



Giornate INAF RSN4 - Napoli 22-24 novembre

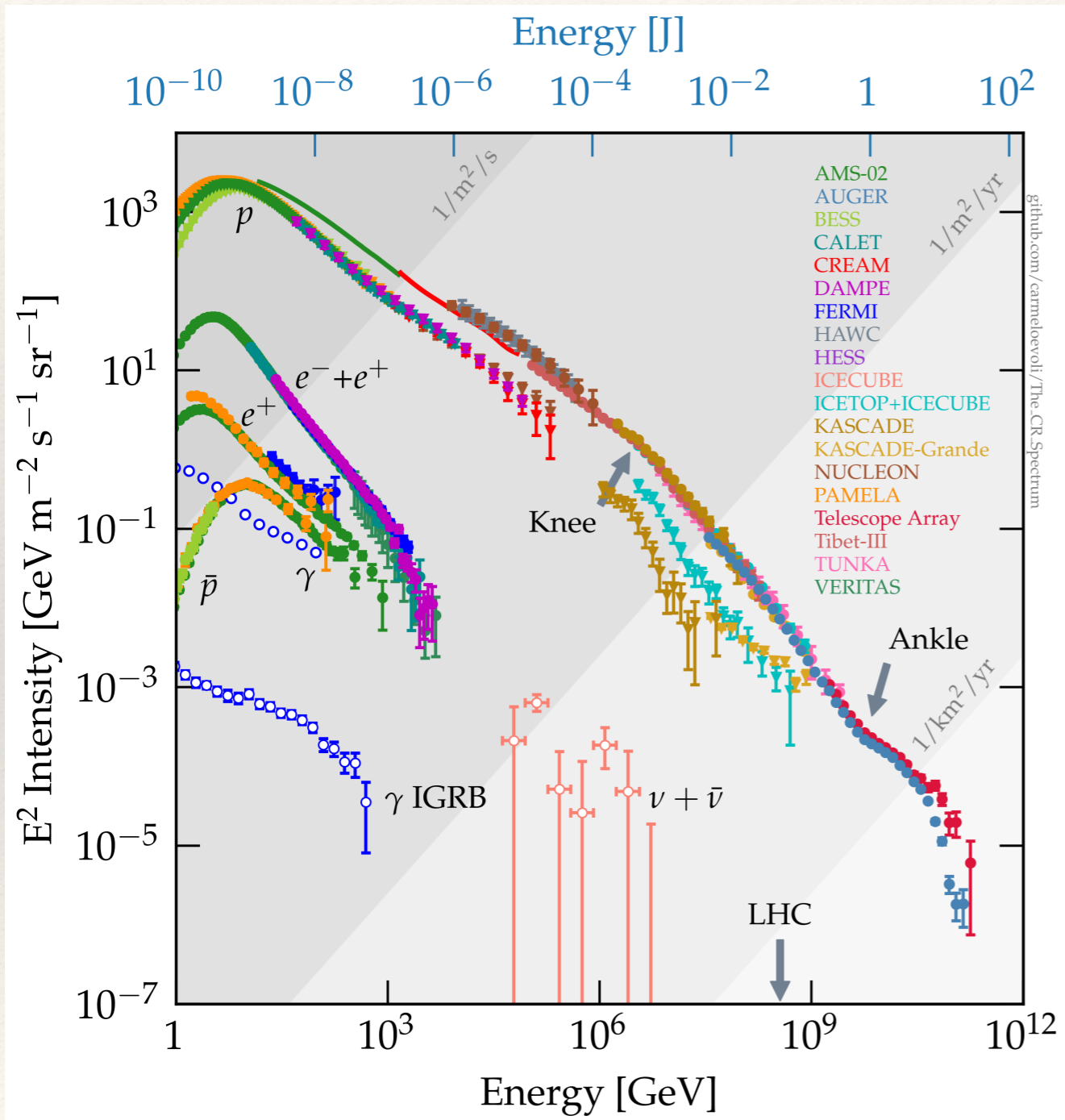
Raggi Cosmici

Giovanni Morlino

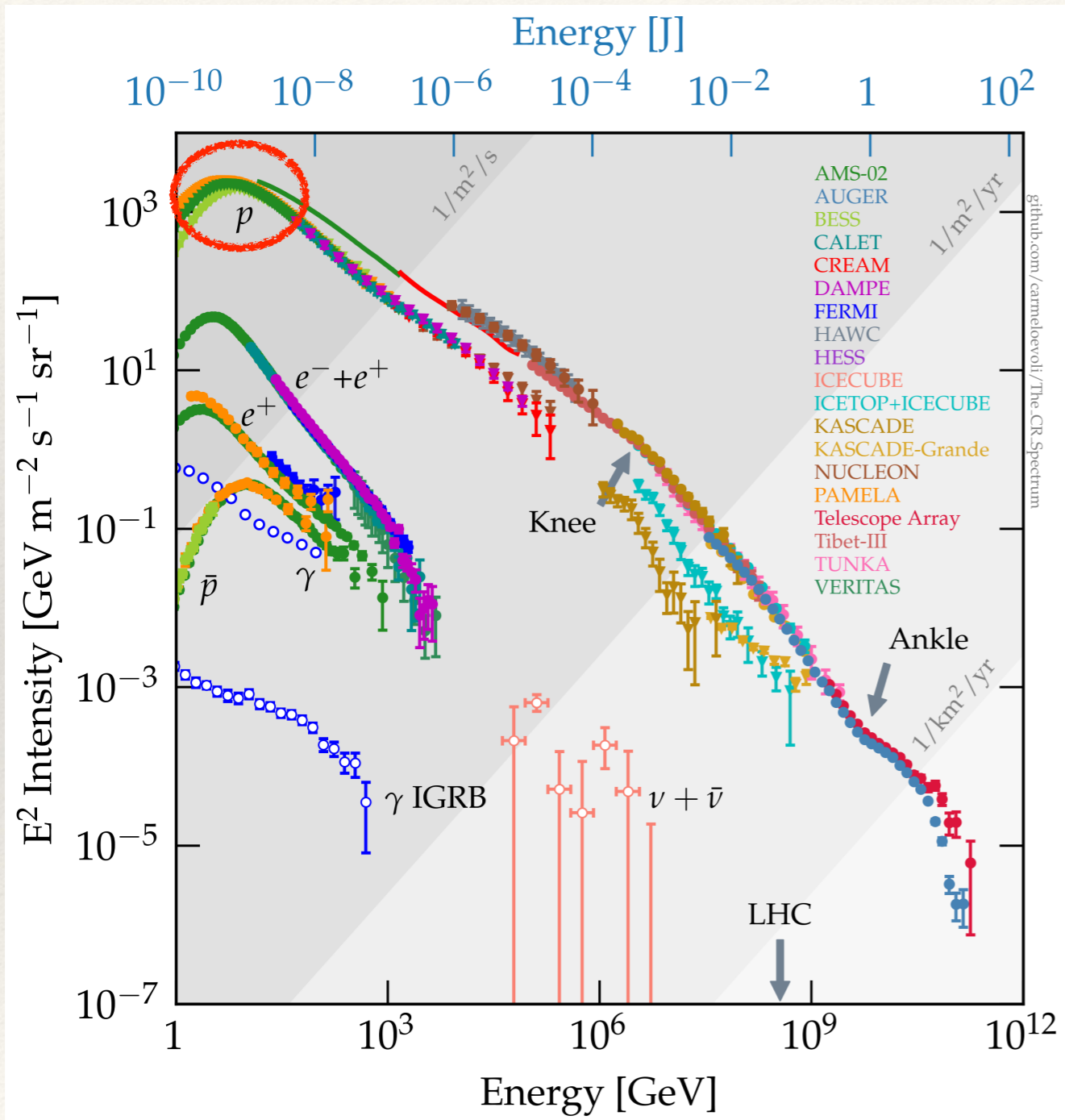
Osservatorio Astrofisico di Arcetri



Uno sguardo d'insieme



Uno sguardo d'insieme

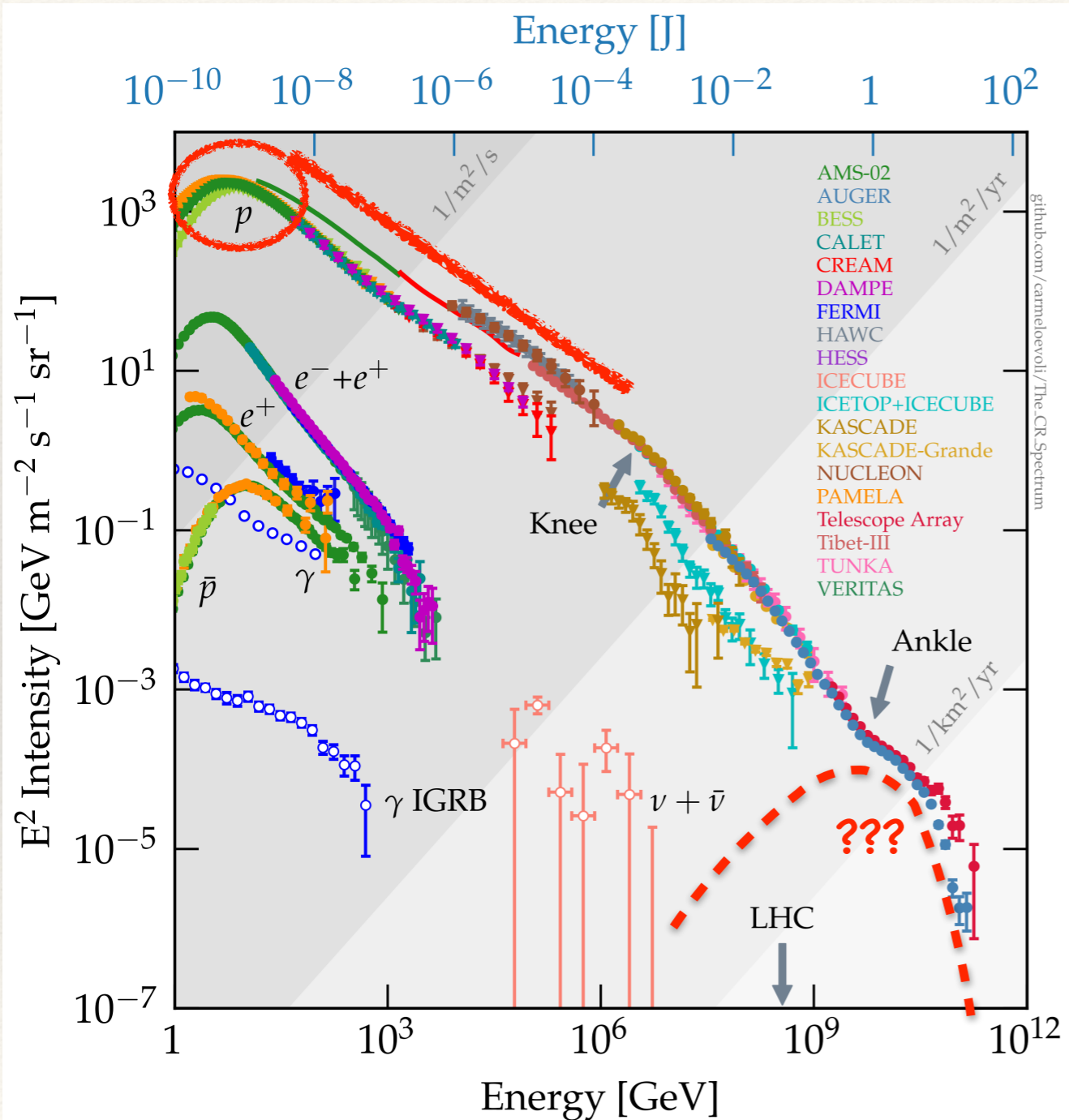


Requirements

❖ Energetics Gal: $\sim 10^{40}$ erg/s

Component	Energy density [eV/cm ³]
Gas motion	~ 0.5
Magnetic field	~ 0.5
Starlight	~ 0.5
CMB	~ 0.5
Cosmic Rays	~ 0.5

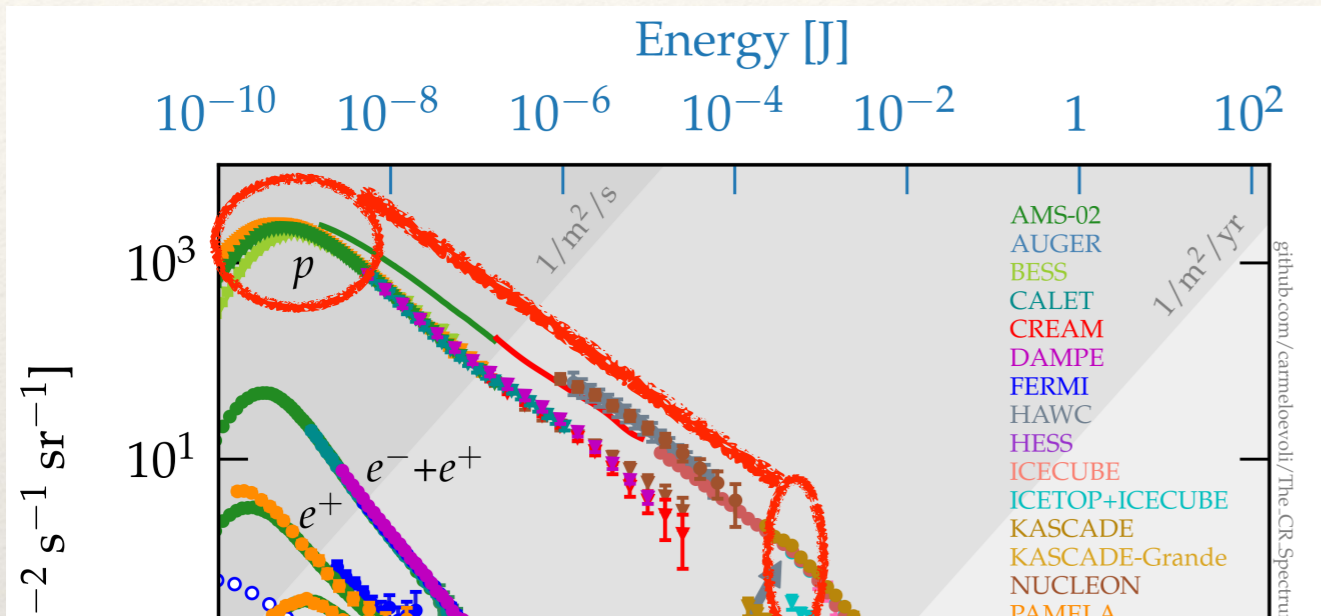
Uno sguardo d'insieme



Requirements

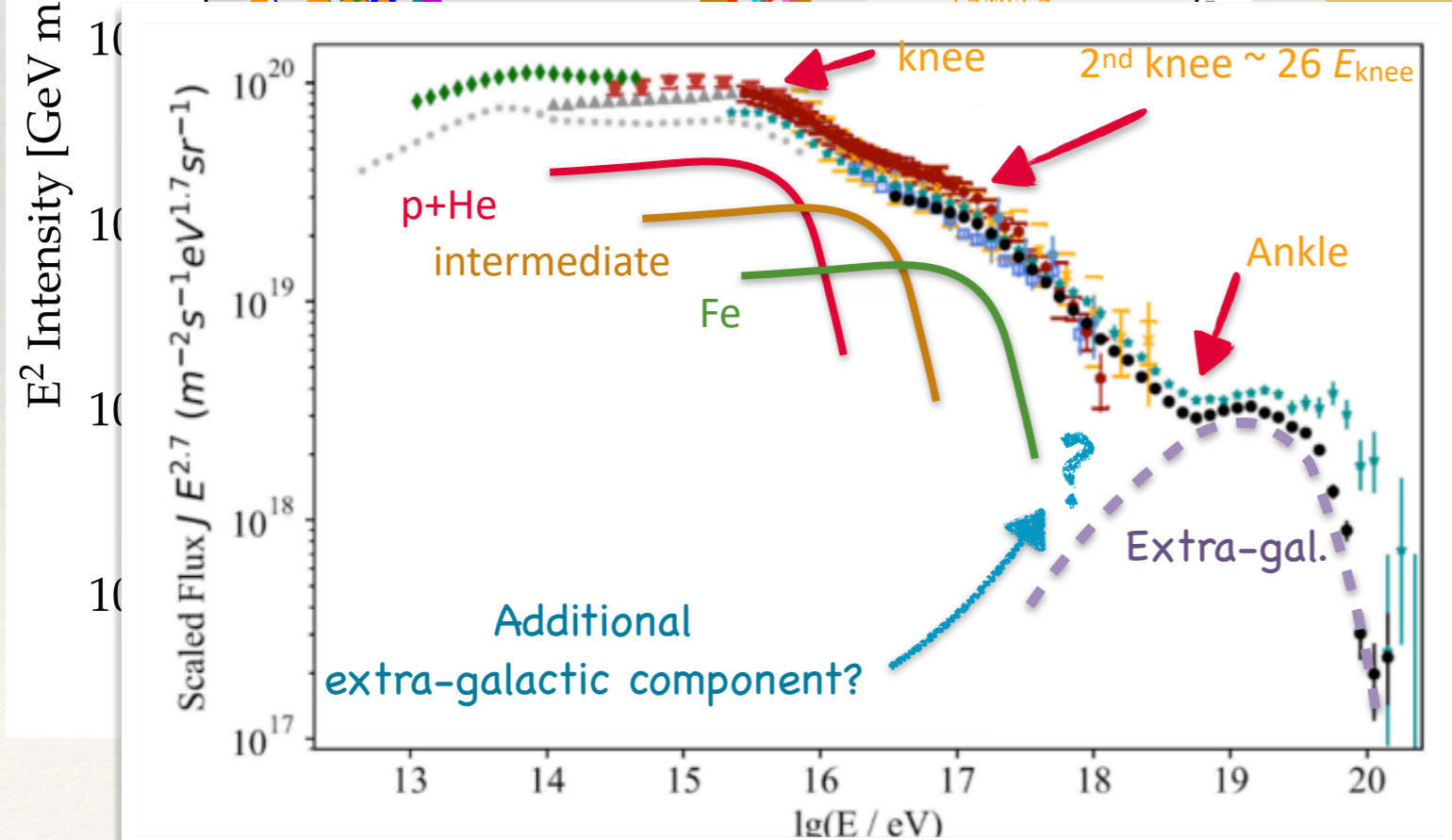
- ❖ Energetics Gal: $\sim 10^{40}$ erg/s
- ❖ Spectrum
 - ❖ $Q_{\text{inj,Gal}} \propto E^{-2.3}$
 - ❖ $Q_{\text{inj,extragal}}$ harder (depends on transition)

Uno sguardo d'insieme

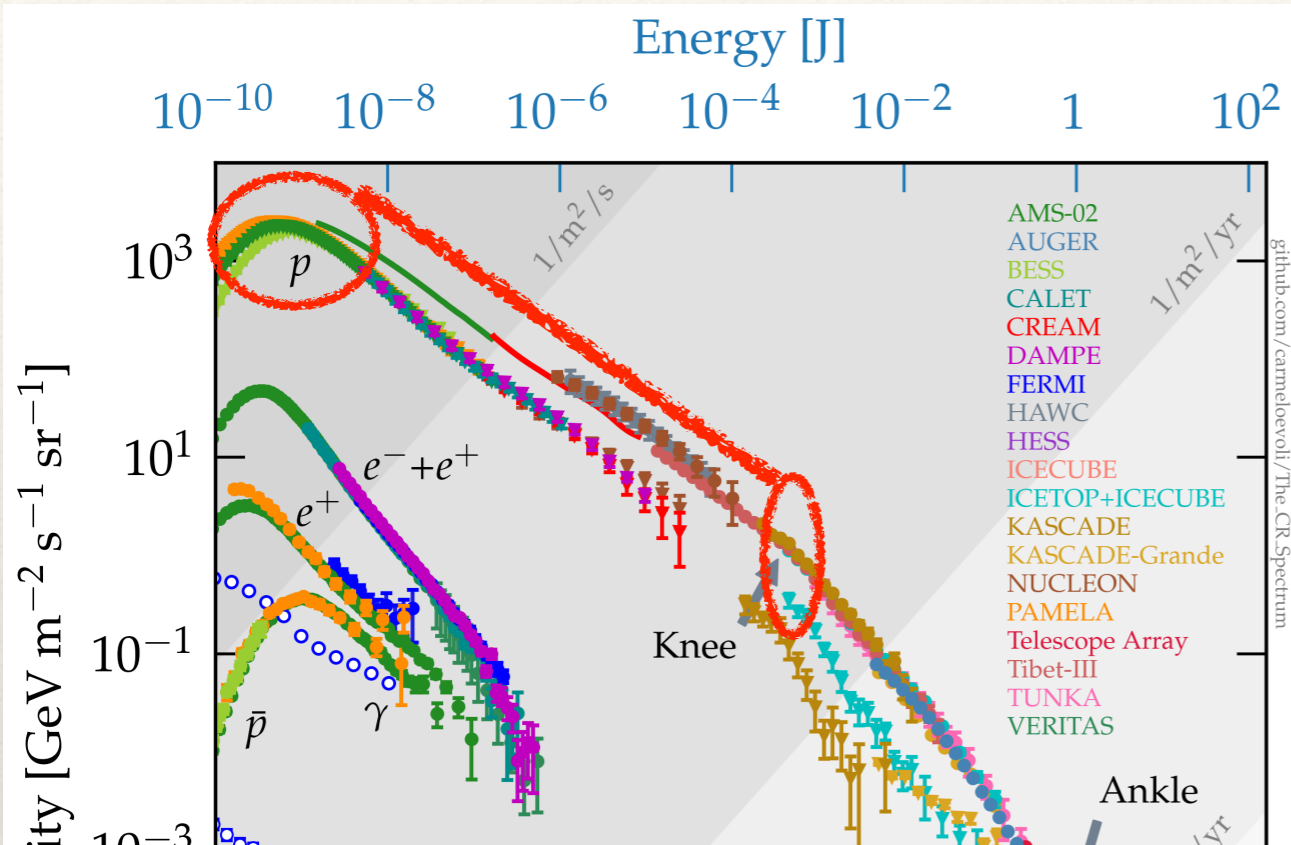


Requirements

- ❖ Energetics Gal: $\sim 10^{40}$ erg/s
- ❖ Spectrum
 - ❖ $Q_{\text{inj,Gal}} \propto E^{-2.3}$
 - ❖ $Q_{\text{inj,extragal}}$ harder (depends on transition)
- ❖ Maximum energy
 - ❖ Gal: $E_{\text{max},p} \gtrsim 10^{15}$ eV
 - ❖ Extragal: $E_{\text{max},p} \gtrsim 10^{18}$ eV

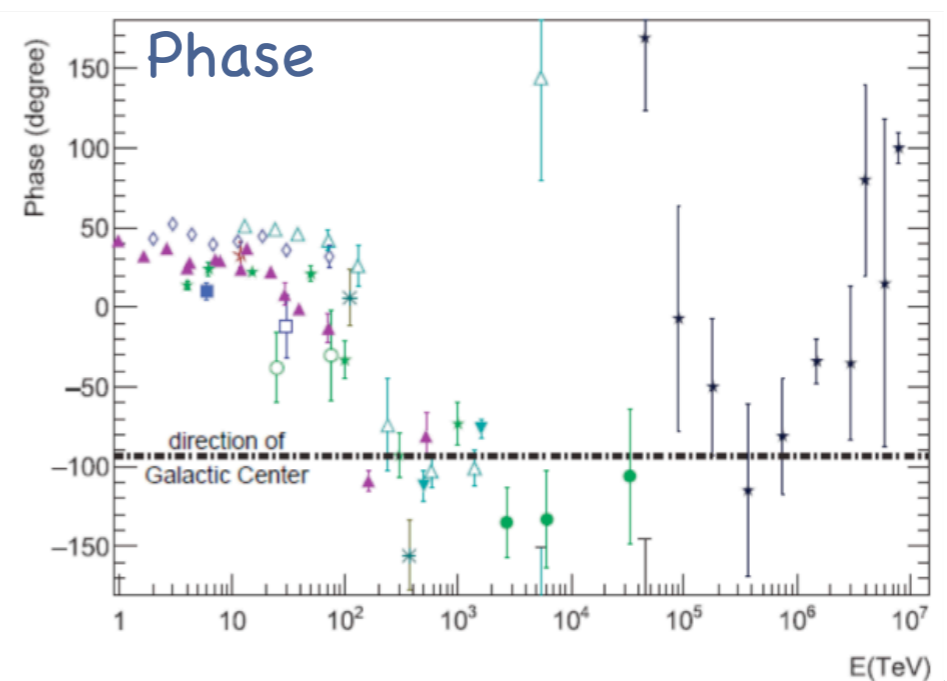
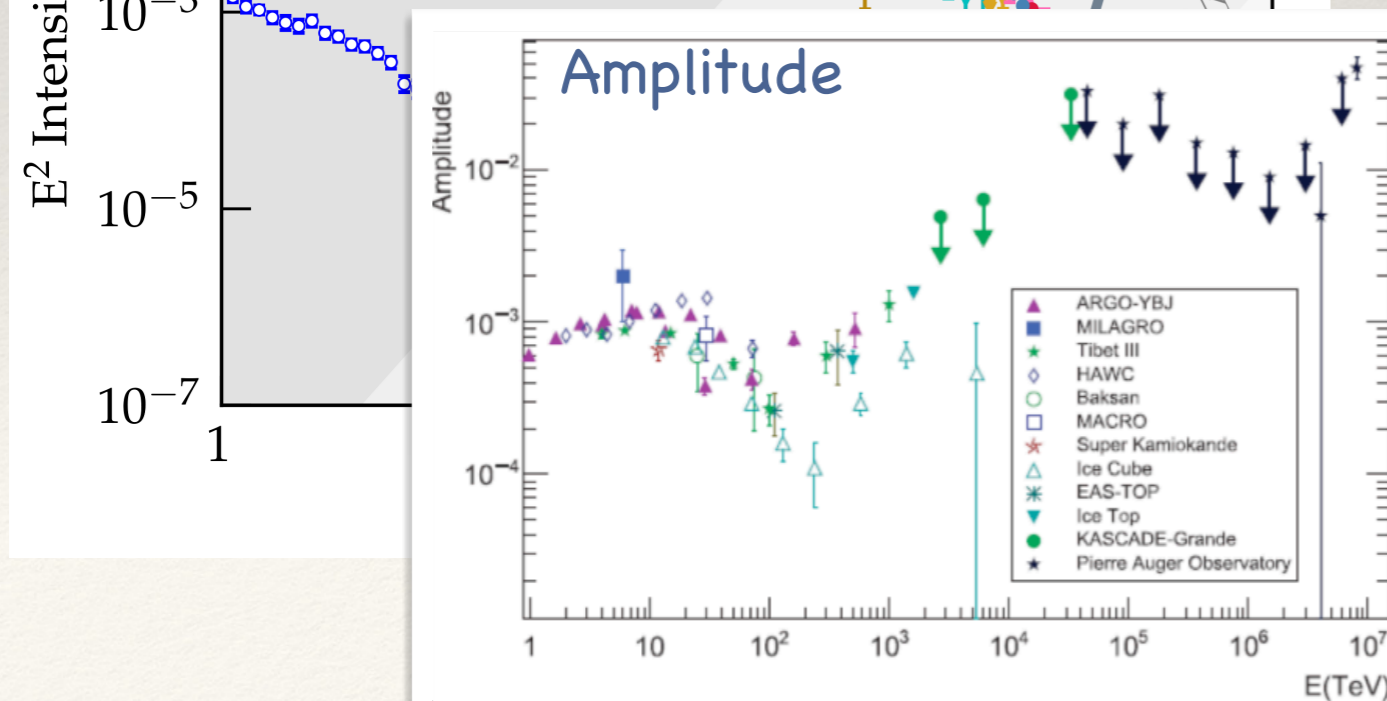


Uno sguardo d'insieme

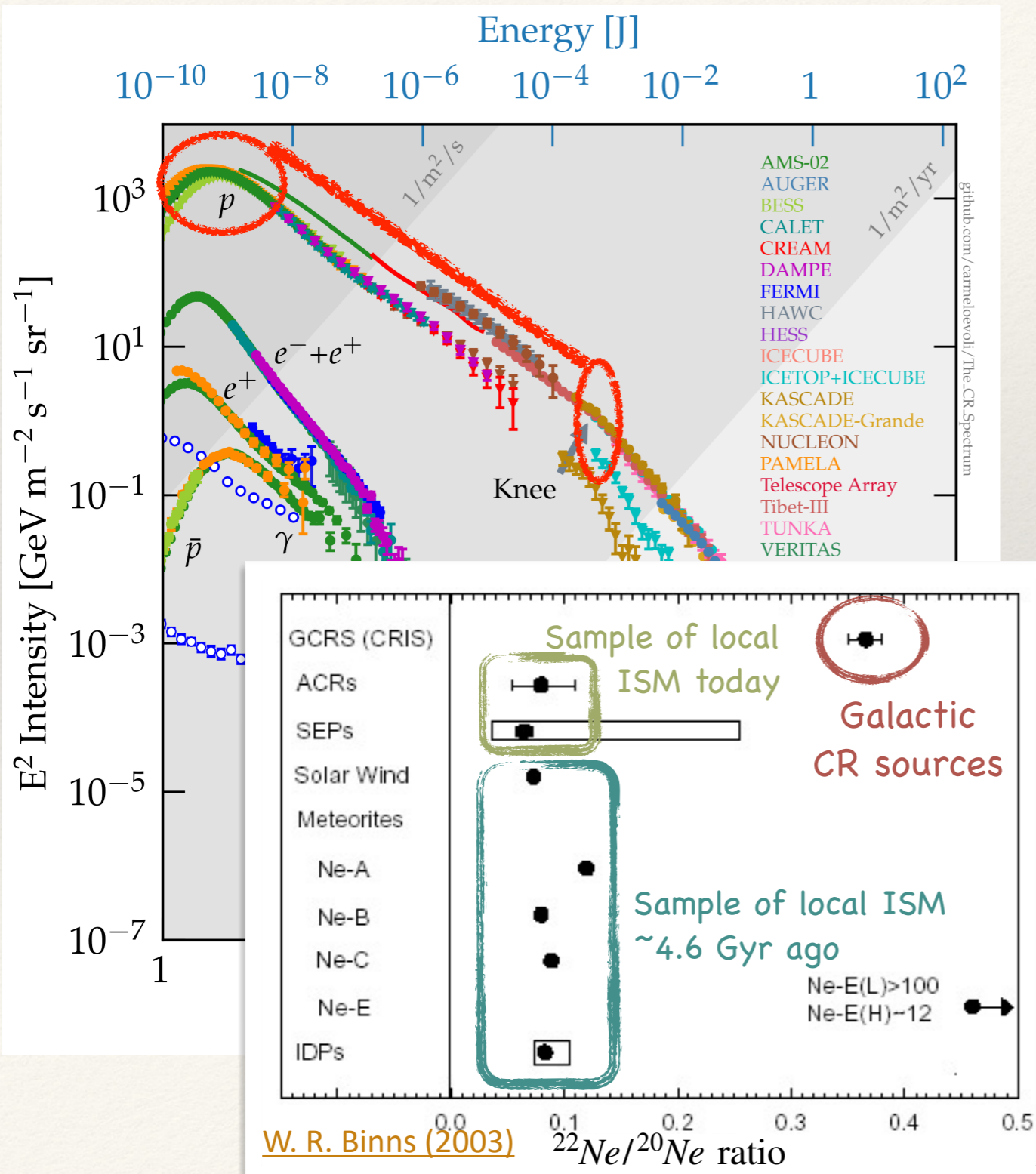


Requirements

- ❖ Energetics Gal: $\sim 10^{40}$ erg/s
- ❖ Spectrum
 - ❖ $Q_{inj,Gal} \propto E^{-2.3}$
 - ❖ $Q_{inj,extragal}$ harder (depends on transition)
- ❖ Maximum energy
 - ❖ Gal: $E_{max,p} \gtrsim 10^{15}$ eV
 - ❖ Extragal: $E_{max,p} \gtrsim 10^{18}$ eV
- ❖ Anisotropy $\sim 10^{-3}$ @ 10 TeV



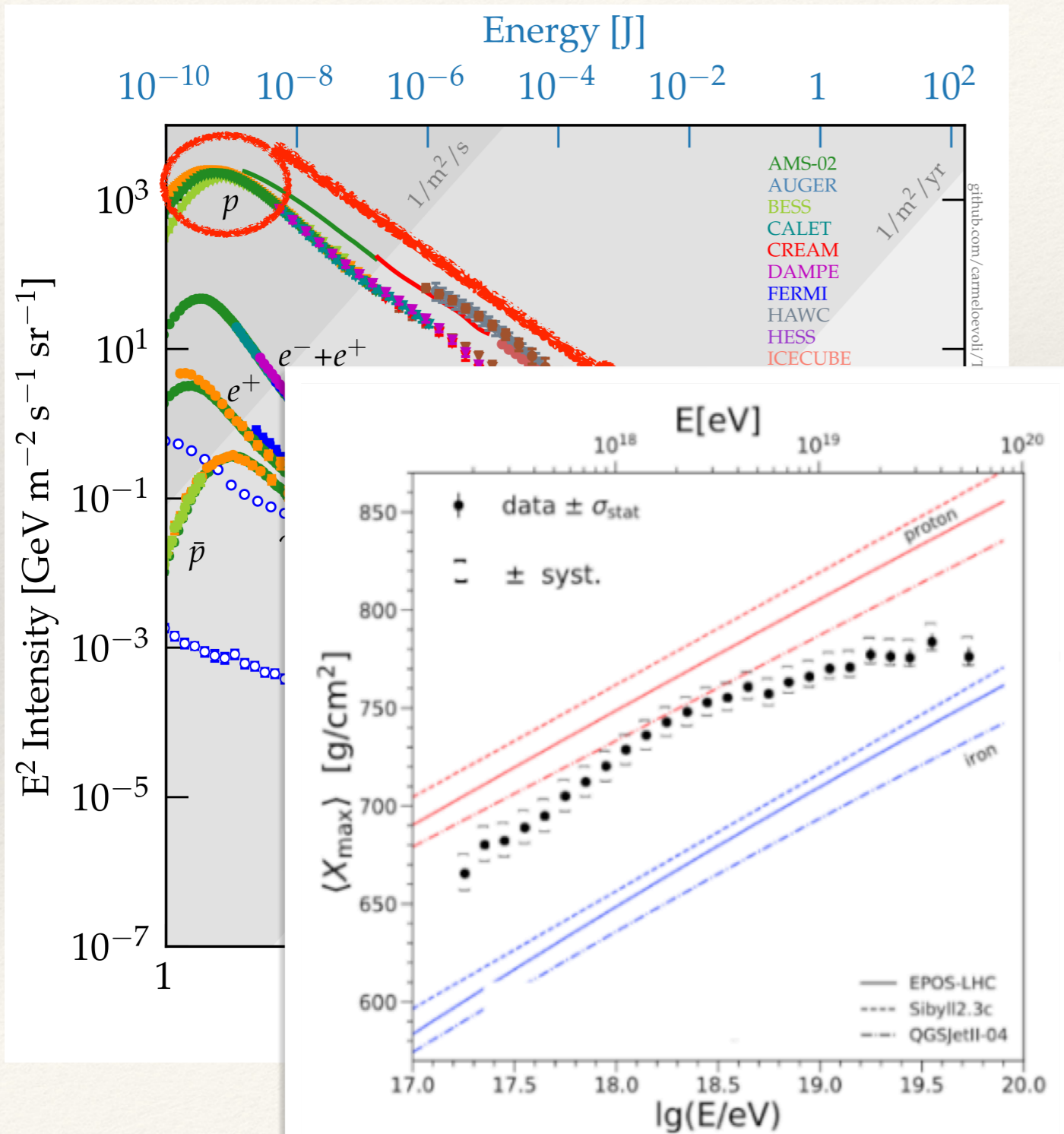
Uno sguardo d'insieme



Requirements

- ❖ Energetics Gal: $\sim 10^{40}$ erg/s
- ❖ Spectrum
 - ❖ $Q_{\text{inj,Gal}} \propto E^{-2.3}$
 - ❖ $Q_{\text{inj,extragal}}$ harder (depends on transition)
- ❖ Maximum energy
 - ❖ Gal: $E_{\text{max},p} \gtrsim 10^{15}$ eV
 - ❖ Extragal: $E_{\text{max},p} \gtrsim 10^{18}$ eV
- ❖ Anisotropy $\sim 10^{-3}$ @ 10 TeV
- ❖ Composition
 - ❖ Gal: few anomalies w.r.t. Solar

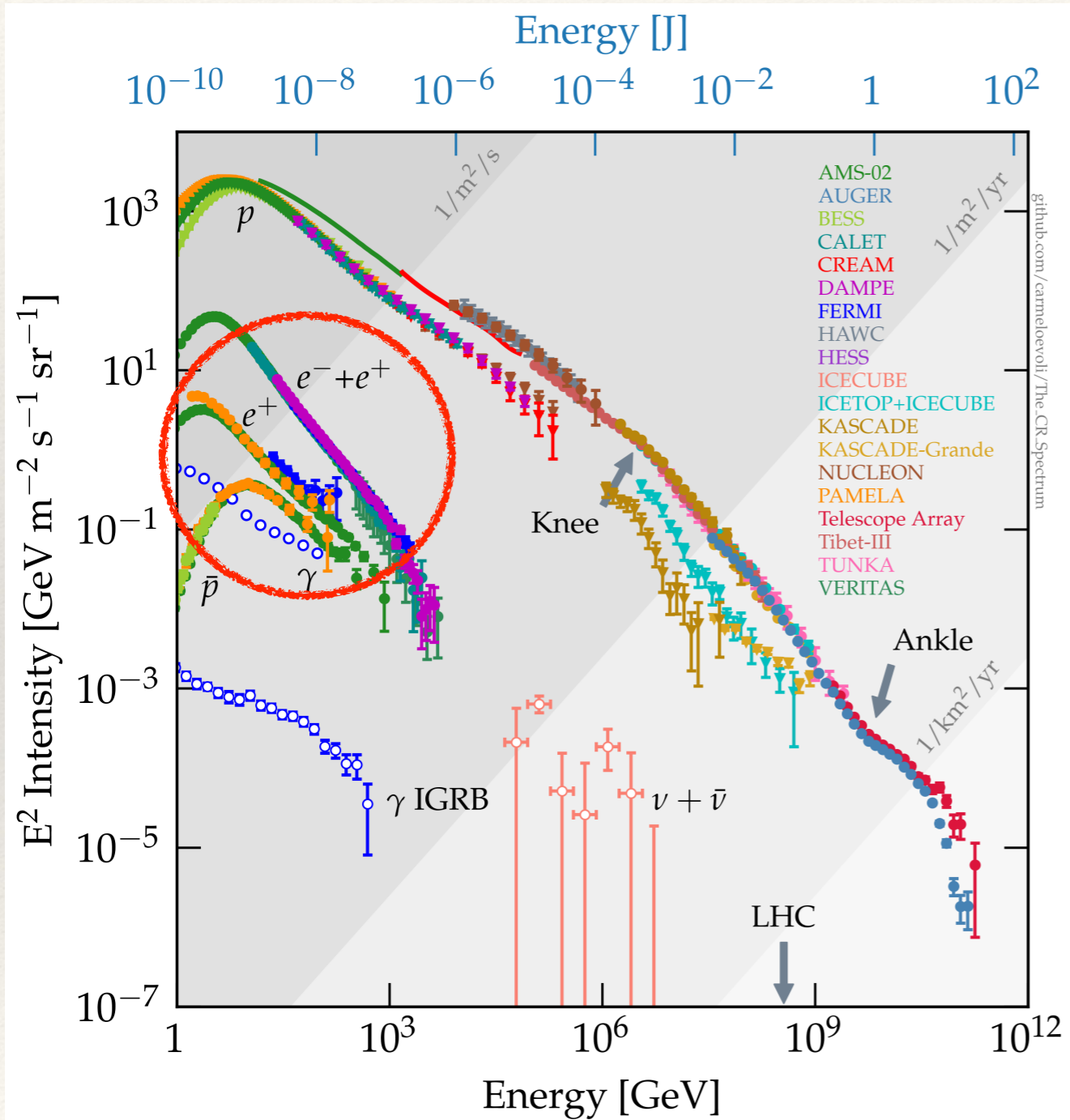
Uno sguardo d'insieme



Requirements

- ❖ Energetics Gal: $\sim 10^{40}$ erg/s
- ❖ Spectrum
 - ❖ $Q_{\text{inj,Gal}} \propto E^{-2.3}$
 - ❖ $Q_{\text{inj,extragal}}$ harder (depends on transition)
- ❖ Maximum energy
 - ❖ Gal: $E_{\text{max},p} \gtrsim 10^{15}$ eV
 - ❖ Extragal: $E_{\text{max},p} \gtrsim 10^{18}$ eV
- ❖ Anisotropy $\sim 10^{-3}$ @ 10 TeV
- ❖ Composition
 - ❖ Gal: few anomalies w.r.t. Solar
 - ❖ Extragal: transition light \rightarrow intermediate

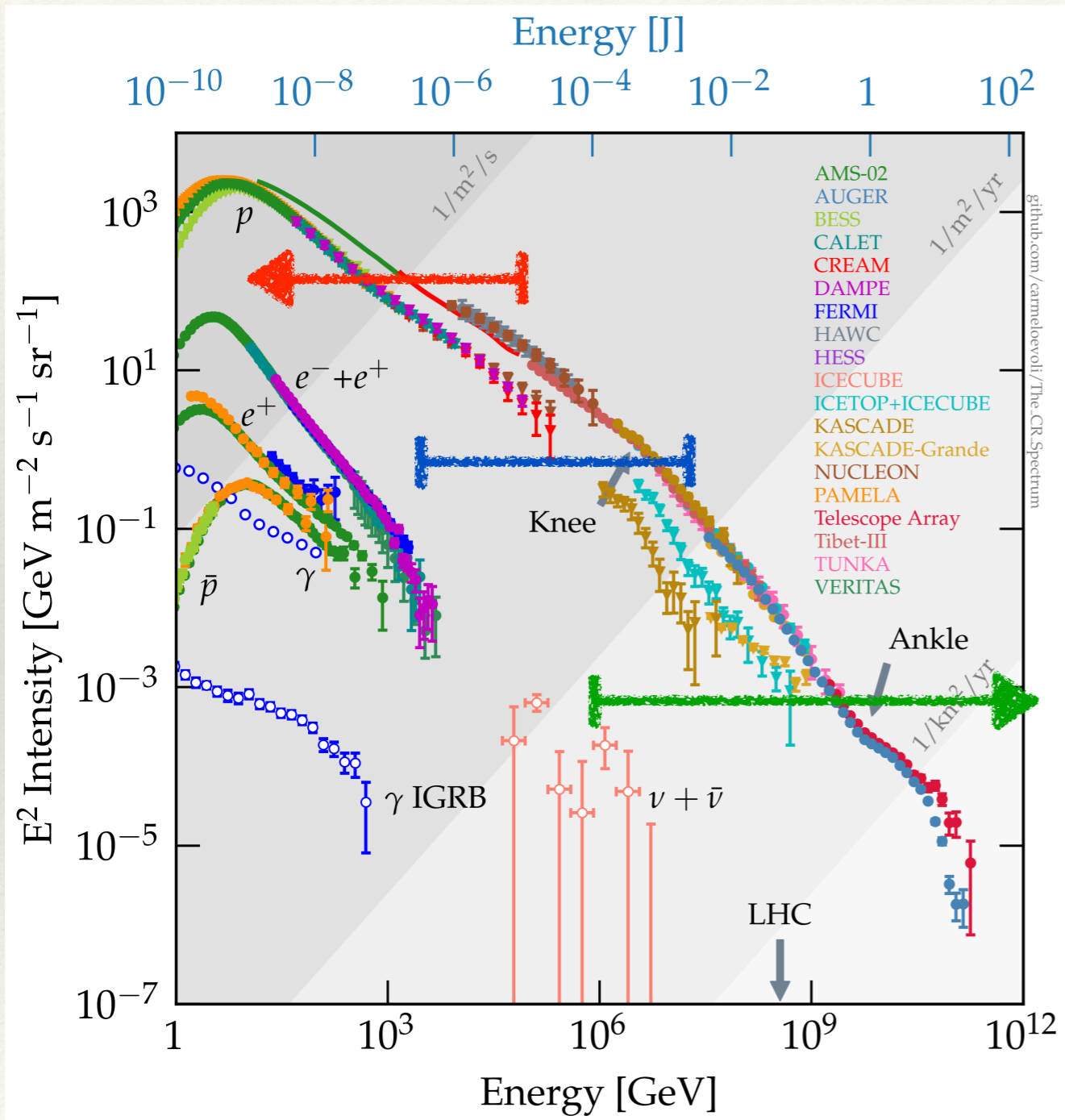
Uno sguardo d'insieme



❖ Leptoni

- ❖ Non ancora chiara l'origine degli elettroni
- ❖ Positroni: secondari + pulsar

Uno sguardo d'insieme



Tecniche di rivelazione

Direct measurements
(Ballon & satellites)

Indirect measurements
(Cherenkov)

Indirect measurements
(EAS)

Possibili sorgenti di CR

SORGENTI GALATTICHE

- ❖ **Sorgenti adroniche**
 - ❖ SNR (sorgenti principali?)
 - ❖ Core-collapse supernovae
 - ❖ Massive young star clusters
 - ❖ Super-bubbles
 - ❖ Galactic Centre
 - ❖ Giant magnetic island
 - ❖ Pulsar?
- ❖ **Sorgenti leptoniche**
 - ❖ SNR (e^-)
 - ❖ Pulsar e pulsar wind nebulae (e^\pm)
 - ❖ ...

SORGENTI EXTRA-GALATTICHE

- ❖ **Sorgenti adroniche**
 - ❖ AGN
 - ❖ Starburst galaxies
 - ❖ GRB

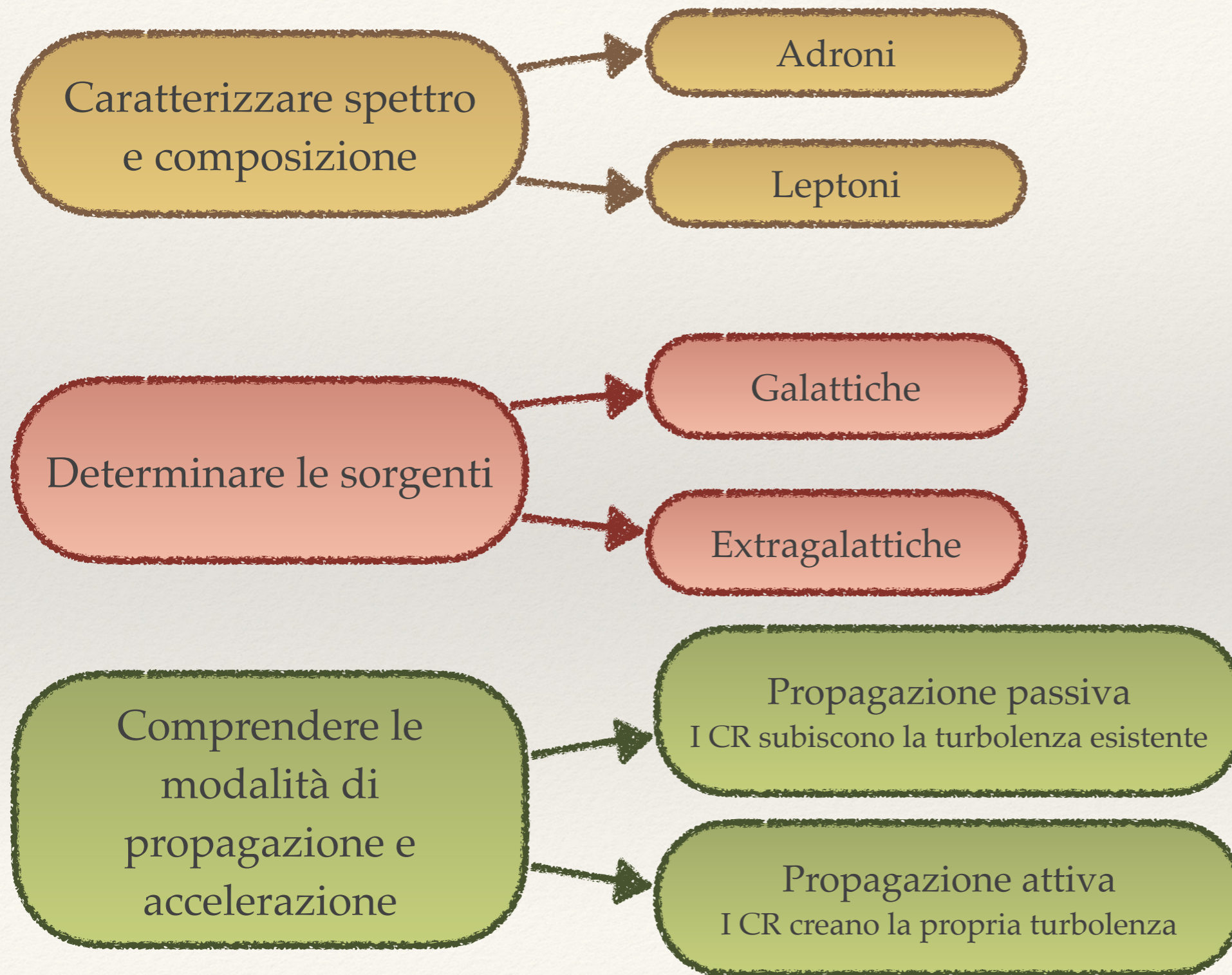
Obiettivi della ricerca

Caratterizzare spettro
e composizione

Determinare le sorgenti

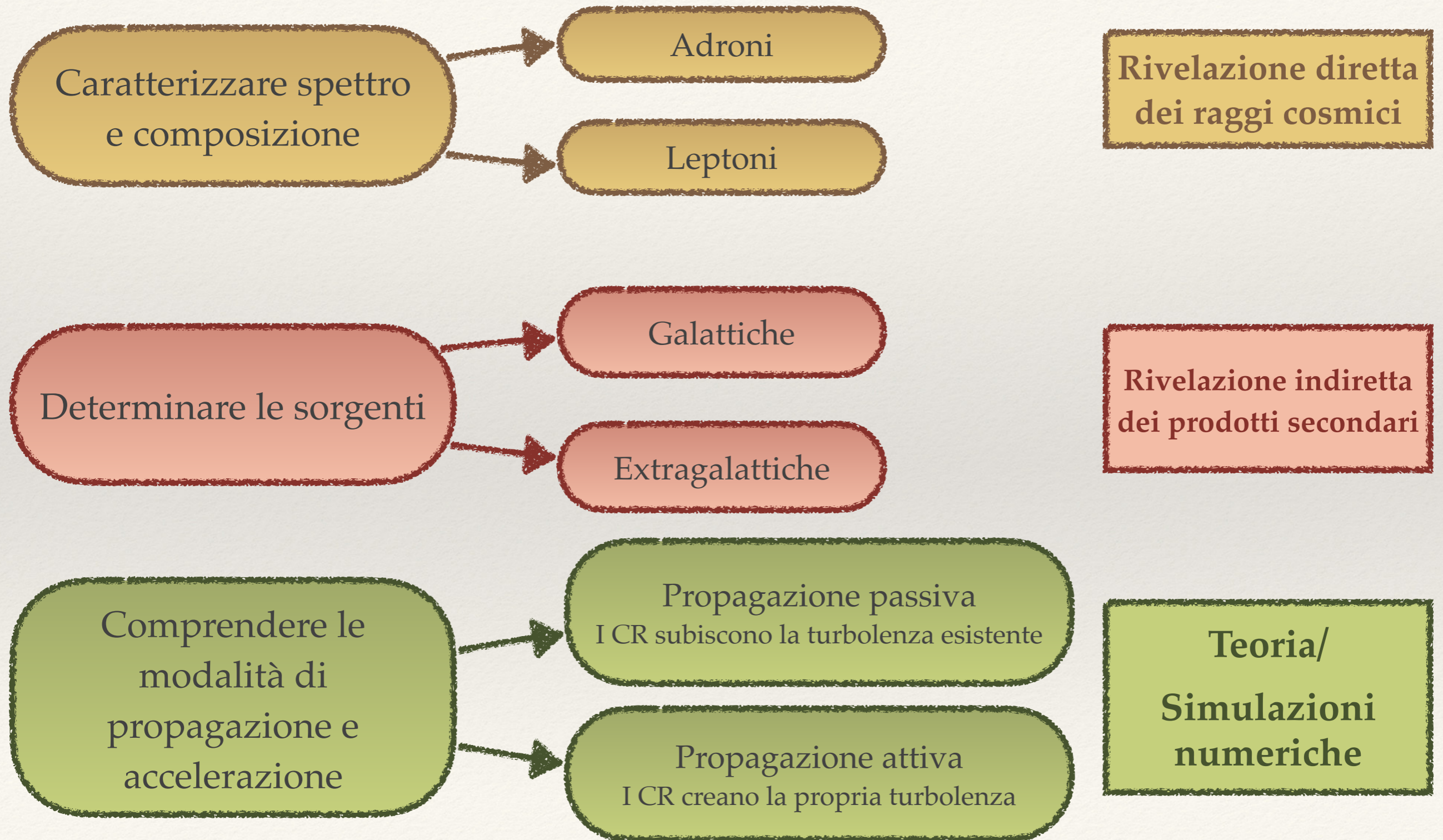
Comprendere le
modalità di
propagazione e
accelerazione

Obiettivi della ricerca



Obiettivi della ricerca

Principali metodi di indagine



Schede INAF relative

Caratterizzare spettro e composizione

Determinare le sorgenti

Comprendere propagazione / accelerazione

Progetto	NFTE	Inviluppo FTE
PAO	4	40
JEM-EUSO	3	18.5
Totale	7	58.5

Progetto	NFTE	Inviluppo FTE
CRACHEN	9	40
PAMSUR	10	24
PEACE	0	0
INTEGRAL	14	233
AGILE	27	150
Fermi Science	12	90
MIOHECS	6	20
SDI/SNR	4	4
SNR	3	0
Progress	169	650
RPC-SWGO	2	10
SWGO-WCD	2	1.6
Totale	248	1218.6

Progetto	NFTE	Inviluppo FTE
CRACHEN	9	40
Blazar	4	1.8
Plasmi	7	1.8
Totale	20	43.6

Teorico

Osservativo

Sperimentale
Tecnologico

=

NOTA: selezione personale, potrei aver perso qualcosa!

Unità INAF coinvolte (NFTE)

	PAO	JEM-EUSO	CRACHEN	PAMSUR	PEACE	AGILE	INTEGRAL	Fermi Science	MIOHECS	SDI/SNR	SNR	SWG0-WCD	RPC-SWGO	Progress	Blazar	Plasmi	TOTALE
IASF Palermo	1	2												25			28
OA Palermo			2	3							3			7			15
OA Catania										1				23			24
OA Cagliari						2				2				1			5
OA Capodimonte														6			6
OA Roma				1		3								21			25
IAPS Roma				1		12	8						2	3	2	6	34
OA Arcetri			6	4										7			17
IRA Bologna								3		1				5			9
OAS Bologna						6	3	1	5					19			24
OA Padova				1		1								6			8
IASF Milano						1	3	7	1					12			30
OA Brera			1			1		1						30			33
OA Torino	3	1										2		3			9
Dir. generale															1		1
Dir. scientifica															1		1

Infrastrutture dedicate

Infrastrutture a partecipazione INAF che hanno la ricerca sui raggi cosmici tra gli obiettivi primari

	Coinvolgimento INAF	Leadership INAF	Fase operativa
Auger	😐		Presi dati avanzata (upgrade in corso)
AGILE	😊	😎	Presi dati avanzata
ASTRI-MA	😊	😎	In costruzione Presi dati prossima (~2024)
CTAO	😊		In costruzione Presi dati prossima (~2028)
JEM-EUSO	😞		Costruzione e test dei precursori
SWG0	😐		Studio di fattibilità

I telescopi Cherenkov possono essere usati anche per la rivelazione indiretta di CR di alta energia ($E \gtrsim 1 \text{ TeV}$)

Highlights

Selezione molto "personale" di highlights degli ultimi 2-3 anni

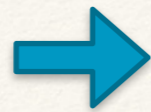
Partecipazione INAF

- ❖ **Ricerca dei PeVatroni**
 - ❖ Energia massima nei SNR
 - ❖ Sorgenti LHAASO
- ❖ **Ammassi stellari**
- ❖ **UHECRs**
 - ❖ Anisotropie
 - ❖ Composizione chimica
- ❖ **Impatto dei Raggi cosmici in altri settori dell'astrofisica**
 - ❖ Venti galattici
 - (RS2) ❖ Interazione di CR con nubi molecolari

Highlights: Energia massima nei resti di supernovae

Anni 2015-2020

Energia massima agli shock di
SNR imponendo $t_{\text{acc}} = t_{\text{ST}}$



$$E_{\text{max}} \simeq 5 \times 10^{13} \mathcal{F}(k_{\text{max}}) \left(\frac{B_0}{\mu\text{G}} \right) \left(\frac{M_{\text{ej}}}{M_{\odot}} \right)^{-1/6} \left(\frac{E_{\text{SN}}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{1/2} \left(\frac{n_{\text{ism}}}{\text{cm}^{-3}} \right)^{-1/3} \text{ eV}$$

$E_{\text{max}} > 100 \text{ TeV}$ richiede $\delta B/B_0 \gg 1$ possibile
solo con l'instabilità di streaming non-
risonante [Bell (2004)]

Highlights: Energia massima nei resti di supernovae

Anni 2015-2020

Energia massima agli shock di SNR imponendo $t_{\text{acc}} = t_{\text{ST}}$



$$E_{\text{max}} \simeq 5 \times 10^{13} \mathcal{F}(k_{\text{max}}) \left(\frac{B_0}{\mu G} \right) \left(\frac{M_{\text{ej}}}{M_{\odot}} \right)^{-1/6} \left(\frac{E_{\text{SN}}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{1/2} \left(\frac{n_{\text{ism}}}{\text{cm}^{-3}} \right)^{-1/3} \text{ eV}$$

$E_{\text{max}} > 100 \text{ TeV}$ richiede $\delta B/B_0 \gg 1$ possibile solo con l'instabilità di streaming non-risonante [Bell (2004)]

Cristofari, Blasi & Amato (2020)

Confronto con lo spettro osservato a Terra

Parametri per diversi tipi di SNe

Type	Ia	II	II*
$M_{\text{ej}} [M_{\text{Sol}}]$	1.4	5	1
$E_{\text{SN}} [10^{51} \text{ erg}]$	1	1	10
$M_{\text{wind}} [10^{-5} M_{\text{Sol}}/\text{yr}]$	—	1	10
$v_{\text{wind}} [10 \text{ km/s}]r$	—	1	1
$r_1 [\text{pc}]$	—	1.5	1.3

Highlights: Energia massima nei resti di supernovae

Anni 2015-2020

Energia massima agli shock di SNR imponendo $t_{\text{acc}} = t_{\text{ST}}$



$$E_{\text{max}} \simeq 5 \times 10^{13} \mathcal{F}(k_{\text{max}}) \left(\frac{B_0}{\mu\text{G}} \right) \left(\frac{M_{\text{ej}}}{M_{\odot}} \right)^{-1/6} \left(\frac{E_{\text{SN}}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{1/2} \left(\frac{n_{\text{ism}}}{\text{cm}^{-3}} \right)^{-1/3} \text{ eV}$$

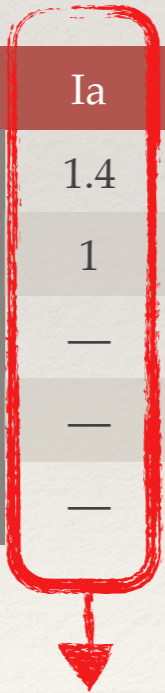
$E_{\text{max}} > 100 \text{ TeV}$ richiede $\delta B/B_0 \gg 1$ possibile solo con l'instabilità di streaming non-risonante [Bell (2004)]

Cristofari, Blasi & Amato (2020)

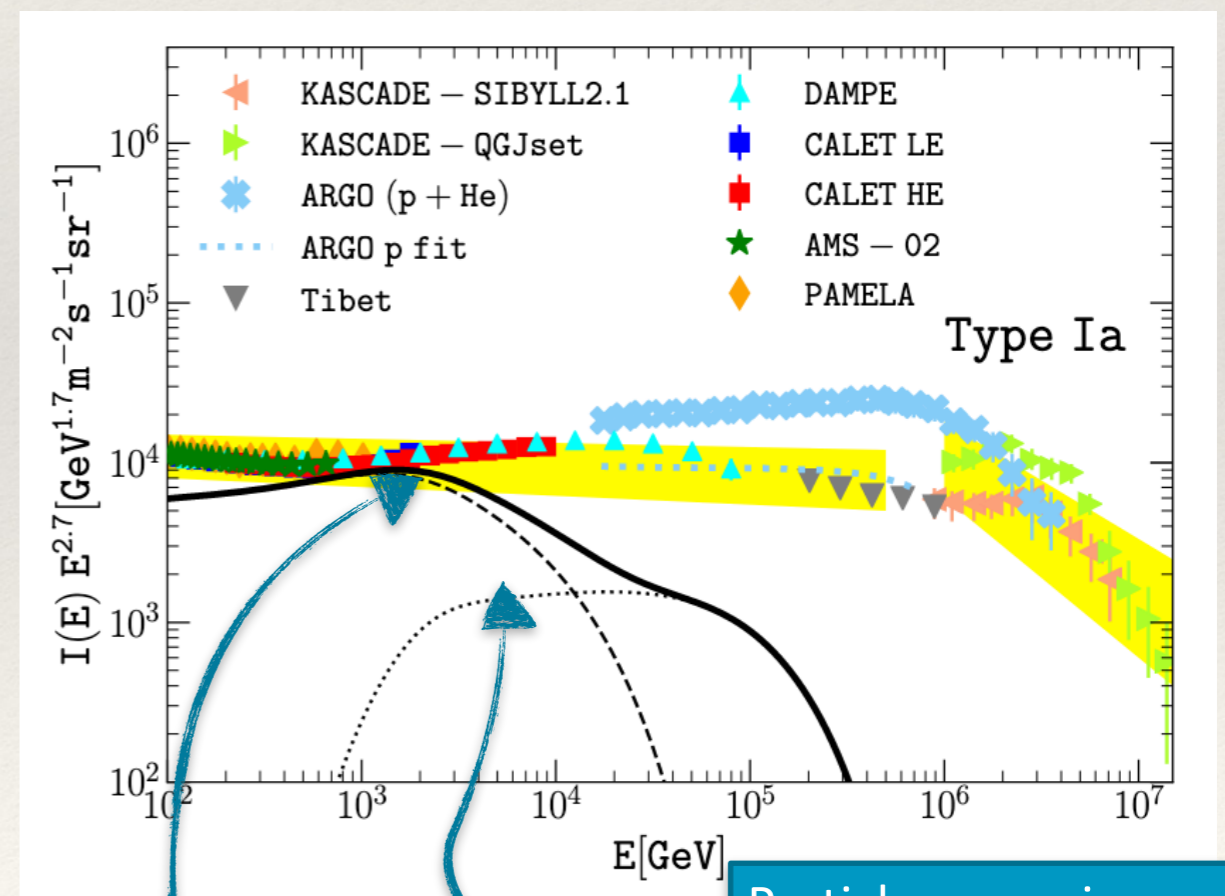
Confronto con lo spettro osservato a Terra

Parametri per diversi tipi di SNe

Type	Ia	II	II*
$M_{\text{ej}} [M_{\text{Sol}}]$	1.4	5	1
$E_{\text{SN}} [10^{51} \text{ erg}]$	1	1	10
$M_{\text{wind}} [10^{-5} M_{\text{Sol}}/\text{yr}]$	—	1	10
$v_{\text{wind}} [10 \text{ km/s}]r$	—	1	1
$r_1 [\text{pc}]$	—	1.5	1.3



$$\text{Rate} = \frac{1}{100 \text{ yr}} ; \xi_{\text{CR}} = 0.1$$



Confined particles

Particles escaping during the acceleration

Highlights: Energia massima nei resti di supernovae

Anni 2015-2020

Energia massima agli shock di SNR imponendo $t_{\text{acc}} = t_{\text{ST}}$



$$E_{\text{max}} \simeq 5 \times 10^{13} \mathcal{F}(k_{\text{max}}) \left(\frac{B_0}{\mu\text{G}} \right) \left(\frac{M_{\text{ej}}}{M_{\odot}} \right)^{-1/6} \left(\frac{E_{\text{SN}}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{1/2} \left(\frac{n_{\text{ism}}}{\text{cm}^{-3}} \right)^{-1/3} \text{ eV}$$

$E_{\text{max}} > 100 \text{ TeV}$ richiede $\delta B/B_0 \gg 1$ possibile solo con l'instabilità di streaming non-risonante [Bell (2004)]

Cristofari, Blasi & Amato (2020)

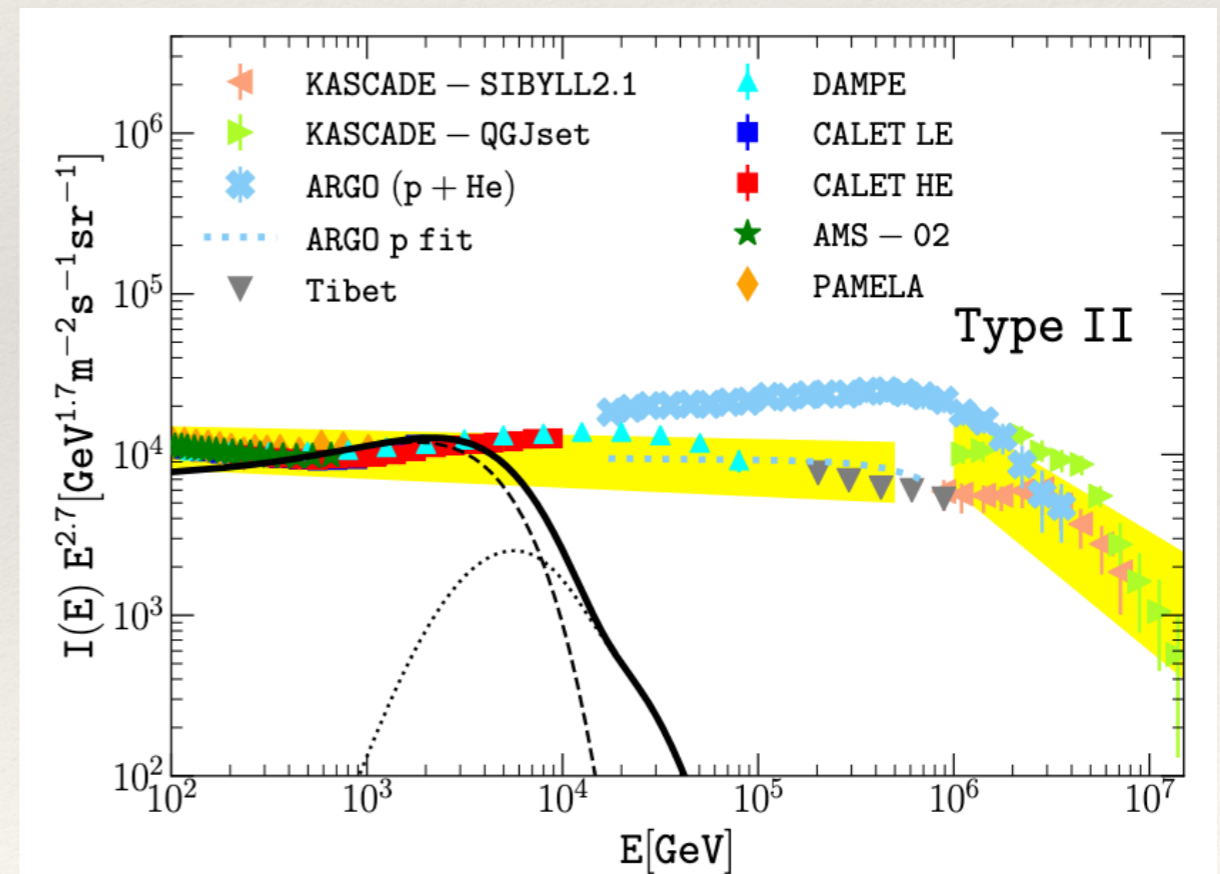
Confronto con lo spettro osservato a Terra

Parametri per diversi tipi di SNe

Type	Ia	II	II*
$M_{\text{ej}} [M_{\text{Sol}}]$	1.4	5	1
$E_{\text{SN}} [10^{51} \text{ erg}]$	1	1	10
$M_{\text{wind}} [10^{-5} M_{\text{Sol}}/\text{yr}]$	—	1	10
$v_{\text{wind}} [10 \text{ km/s}]r$	—	1	1
$r_1 [\text{pc}]$	—	1.5	1.3



$$\text{Rate} = \frac{2}{100 \text{ yr}} ; \xi_{\text{CR}} = 0.06$$



Highlights: Energia massima nei resti di supernovae

Anni 2015-2020

Energia massima agli shock di SNR imponendo $t_{\text{acc}} = t_{\text{ST}}$



$$E_{\text{max}} \simeq 5 \times 10^{13} \mathcal{F}(k_{\text{max}}) \left(\frac{B_0}{\mu\text{G}} \right) \left(\frac{M_{\text{ej}}}{M_{\odot}} \right)^{-1/6} \left(\frac{E_{\text{SN}}}{10^{51} \text{ erg}} \right)^{1/2} \left(\frac{n_{\text{ism}}}{\text{cm}^{-3}} \right)^{-1/3} \text{ eV}$$

$E_{\text{max}} > 100 \text{ TeV}$ richiede $\delta B/B_0 \gg 1$ possibile solo con l'instabilità di streaming non-risonante [Bell (2004)]

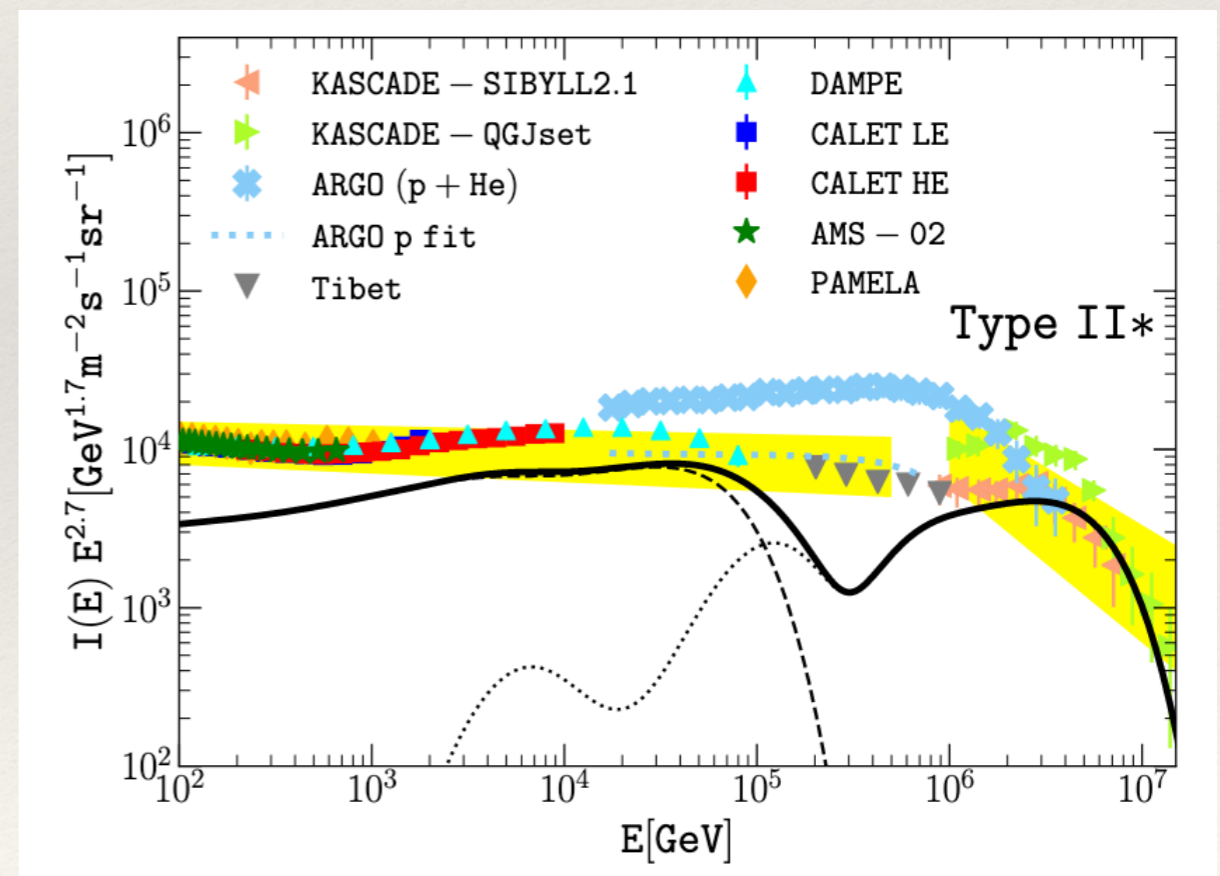
Cristofari, Blasi & Amato (2020)

Confronto con lo spettro osservato a Terra

Parametri per diversi tipi di SNe

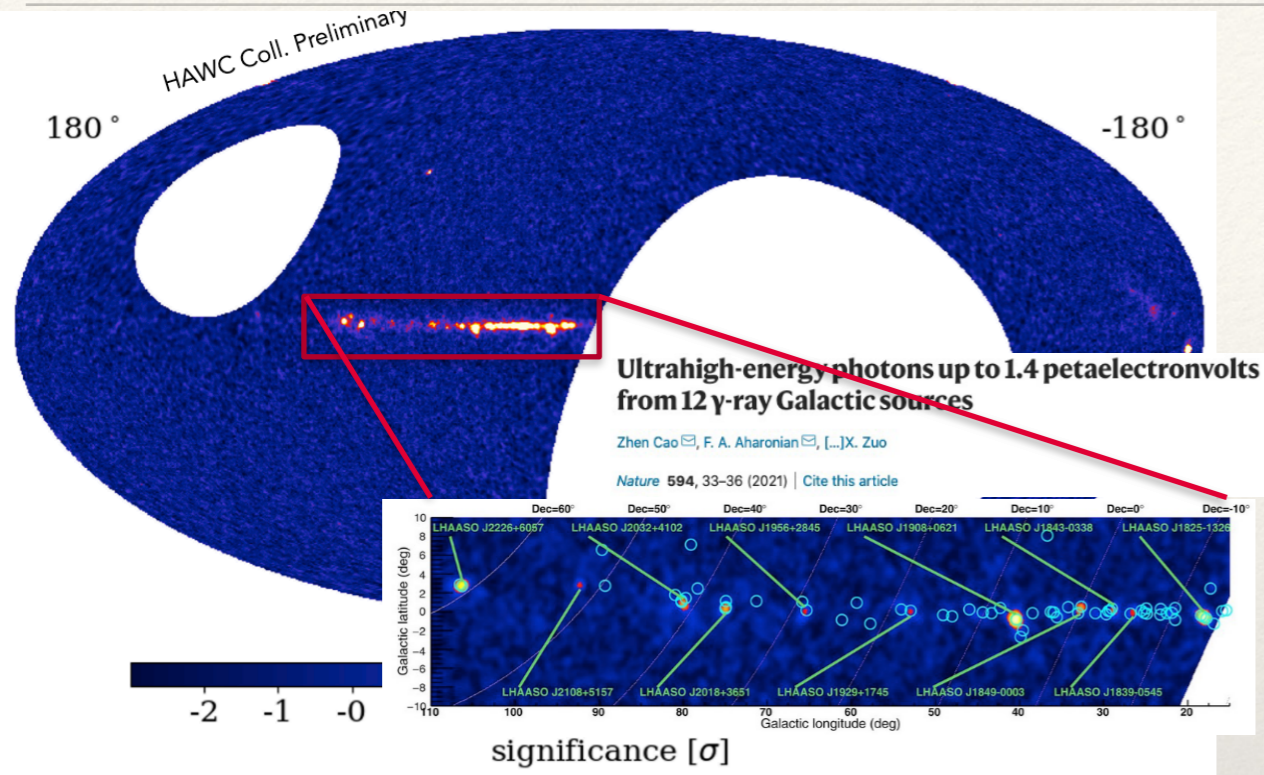
Type	Ia	II	II*
$M_{\text{ej}} [M_{\text{Sol}}]$	1.4	5	1
$E_{\text{SN}} [10^{51} \text{ erg}]$	1	1	10
$M_{\text{wind}} [10^{-5} M_{\text{Sol}}/\text{yr}]$	—	1	10
$v_{\text{wind}} [10 \text{ km/s}]r$	—	1	1
$r_1 [\text{pc}]$	—	1.5	1.3

$$\text{Rate} = \frac{3}{10000 \text{ yr}} ; \xi_{\text{CR}} = 0.1$$



Highlights: sorgenti LHAASO

Anno 2021



LHAASO ha osservato 12 sorgenti con emissione gamma $E > 100$ TeV

- Maggioranza di pulsar
- Poche SNRs
- 2 ammassi stellari

Associazione incerta dovuta alla cattiva risoluzione angolare



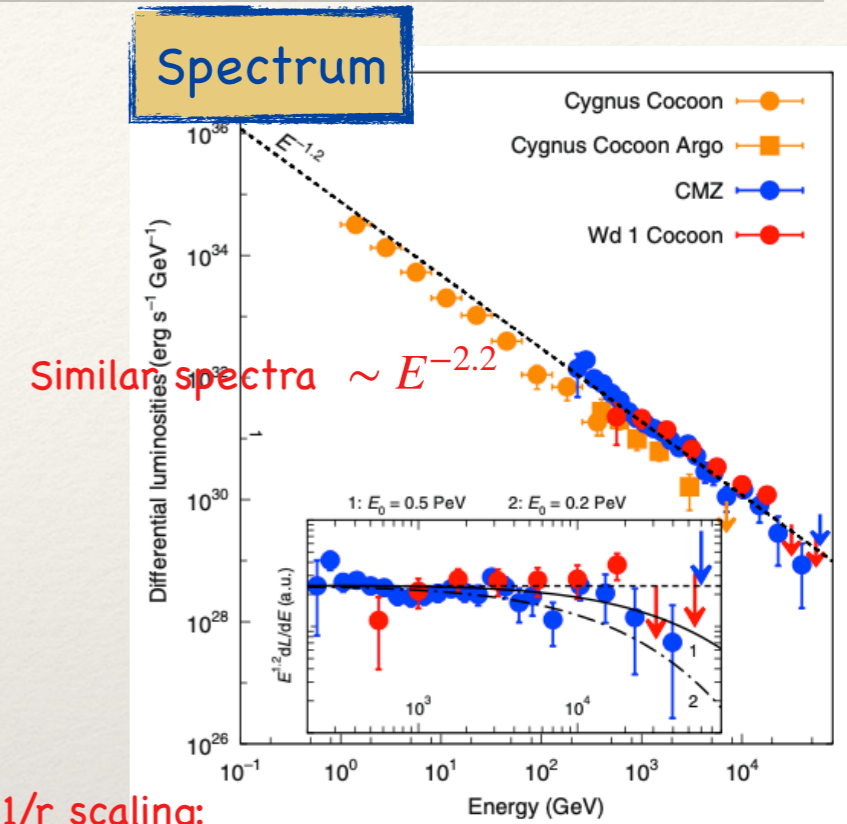
Necessità di avere strumenti ad alta risoluzione spaziale

LHAASO Source	Possible Origin	Type	Distance (kpc)	Age (kyr) ^a	L_s (erg/s) ^b	Potential TeV Counterpart ^c
LHAASO J0534+2202	PSR J0534+2200	PSR	2.0	1.26	4.5×10^{38}	Crab, Crab Nebula
LHAASO J1825-1326	PSR J1826-1334	PSR	3.1 ± 0.2^d	21.4	2.8×10^{36}	HESS J1825-137, HESS J1826-130,
	PSR J1826-1256	PSR	1.6	14.4	3.6×10^{36}	2HWC J1825-134
LHAASO J1839-0545	PSR J1837-0604	PSR	4.8	33.8	2.0×10^{36}	2HWC J1837-065, HESS J1837-069,
	PSR J1838-0537	PSR	1.3 ^e	4.9	6.0×10^{36}	HESS J1841-055
LHAASO J1843-0338	SNR G28.6-0.1	SNR	9.6 ± 0.3^f	$< 2^f$	—	HESS J1843-033, HESS J1844-030,
LHAASO J1849-0003	PSR J1849-0001	PSR	7 ^g	43.1	9.8×10^{36}	HESS J1849-000, 2HWC J1849+001
	W43	YMC	5.5 ^h	—	—	—
LHAASO J1908+0621	SNR G40.5-0.5	SNR	3.4 ⁱ	$\sim 10 - 20^j$	—	MGRO J1908+06, HESS J1908+063,
	PSR 1907+0602	PSR	2.4	19.5	2.8×10^{36}	ARGO J1907+0627, VER J1907+062,
	PSR 1907+0631	PSR	3.4	11.3	5.3×10^{35}	2HWC 1908+063
LHAASO J1929+1745	PSR J1928+1746	PSR	4.6	82.6	1.6×10^{36}	2HWC J1928+177, 2HWC J1930+188,
	PSR J1930+1852	PSR	6.2	2.9	1.2×10^{37}	HESS J1930+188, VER J1930+188
	SNR G54.1+0.3	SNR	$6.3^{+0.8}_-0.7^d$	$1.8 - 3.3^k$	—	—
LHAASO J1956+2845	PSR J1958+2846	PSR	2.0	21.7	3.4×10^{35}	2HWC J1955+285
	SNR G66.0-0.0	SNR	2.3 ± 0.2^d	—	—	—
LHAASO J2018+3651	PSR J2021+3651	PSR	$1.8^{+1.7}_-1.4^l$	17.2	3.4×10^{36}	MGRO J2019+37, VER J2019+368,
	Sh 2-104	H II/YMC	$3.3 \pm 0.3^m / 4.0 \pm 0.5^n$	—	—	VER J2016+371
LHAASO J2032+4102	Cygnus OB2	YMC	1.40 ± 0.08^o	—	—	TeV J2032+4130, ARGO J2031+4157,
	PSR 2032+4127	PSR	1.40 ± 0.08^o	201	1.5×10^{35}	MGRO J2031+41, 2HWC J2031+415,
	SNR G79.8+1.2	SNR candidate	—	—	—	VER J2032+414
LHAASO J2108+5157	—	—	—	—	—	—
LHAASO J2226+6057	SNR G106.3+2.7	SNR	0.8 ^p	$\sim 10^p$	—	VER J2227+608, Boomerang Nebula
	PSR J2229+6114	PSR	0.8 ^p	$\sim 10^p$	2.2×10^{37}	—

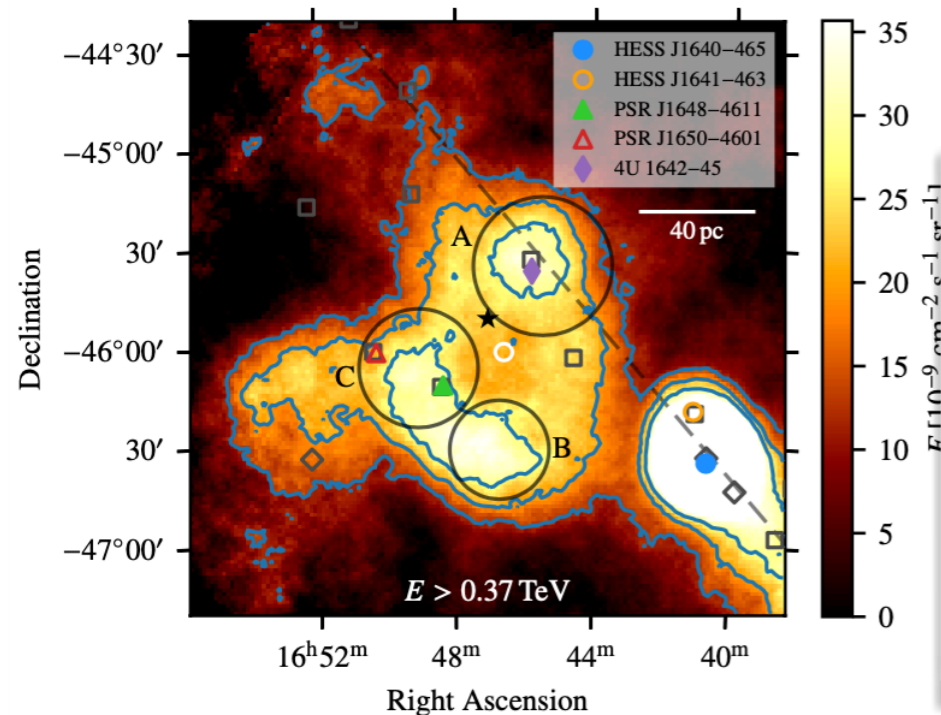
Highlights: ammassi stellari come sorgenti di raggi cosmici

Negli ultimi anni ~10 ammassi stellari giovani sono stati associati a sorgenti gamma

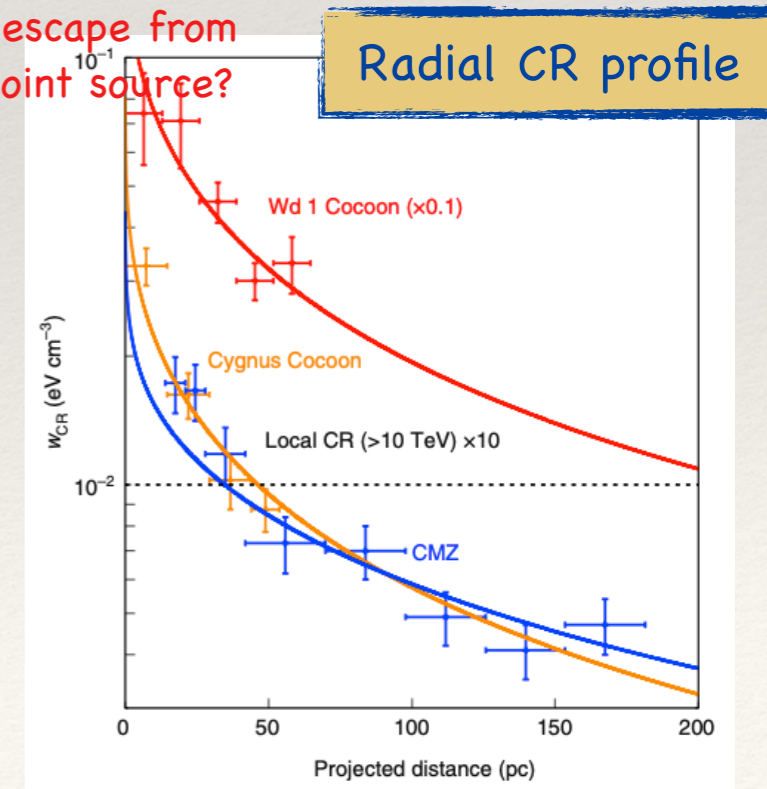
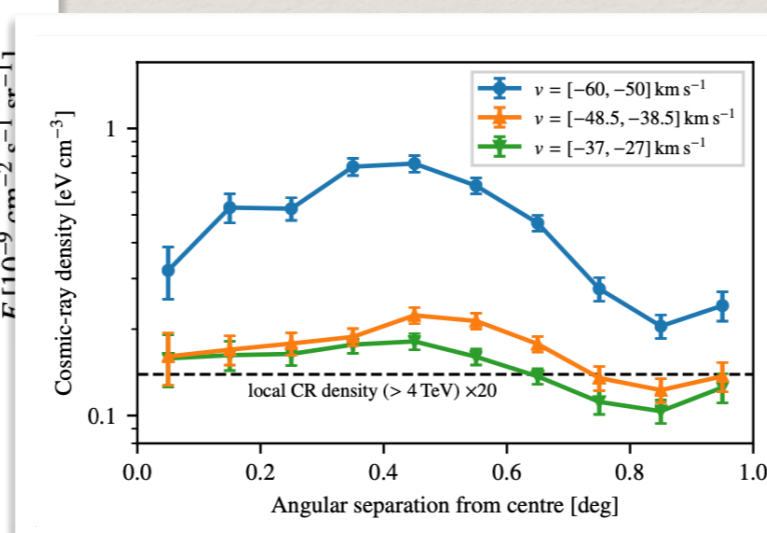
- Sorgenti estese \Rightarrow difficili da studiare
- Profilo spaziale piatto o decrescente $\propto 1/r \Rightarrow$ competizione tra avvezione e diffusione?
- Spettri relativamente duri $\propto E^{-2.2} \Rightarrow$ probabile origine adronica
- Energia massima > 100 TeV \Rightarrow candidati PeVatroni



Westerlund 1 [HESS coll. A&A (2022)]



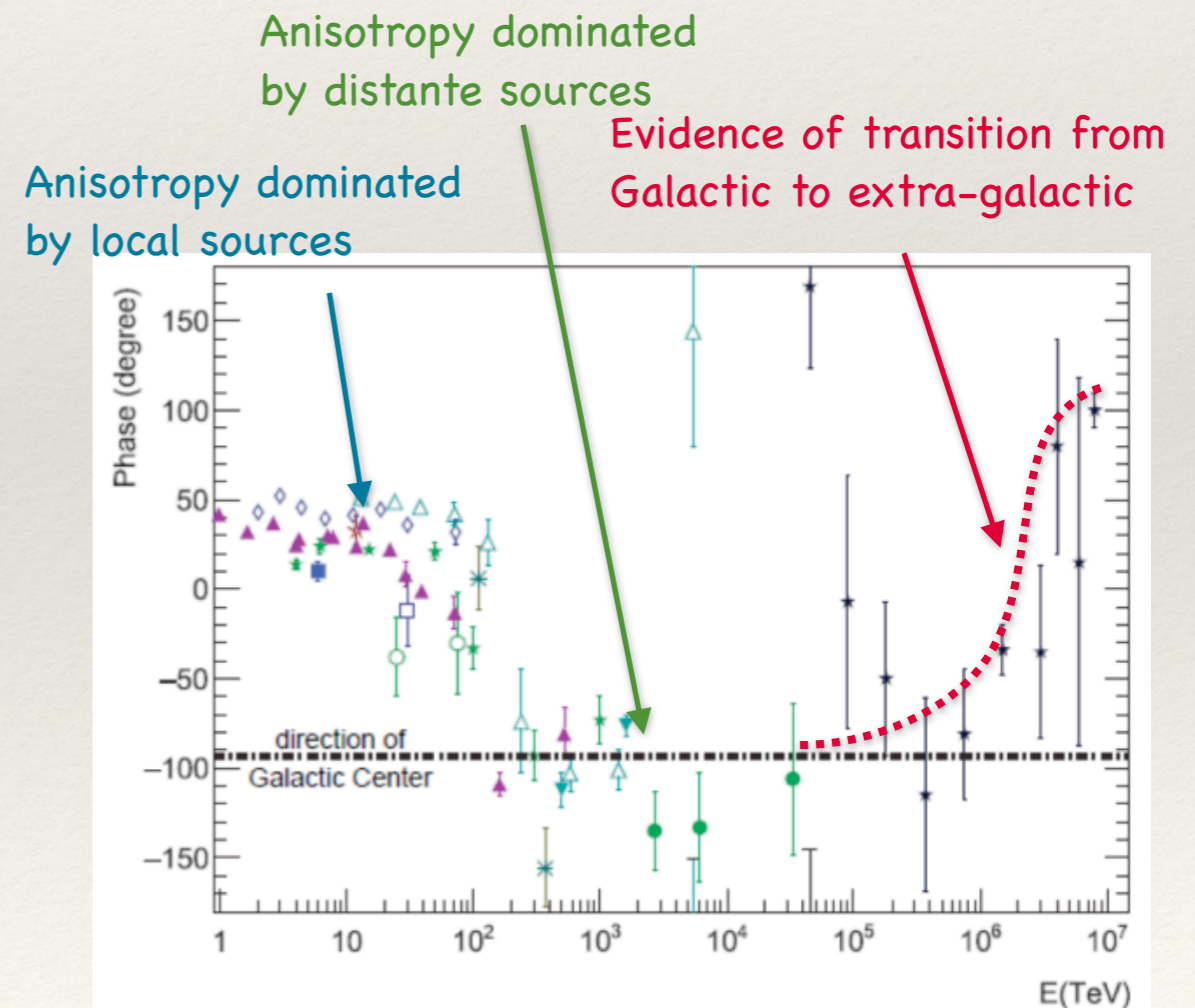
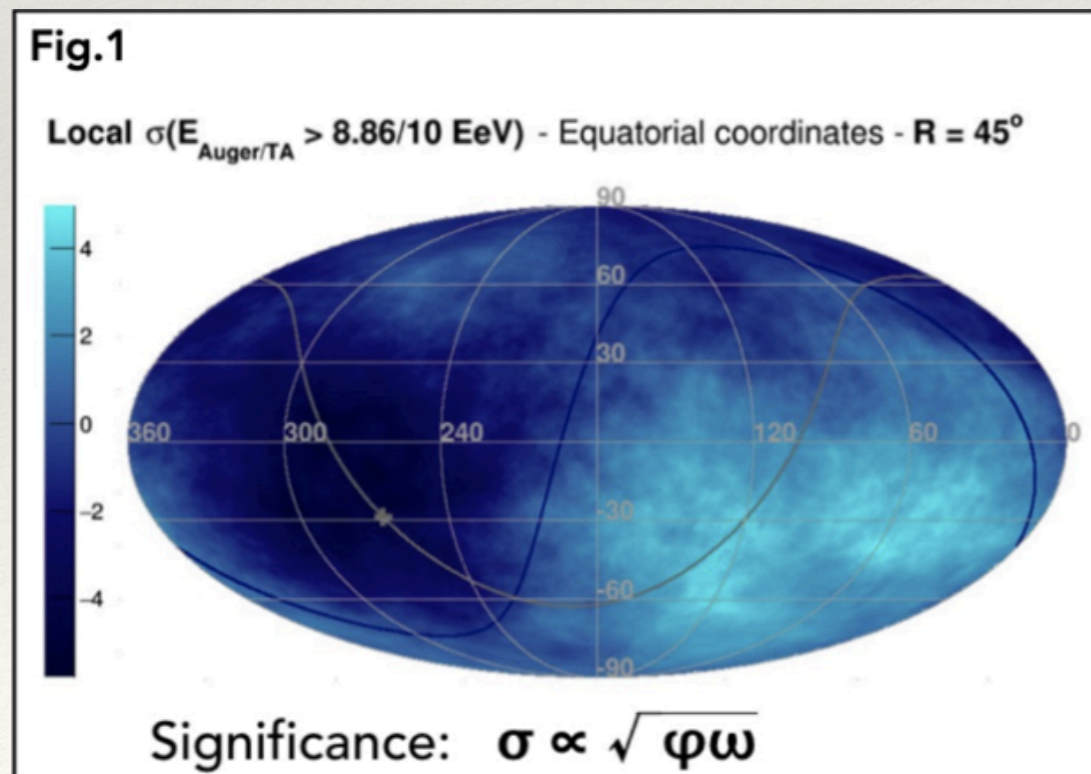
1/r scaling:
CR diffusive escape from
continuous point source?



Highlights: UHECRs

Anisotropia su larga scala

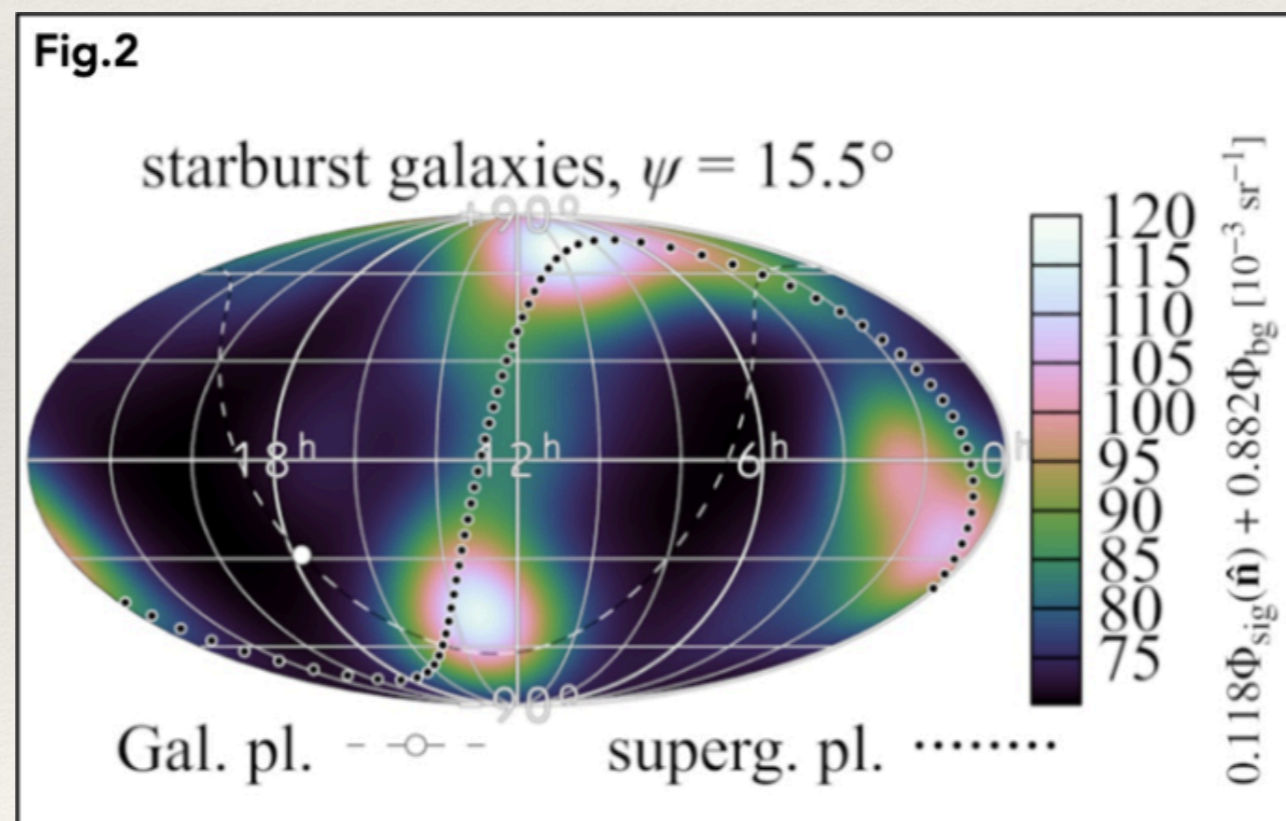
L'osservazione di una modulazione dipolare sopra 8×10^{18} eV e' confermata a $>5\sigma$. L'estensione della misura della sua ampiezza e fase su più di 3 ordini di grandezza permette di confermare l'origine Galattica dei UHECR al di sotto di 10^{18} eV, mentre la direzione del dipolo favorisce un'origine extra-Galattica ad energie superiori



Highlights: UHECRs

Anisotropia intermedia

Misurata una correlazione a livello di 4.5σ tra le direzioni d'arrivo degli UHECR di energia maggiore di 3.8×10^{19} eV e la posizione di Starburst Galaxies dal catalogo di Fermi (NGC4945, M83 nella regione del CentaurusA, NGC253 presso il Polo Sud Galattico)

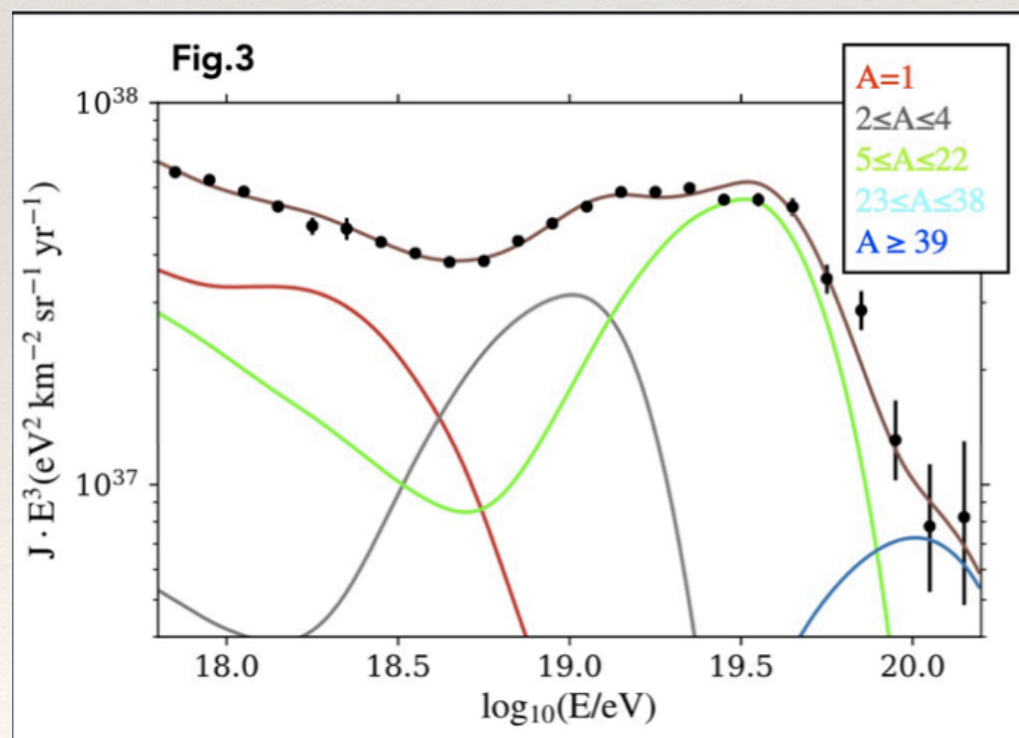


Highlights: UHECRs

Composizione in massa dei UHECR

Nella regione di transizione Galattica—extra-Galattica (la “caviglia”, attorno a 5×10^{18} eV) la composizione è mista: si può escludere una composizione leggera con una significatività di più di 5σ .

- Questo esclude modelli di transizione in cui la caviglia è generata durante la propagazione per effetto della produzione di coppie nell'interazione tra protoni e campi di radiazione di fondo.
- Esclude sorgenti in grado di accelerare solo mezzo intergalattico (ex. Bow shock di jets da AGN)



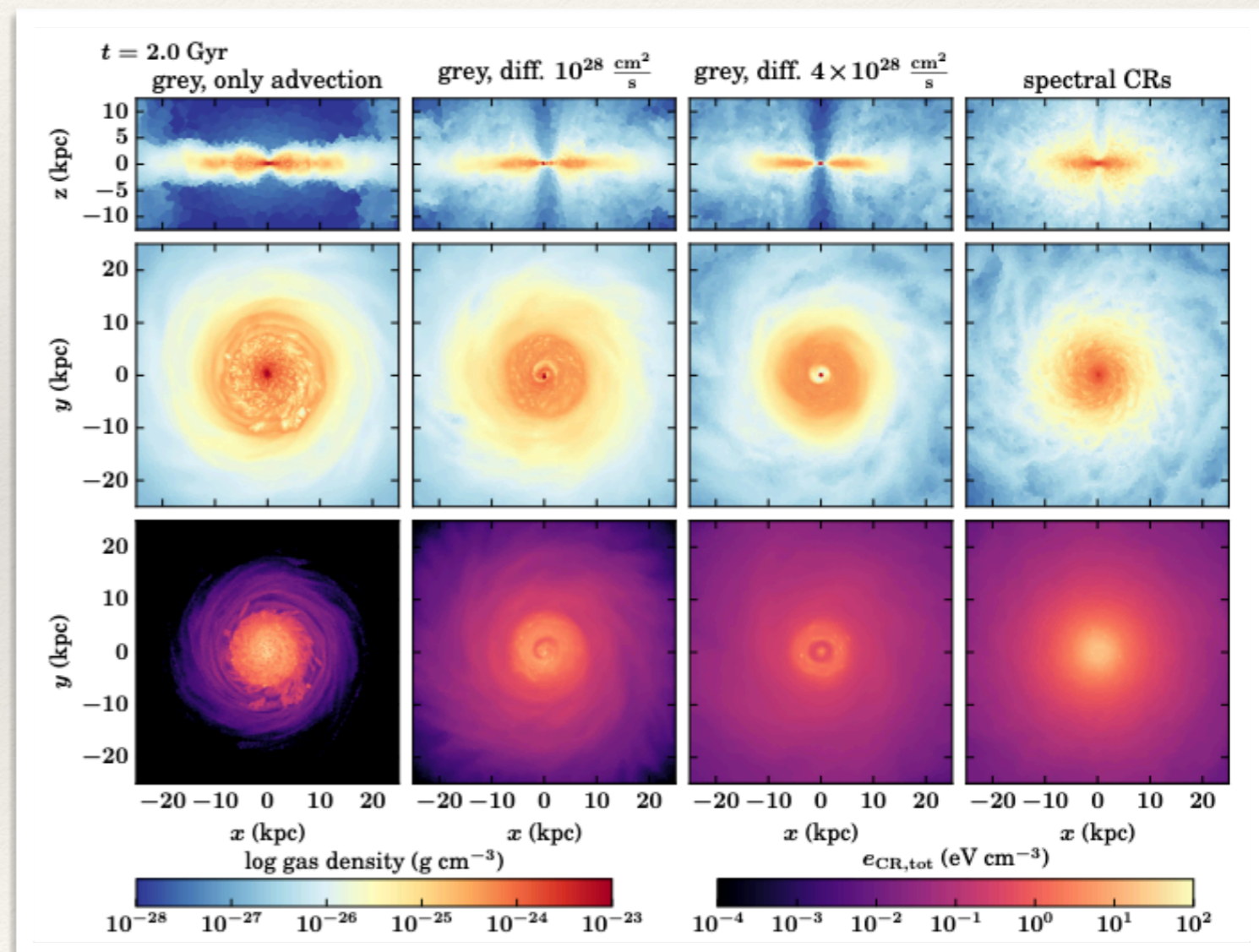
Raggi Cosmici come attori: Legami con altri settori dell'Astrofisica

❖ Evoluzione delle Galassie

- La pressione esercitata dai CR nel piano Galattico può dar vita ad un vento che rimuove gas dalla Galassia
- Tipiche perdite di massa confrontabili con la rate di formazione stellare

$$\dot{M} \approx 1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

Evoluzione di una galassia tipi Via Lattea con e senza CR



Raggi Cosmici come attori: Legami con altri settori dell'Astrofisica

- ❖ **Evoluzione delle Galassie**
- ❖ **Formazione stellare e planetaria**

I CR giocano un ruolo chiave nella chimica e nella dinamica in tutte le fasi della formazione stellare e planetaria:

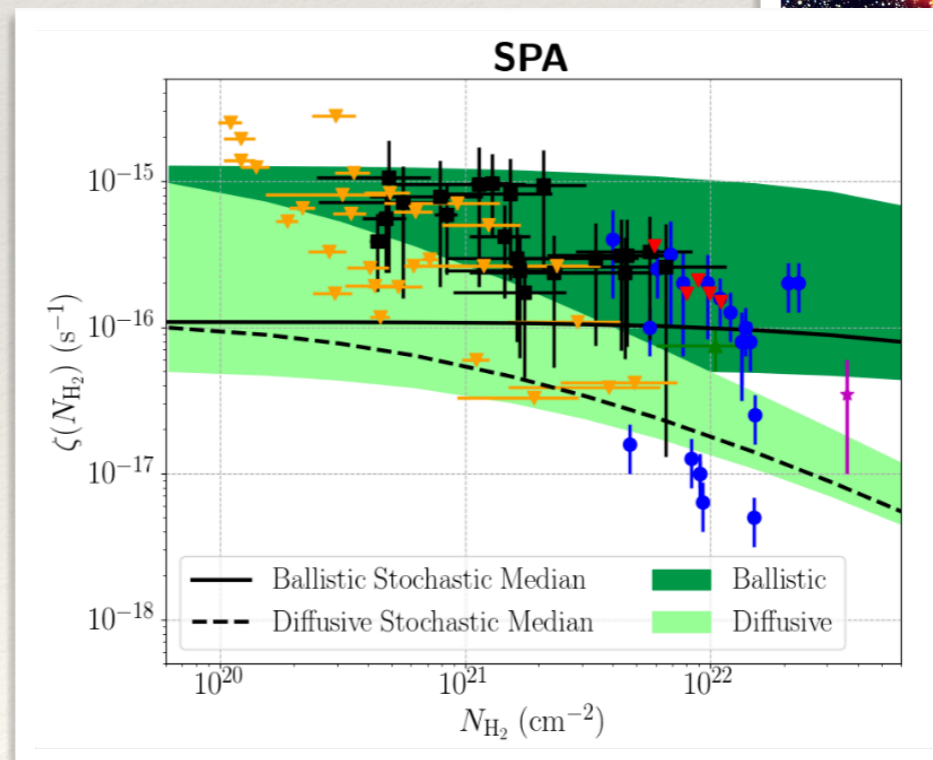
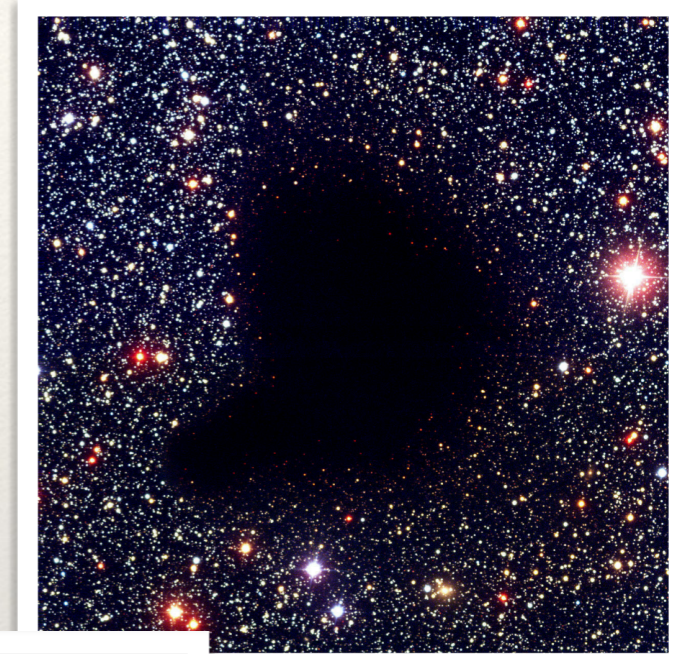
- Nubi molecolari
- Grani di polvere
- Dischi proto-planetari
- Atmosfere dei pianeti

Raggi Cosmici come attori: Legami con altri settori dell'Astrofisica

- ❖ Evoluzione delle Galassie
- ❖ Formazione stellare e planetaria

I CR giocano un ruolo chiave nella chimica e nella dinamica in tutte le fasi della formazione stellare e planetaria:

- Nubi molecolari
- Grani di polvere
- Dischi proto-planetari
- Atmosfere dei pianeti



Raggi Cosmici come attori: Legami con altri settori dell'Astrofisica

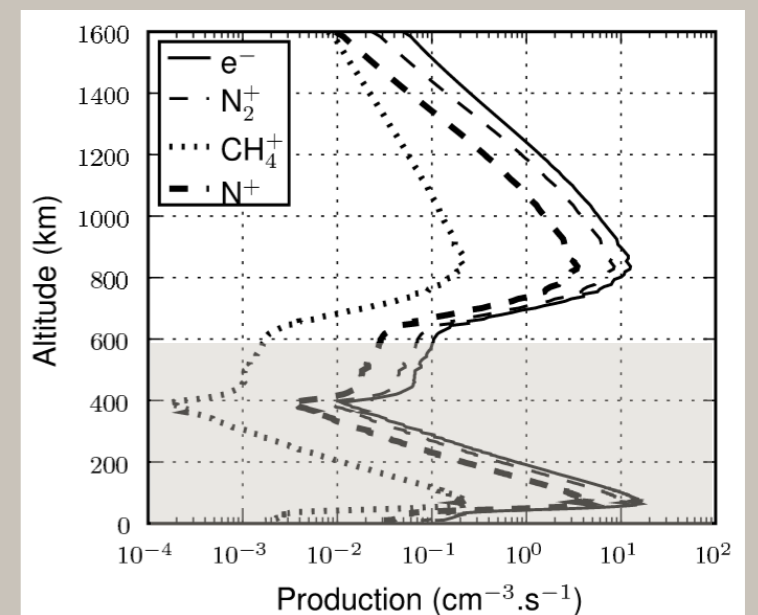
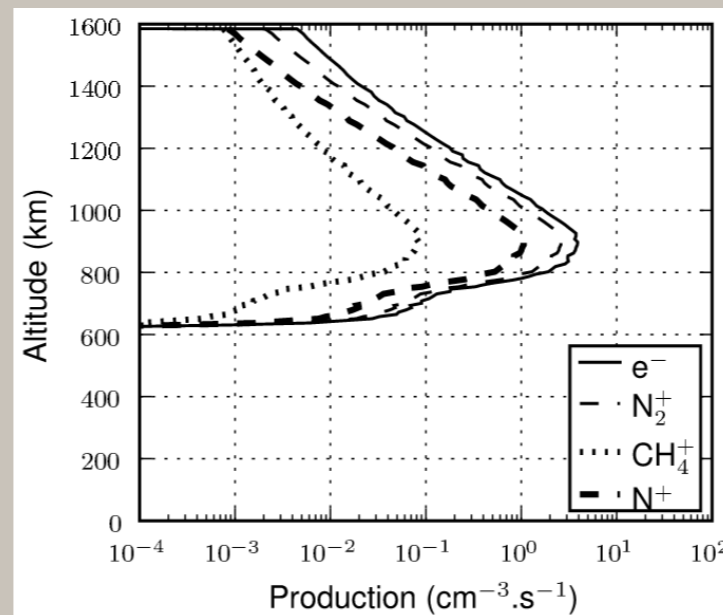
- ❖ Evoluzione delle Galassie
- ❖ Formazione stellare e planetaria

I CR giocano un ruolo chiave nella chimica e nella dinamica in tutte le fasi della formazione stellare e planetaria:

- Nubi molecolari
- Grani di polvere
- Dischi proto-planetari
- Atmosfere dei pianeti



The chemistry in the Titan's atmosphere below 600 km is dominated by the ionisation produced by GCR in the energy range $\text{GeV} < E < \text{TeV}$



Gronoff et al. (A&A 506, 2006)

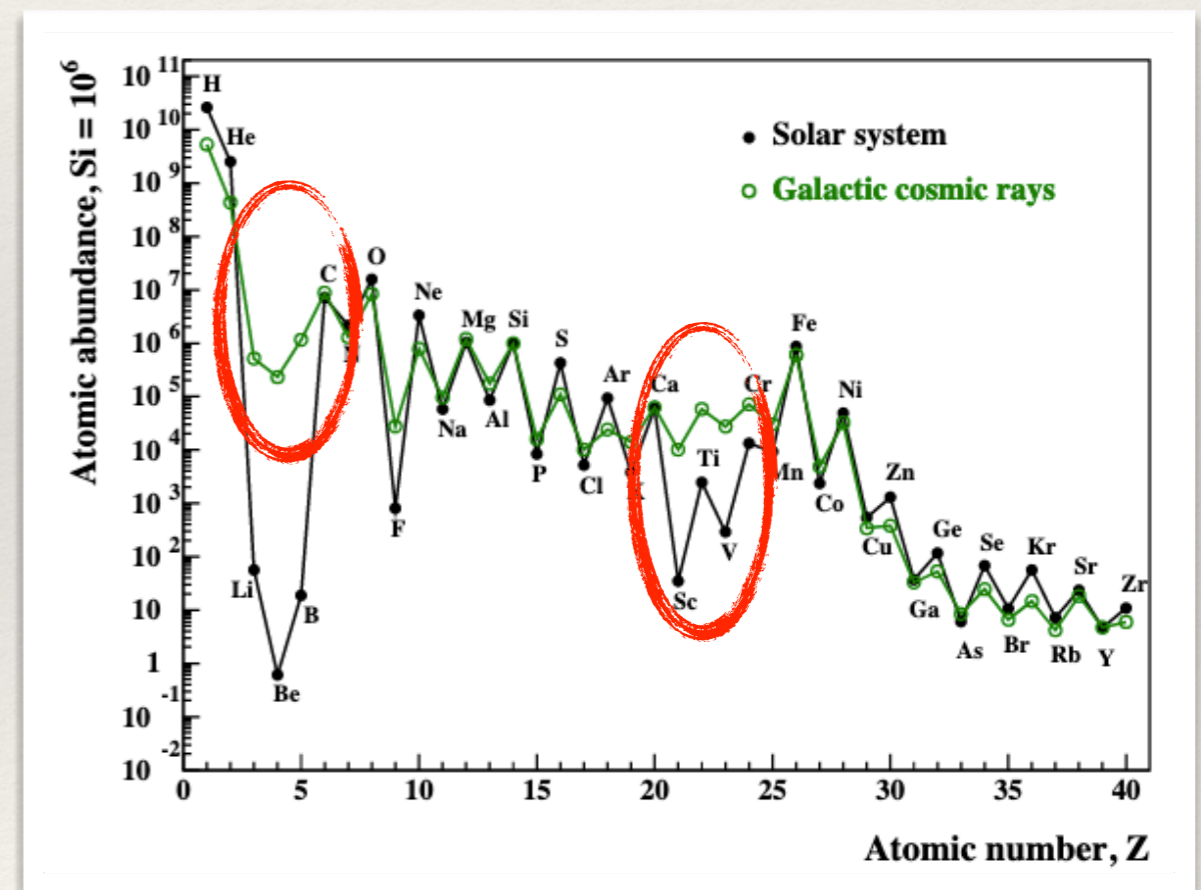
Raggi Cosmici come attori: Legami con altri settori dell'Astrofisica

- ❖ Evoluzione delle Galassie
- ❖ Formazione stellare e planetaria
- ❖ Origine degli elementi

Alcuni elementi (Litio, Berillio e Boro) sono principalmente prodotti dalla spallazione dei raggi cosmici sul mezzo interstellare

[Reeves, Fowler & Hoyle\(1970\)](#)

[Meneguzzi, Audouze & Reeves \(1971\)](#)



Criticità

- ❖ Numerose attività nel settore delle alte energie: possibili sinergie e coordinamento (progetto **AHEAD2020** va in questa direzione) che includa maggiormente anche il settore raggi cosmici
- ❖ Personale numeroso ed investimenti importanti per esperimenti nella banda gamma (ASTRI, CTA) → necessità di preparare il terreno per le scoperte future:
 - ❖ Preparazione del personale ai nuovi tool di analisi
 - ❖ Necessità di adeguate competenze teoriche per l'interpretazione dei dati
- ❖ Mancanza di personale principalmente nel settore della detection diretta (Auger)
 - Forte criticità nell'acquisizione di risorse umane: l'Osservatorio è in fase di deployment dell'Upgrade, che in particolare include la messa in opera di nuova elettronica e il primo utilizzo nella fisica astroparticellare di ultra-high energy di un apparato radio (1660 antenne operanti nella regione di frequenza 20-80 MHz, da installare su ognuna delle stazioni del rivelatore di superficie). Occorrono giovani ricercatori con esperienza nel campo dei rivelatori (in particolare fotomoltiplicatori e antenne radio) e con esperienza nell'analisi statistica dei dati.