

Anisotropia dei raggi cosmici di altissima energia nei dati dell'Osservatorio Pierre Auger

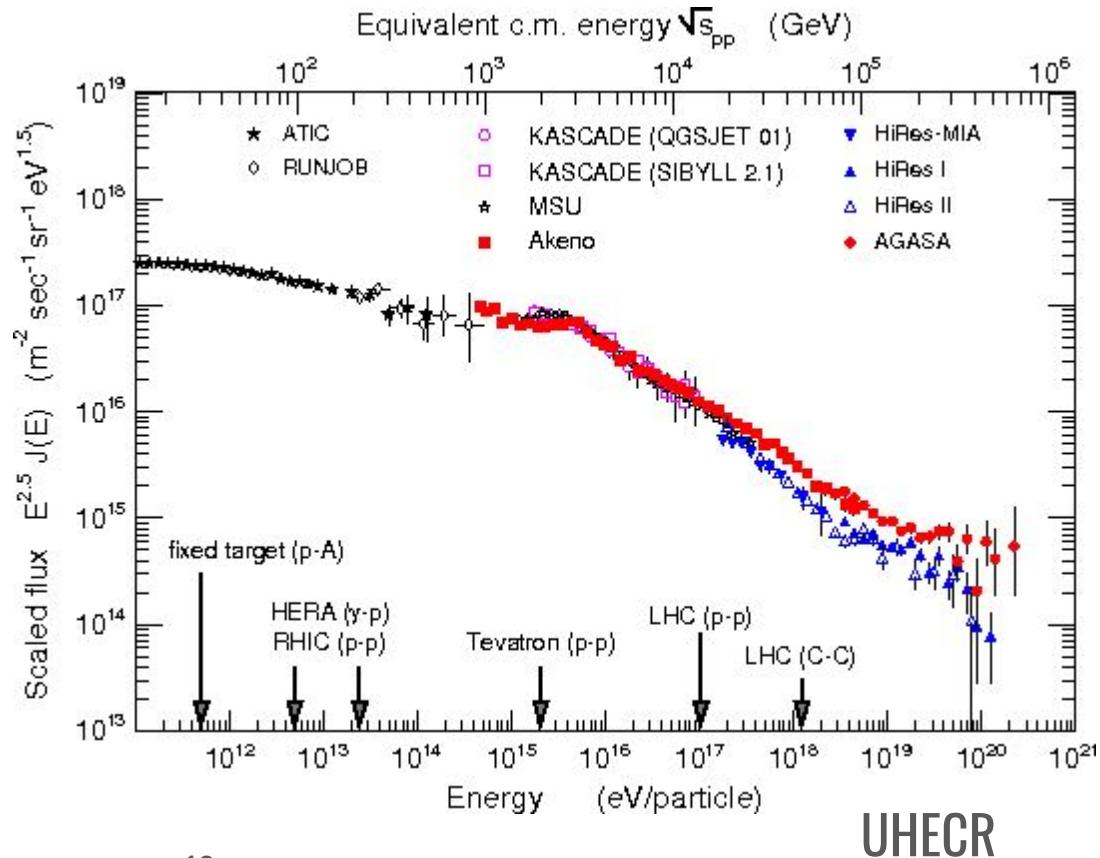
Lorenzo Caccianiga
For the Pierre Auger Collaboration

INFN - Sezione di Milano

IFAE 2019

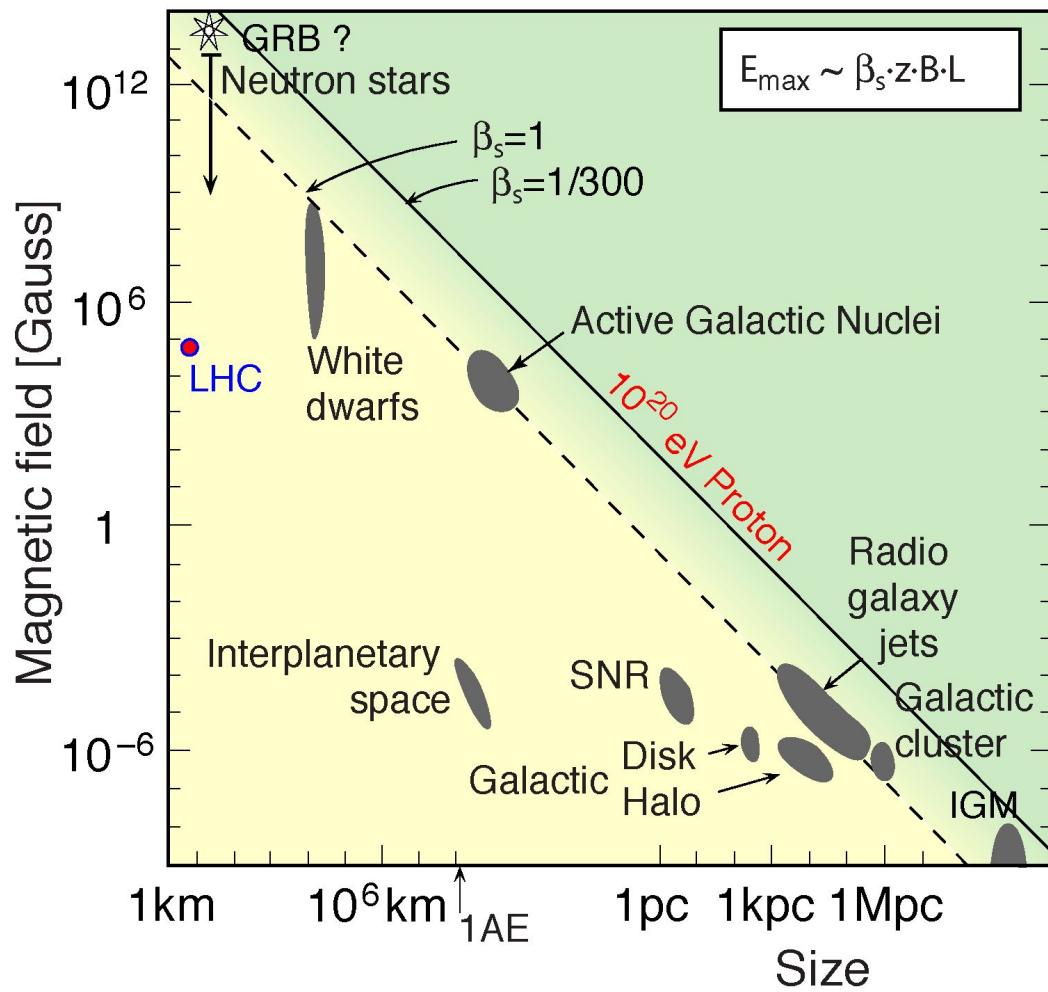
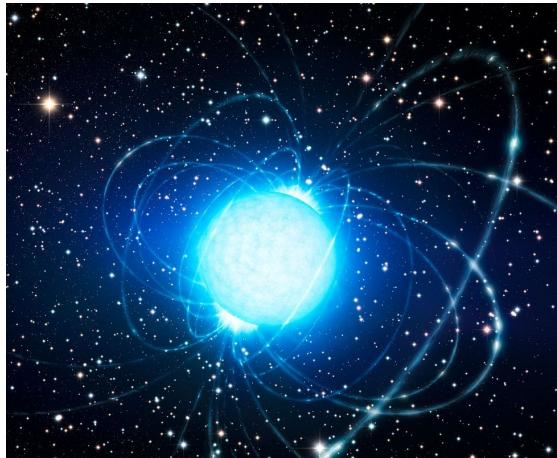
Motivazione

“...What extraordinary processes are capable of accelerating particles to such enormous energies? In the hope of finding clues to the solution, physicists would like to know whether the most energetic particles come from all directions or only from certain regions of the sky...” Bruno Rossi, 1964



$$1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$$

Possibili sorgenti

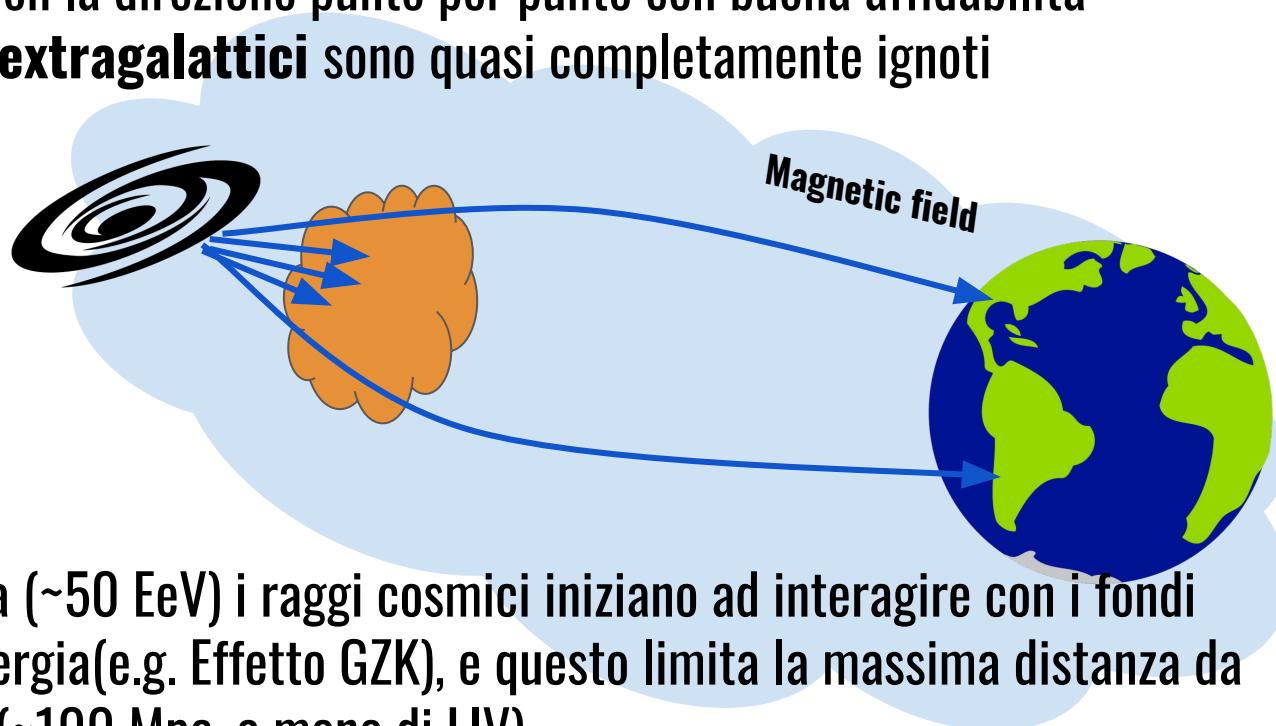


Propagazione

I raggi cosmici sono **particelle cariche**: sono deflessi dai campi magnetici che incontrano mentre propagano

I **campi magnetici galattici** sono studiati ma i modelli per descriverli sono ancora ampiamente incerti: è stimabile l'ordine di grandezza di deflessione media ($\sim 3^\circ$ per un p a 100 EeV) ma non la direzione punto per punto con buona affidabilità

I **campi magnetici extragalattici** sono quasi completamente ignoti



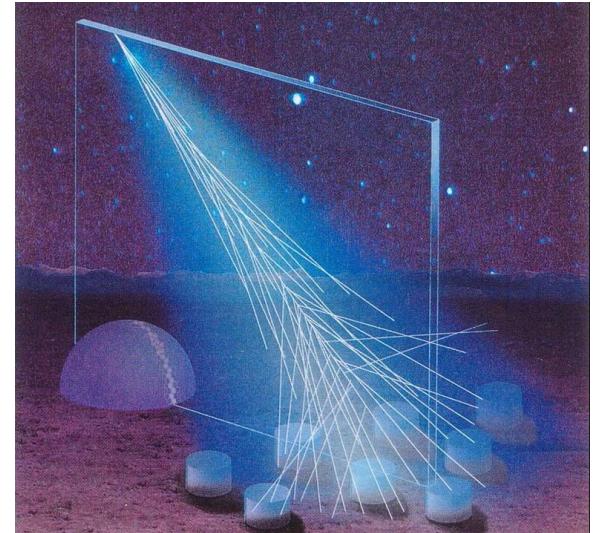
Oltre una certa soglia (~ 50 EeV) i raggi cosmici iniziano ad interagire con i fondi cosmici perdendo energia (e.g. Effetto GZK), e questo limita la massima distanza da cui possono arrivare (~ 100 Mpc, a meno di LIV)

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)

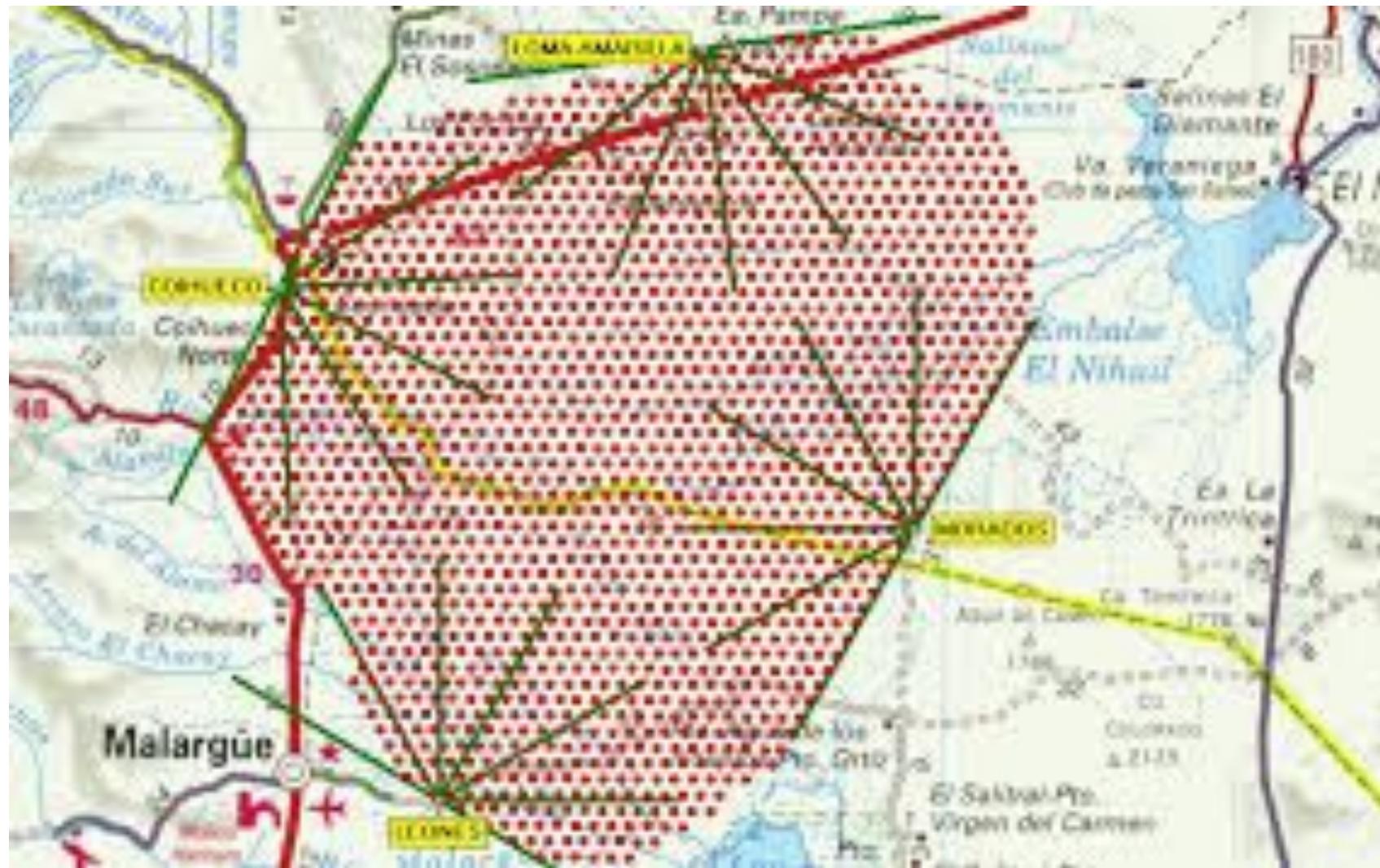


Design *Irido*:



- **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

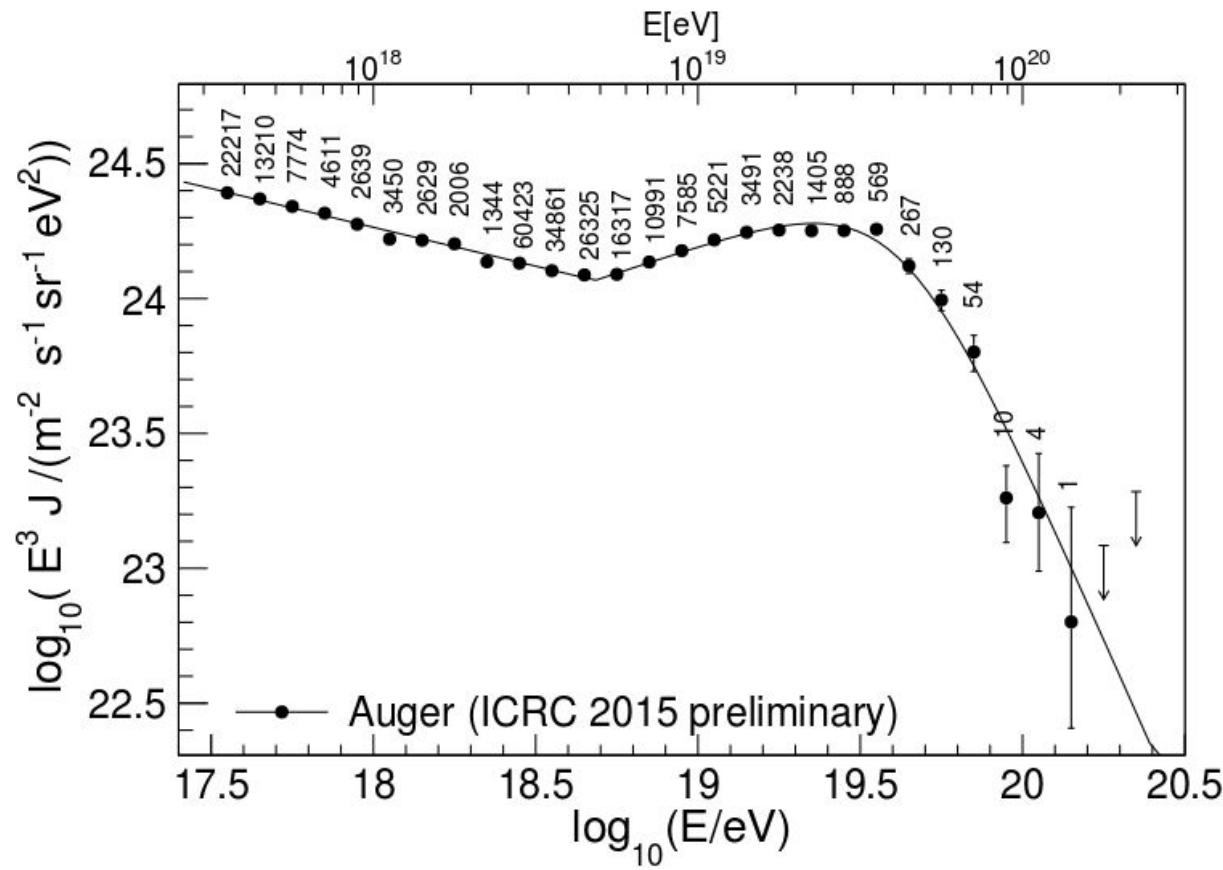


L'Osservatorio Pierre Auger - Spettro

Conferma di un **cut-off**
alle alte energie (~ 40 EeV)

Due scenari possibili:

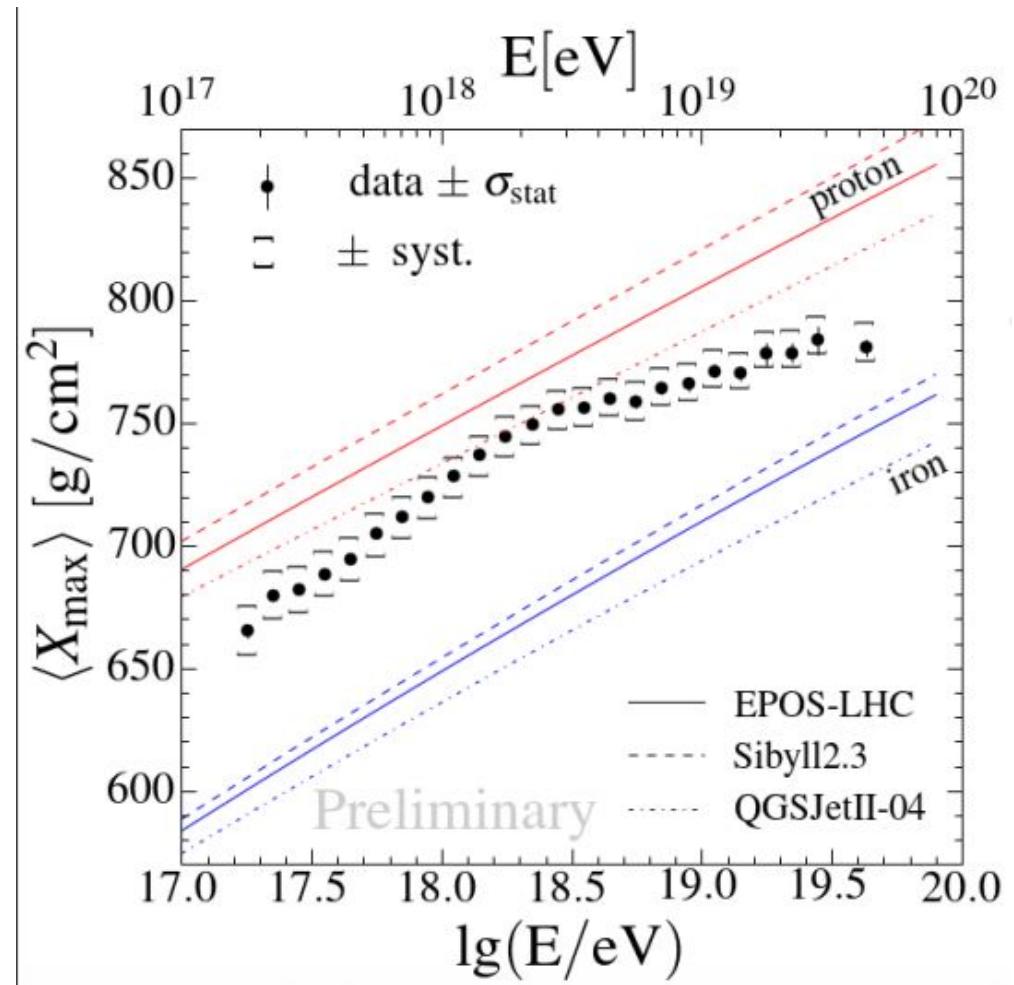
- interazione dei raggi cosmici con i fondi di fotoni (effetto GZK e analoghi)
- Soppressione dovuta al limite nell'energia accessibile dalle sorgenti



L'Osservatorio Pierre Auger - Composizione

Misure medie basate solo su dati FD (~10% dei dati)

- Trend verso **masse pesanti** alle alte energie, **MA**
- i **modelli adronici** non sono sufficientemente accurati da permettere una conversione affidabile in $\langle A \rangle$
- Le misure sono **medie**: non è esclusa la presenza di una frazione di componente leggera a alta energia
- Pochissimi dati alle **altissime energie**



Strategie per la ricerca di correlazioni

A “bassa” energia (1-10 EeV)

Ricerca di anisotropie su larga scala

Scopo: studiare l’evoluzione dell’importanza dell’anisotropia e della sua direzione rispetto all’energia, per identificare le caratteristiche generali della distribuzione delle sorgenti.

Metodo principale: analisi di Rayleigh in ascensione retta

Difficoltà principali: controllo delle incertezze sul flusso al livello inferiore al %.

Ad alta energia (> 20 EeV)

Ricerca di anisotropie su scala “piccola”

Scopo: sfruttare l’effetto GZK e la rigidità crescente con l’energia per cercare eccessi in direzione di potenziali sorgenti

Metodo principale: confronto delle direzioni di arrivo degli UHECR con le posizioni di candidate sorgenti

Difficoltà principali: deflessioni nei campi magnetici ignote per entità e direzione. Bassa statistica. Trial factors per il test di molti scenari.

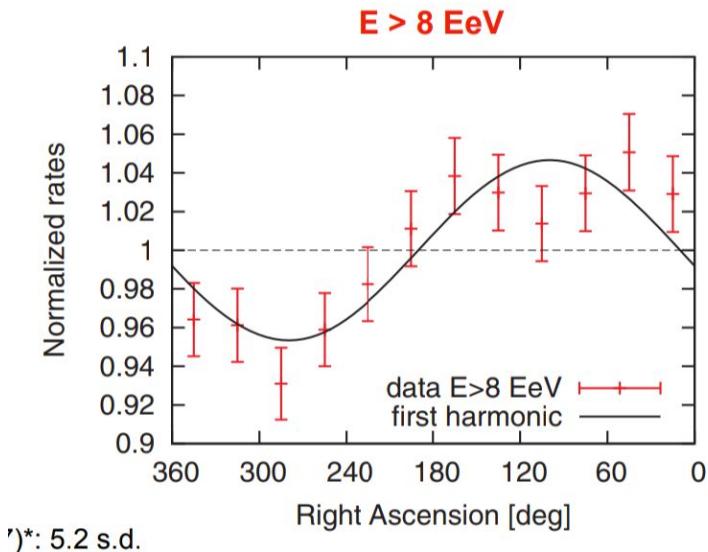
Anisotropia a larga scala

Ricerche di anisotropie a larga scala

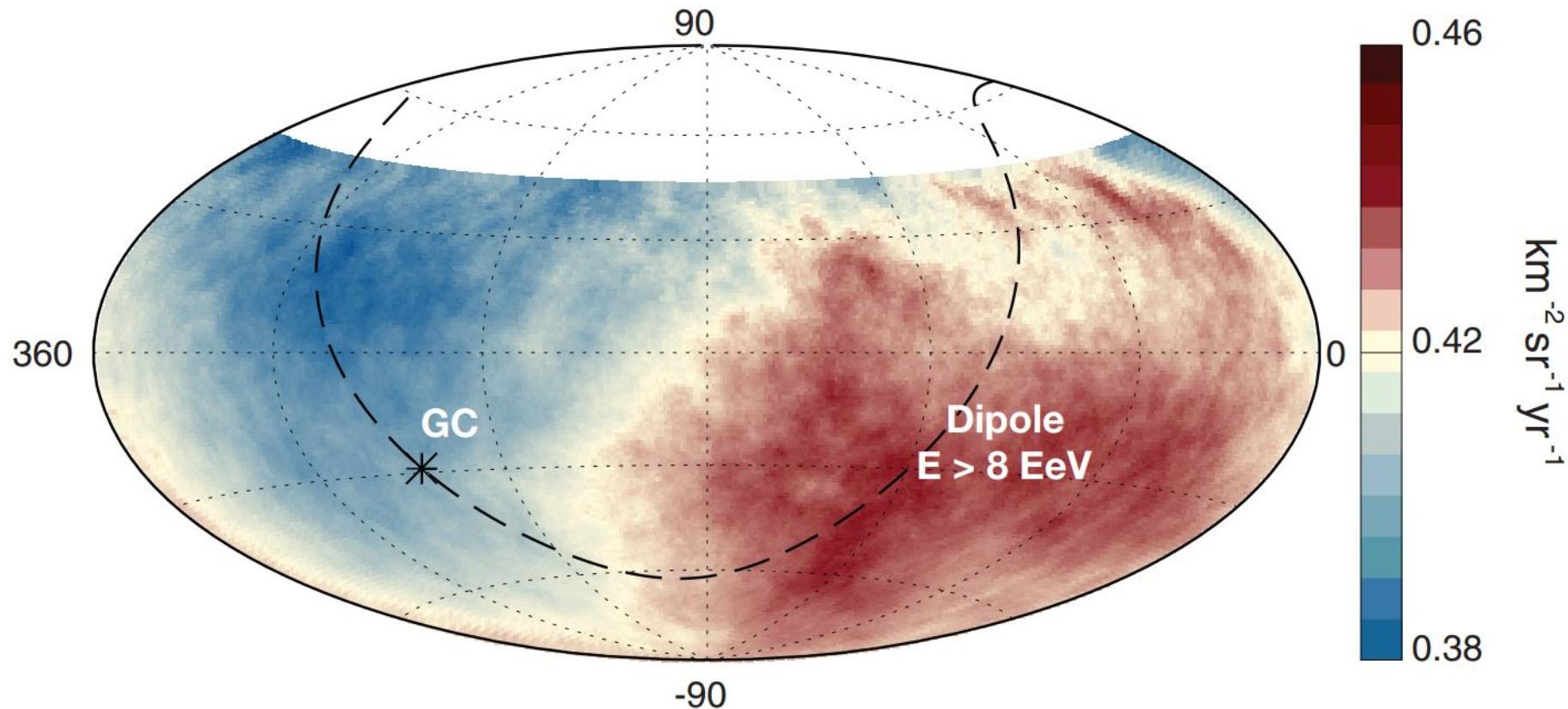
	Harmonic		Components		Amplitude	Phase	Probability
Energy [EeV]	events	k	a_k^α	b_k^α	r_k^α	$\varphi_k^\alpha [\circ]$	$P(\geq r_k^\alpha)$
4 - 8	81,701	1	0.001 ± 0.005	0.005 ± 0.005	0.005	80 ± 60	0.60
≥ 8	32,187	1	-0.008 ± 0.008	0.046 ± 0.008	0.047	100 ± 10	2.6×10^{-8}

Nel bin tra 4 e 8 EeV non è presente un dipolo significativo \rightarrow tensione con l'ipotesi di origine galattica in questa regione energetica

Nel bin di energia $E > 8$ EeV è presente anisotropia di dipolo a 5.4 sigma (post trial)



Ricerche di anisotropie a larga scala



Posizione del dipolo difficile da conciliare con un'origine galattica degli UHECR

Ricerche di correlazione a piccola scala

Ricerche di anisotropie a “piccola“ scala - possibili cataloghi

[Auger Coll. ApJL 853 (2018) L29]

γ -AGNs

Catalogo 2FHL
(Fermi-LAT, E>50 GeV)
 $R < 250$ Mpc
17 oggetti (tra cui Cen A,
M87, Mkn 421, Mkn501...)

Possibili sorgenti di
accelerazione: jet dall'AGN
centrali, lobi magnetizzati,
hot spot nei lobi...

Galassie starburst

in Fermi-LAT
(from the HCN survey)
 $R < 250$ Mpc
Radio-flux > 0.3 Jy
23 oggetti (tra cui M82,
NGC253...)

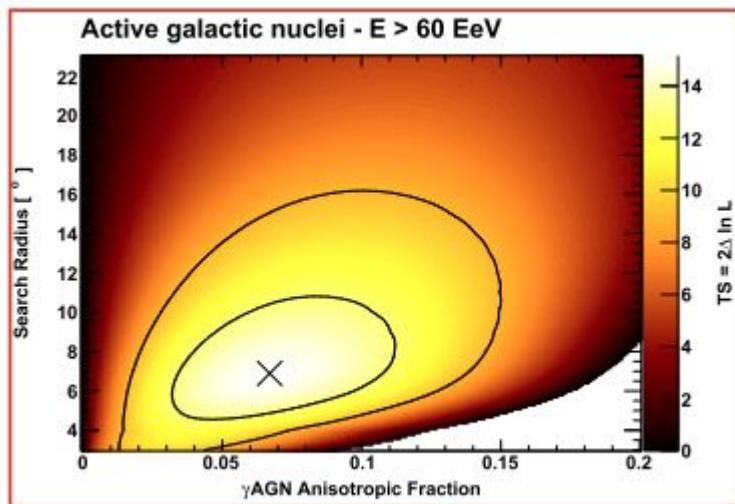
Possibili sorgenti di
accelerazione: magnetar,
oggetti compatti...

Ricerche di anisotropie a “piccola” scala

Metodo di analisi: unbinned maximum likelihood, usando come null hypothesis una distribuzione isotropa di UHECR. Parametri liberi: frazione isotropa, angolo di correlazione. Scan sull’energia di soglia.

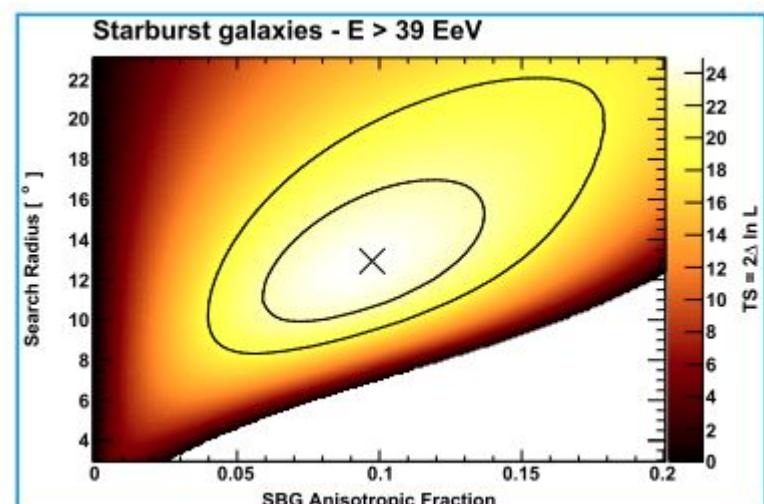
γ -AGNs

TS massima a 60 EeV 2.7σ post-trial



Galassie starburst

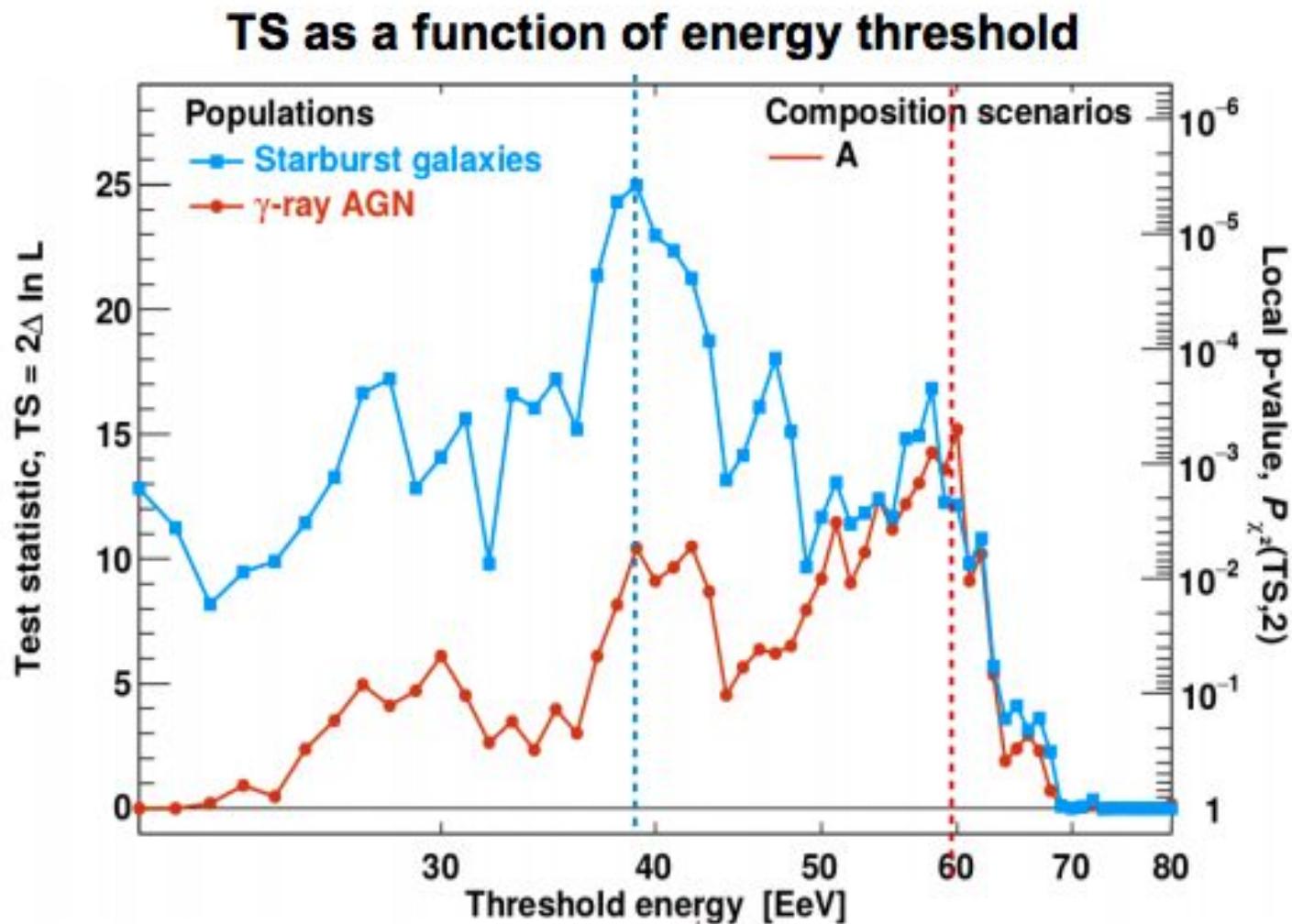
TS massima a 39 EeV 4σ post-trial



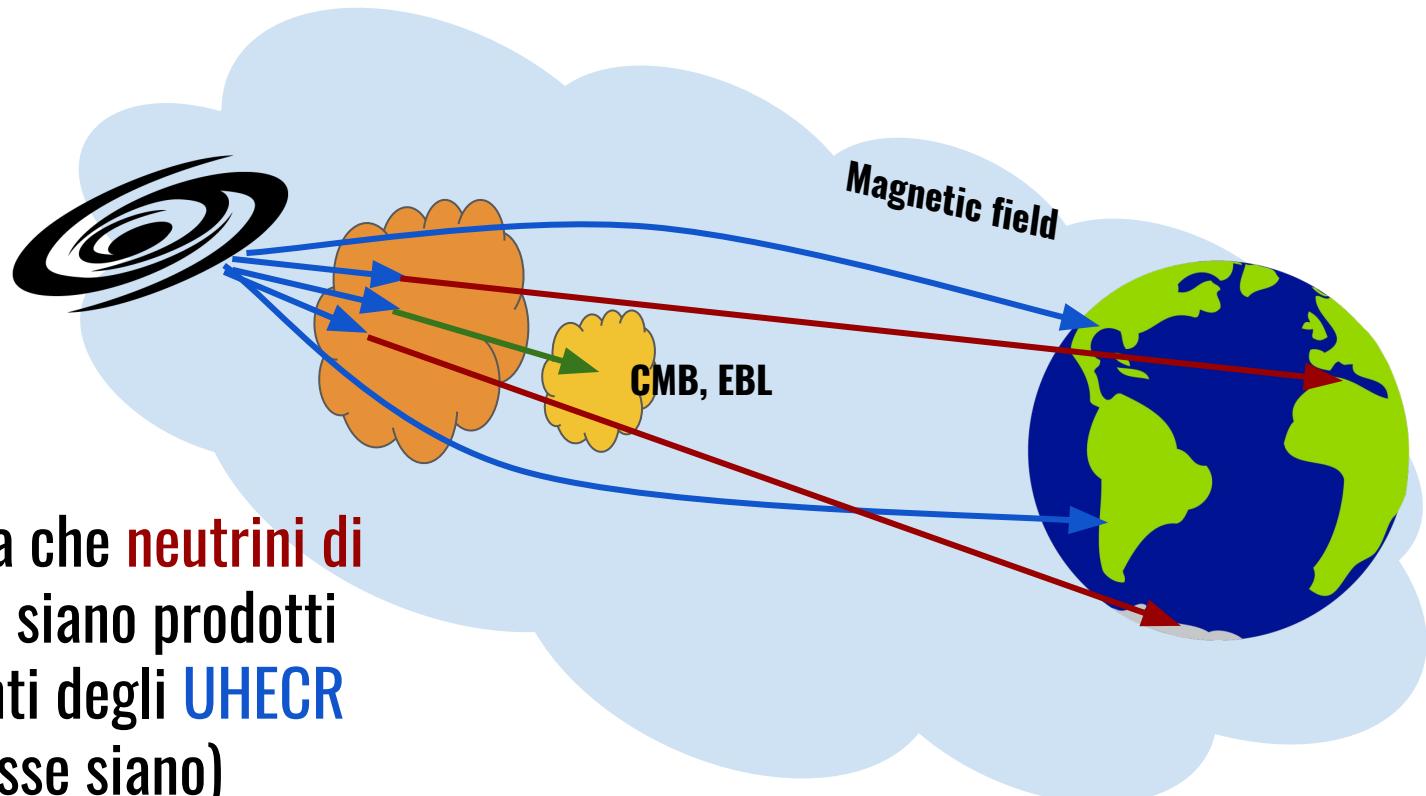
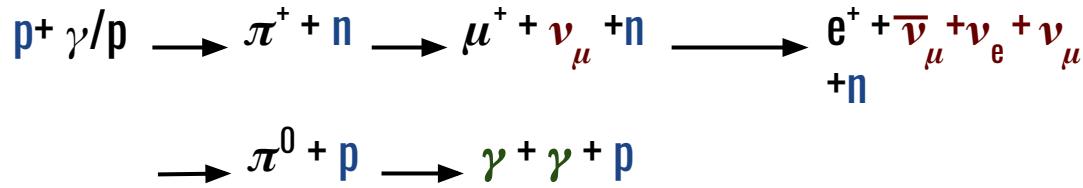
$$f = 7 \pm 4\%, a = 7^\circ \pm 4^\circ$$

$$f = 10 \pm 4\%, a = 13^\circ \pm 4^\circ$$

Ricerche di anisotropie a “piccola” scala



Ricerca di correlazione con neutrini di alta energia



Ci si aspetta che neutrini di alta energia siano prodotti nelle sorgenti degli UHECR (quali che esse siano)

ANTICATA working group

- Nato nel 2014 con **IceCube, Telescope Array e Auger**
 - nel 2017 entra **ANTARES**.
- primi risultati presentati in **JCAP 1601 (2016) 01, 037.**
- Update a **ICRC 2017** (Imen Al-Samarai) e **UHECR 2018** (Lorenzo Caccianiga)
- Tre analisi: cross-correlation e likelihood con neutrini di alta energia e likelihood con neutrino point source samples.
- risultati interessanti nel paper (oltre 3σ) sono rientrati nelle attese con più statistica
- Ultimi update saranno presentati a **ICRC 2019**
- Possibile futura inclusione di cataloghi (3-fold correlation)

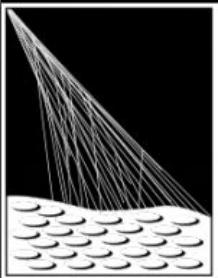
Conclusioni

Conclusioni (per ora)

- Non sappiamo ancora quali siano le sorgenti dei raggi cosmici di altissima energia (), ma...
- A larga scala **osservato** un dipolo nel bin di alta energia, vista la direzione l'origine galattica è altamente sfavorita.
- A piccola scala ci sono interessanti risultati in correlazione con la posizione di galassie di tipo **starburst**.
- Indicazioni più deboli usando altri cataloghi (AGN, 2MRS, Swift-BAT)
- Nessun risultato per ora nella ricerca multi-messenger tra neutrini di alta energia e UHECR (atteso dalle condizioni al contorno).
- Principale limite dovuto al fatto di non conoscere nè la composizione dei raggi cosmici a queste energie nè i campi magnetici con precisione

Prospettive future

- Larga scala: andare a più bassa energia (**cercare la transizione galattico-extragalattico**) e ricerca di multipoli più alti (su tutto il cielo, con **Telescope Array**)
 - A piccola scala: vedere come evolve con nuovi dati l'eccesso verso le **starburst** -> Keep tuned at ICRC 2019
 - Includere sorgenti nella correlazione multi-messenger coi neutrini?
-
- L'upgrade di Auger, **Auger Prime** (uno scintillatore su ogni stazione dell'array di superficie) migliorerà la capacità di discriminazione di massa -> in fase di deployment



PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

Grazie per l'attenzione

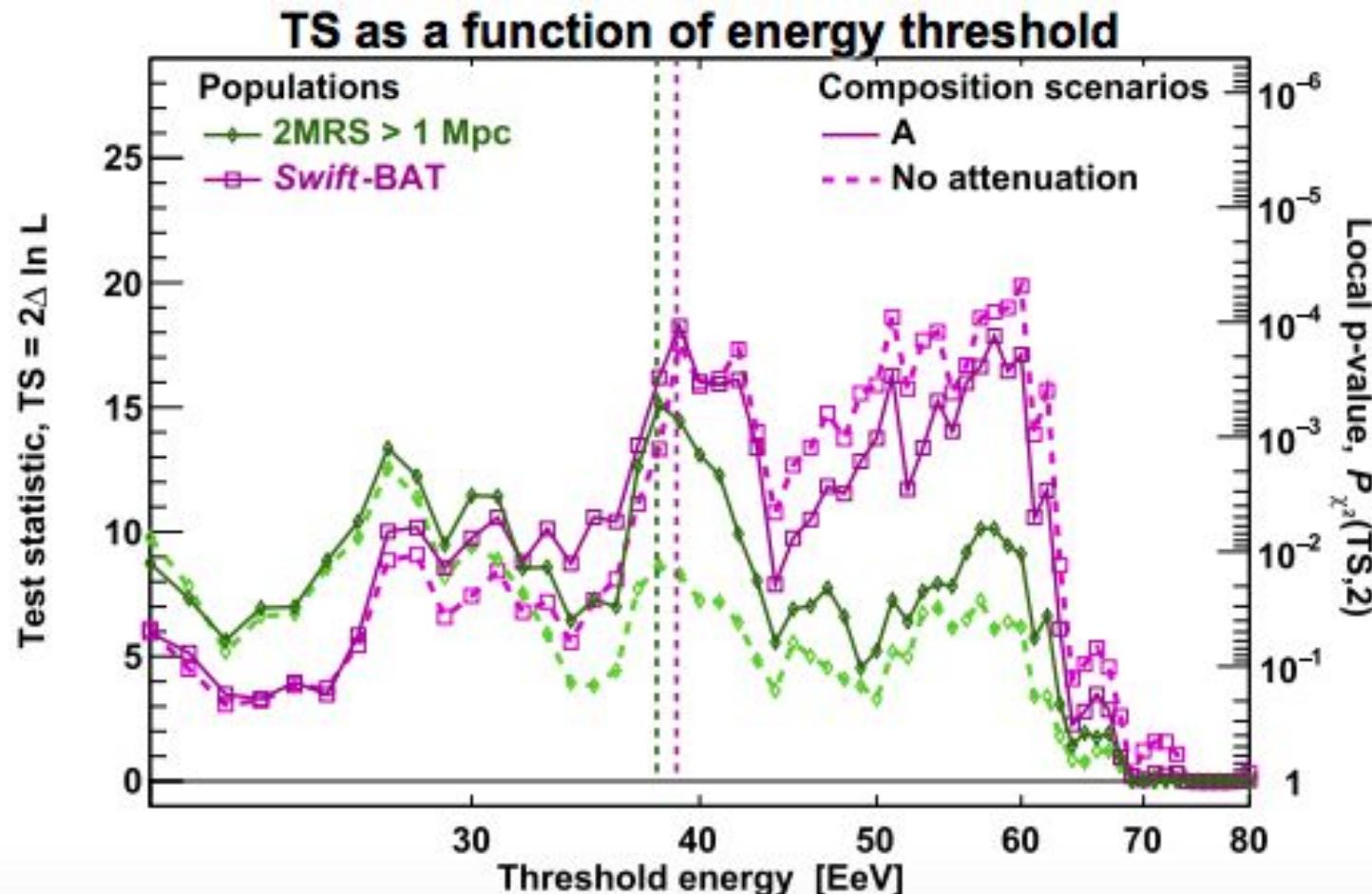


Credit:
Steven Saffi
University of Adelaide

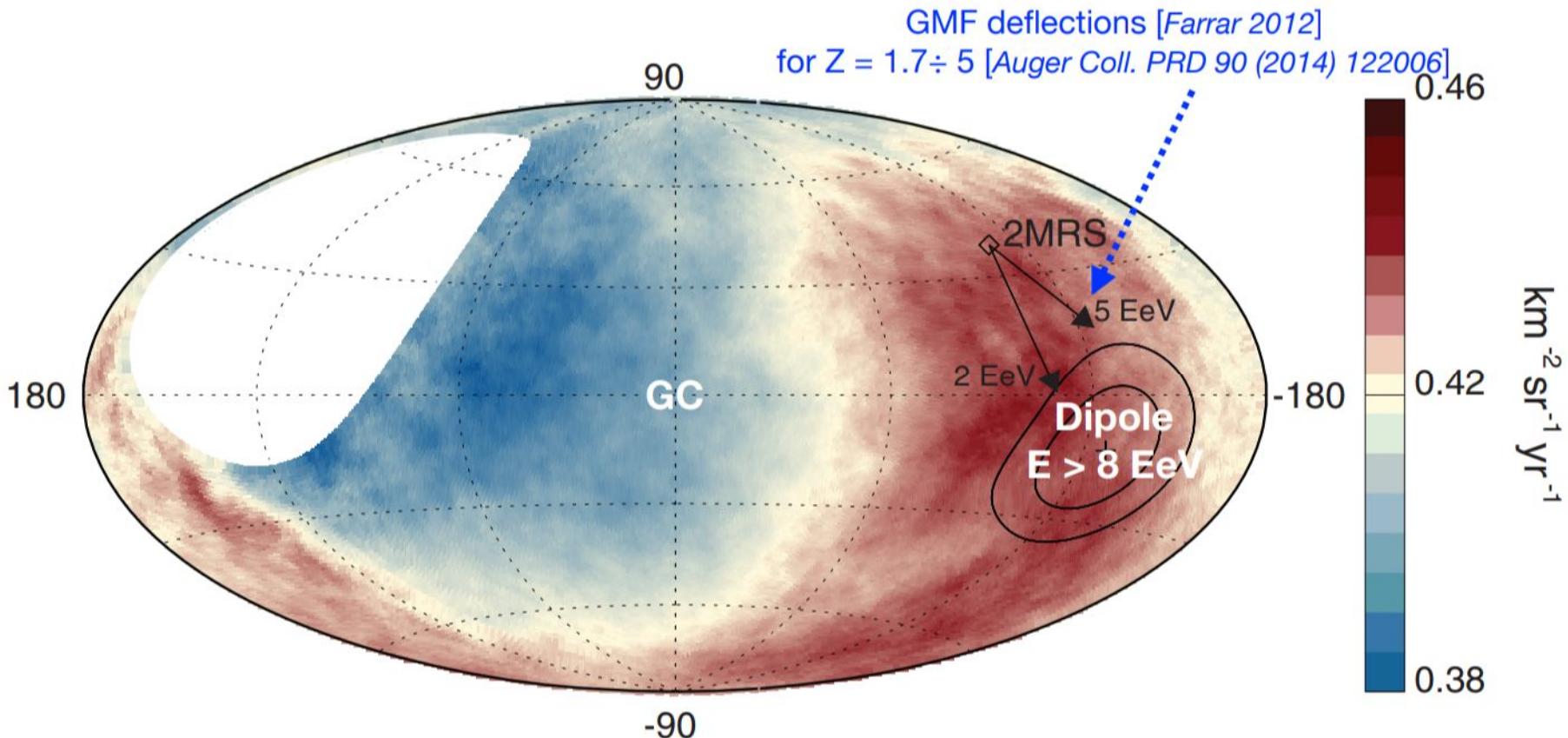
Backup Slides

Ricerche di anisotropie a “piccola” scala

Ricerca di correlazione con “materia vicina”

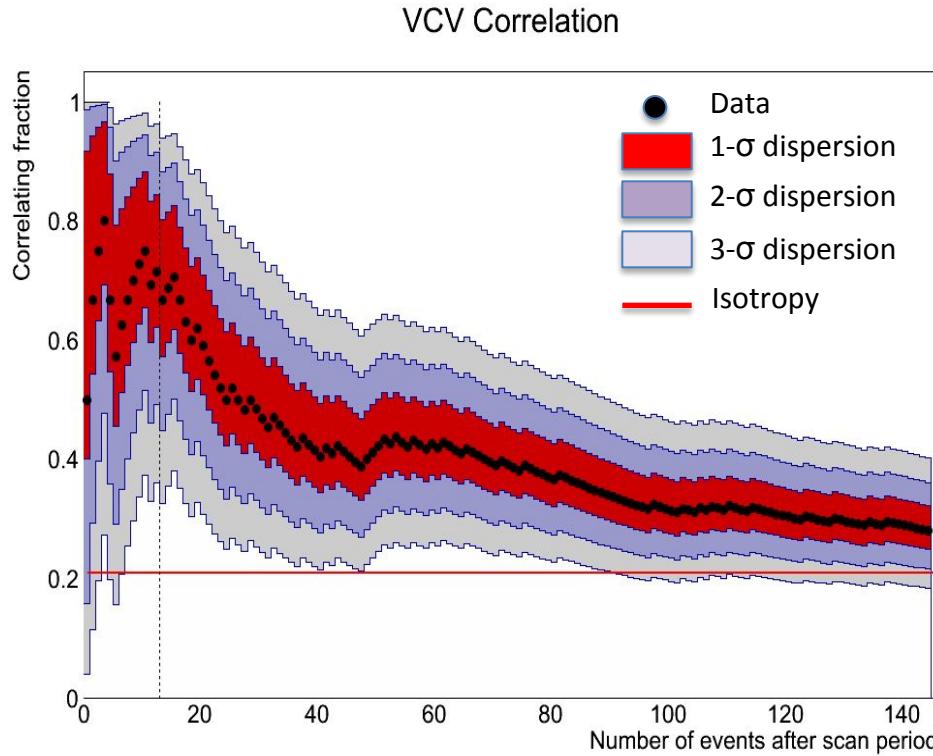


Ricerche di anisotropie a larga scala



Posizione del dipolo difficile da conciliare con un'origine galattica degli UHECR

Introduction



Previous analyses:

- In 2006 a scan found excess with respect to isotropic expectation when counting the fraction of events with **$E > 57 \text{ EeV}$** that are within **3.1°** from an AGN in the Veron-Cetty Veron catalogue closer than **75 Mpc**
- Prescription started on events after the scan period
- Prescription fulfilled in 2007 with 62% correlating events while 21% was expected (1% chance coincidence)
Now $28.1^{+3.8\%}_{-3.6\%}$ \square not significant anymore

In 2014 the Pierre Auger Collaboration decided to perform a new set of anisotropy tests exploring the arrival directions of all cosmic rays observed with energies above 40 EeV (**the dataset previously described**)

The Pierre Auger Collaboration. *The Astrophysical Journal*, 804(1):15, 2015

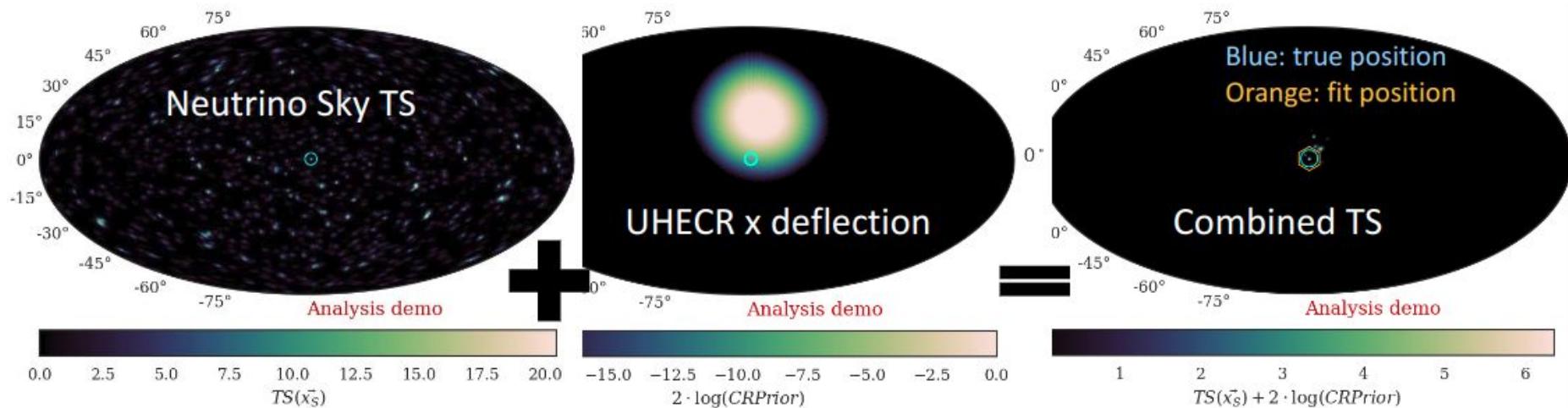
\square For this work I performed cross-checks of the official analysis using, when possible, a different method

Cross-Correlation results evolution

	JCAP 2016	ICRC 2017	UHECR 2018 (This work)
tracks wrt an isotropic flux of UHECR	0.28	0.48	0.45
tracks wrt an isotropic flux of neutrinos		0.52	0.49
cascades wrt an isotropic flux of UHECR	5×10^{-4}	5.4×10^{-3}	2.7×10^{-2}
cascades wrt an isotropic flux of neutrinos	8.5×10^{-3}	1.0×10^{-2}	2.6×10^{-2}

Analysis method 3: updated approach

- Use UHECR arrival directions and estimate their average deflection to construct “prior windows“ in which to search for point-like neutrino hotspots



-> applied to data as we are speaking

Magnetic field deflections

- The median is for both models $\sim 2.7^\circ$ $100 \text{ EeV}/E_{\text{CR}}$. This does not include the turbulent component of the GMF

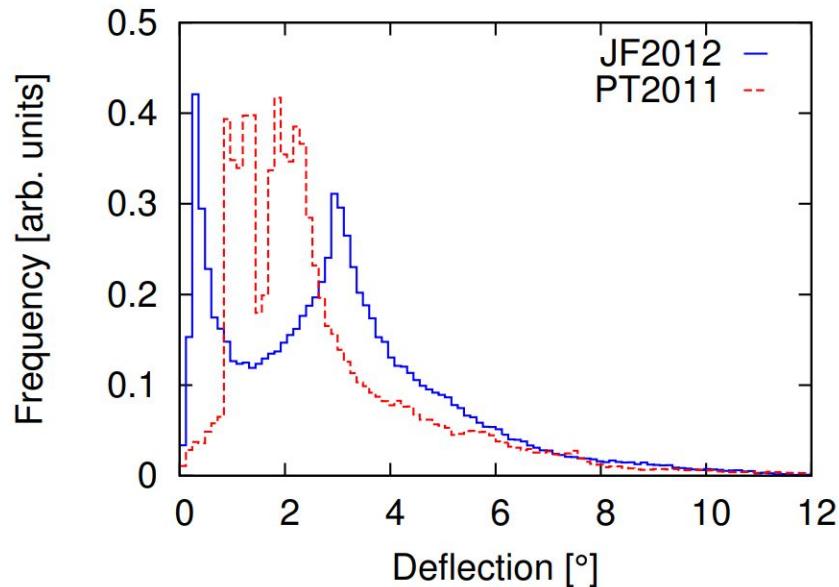
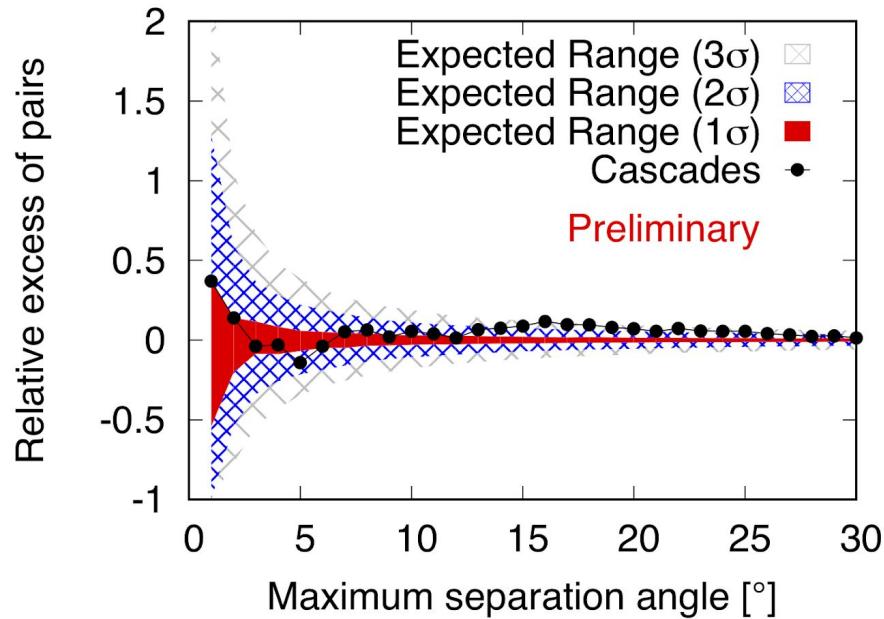
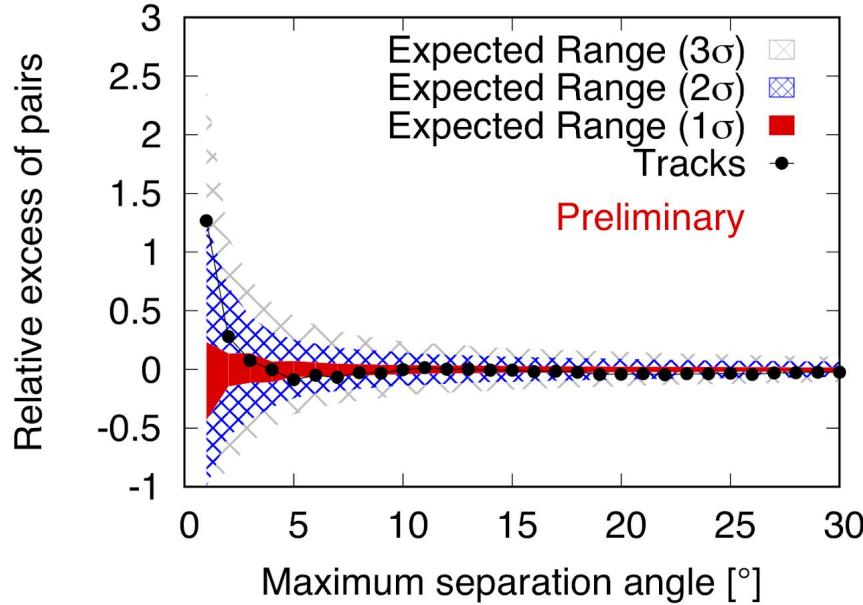


Figure 3. Distribution of UHECR deflections in two Galactic magnetic field models marked PT2011 [44] and JF2012 [45] for the regular component. The energies of actual UHECRs are renormalized to show the distributions for $E/Z = 100 \text{ EeV}$. The double-peak structure is mostly due to the fact that UHECRs from different Galactic hemispheres undergo different deflections.

Analysis method 1: cross-correlation

- Compute the number of pairs (n_p) UHECR-neutrino separated by less than a certain angle α
- Compare n_p with the expectations from the null hypotheses:
 - Null hypothesis 1: isotropic distribution of UHECR (neutrino directions are fixed)
 - Null hypothesis 2: isotropic distribution of neutrinos (UHECR directions are fixed)
- Scan on α from 1° to 30° in 1° steps to find for maximum departure from isotropy
- Analyse independently cascades and tracks neutrino samples
 - Final result: 4 p-values (2 null hypothesis for each sample)
- This analysis makes no assumption on the deflection of cosmic rays

Cross-Correlation analysis updated results



Tracks: minimum at 1°, np = 4,
post-trial p-value=0.45
with respect to an isotropic flux of CRs
post-trial p-value= 0.49
with respect to an isotropic flux of ν .

Cascades: minimum at 16°, np = 623,
post-trial p-value= 2.7×10^{-2}
with respect to an isotropic flux of CRs (was 5.4×10^{-3} at ICRC 2017)
post-trial p-value= 2.6×10^{-2}
with respect to an isotropic flux of ν (was 1.0×10^{-2} in ICRC 2017)

Analysis method 2: likelihood stacking neutrino sources

- No scan in angle, 1 Free parameter: number of signal events
- three standard deflections for UHECR based on magnetic field models (JF 2012, PT 2011) computed as $D \cdot 100 \text{ EeV} / E_{\text{UHECR}}$ with $D = 3^\circ, 6^\circ$ and 9° (no assumption on the charge of each event).
- Same two null hypotheses as before (isotropic distribution of UHECR/neutrinos)

JCAP 2016 results:

D	High-energy tracks			High-energy cascades		
	n_s	TS	pre-trial p-value	n_s	TS	pre-trial p-value
3°	4.26	0.6	0.22	53.7	8.21	2.1×10^{-3}
6°	0.5	2.9×10^{-3}	0.48	85.7	11.99	2.7×10^{-4}
9°	0	0	under-fluctuation	106.1	11.32	3.8×10^{-4}

Cascades D=6°:

post-trial p-value = 8×10^{-4} with respect to an isotropic flux of CRs, 1.3×10^{-3} wrt an isotropic flux of neutrinos.

ICRC 2017 update:

Cascades D=6° :

post-trial p-value 2.2×10^{-2} , with respect to an isotropic flux of CRs, 1.7×10^{-2} wrt an isotropic flux of neutrinos.

Analysis method 3: likelihood stacking UHECR sources

- Using the neutrino point source sample
- Same magnetic deflection approach as in method 2 ($D = 9^\circ$ not used)
- The UHECR positions will be the “stacked sources”.
- Two free parameters to maximize: the neutrino spectral index and the number of signal events
- Cut on UHECR energy not to cover the whole sky with stacked sources ($E_{th} = 85$ EeV defined a priori in a sensitivity study)

JCAP 2016 result:

Post-trial p-value at minimum ($D=3$ deg 100 EeV/E): 25%

No update at ICRC 2017

Updated analysis method is being applied to data at time of speaking.

Summary and outlook

- Joint WG between **IceCube, Pierre Auger and Telescope Array** has been doing correlation analysis of the arrival directions of UHECRs and neutrino candidates since 2014. In **2017 ANTARES** joined the WG.
- 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 with new data from Auger, TA and data from ANTARES for the first time. The p-values for cascades have increased up to **$\sim 2.7 \times 10^{-2}$**
- Update of analysis (3) method: use UHECR arrival directions and estimate their average deflection to construct “prior windows” in which to search for point-like neutrino hotspots
 - This updated analysis is being applied to data at time of speaking.
- The likelihood analysis done with the high-energy neutrino candidates (2) will be updated and as well as the likelihood analysis done with the IceCube and ANTARES point source samples (3).

Analysis method 2: likelihood stacking neutrino sources

$$\ln \mathcal{L} = \sum_{i=0}^{N_{\text{Auger}}} \ln \left(\frac{n_{sCR}}{N_{tot}} S_i^{\text{Auger}} + \frac{N_t ot - n_{sCR}}{N_{tot}} B_i^{\text{Auger}} \right) + \\ \sum_{i=0}^{N_{\text{TA}}} \ln \left(\frac{n_{sCR}}{N_{tot}} S_i^{\text{TA}} + \frac{N_t ot - n_{sCR}}{N_{tot}} B_i^{\text{TA}} \right)$$