

東京大学 宇宙線研究所瀧田正人タキタマサト

東京大学宇宙線研究所 × 東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 第28回 春の合同一般講演会 @柏の葉カンファレンスセンター(柏) 2023年 4月22日

長さについて

原子核の直径 10⁻¹⁵ m

宇宙の果てまでの距離 138億光年 = 1.3 × 10²⁶ m

10⁴¹倍 = 10 正(せい)倍
= 1兆倍の1兆倍の1兆倍の10万倍
一万億兆京垓禾予(じょ) 穰溝澗正載極
恒河沙阿僧祇那由他不可思議 無量大数

単位の接頭語

k (キロ, 10³) M (メガ, 10⁶) G (ギガ, 10⁹) T (テラ, 10¹²) P (ペタ, 10¹⁵) m (ミリ, 10⁻³) μ (マイクロ, 10⁻⁶) n (ナノ, 10⁻⁹) p (ピコ, 10⁻¹²) f (フェムト, 10⁻¹⁵)

10²⁶ m ≒ 100億光年

宇宙の果て

宇宙の大きさ 138億光年



ハドロン バリオン・・・・ クォーク 3個 陽子, 中性子, など メソン (中間子)・・・・ クォーク 2個 π中間子, K中間子, など

素粒子

エネルギーの単位

cal (カロリー) 水 1グラムの温度を 1℃上げる熱量

J (ジュール)

地球上でおよそ100グラムの物体を 1メートル持ち上げる時の仕事 1 J = 1 W・秒 ≒ 1/4.2 cal

eV (電子ボルト) 1ボルトの電位差で電子1 つが得る エネルギー 1 eV ≒ 1.6 × 10⁻¹⁹ J



Tibet ASy Collaboration

現在 33機関・121名

1990年発足



M. Amenomori¹, S. Asano², Y. W. Bao³, X. J. Bi⁴, D. Chen⁵, T. L. Chen⁶, W. Y. Chen⁴, Xu Chen^{4,5}, Y. Chen³, Cirennima⁶,
S. W. Cui⁷, Danzengluobu⁶, L. K. Ding⁴, J. H. Fang^{4,8}, K. Fang⁴, C. F. Feng⁹, Zhaoyang Feng⁴, Z. Y. Feng¹⁰, Qi Gao⁶, A. Gomi¹¹,
Q. B. Gou⁴, Y. Q. Guo⁴, Y. Y. Guo⁴, Y. Hayashi², H. H. He⁴, Z. T. He⁷, K. Hibino¹², N. Hotta¹³, Haibing Hu⁶, H. B. Hu⁴, K. Y. Hu^{4,8},
J. Huang⁴, H. Y. Jia¹⁰, L. Jiang⁴, P. Jiang⁵, H. B. Jin⁵, K. Kasahara¹⁴, Y. Katayose¹¹, C. Kato², S. Kato¹⁵, I. Kawahara¹¹,
T. Kawashima¹⁵, K. Kawata¹⁵, M. Kozai¹⁶, D. Kurashige¹¹, Labaciren⁶, G. M. Le¹⁷, A. F. Li^{4,9,18}, H. J. Li⁶, W. J. Li^{4,10}, Y. Li⁵,
Y. H. Lin^{4,8}, B. Liu¹⁹, C. Liu⁴, J. S. Liu⁴, L. Y. Liu⁵, M. Y. Liu⁶, W. Liu⁴, X. L. Liu⁵, Y.-Q. Lou^{20,21,22}, H. Lu⁴, X. R. Meng⁶,
Y. Meng^{4,8}, K. Munakata², K. Nagaya¹¹, Y. Nakamura¹⁵, Y. Nakazawa²³, H. Nanjo¹, C. C. Ning⁶, M. Nishizawa²⁴, R. Noguchi¹¹,
M. Ohnishi¹⁵, S. Okukawa¹¹, S. Ozawa²⁵, L. Qian⁵, X. L. Qian⁵, X. L. Qian²⁶, X. B. Qu²⁷, T. Saito²⁸, Y. Sakakibara¹¹, M. Sakata²⁹,
T. Sako¹⁵, T. K. Sako¹⁵, T. Sasaki¹², J. Shao^{4,9}, M. Shibata¹¹, A. Shiomi²³, H. Sugimoto³⁰, W. Takano¹², M. Takita¹⁵, Y. H. Tan⁴,
N. Tateyama¹², S. Torii³¹, H. Tsuchiya³², S. Udo¹², H. Wang⁴, Y. P. Wang⁶, Wangdu⁶, H. R. Wu⁴, Q. Wu⁶, J. L. Xu⁵, L. Xu⁹,
Z. Yang⁴, Y. Q. Yao⁵, J. Yin⁵, Y. Yokoe¹⁵, N. P. Yu⁵, A. F. Yuan⁶, L. M. Zhai⁵, C. P. Zhang⁵, H. M. Zhang⁴, J. L. Zhang⁴, X. Zhang³, Ying Zhang⁴, S. P. Zhao⁴, Zhaxisangzhu⁶, X. X. Zhou¹⁰ and Y. H. Zou^{4,8}

18 School of Information Science and Engineering, Shandong Agriculture 1 Department of Physics, Hirosaki Univ., Japan. Univ., China. 2 Department of Physics, Shinshu Univ., Japan. 19 Department of Astronomy, School of Physical Sciences, Univ. of Science 3 School of Astronomy and Space Science, Nanjing Univ., China. and Technology of China, China. 4 Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, 20 Department of Physics and Tsinghua Centre for Astrophysics (THCA), CAS, China. Tsinghua Univ., China. 5 National Astronomical Observatories, CAS, China. 21 Tsinghua Univ.-National Astronomical Observatories of China (NAOC) 6 Department of Mathematics and Physics, Tibet Univ., China. Joint Research Center for Astrophysics, Tsinghua Univ., China. 7 Department of Physics, Hebei Normal Univ., China. 22 Department of Astronomy, Tsinghua Univ., China. 8 Univ. of Chinese Academy of Sciences, China. 23 College of Industrial Technology, Nihon Univ., Japan. 9 Institute of Frontier and Interdisciplinary Science and Key Laboratory of 24 National Institute of Informatics, Japan. Particle Physics and Particle Irradiation (MOE), Shandong Univ., China. 25 National Institute of Information and Communications Technology, Japan. 10 Institute of Modern Physics, SouthWest Jiaotong Univ., China. 26 Department of Mechanical and Electrical Engineering, Shangdong 11 Faculty of Engineering, Yokohama National Univ., Japan. Management Univ., China. 12 Faculty of Engineering, Kanagawa Univ., Japan. 27 College of Science, China Univ. of Petroleum, China. 13 Faculty of Education, Utsunomiya Univ., Japan. 28 Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, Japan. 14 Faculty of Systems Engineering, Shibaura Institute of Technology, Japan. 29 Department of Physics, Konan Univ., Japan. 15 Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo, Japan. 30 Shonan Institute of Technology, Japan. 16 Polar Environment Data Science Center, Joint Support-Center for Data 31 Research Institute for Science and Engineering, Waseda Univ., Japan. Science Research, Research Organization of Information and Systems, Japan. 32 Japan Atomic Energy Agency, TJapan. 17 National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, 33 Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain China. Observatory, CAS, China.



 $1^{1} 10 10^{2} 10^{3} 10^{4} 10^{5} 10^{6} 10^{7} 10^{8} 10^{9} 10^{10} 10^{11} 10^{12} 10^{13} 10^{14} 10^{15} 10^{16} 10^{16} 10^{11} 10^{11} 10^{12} 10^{11} 10^$ 10^{.4} 10^{.3} 10^{.2} 10^{.1} エネルギー(eV) 電子加速器(LEP) 観 測対象の

電磁波のエネルギーは波長で表す

電子ボルト(eV):1Vの電位差で電子1つが得るエネルギー

素粒子のエネルギーの単位として良く用いられる

エネル

sub-PeV: 10¹⁴~10¹⁵ eV = 0.1 - 1ペタ電子ボルト(PeV) →可視光線の100兆倍から1000兆倍の最高エネルギー



宇宙のどこから飛んでくるの?



太陽

超新星残骸? 活動的な銀河?? (星の爆発後のざんがい) (超巨大ブラックホール)

など考えられている。。。











宇宙線(陽子)はプラスの電気を帯びているので、 磁場によって曲がり、どこから来たか分からない



"We" are here

宇宙線(陽子)はプラスの電気を帯びているので、 磁場によって曲がり、どこから来たか分からない



"We" are here

宇宙線と星間物質が衝突しガンマ線を放射 ガンマ線は真っ直ぐやって来るので 来た方向がわかる!

Image: NASA

§ ガンマ線の観測方法



実験場所

(高地!:地上だと空気シャワーが空気に吸収されてしまう)



中国 チベット自治区 羊八井(ヤンパーチン) 標高4300m ラサから北西へ90km (車で~2時間)



チベット空気シャワー実験

本研究の鍵となる技術



地表空気シャワー観測装置 65,700m² 多数のシンチレーション検出器

30年間の実績あり!

古くからある技術、劣化することが ほとんどなく安定して動作する 広い視野で、昼夜問わず観測可能 地下水チェレンコフ型ミューオン 観測装置(注水前) 3,400m²

(スーパー)カミオカンデの技術を応用 することで安価,低雑音で大面積の ミューオン観測装置を達成。 ミューオンが水中で放射するチェレ ンコフ光を利用。



チベット空気シャワー実験

本研究の鍵となる技術



地表空気シャワー観測装置 65,700m² 多数のシンチレーション検出器

30年間の実績あり!

古くからある技術、劣化することが ほとんどなく安定して動作する 広い視野で、昼夜問わず観測可能 地下水チェレンコフ型ミュー粒子 観測装置(注水前) 3,400m²

(スーパー)カミオカンデの技術を応 用することで安価,低雑音で大面積 のミュー粒子観測装置を達成。 ミュー粒子が水中で放射するチェレ ンコフ光を利用。





宇宙線雑音中のガンマ線の選別

ガンマ線を観測するには圧倒的に数の多い宇宙線雑音が 邪魔である

ガンマ線を選別的に観測したい!

空気シャワーの主な成分

電子、陽電子、光子・・・ 土で吸収される ミュー粒子・・・ 土で吸収されにくい

ガンマ線の作る空気シャワー中にはミュー粒子が少ない 宇宙線の作る空気シャワーはミュー粒子が多い

地下に粒子検出器を追加すればよい!



→ 地下ミュー粒子観測装置

<u>プロトタイプ水チェレンコフミュー粒子観測装置</u>



地下 2.5m (物質厚 ~515g/cm² ~19X₀) 7.2m×7.2m×水深1.5m 水槽 2台 20"ФРМТ (HAMAMATSU R3600) 2本/水槽 水槽材質: コンクリート 白色壁 水循環なし・ろ過なし

チベットでの建設の実証 シミュレーションとの比較 sub-PeV領域ガンマ線のテスト観測

2007年 9月 1日 建設開始 2007年11月26日 竣工











2007年11月16日 プロトタイプチベットミュー粒子観測装置



プロトタイプチベットミュー粒子観測装置 土埋め戻し後



南プール:白色エポキシ樹脂防水材(高価)





北プール:セメント系防水材+タイベックシート(安価)



注水(井戸の地下水)



ミュー粒子検出器 信号の大きさの時間変化

(1 cell, PMT1+PMT2)



水チェレンコフ型ミュー粒子観測装置

シンチレーション検出器数 0.5 m² x 597=~50,000m²





3,400m² 地下ミュー粒子検出器の建設風景



直径20インチ光電子増倍管をミューオン検出器に取付作業中



タイベックシートを貼った壁と2本の20インチ光電子増倍管



地形



宇宙線雑音の除去

Amenomori+, PRL 126, 141101 (2021)



除去前 >1000万個 ほとんど宇宙線ノイズ 除去後 **38**個 天の川からのガンマ線!





sub-PeV銀河面拡散ガンマ線

銀河系星間物質(陽子)

sub-PeVガンマ線 (0.4 - 1 PeV)



Universität Wuppertal) at CRA2019 workshop

銀河系PeV宇宙線プール

Hartmann et al. (1997) Dickey & Lockman (1990)

Amenomori+, PRL 126, 141101 (2021)

- ✓ 銀河面からのPeV宇宙線起源のsub-PeV拡散ガンマ線を世界初観測
- ✓ 銀河系内にPeVatronが存在することを実験的に証明
- ✓ 最高ガンマ線エネルギー ~ 1 PeV







Draw the "Kifune" plot - the integral number of high energy sources detected as a function of year - in the style of a plot developed by Tadashi Kifune (for example http://adsabs.harvard.edu/abs/1996NCimC..19..953%). The data for the number of X-ray and HE (GeV) gamma-ray sources come from a page on HEASARC maintained by Stephen A. Drake (retrieved 2017-09-28) : https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/headates/how_many_xray.html The data for the number of VHE (TeV) gamma-ray sources is from TeVCat maintained by Deirdre Horan and Scott Wakely (retrieved 2017-09-28) : https://tevcat.uchicago.edu/

✓ Tibet ASy 実験は天文学に新しいエネルギー窓 (>0.1 PeV)を開いた.

✓ 現在、北天で1ダース程の超高エネルギーγ線放射天体が世界の実験で見つかった。
 (Tibet ASy, HAWC, LHAASO等) しかし、PeVatronの確実な証拠はなかった。

35

→ 南天(南半球)での超高エネルギーガンマ線観測が必要

先行実験で(30年間)できなかった理由

VERITAS望遠鏡

(Wikipediaより)

・Tibet ASy 実験

広視野:2 sr (45度程度) (利点)

観測時間:昼夜一年中

->数千時間/年/1天体(利点)

水チェレンコフ型ミュー粒子検出器

->宇宙線雑音 1/1000以下[0.1 PeV近辺] (利点)

・大気チェレンコフ望遠鏡

狭視野:数度

観測時間:月無し晴夜(1/10程度)

->50 時間/年/1天体(欠点)

角度分解能:0.1度[1 TeV] (利点)

・CASA-MIA 実験

広視野:2 sr (45度程度) (利点)

観測時間:昼夜一年中

->数千時間/年/1天体(利点)

プラスチックシンチレーション ミュー粒子検出器

->宇宙線雑音 0.02 [0.1 PeV近辺] (欠点)

CASA – MIA (Wikipedia $\sharp \eta$)







Andes

Large area

PArticle detector for

Cosmic ray physics and

Astronomy

The ALPACA Collaboration ALPACA**実験共同研究者リスト**



M. Anzorena ^A, C. A. H. Condori ^C, E. de la Fuente ^D, A. Gomi ^E, Y. Hayashi ^B, K. Hibino ^F, N. Hotta ^G, A. Jimenez-Meza ^D, Y. Katayose ^E, C. Kato ^B, S. Kato ^A, I. Kawahara ^E, T. Kawashima ^A, K. Kawata ^A, T. Koi ^H, H. Kojima ^I, D. Kurashige ^E, R. Mayta ^{J,K}, P. Miranda ^C, K. Munakata ^B, K. Nagaya ^E, Y. Nakamura ^A, C. Nina ^C, M. Nishizawa ^M, R. Noguchi ^E, S. Ogio ^A, M. Ohnishi ^A, S. Okukawa ^E, A. Oshima ^H, M. Raljevich ^C, H. Rivera ^C, T. Saito ^N, Y. Sakakibara ^E, T. Sako ^A, T. K. Sako ^A, T. Sasaki ^F, S. Shibata ^I, A. Shiomi ^L, M. Subieta ^C, N. Tajima ^O, W. Takano ^F, M. Takita ^A, Y. Tameda ^P, K. Tanaka ^Q, R. Ticona ^C, I. Toledano-Juarez ^D, H. Tsuchiya ^R, Y. Tsunesada ^{J,K}, S. Udo ^F, K. Yamazaki ^H, Y. Yokoe ^A et al. (The ALPACA Collaboration)

ICRR, Univ. of Tokyo ^A, Dept. of Phys., Shinshu Univ.^B, IIF, UMSA ^C, Univ. de Guadalajara ^D,
 Fac. of Engn., Yokohama Natl. Univ.^E, Fac. of Engn., Kanagawa Univ.^F, Utsunomiya Univ.^G,
 Coll. of Engn., Chubu Univ.^H, Astro. Obs., Chubu Univ.^I, Grad. Sch. of Sci.,
 Osaka Metro. Univ.^J, NITEP, Osaka Metro. Univ.^K, Coll. of Ind. Tech., Nihon Univ.^L, NII ^M,
 Tokyo Metro. Coll. of Ind. Tech.^N, RIKEN ^O, Fac. of Engn., Osaka Electro-Comm. Univ.^P,

共同研究者51名

サン・アンドレス大学(UMSA) Universidad Mayor de San Andrés



- ✓ チャカルタヤ山(海抜5,200m)
- ✓世界最高高度にある宇宙線観測所

宇宙線観測所

✓ 1947年: C. F. Powellらによる
 パイ中間子の発見
 (1950 ノーベル賞)





ALPACA 実験場所: Chacaltaya Plateau (チャカルタヤ・プラトー)

- 16°23'S, 68°08' W
- ラパスから車で約1時間
- 海抜4740m (~570g/cm²)
- 250,000m² (500m×500m)
- 平坦は土地 (傾斜度 ~±1°)

どうしてボリビアか?

- 平らな高地: (海抜> 4000m)
 宇宙線やガンマ線が大気で吸収されてしまうため
 大きな観測装置用の平らで大きな敷地が必要
- 南半球;

南天にある銀河中心等面白いガンマ線放射天体が観測可能 (北半球からでは観測不可能) 銀河中心は宇宙線加速器(PeVatron)として最有力

 宇宙線研究における日本とボリビアの長期実績 (インフラストラクチャー:電気,水,道路, BASJE実験:1962年より

ALPACA 実験装置の概要



- ✓ 角度分解能~0.2° @0.1 PeV, エネルギー分解能~20%@0.1 PeV
- ✓ 100% duty cycle, 視野角 θ_{zen}<40° (性能OK), θ_{zen}<60° (性能やや劣化)

ALPAQUITA (小さな ALPACA)

- ALPACA の25%ほどのプロトタイプ観測装置
 - 97 台のプラスチックシンチレーション検出器
 - 1プール(16単位)の地下ミュー粒子検出器
 (地下ミュー粒子検出器はまもなく建設開始予定)
- 目的
 - インフラストラクチャーの整備
 - 数個の明るいsub-PeVガンマ線放射天体の観測
 - 宇宙線異方性の研究











2022年5月末~ (3年ぶり!)

ALPAQUITA とインフラストラクチャー

- 中央エレクトノニクス小屋
- フェンス
- 電力線
- ケーブル用の溝
- 避雷針
- 長距離無線LAN (Wifi)
- 水供給システム

















ALPACA実験計画の予定

