

第10回 高エネルギー天文学の観測装置

2021年8月2日 7:05

X線と大気

1. 「宇宙空間」の一般的な定義は？

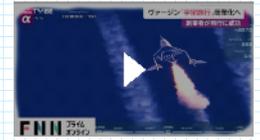
高度 $\geq 100\text{km}$ (Kármán line)



https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1n_line

高度と「無重力」は関係ないので注意してください。
 一般相対性原理：
 重力質量=慣性質量
 重力と慣性力は区別がつかない --> 重力に身を任せていると重力を感じない

弾道飛行 (parabolic flight) の例
 ヴァージン「宇宙旅行」商業化へ 創業者が飛行に成功



Zero-G Flight - Parabolic Flight with the Airbus A300 Of Novespace



無重力塔
https://www.istaae.ist.go.jp/article/iejjournal1994/114/12/114_12_781.pdf

2. X線天文学を研究するのに、なぜ人工衛星で大気圏外に出る必要があるのか？

X線が地球大気で吸収されてしまうから

$$\propto E^{-3}$$

3. 大気圧における大気の密度を $1.2 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$ (at 15 C)、窒素、酸素の光電吸収の断面積を 10^{-19}cm^2 として、
 ~1keVのX線の大气中における「平均自由行程 (mean free path)」を見積もれ。

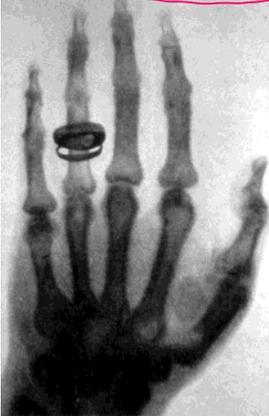
$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{14}{16} \frac{14}{16}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{1.2 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3} \times 1.67 \times 10^{-24} \text{g} = \frac{2.3}{2.7} \times 10^{-23} \text{g}$$

$$\frac{1.2 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3}{2.5 \times 10^{-23} \text{g}} \approx 5 \times 10^{19} \text{cm}^3$$

$$\Rightarrow 10^{-19} \text{cm}^2 \times 5 \times 10^{19} \text{cm}^3 \approx \frac{1}{5} \text{cm} \approx 2 \text{mm}$$

4. ~1 keVのX線に対して、大気は不透明であることが分かった。レントゲン撮影では、なぜ~~身体~~身体をX線が通過できるのか？

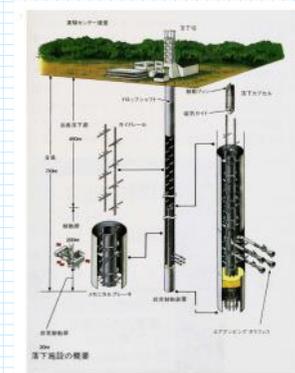


← 高エネルギーのX線を伴っているから

放射線検査

While 20 keV is a typical energy for soft tissue X-rays, for example mammograms, higher energies (around 150 keV) are used for hard tissues, for example bone.

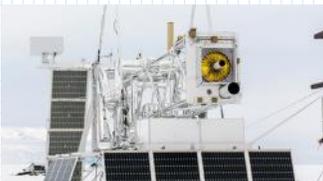
<http://enpx.eu/index.php?c=content&id=1&newsapplications/craymed&lang=en>



5. X線天文学の観測研究に、どうしても、人工衛星が必要？

どうでもいい

高エネルギーのX線 (硬X線)
 (~ 数百 keV) hard X-rays
 は大気上層で観測できる





100 cm x 100 cm x 4 m (100 x 100 cm)
 (2 階 100cm) hard X-rays
 は大気上層での観測が必要



南極に向けた気球実験

Photo Credit: Mike Lucibella
 The X-Calibur telescope was designed to study the x-rays emitted by neutron stars and black holes.

<https://centerforxray.wustl.edu/science/4802/>

Hard X-ray Polarimetry with X-calibur <https://sites.wustl.edu/xcalibur/>

FOXSI: Focusing Optics X-ray Solar Imager <http://foxsi.umn.edu/>



<https://www.nasa.gov/ip/en/news/topics/2019/20190115-solar.html>

6. 人工衛星に比べて、観測気球や観測ロケットを利用するメリットは？

お手軽

安い、何度も実施できる。

実験的物にいろいろ試せる

気球、ロケット実験 ⇒ 人工衛星

X線、ガンマ線検出装置の原理

エネルギー領域ごとに、X線やガンマ線の検出原理を見ていこう。

- 2-10 keVのX線

ガスや固体による光電吸収 → 光電子(photoelectron) → 電気信号

→ 芯線で検出される。



http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/csc/suzaku_td/no1e12.html

- 数百 keV
シンチレーター (シンチレーションカウンター): ガンマ線 → 光子 (可視光) → 光電子増倍管 (photo-multiplier tube; PMT) → 電気信号

<https://doi.org/10.1093/nas/59.sn1.S35>

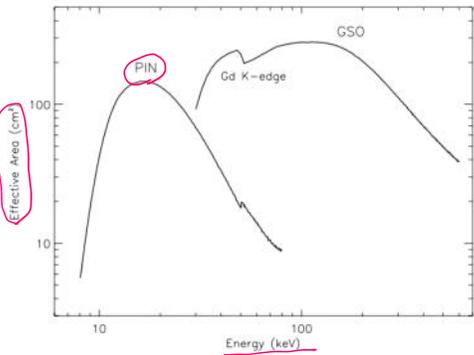


Fig. 9. Total effective area of the HXD detectors, PIN and GSO, as a function of energy. Photon absorption by materials in front of the device is taken into account.

MeV領域の「感度ギャップ」

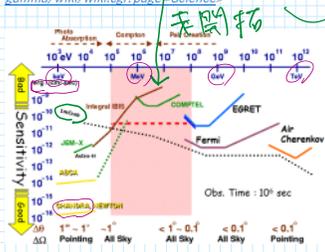
MeVからGeVまでを切り拓くための、COMPTEL(1991-2000)というガンマ線望遠鏡が全天観測を行いました。観測できた正常天体はわずか30個程度に止まっています。これは宇宙空間では予想以上に雑音が多く、想定した検出感度を達成できなかったためです。MeV領域のガンマ線観測においては、宇宙線と塵体との相互作用や地球大気からのガンマ線・中性子など多数の雑音現象が存在し、観測自体が非常に難しいです。貼り付け元 <http://www-ur.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/MeV_gamma/wiki/wiki.cgi?page=Science>

原始ブラックホールの蒸発が
新しい(たまたま)の源に

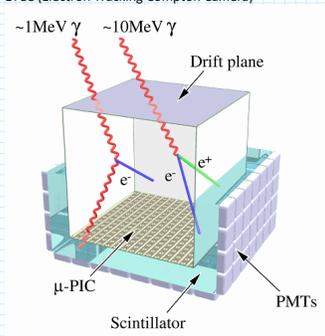
カニ星雲の明るさ = 1 Crab

X線コンプトンの
天体の明るさの単位

Crab カニ星雲
「標準光源」
"Standard candle"



京都大学で開発されている「電子飛跡検出型コンプトンカメラ」
ETCC (Electron Tracking Compton Camera)





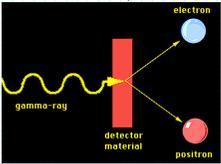
SMILE-2+のETCCは、Ar 2気圧の30×30×30 cm³のガス検出器とそれを取り囲むように配置されたGSOビクセルシンチレータレイで構成されています。これまでのETCCと異なり、GSOシンチレータをガス容器内部に設置したことで、散乱ガンマ線を効率良く捉えることができるようになった事に加え、従来は測定範囲外であった0.3 MeV以上の高エネルギー電子も検出できるため、0.3~1.5 MeVの広いエネルギー帯域に渡って、大きな有効面積が実現可能となっています。2018年4月7日に、オーストラリアアリススプリングスより放球され、26時間余の水平浮遊の後、実験機は無事回収されました。

原付 村井元 <<http://www.crc.ac.th/kyofu-a.ac.in/research/MeV-gamma/isis/isis77page-SMILE-2+SF2/>>

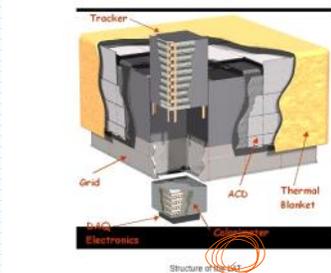
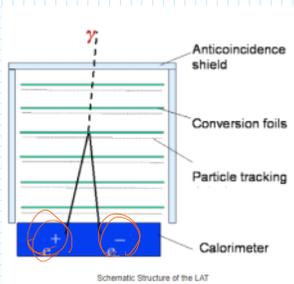
- ~20 MeV から > 300 GeV

The pair telescope

(http://teacherlink.ed.usu.edu/linasa/reference/imaginedvd/files/imaginedocs/science/how_12/pair_telescopes.htm)



ガンマ線 → 電子・陽電子対生成 → カロリメーター



https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/documentation/Cicerone/Cicerone_Introduction/LAT_overview.html

~TeVから~PeV
超高エネルギーガンマ線 → 地球大気の空気チェレンコフ → 空気シャワー → 地上の可視光望遠鏡で観測



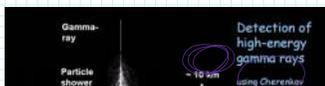
夜しか観測できず

HESS

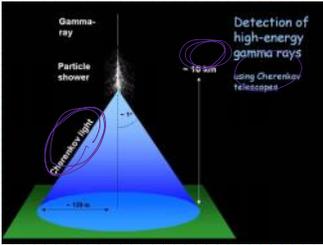
+ 天の研 研 研

ガンマ線

粒子が光速に近い速度で進むと、物質中の検出器



1201107052



<https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/about/telescopes/>

CTA project Cherenkov Telescope Array project

[CTA Science: Emission to Discovery](#)



<https://www.cta-observatory.org/>

中国の空気チェレンコフ望遠鏡による最近の発見

NEWS AND VIEWS | 02 June 2021

Hunting the strongest accelerators in our Galaxy

Twelve candidates for the most powerful astrophysical particle accelerators in the Milky Way have been detected. This advance will help to uncover the nature of these exotic objects.

<https://www.nature.com/articles/d41586-021-01377-1>

[The Large High Altitude Air Shower Observatory \(LHAASO\)](#)

<http://english.ihep.cas.cn/appendix/pic/20190421/201904210948403188.jpg>



Article | Published: 17 May 2021

Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources

Zhen Cao [✉], F. A. Aharonian [✉], [...] X. Zuo

Nature **594**, 33–36 (2021) | [Cite this article](#)

Here we report the detection of more than 530 photons at energies above 100 teraelectronvolts and up to 1.4 PeV from 12 ultrahigh-energy γ -ray sources with a statistical significance greater than seven standard deviations.

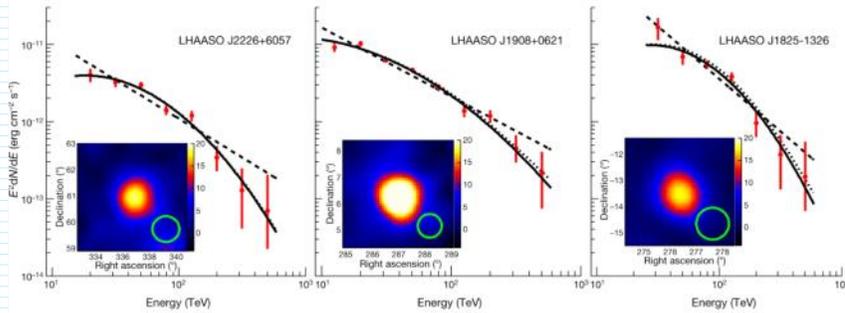
<https://www.nature.com/articles/d41586-021-01358-7>

$10^9 \text{ eV} = \text{GeV}$
 $10^{12} \text{ eV} = \text{TeV}$
 $10^{15} \text{ eV} = \text{PeV}$

Table 1 UHE γ -ray sources

From: Ultrahigh-energy photons up to 1.4 petaelectronvolts from 12 γ -ray Galactic sources

Source name	RA (°)	dec. (°)	Significance above 100 TeV ($\times\sigma$)	E_{\max} (PeV)	Flux at 100 TeV (CU)
LHAASO J0534+2202	83.55	22.05	17.8	0.88 ± 0.11	1.00(0.14)
LHAASO J1825-1326	276.45	-13.45	16.4	0.42 ± 0.16	3.57(0.52)
LHAASO J1839-0545	279.95	-5.75	7.7	0.21 ± 0.05	0.70(0.18)
LHAASO J1843-0338	280.75	-3.65	8.5	$0.26 - 0.10^{+0.16}$	0.73(0.17)
LHAASO J1849-0003	282.35	-0.05	10.4	0.35 ± 0.07	0.74(0.15)
LHAASO J1908+0621	287.05	6.35	17.2	0.44 ± 0.05	1.36(0.18)
LHAASO J1929+1745	292.25	17.75	7.4	$0.71 - 0.07^{+0.16}$	0.38(0.09)
LHAASO J1956+2845	299.05	28.75	7.4	0.42 ± 0.03	0.41(0.09)
LHAASO J2018+3651	304.75	36.85	10.4	0.27 ± 0.02	0.50(0.10)
LHAASO J2032+4102	308.05	41.05	10.5	1.42 ± 0.13	0.54(0.10)
LHAASO J2108+5157	317.15	51.95	8.3	0.43 ± 0.05	0.38(0.09)
LHAASO J2226+6057	336.75	60.95	13.6	0.57 ± 0.19	1.05(0.16)



No known X-ray or gamma-ray (< GeV) sources at these locations. What are these unidentified PeV sources?

... researchers studied the surface brightness of the region and connected the emission to the **Cygnus OB2 star cluster**, where powerful shock waves generated by strong stellar winds might accelerate particles to PeV energies.

<https://www.nature.com/articles/d41586-01-01371-1>