

**Tidal  
disruption  
events**

***(and AGN flares)  
as high-energy  
neutrino sources***

**Unsolved problems in astrophysics**  
Dec 5 2022

**Universiteit  
Leiden**



**Sjoert van Velzen**

# Unsolved problem:

## The origin of cosmic neutrino (PeV scale)

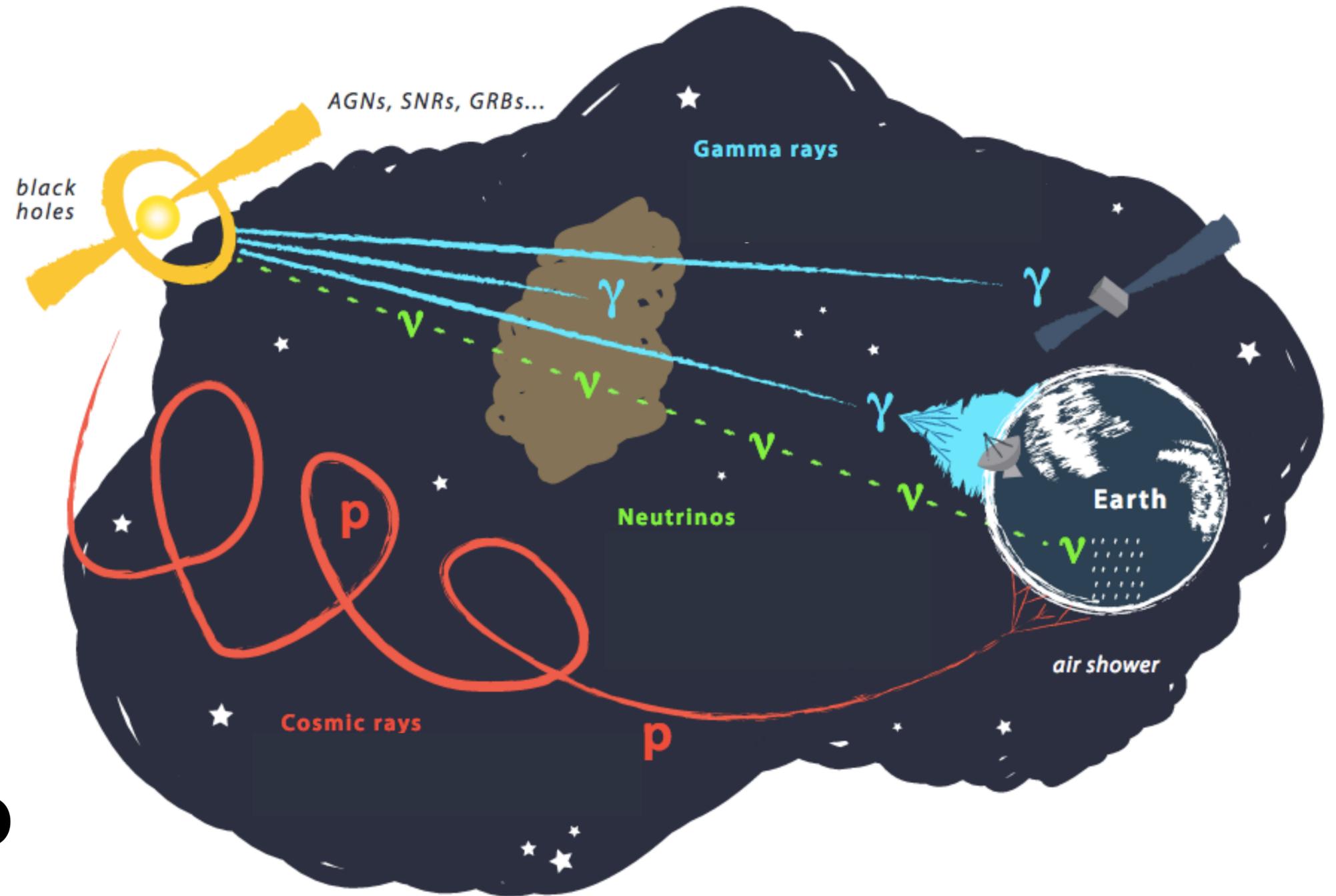
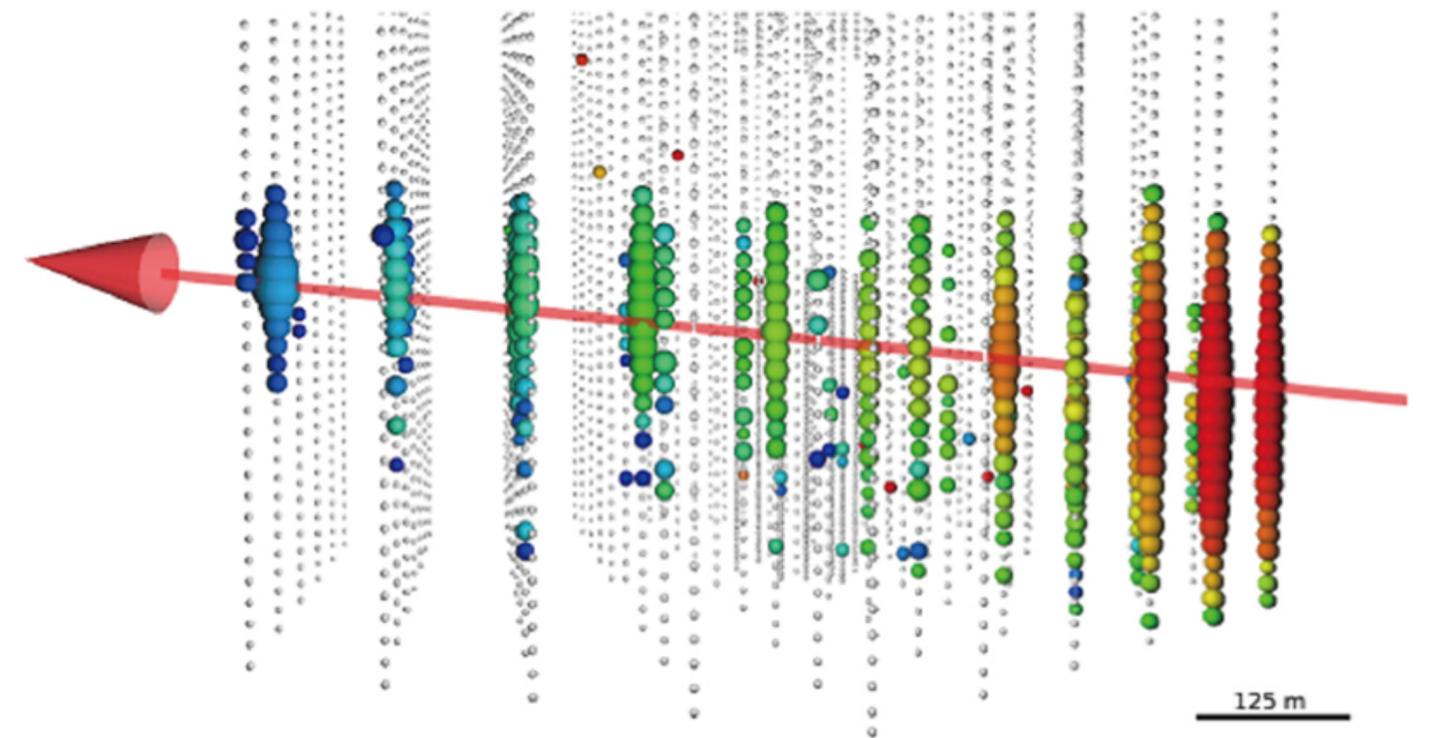
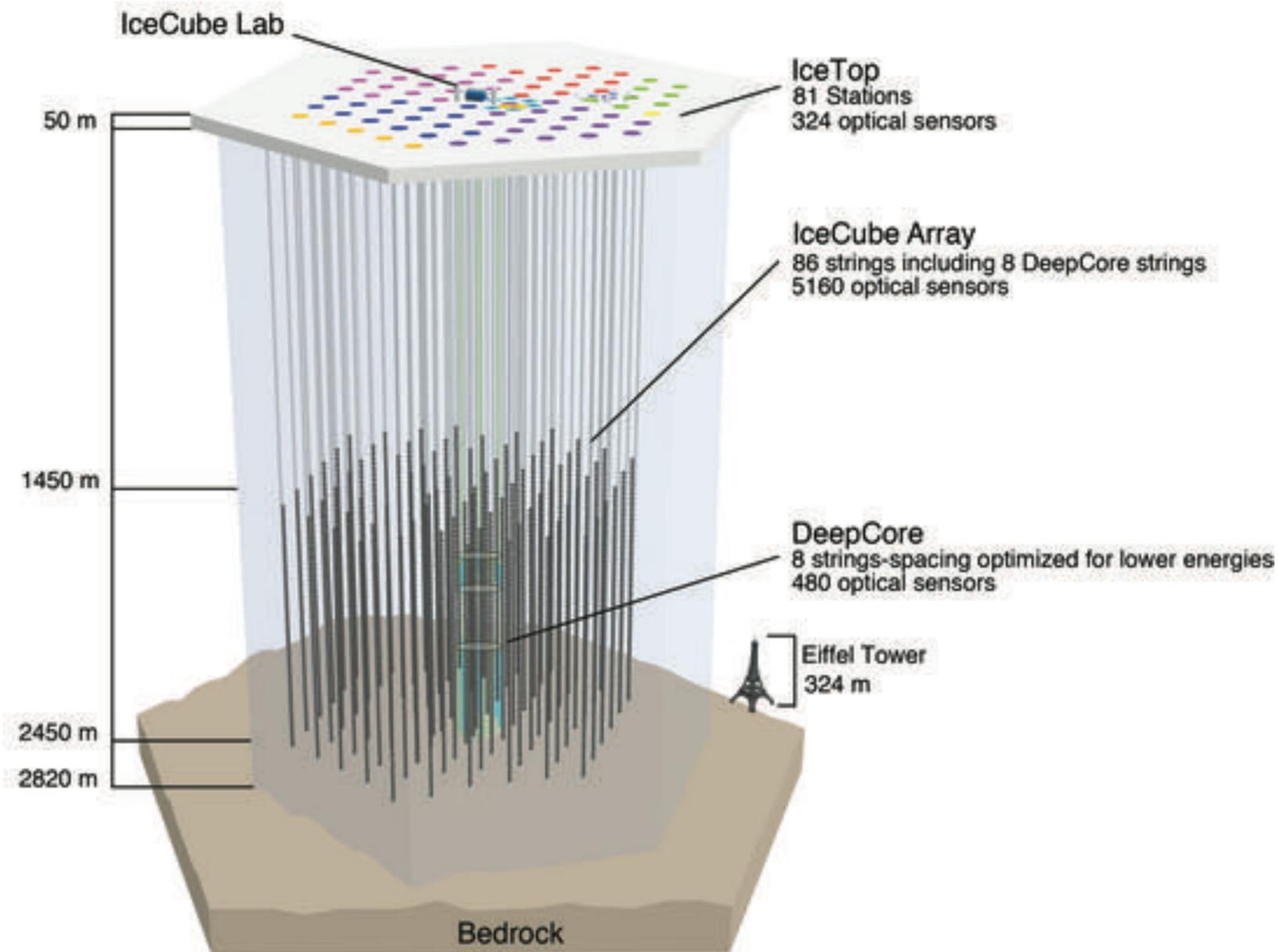


Image credit: IceCube

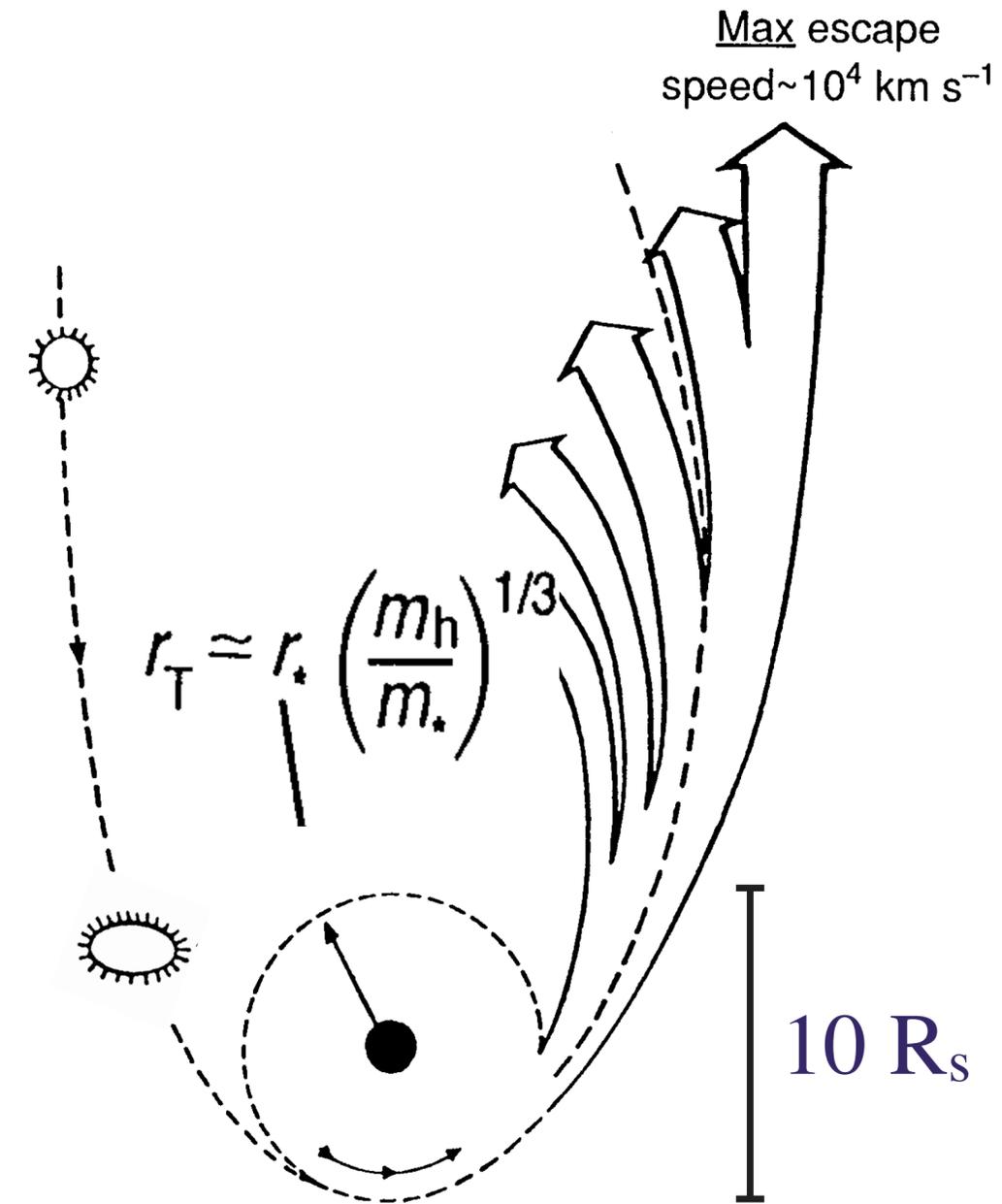
# Detecting neutrinos is not easy



Event view of IceCube-170922

# Stellar tidal disruption events (TDEs)

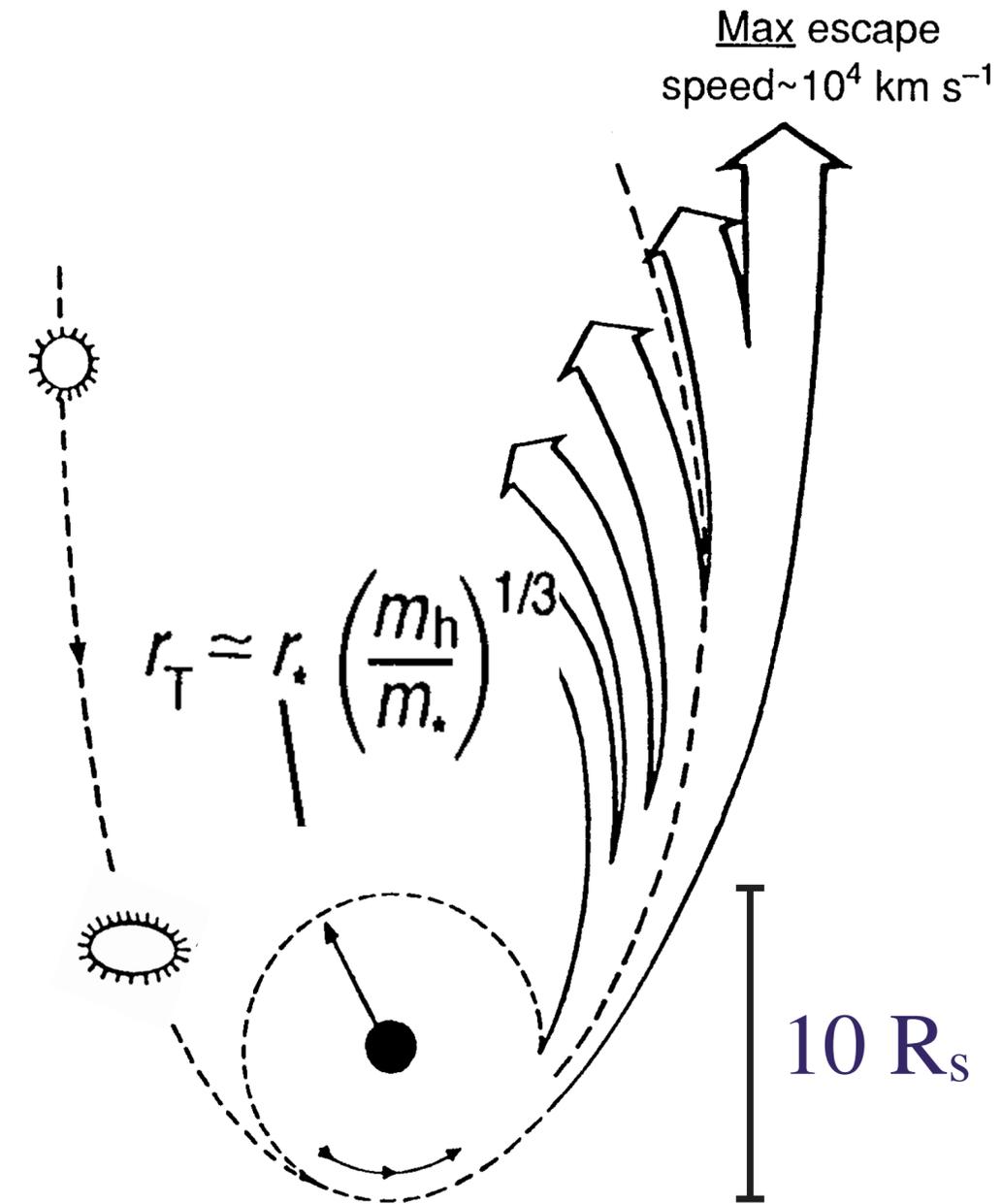
- Star passes within Roche radius
- Half of the stellar debris remains bound to BH
- Timescale  $\sim$  months;  $\dot{M} \propto t^{-5/3}$



Rees (1988)

# Stellar tidal disruption events (TDEs)

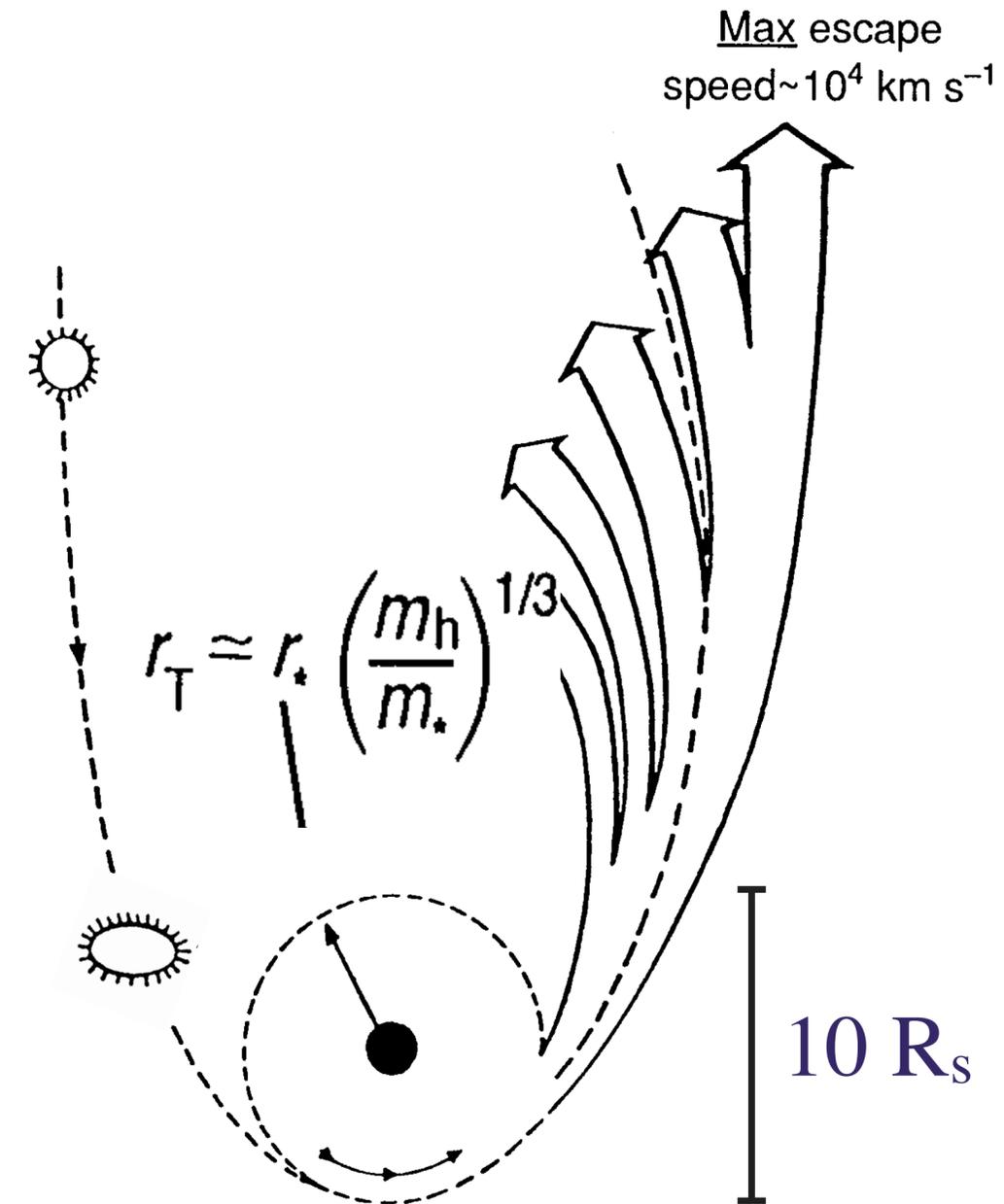
- Star passes within Roche radius
- Half of the stellar debris remains bound to BH
- Timescale  $\sim$  months;  $\dot{M} \propto t^{-5/3}$
- Probe of quiescent black holes



Rees (1988)

# Stellar tidal disruption events (TDEs)

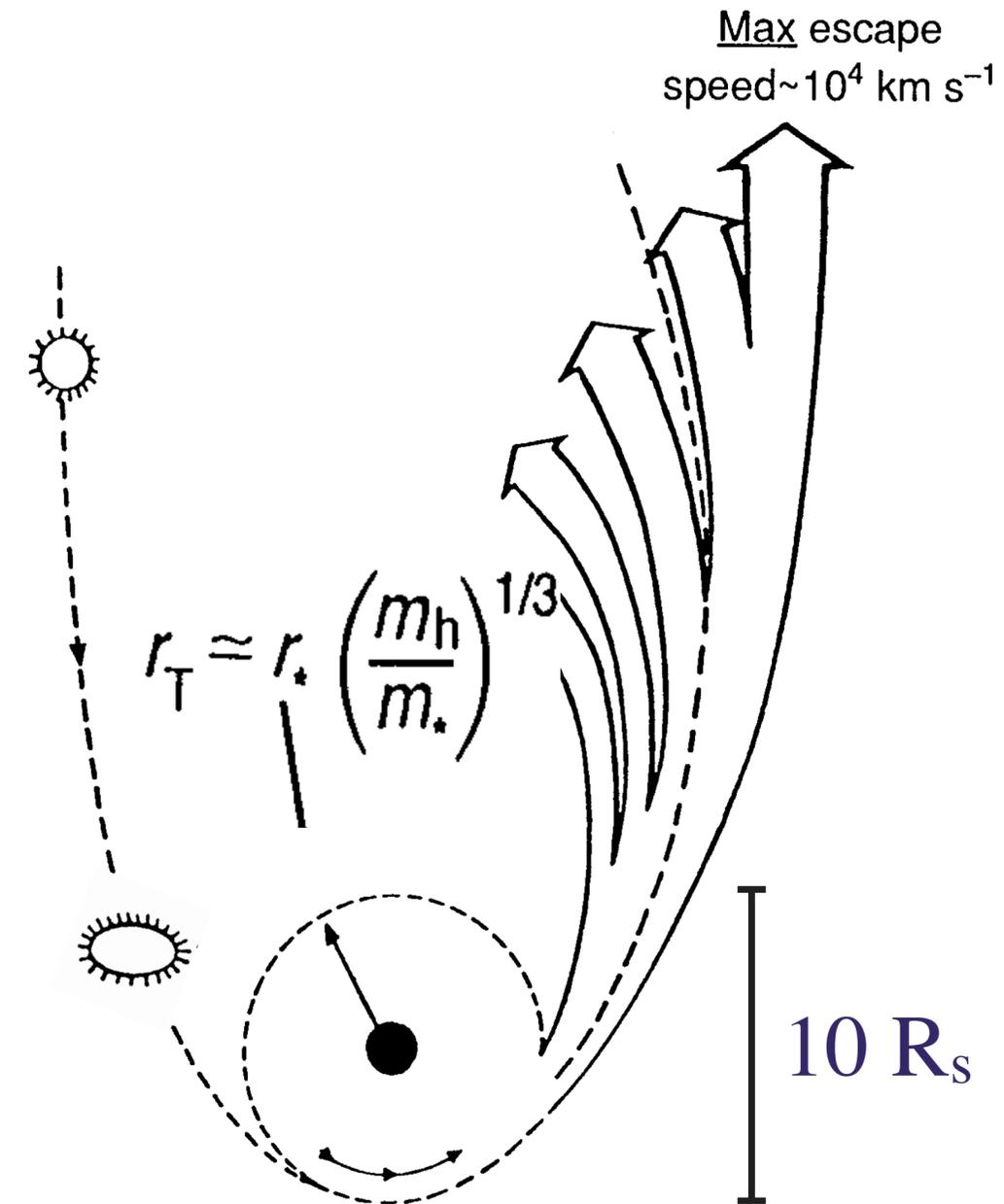
- Star passes within Roche radius
- Half of the stellar debris remains bound to BH
- Timescale  $\sim$  months;  $\dot{M} \propto t^{-5/3}$
- Probe of quiescent black holes
- Laboratory for accretion physics



Rees (1988)

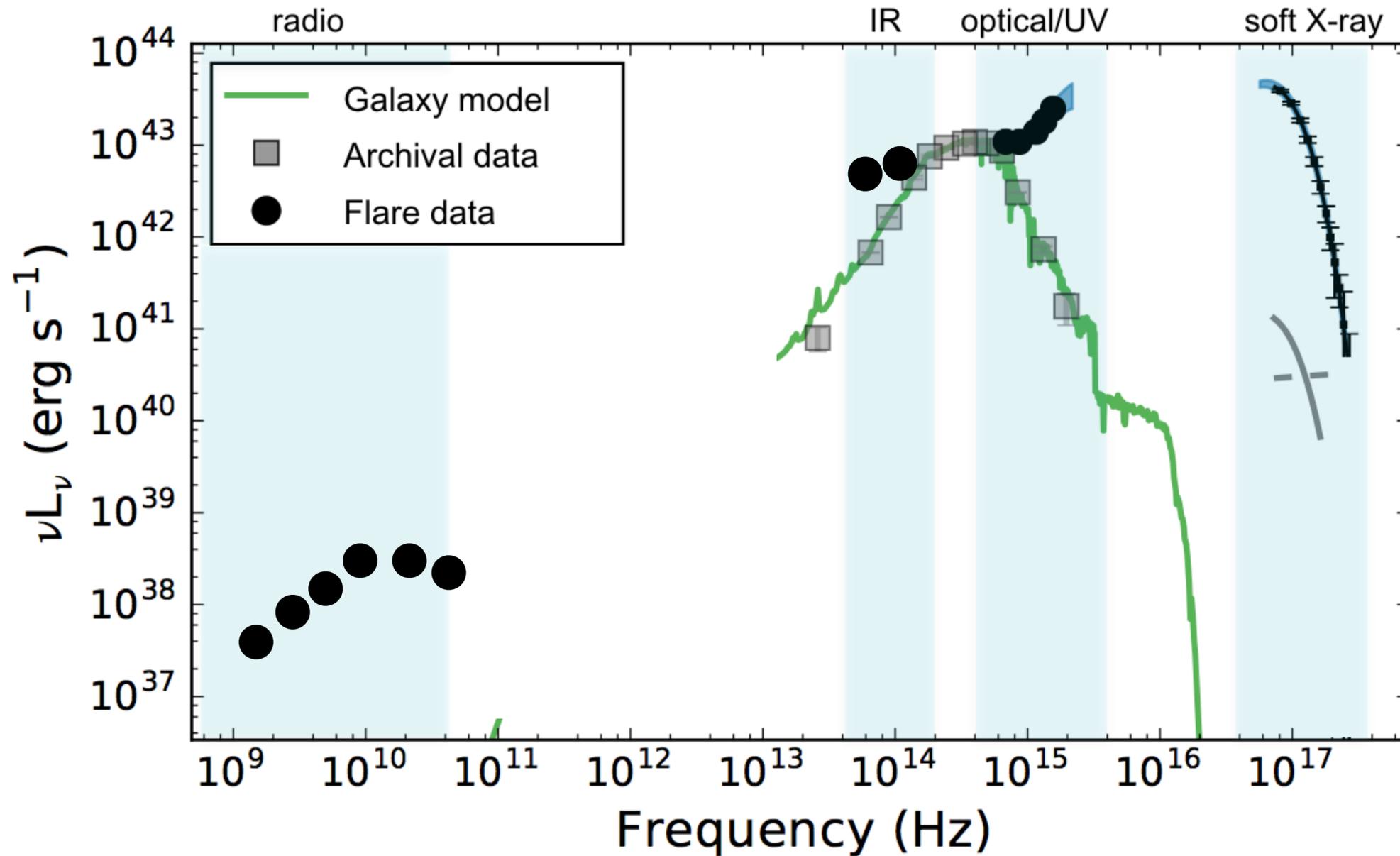
# Stellar tidal disruption events (TDEs)

- Star passes within Roche radius
- Half of the stellar debris remains bound to BH
- Timescale  $\sim$  months;  $\dot{M} \propto t^{-5/3}$
- Probe of quiescent black holes
- Laboratory for accretion physics
- Rare events:  $\sim 10^4$  yr wait time per galaxy: need big surveys



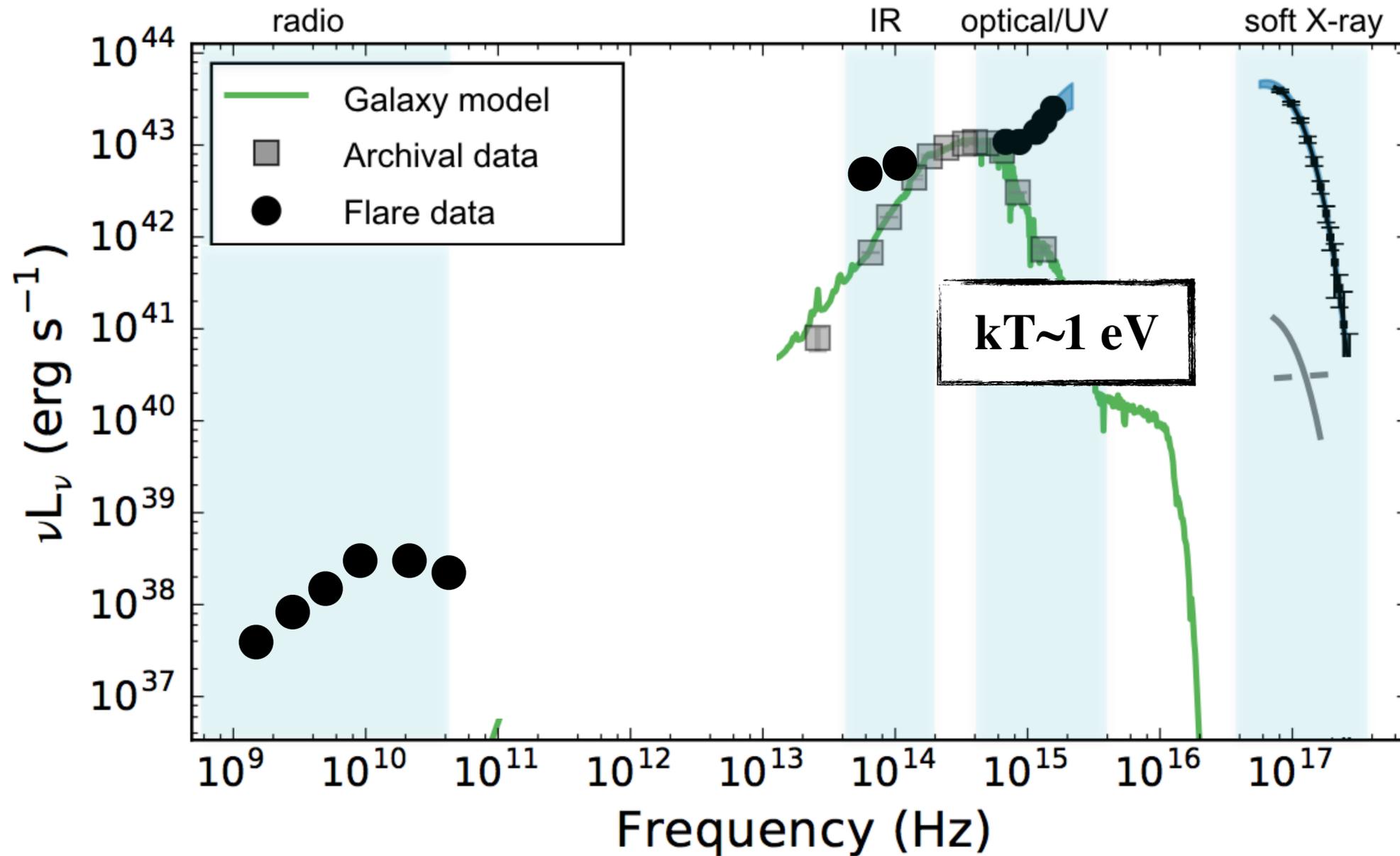
Rees (1988)

# Spectrum of a tidal disruption flare



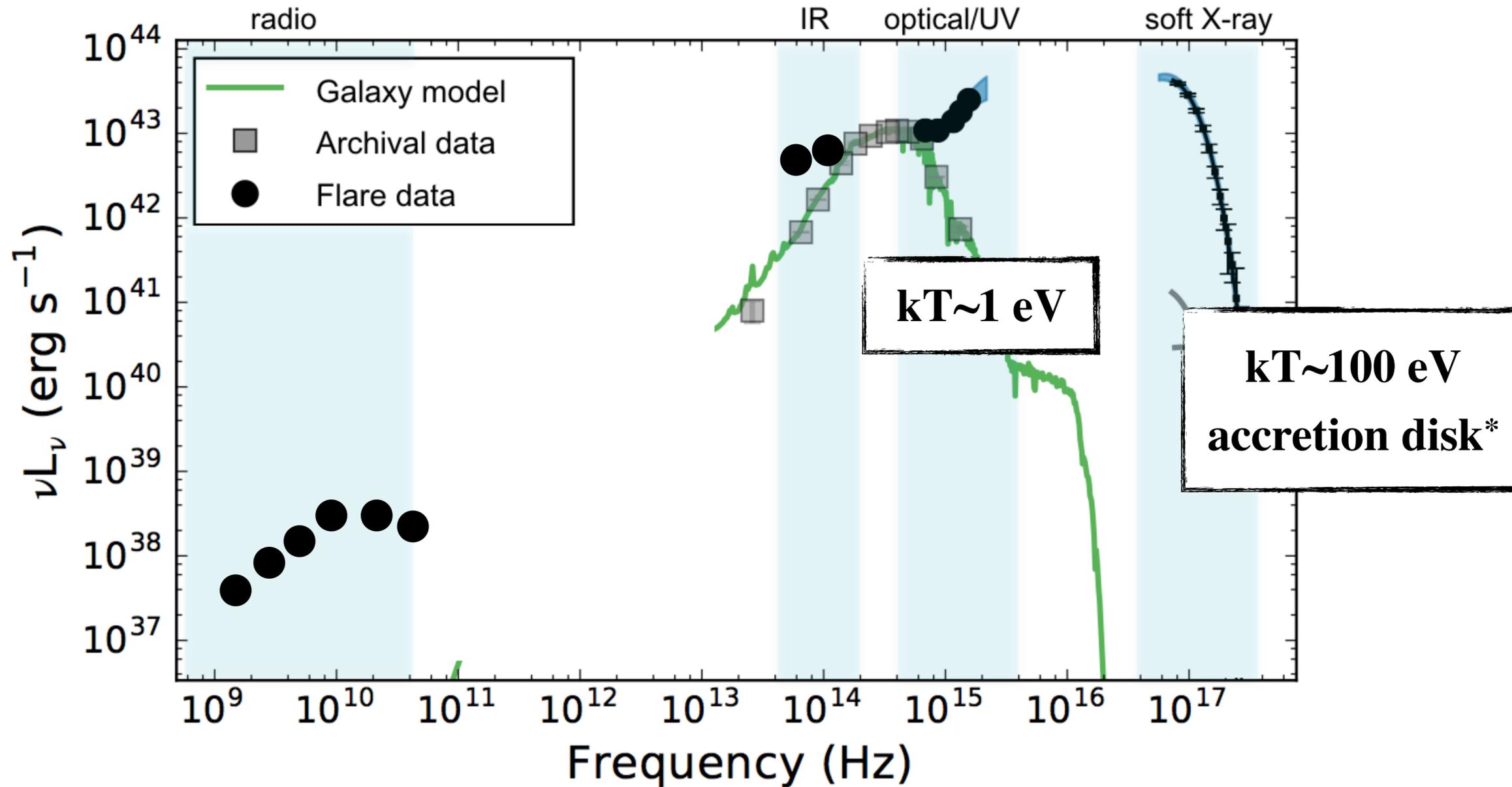
van Velzen et al. (Science, 2016);  
ASASSN-14li (Holoien et al. 2016)  
\*however: Steinberg & Stone (2022)

# Spectrum of a tidal disruption flare



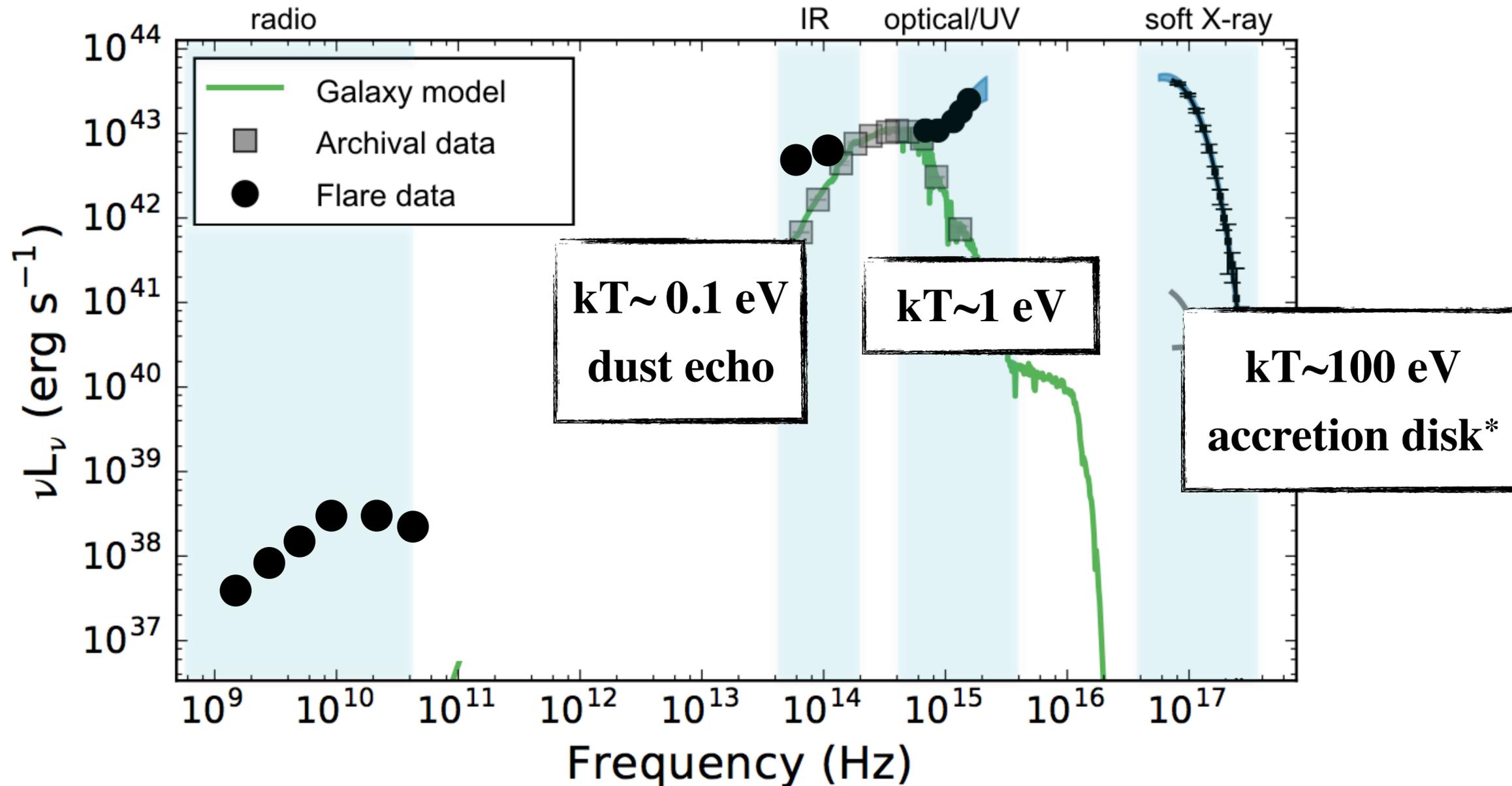
van Velzen et al. (Science, 2016);  
ASASSN-14li (Holoien et al. 2016)  
\*however: Steinberg & Stone (2022)

# Spectrum of a tidal disruption flare



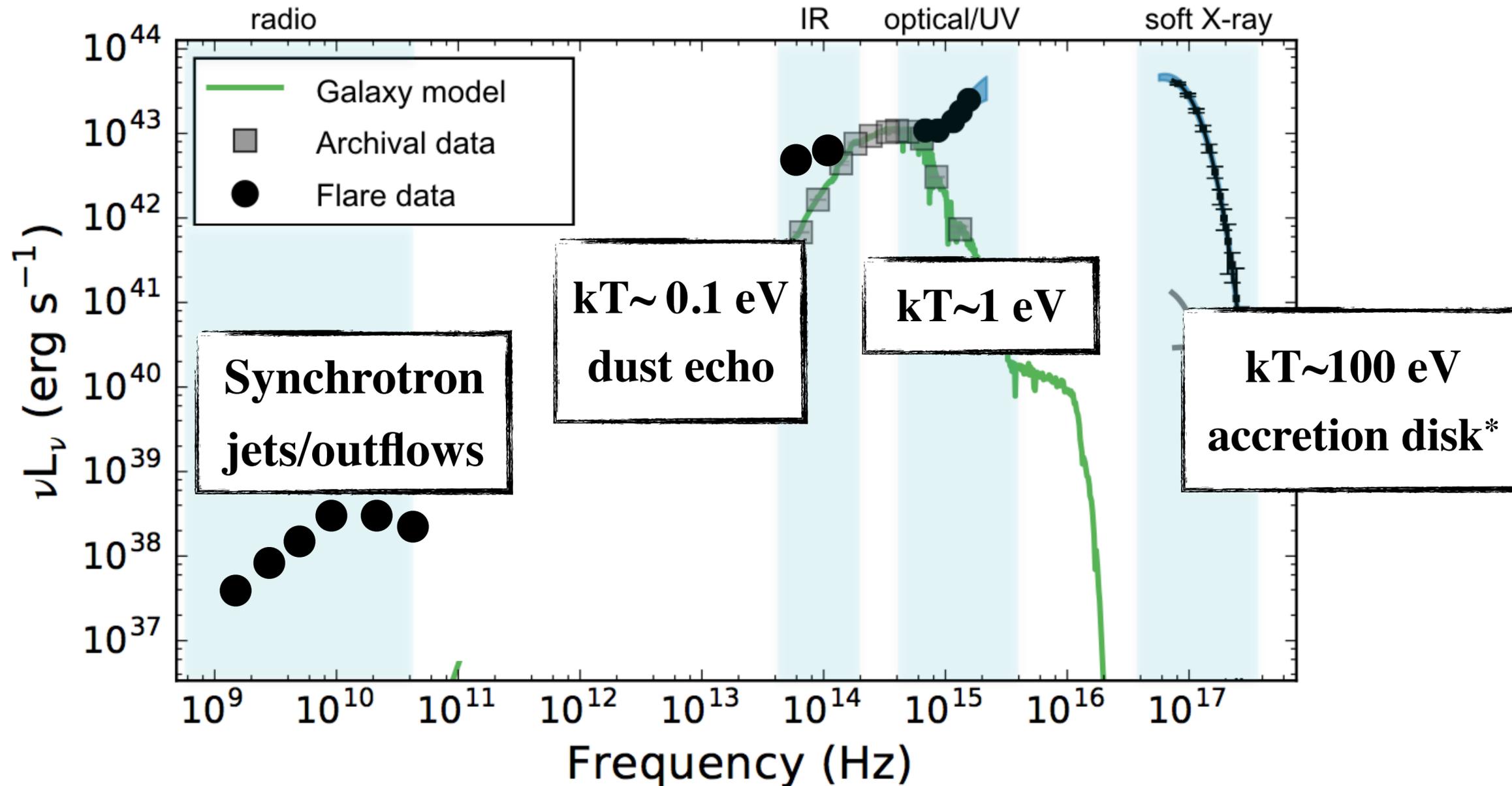
van Velzen et al. (Science, 2016);  
ASASSN-14li (Holoien et al. 2016)  
\*however: Steinberg & Stone (2022)

# Spectrum of a tidal disruption flare



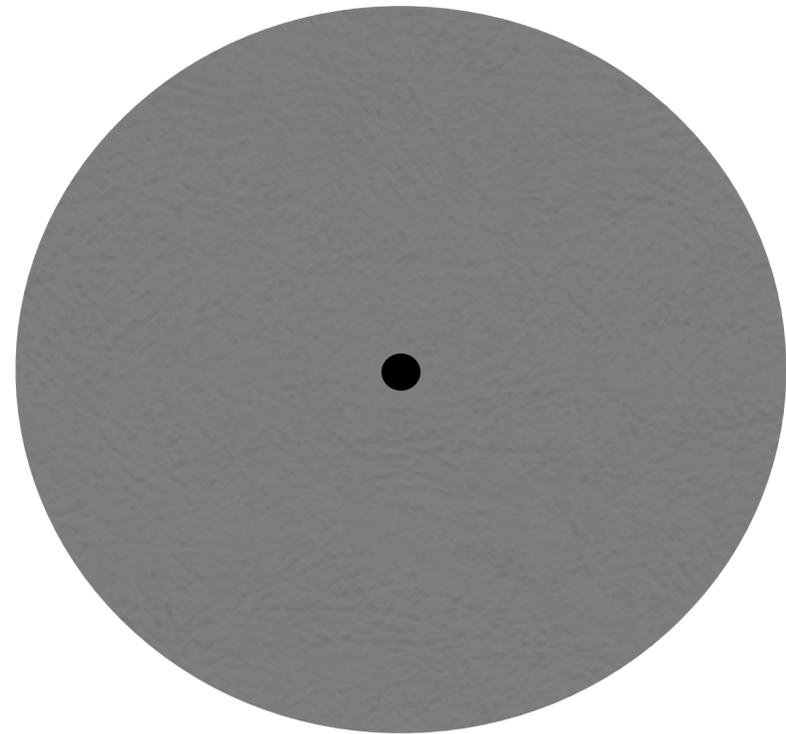
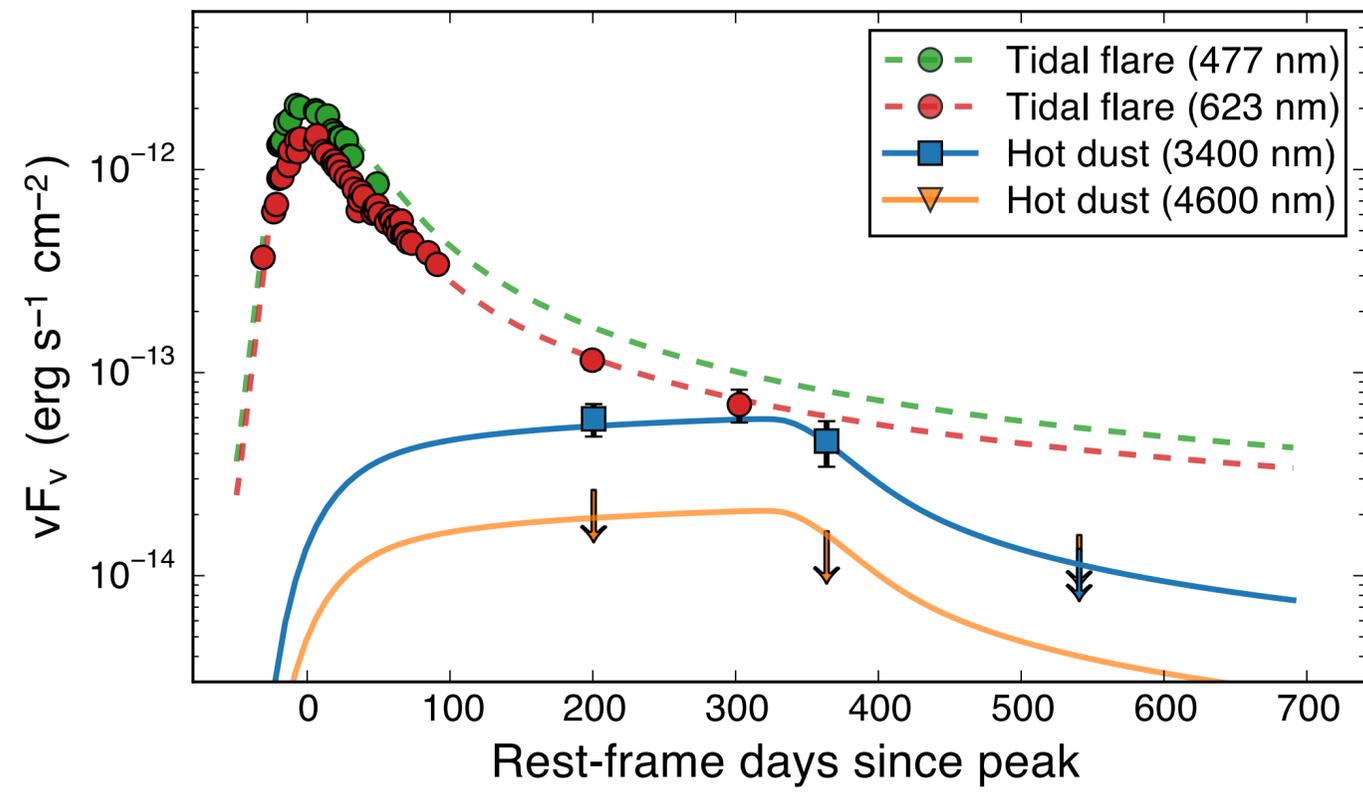
van Velzen et al. (Science, 2016);  
ASASSN-14li (Holoien et al. 2016)  
\*however: Steinberg & Stone (2022)

# Spectrum of a tidal disruption flare

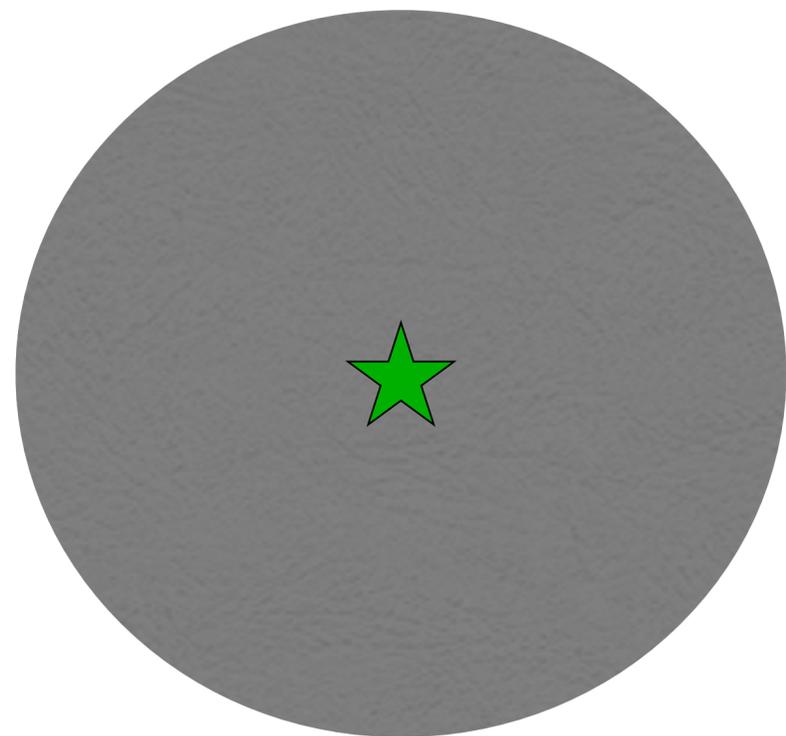
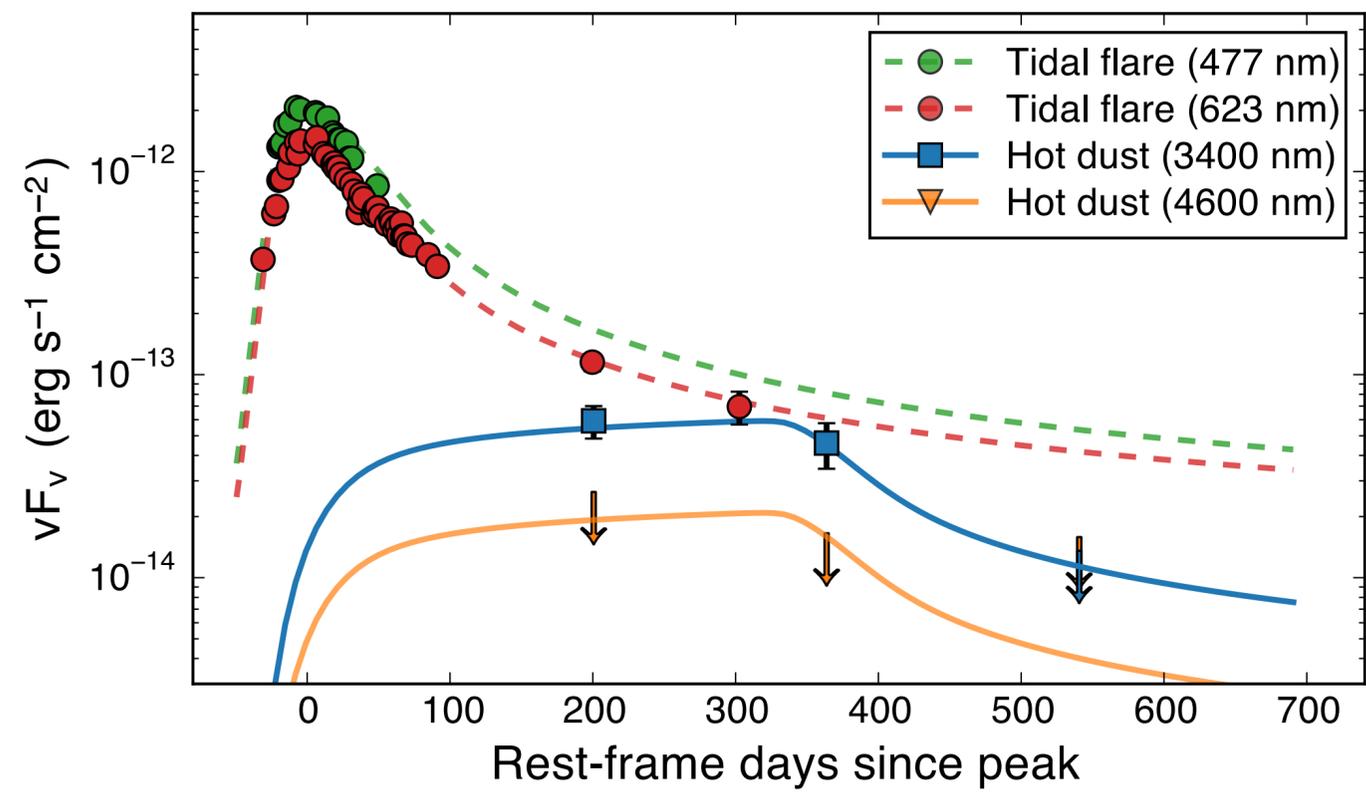


van Velzen et al. (Science, 2016);  
ASASSN-14li (Holoien et al. 2016)  
\*however: Steinberg & Stone (2022)

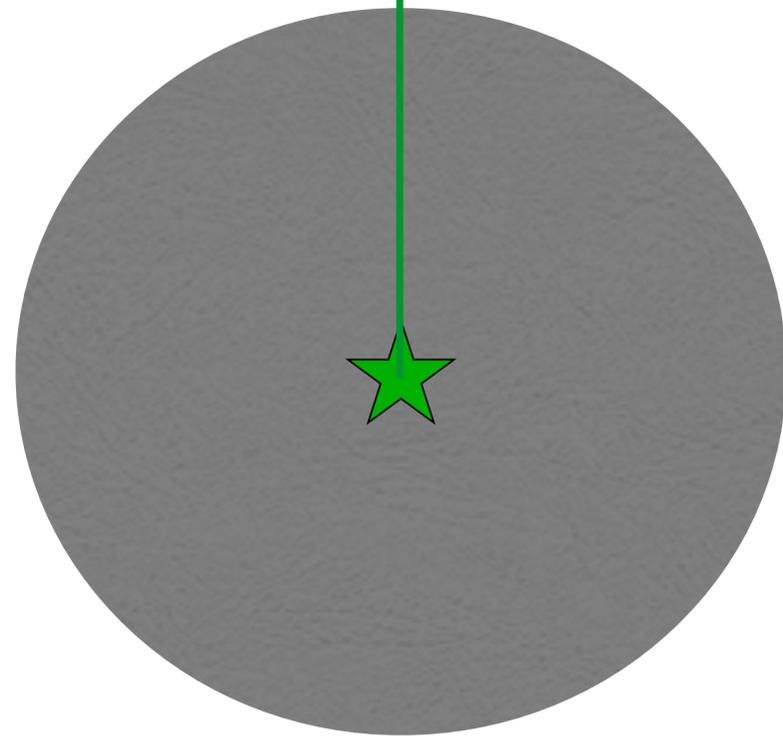
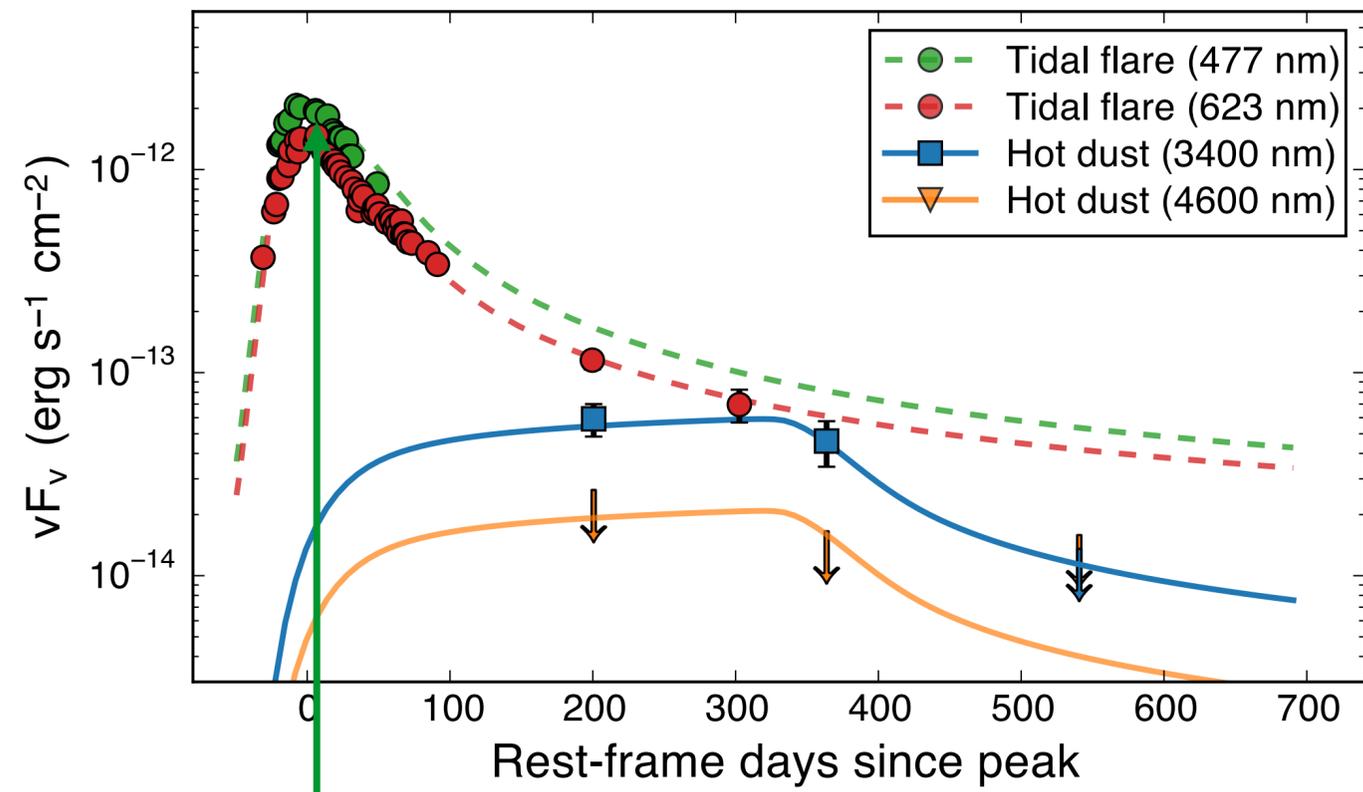




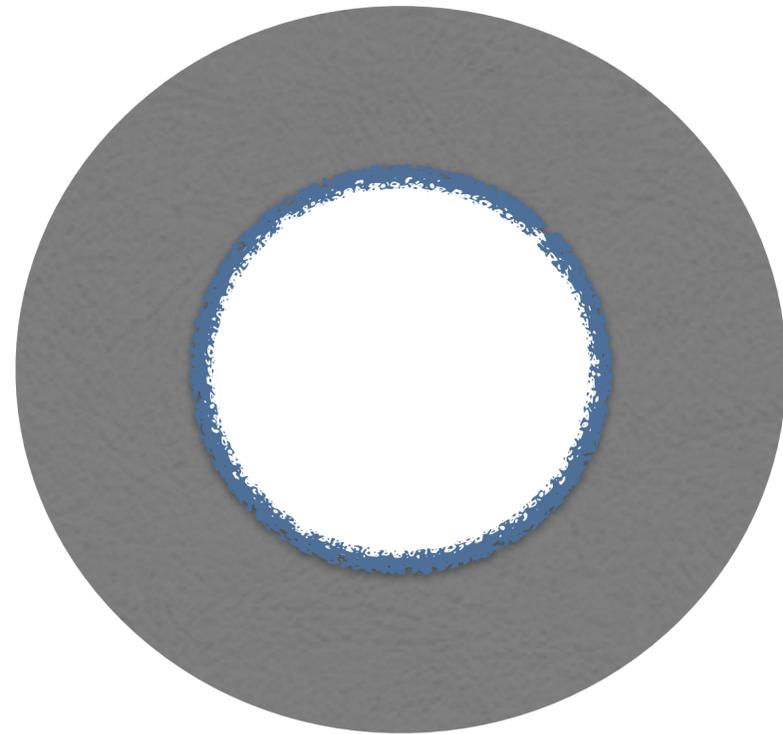
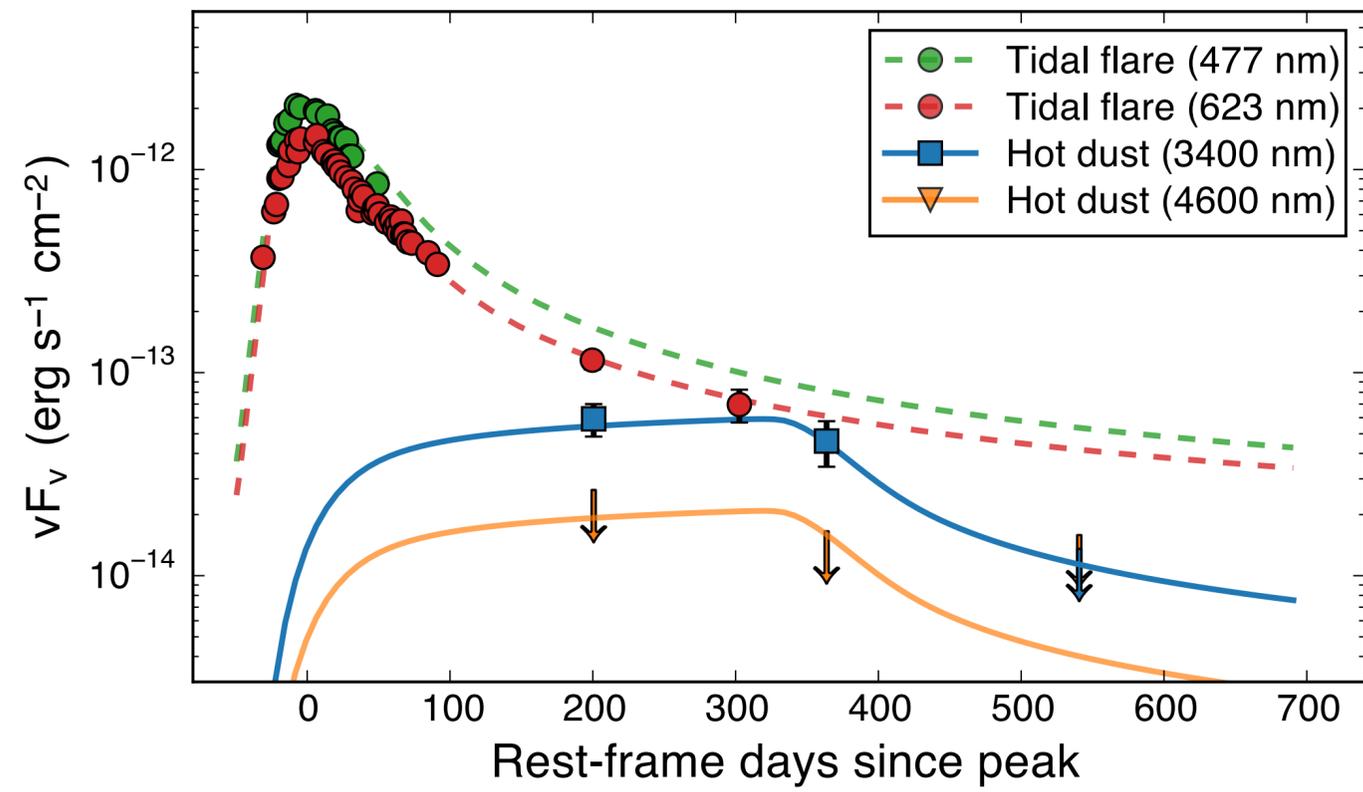
- $R \sim 0.1 \text{ pc}$
- $L_{\text{abs}} \sim 10^{45} \text{ erg/s}$
- Covering factor:  
 $L_{\text{abs}}/L_{\text{dust}} \sim 1\%$



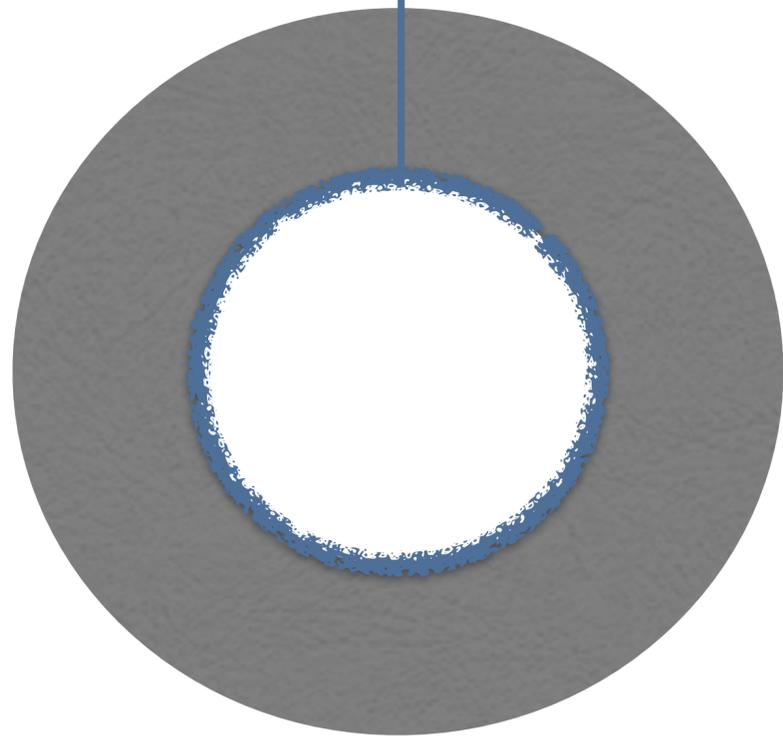
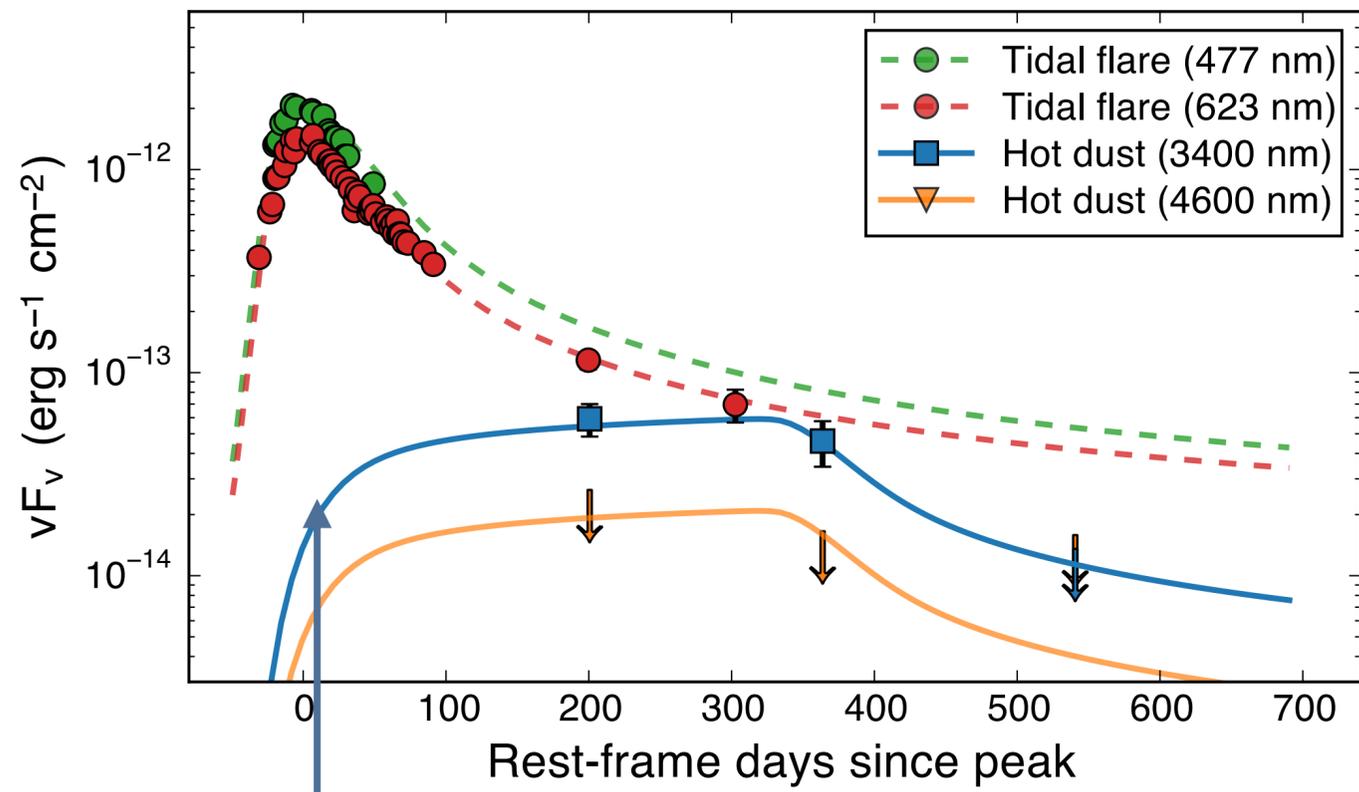
- $R \sim 0.1 \text{ pc}$
- $L_{\text{abs}} \sim 10^{45} \text{ erg/s}$
- Covering factor:  
 $L_{\text{abs}}/L_{\text{dust}} \sim 1\%$



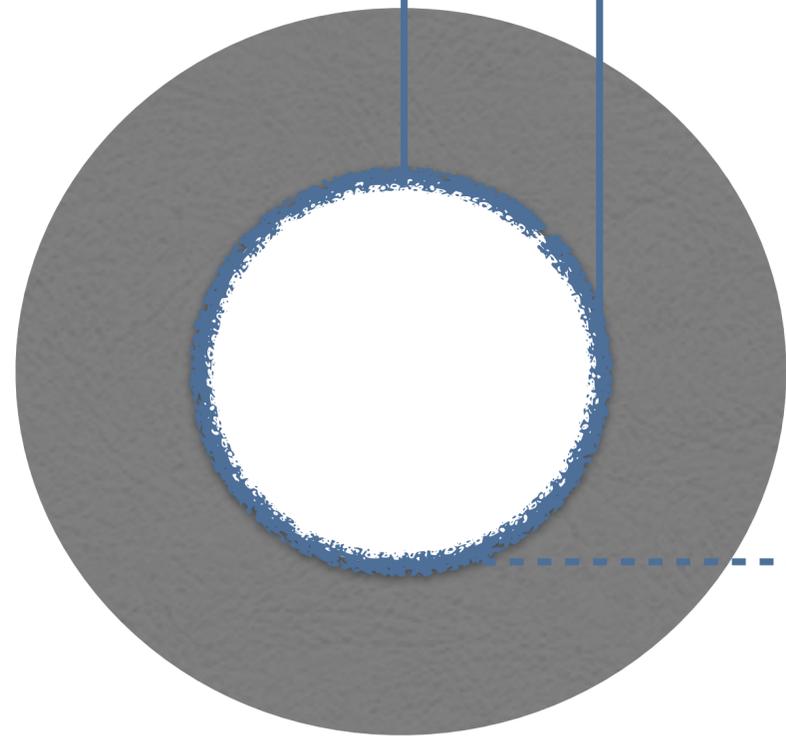
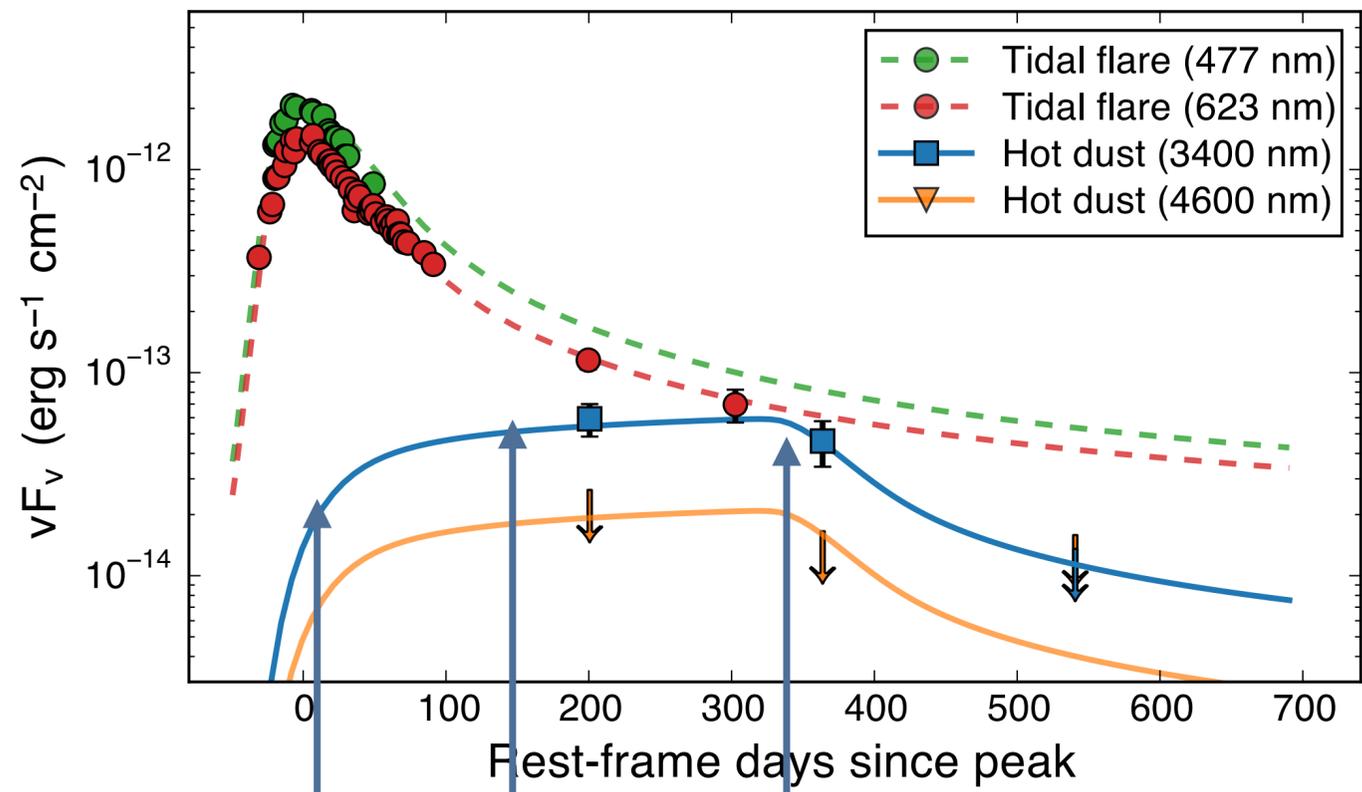
- $R \sim 0.1 \text{ pc}$
- $L_{\text{abs}} \sim 10^{45} \text{ erg/s}$
- Covering factor:  
 $L_{\text{abs}}/L_{\text{dust}} \sim 1\%$



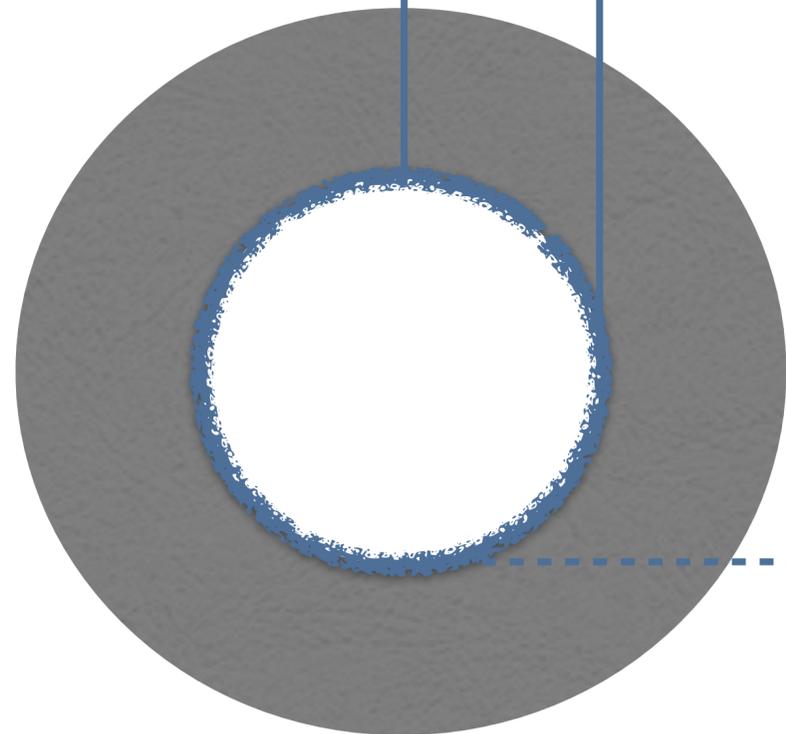
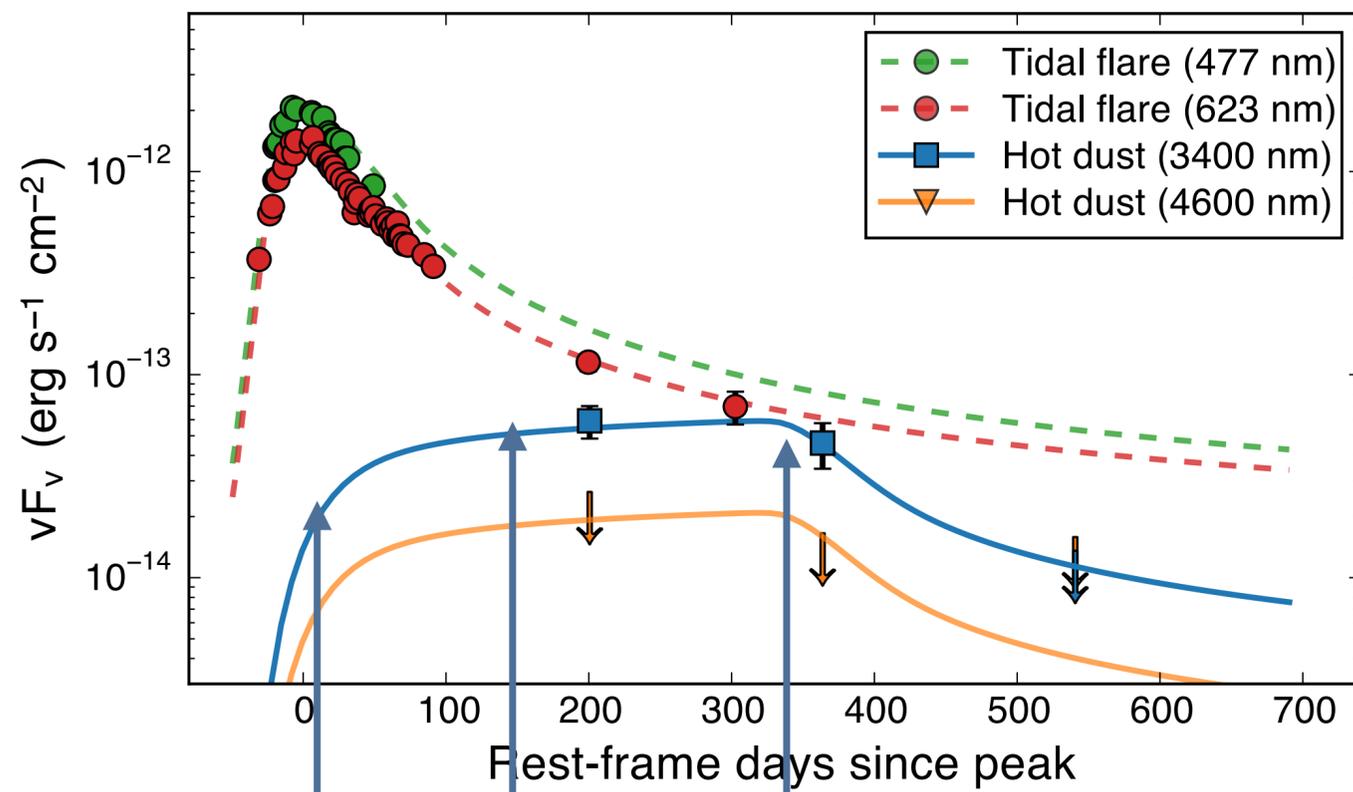
- $R \sim 0.1 \text{ pc}$
- $L_{\text{abs}} \sim 10^{45} \text{ erg/s}$
- Covering factor:  
 $L_{\text{abs}}/L_{\text{dust}} \sim 1\%$



- $R \sim 0.1$  pc
- $L_{\text{abs}} \sim 10^{45}$  erg/s
- Covering factor:  
 $L_{\text{abs}}/L_{\text{dust}} \sim 1\%$



- $R \sim 0.1$  pc
- $L_{\text{abs}} \sim 10^{45}$  erg/s
- Covering factor:  
 $L_{\text{abs}}/L_{\text{dust}} \sim 1\%$



- $R \sim 0.1 \text{ pc}$
- $L_{\text{abs}} \sim 10^{45} \text{ erg/s}$
- **Covering factor:**  
 $L_{\text{abs}}/L_{\text{dust}} \sim 1\%$

Predicted by Lu et al. (2016)  
based on Waxman & Draine (2000)

First observed by: van Velzen et al. (2016);  
Jiang et al. (2016); Dou et al. (2016)

# Zwicky Transient Facility (ZTF) and Tidal Disruption Events

- Tidal Disruption Events (TDEs) are rare: only 30 found in the last decade (see review by van Velzen et al. 2020)



# Zwicky Transient Facility (ZTF) and Tidal Disruption Events

- Tidal Disruption Events (TDEs) are rare: only 30 found in the last decade (see review by van Velzen et al. 2020)
- With ZTF, we tripled the number good TDEs (van Velzen et al. 2019; 2021)



# Zwicky Transient Facility (ZTF) and Tidal Disruption Events

- Tidal Disruption Events (TDEs) are rare: only 30 found in the last decade (see review by van Velzen et al. 2020)
- With ZTF, we tripled the number good TDEs (van Velzen et al. 2019; 2021)
- Radio-emitting TDEs are even more rare (Alexander, van Velzen, et al. 2020)

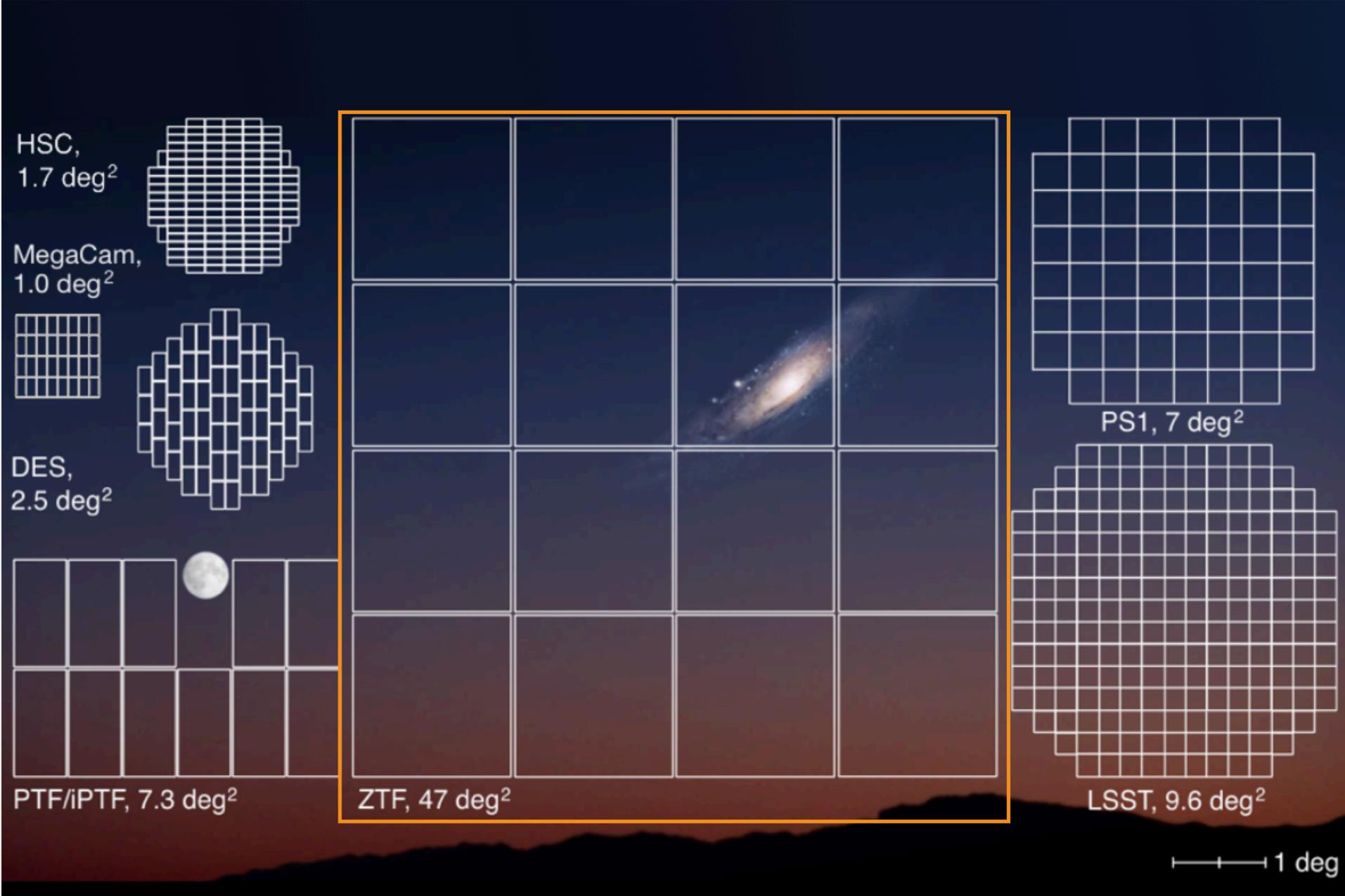


# Zwicky Transient Facility (ZTF) and Tidal Disruption Events

- Tidal Disruption Events (TDEs) are rare: only 30 found in the last decade (see review by van Velzen et al. 2020)
- With ZTF, we tripled the number good TDEs (van Velzen et al. 2019; 2021)
- Radio-emitting TDEs are even more rare (Alexander, van Velzen, et al. 2020)
- In October 2019, we found a HE neutrino spatially coincident with a radio-emitting TDE (Stein et al. Atel #13160)



# Follow-up of IceCube neutrino alerts with ZTF

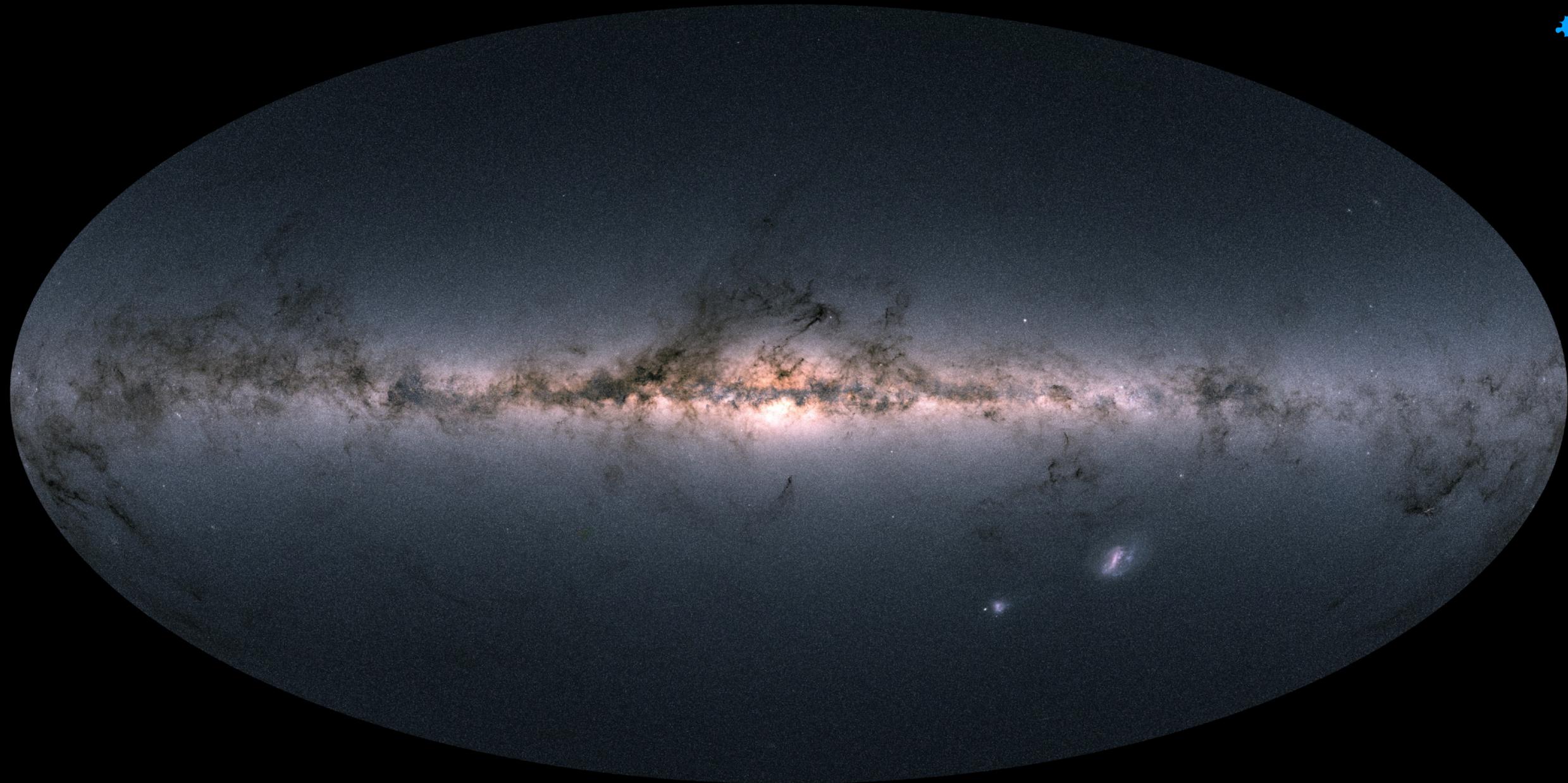


# A neutrino coincident with a tidal disruption event

Areal density-based significance;  $p=0.005$

★ Radio TDE

☀ Neutrino

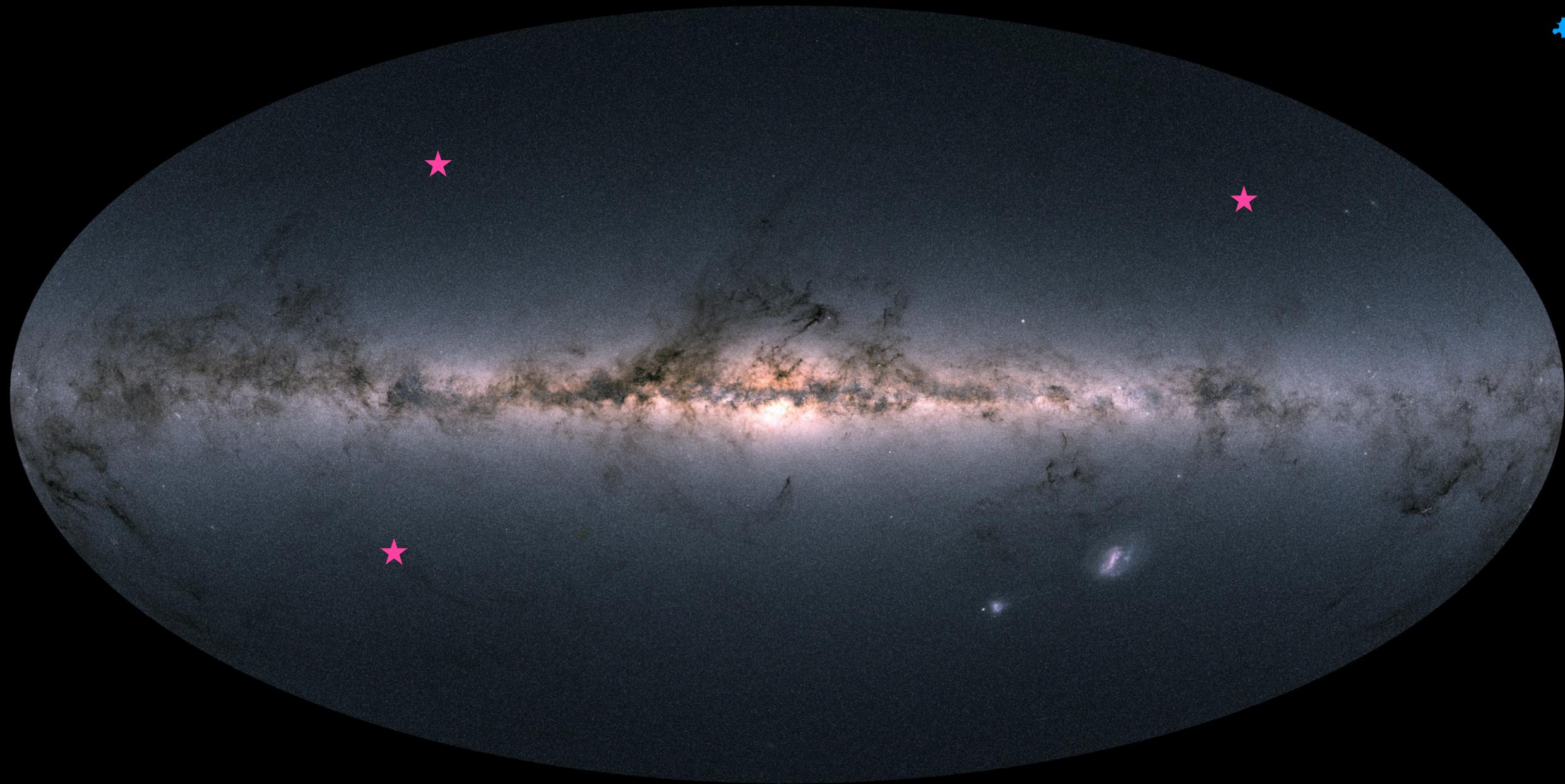


# A neutrino coincident with a tidal disruption event

Areal density-based significance;  $p=0.005$

★ Radio TDE

☀ Neutrino

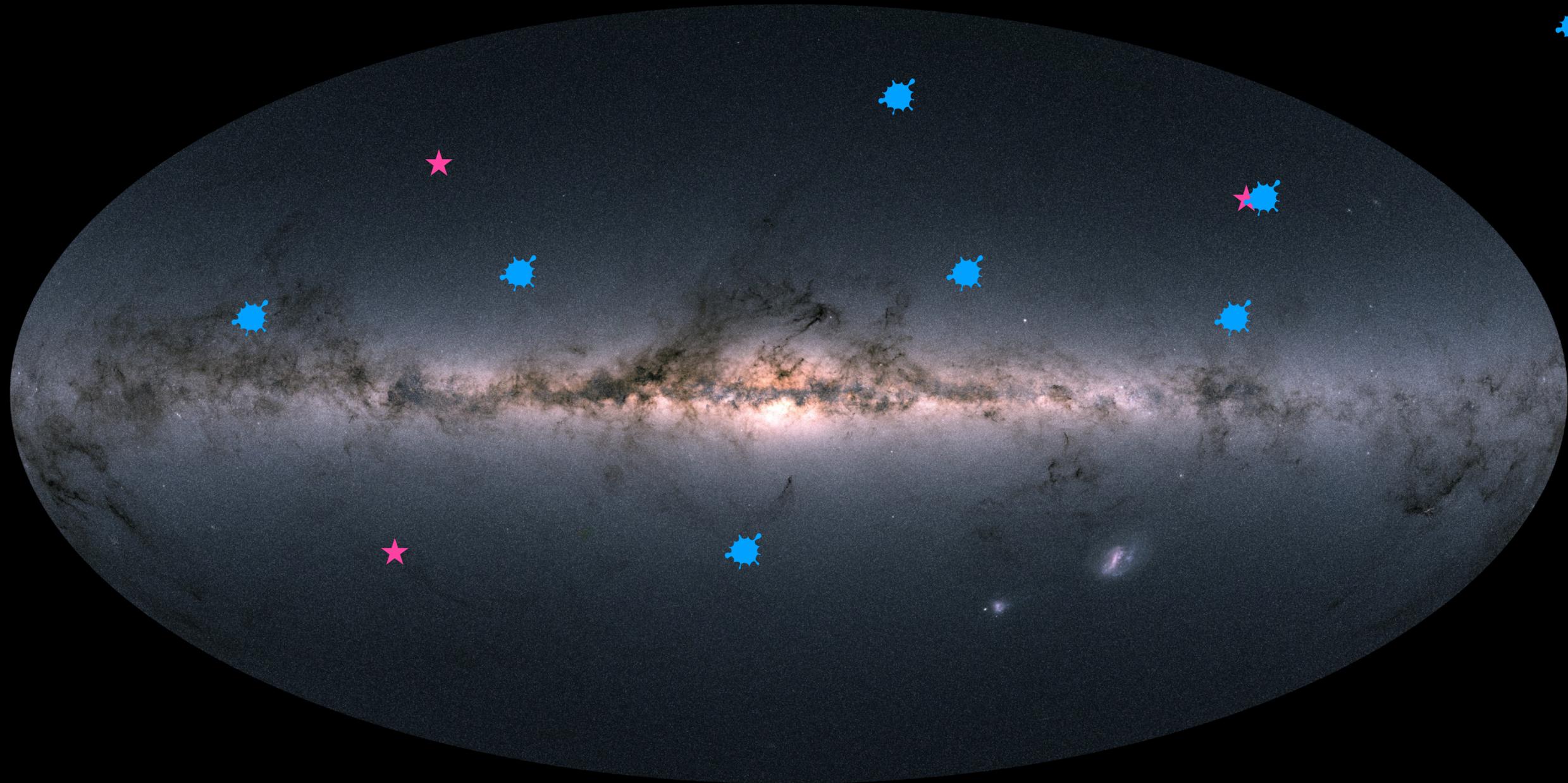


# A neutrino coincident with a tidal disruption event

Areal density-based significance;  $p=0.005$

★ Radio TDE

☀ Neutrino

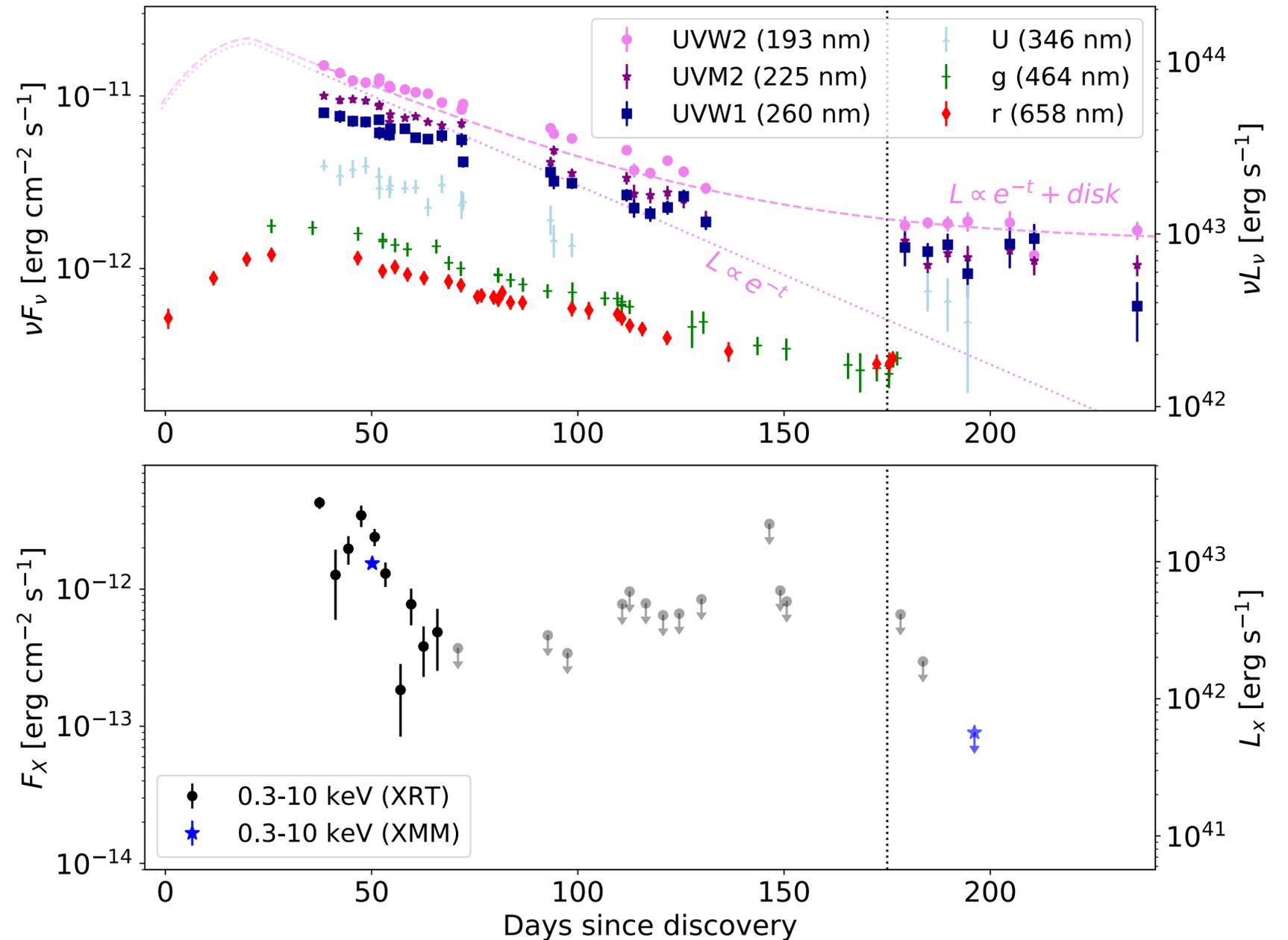


# The multi-wavelength picture

## AT2019dsg: a nearby and powerful TDE

- Very high UV luminosity (2<sup>nd</sup> highest flux on Earth)
- X-rays from accretion disk
- Neutrino arrived late, about 6 months post peak

Stein, van Velzen et al. (2021, Nature Astronomy)

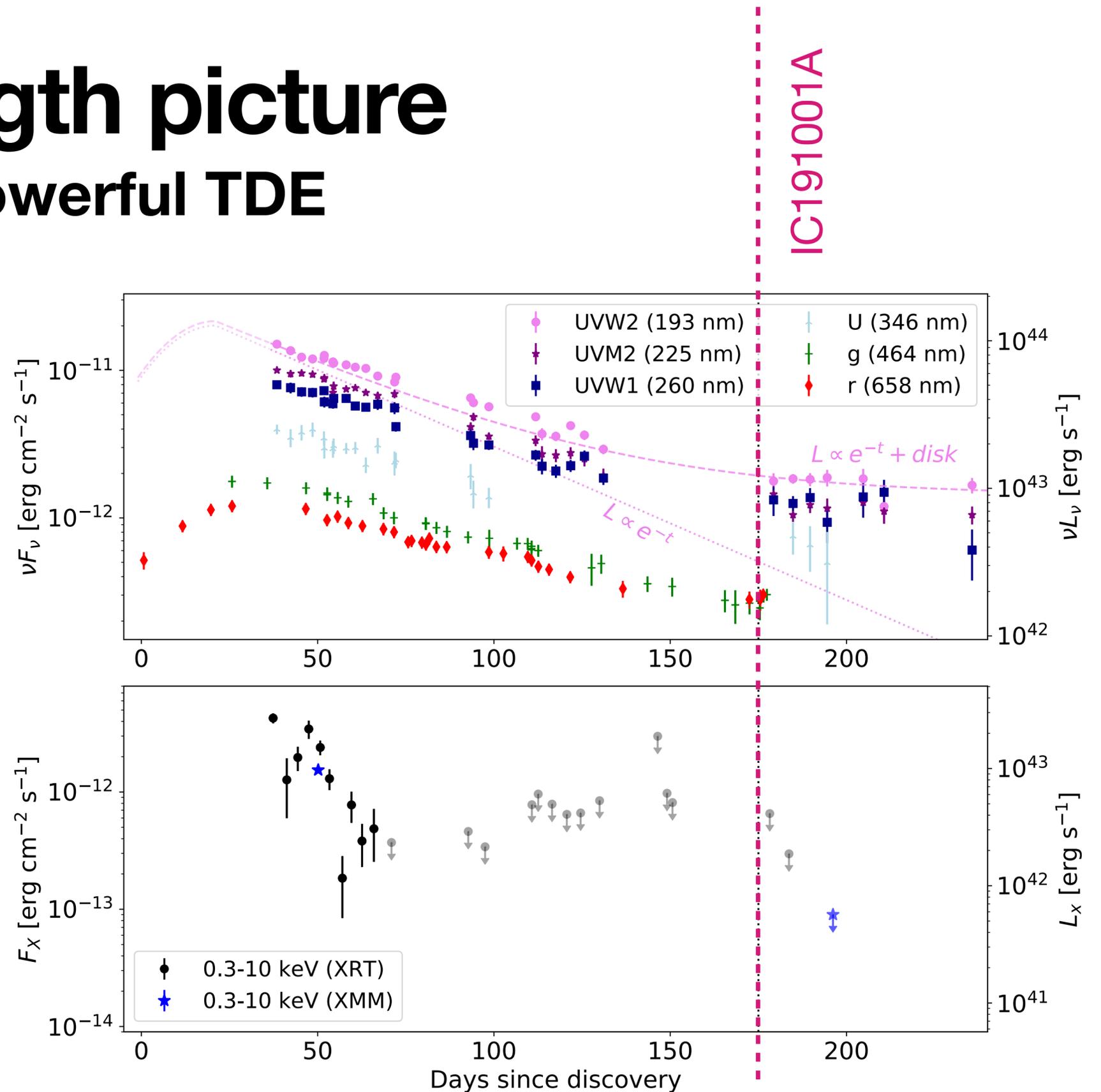


# The multi-wavelength picture

## AT2019dsg: a nearby and powerful TDE

- Very high UV luminosity (2<sup>nd</sup> highest flux on Earth)
- X-rays from accretion disk
- Neutrino arrived late, about 6 months post peak

Stein, van Velzen et al. (2021, Nature Astronomy)

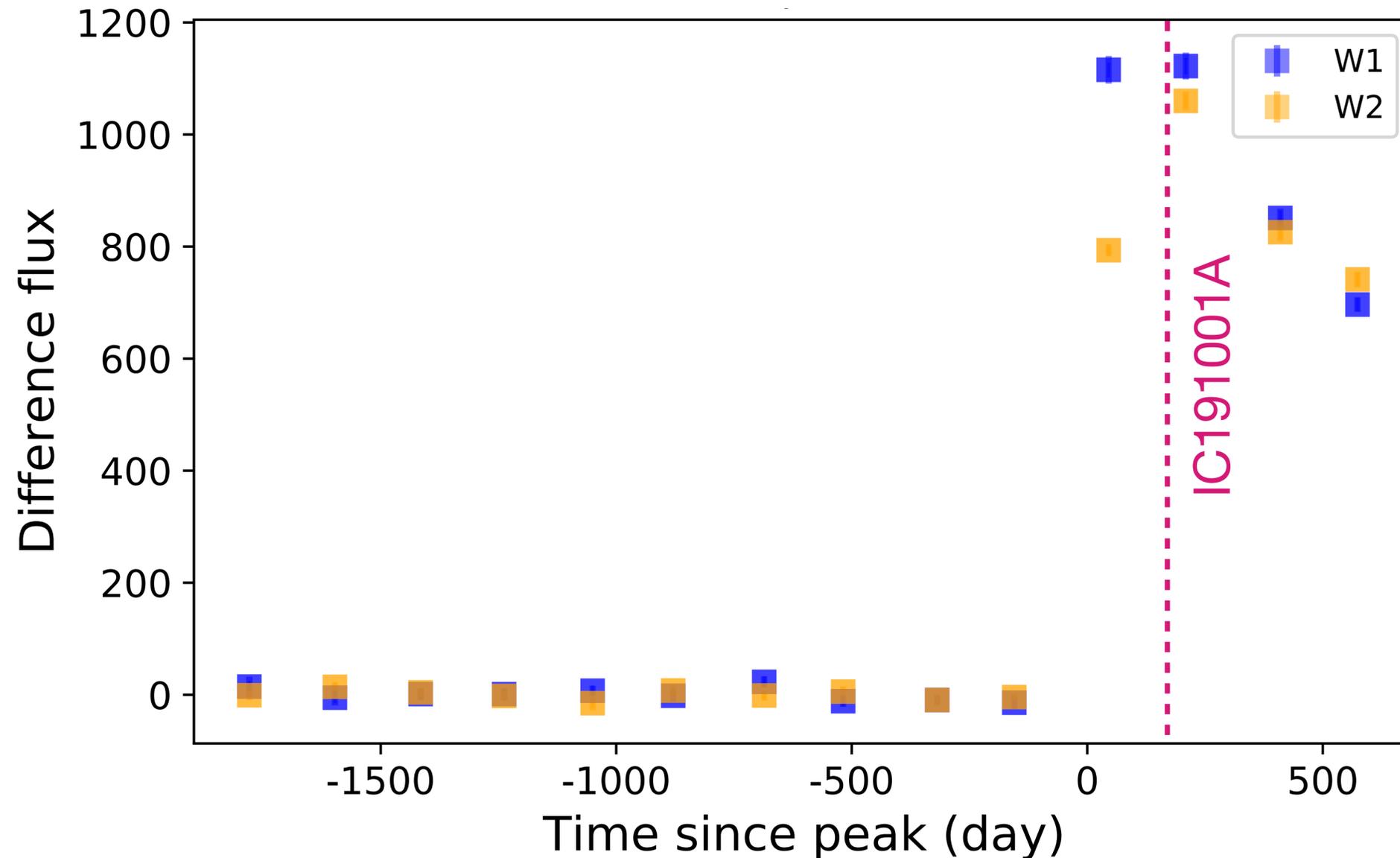


# From one, to three neutrinos

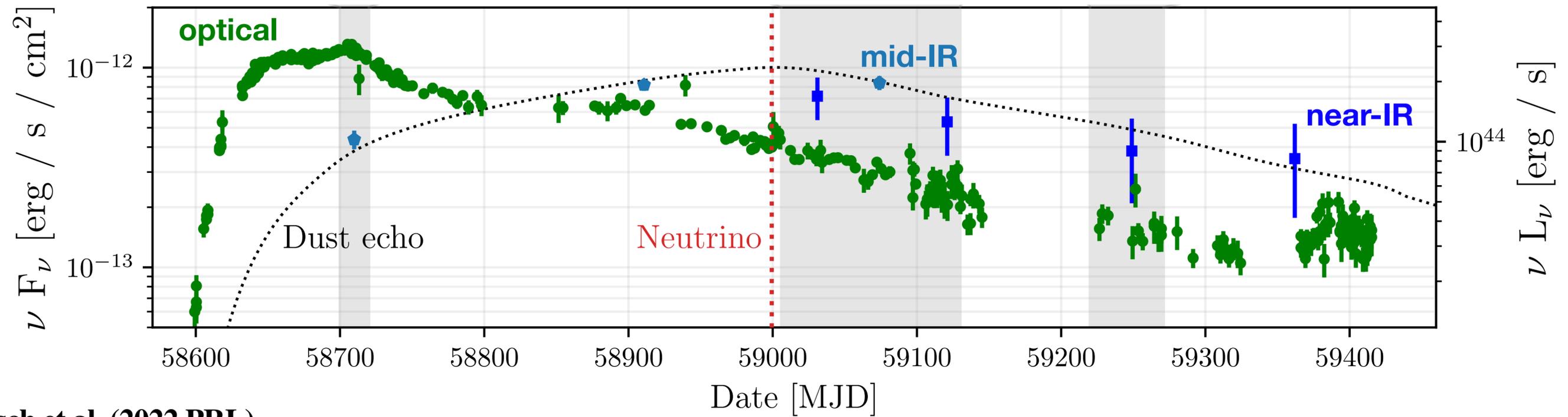


# AT2019dsg: record-breaking dust echo

This mid-IR (neoWISE) light curve was not available at the time of the IC alert and is not part of the discovery paper by Stein, van Velzen et al. (2021)



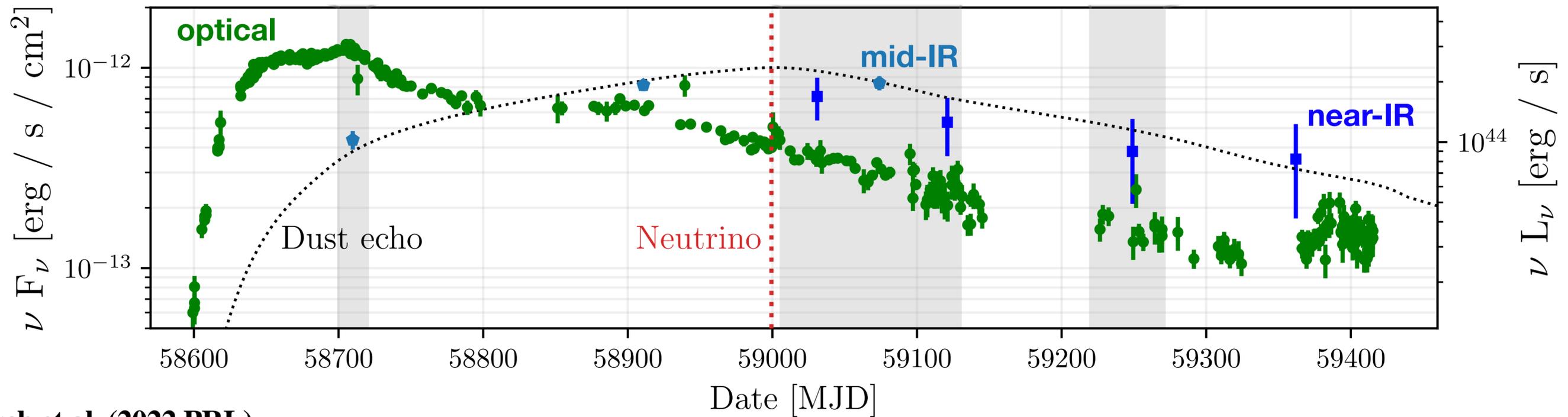
# AT2019fdr: another large dust echo



Reusch et al. (2022 PRL)

# AT2019fdr: another large dust echo

Origin of this optical flare unknown;  
let's label this as 'TDE?'

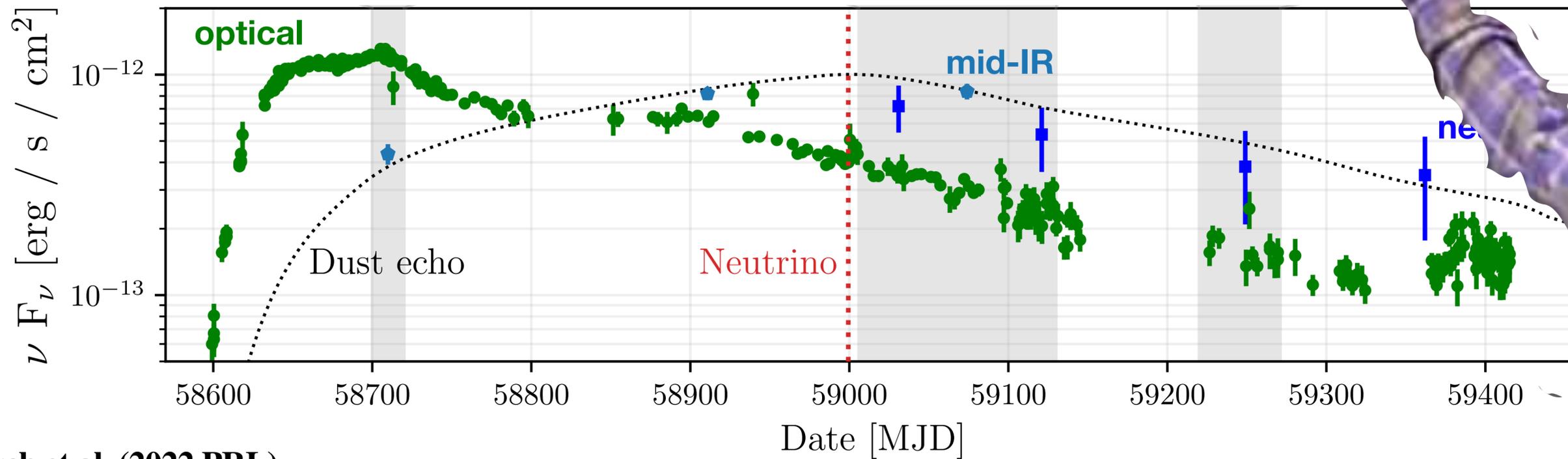


Reusch et al. (2022 PRL)

# AT2019fdr: another large dust echo

Origin of this optical flare unknown;  
let's label this as 'TDE?'

Totally Different Explanation

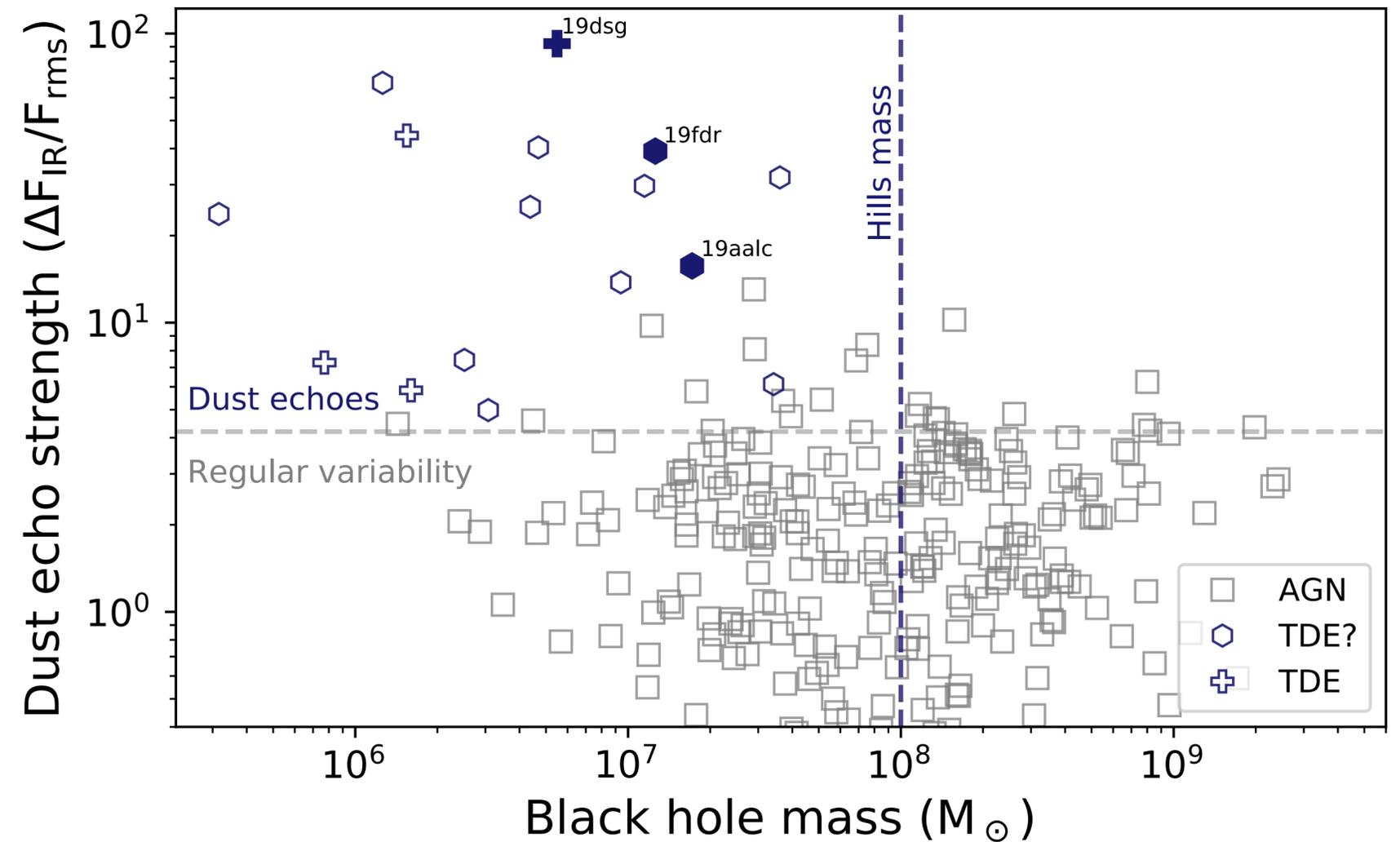


Reusch et al. (2022 PRL)

Sterl Phinney

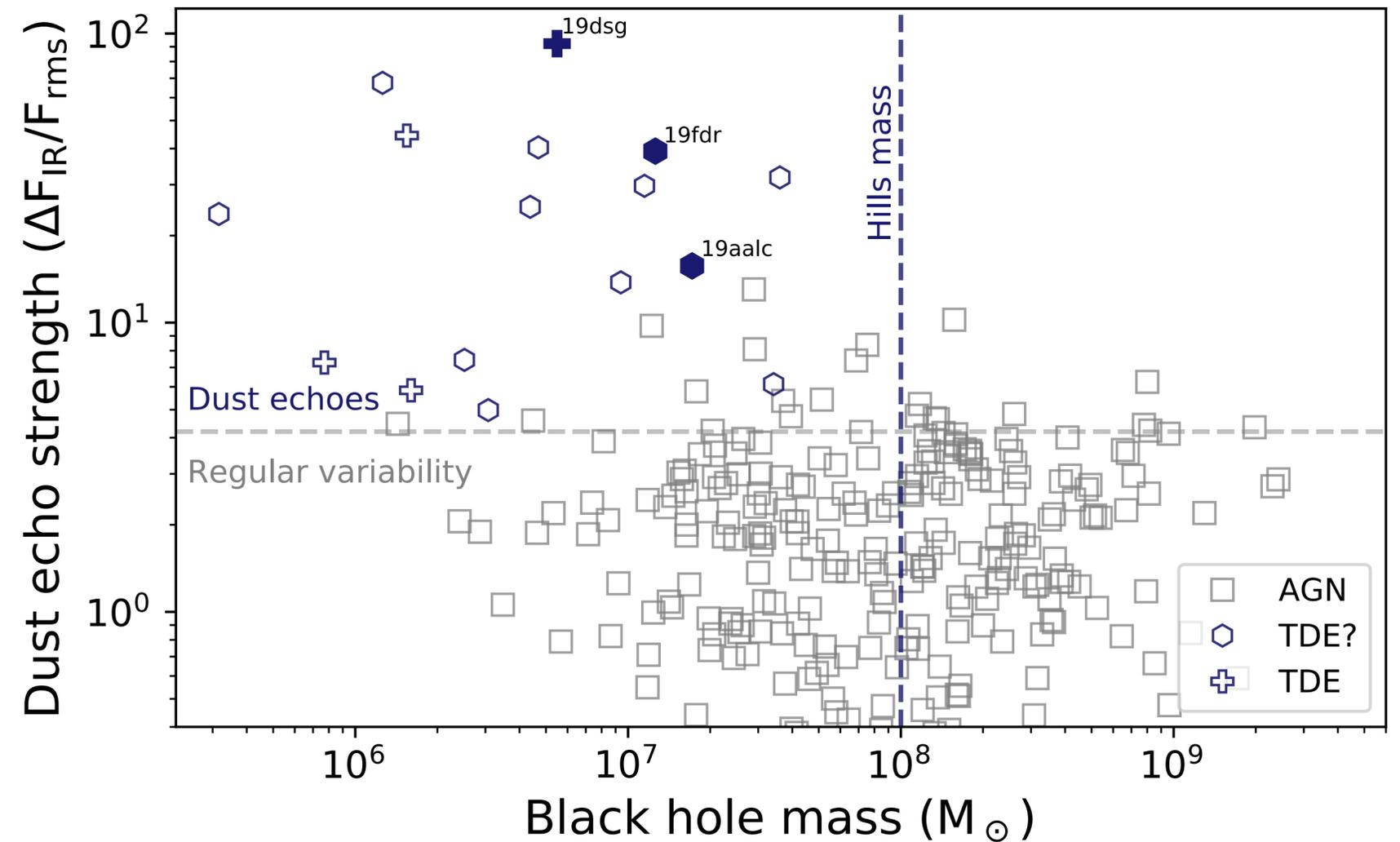
# Systematic search for dust echoes

- Select optical flares (ZTF)
- Measure mid-IR light curves (neoWISE)
- Select dust echoes candidates
- Results:



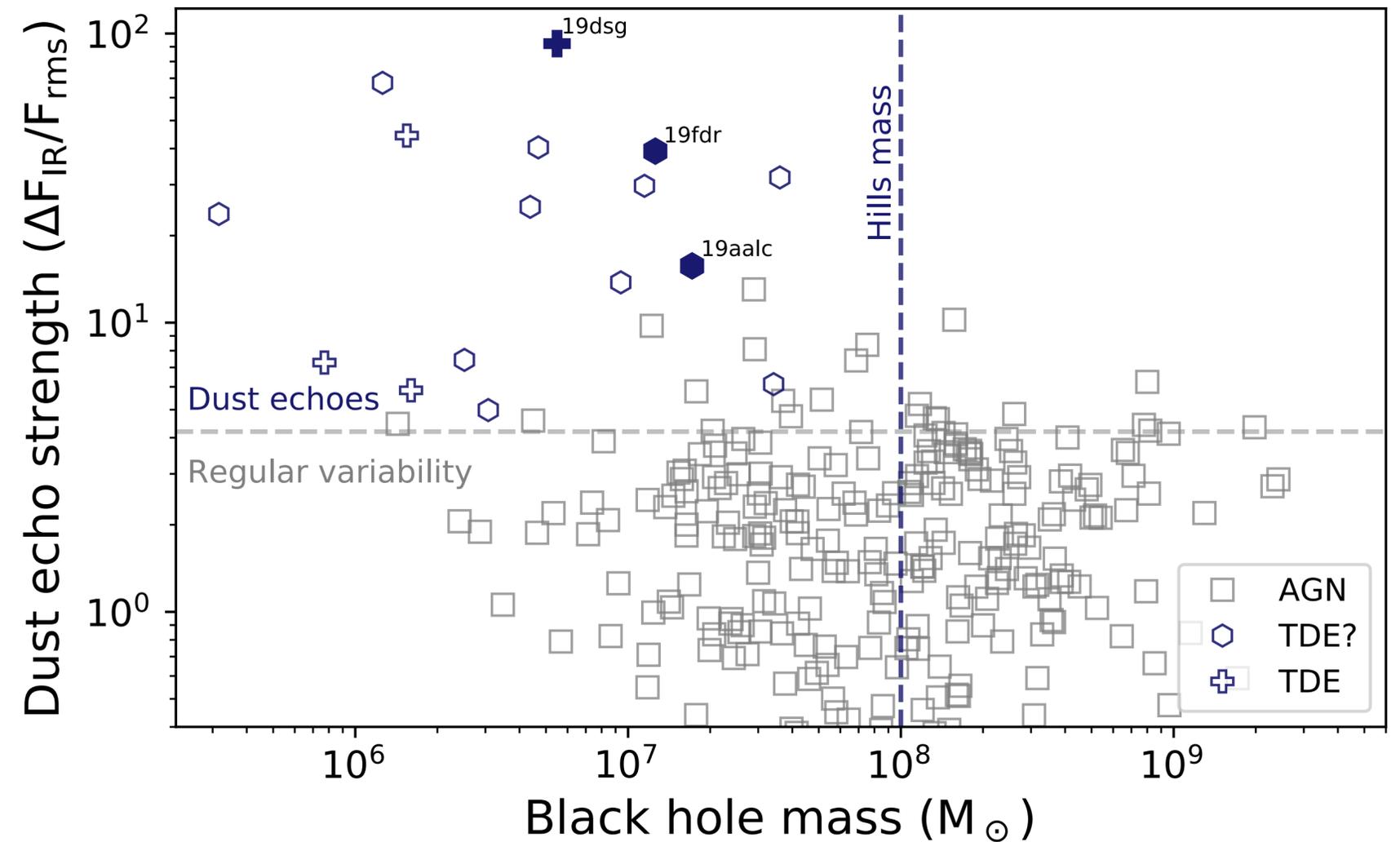
# Systematic search for dust echoes

- Select optical flares (ZTF)
- Measure mid-IR light curves (neoWISE)
- Select dust echoes candidates
- Results:
  - Unifies 'TDE' and 'TDE?'



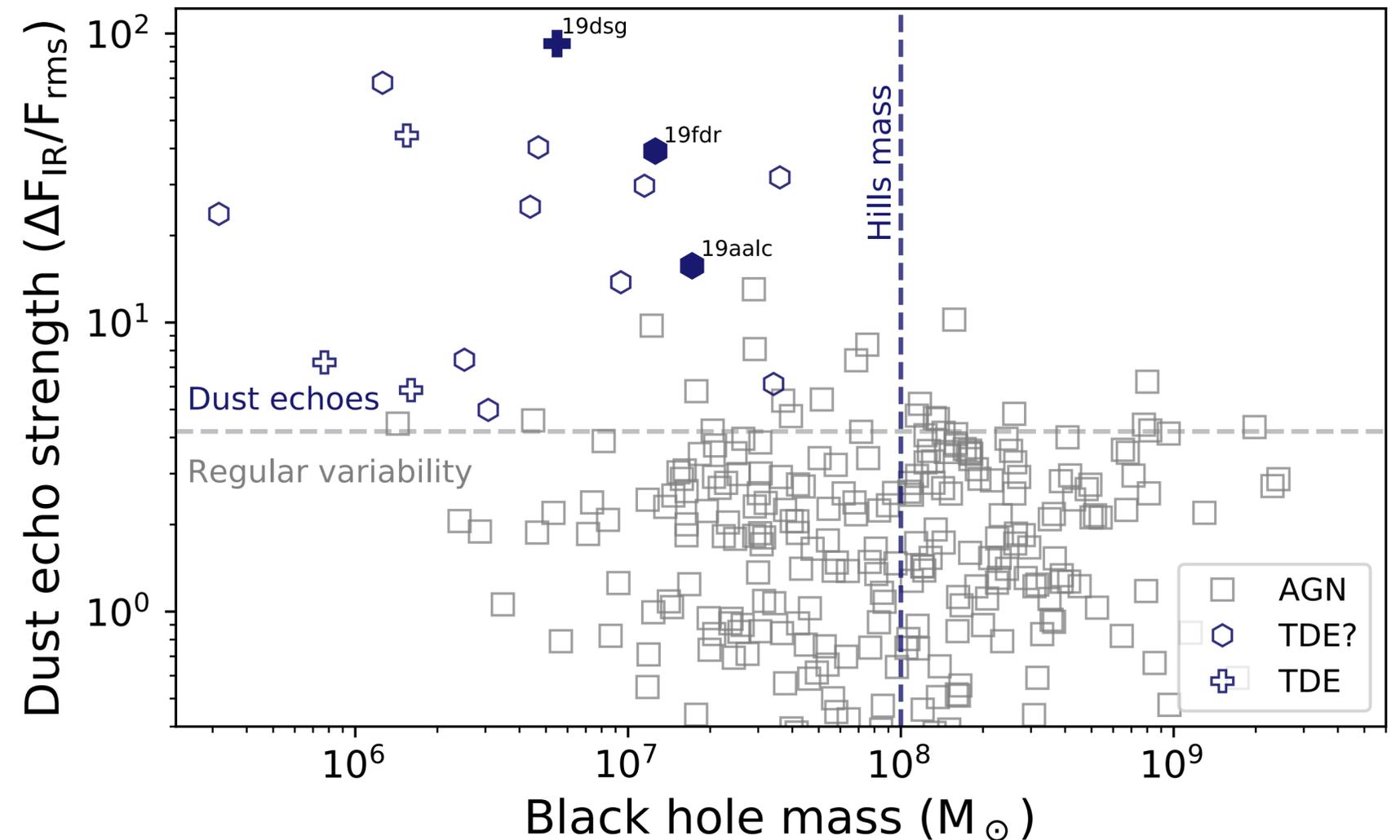
# Systematic search for dust echoes

- Select optical flares (ZTF)
- Measure mid-IR light curves (neoWISE)
- Select dust echoes candidates
- Results:
  - Unifies ‘TDE’ and ‘TDE?’
  - Large echoes exclusively from low-mass black holes



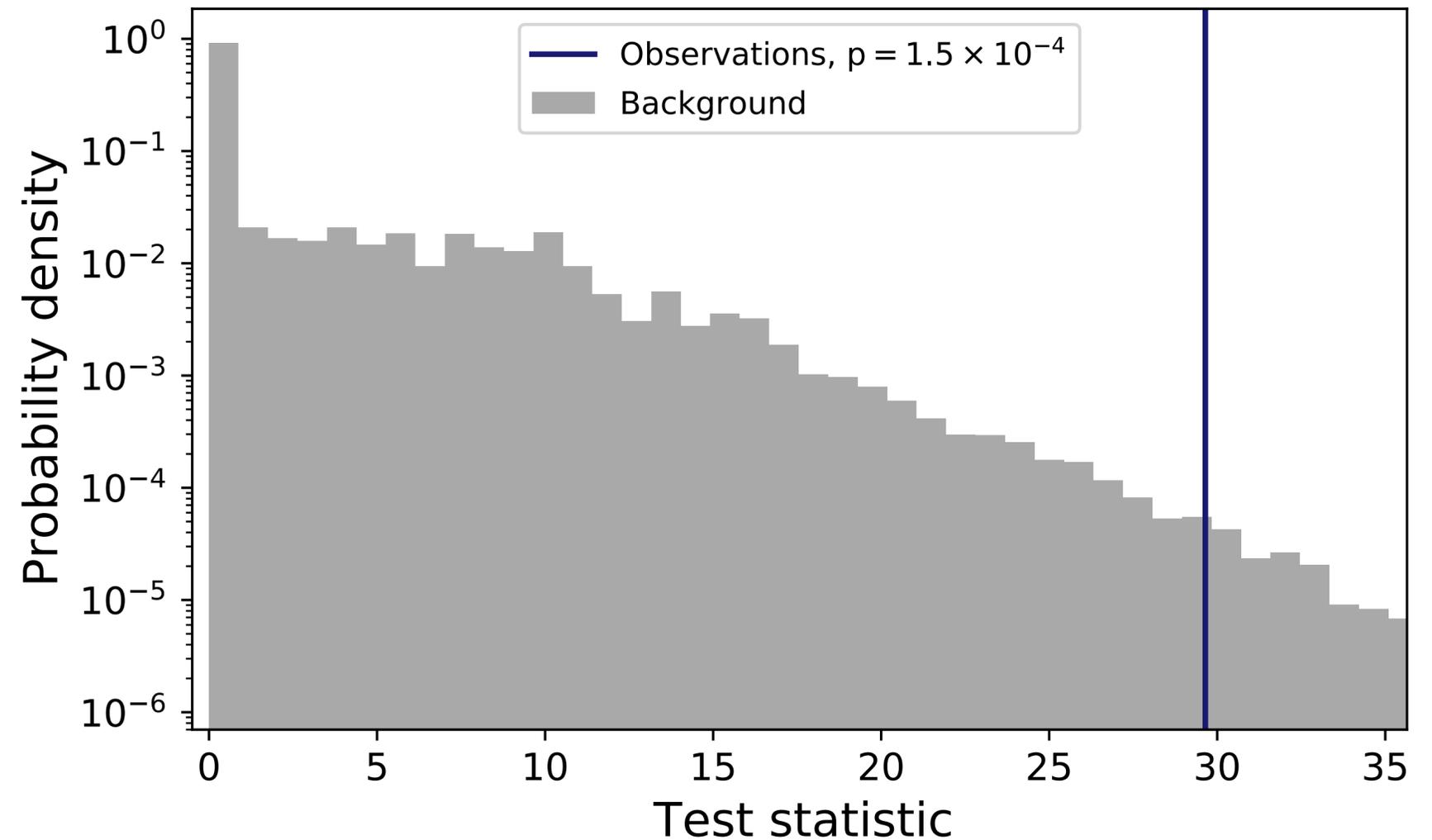
# Systematic search for dust echoes

- Select optical flares (ZTF)
- Measure mid-IR light curves (neoWISE)
- Select dust echoes candidates
- Results:
  - Unifies ‘TDE’ and ‘TDE?’
  - Large echoes exclusively from low-mass black holes
  - **Three** events coincident with IceCube alerts: two known, one new



# Likelihood analysis

- All public IceCube alerts
- Formulate test statistic
- Use only the IR properties of flare
- Scramble sources in the ZTF sky
- Obtain TS distribution for null hypothesis

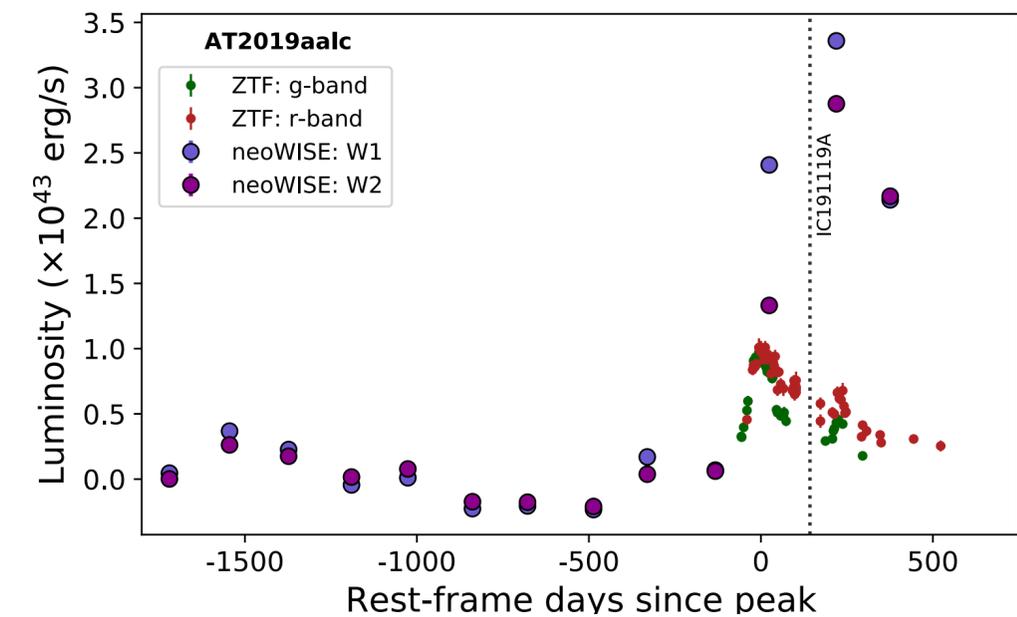
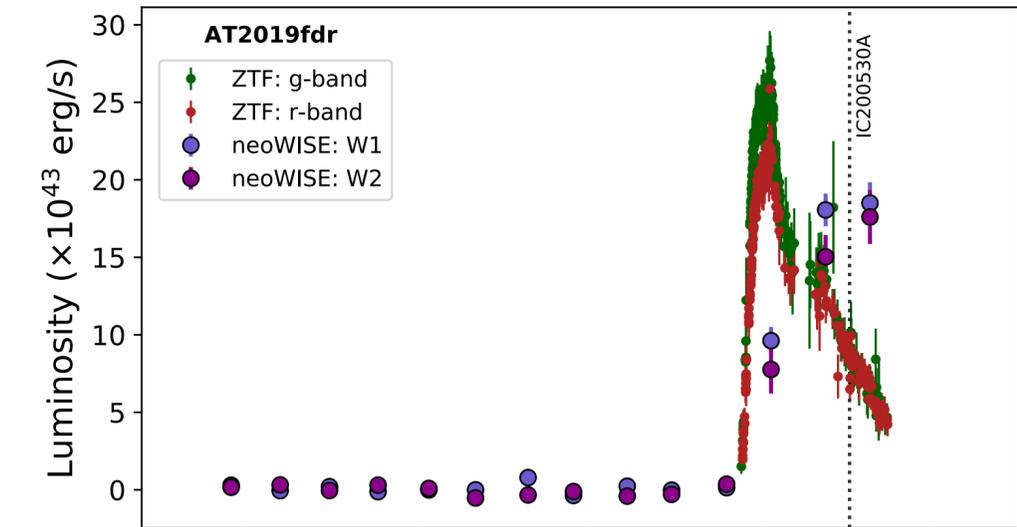
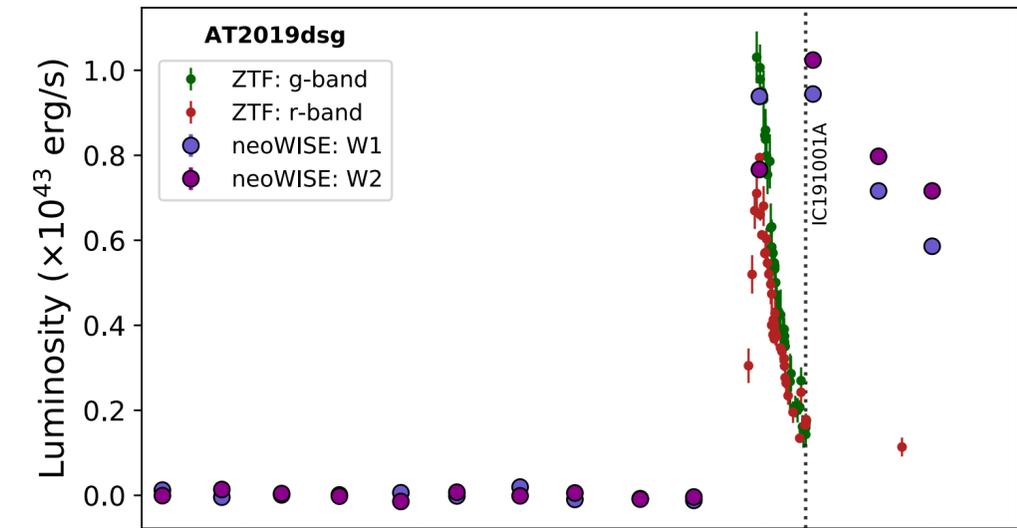


$$TS_i = 2 \log \left[ \left( \hat{S}/B \right)_{\text{IC}} \left( \hat{S}/B \right)_{\text{area}} \left( \hat{S}/B \right)_{\text{echo}} \left( \hat{S}/B \right)_{\text{flux}} \right]$$

van Velzen, Stein, et al.  
(arXiv:2111.09391)

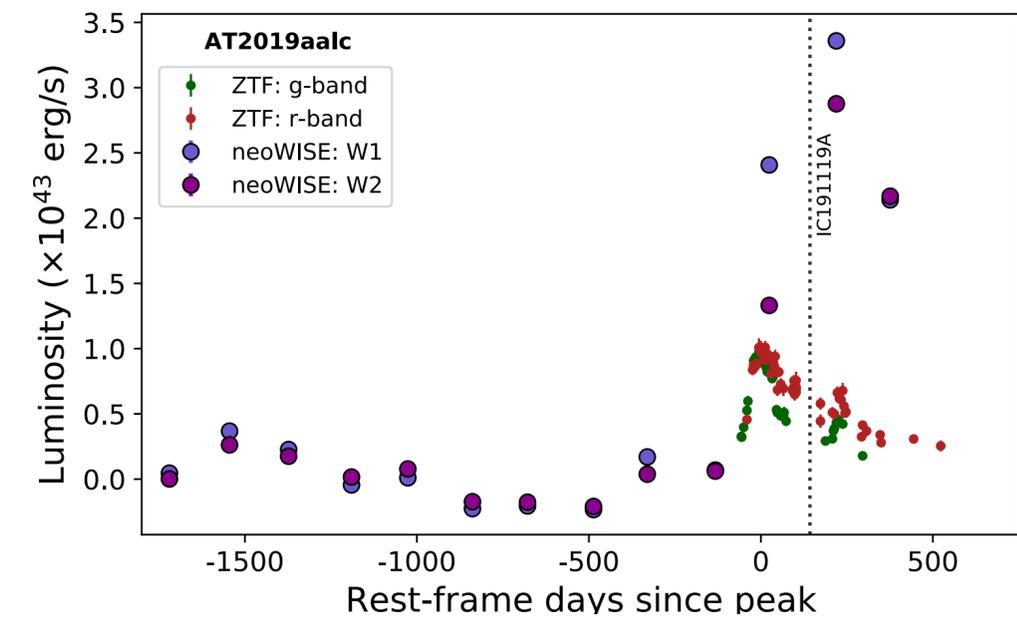
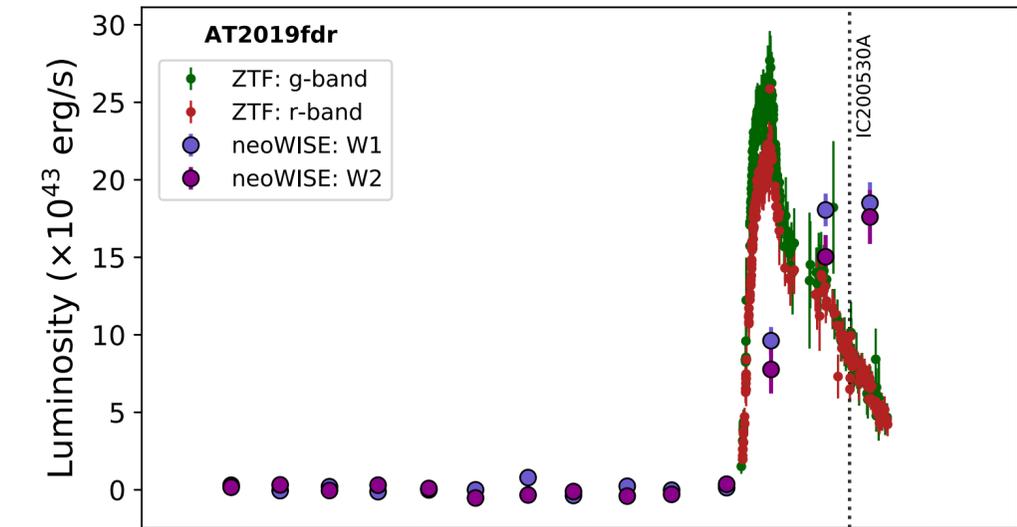
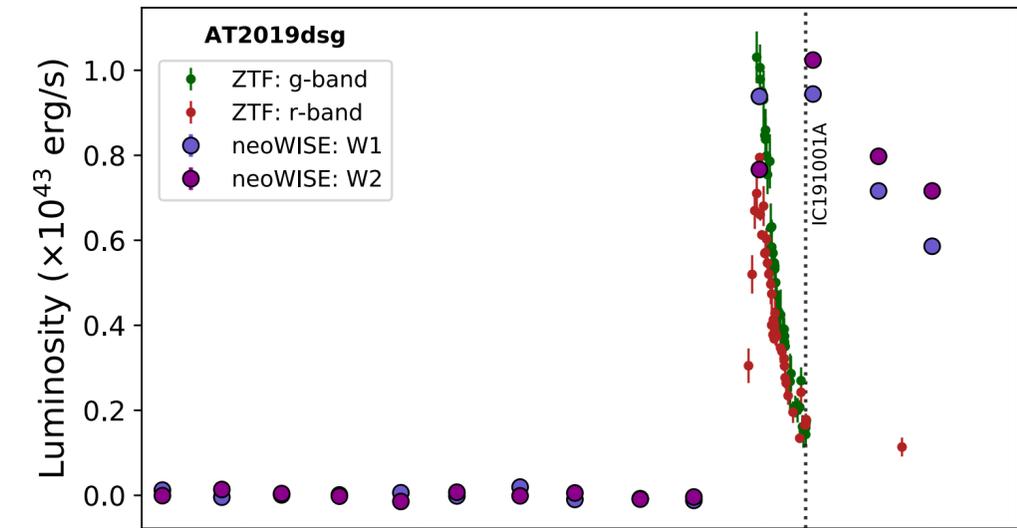
# Supporting evidence

- AT2019dsg: largest-amplitude dust echo
- AT2019aalc: highest IR flux



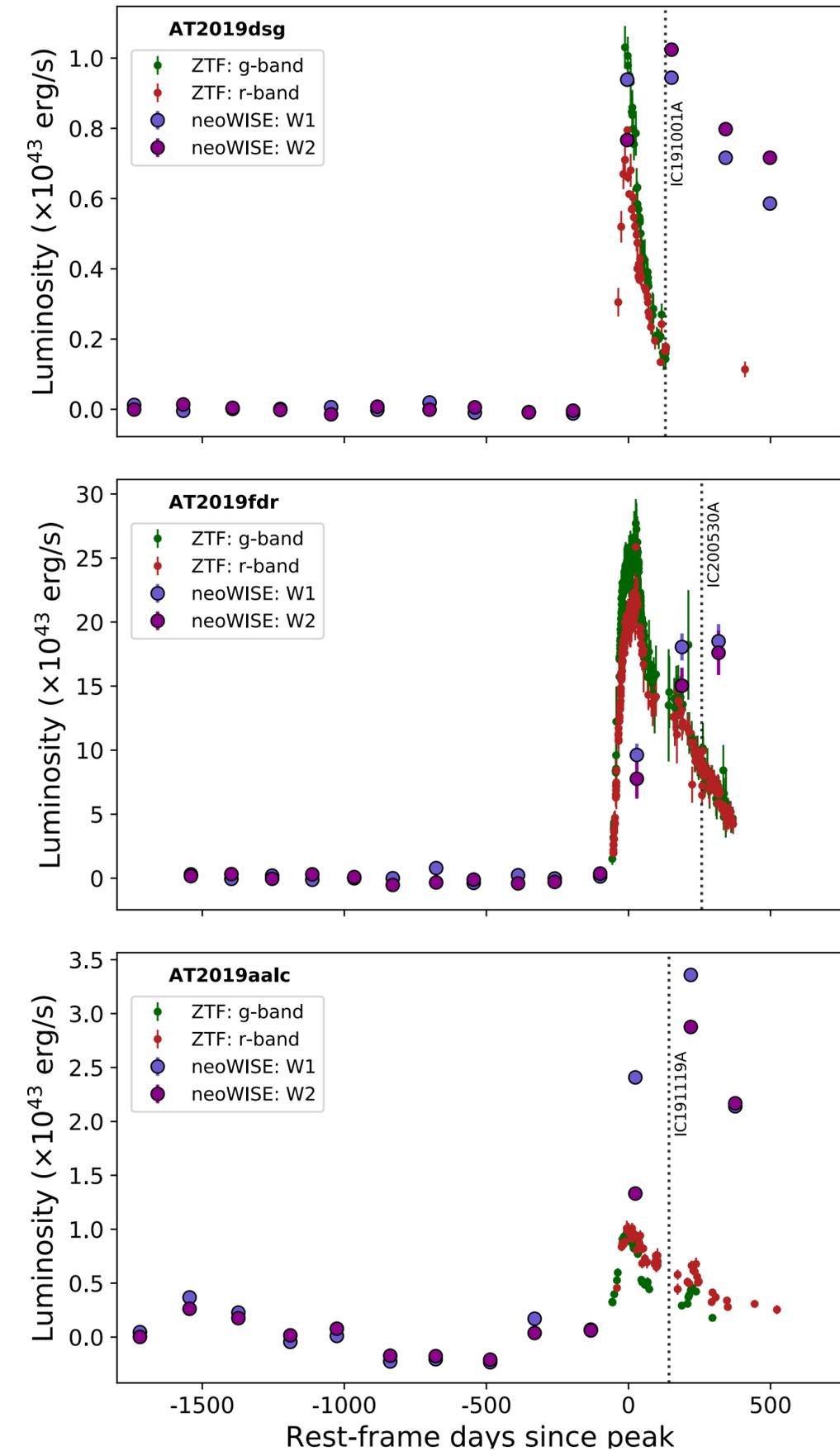
# Supporting evidence

- AT2019dsg: largest-amplitude dust echo
- AT2019aalc: highest IR flux



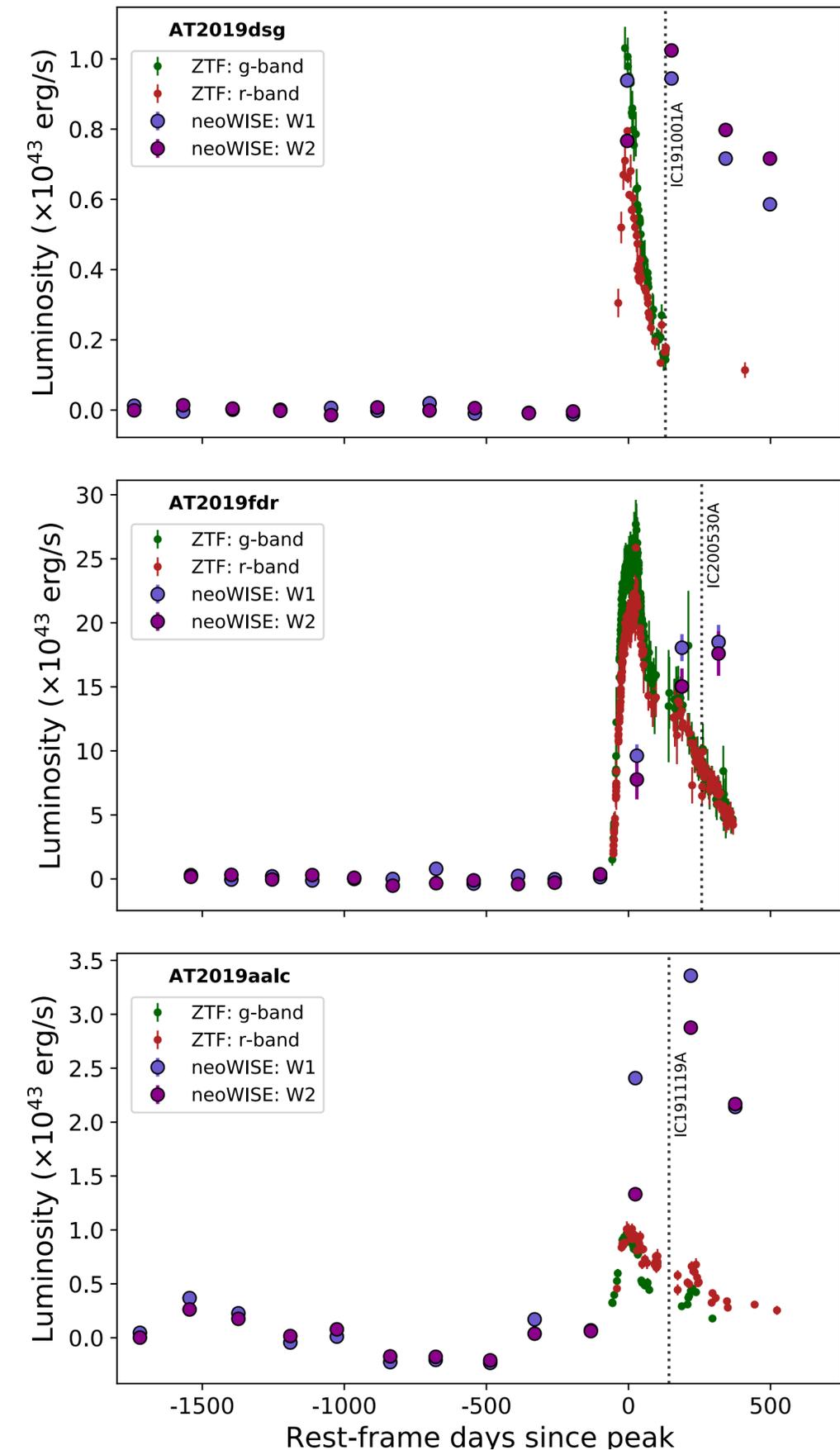
# Supporting evidence

- AT2019dsg: largest-amplitude dust echo
- AT2019aalc: highest IR flux
- **All three** neutrino associations:



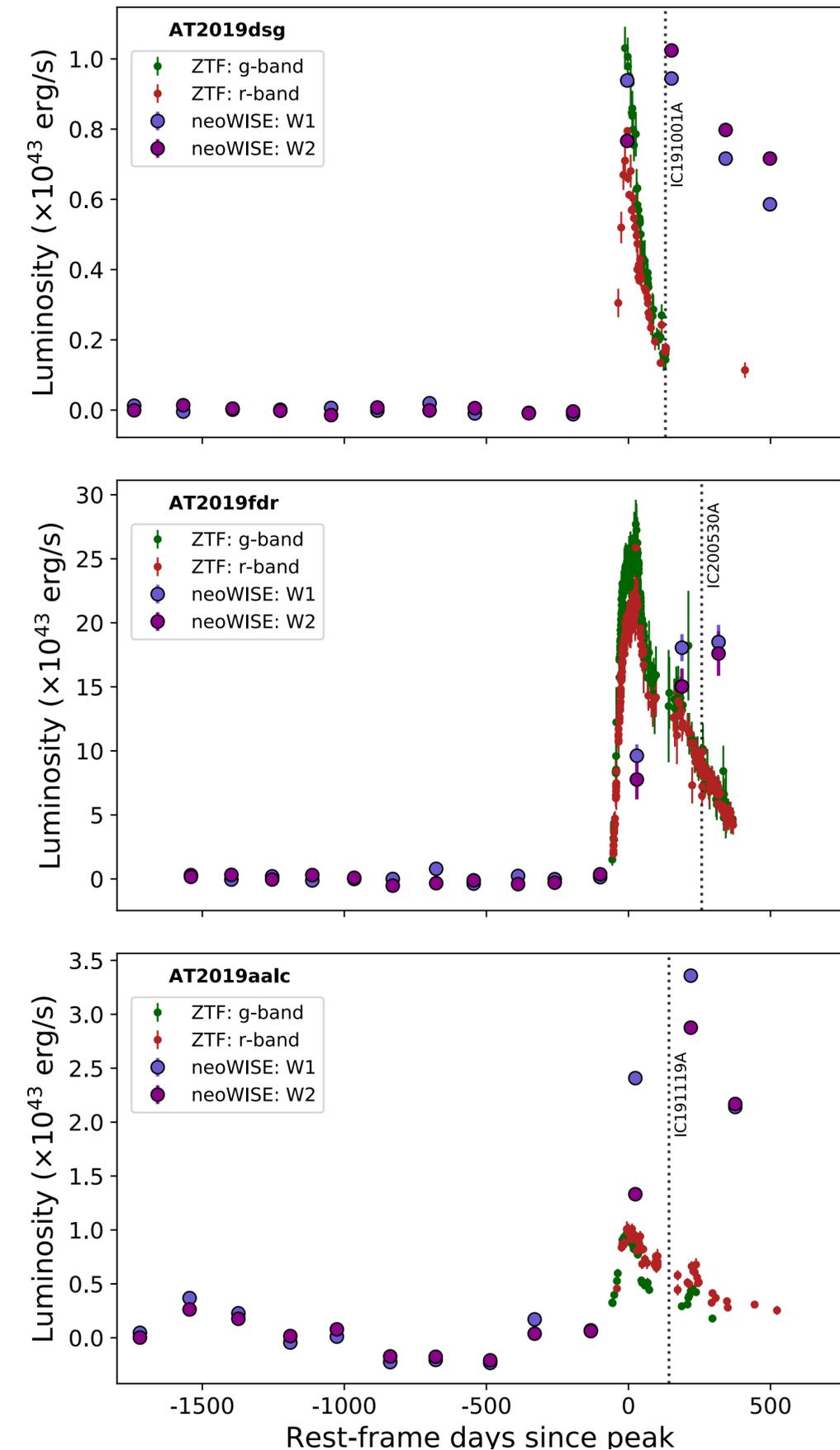
# Supporting evidence

- AT2019dsg: largest-amplitude dust echo
- AT2019aalc: highest IR flux
- **All three** neutrino associations:
  - Detected in the **radio** (uncommon for AGN)



# Supporting evidence

- AT2019dsg: largest-amplitude dust echo
- AT2019aalc: highest IR flux
- **All three** neutrino associations:
  - Detected in the **radio** (uncommon for AGN)
  - Detected in **X-ray**, with soft spectra (very uncommon for AGN)



# Explaining the cosmic neutrino flux

## Particle acceleration in a super-Eddington accretion disk

- Puzzling facts:
  - About 10% of HE neutrinos from TDE-like flares
  - Normal AGN outshine TDEs by 2 orders of magnitude
  - For common particle acceleration, AGN *should* dominate the neutrino sky

# Explaining the cosmic neutrino flux

## Particle acceleration in a super-Eddington accretion disk

- **Puzzling facts:**
  - About 10% of HE neutrinos from TDE-like flares
  - Normal AGN outshine TDEs by 2 orders of magnitude
  - For common particle acceleration, AGN *should* dominate the neutrino sky
- **Solution:**
  - Super-Eddington accretion: common for TDEs, uncommon for AGN

# Explaining the cosmic neutrino flux

## Particle acceleration in a super-Eddington accretion disk

- **Puzzling facts:**
  - About 10% of HE neutrinos from TDE-like flares
  - Normal AGN outshine TDEs by 2 orders of magnitude
  - For common particle acceleration, AGN *should* dominate the neutrino sky
- **Solution:**
  - Super-Eddington accretion: common for TDEs, uncommon for AGN
- **Supporting evidence:**
  - NGC 1068 (IceCube hotspot) is the nearest super-Eddington AGN (!)

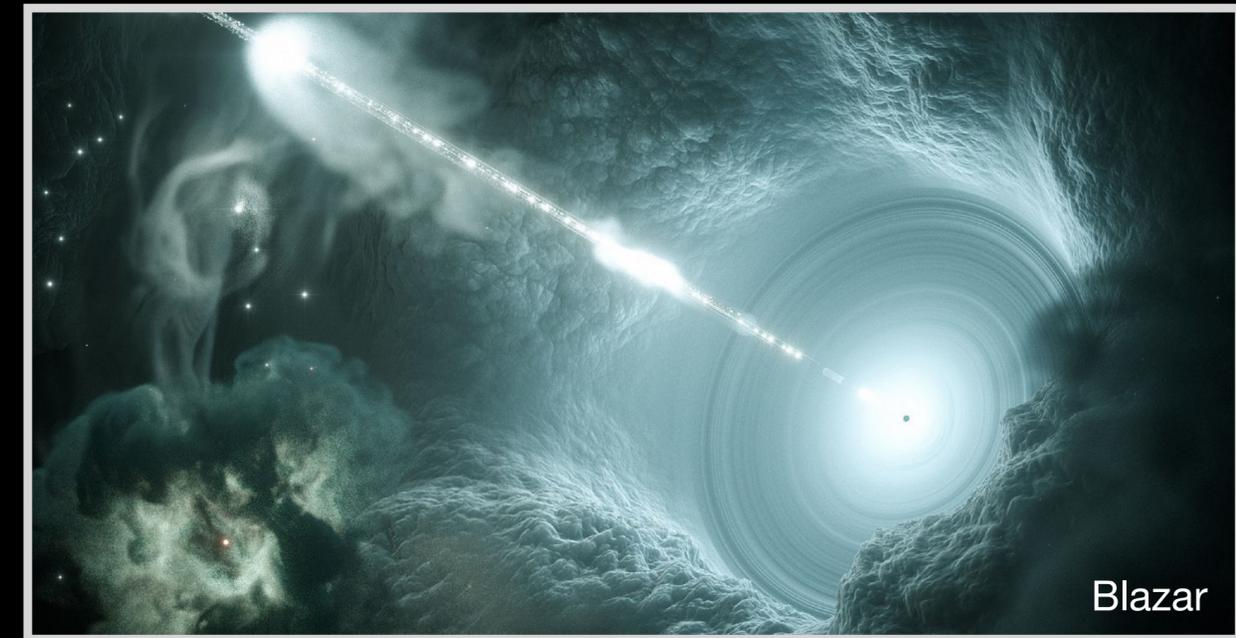
# Summary

Image: Palomar Observatory

- Systematic analysis of dust echoes from black holes
- Three events found in coincidence with IceCube alerts
- $p = 1.5 \times 10^{-4}$  ( $3.6 \sigma$ ), based only on IR properties

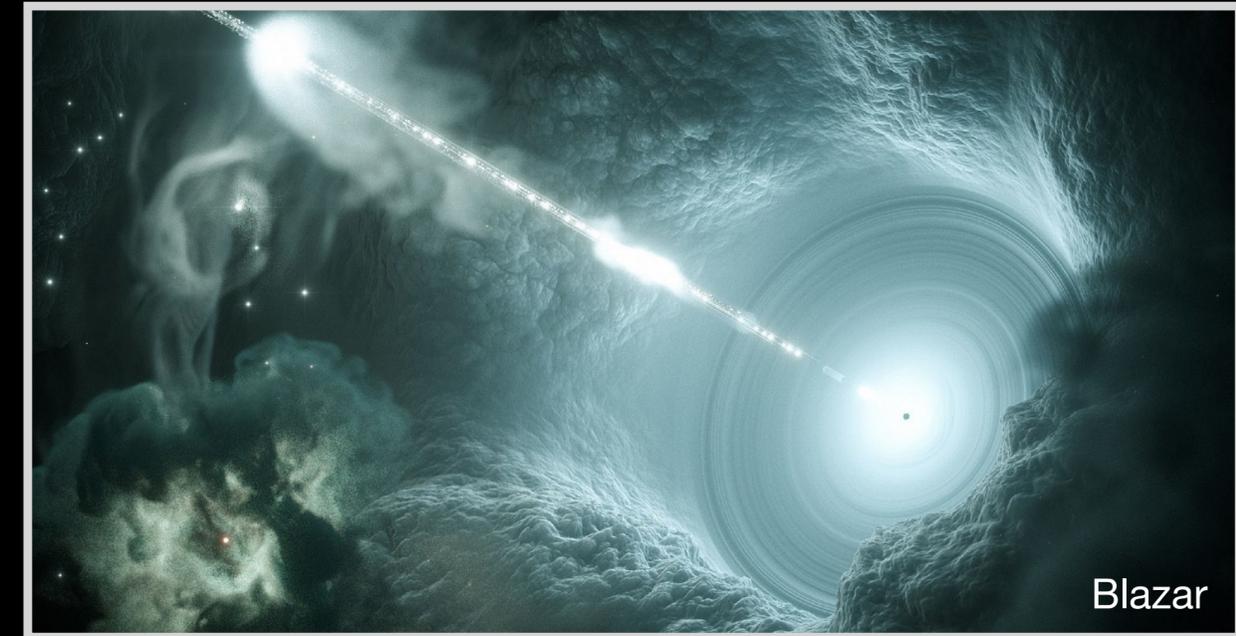
# Conclusions

- Tidal disruption events: second possible source for cosmic neutrinos



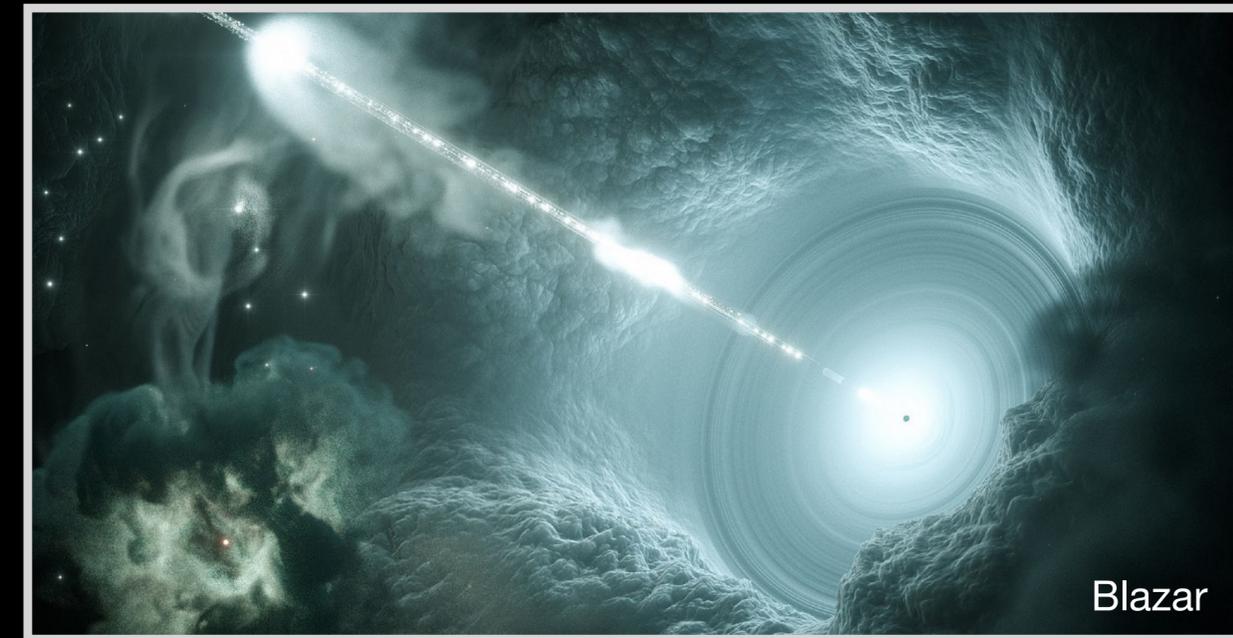
# Conclusions

- Tidal disruption events: second possible source for cosmic neutrinos
- Neutrino detection implies protons accelerated to at least  $\sim 1$  PeV

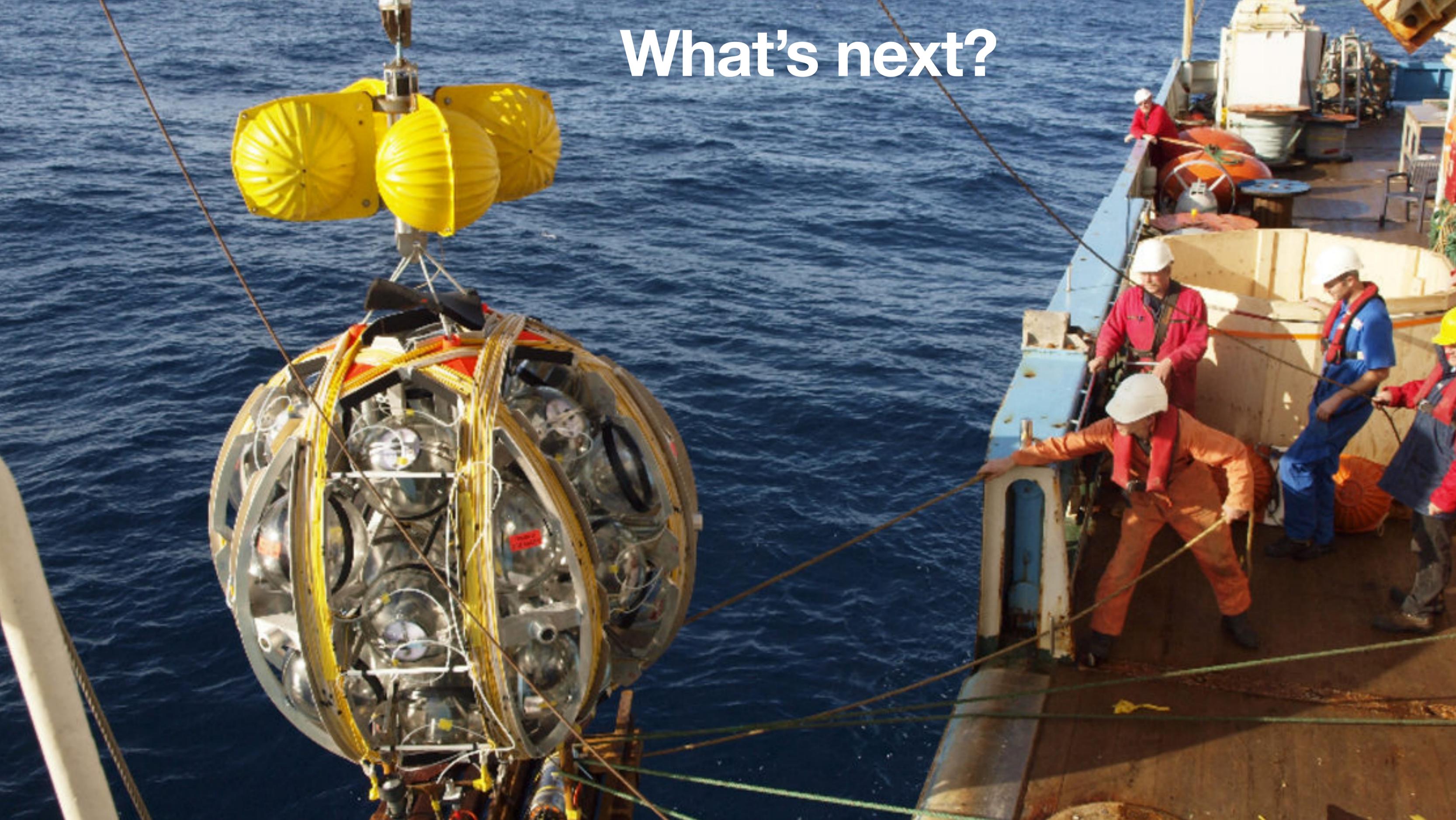


# Conclusions

- Tidal disruption events: second possible source for cosmic neutrinos
- Neutrino detection implies protons accelerated to at least  $\sim 1$  PeV
- Acceleration inside UV photosphere:
  - High photon density yields PeV scale neutrino production (via Delta-resonance)
  - No gamma-rays
  - These are not UHECR sources



What's next?



# When will we solve this?

- More TDEs and AGN flares from ZTF
- More radio follow-up with VLA Large program (300 hours)
- IR observations of TDE dust echoes (JWST)
- Preparation for **Rubin Observatory**:
  - 100-1000 TDEs per year!
- KM3NET + Rubin will powerful MM combination in the Southern sky



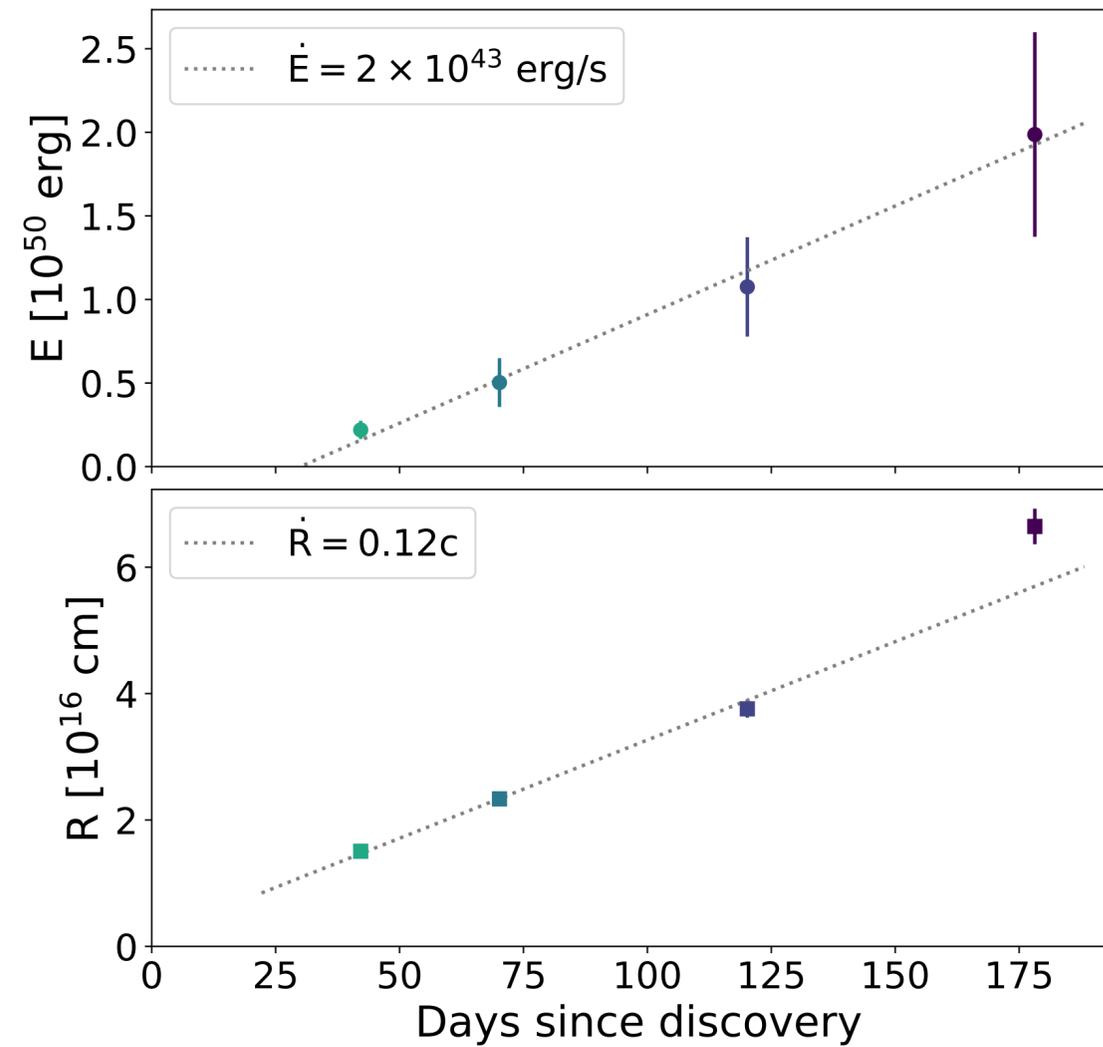
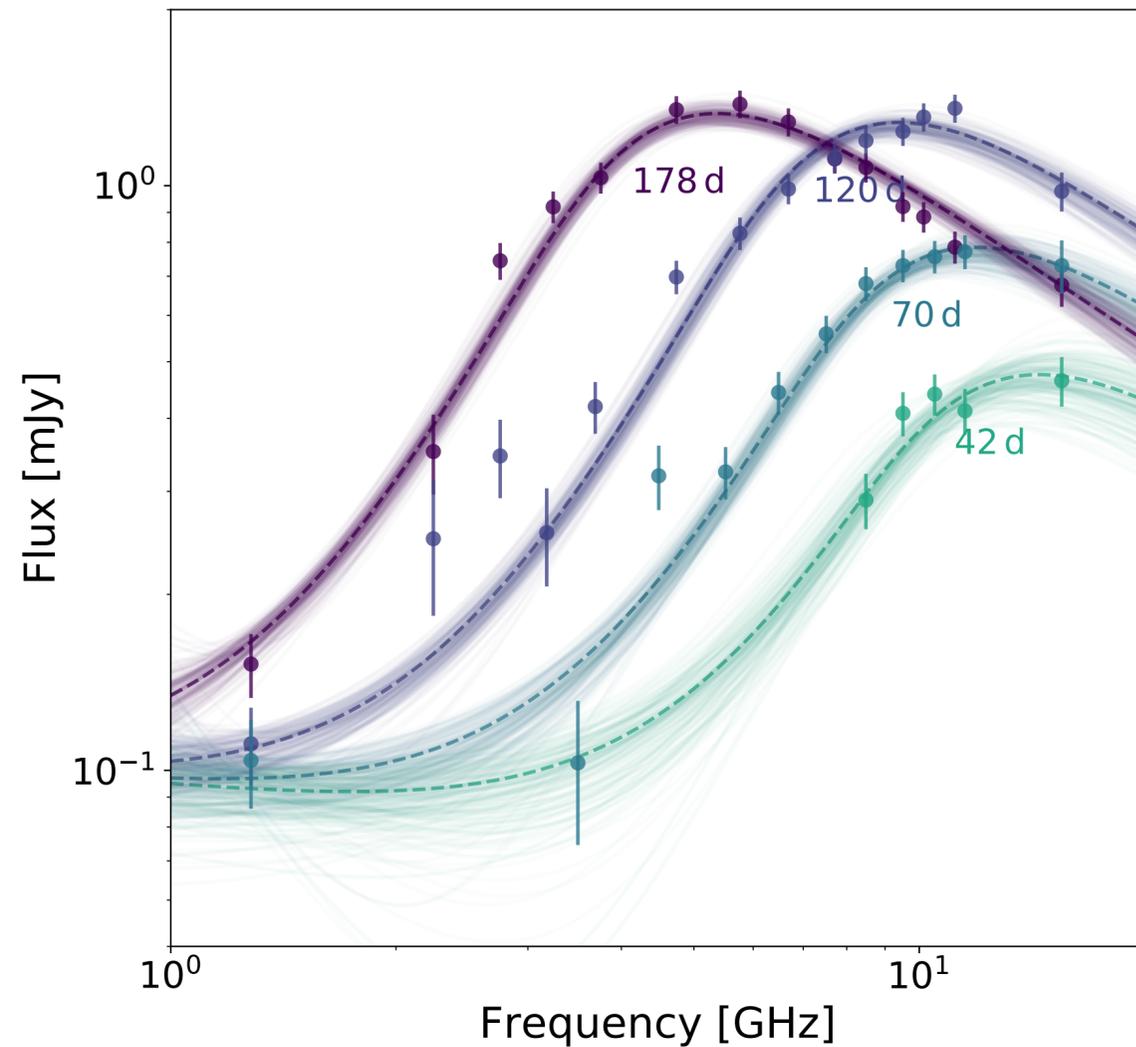
Thanks!



Vera Rubin Observatory

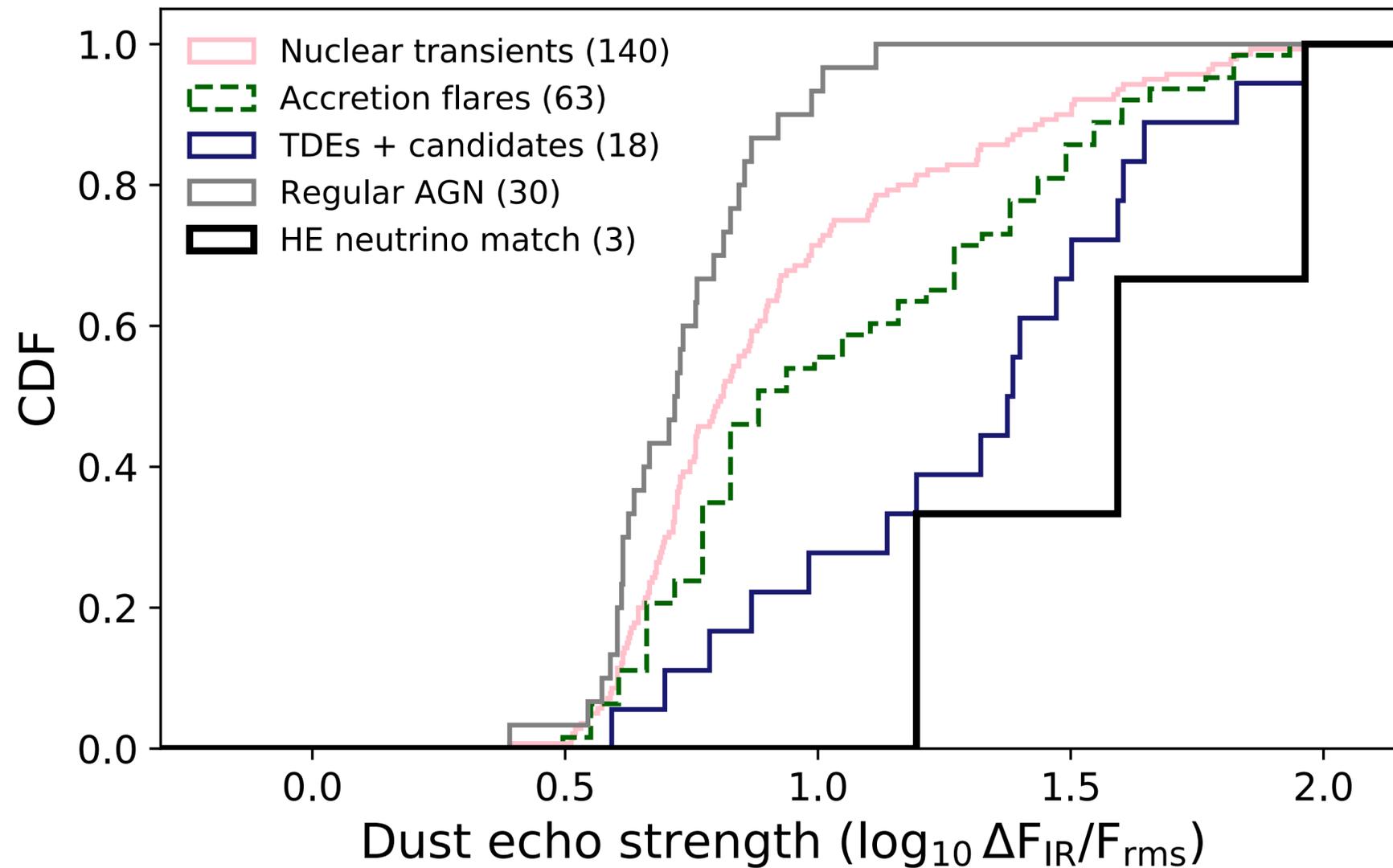
# Radio monitoring with the VLA

## Constant energy injection by central engine



# CDFs of echo strength

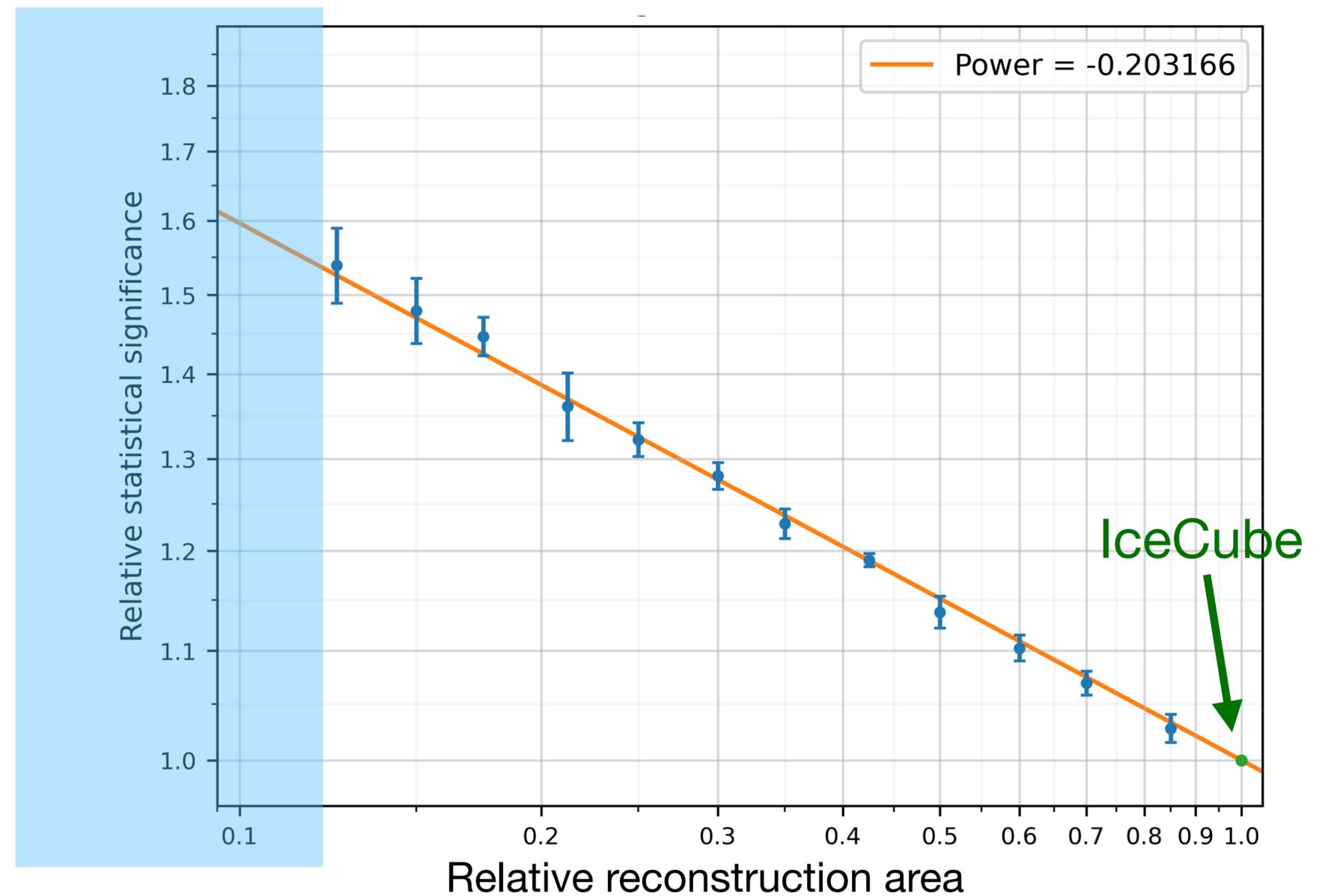
**AD test:  $p=0.007$**  (significance based only on IR observations, not areal density)



# Angular resolution greatly helps MM analysis

KM3NET

Thomas Boxman MSc thesis (2022)

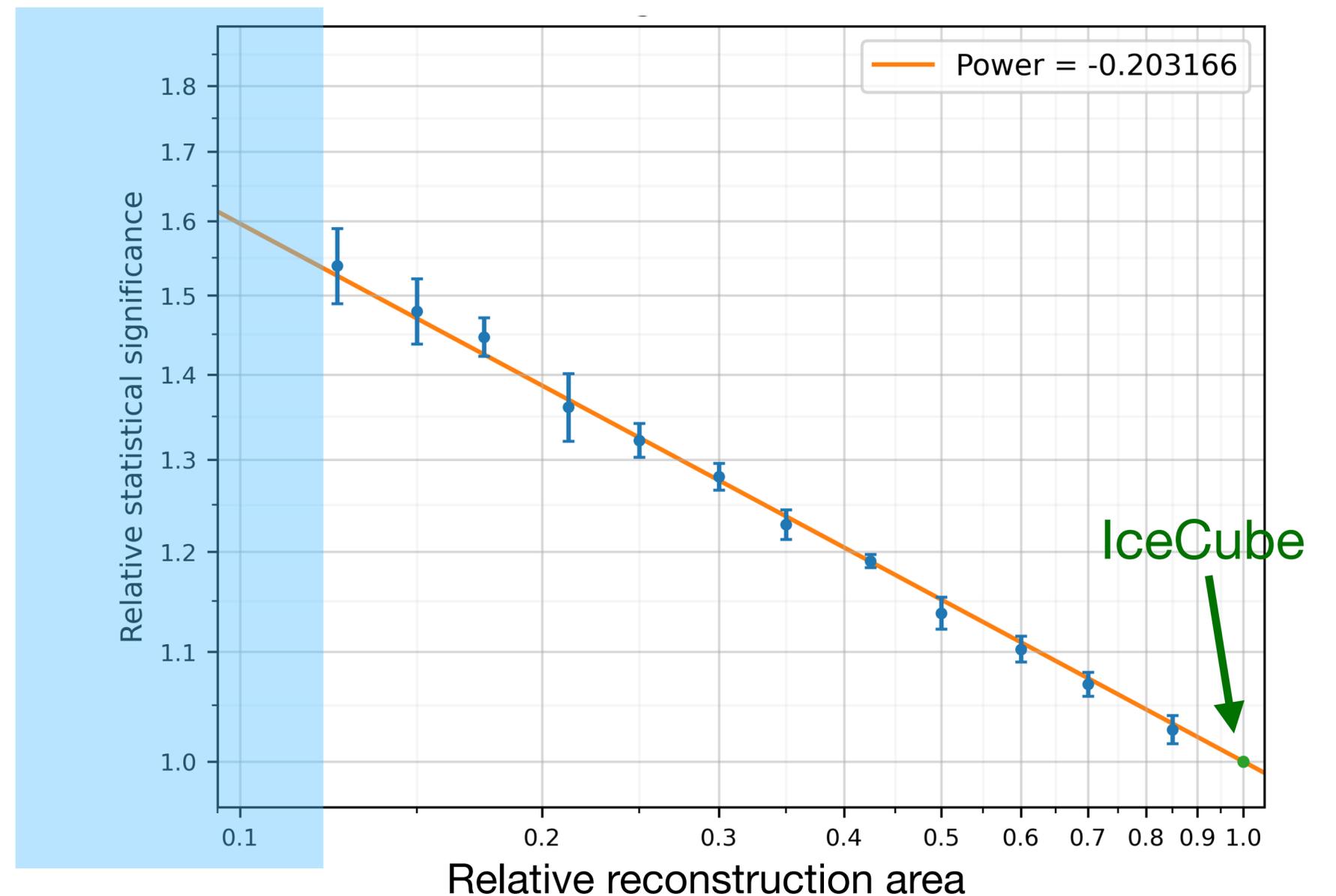


# Angular resolution greatly helps MM analysis

KM3NET

Thomas Boxman MSc thesis (2022)

- Simulated MM search with 100 targets

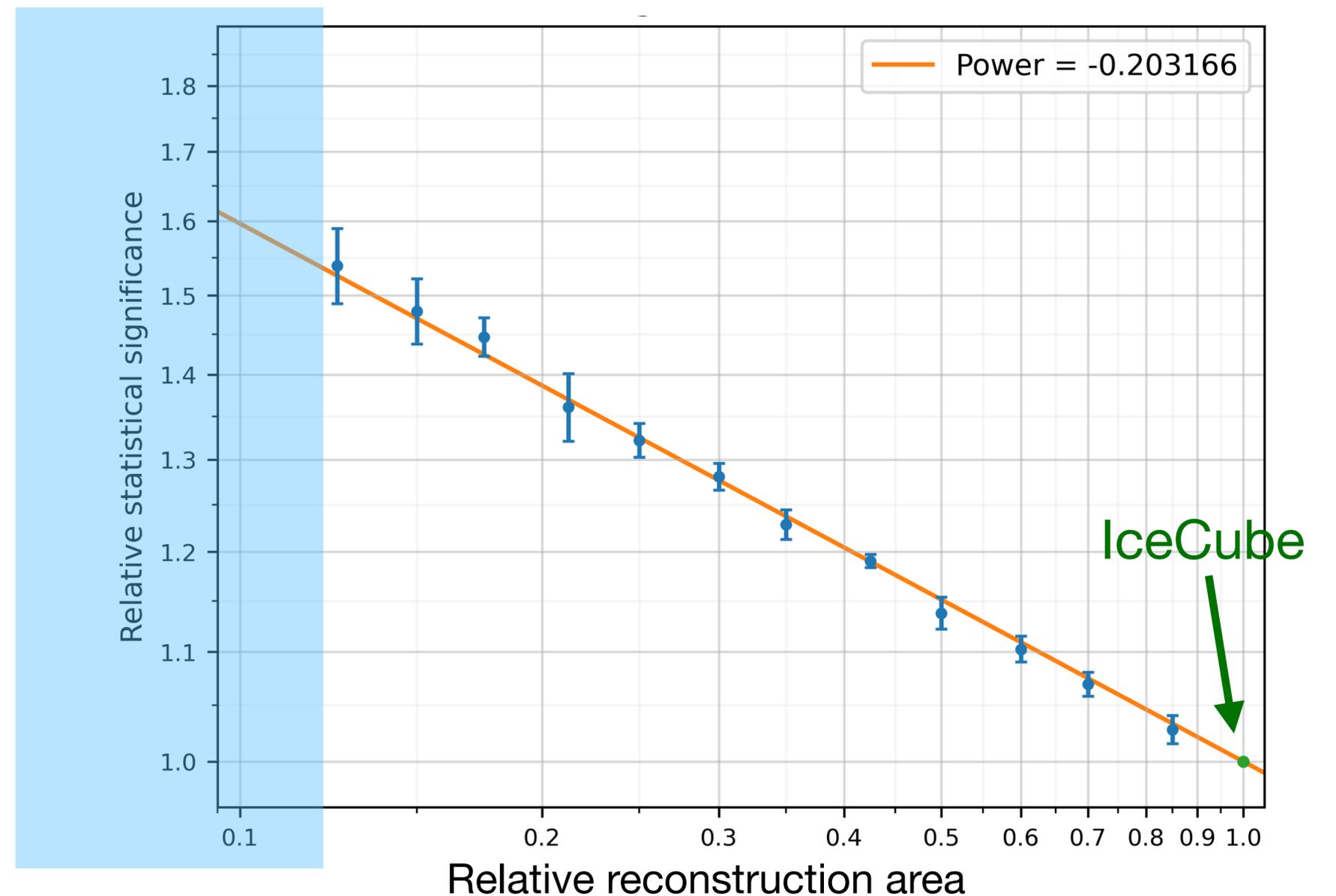


# Angular resolution greatly helps MM analysis

- Simulated MM search with 100 targets
- KM3NET versus IC:

KM3NET

Thomas Boxman MSc thesis (2022)

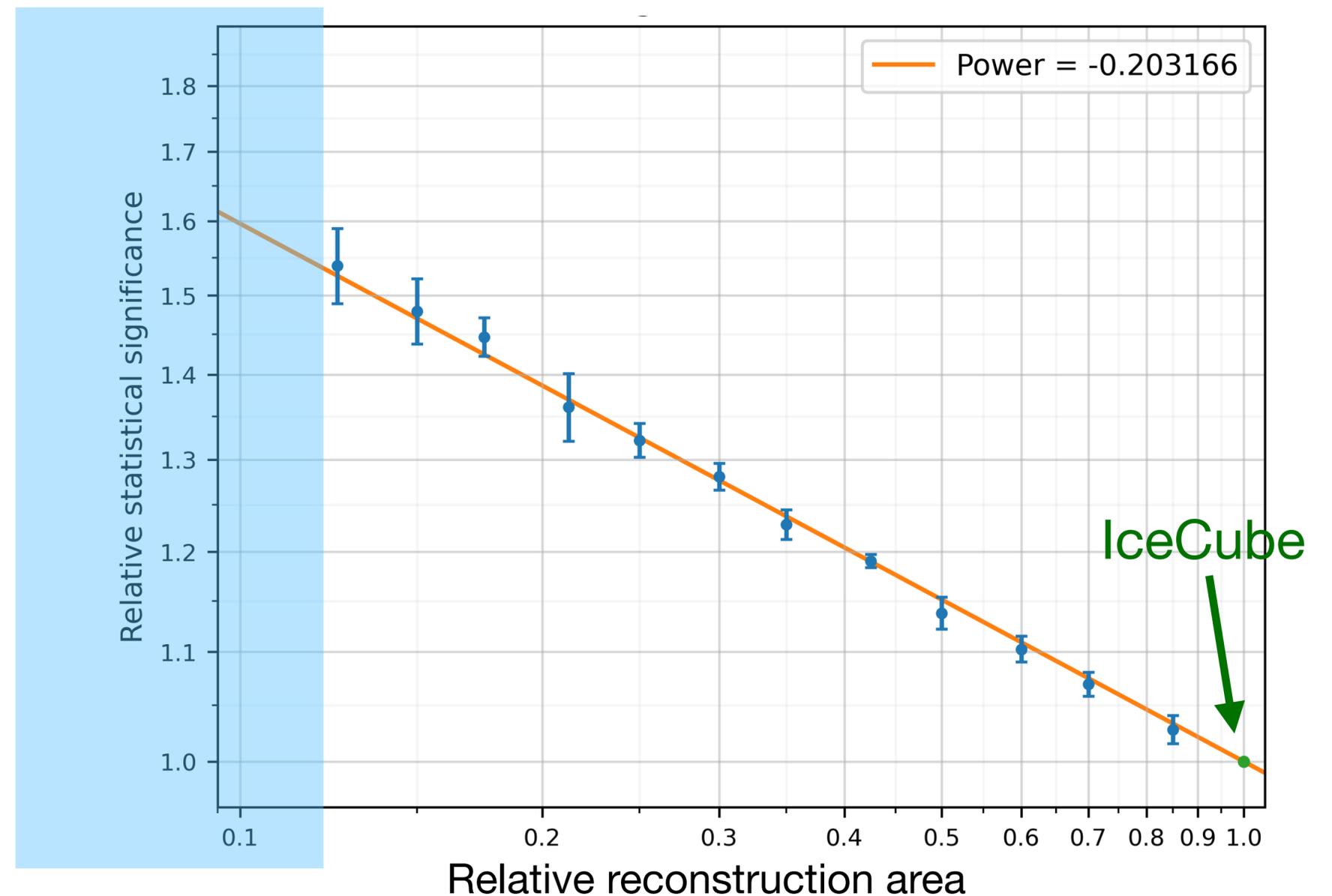


# Angular resolution greatly helps MM analysis

- Simulated MM search with 100 targets
- KM3NET versus IC:
  - Factor 5 better resolution

KM3NET

Thomas Boxman MSc thesis (2022)

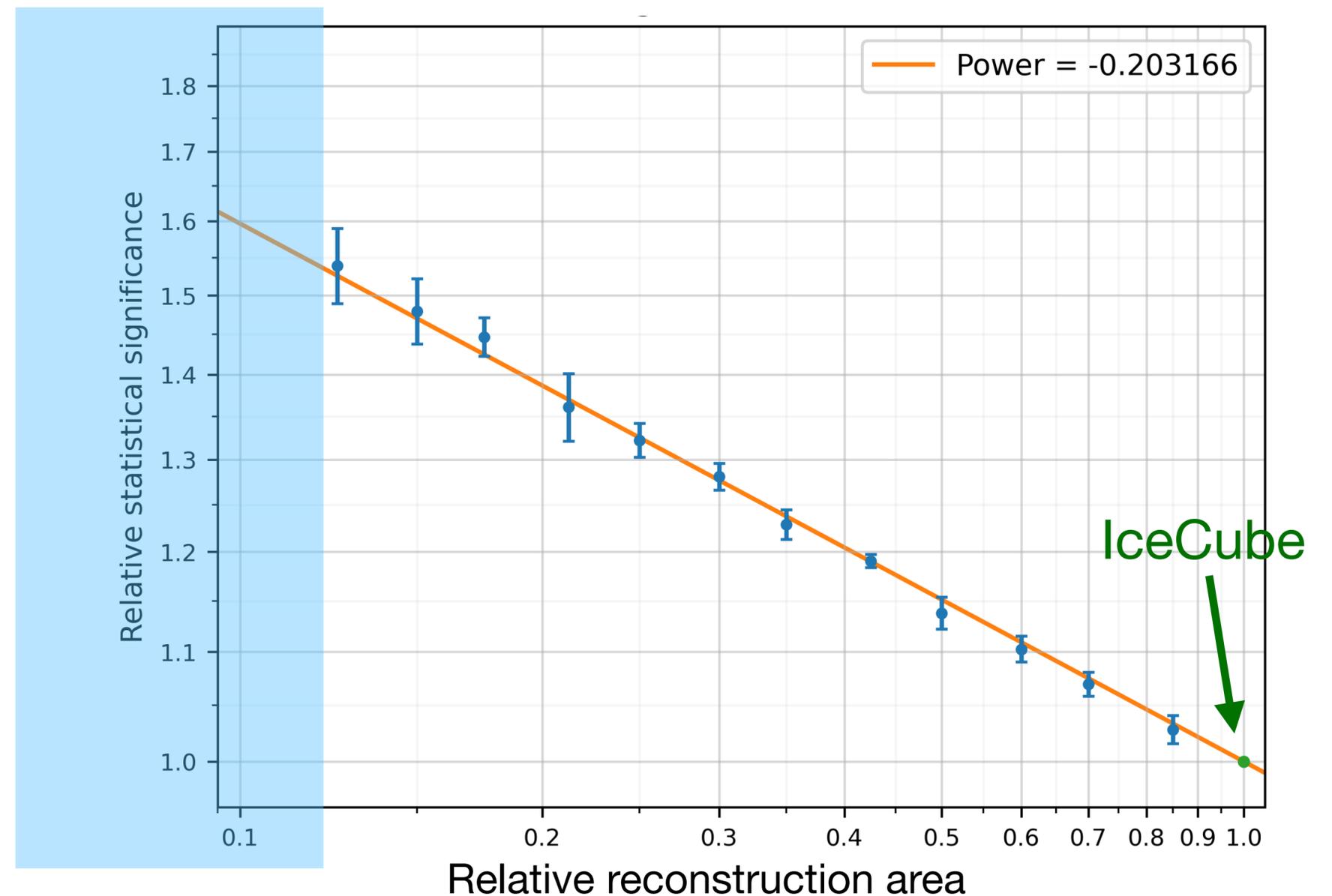


# Angular resolution greatly helps MM analysis

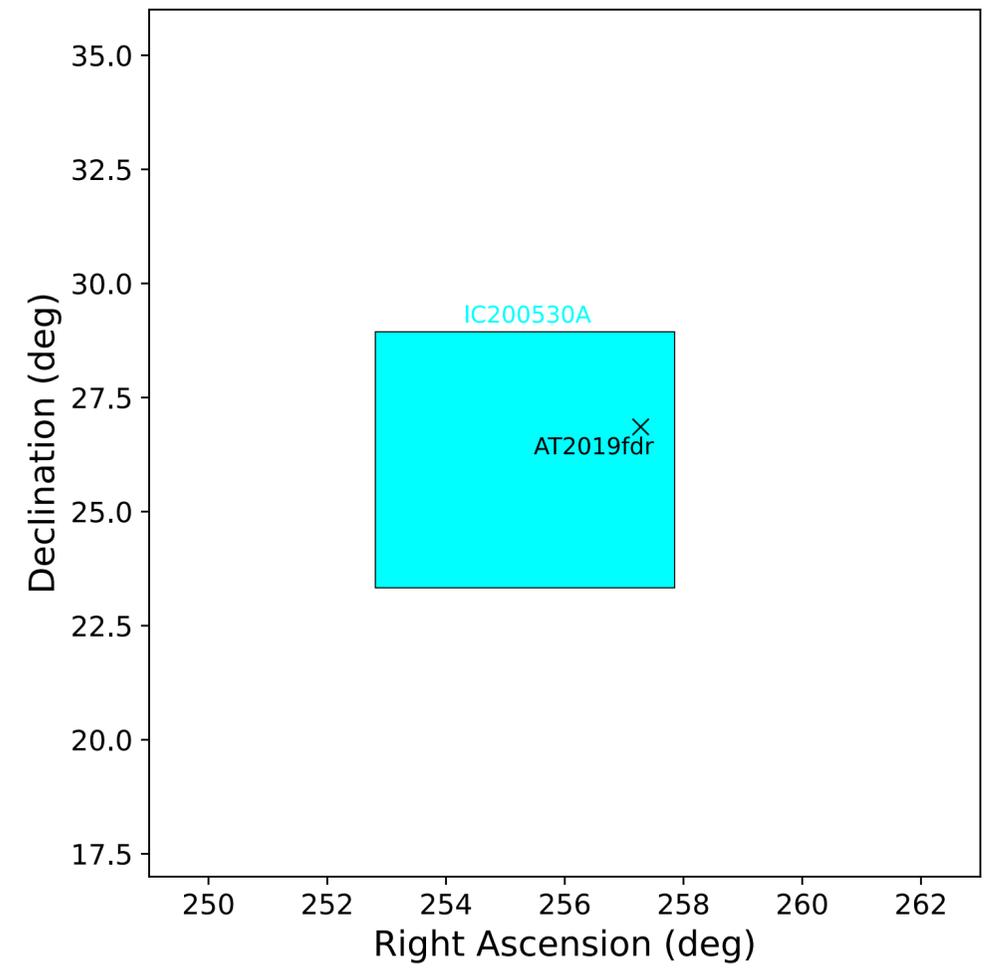
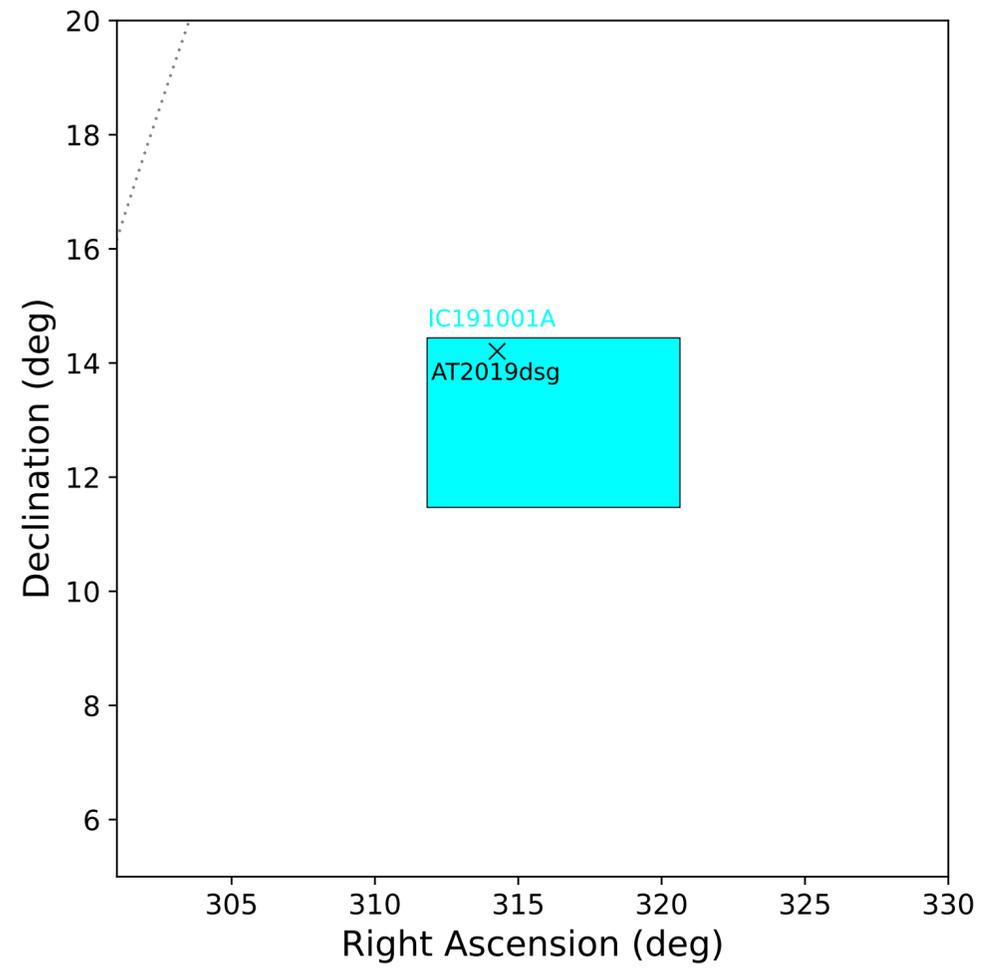
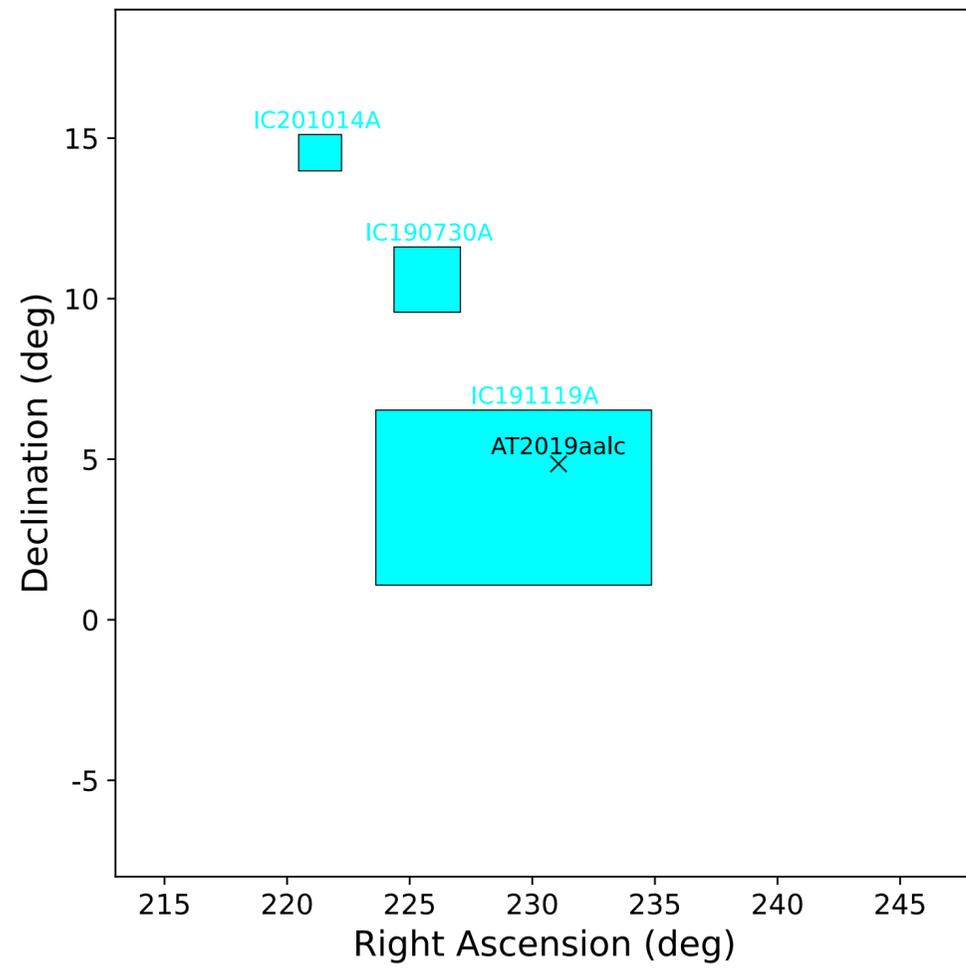
- Simulated MM search with 100 targets
- KM3NET versus IC:
  - Factor 5 better resolution
  - Factor 2 higher significance (in  $\sigma$ )

KM3NET

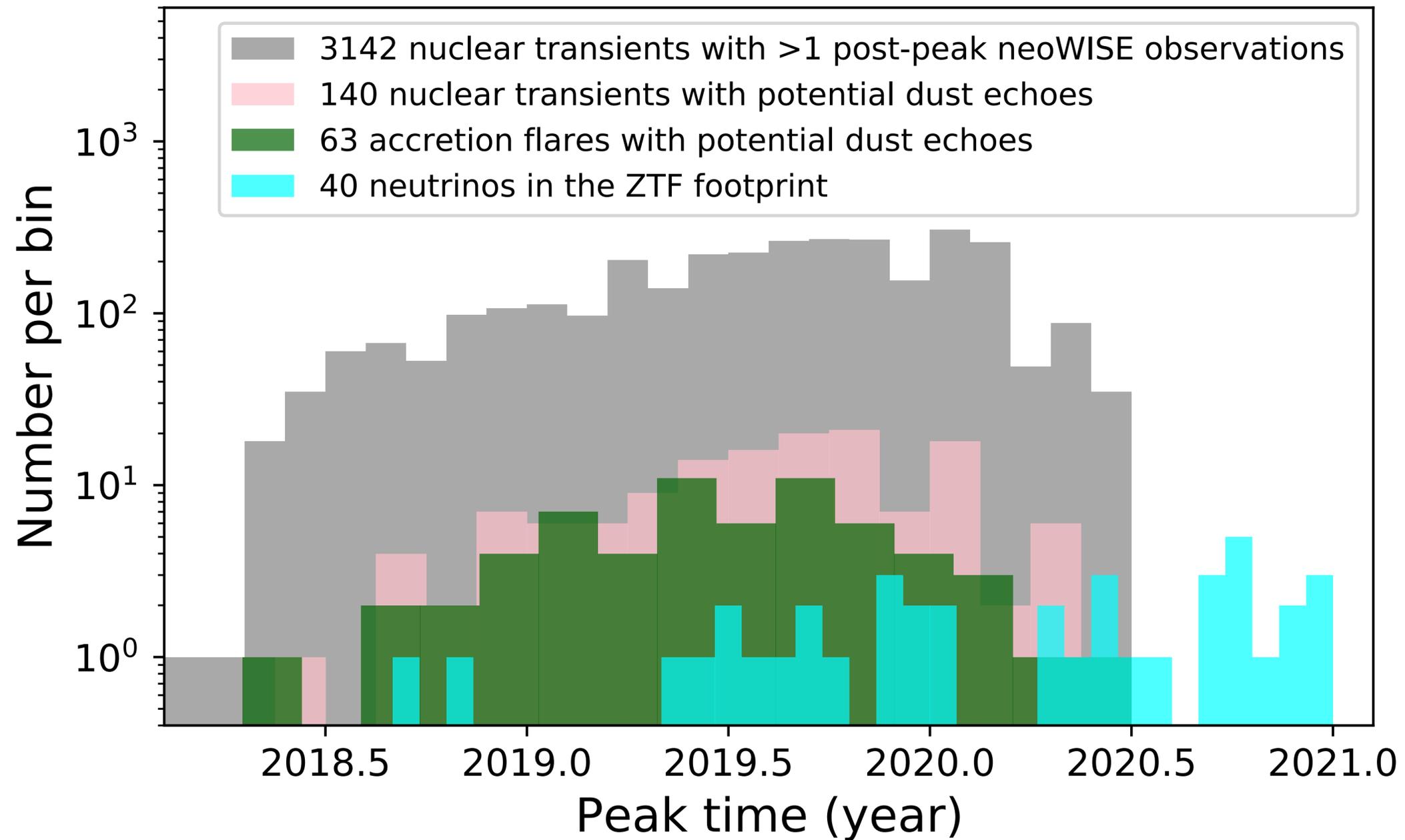
Thomas Boxman MSc thesis (2022)



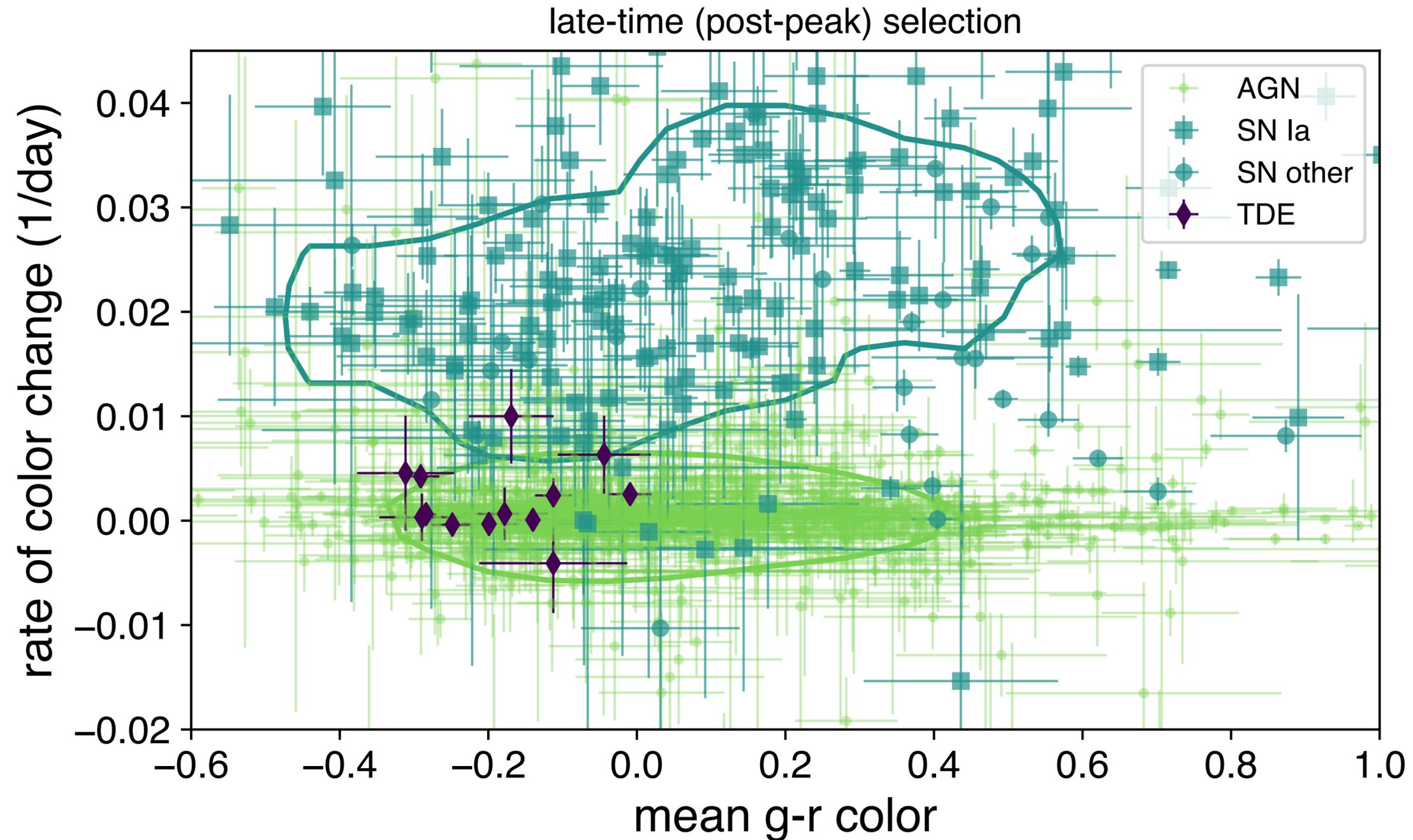
# Sky maps



# Most neutrinos from 2019+



# Photometric selection of TDEs with ZTF



# URLs to relevant movies

[https://www.desy.de/news/news\\_search/index\\_eng.html?openDirectAnchor=2030&two\\_columns=0](https://www.desy.de/news/news_search/index_eng.html?openDirectAnchor=2030&two_columns=0)

<https://www.youtube.com/watch?v=-dFQYQCmqk>

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2021/nasa-s-swift-helps-tie-neutrino-to-star-shredding-black-hole>

# Media



## Kosmisch 'spookdeeltje' betrapt in het Zuidpool-ijs

George van Hal  
Amsterdam

Ongeremd vliegt het door sterren en planeten, maar nu - na een kosmische reis van 700 miljoen jaar - is het diep in het Zuidpool-ijs tóch betrapt: een 'spookdeeltje', een kosmische neutrino. Pas voor de tweede keer in de menselijke geschiedenis is zo'n deeltje herleid tot zijn bron, een superzwaar zwart gat dat een ster aan stukken scheurde.

Ze vliegen overal dwars doorheen. Vluchtig, ongrijpbaar. Het maakt van zogeheten neutrino's, deeltjes die zich vrijwel niets aantrekken van andere materie, misschien wel de meest mysterieuze bouwstenen van de wereld om

ons heen. Toch: héél af en toe vangen we er eentje, in monsterlijke meetapparaten op exotische locaties, zoals de IceCube-detector op Antarctica, die met sensoren diep onder het ijs de spookdeeltjes betrapt.

Onlangs zag dat apparaat een wel héél bijzonder exemplaar, schrijven astronomen maandag in het vakblad *Nature Astronomy*. Een deeltje die met een fikse bonk energie op de sensoren klapte: grofweg dertigmaal meer dan de krachtigste botsingen die fysici in deeltjesversnellers als de Large Hadron Collider van Cern kunnen maken. Zulke hoge energieën vergaren deeltjes meestal slechts als ze diep in de kosmos een flinke zwiep hebben gekregen.

Normaliter is het verhaal daarmee af. Controleren of een neutrino daadwerkelijk uit het heelal komt, is namelijk buitengewoon lastig, vertelt astronoom Sjoert van Velzen (Universiteit Leiden), co-auteur van het nieuwe artikel. Maar ditmaal hadden ze geluk: het neutrino bleek afkomstig uit een gebied aan de hemel waar hij en zijn collega's met radiotelescopen ook een superzwaar zwart gat een ster aan stukken hadden zien trekken. Uit een statistische analyse bleek dat er een kans van één op vijfhonderd bestond dat dat toeval was. Het neutrino is dus vermoedelijk afkomstig van die kosmische catastrofe, zo luidt hun conclusie.

Hoe precies is nog een raadsel. Zeker is dat het enorme geweld waarmee het zwarte gat de ster verzwoeg de energie leverde om het deeltje te maken. 'We hebben een aantal scenario's opgesteld, maar kunnen niet met zekerheid zeggen welke daarvan klopt', zegt Van Velzen.

Fysicus Dorothea Samtleben van deeltjesinstituut Nikhef is enthousiast en noemt de vondst spannend. 'Dit is wat iedereen heel graag wil: de bron van dit soort hoogenergetische kosmische straling vinden.' Mede daarom is ze echter ook terughoudend. 'Omdat iedereen zo graag een bron wil vinden, moet je extra sceptisch zijn. Het gaat hier maar om één deeltje.

Dat is statistisch nog niet zo stevig. Ik kom zelf uit de deeltjesfysica, waar we pas spreken van een vondst bij een kans op toeval van 1 op de 3,5 miljoen', zegt ze. 'Daar zit dit nog mijlener vanaf.'

Pas één keer eerder lukte het om het pad van een hoogenergetische kosmische neutrino terug te leiden naar de bron - destijds overigens op basis van ruim tien gemeten neutrino's. Drie jaar terug zagen astronomen die deeltjes vertrekken uit een sterrenstelsel met de naam 'Texas', een object die dat jaar prominente lijstjes van wetenschappelijke haalde.



16 Wetenschap

nrc  
DONDERDAG 25 FEBRUARI 2021



Impressie van het uiteenrijten van een ster door een superzwaar zwart gat, op 690 miljoen lichtjaar afstand. ILLUSTRATE DES/SCIENCE COMMUNICATION LAB

WETENSCHAP

## De reis door het heelal van bijna 700 miljoen jaar botste een neutrino op het ijs van Antarctica.

erker

Een energierijk deeltje dat eind 2019 geen het ijs van Antarctica van een ster die 700 miljoen jaar afstand door zwart gat aan stukken werd. Het is pas de bron van zo'n energie is herleid, men in een artikel cheen in *Nature Astronomy*.

Als de spookachtige licht, klein en heftig vliegen met bijna overal doorheen van andere materie aan te trekken. De neutrino die eind 2019 gespot werd, is bijna 700 miljoen jaar ongehinderd onderweg geweest totdat het op een watermolecuul in het zuidpoolijs knalde. Het

deeltje had veel energie, meer dan 100 tera-elektronvolt. Dat is ruim tien keer meer dan de meest krachtige botsingen die fysici kunnen realiseren in de deeltjesversneller LHC van CERN op de grens van Zwitserland en Frankrijk.

De botsing werd gezien door de neutrino-detector IceCube. IceCube-onderzoekers lichten astronomen in om te kijken of zij toevallig iets gezien hadden in het gebied aan de hemel waar de neutrino vandaan kwam, vertelt co-auteur Sjoert van Velzen, van de Universiteit Leiden. Meestal levert dit niets op, maar nu was het raak. De neutrino bleek afkomstig uit een gebied waar een superzwaar zwart gat - met dertig miljoen keer de massa van de zon - een ster aan stukken aan het scheuren was. Slierten materie, afkomstig van de ster, draaien hierbij in een kolkende schijf om het zwarte gat voordat ze erin verdwijnen, als een draai-

kol van water dat in een afvoerputje verdwijnt.

De kans dat de neutrino toevallig tegelijkertijd met dit kosmische geweld ontstond is slechts een op vijfhonderd, schrijven de onderzoekers. Dat maakt het zeer waarschijnlijk dat de neutrino door de verscheurde ster geproduceerd werd.

Het is een spannende en onverwachte ontdekking

Antoine Kouchner Antares

De neutrino-detectie vertelt iets over de manier waarop de ster verscheurd wordt. 'Dat we een neutrino zien, betekent dat er in de kolkende schijf bij het zwarte gat deeltjes verspreid worden tot een hoge energie', zegt Van Velzen. 'Als die verspreide

deeltjes botsen met andere materie die ook rond het zwarte gat draait, dan ontstaan er namelijk neutrino's.' Hoe die deeltjes precies verspreid worden en waar ze mee botsen is nog onduidelijk. Sinds de bekendmaking van de ontdekking zijn er wel al enkele artikelen verschenen met mogelijke verklaringen, maar een definitief antwoord is er nog niet.

Combinatie van metingen

'Het is een spannende en onverwachte ontdekking. Zowel de observatie van zo'n neutrino als van een verscheurde ster, is zeldzaam', zegt Antoine Kouchner, woordvoerder van Antares, een neutrino-detector in de Middellandse Zee en niet betrokken bij de publicatie. 'Het is ook een mooie demonstratie van zogeheten multi-messenger-astronomie, waarbij verschillende soorten metingen gecombineerd worden. De ontdekking was alleen mogelijk door traditionele

telescoopmetingen te combineren met de neutrino-detectie.'

Het is de tweede keer dat de herkomst van een energierijk neutrino achterhaald is. De eerste keer, in 2018, bleek de herkomst een bundel hoogenergetische materie, uitgezonden door een superzwaar zwart gat. De derde zit in de pijplijn, vertelt Kouchner. 'De IceCube-samenwerking heeft recentelijk aangekondigd dat ze nog een neutrino hebben gevonden die afkomstig is van een ander zwart gat dat een ster verscheurt.' Deze ontdekking is nog niet gepubliceerd.

Kouchner en Van Velzen verwachten dat er de komende tijd nog meer bronnen van energierijke neutrino's gevonden worden. IceCube krijgt een upgrade en er komt een nieuwe neutrino-detector, genaamd KM3NeT, in de Middellandse Zee. Ook vindt er steeds meer multi-messenger-astronomie plaats.