

超高エネルギー宇宙線(2) 宇宙からの観測

戎崎俊一

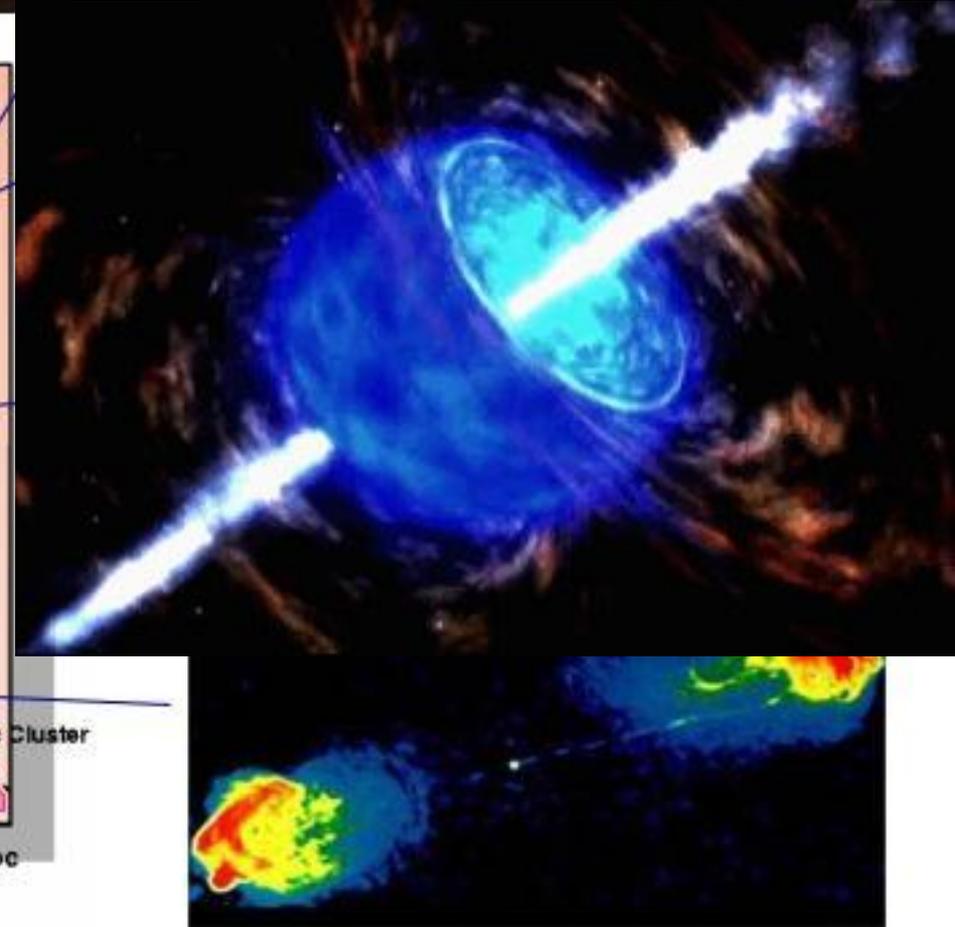
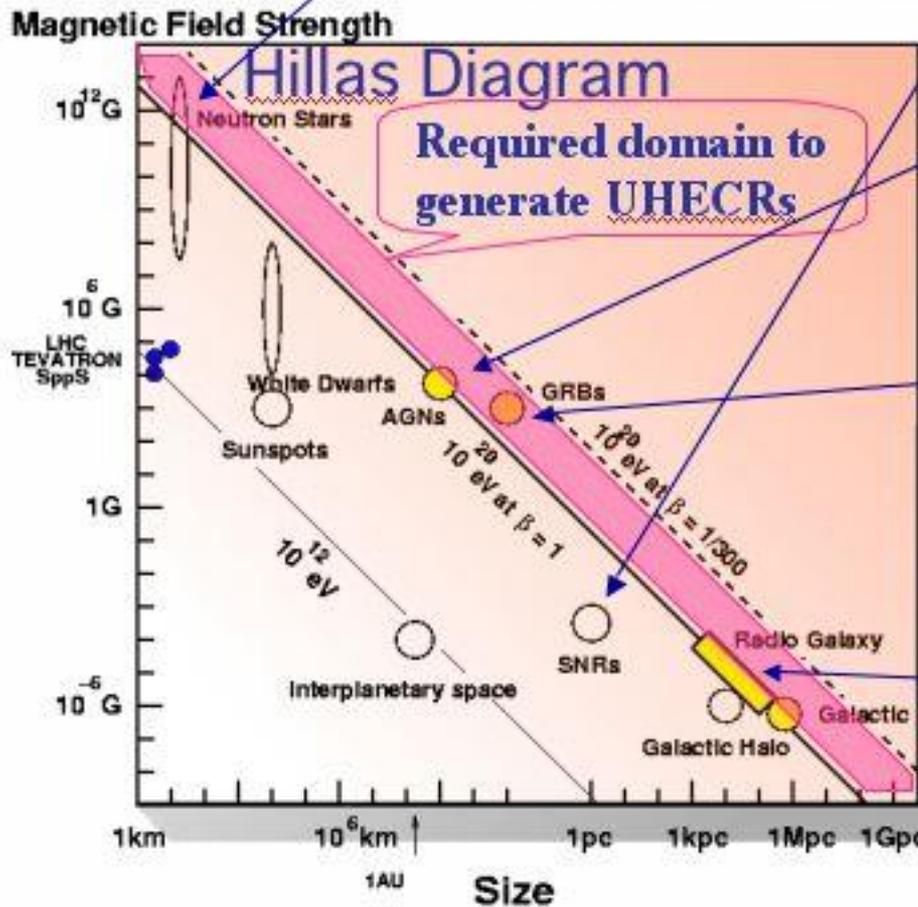
理研主任研究員

宇宙観測実験連携グループ

超高エネルギー宇宙線？

- 非常に高いエネルギー
 - 10^{20} eV=16 J
- 正体は何？
 - たぶん陽子、もしかしたら鉄原子核
- どこでいつ作られた？
 - たぶん、高エネルギー天体の相対論的ジェット
 - ブラックホールができるとき：ガンマ線バースト
 - ブラックホールに物が落ちるとき：活動的銀河核

ヒラス 理論的加速限界 $< 10^{20}$ eV

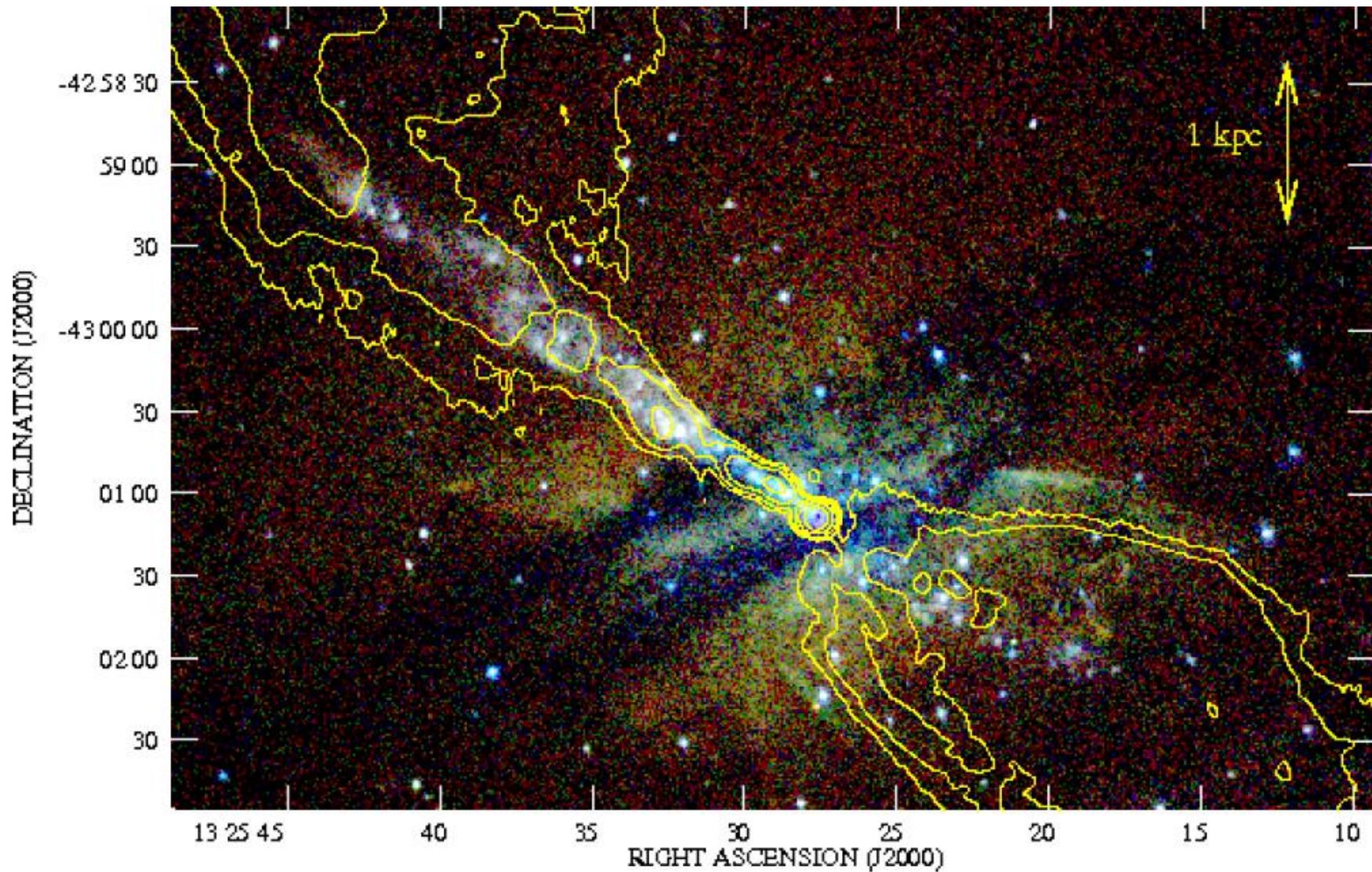


ケンタウルス座 A

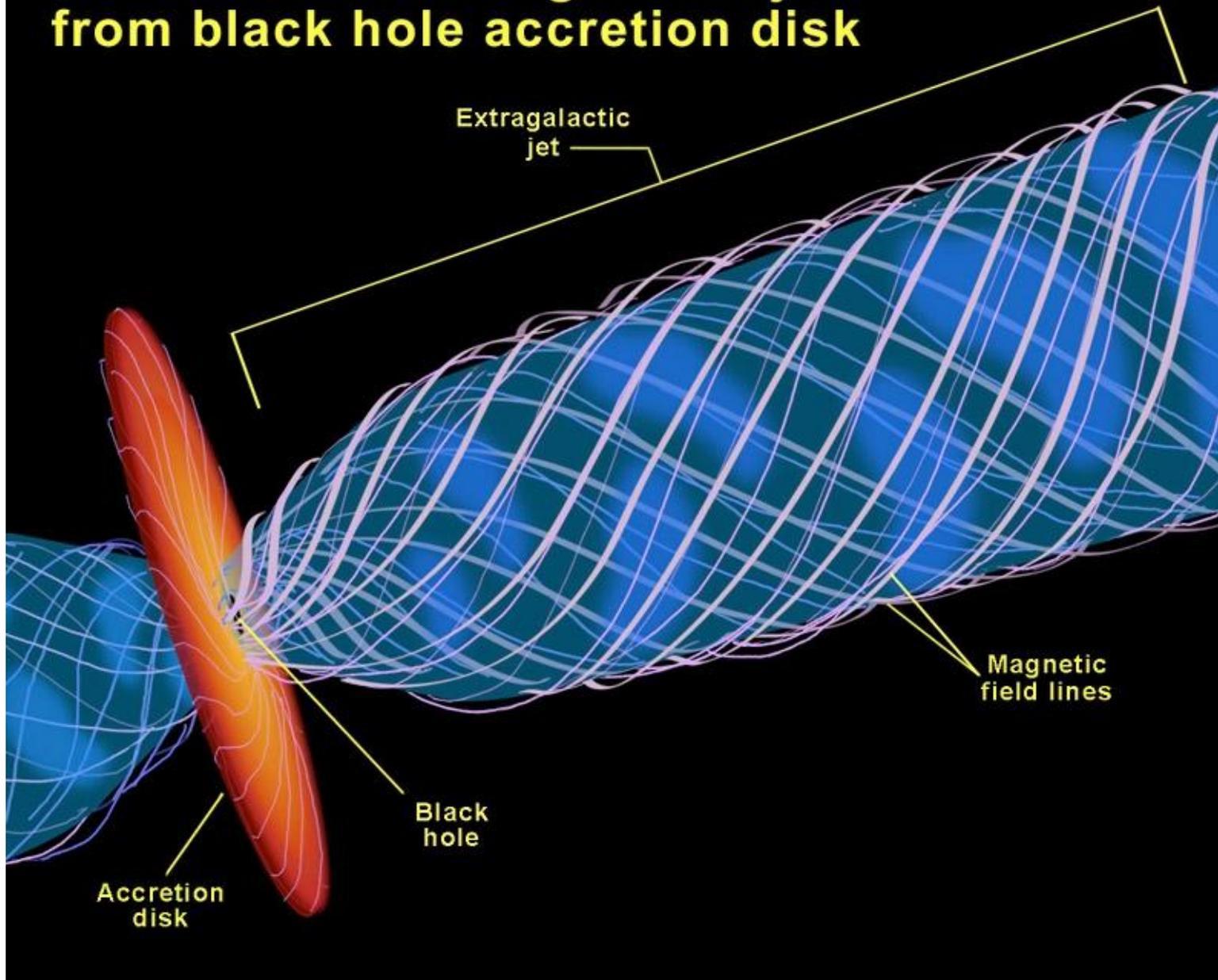


- 距離 : 3.4Mpc
 - GZK機構は効かない
- 電波銀河
 - もっとも近い
 - 全天最も明るい電波星
- 楕円銀河ダークレーン
 - 最近ガスに富む渦巻銀河が落下
- 荷電粒子光度～電波光度
～ 2×10^{32} W

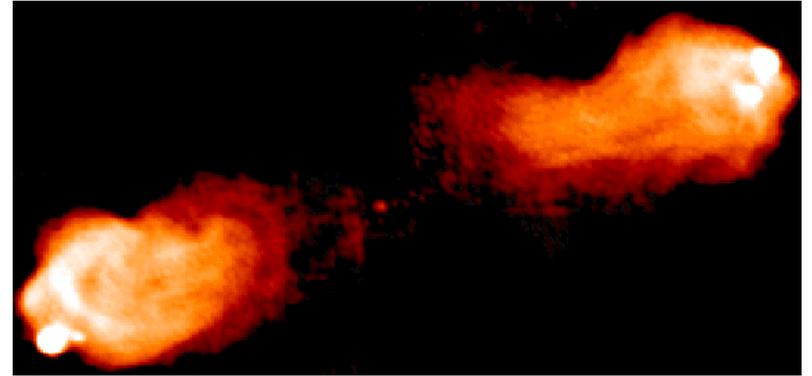
Cen-Aのジェット (X線と電波)



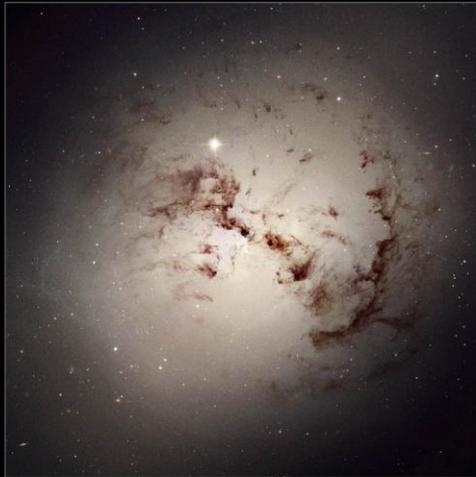
Formation of extragalactic jets from black hole accretion disk



他の電波銀河(1)

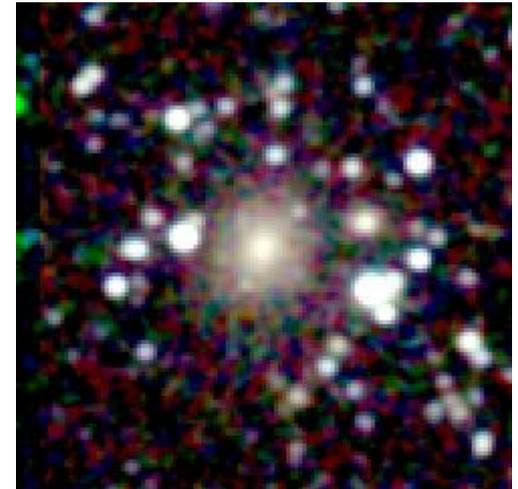


Elliptical Galaxy NGC 1316



Hubble
Heritage

Fornax A



Cygnus A

他の電波銀河(2)

おとめ座A=M87

M87 (おとめ座銀河団の中にある巨大楕円銀河)



この銀河は、ブラックホールに伴う現象とされているが、中心部から噴き出している明瞭なジェットがあり、強い電波を放射している。

ジェットを表現するため、中心部だけを拡大し、異なる処理を施した画像を右下に示す。

口径50cmカセグレン式反射望遠鏡 (F12)
液体窒素式冷却CCDカメラ (Astromed 3200 シー・ス)
露出時間: 5分×8, フィルタ: Iバンド
擬似カラー処理

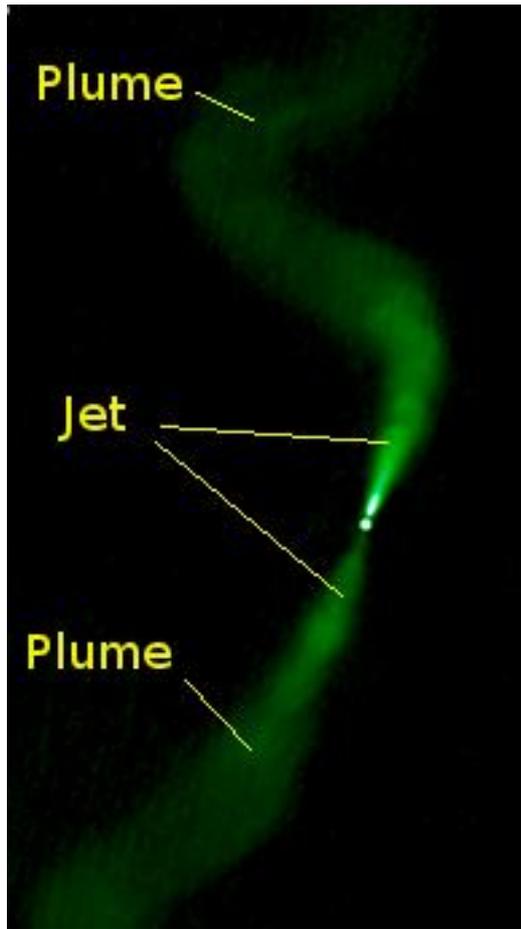


Mar. 4. 1996, 21h02m~21h51m (JST)

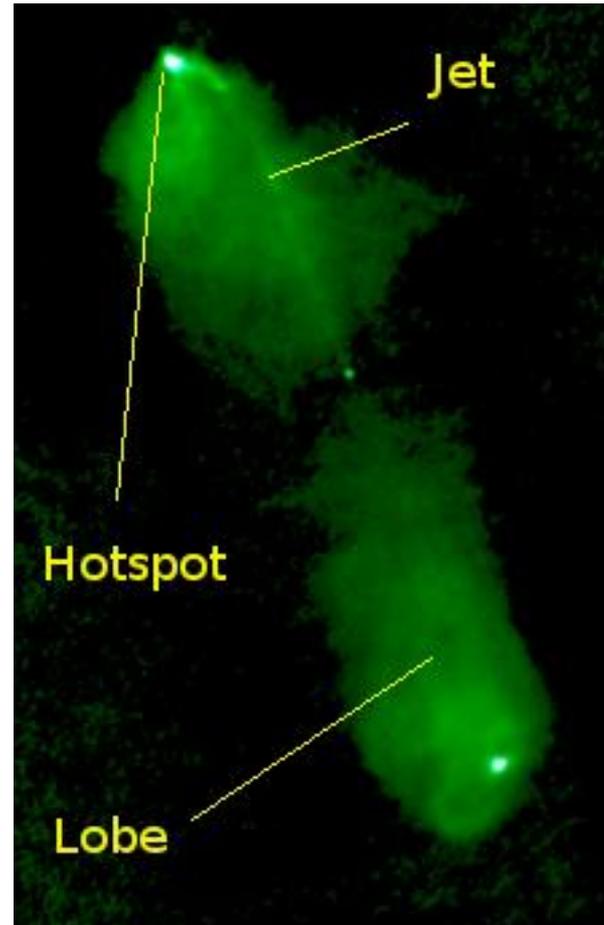
H. Fukushima

国立天文台 天文情報公開センター
広報普及室

他の電波銀河(3)



3C31

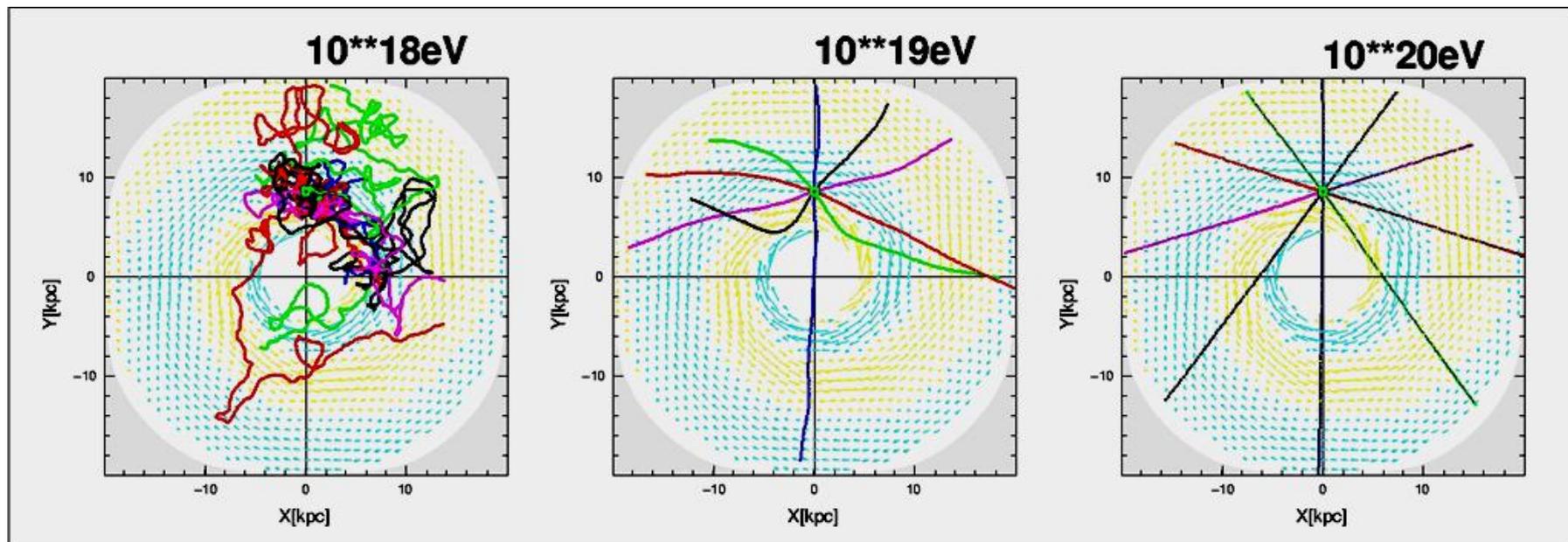


3C98

なぜ、超高エネルギー粒子？

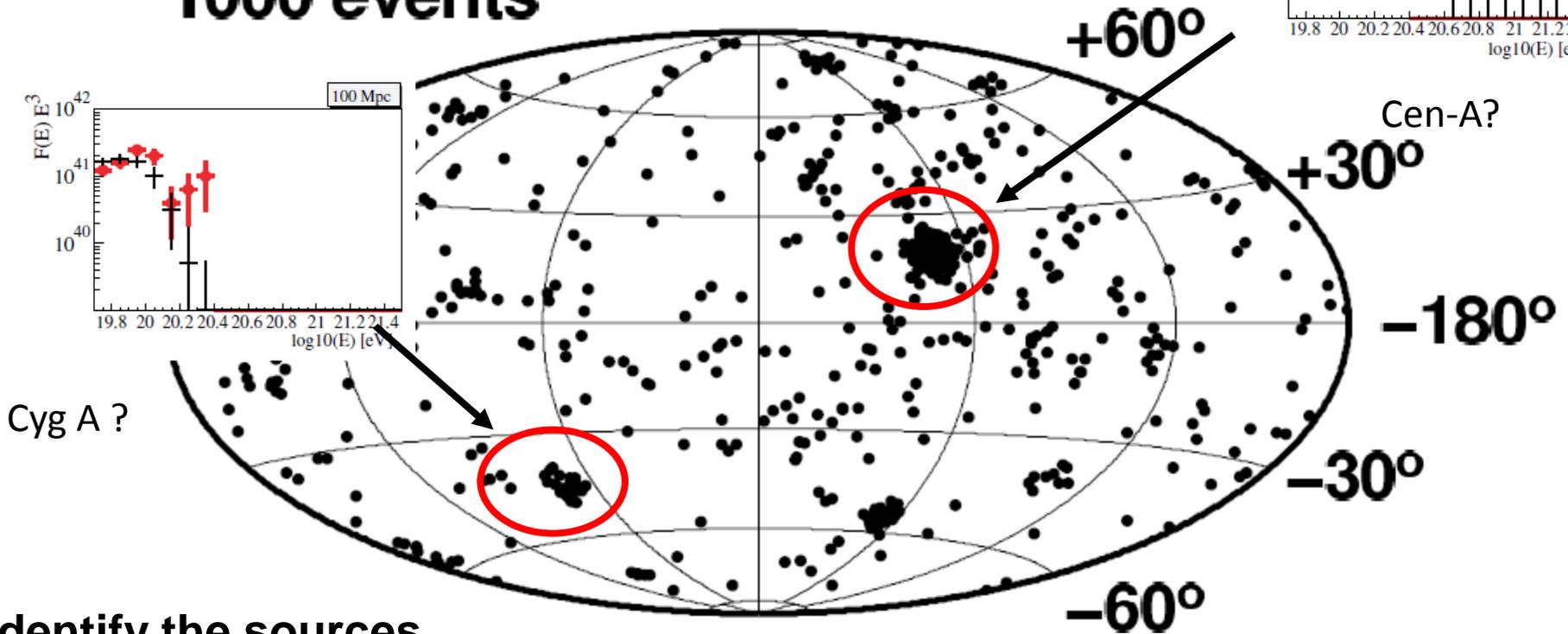
- ほぼ一直線：線源から地球まで
 - 到来方向から線源を特定できる
 - 低エネルギー宇宙線はグニャグニャに曲がる

Galactic-MF structure & UHECR propagation



Five years after launch: 1000 events (proton)

1000 events



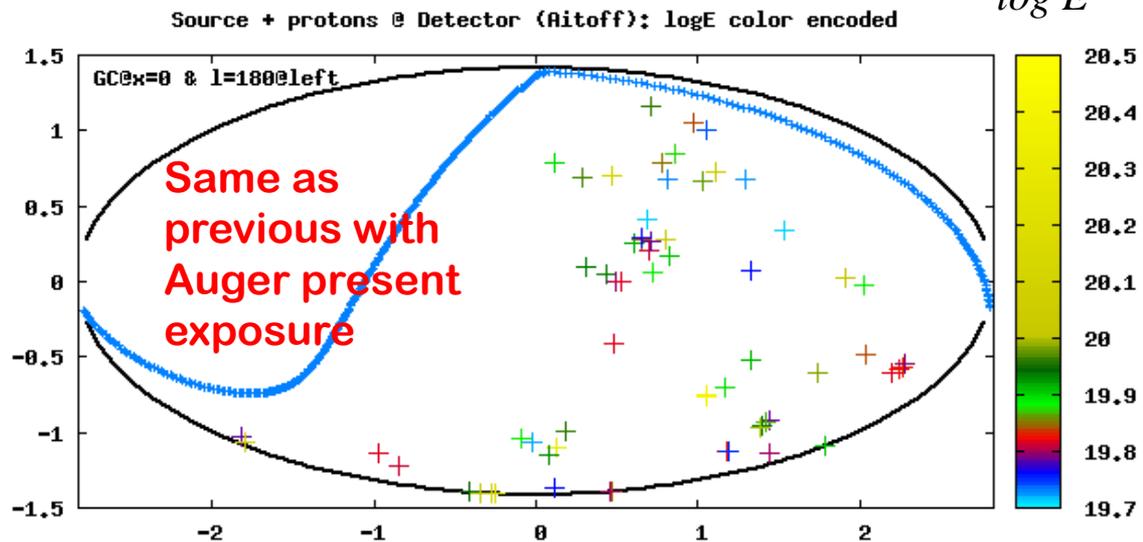
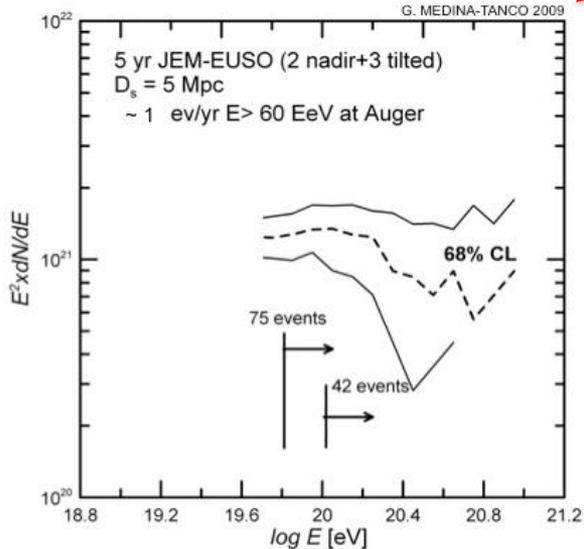
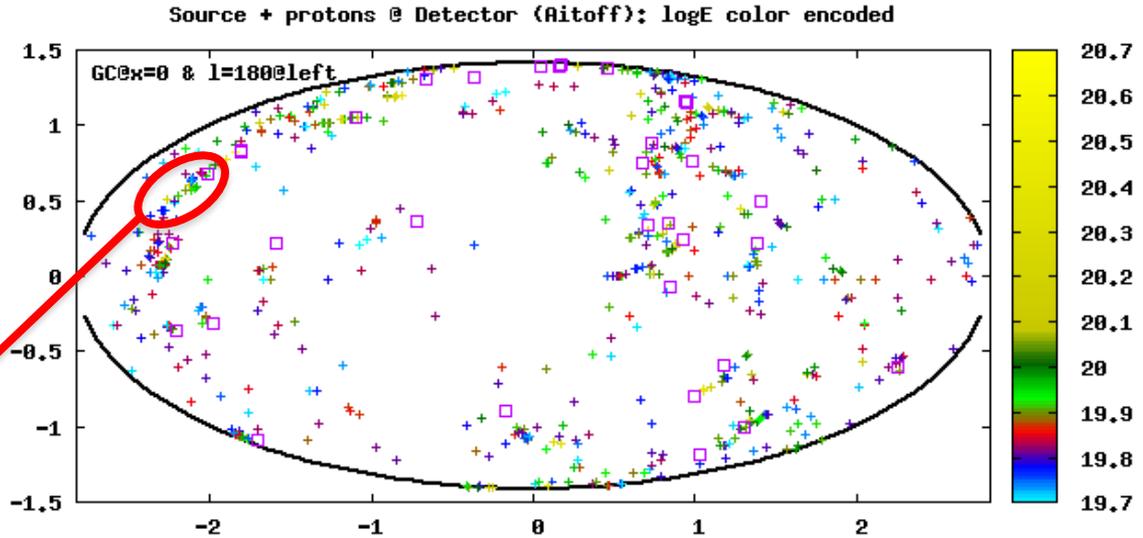
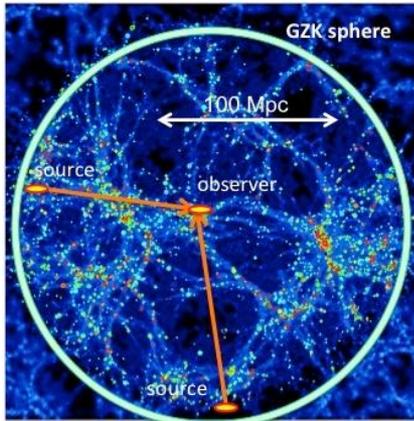
- Identify the sources
- Confirmation of GZK
- Clarify acceleration mechanism

Takami et al 2010

JEM-EUSO science potential

Single source astronomy

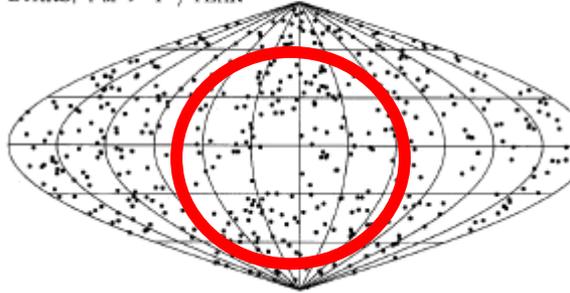
- (1) PSF identification, (2) individual spectra, (3) multiplet statistical analysis,
- (4) catalogue cross-correlation, (5) multiwavelength study, (6) GMF determination



Distribution of Astronomical Objects

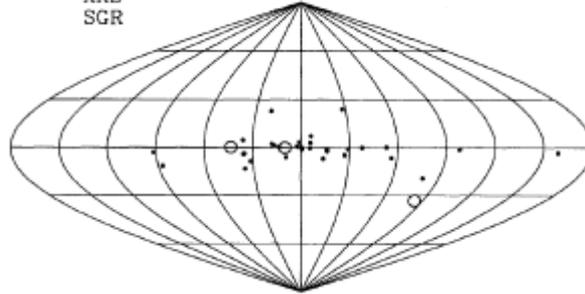
stars

STARS, PM > 1"/YEAR

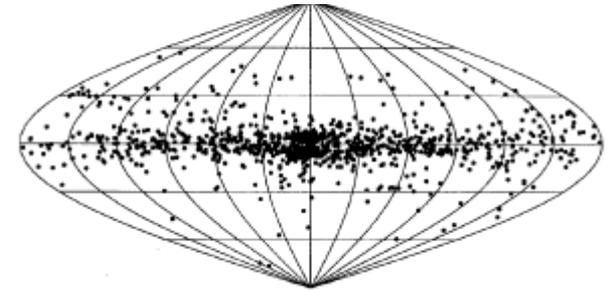


X-ray Burst

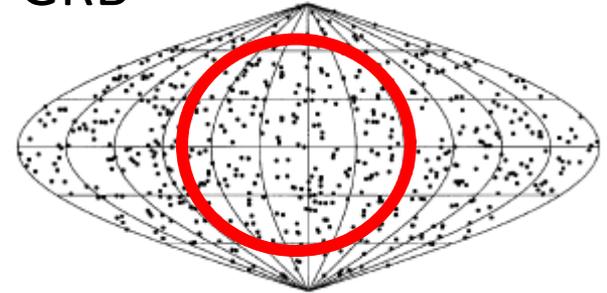
XRB
SGR



Planetary Nebulae

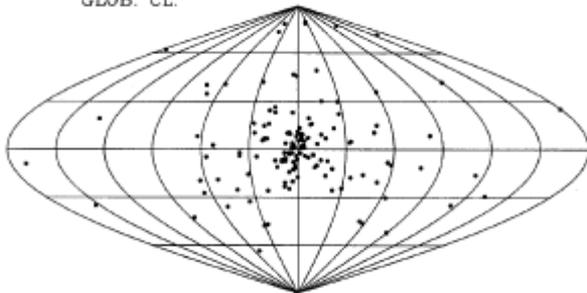


GRB



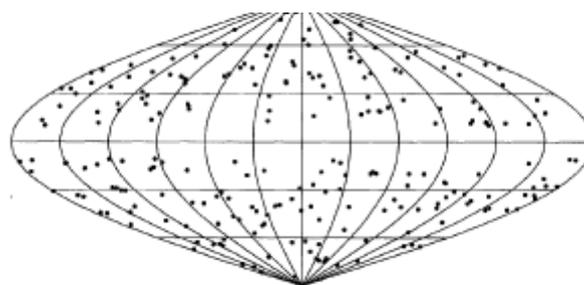
Globular
Clusters

GLOB. CL.



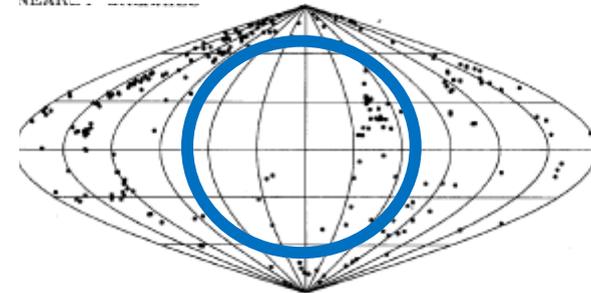
Radio
Sources

RADIO 2.1



Nearby Galaxies

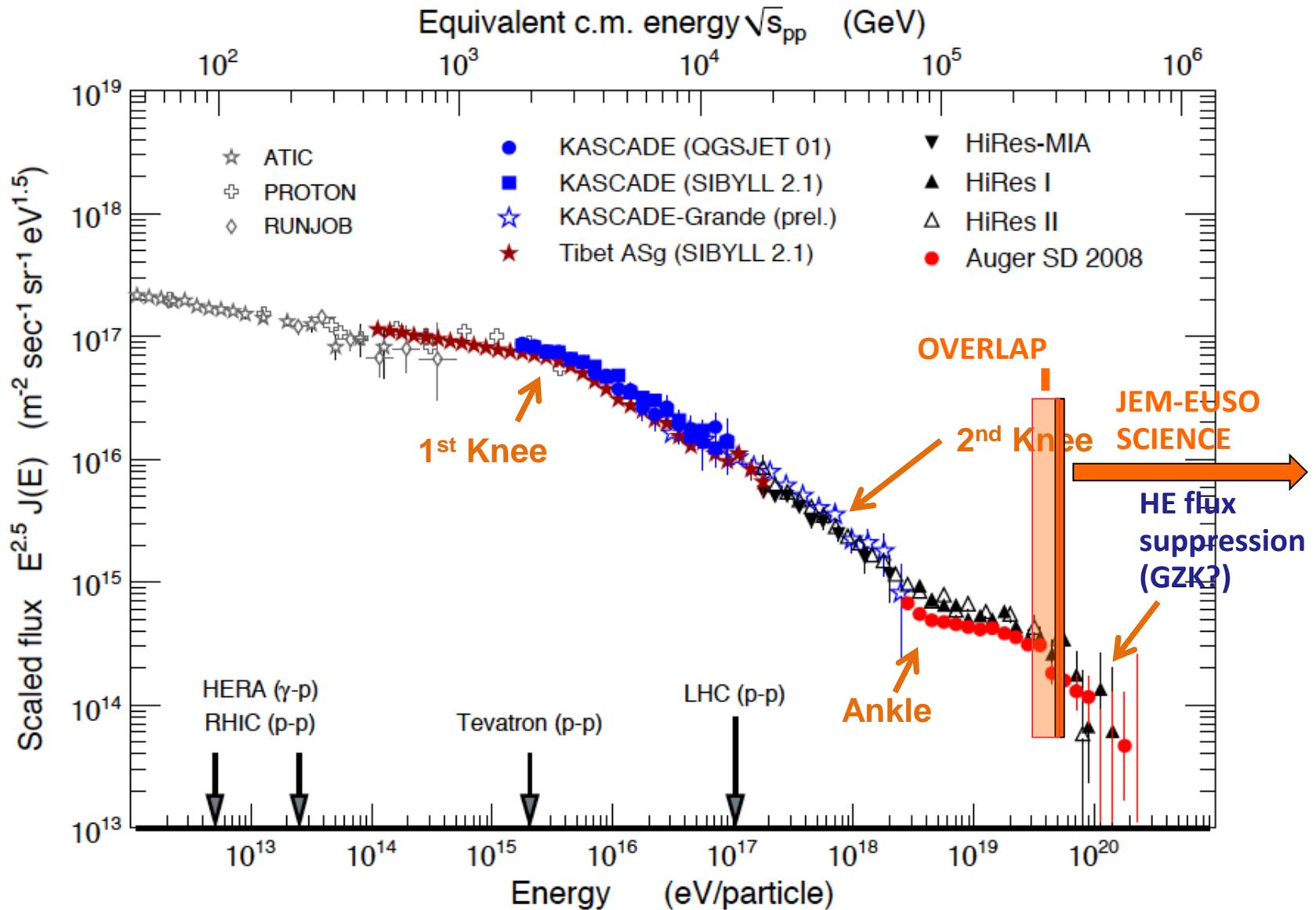
NEAR. GAL.



なぜ、超高エネルギー粒子？

- ほぼ一直線：線源から地球まで
 - 到来方向から線源を特定できる
 - 低エネルギー宇宙線はグニャグニャに曲がる
- 人口加速器を遥かに超える相互作用エネルギー
 - Super-LHC領域における核子・原子核相互作用

JEM-EUSO EE target region



なぜ、超高エネルギー粒子？

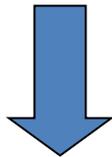
- ほぼ一直線：線源から地球まで
 - 到来方向から線源を特定できる
 - 低エネルギー宇宙線はグニャグニャに曲がる
- 人口加速器を遥かに超える相互作用エネルギー
 - Super-LHC領域における核子・原子核相互作用
- ローレンツ不変性の検証

Principle of Relativity

Principle of Relativity: Galileo Galilei:
There are no differences in physical
laws at any velocity



Theory of Relativity: Einstein: Lorentz
Invariance

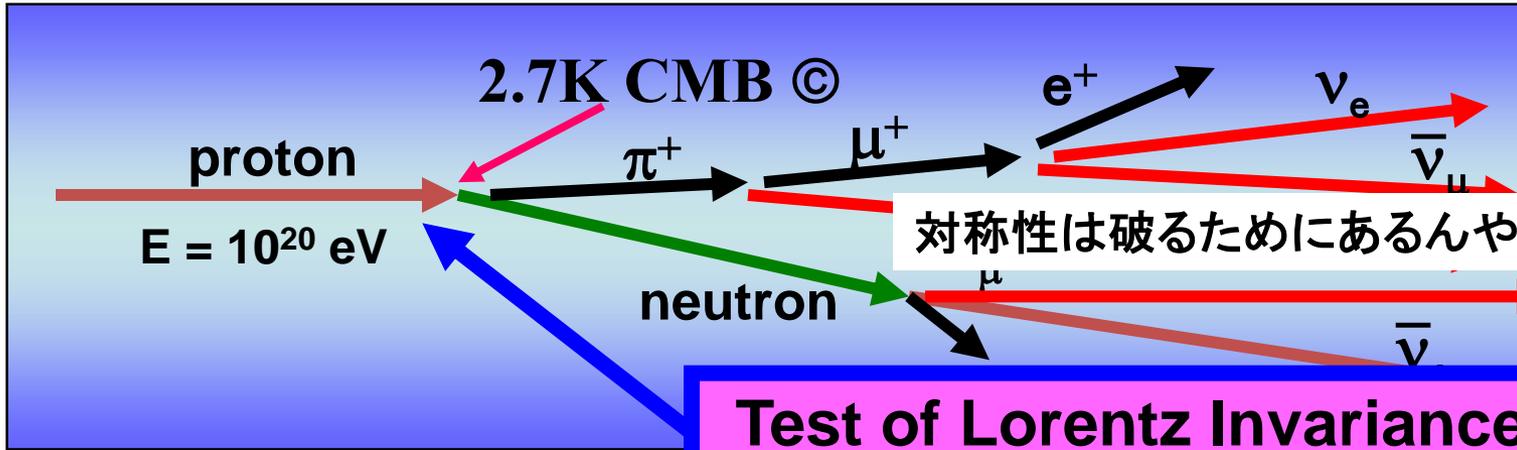


Must be violated!



Greisen-Zatsepin-Kuz'min Process

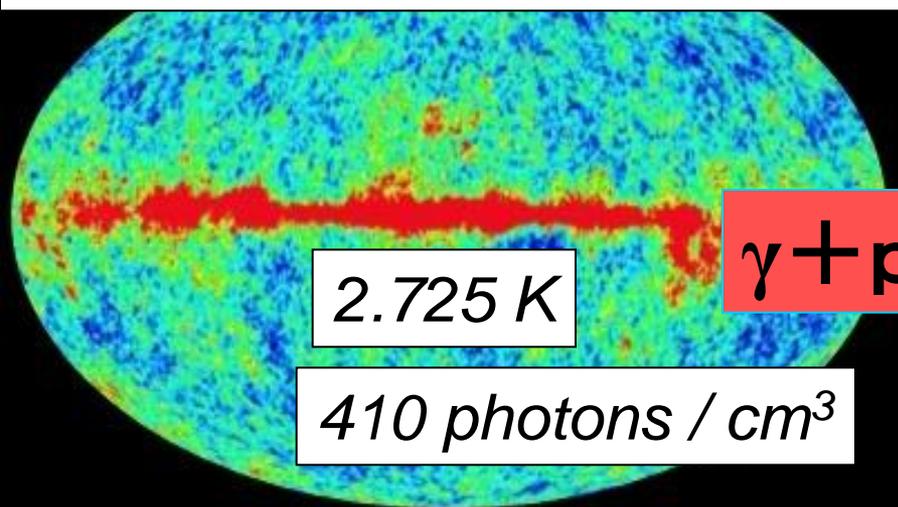
Greisen1966; Zatsepin and Kuz'min 1966



対称性は破るためにあるんや！

Test of Lorentz Invariance at $\sim 10^{11}$
Sato and Tati 1972

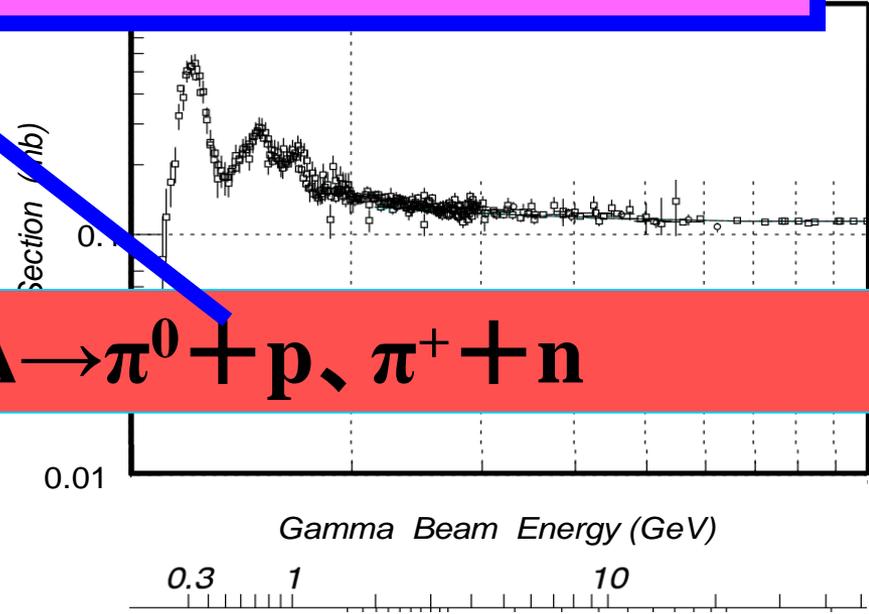
Microwave Cosmic Background Radiation



2.725 K

410 photons / cm³

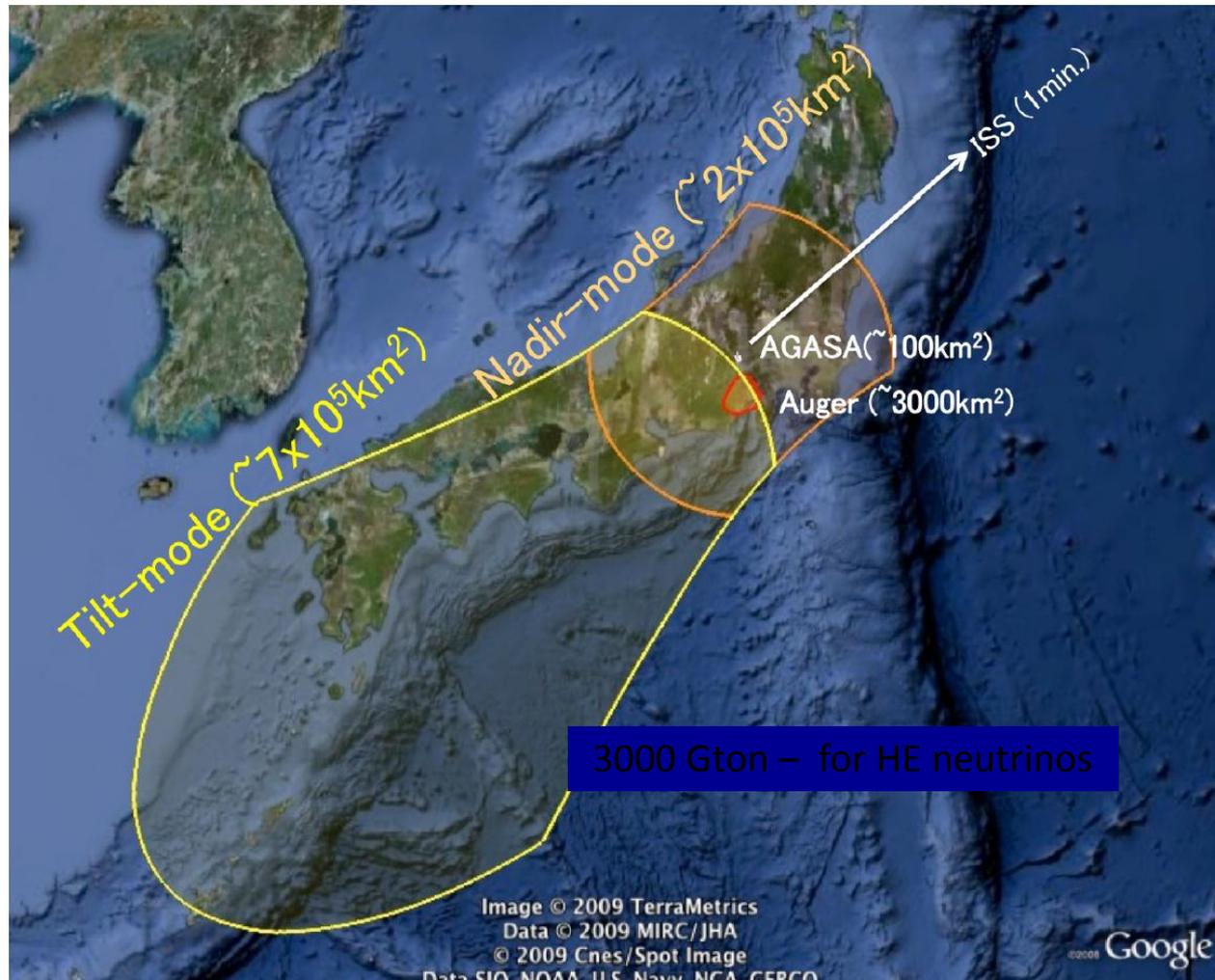
$\gamma + p \rightarrow \Delta \rightarrow \pi^0 + p, \pi^+ + n$



なぜ宇宙に行くのか？

- 巨大な監視領域
 - 少ないイベントを一網打尽

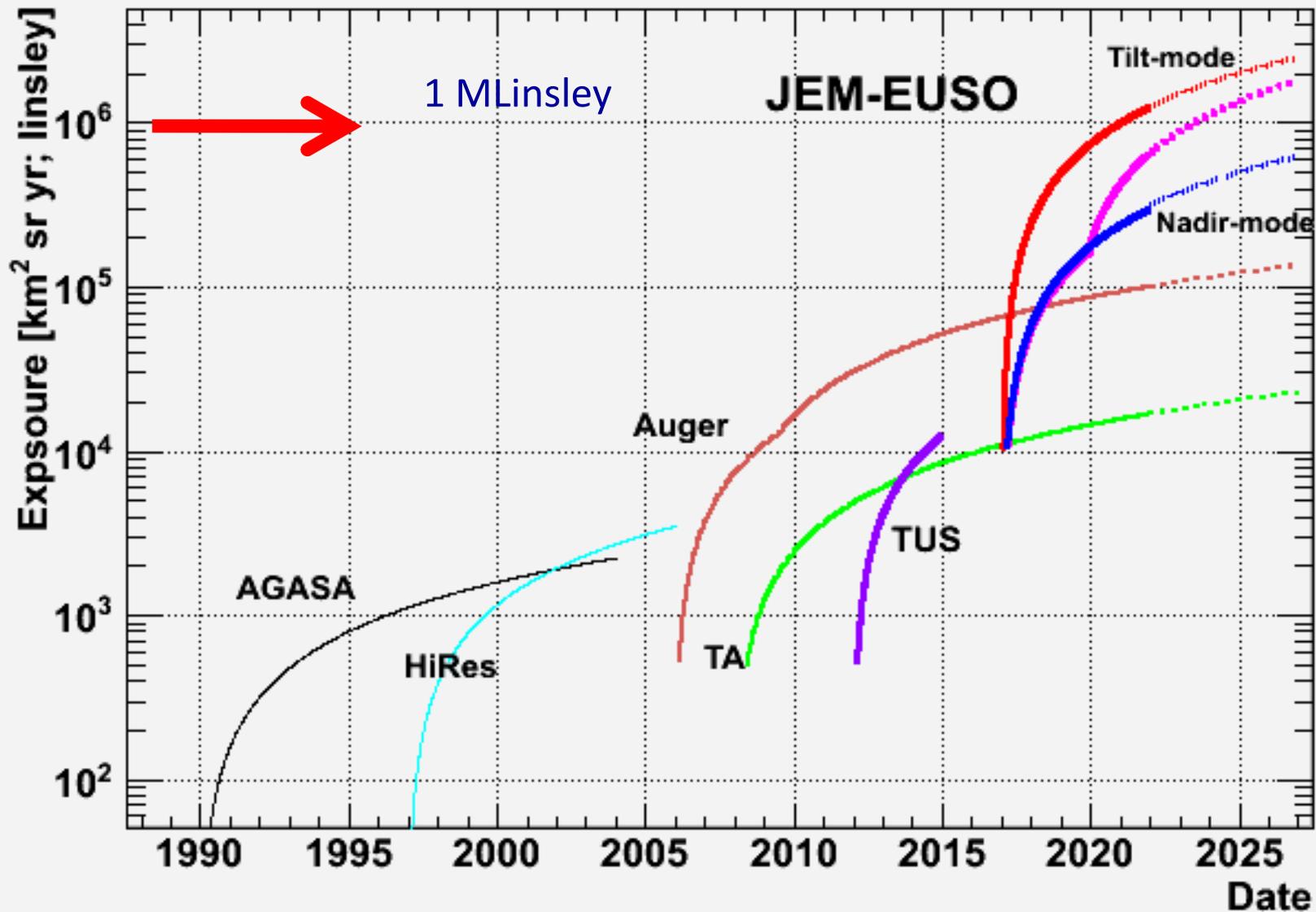
宇宙は何がいいのか？



1. 大きな監視領域

2. 南北に一様な露出

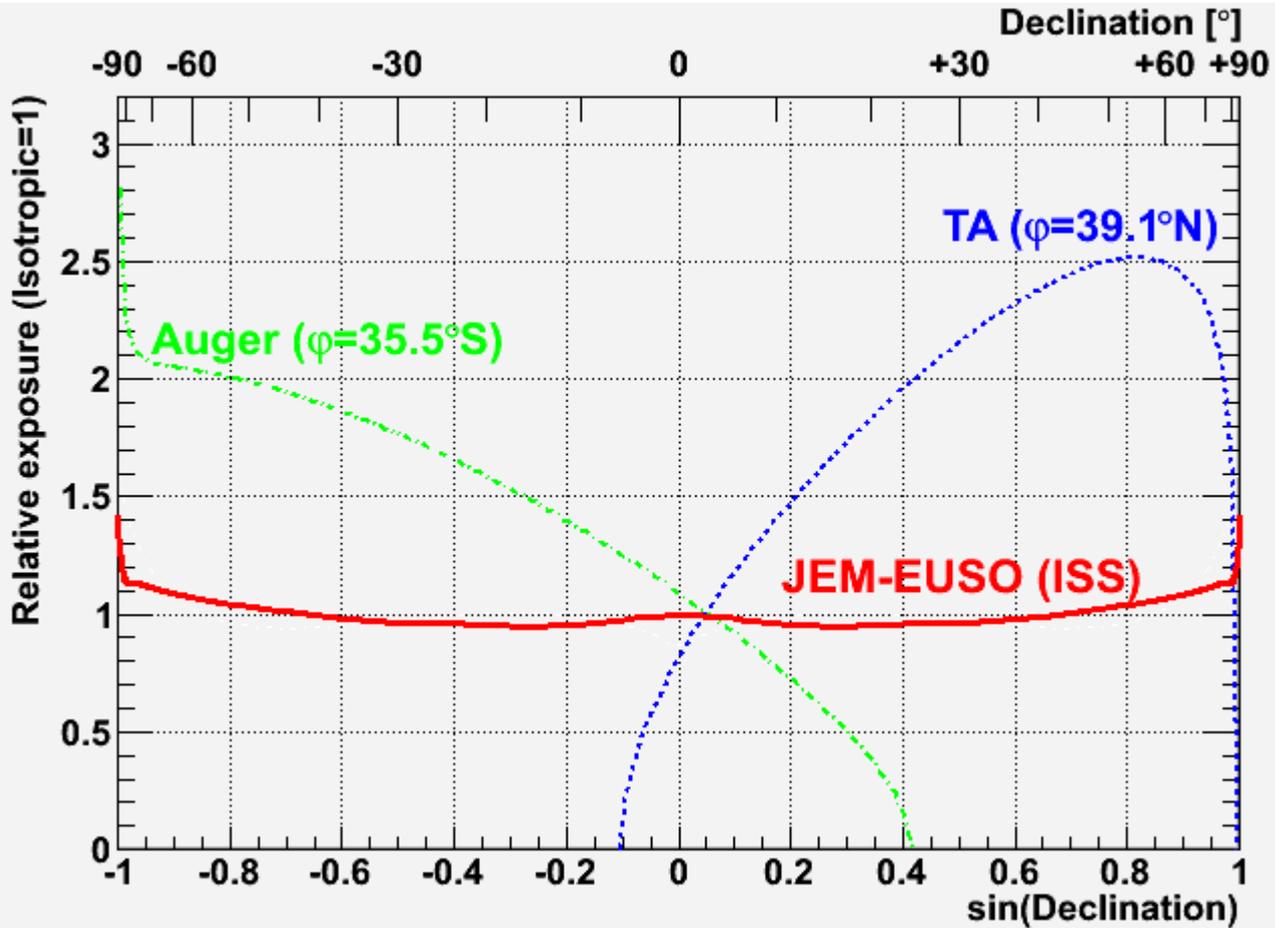
Why JEM-EUSO? Large exposure + Full sky coverage



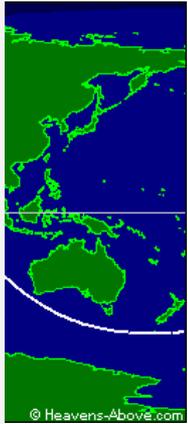
なぜ宇宙に行くのか？

- 巨大な監視領域
 - 少ないイベントを一網打尽
- 南北両天にまたがる一様な観測
 - 全天をほぼ一様に観測

ISS Orbit



<http://www.nisa.com/>



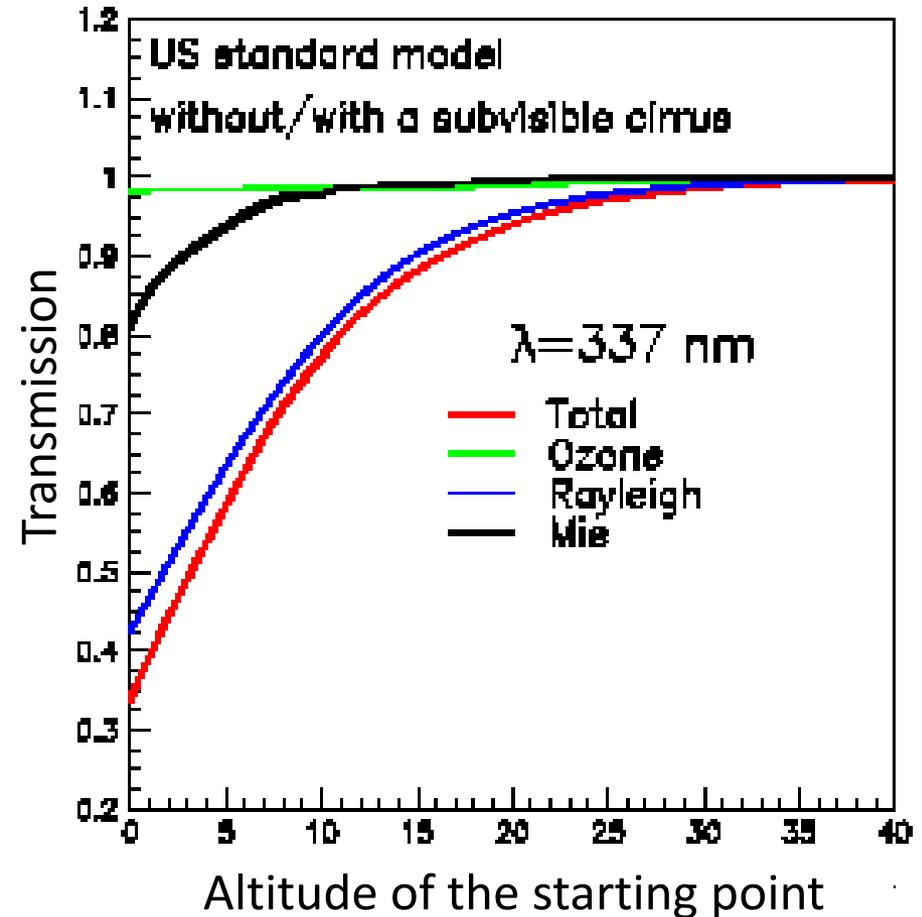
Full-Sky Coverage

なぜ宇宙に行くのか？

- 巨大な監視領域
 - 少ないイベントを一網打尽
- 南北両天にまたがる一様な観測
 - 全天をほぼ一様に観測
- 比較的透明な大気
 - 地上近くは散乱が効く

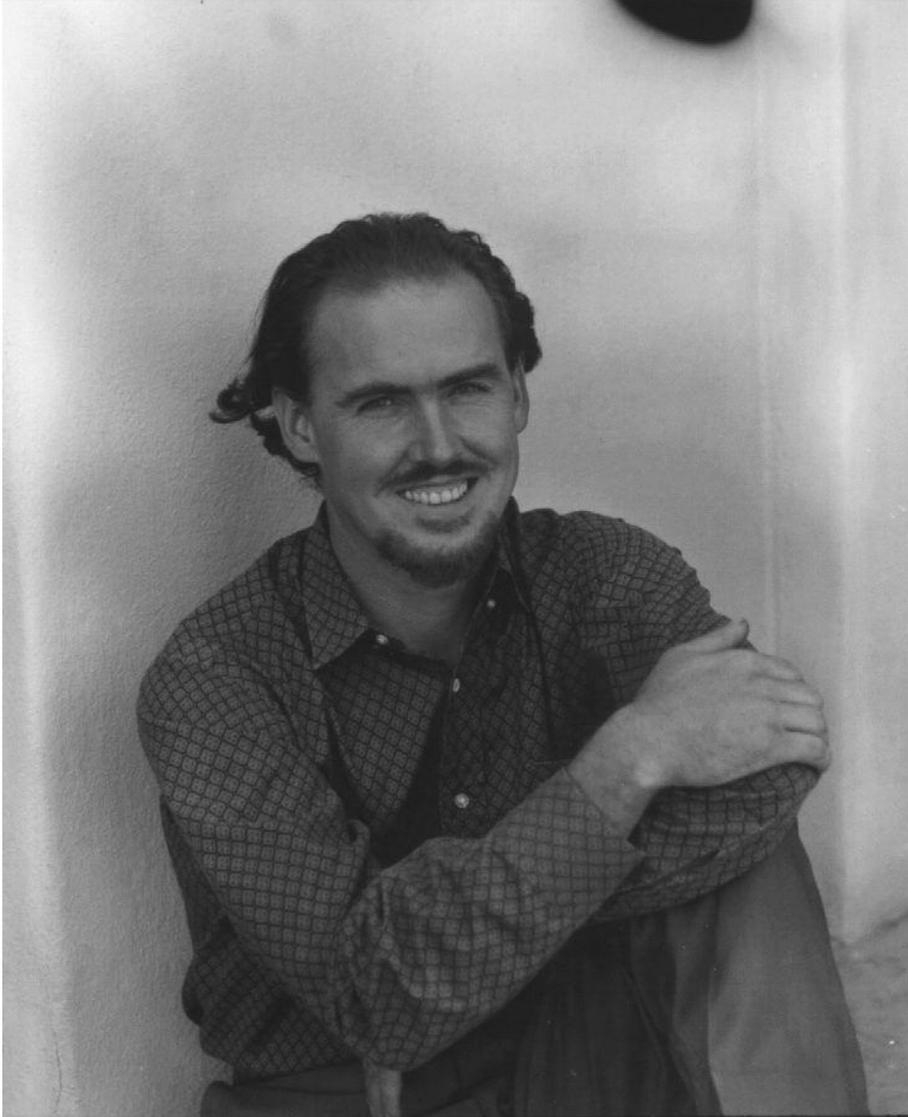
宇宙から見る利点

- 上層大気は希薄で散乱が少ない
 - 地上からだ汚い下層大気の吸収をこうむる
 - 10km先だと10%以下
- 夜は雲頂高度が低い
 - ほとんどは<3km
 - 空気シャワーの大部分は雲の上で最大を迎える
- 距離が決まっている
 - 軌道高度(400km) >> 大気厚さ(10km)



1979, An idea* of John Linsley

SOCRAS: Satellite Observatory of Cosmic Ray Showers



John Linsley in 1979 in the Field Committee Report of NASA “Call for Projects and Ideas in High Energy Astrophysics for the 1980s”

The concept to observe, by means of Space Based devices looking at Nadir during the night, the fluorescence light produced by an EAS proceeding in the atmosphere

In Early 1990s John had moved to Palermo to work on the PLASTEX experiment with his old friend Livio Scarsi, and Osvaldo Catalano

Yoshi Takahashi 1995

- Fresnel Optics enlarges Field of View $\pm 30^\circ$
- Observational Area $\sim 100,000 \text{ km}^2$



John Linsley, "search for the End of the Cosmic Ray Spectrum",
AIP CP433, 21, 1977.

FOURTH BREAKTHROUGH?

1
Sj

On 15 May, 1995, my wife Paola te
was trying to get in touch with me
was, "I have written a paper ab
Satellite. The technology and neu
idea of 1979. I would like to send

MASS: Maximum
Energy Auger (Air)
Shower Satellite
Italian Mission

launch requirements. His order of
the same amount his counting rate.
if formidable technical problems are
it is not unreasonable to imagine

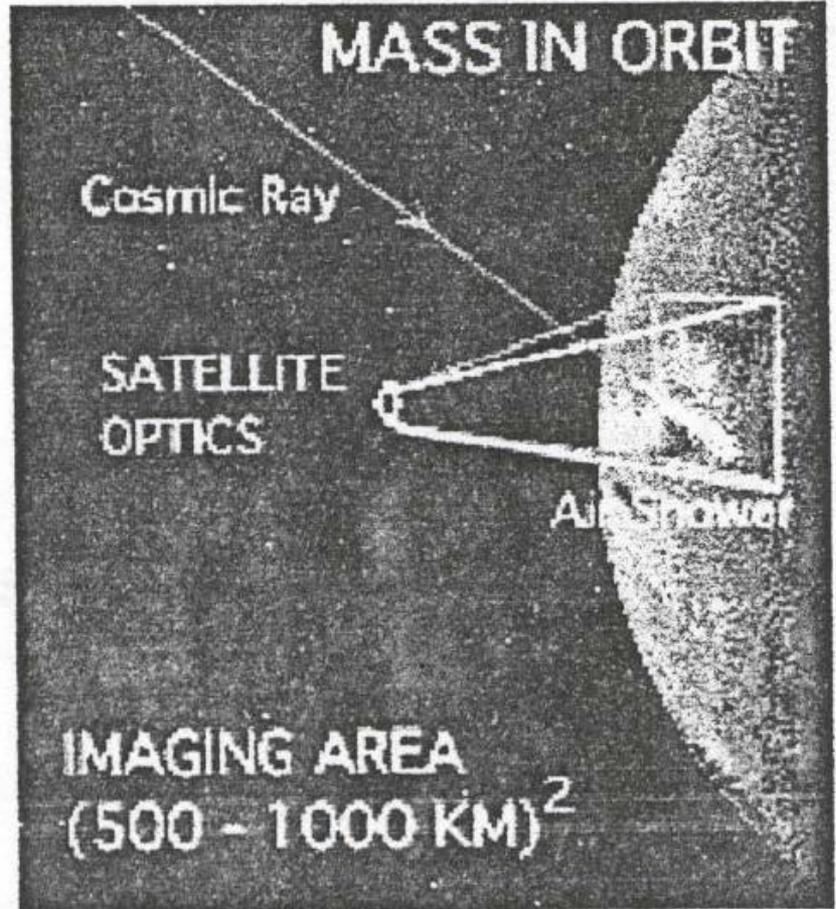


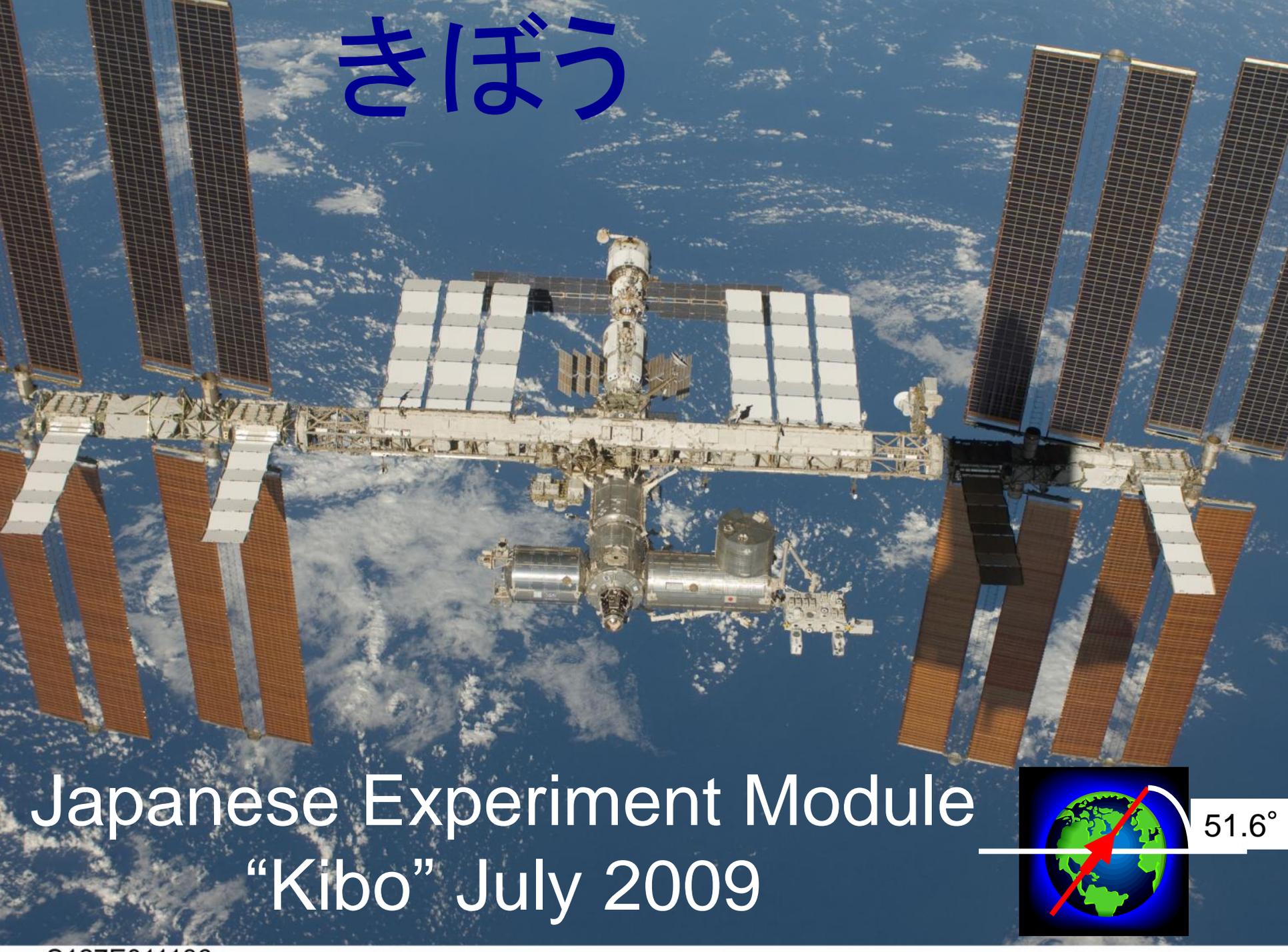
Fig. 3 Artist view of the MASS on orbit.



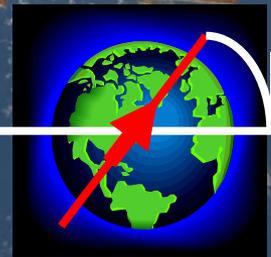
宇宙から地球を見下ろして宇宙と地球を知る:地文台

JEM—EUSO

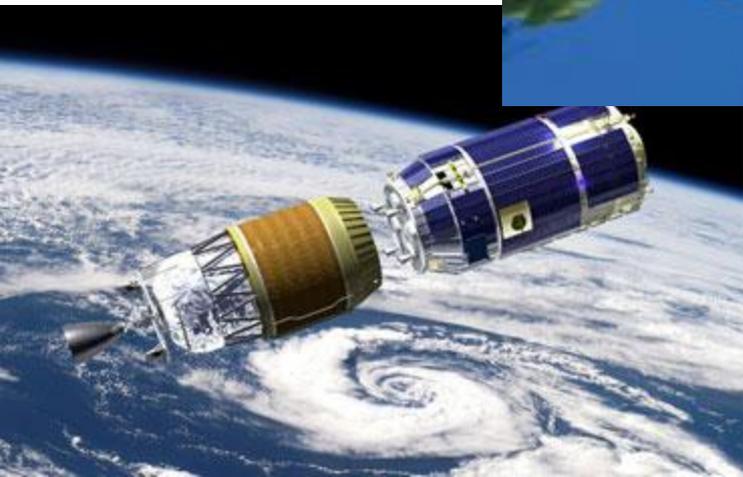
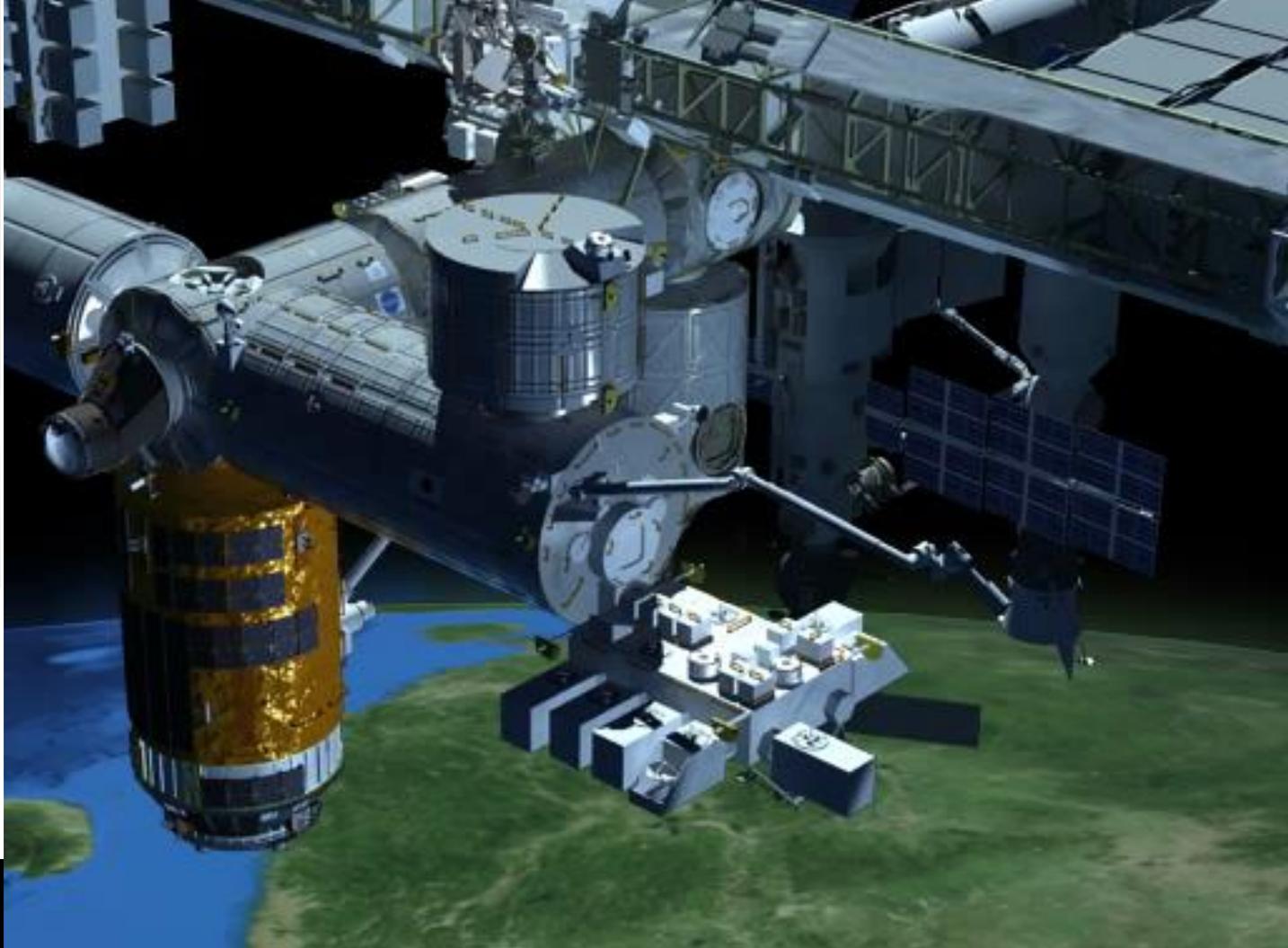
きぼう



Japanese Experiment Module
"Kibo" July 2009

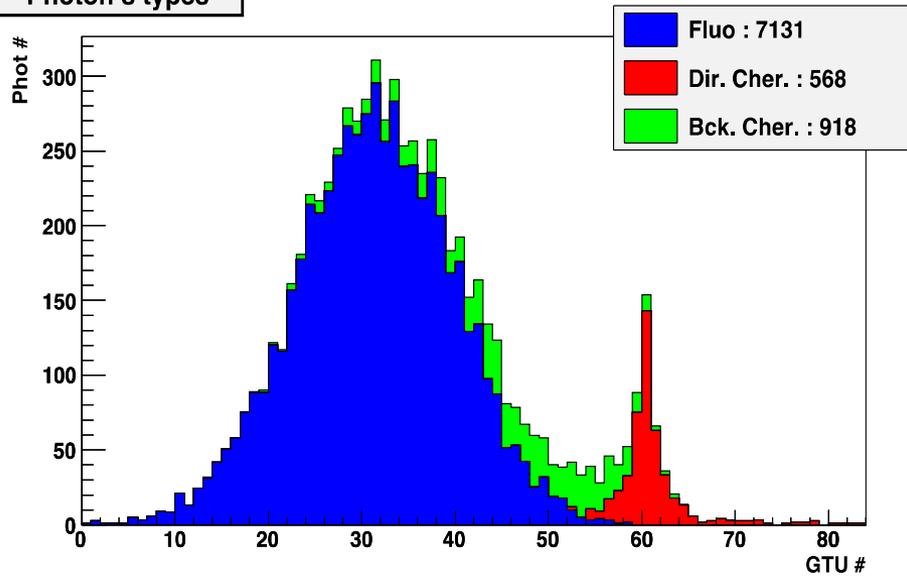


51.6°



Successful Launch of HTV
September 11, 2009

Photon's types



a) 蛍光

b) 散乱チェレンコフ光

c) 地上散乱チェレンコフ光

$$1 \text{ GTU} = 2.5 \text{ msec}$$

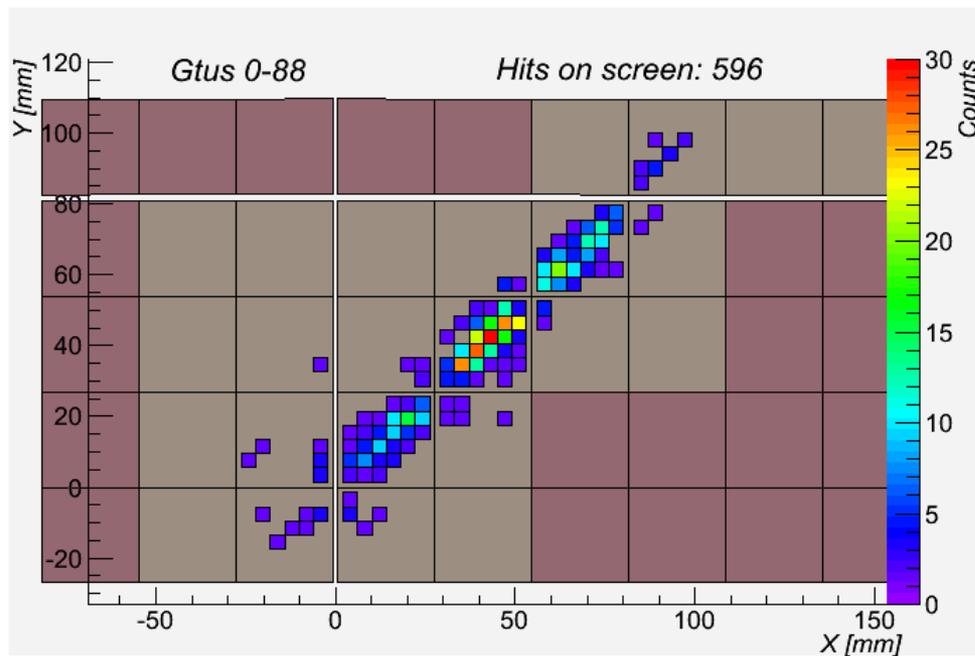
$$\text{Back.} = 500 / (\text{m}^2 \text{ sr ns})$$

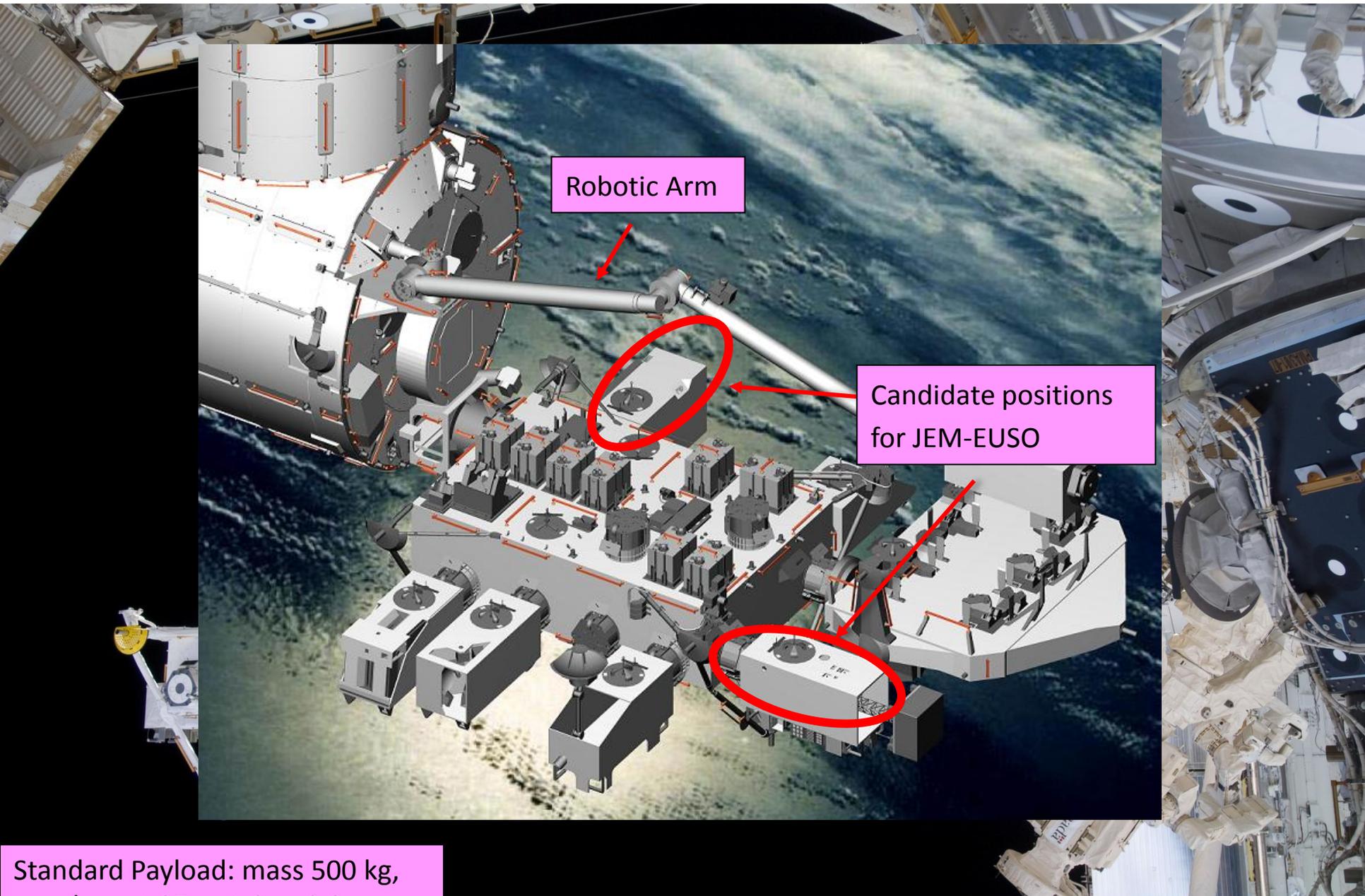
高速のシグナル

duration » 50 - 150 ms

Simulation of the light profile observed at the entrance pupil (above) and of the observed shower image (using the ESAF code)

GTU time units





Robotic Arm

Candidate positions
for JEM-EUSO

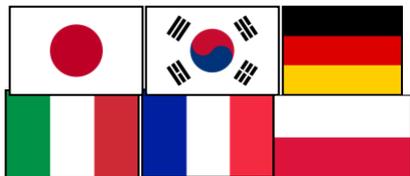
Standard Payload: mass 500 kg,
envelope: 1.85m x 1.0m x 0.8m

All mission aspects have been successfully studied by JAXA and RIKEN: **open issue of ISS resources.**

Parameter	Value
Launch date	JFY 2016
Mission Lifetime	3+2 years
Rocket	H2B
Transport Vehicle	HTV
Accommodation on JEM	EF#2
Mass	1938 kg
Power	926 W (op.) 352 W (non op.)
Data rate	285 kbps (+ on board storage)
Orbit	400 km
Inclination of the Orbit	51.6°
Operation Temperature	-10° to 50°

国際協力

DAQ Electronics



Support Structure



Focal Surface Detector



Housekeeping



Simulation : Worldwide

Telescope Structure



BUS System : JAXA



Atmospheric Monitoring



Optics



Rear Fresnel Lens

Precision Fresnel lens

Iris

Front Fresnel lens

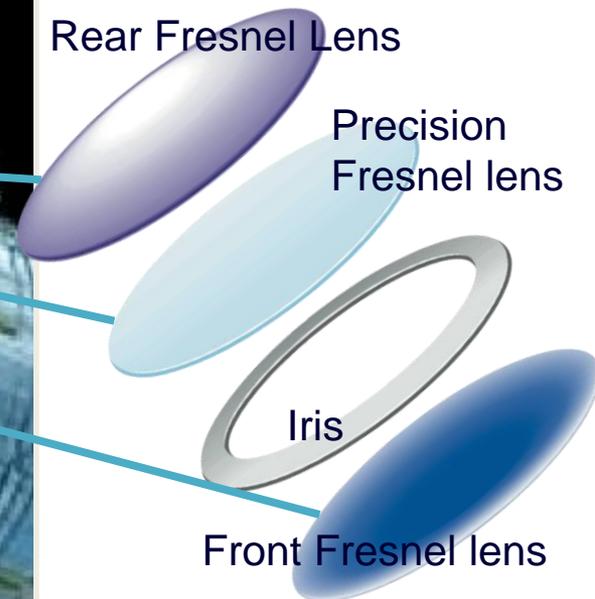
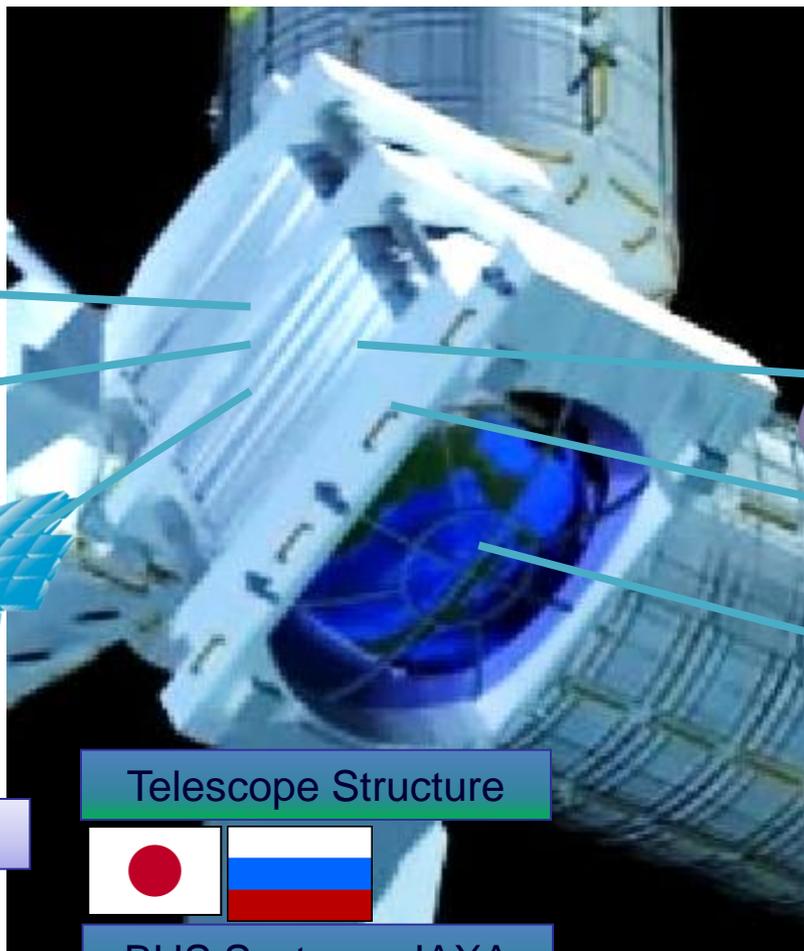
On-board Calibration



Ground Based Calibration



Ground Support Equipment



JEM EUSOコラボレーション

- 日本、米国、韓国、メキシコ、ロシア
- ヨーロッパ：ブルガリア、フランス、ドイツ、イタリア、ポーランド、スロバキア、スペイン、スイス
- 77 機関、 250人以上の研究者
- *理研: : 取りまとめ機関*



基本科学目的

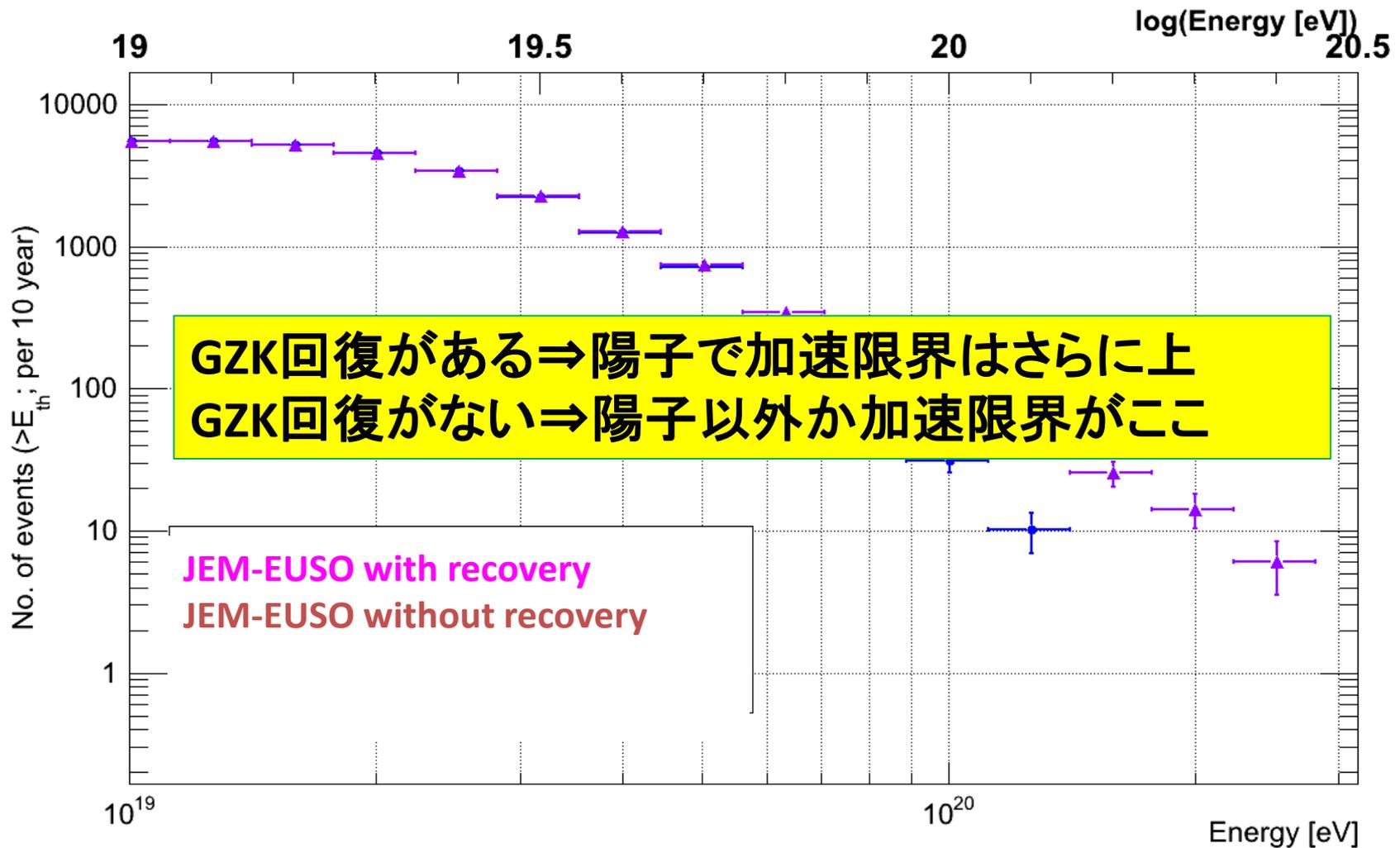
- 荷電粒子天文学の確立
 - 高統計到来方向解析による線源の同定
 - 個々の線源のエネルギースペクトル測定
 - GZK構造の高統計測定

$E > 5. \times 10^{19} \text{eV}$ における物理と天文学

Comparison with current observatories

Observatory	Aperture km ² sr	Status	Start	Lifetime	Duty cycle	Annual Exposure km ² sr yr	Relative to Auger
Auger	7,000	Operations	2006	4 (16)	1	7000	1
TA	1,200	Operations	2008	2 (14)	1	1,200	0.2
TUS	30,000	Developed	2012	5	0.14	4,200	0.6
JEM-EUSO ($E \approx 10^{20}$ eV)	430,000	Design	2017	5	0.14	60,000	9
JEM-EUSO (highest energies) Tilted mode 35°	1,500,000	Design	2017	5	0.14	200,000	28

Expected number of events 5 years ($>E$)



試験的探求研究(1)

- 新メッセンジャー

- 超高エネルギーニュートリノの検出

- X_0 and X_{max}

- 超高エネルギーガンマ線の検出

- X_{max} の変化LPM effect

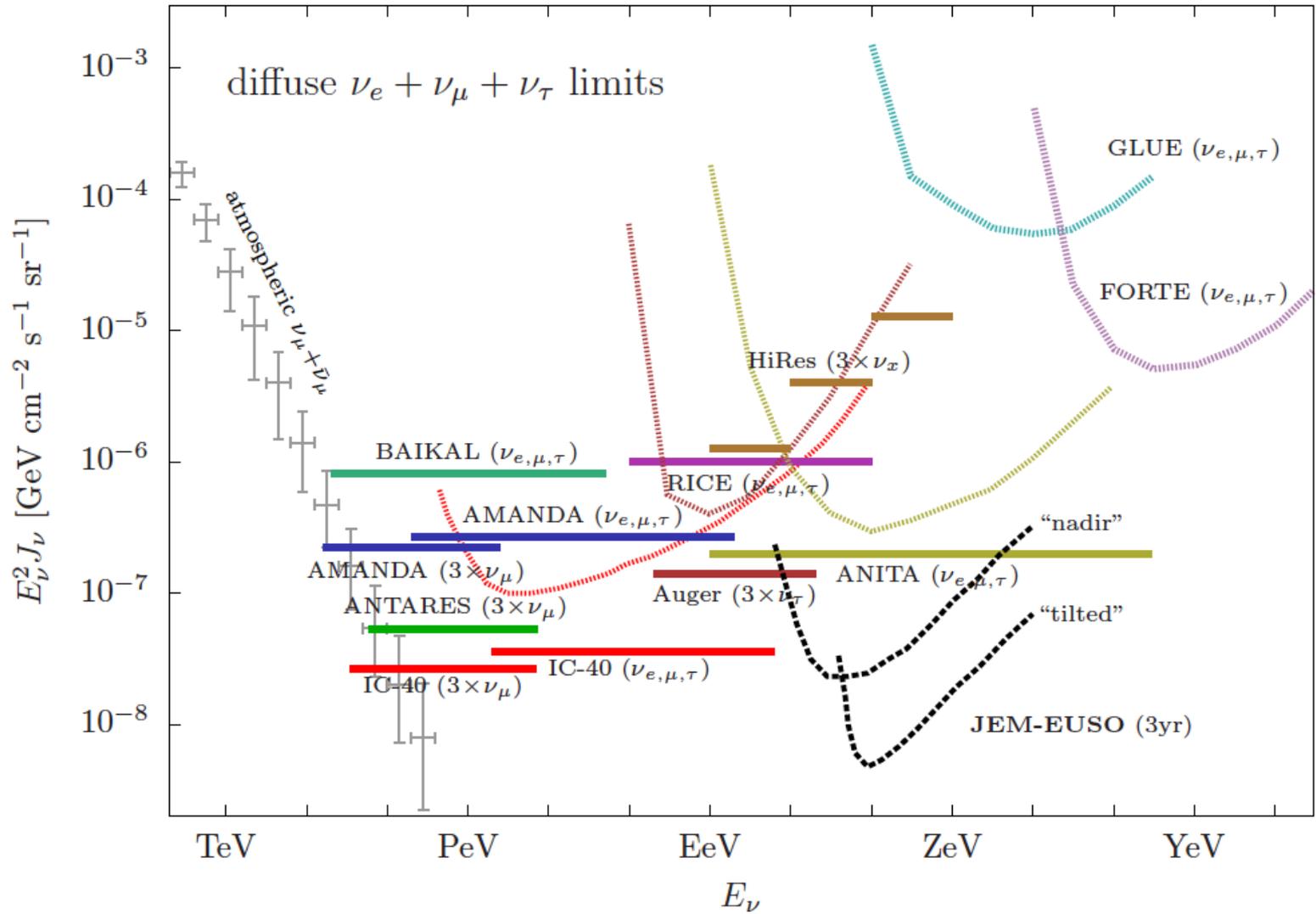
- 磁場magnetic fields

- 銀河磁場と局所宇宙の磁場構造に制限



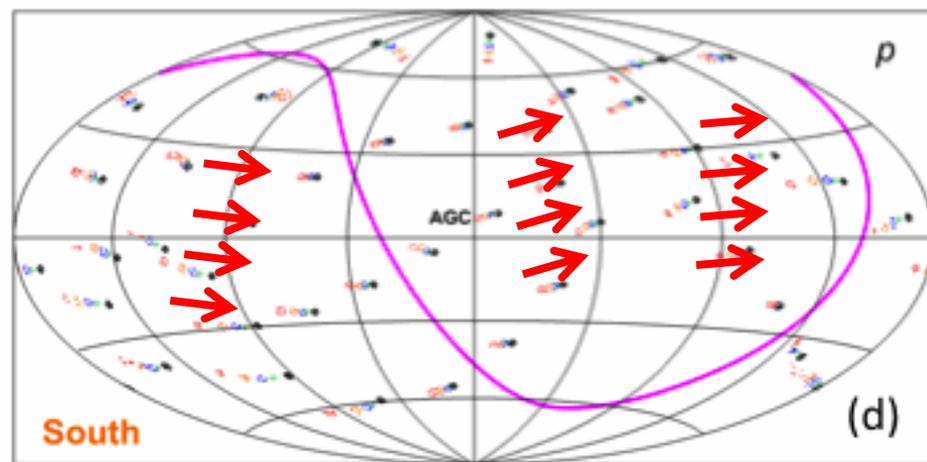
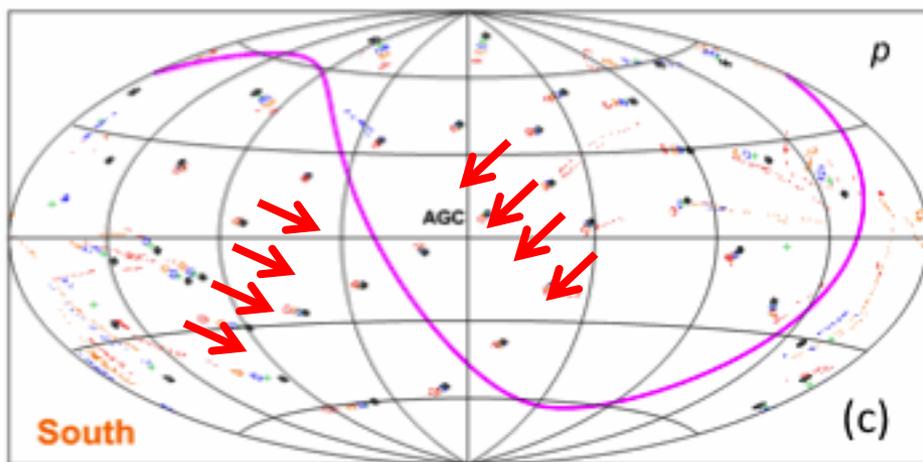
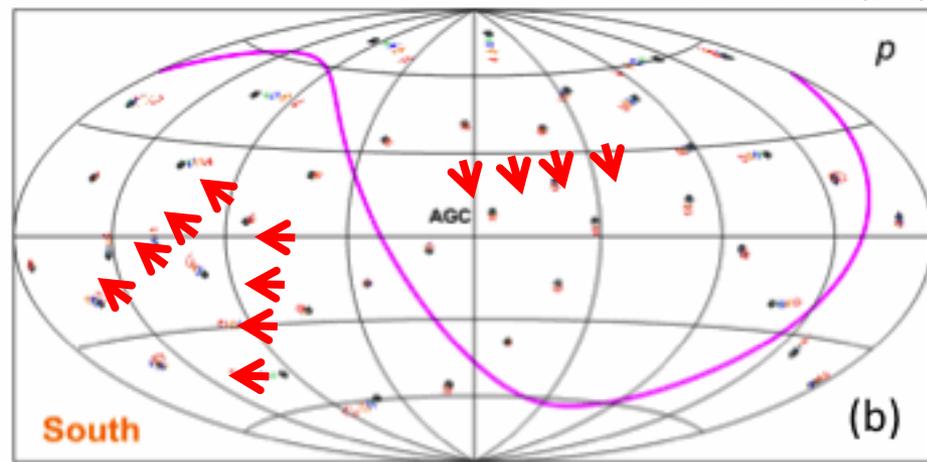
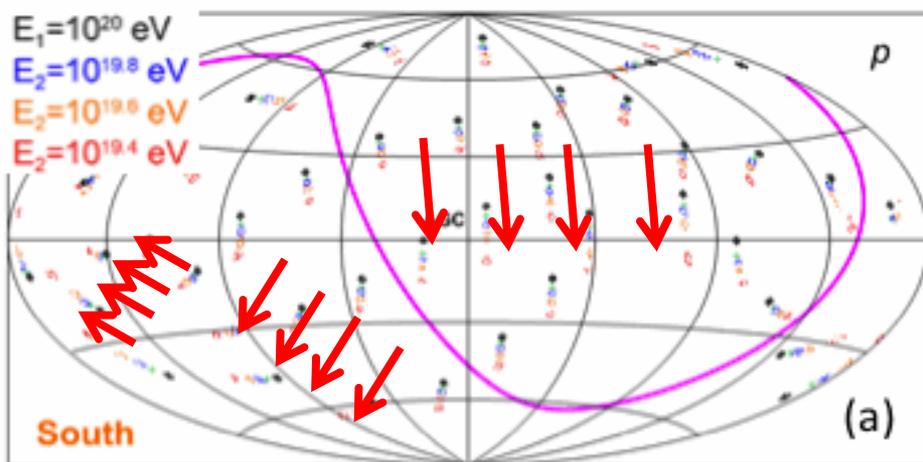
高い発見能力と新しい物理への制限

Upper limits on neutrino flux



GMF assesment through PSF global patterns

Medina-Tanco & Teshima (2003)



Individual PSFs do not need to be visible – 2D correlation function in (l,b) is enough to recover the structure.

Key observation and instrument requirements

Observation area (Nadir)	$\geq 1.3 \times 10^5 (H_{orbit}/400[\text{km}])^2 \text{ km}^2$
Arrival direction determination accuracy	$\leq 2.5^\circ$ (at $E=10^{20}$ [eV] and 60° zenith angle)
Energy determination accuracy	$\leq 30\%$ ($E=10^{20}$ [eV] and 60° zenith angle)
X_{max} determination accuracy	≤ 120 [g/cm ²] ($E=10^{20}$ [eV] and 60° zenith angle)
Energy threshold	$\leq 5.5 \times 10^{19}$ [eV]
Duty cycle	$\geq 17\%$
Lifetime	> 3 years (goal: > 5 years)

サイドプロジェクト

- TA-EUSO
- EUSO-Balloon
- UVT: きぼうロボットアーム把持

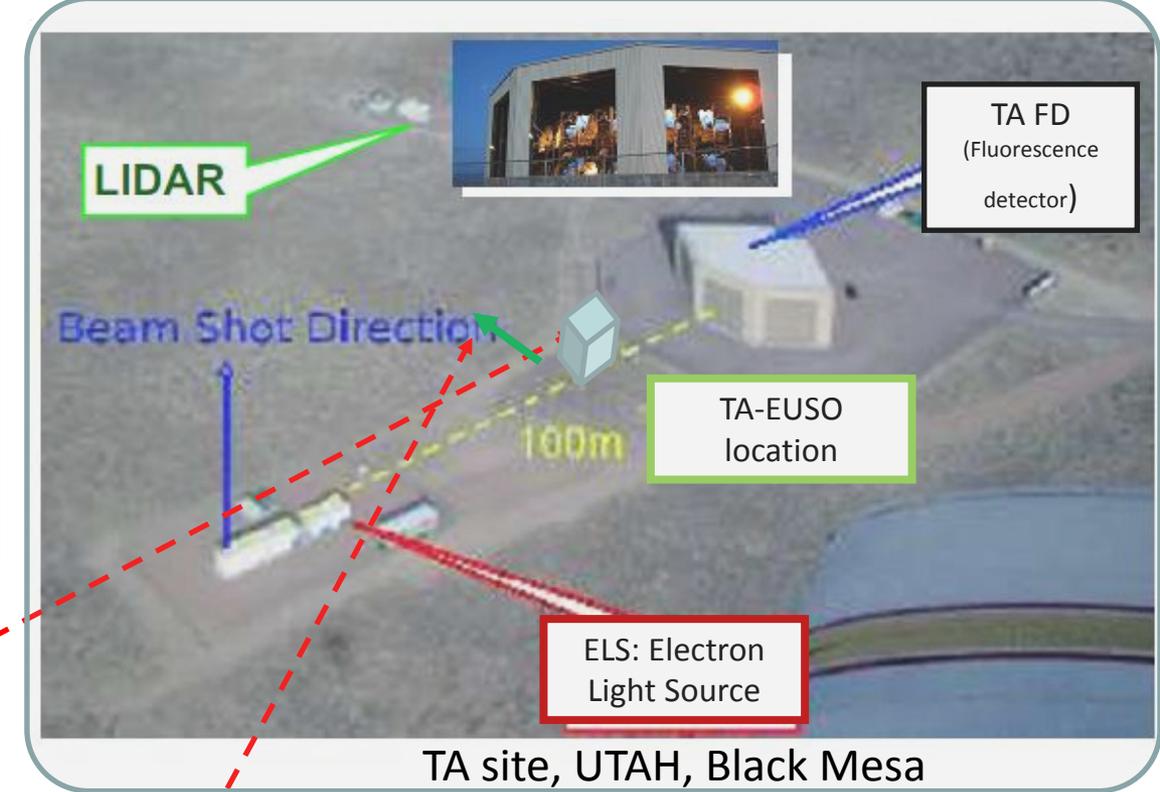
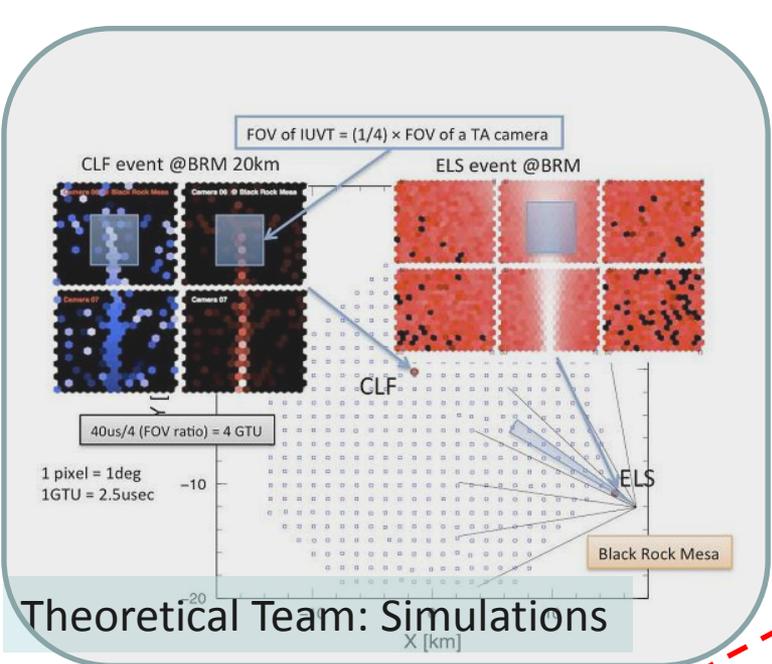
TA-EUSO

2012年の12月までに

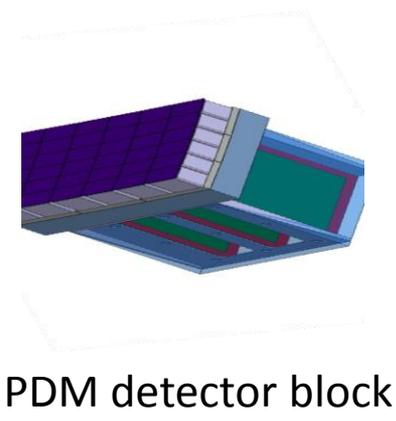
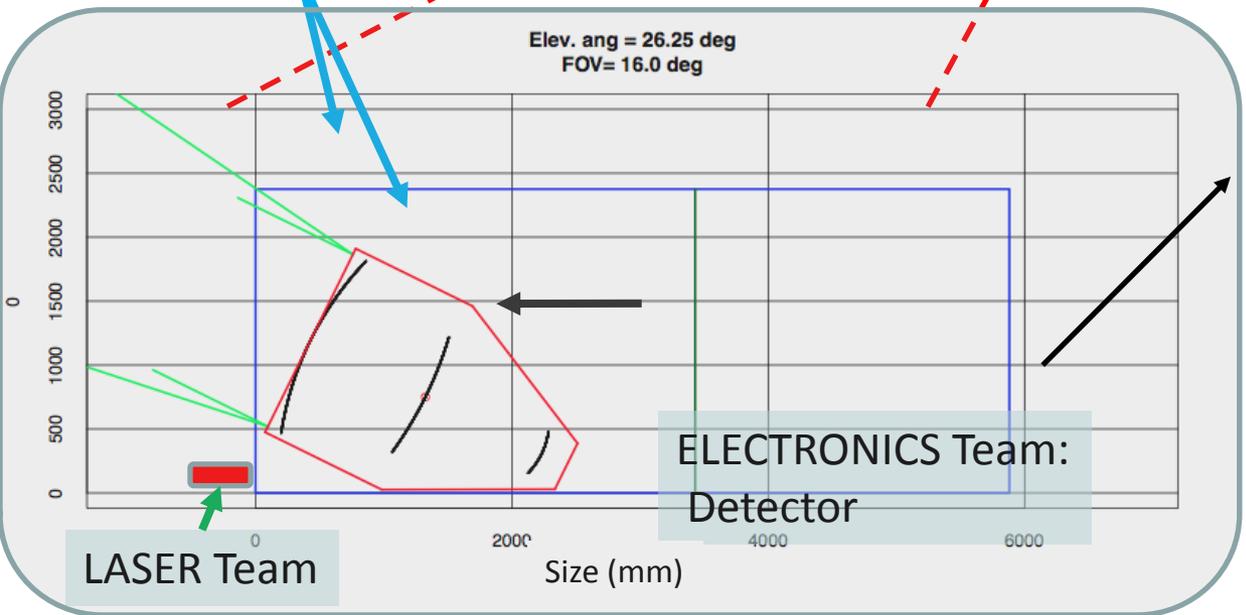
Telescope Array (TA) サイトにおける検出器テスト

- TA-EUSO 望遠鏡はBlack Rock Mesaの蛍光望遠鏡の前に置く
 - Electron Light Source at 100m
 - Most nearby SD is at ~3.5 km
 - Central Laser Facility ~21km

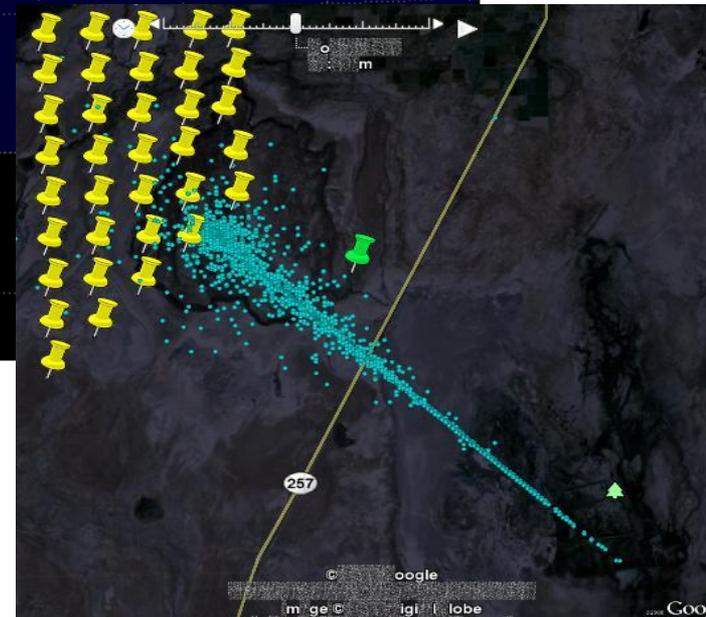
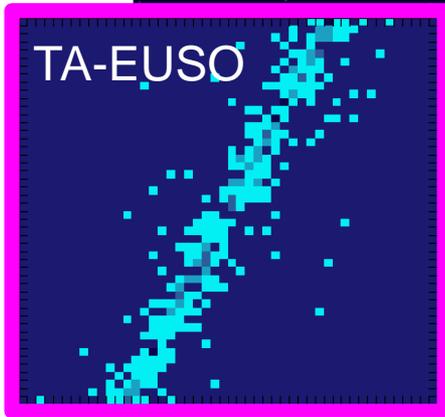
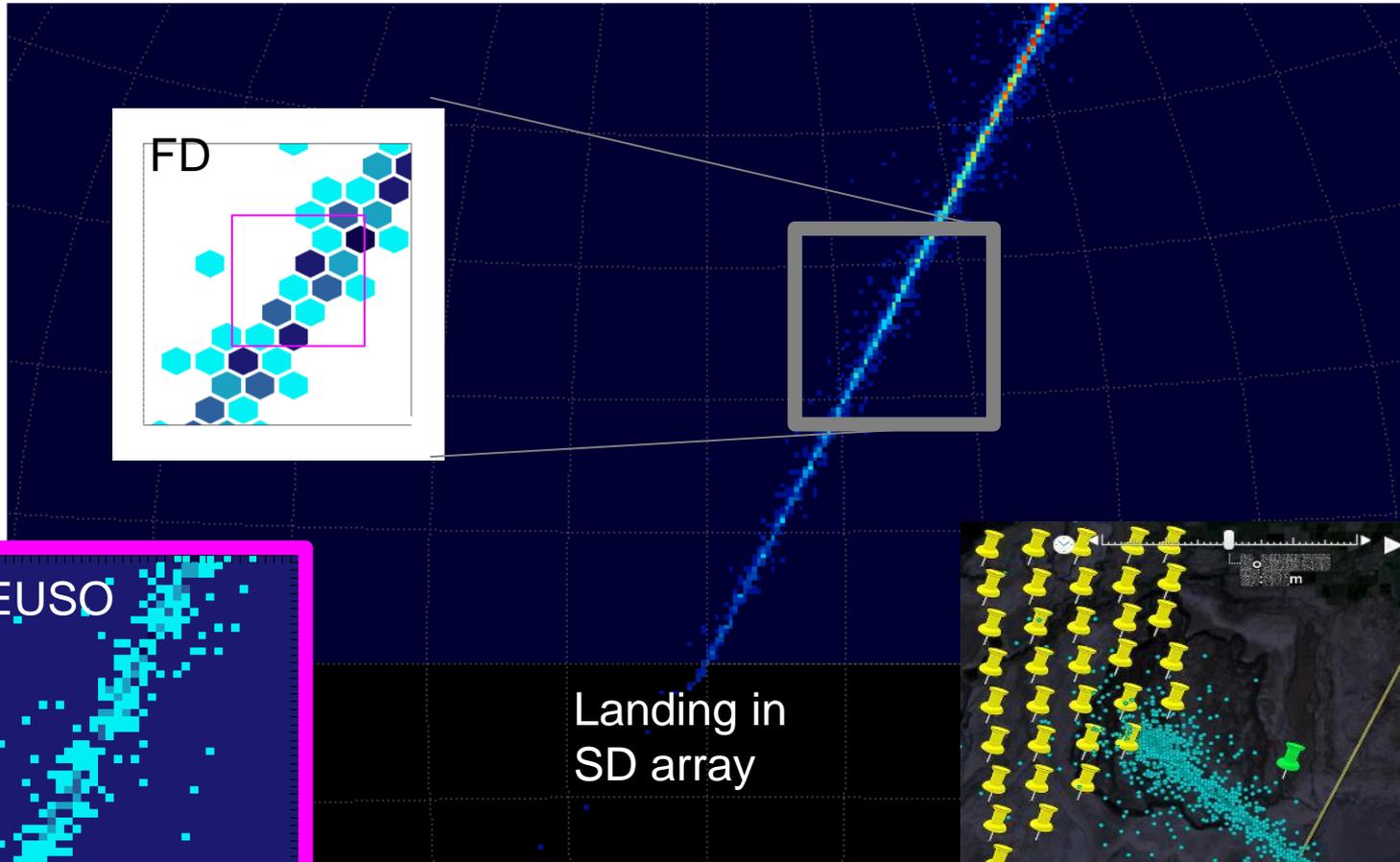




OPTICS Team: Lenses

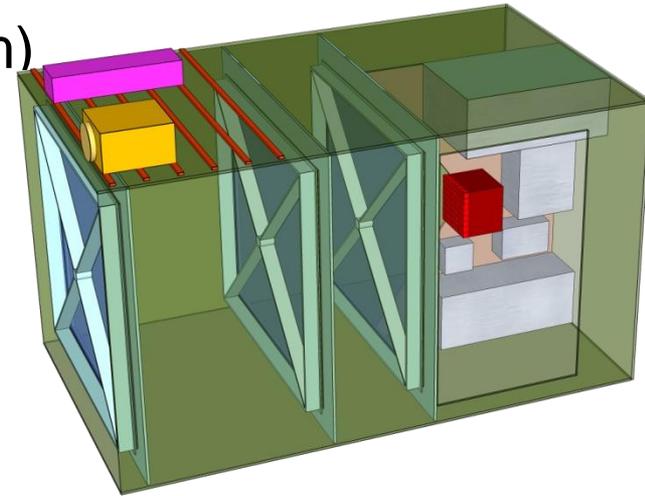


Super hybrid event



EUSO Balloon

- 気球から下を見る
 - UV望遠鏡 (PDM EM + 3 lenses system)
- 光学テスト
- 背景光テスト
- 40kmの高さから空気シャワーを見る

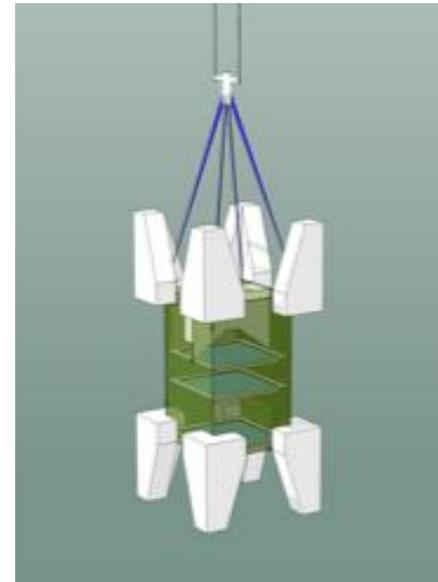


フランス宇宙機関 (CNES)

Phase B 進行が決定

→ 2014年の打ち上げ

→ 3回のフライト



On the Sky Background

Nightglow background: 100 - 500 photons/m²/ns/sr

Sakaki, BABY, NIGHTGLOW, Tatiana
increases by ~1.5 with clouds

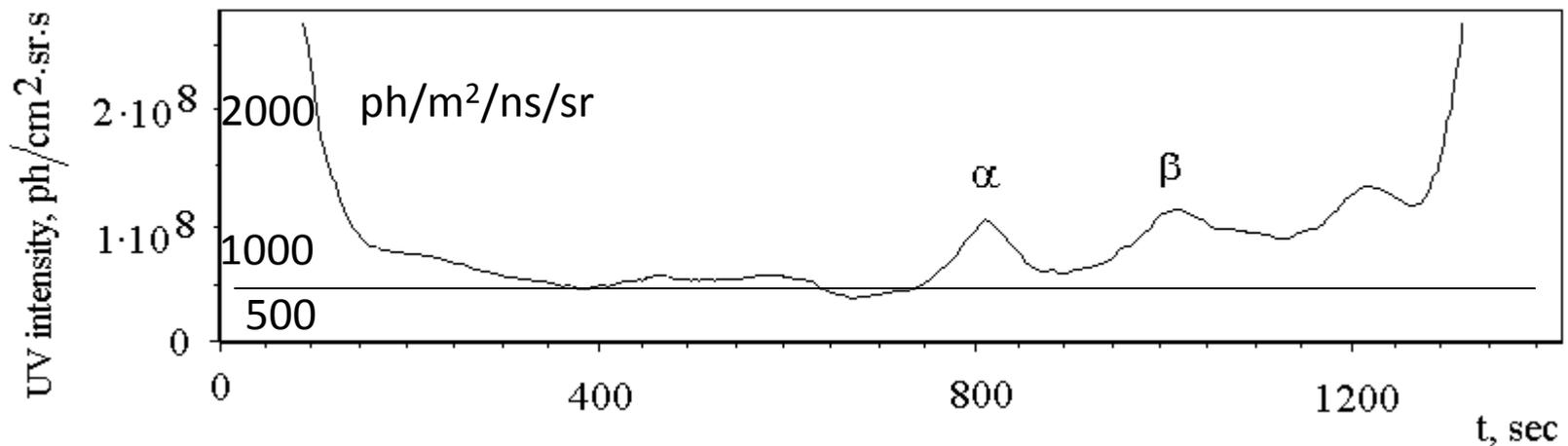
Airglow (~100 km height): 250 - 600 photons/m²/ns/sr

Moon phases (<25%): <100 ph/m²/ns/sr

Background measurements with coarse resolution (~200 km FoV)

From Tatiana Universitetsky Satellite.

α and β = large cities



PARAMETERS OF EUSO-BALLOON COMPARED TO JEM-EUSO

	JEM-EUSO	EUSO-Balloon
Height(km)	420	40
Diameter(m)	2.5	1
FoV/pix(deg)	0.08	0.25
Pixel@ground(km)	0.580	0.175
FoV/PDM(deg)	3.8	12
PDM@ground(km)	28.2	8.4
Signal Ratio	1	17.6
 BG Ratio	1	0.9-1.8
S/ \sqrt{N}	1	20-10
 E_{thr} (eV)	3×10^{19}	$1.5-3 \times 10^{18}$
Number of PDM	143	1

Maximize performance of EUSO-Balloon keeping
parameters as close as possible to **JEM-EUSO**

Typical event observable by EUSO-Balloon (2)

Proton:

$$E = 4 \cdot 10^{18} \text{ eV}$$

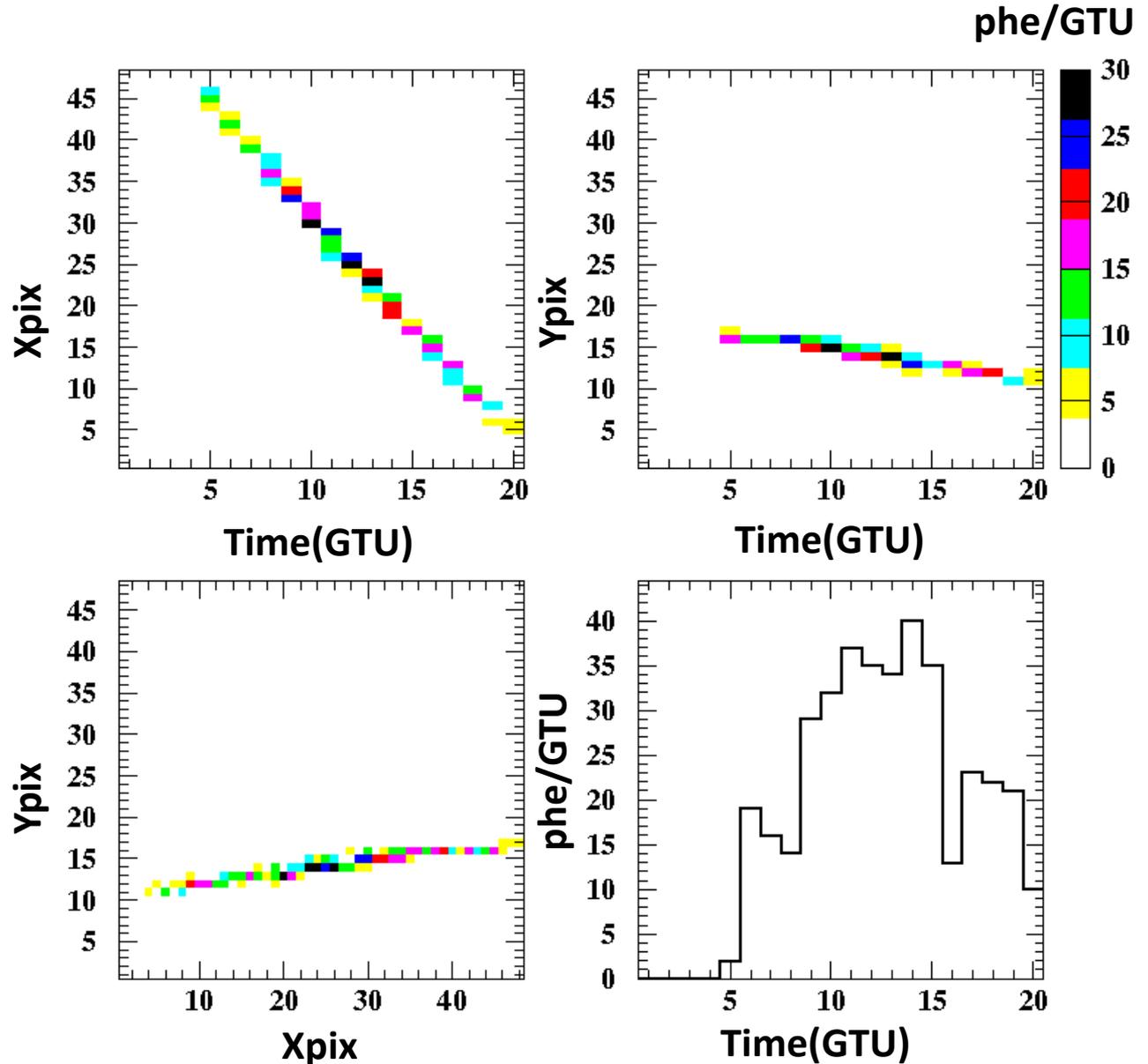
$$\theta = 57.5^\circ$$

$$\phi = 188.7^\circ$$

$$X_0 = 9.3 \text{ km}$$

$$Y_0 = 3.1 \text{ km}$$

Event landing
outside the FoV



USA

- 米国宇宙機関

(NASA) - 2010年

	Cover Page for Proposal Submitted to the National Aeronautics and Space Administration	NASA Proposal Number 11-APRA11-0066	
NASA PROCEDURE FOR HANDLING PROPOSALS			
This proposal shall be used and disclosed for evaluation purposes only, and a copy of this Government notice shall be applied to any reproduction or abstract thereof. Any authorized restrictive notices that the submitter places on this proposal shall also be strictly complied with. Disclosure of this proposal for any reason outside the Government evaluation purposes shall be made only to the extent authorized by the Government.			
Principal Investigator Angela Olinto		Phone Number 73-702-8206	
Street Address (1) 5640 S Ellis Ave			
City Chicago		Country Code US	
Proposal Title : U.S. Partici			
Proposed Start Date 01 / 01 / 2013	Proposed 12 / 31	Budget 83.55	Year 5 Budget 146,123.32

採択!



Space Agencies

- JAXA : Japan
- ESA: Europe
- NASA : US
- Roscosmos : Russia

- National Space Agencies
 - ASI, CNES, DLR, etc



Review by JAXA



09 宇航有環利 1013001
平成 21 年 10 月 20 日

独立行政法人 理化学研究所
主任研究員 戎崎 俊一 殿

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
有人宇宙環境利用ミッション本部
宇宙環境利用センター
センター長 田中 哲夫



「きぼう」船外実験プラットフォーム第2期ポート占有利用
候補ミッションの選定結果について

謹啓 時下ますますご清祥のこととお喜び申し上げます。

平素から、当機構の業務に関しまして種々のご高配を賜り厚くお礼申し上げます。

先般、実施致しました標記選定につきまして、国際宇宙ステーション・きぼう利用推進委員会ならびに曝露部分科会にて審議・評価いただきました結果、引き続き概念設計を継続とすることが提言されました。

[きぼう利用推進委員会・曝露部分科会の評価]

JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard JEM/EF) については、2015年頃のポート占有ミッションの有望な候補となる可能性があることから、技術要素課題の解決および国際協力の構築を目指して、提案機関とJAXAが協力し、国際調整および設計検討を継続することを提案する。

上記評価を踏まえ、技術的な検討としてミッション機器構成要素の技術成熟度の向上ならびにシステム検討作業をJAXAと協力して実施していただけるようお願いいたします。

また、国際協力体制については、JAXAと共同して体制の構築を引き続き推進すると共に、国際間/機関間の開発費の分担、担当範囲の見直し・調整を実施していただけるようお願いいたします。

敬具

- Exposure Facility working Group (Chaired by Prof. F. Makino) of ISS “KIBO” utilization promotion committee of JAXA, reviewed JEM-EUSO and recommended JEM-EUSO as a mission around 2015 on October 20, 2009.

- Science was highly recognized
- Several technical issues to be confirmed
- Programmatic issues
 - International role sharing
 - Resource sharing among ISS partners

JAXA

2016年－2020年の次期船外利用計画

- きぼう利用推進委員会とJAXAで2016年－2020年の次期船外利用計画について検討を開始した。
- ペイロード(実験装置)の公募は2013年の春頃から開始する予定。(締め切り、選定期間は検討中)
- JEM-EUSOは応募できる。

日本チームの強化

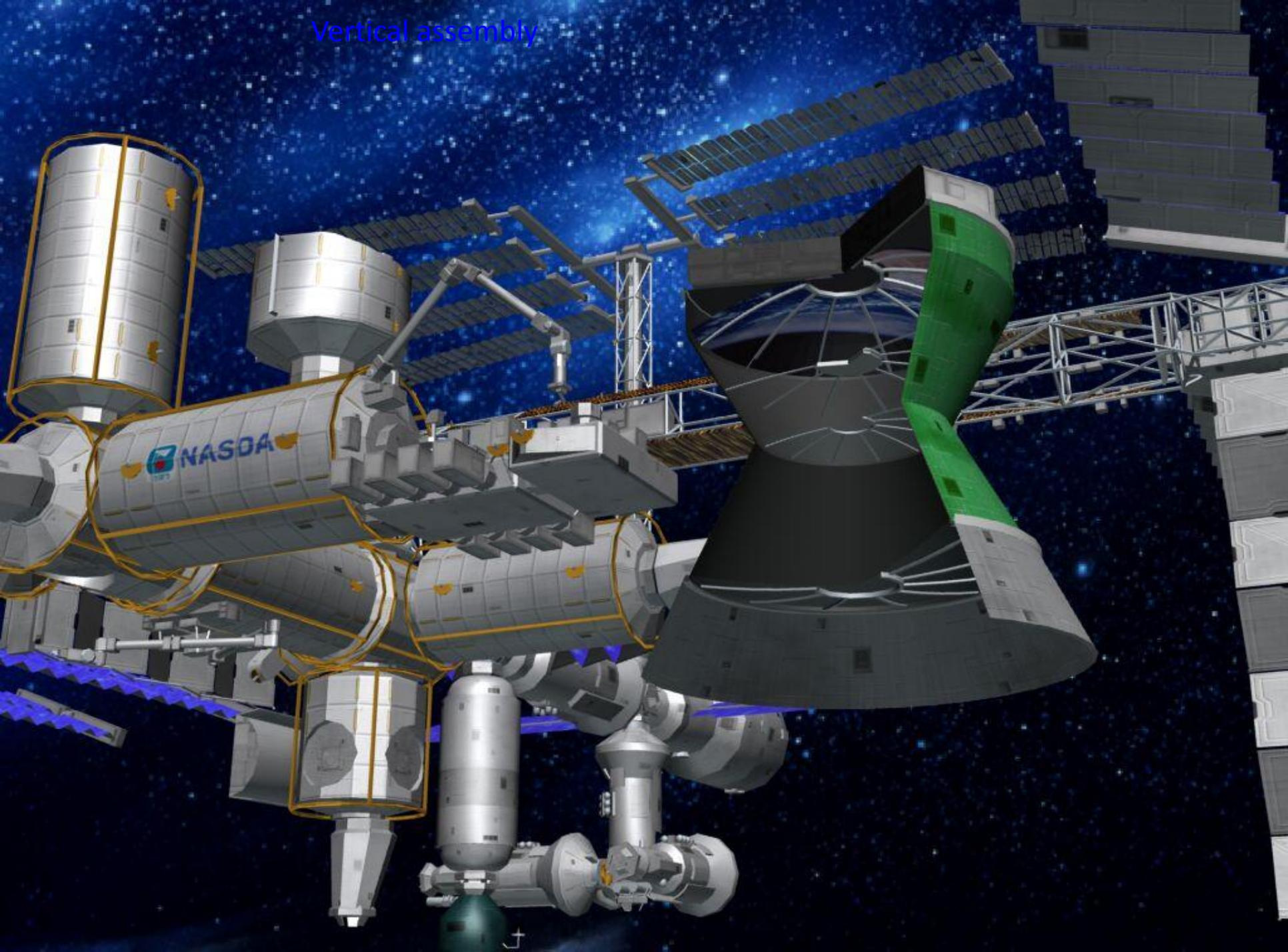
- 新参加: 実験チーム
 - 福島、佐川、野中、池田(東大宇宙線研究所)
 - 荻尾(大阪市立大学)
 - 常定、得能(東京工業大学)
- 理研準主任採用(2013年4月赴任): 理論
 - 長滝(現、京大基研)
- 2017年打ち上げに向けた体制作り
- 12月3日ー7日: 国際JEM-EUSO会合
 - 3日はコミュニティにオープン: 場所はココ

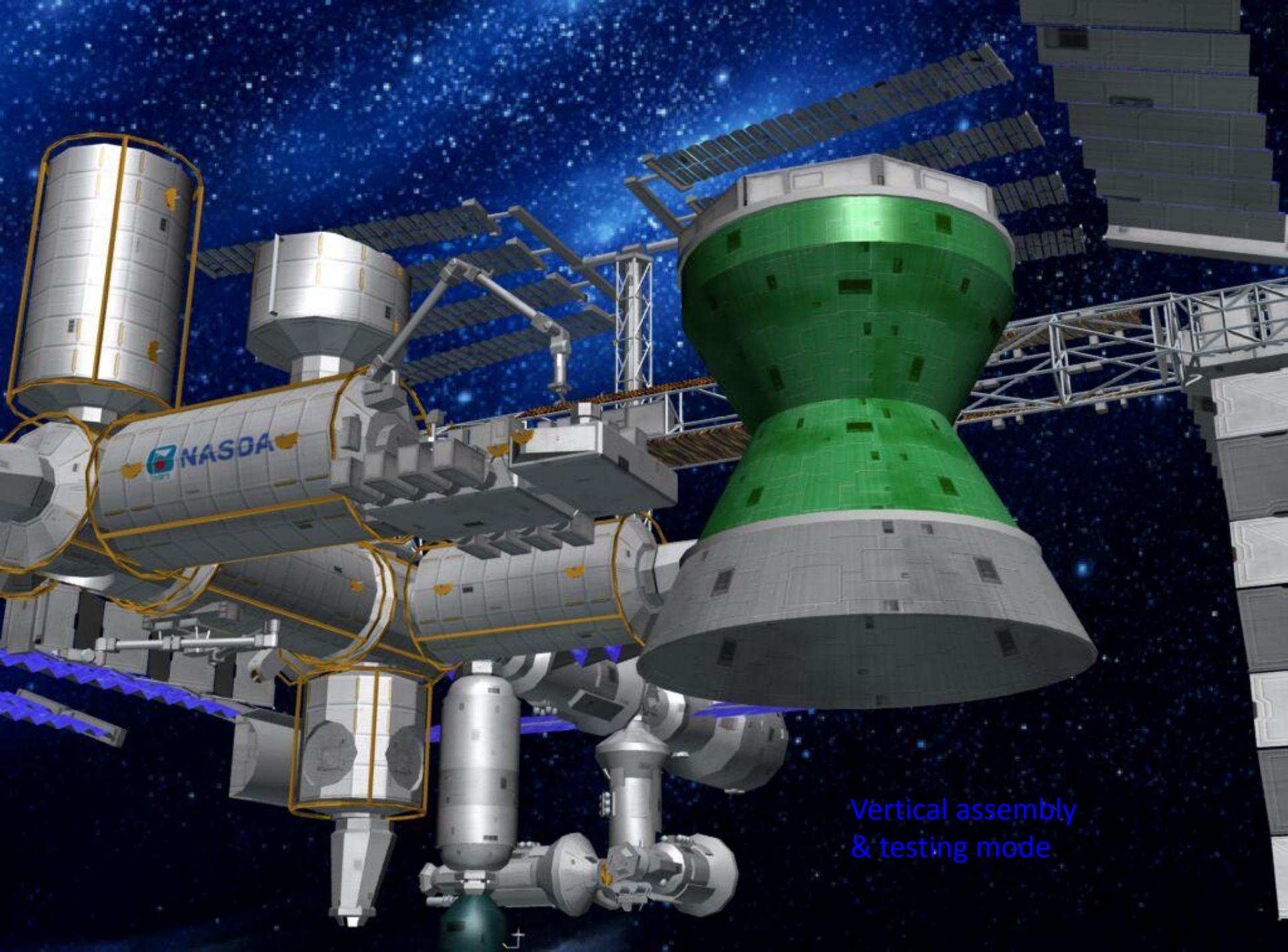
まとめ

- 挑戦1:新しい観測手法
 - 宇宙から空気シャワーを見る最初のミッション
- 挑戦2:荷電粒子天文学
 - 極限エネルギー宇宙線の線源を同定
 - 個々のスペクトルを図る
 - 露出の飛躍的な増加
 - 10^{20} eVでPAOの9倍、最高エネルギーで27倍
 - 一様な露出
 - トップダウン(高⇒底)の宇宙線起源論
 - 独立の情報
- 挑戦3:物理の基本原理
 - ローレンツ不変性、新物理への制限
- 挑戦4:国際協同:総額180億円を3分の一程度の負担
 - 3つの大陸にまたがった広範な国際協力
 - 国際宇宙ステーション:総合宇宙線天文台にする
 - 2017年ごろの打ち上げ

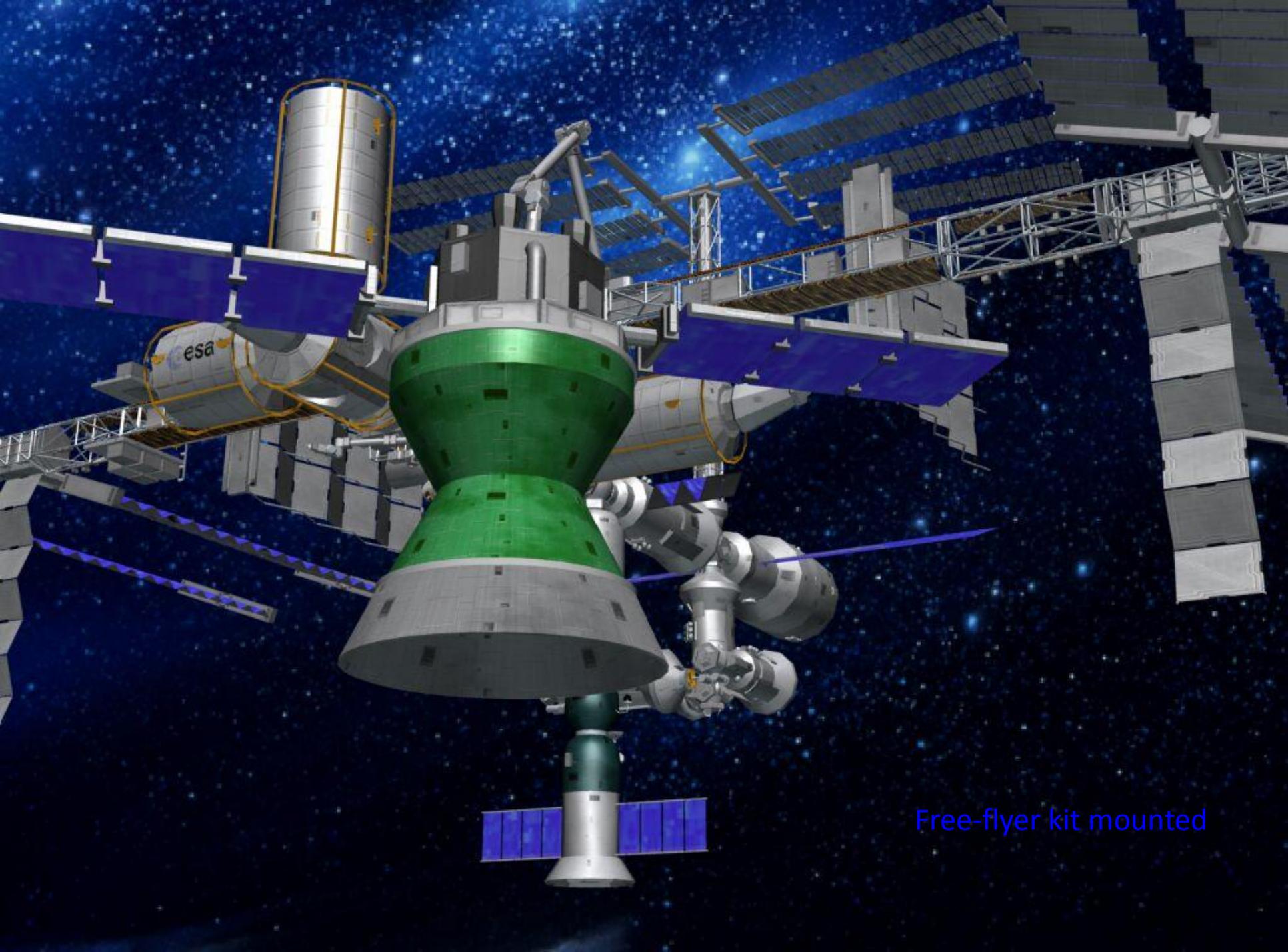
これは始まりに過ぎない

Vertical assembly





Vertical assembly
& testing mode

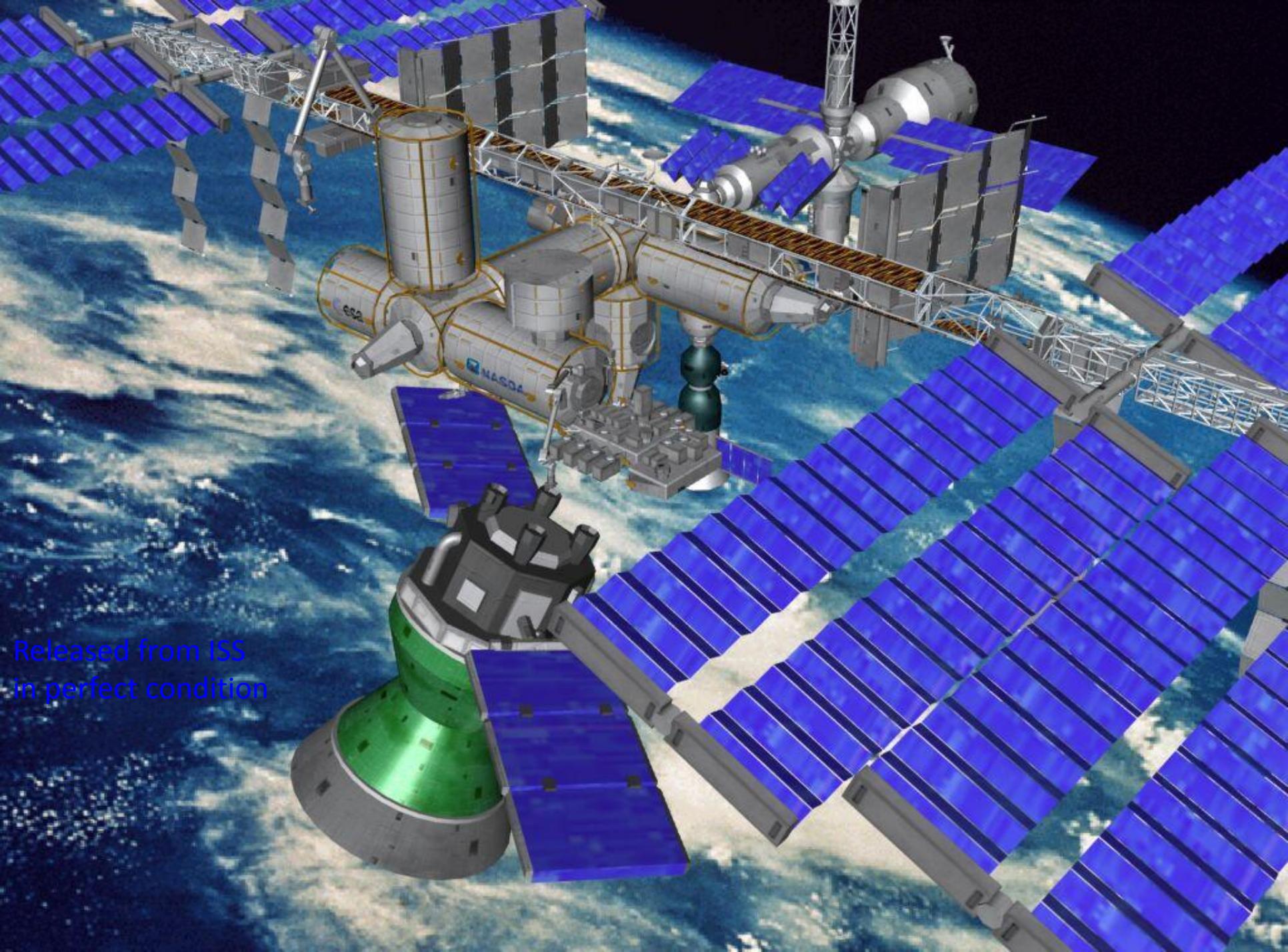


Free-flyer kit mounted

Y. Takahashi 1999

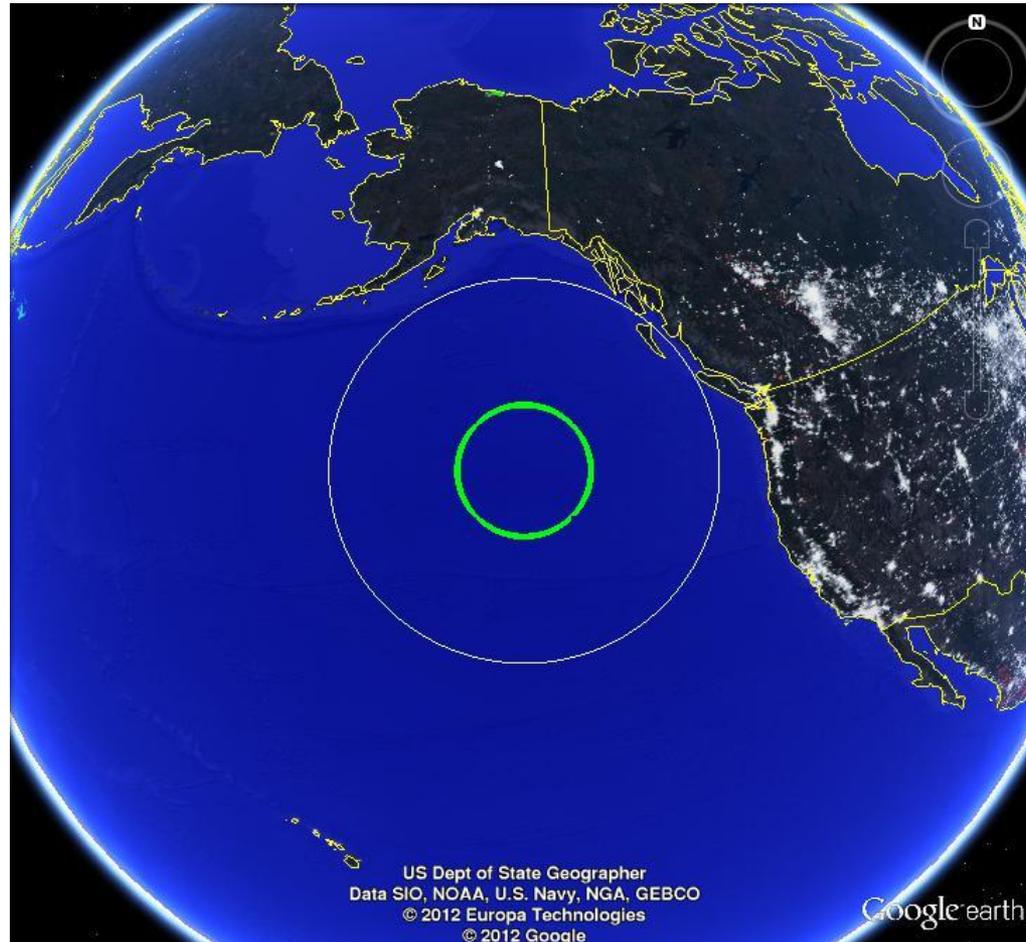


Great observatory made &
deployed from the renewed ISS
heading for its own orbit



Released from ISS
in perfect condition

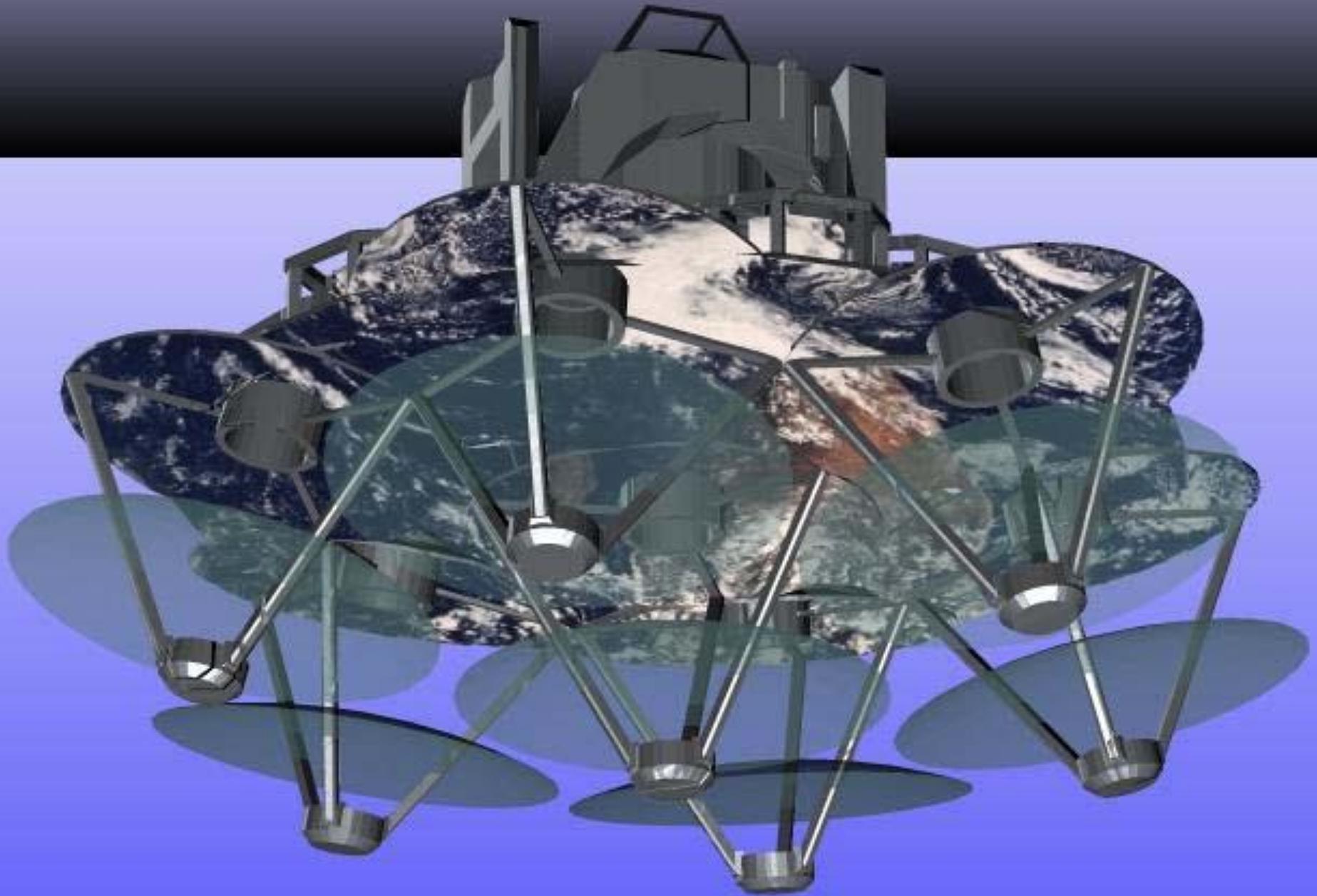
Huge Pacific Ocean will be our Detector



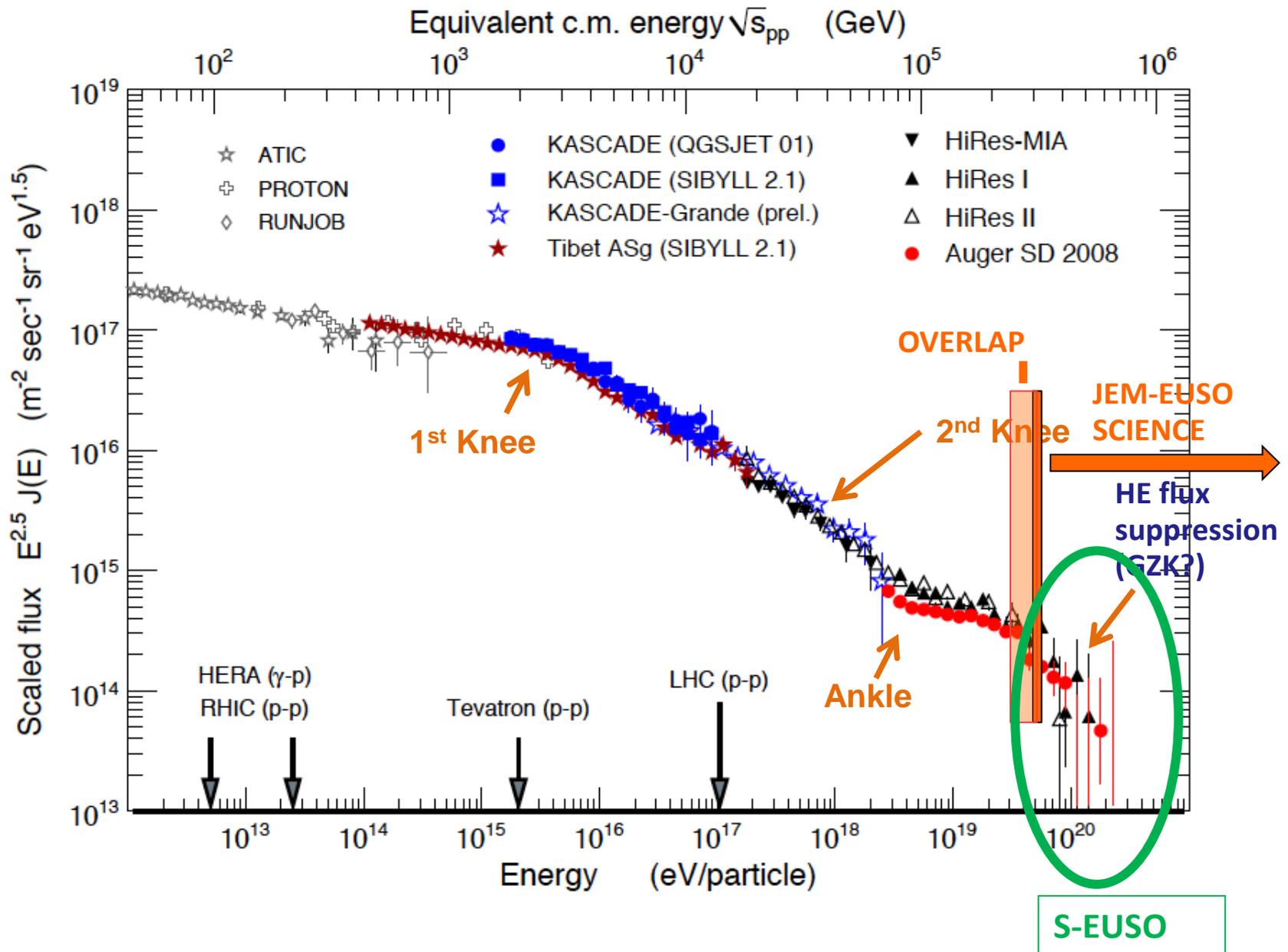
White circle → HORIZON from S-EUSO (900km)

Four Space-Based Missions

	Optics Aperture [m ²]	FOV	Pixel side	Orbit altitude [km ²]	Geom. aperture [km ² sr]	Annual exposure [linsley yr ⁻¹]
TUS (2012—)	1.8	9° x9°	0.6°	500	2.0x10 ⁴	2,700
JEM-EUSO (2017—)	4.5	60° φx48° (40° φ)	0.07°	400	4.0x10 ⁵ (5.5x10 ⁴)	60,000 (7000)
S-EUSO (2025—)	38	50° φ	0.04°	~900	2.0x10 ⁶	300,000



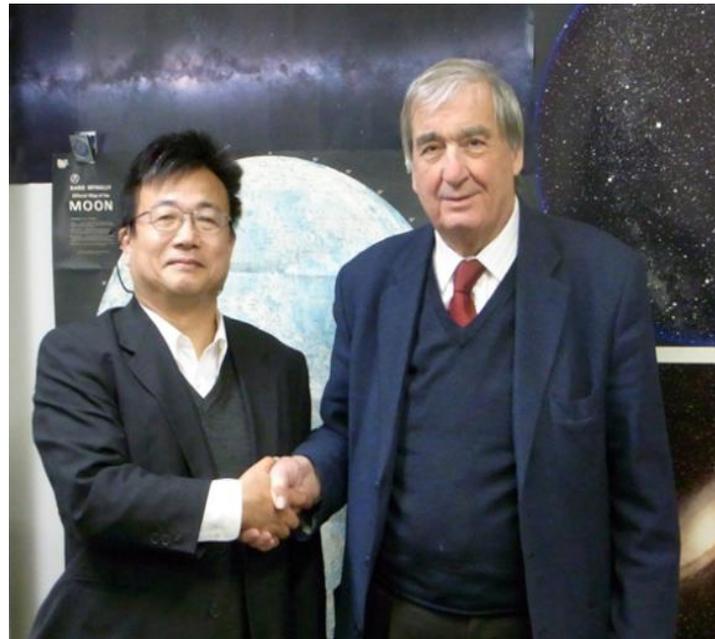
JEM-EUSO EE target region



予備

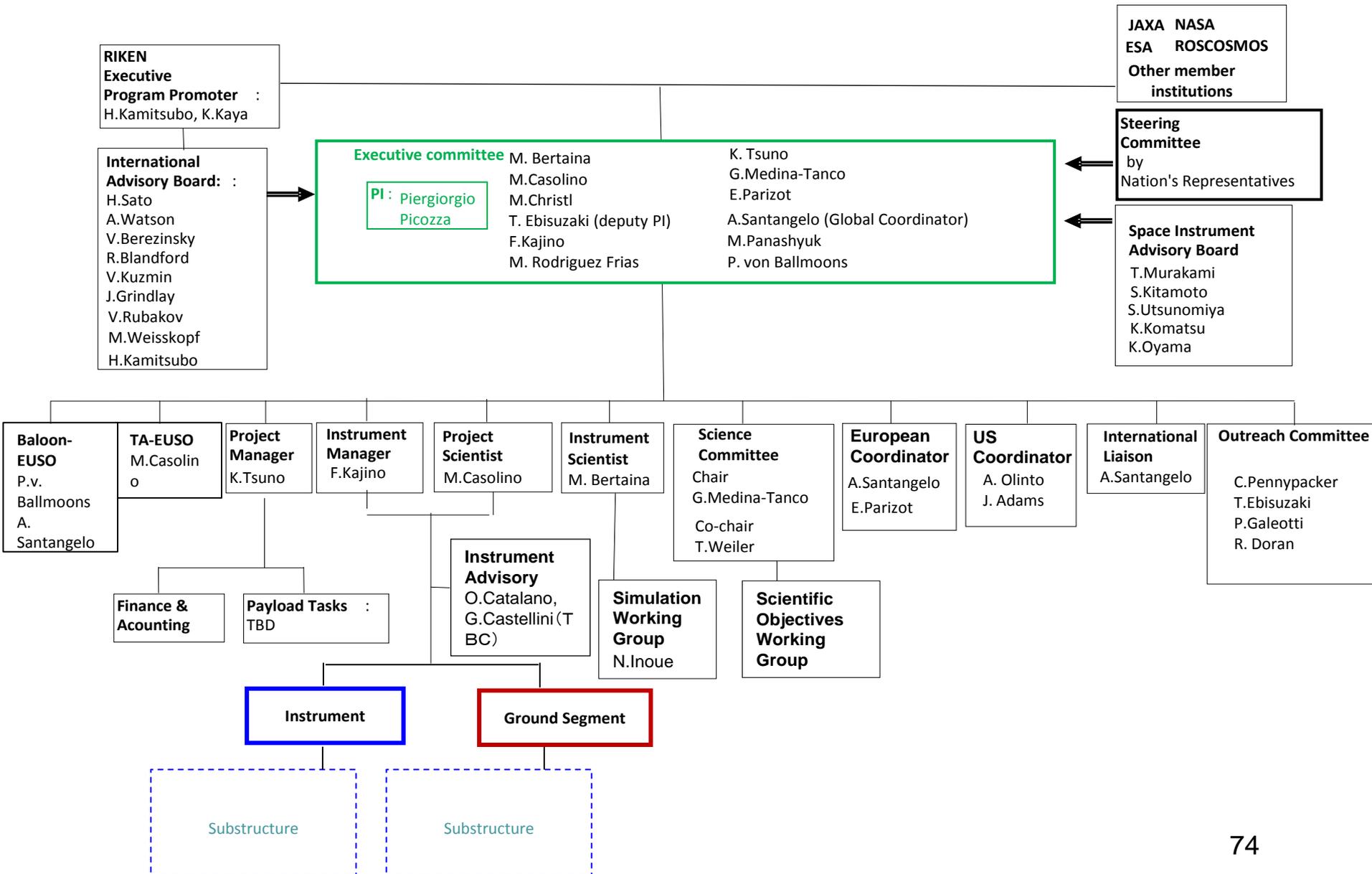
New Organization

- PI: Piergiorgio Picozza
- Deputy PI: Toshikazu Ebisuzaki
- Global Coordinator
Andrea Santangelo



JEM-EUSO Organization

March. 1, 2012



Angular resolution

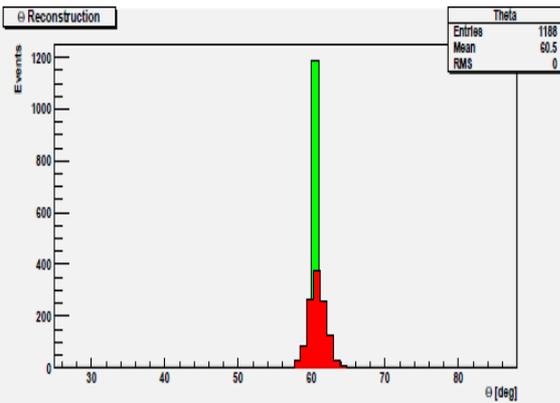
- Full FoV ($E > 10^{20} \text{eV}$)
- Central FoV ($E > 5 \times 10^{19} \text{eV}$)

Energy resolution

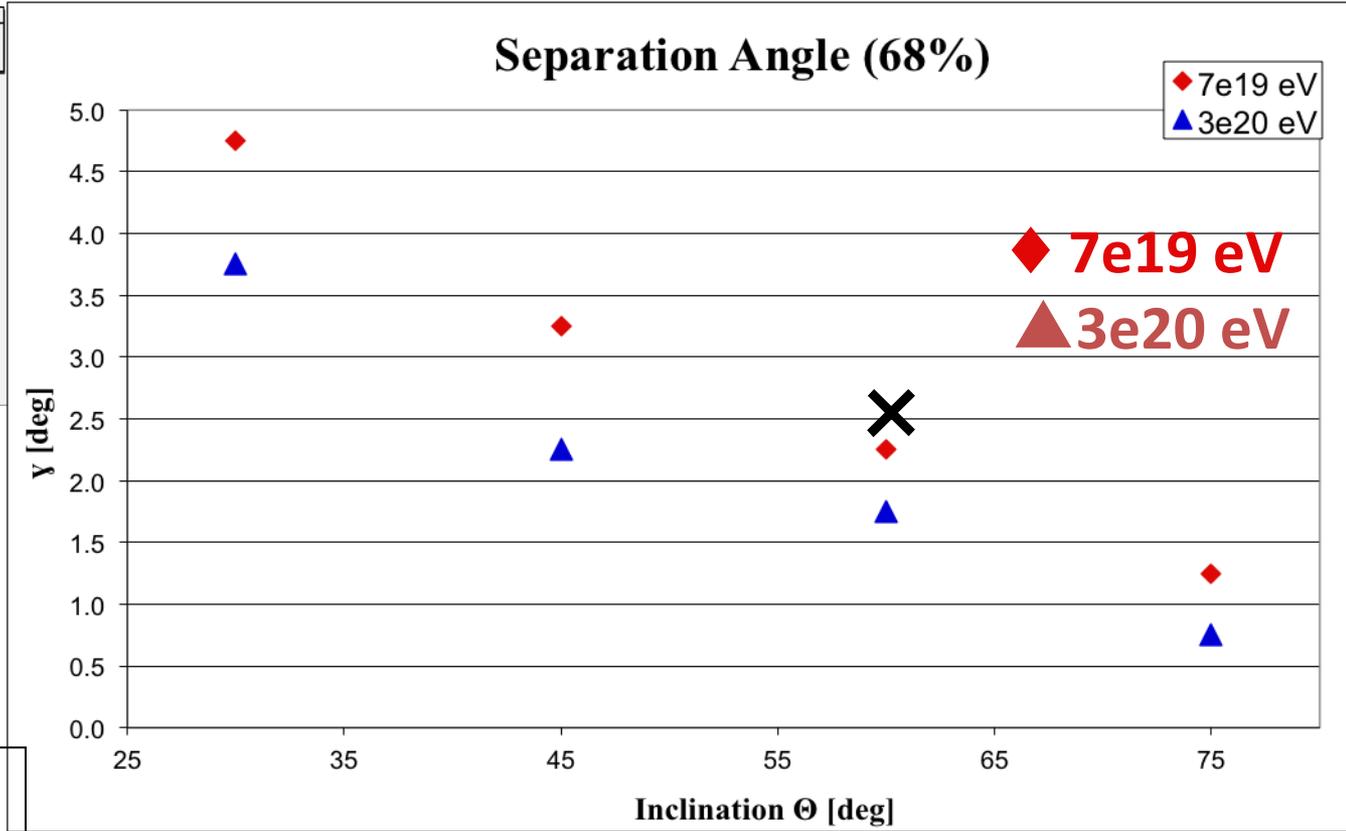
- Full FoV ($E > 10^{20} \text{eV}$)
- Central FoV ($E > 3-5 \times 10^{19} \text{eV}$)

Xmax resolution

Angular Resolution



$\alpha(\text{deg})$

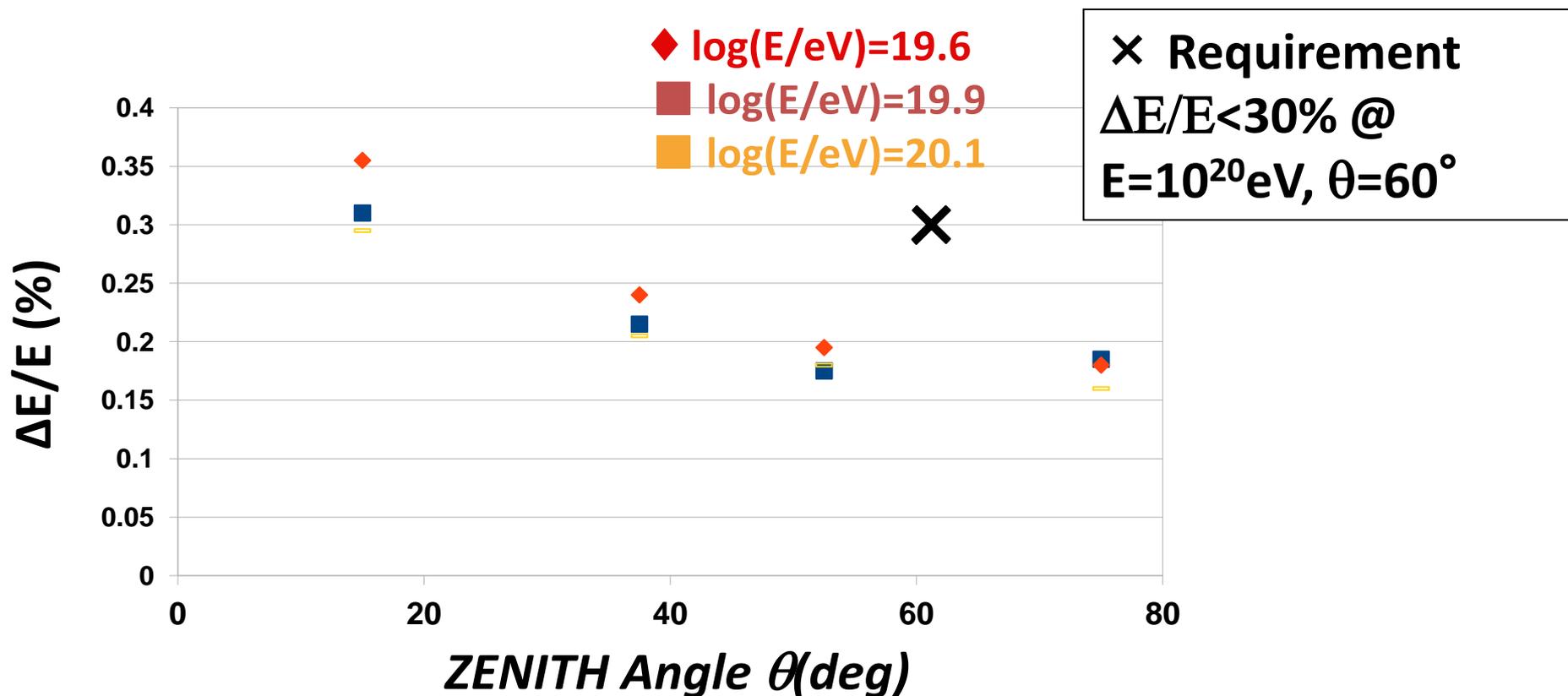


Zenith Angle $\theta(\text{deg})$

× Requirement
 $\alpha < 2.5^\circ$ @
 $E = 10^{20} \text{eV}, \theta = 60^\circ$

End to end simulations show that the requirement is met.

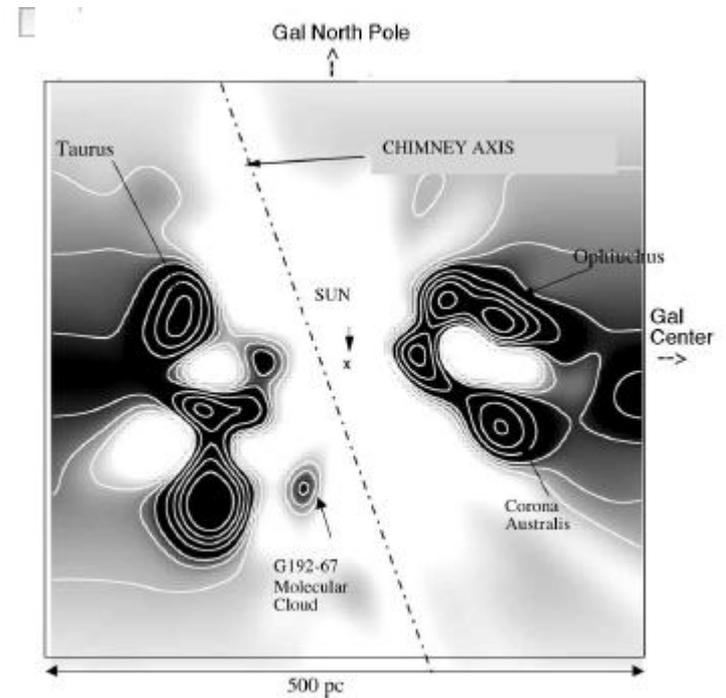
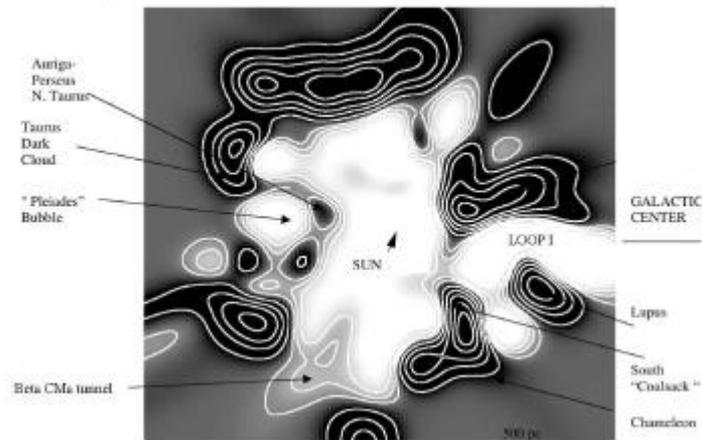
Energy Resolution



End to end simulations show that the requirement is met.

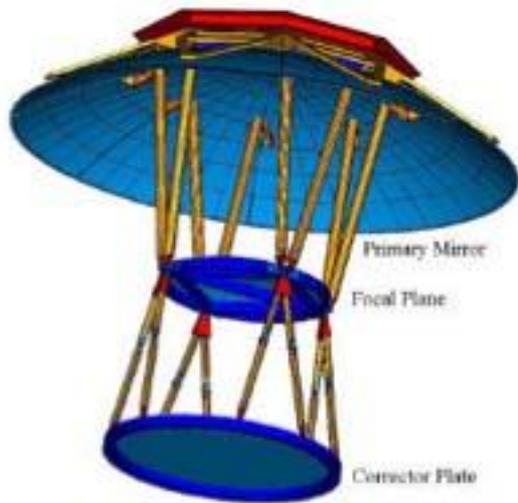
$\Delta X_{\max} < 70 \text{ gr/cm}^2$ (Requirement $\Delta X_{\max} < 120 \text{ gr/cm}^2$) OK

太陽系周辺の物質分布

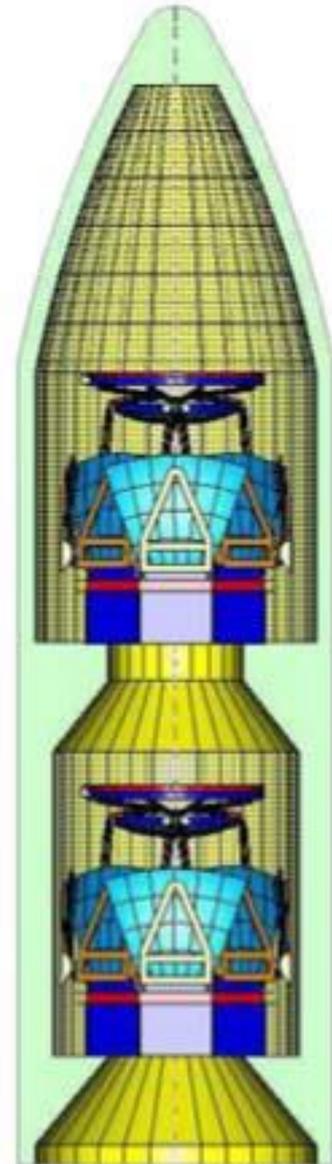
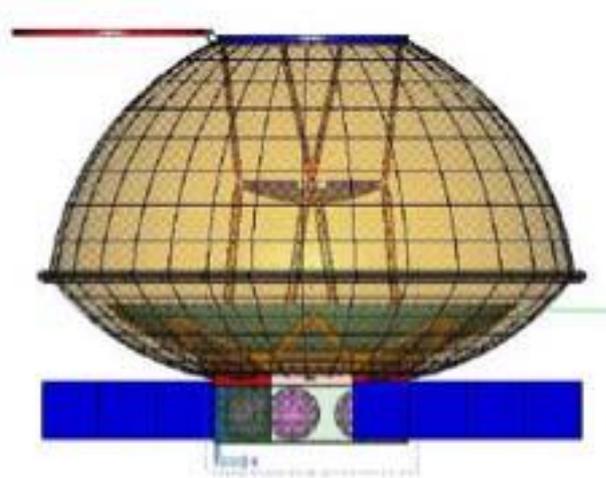


Welsh and Shelton 2009

Price tag \$700M
Out of Strategic Planning
2002-2003

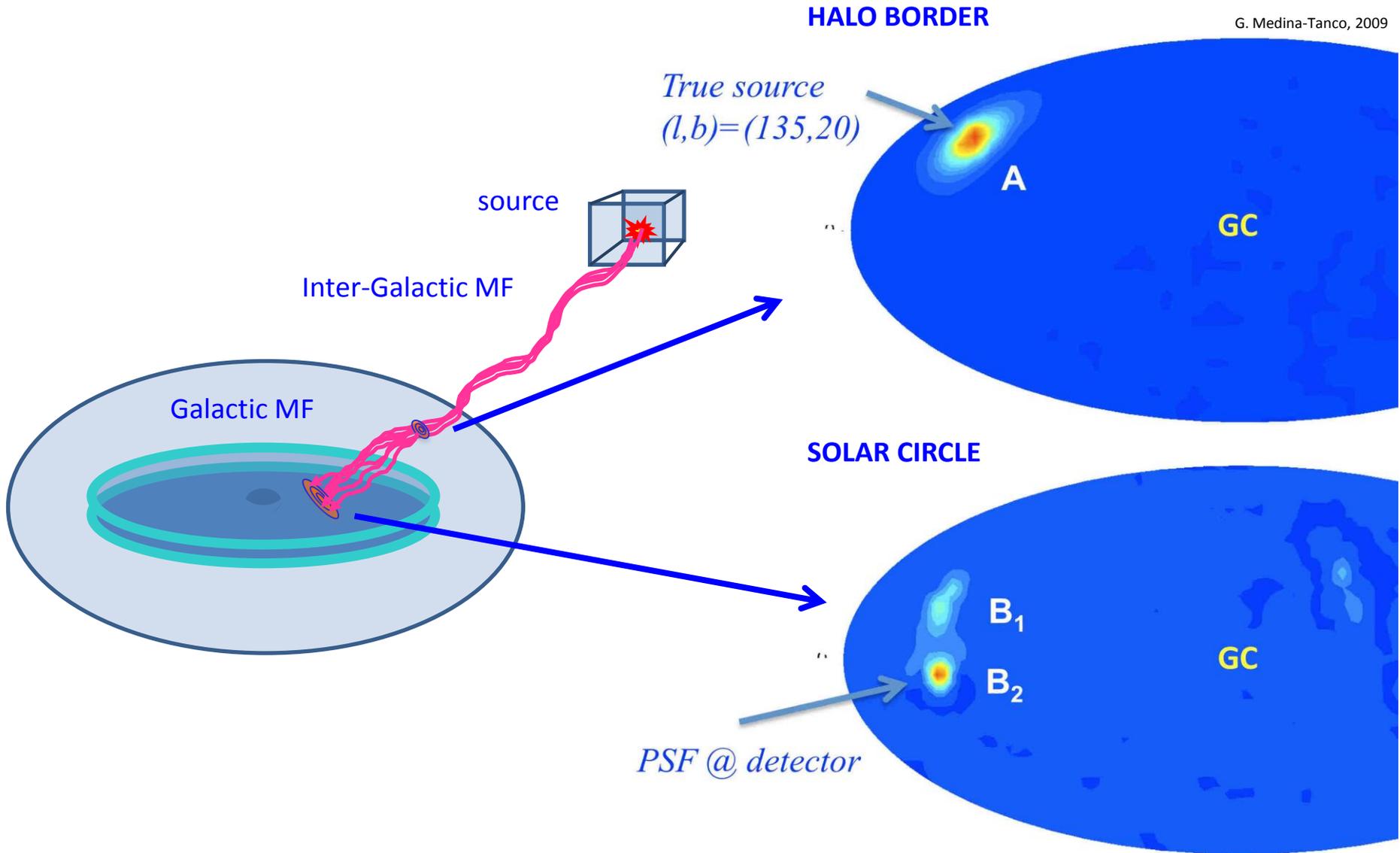


Optics option 15° FOV
Limited by Schmidt



Individual source identification

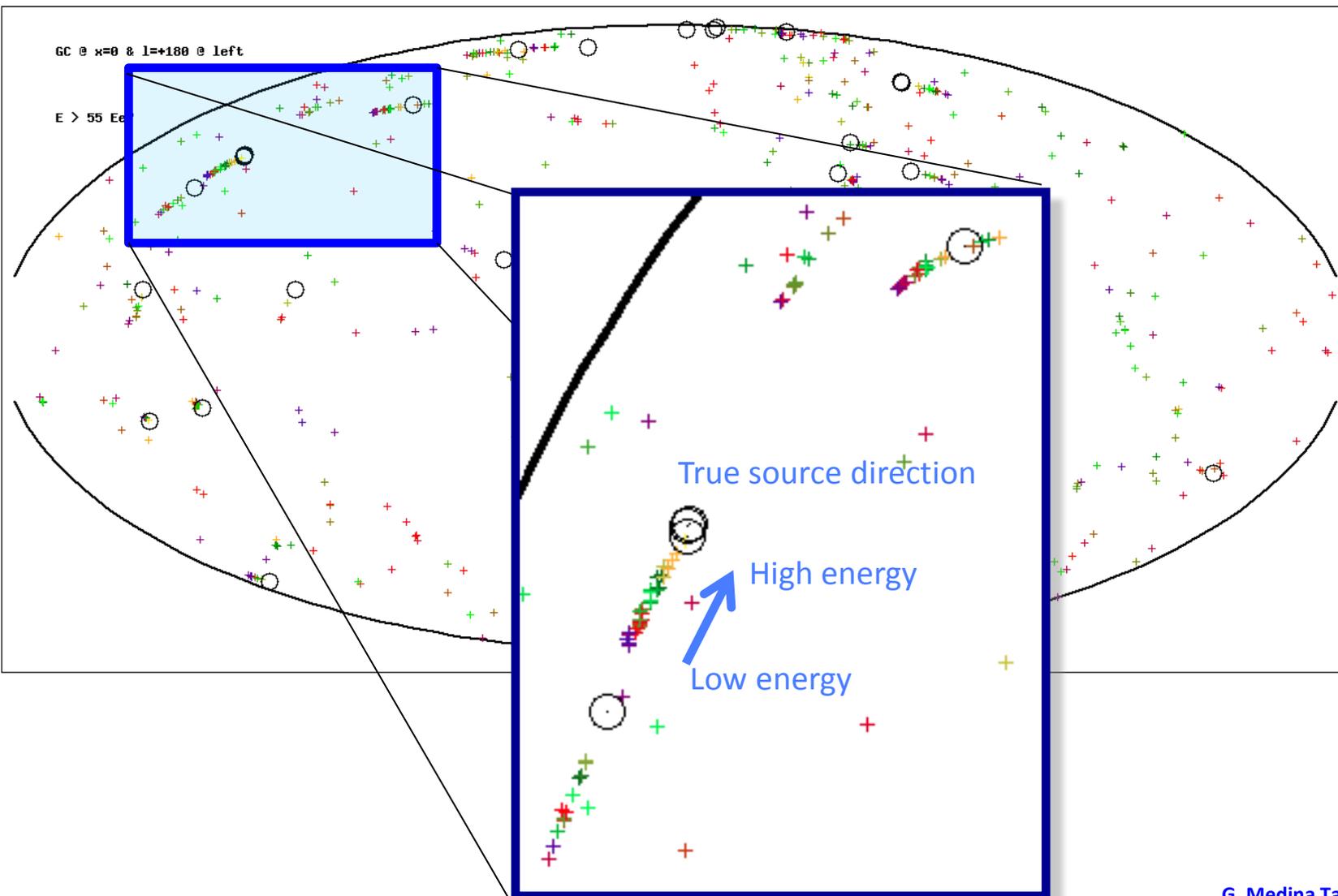
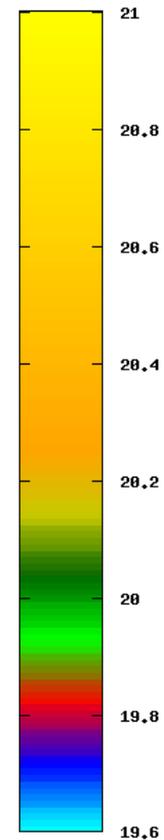
G. Medina-Tanco, 2009



Protons: $E > 55 \text{ EeV}$ - 300ev from ULX + 500ev (bckgr) from IRAS

Source + protons @ Detector (Aitoff); logE color-coded (300 events from ULX & 500 from IRAS @ $E > 55 \text{ EeV}$)

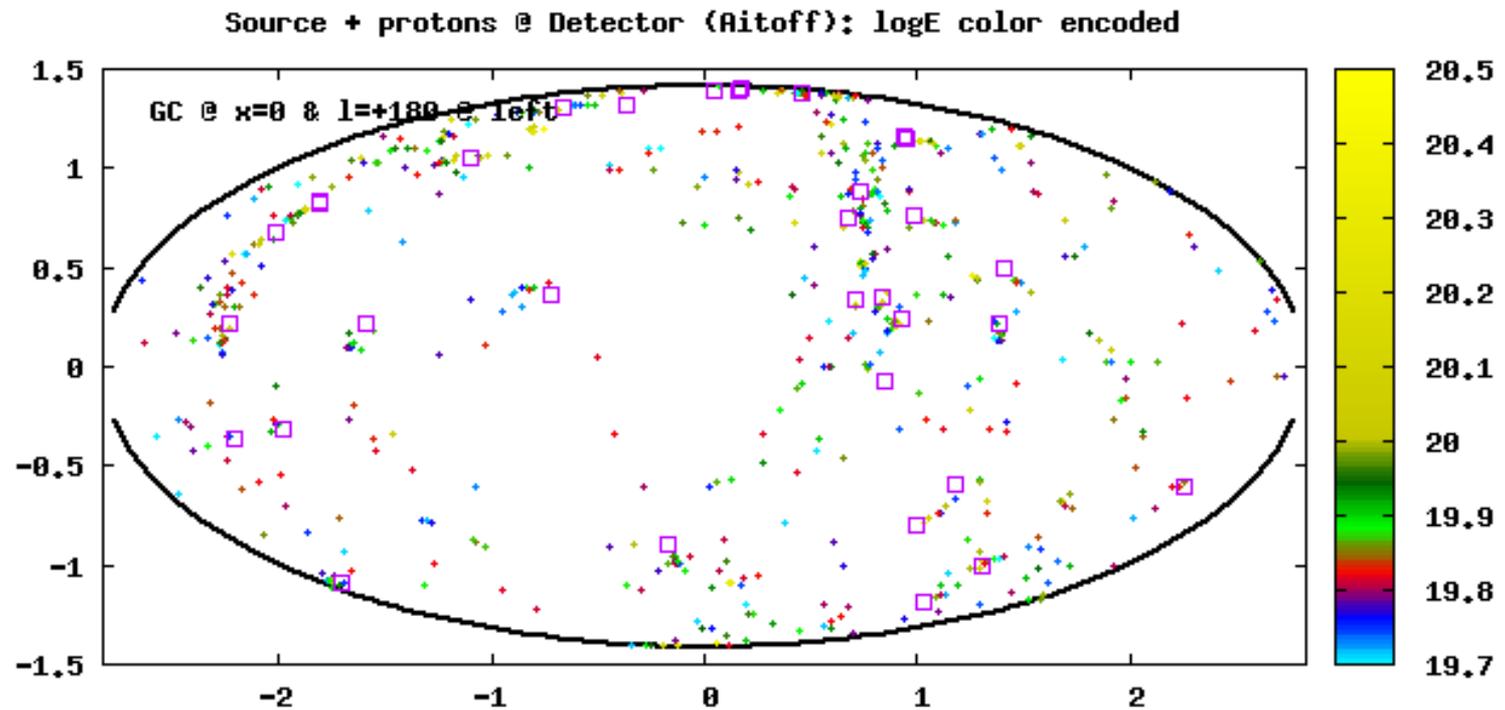
$\log E$



JEM-EUSO @ 5 yr

$$\vec{B} = 1 \times \vec{B}_{Ahn}$$

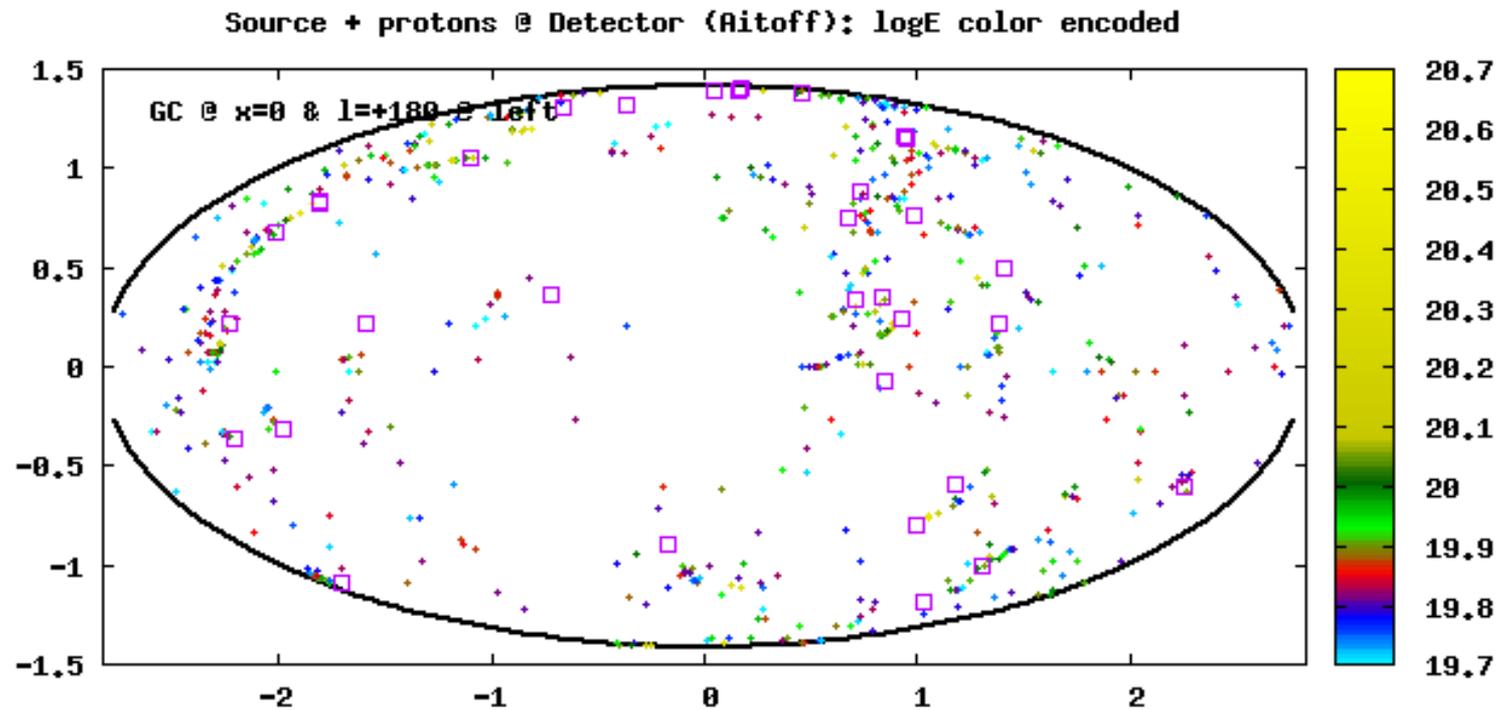
800 events: 70% bckgr from IRAS LSS + 30% from ULX PSrc



JEM-EUSO @ 5 yr

$$\vec{B} = 2 \times \vec{B}_{Ahn}$$

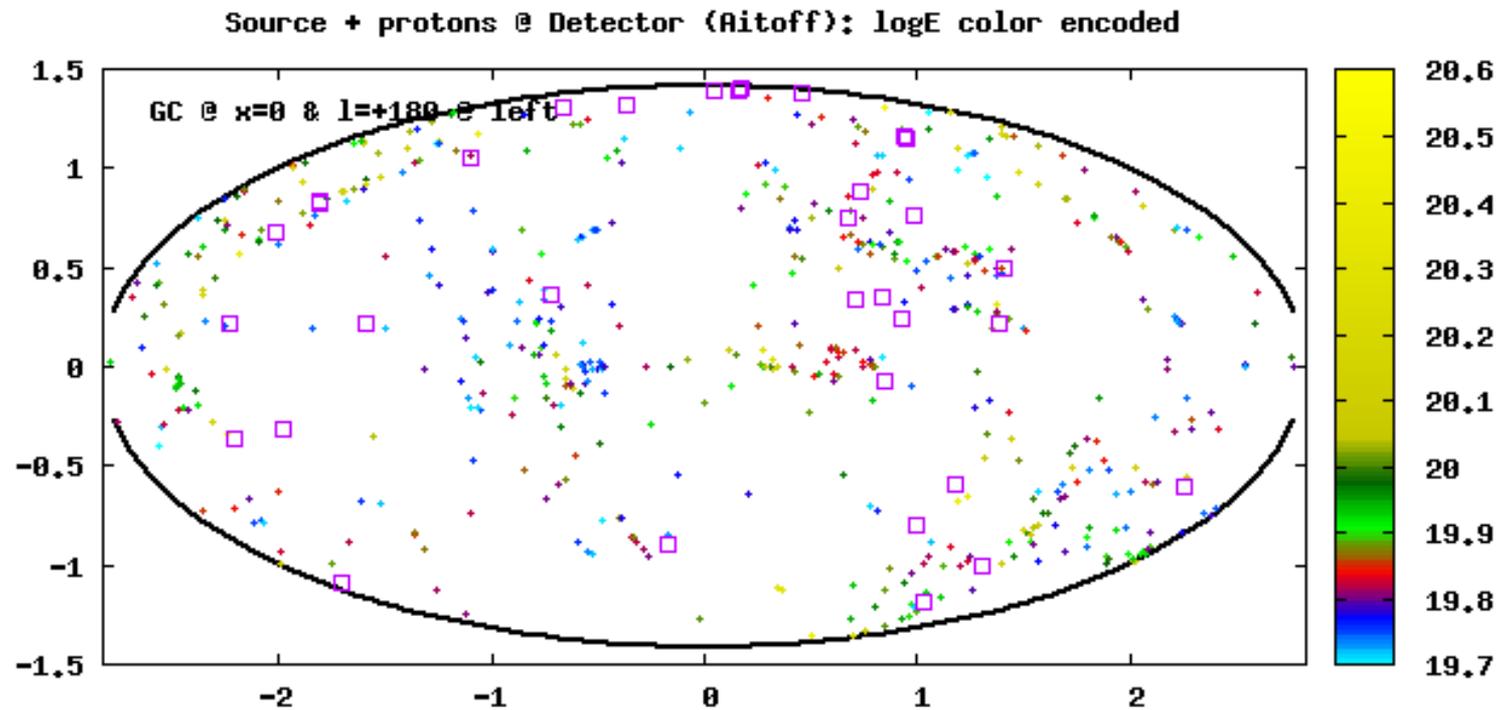
800 events: 70% bckgr from IRAS LSS + 30% from ULX PSrc



JEM-EUSO @ 5 yr

$$\vec{B} = 5 \times \vec{B}_{Ahn}$$

800 events: 70% bckgr from IRAS LSS + 30% from ULX PSrc

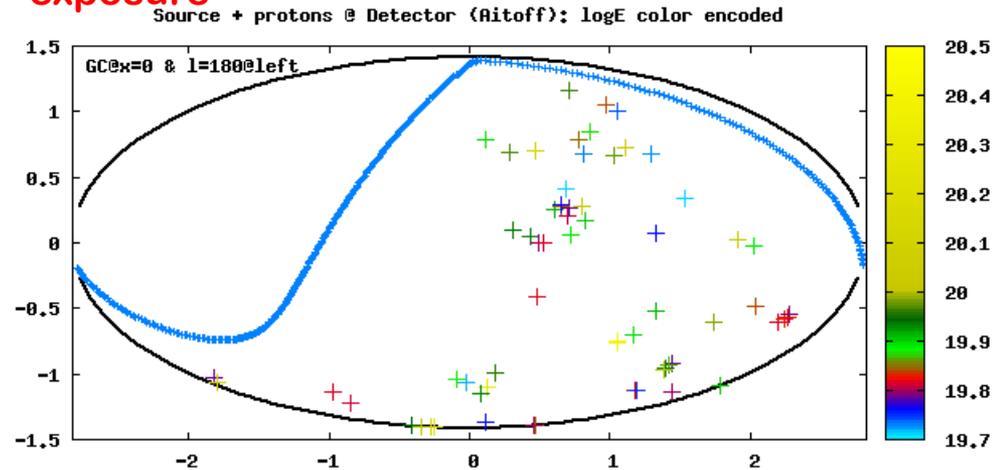
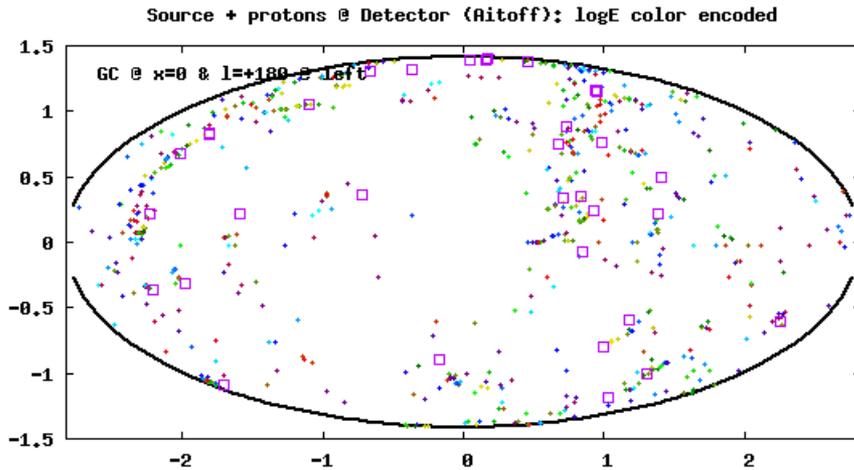


JEM-EUSO @ 5 yr compared to Auger

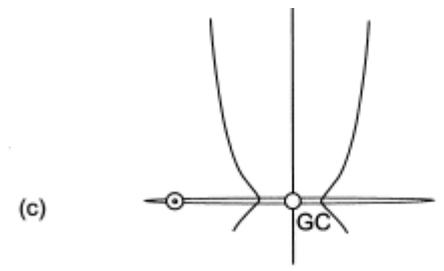
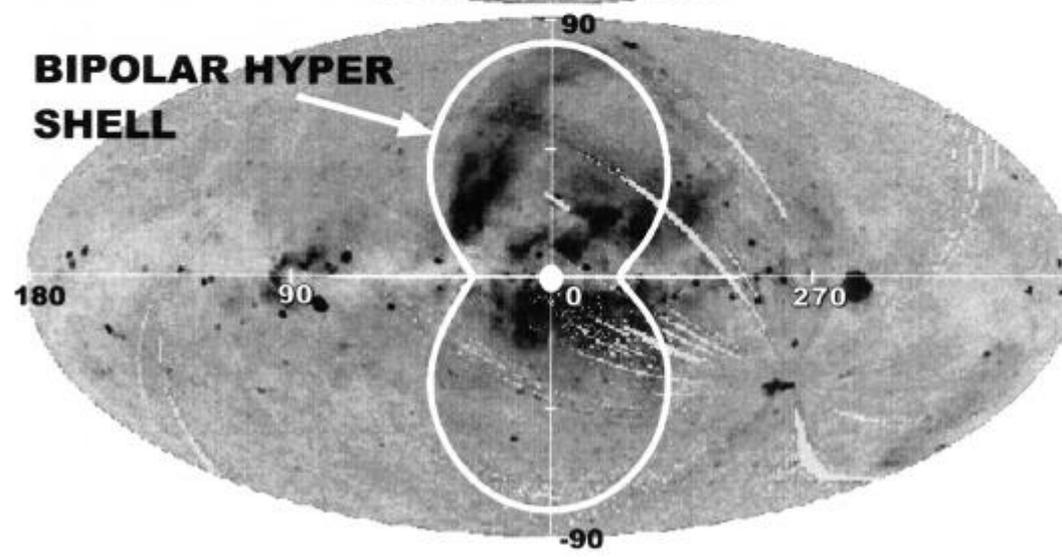
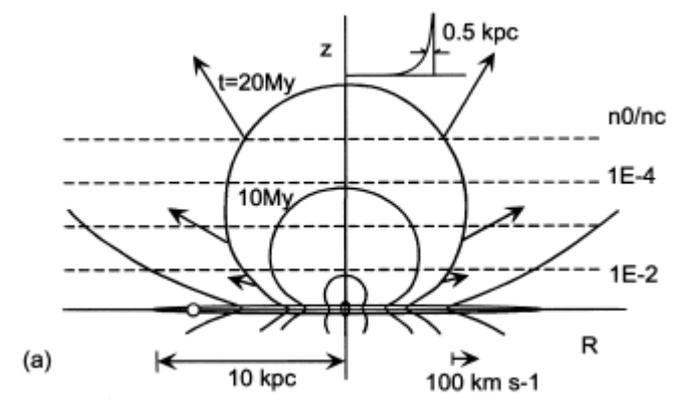
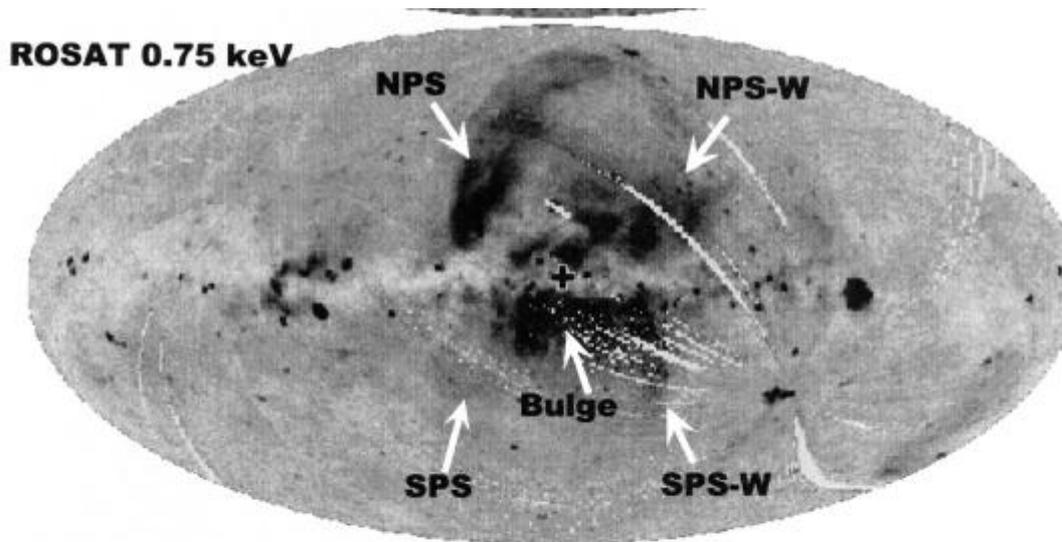
$$\vec{B} = 2 \times \vec{B}_{Ahn}$$

800 events: 70% bckgr from IRAS LSS + 30% from ULX PSrc

Same as previous with Auger present exposure



Bipolar Hyper Shell



Sofue et al 2000