



Rayons cosmiques

Mesures et perspectives instrumentales

Etienne Parizot
(APC, Université Paris Diderot)

Workshop du Labex OCEVU — Toulouse — 22-24 mars 2016



Principaux messages

- ✧ Une ère nouvelle : l'astronomie multi-messagers
- ✧ Les rayons cosmiques (ici les UHECR) ont beaucoup à nous apprendre !
- ✧ Nécessité de changer de grille de lecture pour déchiffrer le message des nouveaux messagers
- ✧ Bilan des résultats récents : Auger et Telescope Array : peut-être le premier signal d'une source individuelle
- ✧ Nécessité d'aller au-delà des expériences actuelles
- ✧ Voie crédible pour avancer sur le front des UHECRs : l'observation depuis l'espace !
- ✧ EUSO : immenses progrès récents et en cours sur le plan instrumental → démonstrateurs ballons + ISS

Les rayons cosmiques: de nouveaux messagers pour l'astrophysique

✧ Astronomie avec des photons depuis $> 40\,000$ ans !

✧ 1^{ère} révolution (XIX^e siècle): spectroscopie !



→ Spectrum d'énergie

→ Donne accès à des informations physiques/chimiques (composition, vitesses, températures, fractions d'ionisation, diffusion, absorption...)

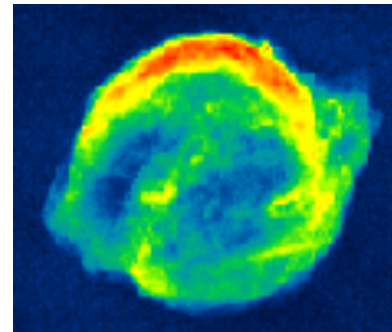
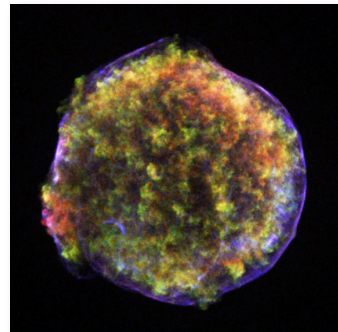
✧ 2^{ème} révolution (XX^e siècle): astronomie multi-longueur d'onde!

[radio, mm, Infrarouge, visible, UV, X, gamma, TeV]

→ Contraintes multiples sur les processus physiques à l'œuvre dans les sources astrophysiques

→ Accès aux phénomènes de haute énergie

→ « Astrophysique de hautes énergies »

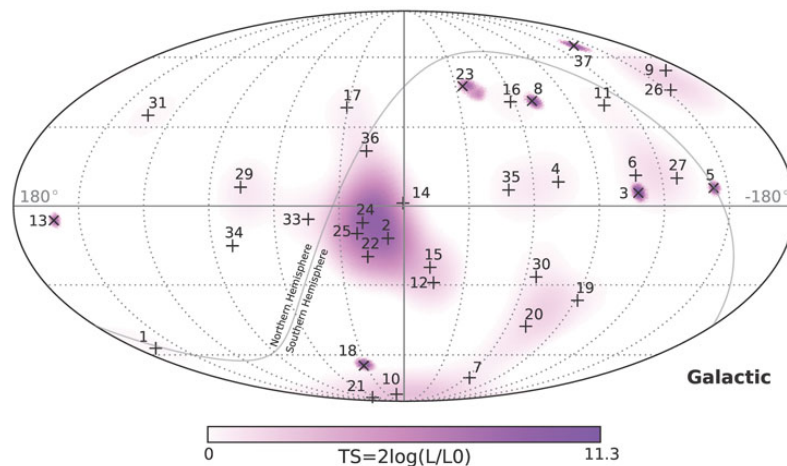


Les rayons cosmiques: de nouveaux messagers pour l'astrophysique

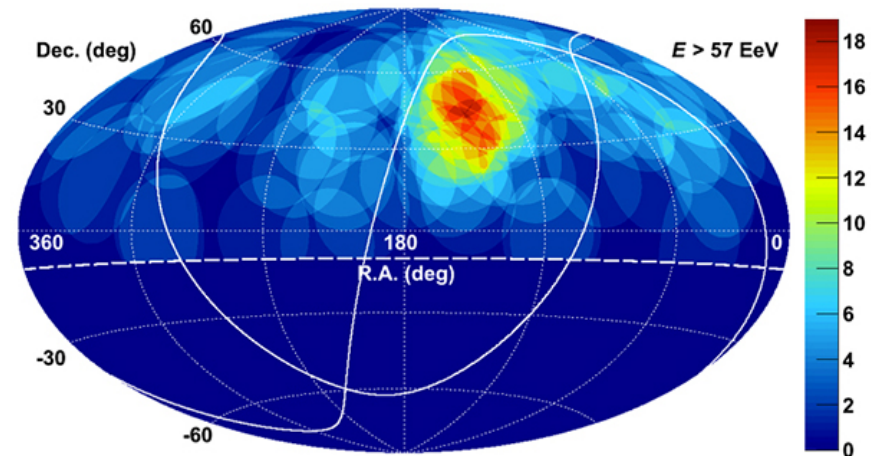
✧ 3^{ème} révolution (XXI^e siècle): astronomie multi-messagers ?

- Rayons cosmiques
- Neutrinos
- Ondes gravitationnelles

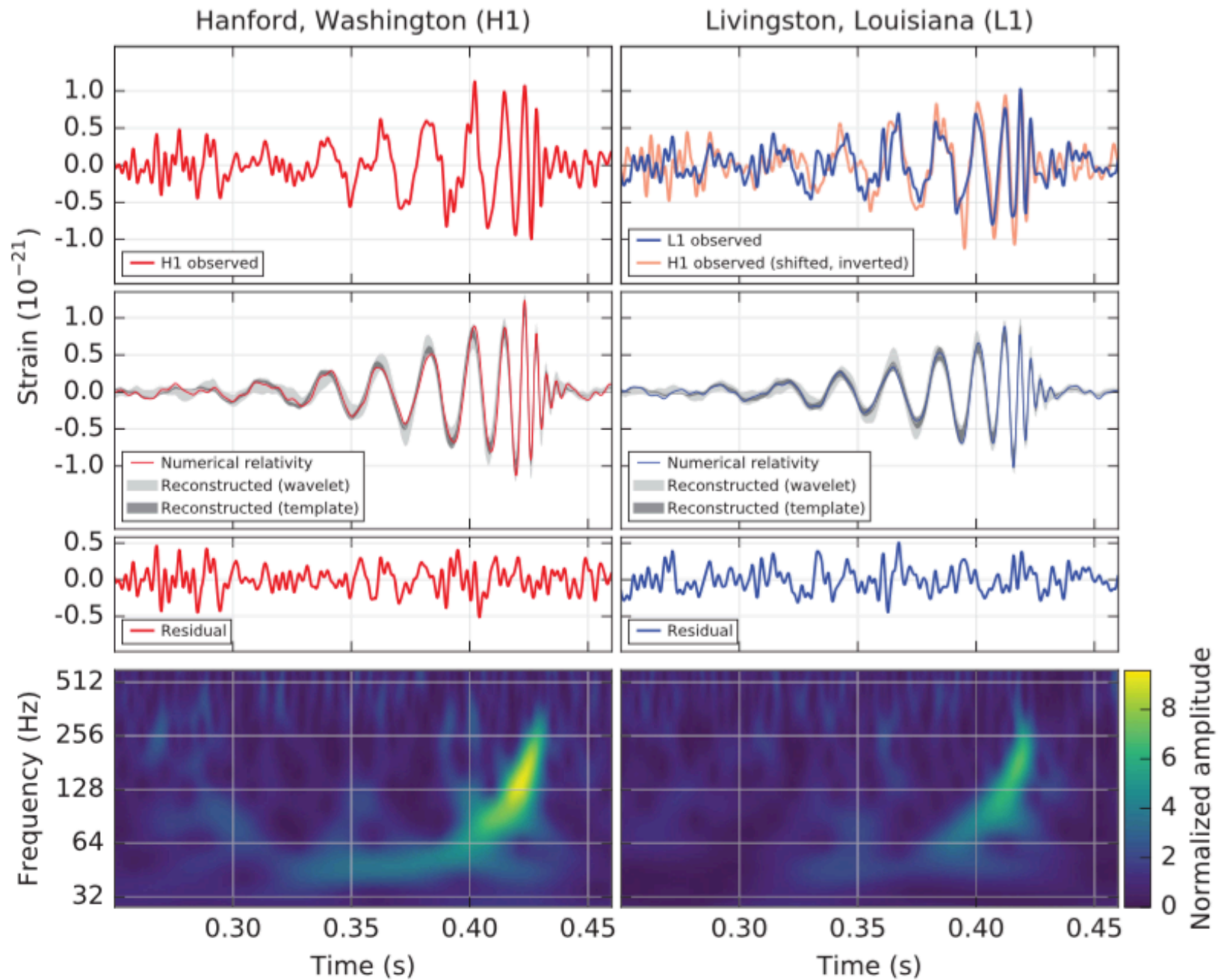
- Nouveaux types d'information
- « Perception » physique enrichie
- Indices et contraintes complémentaires



Neutrinos (Ice Cube)



UHECRs (Telescope Array)



CARPEAUX Jean-Baptiste (1827-1875) :
« Les Quatre parties du monde soutenant la sphère céleste »



- ✧ Photons
- ✧ Rayons cosmiques
- ✧ Neutrinos
- ✧ Ondes gravitationnelles



Astronomie multi-messagers

- ✧ Apport du « multi-longueurs d'ondes » aujourd'hui évident ! La routine... ;-)
- ✧ Neutrinos d'IceCube : quelques neutrinos changent tout !
- ✧ Ondes gravitationnelles : 1 événement → déjà une révolution !
- ✧ Il suffit de peu pour ouvrir des perspectives fascinantes !
- ✧ Mais ATTENTION aux réflexes issus de l'astronomie photons
- ✧ Apprendre à envisager autre chose qu'une astronomie de sources (multi- λ : contreparties simultanées d'une même source)
- ✧ E.g. Neutrinos : sources ou continuum ? Spectre ? E_{\max} ? Lien avec photons et RC ? Gal. ou Extragal. ? Composante nouvelle ou contrepartie de choses connues ?
- ✧ E.g. Ondes gravitationnelles : histogramme des masses impliquées ? Infos inattendues sur l'évolution stellaire, sans aucune contrepartie identifiée ! Infos sur l'effondrement grav. ? Clé de l'explosion des SNe ?

Astronomie multi-messagers

- ✧ Rayons cosmiques → UHECRs
- ✧ NB: certains ont exprimé le sentiment qu'il n'y avait plus rien à attendre de cette « fausse bonne piste », puisqu'Auger n'a rien vu...
(Étrange prétention ! Étrange courte vue...)
- ✧ Si, Auger a vu quelque chose ! C'est seulement qu'il n'a pas vu de sources...
(Il n'y a pas que les sources, dans la vie !)
- ✧ Les enjeux de l'astronomie multi-messagers ne sont pas ceux de l'astronomie multi-longueurs d'onde.
- ✧ E.g. sources vs. populations de sources...
- ✧ Contraintes générales...
- ✧ Savoir que les GRBs ou que les AGN accélèrent des UHECRs, ou savoir que non, est une info majeure pour la modélisation, indépendamment de toute identification
- ✧ Idem: connaître leur composition, la densité des sources, ou leur évolution cosmologique, ou le caractère transitoire ou non des sources, etc.

Rayons cosmiques et « écologie Galactique »

10

✧ Les rayons cosmiques sont l'une des principales composantes de la Galaxie et jouent un rôle majeur dans les processus les plus significatifs qui s'y déroulent !

→ Densité d'énergie similaire à celle de la lumière ou du champ magnétique!

✧ Les rayons cosmiques :

→ régulent l'équilibre entre les phases du milieu interstellaire (très chaud, chaud, froid, ionisé, atomique, moléculaire)

→ contrôle l'ionisation du milieu interstellaire

→ génère le champ magnétique turbulent

→ régule la formation d'étoiles

→ contrôle les processus astrochimiques

+ ils sont responsables de la nucléosynthèse des éléments légers !

(Li, Be et B)

✧ Pourtant leur origine est toujours inconnue !

Quels enjeux autour des UHECRs ?

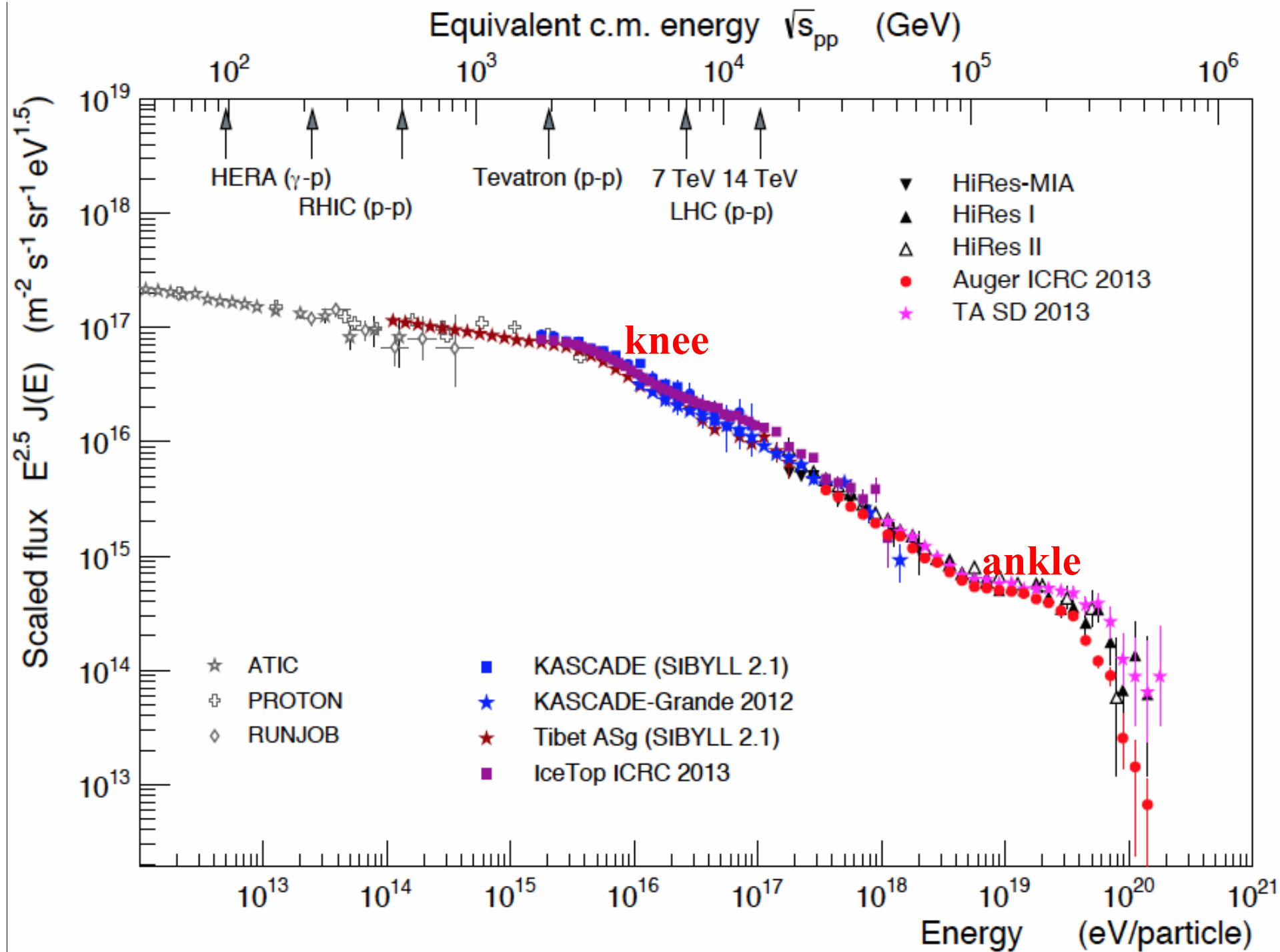
11

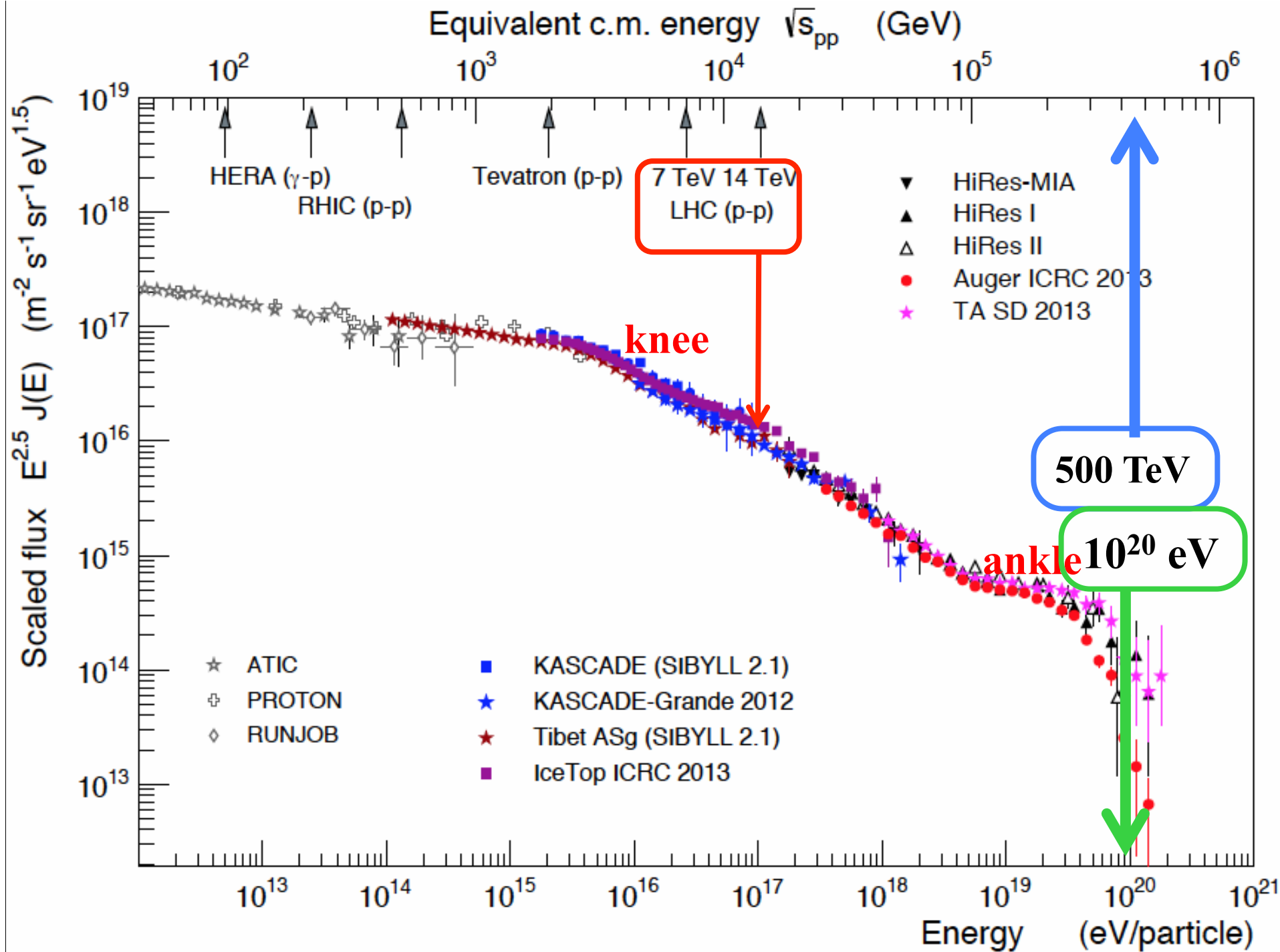
- ✧ NB: on ignore leur « rôle » et même s'ils ont un !
 - Quelle influence sur leurs sources ? (Difficile à imaginer qu'ils n'en ont pas: énergie colossale !)
 - Hors de leurs sources ? À l'échelle galactique ? Extragalactique ? Sur Terre ?
 - Champ magnétique extragalactique ? Modes à grande longueur ? Intensité ?
 - Rétroactions possibles ?
 - (NB: sur Terre : éclairs ? 200 RC par an dans Auger \Leftrightarrow 1 par seconde sur la planète !)
- ✧ Comprendre/contraindre la physique de leurs sources
 - l'identification ne serait-ce que d'une classe de sources serait extraordinaire !
- ✧ Comprendre l'accélération des particules
 - Enjeu global pour toute l'astrophysique des hautes énergies...
 - On pourrait découvrir des contraintes clés sur l'accélération, sans même l'identification d'une contrepartie...
- ✧ NB: est-il même certain qu'il y ait des « sources » ?
 - Absence d'anisotropies serait extraordinaire ! On ne sait rien : tout est possible !

Quels enjeux autour des UHECRs ?

12

- ❖ Enjeux de physique des hautes énergies !
 - Physique des gerbes ("anomalies" : muons, distribution pseudo-rapacité...)
 - Interactions à haute énergie (NB: bien au-delà des énergies du CERN)
 - Modèles hadroniques
 - Conditions physiques extrêmes dans les sources ?
- ❖ Astrophysique générale : ex. : champs magnétiques ! (G + EG)
- ❖ Exploration : neutrinos UHE ? Photons UHE ?
 - Nouvelles fenêtres : possibilité de sources inattendues...
 - Limites sur les contributions top-down...
- ❖ Physique fondamentale
 - Particules les plus énergétiques de l'univers !
 - Physique des particules enrichie ? (inaccessible en accélérateurs)
 - Nouvelle physique de l'espace-temps ? (Invariance de Lorentz, effets quantiques...)





État des lieux : que savons-nous ?

✧ 3 observables principales

- Spectre d'énergie (toutes les particules, toutes les sources)
- Composition (toutes les sources : 1 pixel dans le ciel !)
- Distribution angulaire: anisotropies ? (toutes les particules, toutes les énergies)

✧ Deux expériences majeures

- Observatoire Pierre Auger : Argentine (Sud !) : 3 000 km²
- Telescope Array (TA) : Utah (Nord !) : 700 km²

✧ UHECRs assez différents de ce qui était imaginé !

- Rôle des noyaux (=> contraintes sur les sources)
- Probable énergie maximale dans la majorité des sources...
- Absence d'anisotropie apparentes
- Transition galactique/extragalactique plus riche que prévue
- Contraintes sur les GCRs: protons galactiques jusqu'à $\sim 10^{17}$ eV !

NB: connexion GCR/SNRs de plus en plus douteuse... !

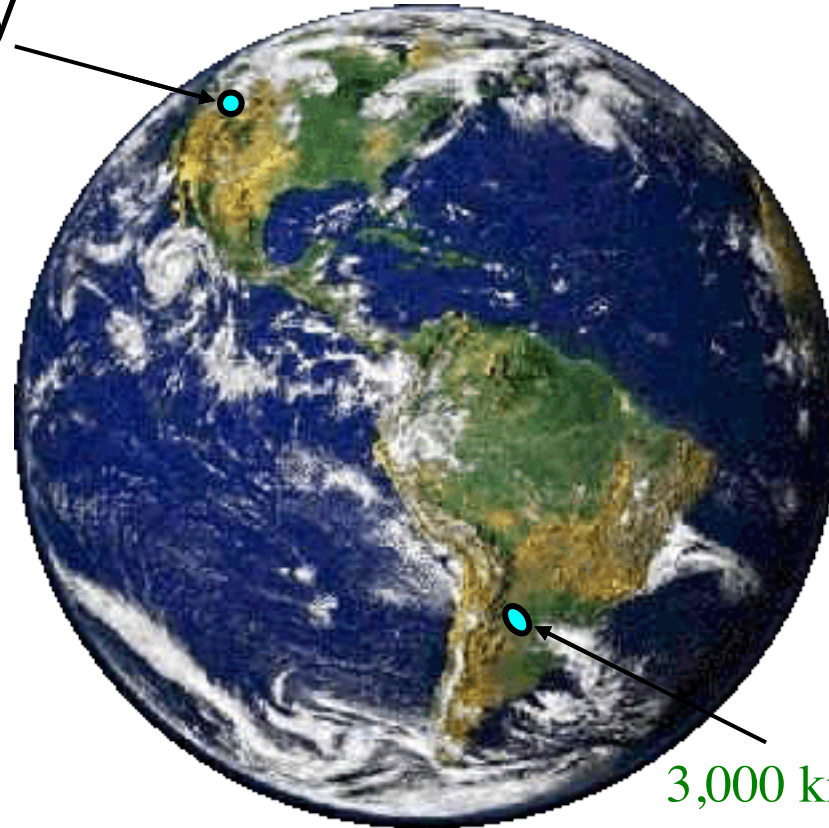
Observatoires UHECR

Telescope Array

Utah, USA

(5 pays)

700 km² array
3 fluorescence
telescopes



Pierre Auger
Observatory

Argentina

(19 pays)

3,000 km² array

4 fluorescence telescopes

Principaux résultats

✧ Spectre d'énergie

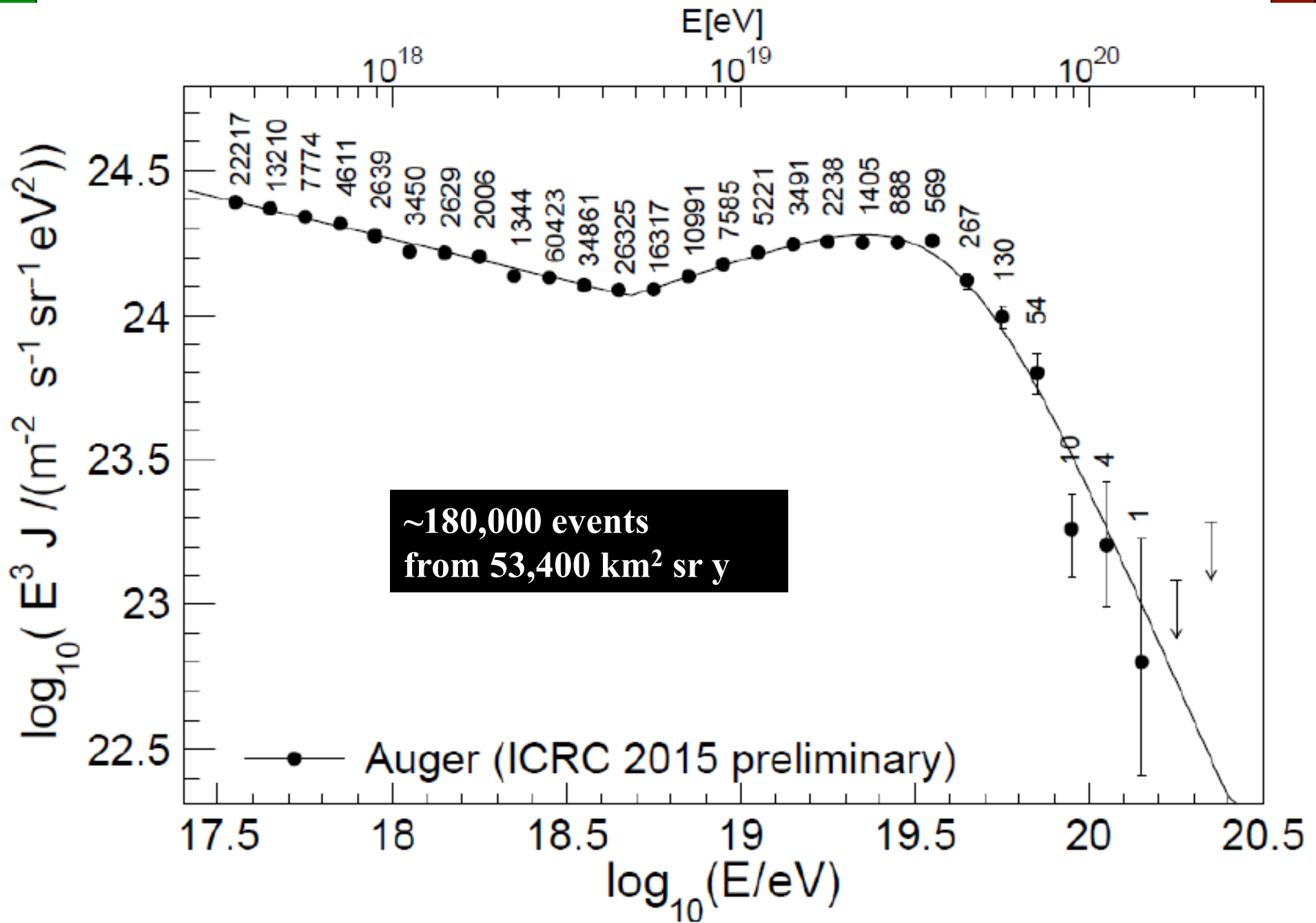
- Coupure GZK ? Énergie maximale ? Les deux ?
- Compatible avec de nombreuses compositions !

✧ Composition

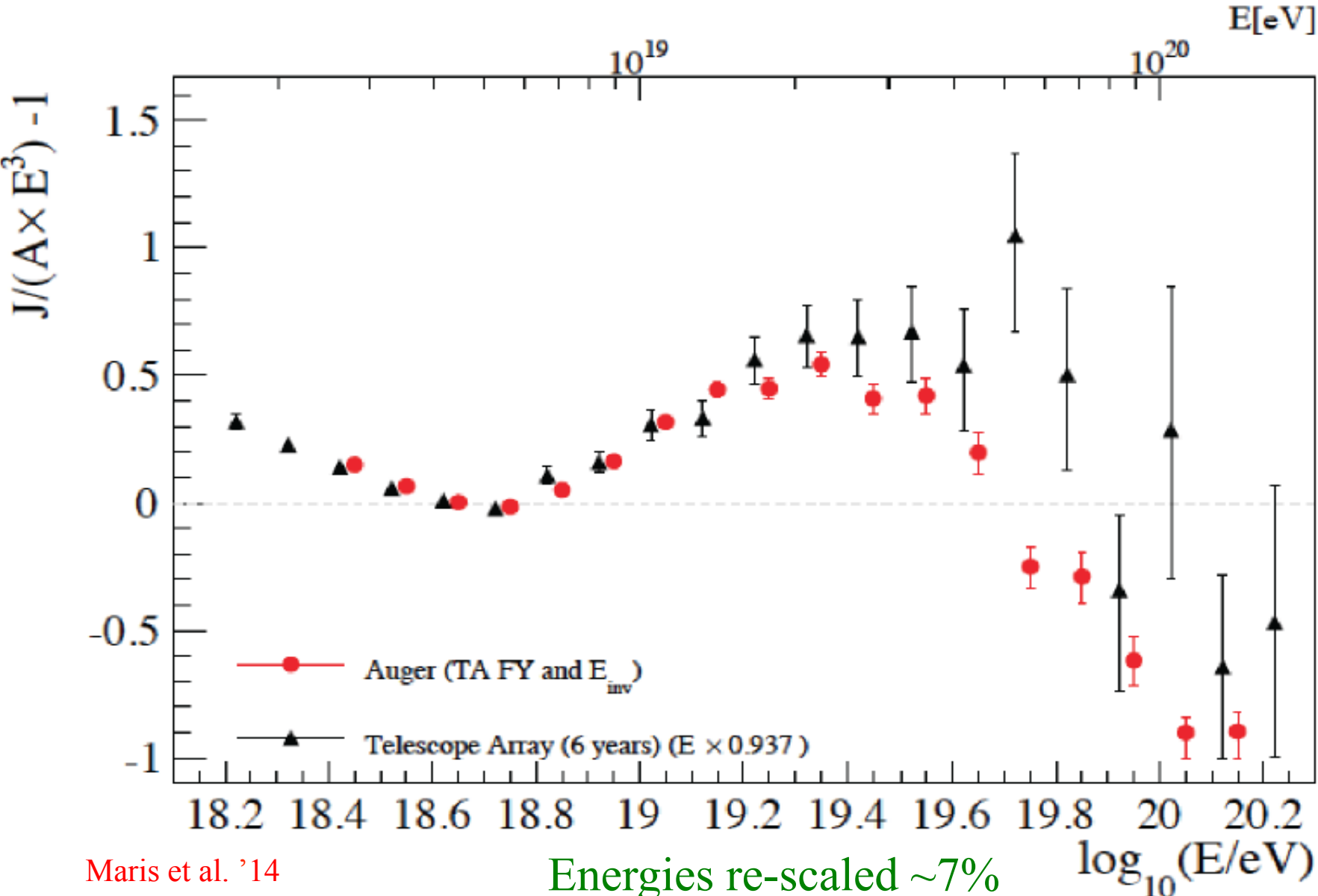
- Auger : transition vers une composante nettement plus lourde à partir de 10^{18} eV
 - Telescope Array : « compatible avec des noyaux légers »
- Mais attention : le désaccord n'est pas avéré !

✧ Anisotropies

- Auger : rien ! [Oubliez la (pseudo-vague-stupide-)corrélacion avec les AGN !]
- Telescope Array : hot spot !



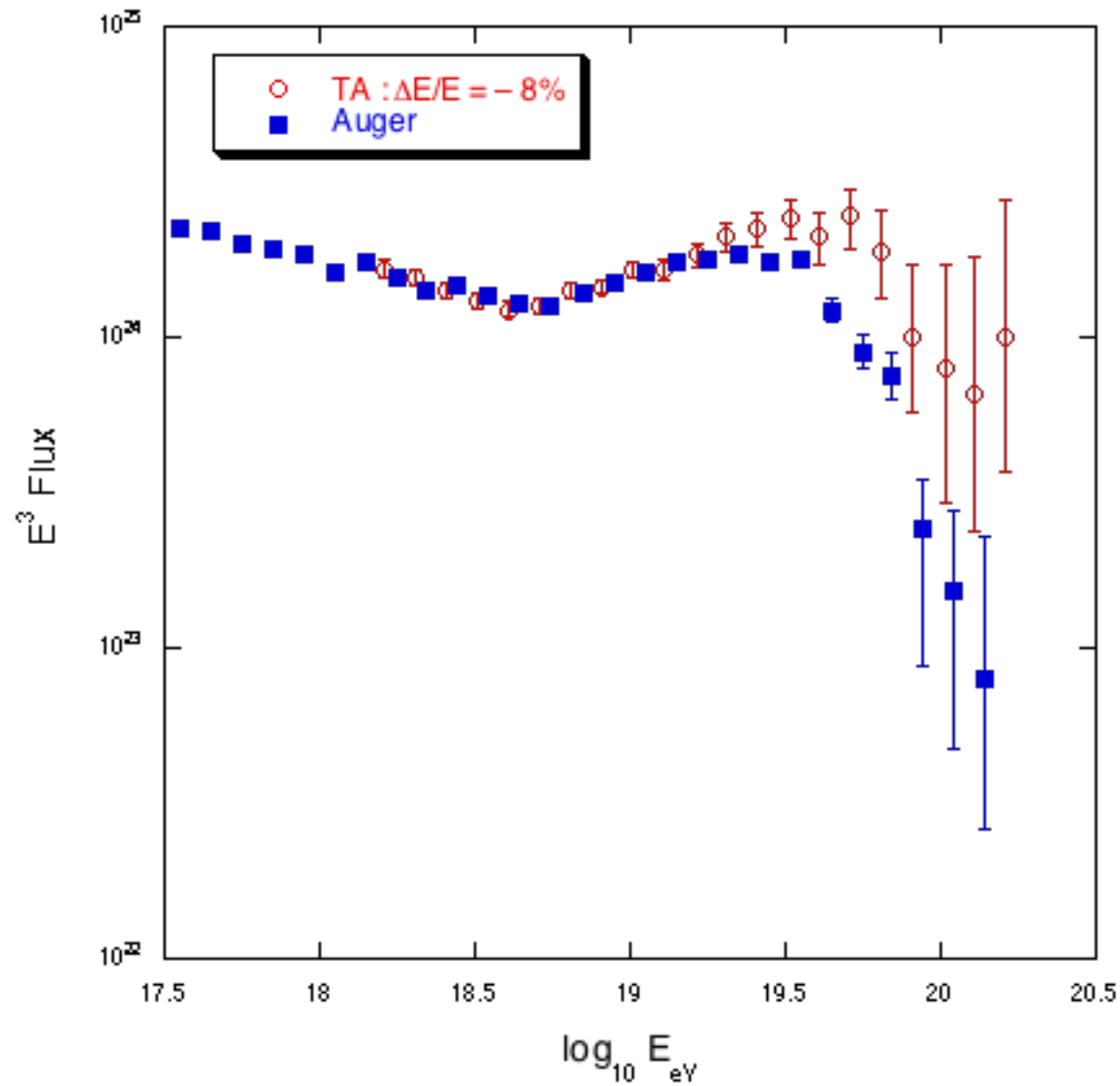
UHECR 2014 Working Group - Joint Spectrum



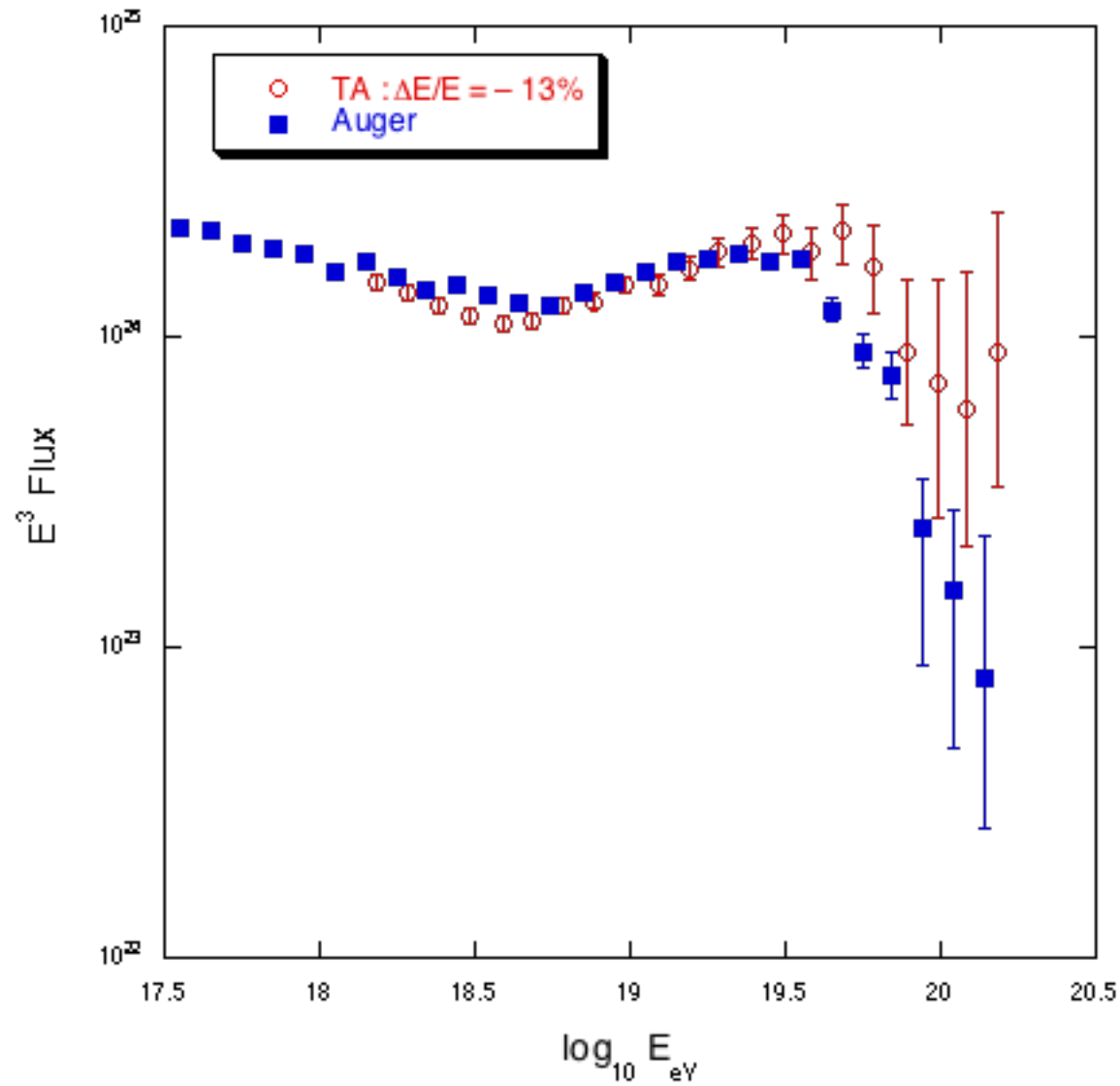
Maris et al. '14

Energies re-scaled ~7%

Comparaison Auger(Sud)/TA(Nord)

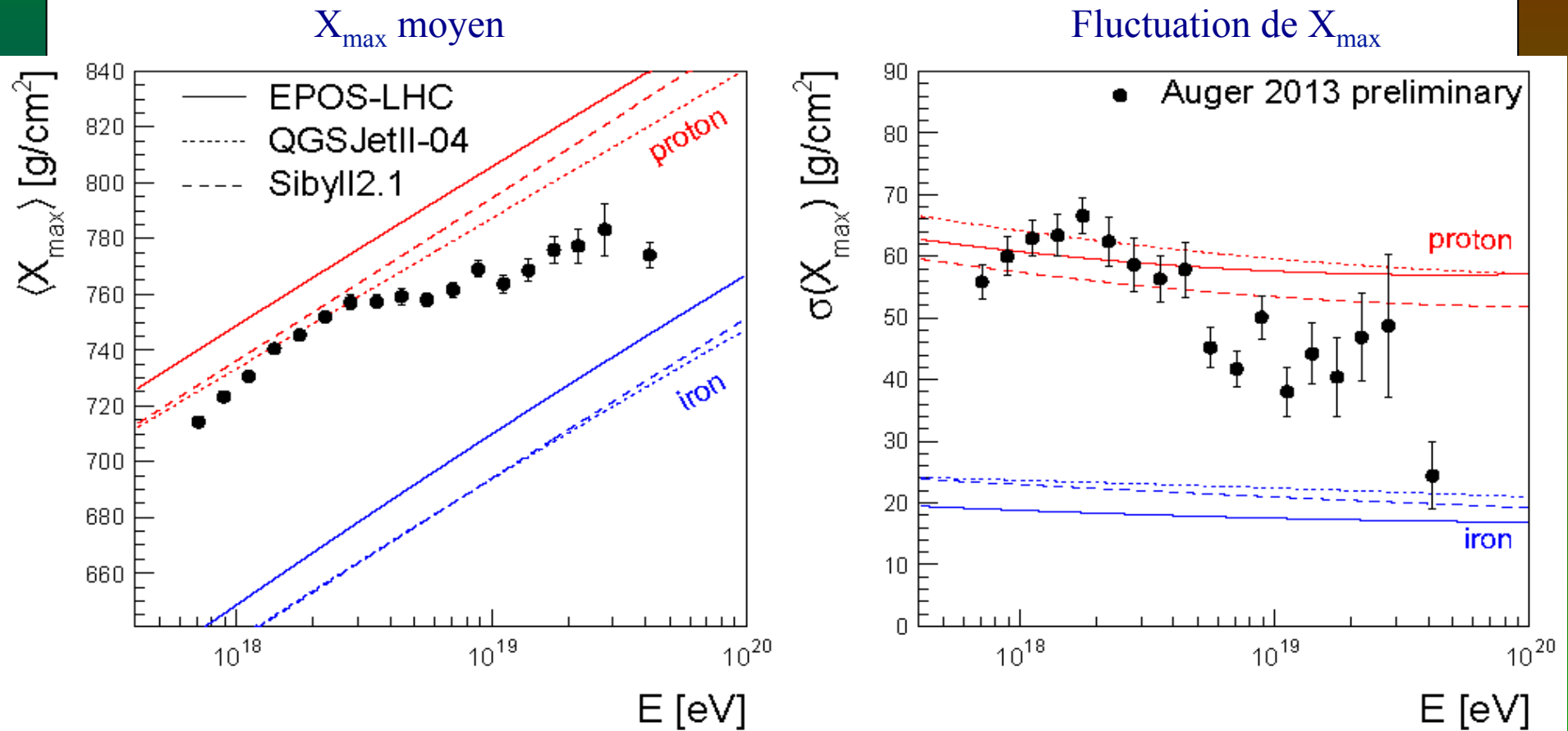


Comparaison Auger(Sud)/TA(Nord)

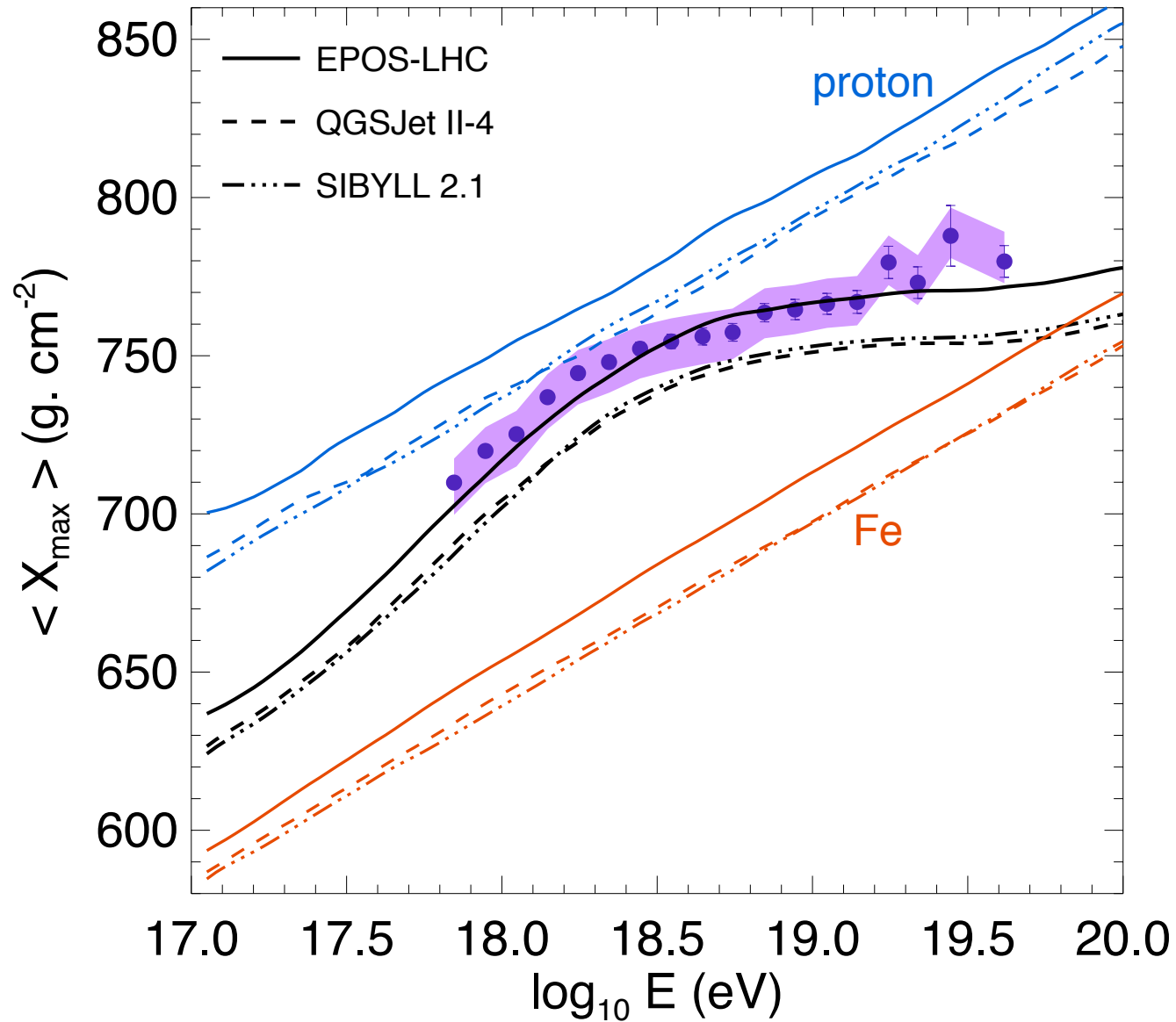


Composition

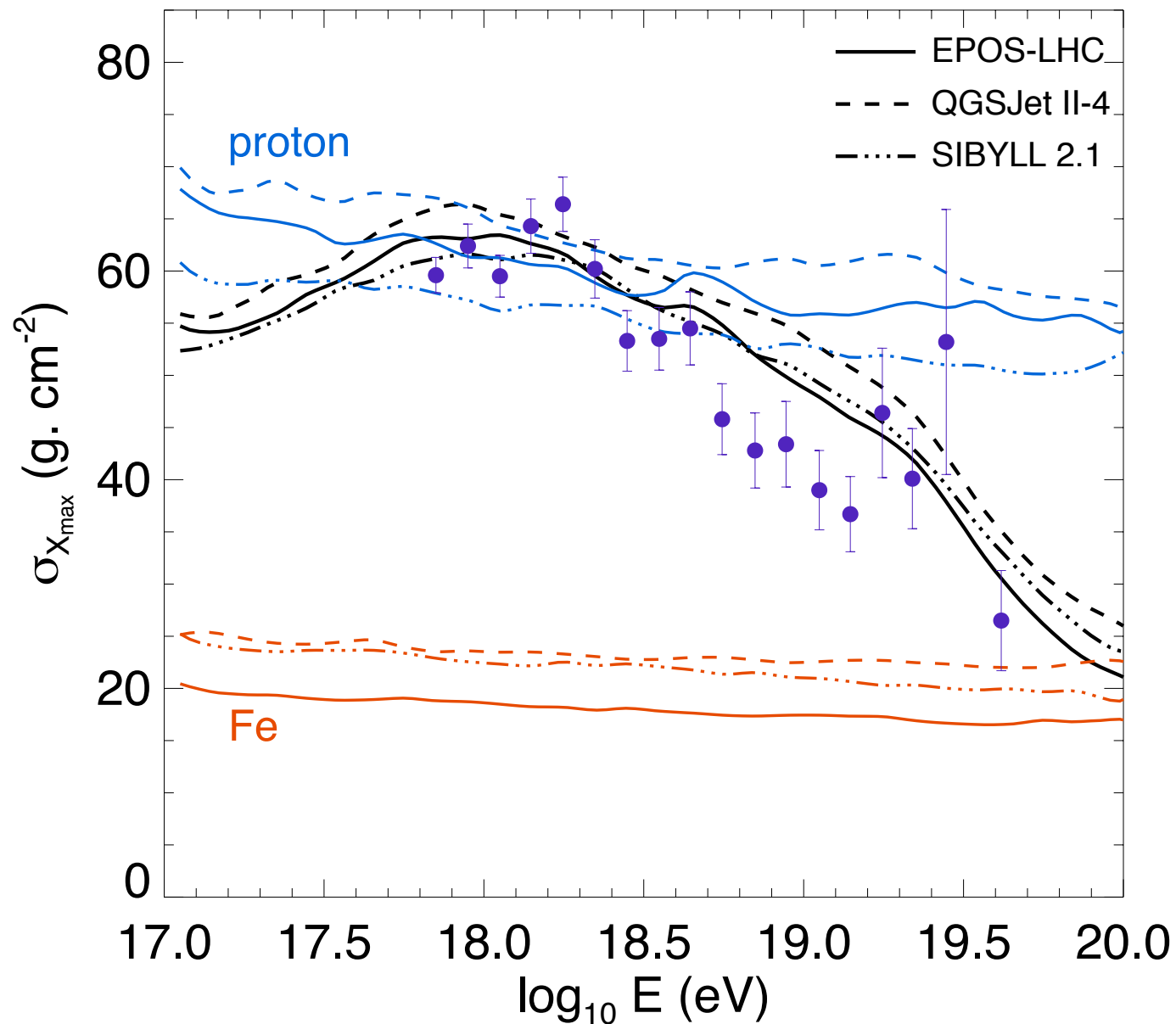
- ✧ Observable : profondeur du maximum de développement de la gerbe atmosphérique initiée par le UHECR (X_{\max} , en g/cm²)



Composition



Composition



Anisotropies : le "hotspot" de TA

✧ Résultat potentiellement capital ! <http://arxiv.org/abs/1404.5890>

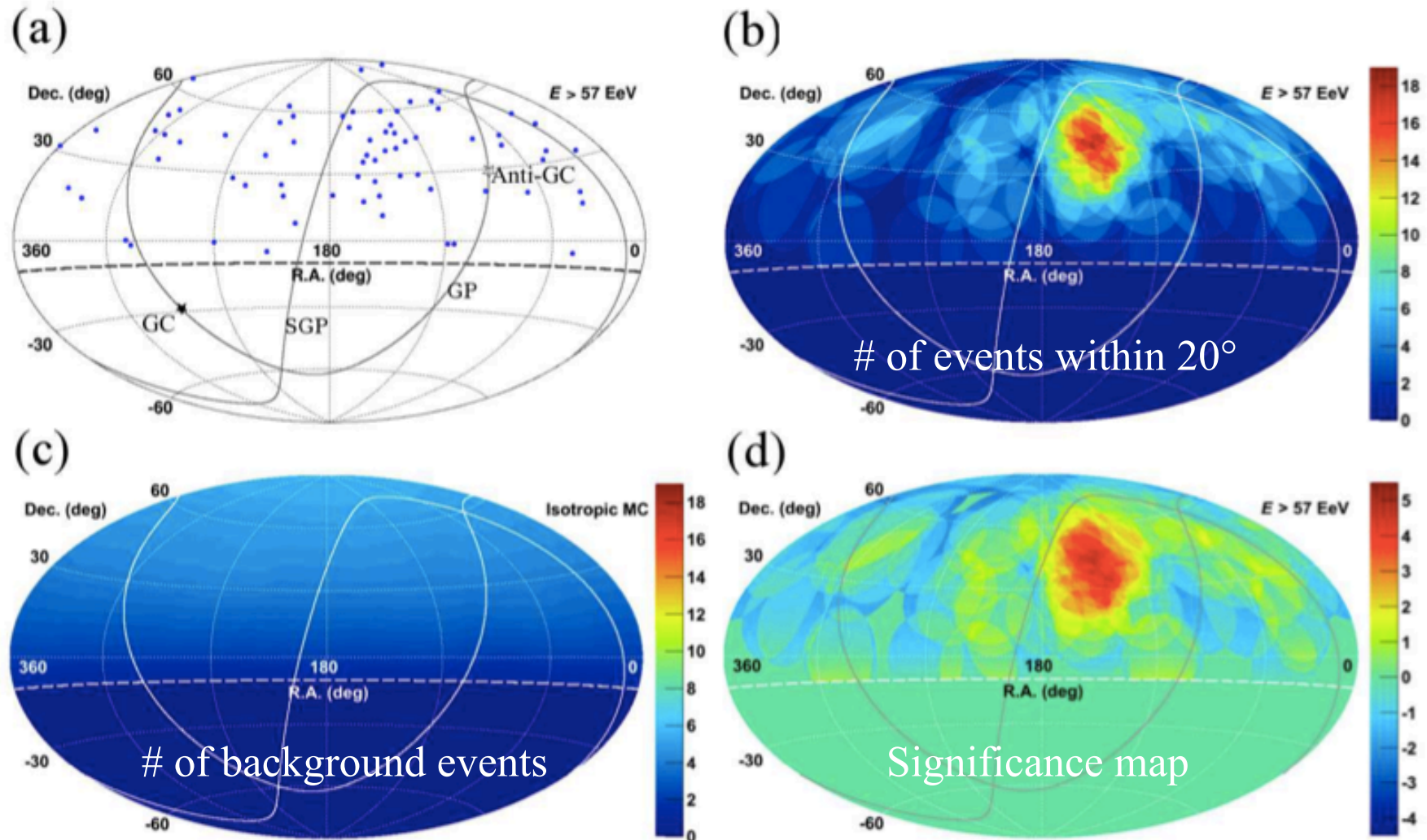
Indications of Intermediate-Scale Anisotropy of Cosmic Rays with Energy Greater Than 57 EeV in the Northern Sky Measured with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment

We have searched for intermediate-scale anisotropy in the arrival directions of ultrahigh-energy cosmic rays with energies above 57 EeV in the northern sky using data collected over a 5 year period by the surface detector of the Telescope Array experiment. We report on a cluster of events that we call the hotspot, found by oversampling using 20° -radius circles. The hotspot has a statistical significance of 5.1σ , and is centered at R.A. = $146^\circ 7$, Dec. = $43^\circ 2$. The position of the hotspot is about 19° off of the supergalactic plane. The probability of a cluster of events of 5.1σ significance, found using 20° radius oversampling, appearing by chance in an isotropic cosmic-ray sky is calculated to be 1.4×10^{-4} (3.6σ).

Anisotropies : le "hotspot" de TA

❖ Déjà ?!

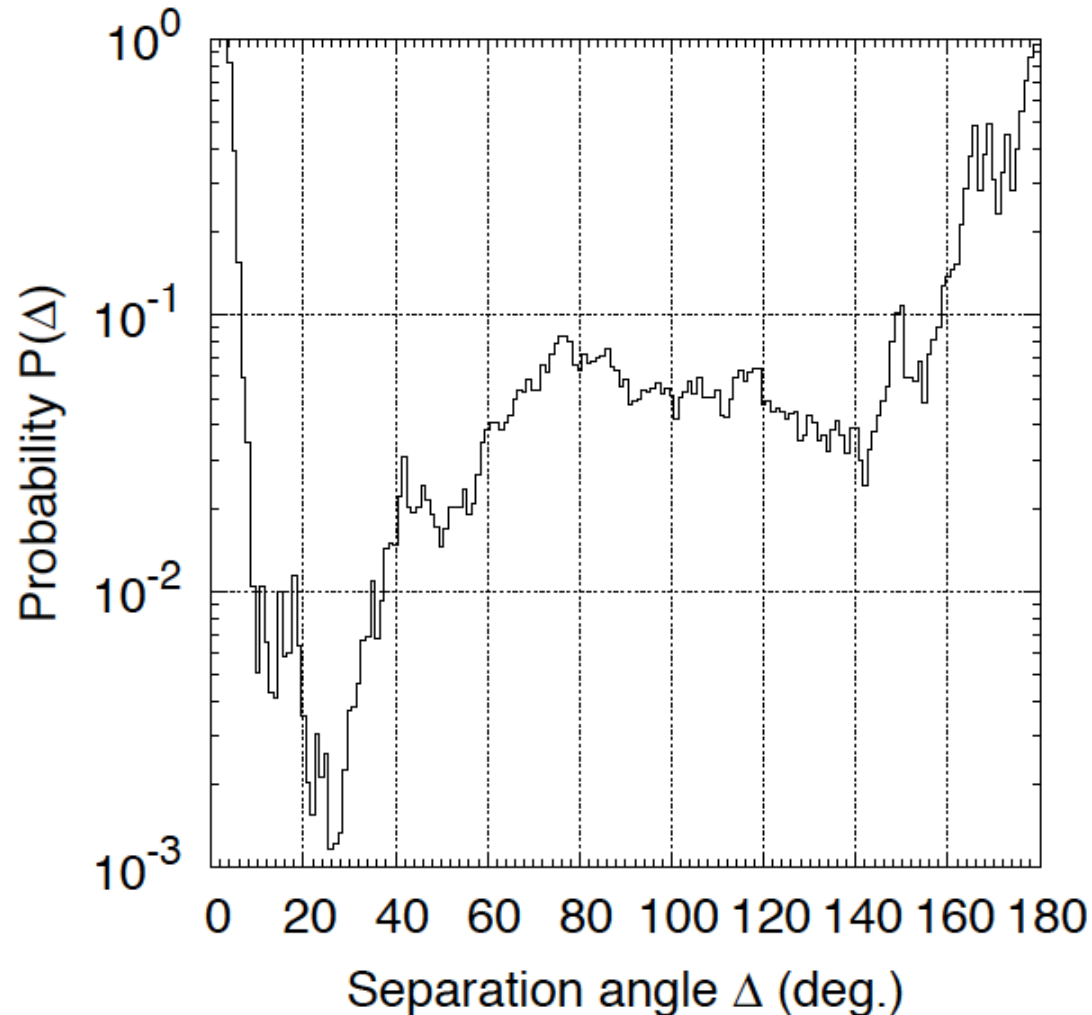
72 events above 57 EeV (TA energy scale)
20°-scale oversampling



Anisotropies : le "hotspot" de TA

✧ Autocorrelation function

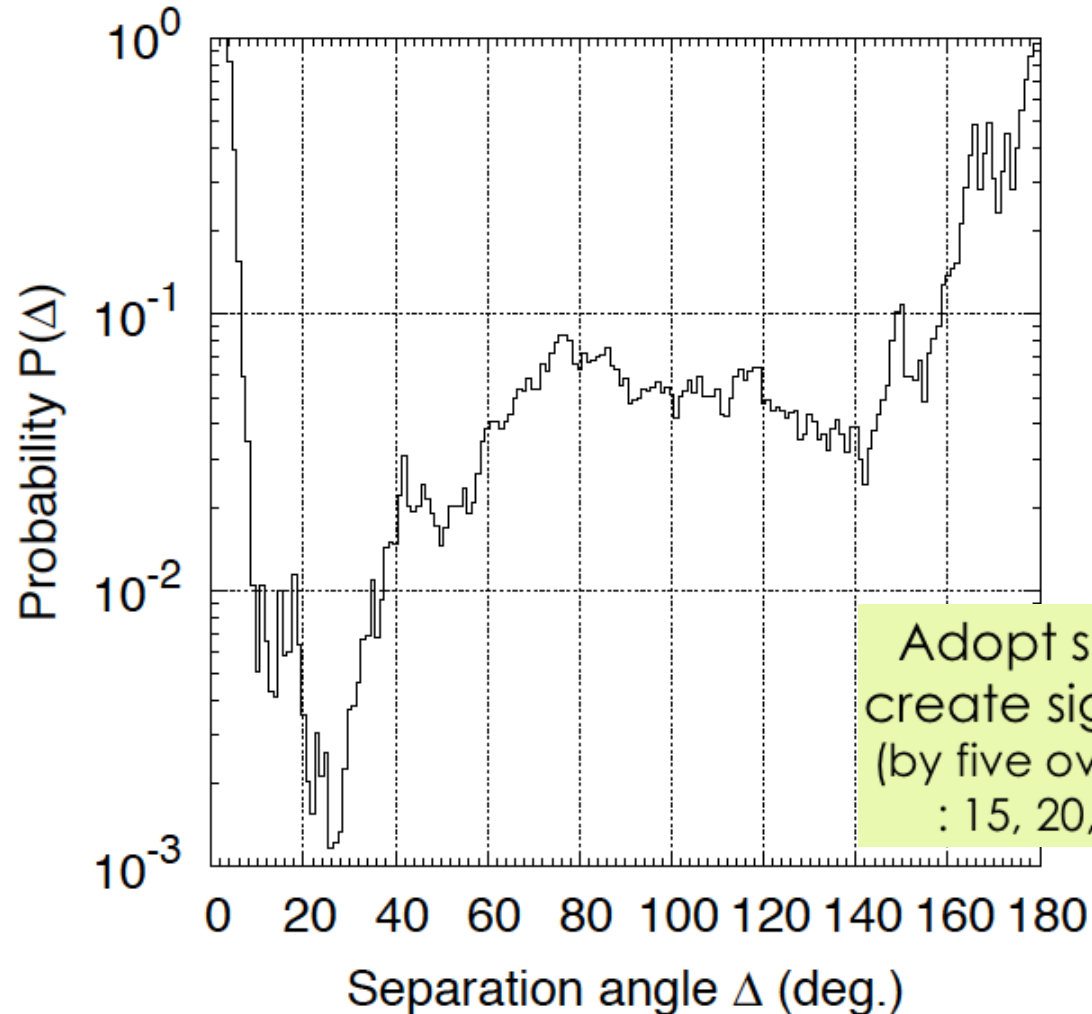
Most significant departure from anisotropy at a scale similar to that used for the oversampling ($\sim 20^\circ$)



Anisotropies : le "hotspot" de TA

✧ Autocorrelation function

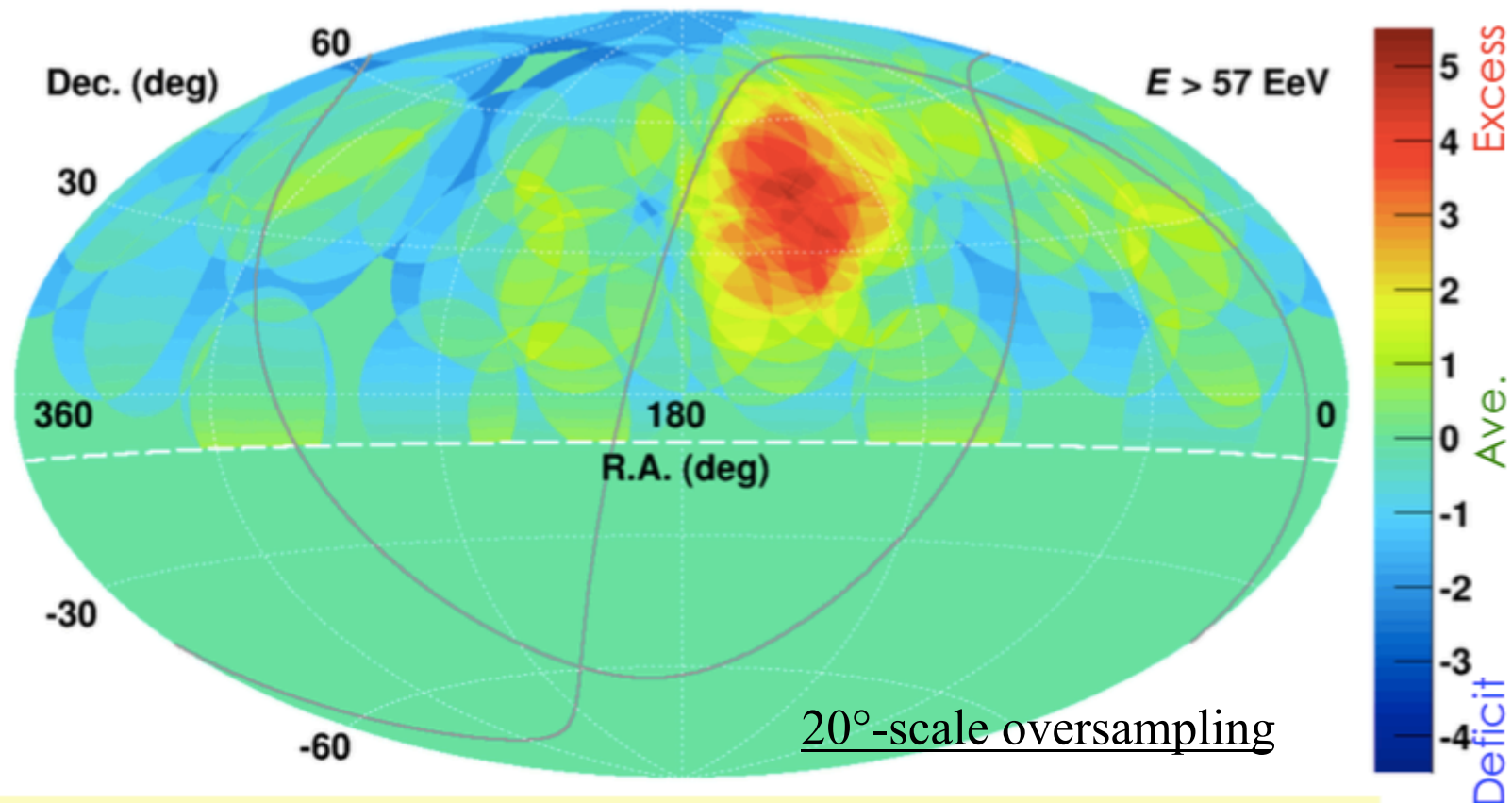
Most significant departure from anisotropy at a scale similar to that used for the oversampling ($\sim 20^\circ$)



The "Telescope Array hotspot"

❖ Brand new data
(unofficial update:
thanks to Sagawa san!)

5 years of data
72 events above 57 EeV
 5.1σ (unpenalized)



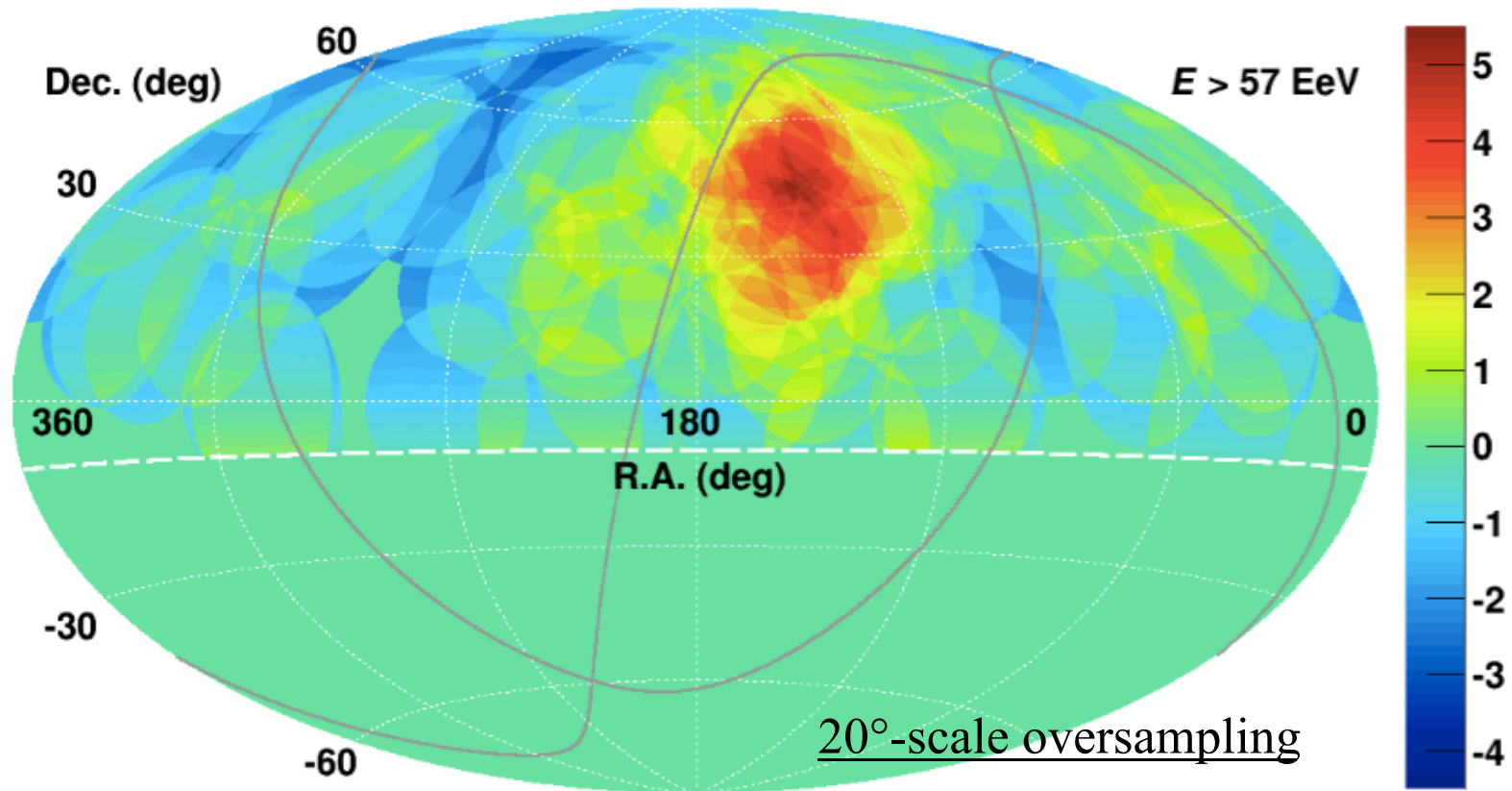
The "Telescope Array hotspot"

❖ Brand new data
(unofficial update:
thanks to Sagawa san!)

5 years → 6 years of data

72 → 87 events above 57 EeV

5.1 σ → 5.55 σ (unpenalized)



A-t-on déjà vu une source ?

- ❖ Premiers signes d'une source individuelle ?
 - Comparaison Auger / Telescope Array
 - Différence de spectre ?
 - Différence de composition ?
 - Différence d'anisotropie ?
- ❖ Se peut-il qu'une source soit visible seulement par TA ?
 - Bien sûr !
- ❖ Son flux peut-il expliquer la différence de spectre Nord/Sud ?
 - En principe oui. Mais avec des implications sur les sources (densité, durée...)
- ❖ Est-ce compatible avec les résultats d'isotropie d'Auger ?
 - En principe oui. Mais est-ce probable ?
 - Étude en cours... (à suivre !)
- ❖ Déjà des contraintes importantes !

Questions diverses

- ✧ Sources transitoires ou continues ?
 - Quelle échelle de temps ?
- ✧ Densité de source ? (→ puissance des sources individuelles)
- ✧ Champs magnétiques Gal. et Extragal. ?
 - Distribution angulaire des UHECRs ? (en fonction de la rigidité)
 - Effets de magnification / suppression (caustiques magnétiques...)
 - Sélection de certains noyaux et/ou de certaines énergies (→ rigidité)
- ✧ Variabilité temporelle ?
 - Sur quelques décennies ? Voire quelques années ?

Déflexions dans le champ magnétique galactique

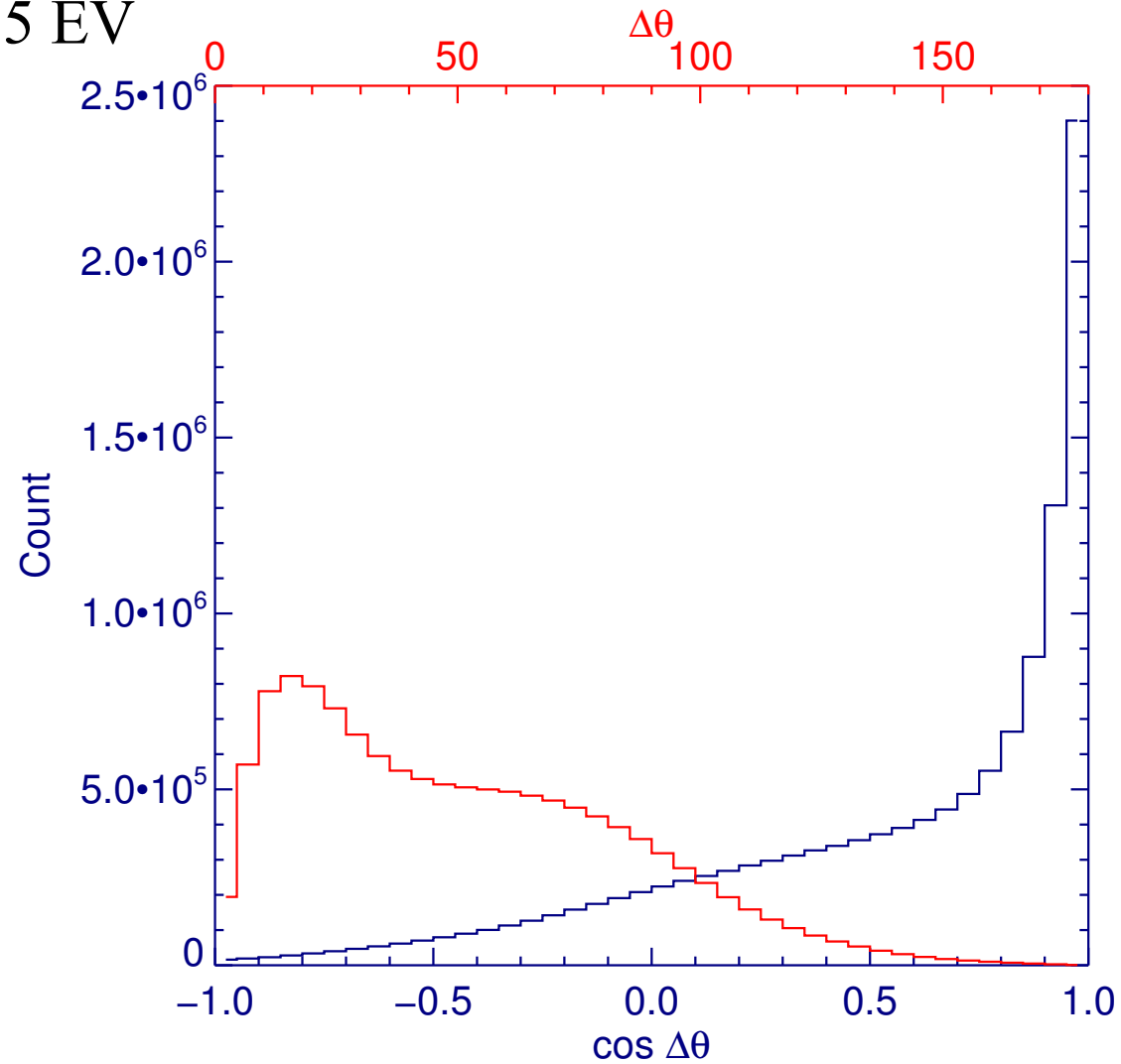
- ✧ Relate the direction of the UHECRs at the entrance of the Galaxy to the direction in which they are observed at Earth
- ✧ Backward propagation from the Earth to “out of the Galaxy”
- ✧ Inversion of the “transport matrix”
- ✧ Source amplification as a function of source position in the sky

→ Deflection maps for each particle rigidity

Rigidities	{	$R = 5 \text{ EV}$	$E = 5 \text{ EeV}$ for protons $E = 130 \text{ EeV}$ for Fe nuclei
		$R = 16 \text{ EV}$	$E = 95 \text{ EeV}$ for C nuclei
		$R = 63 \text{ EV}$	$E = 63 \text{ EeV}$ for protons
		$R = 130 \text{ EV}$	$E = 130 \text{ EeV}$ for protons

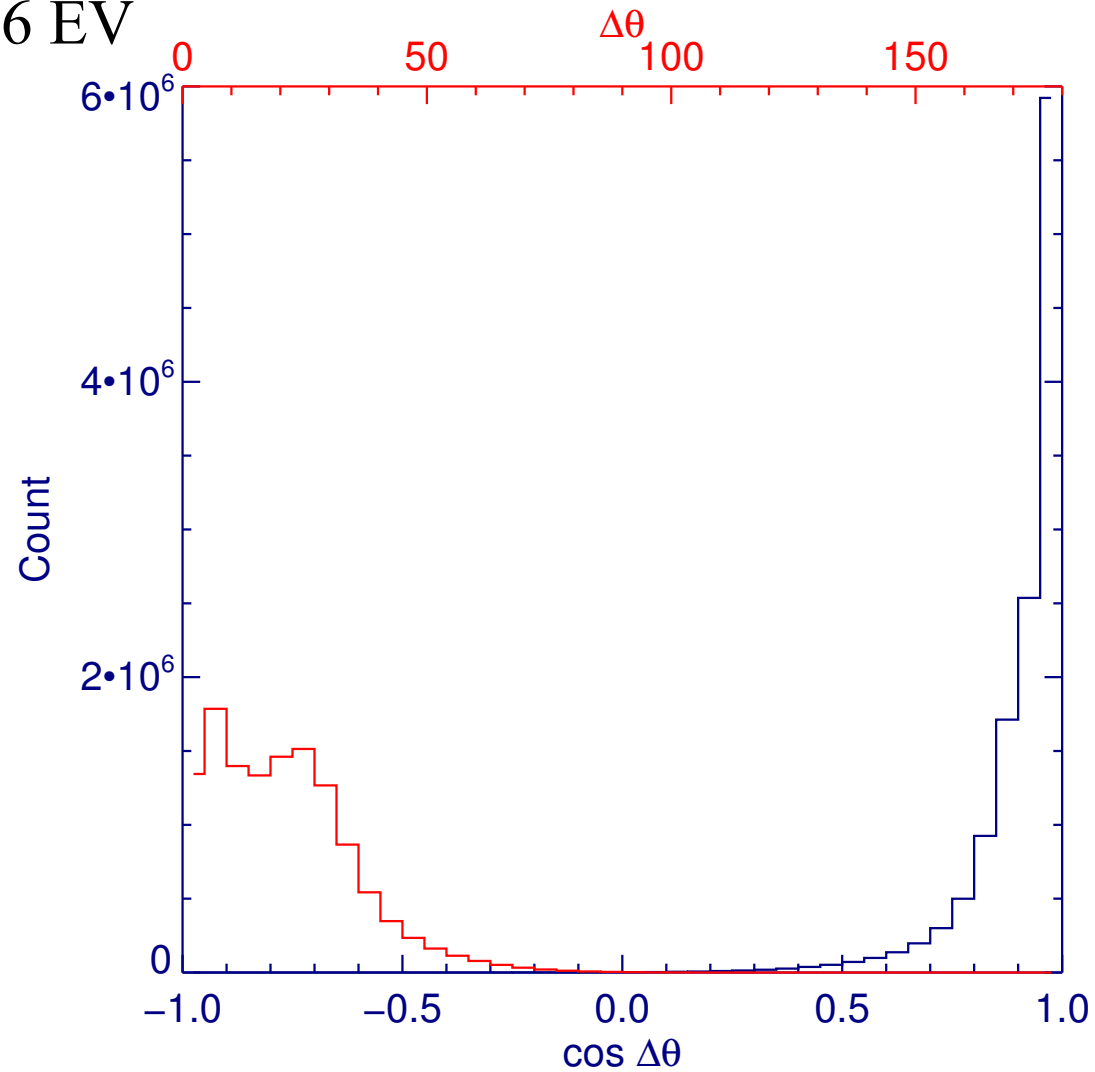
Deflection histogram

Rigidity = 5 EV



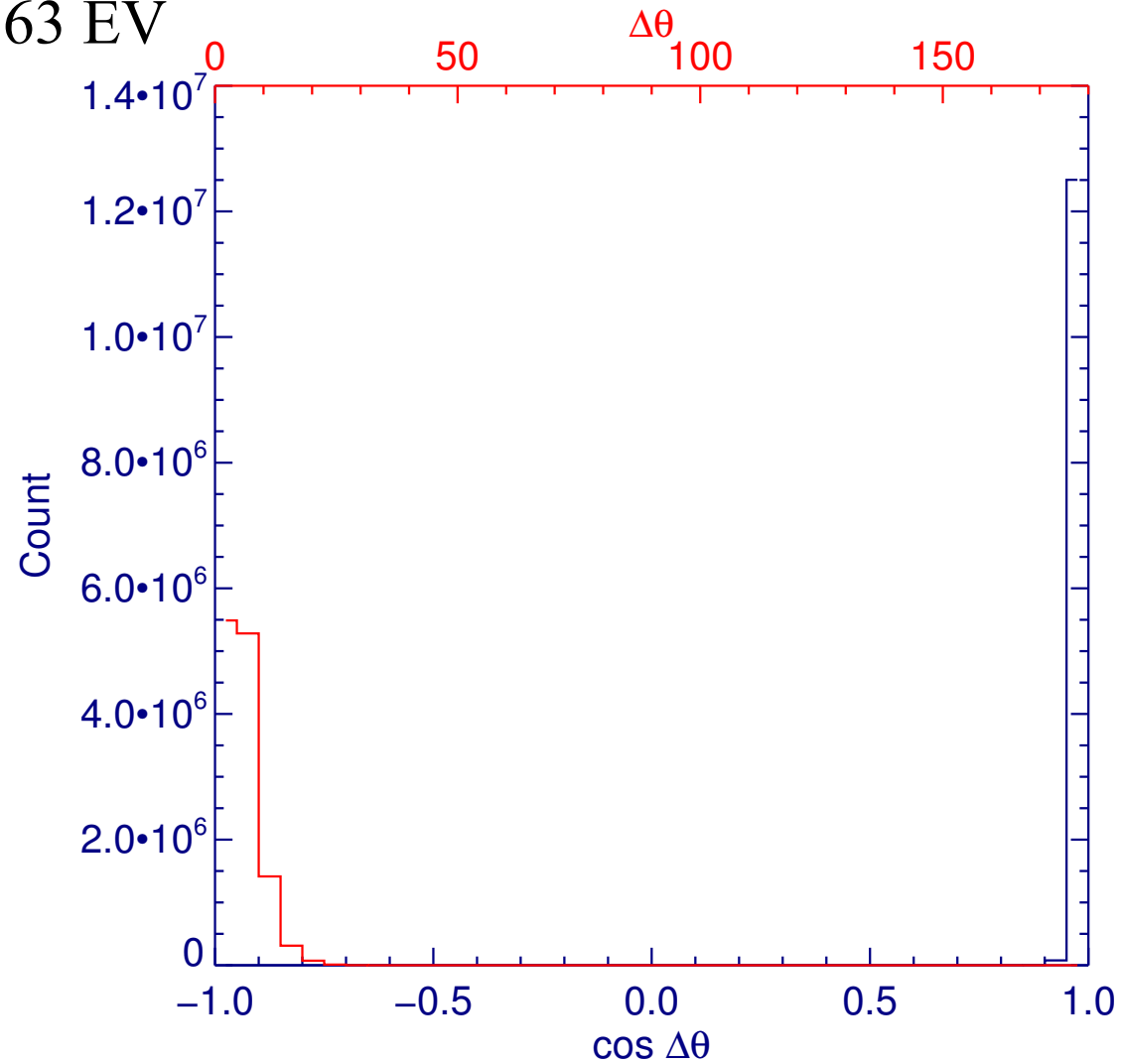
Deflection histogram

Rigidity = 16 EV



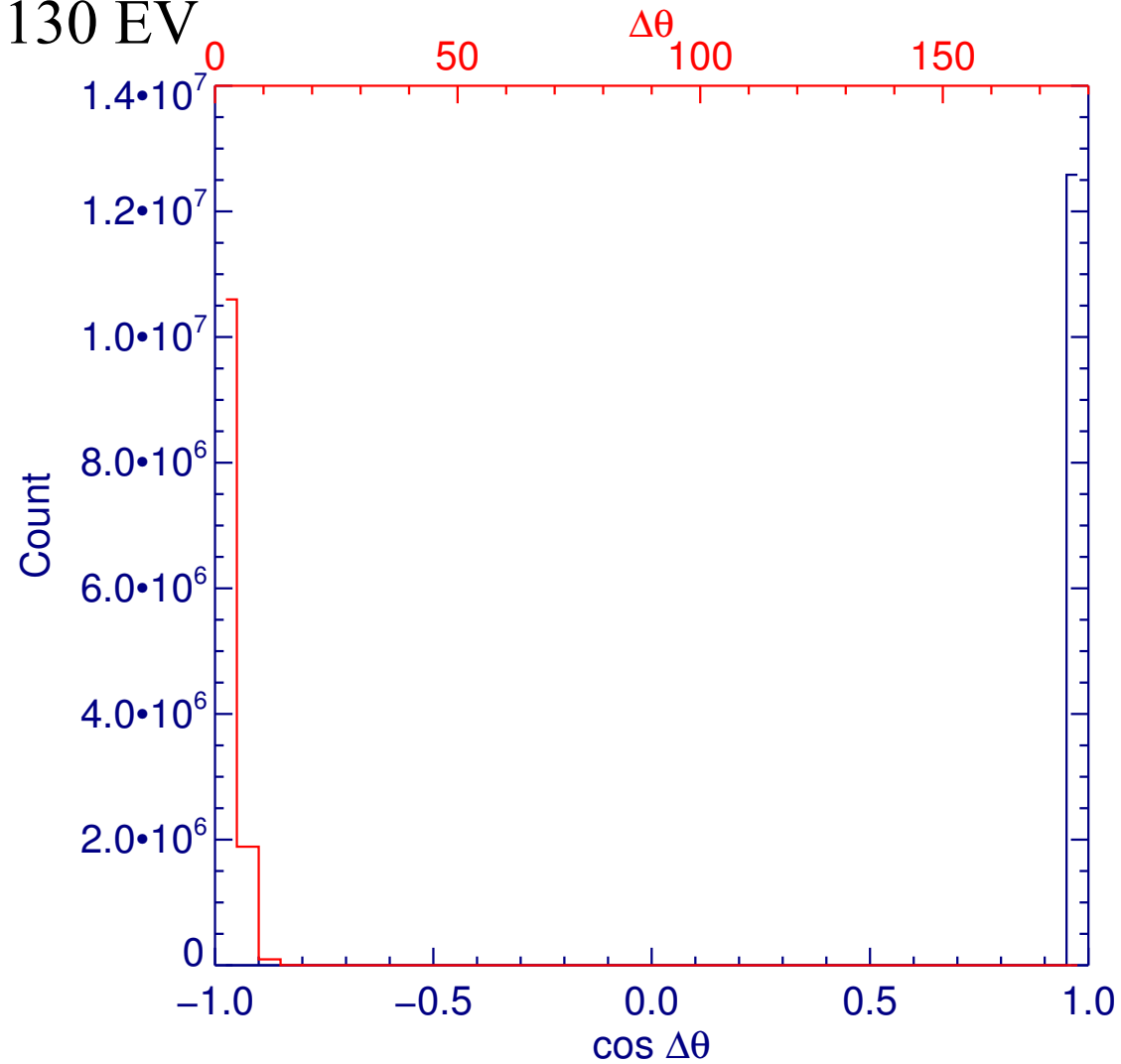
Deflection histogram

Rigidity = 63 EV



Deflection histogram

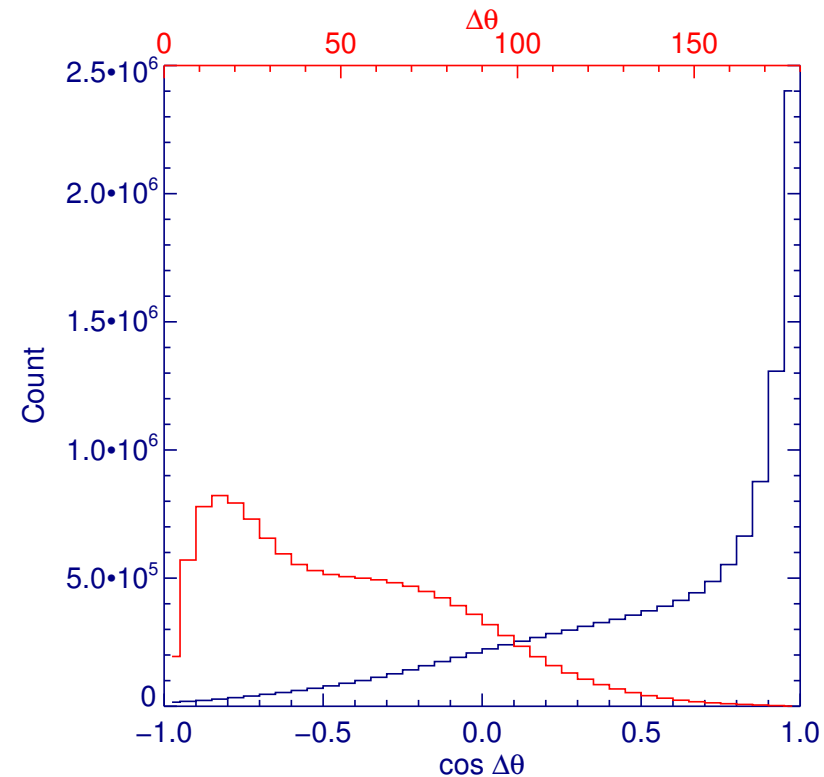
Rigidity = 130 EV



Deflection and anisotropies...

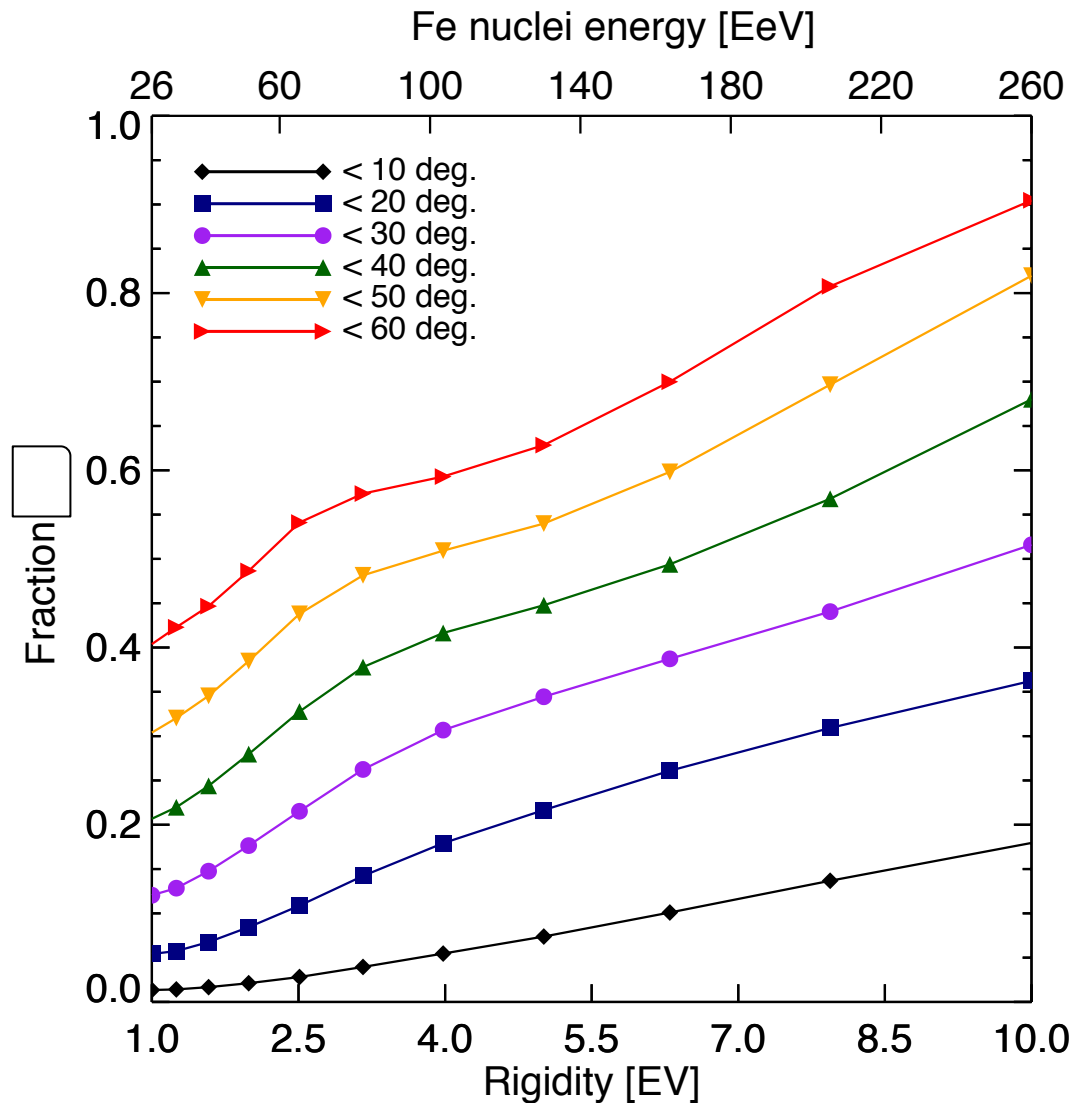
Fe nuclei at 100 EeV

Large deflections, but a significant fraction of the particles have deflection angles smaller than the source separation angle



Deflection and anisotropies...

Fractions of UHECRs with deflection smaller than a given angle



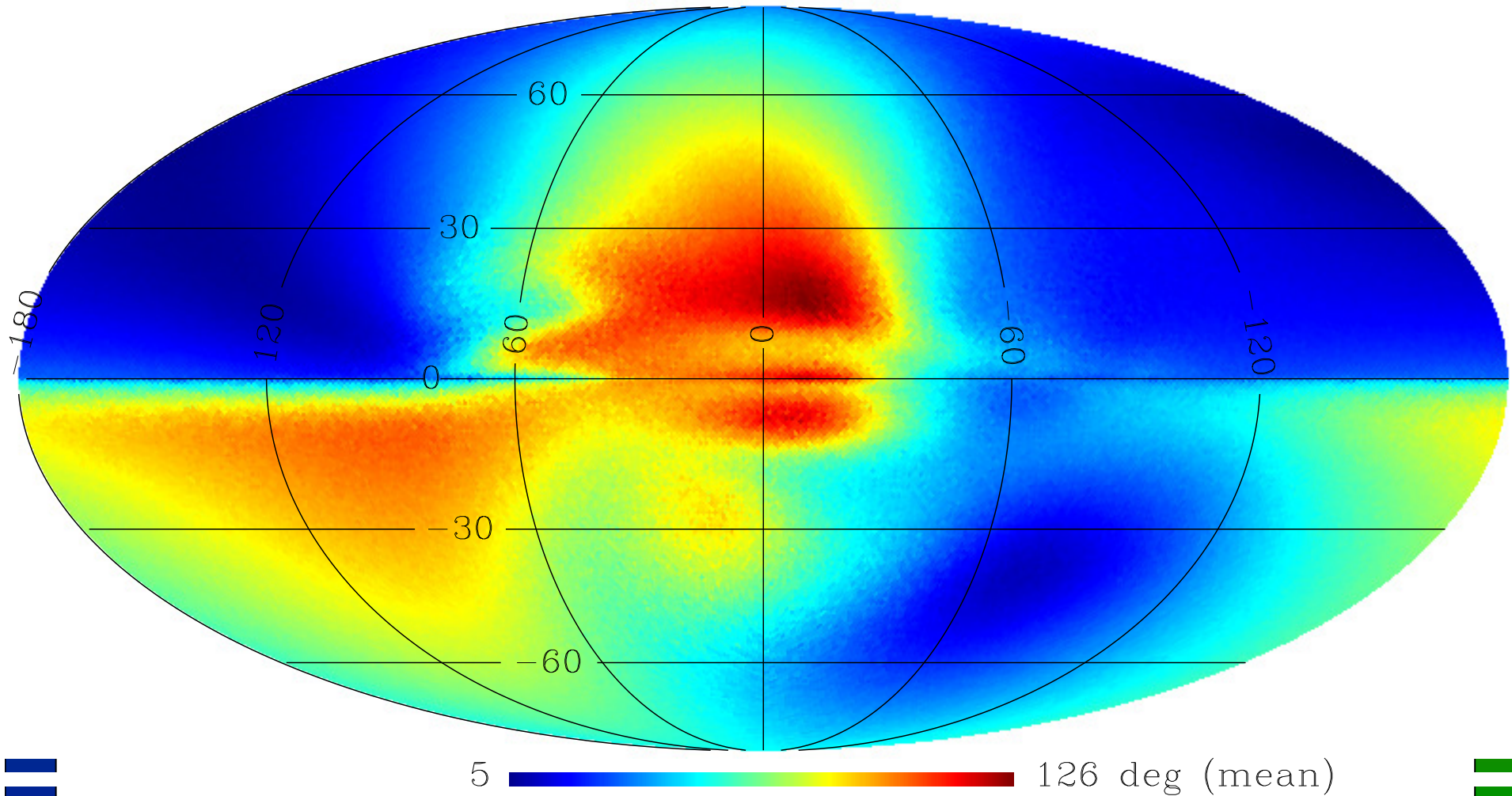
30% of 100 EeV Fe nuclei are deflected by less than 30°

The low-deflection directions can be known!

(if the magnetic field model is reliable)

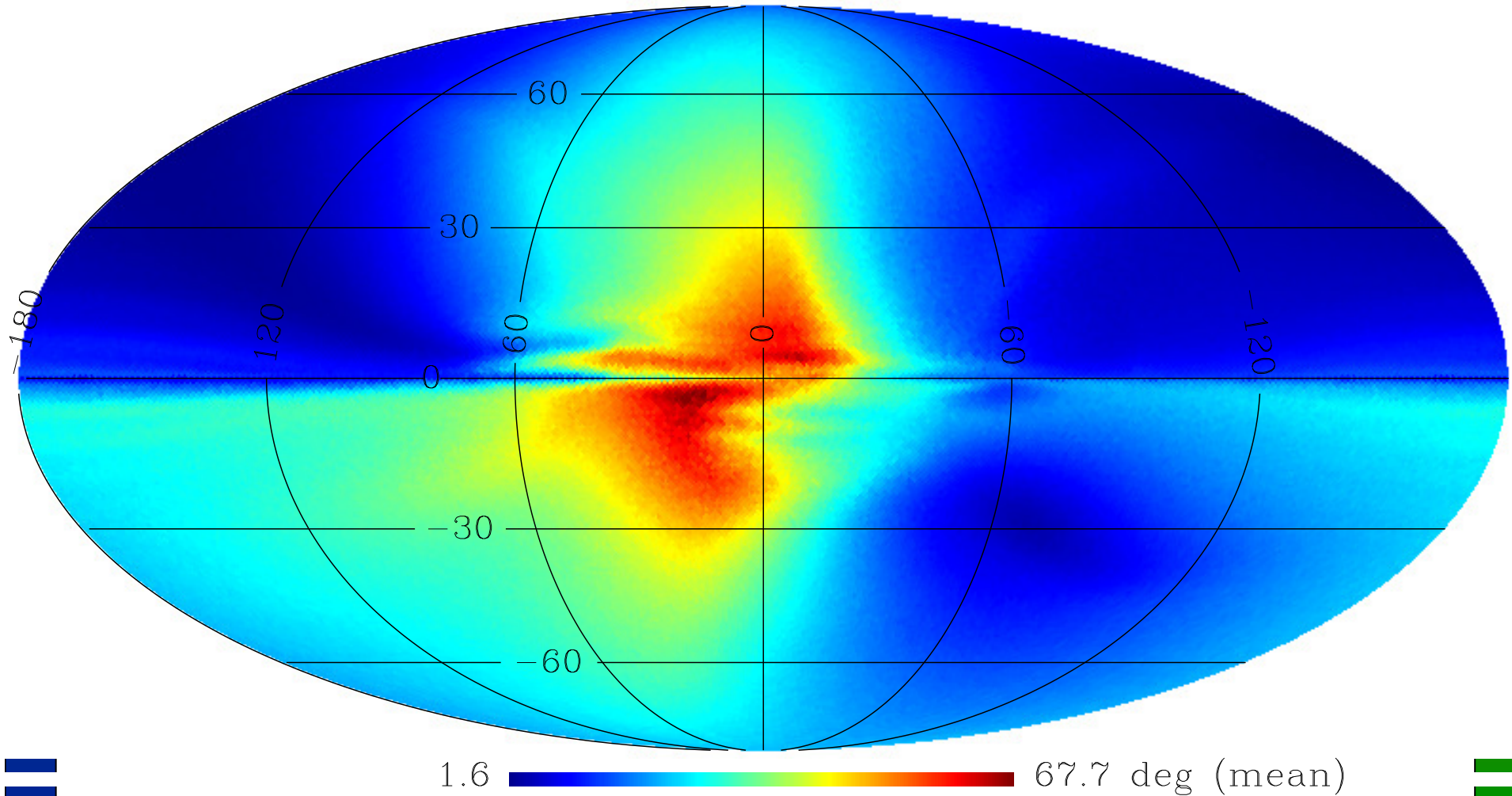
Backward deflection map

Rigidity = 5 EV



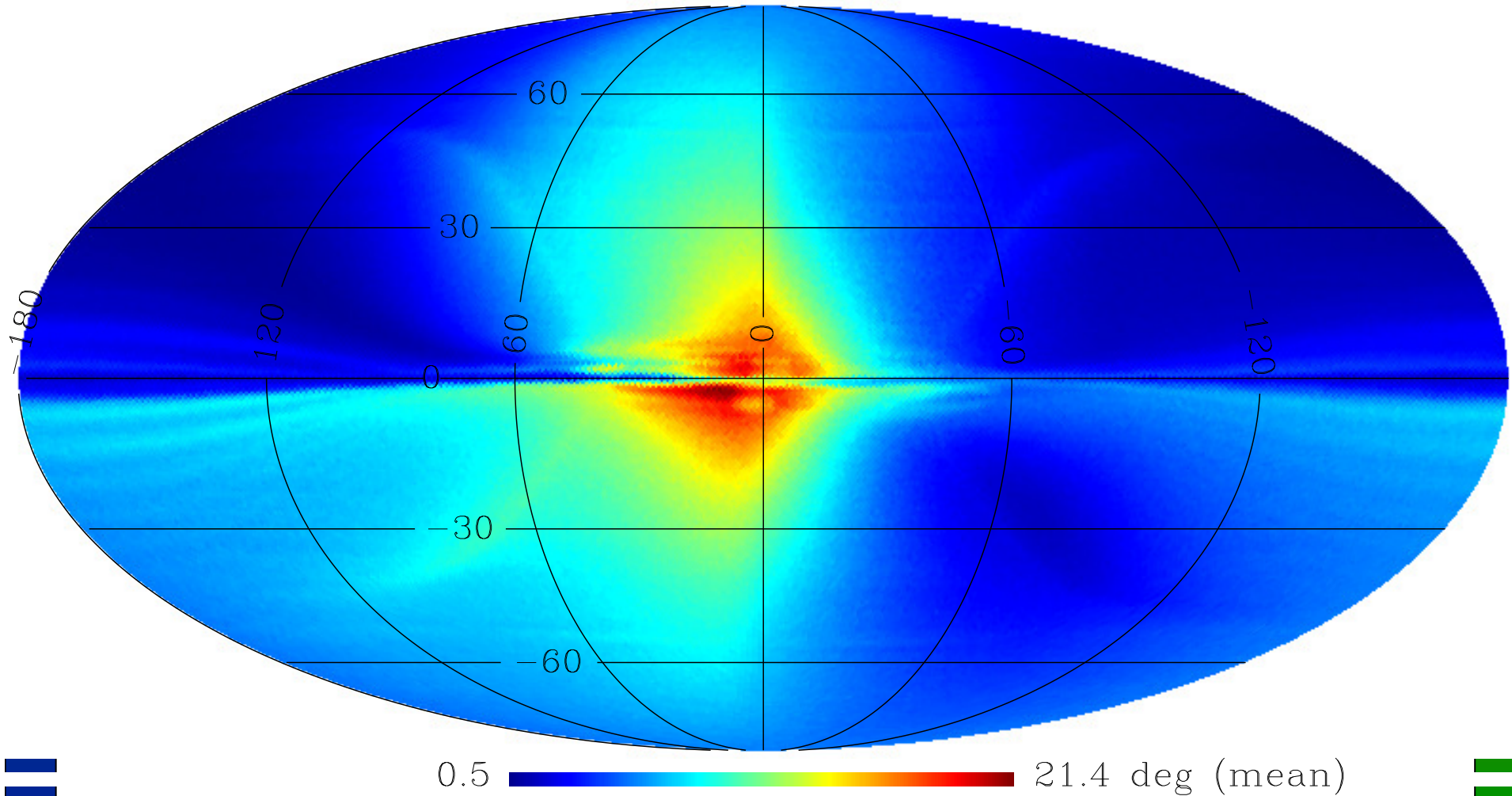
Backward deflection map

Rigidity = 16 EV



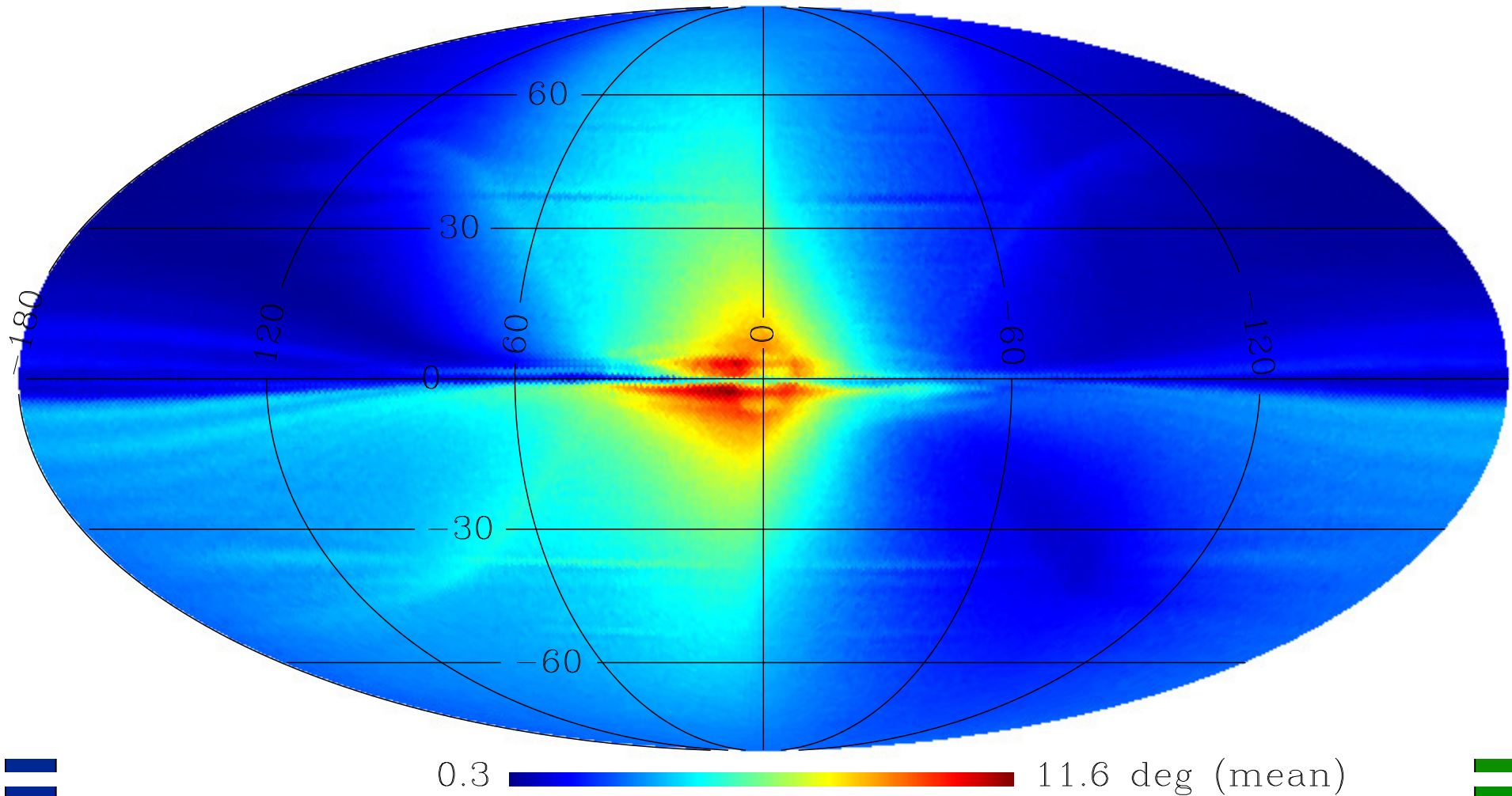
Backward deflection map

Rigidity = 63 EV



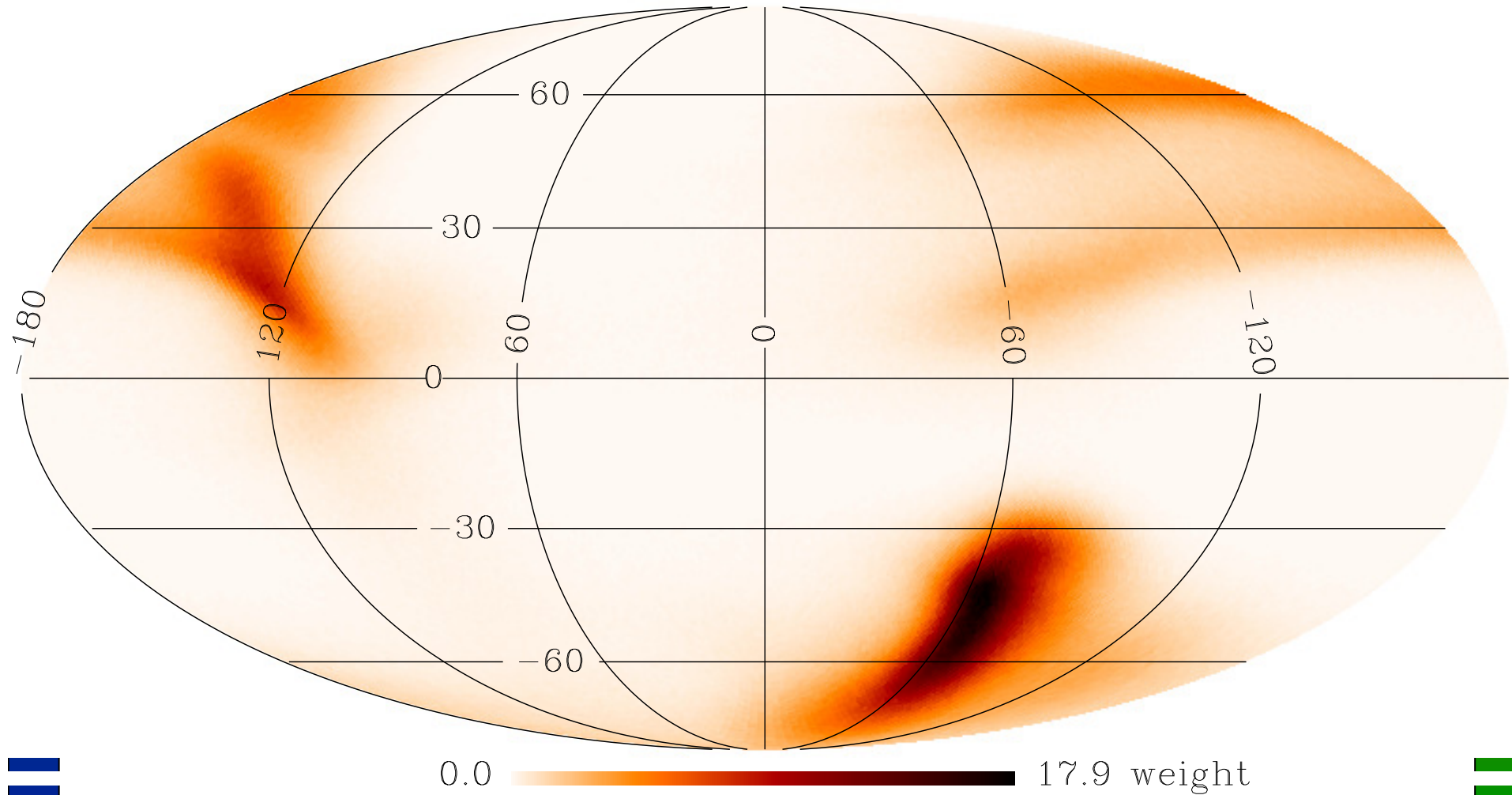
Backward deflection map

Rigidity = 130 EV



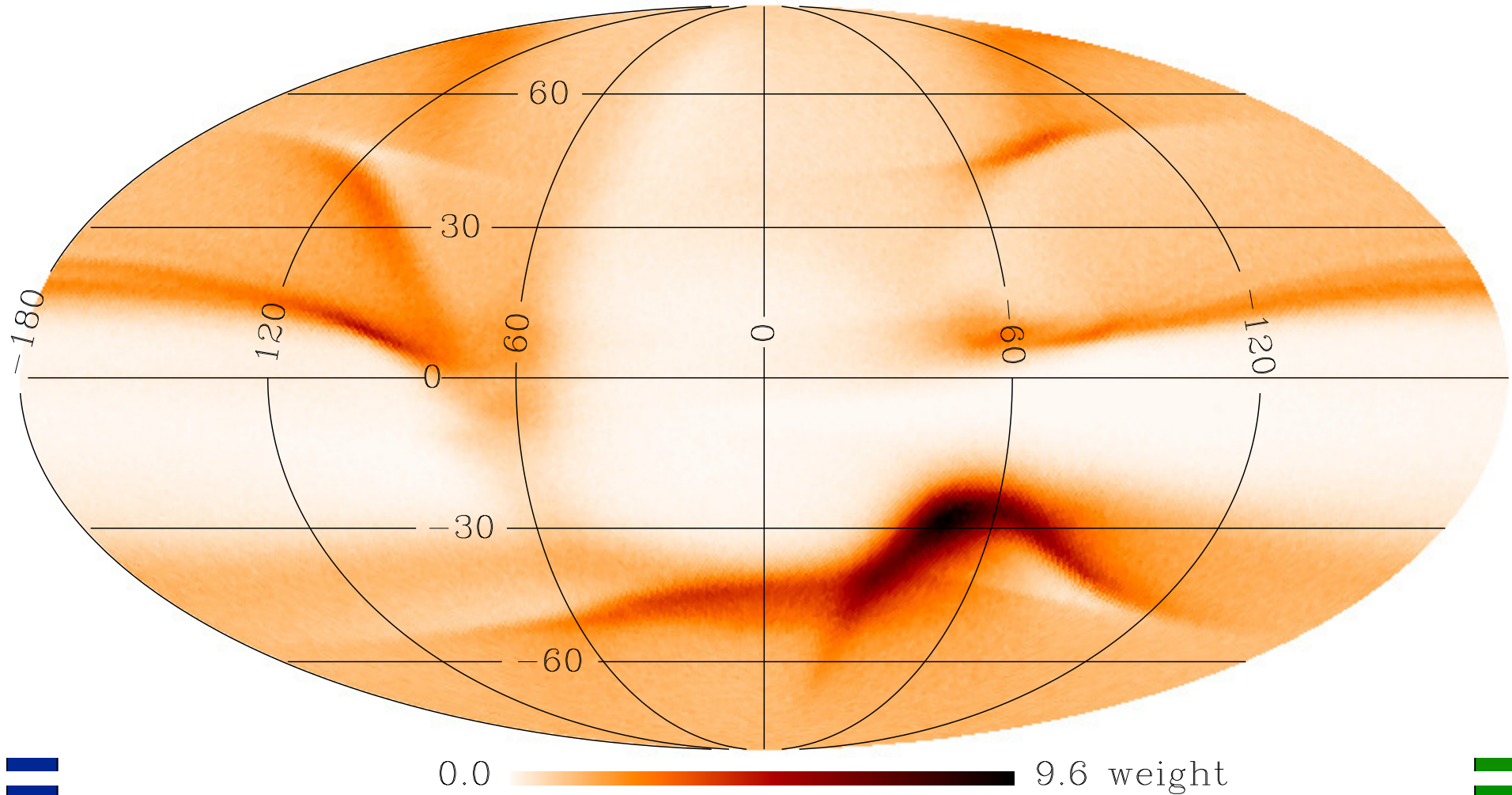
Magnification map

Rigidity = 5 EV



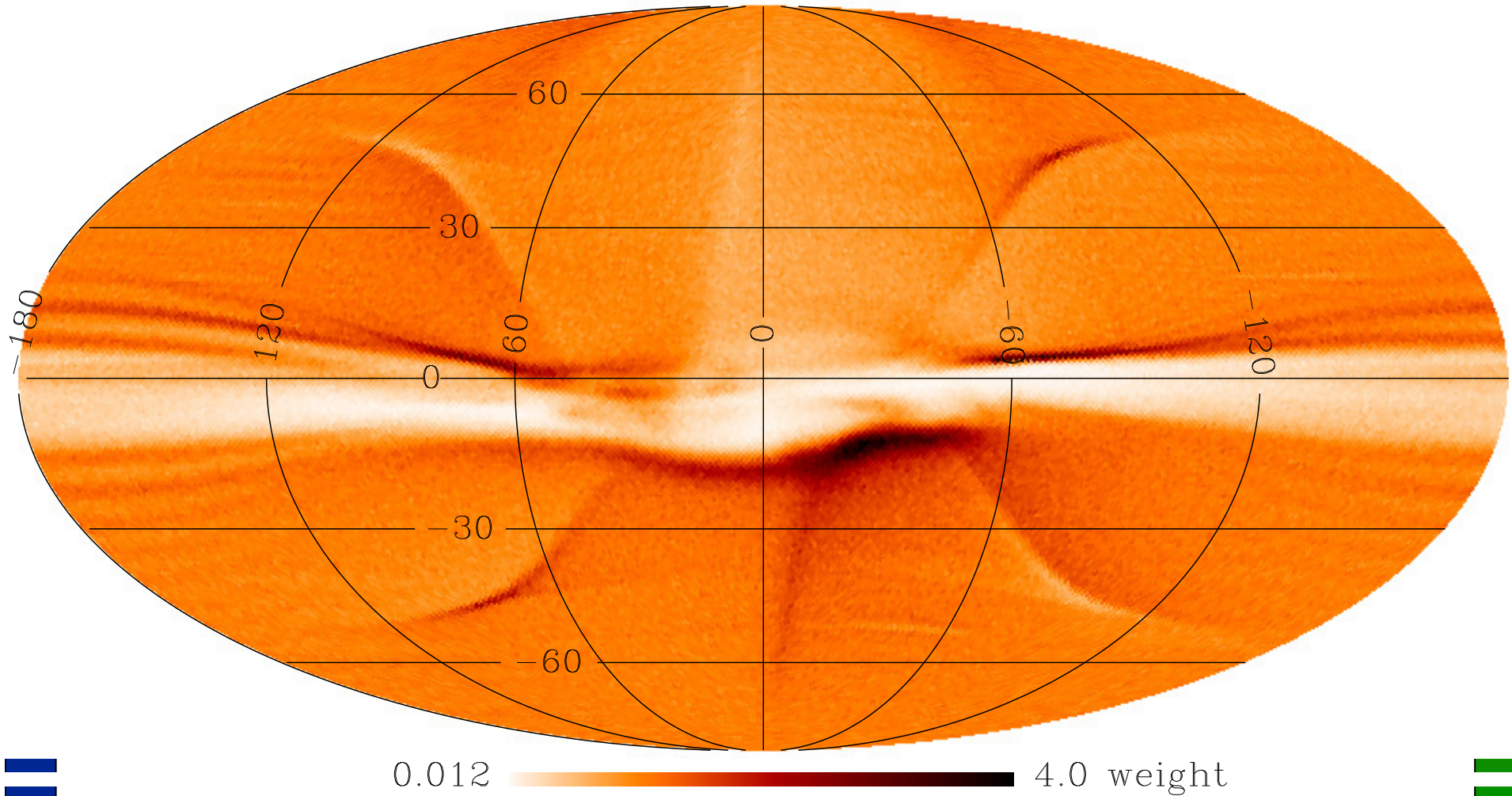
Magnification map

Rigidity = 16 EV



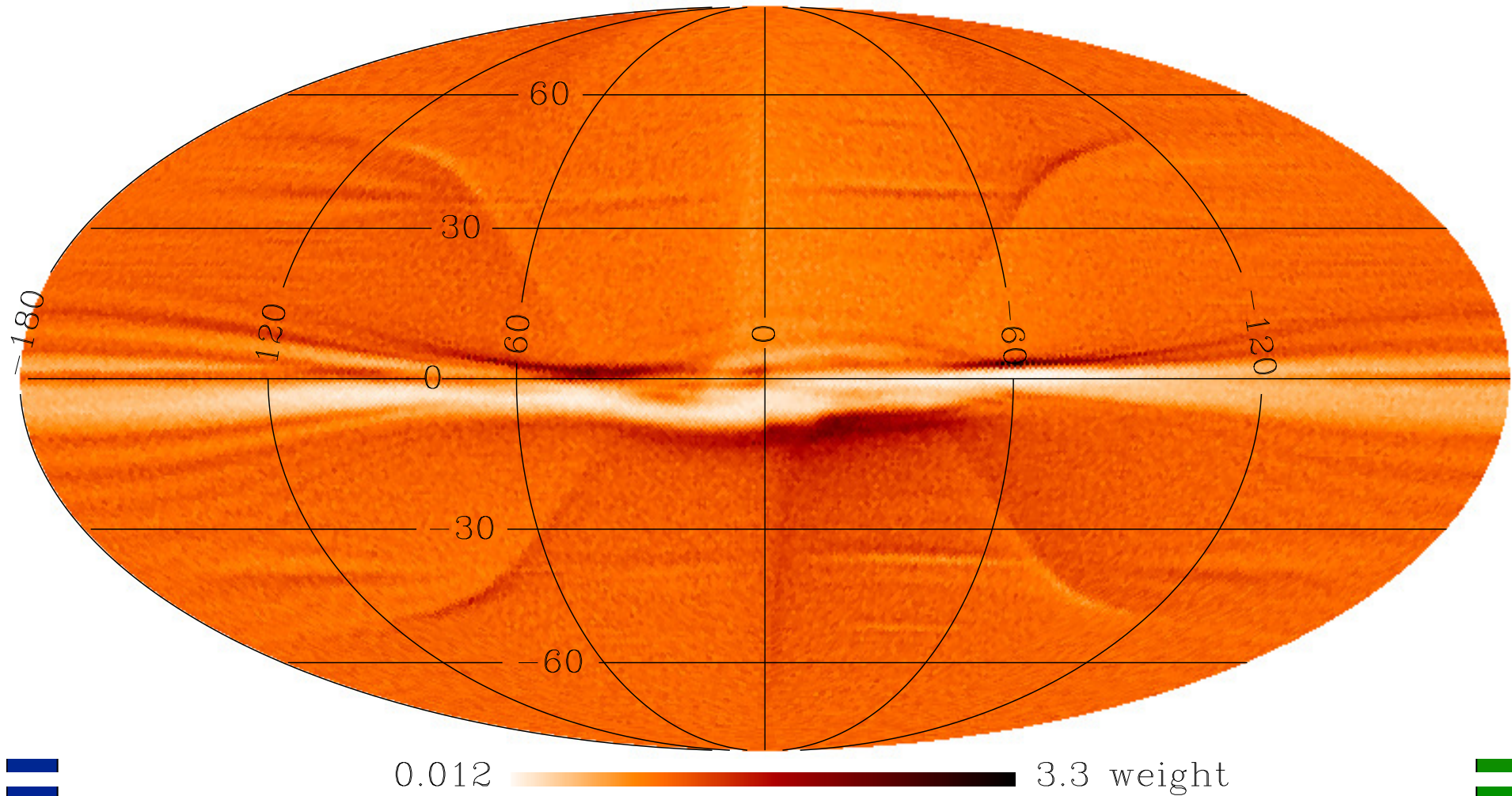
Magnification map

Rigidity = 63 EV

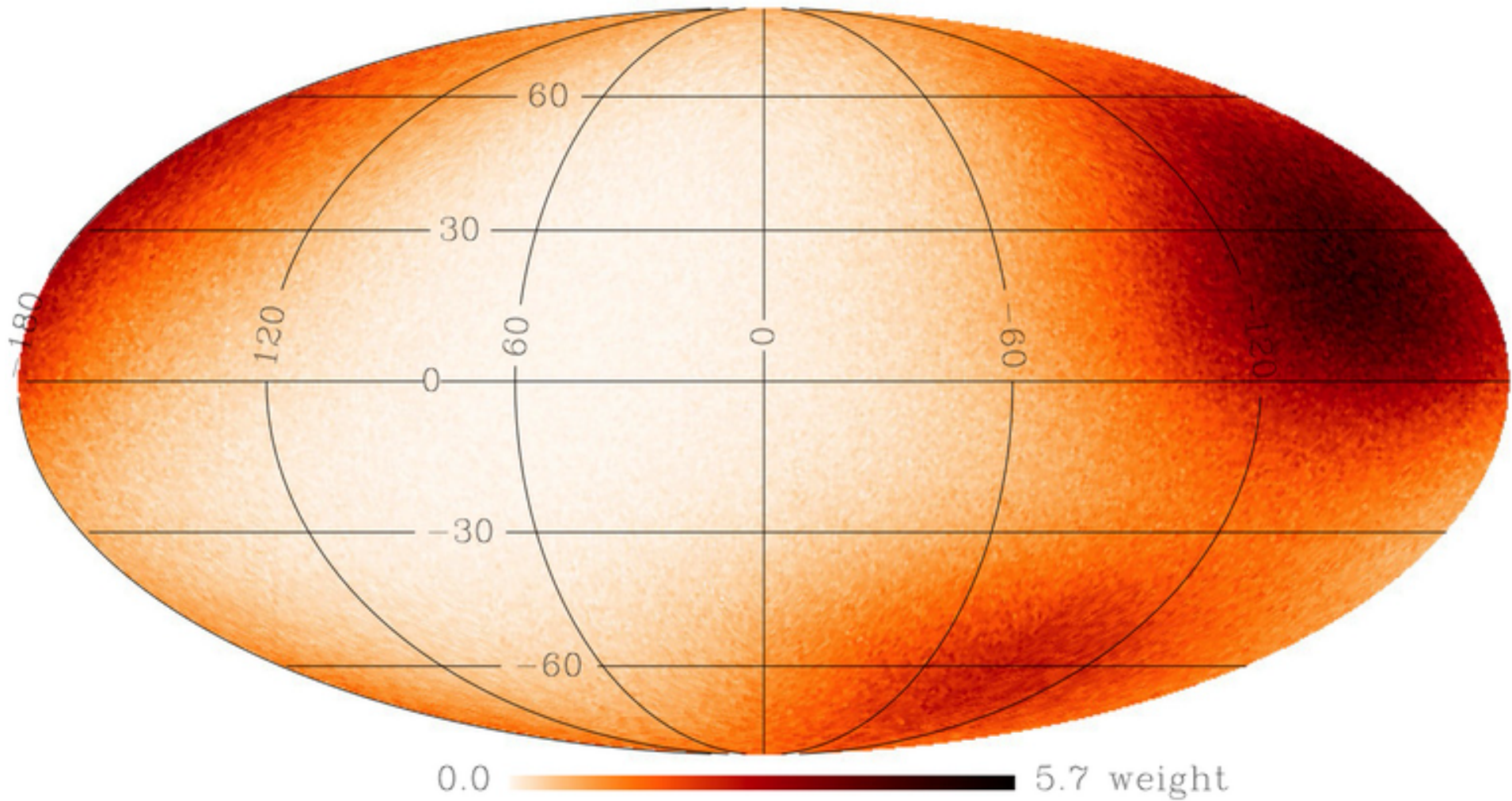


Magnification map

Rigidity = 130 EV

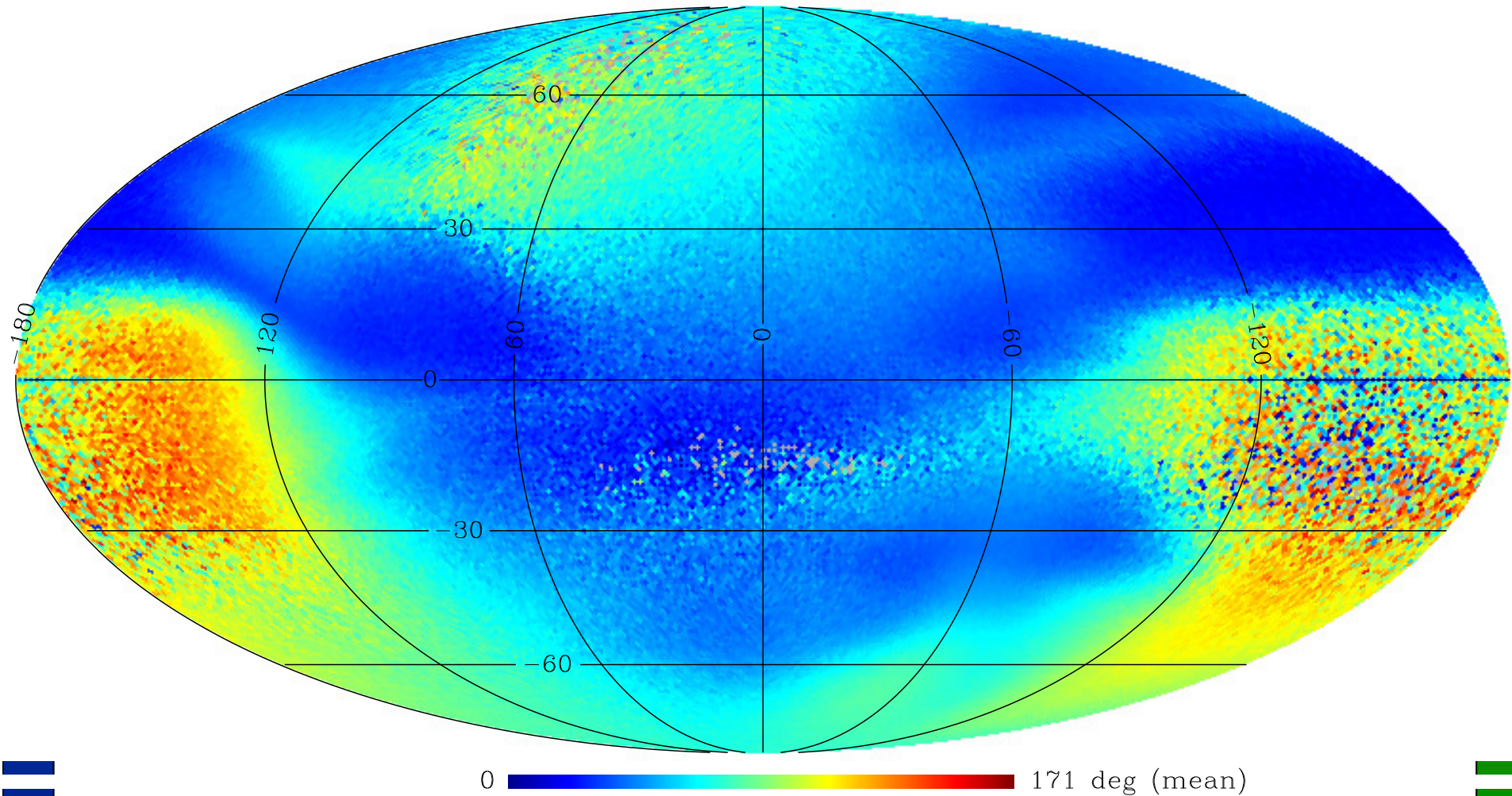


Magnification map



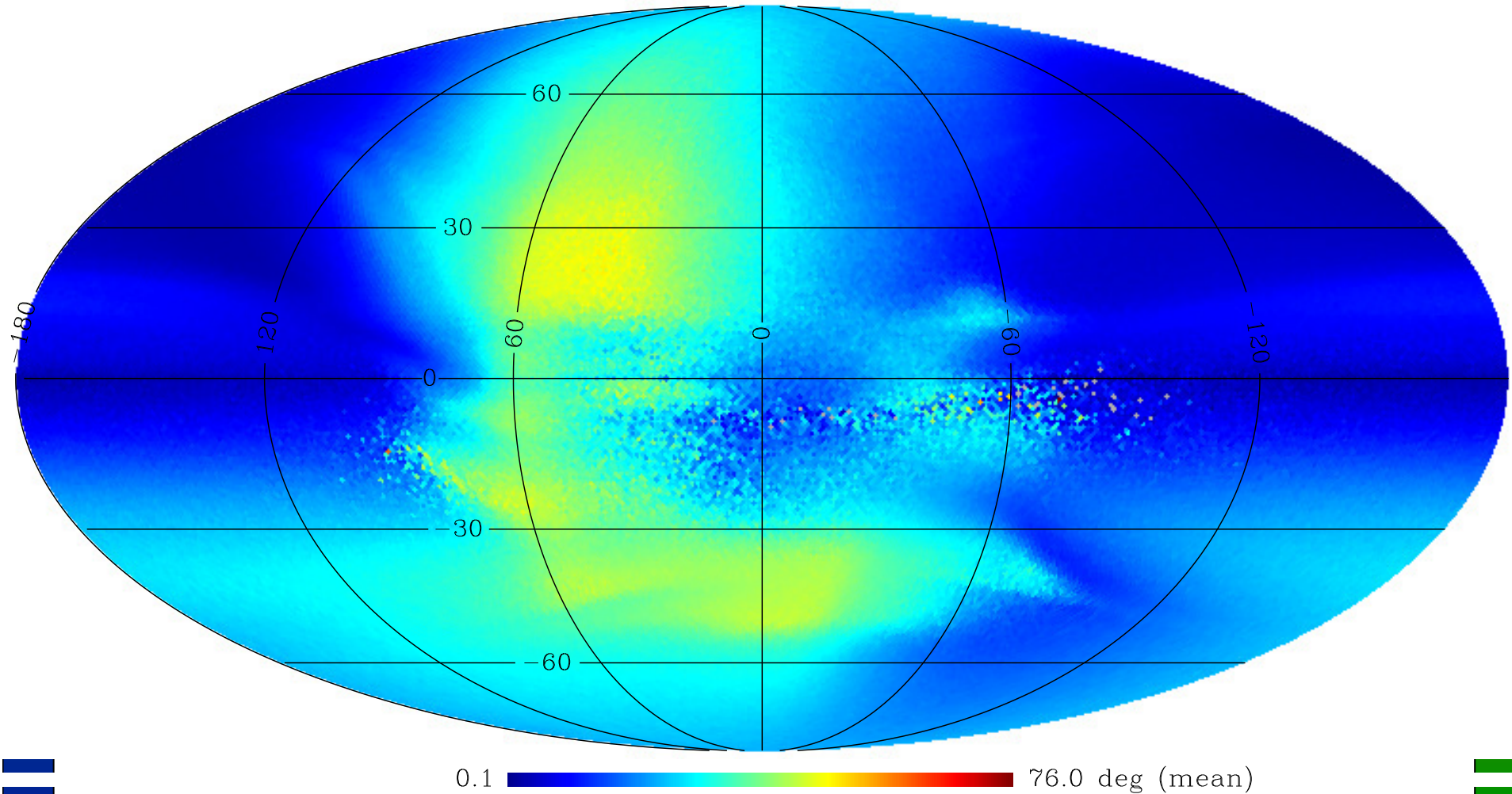
Forward deflection map

Rigidity = 5 EV



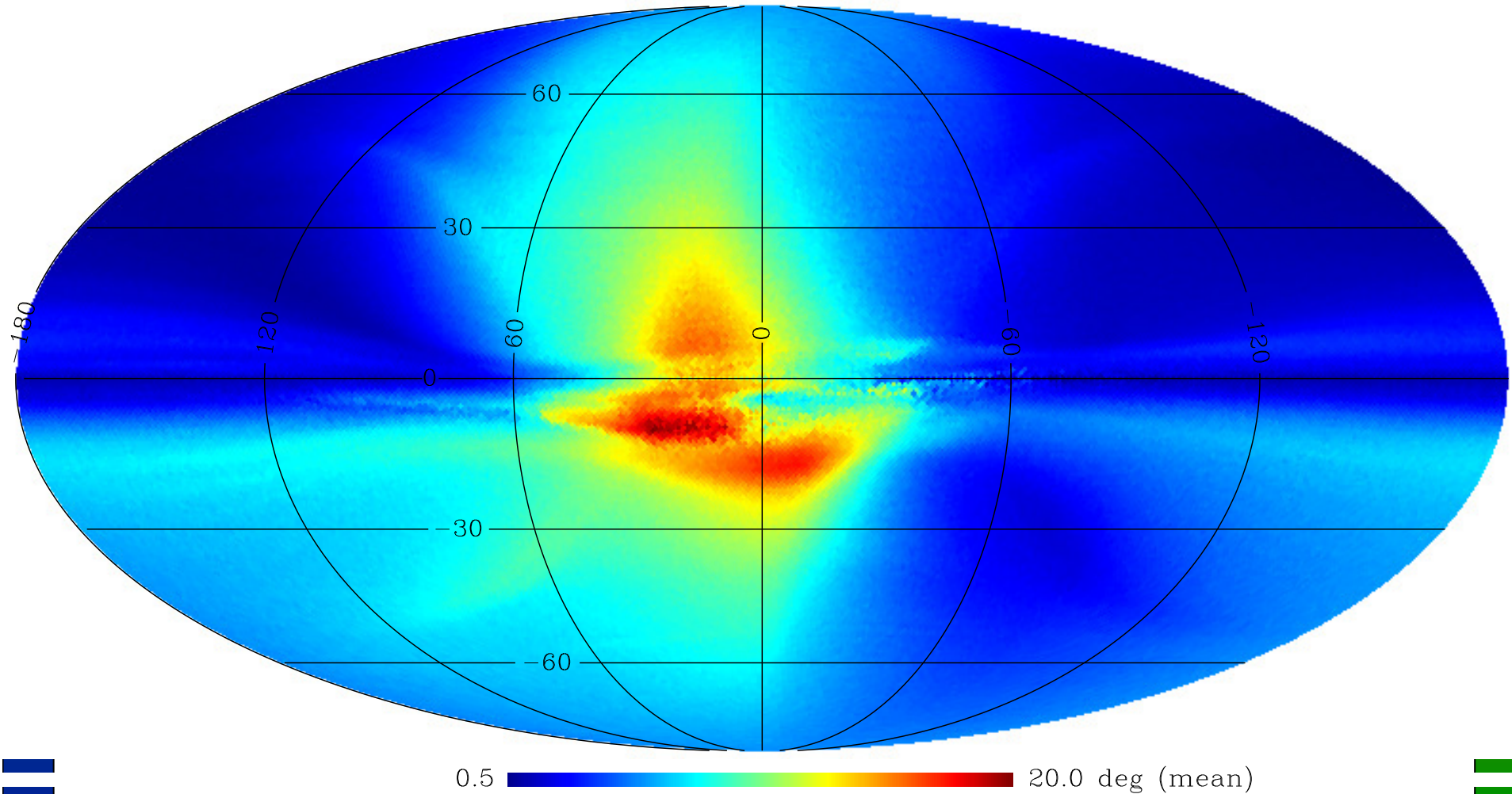
Forward deflection map

Rigidity = 16 EV



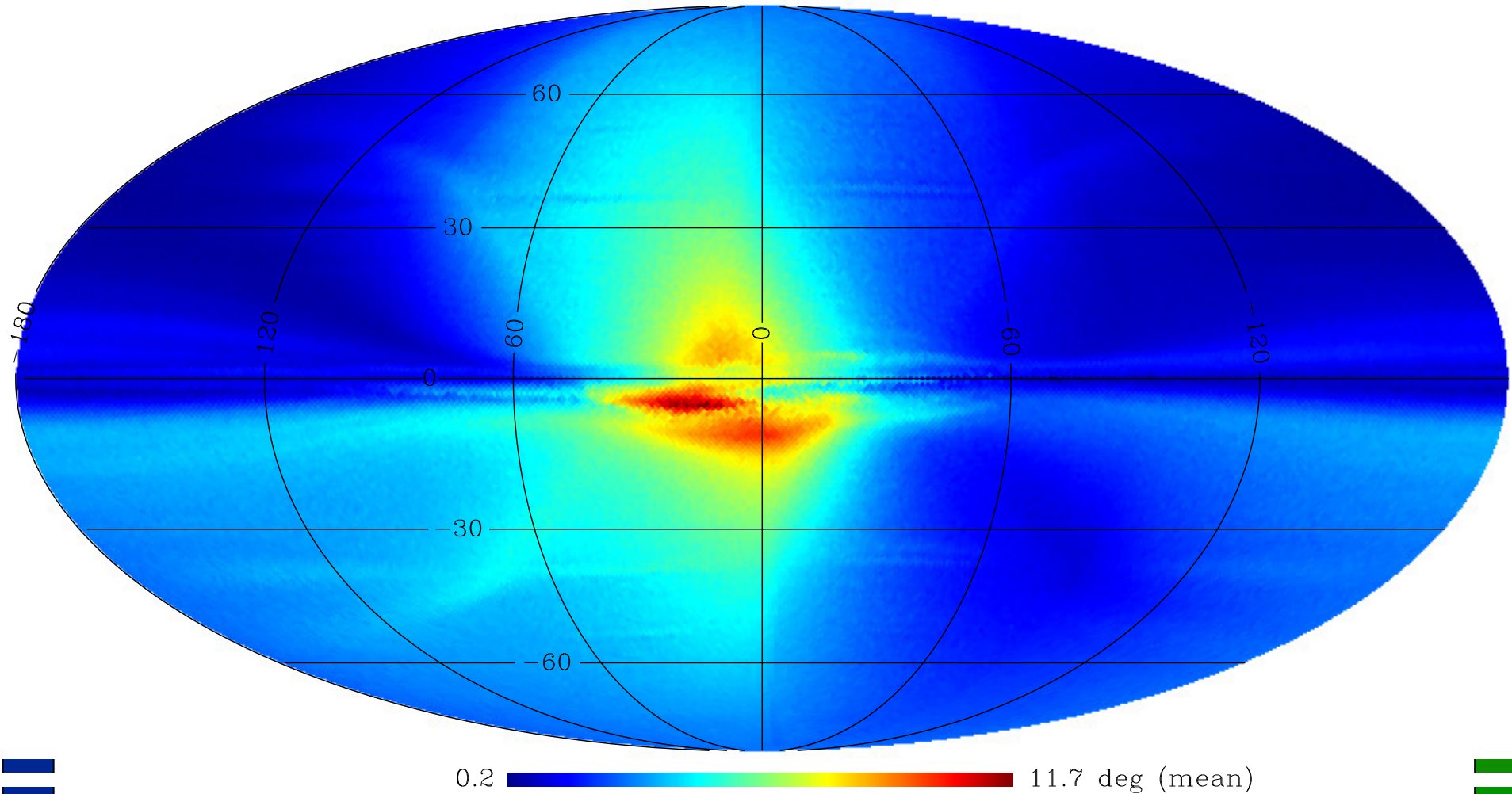
Forward deflection map

Rigidity = 63 EV



Forward deflection map

Rigidity = 130 EV



Possible cause of a hotspot

✧ Dominant local source

- Which direction?
- Which composition?
- Which maximum energy?
- Which power?

✧ Magnetic amplification

- Structure in the deflection/magnification maps
- Rigidity-dependent
- NB: still requires a local source! (Liouville's theorem → an isotropic sky cannot be deisotropize by magnetic structures)

✧ Bursting source with small time dispersion!

- Constraints on the galactic and extragalactic magnetic fields

Lessons from a tentative hotspot

- Based on the Auger data, such a hotspot was not expected
- North and South skies are different, despite apparent anisotropy at lower energy!
- Good news: the low-E isotropy is probably due to near-isotropic source distribution, rather than complete CR-direction randomization by magnetic fields!
- No intrinsic limitation to source study (Nature is kind after all ;))
- Some distinct sources are already appearing, and will become clear with larger statistics!
- Beginning of region-dependent studies!
- Cosmic-ray astronomy can start!

Lessons from a tentative hotspot

- The recent results reinforces the idea that full-sky coverage is crucial!
- It also reminds us that it's always important to open new windows.
(Some people were saying something like “TA will be useless, because it is much smaller than Auger”: these people are being proven wrong!)
 - First look, then talk! ;)

A space mission can look at the whole sky in exactly the same way!

- Expect the unexpected!

Perspective studies

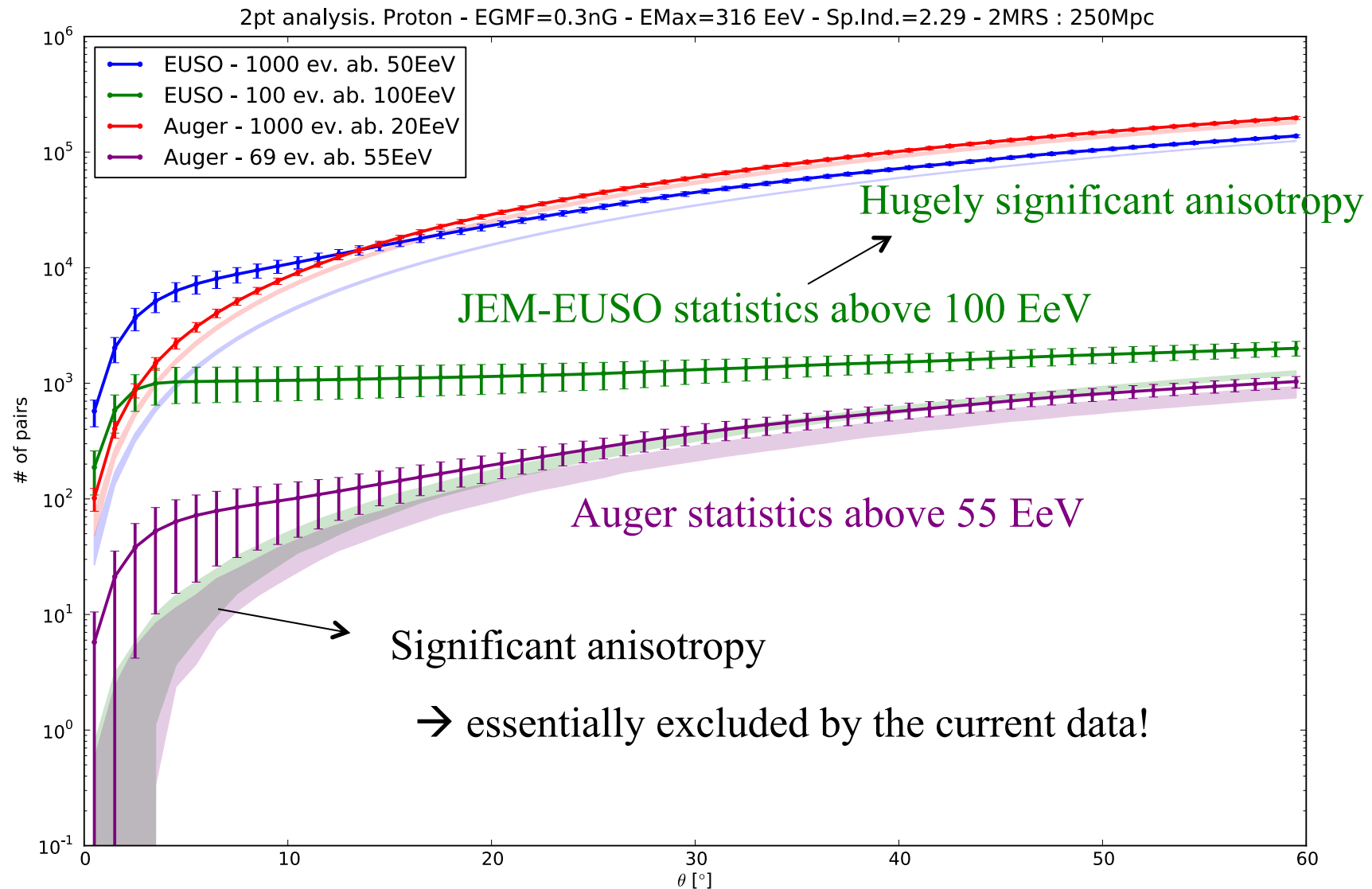
- ✧ Differences between energy spectra in different regions
 - Related to different source distributions
 - Related to different source power, proton- E_{\max}
 - Related to different source composition
 - Related to different intervening magnetic field structures
- ✧ Different skies, different compositions, different patterns
- ✧ NB: most probably, K-EUSO won't be large enough to provide crucial information in this way, but at least it will start and demonstrate the potential power, make first detection and/or set first upper limits (→ first constraints on the models)
- ✧ For these studies, uniform full-sky coverage is very important!
By the way, why would the UHECR sky be ordered according to Earth's hemispheres?

Questions diverses

- ✧ Sources transitoires ou continues ?
 - Quelle échelle de temps ?
- ✧ Densité de source ? (→ puissance des sources individuelles)
- ✧ Champs magnétiques Gal. et Extragal. ?
 - Distribution angulaire des UHECRs ? (en fonction de la rigidité)
 - Effets de magnification / suppression (caustiques magnétiques...)
 - Sélection de certains noyaux et/ou de certaines énergies (→ rigidité)
- ✧ Variabilité temporelle ?
 - Sur quelques décennies ? Voire quelques années ?

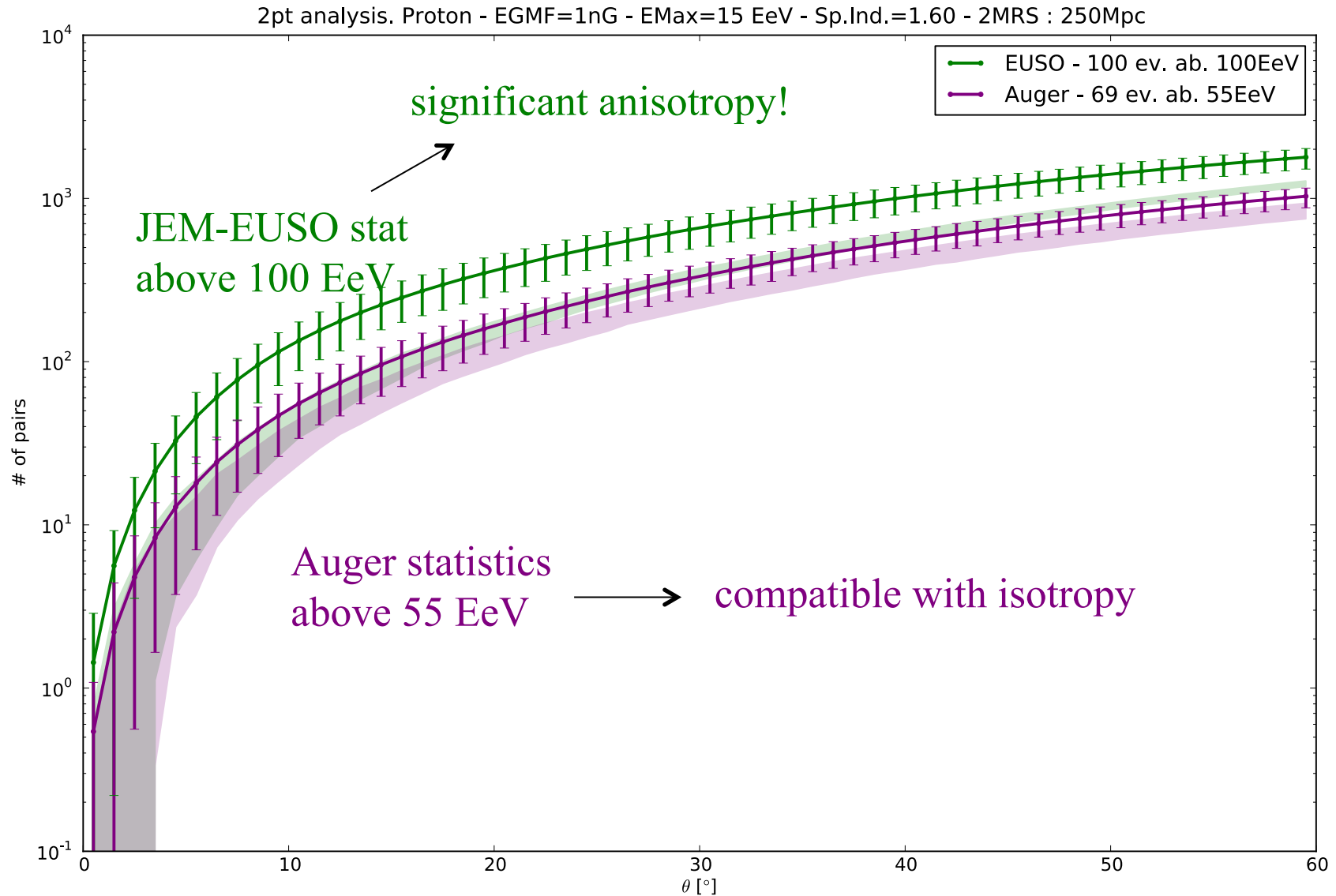
Expected 2-point correlation functions

Proton-dominated case ($E_{\max} = 300 \text{ EeV}$), $n_s = 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$



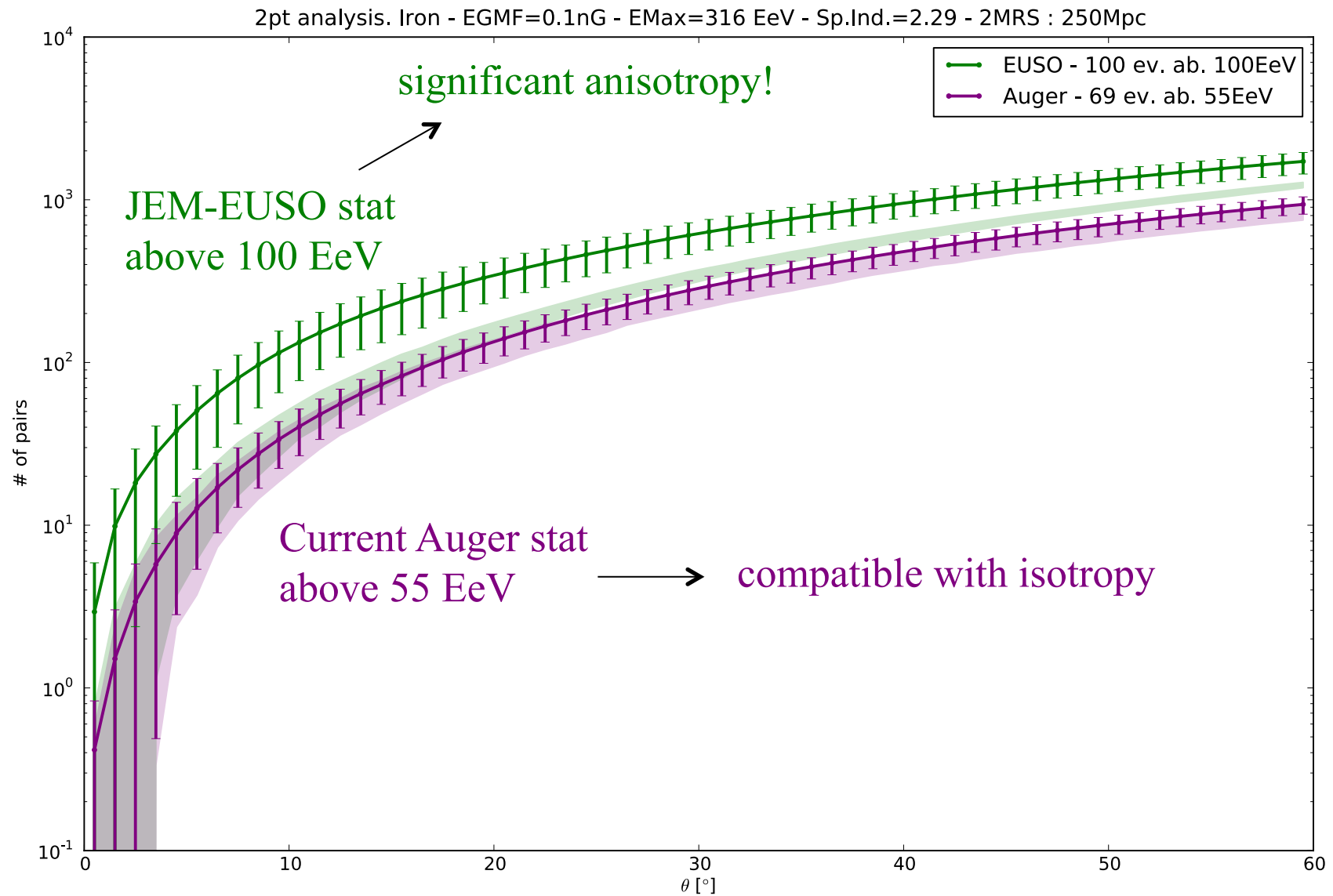
Expected 2-point correlation functions

$E_{\max}(p) = 15 \text{ EeV}$ (heavy-dominated) $n_s = 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$



Expected 2-point correlation functions

“Pure Fe” model, $n_s = 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$



Comment aller plus loin ?

✧ Augmenter la surface de détection !

→ Passer de 3.000 km² à 500.000.000 km² !

200 RC par an dans Auger \Leftrightarrow 1 par seconde sur la planète !

✧ C'est difficile ?

→ Euh... Ligo/Virgo, c'était facile ?

✧ Sénèque :

« Non quia difficilia sunt non audemus, sed quia non audemus difficilia sunt. »

✧ De plus, nous avons au moins une piste crédible !

→ EUSO ! (Extreme Universe Space Observatory)

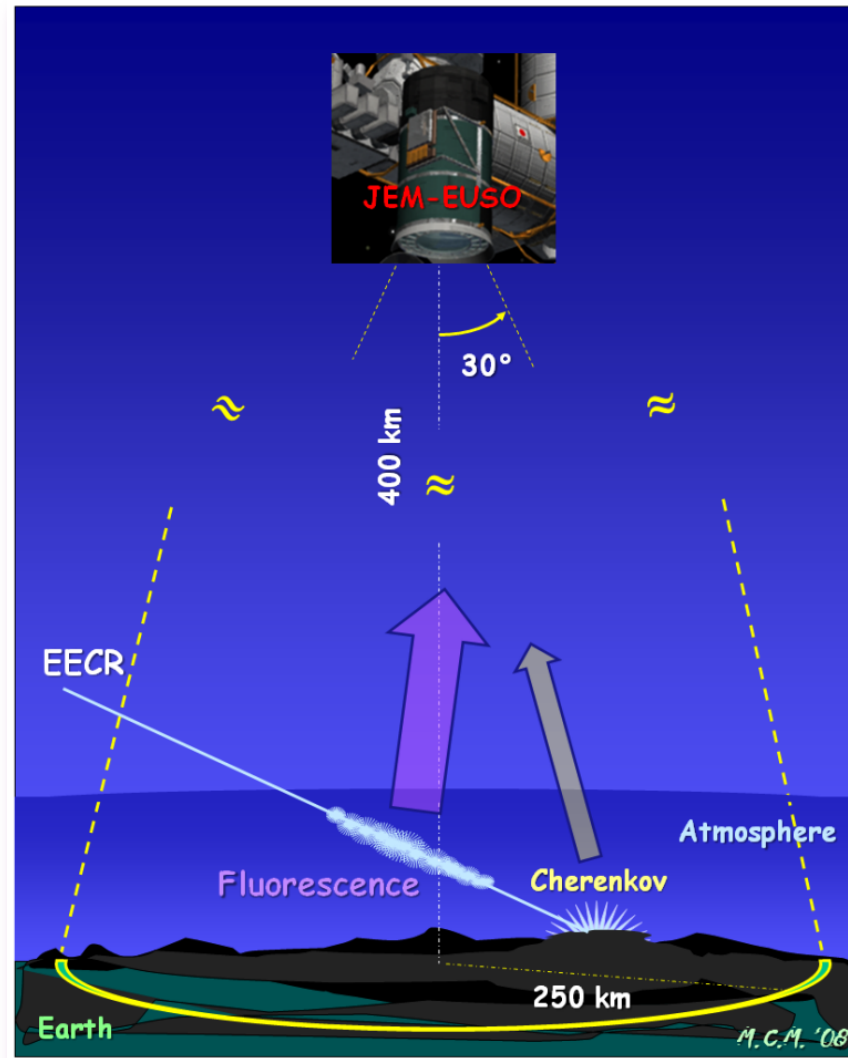
La solution ? L'espace !

- ✧ Le vrai détecteur (primaire) de rayons cosmiques d'ultra-haute énergie est l'atmosphère terrestre → en observer la plus grande part possible !



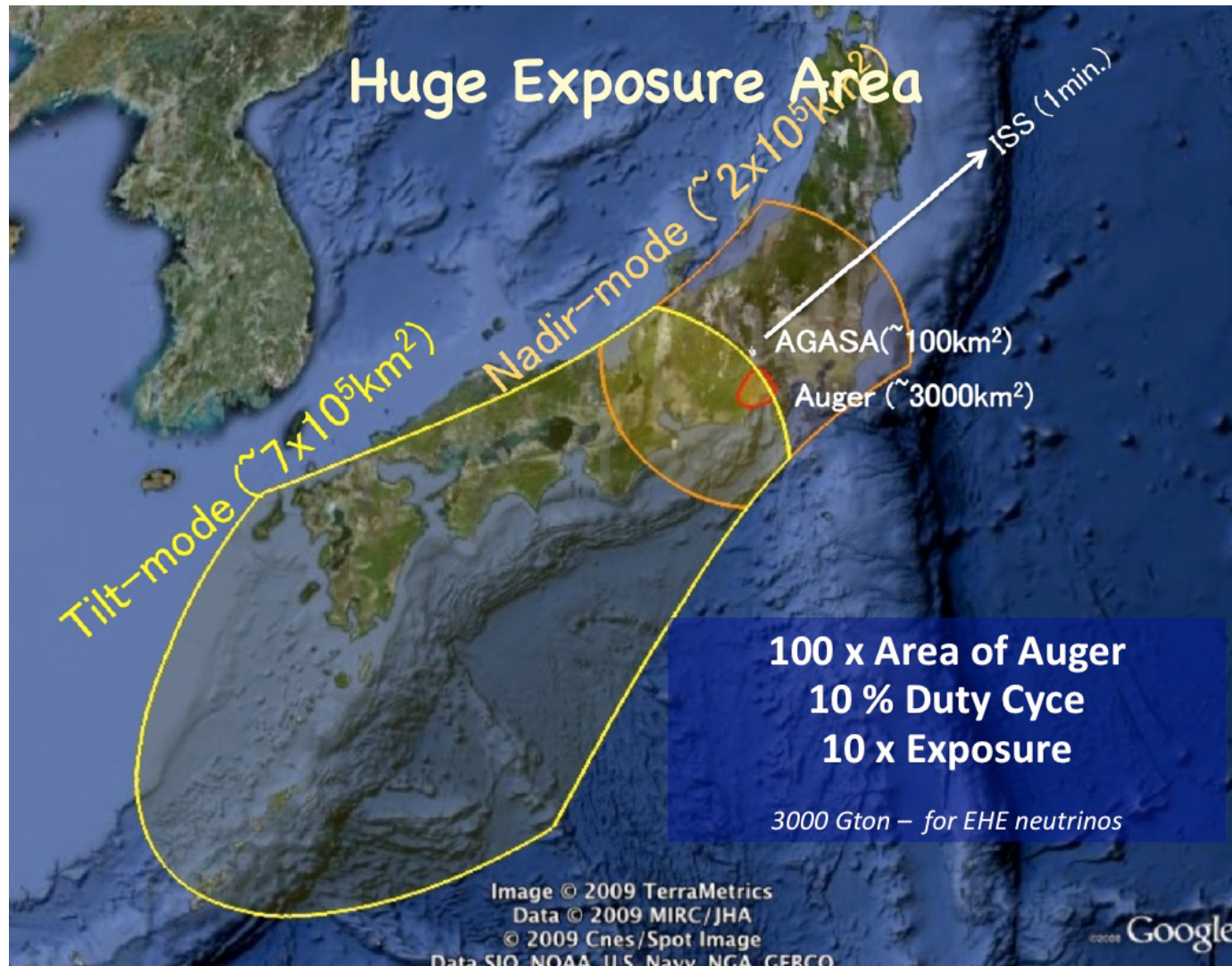
Le concept d'EUSO

« Extreme Universe Space Observatory »



Le concept d'EUSO

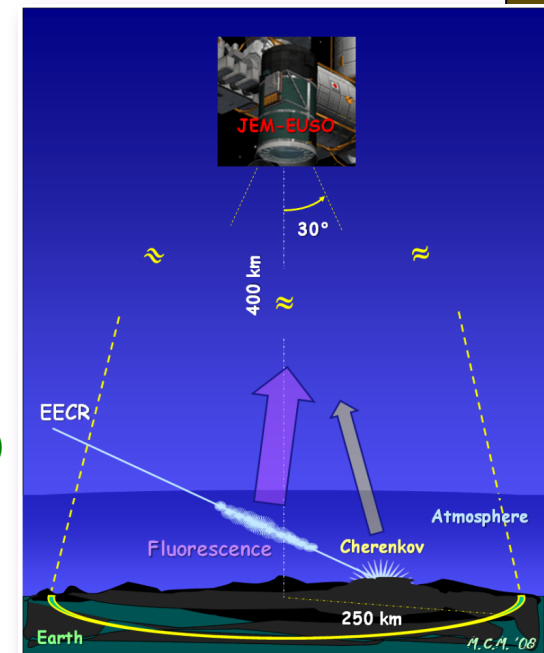
« Extreme Universe Space Observatory »



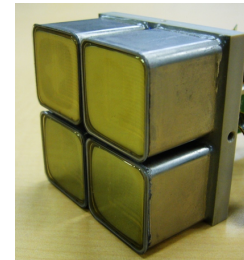
Le concept d'EUSO

65

- ❖ Insolite : un télescope UV dans l'espace pour faire de l'astronomie... en regardant la Terre !!!
- ❖ But: détecter la lumière de fluorescence des gerbes cosmiques, qui se développent à la vitesse de la lumière dans l'atmosphère, et reconstruire la trajectoire et l'énergie (quantité totale de lumière émise)
- ❖ Grande acceptance => télescope à grande champ, et à grande distance (ISS : 400 km ; free-flyer : 600-1000 km ?)
Mais il faut collecter suffisamment de photons !
=> Optique à lentilles Fresnel de grand diamètre (≥ 2.5 m)
- ❖ Grande sensibilité : détection de photons uniques
=> Tubes photomultiplicateurs avec filtres UV (raies de fluo)
- ❖ Haute résolution angulaire et temporelle :
> 300 000 pixels, $\Delta t = 2.5 \mu s$ (400 000 images/s !)
=> Nécessité d'un trigger très sélectif !

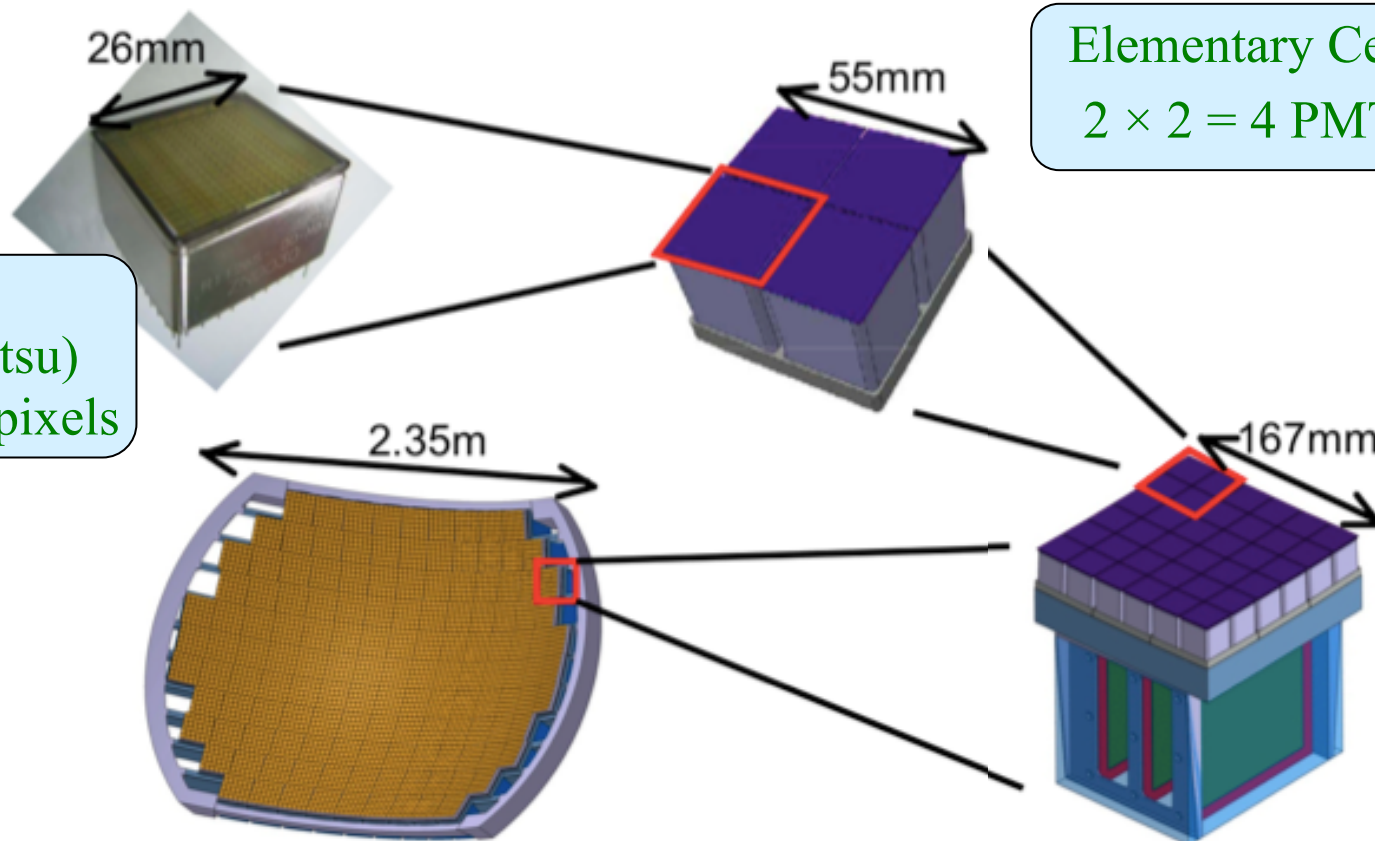


La surface focale



Elementary Cell (EC)
 $2 \times 2 = 4$ PMTs (flat)

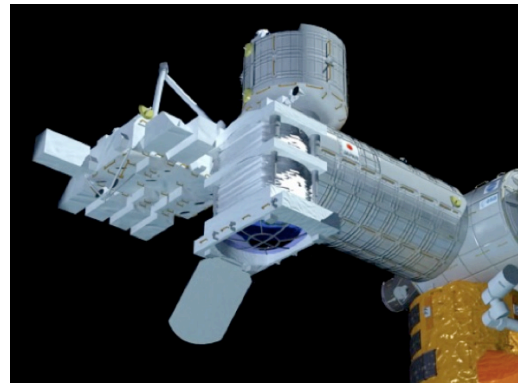
MAPMT
(Hamamatsu)
 $8 \times 8 = 64$ pixels



Surface focale (FS)
 137 PDM = 4932 PMT = $315\,648$ pixels

Photo-Detection Module (PDM)
 $3 \times 3 = 9$ EC (curved)

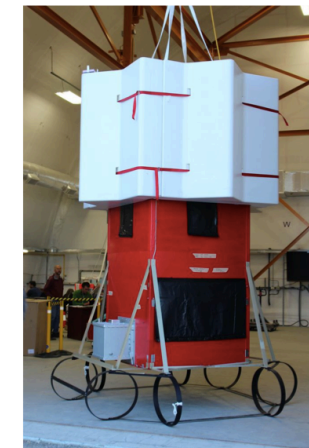
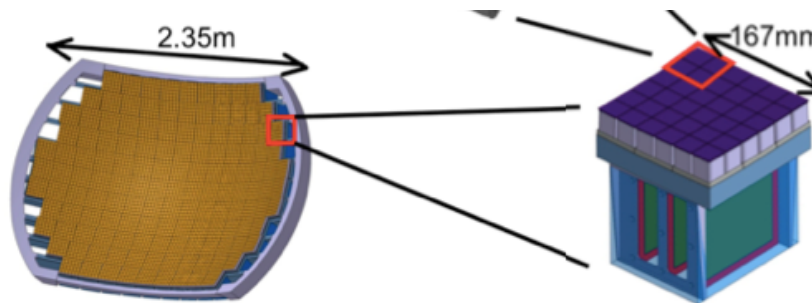
EUSO-Ballon a.k.a. “ α -EUSO”



JEM-EUSO

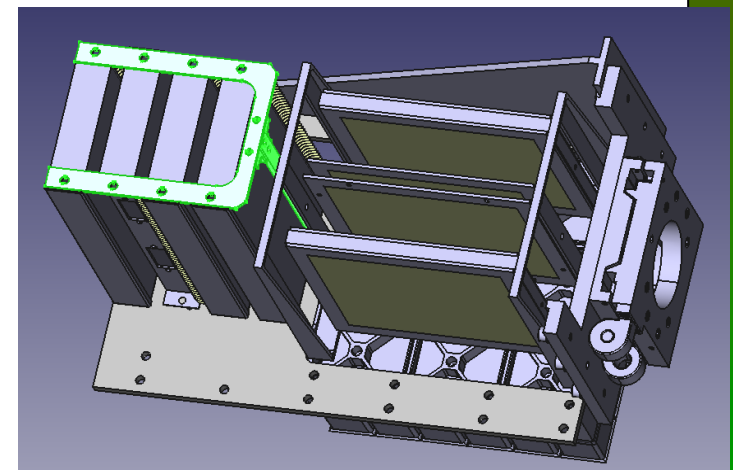
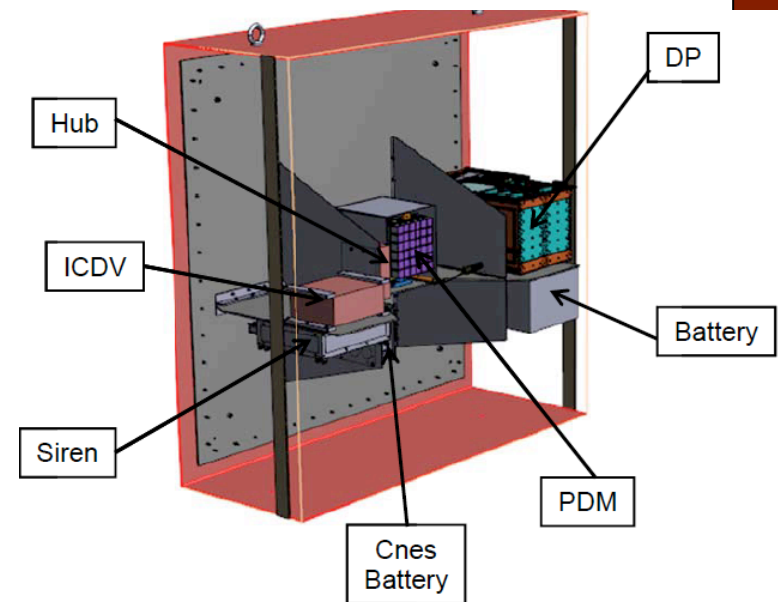
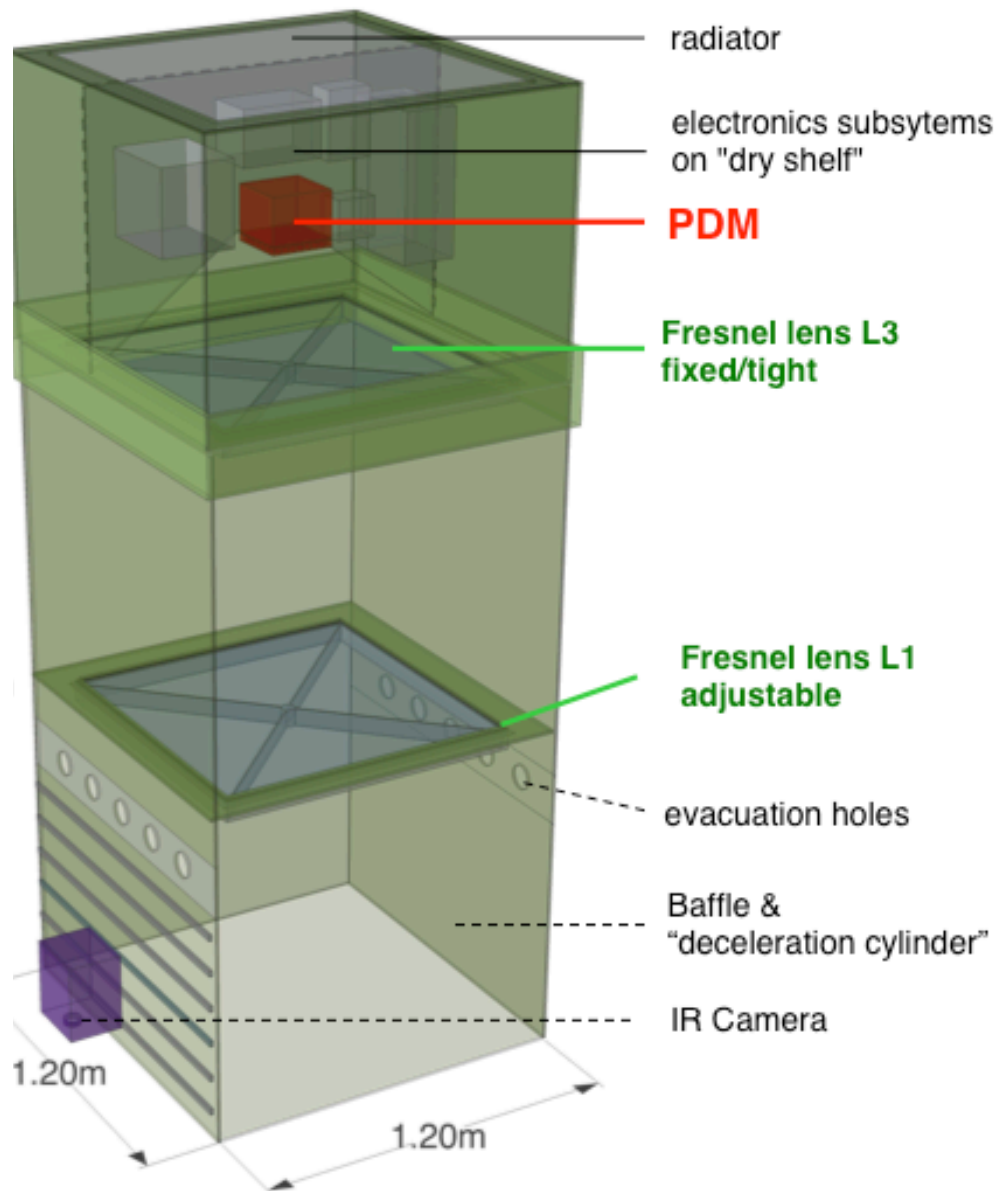
137 PDM
(photo-detection module)

1 PDM

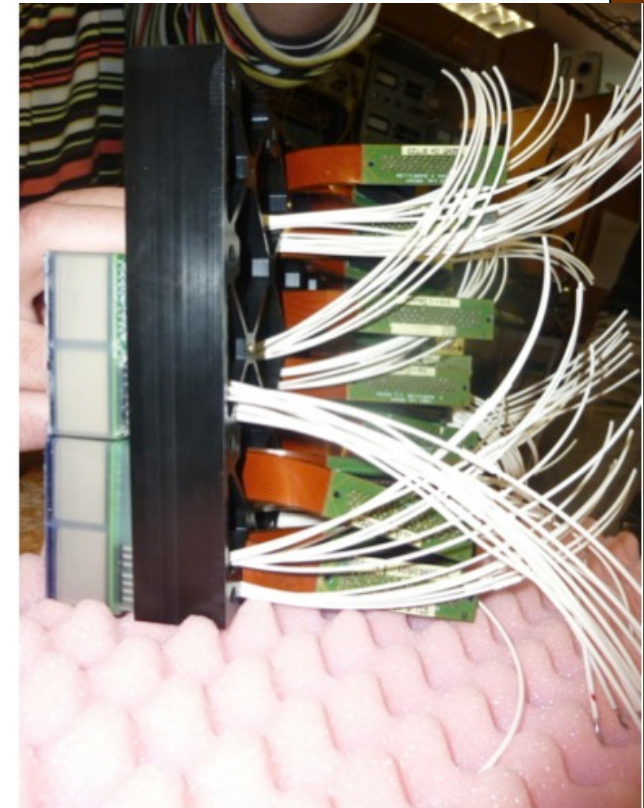
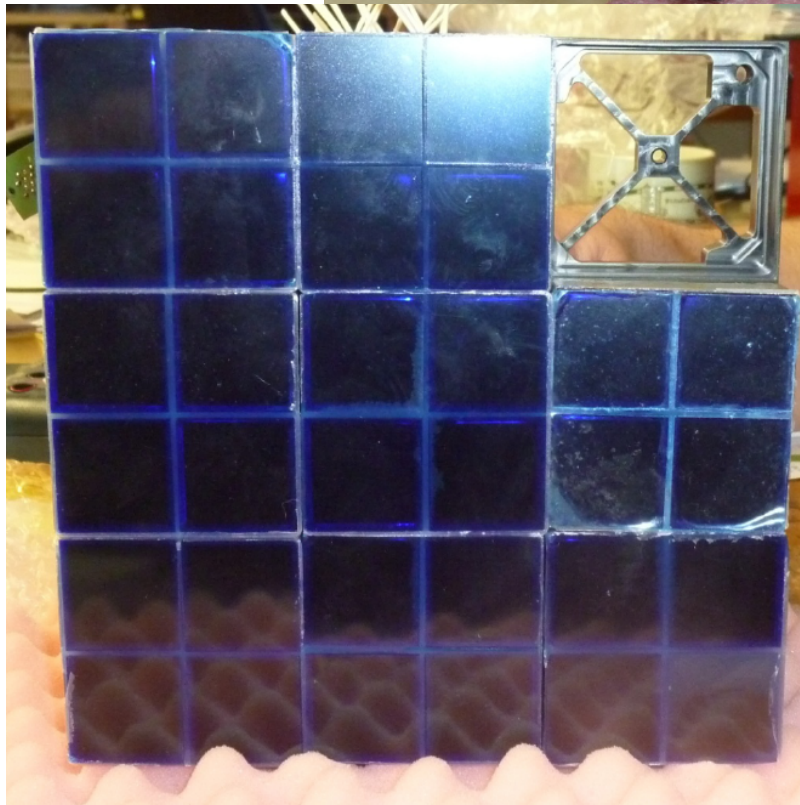
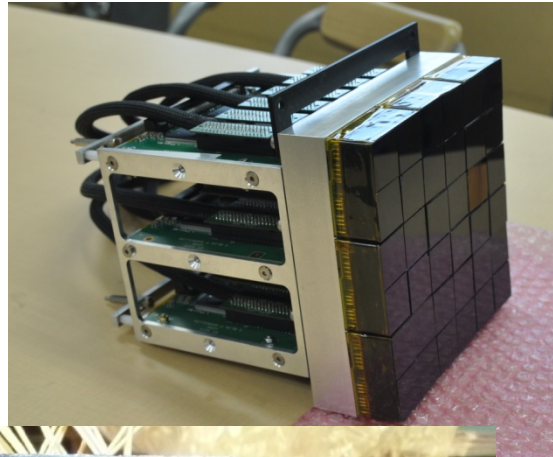
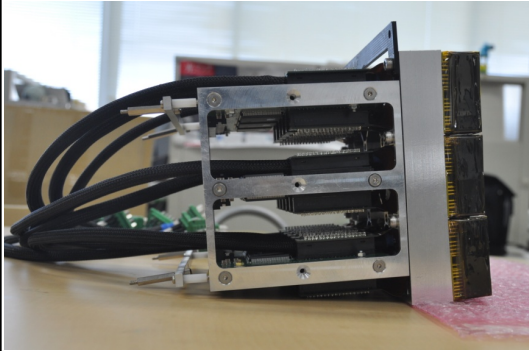


EUSO-Ballon

L'instrument



Le PDM (Photo-Detection Module)



La mission d'EUSO-Ballon

✧ But : permettre des progrès significatifs vers l'observation des UHECR depuis l'espace

Pathfinder scientifique pour JEM-EUSO

Démonstrateur technologique

Mise en place opérationnelle de la collaboration internationale

Données sur le fonds UV et sa variabilité

- intensité
- variabilité spatiale et temporelle
- influence du type de sol survolé (albédo)

Observation d'événements artificiels

Tirs laser + LED + flashers au Xénon (US/NASA)

Instruments supplémentaires : caméra IR, NIST, compteur Geiger, GoPro



14 Sept. 2011 - phase A kick-off



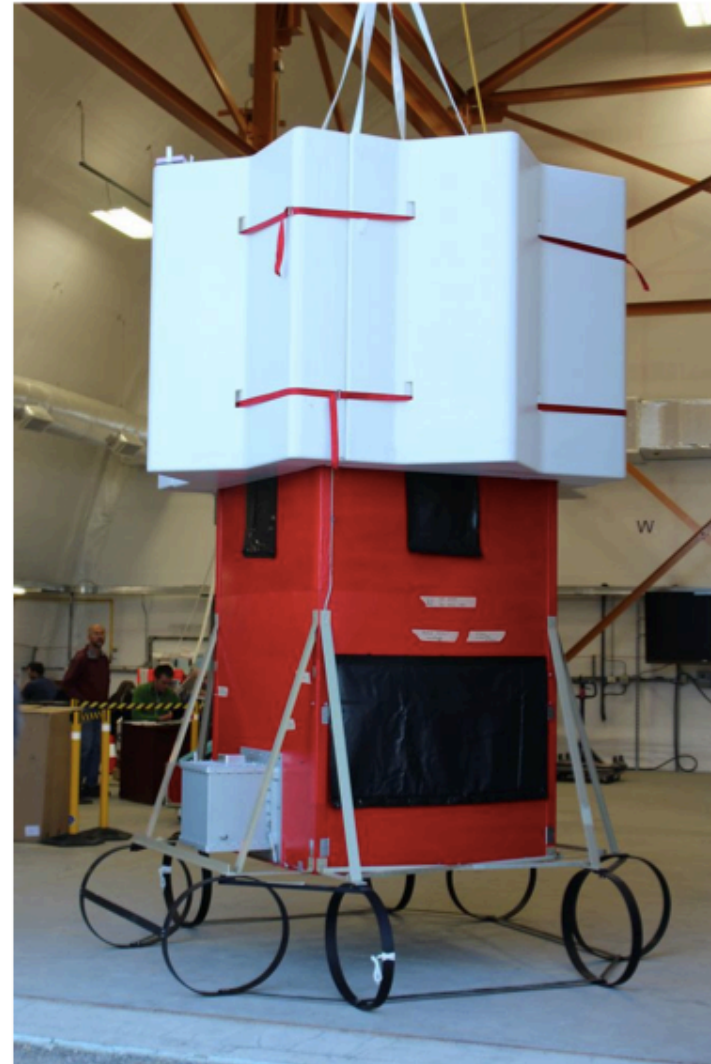
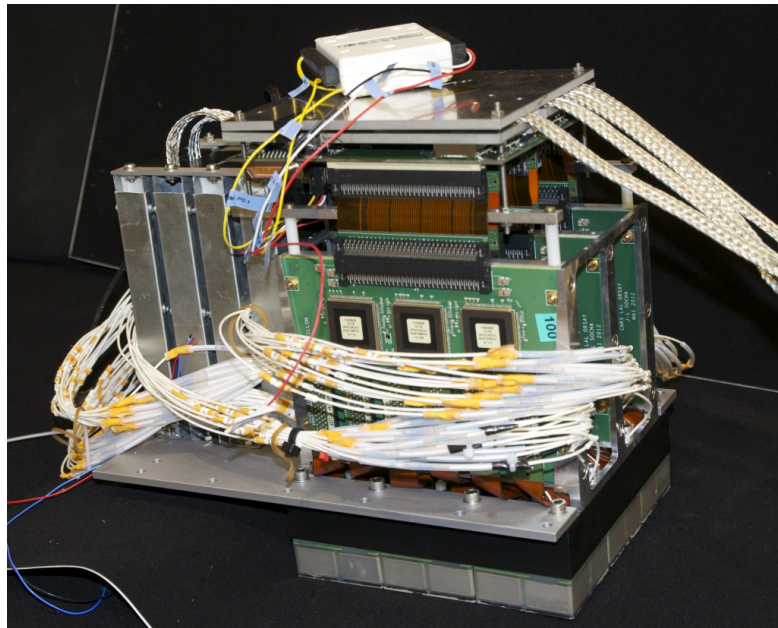
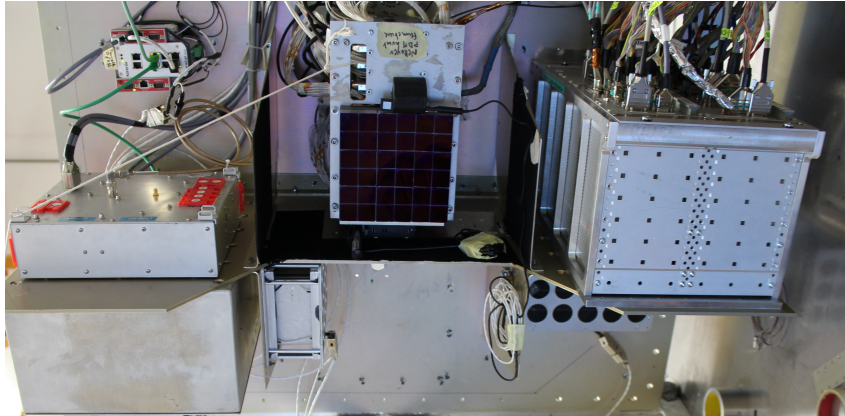
18 Dec. 2012 - Critical Design Review



4 June 2014 - Flight Acceptance Review

L'instrument EUISO-Ballon

72



En route pour le tarmac

Le 24 août 2014,
jour du vol



Juste un peu d'hélium...



Ça se précise...



À vos marques ! Prêts ?



Partez !

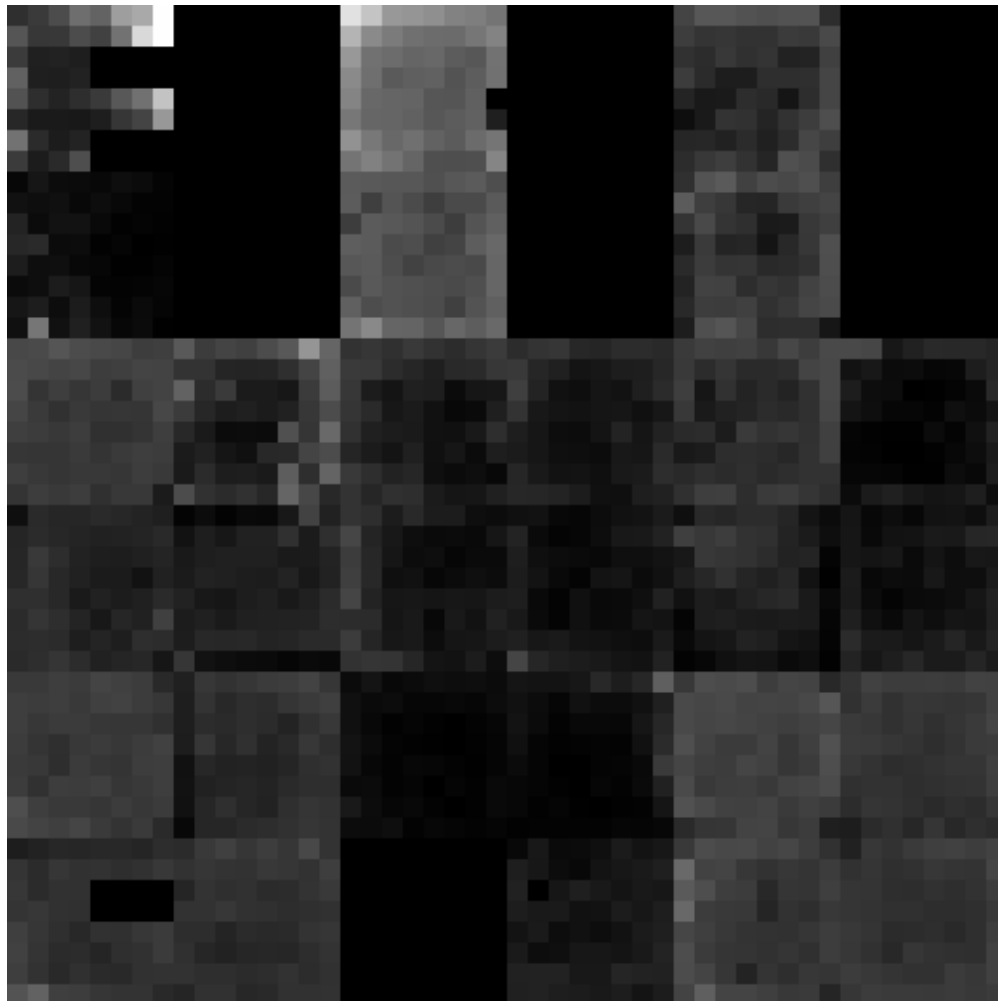


Première lumière !

78

✧ Assurance de qualité dès le début de la prise de données

1^{ère} image:



HK: OK

Températures: OK

Télémétrie: OK

→ Procédure nominale pour le « data taking ».

- envoi de s-curves
- envoi de « petits fichiers » OK (~1% des données → ça aurait été suffisant pour un succès!)

NB: live-blogué sur Facebook et sur twitter! ;-)

→ Nombreux followers à travers le monde!

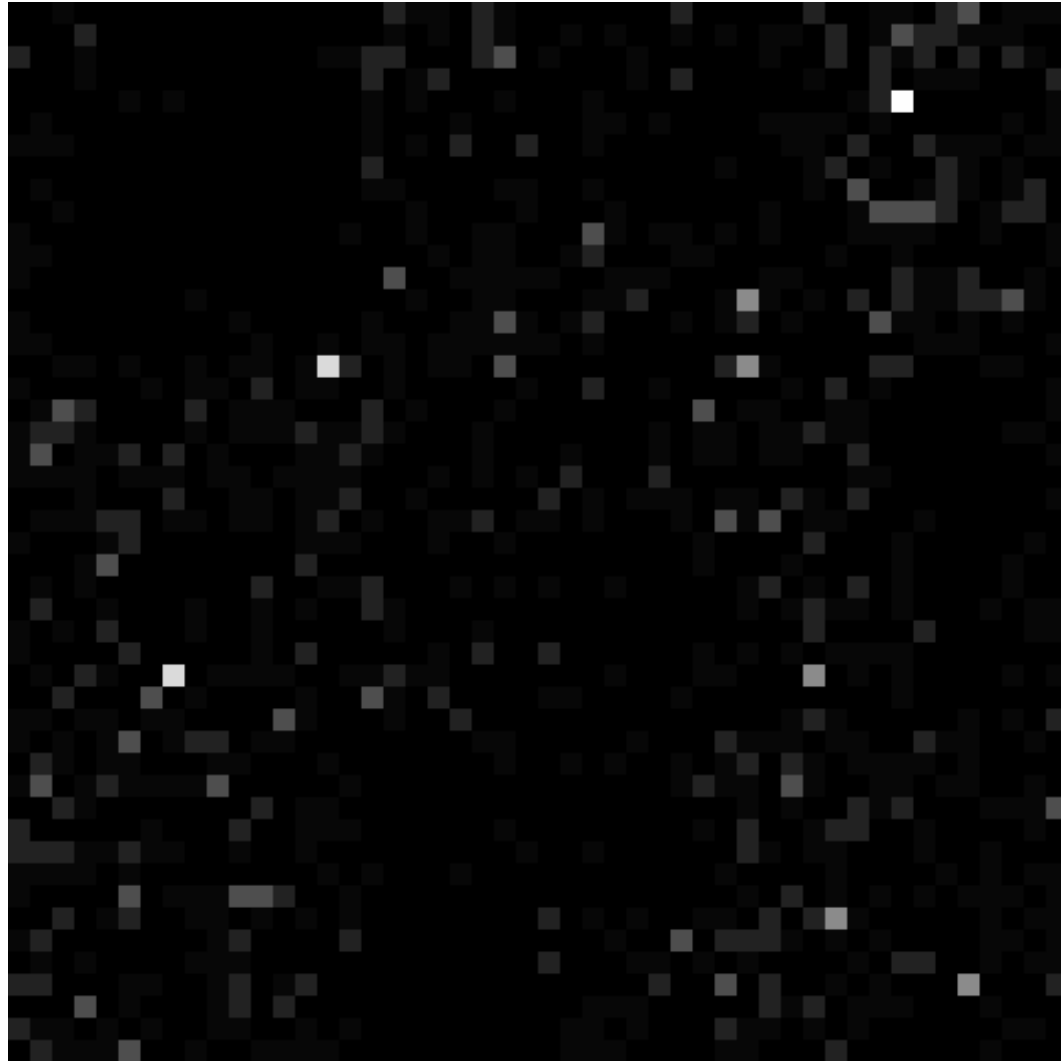
"Quick look" pendant le vol

79

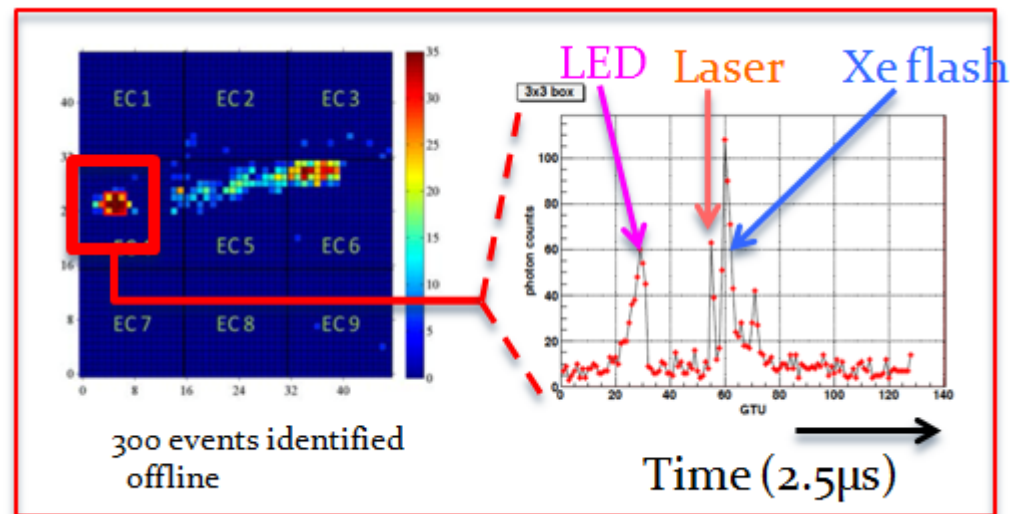
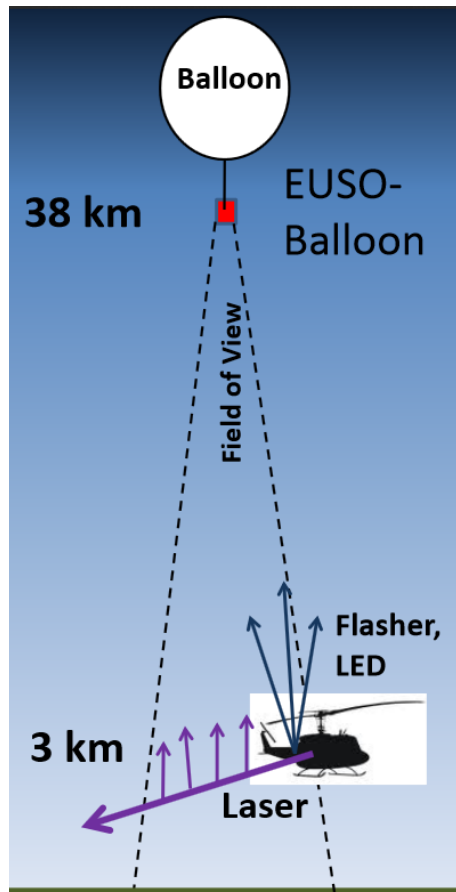
✧ Jubilation !

Observé par
hasard, dans le
petit échantillon de
données envoyées
par télémétrie :

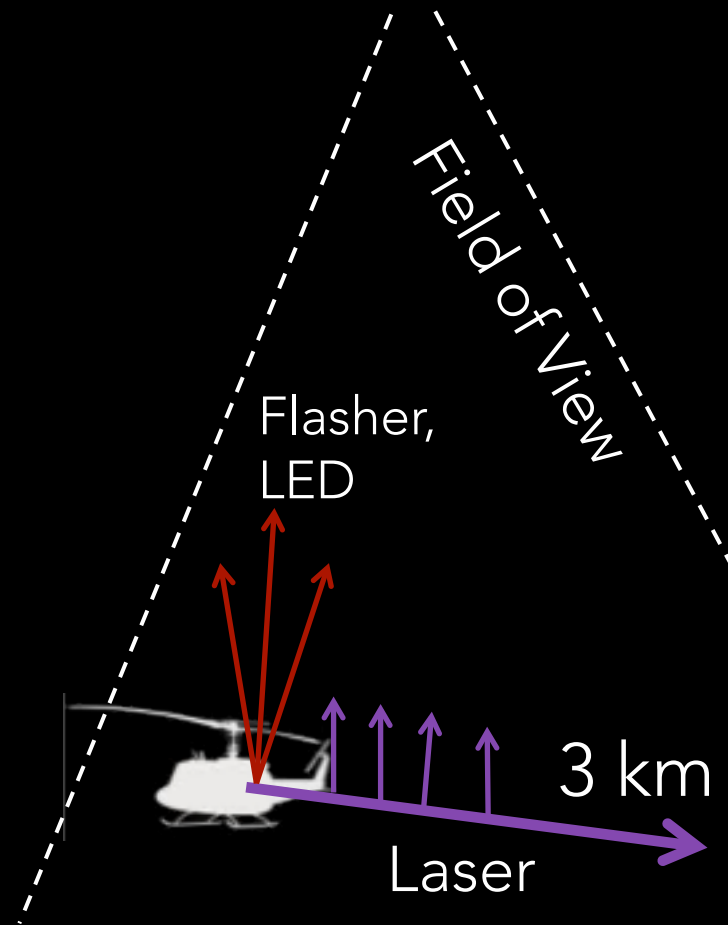
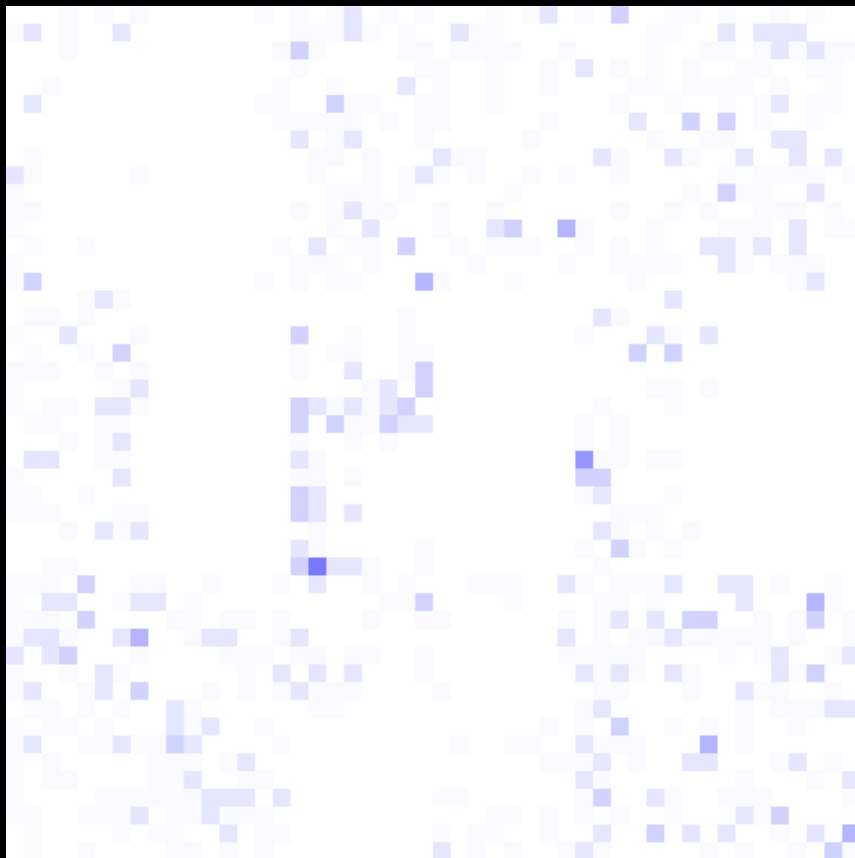
$v = c$!



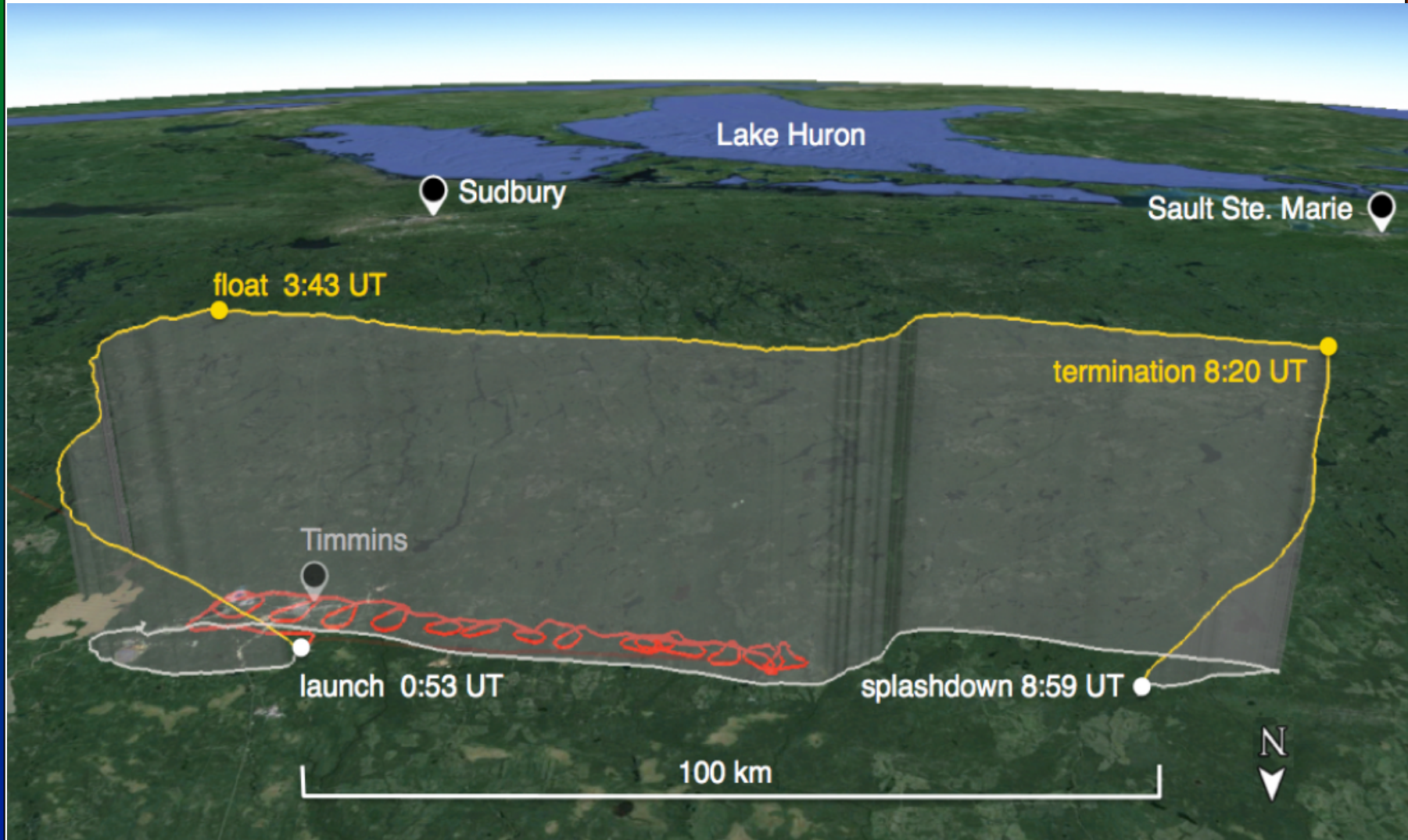
Campagne « hélico »

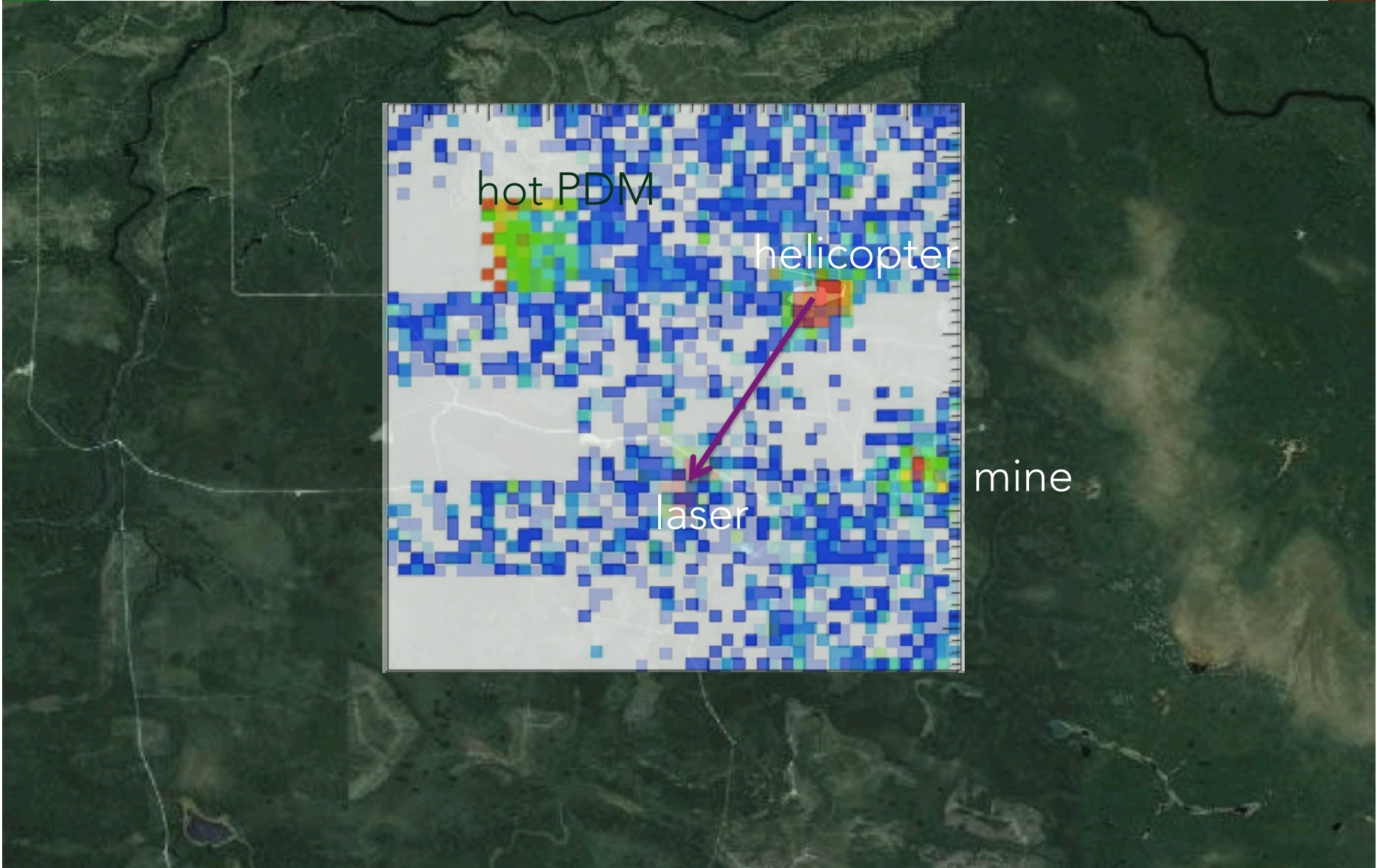


Séquence LED-LASER-XENON



La trajectoire du vol





Fin du vol

✧ L'instrument a bien décollé...

...mais il n'a jamais atterri !

la fin : la trajectoire du vol



la trajectoire de descente



dans une des zone les plus "sèches" du Canada (pays de 3 millions de lacs)

simulated landing site
X

10 km



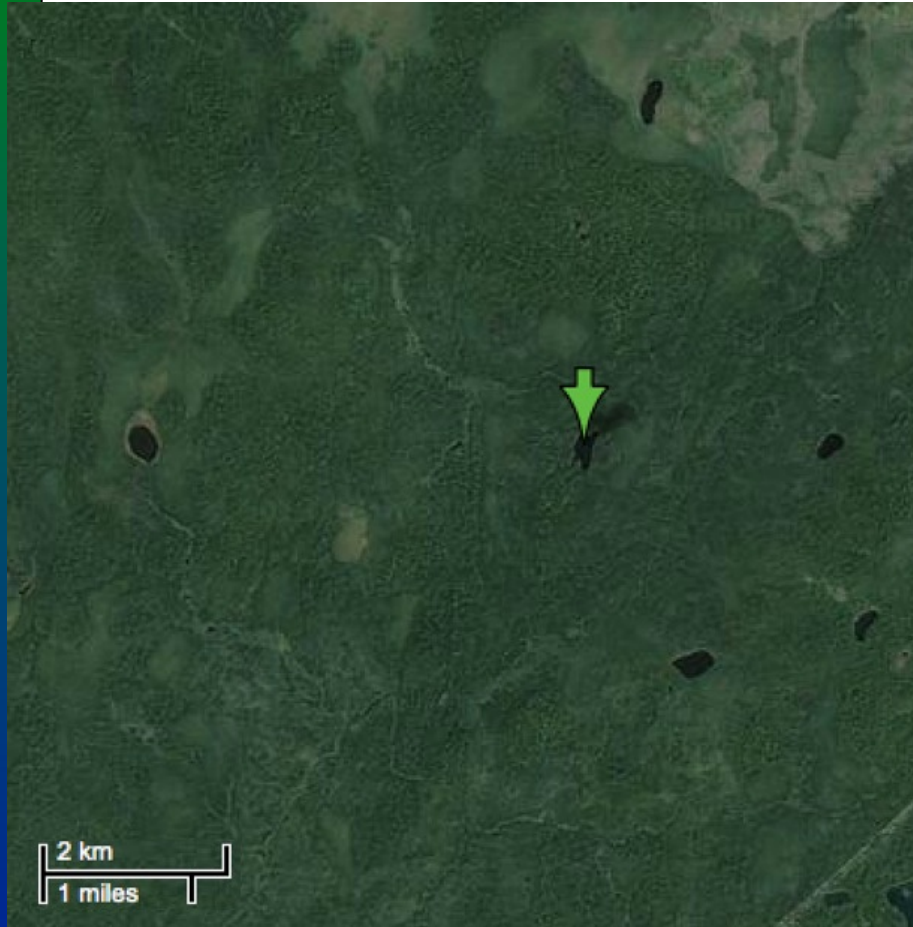


~~Atterrissage !~~ m



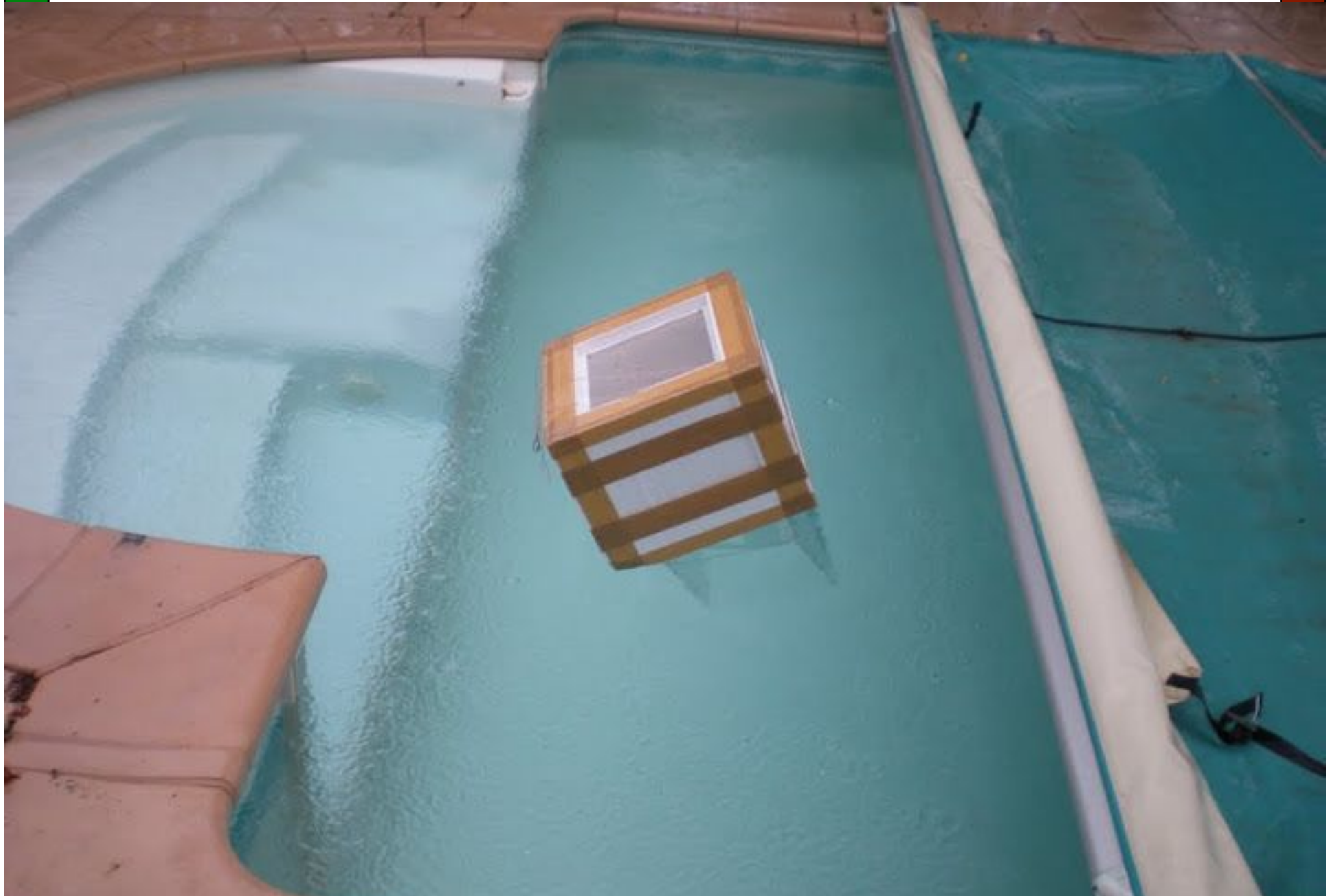
Bien visé !

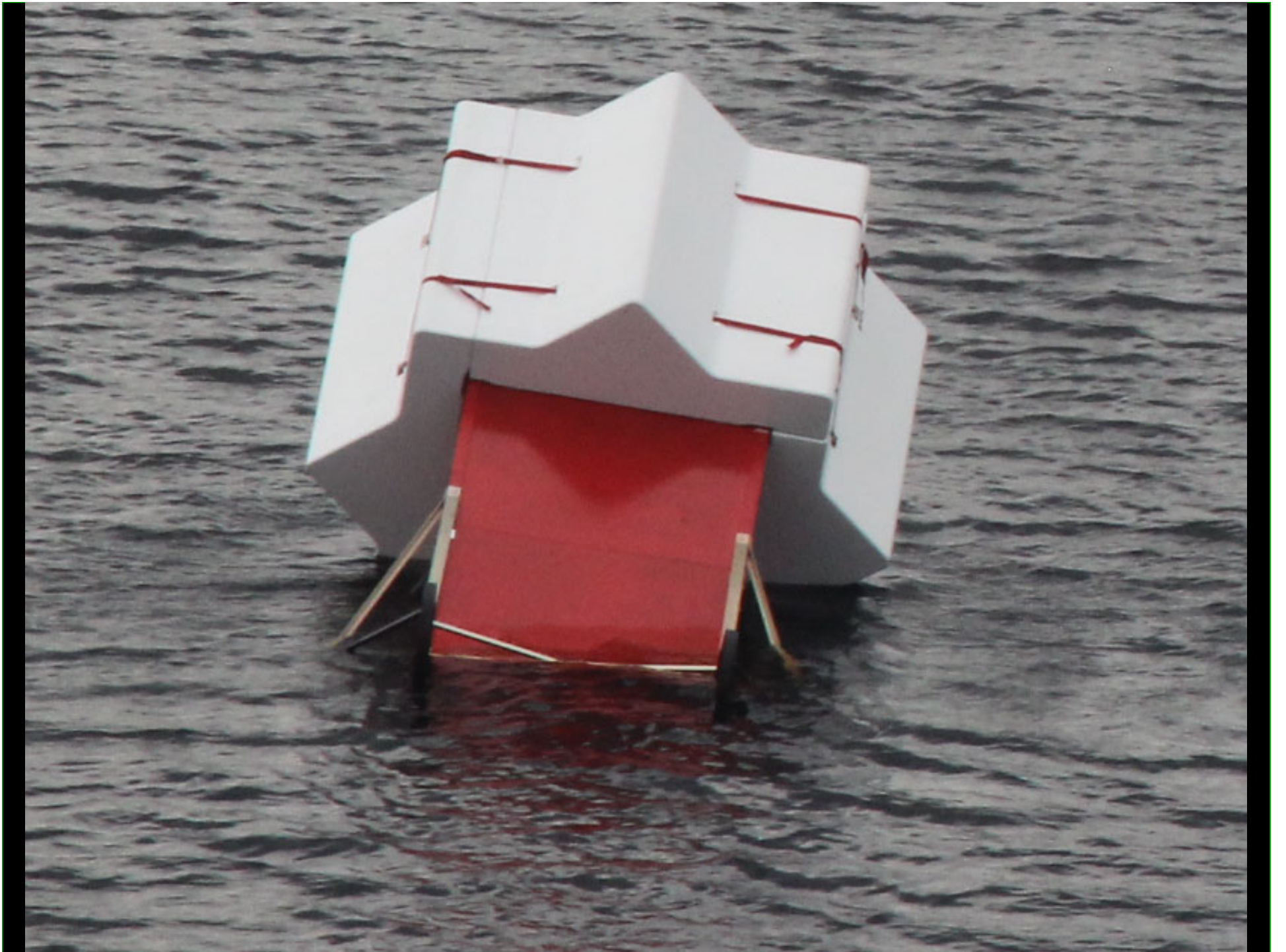
89

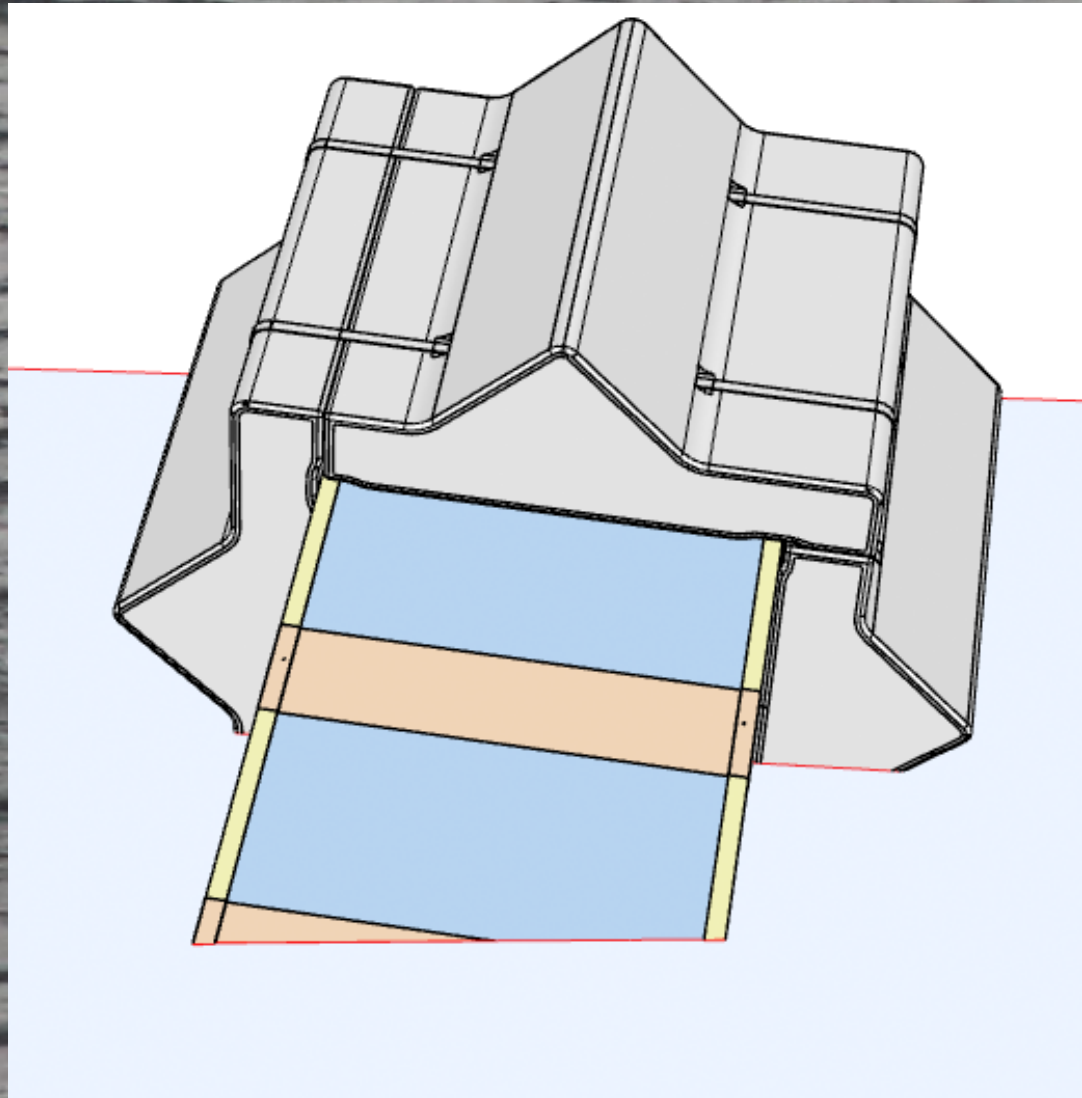


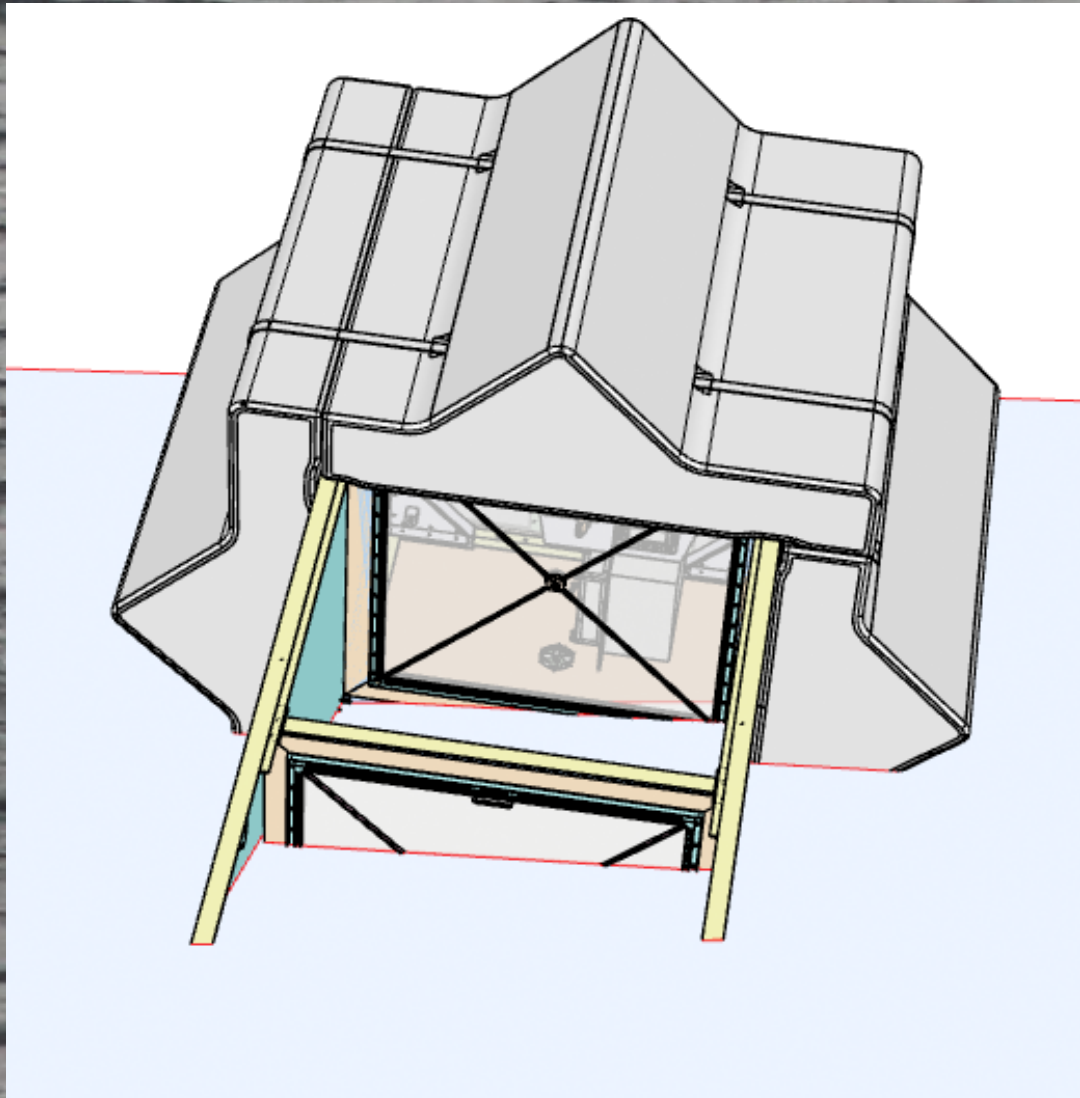
❖ Baptême de « Lake EUSO » !

Test « au cas où » : merci Jean Evrard !

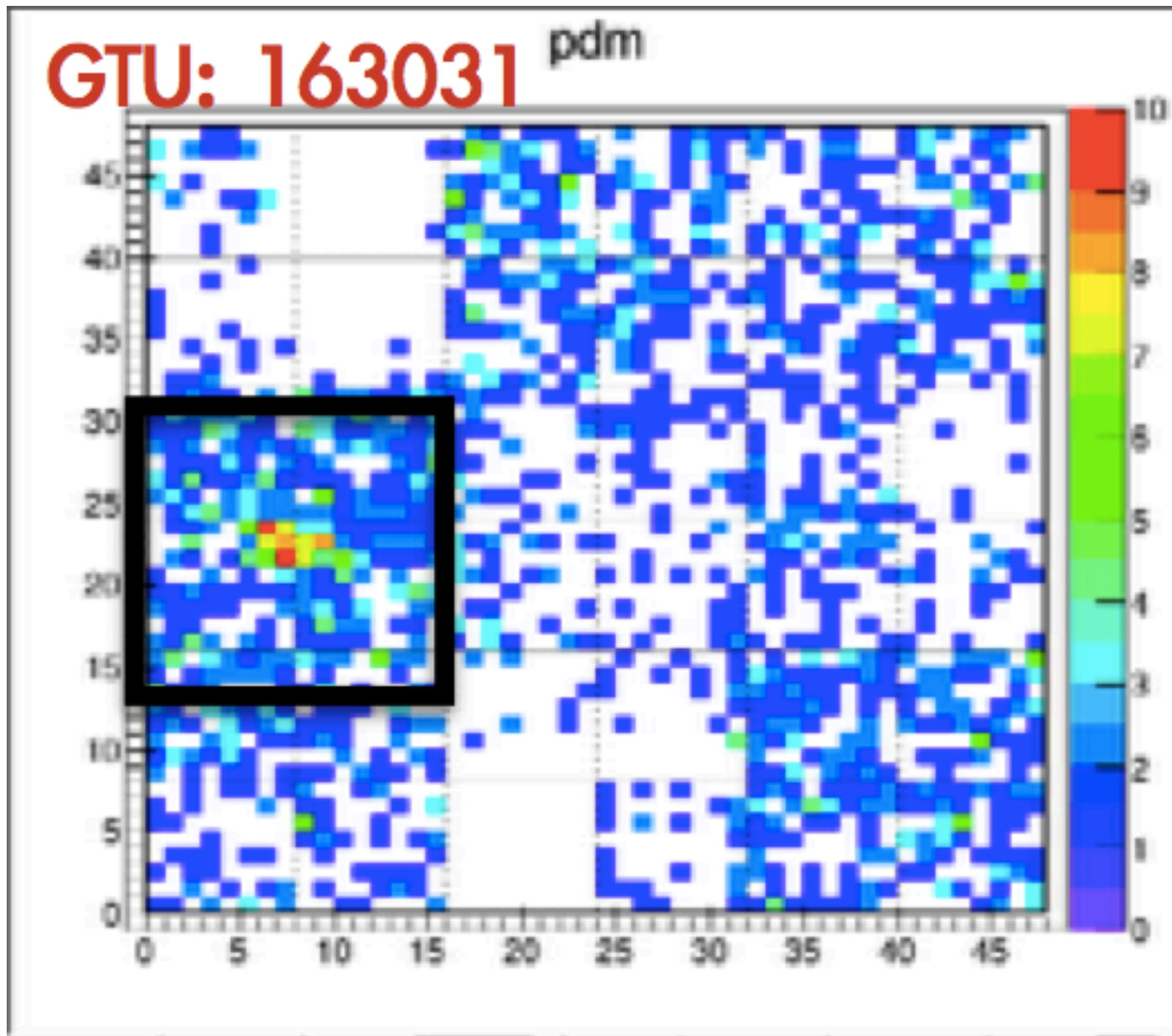




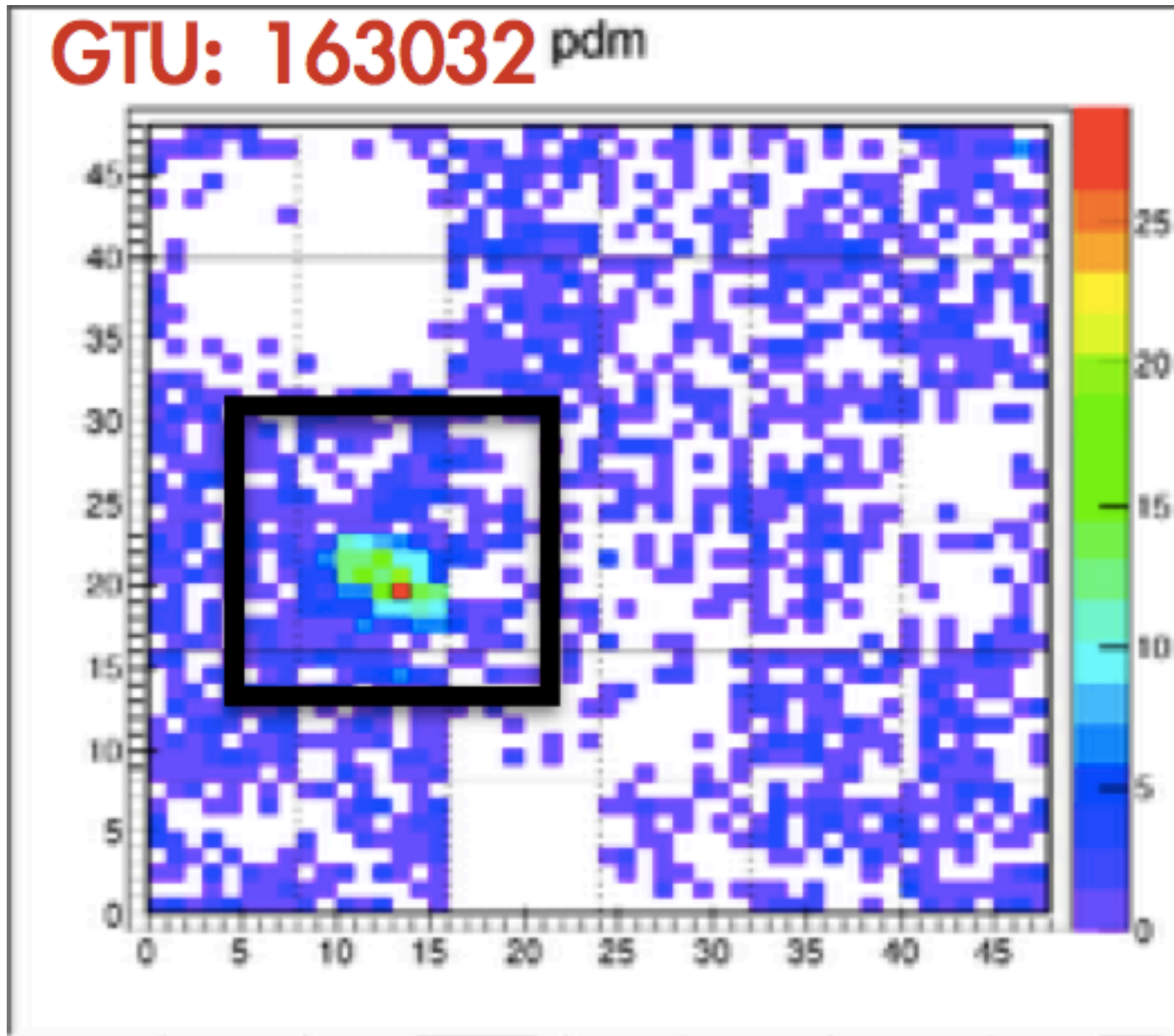




Événement laser (détecté par trigger a posteriori)

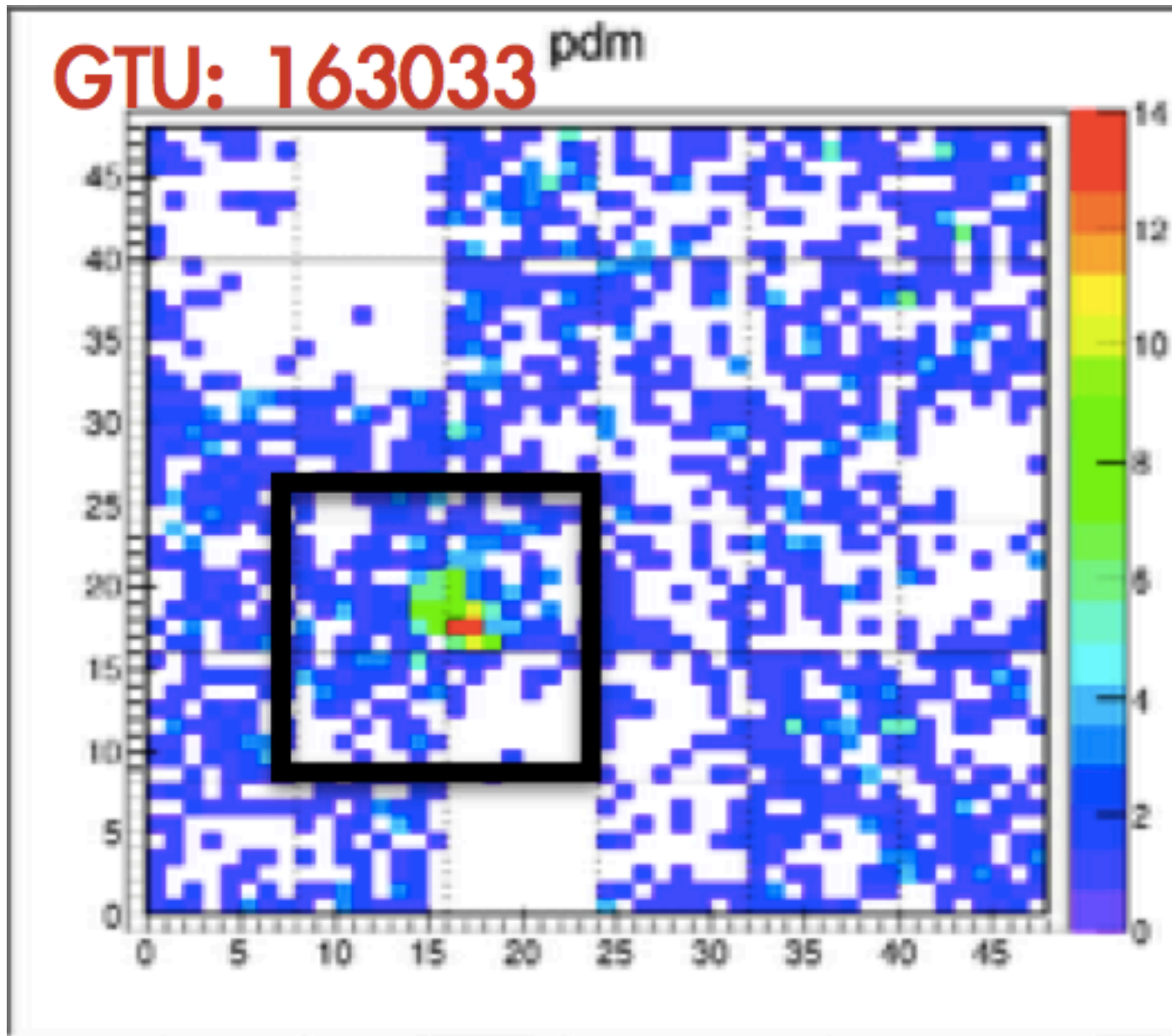


Événement laser (détecté par trigger a posteriori)

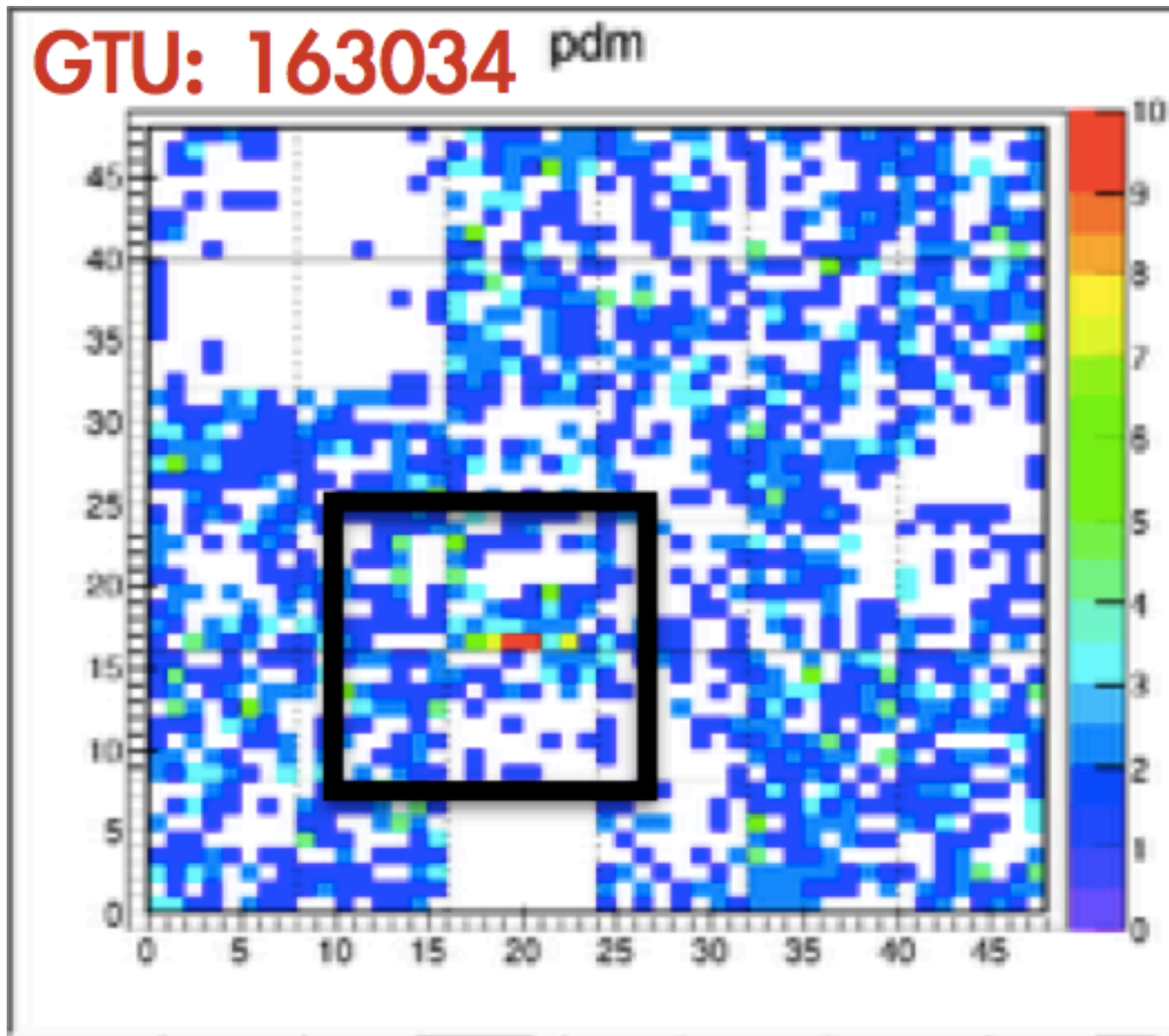


Événement laser (détecté par trigger a posteriori)

96

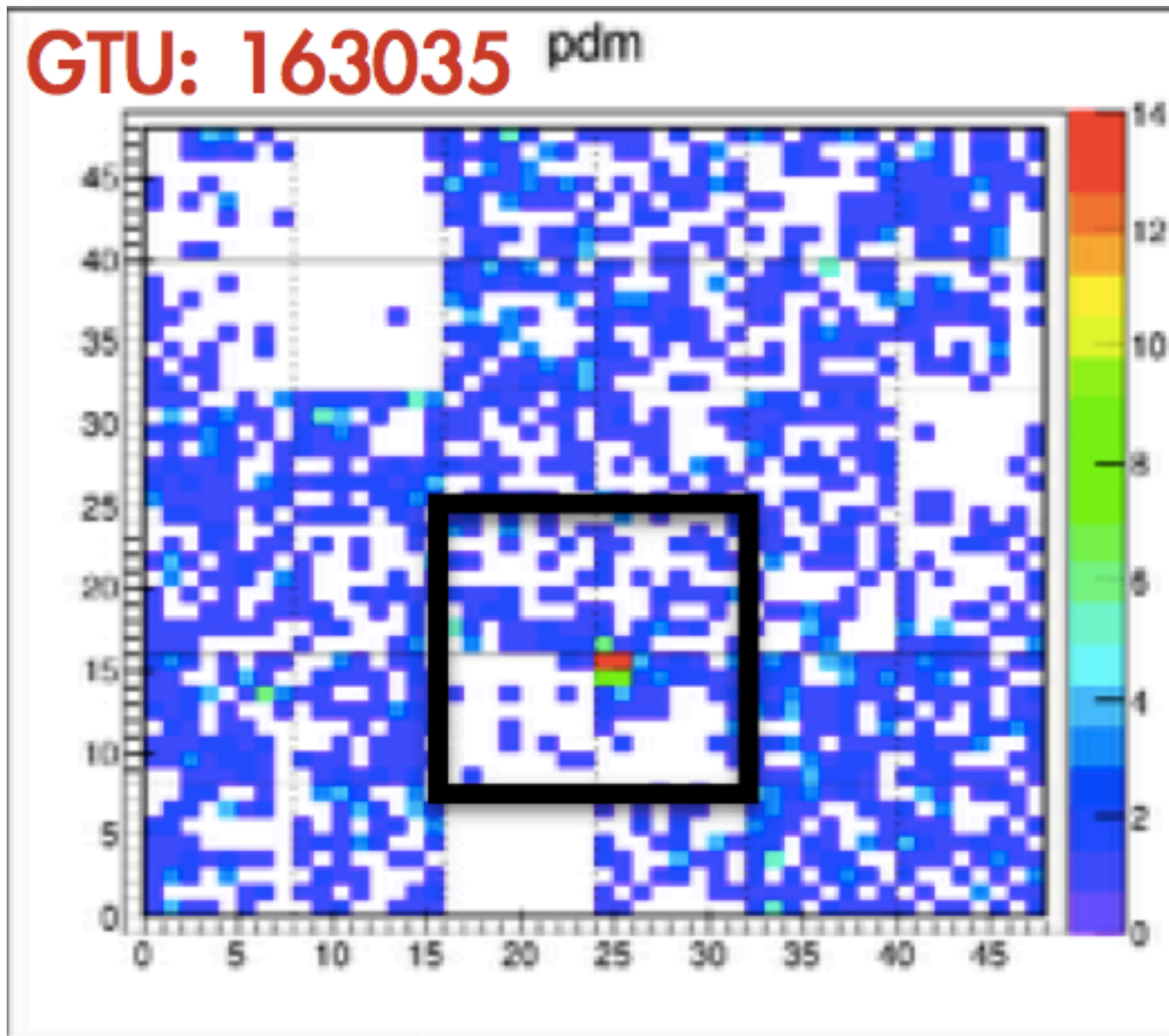


Événement laser (détecté par trigger a posteriori)

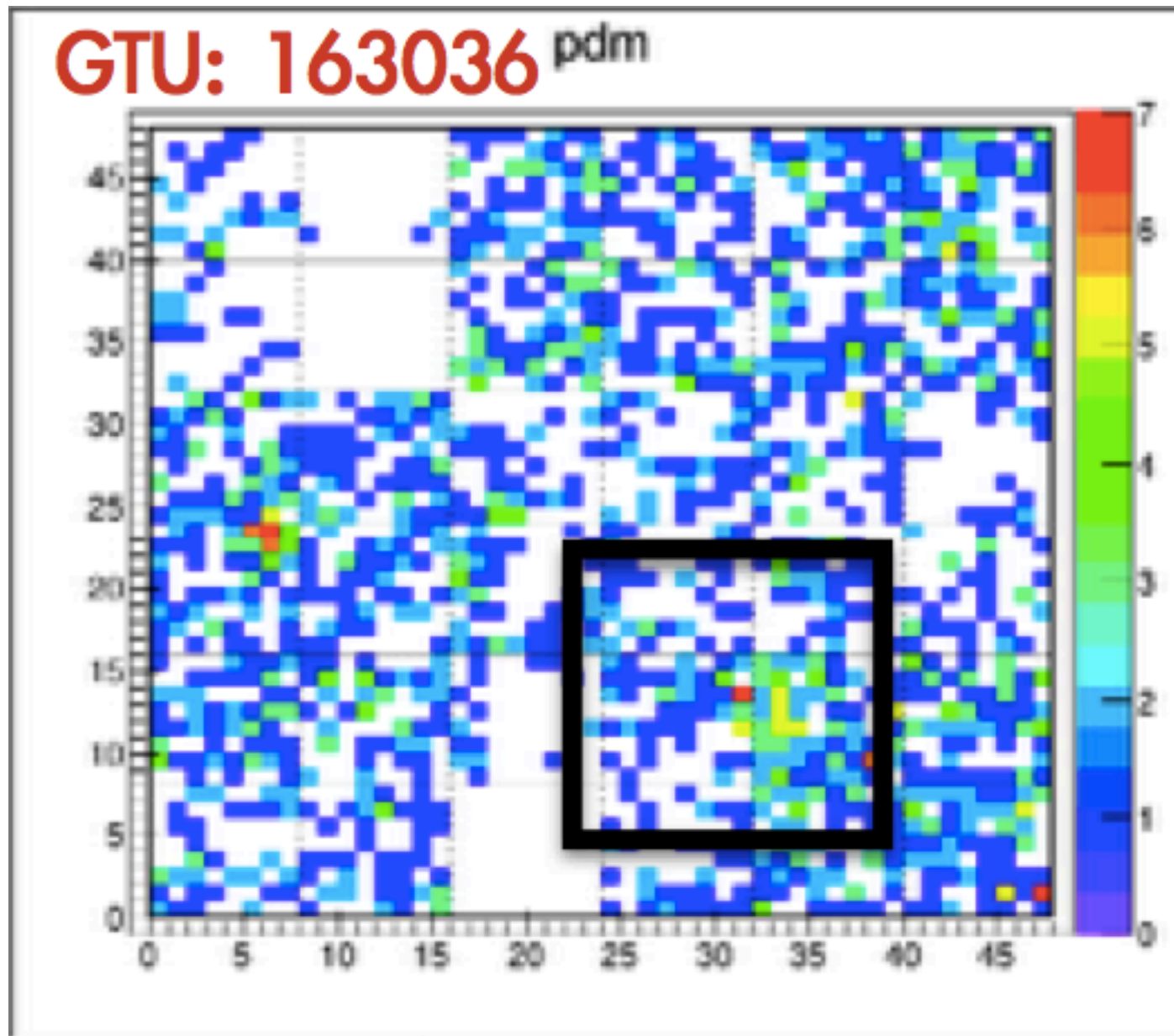


Événement laser (détecté par trigger a posteriori)

98

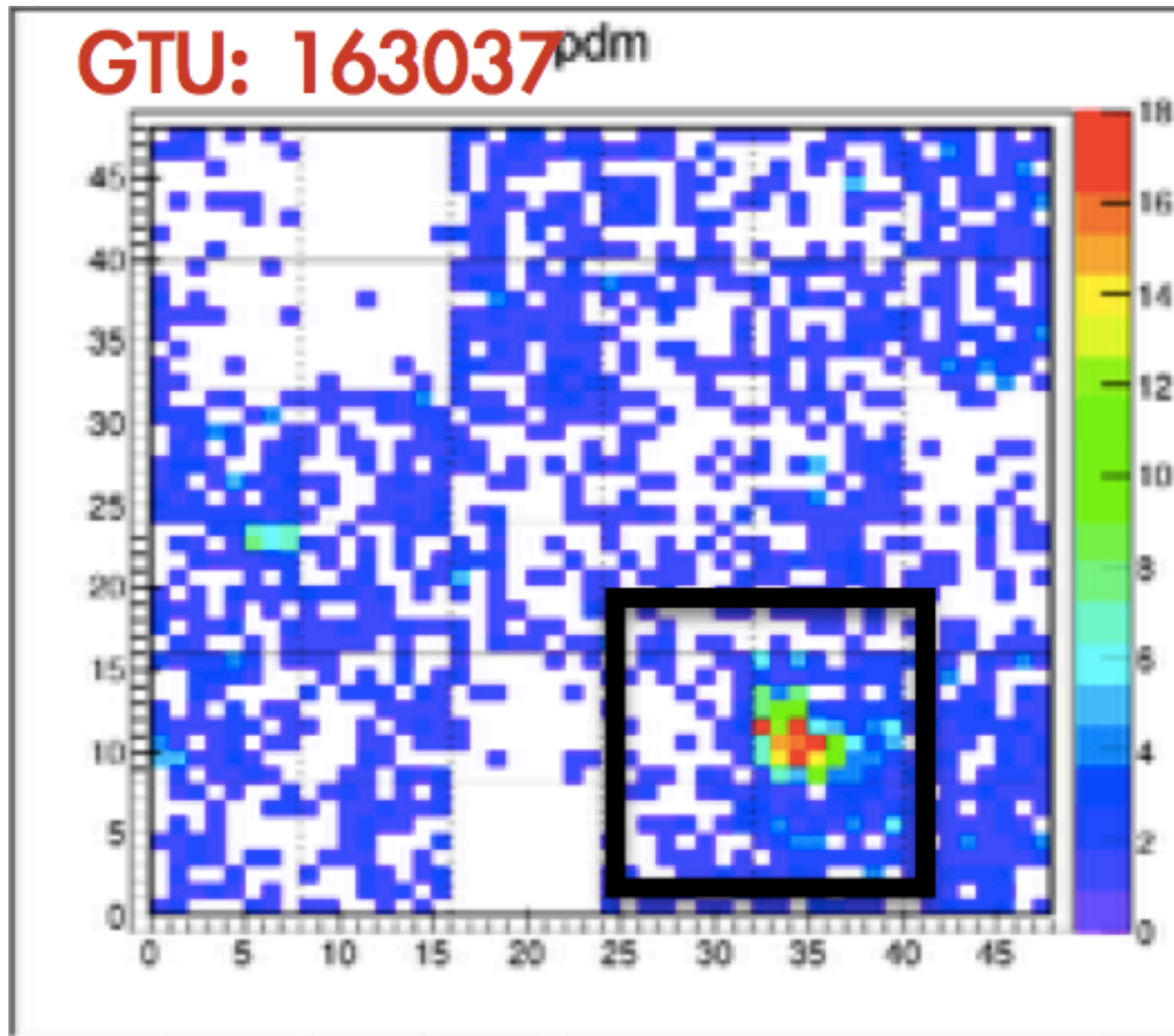


Événement laser (détecté par trigger a posteriori)



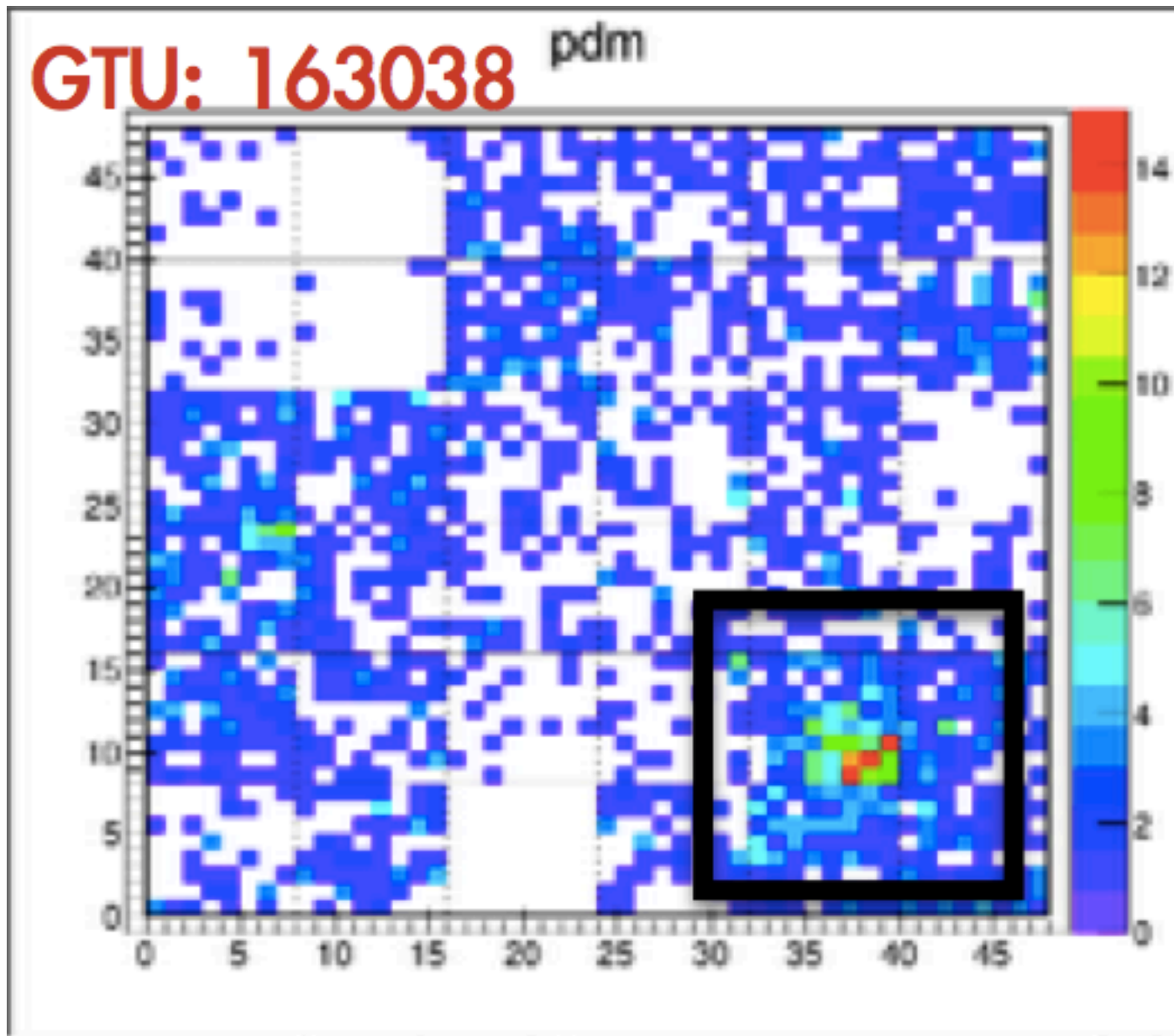
Événement laser (détecté par trigger a posteriori)

00



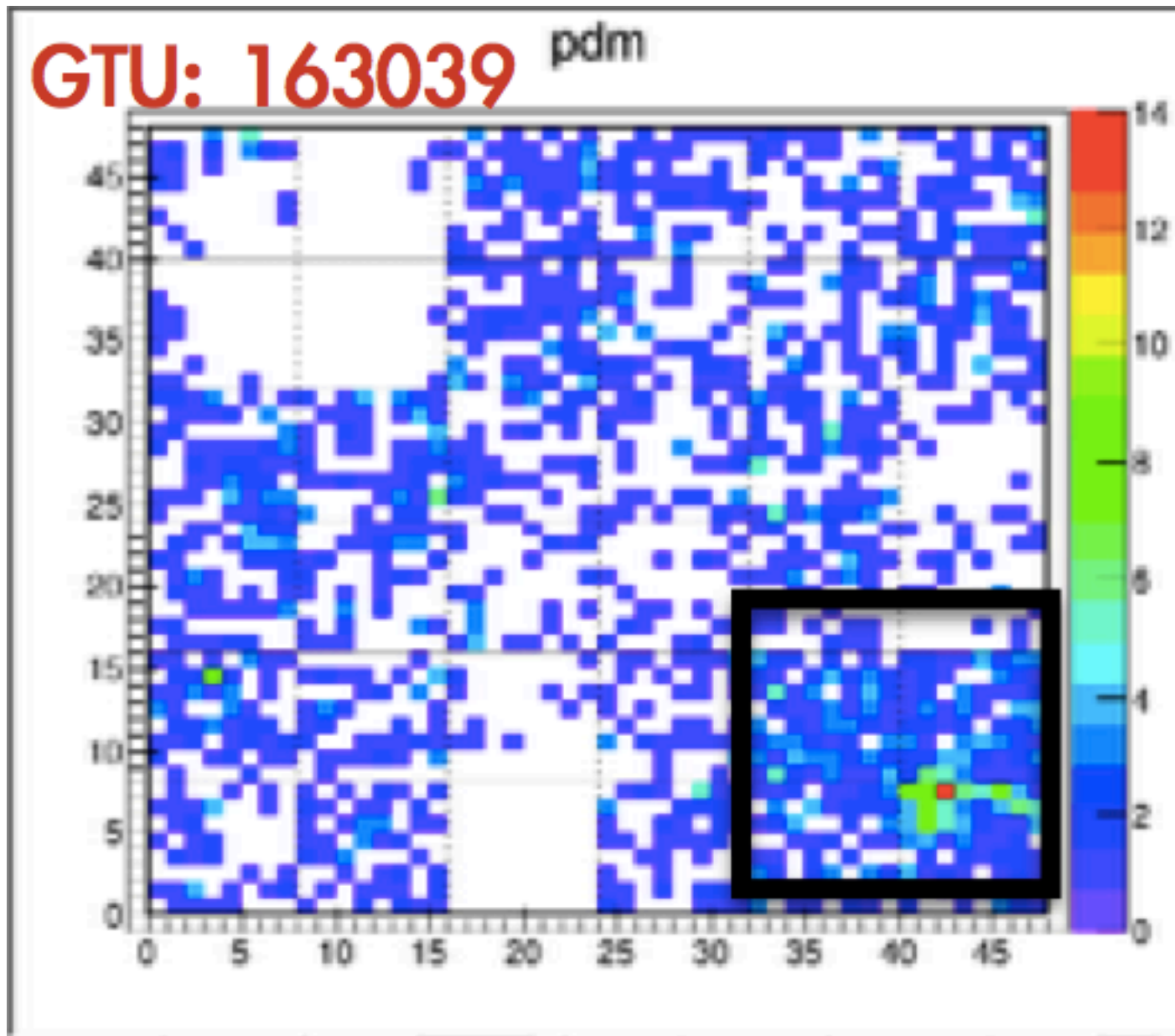
Événement laser (détecté par trigger a posteriori)

01



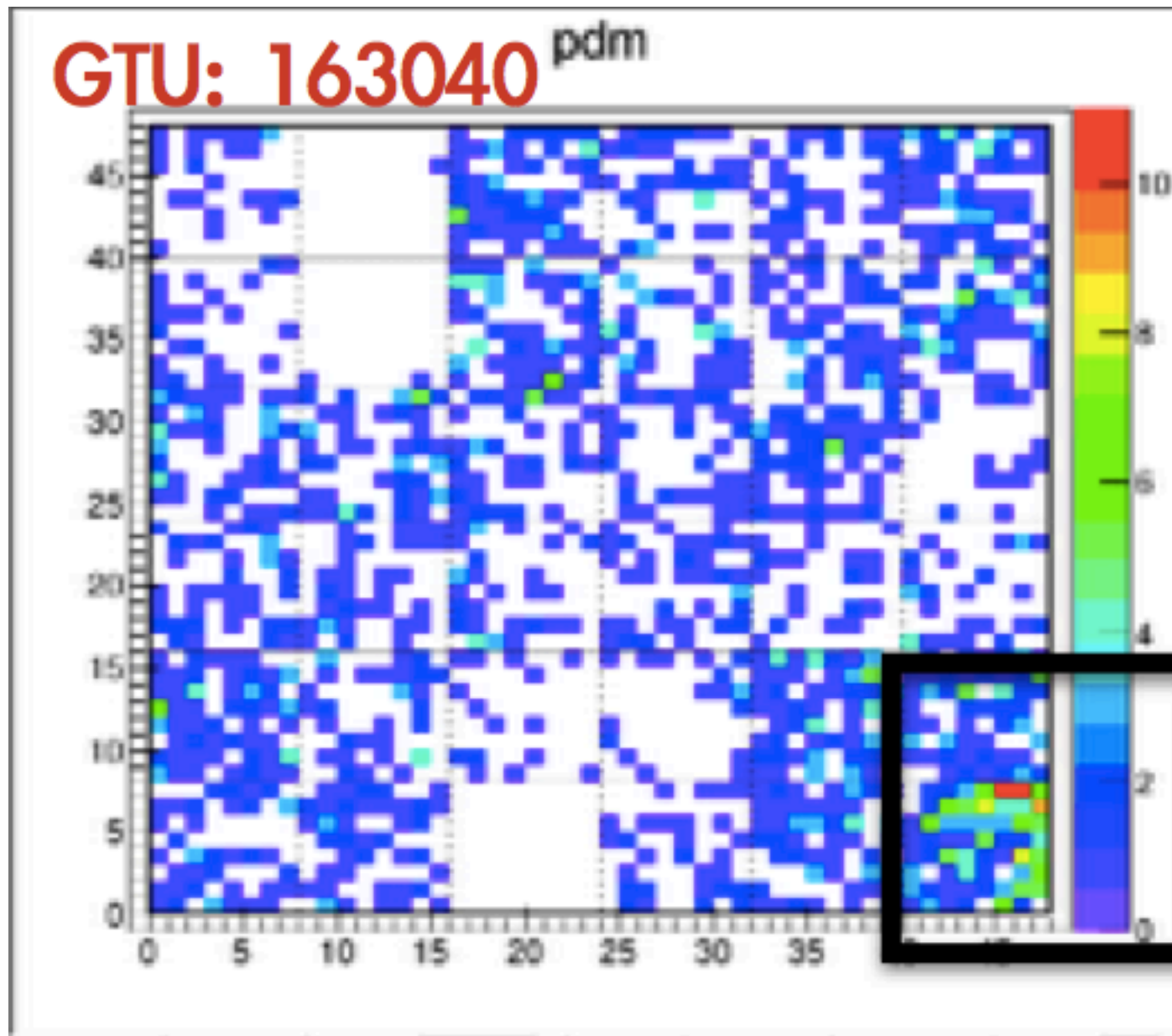
Événement laser (détecté par trigger a posteriori)

02



Événement laser (détecté par trigger a posteriori)

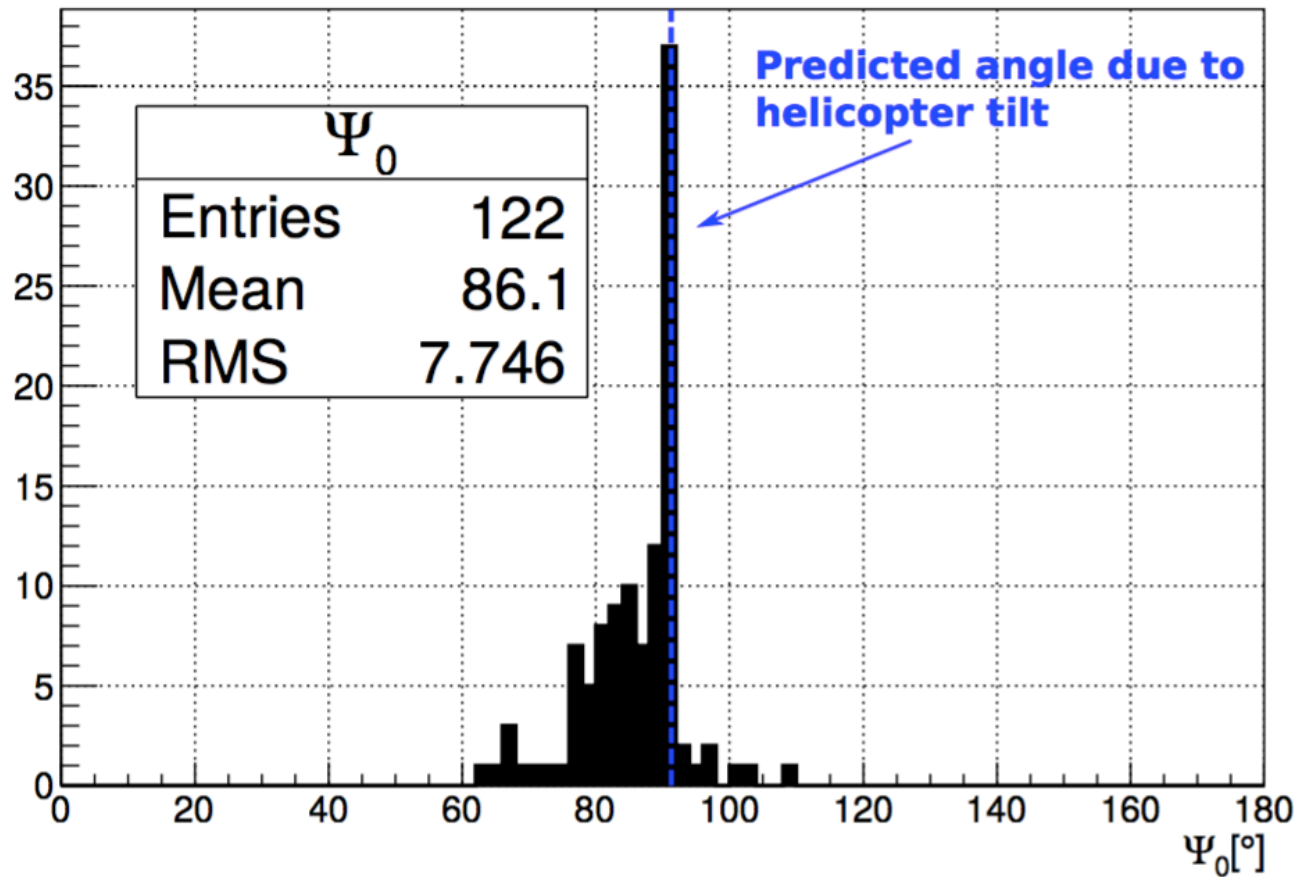
03



Reconstruction des traces laser

04

- ◇ Histogramme des angles reconstruits (préliminaire)



La suite (1) : nouveaux vols

- ✧ EUSO-SPB (2017) : Wanaka, Nouvelle-Zélande (NASA, participation CNES)
 - Compléter les premières mesures d'EUSO-Ballon
 - Mesures du fonds UV au-dessus de l'eau !
 - Opération du trigger interne pour la détection des « événements lasers »
 - Implémentation d'améliorations diverses

Vol longue durée → détection des premières gerbes de rayons cosmiques

La suite (2) : Vers l'espace !

- ✧ Mini-EUSO: mission acceptée (ASI + ROSCOSMOS) → vol en 2017
 - Pathfinder sur l'ISS !

- ✧ KLYPVE-EUSO : mission sélectionnée par la Russie (+ Japon)
 - Première mission scientifique UHECR dans l'espace
 - Observation du ciel entier avec le même instrument !

- ✧ EUSO-Next (JEM-EUSO en free flyer)
 - Proposal ESA M5
 - Proposal NASA MidEx



« Non quia difficilia sunt non audemus,
sed quia non audemus difficilia sunt. »