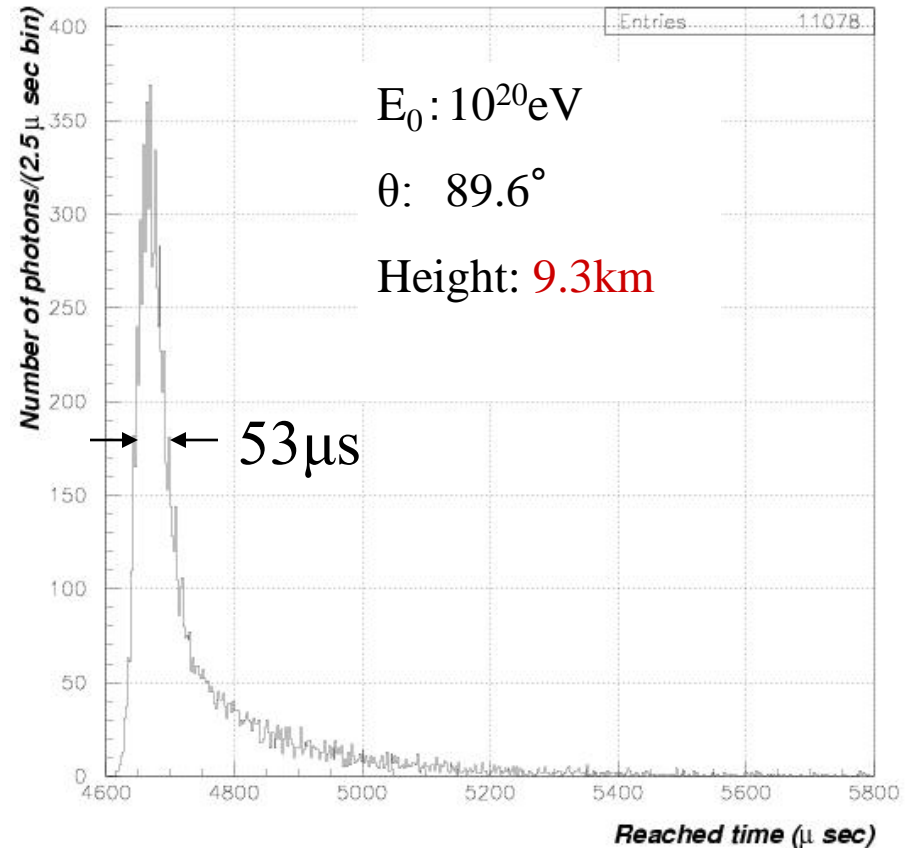
photons vs time

Time Profile of Arrival Photons at JEM-EUSO

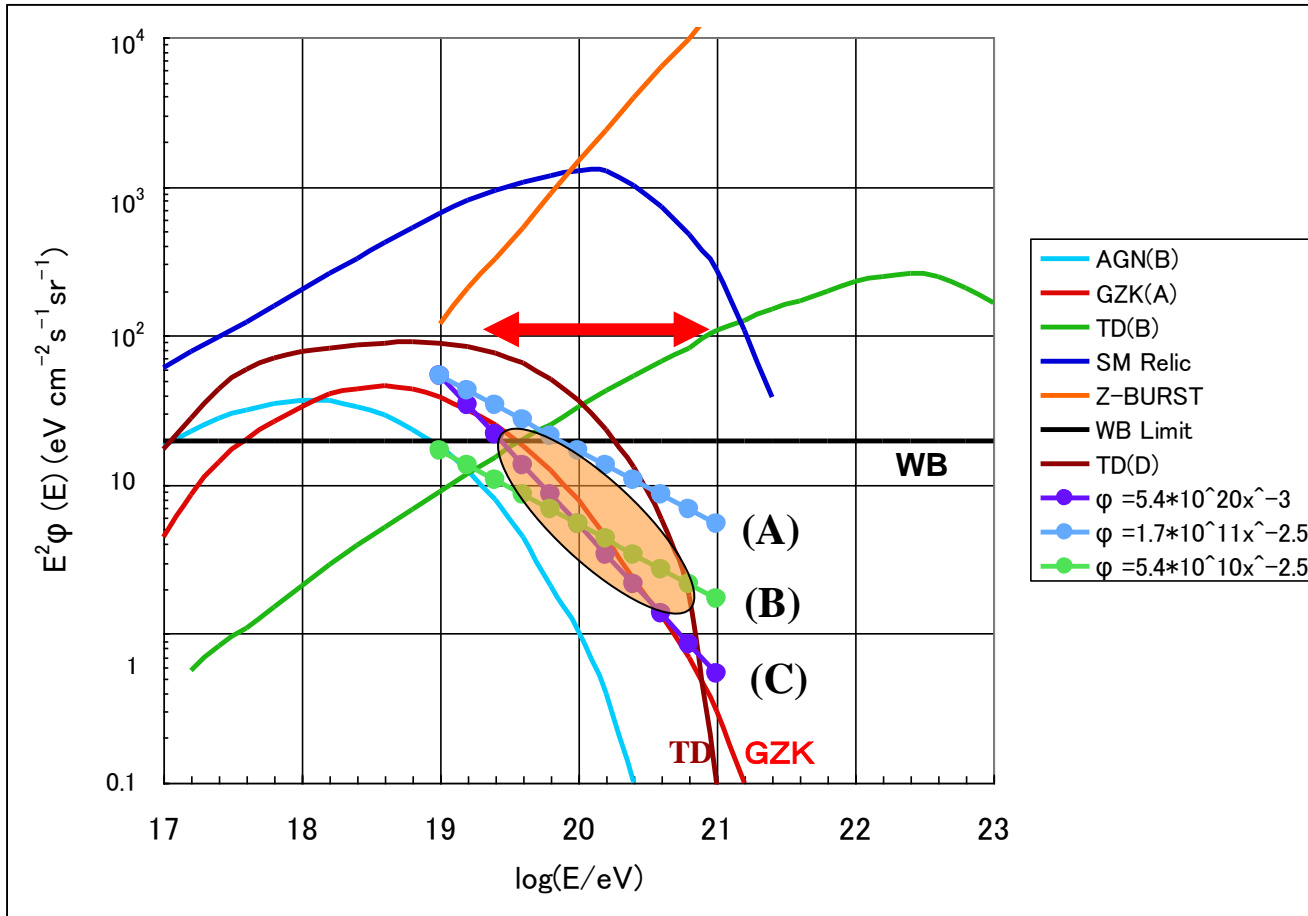
Histogram of photon distribution



Histogram of photon distribution



Assumed ν energy spectrum is a form of $\phi(E) = K \times E^{-\alpha}$.
 for $E > 10^{19} \text{eV}$, $\theta = 0-95^\circ$, obs. Efficiency = 19%.



Waxman-Bahcall limit

Assumed ν E.S.

(A) $\phi = 1.7 \times 10^{11} E^{-2.5}$

(B) $\phi = 5.4 \times 10^{10} E^{-2.5}$

(C) $\phi = 5.4 \times 10^{20} E^{-3}$

nadir	# of incident ν 's in a view [1/yr]			# of ν 's showers in a view [1/yr]		
	Log(Ev)	C	A	B	C	A
>18.9	194494	229985	73054	5.72	10.94	3.10
>19.1	77425	115208	36596	2.72	6.49	1.97
>19.3	30819	57683	18323	1.12	3.59	1.20
>19.5	12264	28853	9165	0.47	2.25	0.66
>19.7	4878	14403	4575	0.35	1.43	0.37
>19.9	1937	7161	2275	0.16	0.69	0.37
>20.1	767	3532	1122	0.08	0.41	0.19
>20.3	301	1712	544	0.08	0.28	0.06
>20.5	115	801	254	0.08	0.09	0.06

Tilt 38	# of incident ν 's in a view [1/yr]			# of ν 's showers in a view [1/yr]		
	Log(Ev)	C	A	B	C	A
>18.9	1312904	1552482	493141	40.17	67.69	24.36
>19.1	522645	777696	247033	19.17	39.12	16.27
>19.3	208037	389383	123686	10.77	25.46	8.68
>19.5	82790	194765	61867	5.78	15.84	5.42
>19.7	32928	97226	30883	3.41	12.11	3.45
>19.9	13077	48340	15355	1.84	7.14	1.68
>20.1	5175	23839	7572	1.31	4.97	0.79
>20.3	2029	11560	3672	0.26	2.79	0.79
>20.5	776	5405	1717	0	1.55	0.19

視野内における年間の到来数と相互作用数

・到来数=

$$\int \phi \times \text{観測領域} \times \text{時間}$$

・相互作用数=

$$\text{到来数} \times \text{相互作用確率}$$

Assumed ν E.S.

(A) $\phi = 1.7 \times 10^{11} \text{E}^{-2.5}$

(B) $\phi = 5.4 \times 10^{10} \text{E}^{-2.5}$

(C) $\phi = 5.4 \times 10^{20} \text{E}^{-3}$

Expected number of ν AS observed by JEM-EUSO

Log(Ev)	# of triggered ν 's showers in a view [1/yr] Nadir			# of triggered ν 's showers in a view [1/yr] tilt 38		
	C	A	B	C	A	B
>18.9	0.37	1.42	0.43	0.80	3.13	0.81
>19.1	0.37	1.42	0.43	0.80	3.13	0.81
>19.3	0.34	1.36	0.42	0.80	3.13	0.81
>19.5	0.27	1.23	0.36	0.77	3.08	0.79
>19.7	0.23	0.99	0.28	0.63	2.86	0.67
>19.9	0.14	0.61	0.21	0.57	2.66	0.60
>20.1	0.07	0.39	0.18	0.45	2.16	0.49
>20.3	0.07	0.26	0.06	0.11	1.47	0.36
>20.5	0.07	0.09	0.06	0	0.94	0.11

トリガー数 =
シャワー生成数 ×
トリガー効率

1/year

Assumed ν E.S.

(A) $\phi = 1.7 \times 10^{11} E^{-2.5}$

(B) $\phi = 5.4 \times 10^{10} E^{-2.5}$

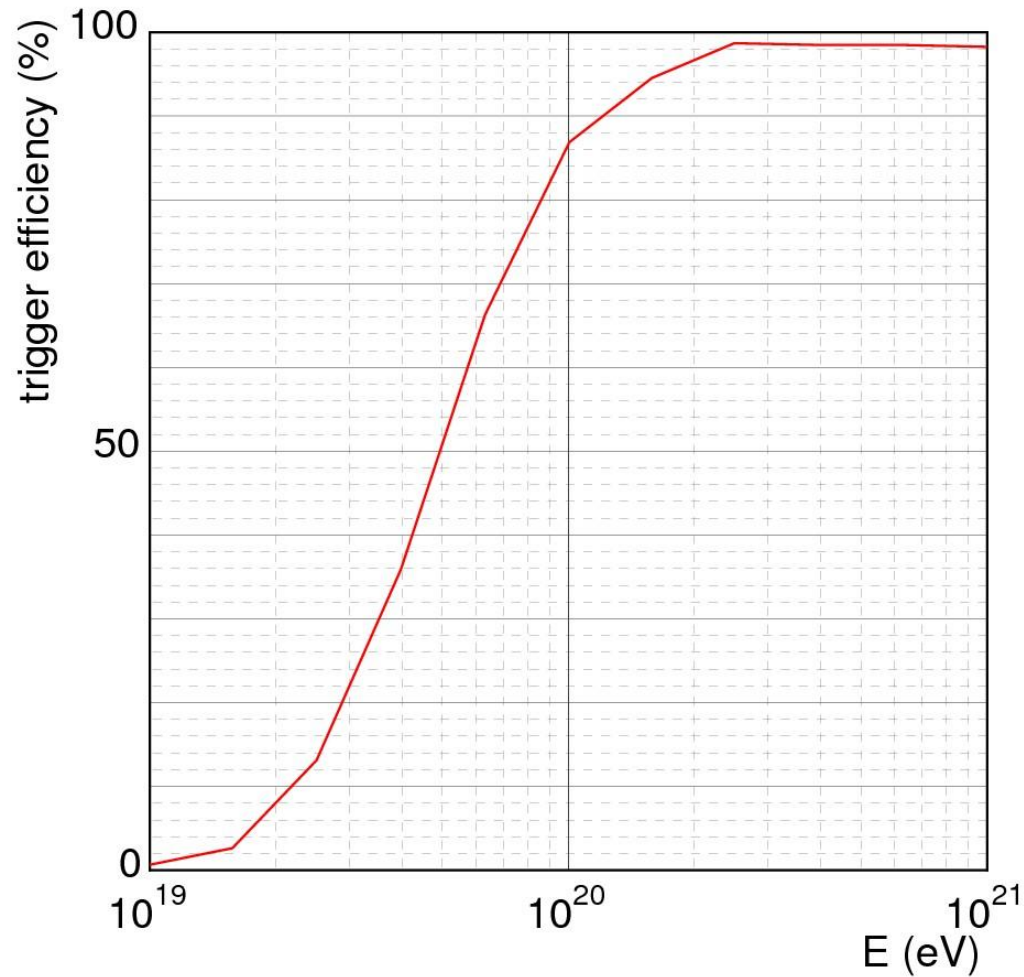
(C) $\phi = 5.4 \times 10^{20} E^{-3}$

- 2 years nadir- and 3 years tilt-mode observation give us a chance for UHE ν detection (downward) with a statistics of 2-8 in an assumed ν flux ($>10^{20}$ eV).

視野内における年間の到来数と相互作用数 by TUS

nadir Log(Ev)	# of incident v's in a view [1/yr]			# of v's showers in a view [1/yr]		
	C	A	B	C	A	B
>19.1	4500	6700	2100	0.036	0.055	0.018
>19.3	1800	3400	1100	0.014	0.028	0.0089
>19.5	720	1700	530	0.0068	0.017	0.0055
>19.7	280	840	270	0.0034	0.011	0.0035
>19.9	110	420	130	0.0016	0.006	0.0020
>20.1	45	210	65	0.00071	0.0037	0.0011
>20.3	18	100	32	0.00032	0.0019	0.0006
>20.5	7	47	15	0.00014	0.001	0.00033

Triggering efficiencies of TUS



TUSの閾値エネルギー (5×10^{19})にて50%となるようなトリガー効率線を仮定した。

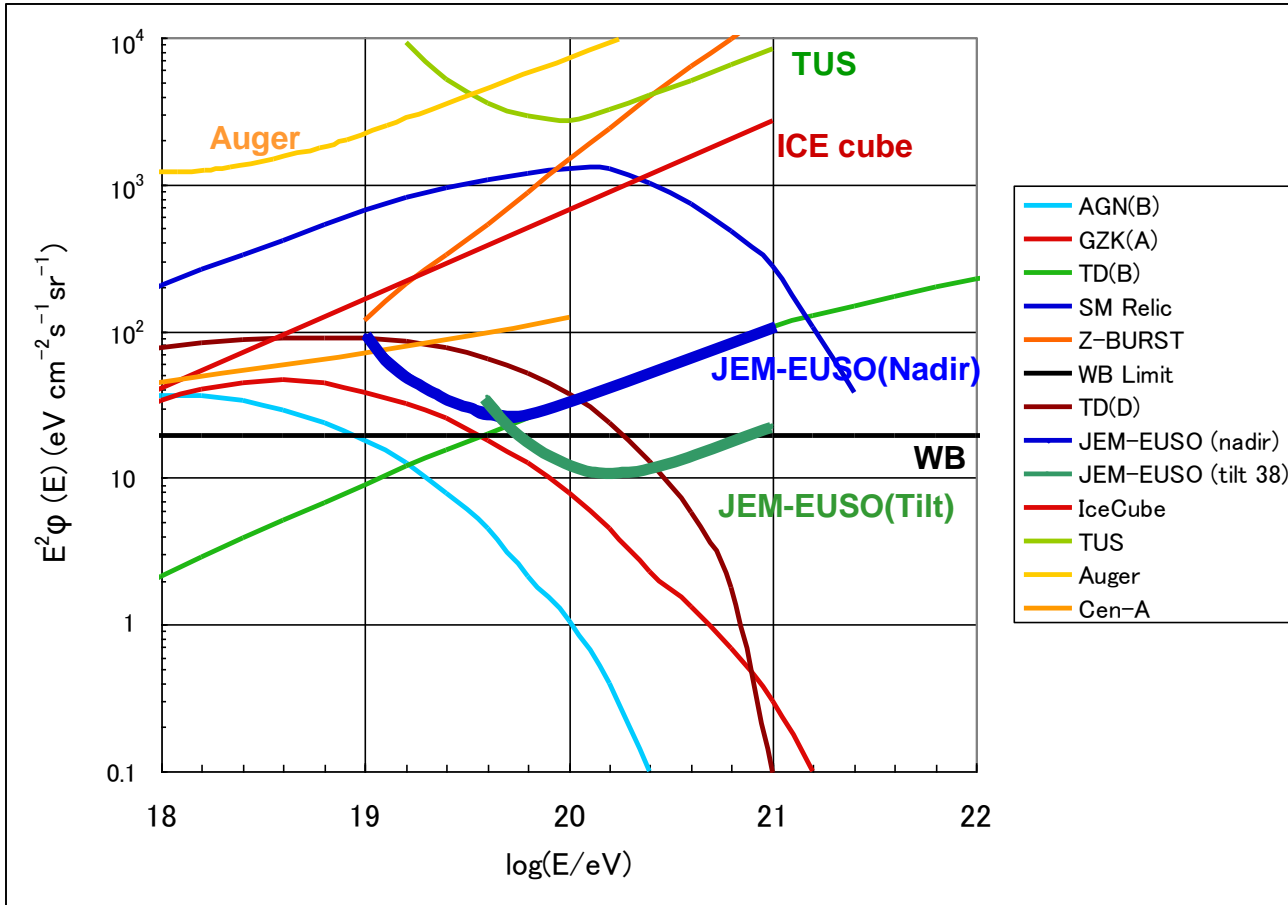
Expected number of ν AS observed by TUS

	# of triggered ν 's showers in a view [1/yr]		
Log(Ev)	C	A	B
>19.1	0.0054	0.0131	0.0042
>19.3	0.0048	0.0124	0.0032
>19.5	0.0039	0.011	0.0035
>19.7	0.0027	0.0086	0.0027
>19.9	0.0014	0.0056	0.0018
>20.1	0.0007	0.0033	0.0011
>20.3	0.0003	0.0019	0.0006
>20.5	0.0001	0.001	0.0003

1/year

- 5 years observation give us a chance for UHE ν detection (downward) with a statistics of 0.007-0.02 in an assumed ν flux($>10^{20}$ eV).

UHE- ν Sensitivity (downward neutrinos $\theta:0-95^\circ$)



Sensitivity
1 events/decade/year

$$\text{sensitivity} = 1 / \left(\frac{\text{trigger efficiency} \times \nu\text{-shower 割合}}{(\text{fip} + \text{xmax in FOV}) / \text{cm}^2 \cdot \text{sr/s}} \int E^{-2} \right)$$

まとめ

- ・ JEM-EUSO実験のようなsatellite-basedにおけるUHEニュートリノの検出可能性。ニュートリノ相互作用と密度が変化する空気中におけるLPM効果を考慮した電磁カスケード計算。
- ・ 陽子とニュートリノEAS 識別 X_{\max} EAS profile
- ・ downward ν のFluxを仮定し、2年間のNadirモード+3年間のTiltモードにてトリガー効率を考慮、期待される事例数を計算、観測期間中に2-8事例 (JEM-EUSO)、またTUSにおける5年間の観測で0.007-0.02事例 (TUS) ($>10^{19.9}\text{eV}$)
- ・ 今後の課題
 - 上向きの ν - showerについて検討

END