

空気シャワー現象と μ (ミュー) 粒子

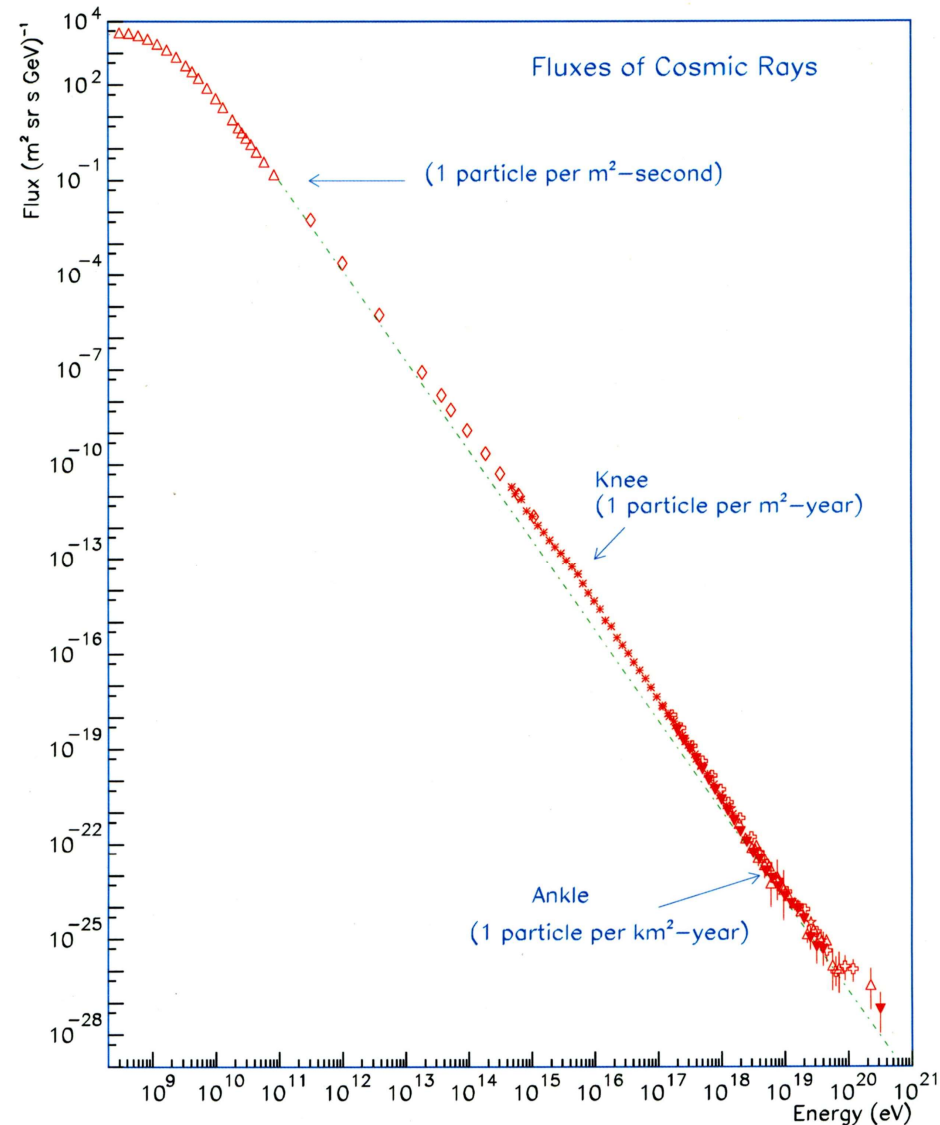
大石 理子

目次

- 宇宙を満たす高エネルギー粒子・宇宙線
- 地球大気役割
- 空気シャワー現象
 - 電磁シャワー
 - 核カスケードシャワー
- 空気シャワー中の粒子：
 - パイ粒子
 - ミュー粒子
- ミュー粒子はなぜ地上に到達するか
- 解像型大気チェレンコフ望遠鏡でのこれらのシャワーの見え方

宇宙を満たす高エネルギー粒子：宇宙線

- 我々の銀河は高いエネルギーを持った粒子 **宇宙線** で満たされている
- そのエネルギー密度は
およそ
 $1\text{ eV(電子ボルト)}/\text{cc}$
- 宇宙線はベキ指数型のエネルギー分布（スペクトル）を持っている
$$dN/dE = I_0 E^{-\alpha}$$
- ベキ指数はおよそ 2.7
- エネルギーが高くなると到来頻度が急激に減少する



地球大気は「分厚い」防護壁

- とある日の気圧 “1028 hPa”

- 頭上の大気は 1048 g/cm^2 の重さ

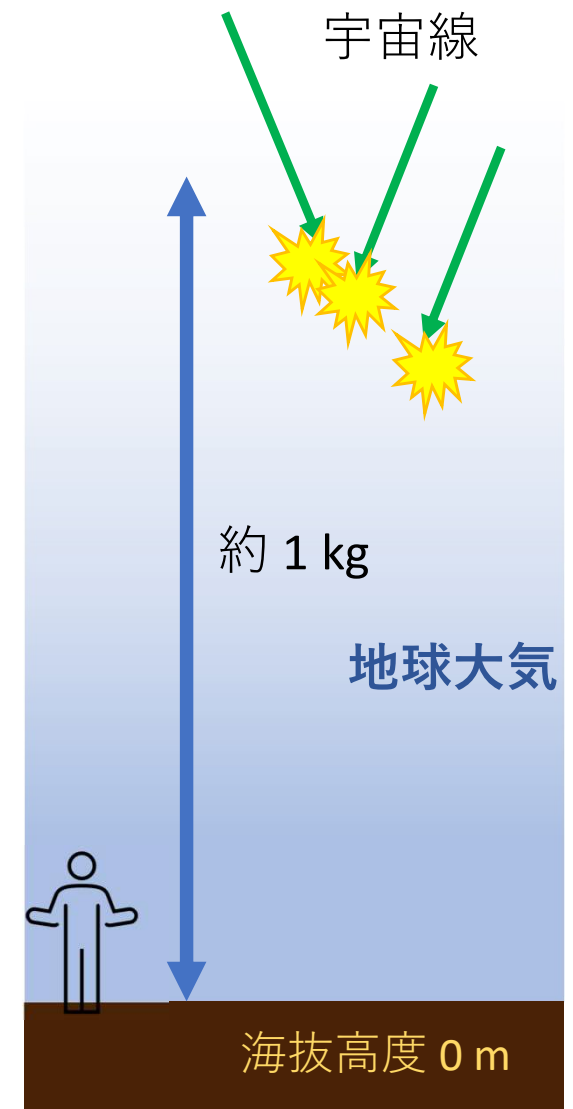
- 分厚い物質の壁、宇宙線の多くは
通り抜けられない
(貫通力の高い粒子は別)

- 地球大気の構造

- 一様の密度ではなく、地表に近い
ほど密度が高い

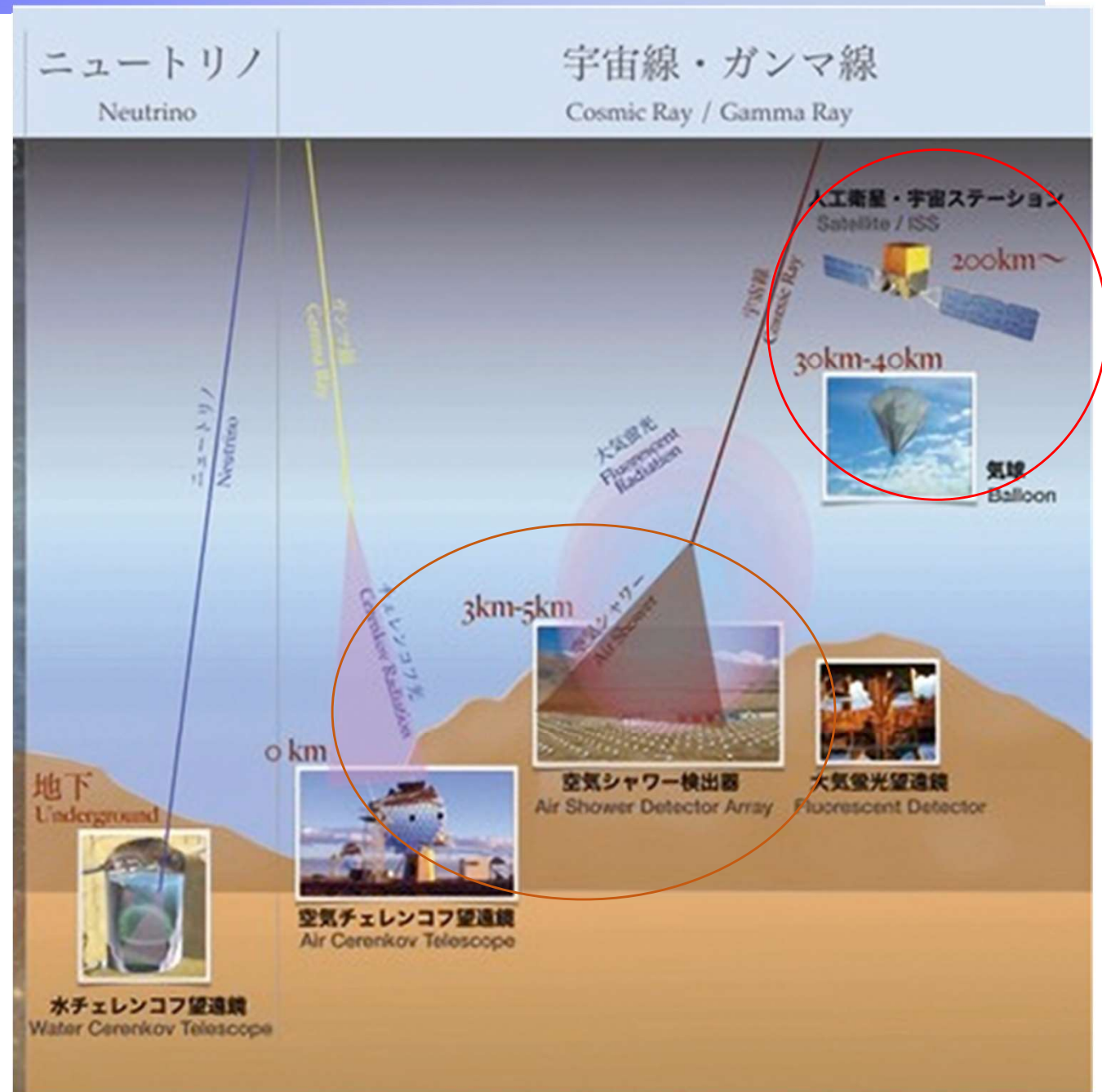
- 指数関数的な密度分布

$$\rho(z) = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{H_0}\right) \quad \begin{array}{l} H_0: \text{スケールハイト} \\ \text{約 } 7 \text{ km} \end{array}$$



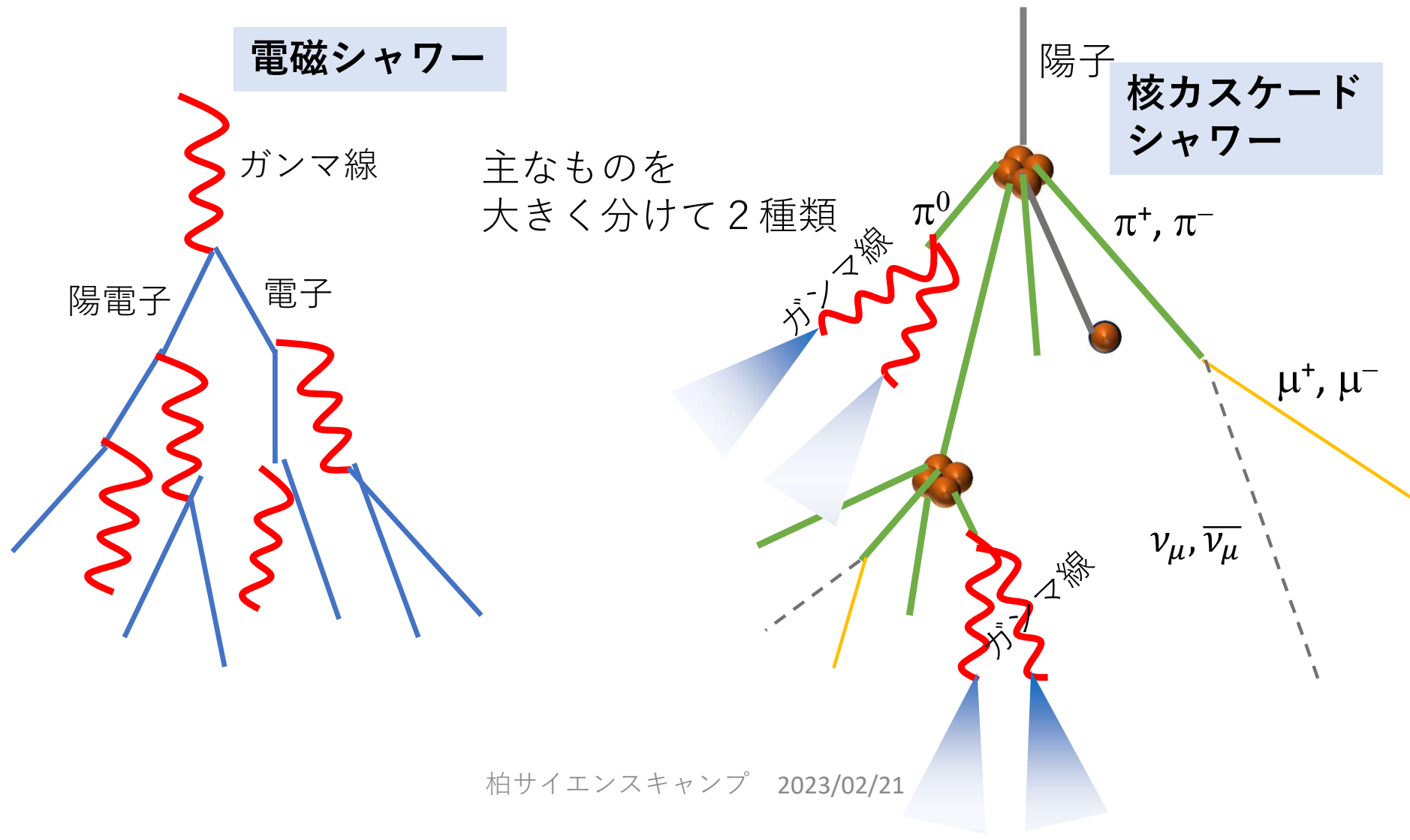
防護壁の上と下：直接と間接測定

- 宇宙線やガンマ線の観測手法は大気の上か下かで大きく違う
- 上は「直接」
- 下は「間接」

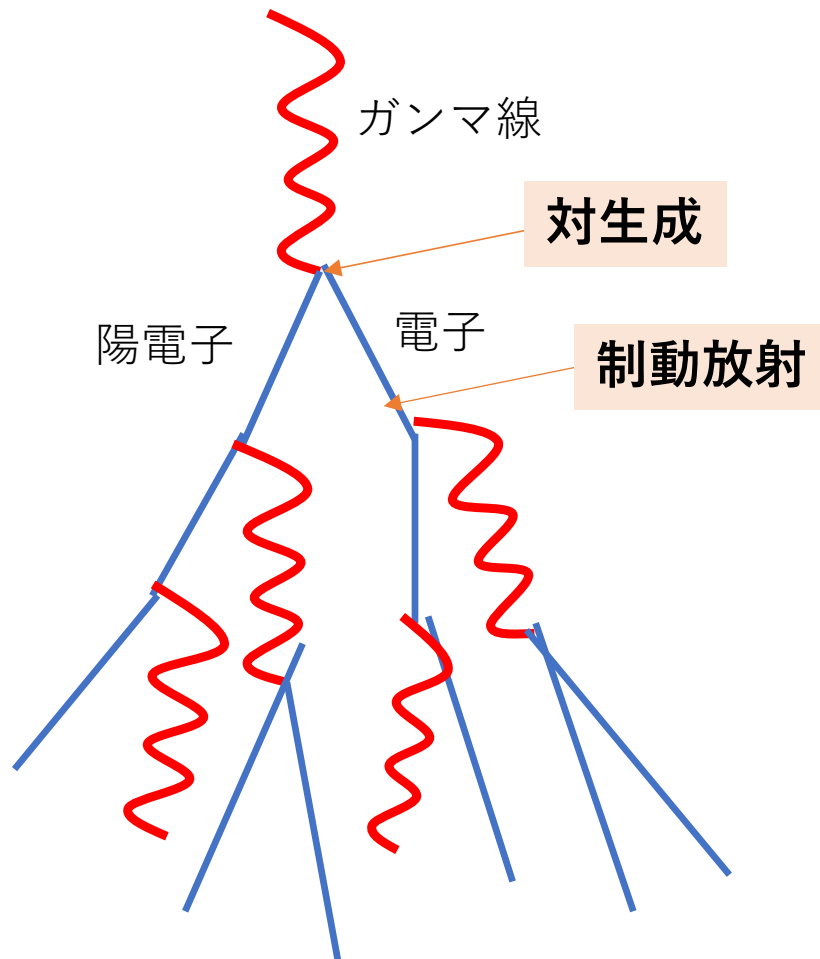


地上からの宇宙線検出：空気シャワー現象

- 宇宙線（ガンマ線）が地球大気に突入
- 大気中の原子核と衝突して二次粒子を大量に生成→空気シャワー

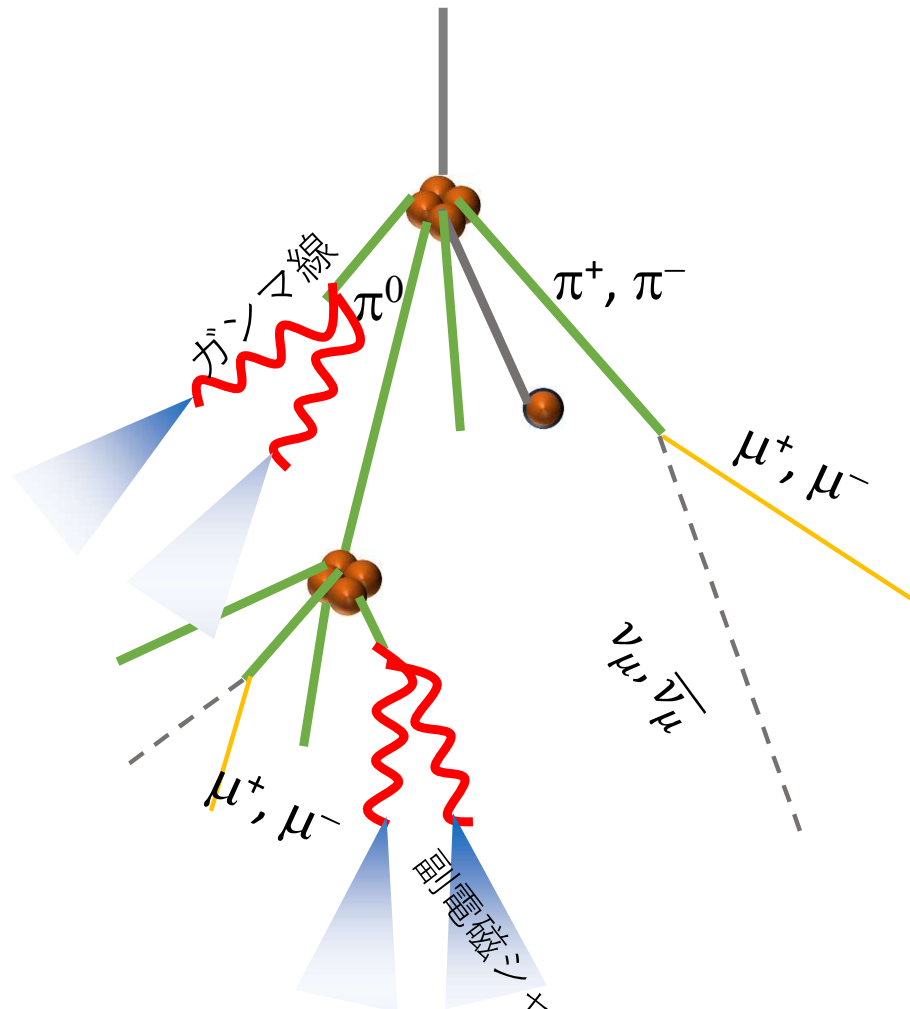


電磁シャワー



- 入射粒子が
ガンマ線 または 電子
のときに起きる
- ガンマ線は
電子・陽電子対生成を起こす
 $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$
- 電子・陽電子は原子核のそばを通るときに軌道が曲がりガンマ線を放出してエネルギーを失う（制動放射） $e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$
- 対生成→制動放射→対生成→ 制動放射を繰り返し、粒子の数が雪崩的に増える

地上からの宇宙線検出：空気シャワー現象

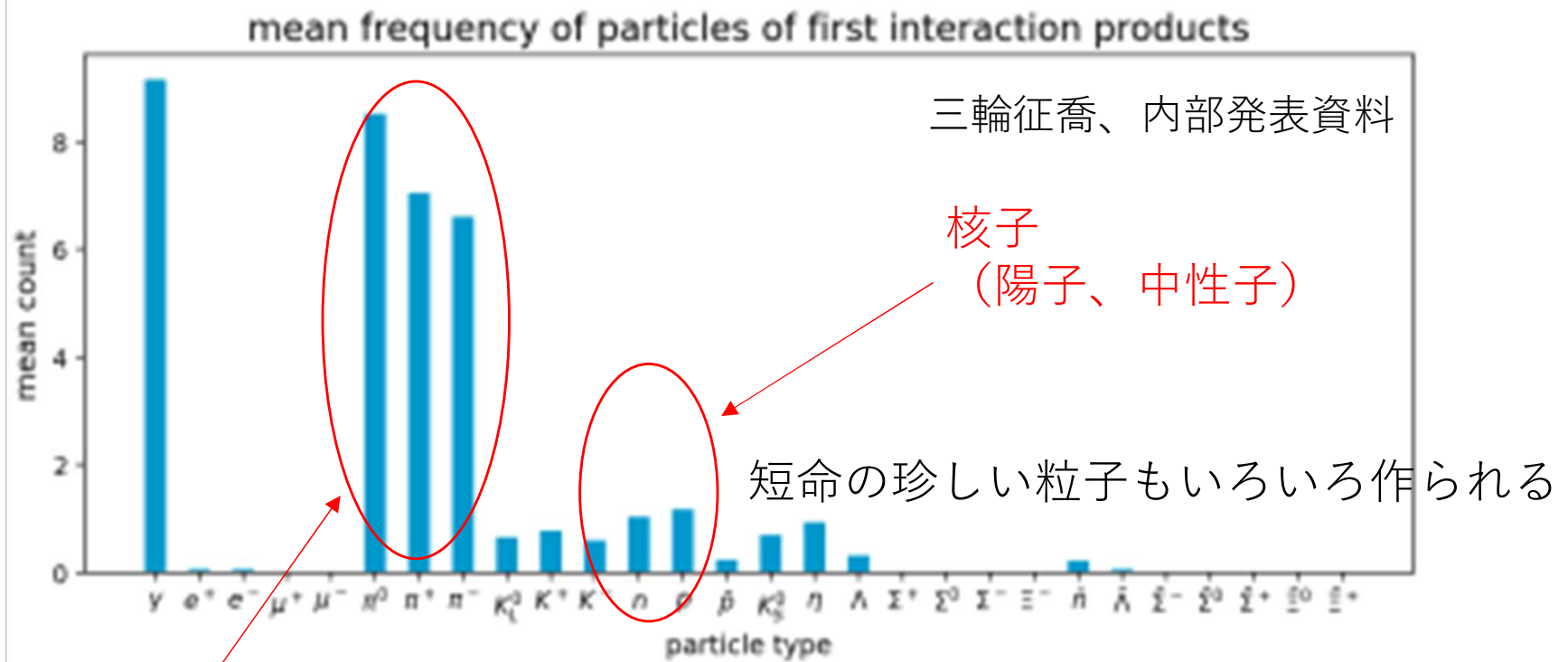


電磁シャワーに比べると、
不規則かつ横方向に
広がった形をしていることが多い

- 入射粒子が主に
原子核（陽子、ヘリウム、..鉄）
のときに起きる
- 大気を構成する主要な元素は
窒素($Z=7$)、酸素($Z=8$)
- 原子核同士の衝突では多様な粒子
が生成される（次頁）
- 主要なものは π (パイ) 粒子
 - ✓ 3種類 $\pi^\pm, \pi^0$
 - ✓ π^0 : 2つのガンマ線に崩壊→電
磁シャワーへ
 - ✓ $\pi^\pm$ は崩壊するか、また原子核
と衝突して $\pi^\pm$ を生成する

宇宙線原子核が大気と衝突したときに作られる粒子たち

宇宙線陽子の最初の衝突で作られる粒子たちの数分布

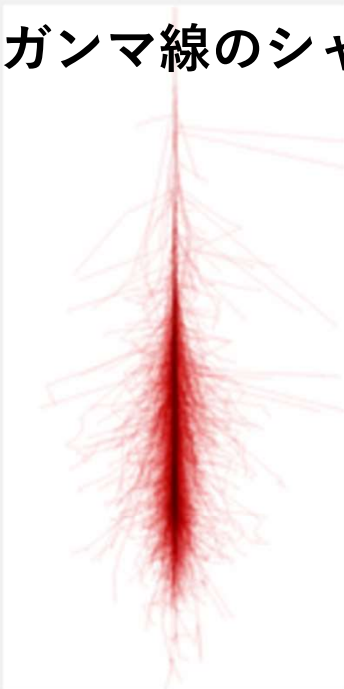


- パイ粒子
- この図はシミュレーションから得られたデータ
 - 様々な粒子ができるが、多いのは π 粒子と核子
 - (この図では中性パイ粒子の子供のガンマ線まで含まれている)

粒子シャワーの空中での形 (シミュレーション)

空気シャワーの粒子飛跡を横から見た図

ガンマ線のシャワー



Photon shower

宇宙線陽子のシャワー



Proton shower

宇宙線鉄のシャワー



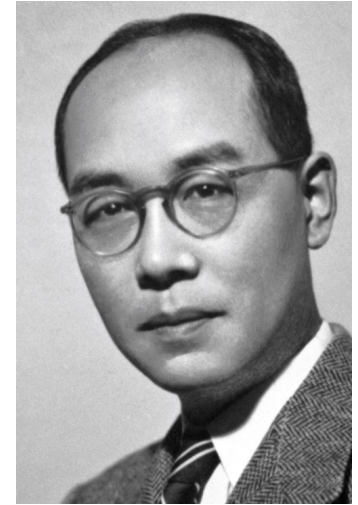
Iron shower

<https://www.iap.kit.edu/corsika/>

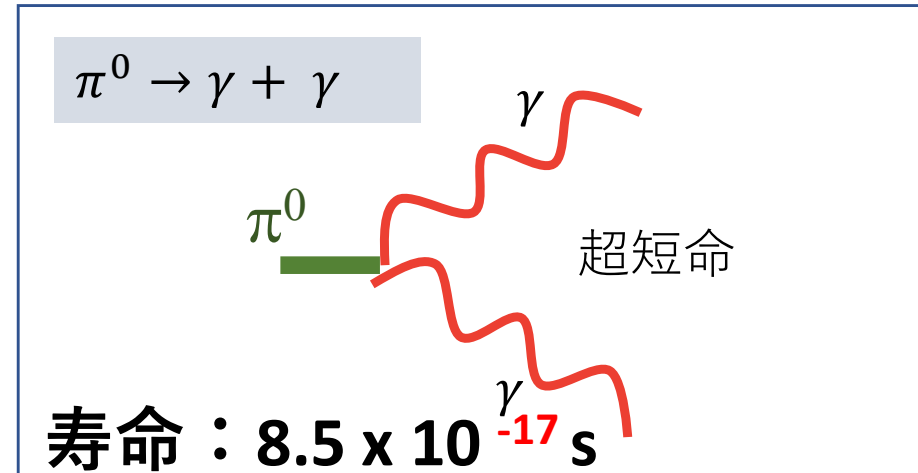
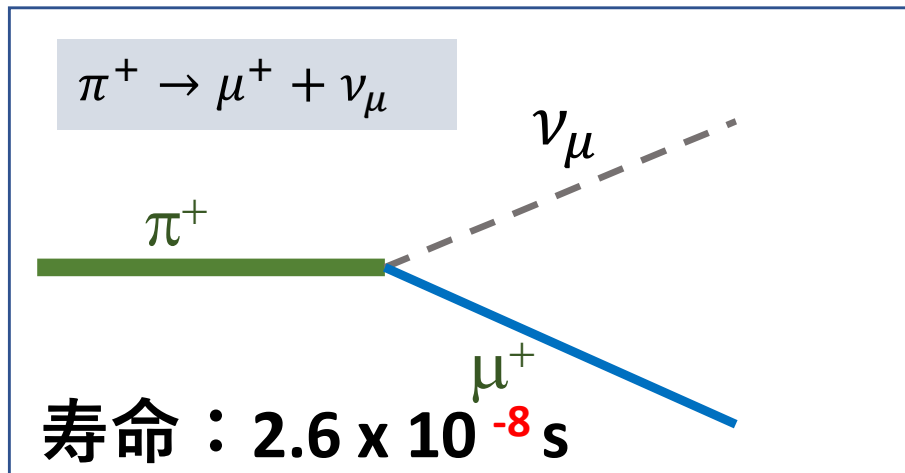
ガンマ線と陽子は異なる特徴を持つが
陽子とより重い原子核（鉄）も異なる特徴を持つ

パイ粒子($\pi^\pm, \pi^0$)

- クォーク二つから出来ている中間子（メソン）
- （余談）パイ中間子の理論的予測：湯川博士
- 電荷を持った荷電パイ粒子
 $\pi^\pm$ 静止質量 $140 \text{ MeV}/c^2$
- 電荷を持たない中性パイ粒子
 π^0 静止質量 $134 \text{ MeV}/c^2$
- 超高エネルギー宇宙線の衝突では、
これらの3つは等量生成される
（一回あたりの衝突では生成はバラつく）
- それぞれ短命で別の粒子に崩壊する

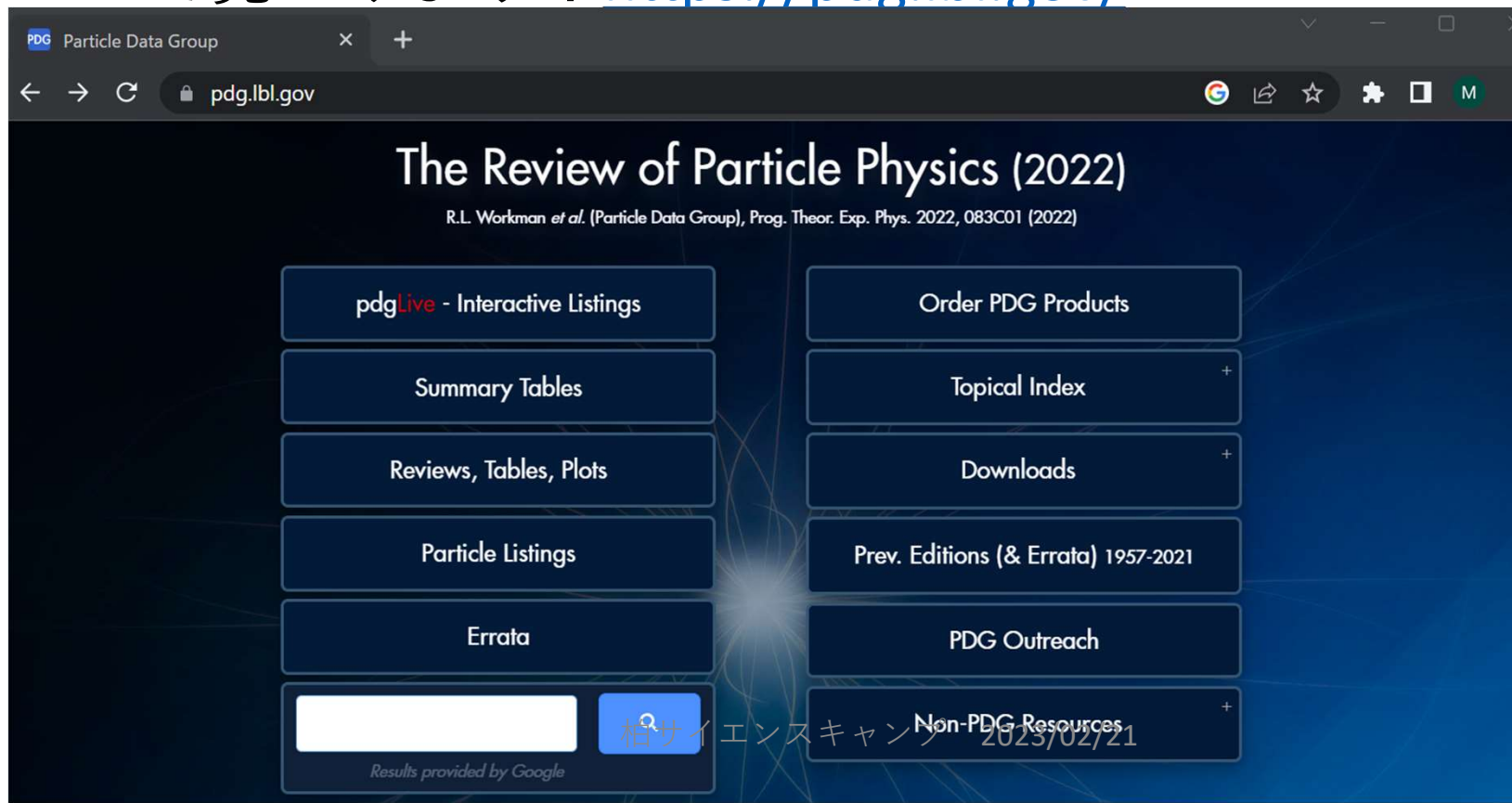


π 粒子と湯川秀樹博士
1947年にパウエルにより
実験的に存在が実証
(1949年にノーベル賞)



ちょっと横道（もっと詳しく知りたい人は）

- 前のページの崩壊は“主要な”崩壊モード
- 確率は低いが他の崩壊モードもある
- 各粒子の特性がより詳しく知りたい人は、Particle Data Groupという組織が詳細な情報を公開してくれているので見てみよう！ <https://pdg.lbl.gov/>



ちょっと横道（もっと詳しく知りたい人は）

ov/2022/tables/contents_tables.html

R.L. Workman *et al.* (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022)

for Listings/Summary Tables was Jan. 15, 2022. Files can be downloaded directly by clicking on the icon: PDF

1 / 193 70%

$\pi^\pm$ $I^G(J^P) = 1^-(0^-)$

Mass $m = 139.57039 \pm 0.00018$ MeV ($S = 1.8$)
 Mean life $\tau = (2.6033 \pm 0.0005) \times 10^{-8}$ s ($S = 1.2$)
 $c\tau = 7.8045$ m

$\pi^\pm \rightarrow \ell^\pm \nu \gamma$ form factors [a]

$F_V = 0.0254 \pm 0.0017$
 $F_A = 0.0119 \pm 0.0001$
 F_V slope parameter $a = 0.10 \pm 0.06$
 $R = 0.059^{+0.009}_{-0.008}$

π^- modes are charge conjugates of the modes below.

For decay limits to particles which are not established, see the section on Searches for Axions and Other Very Light Bosons.

π^+ DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	p (MeV/c)
$\mu^+ \nu_\mu$	[b] (99.98770 $\pm$ 0.00004) %		30
$\mu^+ \nu_\mu \gamma$	[c] (2.00 $\pm$ 0.25) $\times 10^{-4}$		30
$e^+ \nu_e$	[b] (1.230 $\pm$ 0.004) $\times 10^{-4}$		70
$e^+ \nu_e \gamma$	[c] (7.39 $\pm$ 0.05) $\times 10^{-7}$		70
$e^+ \nu_e \pi^0$	(1.036 $\pm$ 0.006) $\times 10^{-8}$		4
$e^+ \nu_e e^+ e^-$	(3.2 $\pm$ 0.5) $\times 10^{-9}$		70
$\mu^+ \nu_\mu \nu \bar{\nu}$	< 9 $\times 10^{-6}$	90%	30
$e^+ \nu_e \nu \bar{\nu}$	< 1.6 $\times 10^{-7}$	90%	70

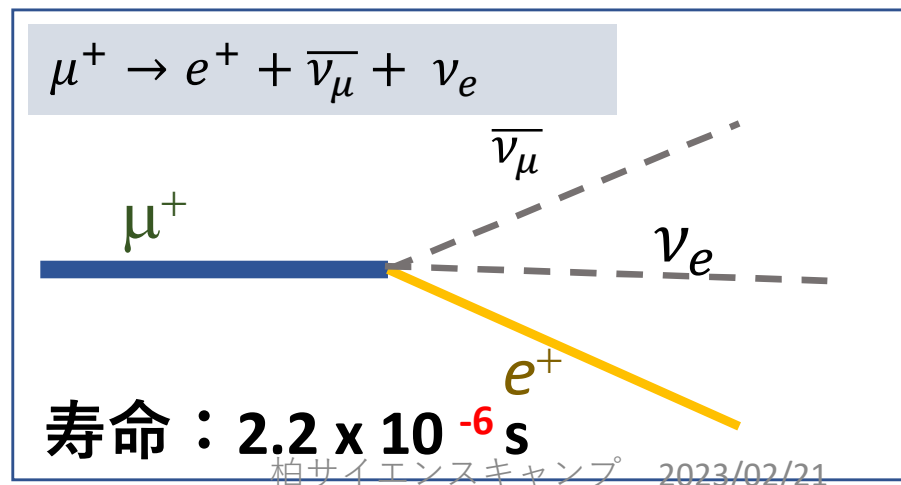
相サイエンスキャンパス 2023/02/21

ミュー粒子 ($\mu^\pm$)

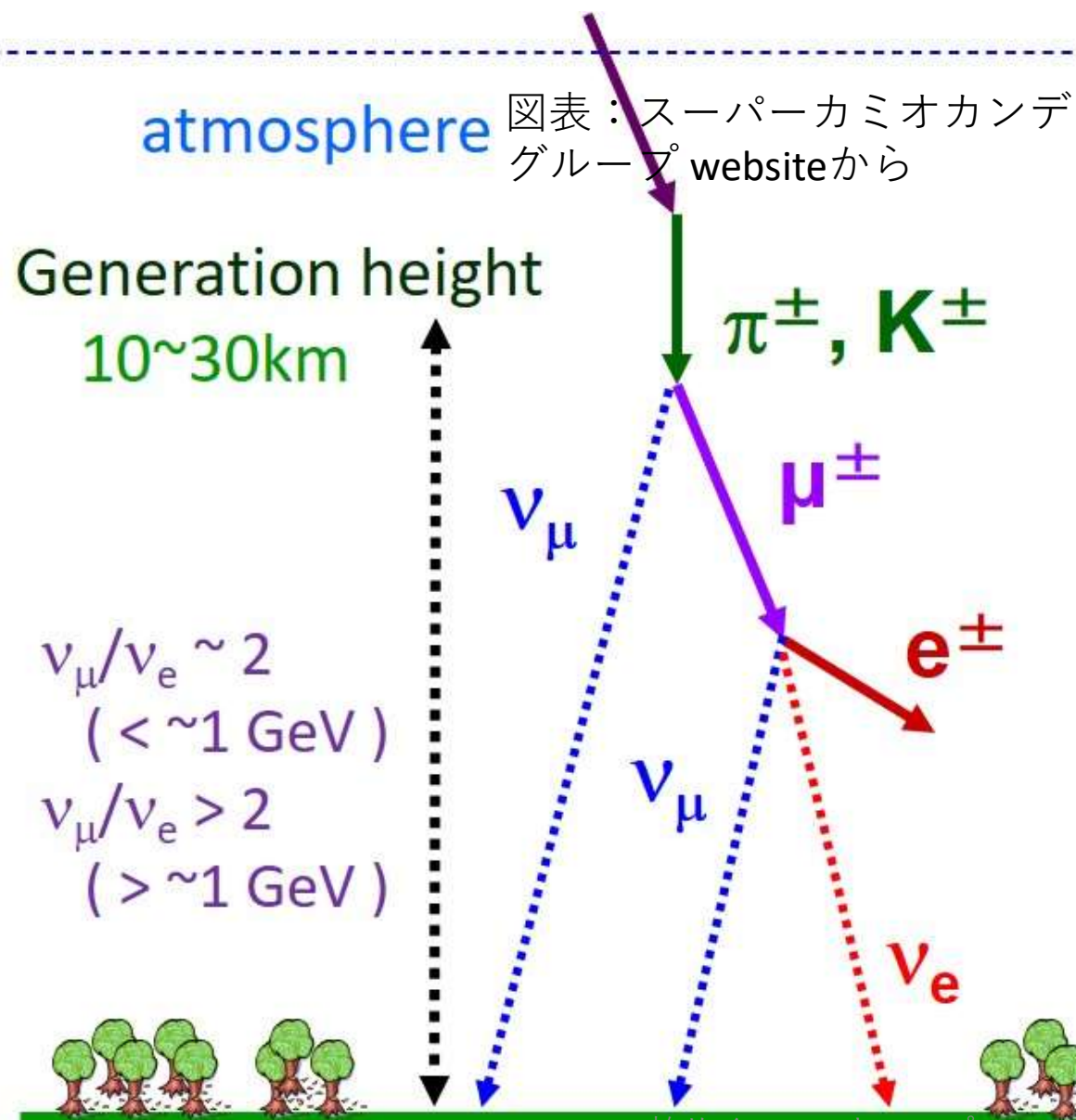
- 電子やニュートリノと同じ仲間：レプトン
- 貫通力の強い粒子
高エネルギーを保ったまま地表に到達する
→宇宙線実験の教材としてよく使われる

今回の実習の主役

- 電荷+と-の二種類： $\mu^\pm$ 静止質量 106 MeV
- パイ粒子よりは**長命**だがこちらも安定ではなく崩壊



π と μ と、そして大気 ν と



十分にエネルギーが低い領域なら

最終的に

- ミューニュートリノが**2**つ
- 電子ニュートリノが**1**つ
- 電子が一つ (μ 粒子を経由) できる

しかし到来方向（作られてからの距離）によってはミューニュートリノが少なくなる。
なぜ？

→ 梶田さんのノーベル賞の研究

空気シャワーの μ は
もともと ν_μ とペアだった...

....なぜ μ は地表に届くの？

- 寿命 $2.2 \times 10^{-6} \text{ s}$
- 宇宙線陽子と大気中の原子核の相互作用は高度 20-30 km 程度から始まる。光速度 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ をかけても 600 m 程度しか進めない → 地表に到達できない？
- 相対論的な速度で運動している粒子は（静止系から見ると） γ 倍寿命が延びる

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad \beta = \frac{v}{c} \quad \text{エネルギー} - E = m_0 \gamma c^2$$

v : 粒子の速度 c : 真空中の光速度

- 例：エネルギー 6 GeV のミュー粒子 → $\gamma \sim 60$,
平均的に 3.6 km 程度は崩壊前に走ることができる
エネルギーが高い方が長命で地表に到達する確率は高くなる

地表でのミューオンの数量

海拔高度 0mでのミューオンフラックス

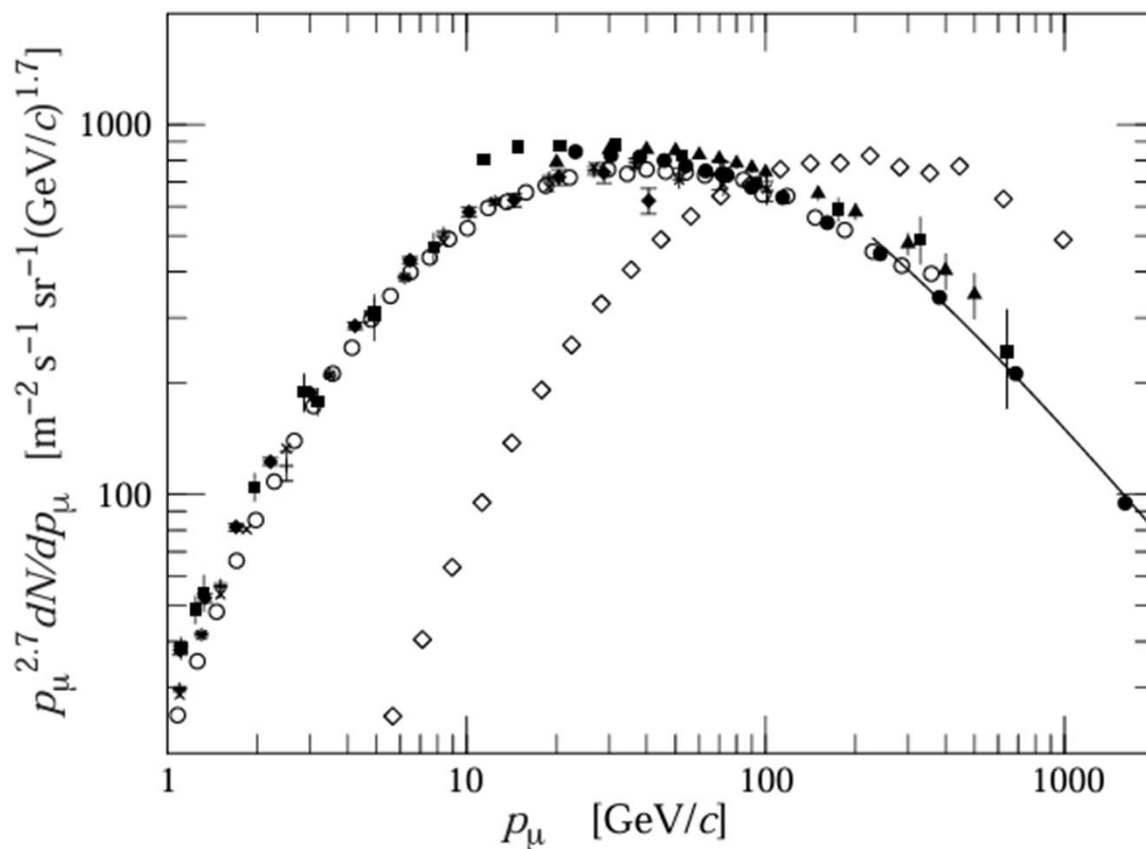


Figure 30.5: Spectrum of muons at $\theta = 0^\circ$ ($\diamond$ [56], $\blacksquare$ [60], $\blacktriangledown$ [61], $\blacktriangle$ [62], $\times$, $+$ [58], $\circ$ [51], and $\bullet$ [59] and $\theta = 75^\circ$ $\diamond$ [63]). The line plots the result from Eq. (30.4) for vertical showers.

地表に到達する
ミュー粒子の頻度は

おおまかには
100 cm² (10cm 四方)
あたり
1 個/1秒
と覚えておくとよい

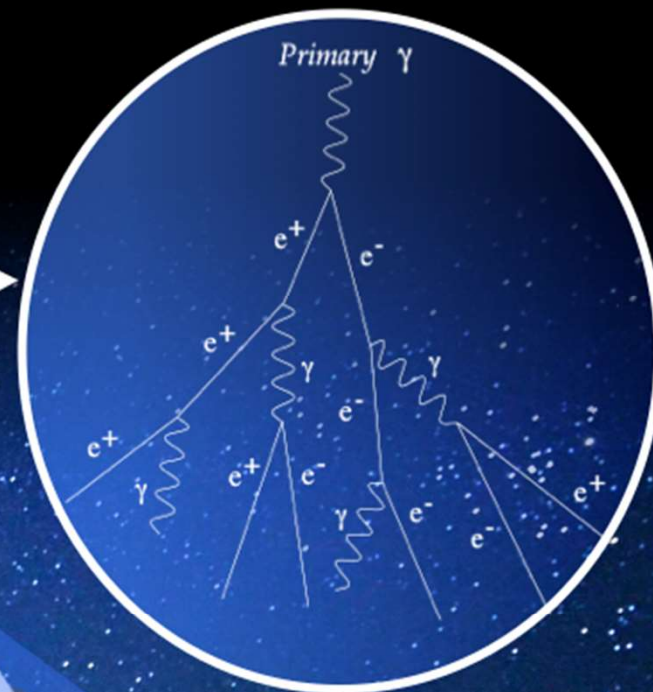
実際に今回の実験で測定する頻度は、
到来方向の角度を絞る
のでこれより小さくなります

γ -ray enters the atmosphere

Electromagnetic cascade

空気シャワー
は解像型大気
チェレンコフ望遠鏡で
どのように見えるか

ガンマ線



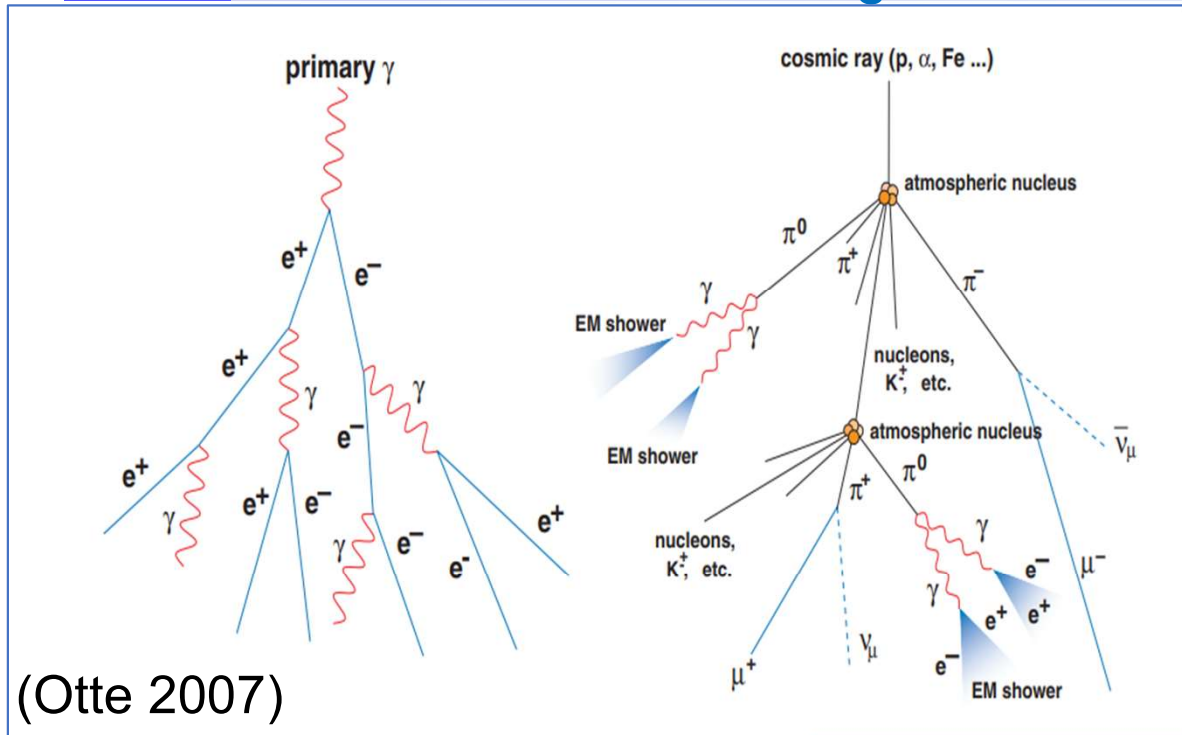
チェレンコフ光

10 nanosecond snapshot

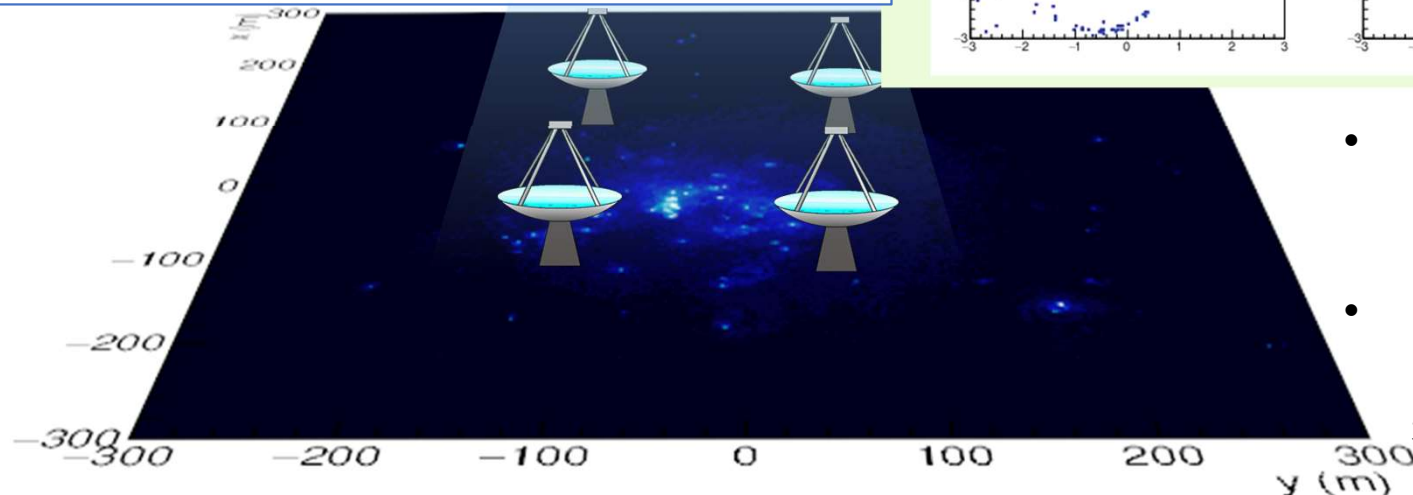
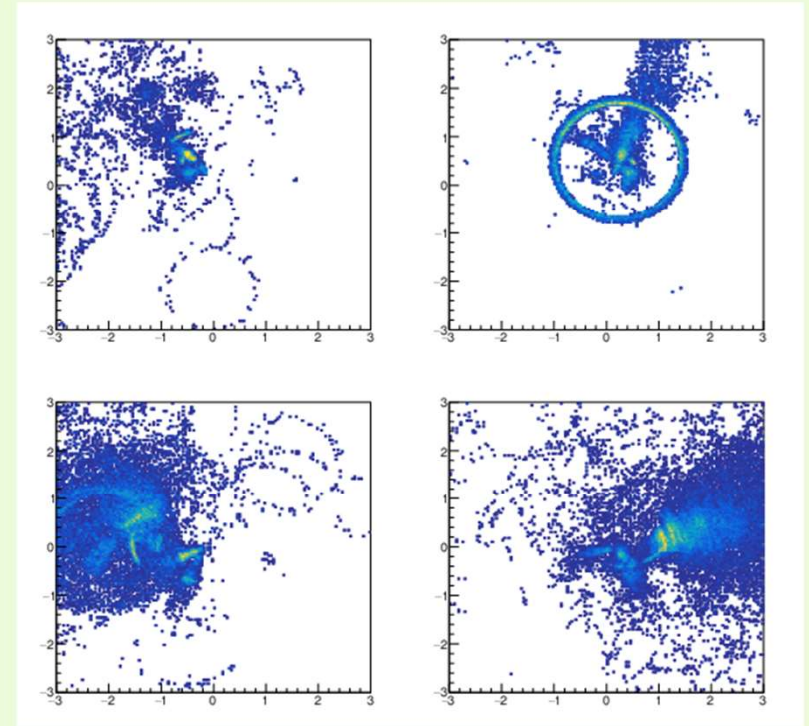
0.1 km² "light pool", a few photons per m².

地上の望遠鏡

宇宙線陽子シャワーがまき散らすチェレンコフ光



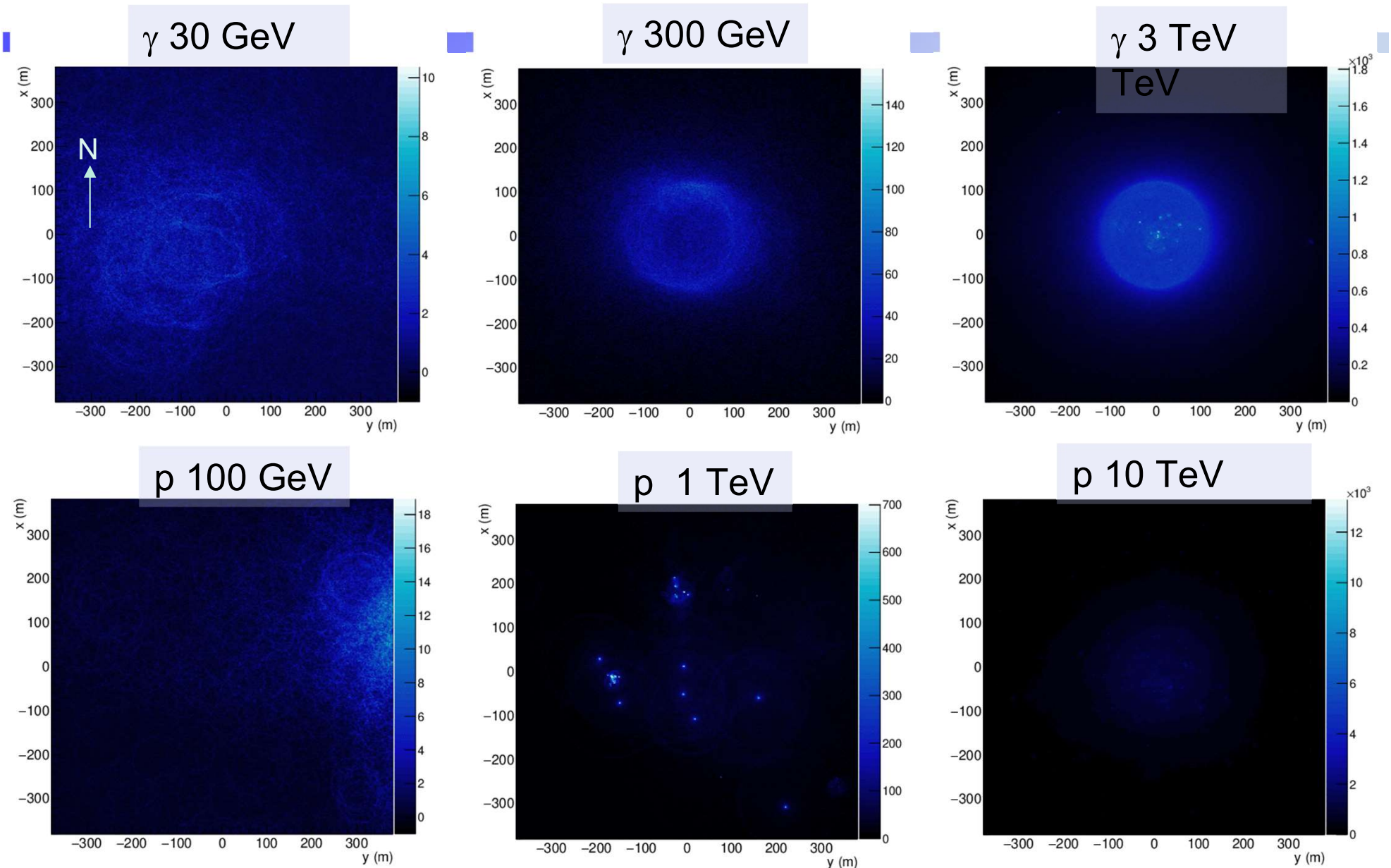
主焦点面での反射像



- これから解析してもらおうアレがいる
- ステレオ観測でもシャワーの到来方向を決めるのが難しい

地表面でのチェレンコフ光パターン

CORSIKA 7.74,
2,000m a. s. l.

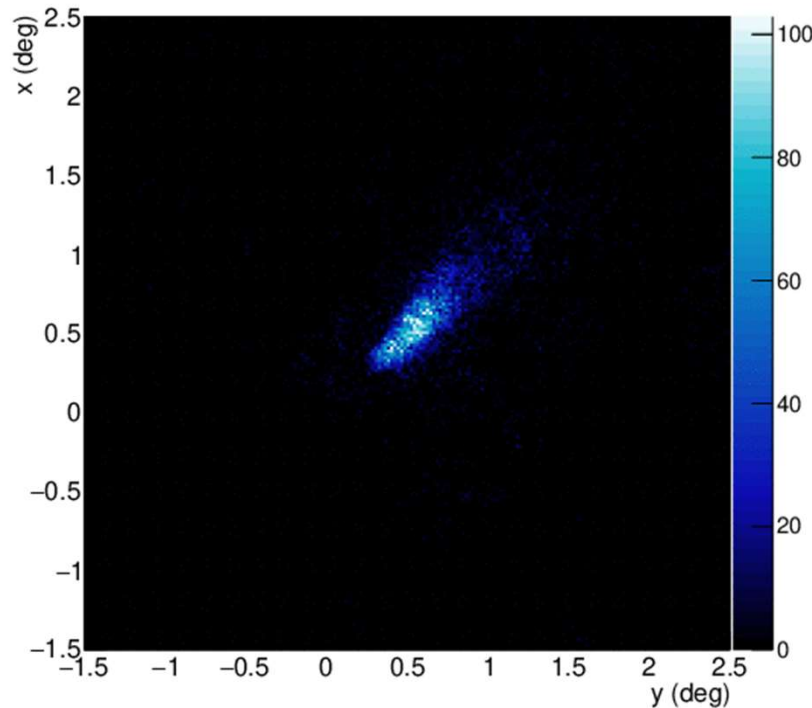


p: 陽子, 明るい点々はミュー粒子が地表に到達した点
(鏡の反射でリングに見える)

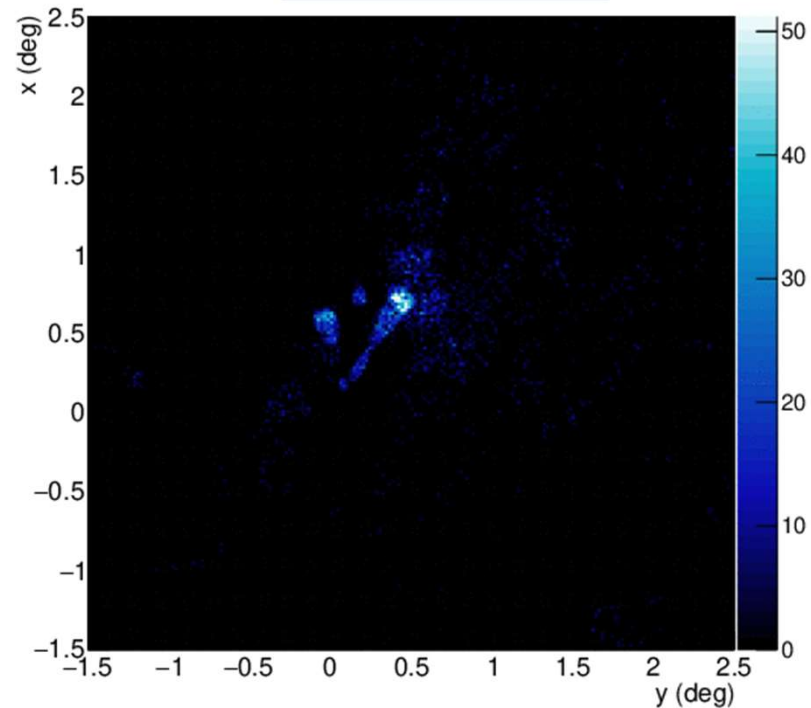
チェレンコフ光の角度分布

望遠鏡とシャワーの距離 $d = 70$ m, 集光半径 = 10 m

γ 300 GeV



p 1000 GeV



単一の電磁シャワー
→ 細長い像が一つ

副構造の重ね合わせ

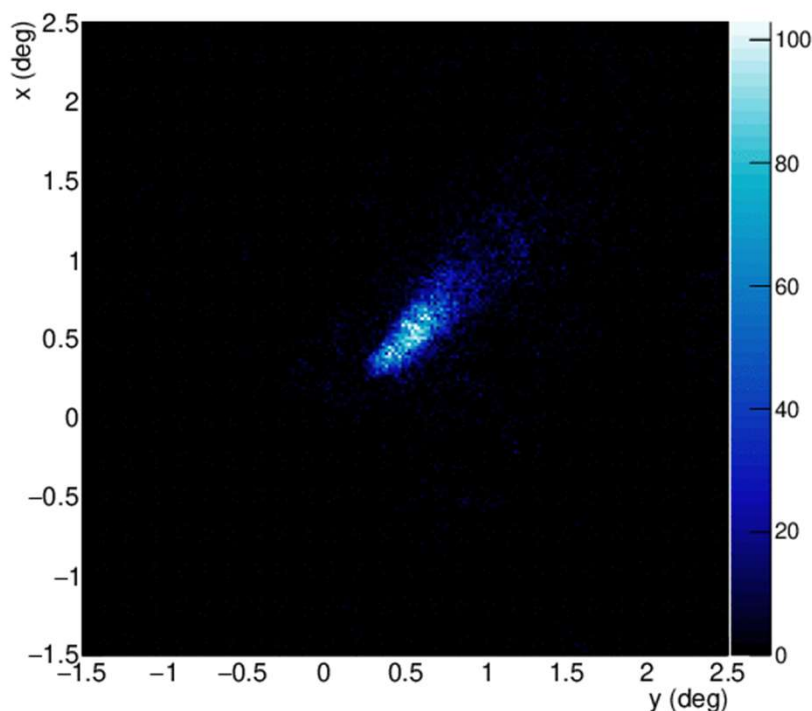
- ・ μ -ring
- ・ サブ電磁シャワー
- ・ μ -リングの一部のみ

実際にはこれに装置応答（鏡のぼけ、夜光ノイズ、電気ノイズ）などが乗る

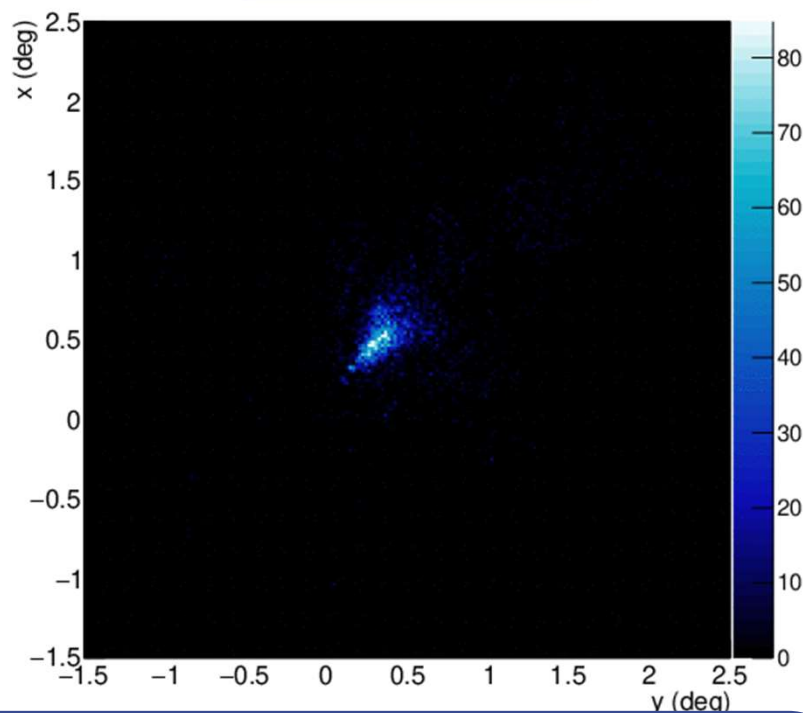
チェレンコフ光の角度分布（おまけ：電子）

望遠鏡とシャワーの距離 $d = 70$ m, 集光半径 = 10 m

γ 300 GeV



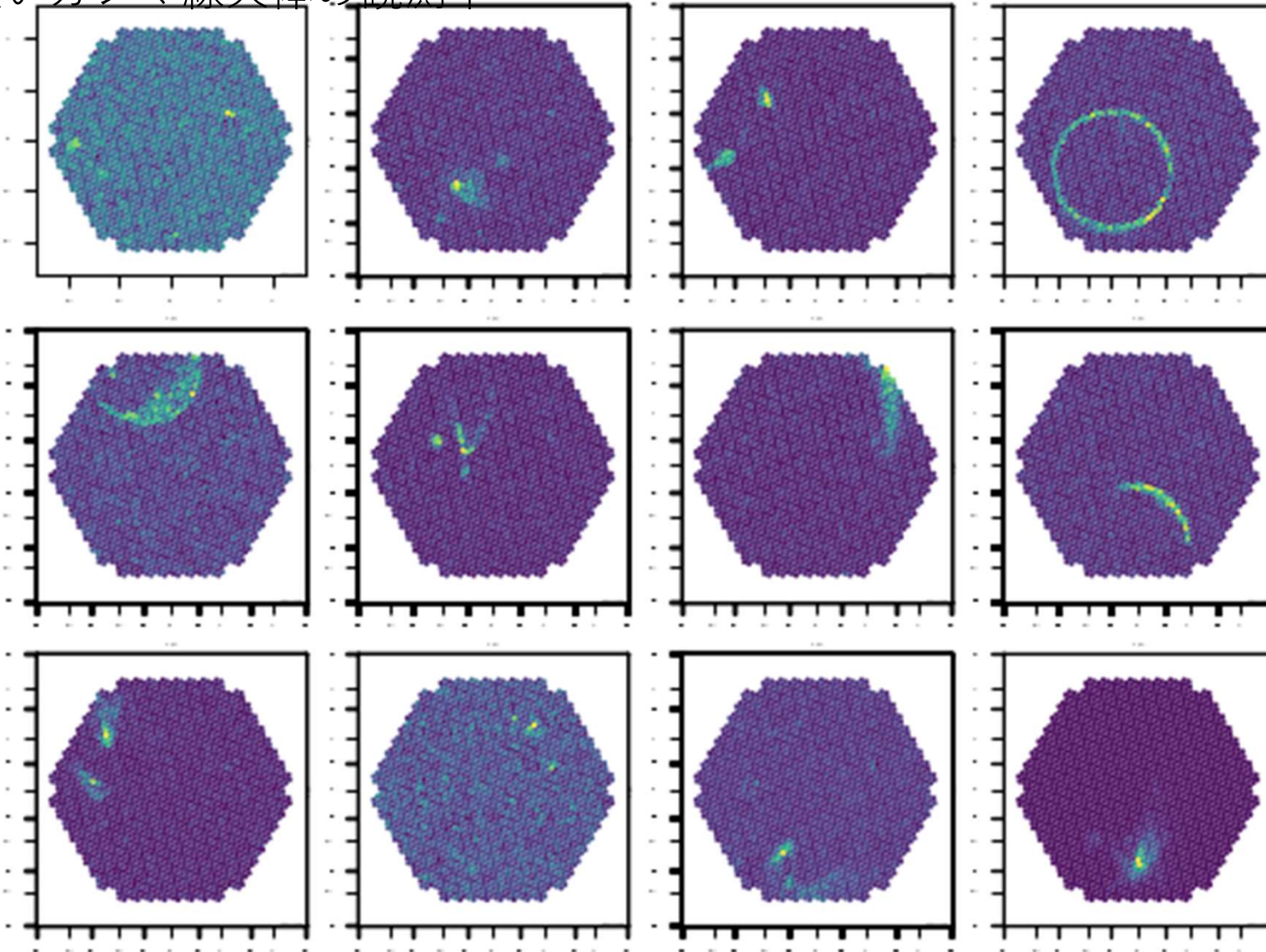
e^- 1000 GeV



- ガンマ線も電子、どちらも電磁シャワーを形成する
(最初が電子かガンマ線かの違いだけ)
 - 基本的に一つ一つの画像単位では違いを見分けられない
 - ガンマ線観測にとって減らすことのできない雑音源

ある日のCTA-LST1の観測データの画像

見やすいように一定以上の明るさの画像だけを表示しているが
それ以上の選択条件はかけていない
強いガンマ線天体の観測中



ガンマ線望遠

もし、“ガンマ線”を”、ガンマ線だけ“を検出する装置だったら
こうなるはずでは？

