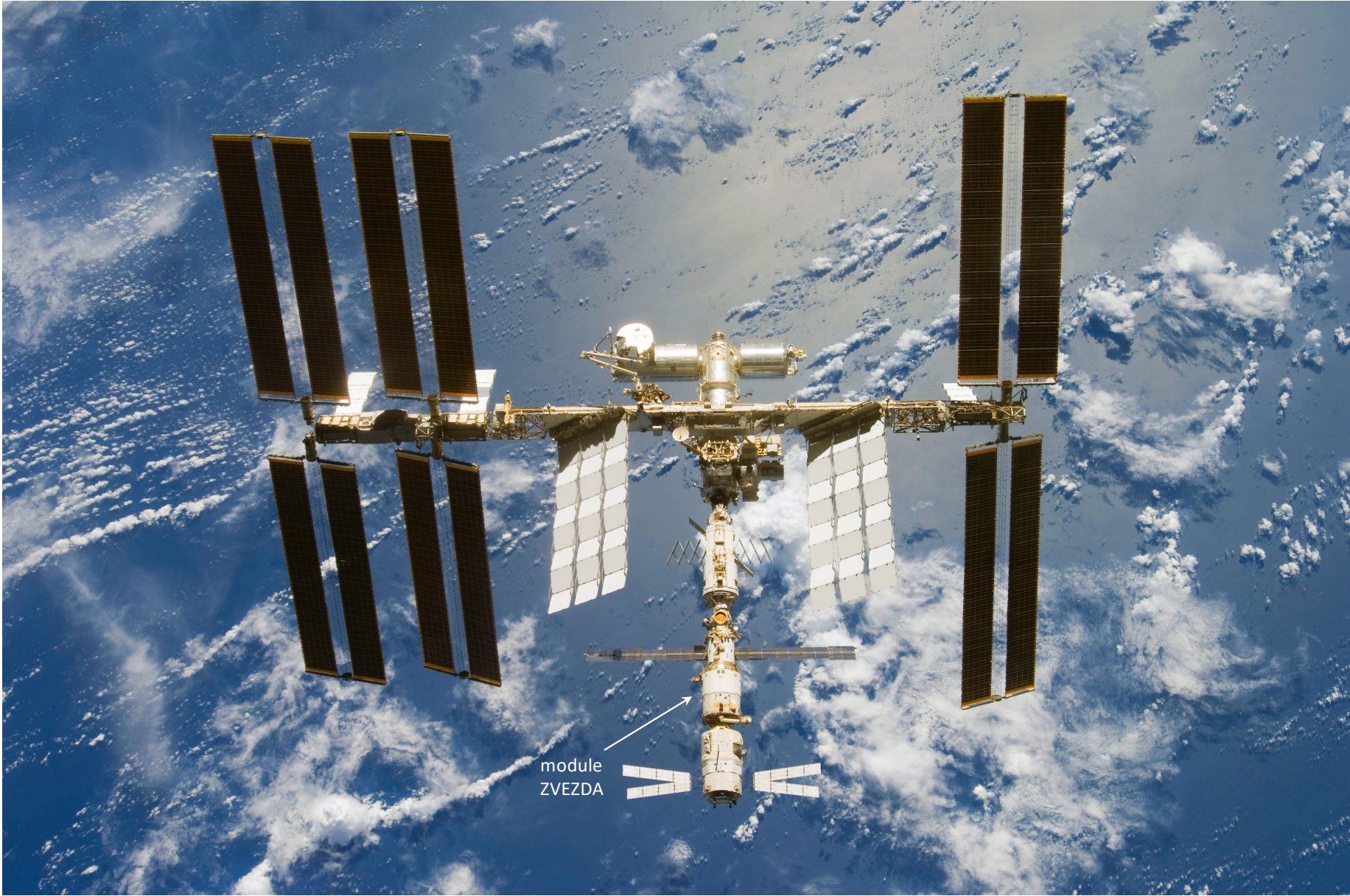


EUSO: Extreme Universe Space Observatory



Etienne Parizot
APC, Université de Paris
CS de l'IN2P3 – 30 juin 2020



Contexte

EUSO : Observatoire Spatial de l'Univers Extrême

Domaine scientifique :

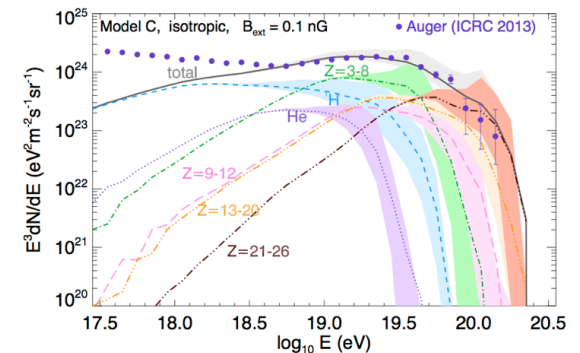
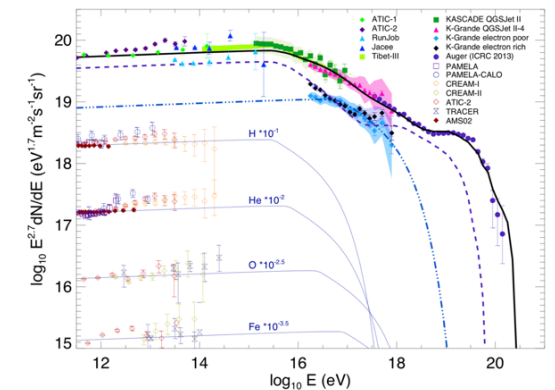
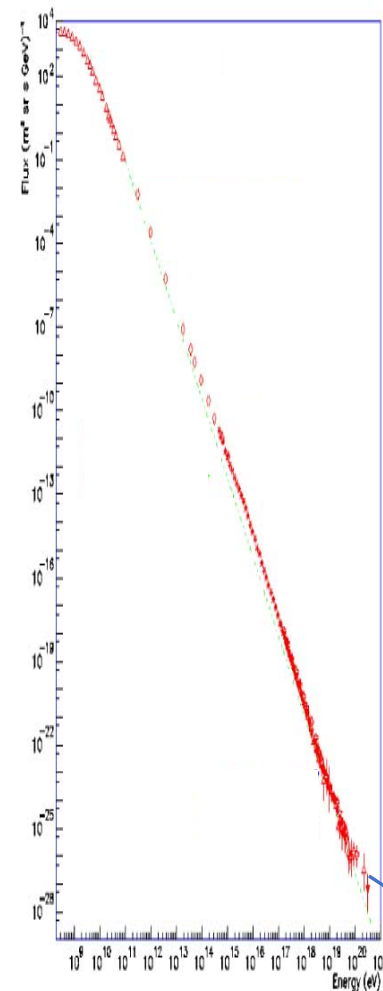
Rayons Cosmiques d'Ultra-Haute Énergie (**UHECR**)

★ **Astroparticules** : Physique des hautes énergies et astrophysique
UHECRs = particules les plus énergétiques de l'univers

★ **Multi-messagers** :
Un (+1?) des 4 piliers de l'astrophysique multi-messagers :
Photons, Neutrinos, Rayons cosmiques, Ondes gravitationnelles

★ **Théorie, Expérimentation, Instrumentation**

★ **Objectifs scientifiques** Découvrir l'origine des UHECR
Comprendre l'accélération des particules
Comprendre le fonctionnement des sources
Utiliser les UHECRs comme messagers (sources, champ B, etc.)
Établir la liaison avec les RC galactiques et l'AHE générale



1 particule par m² par milliard d'années !

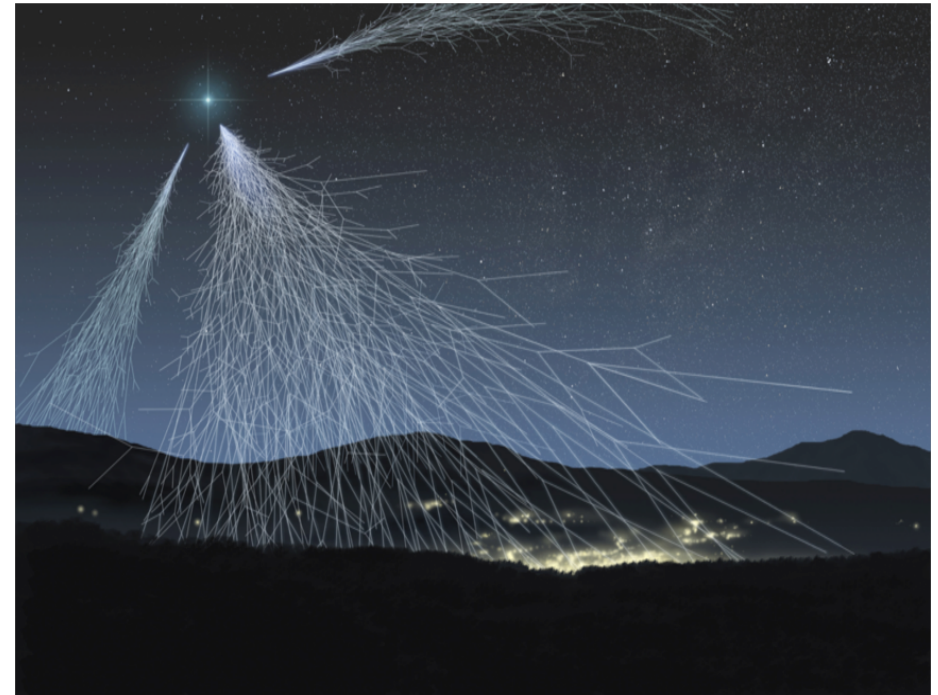
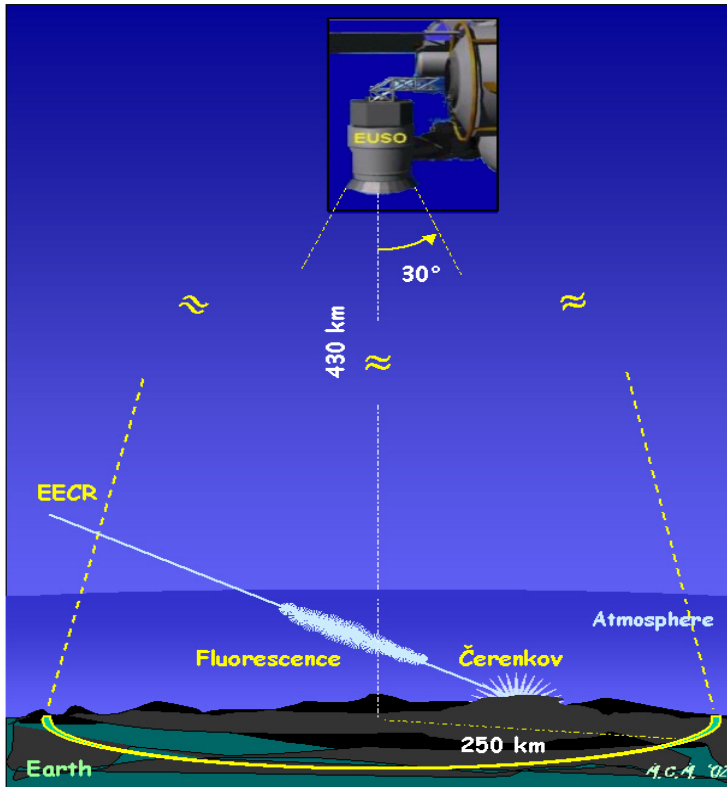
Historique

Programme global de développement de la voie spatiale pour les UHECRs

- 2004–2007 : ESA-EUSO => Mission ESA : Phase A passée avec succès
- 2008–2009 : JEM-EUSO => Nouveau design => Mission sélectionnée par la JAXA => JEM (Japanese Experiment Module)
- 2009 : JEM-EUSO => Participation française validée par le CS de l'IN2P3 NB: année charnière, bascule de l'opinion internationale (cf. Jim Cronin)
APC et LAL (ASIC, électronique front-end, photo-détection, calibration de la surface focale)
- 2011 : tremblement de terre et tsunami au Japon => catastrophe de Fukushima => retrait du leadership de la JAXA
- 2014 : EUSO-Balloon => Mission CNES, responsabilité française de la mission, chef de projet IN2P3
- 2015+ : EUSO-TA => Prototype au sol, sur le site de Telescope Array (Utah) : 3 générations de 2013
- 2017 : EUSO-SPB => Mission NASA (super pressure balloon) (ASIC, unité de détection, surface focale et calibration)
- 2019+ : MINI-EUSO => Mission ASI et RosCosmos (dans l'ISS) (ASIC, unité de détection, surface focale et calibration)
- 2022–2023 : EUSO-SPB2 => Mission NASA (ASIC, unité de détection FD, surface focale FD et calibration)
- 2023/2024+ : K-EUSO => Mission RosCosmos (et ESA ?), sur l'ISS
- 2030+ : POEMMA => Mission NASA, free flyer

Principe observationnel

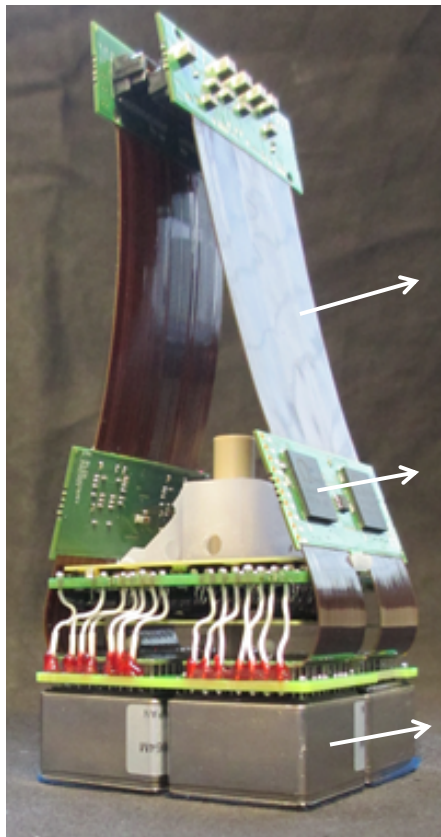
- Technique de fluorescence (cf. Auger)
=> Détection de l'émission UV des gerbes UHE)
- Tcherenkov (cf. CTA) pour les neutrinos
(gerbes montantes)



- => Télescope grand champ (de $\pm 20^\circ$ à $\pm 30^\circ$)
- => Opérant depuis l'espace
- => Image 3D (2D+temps) du développement de la gerbe
- => Résolution 2.5 μ s, 500 mètres
- => Reconstruction de la gerbe :
énergie, direction d'arrivée, profondeur

Contributions françaises

- Responsabilité des unités de détection
« cellules élémentaires », 256 pixels (4 MAPMT, Hamamatsu)

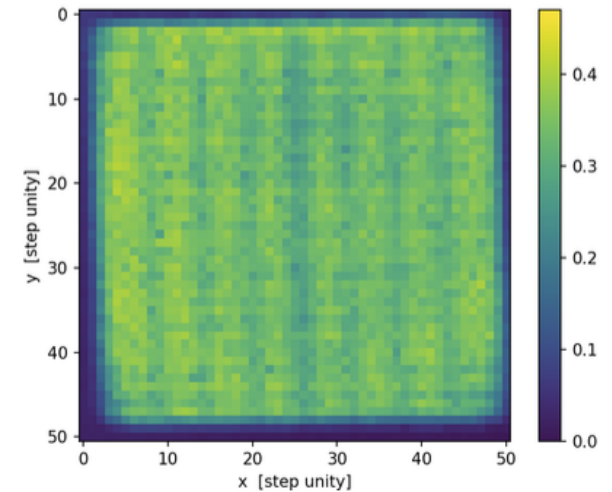
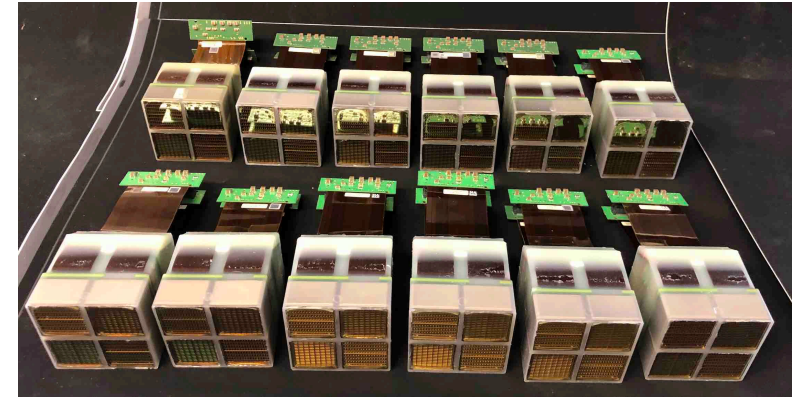


PCB ASIC

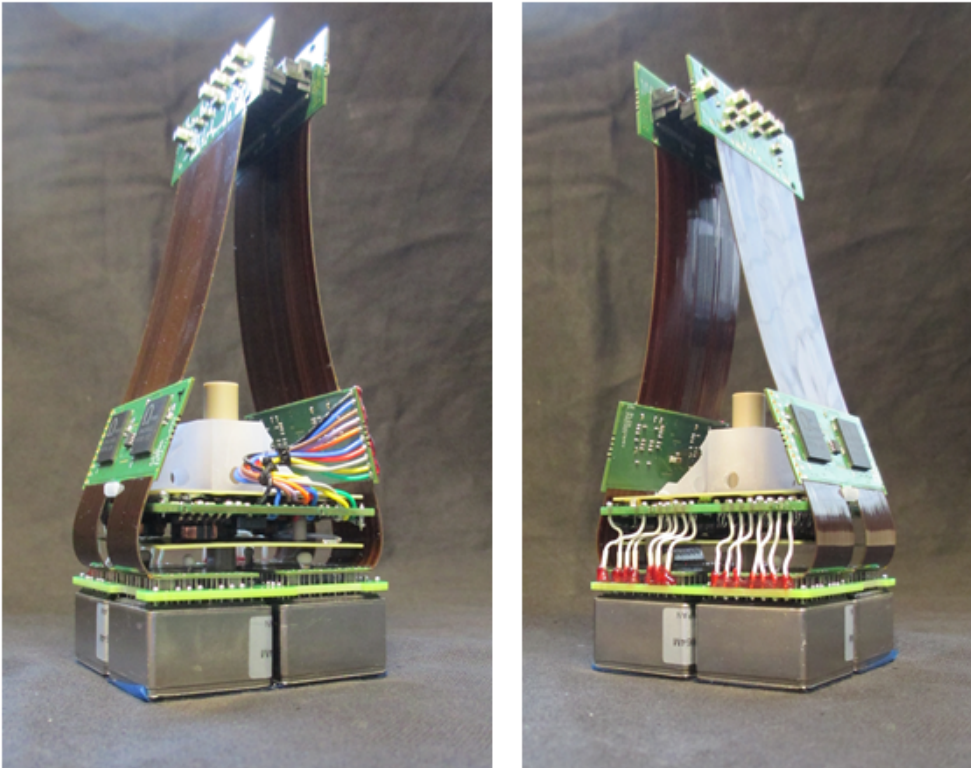
ASIC SPACIROC 3

MAPMT

- Électronique de front end (SPACIROC)
- Design de l'unité de détection
- Caractérisation et sélection des MAPMTs
- Intégration et production
(=> Matra Électronique)
- Caractérisation et étalonnage final



NB: bijou technologique



Unité de détection : « cellule élémentaire »

Multi-channel (256 pixels)
Ultra-sensible (comptage de photons uniques)
UV + visible
Rapide (1 μ s, comptage à 6 ns)
Ultra-compacte (55 x 55 x 60 mm)
Basse conso (350 mW)
Légère (255 g)
Spatialisable
Alimentation HV intégrée
Électronique frontale intégrée
Reproductible
Calibrée

NB: soutien CNES + IN2P3

DEFI « Instrumentation aux limites »

- Nombreuses pistes de valorisation (NB: R&T CNES en 2020)

Synergies pluridisciplinaires : science de l'atmosphère, TLEs (elfes et TEB), météores, q-balls

Débris spatiaux : avec Gérard Mourou + projet majeur au Japon

Contributions françaises

- Analyse des données, interprétation
- Science case + compromis scientifico-technique, optimisation, trigger

- **Responsabilités et visibilité**

- *Executive Committee*: 2 membres
- *European coordinator* (9 pays)
- Responsable de la *Topical Team* de l'ESA sur UHECR/EUSO
- Chef de projet pour les unités de détection
(NB: contributions internationales)
- Co-responsable du *Science case*
- *Publication and Conference Committee*

- NB: rôle central au sein de la Collaboration JEM-EUSO (EUSO-Balloon + surface focale)
(+ proposition de PI-ship)

Membres actifs en 2019–2020

• Denis Allard	APC
• Peter von Ballmoos	IRAP
• Bruny Baret	APC
• Sylvie Blin	OMEGA
• Alexandre Creusot	APC
• Pierrick Dinaucourt	OMEGA
• Guy Monier	APC
• Andrii Neronov	APC
• Etienne Parizot	APC
• Pierre Prat	APC
• Guillaume Prévôt	APC
• Sahbi Selmane	APC
• Christophe de la Taille	OMEGA

FTE chercheurs : 3

FTE ingénieurs : 1.5

Retour scientifique et technologique

- Missions passées et présentes

- publications techniques
- publications scientifiques (pluridisciplinaires)
- savoir-faire technique
- acquis technologiques, valorisables

(+ conduite de projet spatial !)

- Missions futures

- première carte du ciel complète en UHECRs
- statistique accrue à ultra-haute énergie => hot spots, anisotropies, sources, densité, spectre, composition, etc.
- multi-messagers : neutrinos de très haute énergie, contraintes sur les fonds diffus
- champs magnétiques (galactiques)
- physique exotique (q-balls, ANITons...)
- physique des gerbes (NB: haute altitude)

(+ résolution des tensions entre les données sol !)

- Synergies scientifiques diverses

- atmosphère (TLE, TEB)
- météores, petits corps du système solaire
- débris spatiaux

État de l'art UHECR, perspectives, complémentarités

– Situation sur le plan de l'astrophysique : => nous ignorons quelles sont les sources des UHECRs !

– Situation sur le plan de la Physique : => nous ignorons quels sont les mécanismes d'accélération !
(+ Physique des gerbes)

– Situation sur le plan observationnel :

=> D'immenses progrès ont été accomplis grâce à la dernière génération d'observatoires

=> Une nouvelle génération est nécessaire :

NB: Les données actuelles fournissent l'explication de leur insuffisance !

- statistique accrue
- couverture complète du ciel
- Complémentarité entre basse énergie (10^{18} – 10^{19} eV) et haute énergie (10^{20} eV)
- Complémentarité entre sol (précision) et espace (statistique)

Résultats encourageants



Auger: 3000 km²



Atténuation (de type) GZK: établi !

Alourdissement apparent (très net !) de la composition au-dessus de qq 10¹⁸ eV

Écart à l'isotropie (premier terme: dipôle) aux "basses" énergies (≥ 8 EeV, 6%, 6 σ)

Corrélation avec la matière (mais non discriminant) aux énergies moyennes (> 3 σ)
(et "fraction anisotrope" $\sim 10\%$)

Zone tiède aux échelles angulaires intermédiaires aux plus hautes énergies

(entre 2.3 et 3.9 σ)

Physique des gerbes : "excès de muons" (indirect)



Telescope Array:
700 km² \rightarrow 2800 km²



Atténuation (de type) GZK: établi !

Zone chaude aux échelles intermédiaires aux plus hautes énergies (3.4 σ)

Spectre d'énergie dépendant de la déclinaison (4.3 σ)

Résultats encourageants



Auger: 3000 km²



Atténuation (de type) GZK: établi !

Alourdissement apparent (très net !) de la composition au-dessus de qq 10¹⁸ eV

Écart à l'isotropie (premier terme: dipôle) aux "basses" énergies (≥ 8 EeV, 6%, 6 σ)

Corrélation avec la matière (mais non discriminant) aux énergies moyennes (> 3 σ)
(et "fraction anisotrope" $\sim 10\%$)

Zone tiède aux échelles angulaires intermédiaires aux plus hautes énergies

(entre 2.3 et 3.9 σ)

Physique des gerbes : "excès de muons" (indirect)



Telescope Array:
700 km² \rightarrow 2800 km²



Atténuation (de type) GZK: établi !

Zone chaude aux échelles intermédiaires aux plus hautes énergies (3.4 σ)

Spectre d'énergie dépendant de la déclinaison (4.3 σ)

Mais (hélas!) pas d'avancée sur les sources et les mécanismes d'accélération
+ situation observationnelle partiellement confuse...

Deux instruments, deux ciels: tensions et difficultés

I – Spectre d'énergie

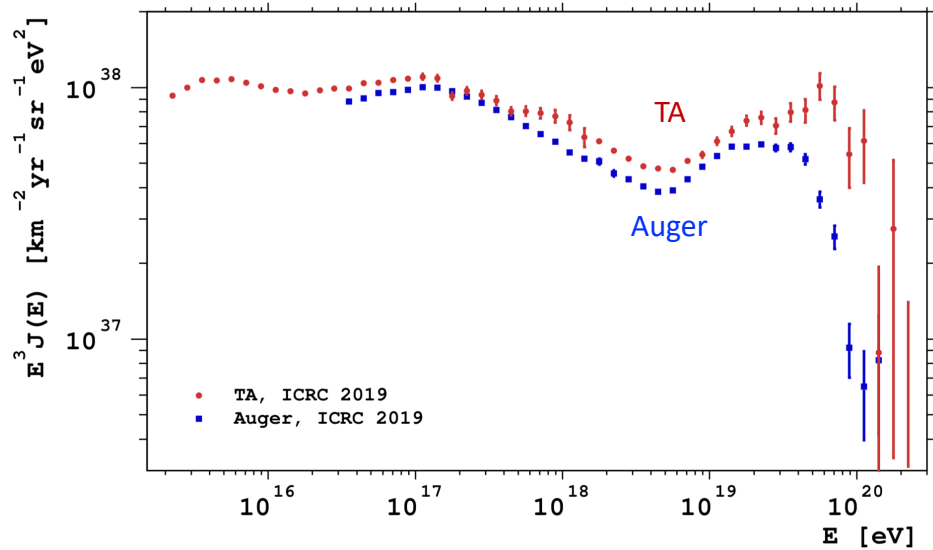
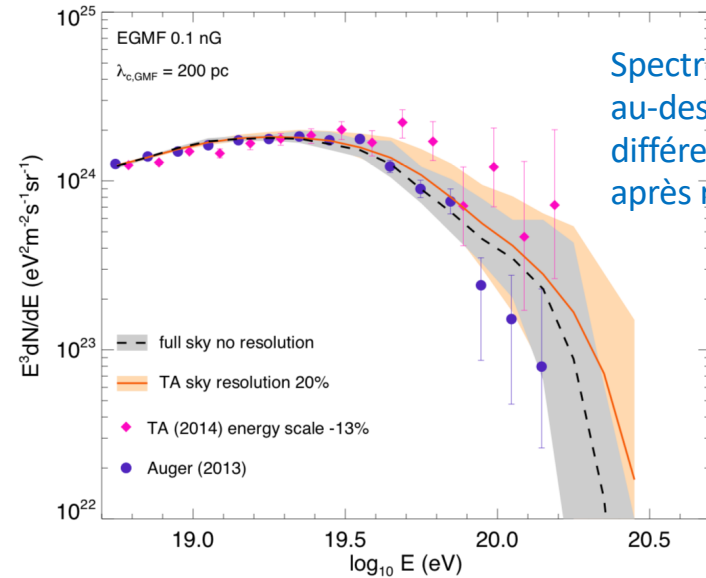


Figure 1: ICRC 2019 energy spectra of the Pierre Auger Observatory and the Telescope Array scaled by E^3 . In each experiment, data of different detection techniques are combined to obtain the spectrum over a wide energy range.

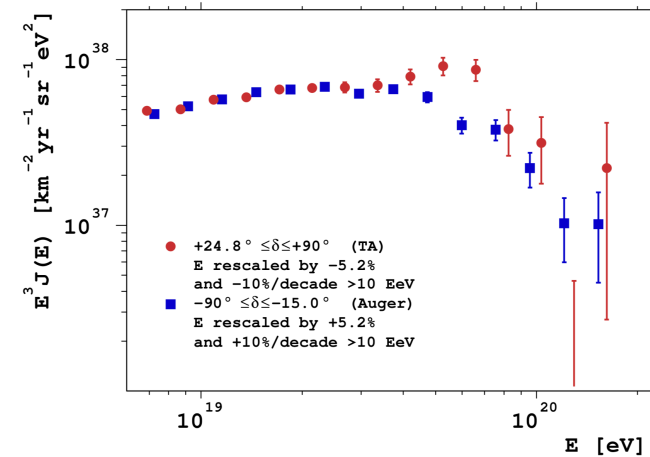
Figure 5: E^3 -scaled energy spectrum in two declination ranges, namely $\delta \geq +24.8^\circ$ (red points, TA) and $\delta \leq -15.0^\circ$ (blue points, Auger). The energies are shifted to get spectra in agreement in the common declination band.

=> EUSO : tout le ciel avec un seul et même instrument



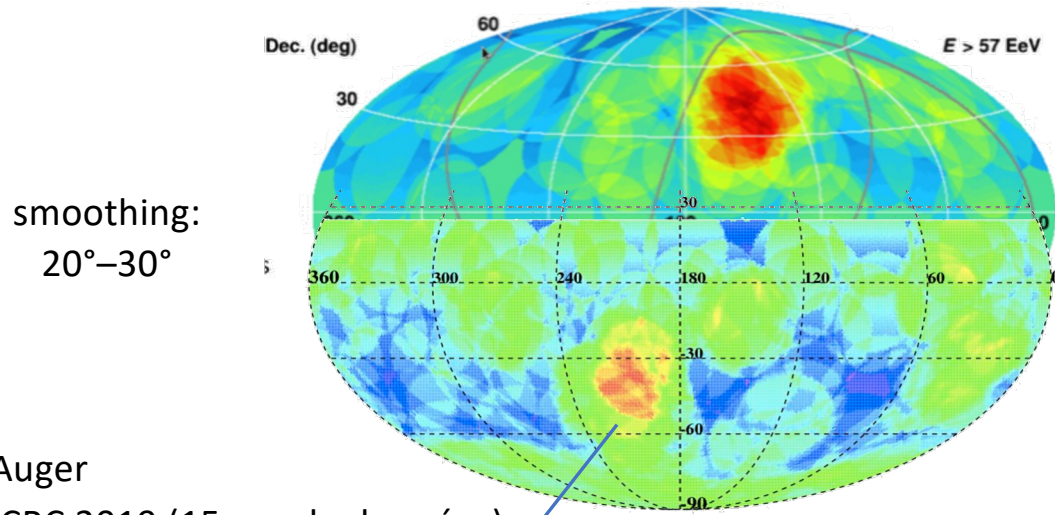
Spectres d'Auger et de TA au-dessus de 50 EeV: différents à 7σ (même après rescaling) !

(Globus et al. 2017)



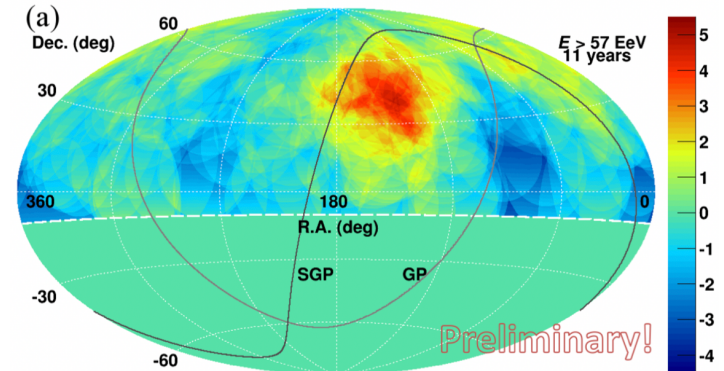
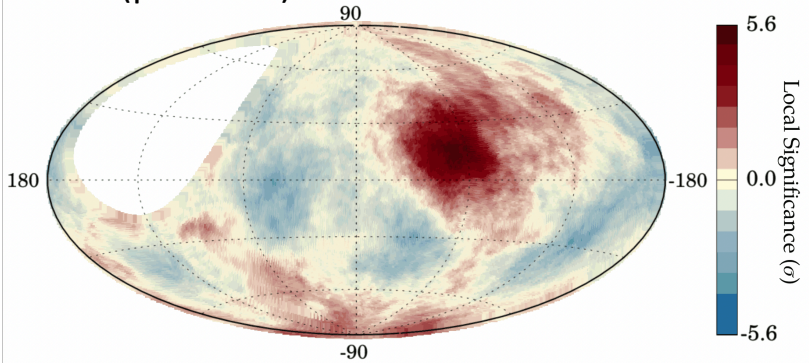
Deux instruments, deux ciels: tensions et difficultés

II – "hot spot" et "warm spot" : pas de recouvrement



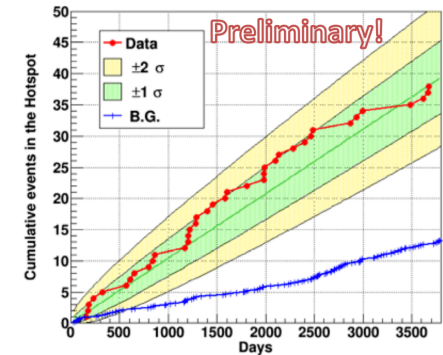
smoothing:
20°–30°

Auger
ICRC 2019 (15 ans de données)
2.2 σ (post trial)



TA
ICRC 2019 (11 ans de données)
2.9 σ (post trial)

NB: inaccessible à Auger



=> EUSO : tout le ciel avec un seul et même instrument

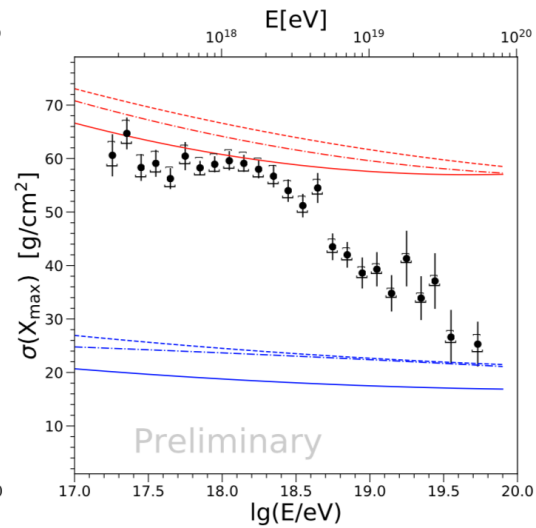
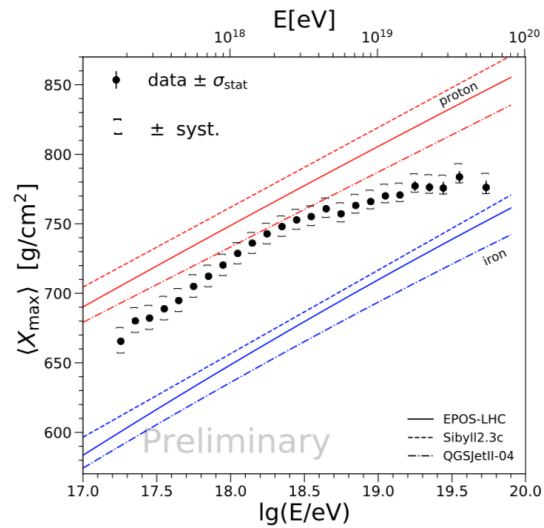
K-EUSO : acceptance multipliée par > 10 dans l'hémisphère Nord

NB: structure du hot spot (énergie vs. position)

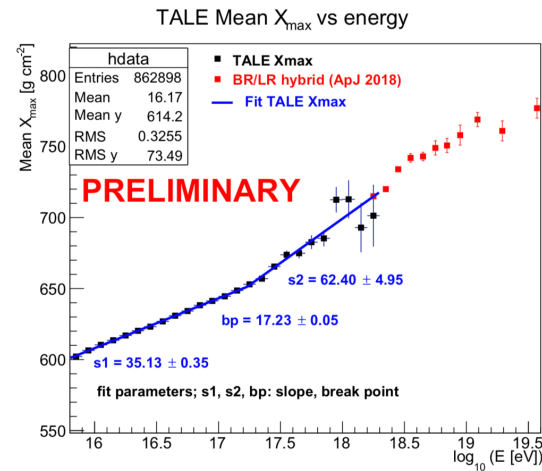
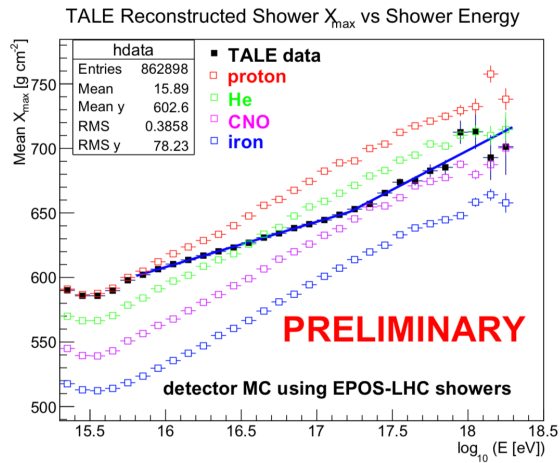
Deux instruments, deux ciels: tensions et difficultés

III – Composition

Auger :



Telescope array :



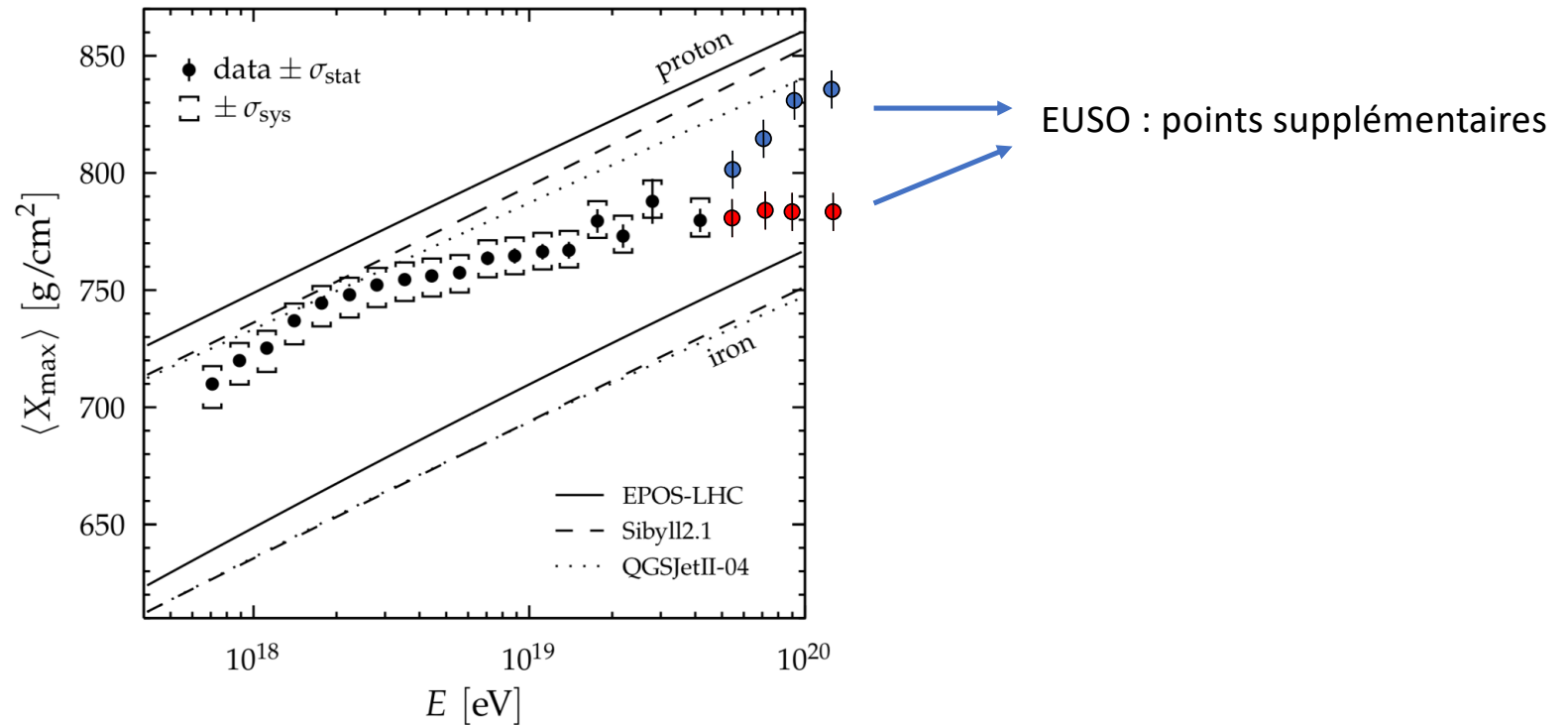
NB: statistique plus faible

Biais persistants ?

Ciel différent ?

Deux instruments, deux ciels: tensions et difficultés

III – Composition



=> EUSO : tout le ciel avec un seul et même instrument

K-EUSO : acceptation FD multipliée par ~ 100 dans l'hémisphère Nord
 ~ 20 dans l'hémisphère Sud

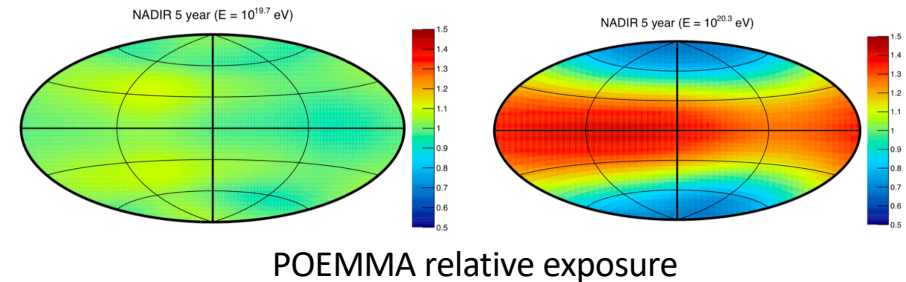
Besoin d'espace ! (=> vers le déconfinement 😊)

Observation de l'ensemble du ciel avec un instrument unique !

Couverture presque uniforme du ciel

Accès potentiel à un gain d'« exposure » considérable

Focus sur les énergies extrêmes → complémentarité avec les observatoires au sol



NB: deux façons d'accroître le rapport signal/bruit pour les anisotropies

Réduire le "bruit" : Auger prime (muons => meilleure discrimination légers/lourds)

Accroître le signal : EUSO (statistique)

+ Aller à plus haute énergie/rigidité : "GZK is your friend" ! (=> EUSO)

EUSO-SPB2 : Premières gerbes FD vues par le dessus + gerbes stratosphériques horizontales

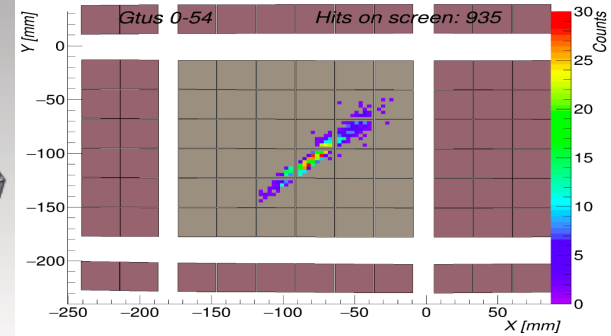
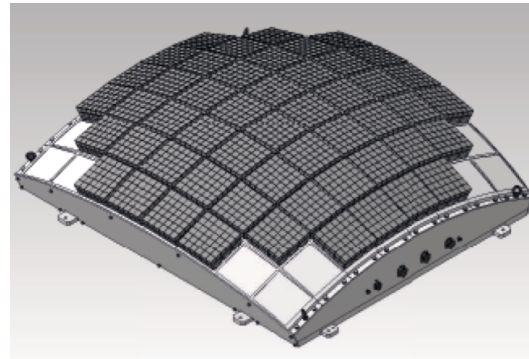
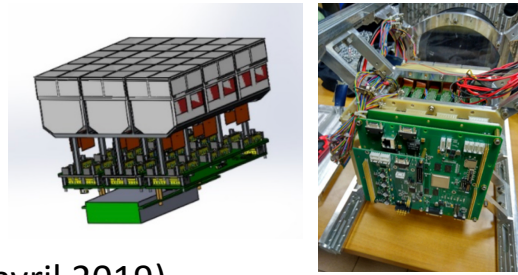
K-EUSO : ~2 fois Auger dans chaque hémisphère

POEMMA : ~10 fois Auger

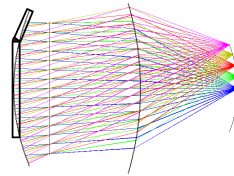
(=> déconfinement progressif ! 😊)

K-EUSO

Prototype du PDM
(photodetection module)
Approuvé par RosCosmos (avril 2019)



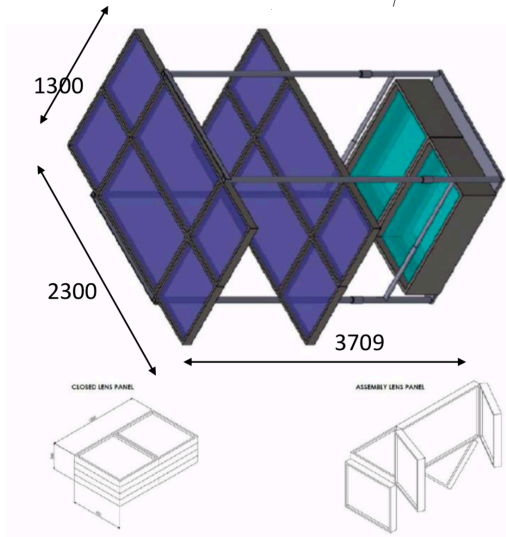
Plusieurs versions à l'étude (suivant la participation de l'ESA et suivant le lanceur)



20, 32 ou 52 PDM



Optique réflexive (Schmidt)

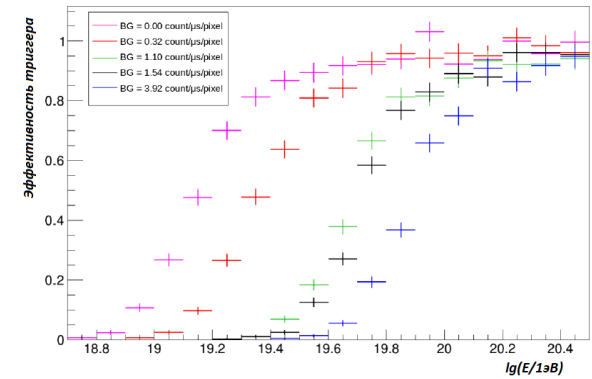


Optique réfractive (Fresnel)

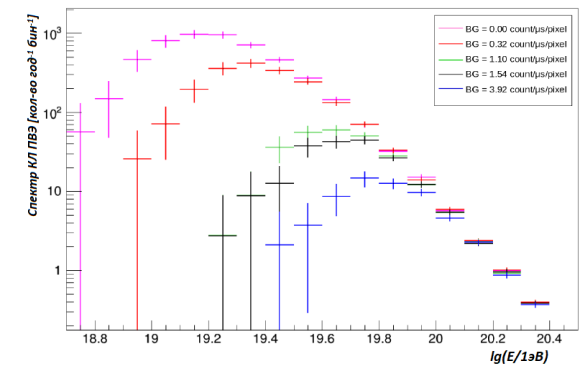
FOV 40°, résolution $\sim 10^{-6}$ sr

K-EUSO: $\sim 25\,000$ km² sr yr chaque année

Efficacité en fonction de l'énergie



Nb d'UHECRs en fonction de l'énergie



~ 100 UHECR/an, $E > 50$ EeV

POEMMA

Probe Of Extreme Multi-Messenger Astrophysics

Final proposal under review by NASA
(design approved and certified by NASA technicians and mission engineers)

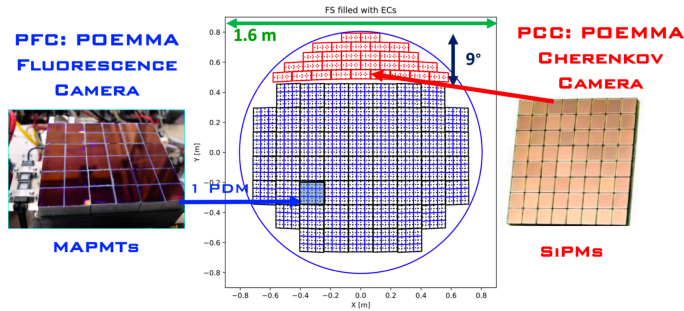
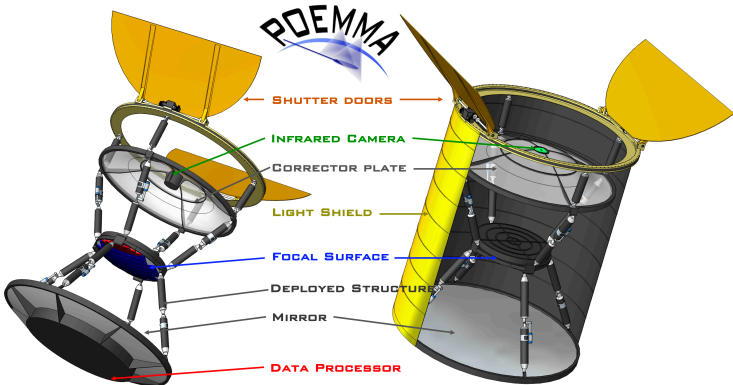


TABLE I: POEMMA Specifications:

Photometer Components			Spacecraft	
Optics	Schmidt	45° full FoV	Slew rate	90° in 8 min
	Primary Mirror	4 m diam.	Pointing Res.	0.1°
	Corrector Lens	3.3 m diam.	Pointing Know.	0.01°
	Focal Surface	1.6 m diam.	Clock synch.	10 nsec
	Pixel Size	3 × 3 mm ²	Data Storage	7 days
	Pixel FoV	0.084°	Communication	S-band
PFC	MAPMT (1μs)	126,720 pixels	Wet Mass	3,450 kg
PCC	SiPM (20 ns)	15,360 pixels	Power (w/cont)	550 W
Photometer (One)			Mission	(2 Observatories)
Mass	1,550 kg		Lifetime	3 year (5 year goal)
Power (w/cont)	700 W		Orbit	525 km, 28.5° Inc
Data	< 1 GB/day		Orbit Period	95 min
			Observatory Sep.	~25 - 1000+ km

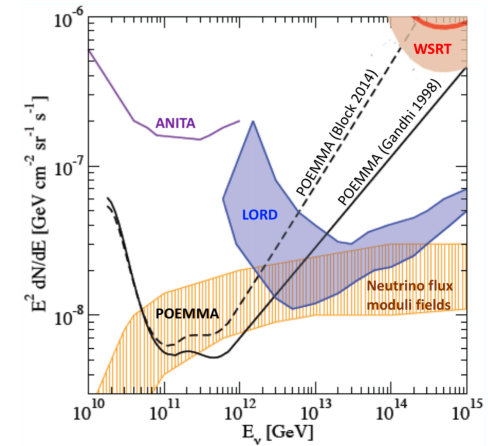
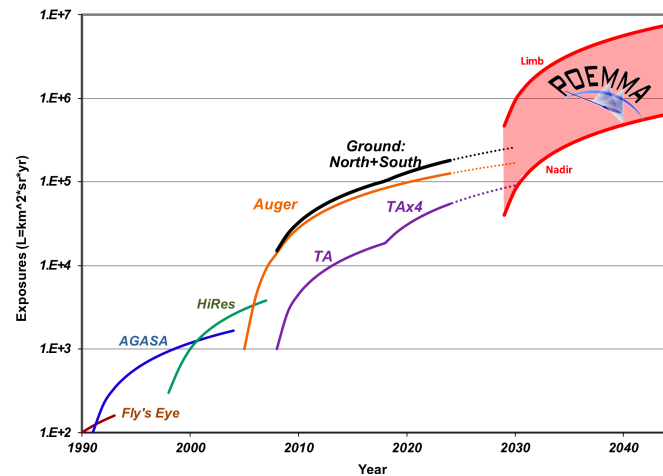
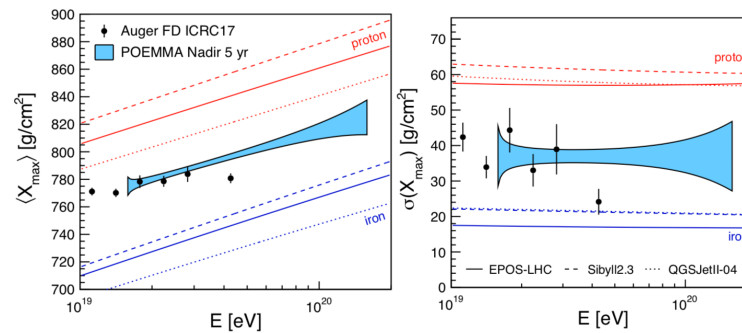
Each Observatory = Photometer + Spacecraft; POEMMA Mission = 2 Observatories

Résolution pour E > 50 EeV :

Direction : 1.5°

Énergie : 20%

X_{max} : 30 g/cm²



Bilan

- **UHECR** : domaine important (astroparticules, astrophysique des hautes énergies, physique des particules, multi-messagers)
- État de l'art au niveau scientifique : **Auger** ! => nombreux résultats importants
- Nécessité d'un gain d'acceptance => **exploration de la voie spatiale**
+ couverture complète du ciel
=> **complémentarité** avec les observatoires au sol
- **∃ programme dynamique**, largement soutenu au niveau international : collaboration **JEM-EUSO**
 - => Développement progressif et régulier => succès des missions passées et présentes
 - => Position centrale des équipes françaises, workpackage technologique abouti
 - => Expérience spatiale et retour technologique valorisable
- Retour scientifique de la mission en cours (MINI-EUSO) et de la prochaine mission garantie (EUSO-SPB2)
- **Positionnement stratégique très favorable**, au cas où le programme EUSO déboucherait véritablement sur une mission spatiale d'envergure (K-EUSO, POEMMA...).