



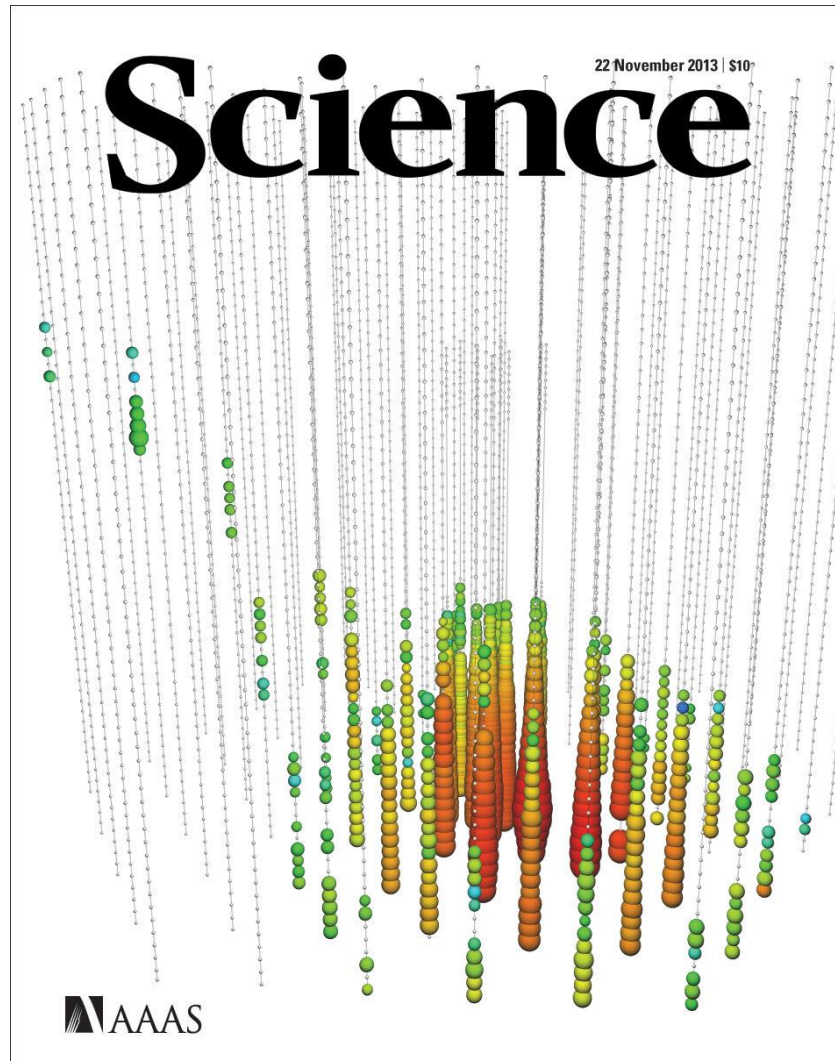
IceCube Masterclass 2025

HESE-Punktquellensuche

(als Beispiel wissenschaftlicher Methodik)

Anke Mosbrugger
Erlangen, 09.04.2025

Die Nadel im Heuhaufen



- Wie heißt dieses Ereignis?
- Welche Energie hat es?

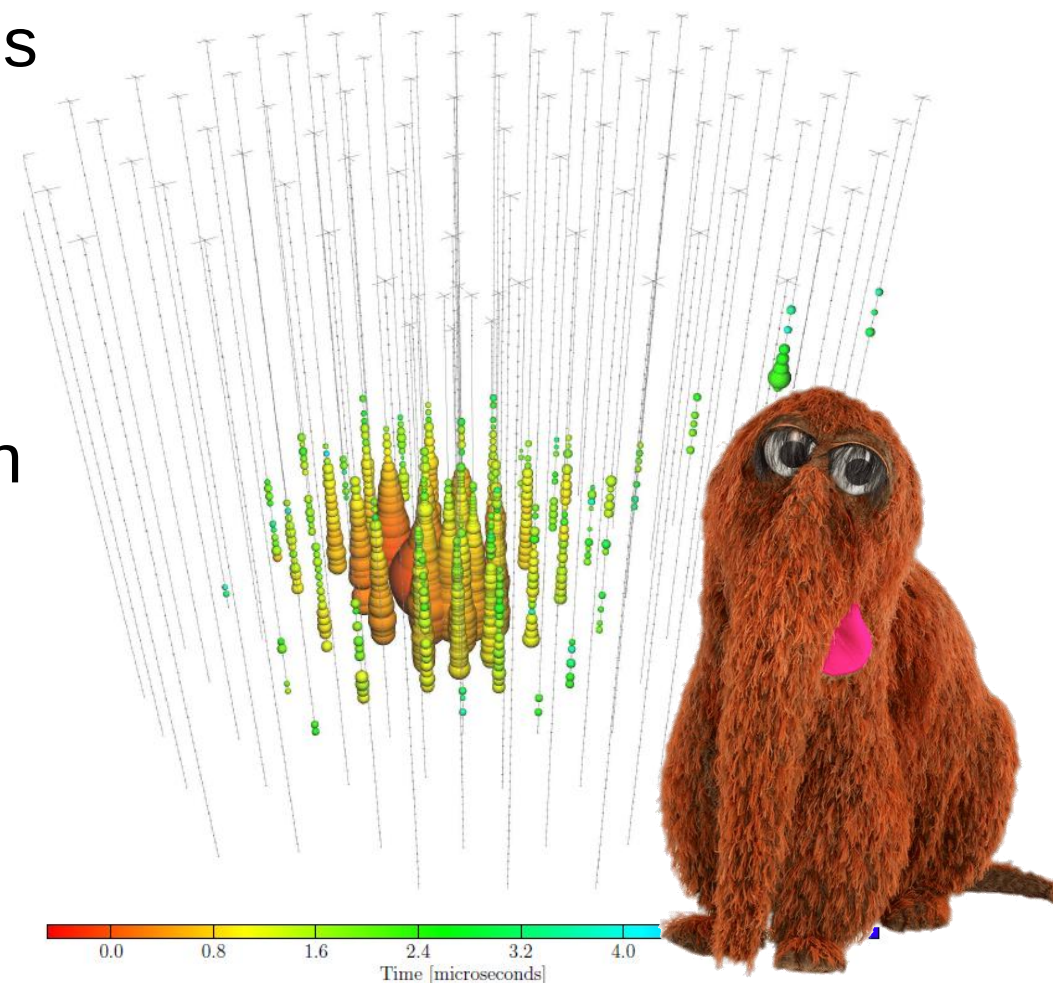
~10 min

<http://icecube.wisc.edu/viewer/hese>

Mr. Snuffleupagus

- Das gesuchte Event ist Mr. Snuffleupagus mit einer Energie von 253 TeV
- Aber warum steht da $252.7^{+25.9}_{-21.6}$ TeV??
- Und wie finden wir jetzt raus von welchen astronomischen Objekten die Neutrinos denn nun kommen?

Deposited Energy (TeV)
$252.7^{+25.9}_{-21.6}$



Deposited Energy (TeV)	Time (MJD)	Declination (deg.)	RA (deg.)	Med. Ang. Resolution (deg.)	Topology
$252.7^{+25.9}_{-21.6}$	55756.1129755	40.3	67.9	$\lesssim 1.2$	Track

Fehler bzw. Unsicherheiten

- **Beispiel:** Zähle Regentropfen auf Gehwegplatte pro Sekunde



Hier: 7 Tropfen/s

1s später: 8 Tropfen/s

2s später: 5 Tropfen/s

3s später: 7 Tropfen/s

...

Wie gebe ich das „wahre“ Ergebnis an?

→ z.B. 7^{+2}_{-1} Tropfen/s

└─ Messunsicherheit

Fehler bzw. Unsicherheiten

Jeder physikalische Messwert ist immer mit einer Unsicherheit behaftet:

Messergebnis μ = Messwert $x \pm$ Messunsicherheit u

z.B. $\mu = \underbrace{7 \pm 2}_{-1} \text{ Tropfen/s}$

Messergebnis in dieser Grenze: Ergebnis „wahr“/präzise

oder

Wahres Ergebnis zu 68% in diesem Intervall

→ **Bestimmung der korrekten Unsicherheit / des korrekten „Fehlers“ ist meistens größte Herausforderung**

Systematische Unsicherheit

Zeitmessung

→ Ungenauigkeit Uhr



Fehler bei jeder Messung in gleicher Größe

→ Je genauer Messgeräte messen, desto geringer ist systematische Unsicherheit

Statistische Unsicherheit

• Regelmäßigkeit des Regens



Zufällige Abweichungen

→ kein fixer Korrekturfaktor

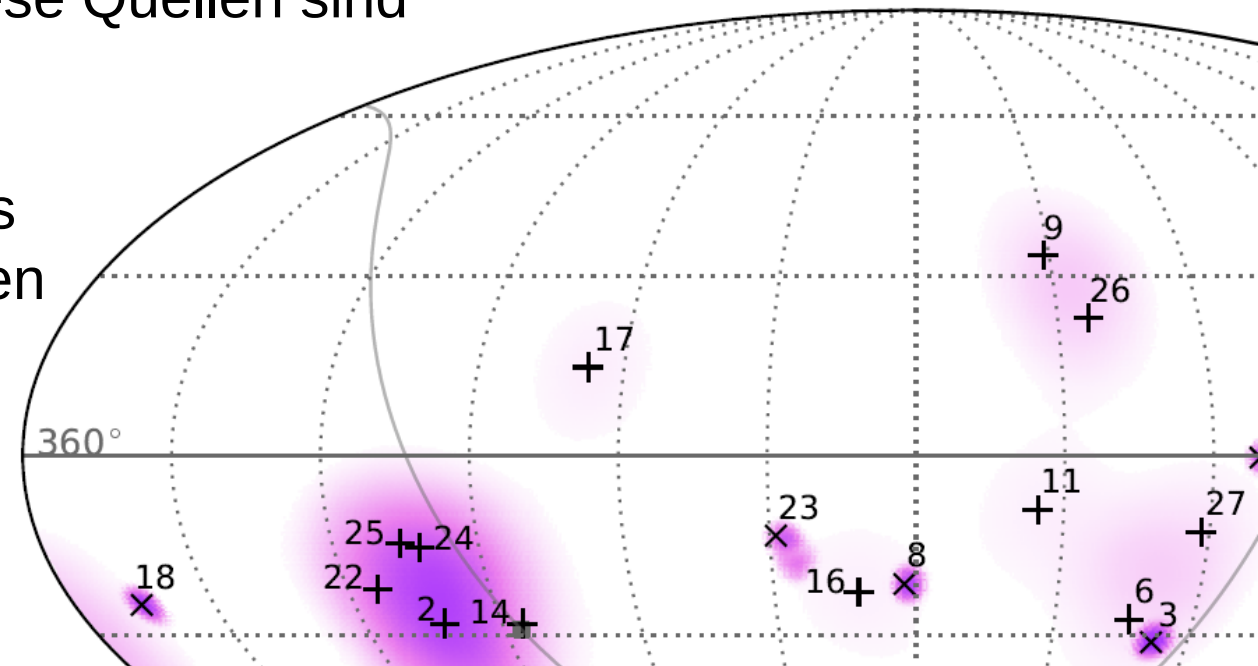
→ Mittelwertes & Standardabweichung

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

→ hohe Anzahl an Messwerten erhöht Belastbarkeit des Messergebnisses

Neutrino Himmelskarte

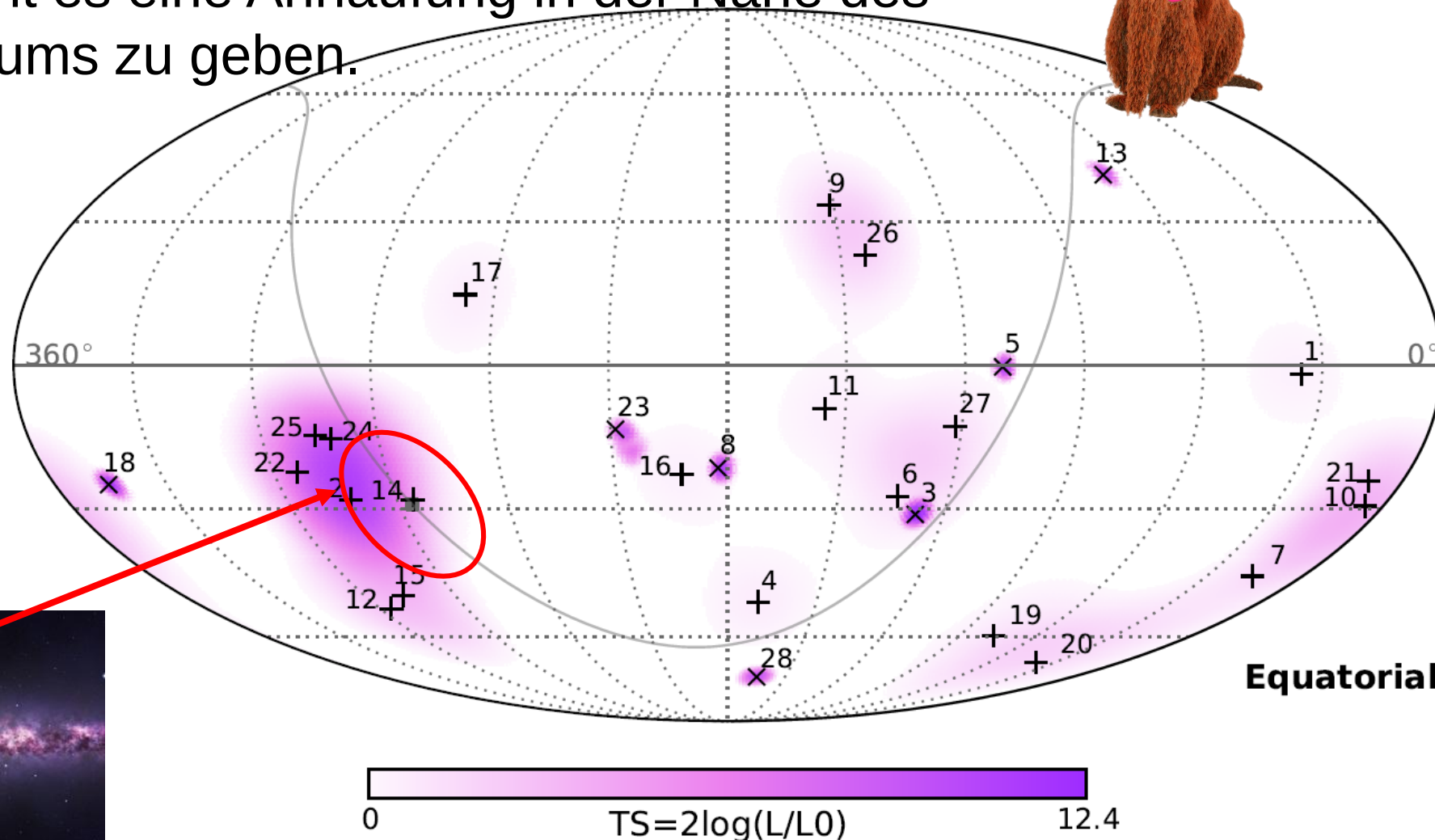
- Um nun nach den Quellen der Neutrinos zu suchen tragen wir die Ankunftsrichtung aller gemessenen Neutrinos in eine Himmelskarte ein
- Falls wir uns sicher sind, dass jedes Neutrino astrophysikalisch (nicht von der Erde) ist, stellt jedes Neutrino eine eindeutige Quelle dar
- Das hilft uns aber nicht zu verstehen, was diese Quellen sind
- Mögliche Lösungen:
 - I. Suche nach einer Anhäufung von Neutrinos und versuche das Objekt dahinter zu suchen
 - II. Postuliere eine Quelle und messe ob aus dieser Richtung besonders viele Neutrinos kommen





- Rein optisch scheint es eine Anhäufung in der Nähe des galaktischen Zentrums zu geben.

Ist das signifikant?



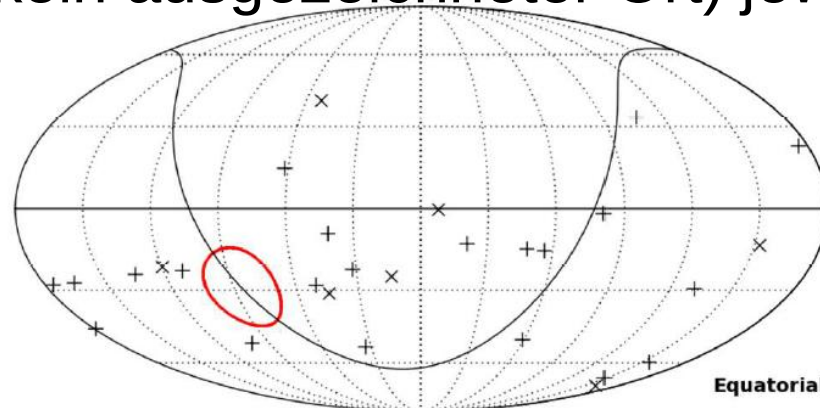
Unsere Null-Hypothese

Wissenschaft kann keine absolut wahren Aussagen („*Eis ist kalt*“) machen. Wir können lediglich das Gegenteil mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ausschließen („*in 203 Beobachtungen war Eis nie heiß*“).

Ihr erhaltet nun in jeder Gruppe ~20 Himmelskarten mit mit genau so vielen Neutrinos wie in den gemessenen Daten, diese sind jedoch zufällig verteilt.

Wie viele Neutrinos befinden sich nach unserer Null-Hypothese (das galaktische Zentrum ist kein ausgezeichneteter Ort) jeweils in der Region?

~10 min



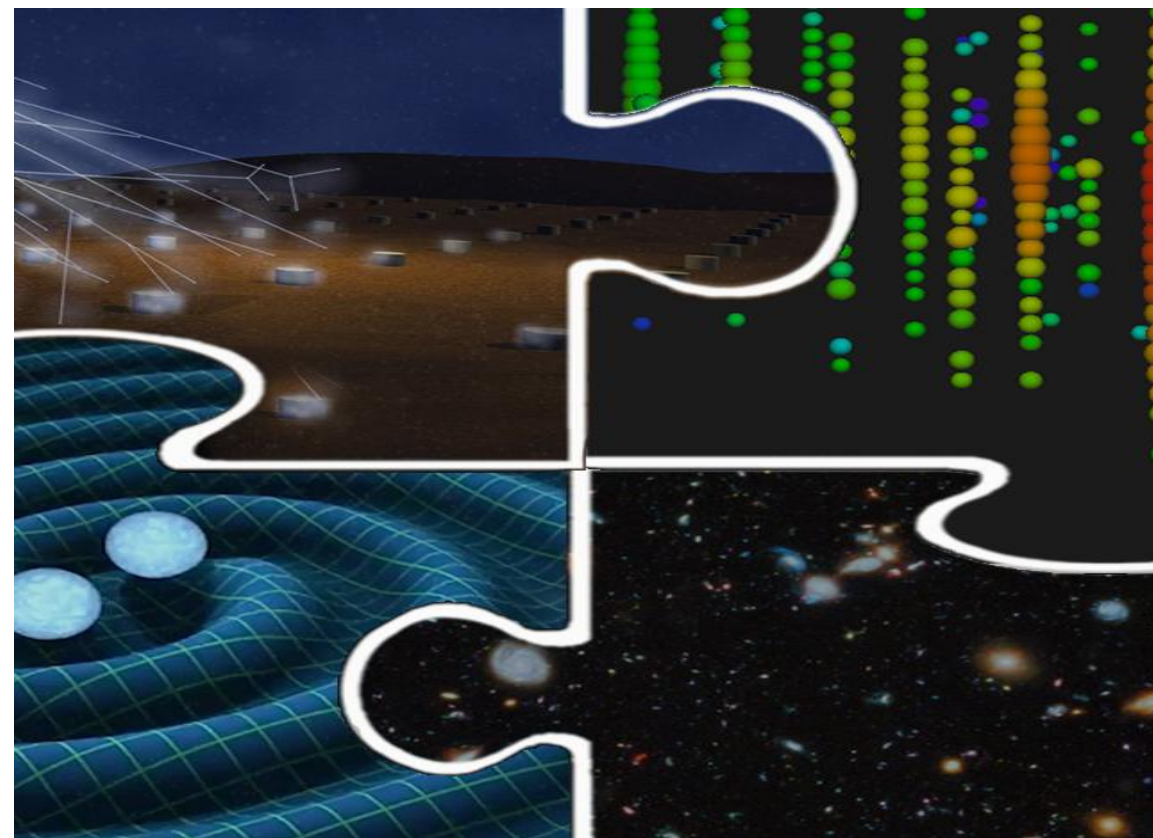
test.html

```
var evts = 'contextmenu dblclick drag dragend dragenter  
var logHuman = function() {  
if (window.wfLogHumanRan) { return; }  
window.wfLogHumanRan = true;  
var wfscr = document.createElement('script');  
wfscr.type = 'text/javascript';  
wfscr.async = true;  
wfscr.src = url + '&r=' + Math.random();  
(document.getElementsByTagName('head')[0] || document.getElementsByTagName('body')[0]).appendChild(wfscr);  
for (var i = 0; i < evts.length; i++) {  
removeEvent(evts[i], logHuman);  
evts.length; i++) {  
man);  
bid=A957C9DCB285F093A87A272330A313CB" data-bbox="530 630 990 1000">
```

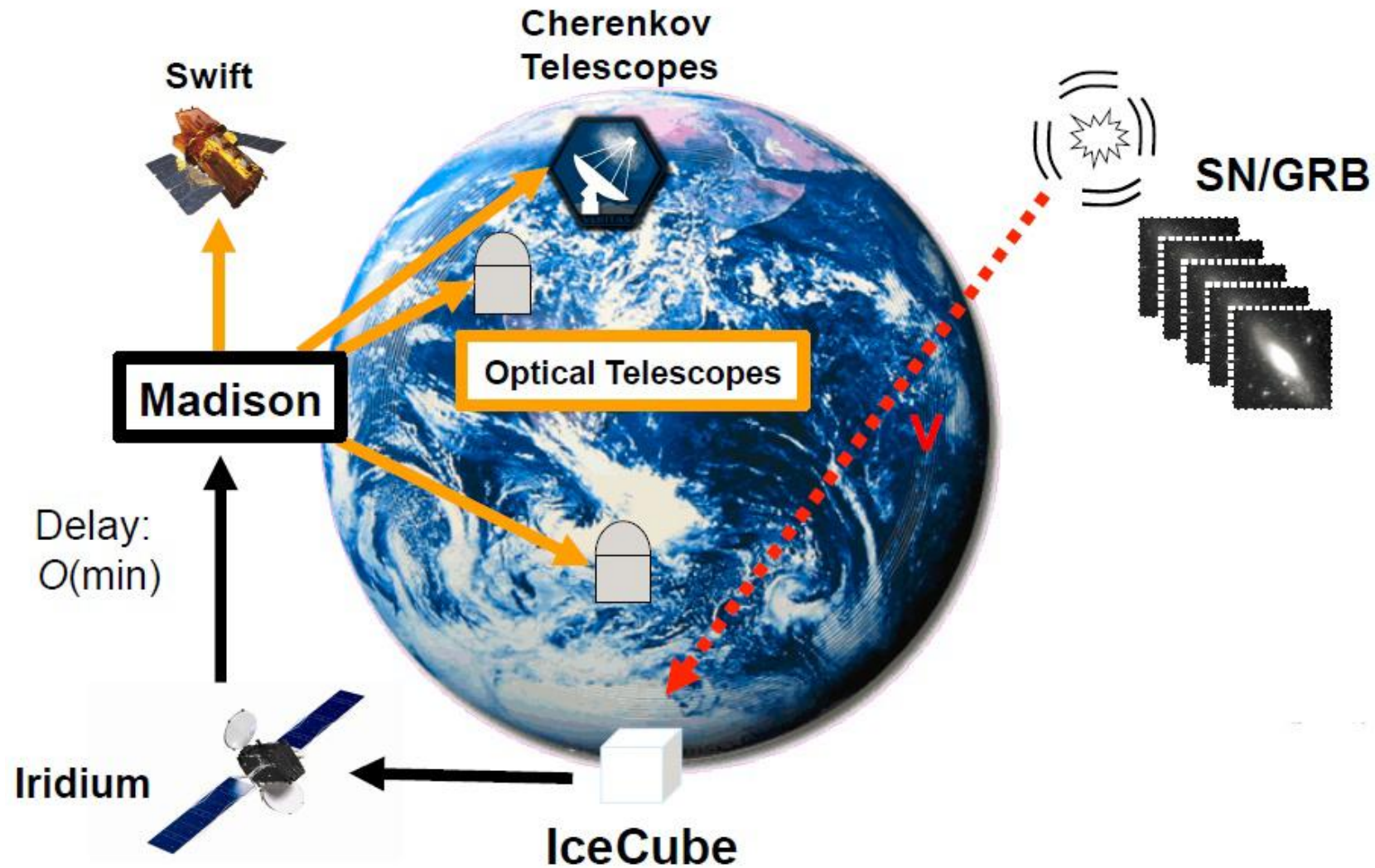
Raus aus dem Dilemma

Habt ihr Ideen, wie wir trotz der sehr wenigen Neutrinos vielleicht doch noch die Quellen eindeutig identifizieren können?

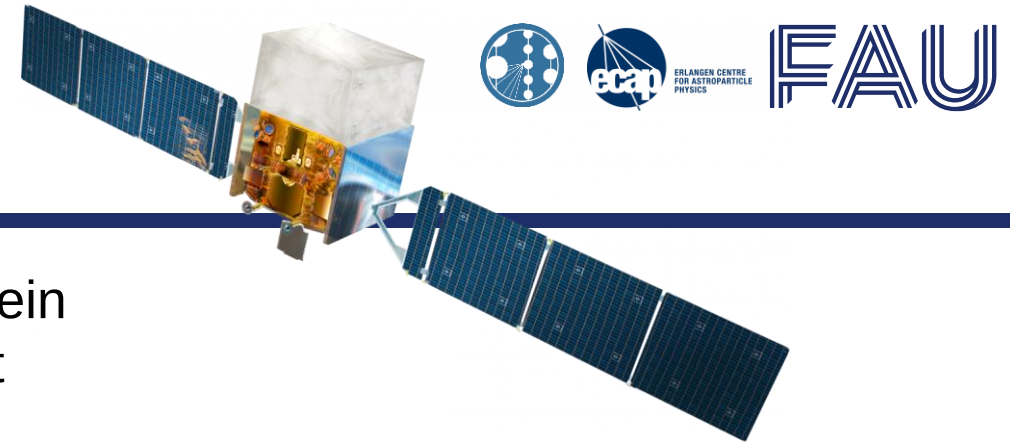
~5 min



Multi-Messenger Astronomy

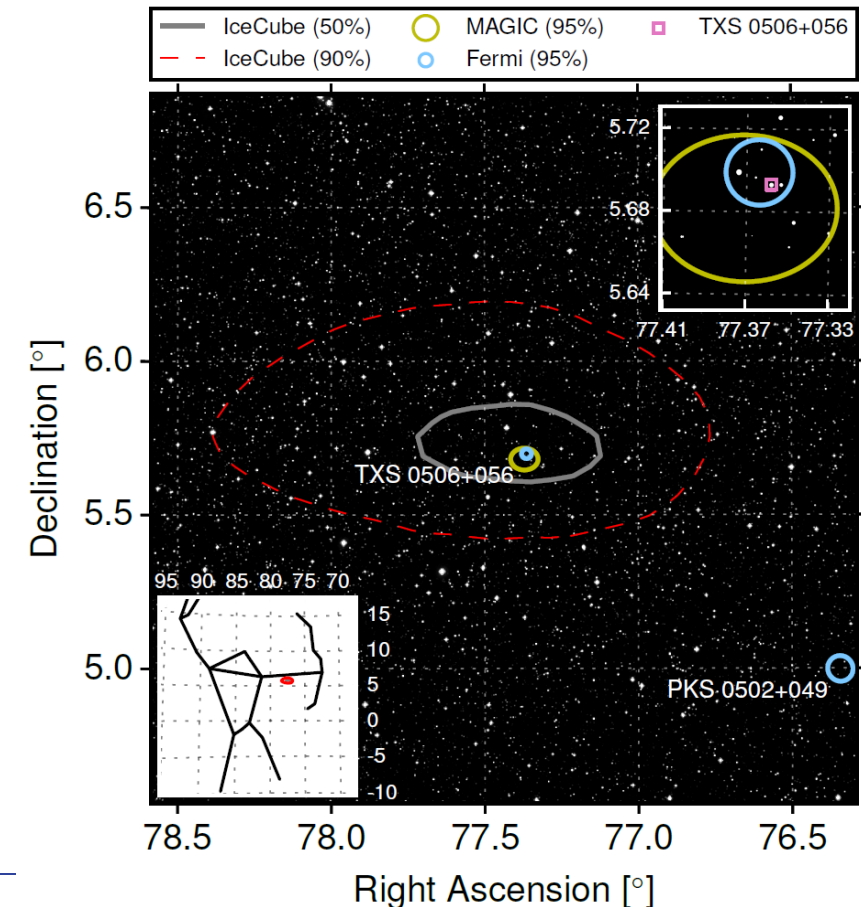
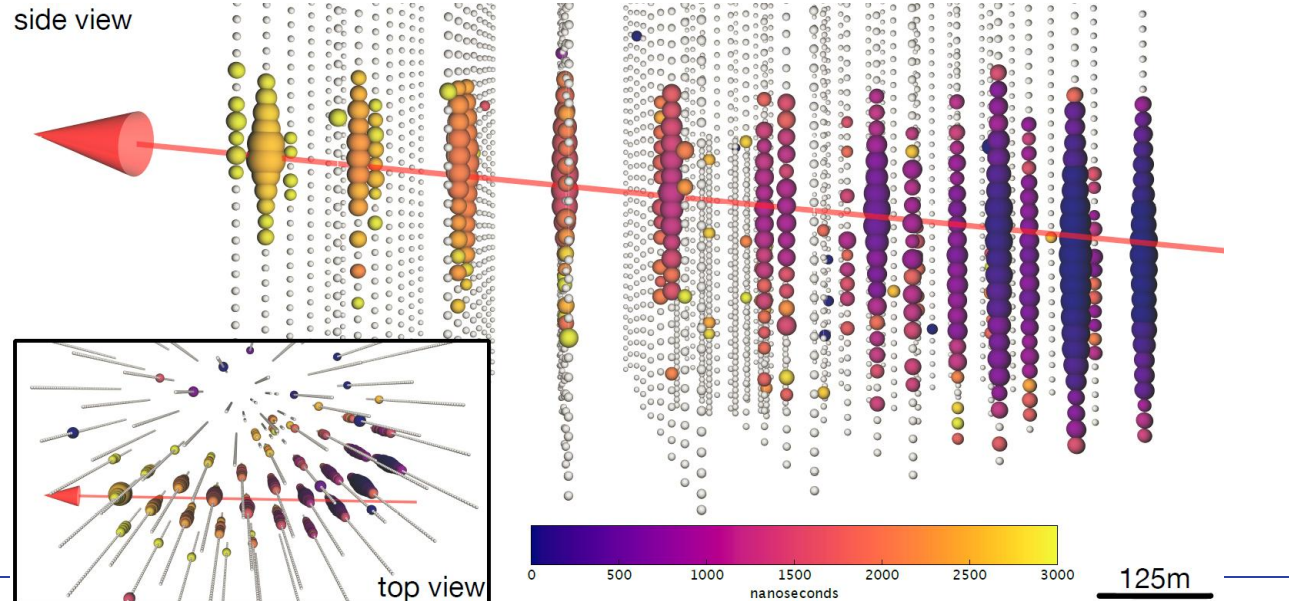


TXS 0506+056

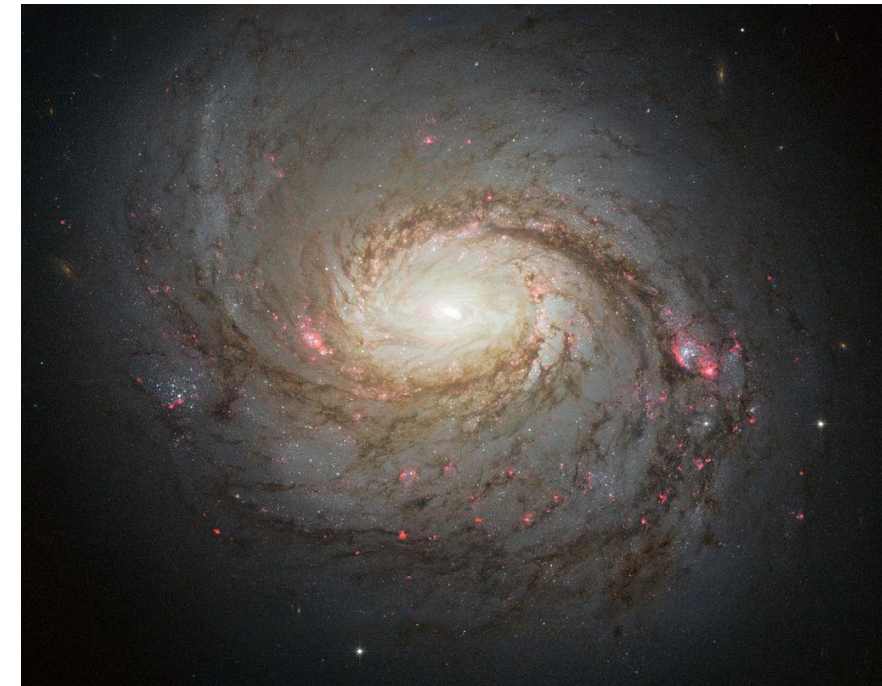
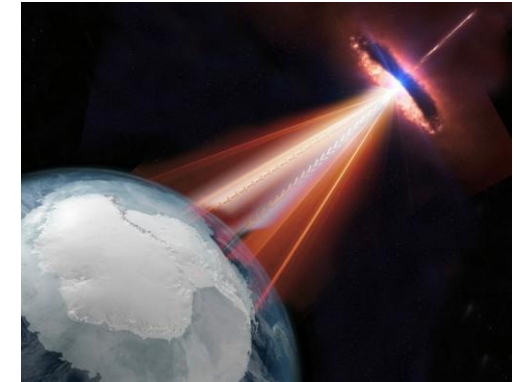
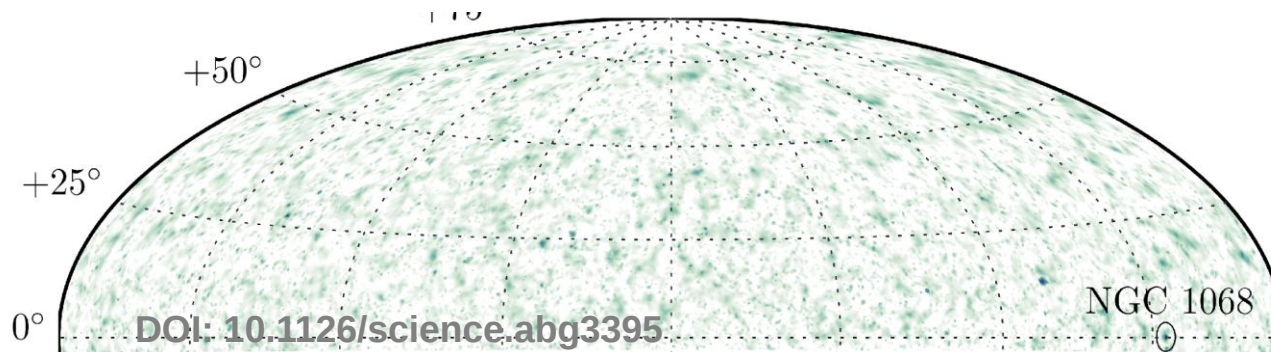
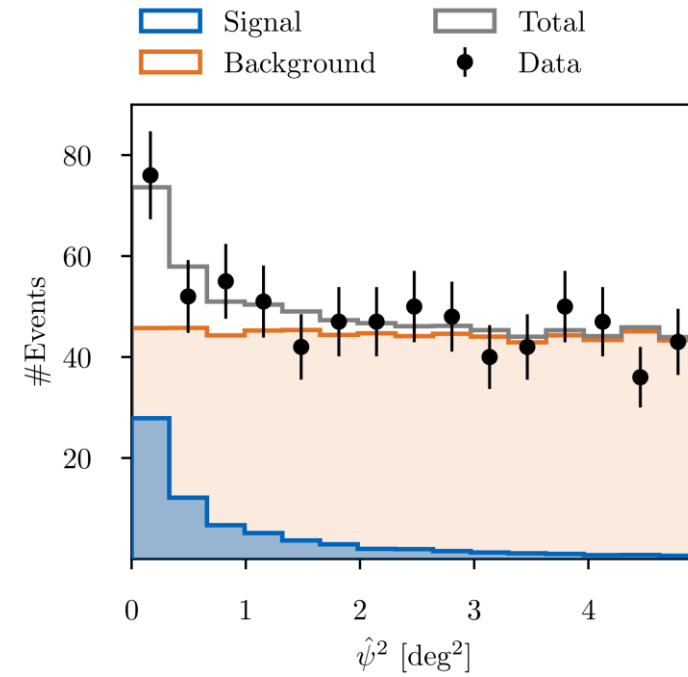
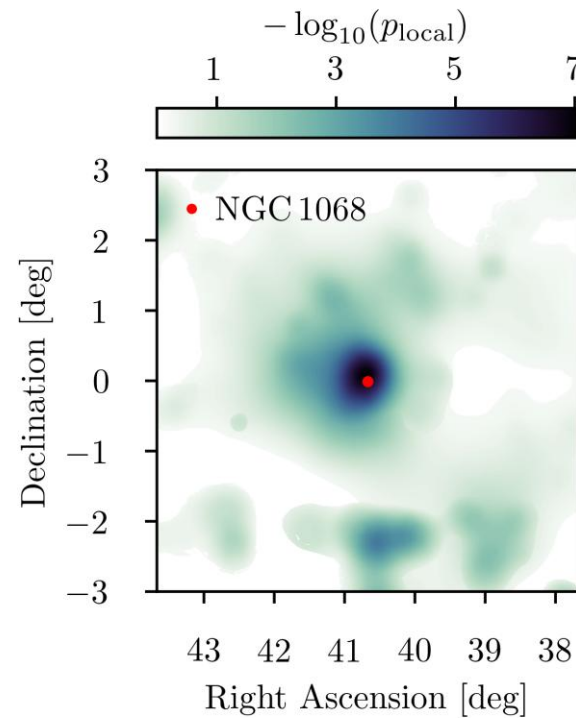


- Am 22. September 2017 hat IceCube einen Alarm über ein Hochenergieneutrino an alle Partnerteleskope gesendet
- In der selben Richtung hat FERMI (Gamma-Rays) einen aufleuchtenden Blazar gefunden
- In Archivdaten wurden weitere Neutrinos aus der selben Richtung identifiziert

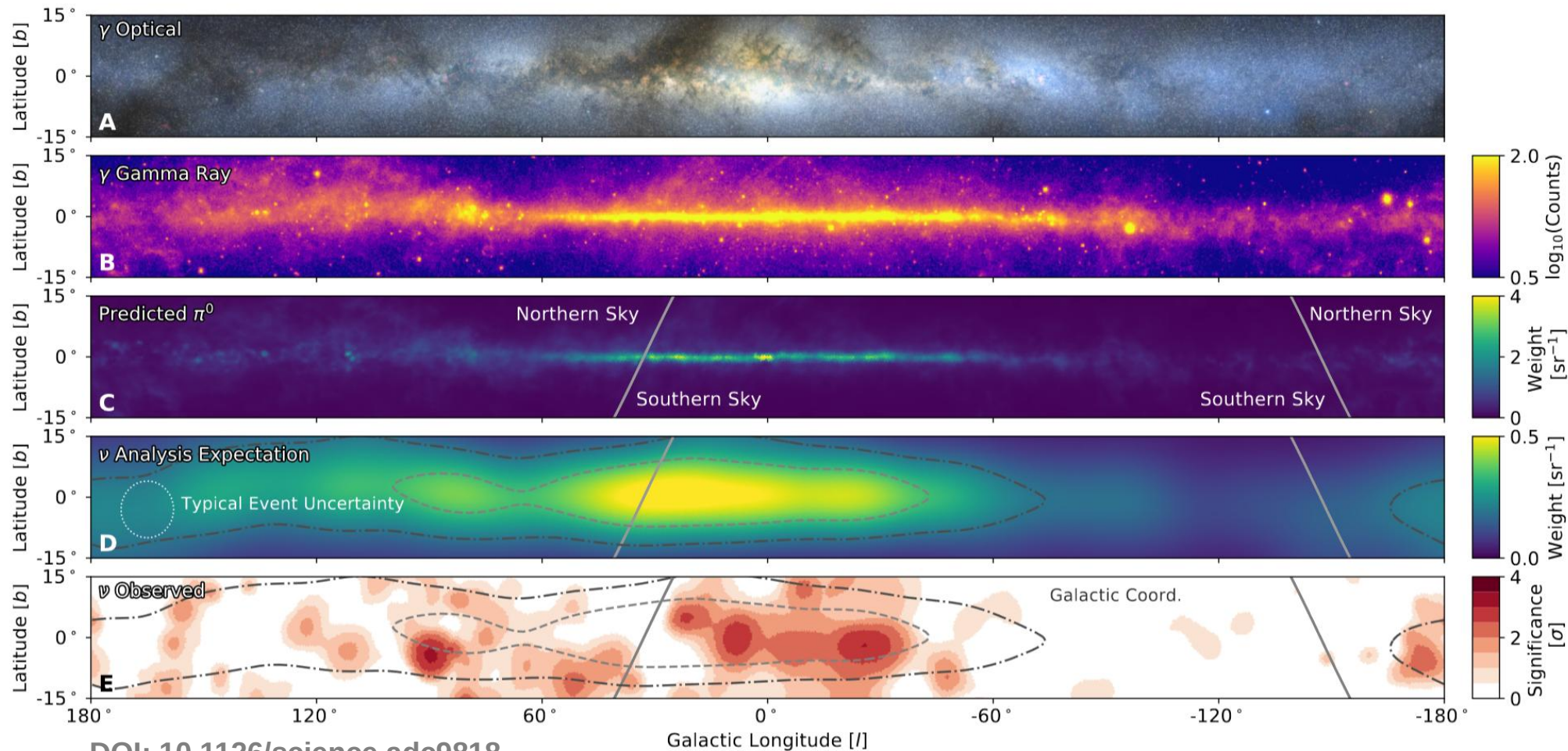
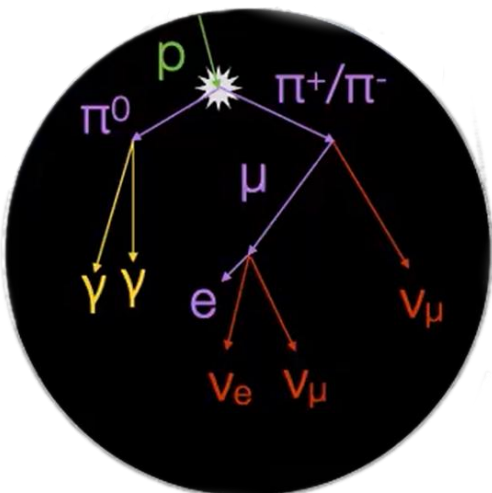
→ die erste Quelle??



NGC 1068 (2022)



Unsere Milchstraße (2023)



DOI: 10.1126/science.adc9818