

Osservatorio Pierre Auger:

La fisica dei raggi cosmici di energia estrema

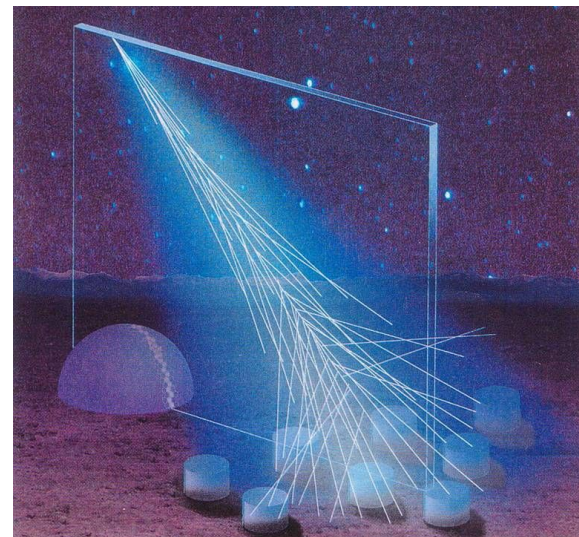
Lorenzo Caccianiga

per il gruppo Auger Milano



L'Osservatorio Pierre Auger

- Si trova in Argentina, provincia di Mendoza
- Copre un'area di $\sim 3000 \text{ km}^2$
- Osserva gli sciami (EAS) prodotti dai raggi cosmici primari in atmosfera
- Operativo dal 2004 e completato nel 2008
- Osserva eventi con $E > 3 \times 10^{17} \text{ eV}$ (UHECR)



Design Ibrido:

- **Rivelatore di superficie (SD):** array di 1660 WCD per campionare lo sciame al suolo
→Duty cycle $\sim 100\%$
- **Rivelatore di Fluorescenza (FD):** 27 telescopi di fluorescenza per osservare lo sviluppo longitudinale degli sciami
→Duty cycle $\sim 13\%$

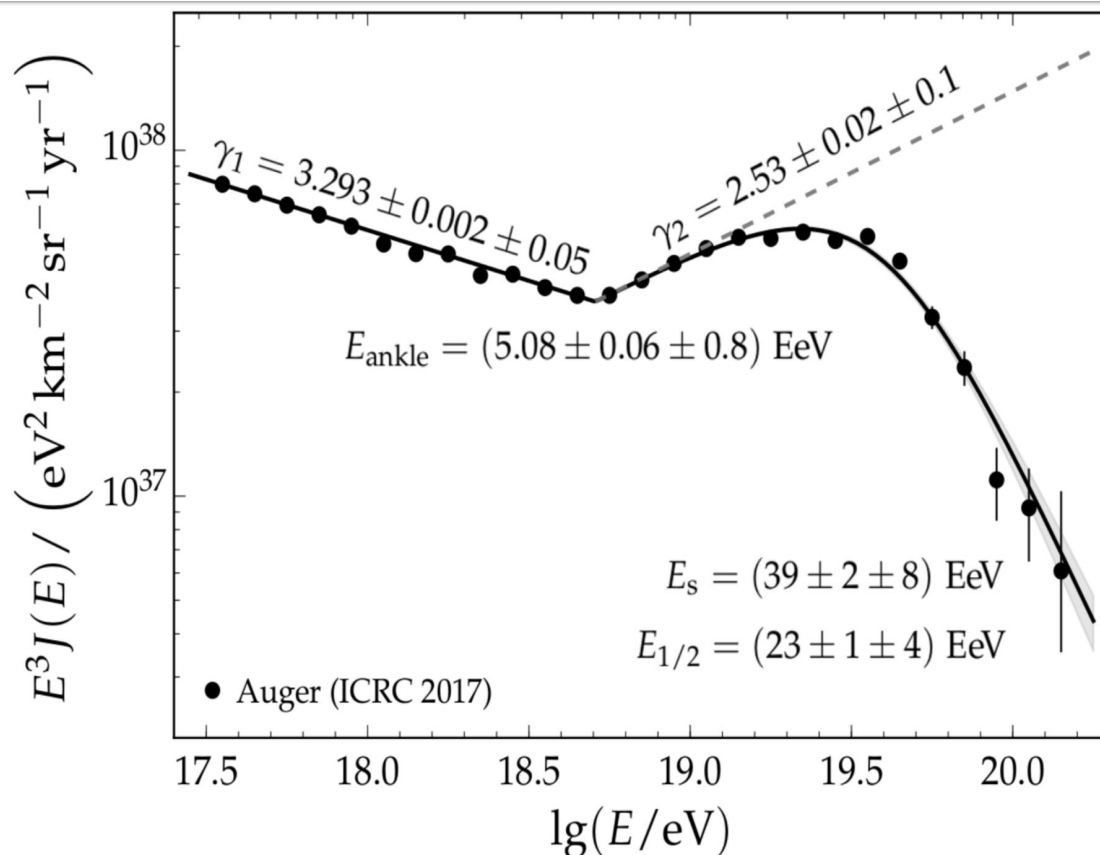
L'Osservatorio Pierre Auger - Risultati principali

Misura di alta precisione dello spettro dei raggi cosmici sopra 3×10^{17} eV:

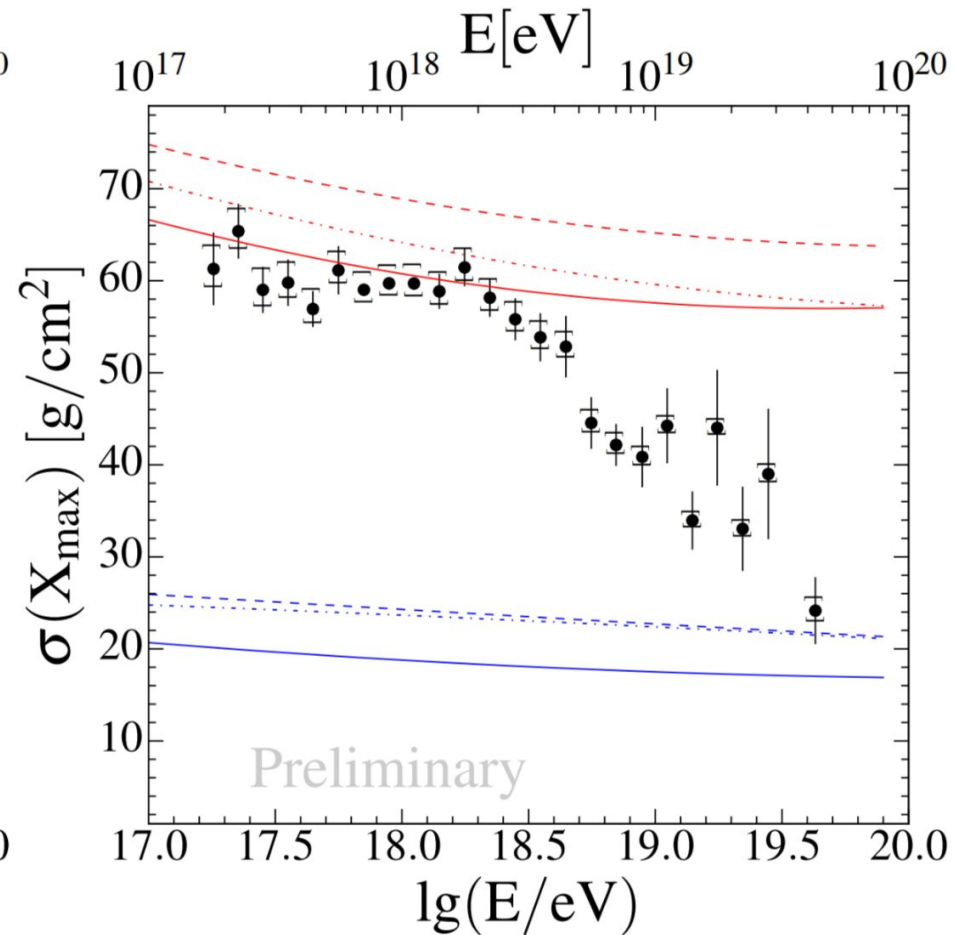
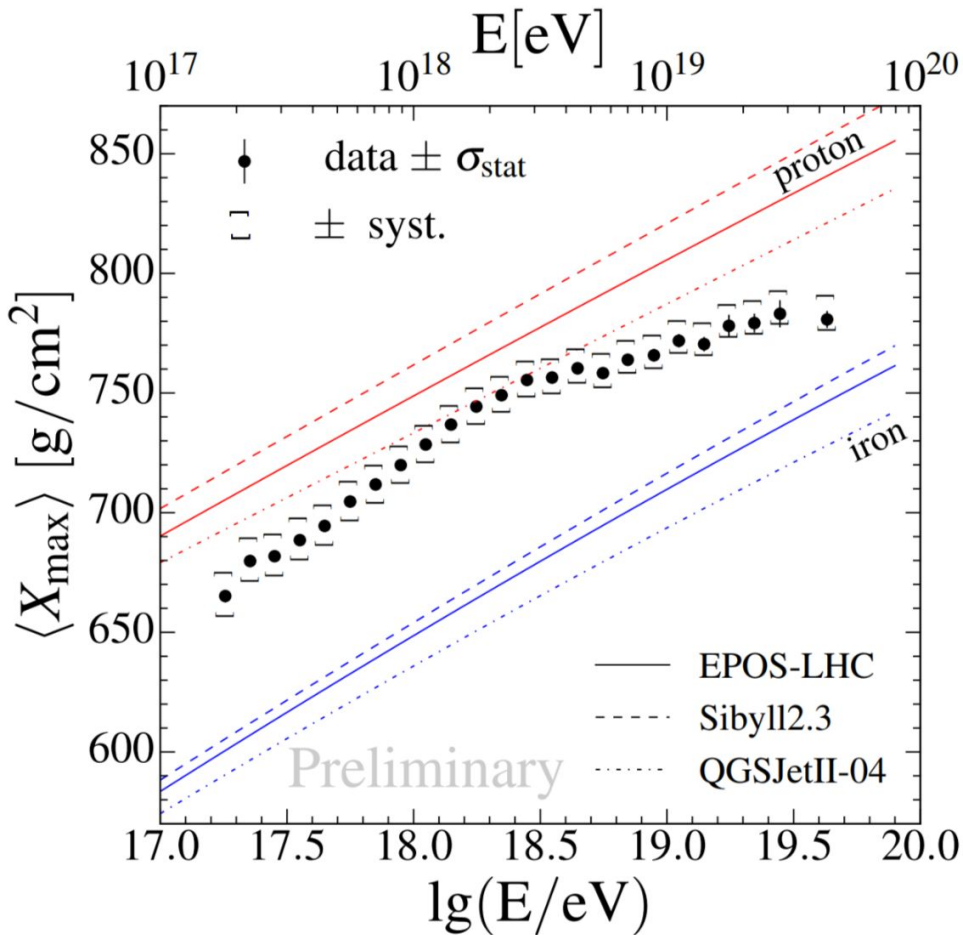
- Miglior stima della posizione della cosiddetta “**caviglia**”
- Conferma di un **cut-off** alle alte energie (oltre $\sim 4 \times 10^{19}$ eV)

Due scenari possibili:

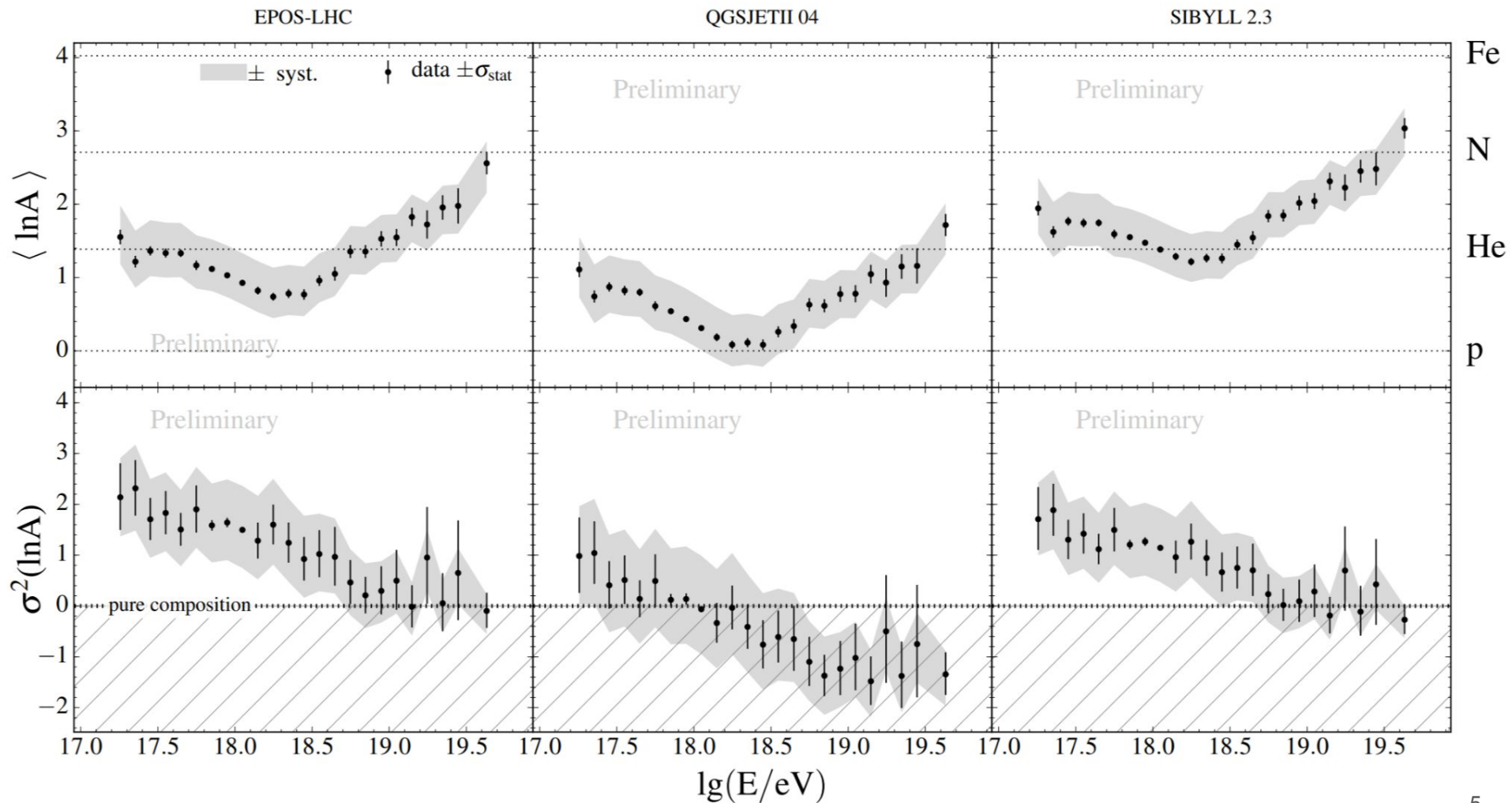
- Soppressione dovuta all'interazione dei raggi cosmici con i fondi di fotoni (effetto GZK e analoghi)
- Soppressione dovuta al limite nell'energia accessibile dalle sorgenti



Composition



Composition and Hadronic interactions



Composition and Hadronic interactions

M.Mallamaci for the Pierre Auger Collaboration – ICRC 2017

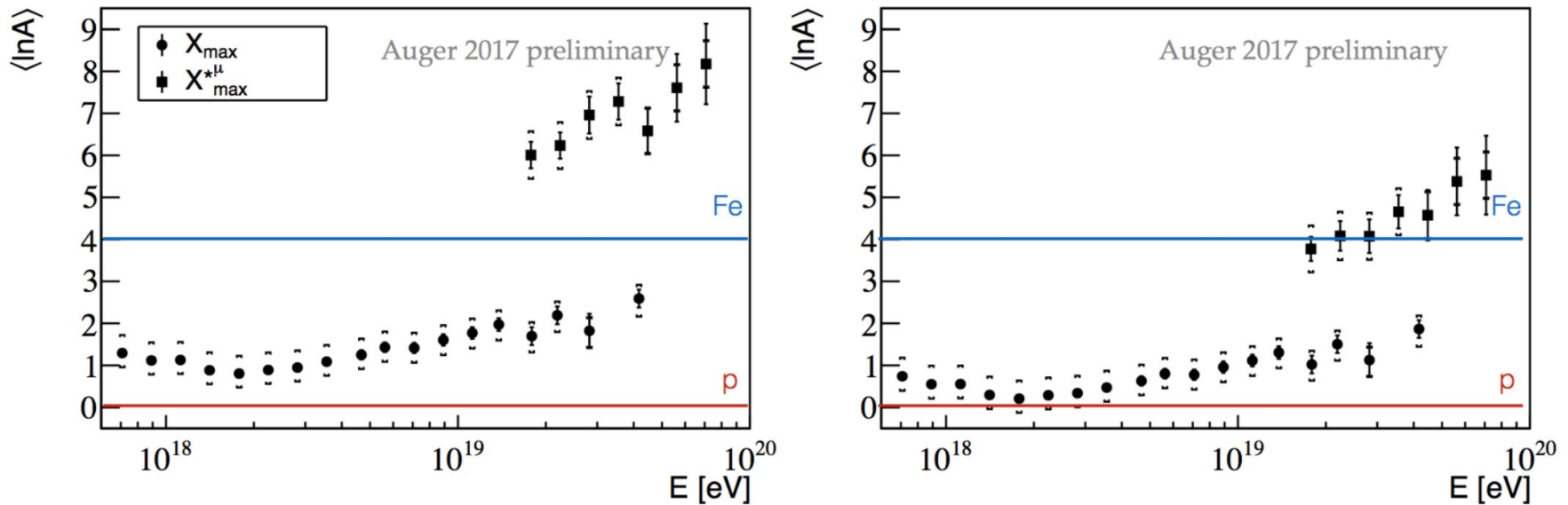


Figure 4: The evolution with energy of $\langle \ln A \rangle$ as obtained from the measured $X_{\max}^{*\mu}$ (squares). The results obtained for X_{\max} (dots) [2] are also shown. EPOS-LHC (left) and QGSJetII-04 (right) are used as reference models. Square brackets correspond to the systematic uncertainties.

Take home message: no hadronic interaction model currently describes ultra-high energy showers properly

Large scale anisotropies

Risultati pubblicati in Science 2017: osservato dipolo per $E > 8$ EeV data, non per 4-8 EeV

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 868:4 (12pp), 2018 November 20

Aab et al.

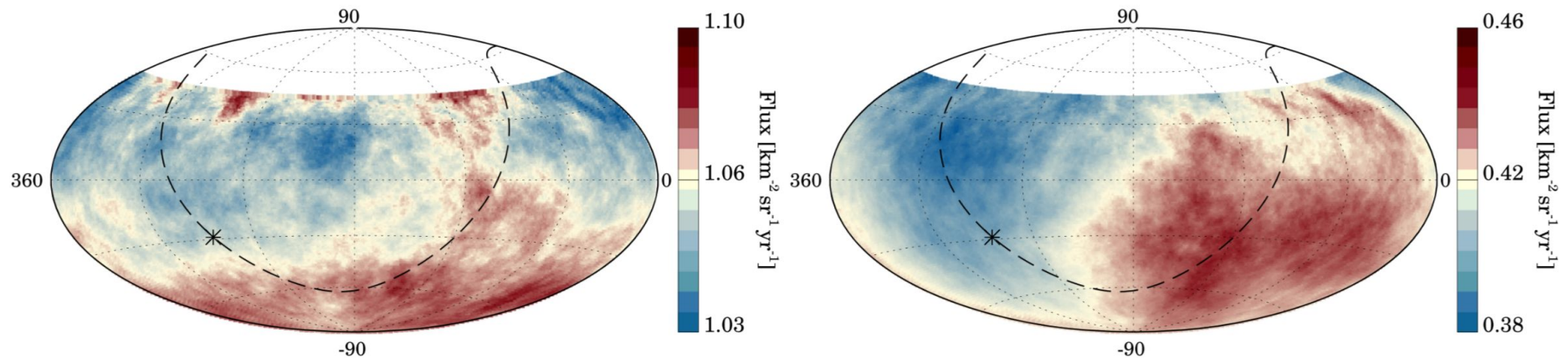


Figure 2. Maps in equatorial coordinates of the CR flux, smoothed in windows of 45° , for the energy bins [4, 8] EeV (left) and $E \geq 8$ EeV (right). The Galactic plane is represented with a dashed line, and the Galactic center is indicated with a star.

-> sopra 8 EeV quasi certa l'origine extragalattica. Anche tra 4 e 8 EeV favorita l'origine galattica

Small/intermediate scale anisotropies

Ricerca di correlazioni con candidate sorgenti

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 853:L29 (10pp), 2018 February 1

Aab et al.

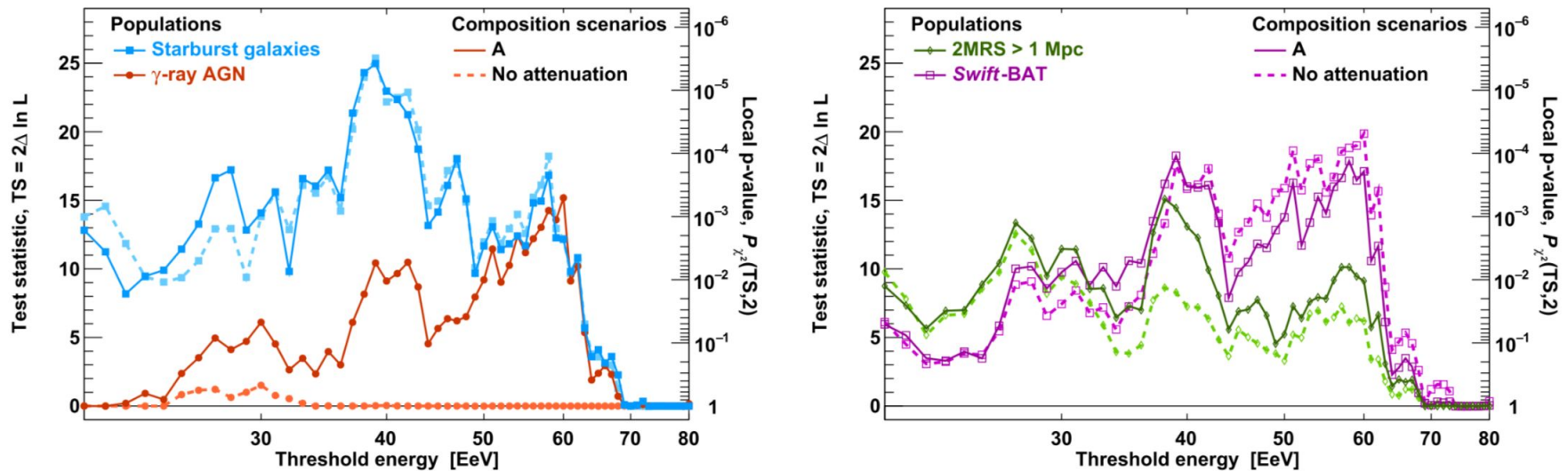
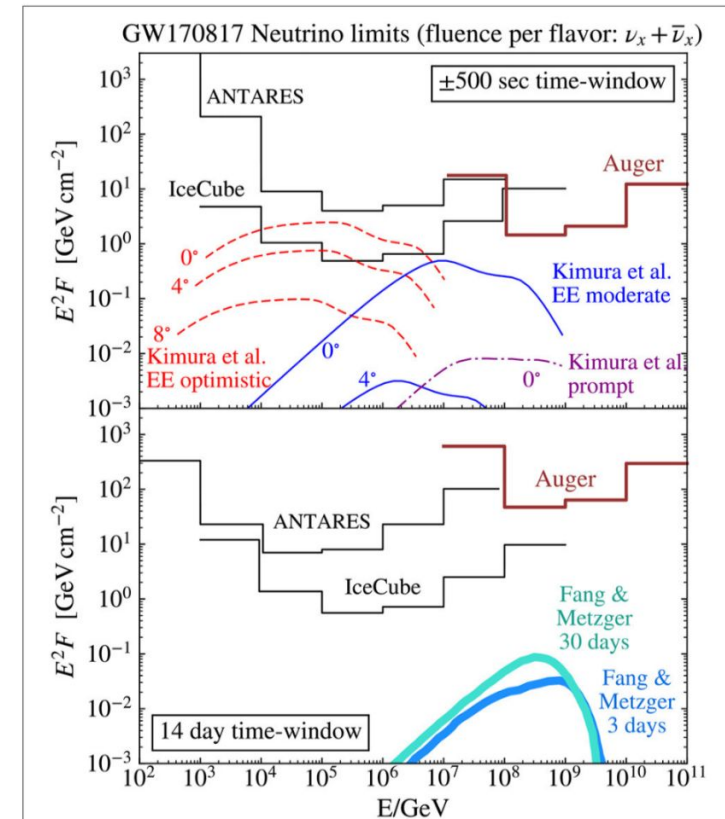
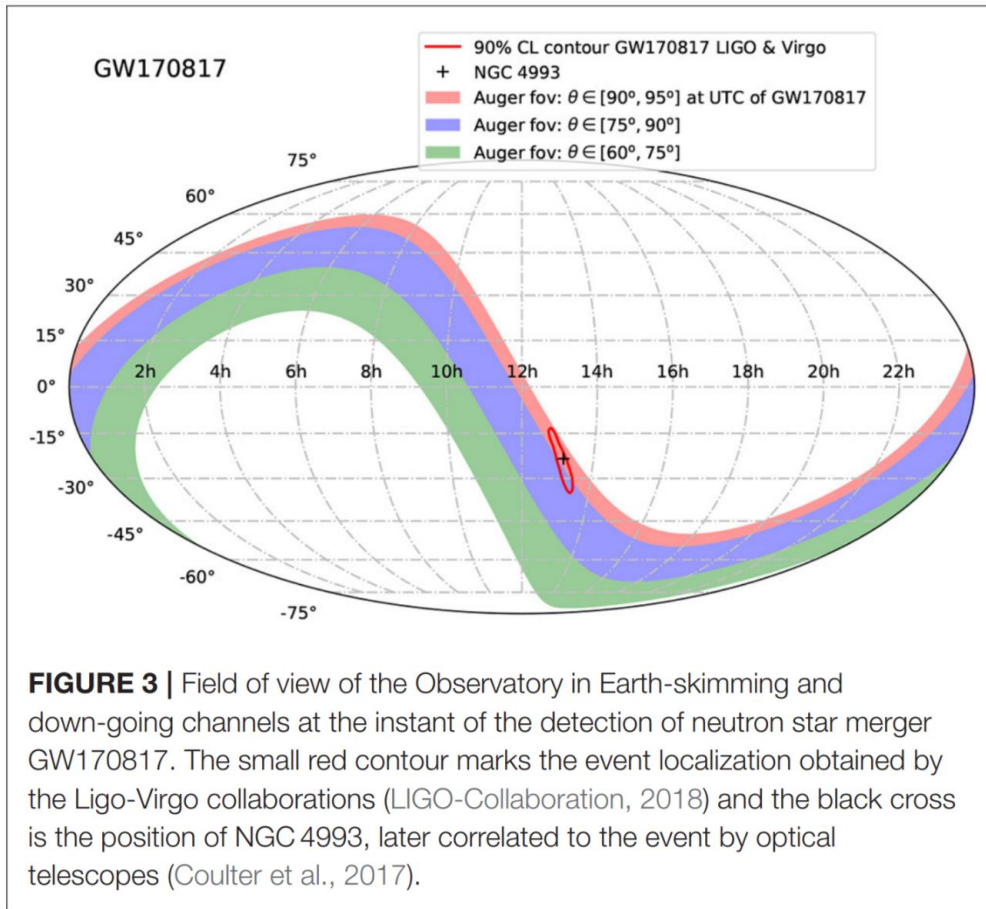


Figure 1. TS scan over the threshold energy for SBGs and AGNs (left) and *Swift*-BAT and 2MRS sources (right), including attenuation (lighter dashed lines) or not (darker solid lines).

Analisi Likeihood con scan in E_{th} , angolo e frazione isotropa

-> 4σ post-trial con le galassie starburst σ

Multi-messenger astrophysics - neutrinos

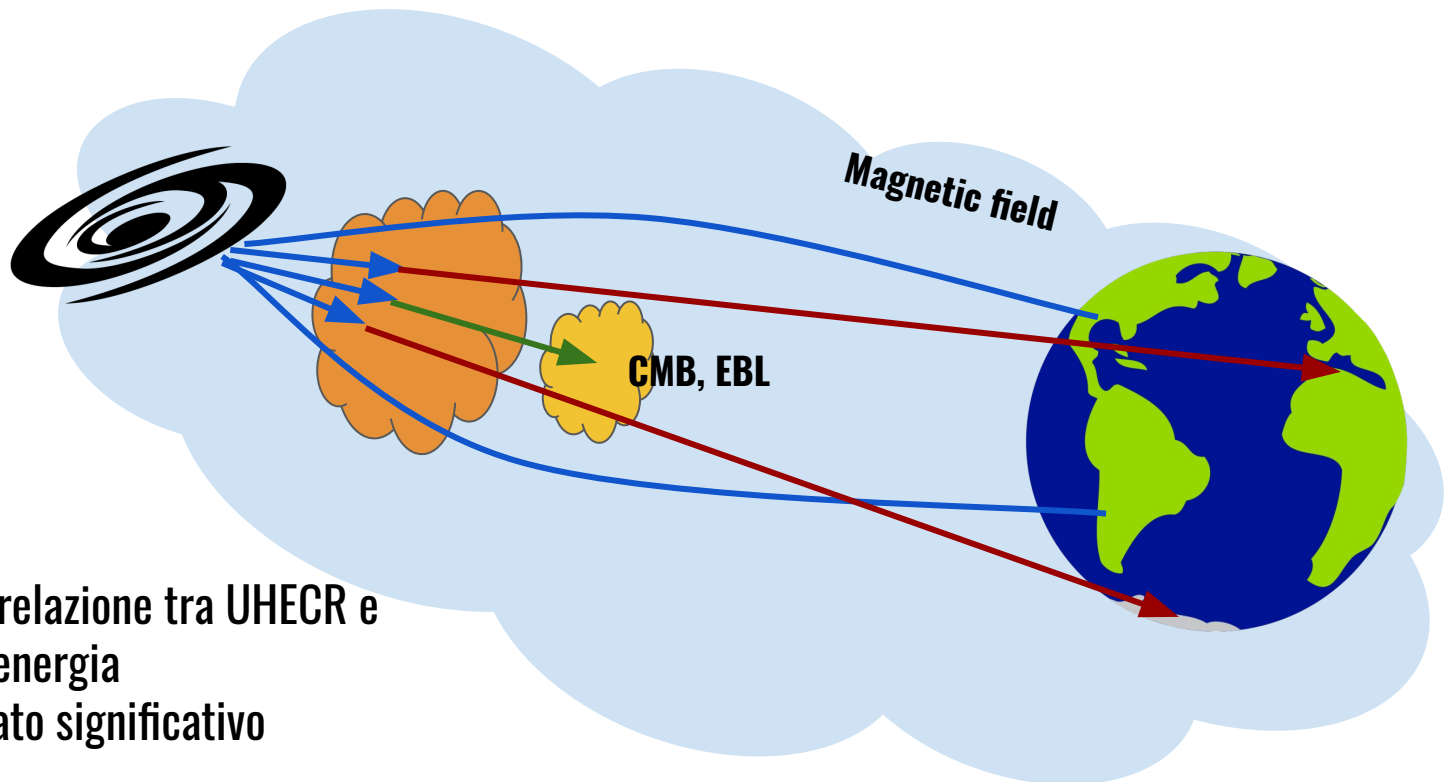
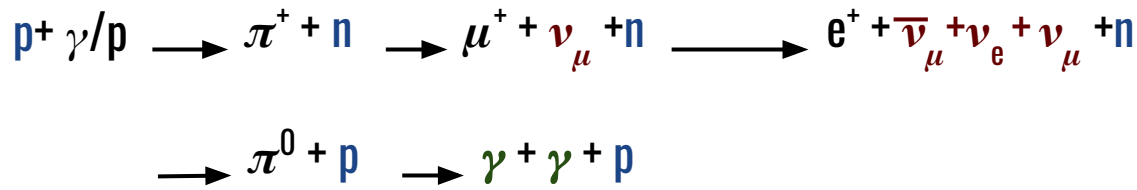


Limiti per il merger NS-NS - siamo stati fortunati!

**Multi-messenger
Observations of a Binary
Neutron Star Merger**

The Astrophysical Journal Letters,
848:L12, 2017

Search for neutrino-UHECR correlation



Si è cercata correlazione tra UHECR e neutrini di alta energia
-> nessun risultato significativo

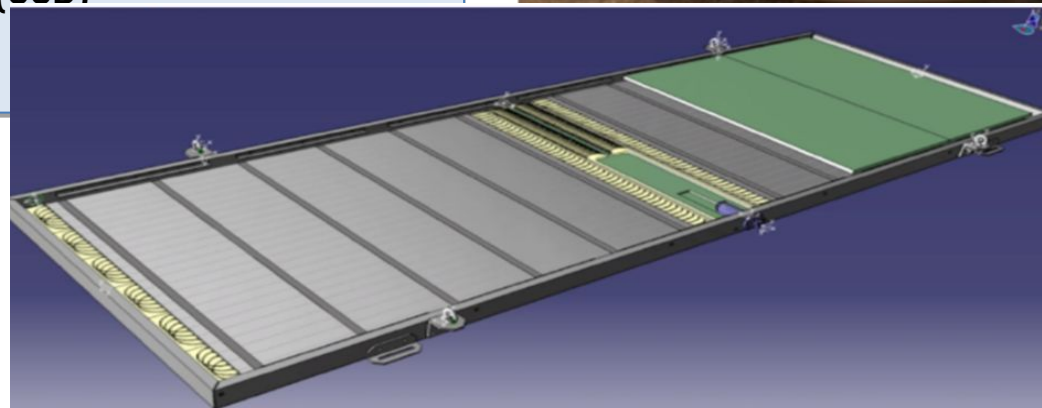
The Pierre Auger Observatory - Auger Prime

Il Futuro è qui: Auger Prime

Importante upgrade del detector:

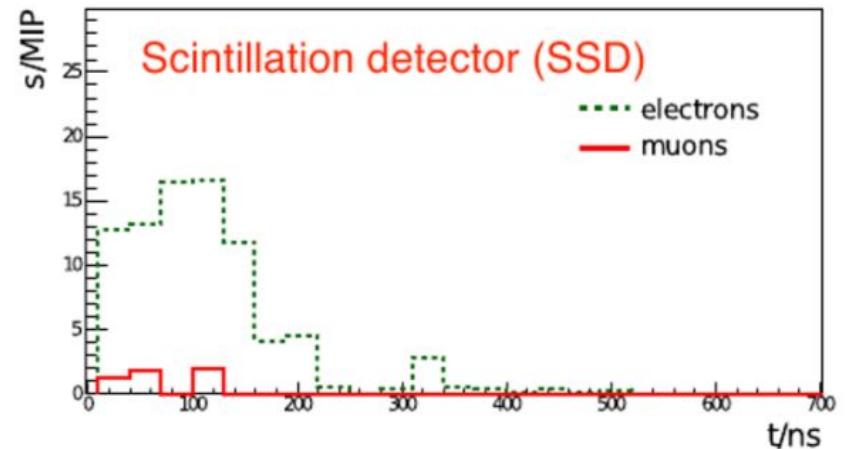
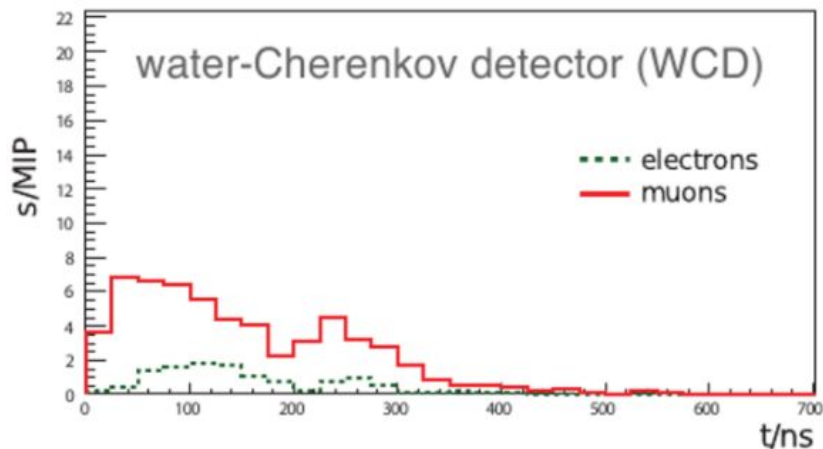
- **Elettronica più veloce**
- **Scintillatori** sopra quasi tutti i WCD (SSD)
- un fototubo addizionale (piccolo) per migliorare il **range dinamico**
- **antenne radio** su quasi ogni WCD
- Operazioni di FD estese a cieli più luminosi

Installazione già cominciata (SSD)



The Pierre Auger Observatory - Auger Prime

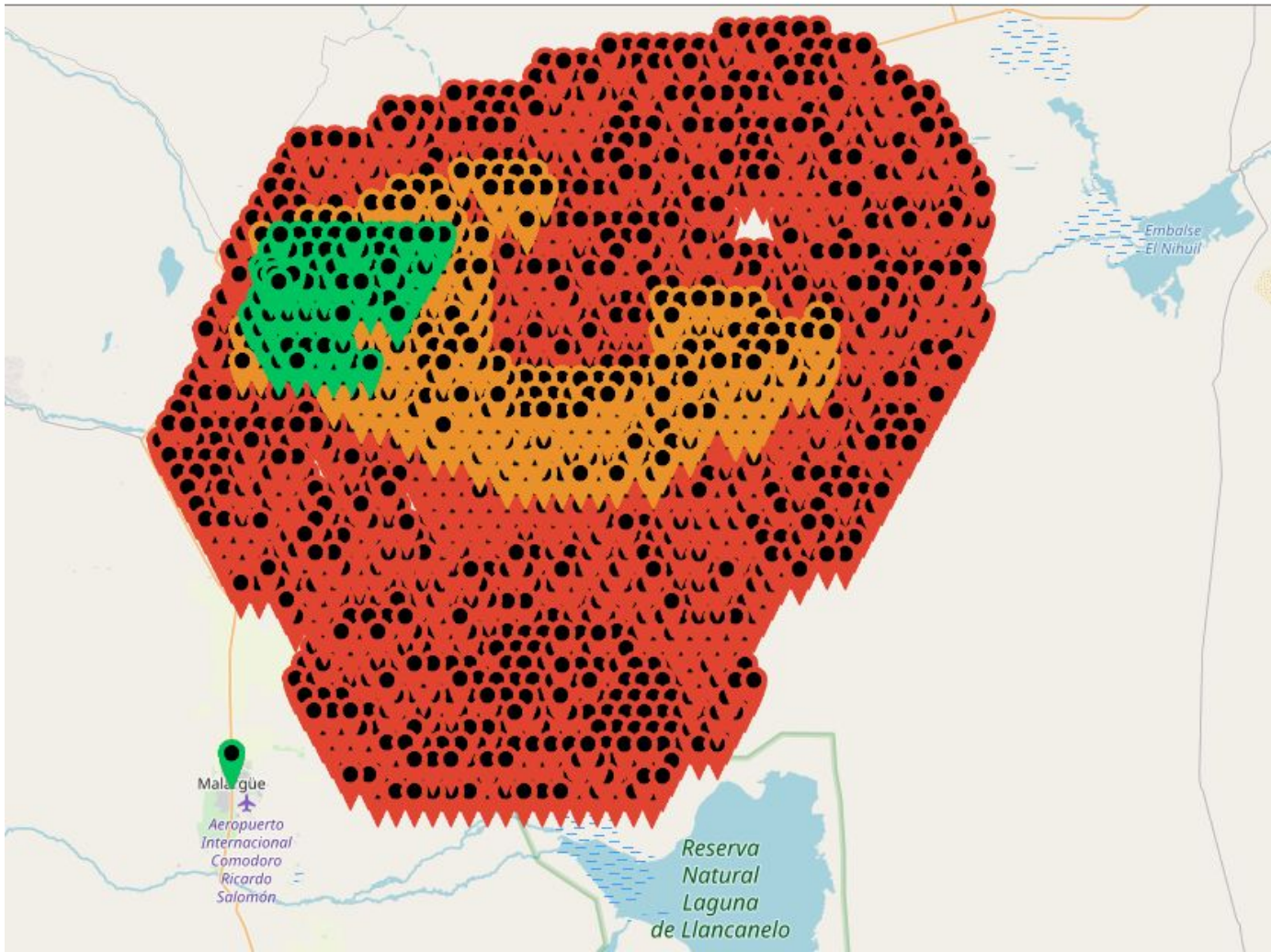
$$\begin{pmatrix} S_{SSD} \\ S_{WCD} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda A_{SSD} & A_{SSD} \\ \beta A_{WCD} & A_{WCD} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathcal{F}_{em} \\ \mathcal{F}_{\mu} \end{pmatrix}$$



The Pierre Auger Observatory - Auger Prime

with PMT (79 detectors) w/o PMT (248 detectors)

SSD not installed (1339 detectors)



The Pierre Auger Observatory - Auger Prime

SSD sarà efficace soprattutto per sciami verticali
(bassa sezione per sciami orizzontali=

Un array radio, AERA detector, con piccola area e
piccolo spacing è già operativa in Auger

-> Esteso a tutto l'array (finanziato tramite ERC)

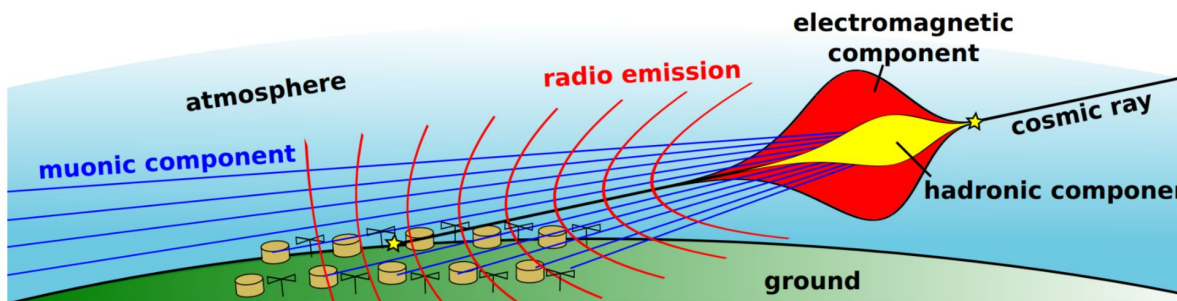
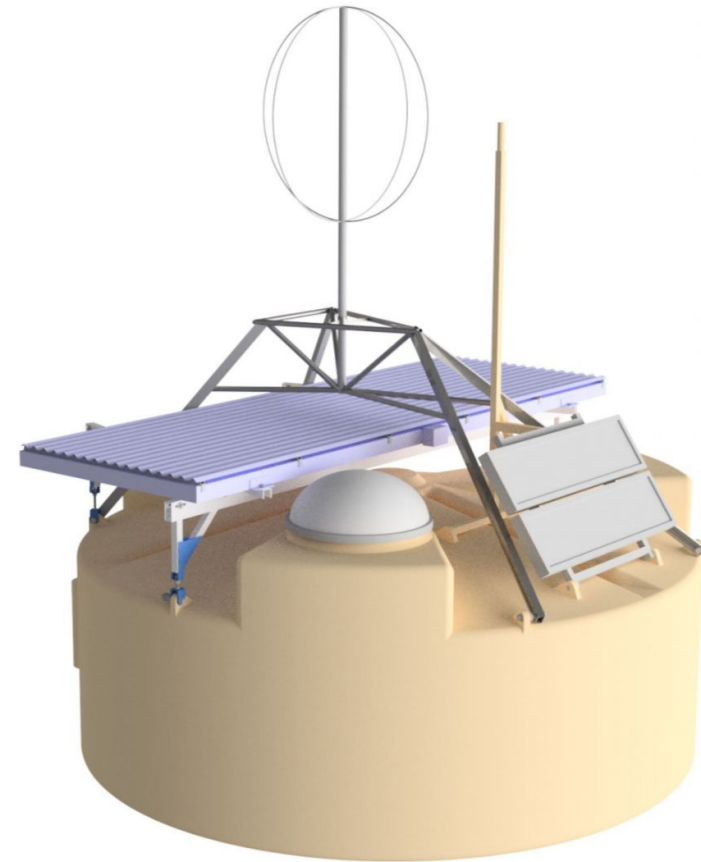


Figure 7. Sketch of a horizontal air shower. The electromagnetic as well as the hadronic air shower components are absorbed in the atmosphere and only muons penetrate to the detectors. The atmosphere is transparent to radiation with frequencies in the 30 – 80 MHz band. (courtesy Ewa Holt)



L'Osservatorio Pierre Auger - Papers

Papers pubblicati nel periodo luglio 2018 - giugno 2019:

Multi-Messenger Physics with the Pierre Auger Observatory Front. Astron. Space Sci. 6:24 (2019)

Measurement of the average shape of longitudinal profiles of cosmic ray air-showers at the Pierre Auger Observatory JCAP03(2019)018

Large-scale cosmic-ray anisotropies above 4 EeV measured by the Pierre Auger Observatory The Astrophysical Journal, Volume 868, Number 1 (2018)

Observation of inclined EeV air showers with the radio detector of the Pierre Auger Observatory JCAP10(2018)026

- + 4 papers submitted
 - + 34 interventi ad ICRC 2019
 - > **Anisotropies of the highest energy cosmic-ray events recorded by the Pierre Auger Observatory in 15 years of operation**
- L. Caccianiga for the Pierre Auger Collaboration

Il gruppo Auger Milano

Lino Miramonti, Marco Giammarchi, Gianni Consolati (Polimi), Mariangela Longhi (Chimica Unimi), Lorenzo Caccianiga, Francesco Cavaliere (Officina Unimi)

- Caratterizzazione e aiuto nella costruzione e nel deployment degli scintillatori per Auger Prime
- Controllo della stabilità, calibrazione e qualità dei dati del rivelatore esistente (e del futuro appena sul campo)
- Ricerca di anisotropie e correlazioni alle alte energie (trans-GZK) e possibili approcci multi-messenger (correlazione con gamma, neutrini, ecc.)

Talk a conferenze internazionali:

- L. Caccianiga: “The Highlights of the Pierre Auger Observatory” - XIII Workshop on Multifrequency behavior of high energy cosmic sources. Palermo Giugno 2019

Il gruppo Auger Milano nella collaborazione

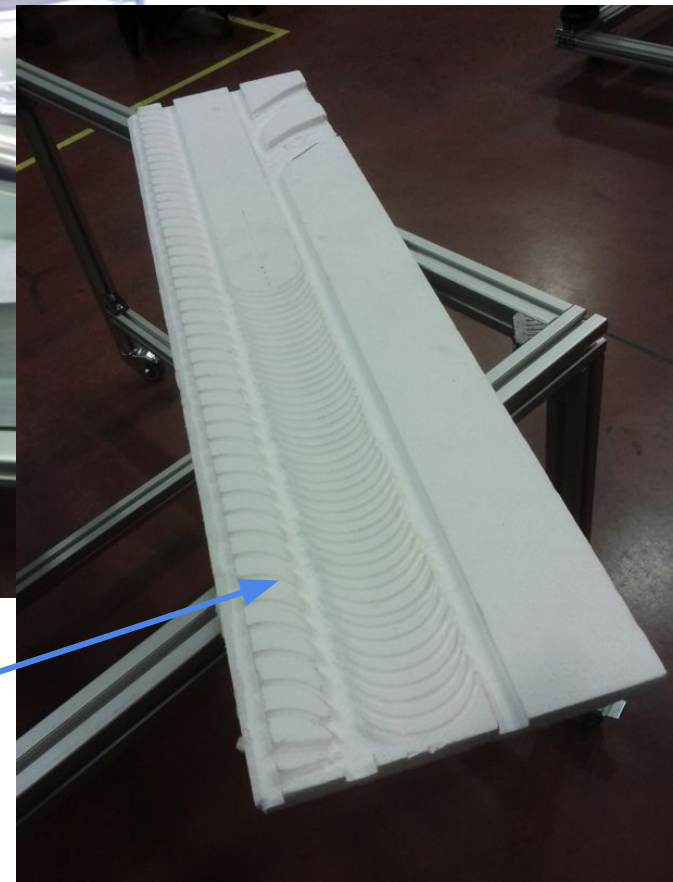
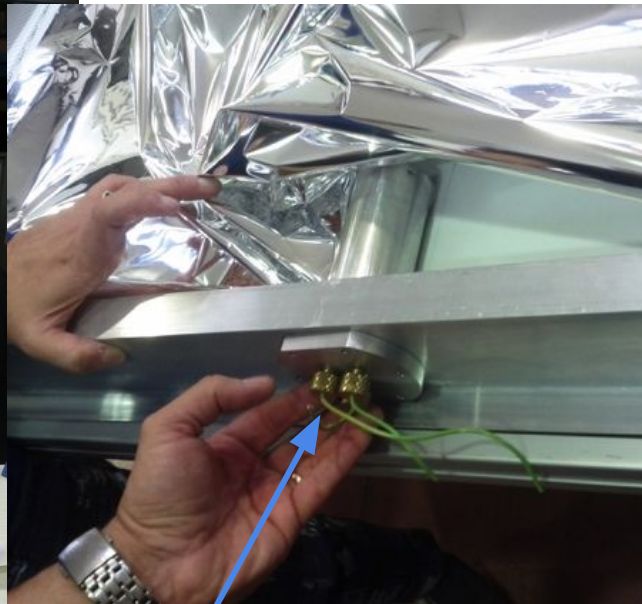
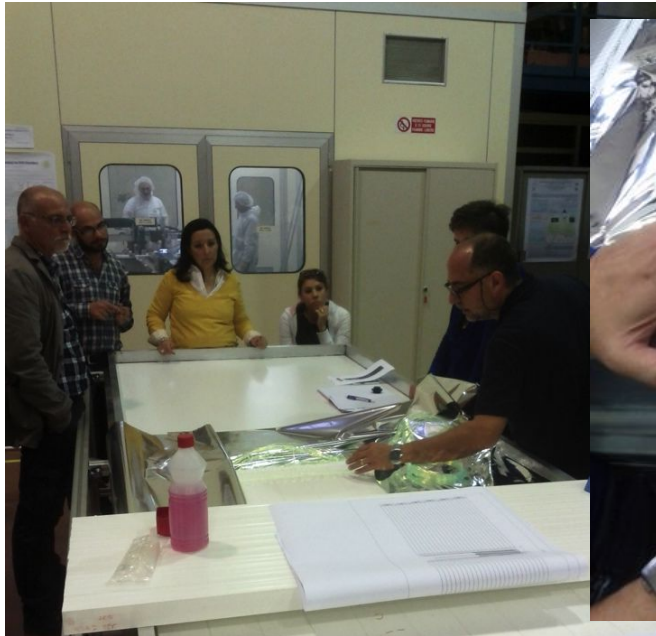
L. Caccianiga:

- Responsabile ricostruzione Herald (da Settembre 2019)
- Membro working group ANTARES - IceCube - Telescope Array -Auger
Ricerca di correlazioni tra UHECR e neutrini di alta energia
- Membro working group anisotropie Auger-Telescope Array
Studi di anisotropia sull'intero cielo
- Membro task arrival direction
Speaker designato per ICRC 2019, responsabile ricerca di neutroni

Attività di supporto:

- **SD Shift Maggio 2019** (L. Miramonti, G. Consolati, L. Caccianiga, M. Giammarchi)
- **FD Shift Luglio/Agosto 2019** (C. Galelli, Laureando Magistrale)
- **FD Shift remoto (Torino) Gennaio/Febbraio 2018** (G. Consolati)
- **Marzo 2019** Supporto al deployment dell'upgrade (F. Cavaliere)

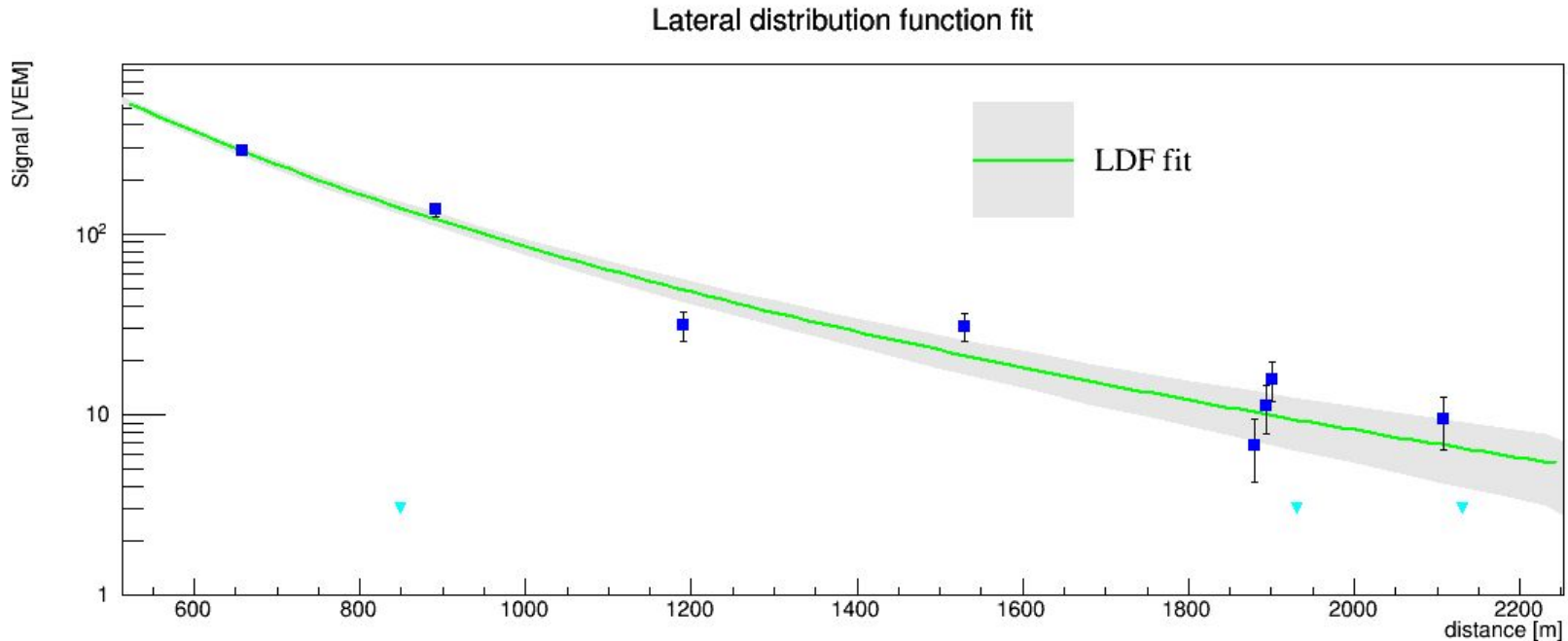
Il gruppo Auger Milano - Auger Prime



Impegno di Milano:

- Design e procurement dei Routers
- Flange alluminio del PM
- Studio e test per colla e oscuramento
- Caratterizzazione dei primi scintillatori di pre-produzione (Tesi Magistrale di Orazio Zapparrata, Aprile 2018)

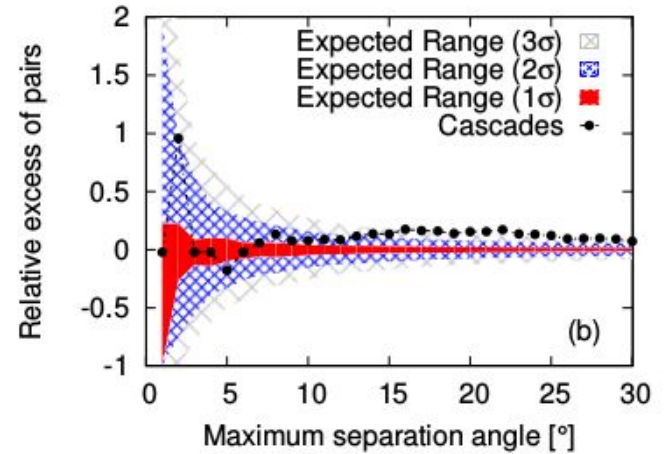
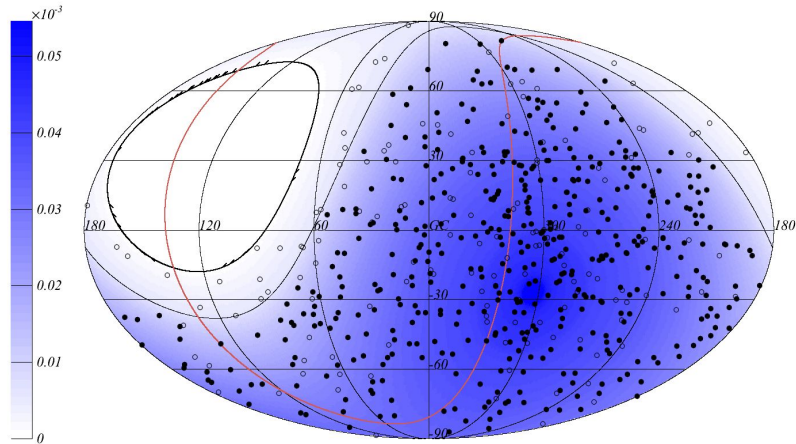
Il gruppo Auger Milano - Detector



- Costruzione e validazione del dataset delle altissime energie ($E > 3.2 \times 10^{19}$ eV)
- Controllo di qualità dei fototubi
- Miglioramento degli algoritmi di ricostruzione

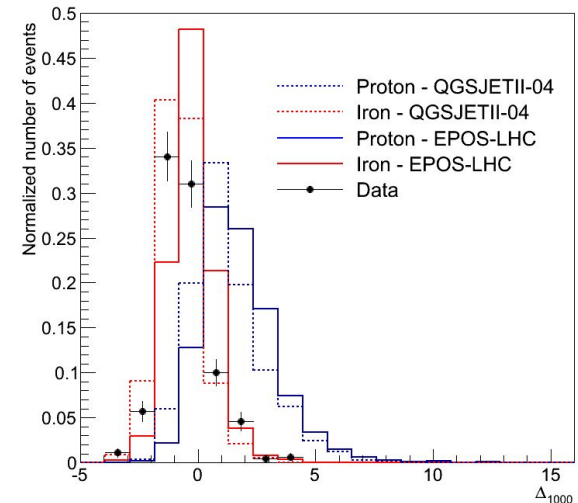
Tesi Triennale di Alessandro Cermenati
(Dicembre 2018)

Il gruppo Auger Milano - Anisotropie



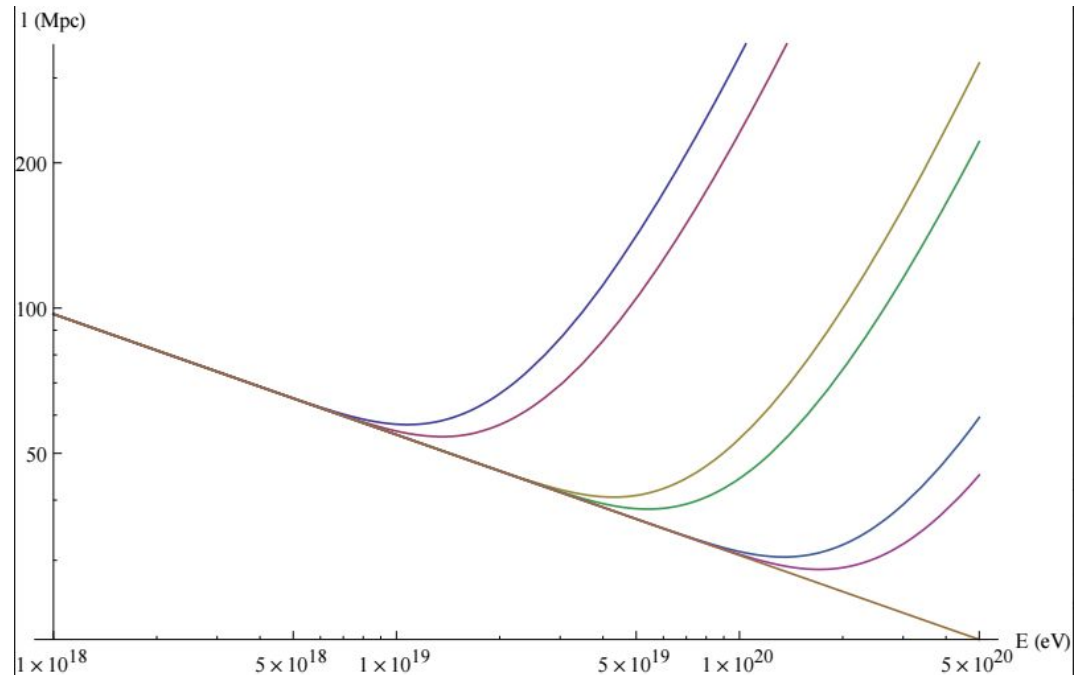
(b)

- Ricerca di neutroni da oggetti galattici (Tesi triennale di Federico Mariani, Marzo 2019)
- Correlazione con altri messenger (Working group Auger-TA-IceCube)
- Metodi di analisi avanzata (MVA) per discriminazione di massa evento-per evento



Il gruppo Auger Milano - LIV

- LIV introdotta modificando le relazioni di dispersione che descrivono la dinamica dei fermioni massivi.
- Effetti previsti in teorie della gravità, come teoria delle stringhe e loop quantum gravity, che introducono una struttura quantizzata dello spazio-tempo.



Da una prima teoria efficace e dalle conseguenti valutazioni numeriche risulta possibile che piccole violazioni dell'invarianza di Lorentz (termini dell'ordine di 10^{-23}) possano implicare una totale soppressione del GZK cut-off o comunque una sua modifica.

→ possibilità di osservare raggi cosmici trans-GZK oltre il normale "orizzonte GZK"

→ possibilità di verificare l'esistenza di LIV tramite osservazioni di UHECR

Dottorato di M. Torri (Febbraio 2019)

Il gruppo Auger Milano - Richieste economiche

L. Miramonti	60% Associato PA Unimi
M. Giammarchi	50% I° Ric. INFN
G. Consolati	60% Associato PA Polimi
L. Caccianiga	100% Ric. INFN
M. Longhi	30% Associata PA Unimi

Richieste 2019, verosimilmente simili a quelle 2020

Missioni	38500
Consumo	
Apparati	2400
Inventario	2000



Thank you for your attention!

Search for neutrino-UHECR correlation

- WG presented at UHECR 2014 originally with **IceCube, Telescope Array and Auger**
 - in 2017 **ANTARES** enters the WG.
- First results presented at ICRC 2015 and published in JCAP 1601 (2016) 01, 037.
- Updated at ICRC 2017 with new neutrino data from IceCube and 1 more year of TA data

Three analyses:

- 1) Cross-correlation method using the high-energy cascades and the high-energy tracks
- 2) Likelihood method stacking the high-energy cascades and the high-energy tracks
- 3) Likelihood method stacking UHECRs and using the neutrino point source sample

- In the first publication, potentially interesting results were found in the analyses done between UHECR and high-energy cascades. **These p-values have become larger with more statistics.**
- Updated cross-correlation results was presented at UHECR 2018 with new data from Auger, TA and data from ANTARES for the first time.

The p-values for cascades have increased up to $\sim 2.7 \times 10^{-2}$

- See also L. Caccianiga for the 4 collaborations, <http://arxiv.org/abs/1905.03997>

Multi-messenger astrophysics - photons

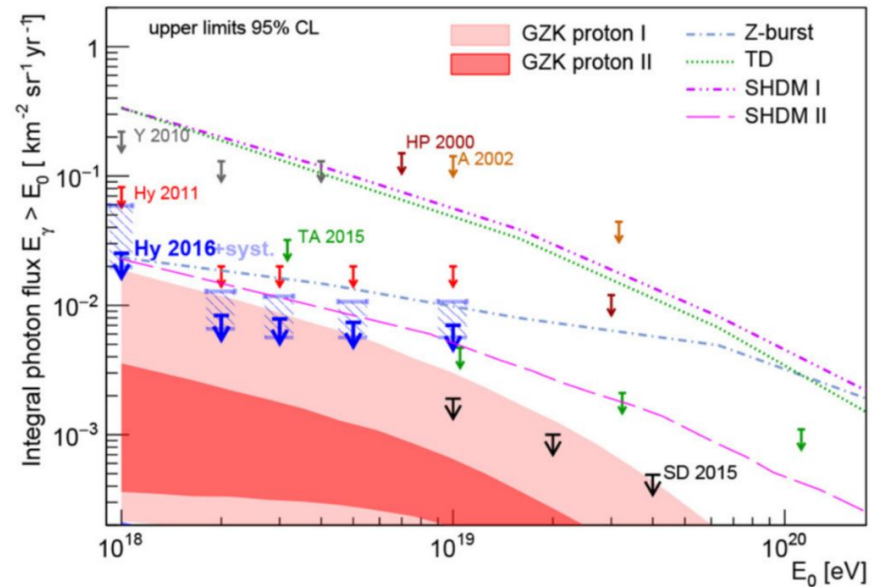
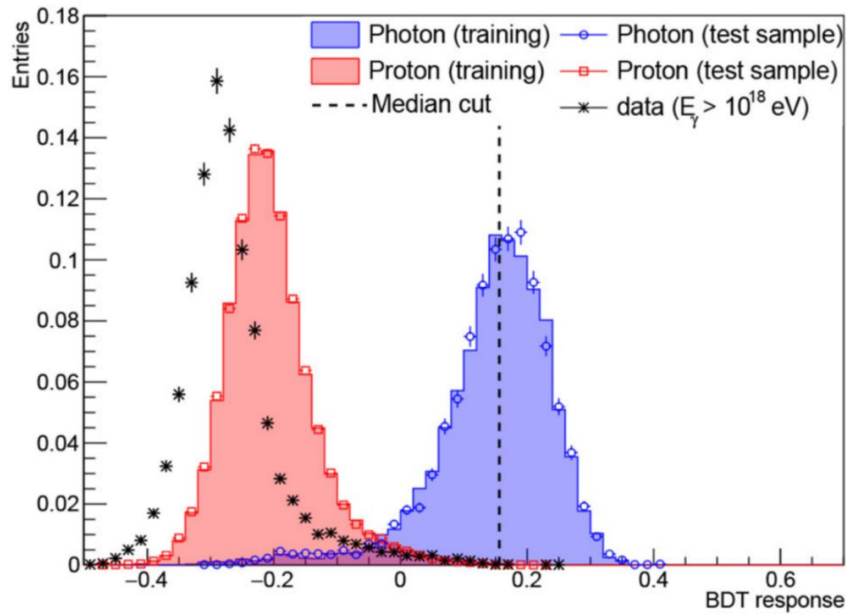


FIGURE 5 | (Left) Photon identification with a Boosted Decision Tree for signal (photon, blue), background (proton, red) and data (black). For simulations, both the training and the test samples are shown. The cut at the median of the photon distribution is indicated by the dashed line. QGSJET-II-04 is used as high-energy hadronic interaction model. **(Right)** Compilation of upper limits on the integral photon fluxes from Aab et al. (2017e). Blue arrows: Integral photon upper limits from the 9 year hybrid data sample assuming a photon flux following E^{-2} and with no background subtraction. The limits obtained when the detector systematic uncertainties are taken into account are shown as horizontal segments (light blue) delimiting a dashed-filled box at each energy threshold; Black arrows: Nine year SD data sample (Bleve, 2016). Previous data from Auger as well as data from TA, AGASA, Yakutsk, and Haverah Park are included for comparison. The lines and shaded regions give the predictions for top-down models and GZK photon fluxes, respectively, assuming different parameters (references can be found in Aab et al., 2017e).

Multi-messenger astrophysics - photons

