

高エネルギー宇宙物理学

井岡 邦仁 (KEK)

理論懇シンポ 2010.12.21 京都

Thanks to
大平、川中、水田 (KEK)
檜山 (京都)



林先生との逸話

林先生は毎週土曜、京大にいられていた。

林先生
~75歳



君、いま
何をしています？



井岡
MI

いま、MIっす。
早く研究したいっす。



おい! General
Educationを
なめとんのか!!

の逸話

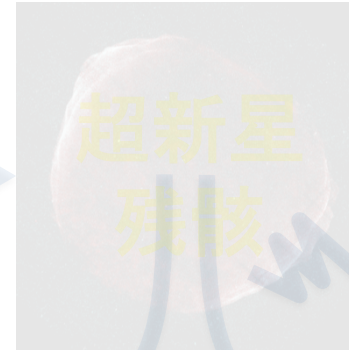
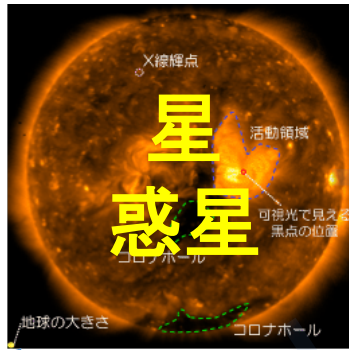
に来られていた。



1時間のご指導(説教)
その後、井岡は改心、
まじめに基礎勉強。
現在の土台に。

研究の発展

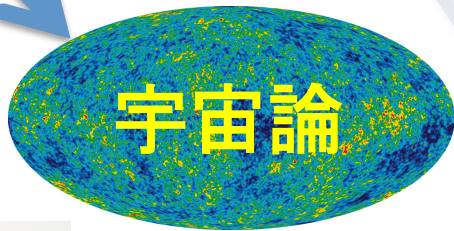
Dark Matter
 相対論の破れ
 Axion



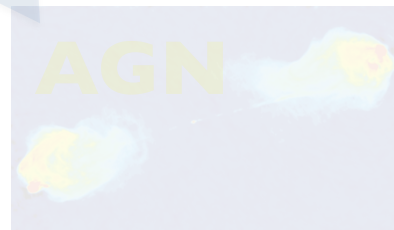
GeV SNR
 宇宙線脱出
 PeVatronは?



林先生



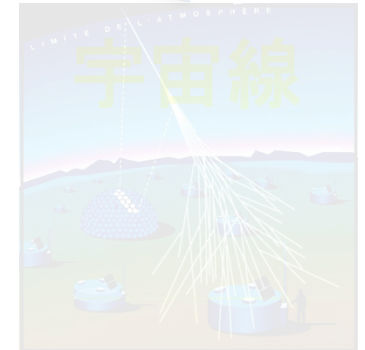
GeV成分発見
 光球 vs 磁場モデル
 超新星Breakout



Blazar Sequence
 Off-axis、変動、偏光
 GeV電波ローブ



2M_⊙中性子星
 Outergap
 Crab変動
 GeV-TeV PWN



e⁺ 超過
 He 超過
 UHECR Fe?

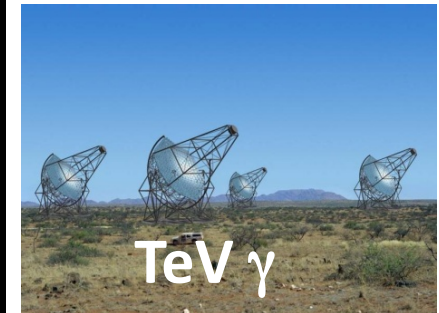
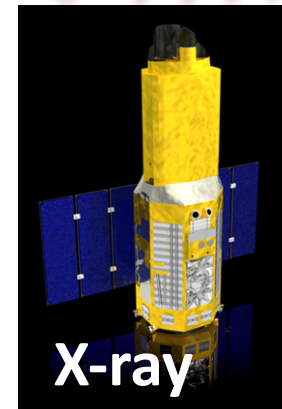
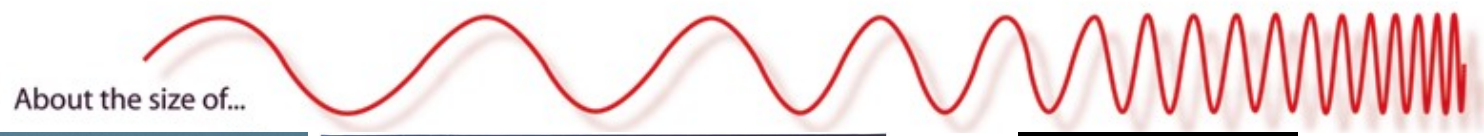


PIC電子加速
 3D rela. MHD
 Jet/降着円盤

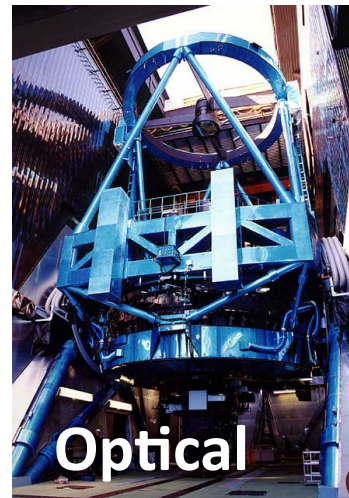
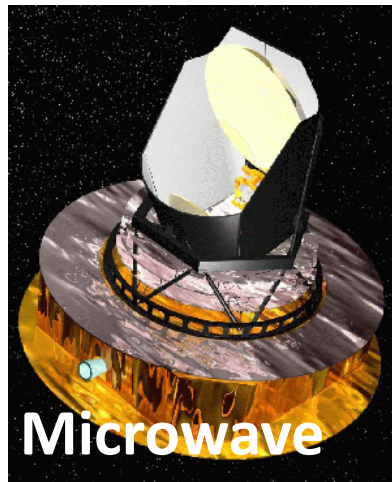
さまざまな高エネルギー源

多波長、特に高エネルギーへ

Wavelength
(meters)



20世紀:
多波長観測
特に近年
X- γ -VHE γ



TeV = 10^{12} eV
GeV = 10^9 eV

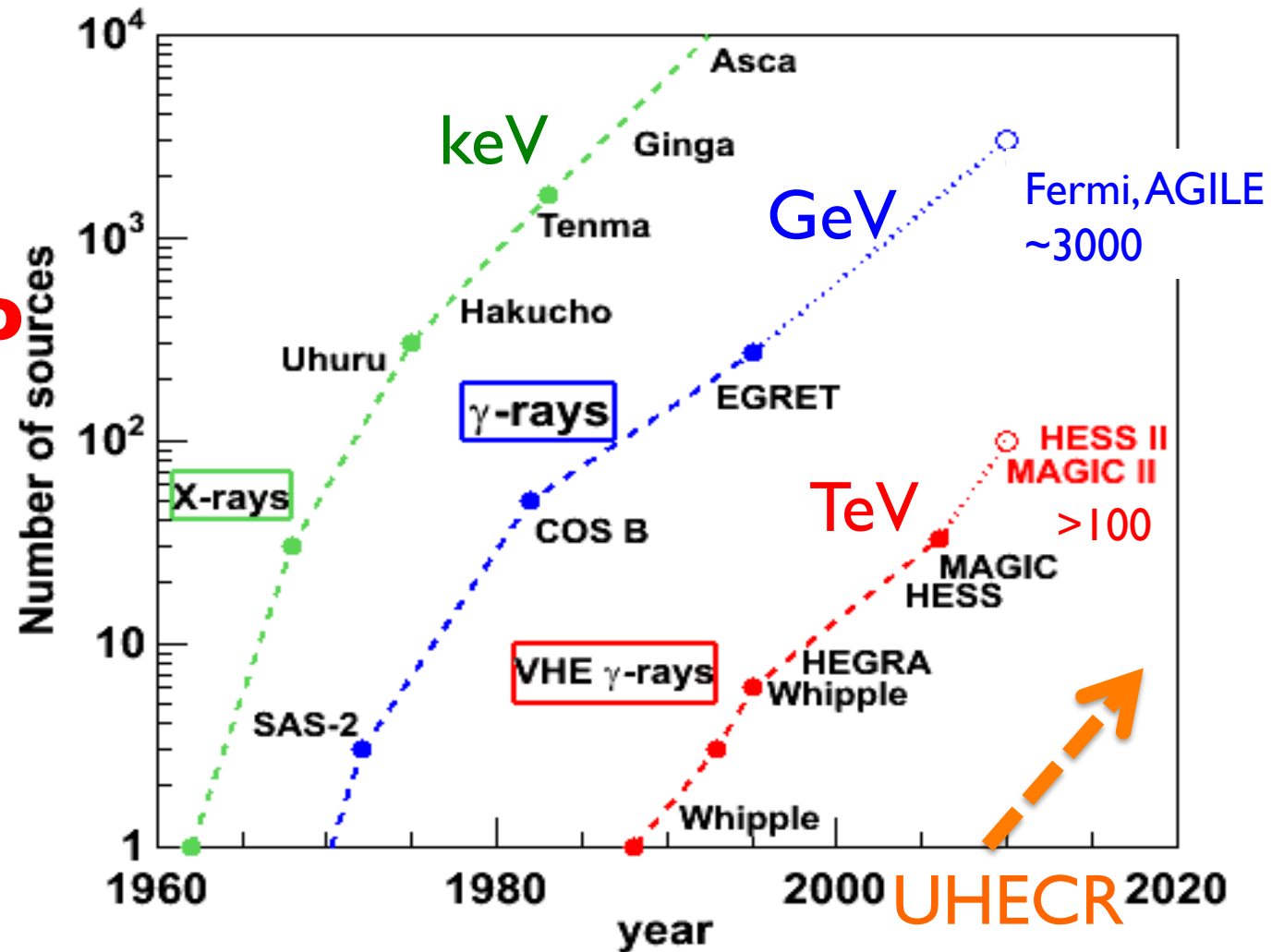
高エネルギー一天体数

Kifune Plot

- 天体数は指数的に増加中

- **HE Astro**

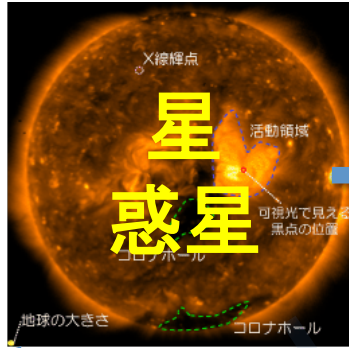
1. 起源・機構の解明
2. ⇒ 星・銀河・宇宙論
3. 物理法則の検証



UHECR
 ν , 重力波

研究の発展

Dark Matter
相対論の破れ
Axion

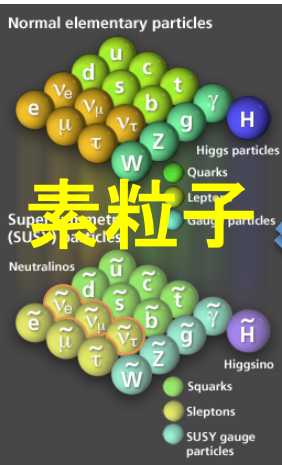




GeV成分発見
光球 vs 磁場モデル
超新星Breakout

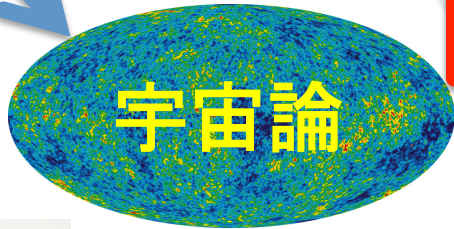


GeV SNR
宇宙線脱出
PeVatronは?

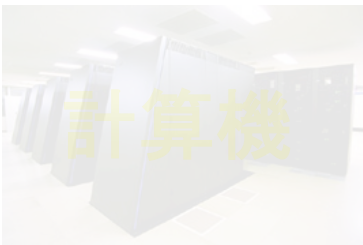


素粒子

林先生



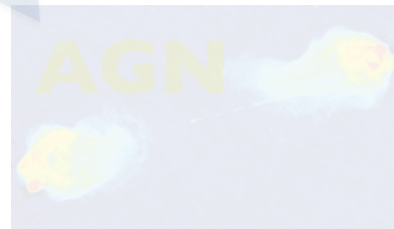
宇宙論



計算機

PIC粒子加速
3D rela. MHD
Jet/降着円盤

High-z/初代 GRB
EBL
銀河間磁場
GeV背景放射



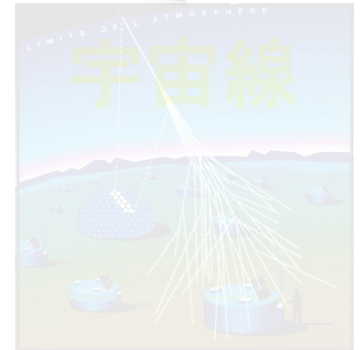
AGN

Blazar Sequence
Off-axis、変動、偏光
GeV電波ローブ



コンパクト星

2M_⊙中性子星
Outergap
Crab変動
GeV-TeV PWN



宇宙線

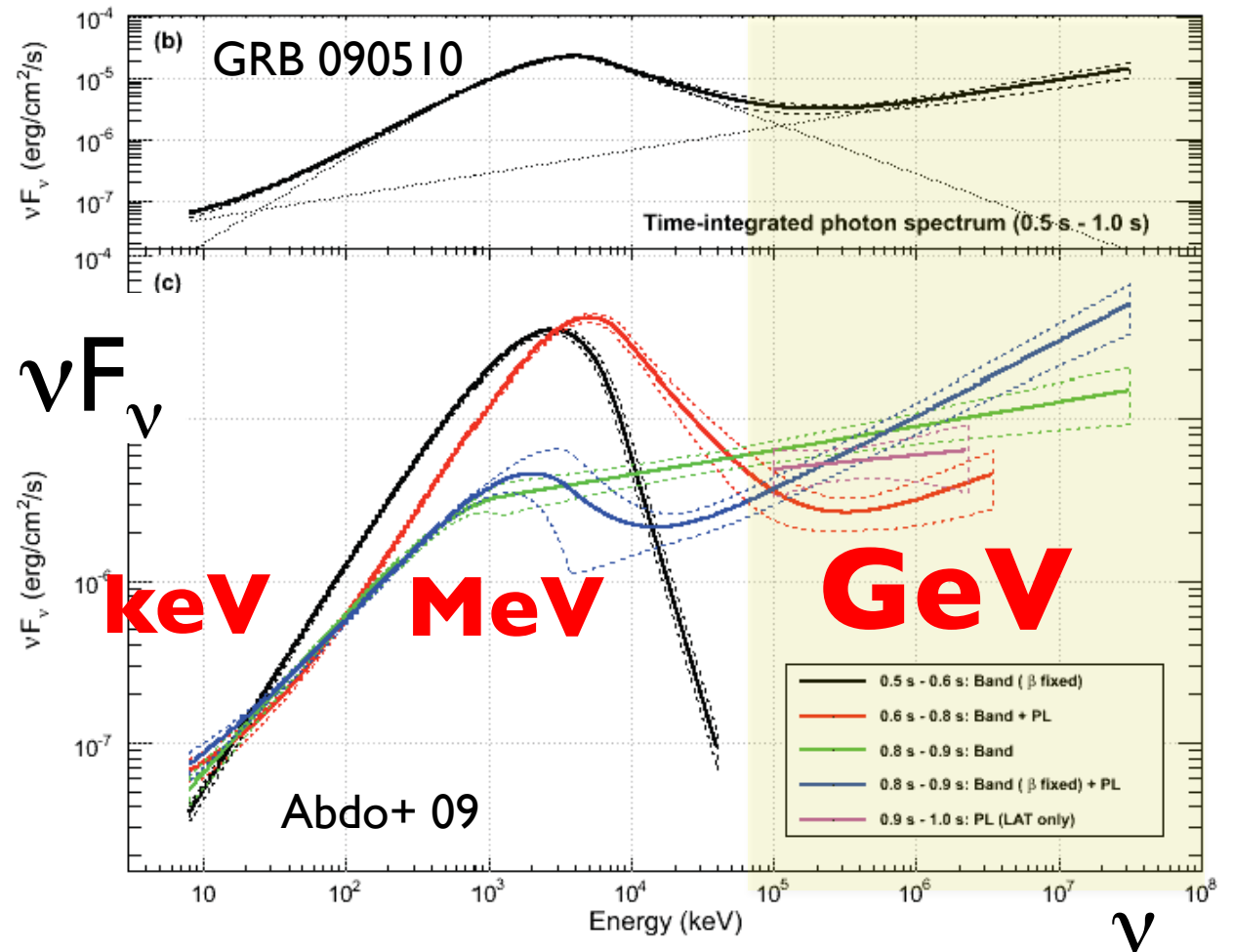
e⁺ 超過
He 超過
UHECR Fe?

さまざまな高エネルギー源

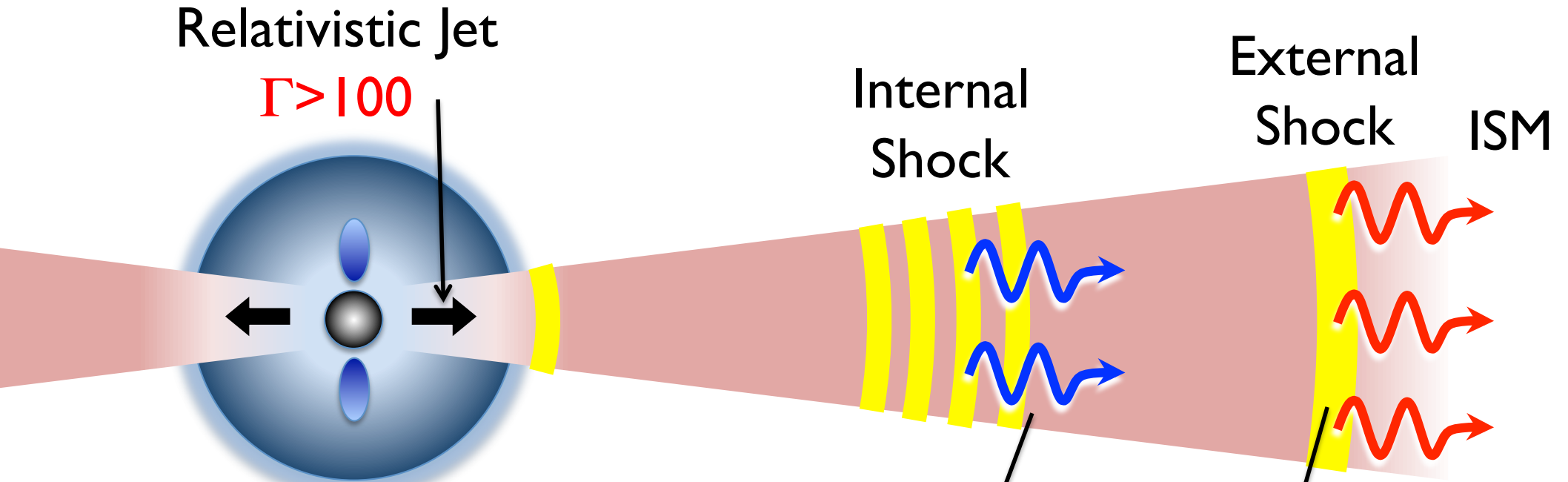
>GeV ガンマ線バースト



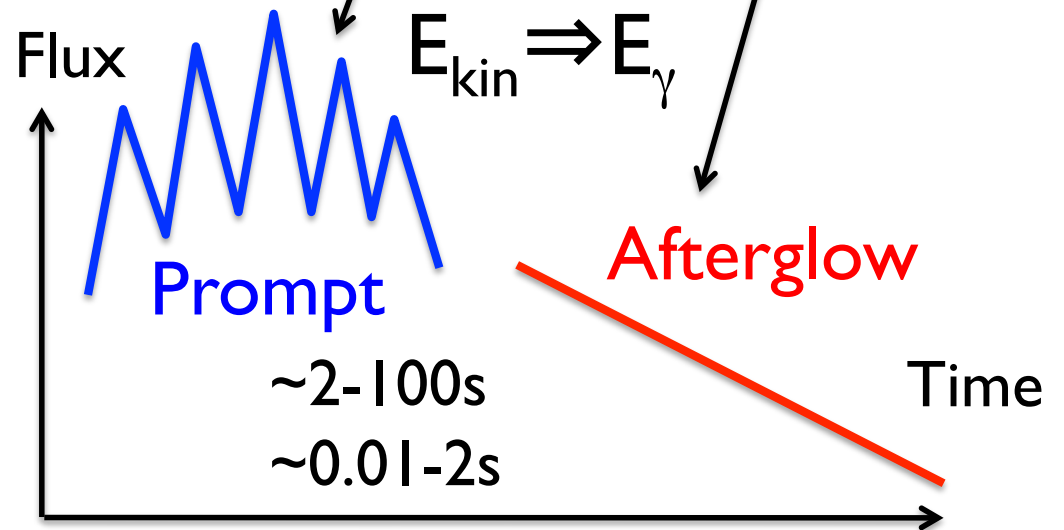
>GeV γ from ~ 20 GRBs



標準モデルの修正



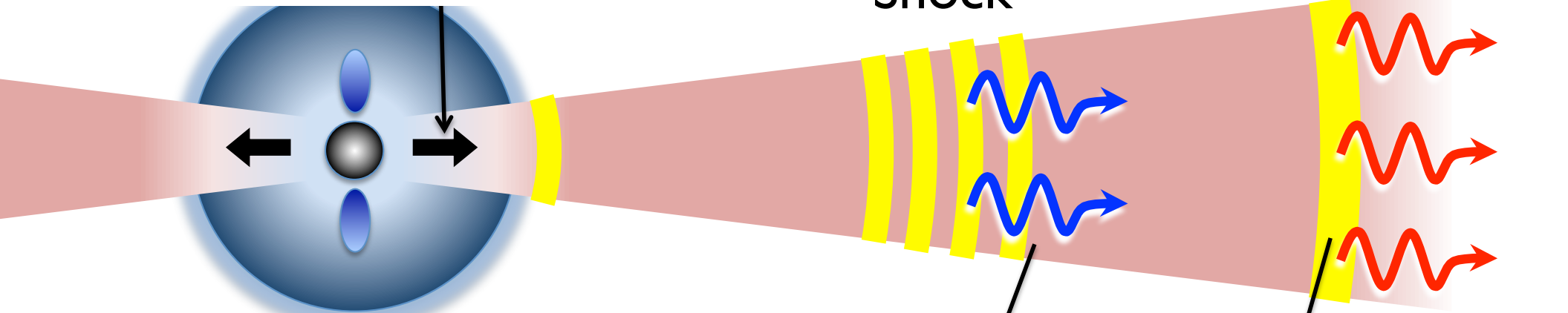
$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^- \Rightarrow \Gamma > 1000?$
長時間 \Rightarrow Afterglow?
変動 \Rightarrow Internal shock?
GeV遅延 \Rightarrow 光球 = MeV?
将来のTeV源 (CTAなど)



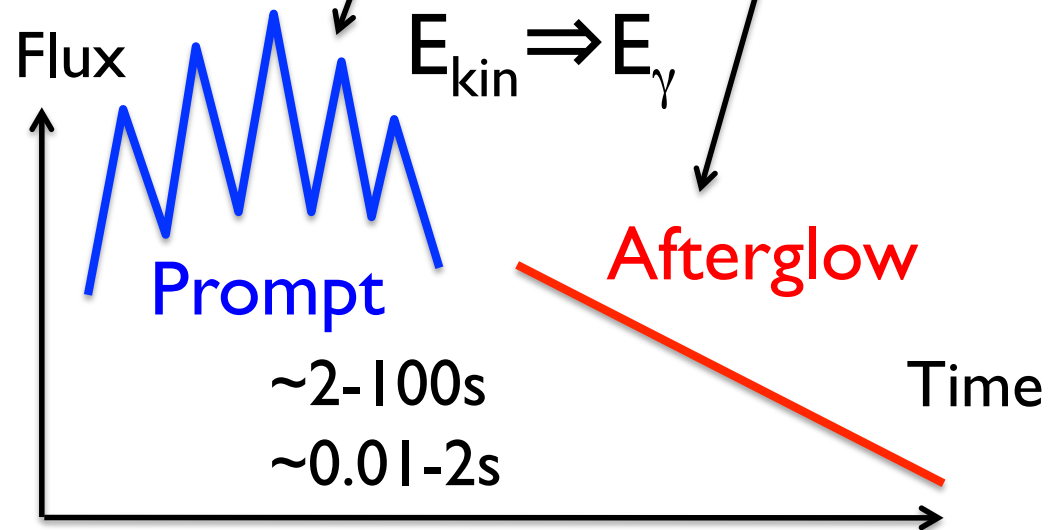
標準モデルの修正

Relativistic Jet

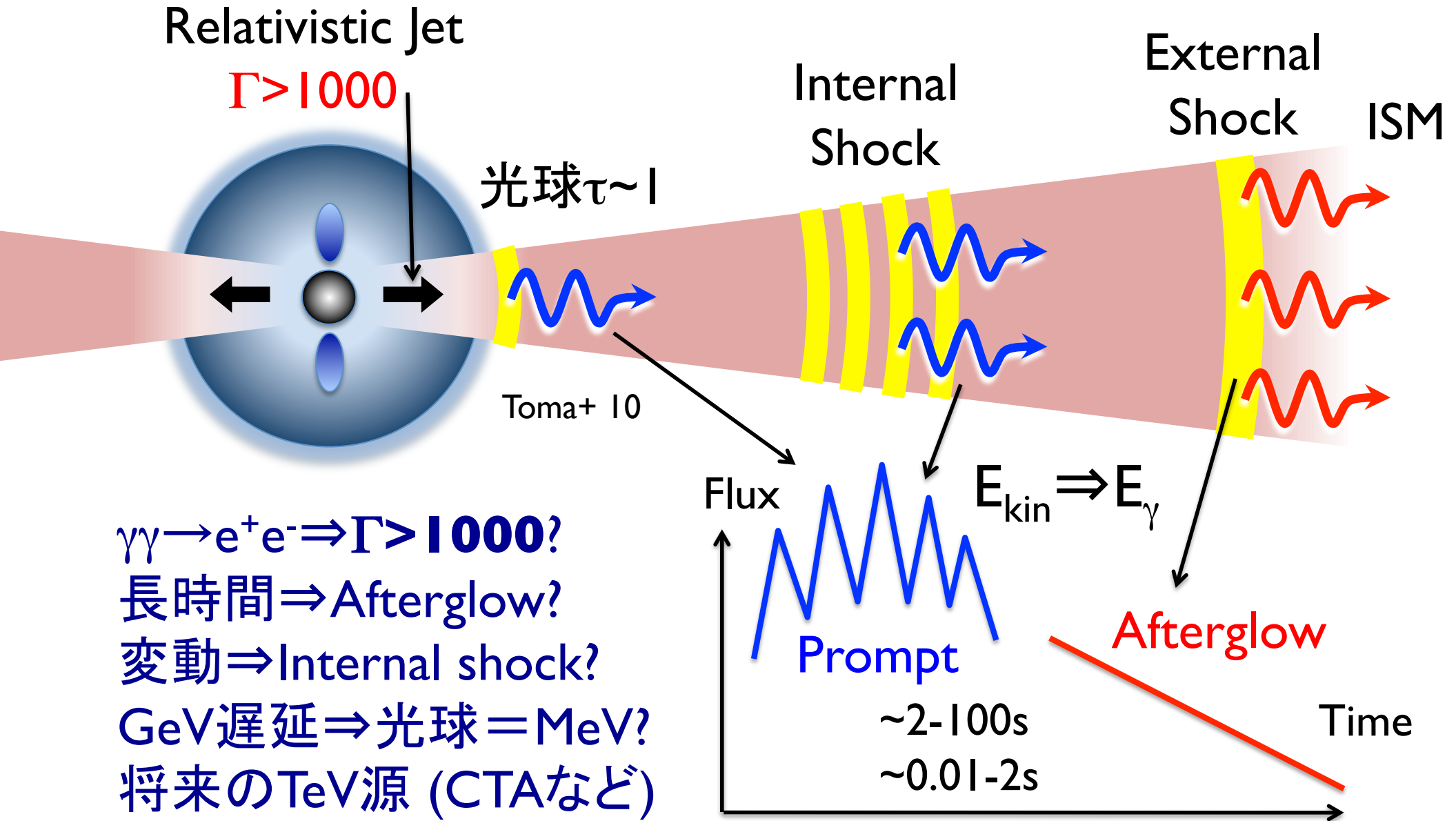
$\Gamma > 1000?$



$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^- \Rightarrow \Gamma > 1000?$
長時間 \Rightarrow Afterglow?
変動 \Rightarrow Internal shock?
GeV遅延 \Rightarrow 光球 = MeV?
将来のTeV源 (CTAなど)



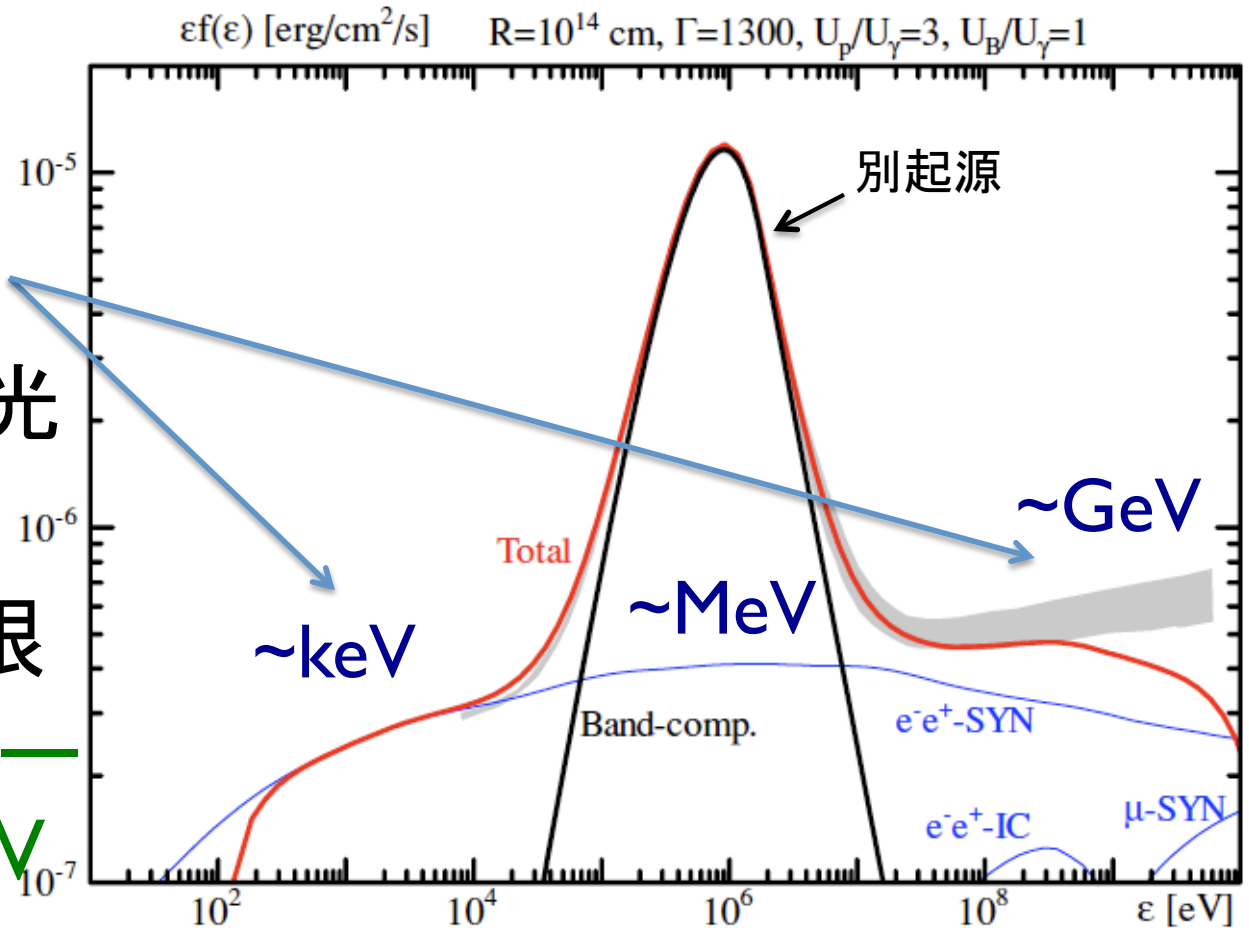
標準モデルの修正



$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^- \Rightarrow \Gamma > 1000?$
 長時間 \Rightarrow Afterglow?
 変動 \Rightarrow Internal shock?
 GeV 遅延 \Rightarrow 光球 = MeV?
 将来の TeV 源 (CTA など)

Hadronic Origin?

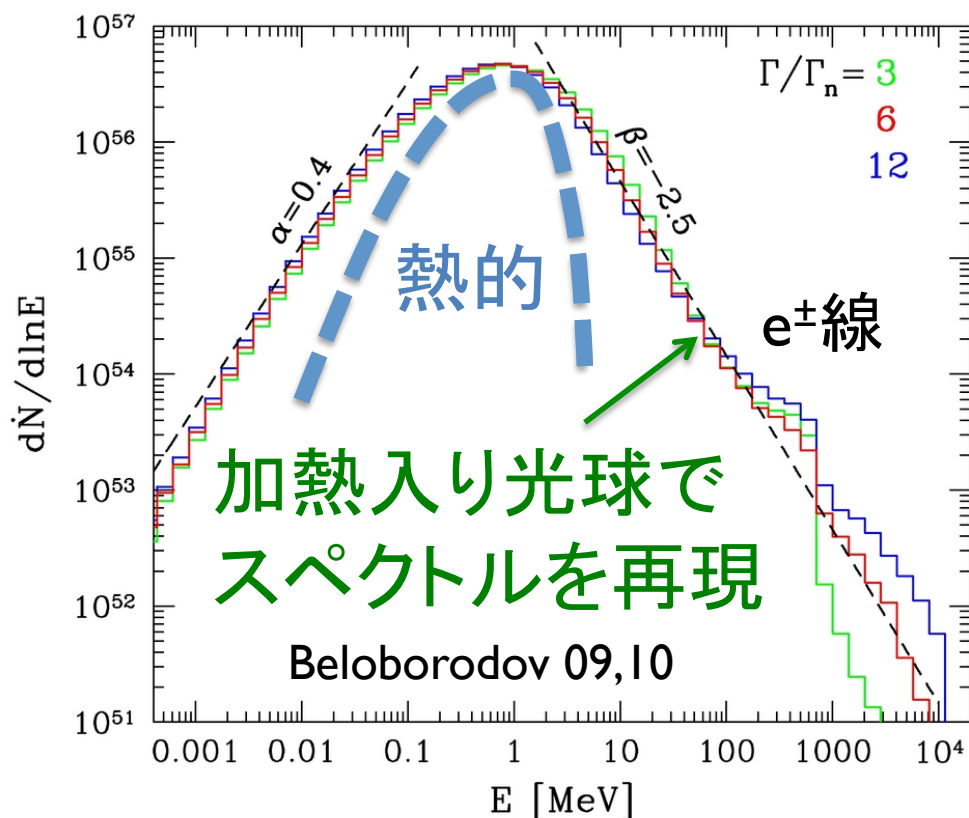
- $> 10^{17} \text{eV } p + \gamma$
 $\rightarrow \pi \rightarrow \gamma, e^\pm$
 カスケード
 シンクロ、IC
- to X線、可視光
- $E_p > E_\gamma \sim 10^{53} \text{erg}$
- IceCubeの制限
- 最高エネルギー
 宇宙線 $\sim 10^{20} \text{eV}$
 の起源?



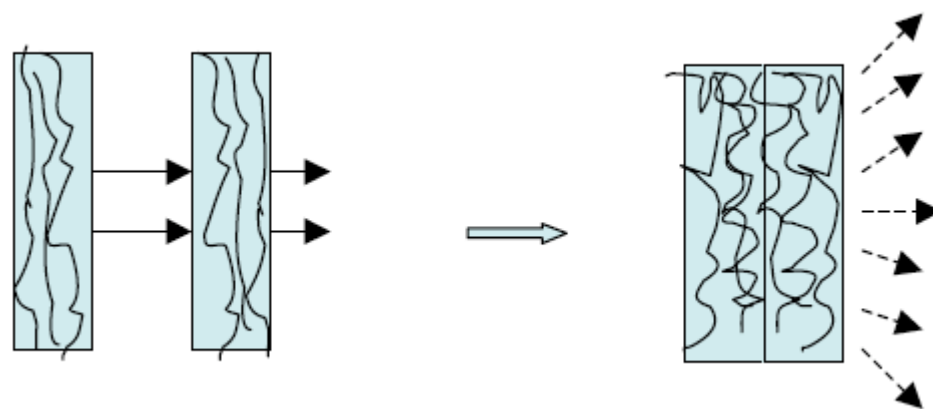
輻射火の玉 v.s. 磁場火の玉

MeV 放射の Internal shock モデルを疑い始めた

光球 $\tau \sim 1$ = 熱的...No! | 磁気優勢 \Rightarrow リコネクション



相対論的輻射輸送



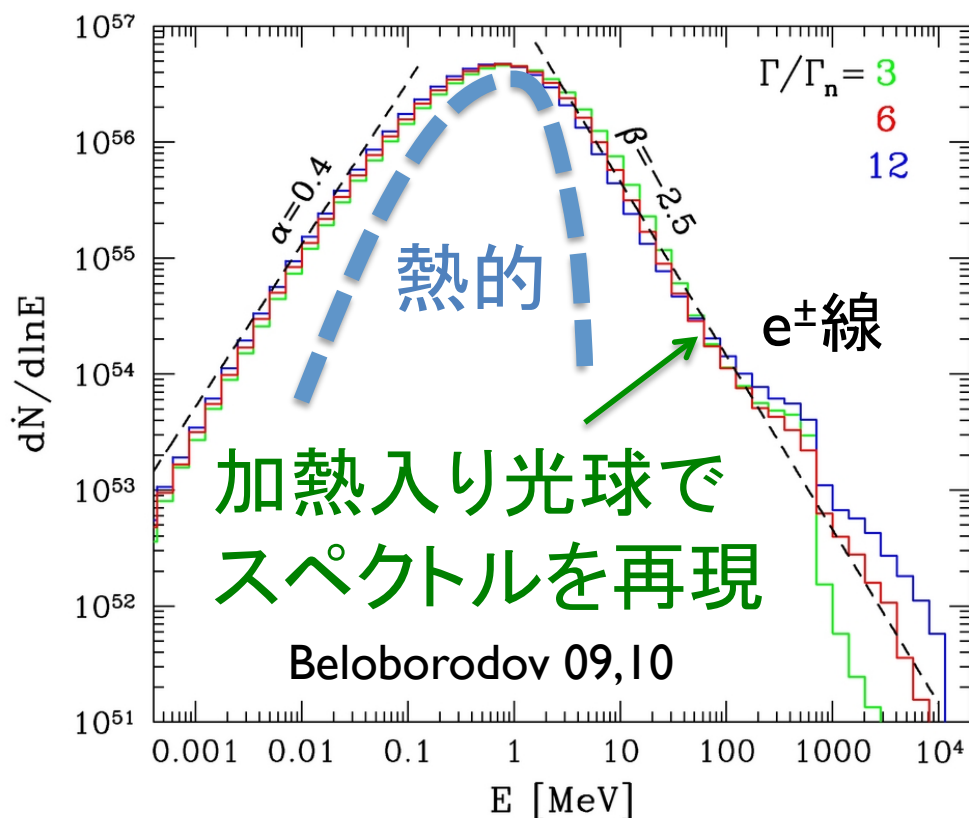
まだ予言能力がない
ジェット根元で磁気優勢?

\Rightarrow GRBの σ 問題

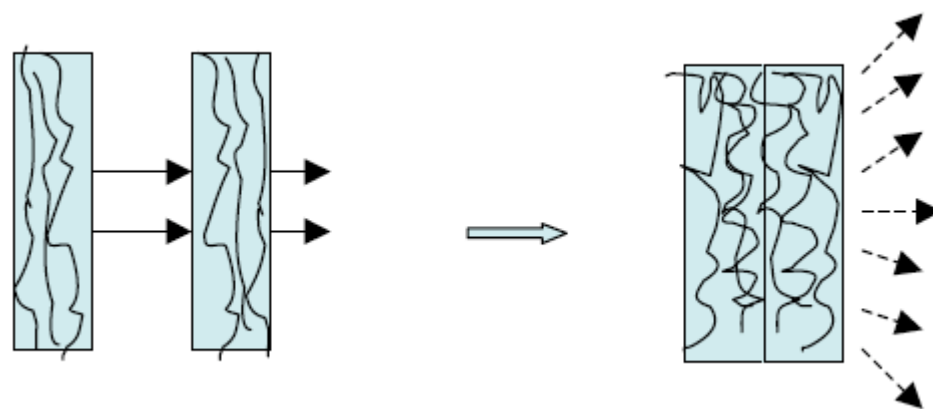
輻射火の玉 v.s. 磁場火の玉

MeV 放射の Internal shock モデルを疑い始めた

光球 $\tau \sim 1$ = 熱的...No! 磁気優勢 \Rightarrow リコネクション



相対論的輻射輸送

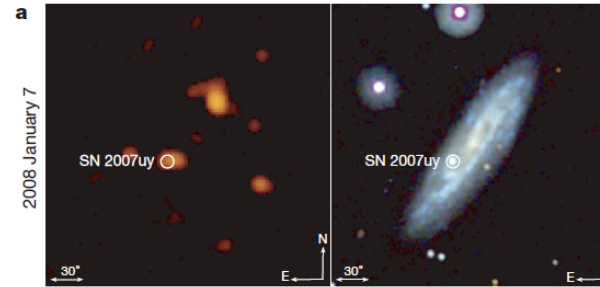
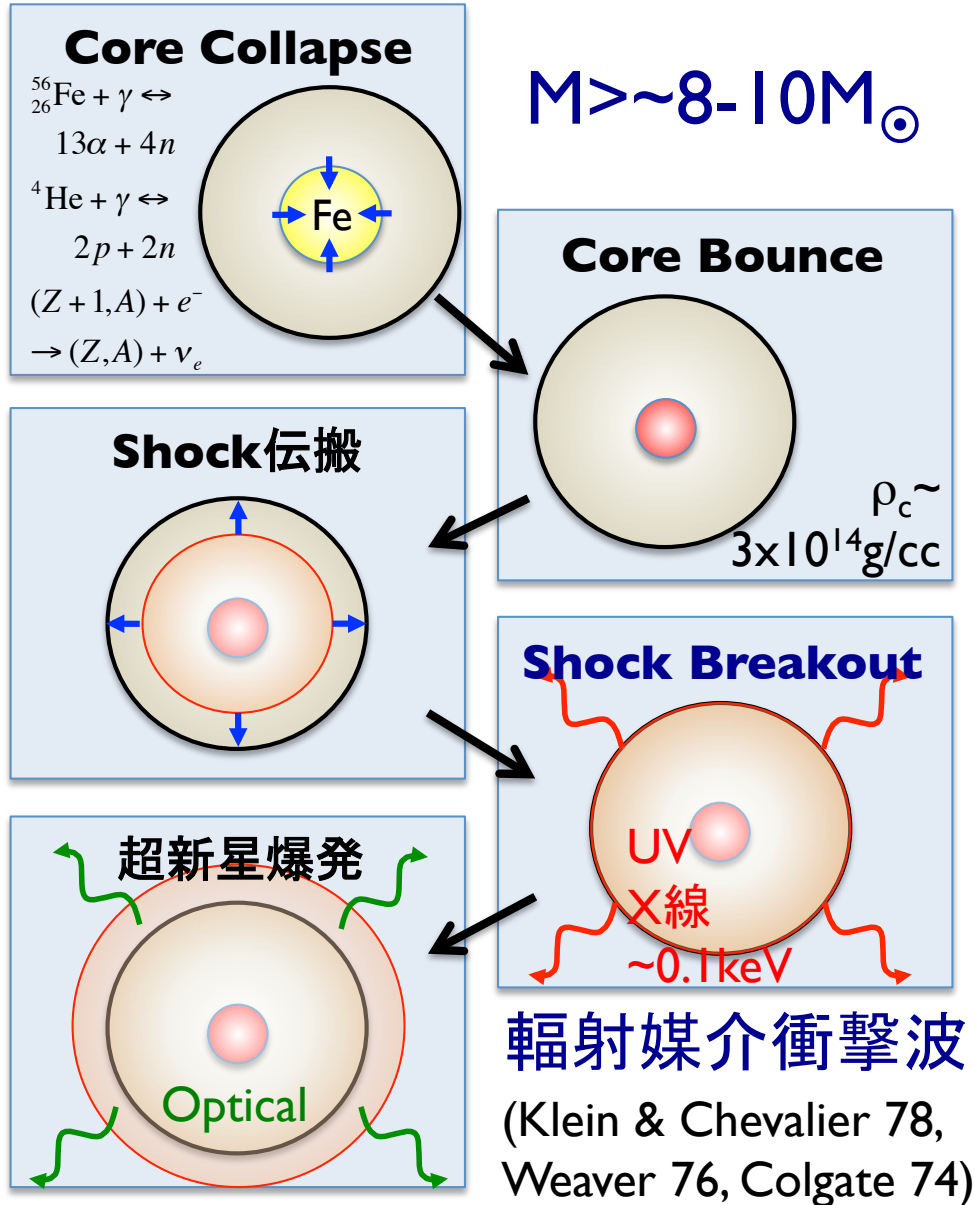


Zhang & Yan 10, McKinney & Uzdensky 10

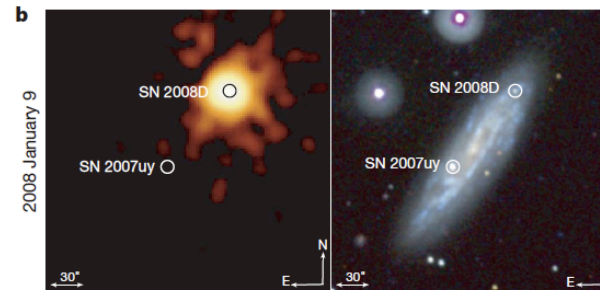
まだ予言能力がない
ジェット根元で磁気優勢?

\Rightarrow GRBの高原-柴田問題

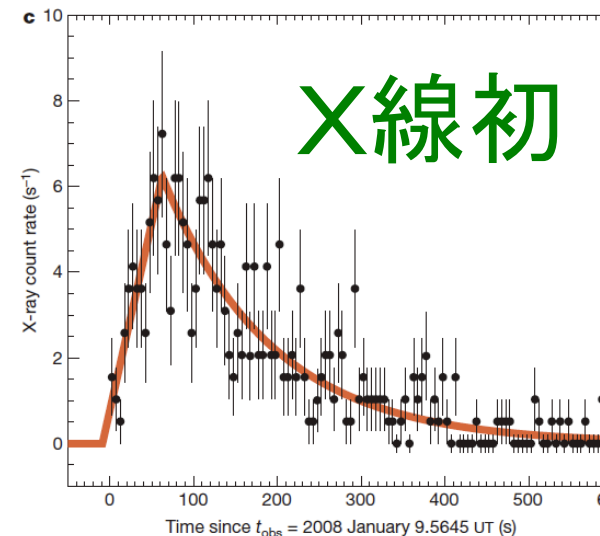
超新星 Shock Breakout



XRF080109/
SN2008D
(Ib/c)
@27Mpc



Single PL
or PL+BB
 $\Gamma \sim -2.3$



$T \sim 0.1 \text{ keV}$
**非熱的
成分**

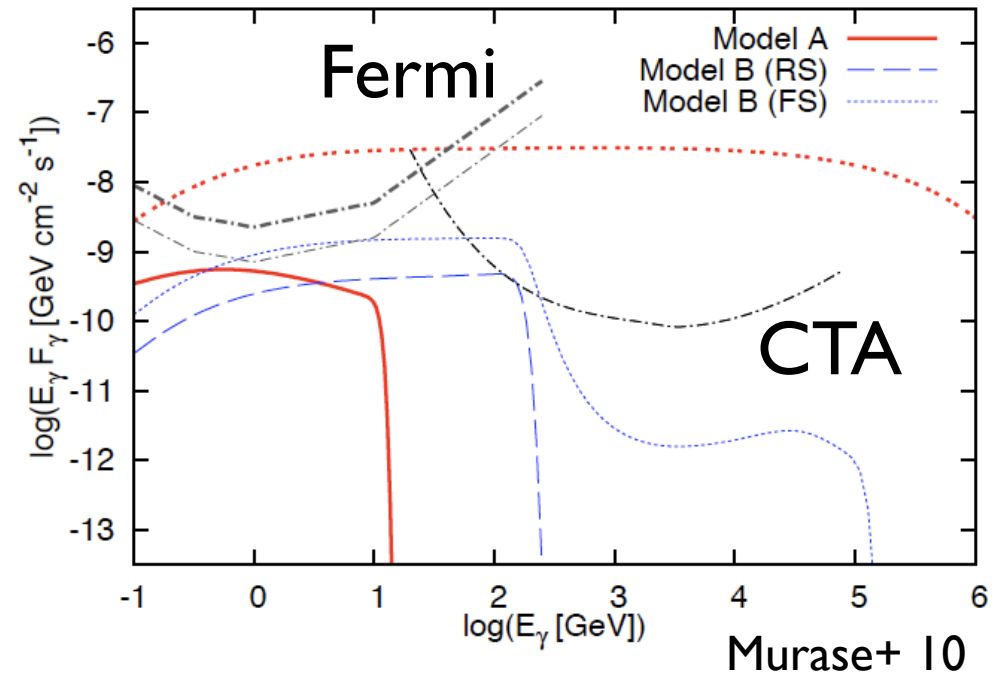
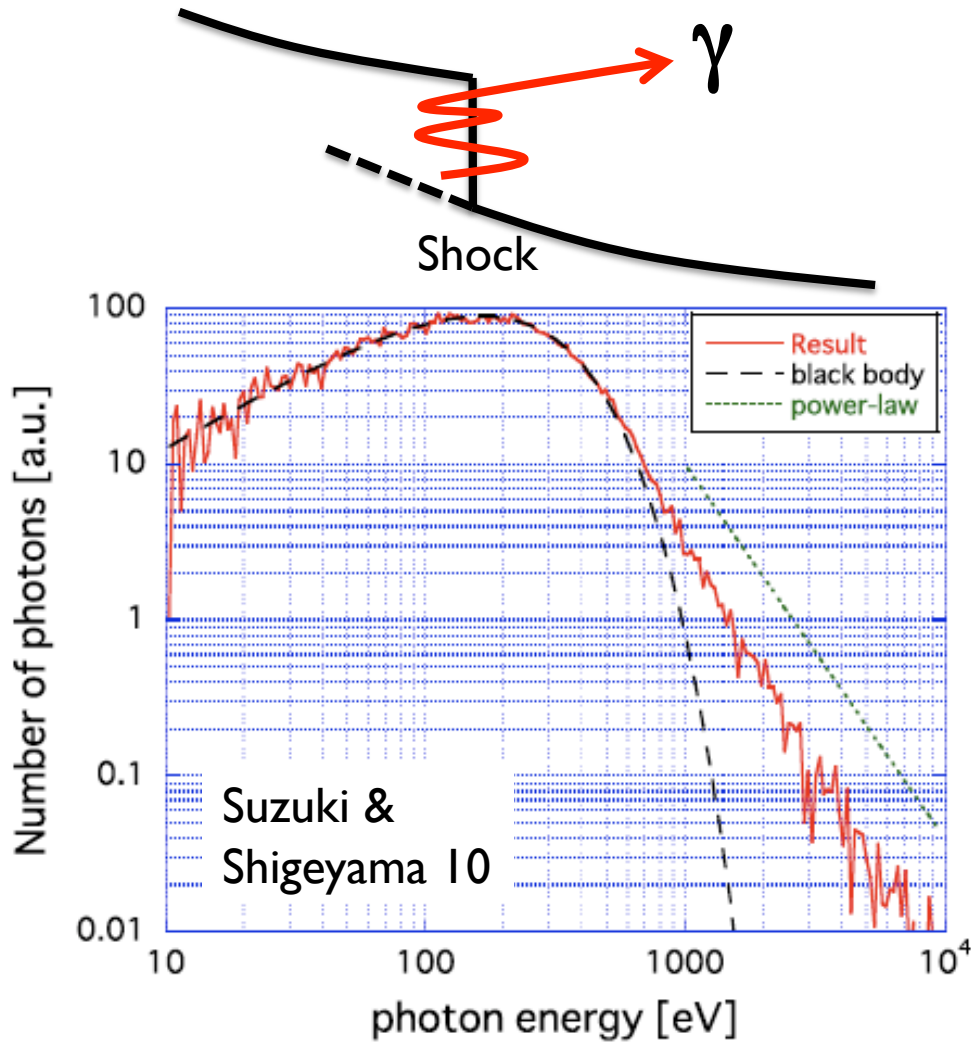
Soderberg+ 08

超新星の高エネルギー放射

光子のFermi加速?

陽子のFermi加速?

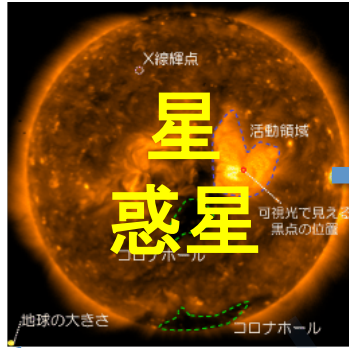
$p+p, \gamma \rightarrow$ 高エネルギー ν, γ



高光度SN: 星周物質? Pair?
Long (~数ヶ月) Transients

研究の発展

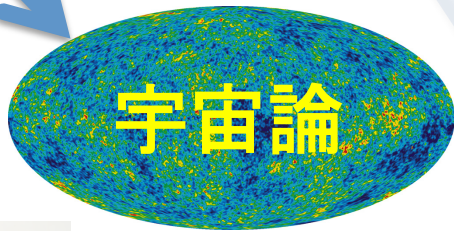
Dark Matter
相対論の破れ
Axion



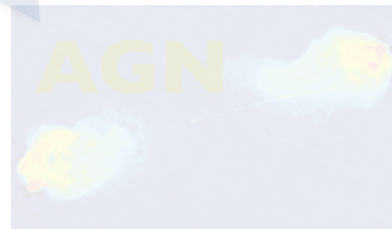
GeV SNR
宇宙線脱出
PeVatronは?



林先生



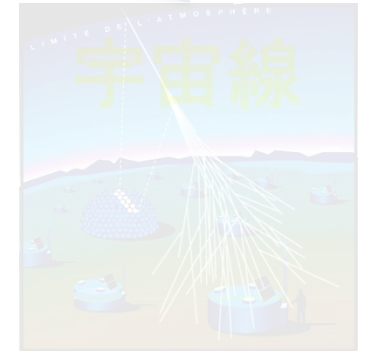
GeV成分発見
光球 vs 磁場モデル
超新星Breakout



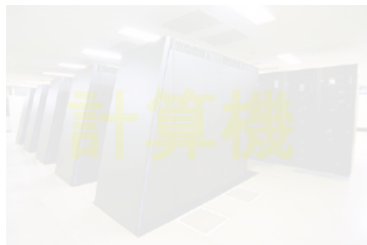
Blazar Sequence
Off-axis、変動、偏光
GeV電波ローブ



2M_⊙中性子星
Outergap
Crab変動
GeV-TeV PWN



e⁺ 超過
He 超過
UHECR Fe?



PIC粒子加速
3D rela. MHD
Jet/降着円盤

さまざまな高エネルギー源

~10 GeV Break in 中年の超新星残骸

● SNR \Rightarrow 宇宙線か?

● $pp \rightarrow \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

● π^0 is favored over Leptonic (IC, Brems)

● Mid-aged SNR:

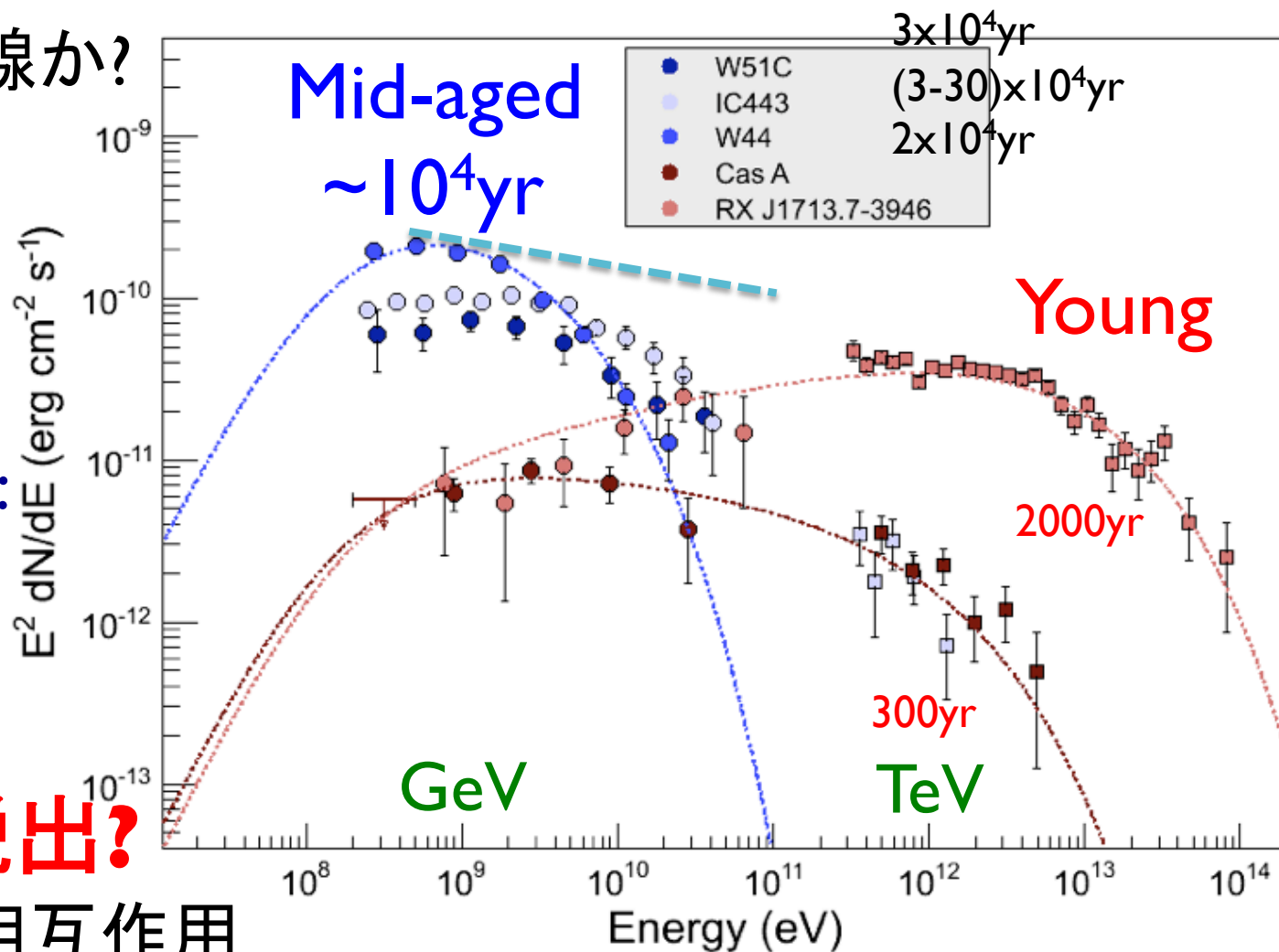
Break at

$E_\gamma \sim 1-10 \text{ GeV}$

$E_p \sim 10-100 \text{ GeV}$

\Rightarrow 宇宙線脱出?

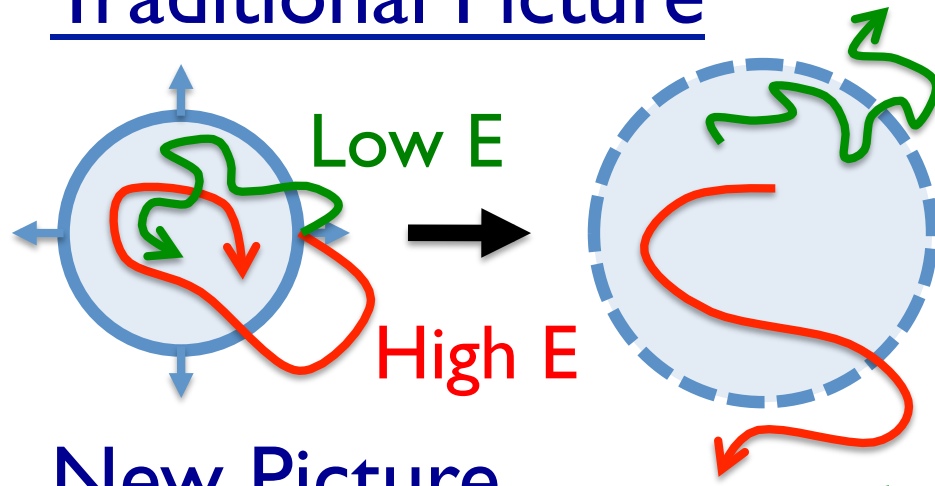
● 注: 分子雲と相互作用



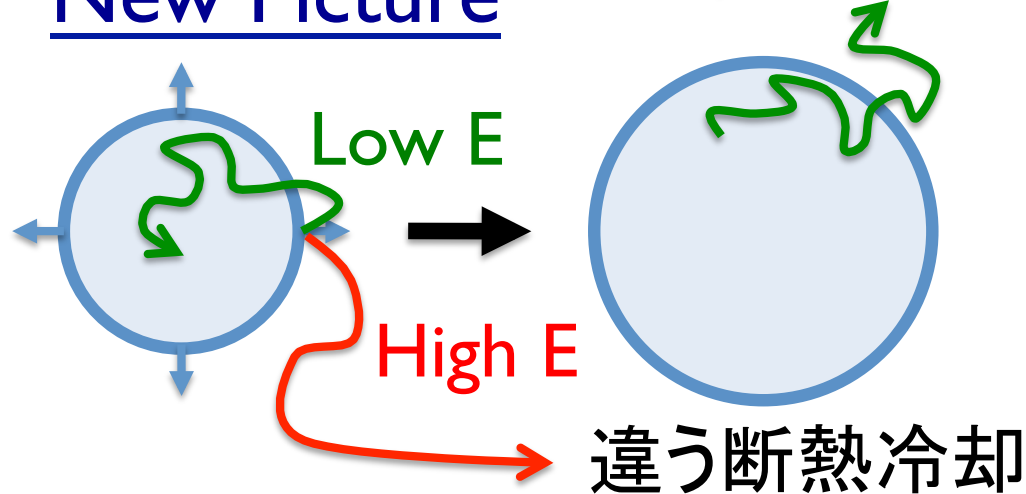
宇宙線脱出問題

宇宙線になるにはSNRから星間空間に逃げないといけない

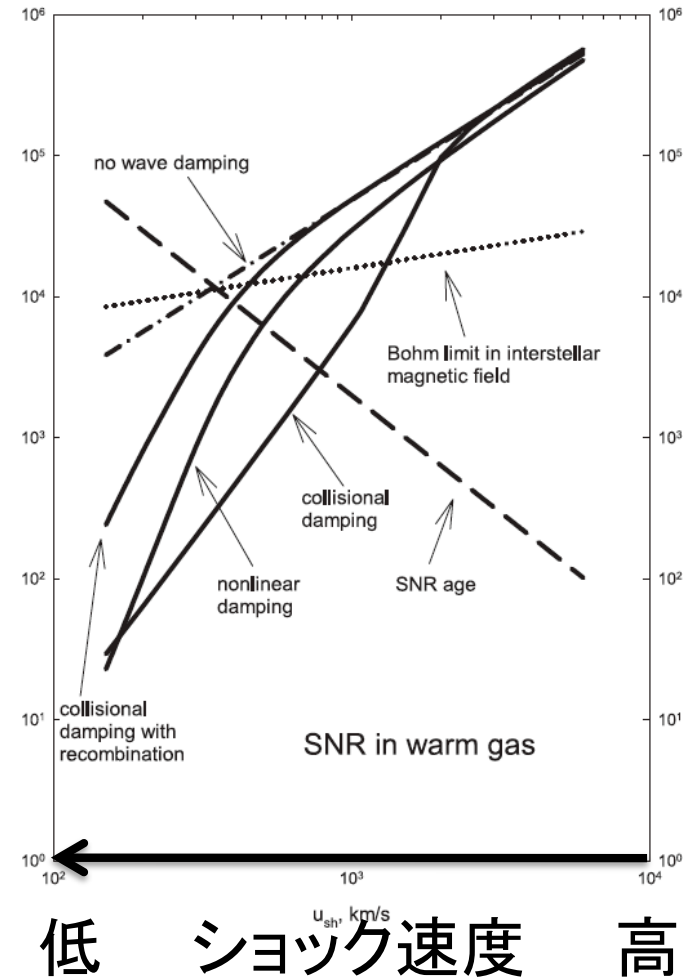
Traditional Picture



New Picture



閉じ込められる最大エネルギー



宇宙線スペクトルへの影響

- 宇宙線スペクトル
SNR内 $\sim E^{-s}$

≠ 脱出後 $\sim E^{-(s+\alpha/\beta)}$

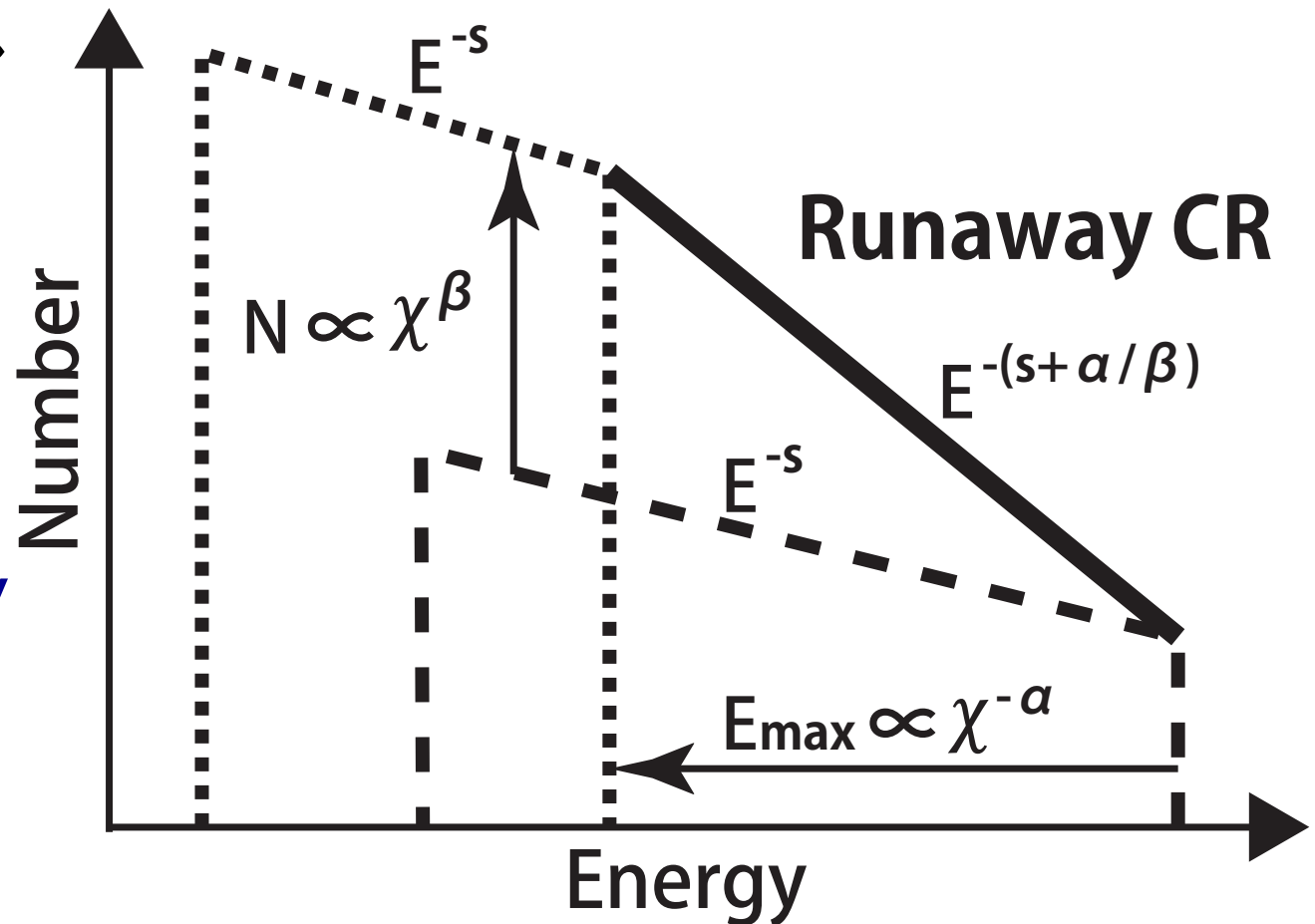
- SNRの外で
高エネルギー放射

Gabici+ 07

- PeVatron $\sim 10^{15}\text{eV}$
w/ age $t_{\text{Sedov}} \sim 100\text{yr}$
をどう探すか?

- e^\pm CRスペクトル
にも影響

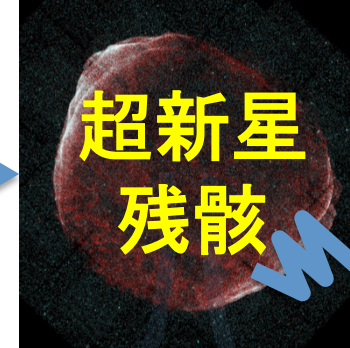
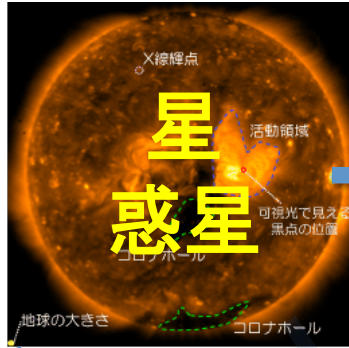
Kawanaka+ 10



Ohira, Murase, Yamazaki 10
Ohira & KI 10, Caprioli+ 10
Fujita+ 10

研究の発展

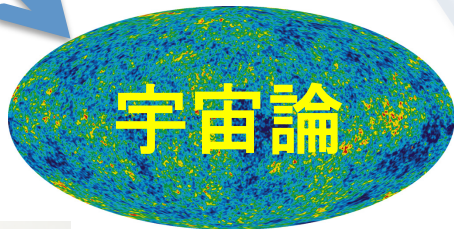
Dark Matter
相対論の破れ
Axion



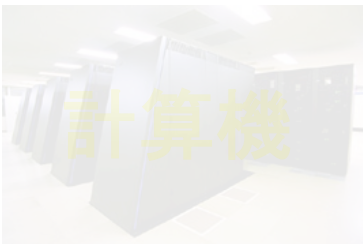
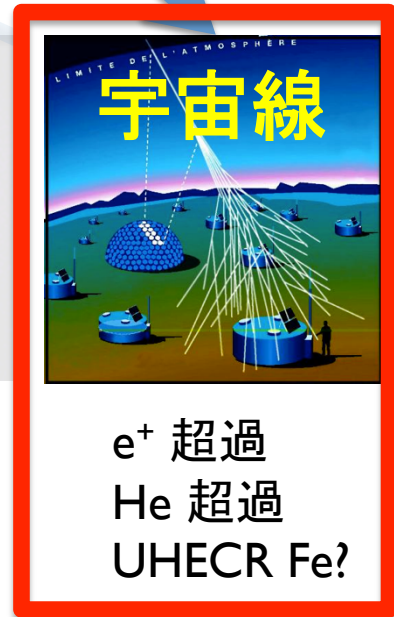
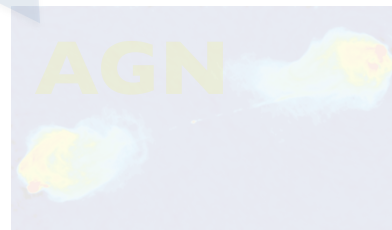
GeV SNR
宇宙線脱出
PeVatronは?



林先生



GeV成分発見
光球 vs 磁場モデル
超新星Breakout



PIC粒子加速
3D rela. MHD
Jet/降着円盤

High-z/初代 GRB
EBL
銀河間磁場
GeV背景放射

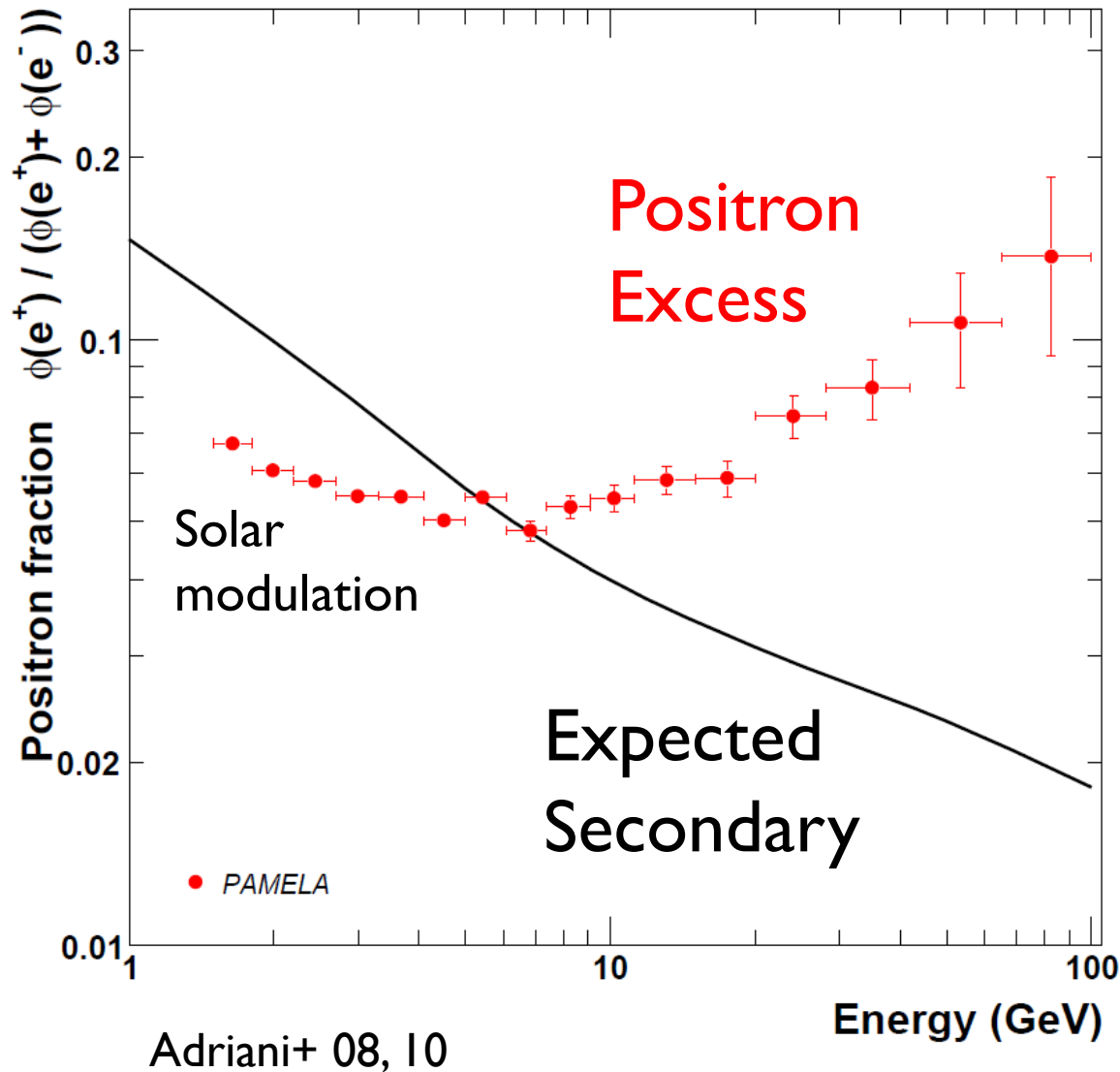
Blazar Sequence
Off-axis、変動、偏光
GeV電波ローブ

2M_☉中性子星
Outergap
Crab変動
GeV-TeV PWN

さまざまな高エネルギー源

PAMELA

予想される2次宇宙線量を超過する陽電子宇宙線



⇒ New sources

- ダークマター?

- 高エネ天体?

⇒ 大量の論文 >500

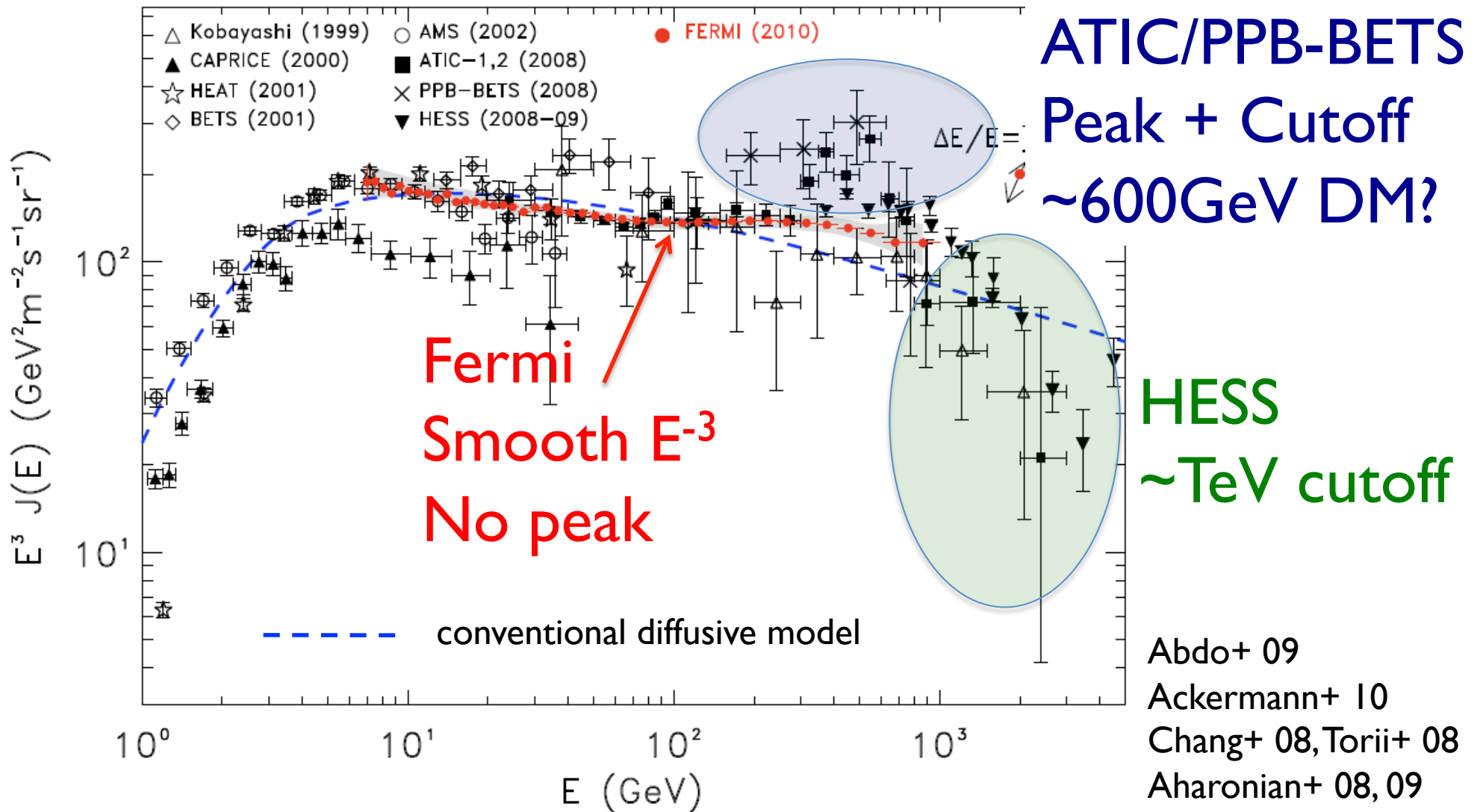


Jul 06 - Feb 08

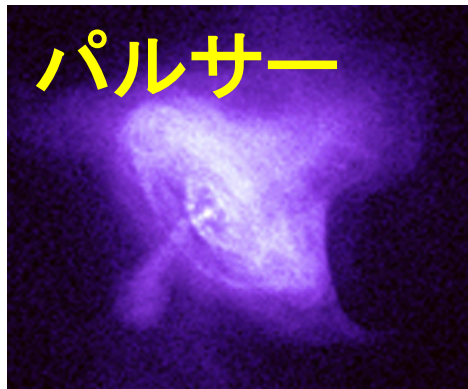
151672 e-, 9430 e+

電子宇宙線

An Excess also in ($e^+ + e^-$) Spectrum

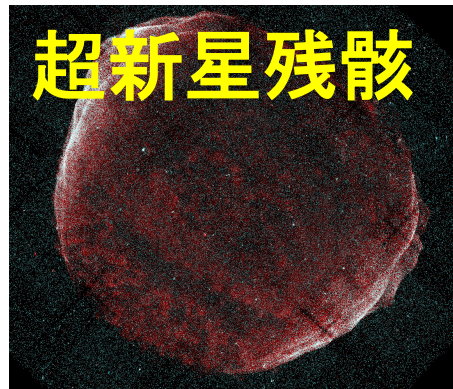


高エネルギー天体 vs ダークマター



パルサー

Yuksel+ 08, Buesching+ 08
Hooper+ 08, Kawanaka+ 10

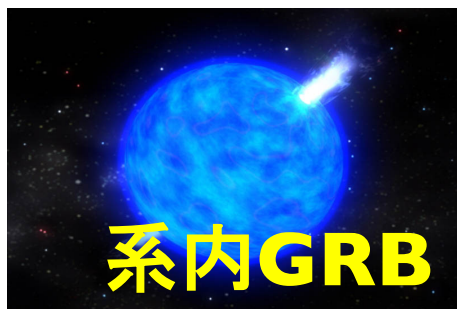


超新星残骸

Kobayashi+ 04,
Fujita+ 09



BH連星



系内GRB

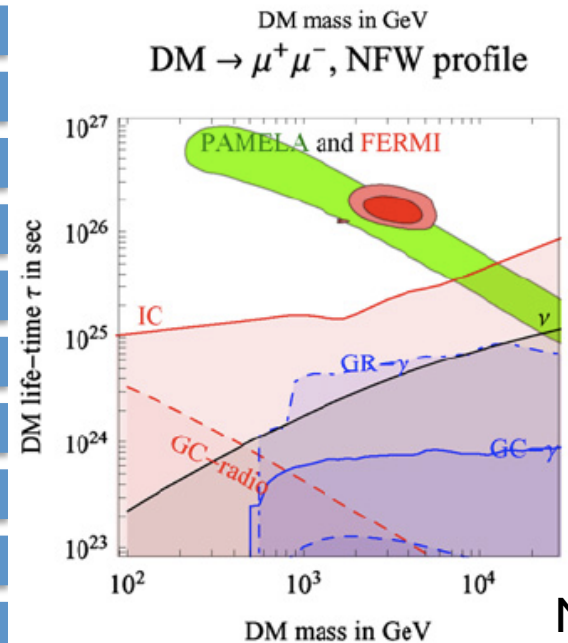
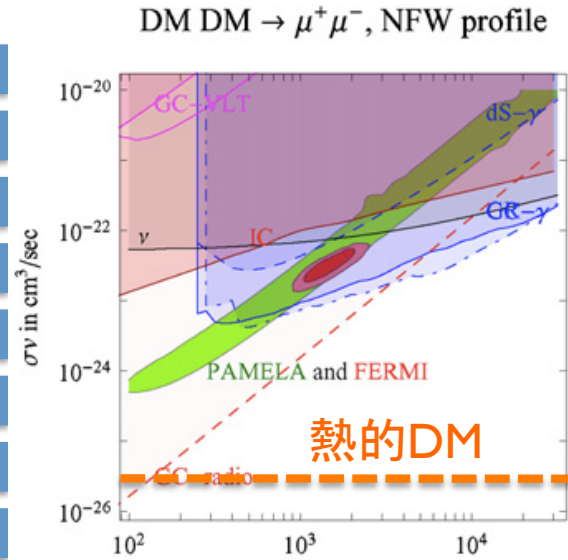
KI 10



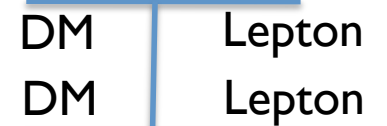
WDパルサー

Kashiyama+ 10

$\sim 10^{48}$ erg/SN
可能性様々

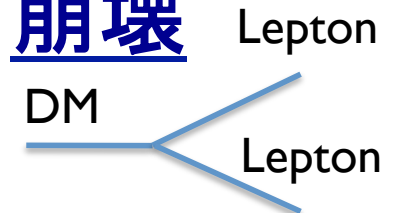


対消滅



- γ , 電波, ν の強い制限
- DM分布に依存する

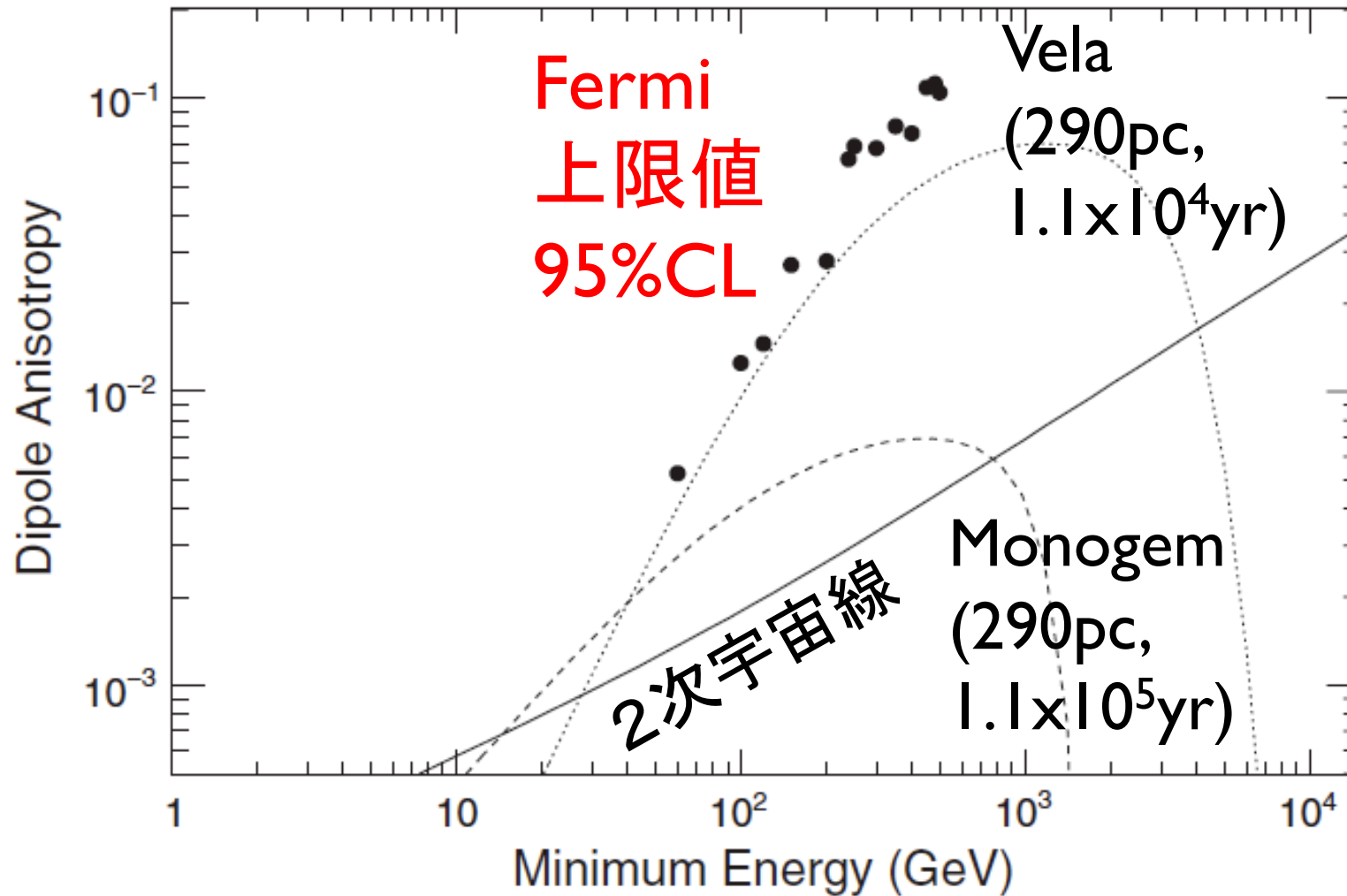
崩壊



- 制限弱い

Meada+ 10

電子宇宙線異方性



$$\delta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

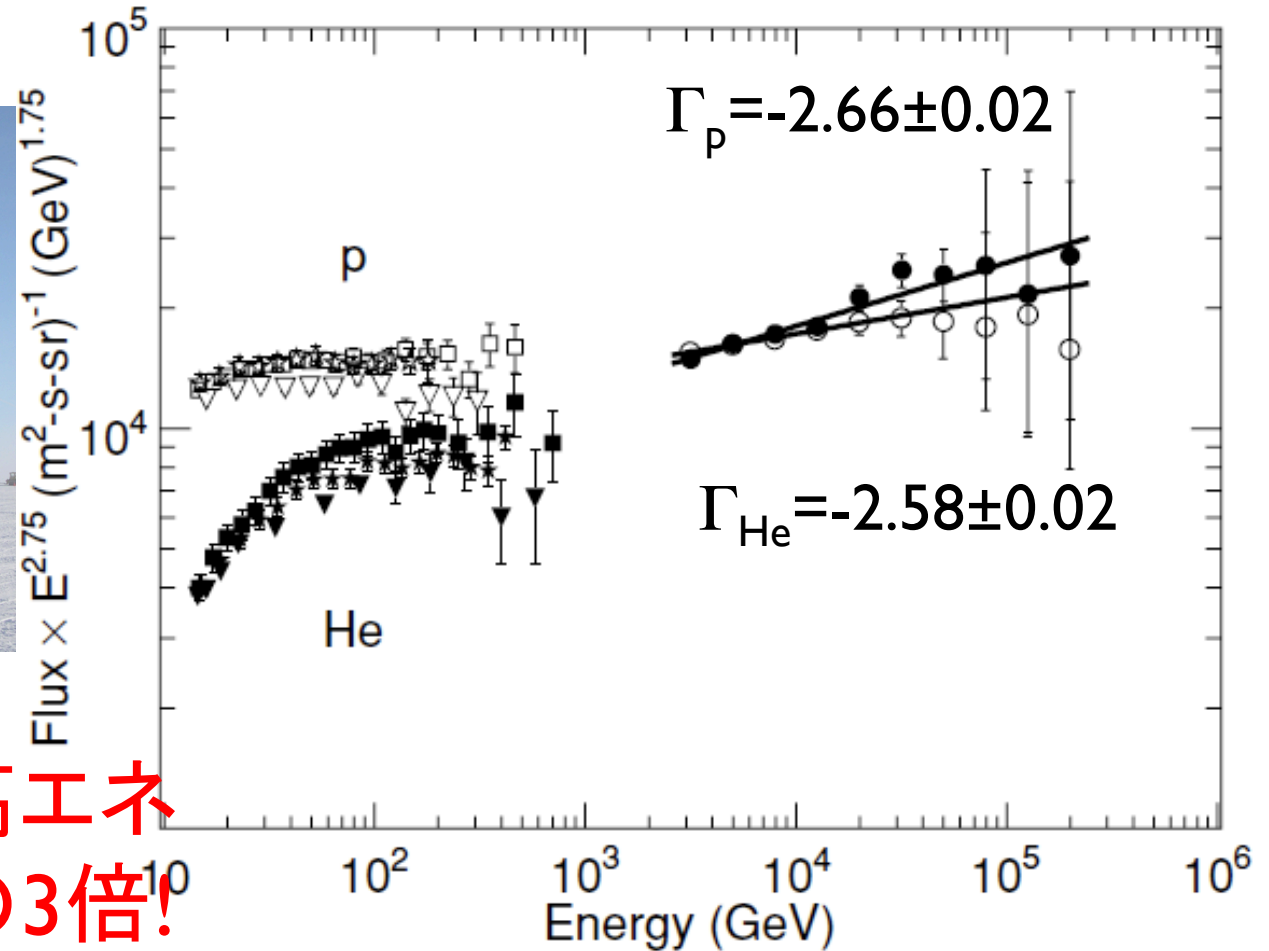
$$= \frac{3K|\nabla f|}{cf}$$

$$\sim \frac{3d}{2ct}$$

Ackermann+ 10

精度 $\propto t^{-1/2}$ 。複数ソースだと異方性 ↓。

He宇宙線

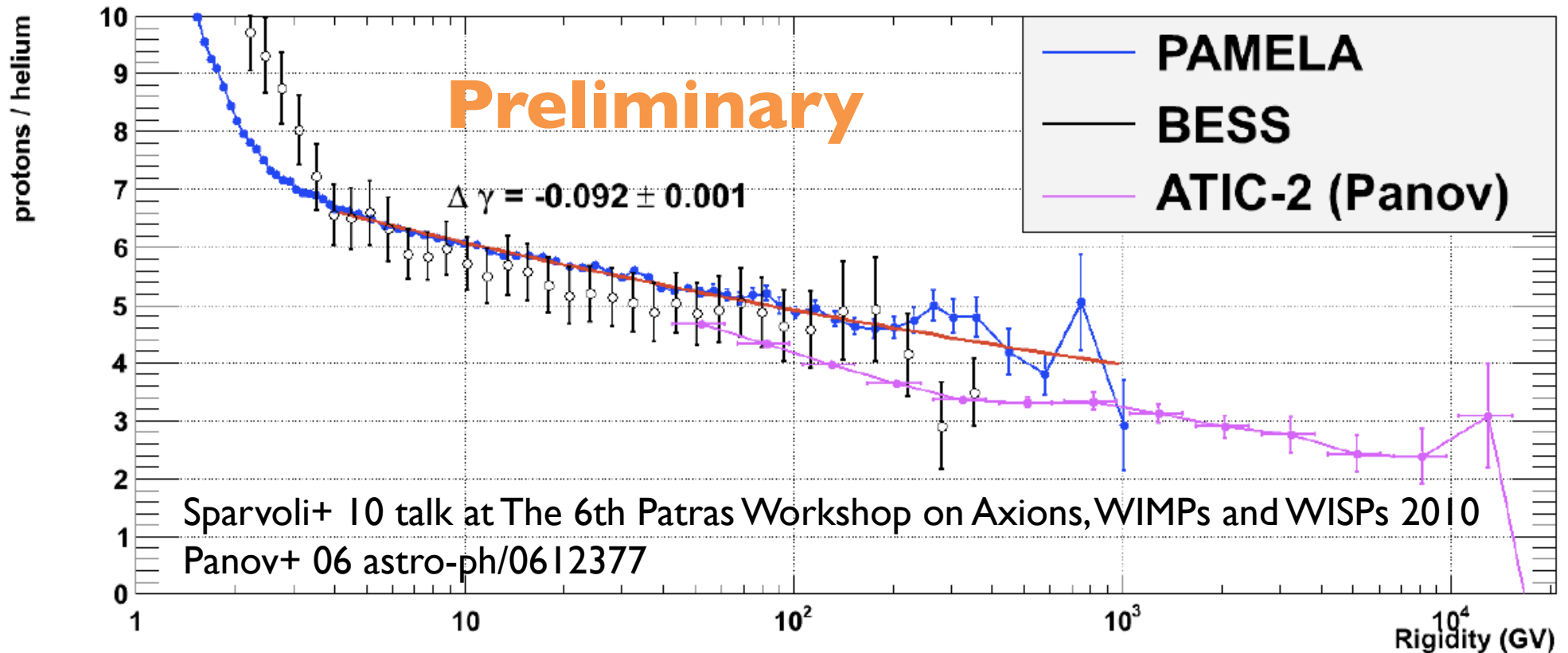


- He/pの増加@高エネ
100TeVではGeVの3倍!
(GeVでは $\gamma \sim 0.25$ でOK)

- 200GeV/nでハードに (全組成p, He, C-Fe)

Proton/Helium Ratio

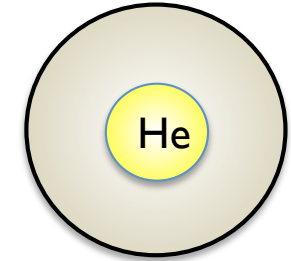
PAMELAやATIC-2でも見えている



衝撃波加速ではスペクトルの冪は圧縮率のみに依存
He/p=一定のはず

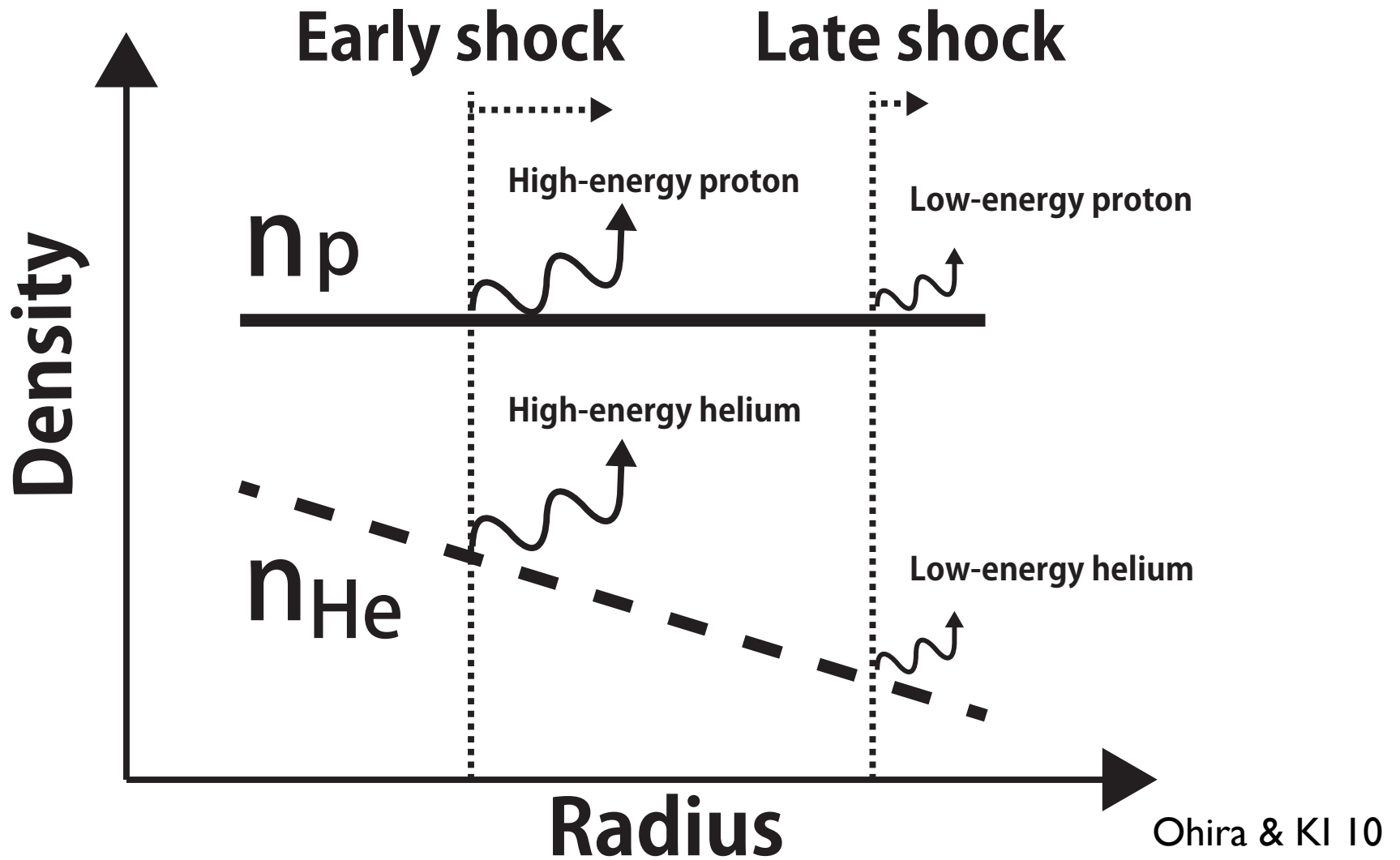
林流

$$M_{\text{He}}/M < q_{\text{SC}} \sim 0.1$$



- 中村さんの授業が思い出される。
Schonberg-Chandrasekhar limitの所で、
「林さんが、このために星ではHeを説明できない、初期宇宙に行かざるを得ない、と
良く言っていた」
- 現在でHe/pを3倍にするには非一様な領域
を考えざるを得ない。
- 例えばスーパーバブル。
- + 宇宙線脱出のNew Picture

非一様元素+脱出モデル

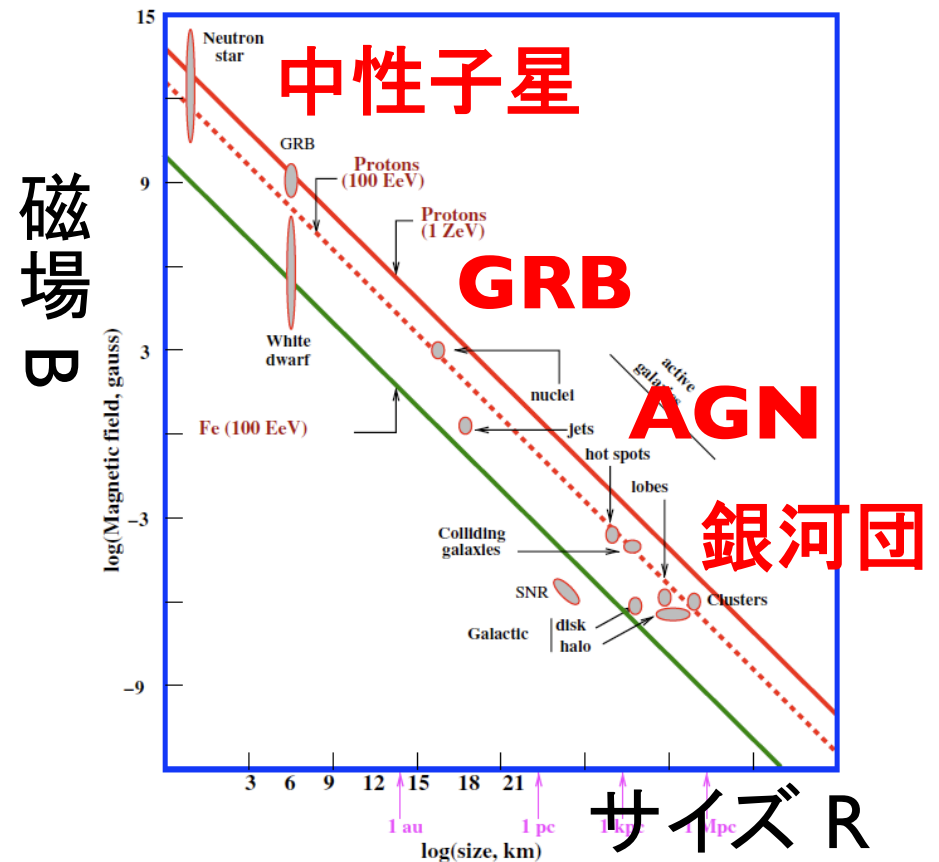
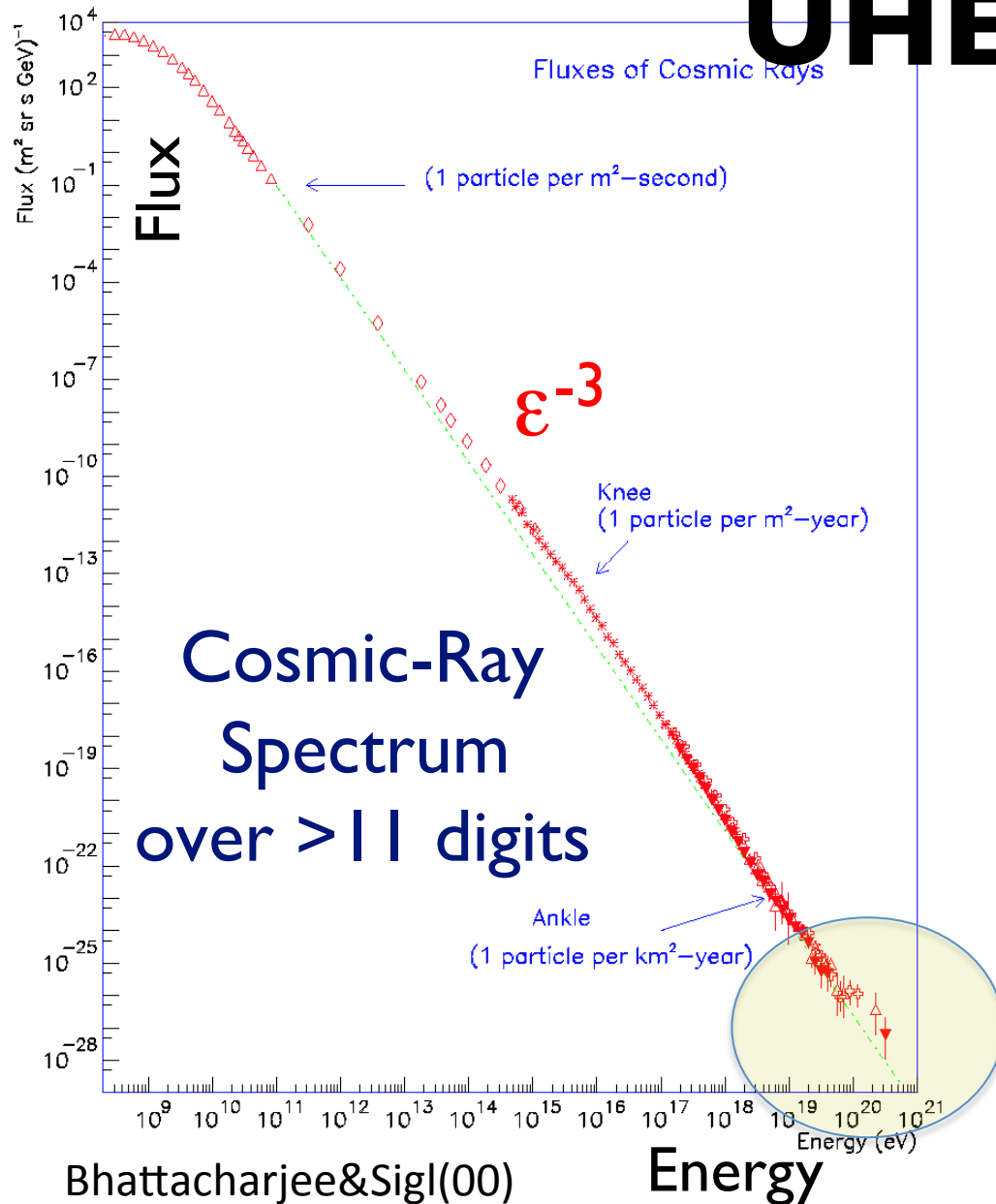


現在観測されているSNRは宇宙線の起源ではない??

最高エネルギー宇宙線

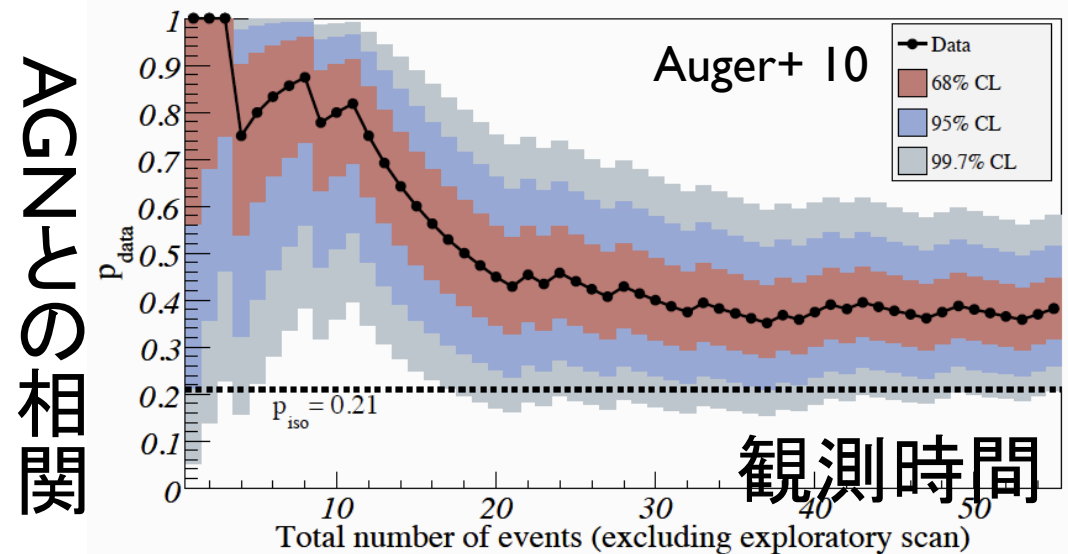
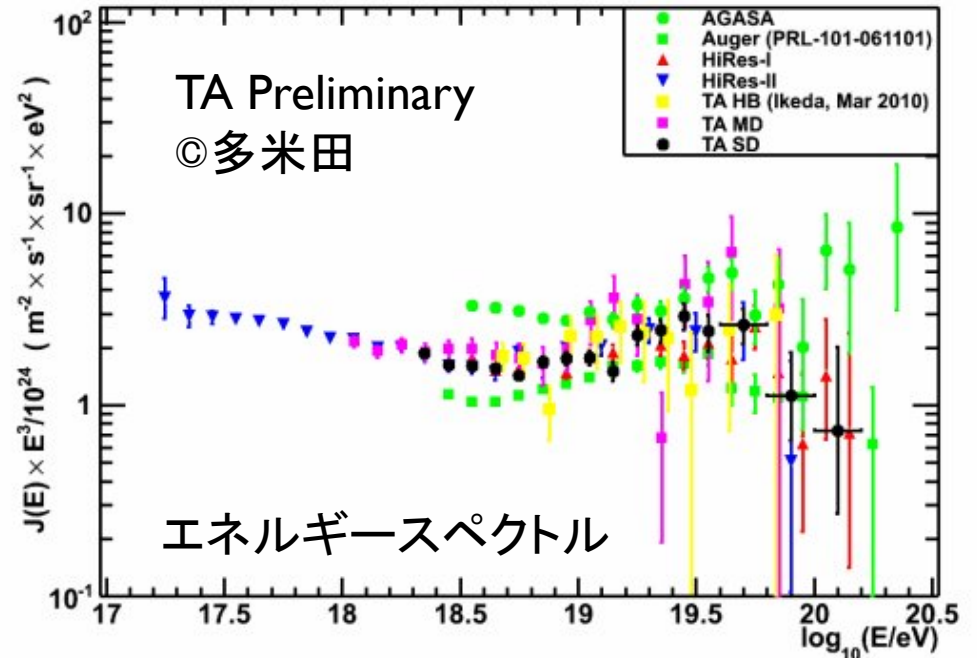
UHECR

- 10^{20} eV 宇宙線
- 系外 ($R_{\text{Larmor}} > R_{\text{銀河}}$)
- Hillas 条件 $E < ZeBR$



UHECRの進展

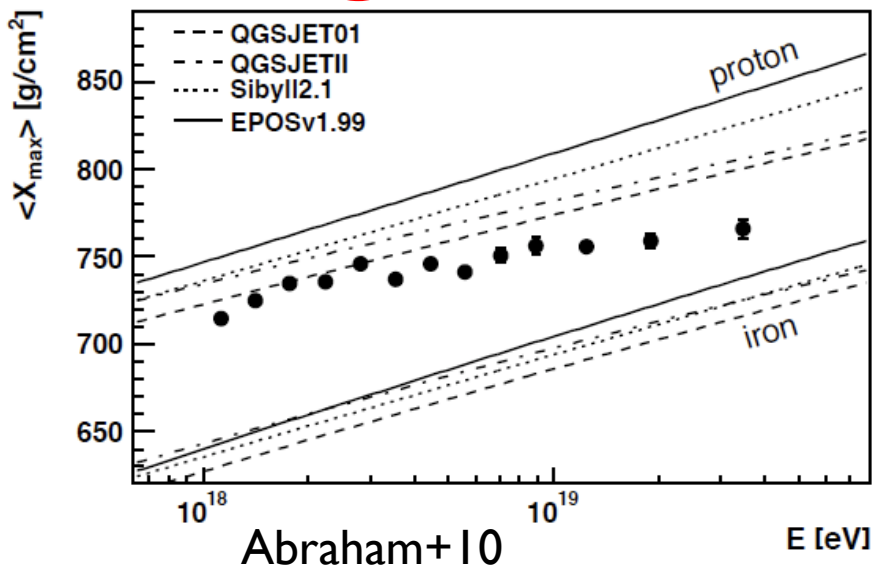
- **GZK-like cutoff**
 - $p + \text{CMB} \rightarrow p, n + \pi$
 - 加速限界?
 - 組成の変化?
 - 重元素の光分解?
- **異方性**
 - AGNとの相関 ↓
 - Cen Aは?
 - Virgoは?
 - 磁場が強い?
- **組成**



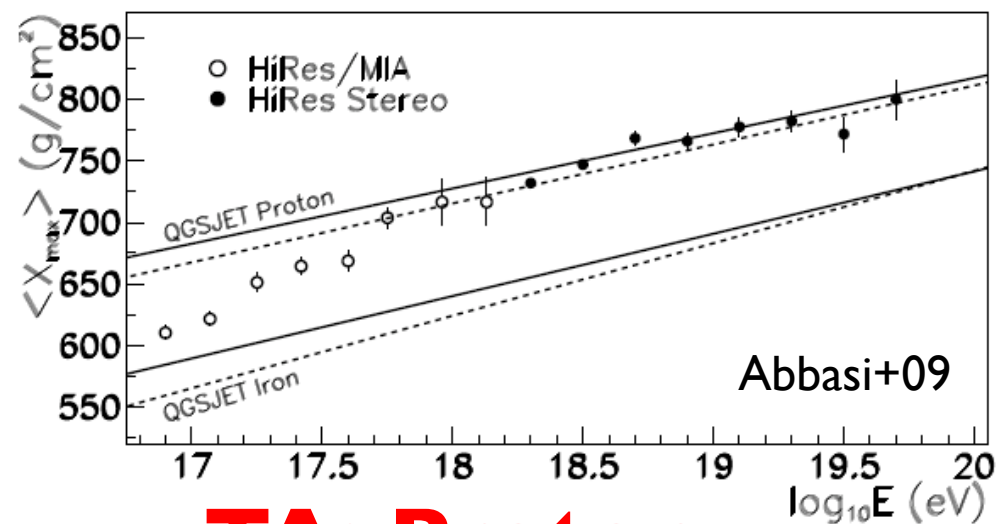
陽子 or 鉄?

空気シャワーの最大深さ

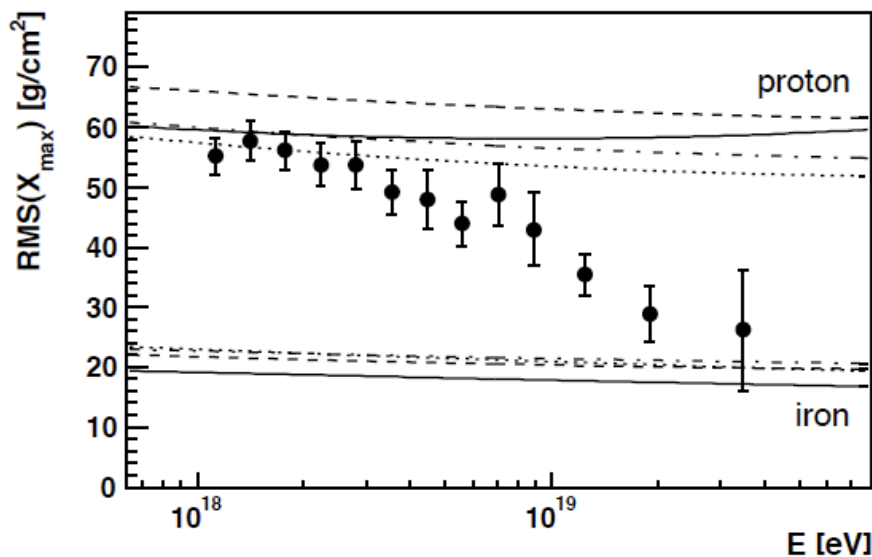
Auger: Fe



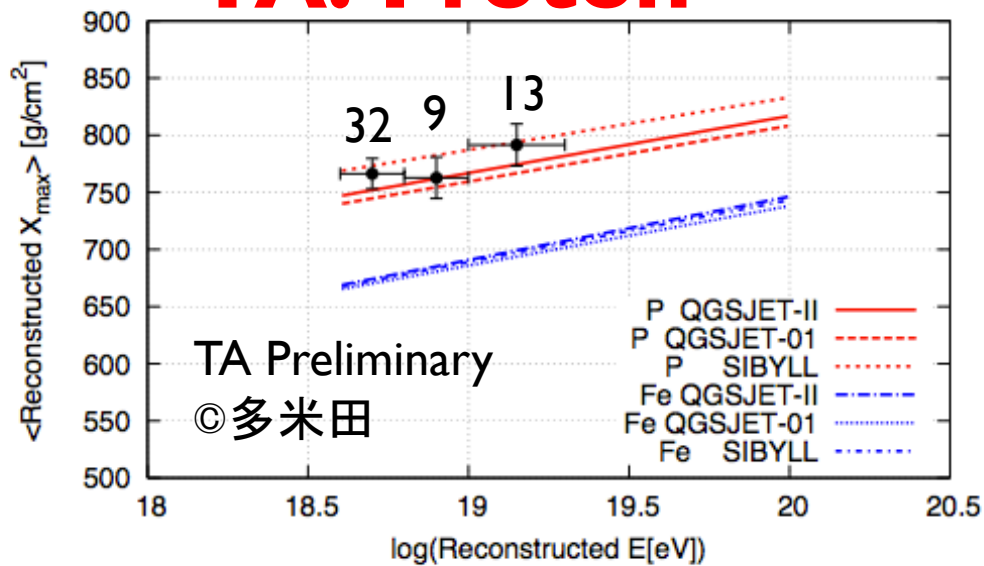
HiRes: Proton



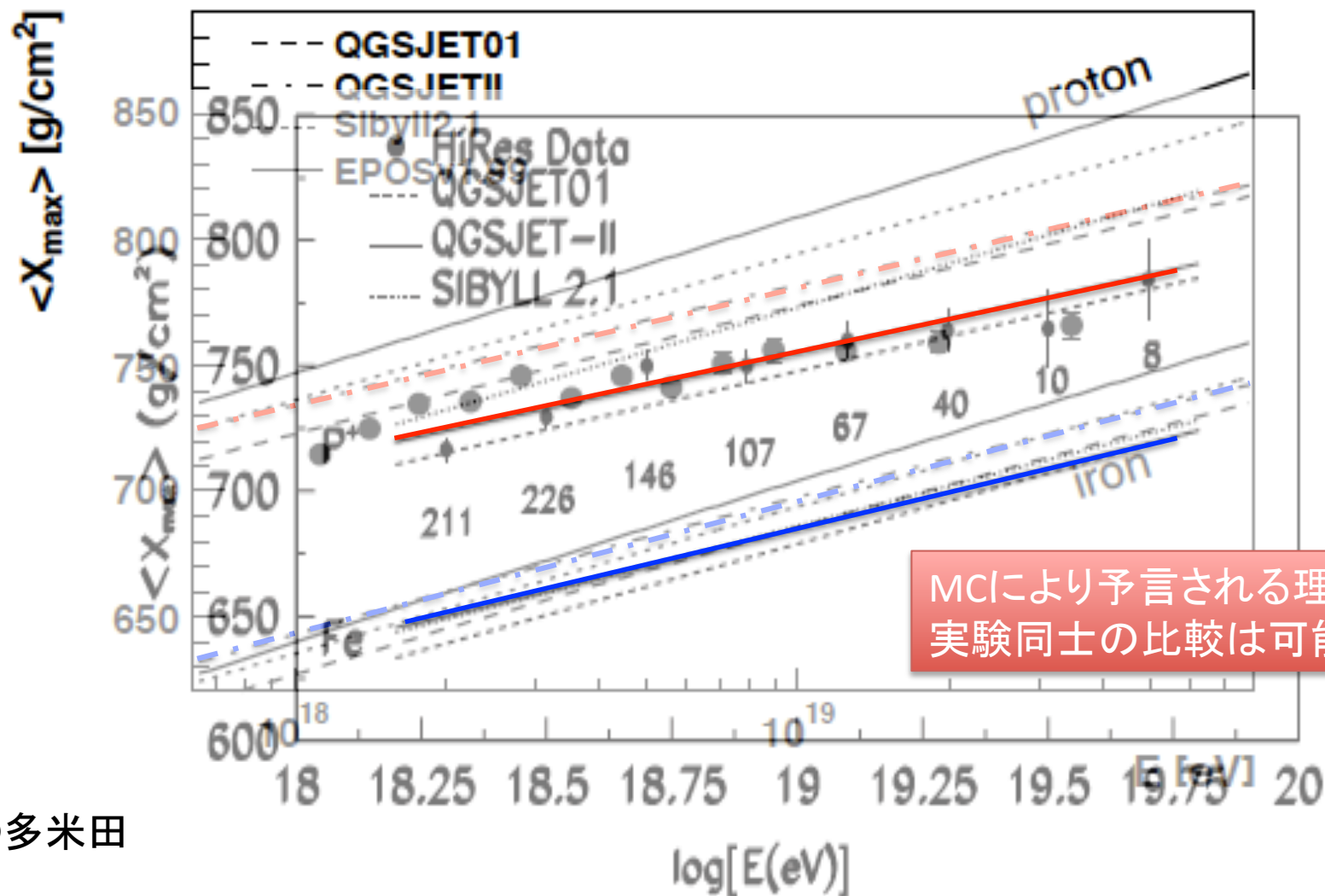
その分散



TA: Proton



他実験との比較は？ HiRes vs Auger

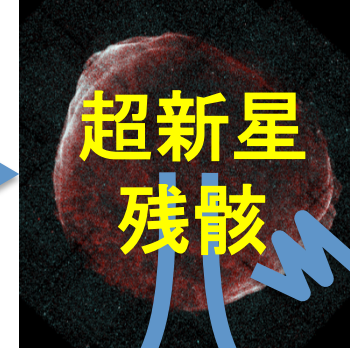
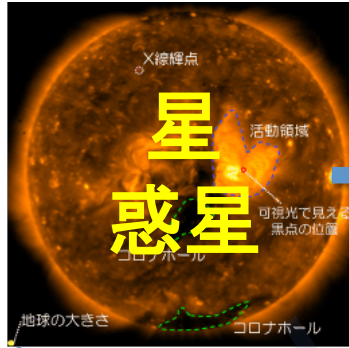


MCにより予言される理論線が違う
実験同士での比較は可能？

©多米田

研究の発展

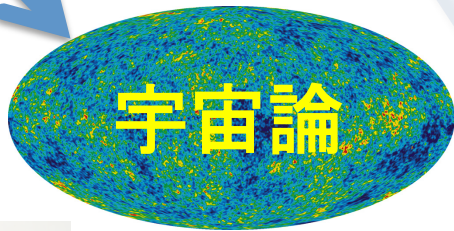
Dark Matter
相対論の破れ
Axion



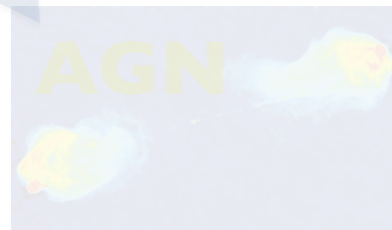
GeV SNR
宇宙線脱出
PeVatronは?



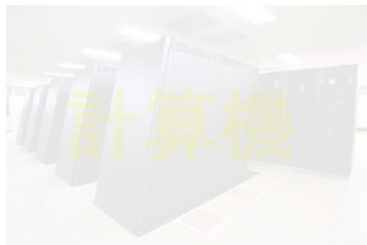
林先生



GeV成分発見
光球 vs 磁場モデル
超新星Breakout



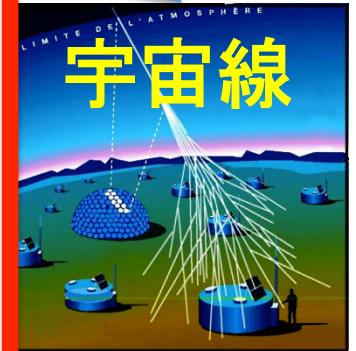
Blazar Sequence
Off-axis、変動、偏光
GeV電波ローブ



PIC粒子加速
3D rela. MHD
Jet/降着円盤



2M_⊙中性子星
Outergap
Crab変動
GeV-TeV PWN



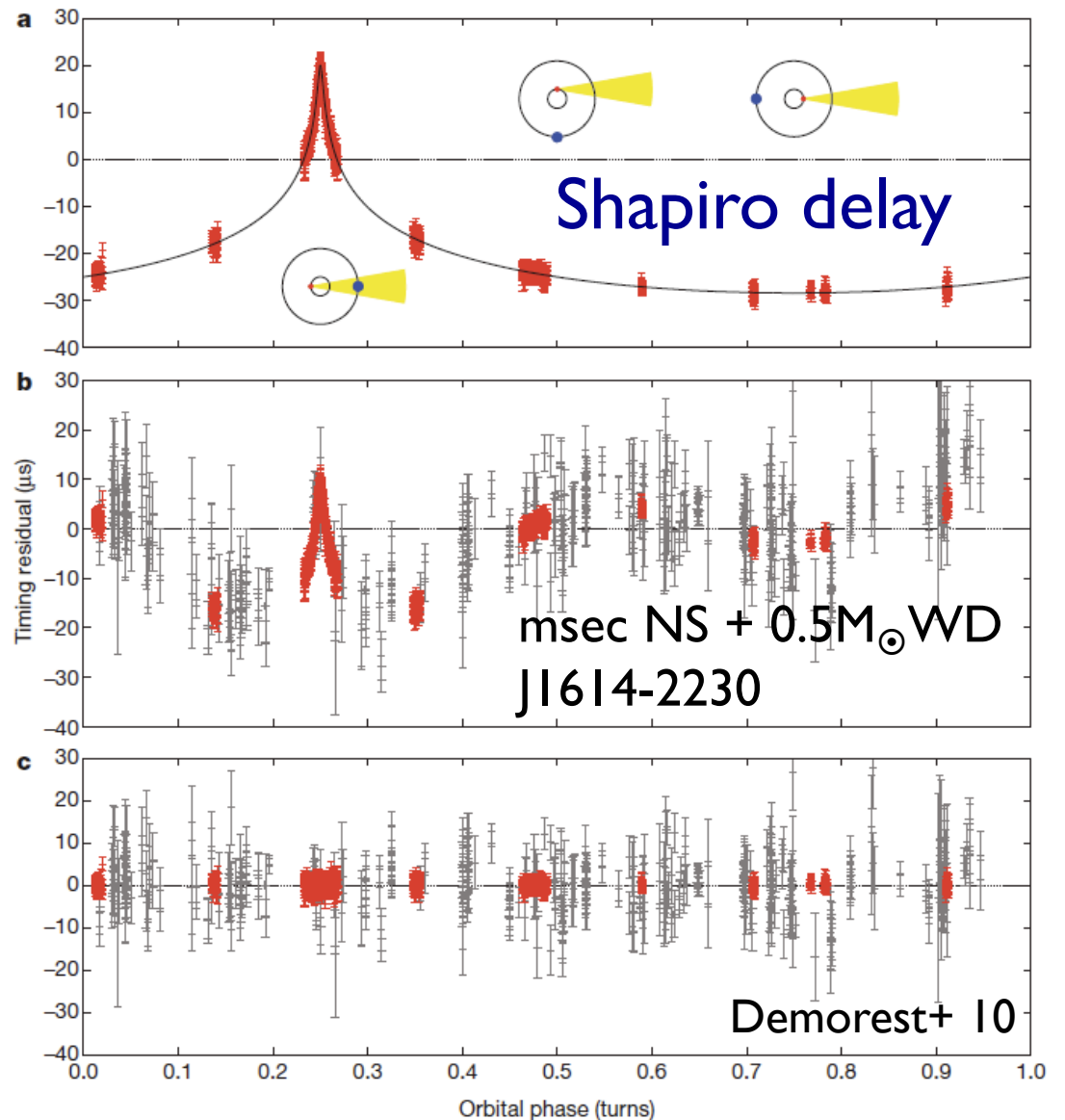
e⁺ 超過
He 超過
UHECR Fe?

さまざまな高エネルギー源

2M_⊙中性子星

- $\sim(1.97\pm 0.04)M_{\odot}$
- NS-NS連星合体
⇒ Short GRBへの道を広げた
 - 即時崩壊しにくい (Magnetar GRB)
 - 質量比大⇒Disk
- 質量比大は球状星団起源?

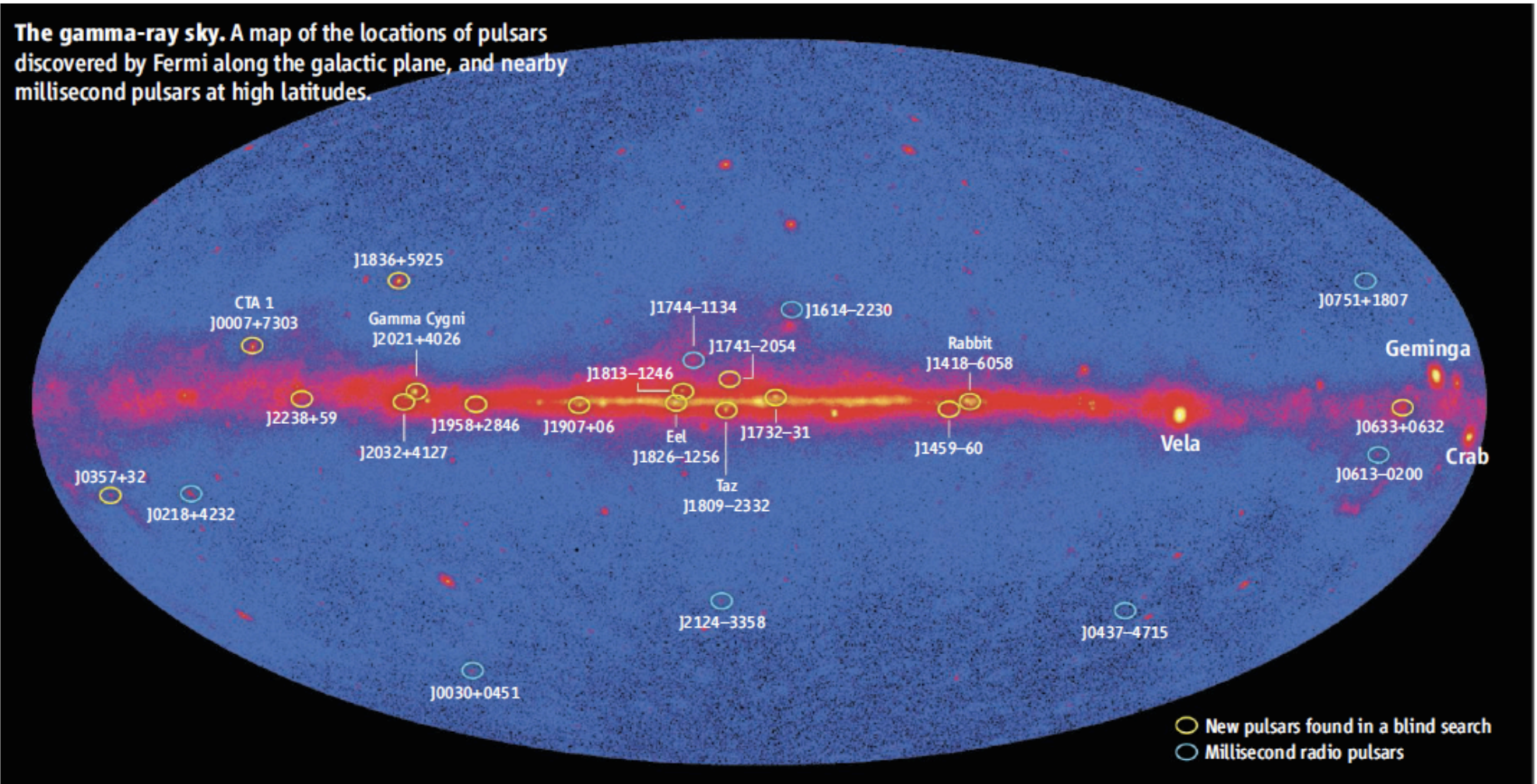
Ozel+ 10



γ線パルサーラッシュ

Halpern+ 10

The gamma-ray sky. A map of the locations of pulsars discovered by Fermi along the galactic plane, and nearby millisecond pulsars at high latitudes.



1. 6個 ⇒ >55個

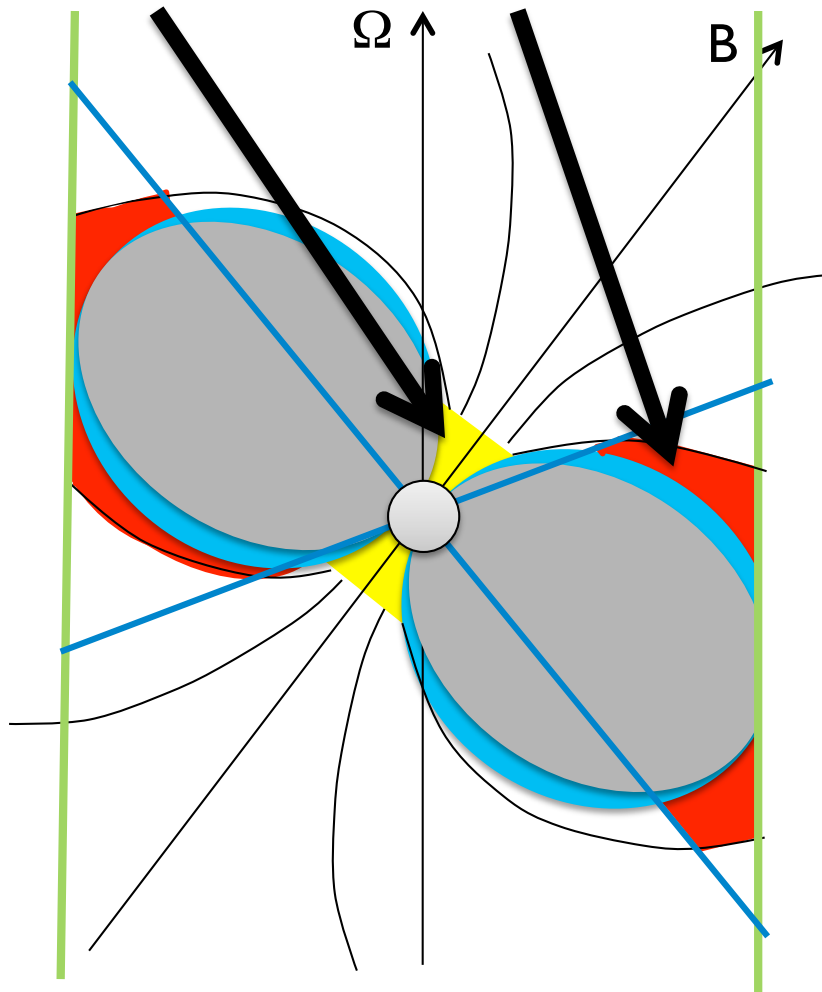
2. ミリ秒γ線PSRの発見(～普通のγ線PSR)

3. Blind, unID ⇒ 後で電波PSR

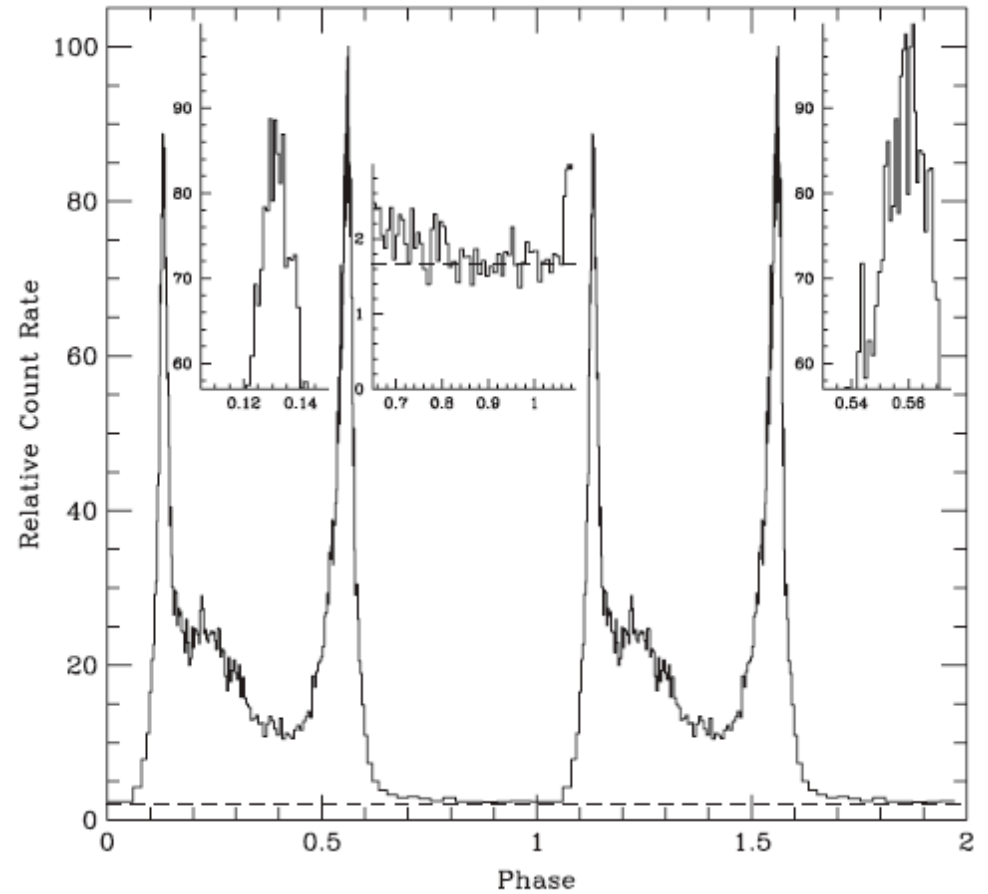
⇒ 重力波

γ 線パルサー

磁場+回転 \Rightarrow 電場 \Rightarrow γ 線
極冠か磁気圏外側か?

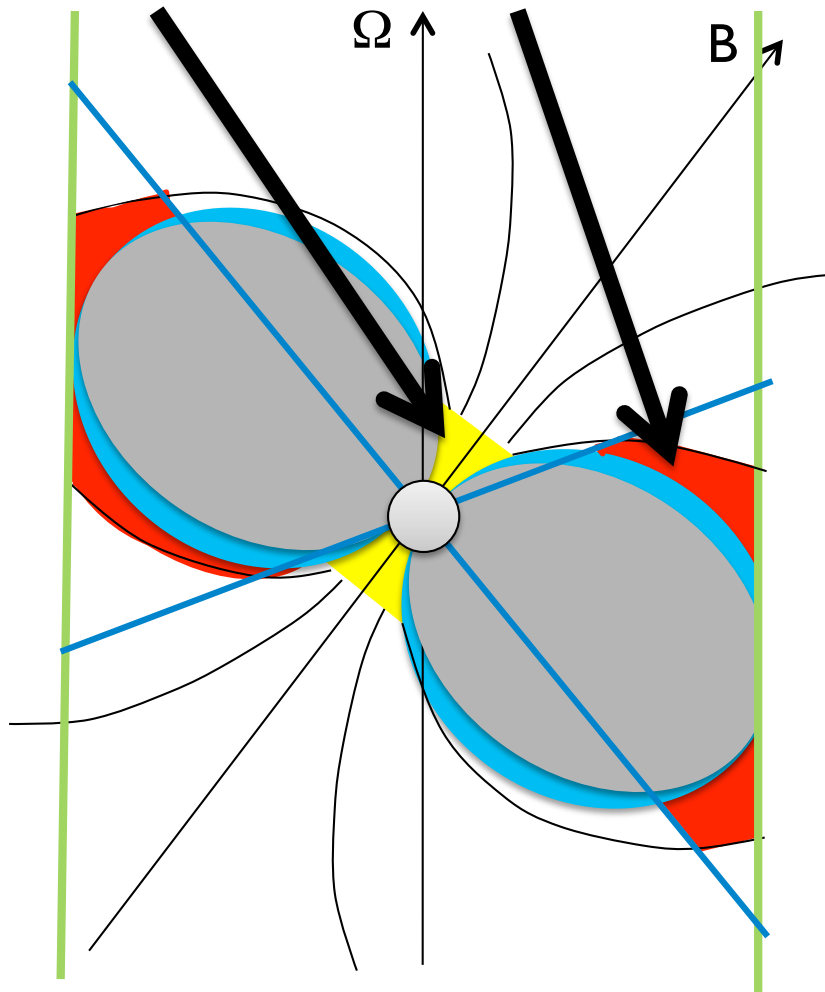


1. 光度曲線: 2ピーク \Rightarrow Fan-like



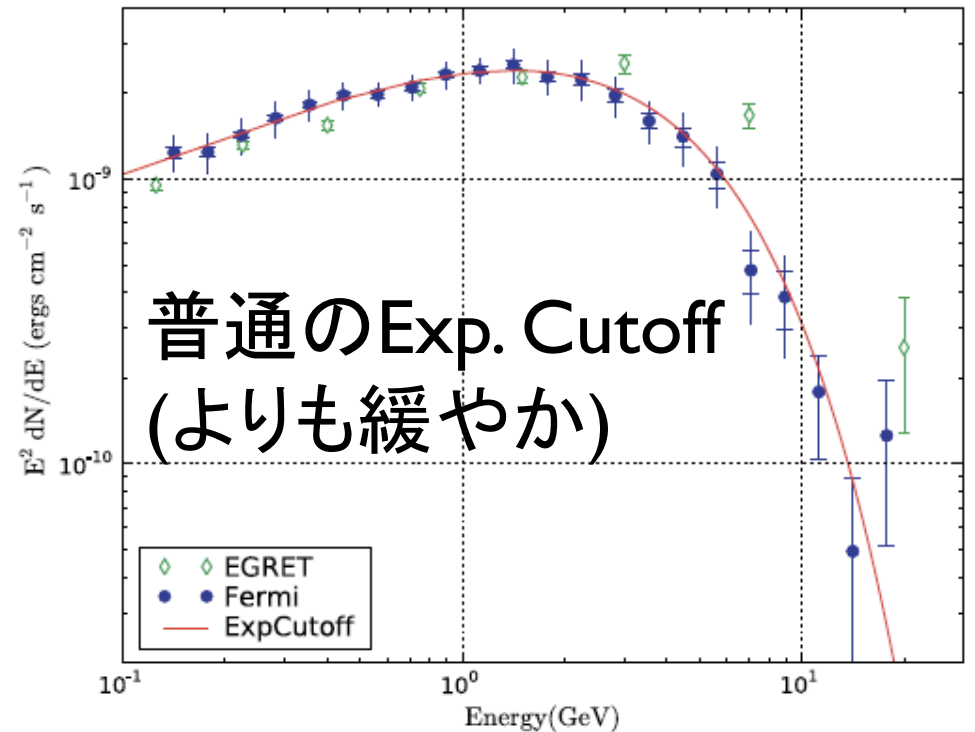
γ線パルサー

磁場+回転 ⇒ 電場 ⇒ γ線
 極冠か磁気圏外側か?



1. 光度曲線: 2ピーク ⇒ Fan-like
2. Spectrum: Not super-Exp.

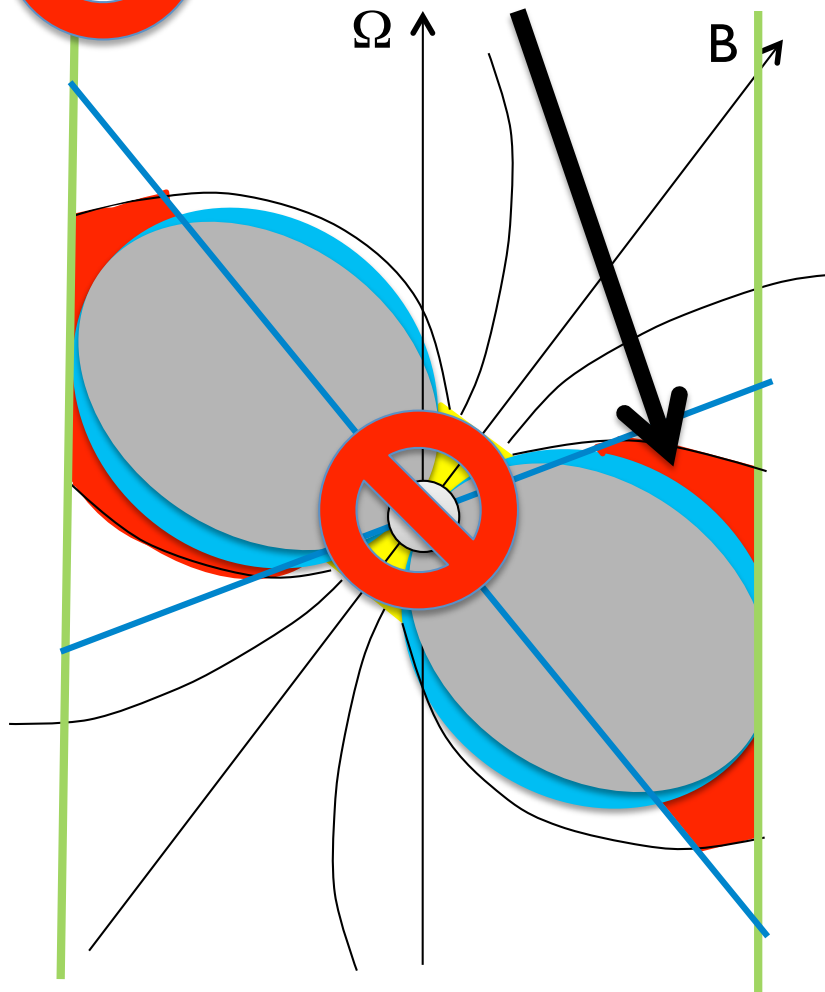
$$\gamma B \rightarrow e^+ e^-: I_{MFP} \propto \exp(1/E)$$



γ線パルサー

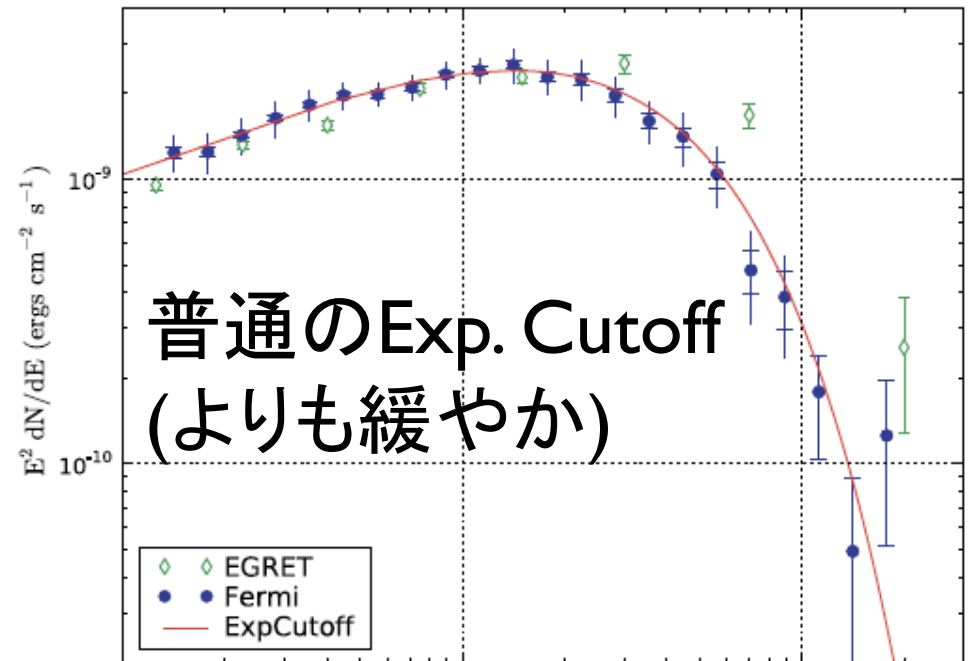
磁場+回転 ⇒ 電場 ⇒ γ線

磁気圏外側か?



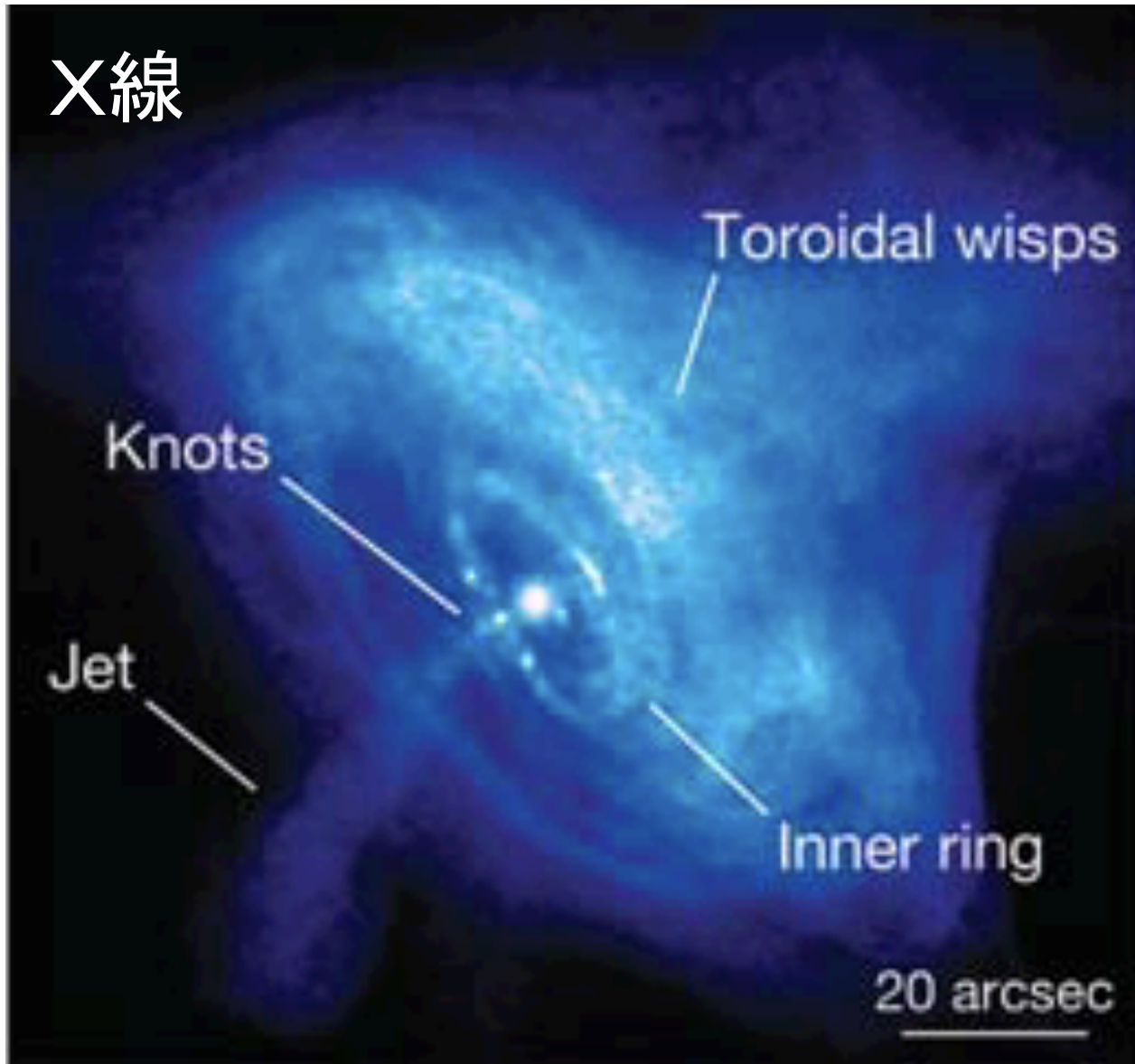
1. 光度曲線: 2ピーク ⇒ Fan-like
2. Spectrum: Not super-Exp.

$$\gamma B \rightarrow e^+ e^-: I_{MFP} \propto \exp(1/E)$$

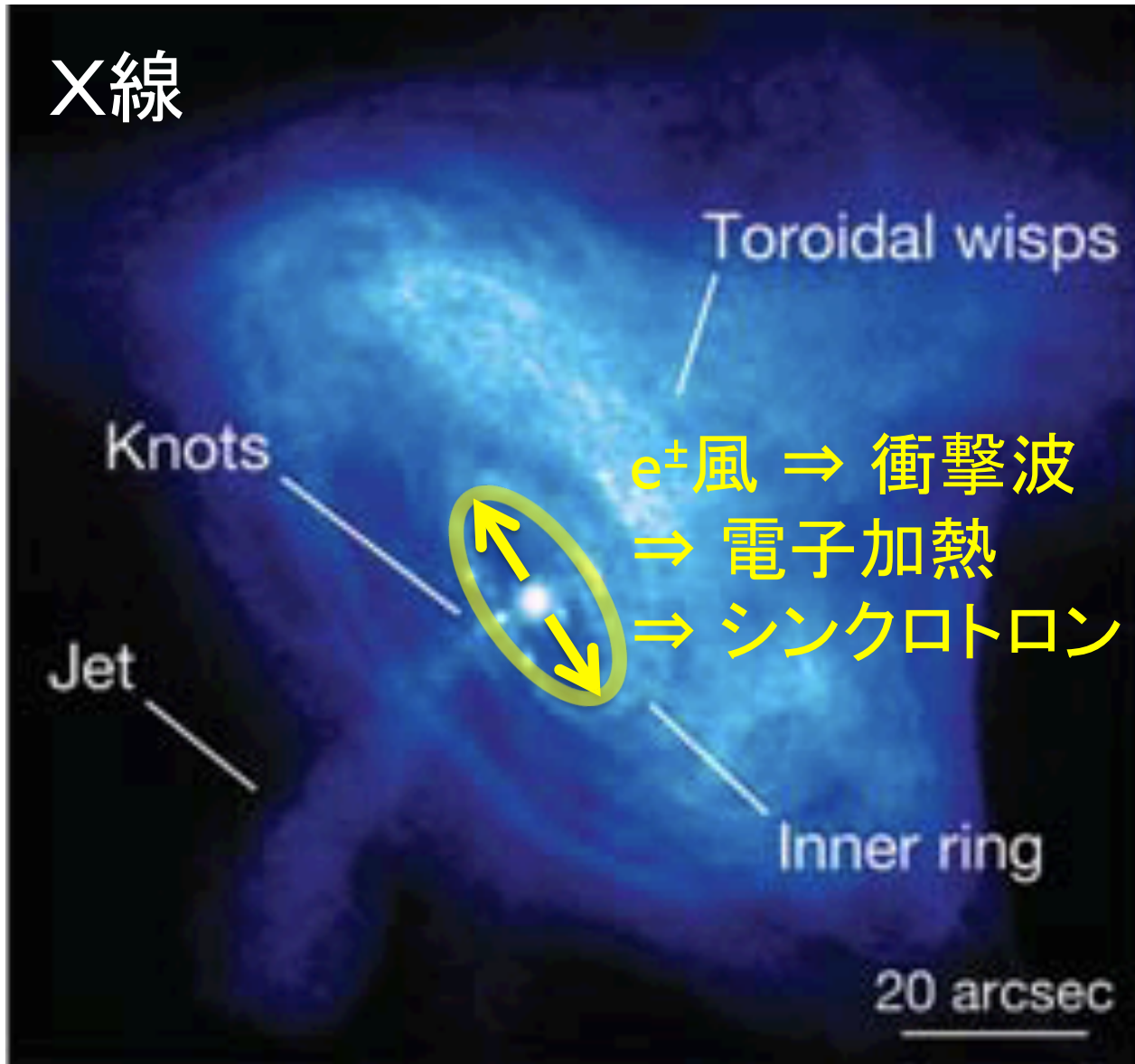


3. Radio-quiet γ線パルサー

パルサー星雲 PWN

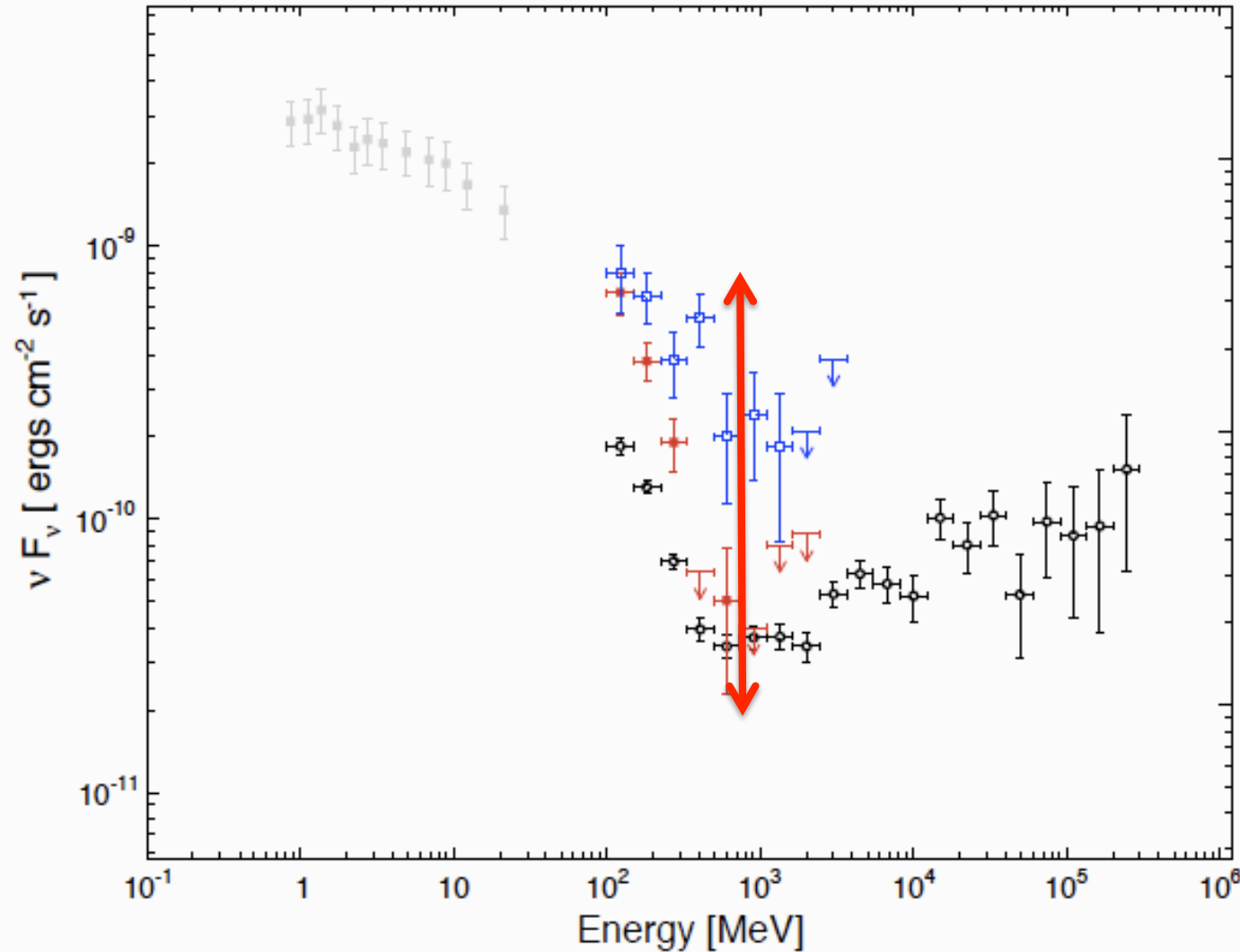


パルサー星雲 PWN



- 蟹星雲
 \Rightarrow 標準光源
(様々な波長)
- $r_{\text{shock}} \sim 0.1 \text{ pc}$
- $r_{\text{shock}}/c \sim$
数ヶ月
- $r_{\text{knot}} \sim 0.01 \text{ pc}$

Crab Nebula の変動



- Fermi
- 16日間
Feb 09
~3.8倍
- 4日間
Sep 10
~5.5倍
- 他の波長
では不変
- 皆驚いた

PeV 電子

Abdo+ 10
Komissarov & Lyutikov 10
Bednarek & Idec 10

- 電子が冷えきる \Rightarrow シンクロトロン (他は遅い)

$$t_{cool} \approx 120 \left(\frac{B}{100 \mu\text{G}} \right)^{-3/2} \left(\frac{\nu}{100 \text{MeV}} \right)^{-1/2} \text{ days}$$

- 最大エネルギー (加速時間 = 冷却時間)

$$\varepsilon_{\gamma}^{\max} = \frac{27}{16\pi} \frac{mhc^3}{q^2} = \frac{27}{8} \frac{mc^2}{\alpha} = 236 \text{ MeV}$$

相対論
的運動
が必要?

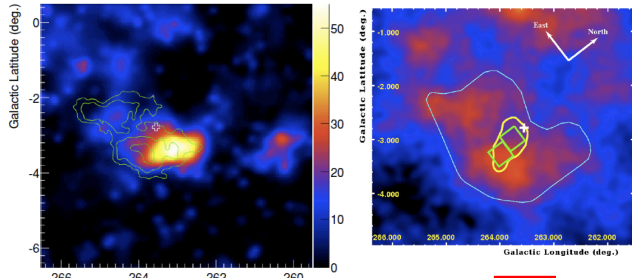
- 電子エネルギー ($\sim 10^{15} \text{eV} = \text{PeV}$)

$$\varepsilon_{\gamma} \approx 500 \left(\frac{\varepsilon_e}{10^{15} \text{eV}} \right)^2 \left(\frac{B}{8 \text{mG}} \right) \text{MeV}$$

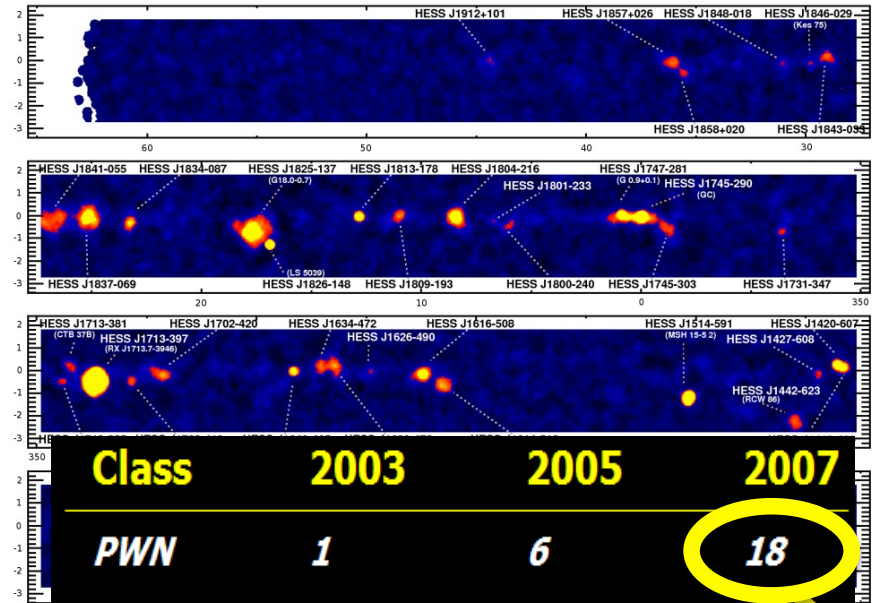
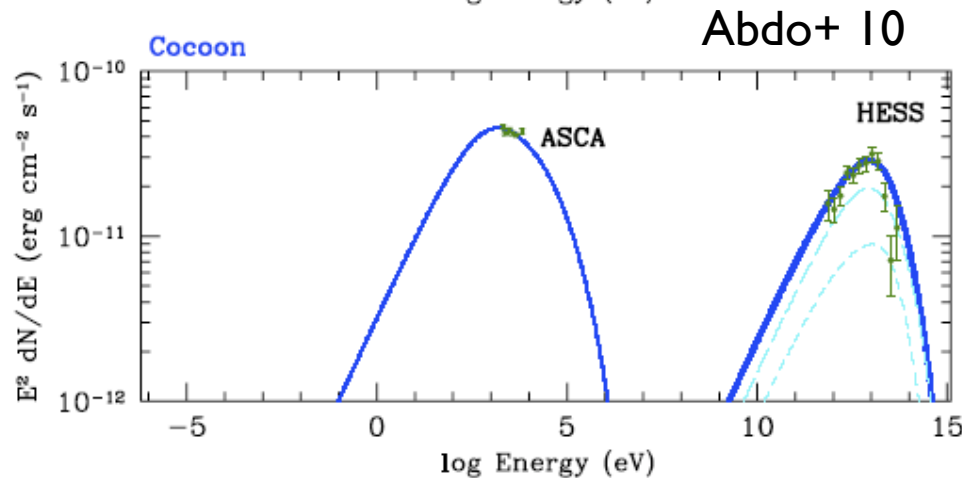
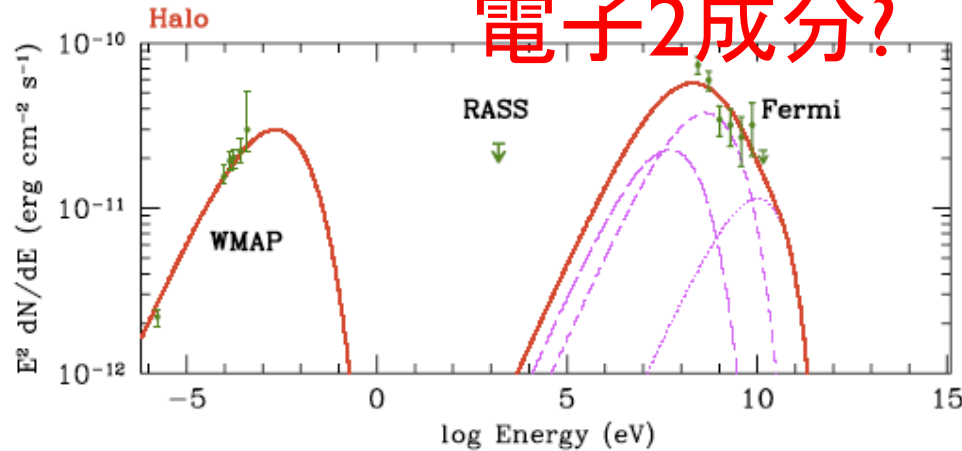
原因は不明

他のGeV PWNNの発見

未同定TeV天体に γ 線PSRが



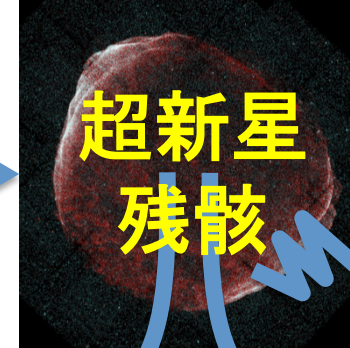
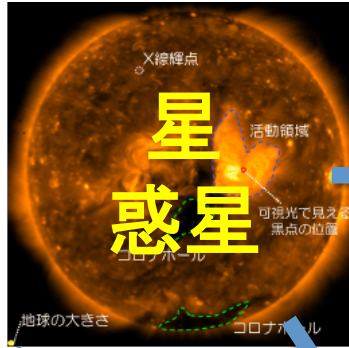
Vela-X
電子2成分?



Class	2003	2005	2007
PWN	1	6	18
SNR	2	3	7
Binary	0	2	4
Diffuse	0	2	2
AGN	7	11	19
UnId	2	6	21
Total	12	33	71!

研究の発展

Dark Matter
 相対論の破れ
 Axion

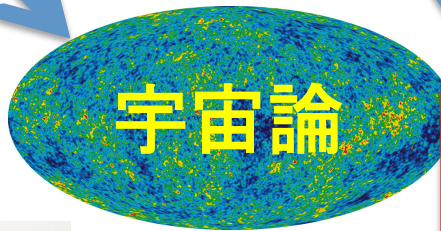


GeV SNR
 宇宙線脱出
 PeVatronは?

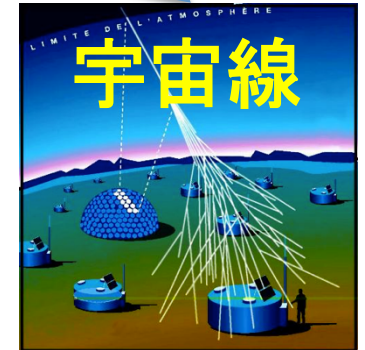
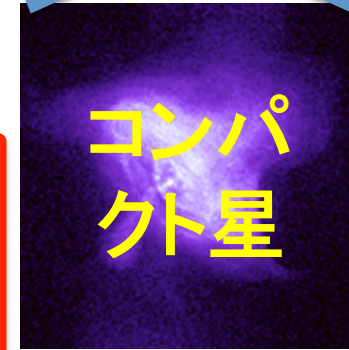


素粒子

林先生



GeV成分発見
 光球 vs 磁場モデル
 超新星Breakout



2M_⊙中性子星
 Outergap
 Crab変動
 GeV-TeV PWN

e⁺ 超過
 He 超過
 UHECR Fe?



PIC粒子加速
 3D rela. MHD
 Jet/降着円盤

High-z/初代 GRB
 EBL
 銀河間磁場
 GeV背景放射

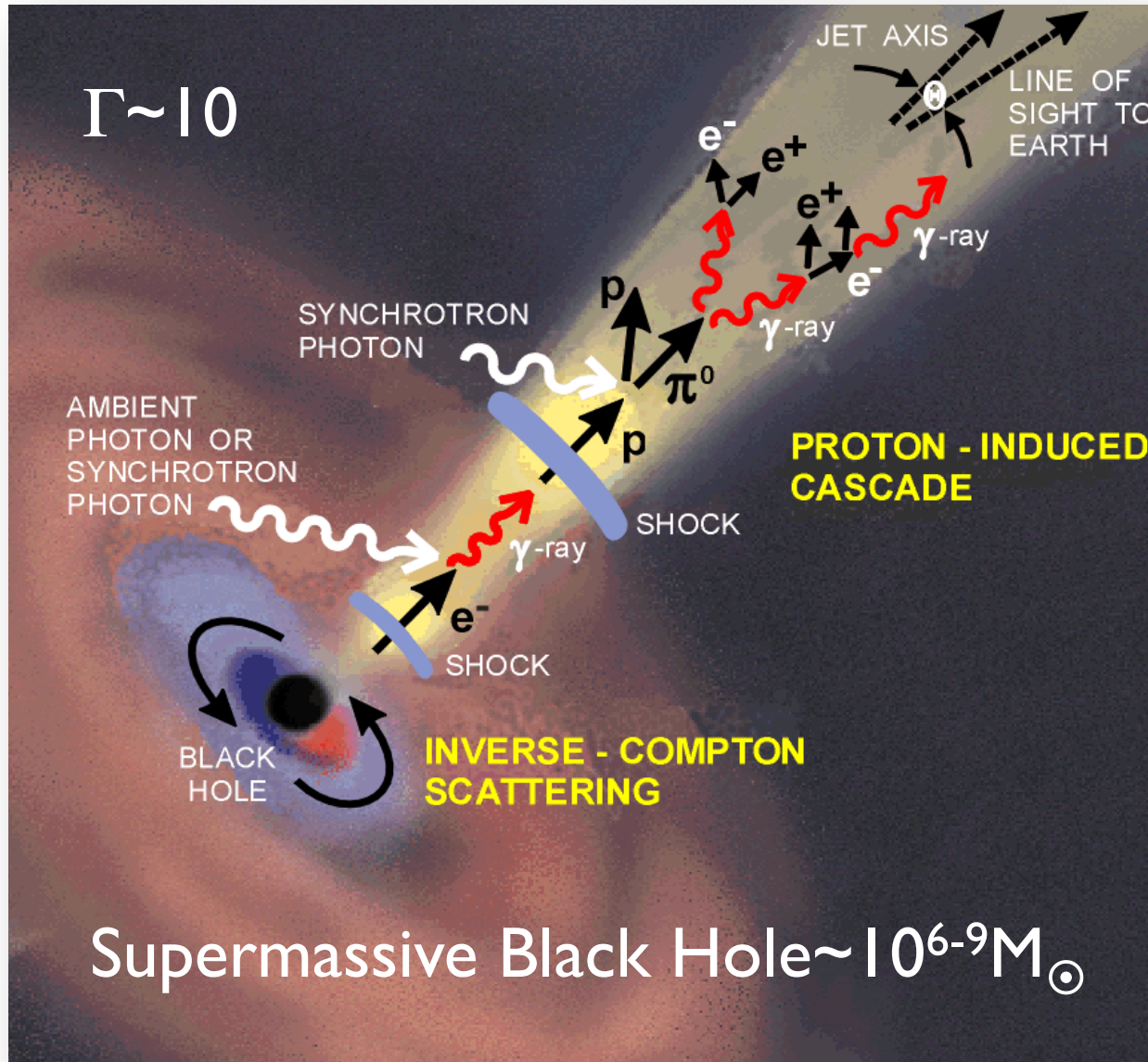


Blazar Sequence
 Off-axis、変動、偏光
 GeV電波ローブ

さまざまな高エネルギー源

活動銀河核 AGN

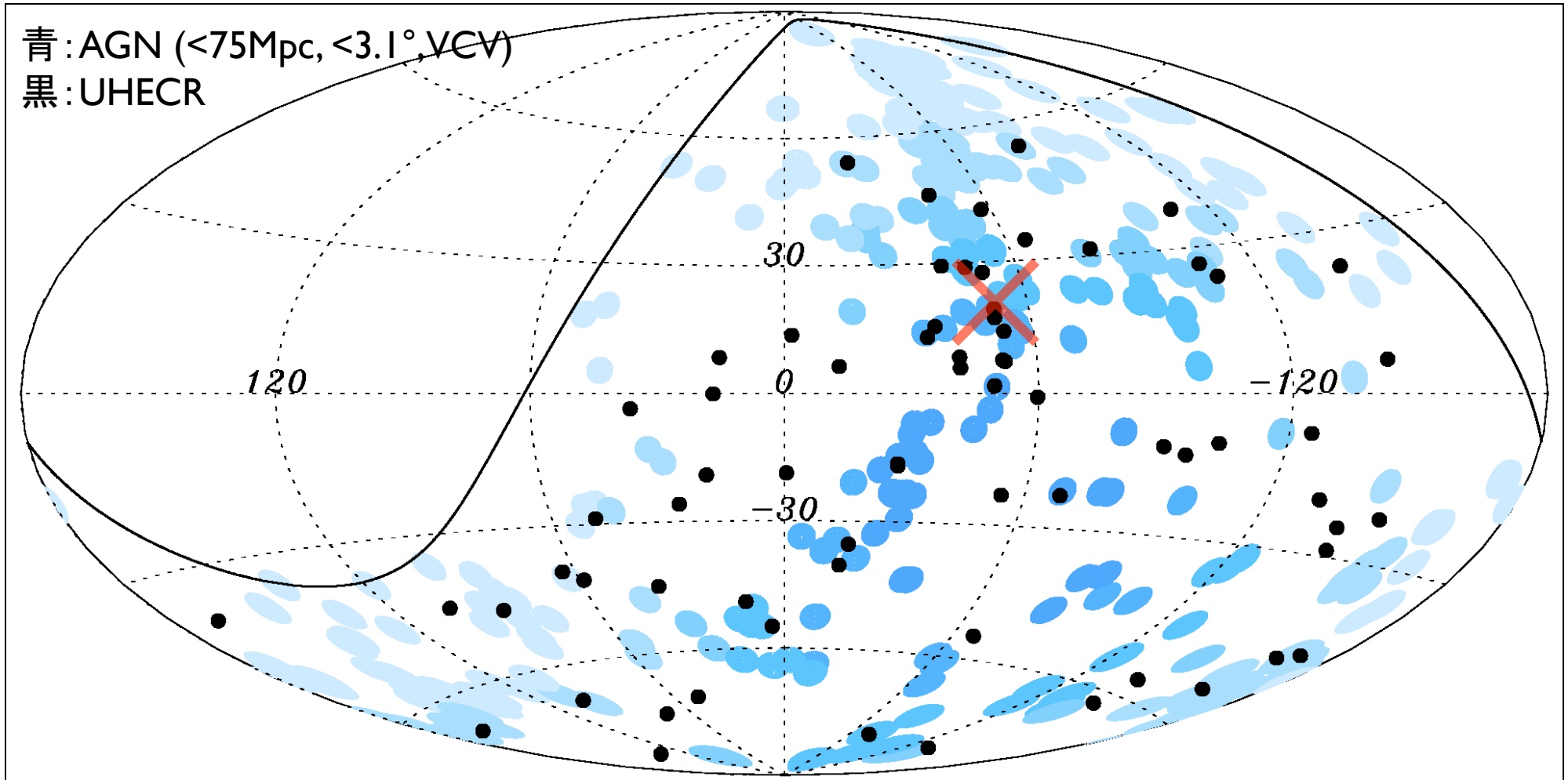
Blazar



FR I
FR II
電波銀河

UHECR 到来方向

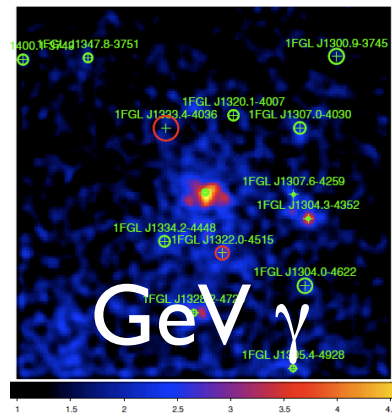
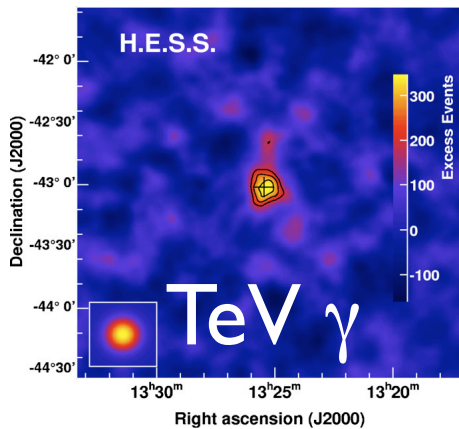
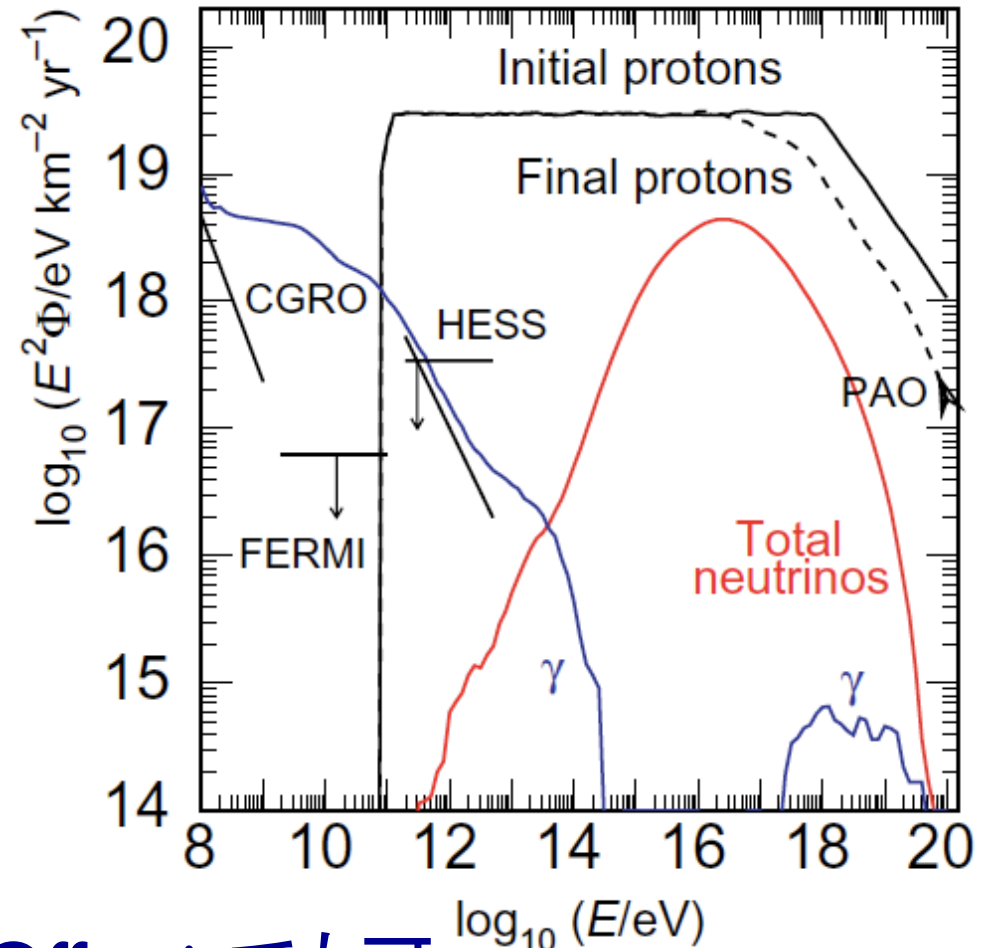
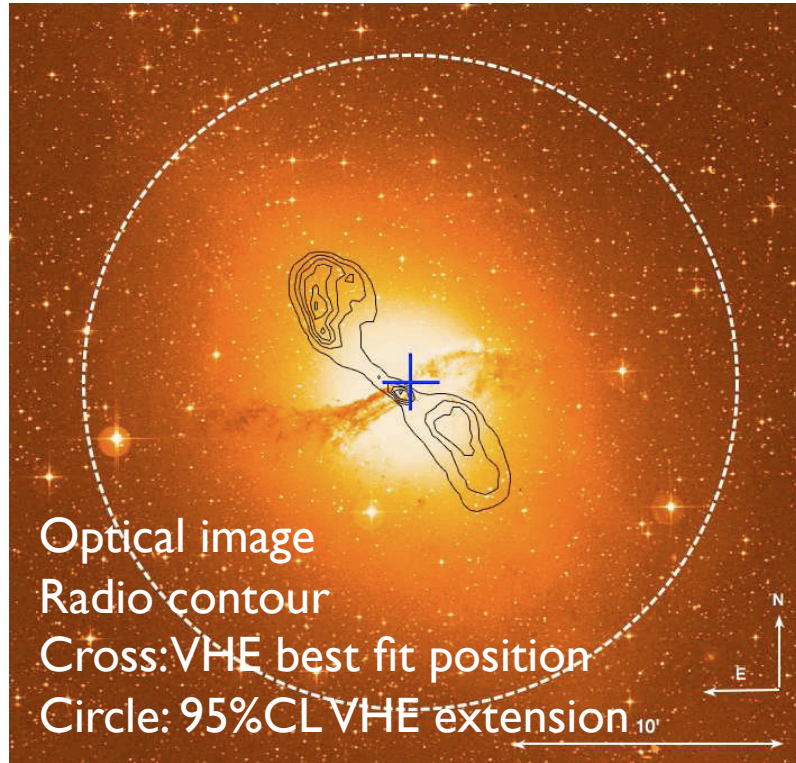
Auger 10



Centaurus A 電波銀河 (Off-axis AGN @3.8Mpc)
>~3 σ excess at ~20 deg around Cen A

Aharonian+ 09
Abdo+ 10

Cen Aからの γ 線



Off-axisでも可

Kachelrieß+ 09

UHECR源=Transient

- Hillas条件 $E < ZeBR$ を書きかえると

$$L > L_B > 10^{12} \left(\frac{\Gamma^2}{\beta} \right) \left(\frac{\varepsilon}{Z 10^{20} \text{ eV}} \right)^2 L_{\text{sun}}$$

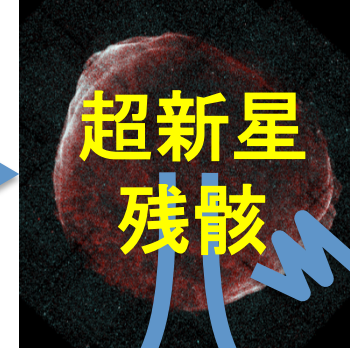
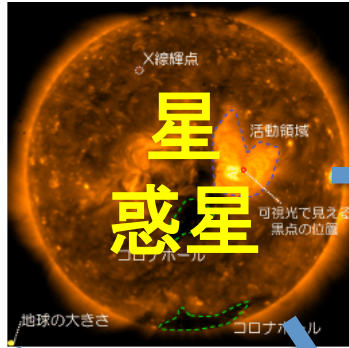
$\sim 10^{46} \text{ erg/s} > \text{Cen A } L \sim 10^{43} \text{ erg/s}$

- $M \sim 10^8 M_{\odot} \Rightarrow L_{\text{Edd}} \sim 10^{46} \text{ erg/s}$
- 昔、明るかったときにUHECRが作られた?
(磁場で曲げられて遅れてやってくる)

No $L > 10^{12} L_{\odot}$ at $d < d_{\text{GZK}} \Rightarrow \text{Transient}$

研究の発展

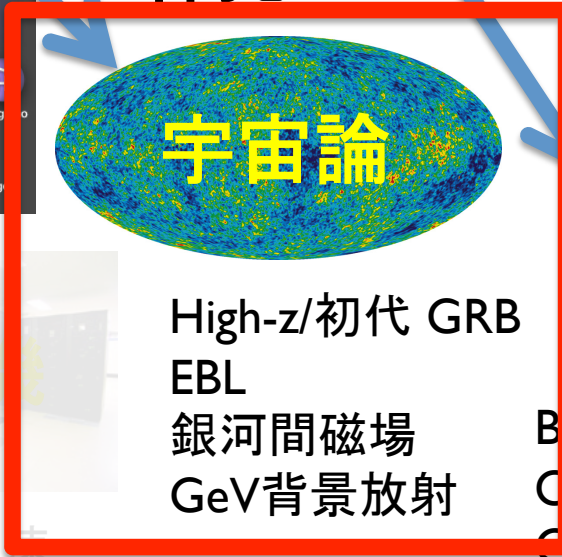
Dark Matter
相対論の破れ
Axion



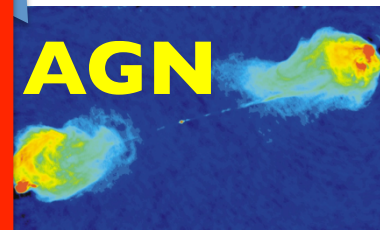
GeV SNR
宇宙線脱出
PeVatronは?



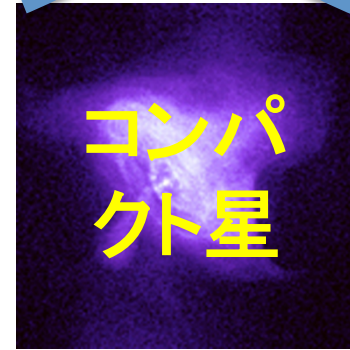
林先生



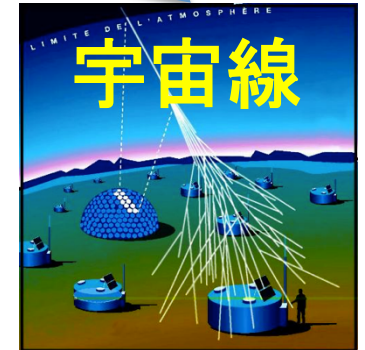
GeV成分発見
光球 vs 磁場モデル
超新星Breakout



Bazar Sequence
Off-axis、変動、偏光
GeV電波ローブ



2M_⊙中性子星
Outergap
Crab変動
GeV-TeV PWN

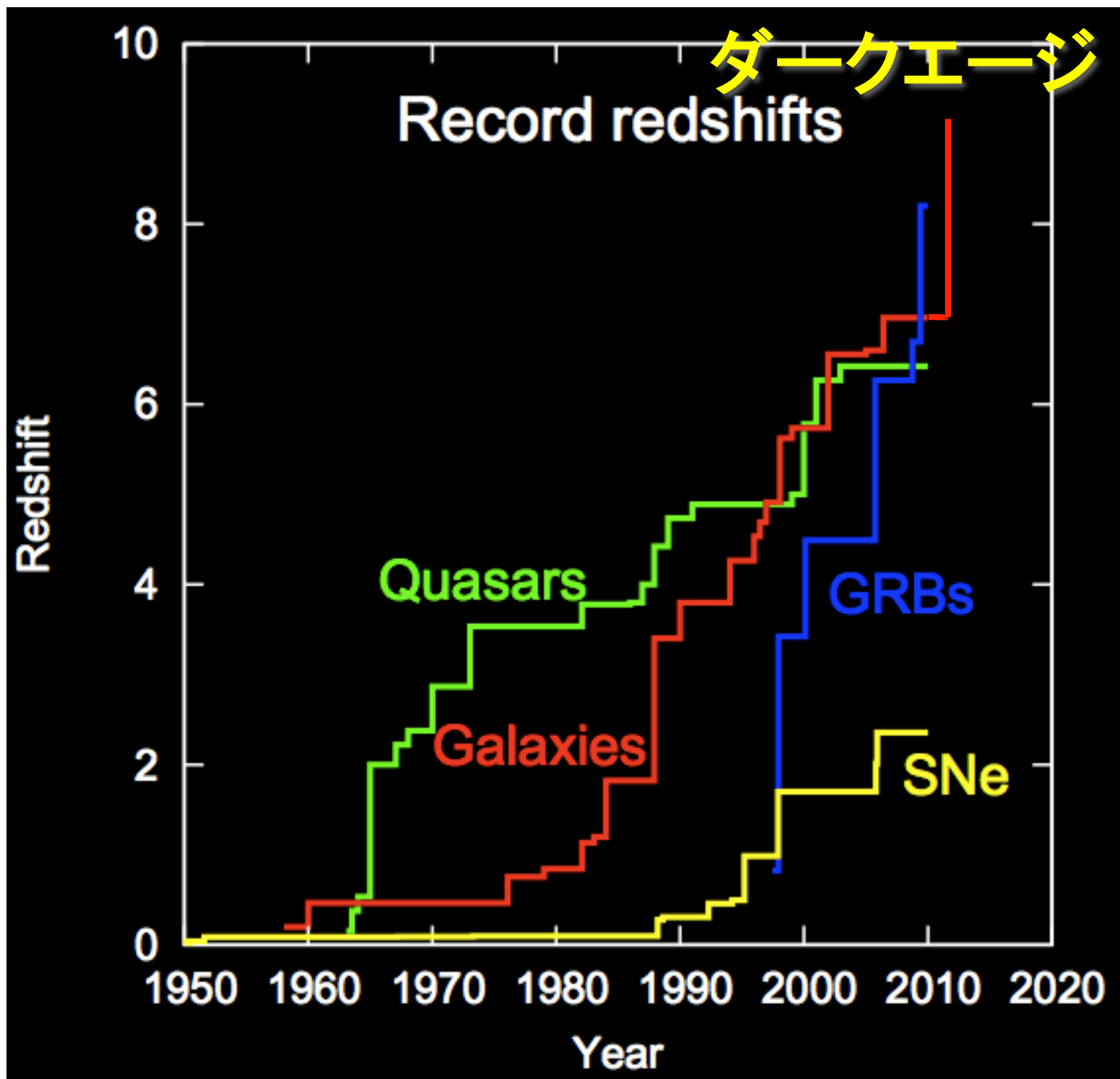


e⁺ 超過
He 超過
UHECR Fe?



PIC粒子加速
3D rela. MHD
Jet/降着円盤

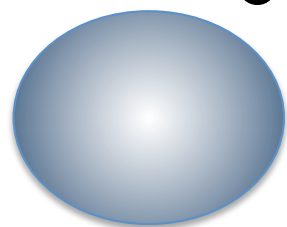
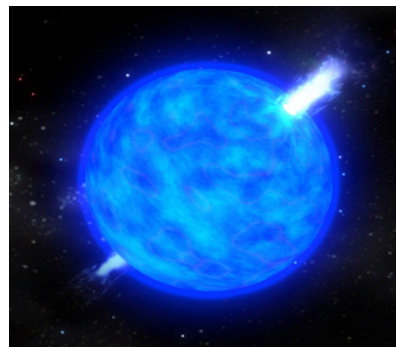
さまざまな高エネルギー源



First GRB

Abel+ 02
Bromm+ 02
Omukai+ 03
Yoshida+ 08

**Present Day
Massive Star**
~20M_☉



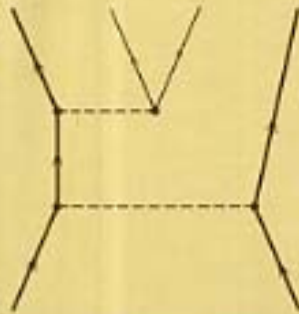
Pop III
(Zero Metal)
~100-1000M_☉
(!?)

Komissarov & Barkov 10
Meszaros & Rees 10
Suwa & KI 10

Gigantic (x100) GRB @ z~10-30???

継続時間大~10⁴s, 普通の光度, Soft-X

岩波講座
現代物理学の基礎
〔第2版〕 5
統計物理学



岩波書店の
単行本
待望の復刊

岩波書店

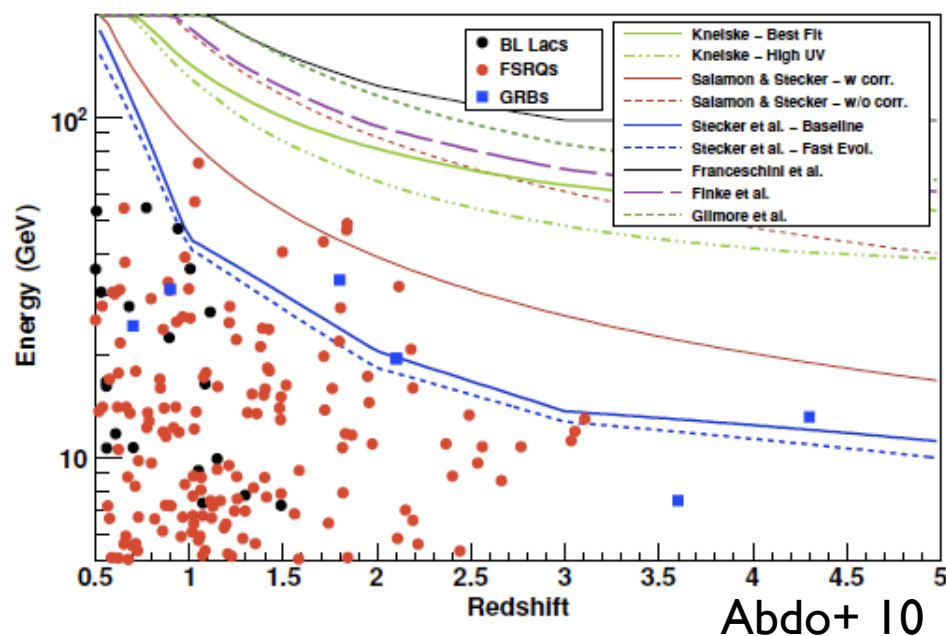
- これは統計物理学ですが、11巻が宇宙物理学
- GRBのJetが星を突き抜けるか?という問題で外層の半径が重要になった。
- どうも $\rho \sim r^{-3}$: 質量に敏感。これでいいのだろうか?
- 答えが載っていた。中心核を持つ星の外層 $\kappa L(r)/M(r) = \text{一定}$ のものは Eddingtonモデル
⇒ $n=3$ のポリトロープ
- 安心して先に進めた。
- ぜひ復刊してほしい。

Probe of Cosmology

Dermer+,
Nerenov+ 10
Murase+,
Takahashi+ 08

系外背景放射 (EBL)

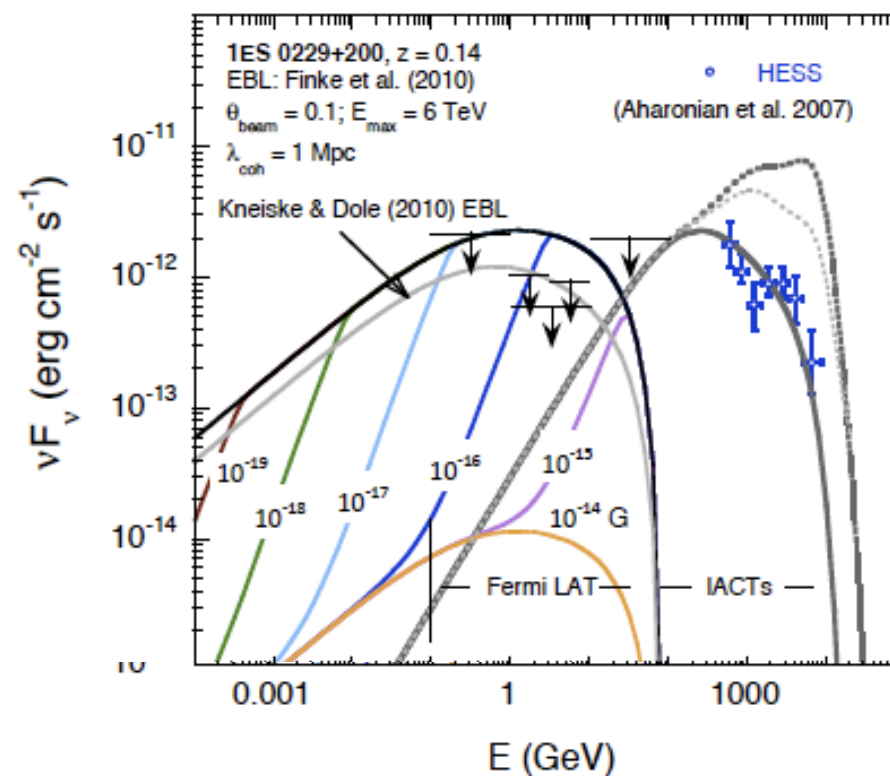
$\gamma_{\text{TeV}} \gamma_{\text{TeV}} \rightarrow e^+e^-$ (γ 線が減光)



Fermi 10-300GeVを使う
Stecker+ 06のモデルを棄却

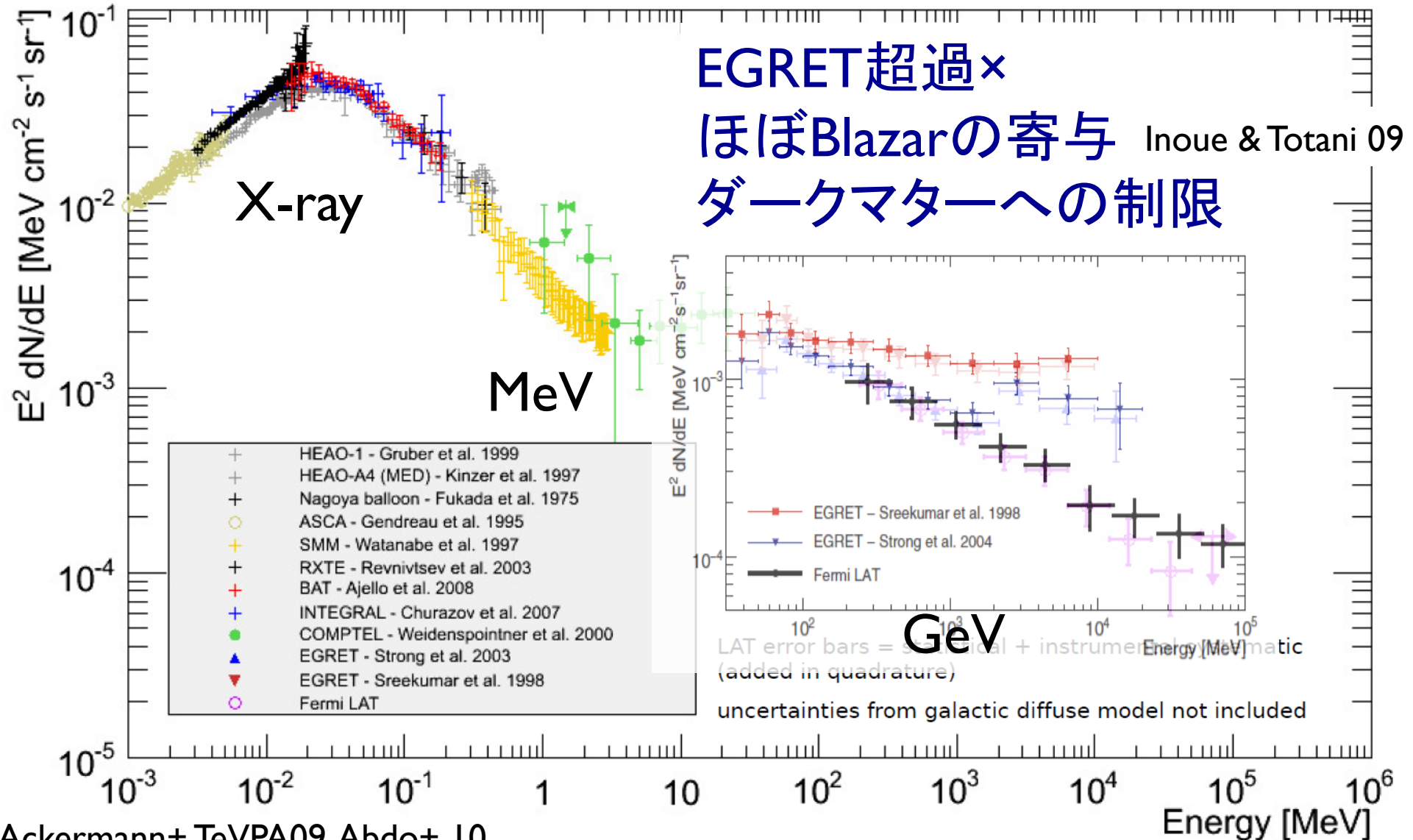
銀河間磁場

$\gamma_{\text{TeV}} \gamma_{\text{TeV}} \rightarrow e + \text{CMB} \rightarrow \gamma_{\text{GeV}}$



源が定常なら $B > 10^{-15} \text{G}$

Cosmic γ -ray Background

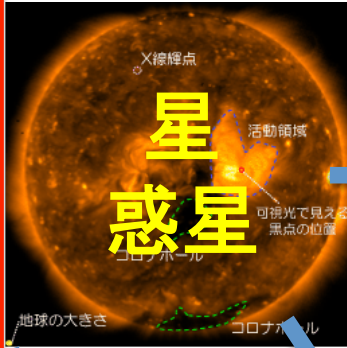


研究の発展

Dark Matter
相対論の破れ
Axion

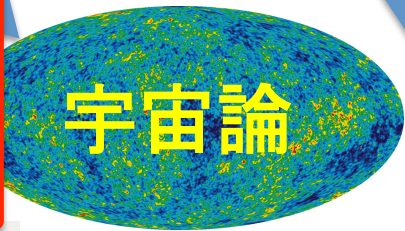


素粒子



星
惑星

林先生

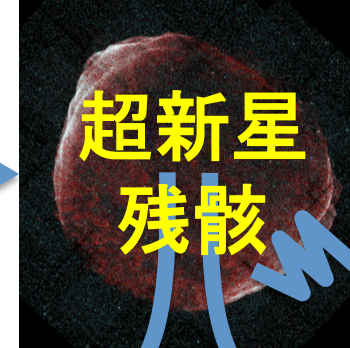


宇宙論



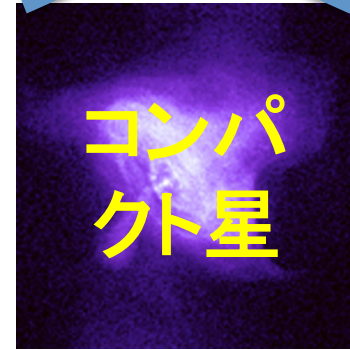
超新星
GRB

GeV成分発見
光球 vs 磁場モデル
超新星Breakout



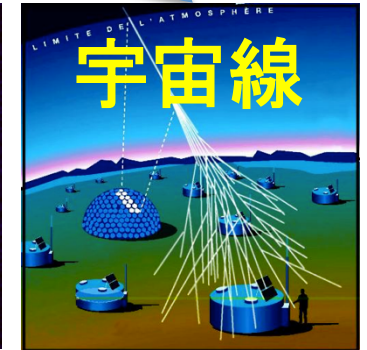
超新星
残骸

GeV SNR
宇宙線脱出
PeVatronは?



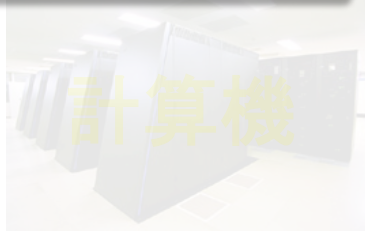
コンパクト星

2M_⊙中性子星
Outergap
Crab変動
GeV-TeV PWN



宇宙線

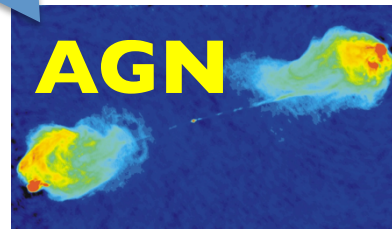
e⁺ 超過
He 超過
UHECR Fe?



計算機

PIC電子加速
3D rela. MHD
Jet/降着円盤

High-z/初代 GRB
EBL
銀河間磁場
GeV背景放射



AGN

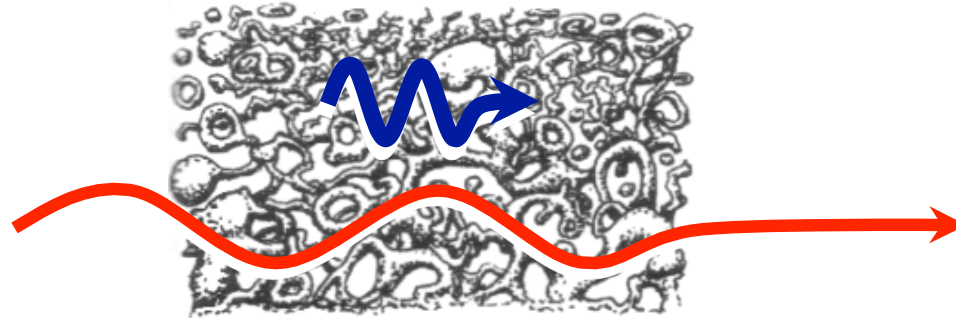
Blazar Sequence
Off-axis、変動、偏光
GeV電波ローブ

さまざまな高エネルギー源

Lorentz Invariance Violation

- Some Quantum Gravity Theories violate LI

⇒ Energy dependent dispersion & speed of light



$$\frac{p_\gamma^2 c^2}{E_\gamma^2} - 1 = s_n \left(\frac{E_\gamma}{\xi M_{\text{Planck}} c^2} \right)^n \quad M_{\text{Planck}} = \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{1/2} \approx 1.22 \times 10^{19} \text{ GeV}/c^2$$

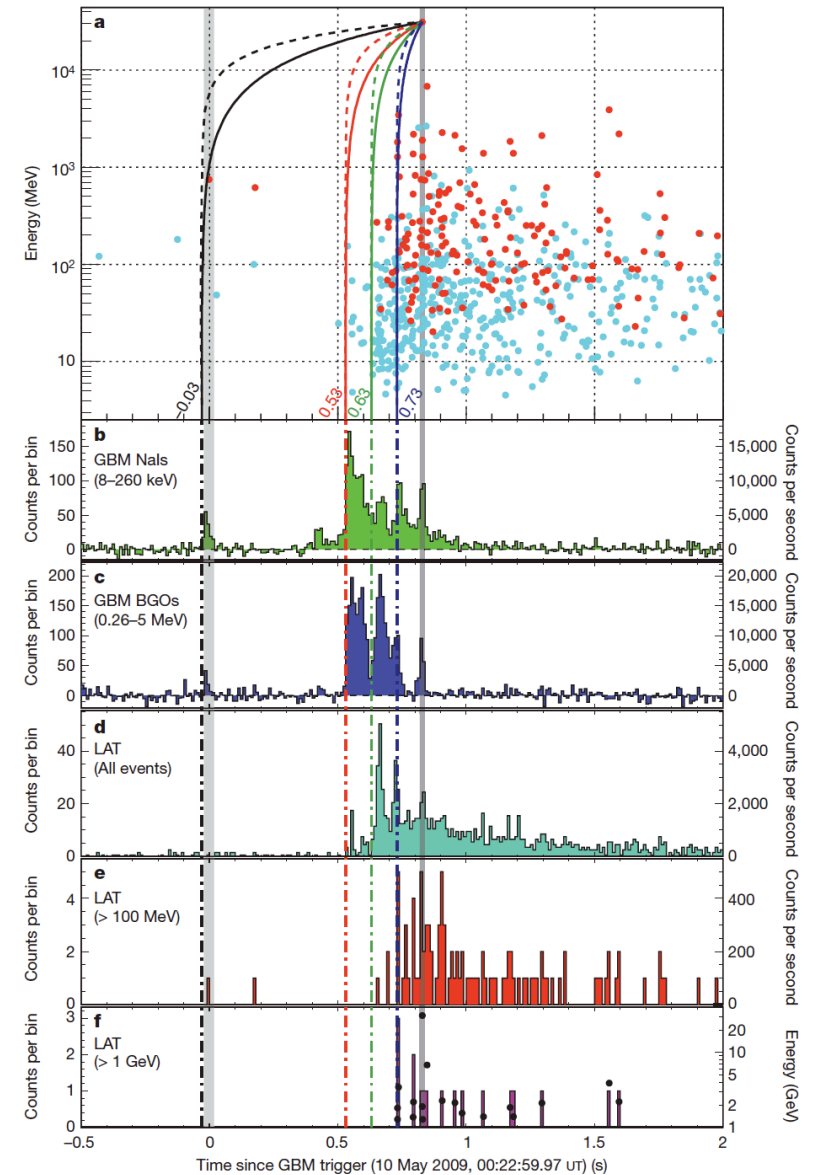
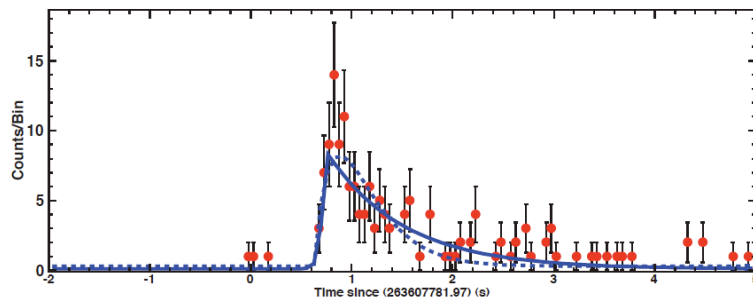
$$v_\gamma = \frac{\partial E_\gamma}{\partial p_\gamma} \approx c \left[1 - s_n \frac{n+1}{2} \left(\frac{E_\gamma}{\xi M_{\text{Planck}} c^2} \right)^n \right]$$

LIV with Fermi

GRB090510 ($z=0.9$, $E_h=28\text{GeV}$)

$$\xi = M_{\text{QG},1} / M_{\text{Planck}} > 1.2$$

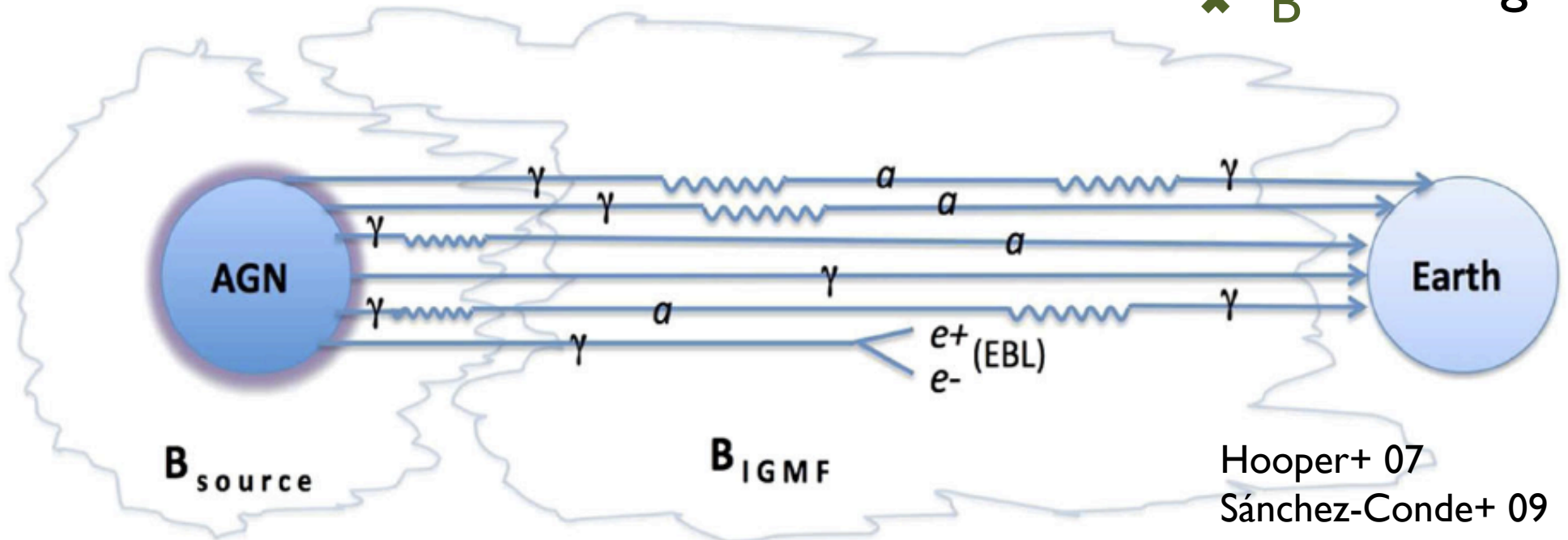
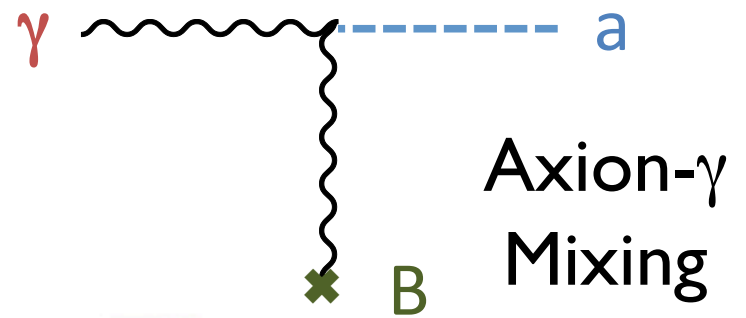
lower limit on $M_{\text{QG},1}/M_{\text{Planck}}$	limit on $M_{\text{QG},2}$ in $10^{10} \text{ GeV}/c^2$
> 1.19	> 2.99
> 3.42	> 5.06
> 5.12	> 6.20
> 10.0	> 8.79
> 102	> 27.7
> 1.33	> 0.54
> 1.22	—



Axion-Like Particle

- $$a\gamma\gamma \quad \mathcal{L}_{a\gamma} = -\frac{1}{4}g_{a\gamma}F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu}a = g_{a\gamma}\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}a,$$

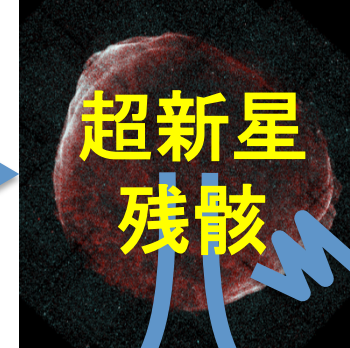
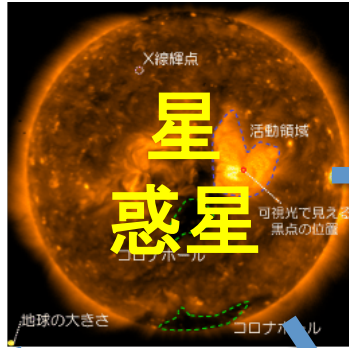
**γ線ホライズンを超える
EBLの矛盾(?)を回避**



Hooper+ 07
Sánchez-Conde+ 09

研究の発展

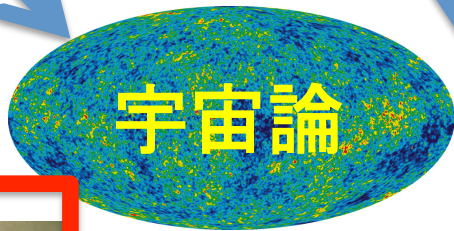
Dark Matter
相対論の破れ
Axion



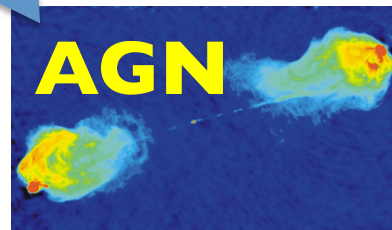
GeV SNR
宇宙線脱出
PeVatronは?



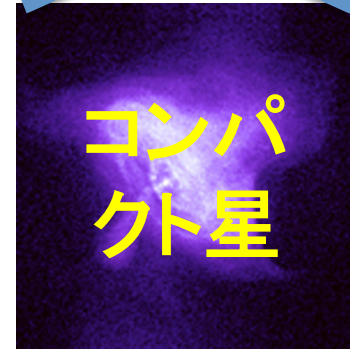
林先生



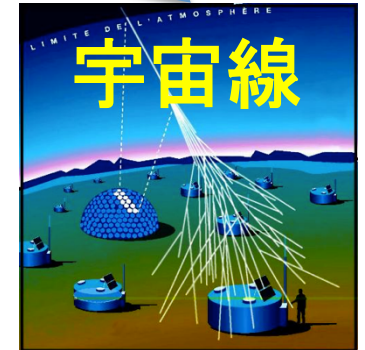
GeV成分発見
光球 vs 磁場モデル
超新星Breakout



Blazar Sequence
Off-axis、変動、偏光
GeV電波ローブ



$2M_{\odot}$ 中性子星
Outergap
Crab変動
GeV-TeV PWN



e^+ 超過
He 超過
UHECR Fe?

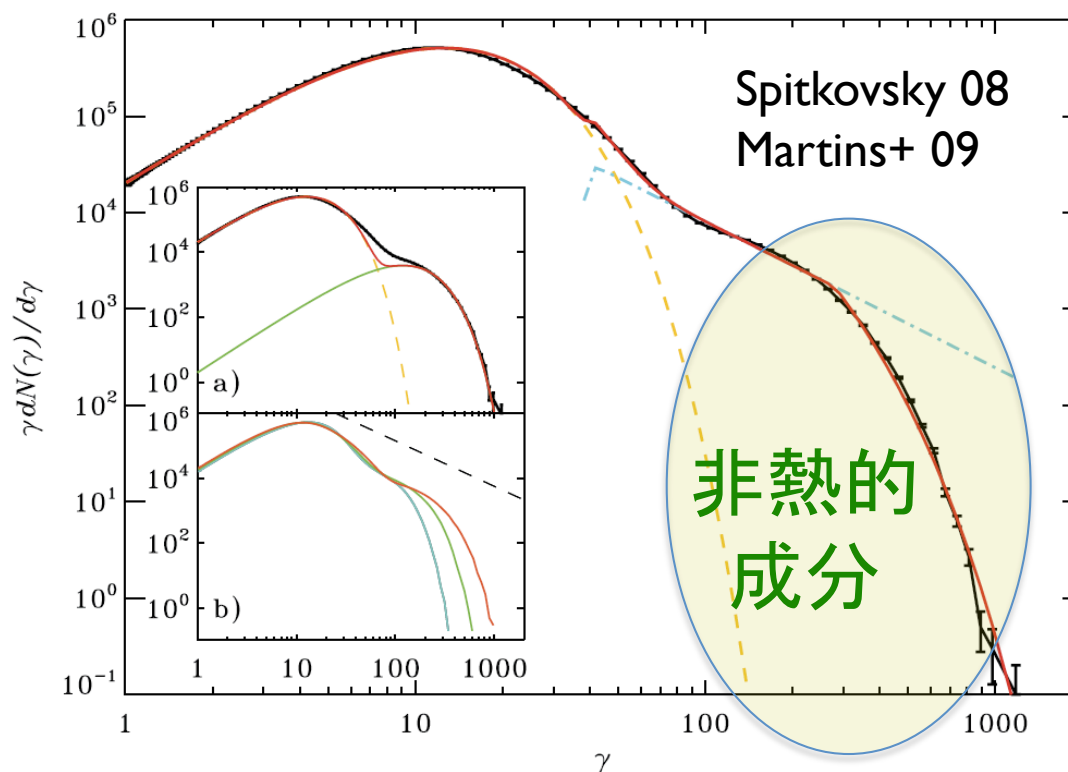
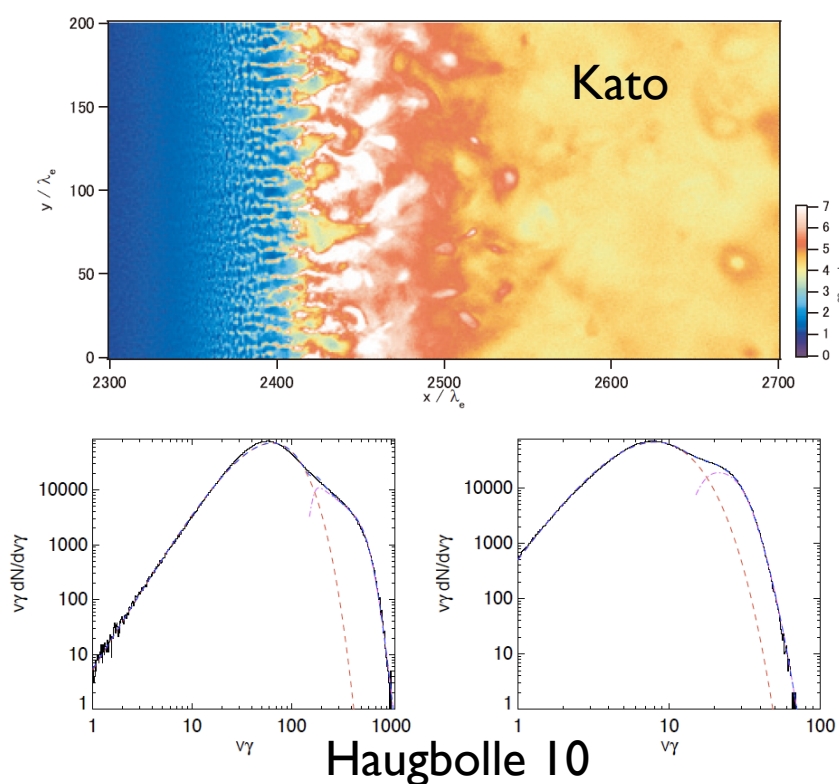
計算機

PIC粒子加速
3D rela. MHD
Jet/降着円盤

さまざまな高エネルギー源

無衝突衝撃波 PIC計算

粒子法 (PIC): 場はMaxwell on cell、粒子はEOM
~250x250x7000 cells, ~160億粒子が可能に



粒子加速が計算機上でついに実現

ただし
>10/cell

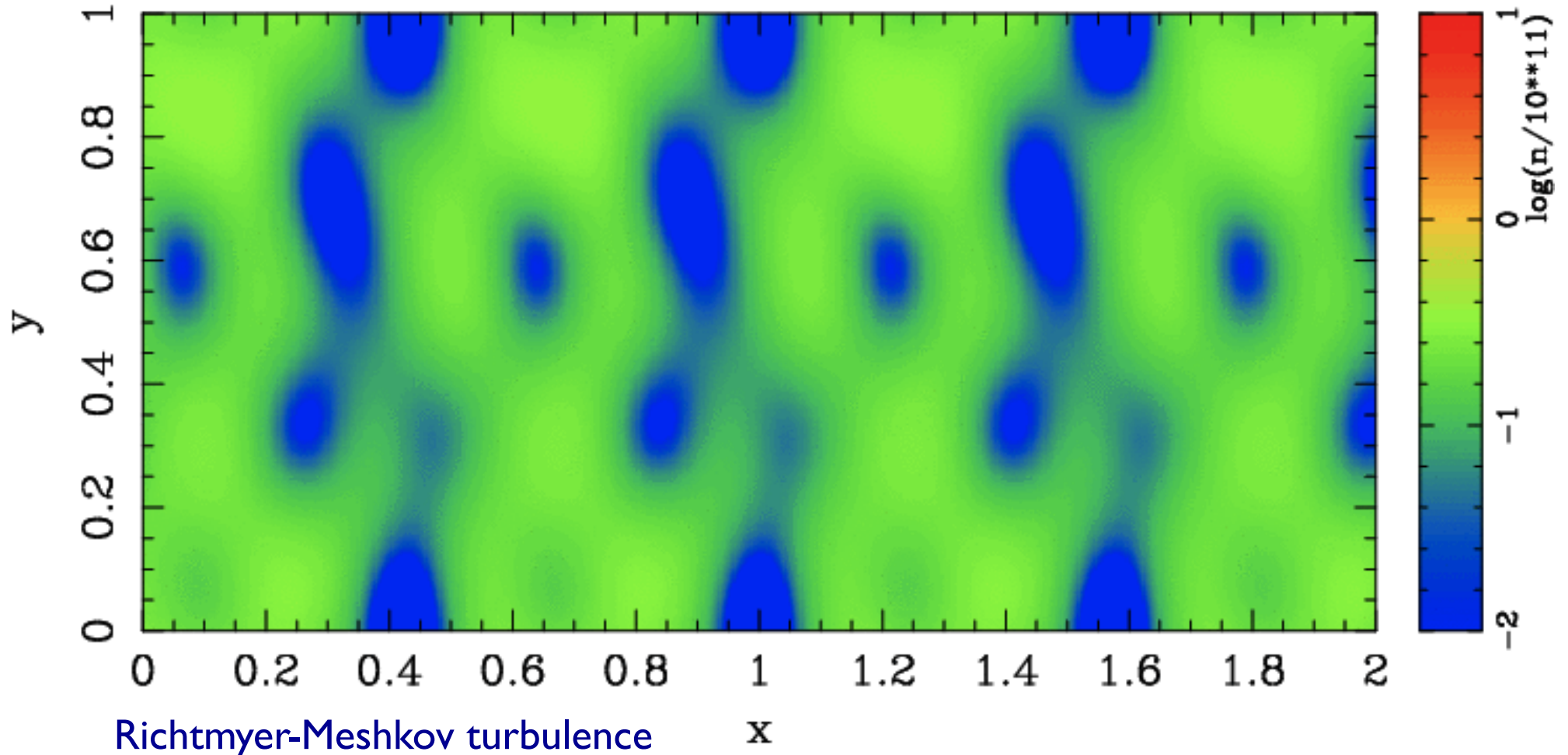
3-D Rela. MHD 乱流

$z = 0.002,$

Time = 0.000

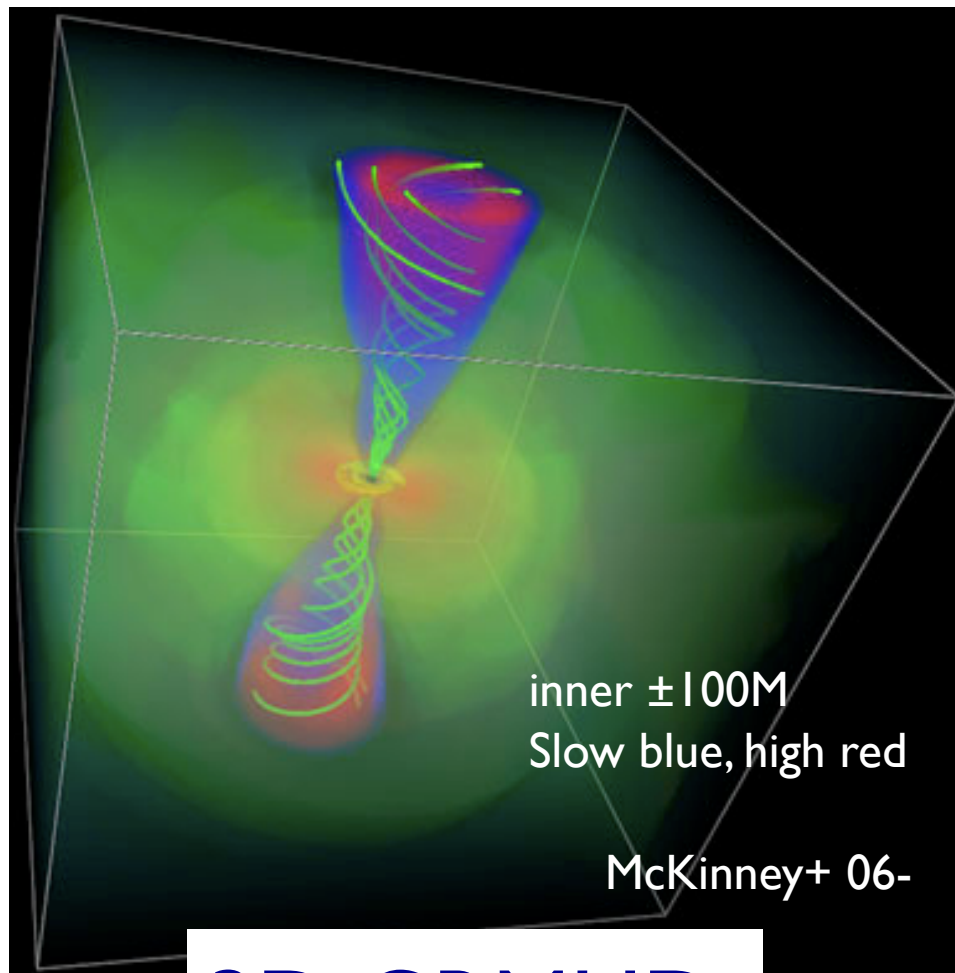
Inoue+ 10

Mizuno+ 10



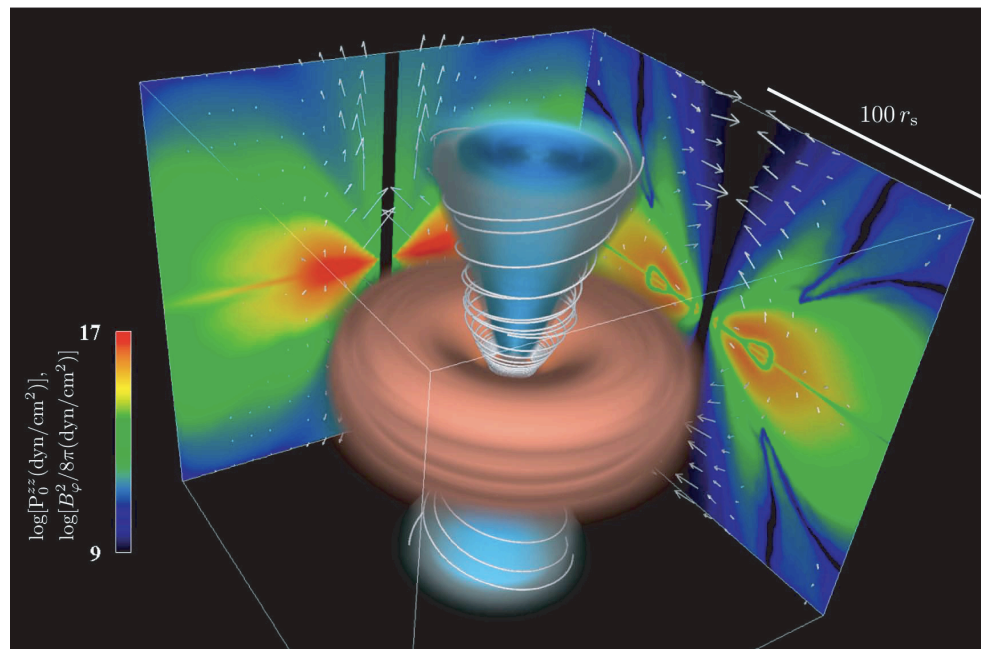
Rela でも ~ 1 Eddy Time で乱流減衰

GR/MHD/輻射流体 ジェット



3D GRMHD

BZ $\Rightarrow \Gamma > \sim 10$



Takeuchi, Ohsuga, Mineshige 10

MHD+輻射輸送 in 2.5D

磁場: コリメーション

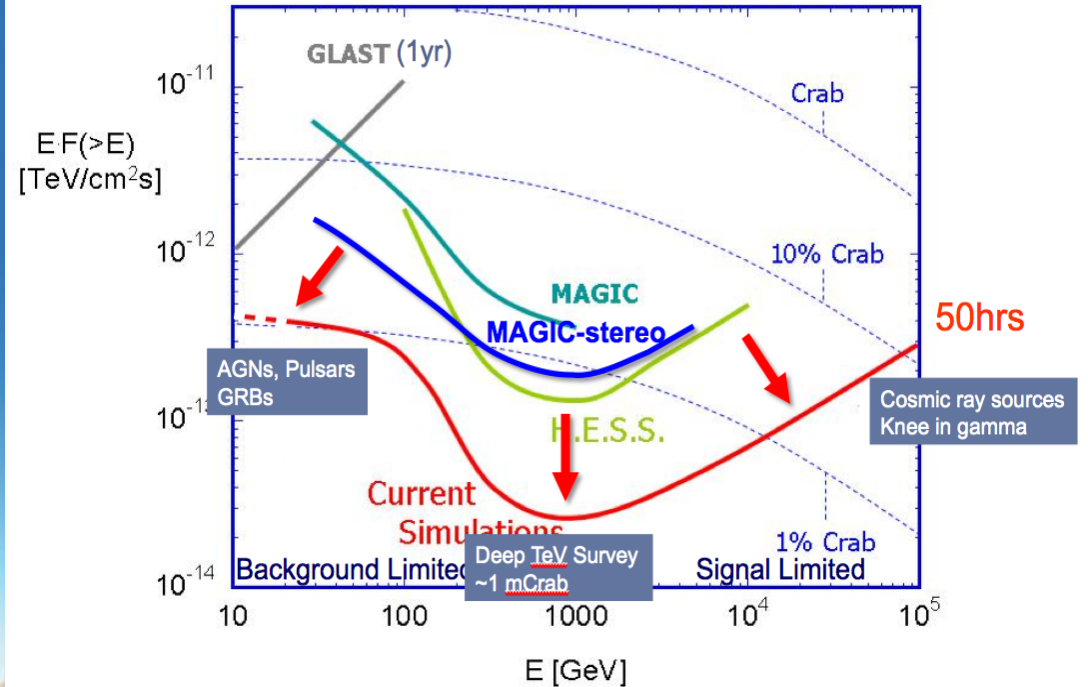
輻射圧: 加速

紹介できなかった話題

- Stellar jet
- 星雲 (η カリーナ)
- γ 線連星
- Nova
- Magnetar (Small B, QPO, HE成分)
- 系外マイクロクエーサー
- 球状星団
- Fermi Haze
- γ 線からの宇宙線分布 (Flat)
- 系外銀河
- 銀河団 ... などなど

多波長から多粒子へ

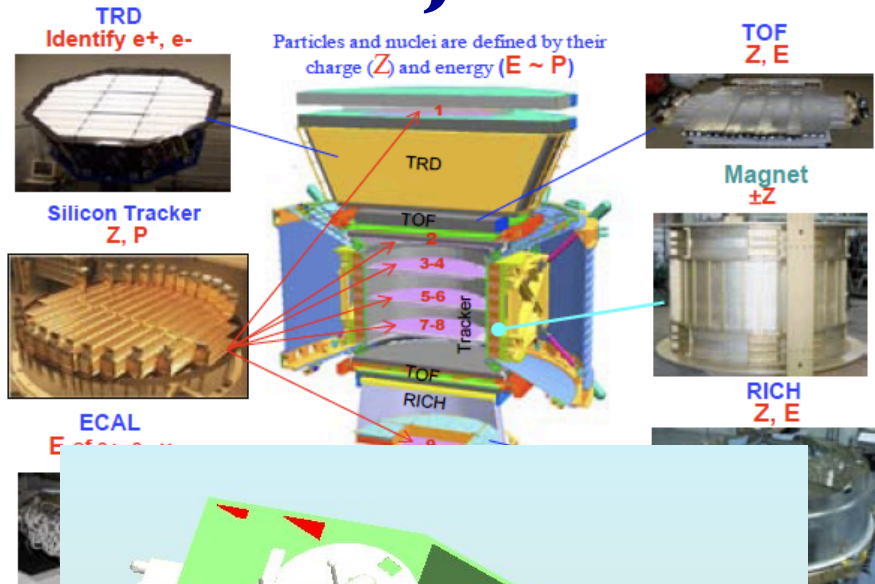
- $\sim 20\text{GeV}-100\text{TeV}$
- $\times 10$ Sensitivity
- $\Delta\theta \sim 1-2$ min
- $\text{FOV} \sim 5-10$ deg
- ~ 20 s slew (LST)
- ~ 2015 (?)
- $\sim 150\text{€}$



多波長から多粒子へ

TeV宇宙線

AMS-02, CALET



UHECR EUSO

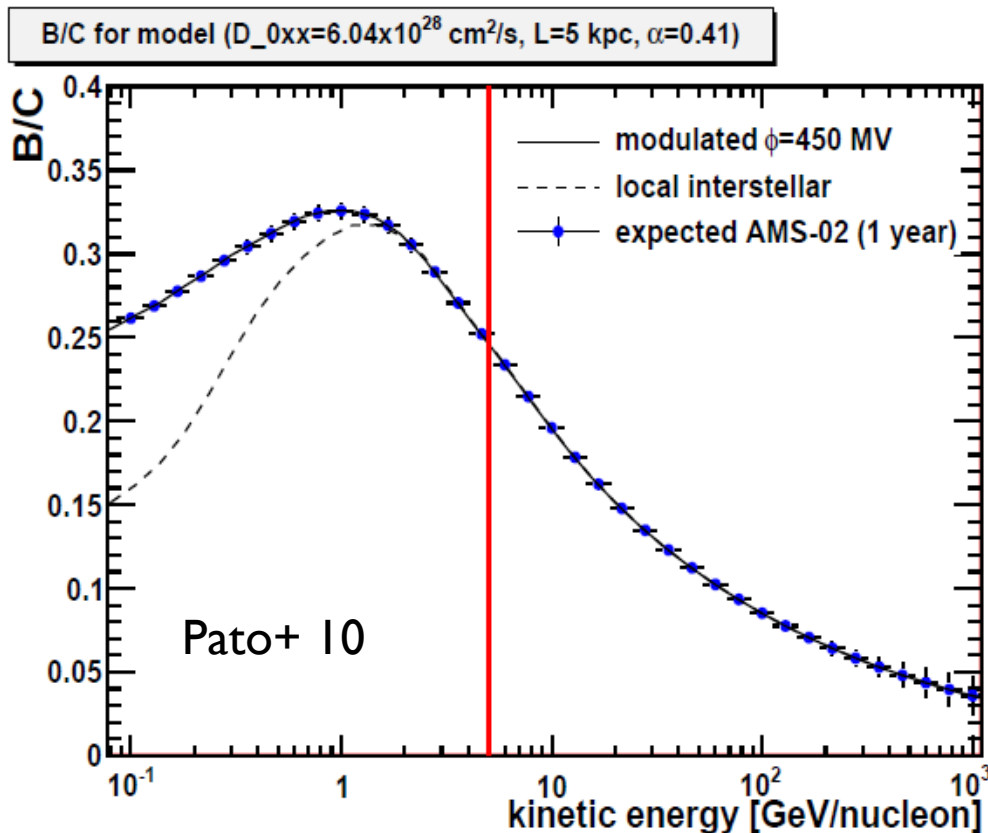
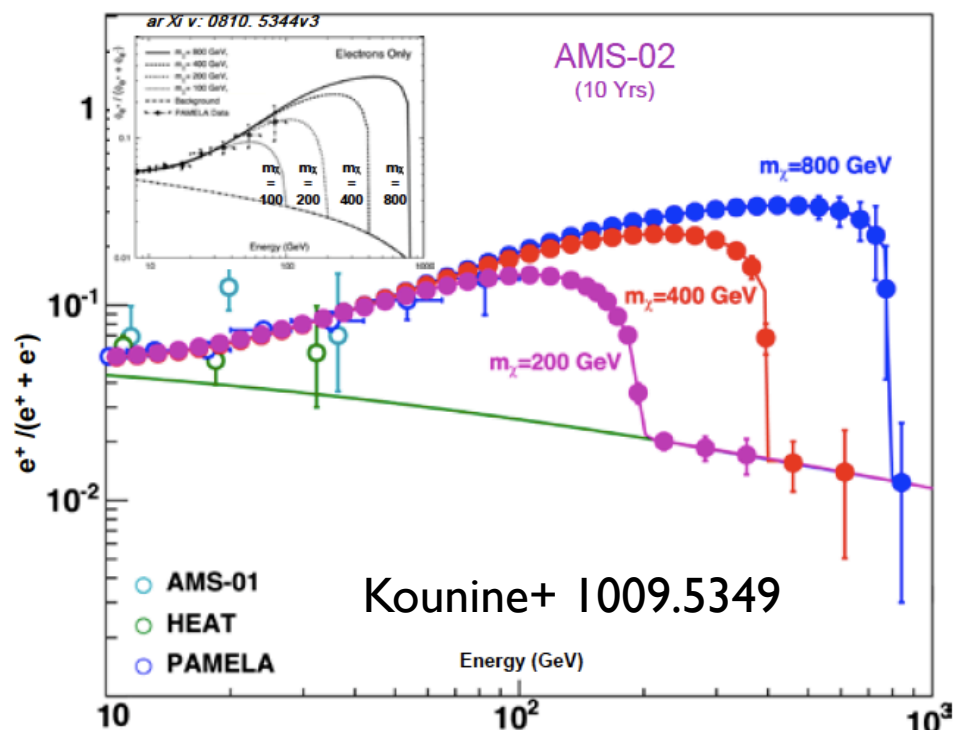


AMS-02

2011~

e^\pm

Boron/Carbon

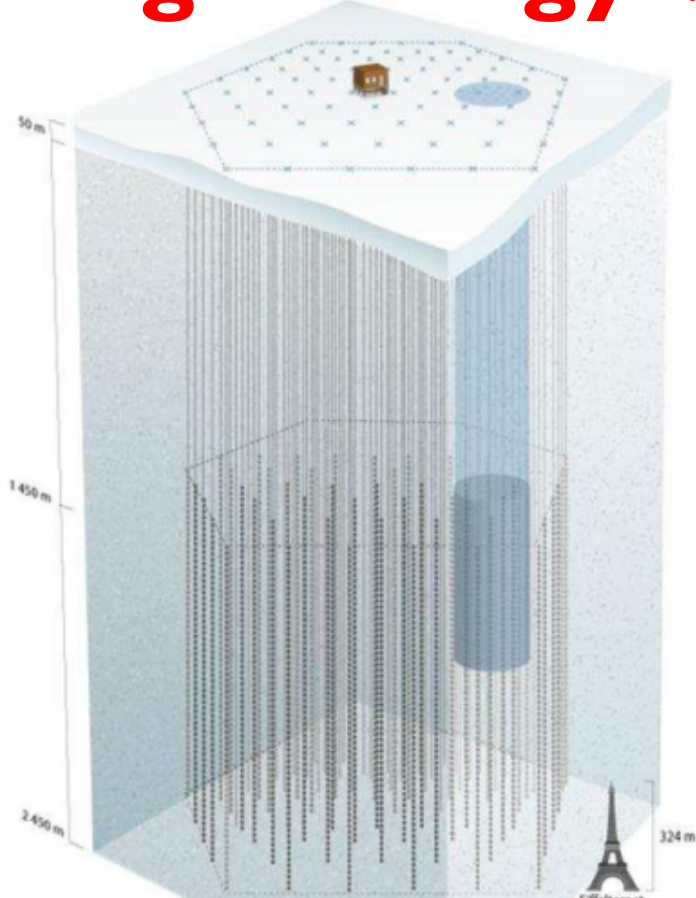


おそろべき精度

超伝導磁石
 \Rightarrow 常伝導
 精度変わらず

多波長から多粒子へ

High Energy ν



IceCube, ANTARES
すでにWB線の下に!

重力波

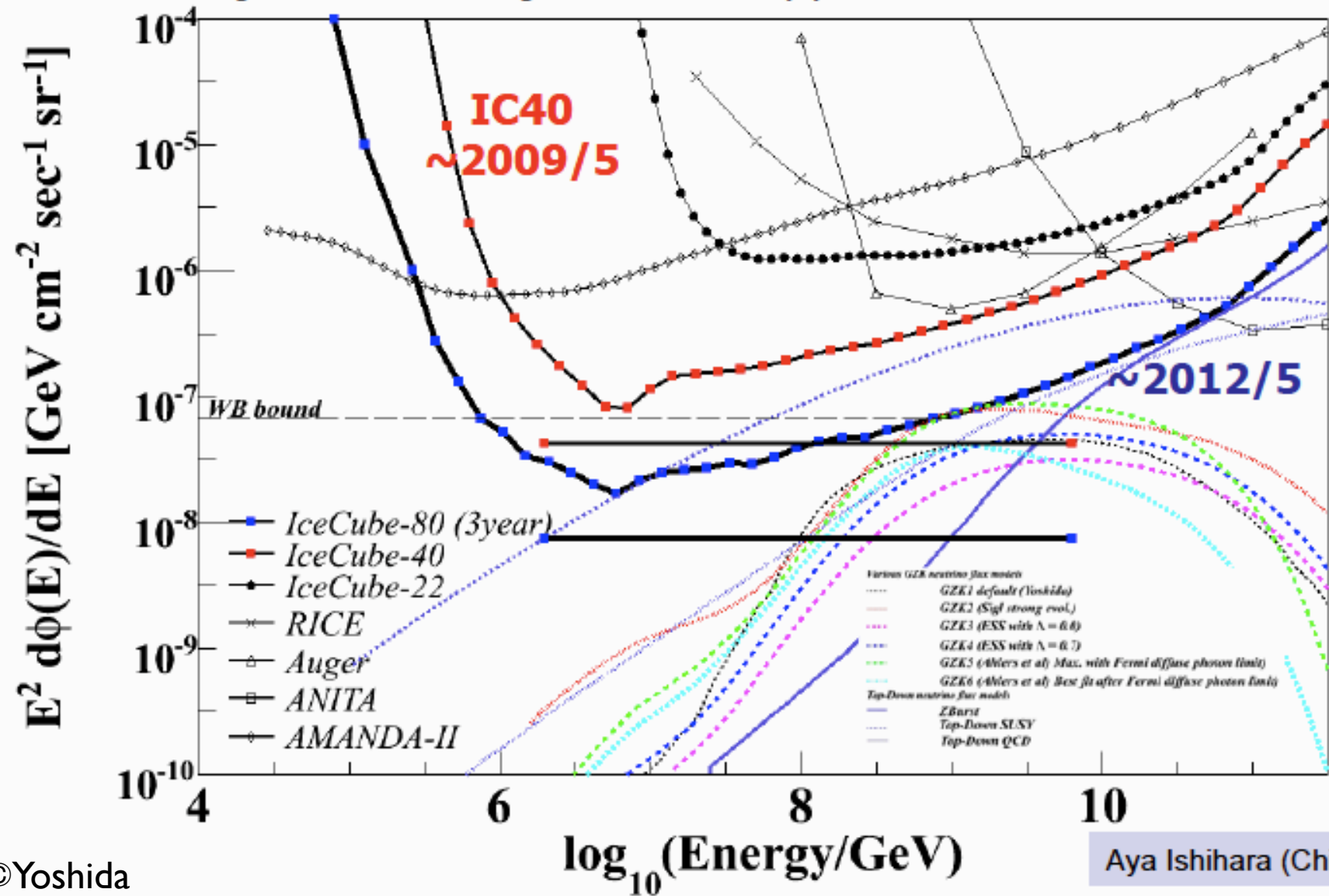


**LIGO, Virgo, GEO,
LCGT, AIGO, LISA,
DECIGO/BBO**

LCGTが一部認可! (名前募集中)

IceCube baseline Sensitivity

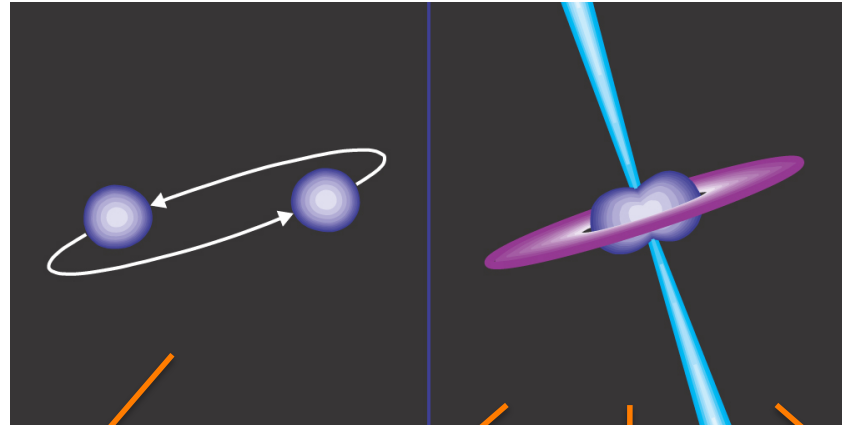
The same analysis method/systematics applied on the full IceCube MC



お勧め1

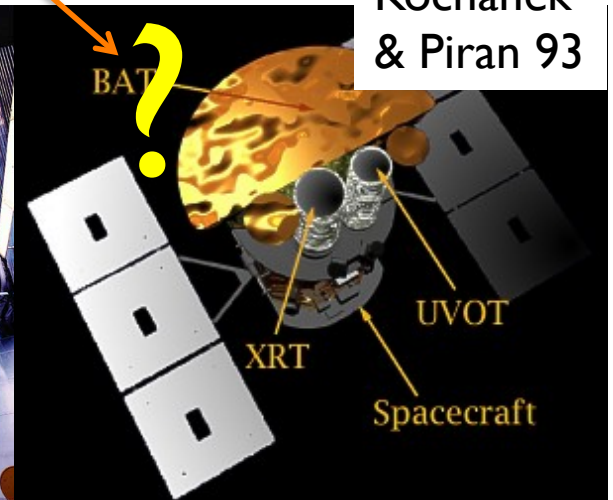
重力波アストロ

NS-NS mergers
are promising
GW sources
⇒ LCGT, LIGO,
Virgo, GEO, ...



- EM followup
- Short GRB?
 - $z \Rightarrow$ local H_0
 - Degeneracies
 - S/N

Schutz 86
Kochanek
& Piran 93



LCGTがあるという土地の利

お勧め2

Astroparticle Physics

LHC
~7TeV

LHCf
 $E_{CR} \sim 10^{17} \text{eV}$
Low-x

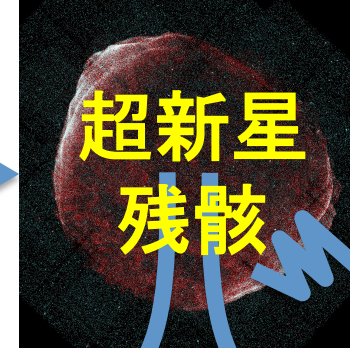
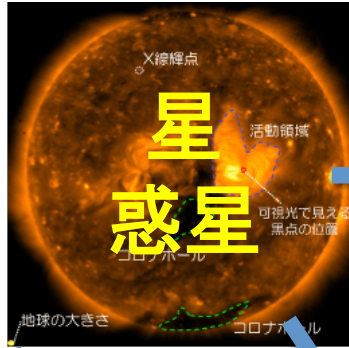


宇宙の
科学も
巨大化
⇒ Idea
理論の
出番

例えばSUSY粒子が発見されたとき対応できるか?

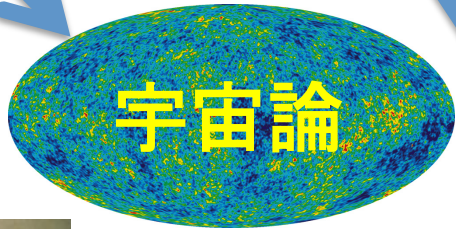
研究の発展

Dark Matter
相対論の破れ
Axion

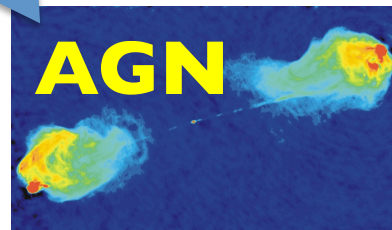


GeV SNR
宇宙線脱出
PeVatronは?

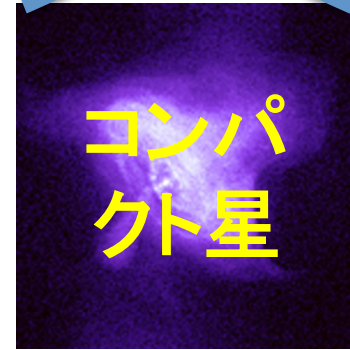
林先生



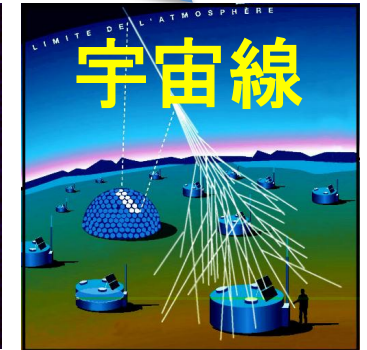
GeV成分発見
光球 vs 磁場モデル
超新星Breakout



Blazar Sequence
Off-axis、変動、偏光
GeV電波ローブ



2M_⊙中性子星
Outergap
Crab変動
GeV-TeV PWN



e⁺ 超過
He 超過
UHECR Fe?



PIC粒子加速
3D rela. MHD
Jet/降着円盤

さまざまな高エネルギー源

ご清聴ありがとうございました

林先生のご冥福をお祈り致します