

2012.9.12 at 京都産業大



# 宇宙線観測の歴史

---

## 初期の観測を中心に

元東京大学宇宙線研究所

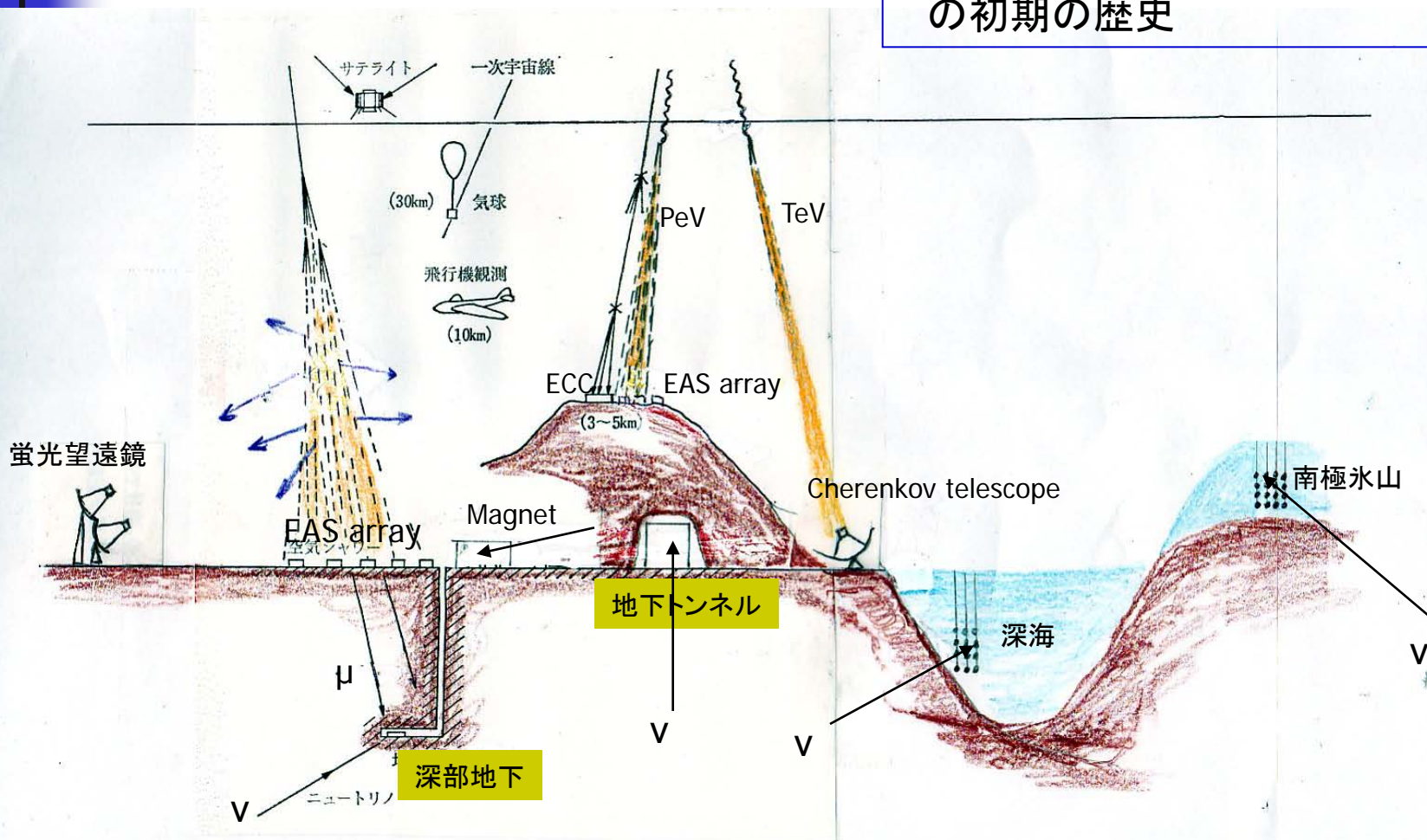
元福井工大宇宙環境情報学科

永野元彦

# 宇宙線の観測方法

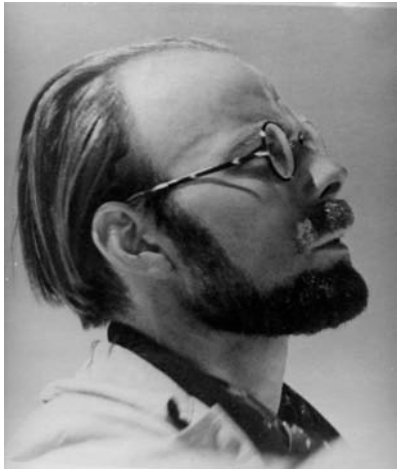
- ・ EASによる宇宙線エネルギー上限探索
- ・ ミューオン・ニュートリノ観測
- ・ EASによるガンマ線観測

の初期の歴史

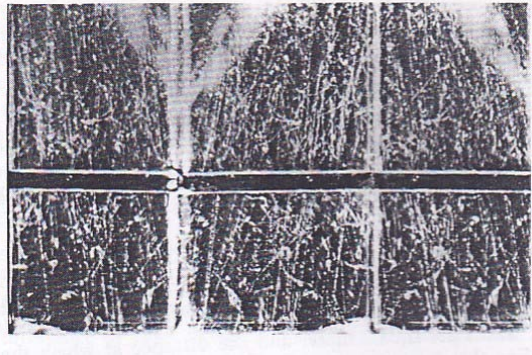


P. Auger, R. Maze et al.

# 空気シャワーの発見 1938



Pierre Auger



1938年以前に、霧箱により、シャワーの写真が撮られていた。  
Skobelzyne and Auger

- GM 計数管の分解能msecから  $\mu\text{sec}$ に
- Accidental coincidence の減少
- 計数管を150m離しても存在する同時計数からシャワーの存在
- 建物の天井でなく、上空からきているExtensive air showerであることをつきとめる

1940年代終頃までに高山での観測もおこない  
 $10^{15}$  eV 程度の宇宙線の存在  
(一次宇宙線は電子として推定)



# 1950年代初の状況

---

- 一次宇宙線の大部分は陽子
  - 炭素, 酸素など重い原子核の存在
  - 空気シャワーは多重発生による核カスケード
  - 三次元電磁カスケード西村・鎌田(N-K)関数
- 
- 電波望遠鏡により銀河磁場の存在
  - フェルミ加速

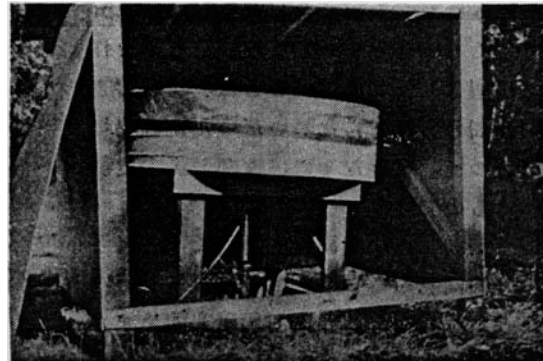
宇宙線のエネルギーの上限は $10^{15} \sim 10^{16}$  eV?

# MIT-Agassiz experiment (1954-57)

## 10<sup>18</sup> eVの宇宙線の観測

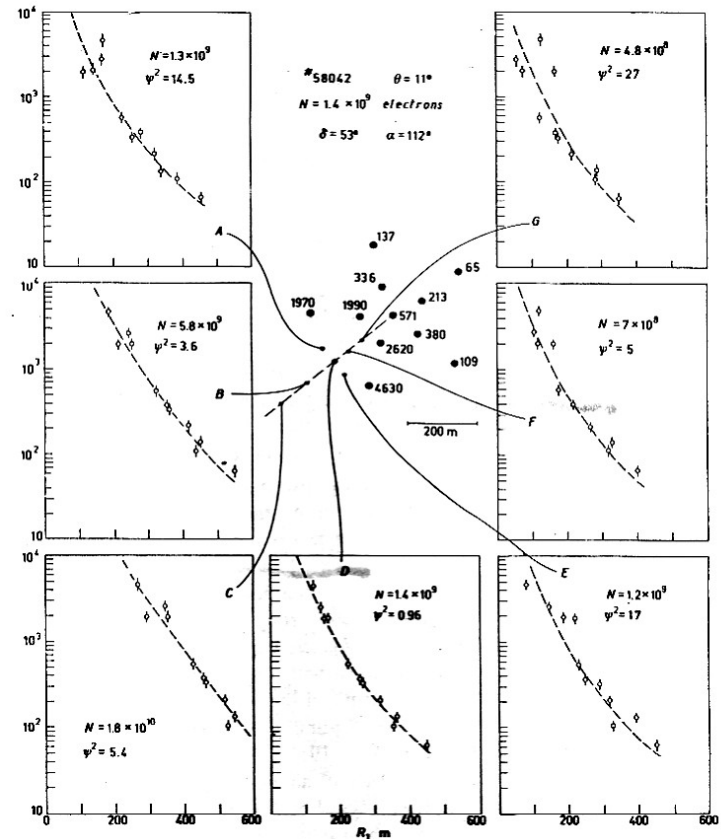


B. Rossi



小田稔作

- 1 m<sup>2</sup> のトルエン・液体シンチレータ15台のアレイ。  
(出火したためプラスチックシンチレータの開発)
- アナログコンピューターで  
シャワー中心と総粒子数  
到来方向  
の決定



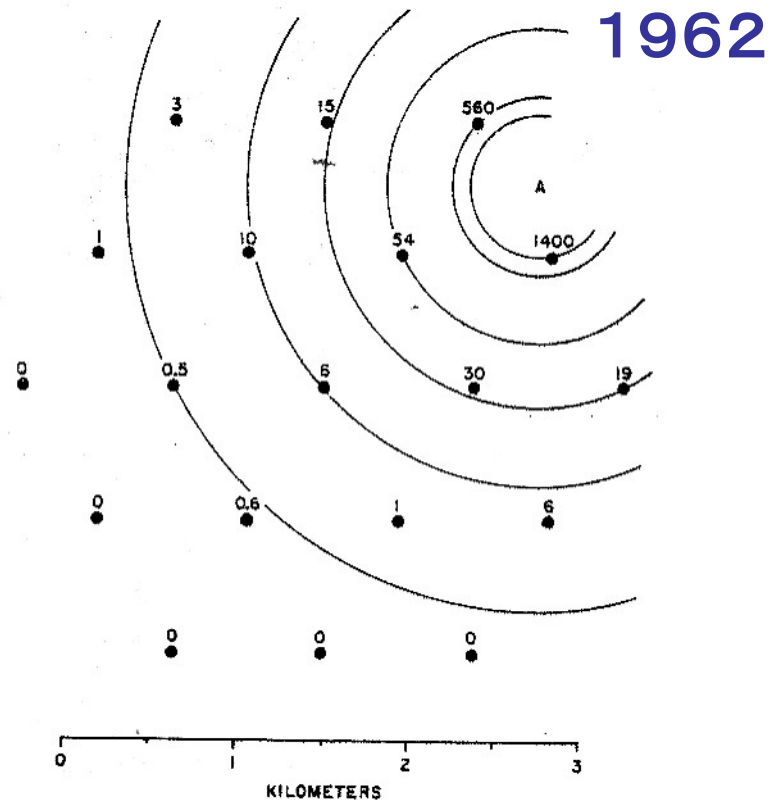
C.W.Clark et al.; Phys. Rev. 122 (1961) 637. **First >10<sup>18</sup> eV event**

# Volcano Ranch (1958~1965?)

J. Linsley and L. Scarsi



Plastic scintillator (3.3 m<sup>2</sup>)  
鉛10cmの上下(Lead burger)  
約8km<sup>2</sup>の領域に19台  
日よけの藁の中にガラガラ蛇が住み、  
見回りは大変危険だったとのこと。



J. Linsley; Phys. Rev. Lett. 10 (1963) 146

**First 10<sup>20</sup> eV event**



# 乗鞍宇宙線観測所

## 東京大学付置共同利用研究所(1953)

- 1950年 大阪市大観測小屋
- 1950年 朝日新聞社第1回学術奨励金により朝日の観測小屋

主として 宇宙線中の高エネルギー核子による核反応

大型マグネット霧箱による新粒子の探索

宇宙線強度の連続観測(仁科型電離箱、中性子モニターなど)

**大盛況で乗鞍宇宙線観測所が共同利用研としてできる。**

1953年 米国ブルックヘブン国立研究所でコスモトロン(3GeV)が稼動

大型霧箱による空気シャワーの中心部の観測

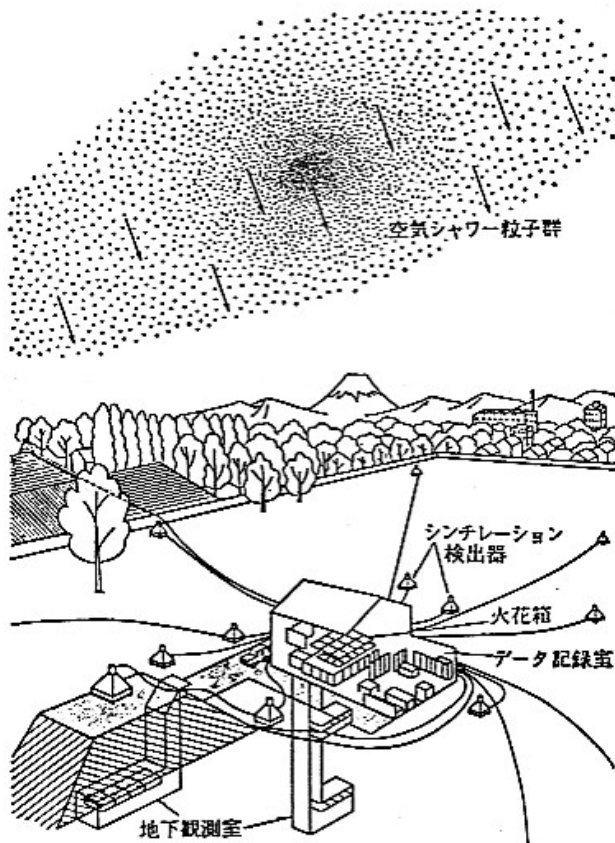
大型エマルジョン・チェンバーによる超高エネルギー現象

太陽フレアーにともなる高速中性子

宇宙線強度の連続観測(仁科型電離箱、中性子モニターなど)

# Tokyo – INS

(1956～1975) 共同利用研究所



- ・ プラスチックシンチレーター検出器
- ・ ミューオン検出器(地下5m, 15m)
- ・ 霧箱
- ・ 鉛ガラス・エネルギーフロー検出器
- ・ ネオン・ホドスコープ
- ・ クロトロンによるFast Timing
- ・ パラメロン自動記録装置
- ・ パラメロン計算機

EASを総合的に解析する、当時の技術を  
集めた画期的空気シャワー観測装置



# INS の解析

double core や

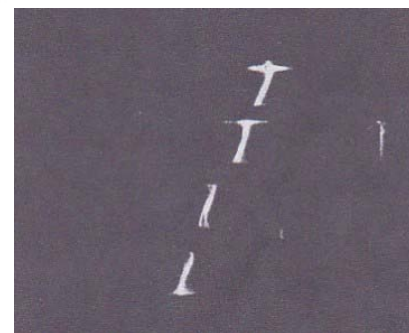


↓ ネオンホドスコープ

解像度をあげる

## 1959 Fukui and Miyamoto Spark Chamber の発明

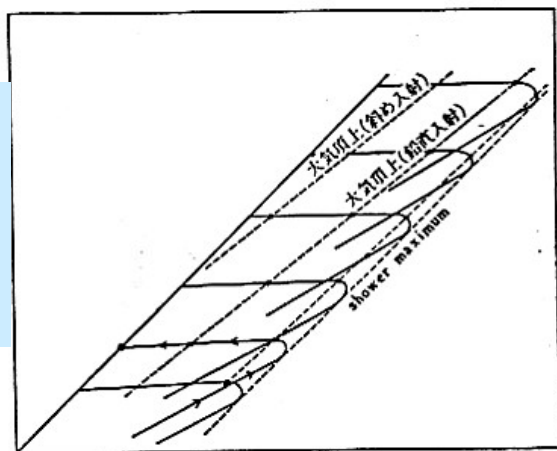
S.Fukui and S.Miyamoto;  
Nuovo Cimento XI (1959) 113



加速器実験  
衛星でのガンマ線観測 等  
必要不可欠の検出器として発展

総て粒子数

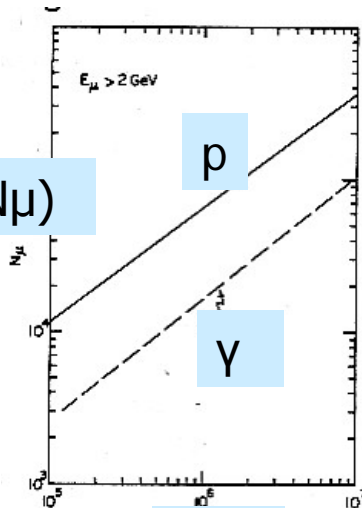
( $N_\mu$ )



総粒子数 (Ne)

( $N_\mu$ )

(Ne)



ガンマ線はμ less シャワー

$p + \text{星間物質} \rightarrow \pi^0 \rightarrow \gamma$

→ 高山一次ガンマ線観測へ

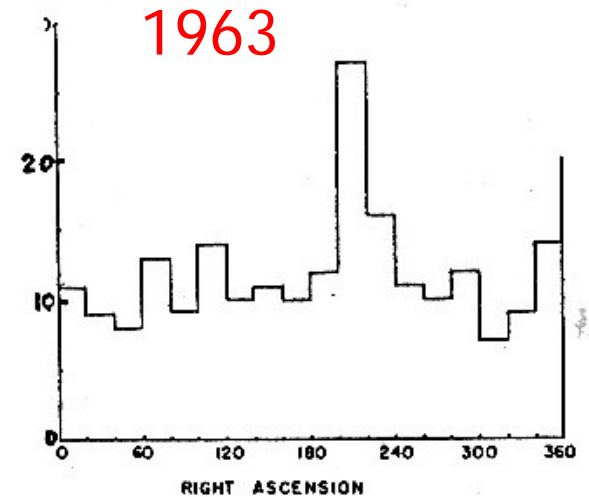
# ガンマ線観測事始

## BASJE (1962~

(Bolivia Air Shower Joint Experiment)



菅浩一



シャワーの選択条件

A	コア距離 < 8m	$\Sigma e > 5000$	$\Sigma \mu = 0$
B	" 8-20m	$> 3000$	0
C	" > 20m	$> 3000$	$< 2$

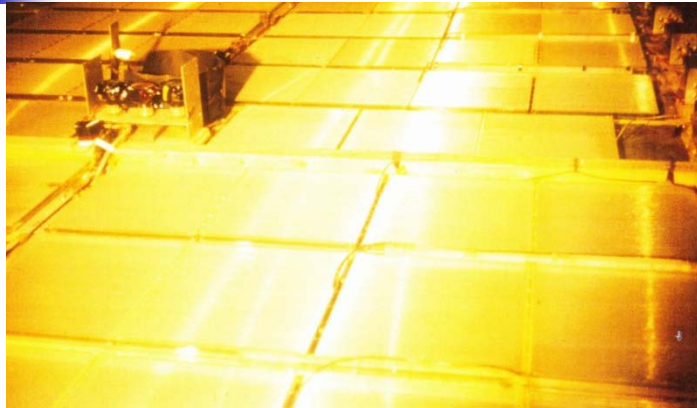
$\mu$  less shower

$4\sigma$

K. Kamata et al.; Can. J. Phys., 10  
46 (1968) S72.

# 1964

## 20 m<sup>2</sup> 放電箱

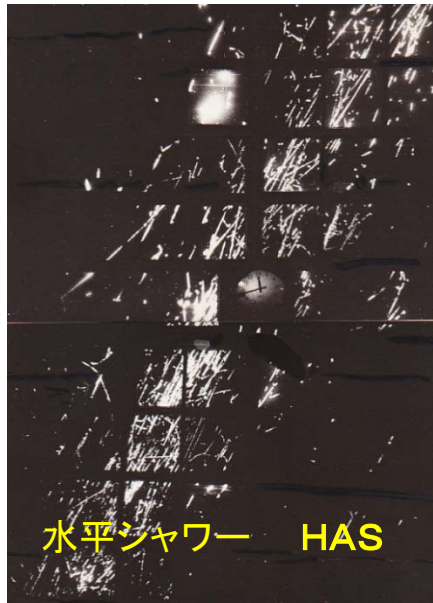


M. Nagano and S. Shibata;  
J. Phys. Soc. Japan, 20 (1965) 685



ネオンホドスコープ

HASの観測結果は  
T.Hara et al.; Acta Phys. Acad. Sci.  
Hungaricae, 29 Suppl. 4 (1979)125.

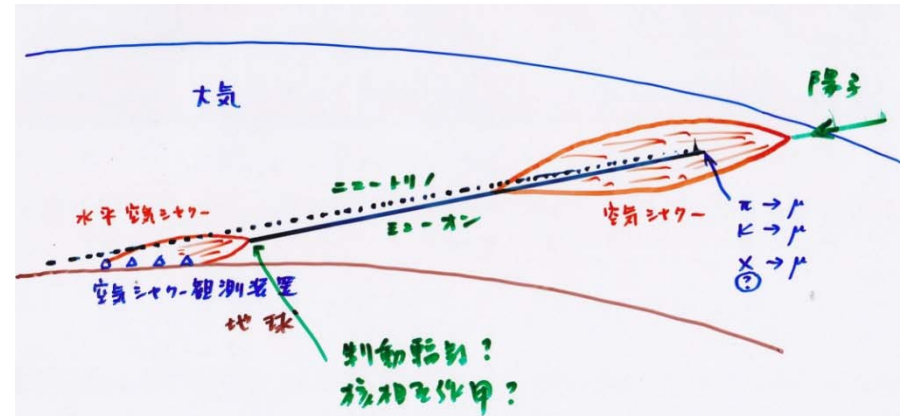
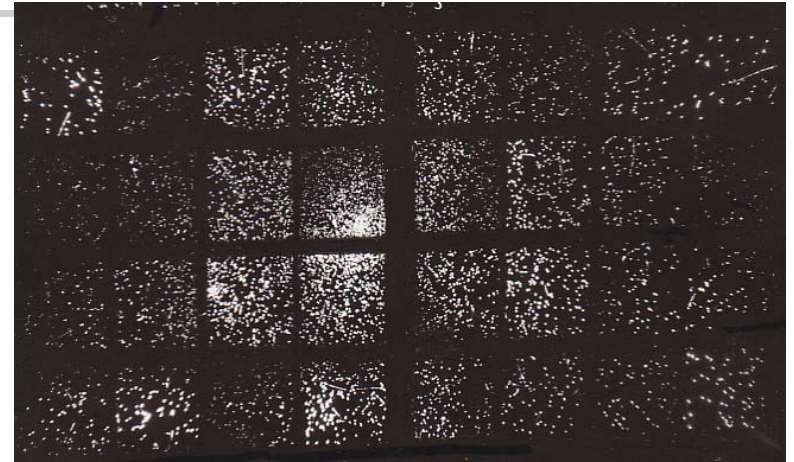


水平シャワー HAS

## Double core

### 大 $p_t$ の存在と $p_t$ 分布

T. Matano et al.; Can. J. Phys., 46 (1968) S56



1965 300 TeV のHASの観測

天頂角86度 大気厚さ12,000g/cm<sup>2</sup>

T. Matano et al.; Phys. Rev. Lett., 15 (1965) 594

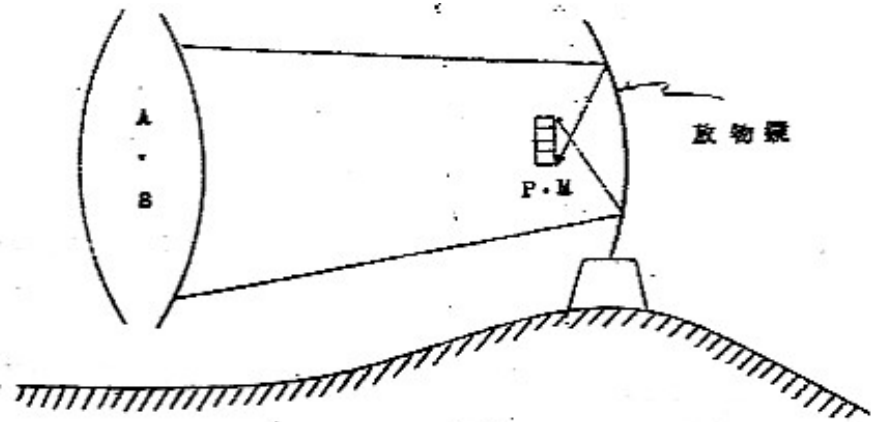


空気シャワー中の正、負の電子



大気中の窒素分子、窒素分子イオンを励起、発光

# 蛍光観測法



乗鞍シンポジウム 1958

村山喬; 宇宙線研究 3, No.5 (1958) 449

- K.Suga and G.Tanahashi  
原子核研究所サイクロトロンでシンチレーション効率を測定 (1960)  
320nm以上、1気圧で  
9.5 photons/MeV loss

菅浩一; 第5回宇宙空間科学研究会 (1964.7.11)

- K.Suga, A.Chudakov  
5<sup>th</sup> Interamerican Seminar at Bolivia (1962)  
蛍光法による観測法の具体的議論

K. Suga; Proc. 5th Inter. American Symp., La Paz, eds I. Escobar et al., 2 (1962) XLIX-1-5.

# コーネル大学の観測 1962~1969(?)



K. Greisen

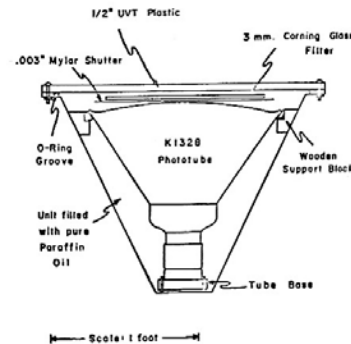
1964-1966

Wide angle 装置

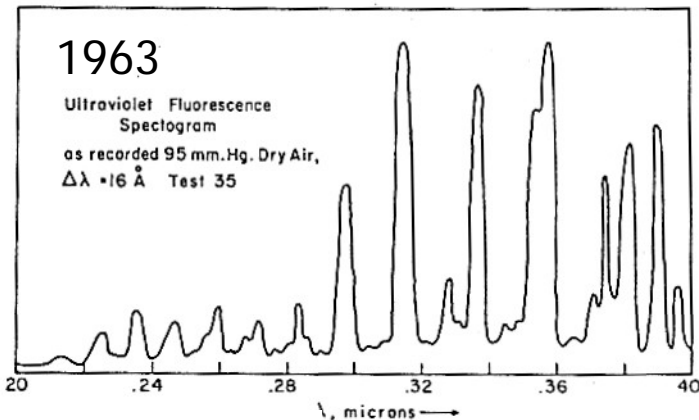
1 station

天頂、東西南北に向け5台

11, 12, 16km の三角形の  
頂点に3 stations

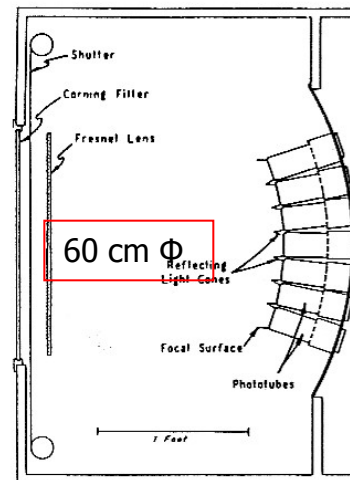


A.N. Bunner; PhD Thesis,  
Cornell U. (1967)

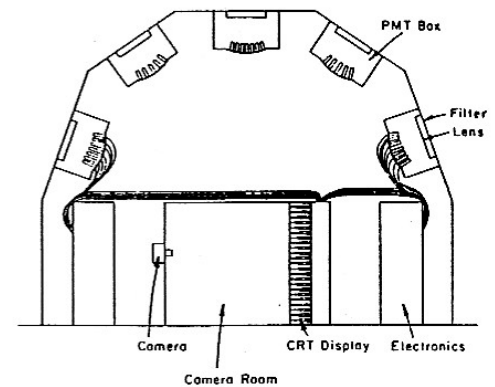


by deuterons

K. Greisen; Proc. 9th ICRC,  
London, Invited paper (1965) 609



1967年に完成



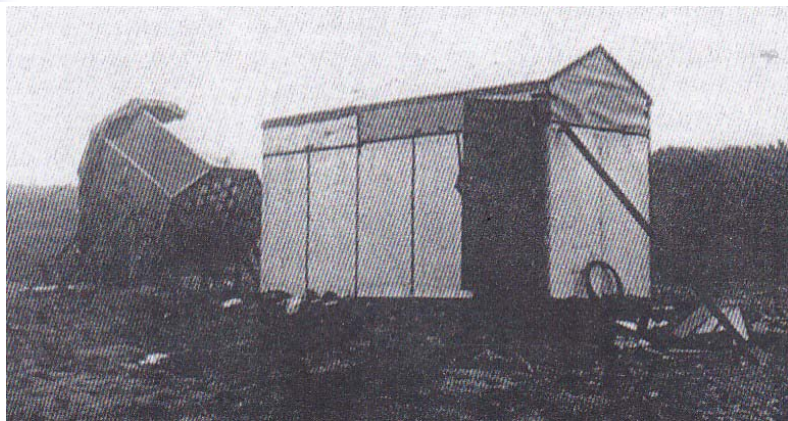
Cross-sectional view of observatory.

500 segments

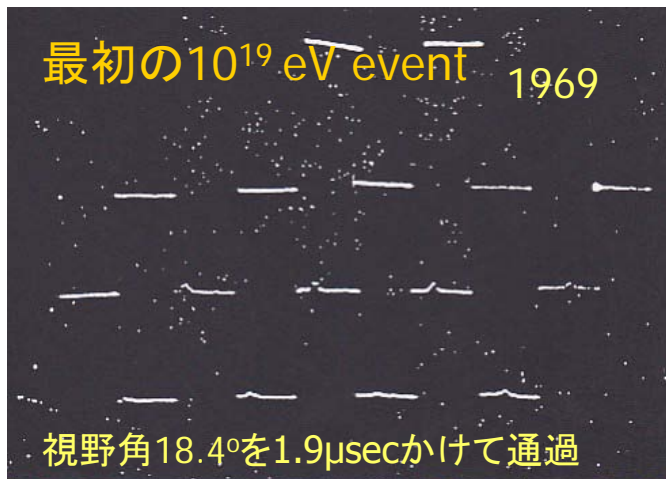
A.N. Bunner et al.; Can. J. Phys., 46 (1967)10, S266.

Tanahashi 等

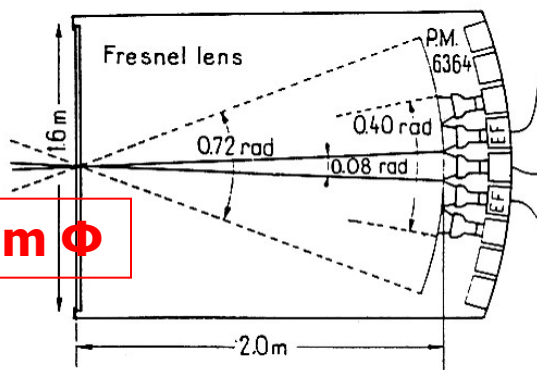
# 堂平山での観測 1968~1969



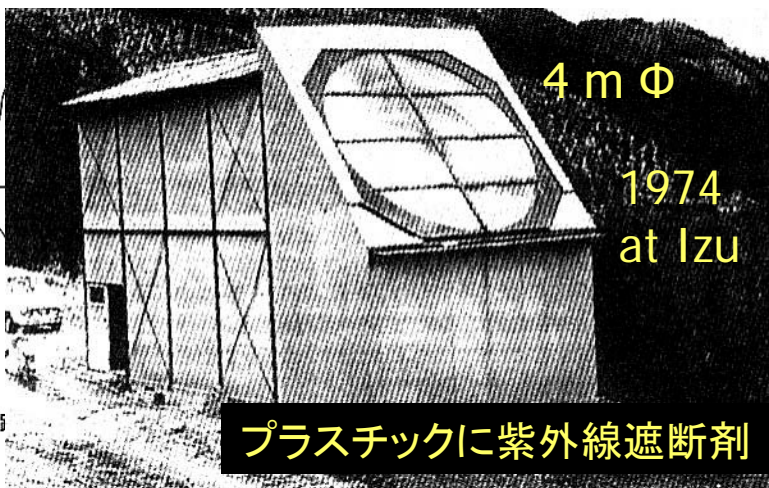
T. Hara et al.; Acta Phys. Acad. Sci. Hung. 29 (1970) 369.



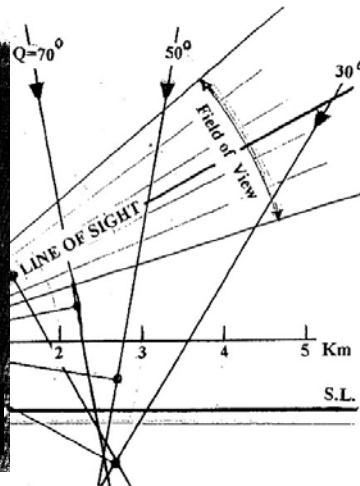
最初の $10^{19}$ eV event 1969  
視野角 $18.4^\circ$ を $1.9\mu\text{sec}$ かけて通過



第7図 TOKYO-1の構造スケッチと回



4 m  $\Phi$   
1974 at Izu  
プラスチックに紫外線遮断剤

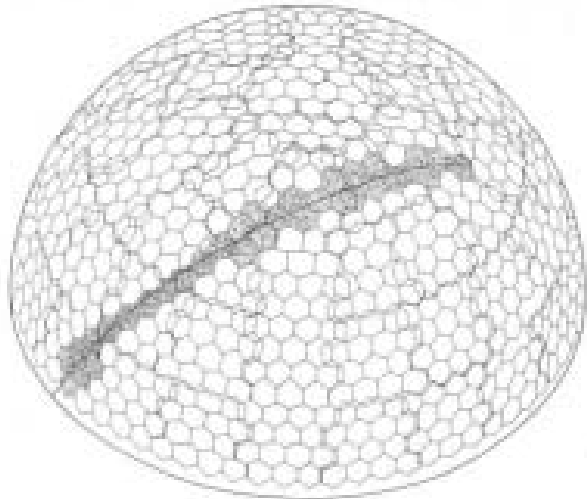




1973年から技術開発

1976年にVolcano RanchでAir Shower Arrayと連動実験

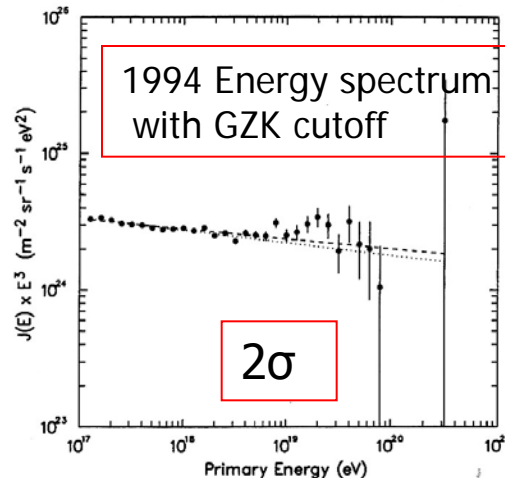
# Fly's Eye 1981-1993



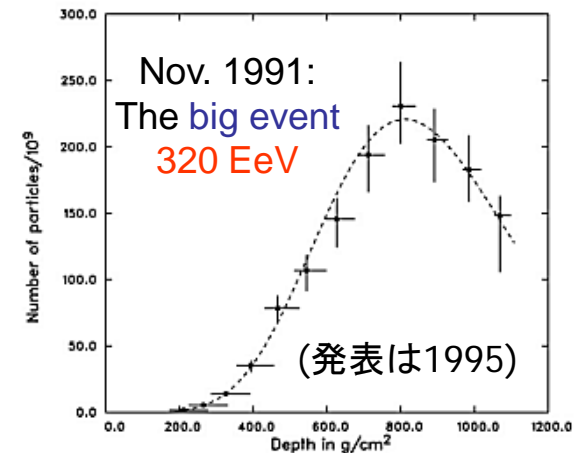
Site 1 (FE1): 67 鏡, 880PMT

Site 2 (FE2): 34 鏡

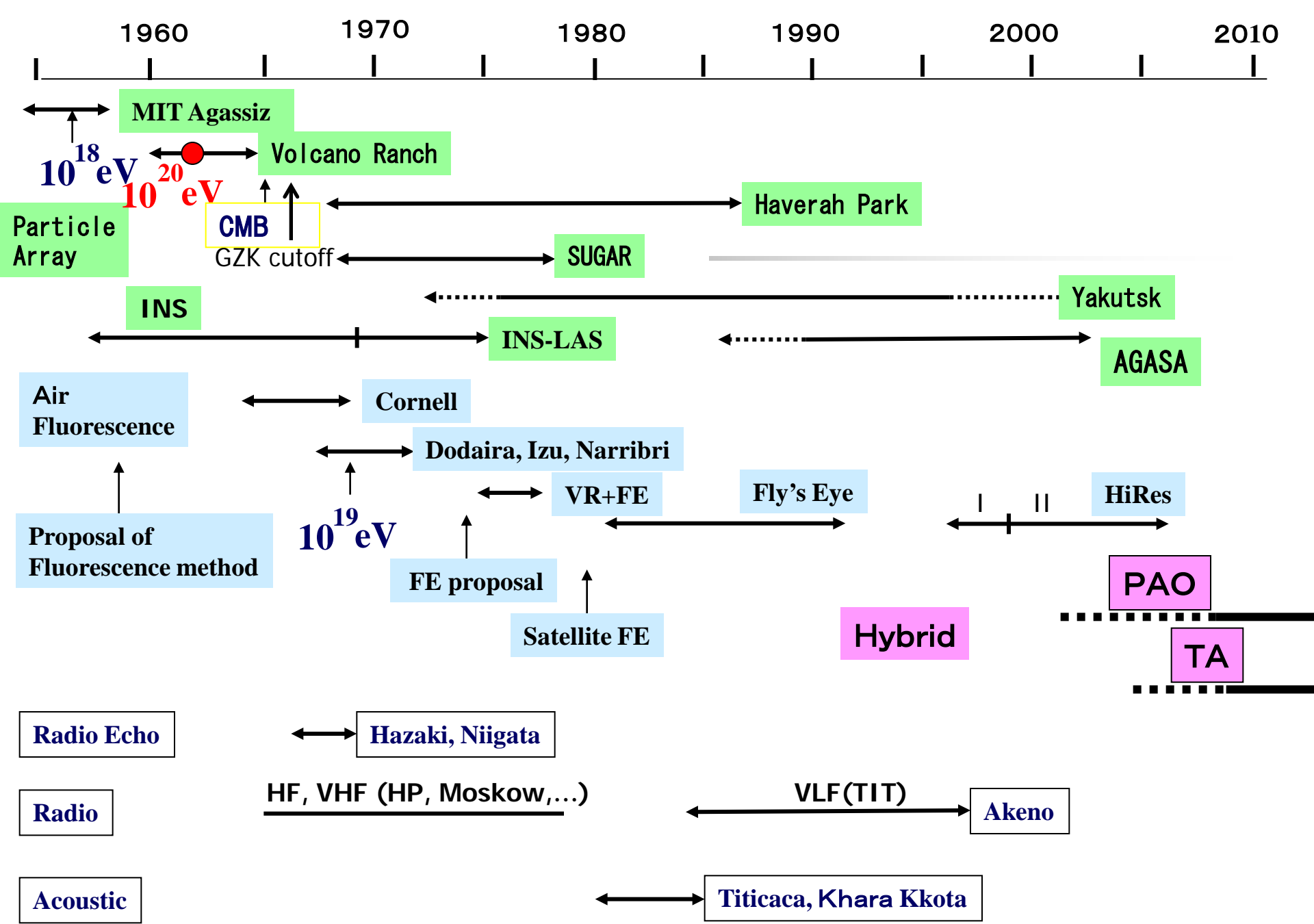
光学システムの較正方法、  
天候モニタリング、解析方法  
の地道な開発



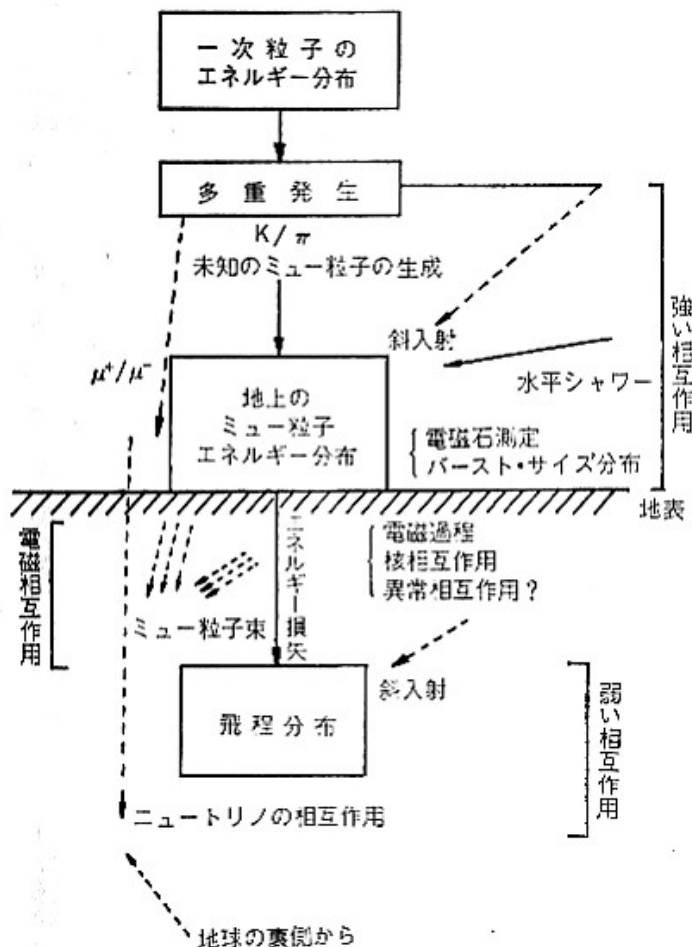
D. Bird et al.; Ap. J. 424 (1994) 491.



D. Bird et al.; Ap. J., 441 (1995) 144.



# 高エネルギー ミューオンの観測



- 一次宇宙線の
- ・ エネルギー分布
  - ・ 化学組成
  - ・ 多重発生機構  
 $K/\pi$ 、チャーム



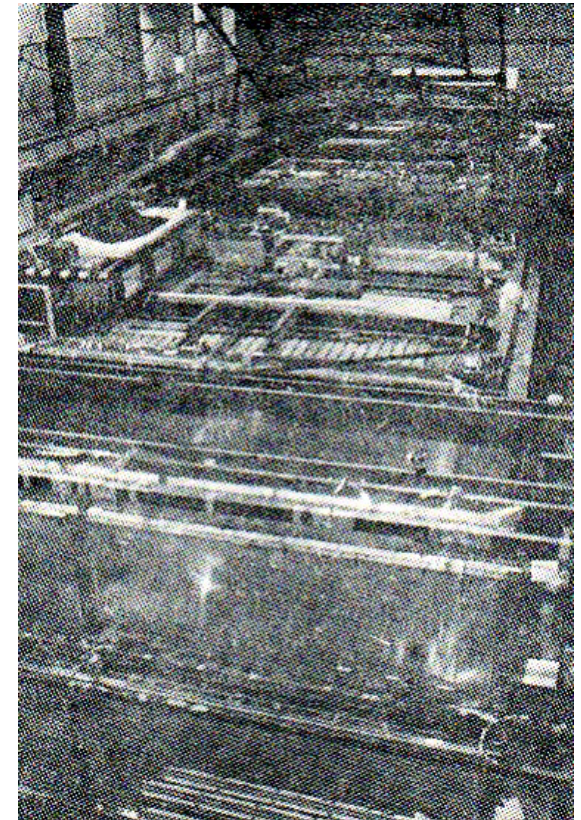
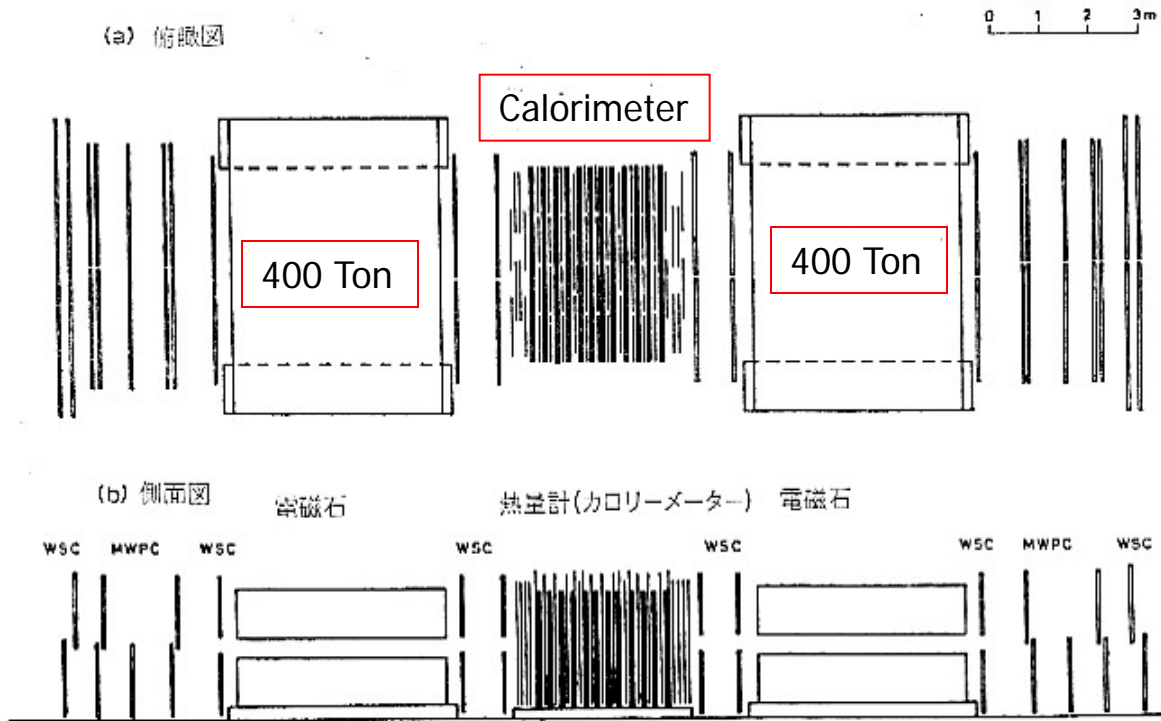
- ミューオンの
- ・ エネルギー分布
  - ・ 天頂角分布
  - ・ 正負の荷電比

- 深部地下でのミューオンの飛程は
- ・ 電磁過程
  - ・ 核相互作用
  - ・ 異常相互作用(?)

電磁石によるミュオンエネルギースペクトルや荷電比の測定は  
1950年代終わり頃から,英国ダーラム大学,名大,独キール大で.1TeV程度まで.

# MUTRON (ICRR) 1975 ~ 1984

20 TeVまで, ミューオンの相互作用も



WSC: 多重線型放電箱 MWPC: 多重線比例計数管

1次宇宙線の化学組成は100TeVまでTeV領域と変わらない。  
ミュオンの異常相互作用は20TeVまで認められず。

S.Matsuno et al.; Phys. Rev. D 29 (1984) 1  
A.Okada et al.; Fortschritte der Physik, 32 (1984)135

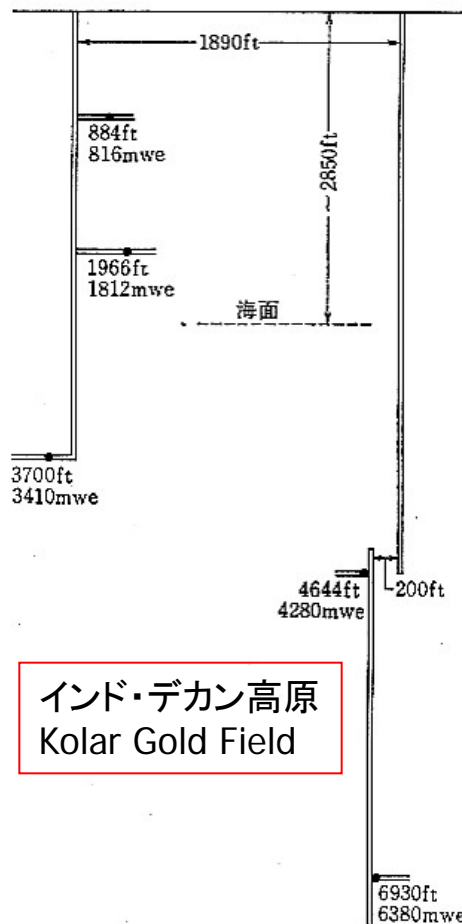


# KGF (OCU三宅グループ and Tata Inst.)

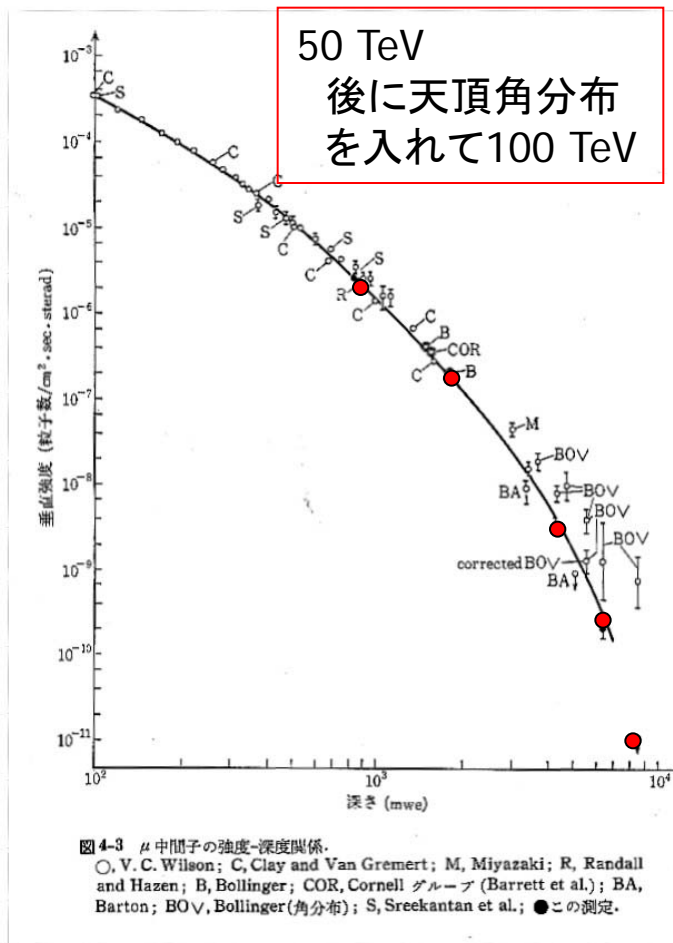
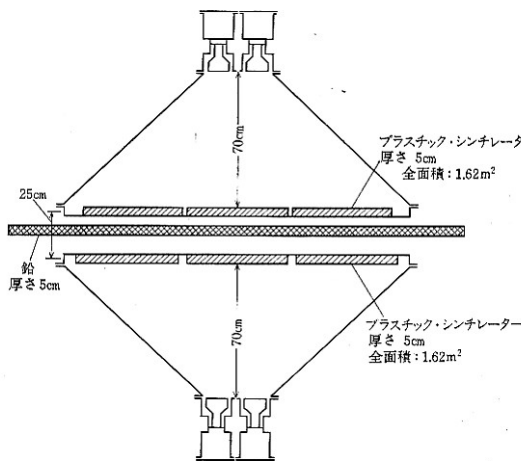
## 1960 ~ 1980



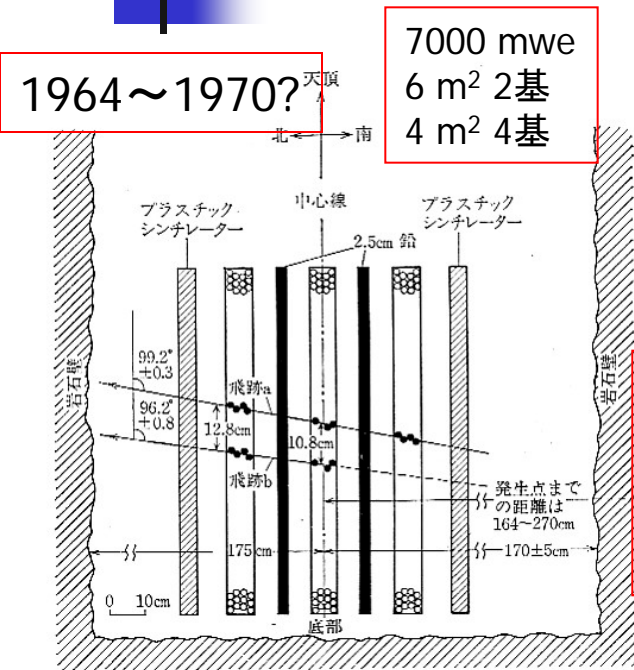
三宅三郎



インド・デカン高原  
Kolar Gold Field



# OCU三宅グループ+Tata Institute (KGF) 大気ニュートリノ観測と陽子崩壊実験

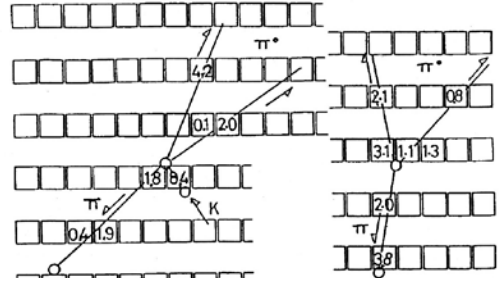
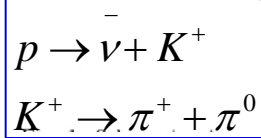
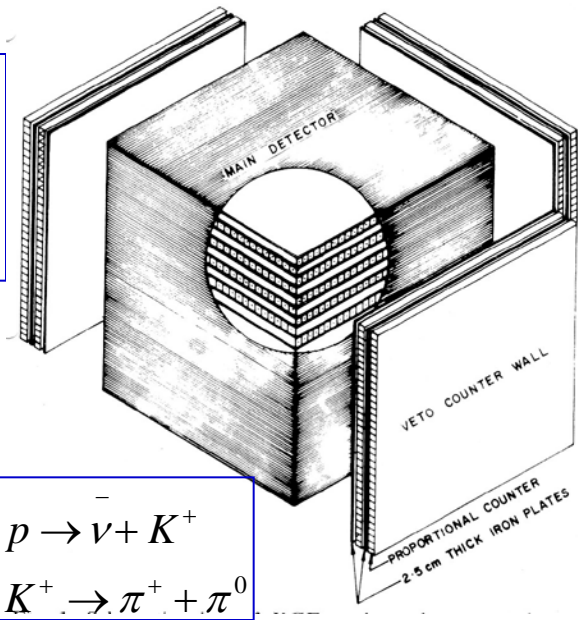


1964~1970?

7000 mwe  
6 m<sup>2</sup> 2基  
4 m<sup>2</sup> 4基

1980~1992  
陽子崩壊実験  
PC + 鉄板  
570 ton

1965年7月  
南アのヨハネスブルク近郊の  
金鉱での実験(Reines等)と  
ほぼ同時期に  
大気ニュートリノを観測



数例の候補事象  
を観測するも  
追認されず

三宅三郎;  $\mu$ 中間子とニュートリノ, 「宇宙線研究」  
(武谷三男編, 岩波書店)(1970)137

発生ミューオンの天頂角, 方位角を測定できる装置,  
運動量も測定できるように鉄芯電磁石を入れた装置  
などの改良を重ね, 弾性衝突, 非弾性衝突の断面積  
を加速器実験より早く発表

N. Ito (India-Japan Collaboration); Proc. Int. Sympo. on  
Underground Phys. Exp., (1990) 101.

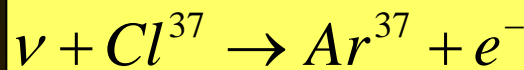
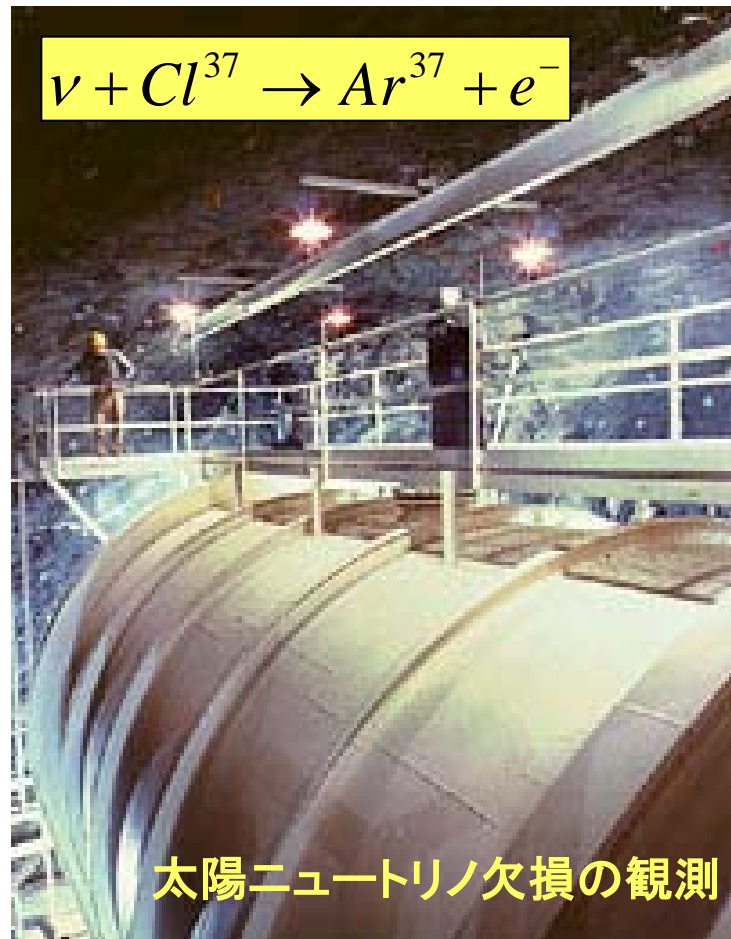


# Ramond Davis Jr. 1966頃から約30年 Homestake Gold Mine Neutrino Experiment



1963 石灰岩の鉱山、地下690m  
での実験。ここで技術を確立

6 mΦ × 14.4 mのタンクに約  
380 m<sup>3</sup> のperchloroethylene



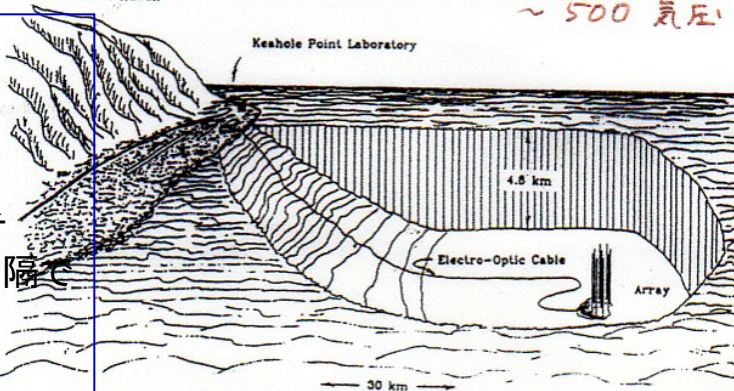
太陽ニュートリノ欠損の観測

# DUMAND 計画

(Deep Underwater Muon and Neutrino Detection)

1989年 米、日、スイスでDUMANDIIの予算承認  
 1993年 1本のstringが設置されたが、JBで漏電があり、データがとれず。

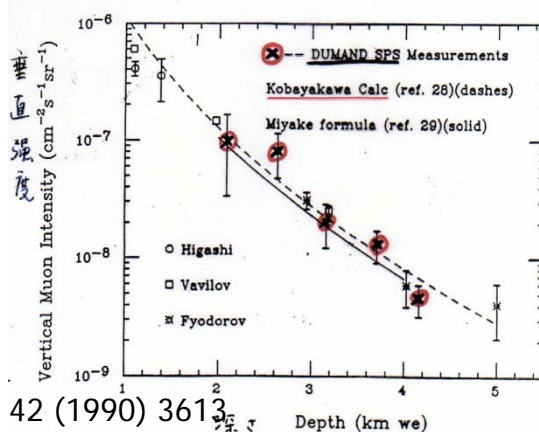
ハワイ島 沖 30 km 深さ 4.8 km  
 ~ 500 気圧



DUMAND 1988 Proposal

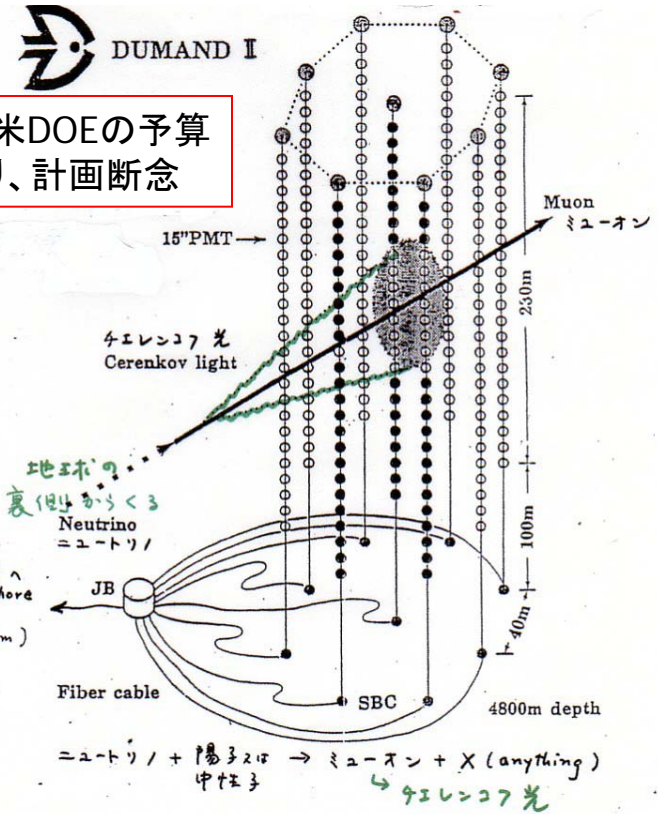
1973年  
 Denver ICRC  
 で提案される。  
 米、日、ソ連、  
 西独等の研究者  
 が集まり、40m間隔で  
 1km<sup>3</sup>の海水中  
 に光センサーを  
 配置する計画  
 を立案

1987年  
 船からおろした短いstringに  
 つけた7個のセンサーで  
 深さ4500mまで沈め、  
 muonのdepth-intensityを  
 測定



J. Babson et al.; Phys. Rev. D 42 (1990) 3613

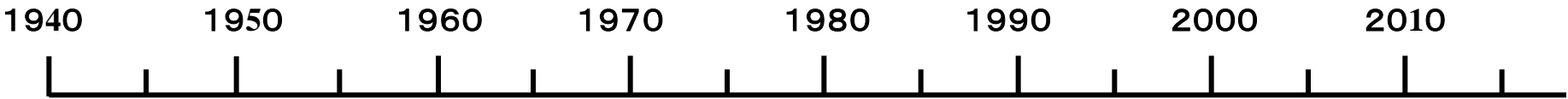
1995年米DOEの予算  
 が止まり、計画断念



M. Barone: Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 44 (1995) 186

DUMANDのHardwareはNESTOR計画へ

# Muon and Neutrino



Magnet



Shimizu tunnel

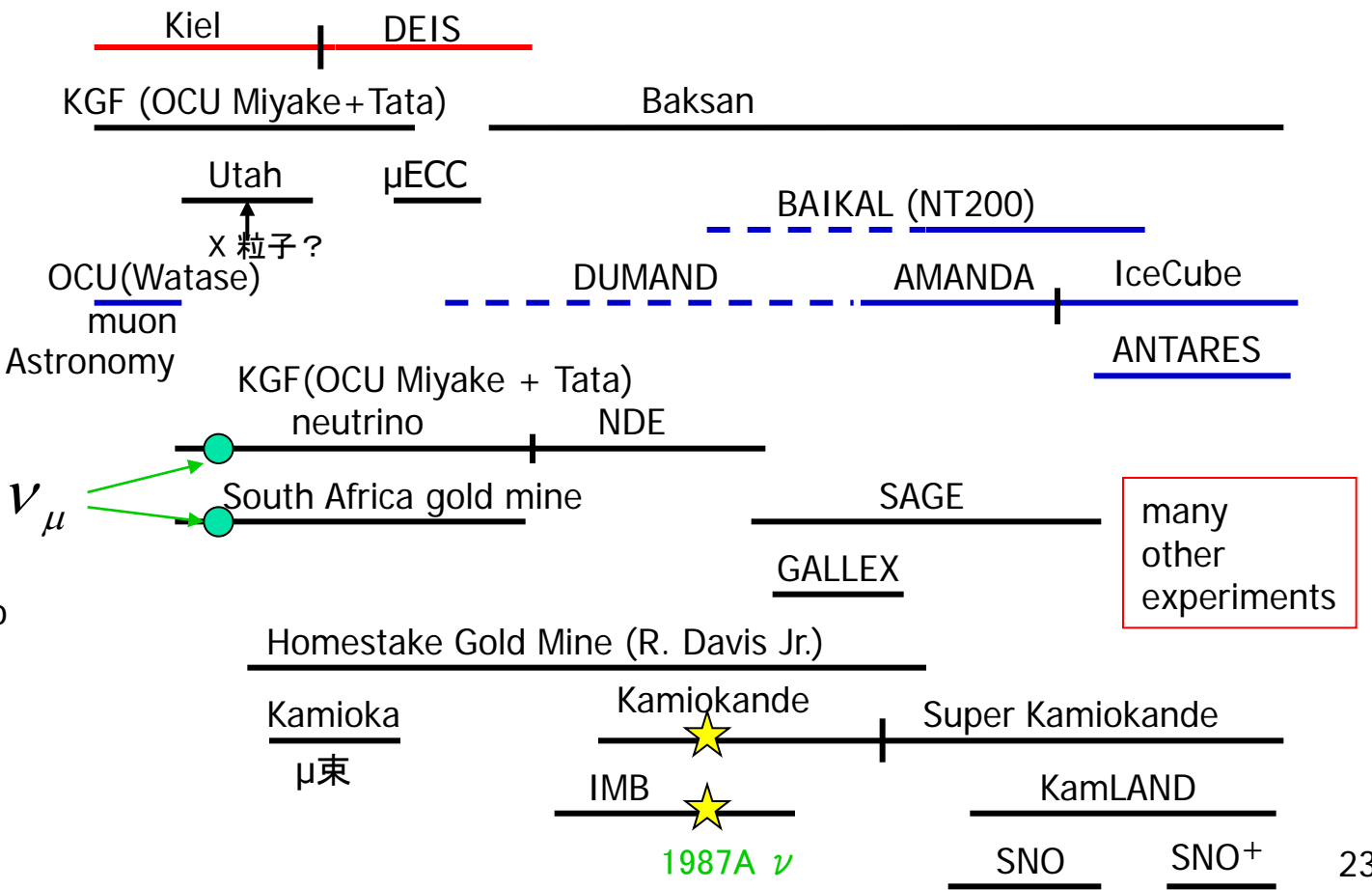
Underground

Ocean/Ice

High Energy Neutrino Astronomy

Underground

- Nucleon decay
- Atmospheric neutrino
- SN neutrino
- Solar neutrino
- Neutrino Physics

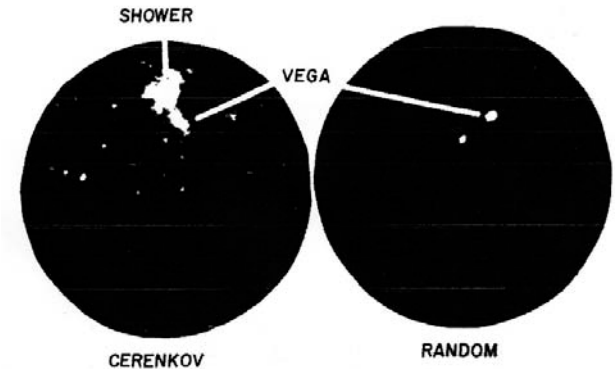


1950年はじめに銀河磁場の存在が明らかになり、荷電宇宙線では源を探索できない。頻度は少ないがガンマ線で探ろうという計画

→ 英国のJelleyやアイルランドのPorter等

## Atmospheric Cherenkov Technique (ACT)

- 1953 Galbraith and Jelley : EAS からの Cherenkov light pulses を観測 at Pic du Midi
- 直径25cmのsearch light mirrorの焦点に直径5cmのPMT : 4台
- 面積200cm<sup>2</sup>のGM counter 4個のトレイ ; 5 トレイ
- これらの同時観測で、受光シグナルの偏光と分光特性がチェレンコフ光としての予測と一致することを示す
- EASのエネルギーは約 $10^{14}$  eV



1963年に発表されたImage Intensifierで撮像されたEASのCherenkov Image  
J.V. Jelley and N.A. Porter;  
Quart J. Roy. Astron. Soc., 4 (1963) 275



# 最初のVHE $\gamma$ 線(TeV)探索

- 1960~1963  
Chudakov et al. :  
( $>4\text{TeV}$ ) at Crimea  
1.5 m $\Phi$   $\times$  12  
Crab Nebula, CasA,  
CygAからの上限値

A.E. Chudakov et. al.; Transl. Consultants Bureau, P.N. Lebedev  
Phys. Inst., 26 (1965) 99.

陽子のバックグラウンドが多すぎる！  
如何にして減らすか。

- 1963  
Jelley and Porter : ガ  
ンマ線点源の観測にImage  
Intensifierによる imageを使うこと  
を提唱

J.V. Jelley and N.A. Porter; Quart. J. Roy.  
Astron. Soc., 4 (1963) 275.

1963 BASJEでガンマ線観測開始

1962 最初のガンマ線衛星 Explorer X1  
9 時間で, 22 ガンマ線を観測 ( $>50\text{ MeV}$ )  
W.L. Kraushaar and G.W. Clark; Phys. Rev. Lett.,  
8 (1962) 106.

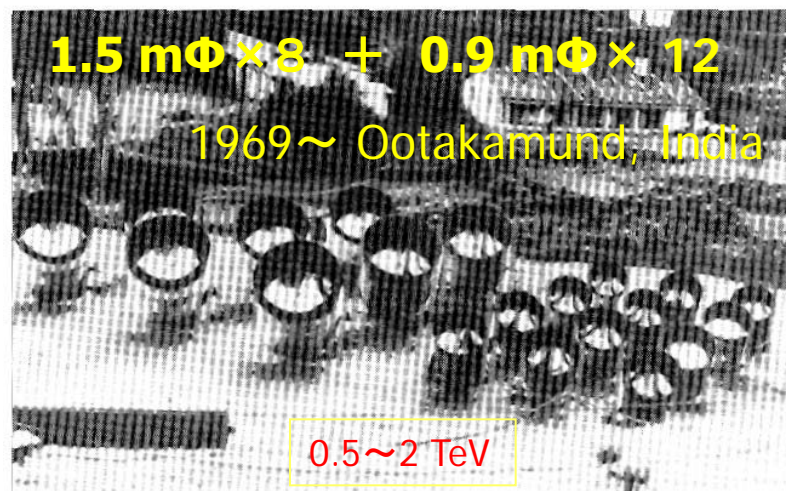


# 初期のACT

それぞれの観測で、点源観測の報告があるが、確証はなし。



Porter, Weekes 等  
1975  $>0.2$  TeVで、Crab, Velaなど上限



1969~  
Crimean Astrophysical Observatory  
Crimea  $> 2$  TeV  
1972-74  
Univ. of Sydney/Smithsonian  
Narrabri  $> 0.5$  TeV



# Turning point 1980-1983

## VHE gamma-ray emission from Cyg X-3

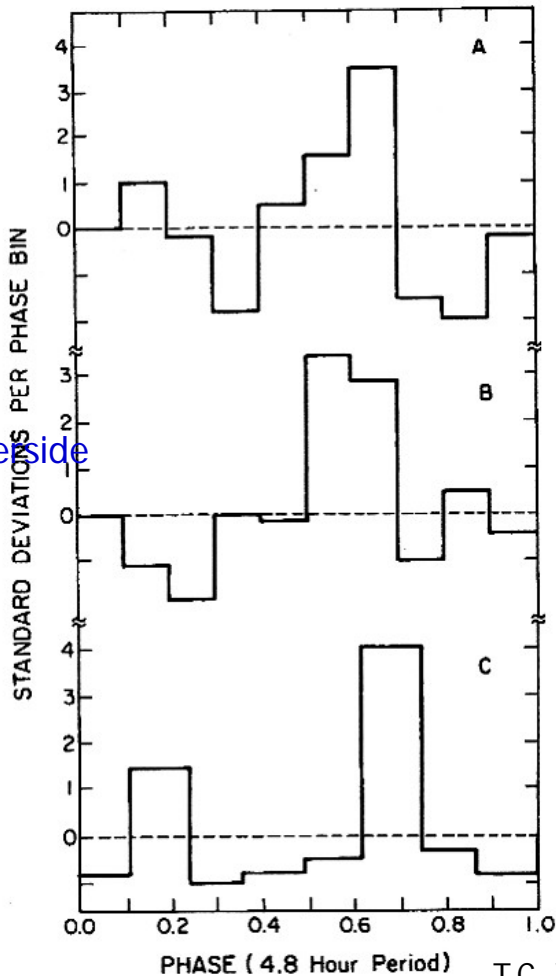
ACT

Mt. Hopkins  
in 1980

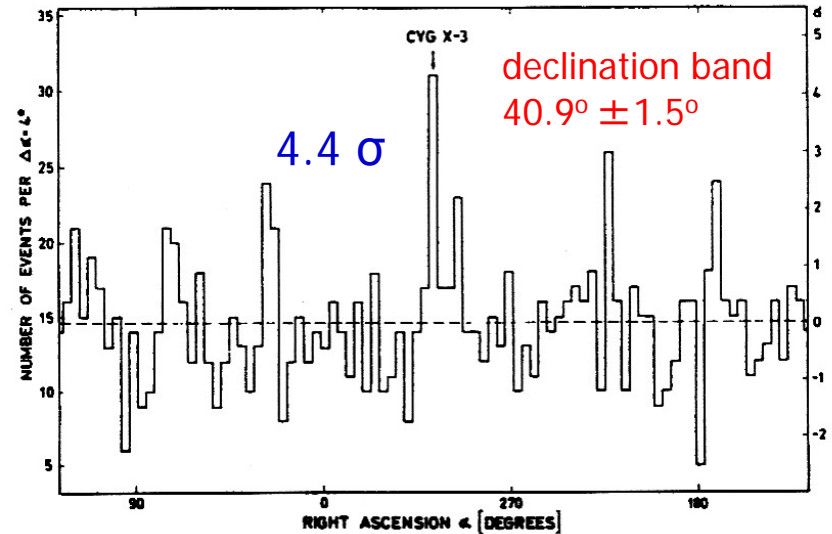
11 mΦ × 2  
solar reflectors  
in 1981

Jet Repulsion Lab.  
U. California at Riverside  
Iowa State U.

Dugway  
(U. Durham)  
(1.5m × 3) × 4  
1981-1982



PeV gamma rays



U. of Kiel : 1976-1980 data  
reported in 1983

selected  $s > 1.1$

$\mu/e$  : similar to other showers?

# ACT around 1985

Table 21a  
Very high energy gamma-ray experiments (atmospheric Cherenkov)

#	Location	Country	Organization	Location			Energy (TeV)	Operational
				Lat. (deg)	Long. (deg)	Elev. (km)		
a	Potchefstroom	South Africa	Potchefstroom	-27	27E	1.4	1	1985
b	White Cliffs	Australia	Adelaide	-32	143E	0.16	1	1986
c	Narrabri	Australia	Durham	-31	145E	0.21	0.3	1986
d	Haleakala	USA	Wisconsin	21	156W	3.0	0.5	1985
e	Albuquerque	USA	River	35	107W	1.5	0.2	1986
f	Mt. Hopkins	USA	Smithsonian	32	111W	2.3	0.3	1983
g	Themis	France	Saclay	43	1W	1.5	0.1	1986
h	Crimea	USSR	Crimean Astrophys. Obs.	45	34E	2.1	1	1986
i	Pachmarchi	India	Tata	23	78E	1.1	0.5	1987
j	Gulmarg	India	Tata	35	77E	2.7	1	1985
k	Beijing	China	Acad. Sinica	40	117E	1.0	1	1987
l	Delingha	China	Acad. Sinica	37	97E	3.2	1	1990

T. C. Weekes; Phys. Report 160 (1988) 1.

# Particle arrays and Cherenkov Detector arrays around 1985

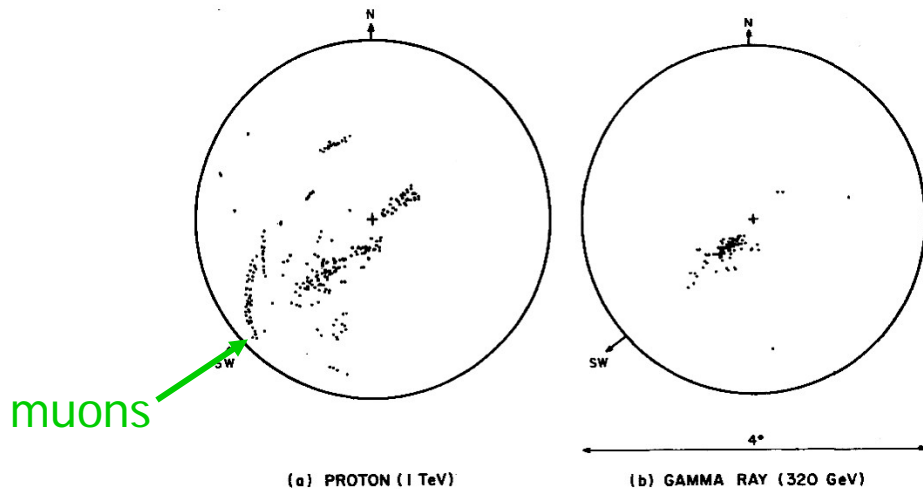
Table 21b  
Ultra high energy gamma-ray experiments (atmospheric Cherenkov and particle arrays)

#	Location	Country	Organization	Location			Energy (PeV)	Angular resolution (deg)	Operational
				Lat. (deg)	Long. (deg)	Elev. (km)			
1	Buckland Park	Australia	Adelaide	-35	138E	S.L.	1	2.5	1984
2	Mt. Chacaltaya	Bolivia	"BASJE"	-16	68W	5.2	0.2	1	1986
3	Mt. Chacaltaya	Bolivia	SYS Collab.	-16	68W	5.2	0.2	3	1986
4	Haverah Park	UK	Leeds	54	1W	S.L.	1	1	1986
5	Dugway	USA	Utah	40	112W	1.5	0.1	0.5	1989
6	Los Alamos	USA	Los Alamos	36	106W	2.1	0.2	1	1986
7	Mt. Hopkins	USA	Dublin	32	111W	2.3	0.1	1	1985
8	La Palma	Germany	Kiel	29	18W	2.2	0.1	1	1986
9	Gran Sasso	Italy	Turin	42	14E	2.0	0.01	1	1988
10	Plateau Rosa	Italy	Turin	46	8E	3.5	0.01	5.5	1981
11	Mt. Aragats	USSR	Erevan	40	44E	3.2	0.1	1	1987
12	Tien Shan	USSR	Lebedev	42	75E	3.3	0.1	3	1974
13	Moscow	USSR	Moscow	56	37E	S.L.	1	3	1982
14	Baksan	USSR	Nucl. Sci.	43	43E	1.7	0.3	1	1984
15	Akeno Ranch	Japan	Tokyo	35	138E	0.9	1.0	3	1981
16	Mt. Norikura	Japan	Tokyo	36	137E	2.8	0.1	1	1988
17	Ooty	India	Tata	11	77E	2.2	0.1	2	1984
18	Kolar	India	Tata	13	78E	0.9	1	1.5	1984
19	South Pole	Antarctica	Bartol	-90	0	2.5	0.1	1	1988

# Use of the images of Cherenkov light to reject background events

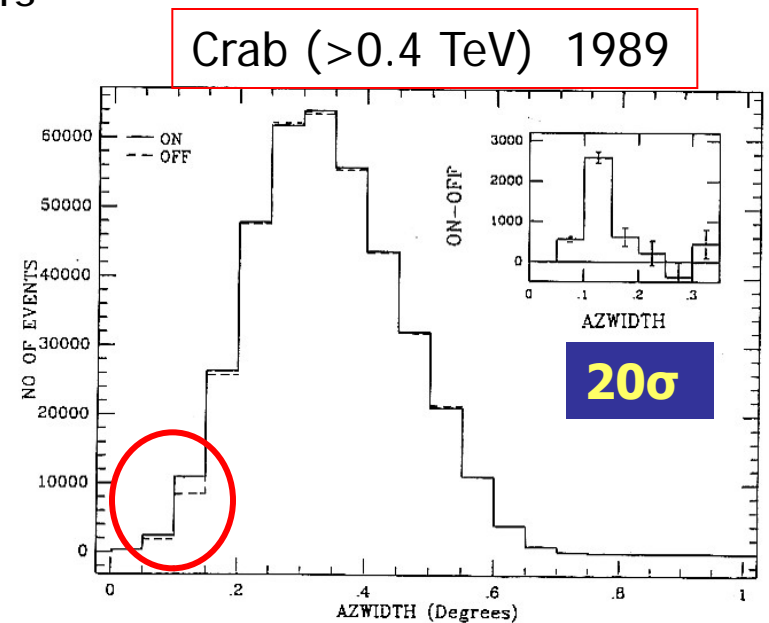
1963 Jelley and Porter : by Image Intensifier

1977 Weekes and Turver : by an array of PMTs



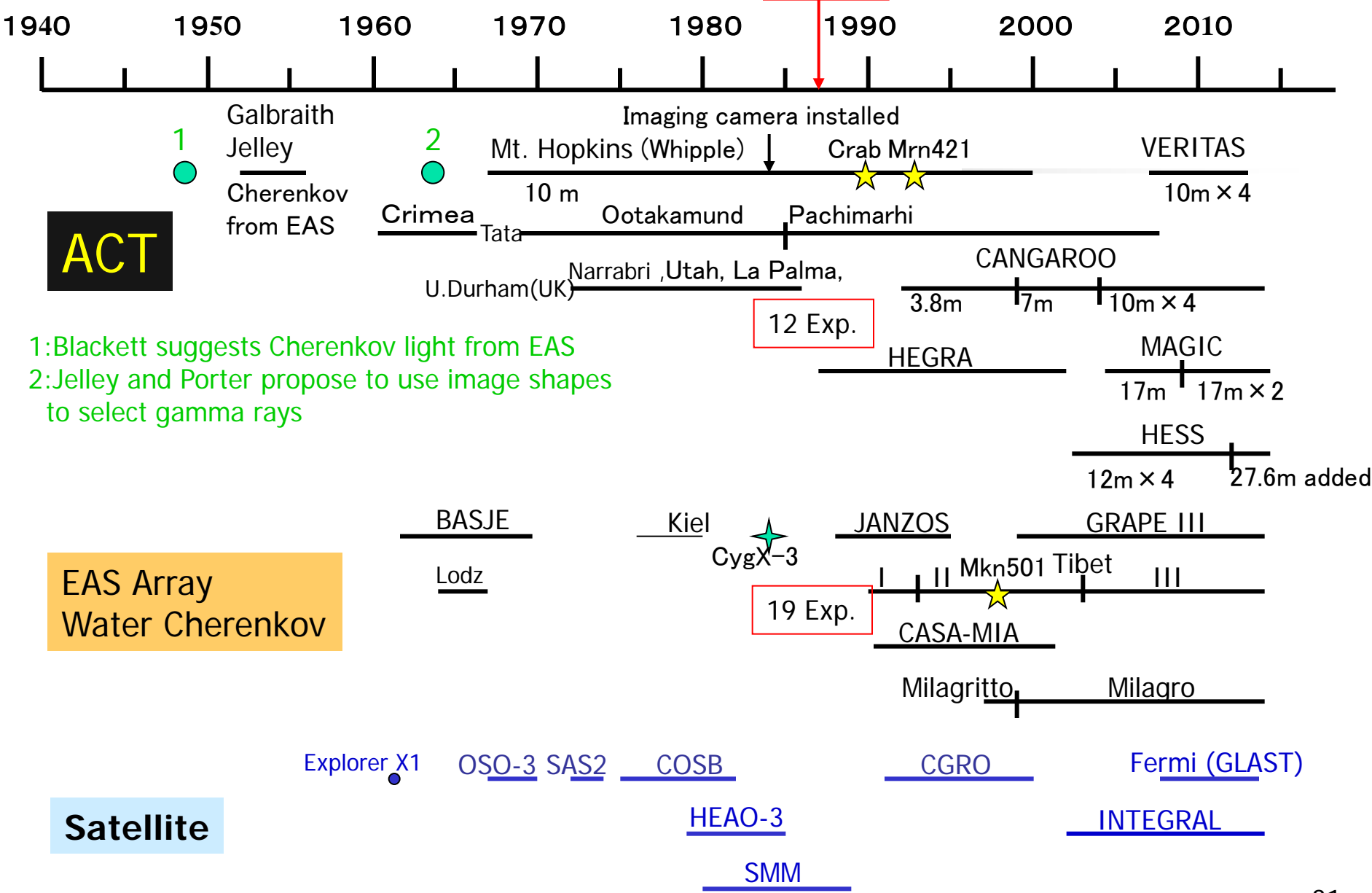
Simulation by A.M. Hillas (1985)

97% rejection of background events



Imaging camera installed in 1984 at Mt. Hopkins

# Gamma-ray Astronomy



1: Blakett suggests Cherenkov light from EAS  
 2: Jelley and Porter propose to use image shapes to select gamma rays

EAS Array  
 Water Cherenkov

Satellite