

# 宇宙線研究と天文学

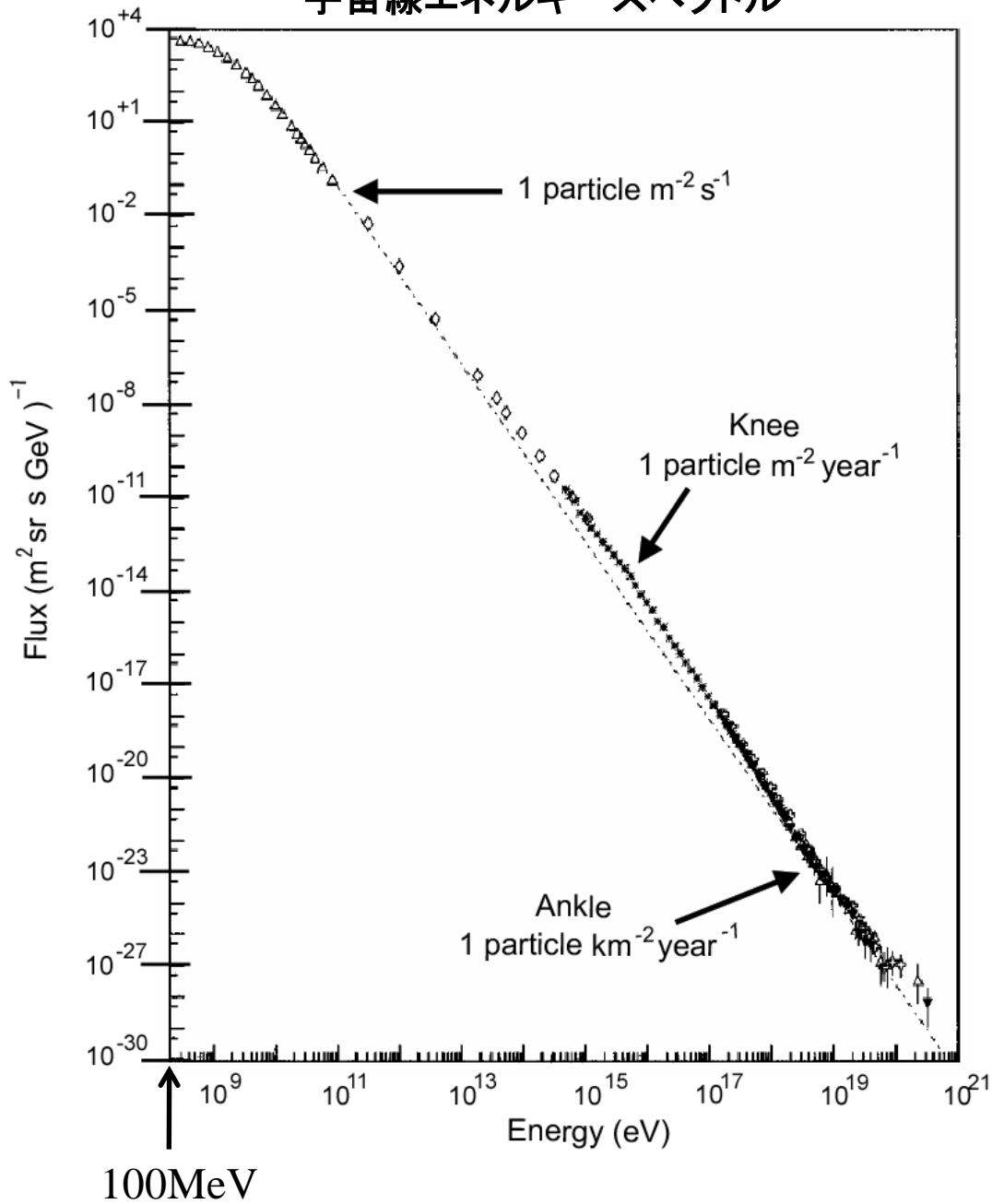
寺澤敏夫・東大宇宙線研

# 宇宙線研究と天文学

宇宙線研究の現状と今後についての私的考察

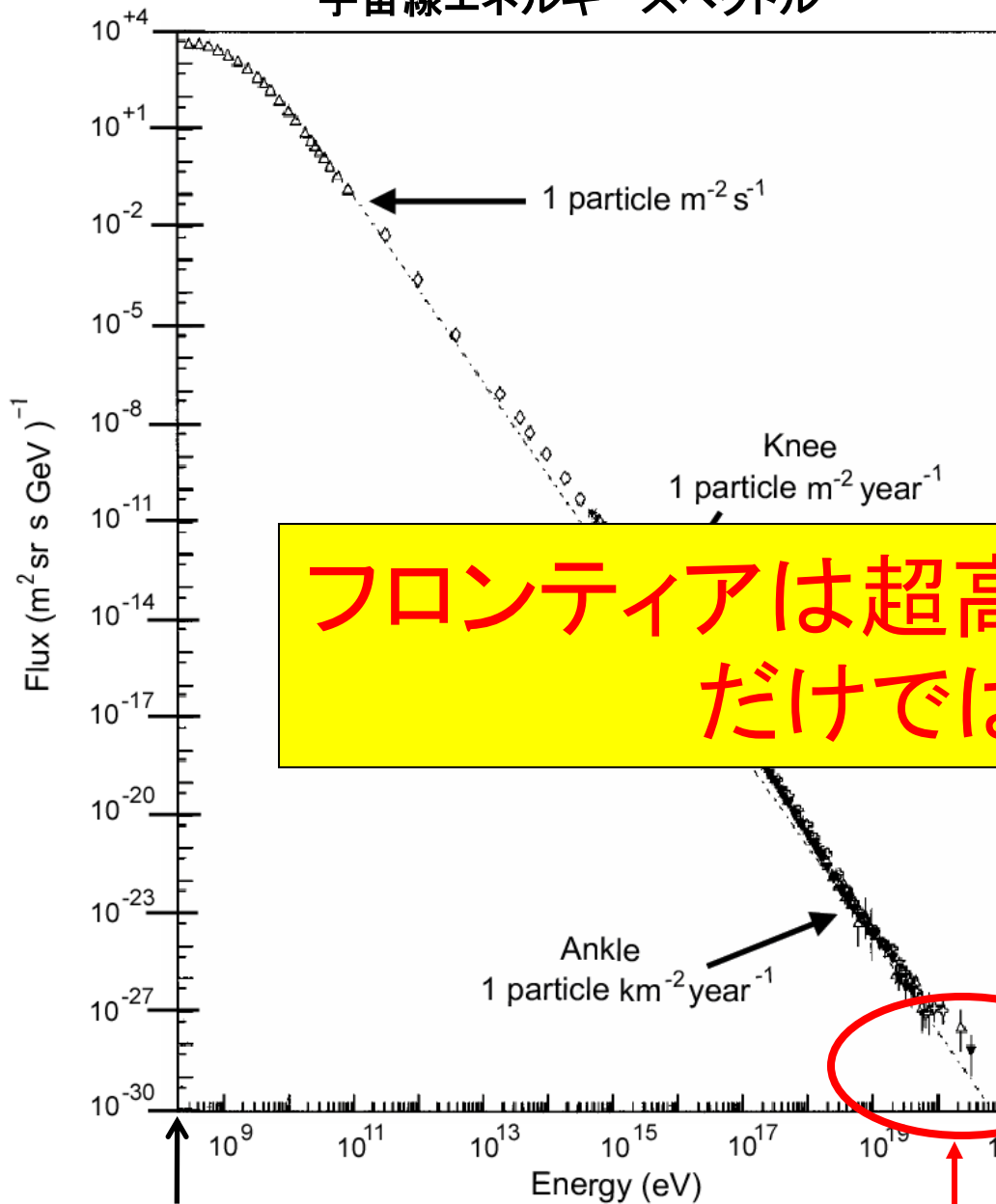
寺澤敏夫・東大宇宙線研

# 宇宙線エネルギースペクトル



宇宙線研究のフロンティア  
は何処に？

# 宇宙線エネルギースペクトル

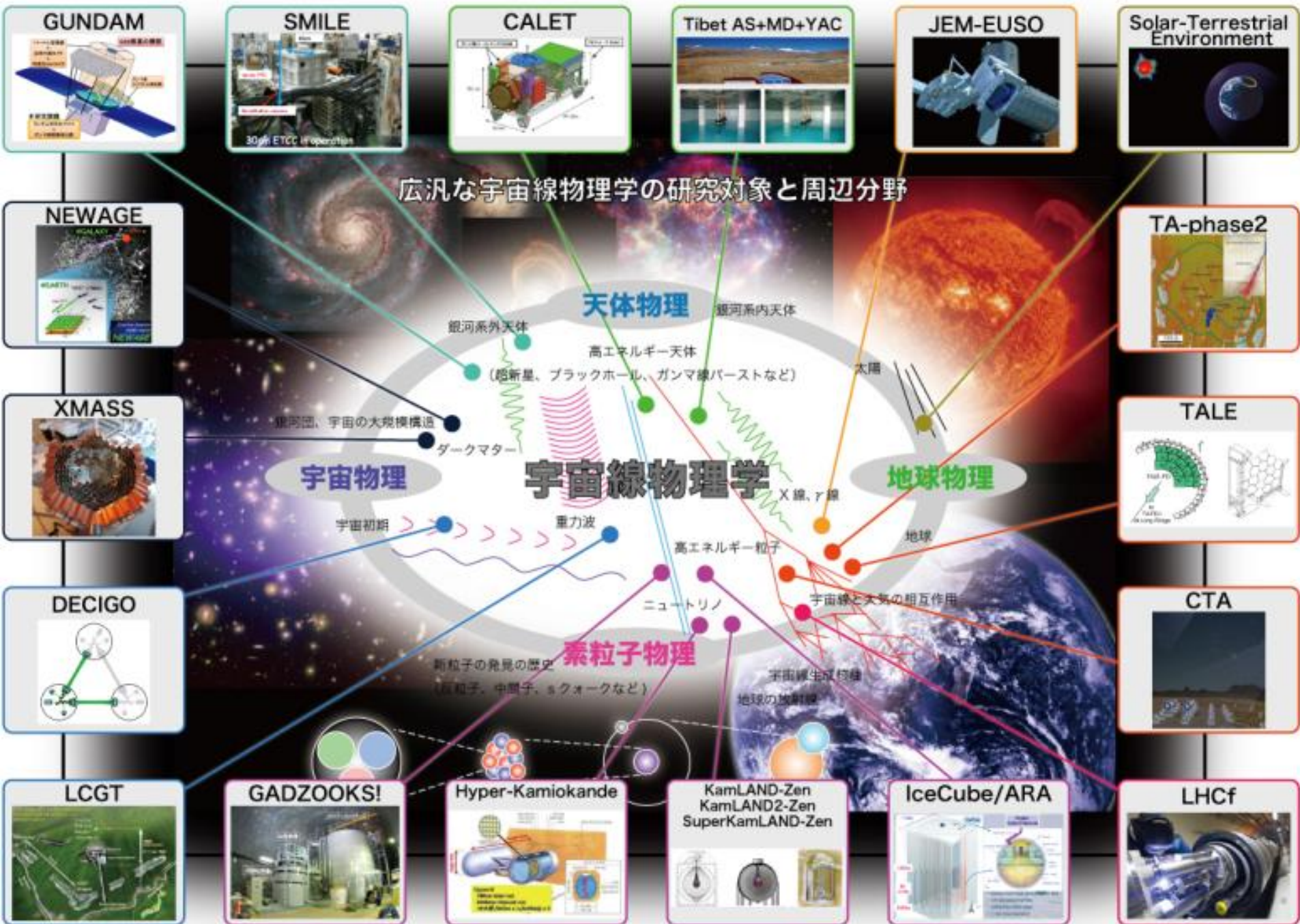


宇宙線研究のフロンティア  
は何処に？

フロンティアは超高エネルギー部分  
だけではない。

10<sup>20</sup>eVに達する超高エネルギー宇宙線の存在

2010.9宇宙線将来計画シンポジウムの取りまとめ文書より



# 2010.9宇宙線将来計画シンポジウムの取りまとめ文書より

## 宇宙線の起源・組成と加速機構に関する研究計画

CALET (CALorimetric Electron Telescope)

CTA (Cherenkov Telescope Array)

Tibet AS+MD+YAC

Telescope Array

JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module)

## ニュートリノに関する研究計画

GADZOOKS!

HyperKamiokande

KamLAND-Zen

IceCube/ARA (Askaryan Radio Array)

## ダークマターに関する研究計画

XMASS (Xenon detector for weakly interacting MASSive particle他)

NEWAGE (New generation WIMP search with an advanced gaseous tracker experiment)

## 重力波に関する研究計画

LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory)

## ガンマ線バーストなどに関する研究計画

GUNDAM (Gamma-ray burst for UNravelling Dark Ages Mission)

極域での宇宙および地球のガンマ線バースト現象の国際共同観測

SciCR (SciBar detector for Cosmic Ray)

LHCf (LHC forward experiment)

「宇宙線と雲」実験

## 宇宙線物理学は、伝統的に

宇宙線を用いた宇宙の研究

← 「現状と今後」の紹介

宇宙線を用いた素粒子の研究

← 本日後半(森山氏、塩澤氏、井上氏)

の二大潮流からなり、現在もそれは続いている。

## 明日、「中規模将来計画についてのCRCタウンミーティング」

日時：7月30日（土曜日）11:00-17:00

場所：東京大学 柏キャンパス図書館 1階 メディアホール

プログラム：

○タウンミーティングの趣旨と「中規模計画」の状況説明 伊藤好孝（名大）

○大規模ハイブリッド検出器による最高エネルギー宇宙線天文学 佐川宏行（ICRR）

○JEM-EUSOミッション：日本実験棟極限エネルギー宇宙天文台 戎崎俊一（理研）

○次世代超高エネルギー宇宙ガンマ線観測施設大規模チェレンコフ望遠鏡アレイ 手嶋政廣（ICRR）

○Tibet AS+MD+YAC 瀧田正人（ICRR）

○Askaryan Radio Array and IceCube High-Energy Extension 吉田 滋（千葉大）

○ニュートリノ観測装置を用いた極低放射能環境下での宇宙素粒子研究 井上邦雄（東北大）

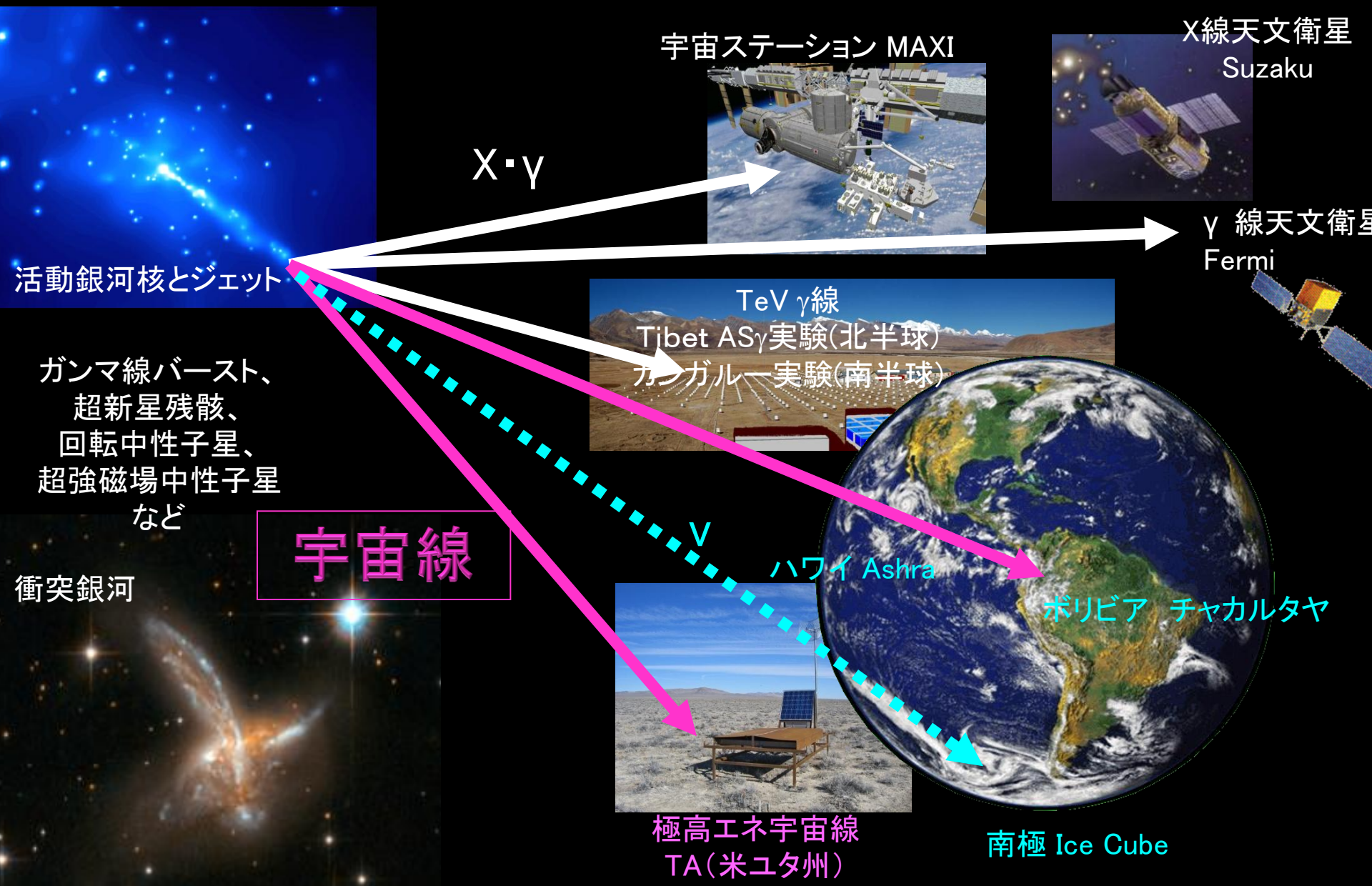
○ガドリニウムを用いたスーパーカミオカンデによる反電子ニュートリノの物理 中畑雅行（ICRR）

○XMASS-1.5 鈴木洋一郎（ICRR）

宇宙線を用いた宇宙の研究

宇宙線を用いた素粒子の研究

# 宇宙における加速現象の謎を解く: 日本の寄与の現状

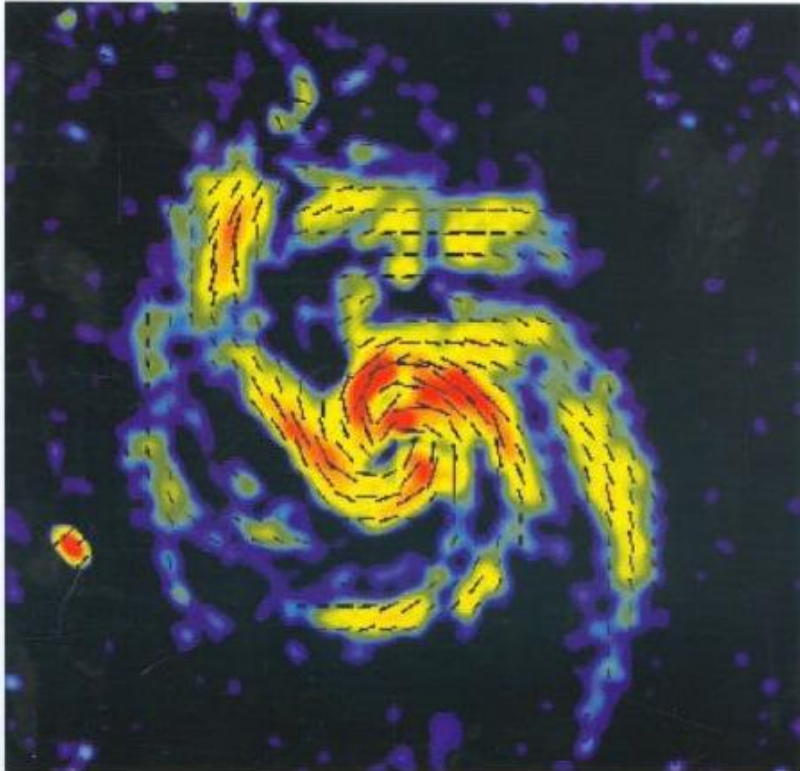


これ以外に、銀河宇宙線国内観測点(信大など)、太陽中性子モニタ世界ネットワーク(名大)などがある



# The Magnetic Universe

Geophysical and Astrophysical  
Dynamo Theory



Copyrighted Material

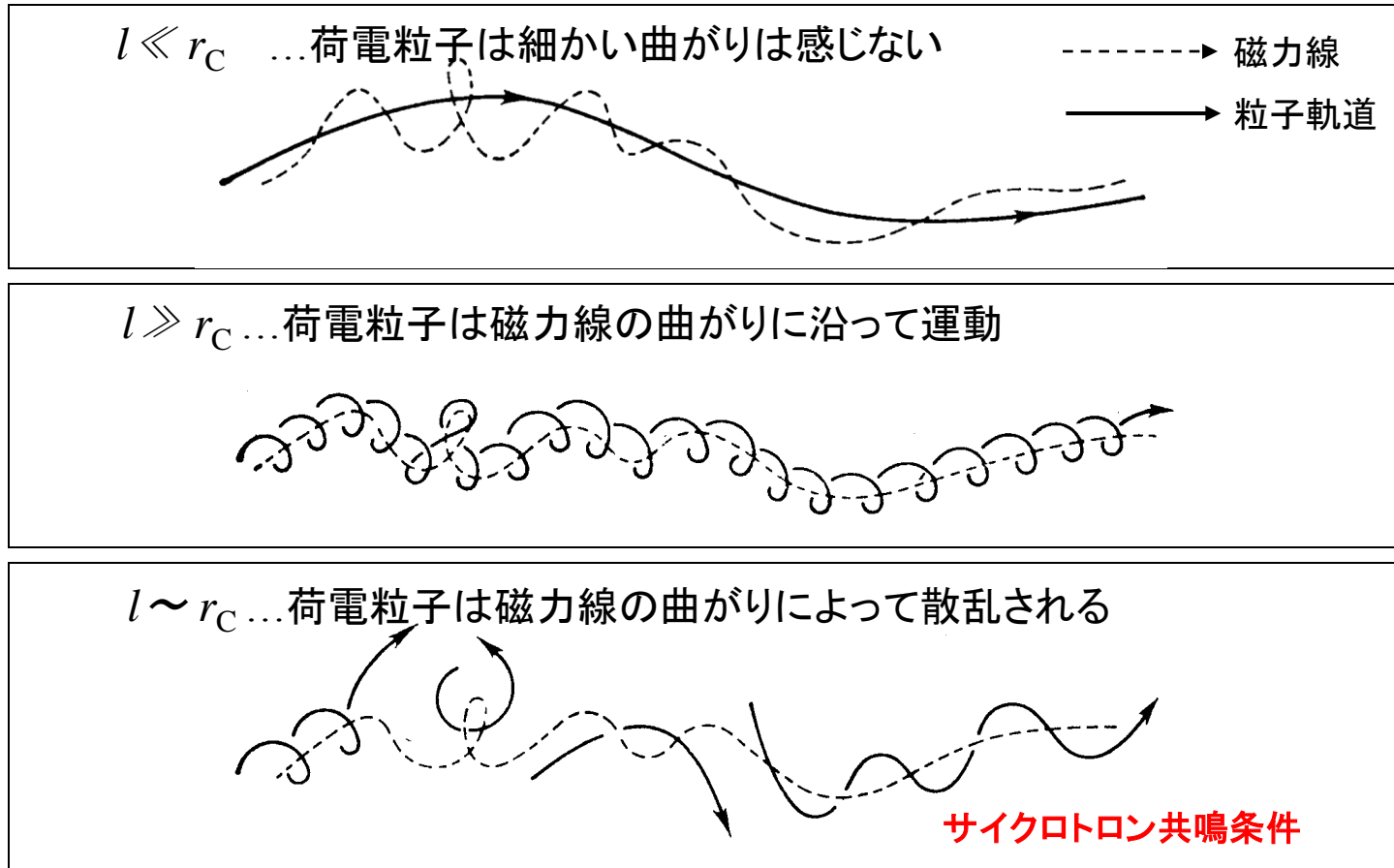
何故、高エネルギー粒子の  
加速現象が生じるのか？  
→宇宙の磁化による

←電波によるFaraday回転観測から  
求められた磁力線形状  
(M51銀河の例)

規則的成分 + 不規則成分  
(乱流)

# 宇宙磁場と粒子の相互作用の素過程：サイクロトロン共鳴

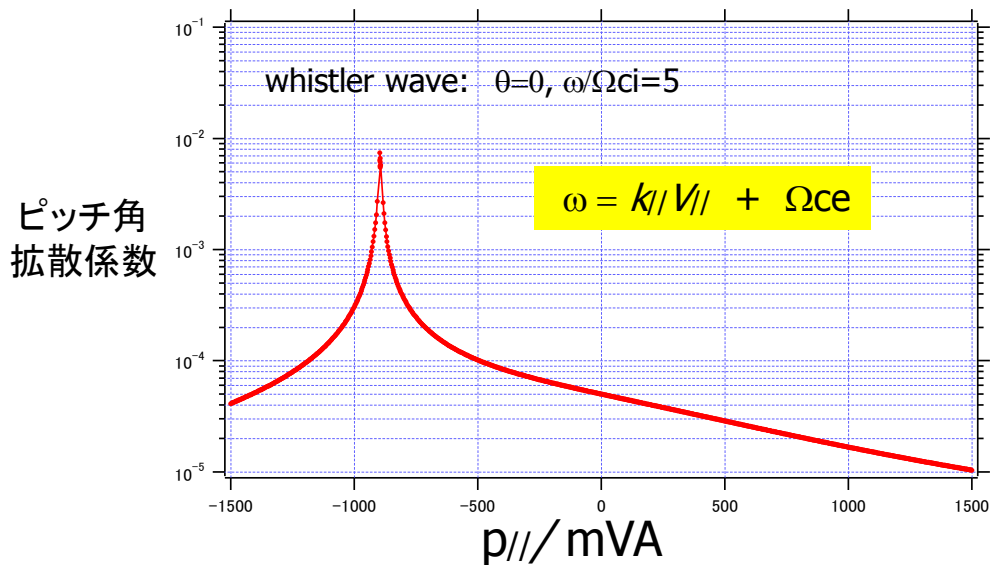
$r_C$  (サイクロトロン半径)  $\longleftrightarrow$  磁場の乱れ (=アルフェン波、ホイスラー波) の特徴的な波長  $l$



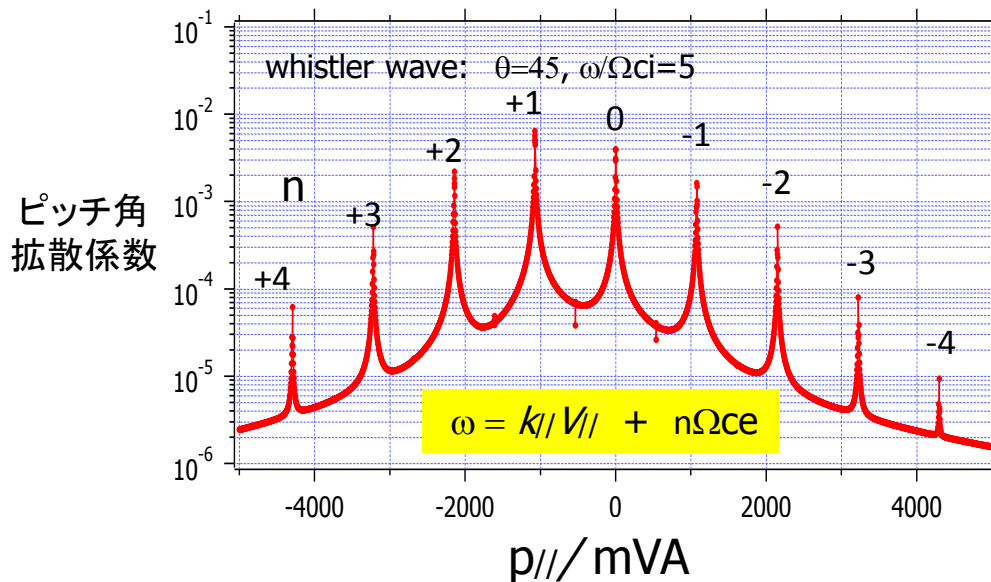
乱れの周波数 $\omega$ 、波数 $k_{//} \equiv 2\pi/l$ により  $\omega = k_{//} V_{//} + \Omega_c$  とかける  
( $//$ は背景の平均磁場についての平行成分の意味)

# サイクロトロン共鳴についての散乱断面積 ( $\propto$ ピッチ角拡散係数)

乱れが平均磁場に平行に伝搬する場合

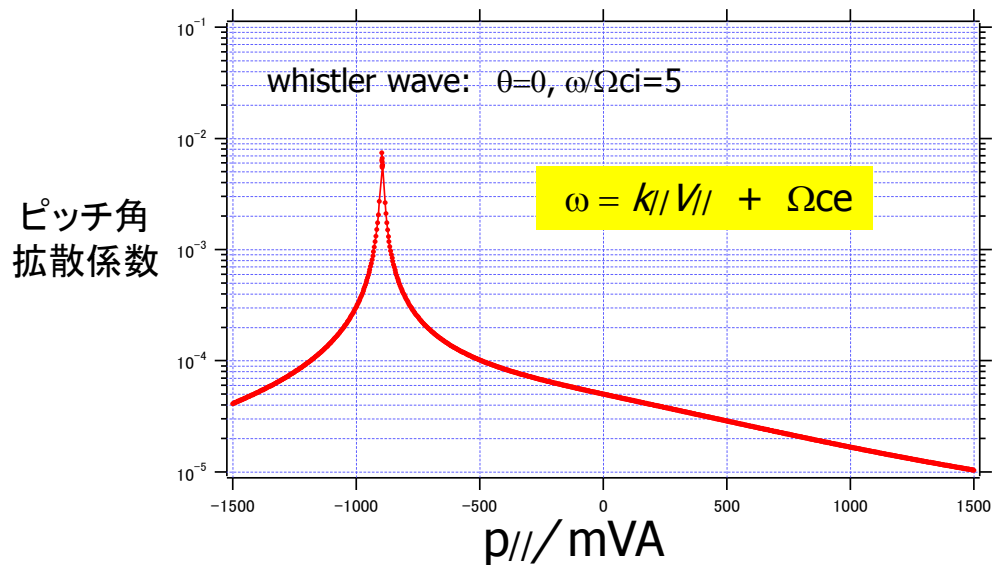


乱れが平均磁場に斜めに伝搬する場合

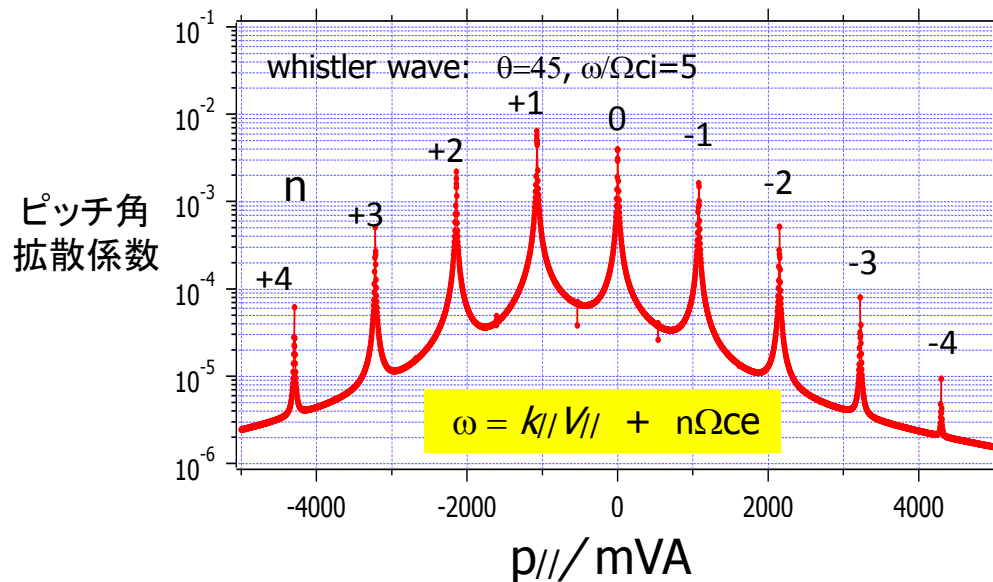


# サイクロトロン共鳴についての散乱断面積 ( $\propto$ ピッチ角拡散係数)

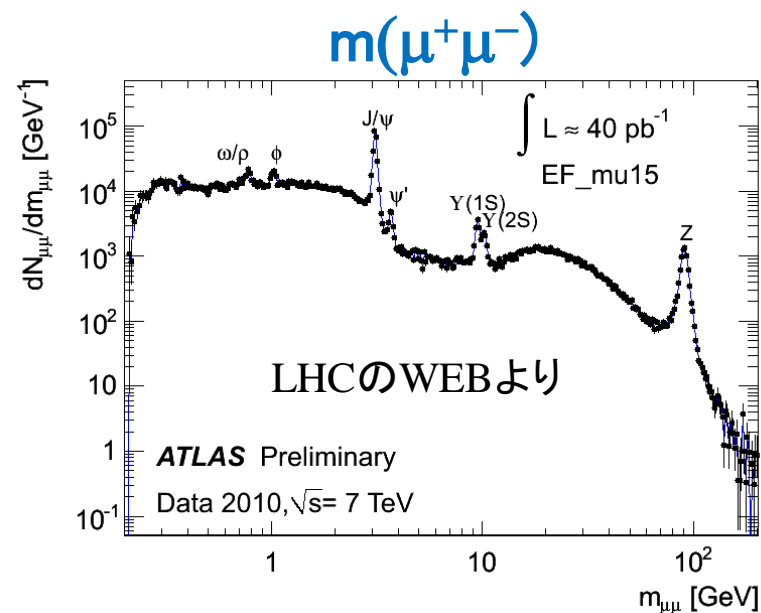
乱れが平均磁場に平行に伝搬する場合



乱れが平均磁場に斜めに伝搬する場合



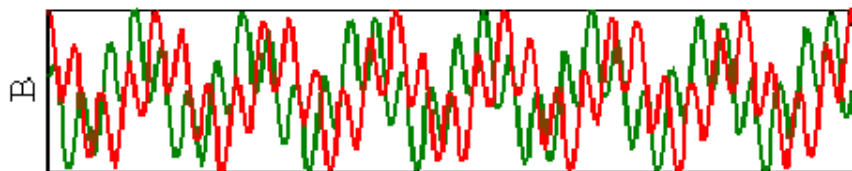
# 古典的共鳴現象 vs. 素粒子的共鳴現象



# 与えられた乱流内でのテスト粒子シミュレーション

(一方方向に伝搬するアルフェン波群を想定し、波の静止系での粒子軌道を描く)

time=2670.00

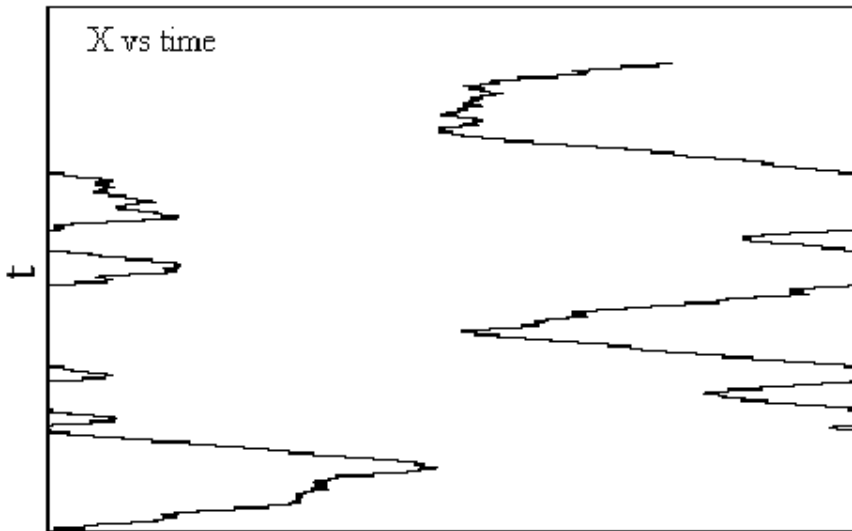
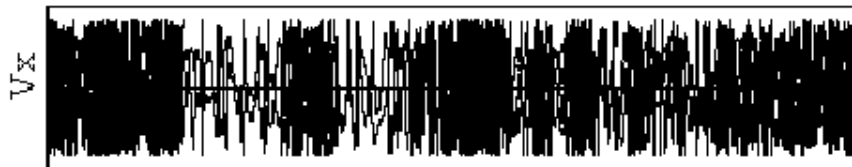


wave1 40.0%

wave2 41.0%

— B<sub>y</sub>

— B<sub>z</sub>



X

toy model乱流:

粒子を注入して運動を追跡。  
系は周期的として左右の端をつないでである。(波は左から右へ伝播。)

粒子は乱流内をrandom walk



mean free path  $\lambda \sim \eta \rho_c$

**Bohm parameter**

強い乱流なら  $\eta \sim 1$

(**Bohm limit**)

弱い乱流なら  $\eta \gg 1$

# 与えられた乱流内でのテスト粒子シミュレーション

(一方方向に伝搬するアルフェン波群を想定し、波の静止系での粒子軌道を描く)

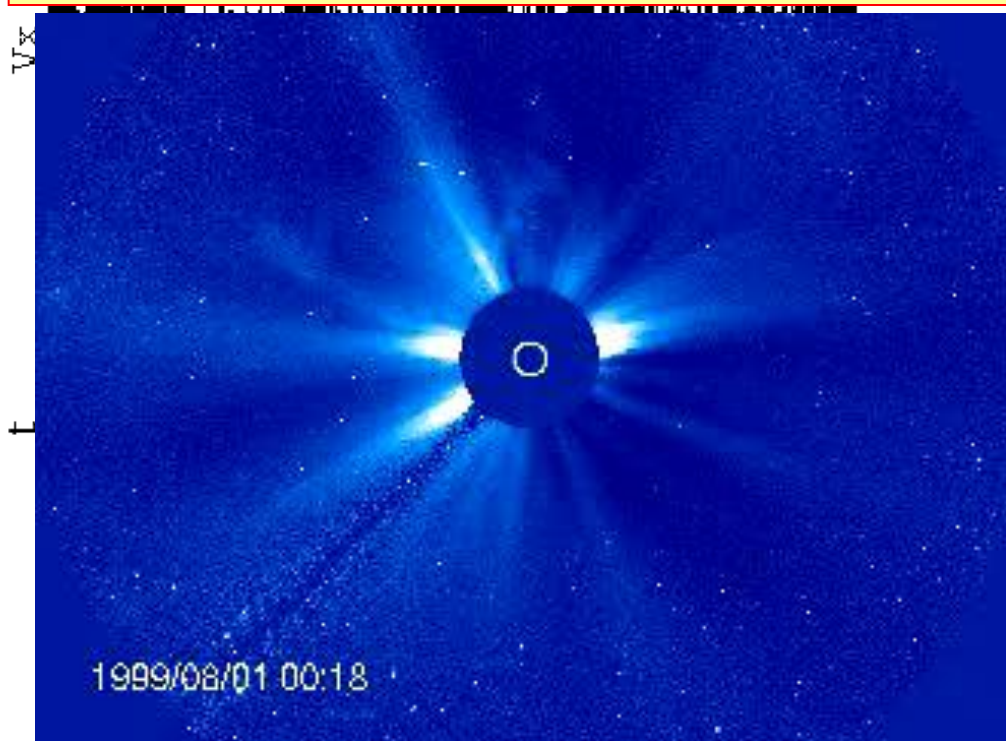
time=2670.00

wavel 40.0%  
41.0%

衛星搭載コロナグラフにより可視化された  
太陽風プラズマ(電子)と磁力線構造  
SOHO 1998.8 1ヶ月間

toy model乱流:

粒子を注入して運動を追跡。  
系は周期的として左右の端  
をつないでいる。(波は左か  
ら右へ伝播。)



粒子は乱流内をrandom walk



mean free path  $\lambda \sim \eta \rho_c$

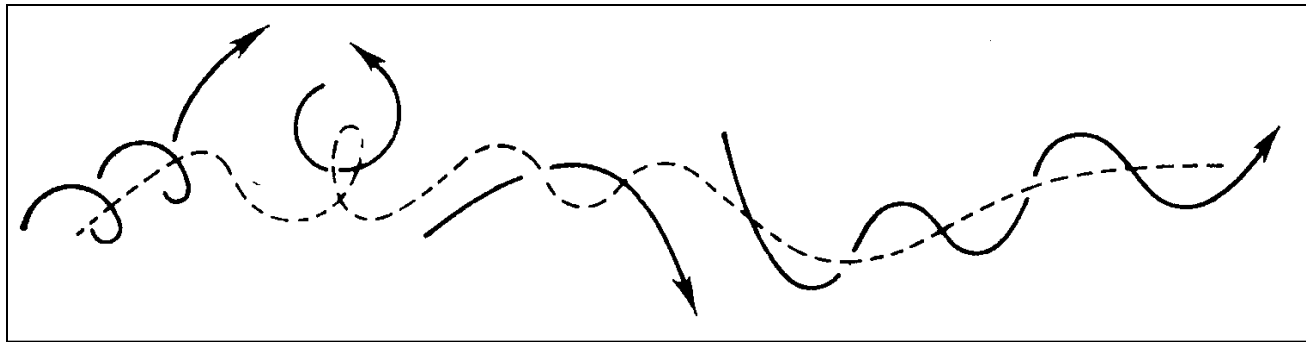
**Bohm parameter**

強い乱流なら  $\eta \sim 1$

(**Bohm limit**)

弱い乱流なら  $\eta \gg 1$

太陽風の場合、 $\eta$ は数百



CR

B

共鳴条件: サイクロトロン半径 ~ 乱れの波長

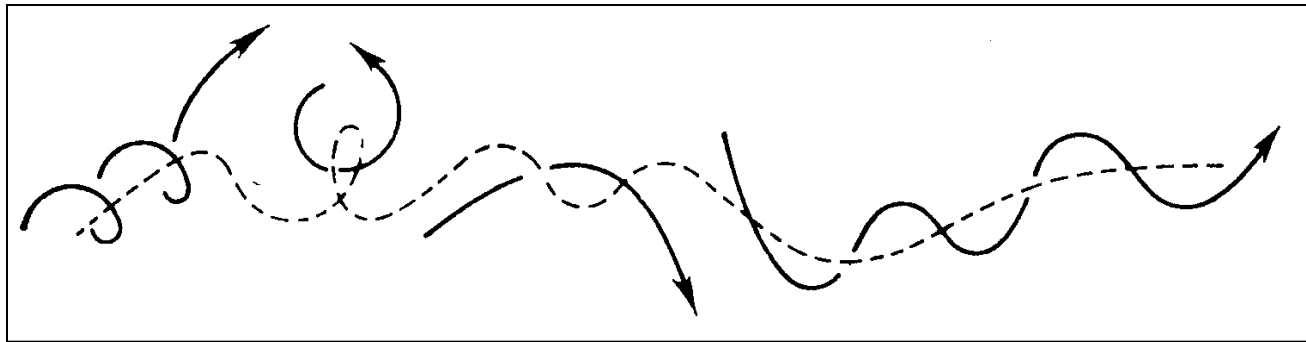
乱れた磁場と宇宙線粒子の相互作用 → 実効的な衝突効果

しかし、本物の衝突ではないので、  
BoltzmannのH定理の適用範囲外

乱流磁場のエネルギーが宇宙線粒子に渡されるとき



非熱的エネルギー分布の発生(冪型 $E^{-\gamma}$ など)



CR

B

共鳴条件: サイクロトロン半径 ~ 乱れの波長

乱れた磁場と宇宙線粒子の相互作用 → 実効的な衝突効果

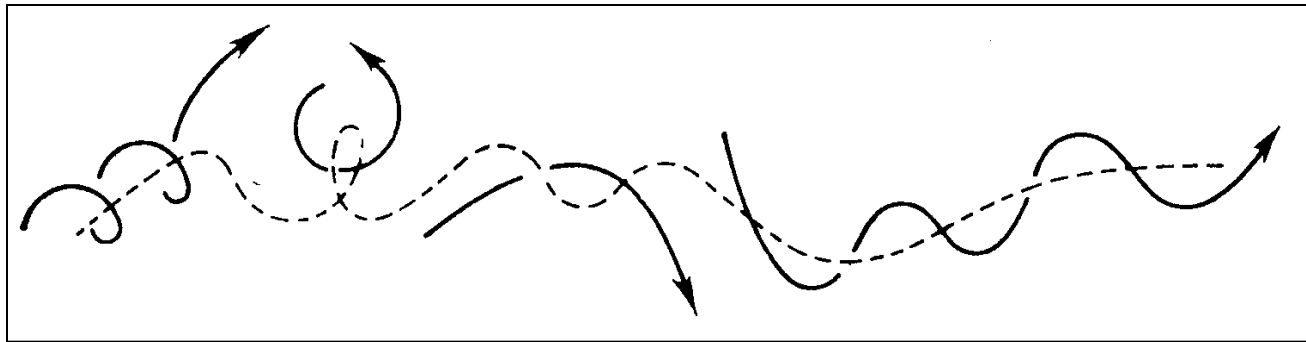
しかし、本物の衝突ではないので、  
BoltzmannのH定理の適用範囲外

乱流磁場のエネルギーが宇宙線粒子に渡されるとき



非熱的エネルギー分布の発生(冪型 $E^{-\gamma}$ など)





CR

B -----

共鳴条件: サイクロトロン半径 ~ 乱れの波長

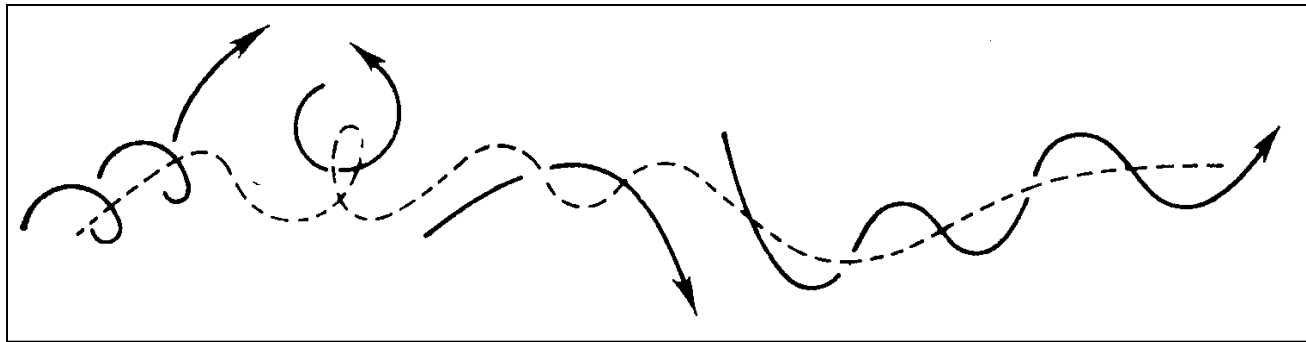
乱れた磁場と宇宙線粒子の相互作用 → 実効的な衝突効果

しかし、本物の衝突ではないので、  
BoltzmannのH定理の適用範囲外

乱流磁場のエネルギーが宇宙線粒子に渡されるとき



非熱的エネルギー分布の発生(冪型 $E^{-\gamma}$ など)



CR

B

共鳴条件: サイクロトロン半径 ~ 乱れの波長

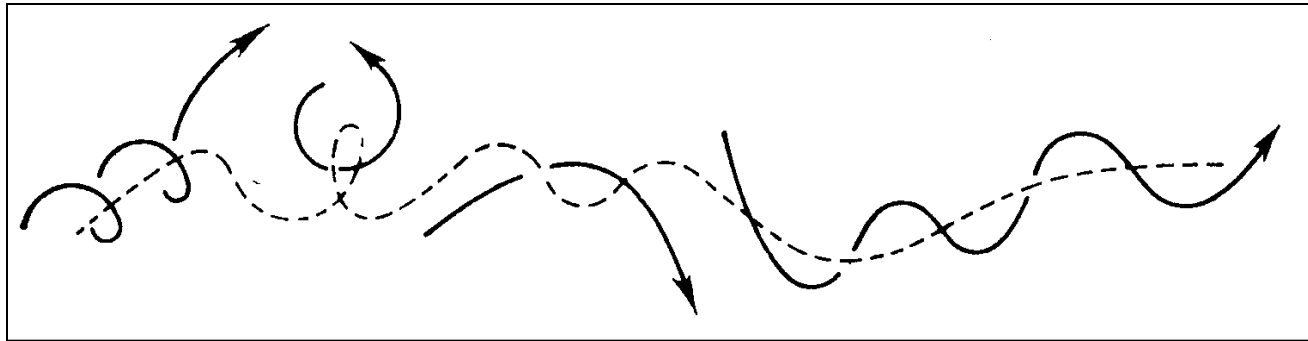
乱れた磁場と宇宙線粒子の相互作用 → 実効的な衝突効果

しかし、本物の衝突ではないので、  
BoltzmannのH定理の適用範囲外

乱流磁場のエネルギーが宇宙線粒子に渡されるとき



非熱的エネルギー分布の発生(冪型 $E^{-\gamma}$ など)



CR

B

共鳴条件: サイクロトロン半径 ~ 乱れの波長

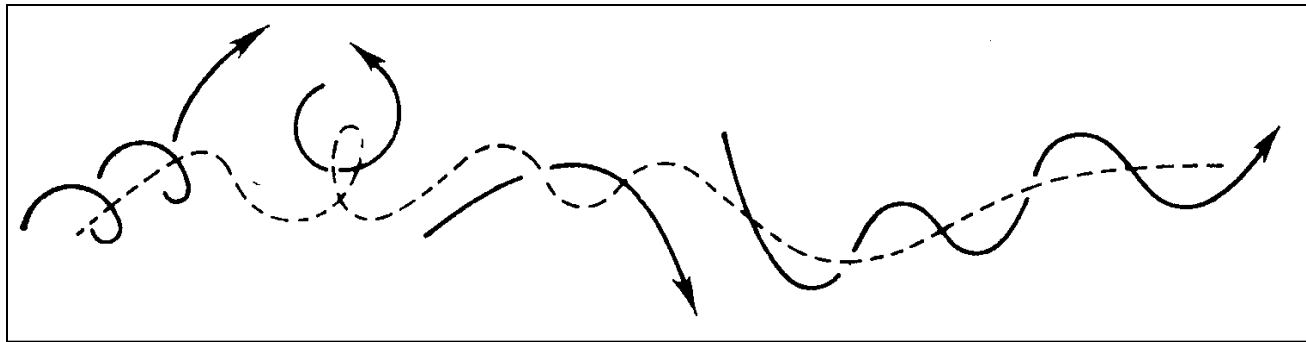
乱れた磁場と宇宙線粒子の相互作用 → 実効的な衝突効果

しかし、本物の衝突ではないので、  
BoltzmannのH定理の適用範囲外

乱流磁場のエネルギーが宇宙線粒子に渡されるとき



非熱的エネルギー分布の発生(冪型 $E^{-\gamma}$ など)



CR

B

共鳴条件: サイクロトロン半径 ~ 乱れの波長

乱れた磁場と宇宙線粒子の相互作用 → 実効的な衝突効果

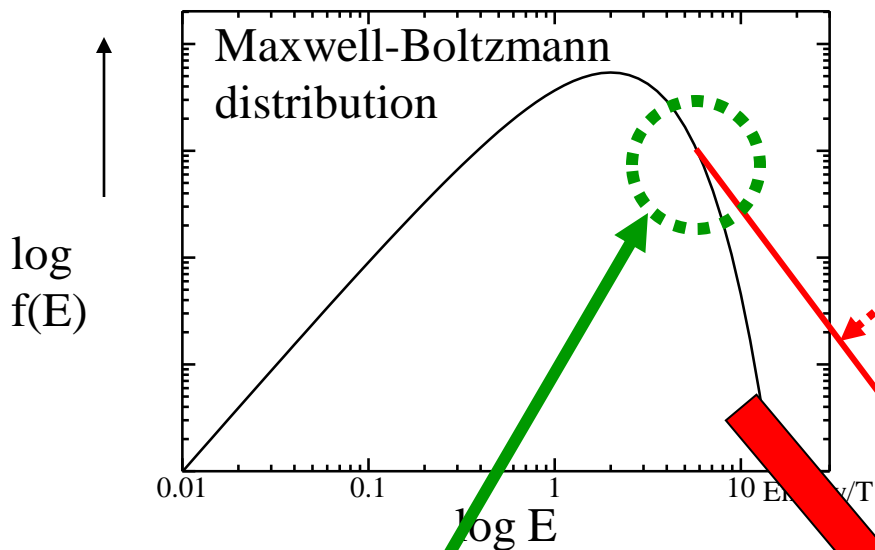
しかし、本物の衝突ではないので、  
BoltzmannのH定理の適用範囲外

乱流磁場のエネルギーが宇宙線粒子に渡されるとき



非熱的エネルギー分布の発生(冪型 $E^{-\gamma}$ など)

# 爆発的天体現象に伴って... 高温プラズマの発生(数千万度~数億度)

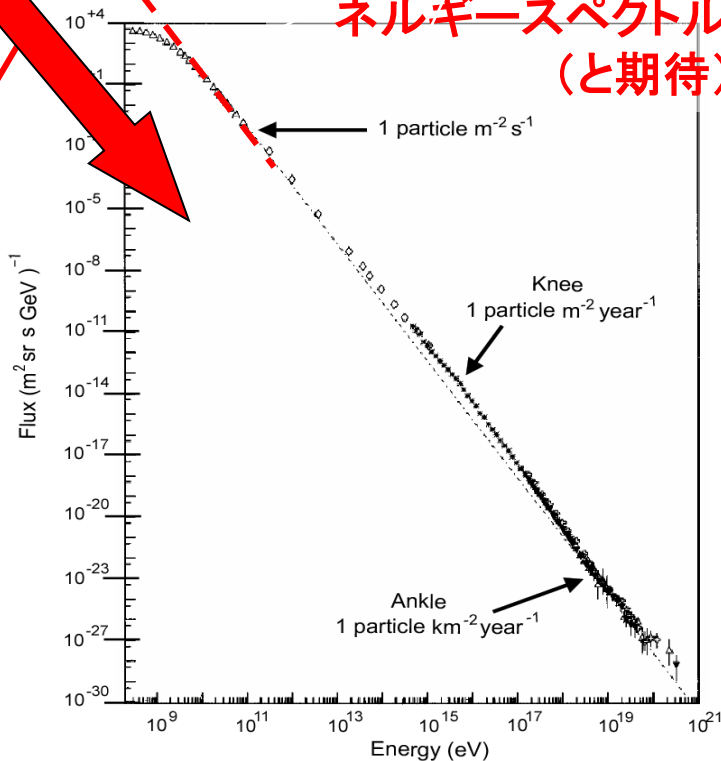


しばしば  $f(E) \propto E^{-\gamma}$  なる  
冪形分布成分が出現  
(非熱的成分)

更に高エネルギー側で宇宙線のエ  
ネルギースペクトルにつながる  
(と期待)

熱的粒子の何%が  
非熱的成分になるのか?  
[injection問題]

$E^{-\gamma}$  の  $\gamma$  は?  
エネルギー増加率  
(加速率) は?  
加速限界は?  
[粒子加速問題]



# 宇宙線の起源

## 爆発的天体現象

→ 電磁流体乱流・衝撃波の発生

非相対論的な場合

(太陽フレア、普通の超新星爆発、銀河団衝突など)

相対論的な場合

(パルサー磁気圏、GRB・AGNジェットなど)

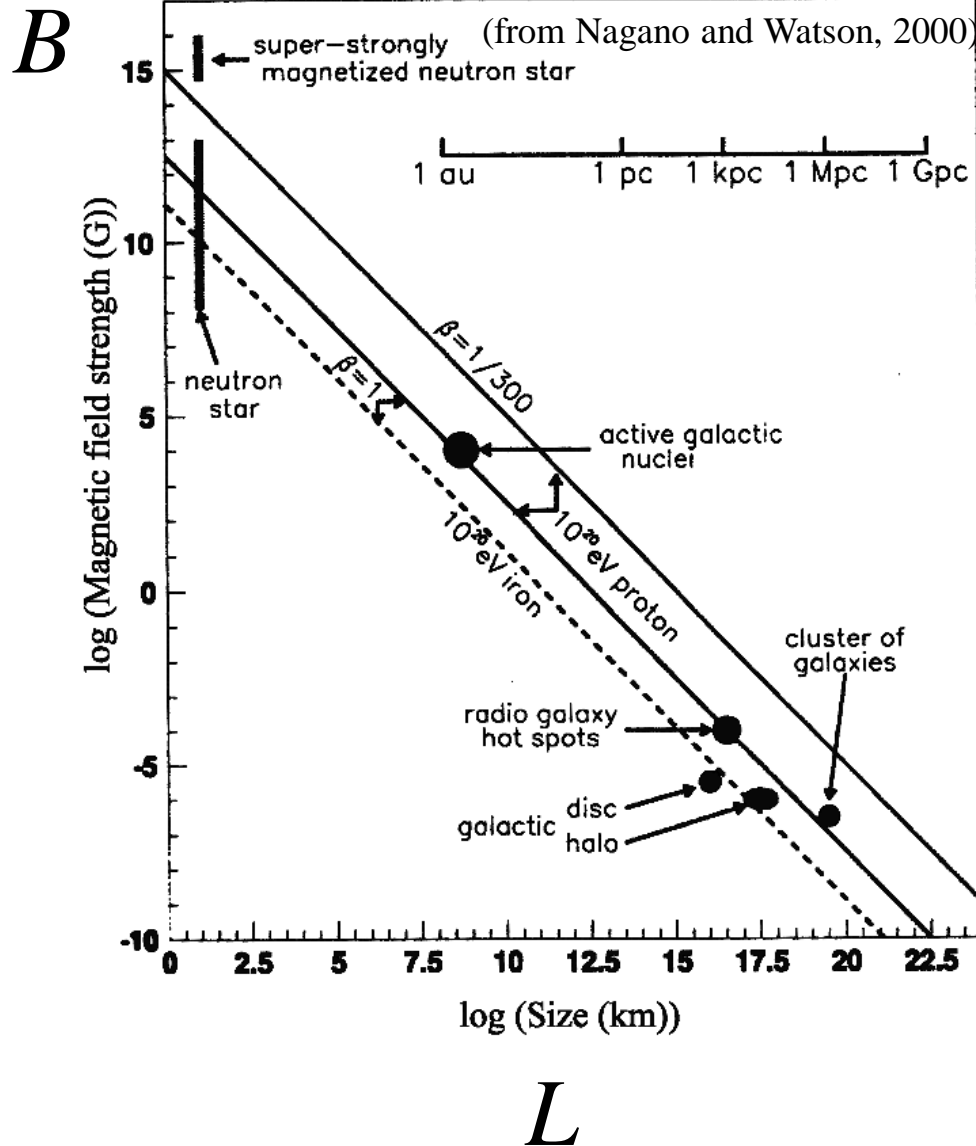
→ 衝撃波統計加速 (流体運動エネルギーの変換)

磁気リコネクション (磁場エネルギーの変換)

2次統計加速 (非相対論的にはtoo slow,  
相対論的な場合には十分早くなりうる)

大筋の理解は得られているが、観測の高度化に伴い、理論・モデルにも新しい進展が続いている。

# Hillas' argument on the maximum attainable energy



$$E_{\max} = Ze(v/c) BL$$

$$= Ze\beta BL$$

$E_{\max}$ : the maximum energy attainable through the acceleration process

$Z$ : Charge number

$\beta$ : plasma velocity ( $v/c$ )

$B$ : magnetic field strength

$L$ : system size

$\beta B$ は電場なので、上の関係式は  
エネルギー＝電荷×電場×距離  
という当然の関係を表しているに過ぎないといえる。

しかし、加速可能性・限界を論ずるときに便利な関係式である(**Hillas条件**)

加速のことだけ考えていてはいけない

**加速の必要条件は当然、**

$$t_{\text{acc}} < t_{\text{esc}}$$

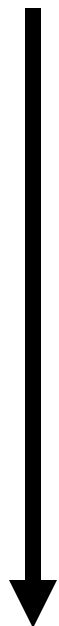
(加速時間 < 脱出時間)

さらに輻射によるエネルギー損失時間  $t_{\text{loss}}$  を考慮する必要あり

$t_{\text{acc}} < t_{\text{esc}} < t_{\text{loss}}$  **粒子は加速後、系から脱出し宇宙線となる**

$t_{\text{acc}} < t_{\text{loss}} < t_{\text{esc}}$  **粒子は一旦加速されるが、  
系から脱出する前に冷えてしまう**

$t_{\text{loss}} < t_{\text{acc}} < t_{\text{esc}}$  **粒子はそもそも加速されない**



**E大**



# シンクロトロン輻射によるエネルギー損失

$$-\left(\frac{d\mathcal{E}}{dt}\right)_{\text{synch}} = \frac{2}{3} \frac{e^4}{m^2 c^3} B^2 \beta^2 \gamma^2$$

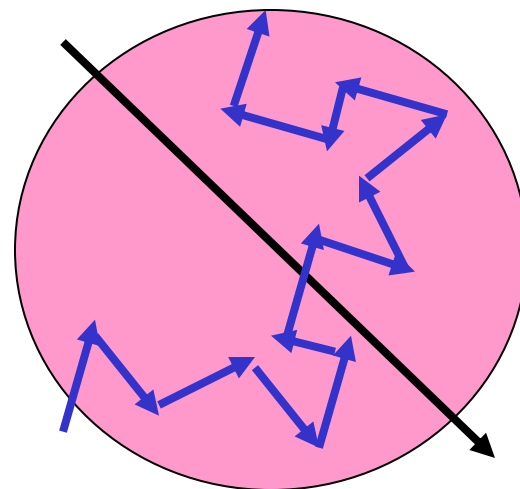
## エネルギー損失の特徴的時間

$$\tau_{\text{loss}} \equiv \left(-\frac{1}{\mathcal{E}} \frac{d\mathcal{E}}{dt}\right)_{\text{synch}}^{-1} = \frac{3}{2} \frac{m^3 c^5}{e^4} \frac{1}{B^2 \gamma}$$

## 系からの脱出時間：下限と上限

$$\tau_{\text{crossing}} = \frac{L}{c}$$

加速領域：空間スケール  $L$



$$\tau_{\text{Bohm}} = \tau_{\text{gyro}} (L/\rho_g)^2 = \frac{eB}{mc^3 \gamma} L^2$$

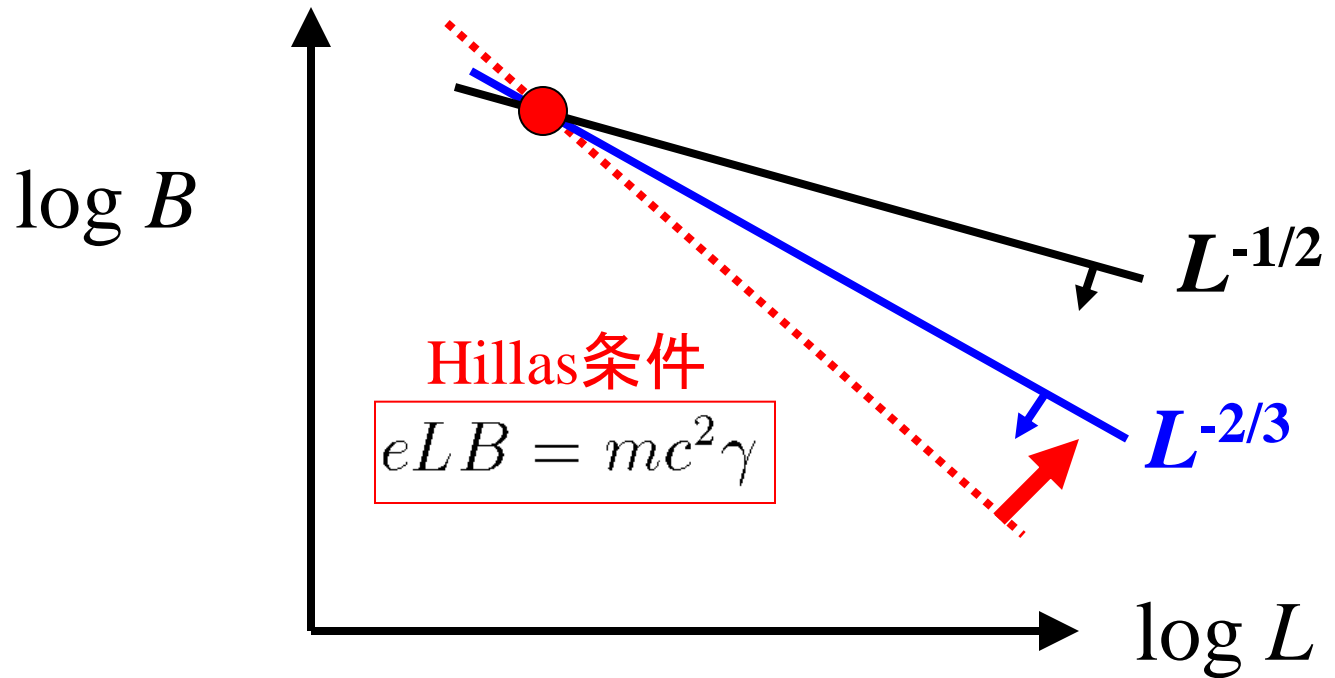
現実の粒子の脱出時間はこれらの中間

# 最短脱出時間について

$$\tau_{loss} > \tau_{crossing} \rightarrow \frac{3 m^3 c^5}{2 e^4} \frac{1}{B^2 \gamma} > \frac{L}{c} \text{ より } LB^2 < \frac{3 m^3 c^6}{2 e^4} \frac{1}{\gamma}$$

# 最長脱出時間について

$$\tau_{loss} > \tau_{Bohm} \rightarrow \frac{3 m^3 c^5}{2 e^4} \frac{1}{B^2 \gamma} > \frac{eB}{mc^3 \gamma} L^2 \text{ より } L^2 B^3 < \frac{3 m^4 c^8}{2 e^5}$$



# 最短脱出時間について

最

$$L_{\text{pc}}^{1/2} B < 0.539 \mathcal{E}_{20}^{-1/2}$$

$$L_{\text{pc}}^{2/3} B < 0.315$$

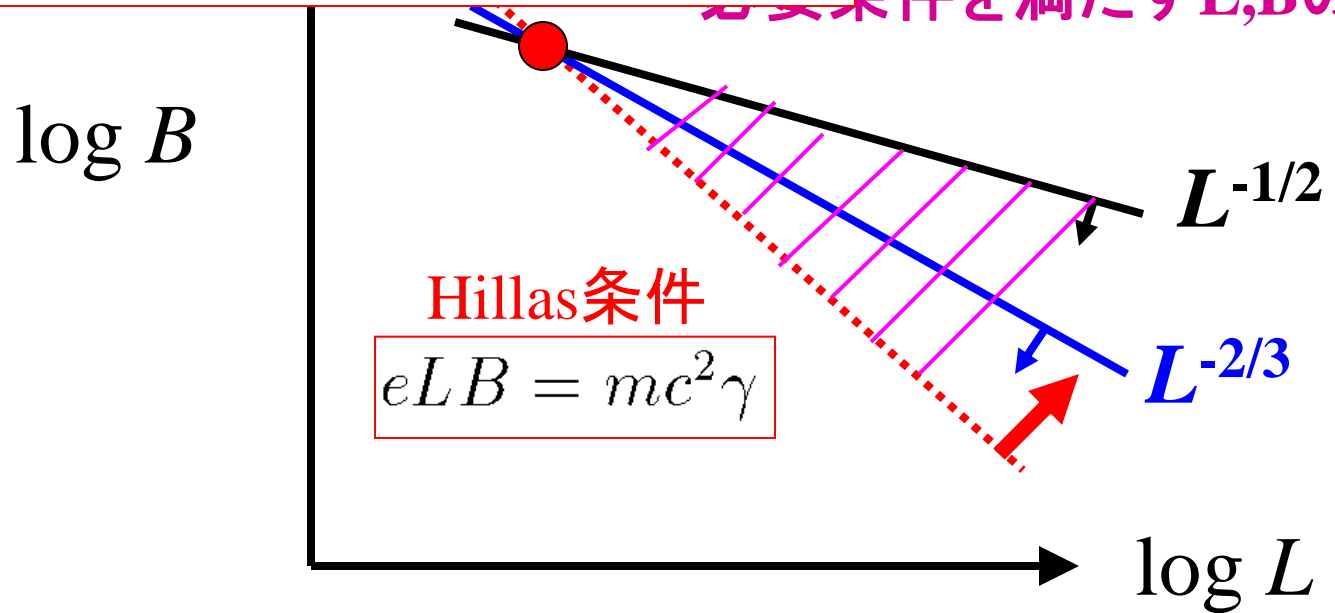
$$L_{\text{pc}} B \geq 0.0803 \mathcal{E}_{20}$$

ただし、BはGauss単位  
 $\mathcal{E}_{20} \equiv \mathcal{E}/(10^{20}\text{eV})$ ,  $L_{\text{pc}} \equiv L/(1\text{pc})$

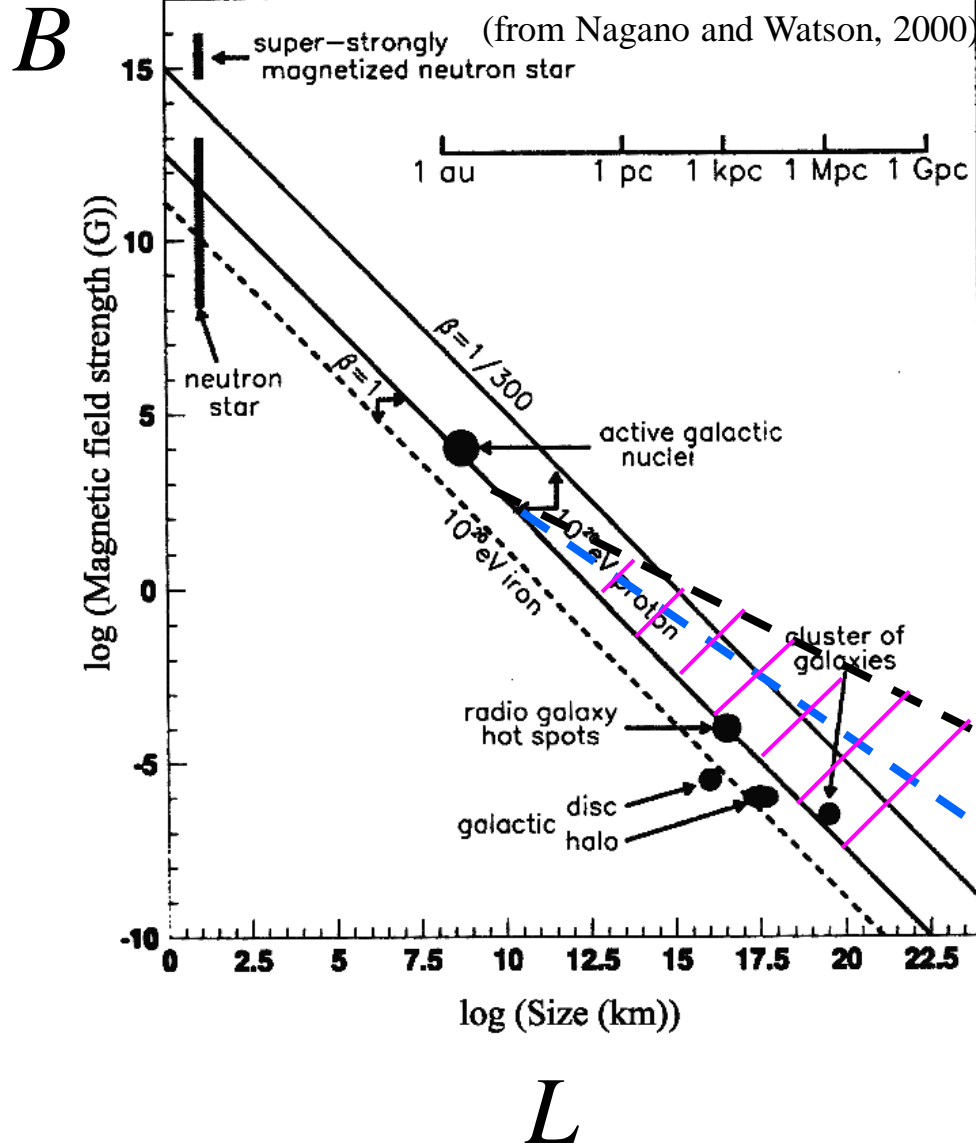
$$LB^2 < \frac{3 m^3 c^6}{2 e^4 \gamma}$$

$$L^2 B^3 < \frac{3 m^4 c^8}{2 e^5}$$

ヒラス条件を満たすL,Bの領域



# Hillas' argument on the maximum attainable energy



$$E_{\max} = Ze(v/c) BL$$

$$= Ze\beta BL$$

$E_{\max}$ : the maximum energy attainable through the acceleration process

$Z$ : Charge number

$\beta$ : plasma velocity ( $v/c$ )

$B$ : magnetic field strength

$L$ : system size

$L^{-1/2}$

$L^{-2/3}$

$10^{20}$  eV に対する  
脱出時間 < 損失時間  
からの制限

# 宇宙線加速候補天体(その1) 超新星残骸



- 秒速数千kmで膨張する衝撃波
- ここで相対論的電子、陽子が生成されている→銀河宇宙線
- X線、ガンマ線を放っている

ただし、せいぜい $10^{15}$ eV止まり

# 宇宙線加速候補天体(その2) パルサー

かに星雲(1054年に爆発した超新星の残骸)



かに星雲(国立天文台提供)



Figure of Supernova Remnant: Crab Nebula (Messier 1)

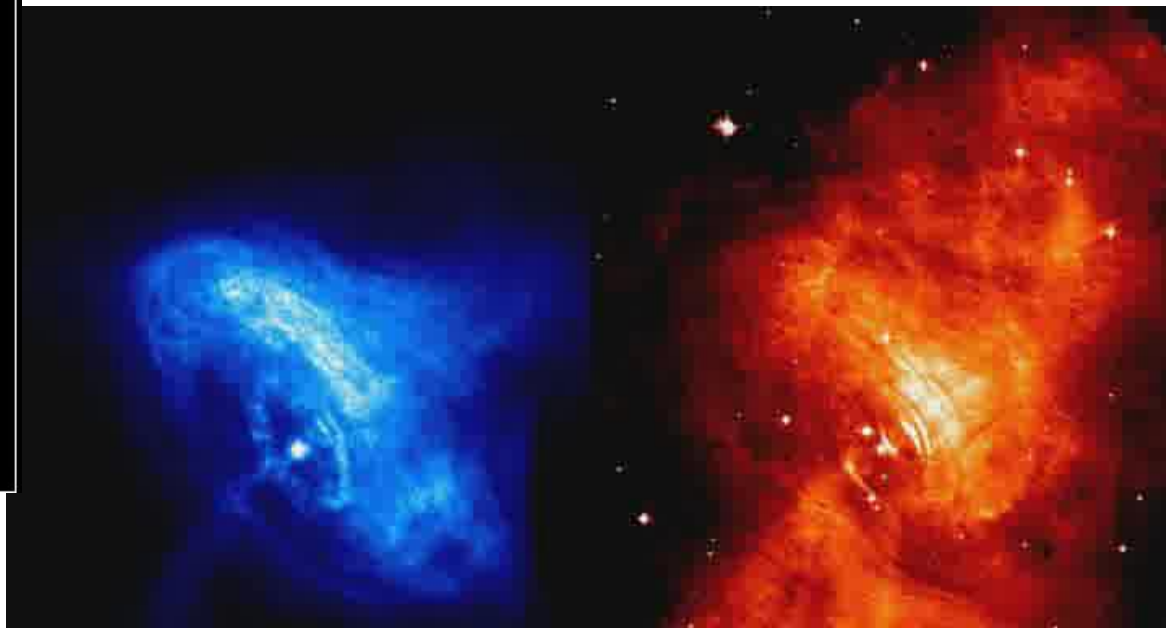
Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan

Suprime-Cam (V, NB497, B)

Copyright © 2007 National Astronomical Observatory of Japan. All rights reserved.

March 12, 2007

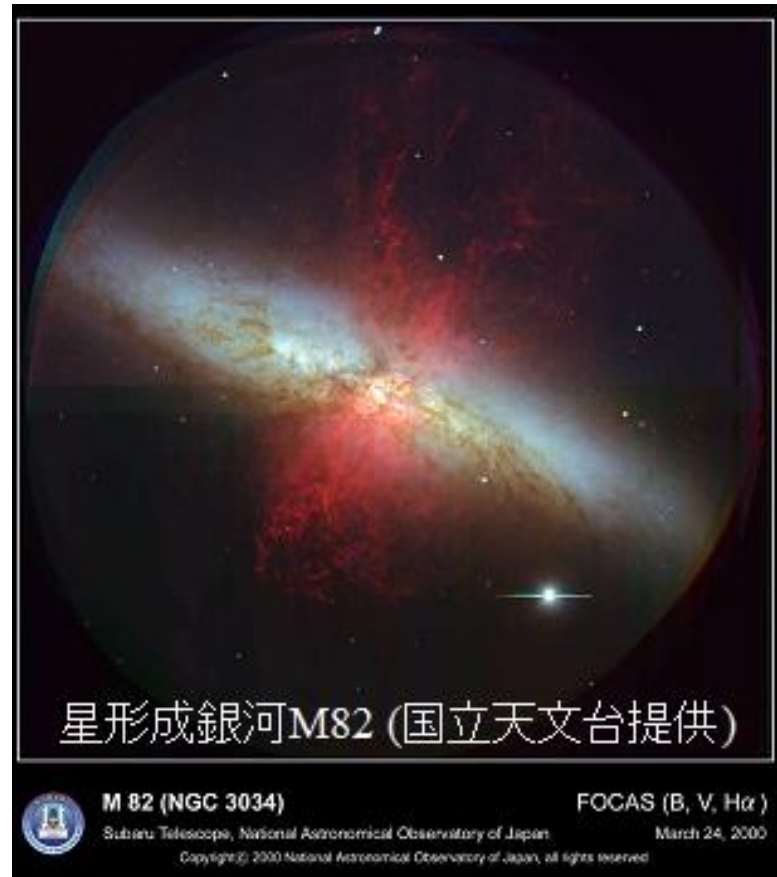
かに星雲中心にあるパルサー(回転中性子星)



- 強磁場を持つ回転中性子星
- 電子・陽電子を生成し、パルサー風を放つ
- 電波、X線、ガンマ線などで観測
- なかには時々巨大な爆発現象を起こすものがある(マグネター)

磁場が強いので損失大。 $10^{15}$ eV程度まで。

# 宇宙線加速候補天体(その3) 星形成銀河



(画像は「すばる」望遠鏡による)

- ・星形成が活発→高頻度の超新星爆発
- 宇宙線エネルギー密度が天の川銀河の500倍

やはり $10^{15}$ eV程度まで?

# 宇宙線加速候補天体(その4) ガンマ線バーストGRB



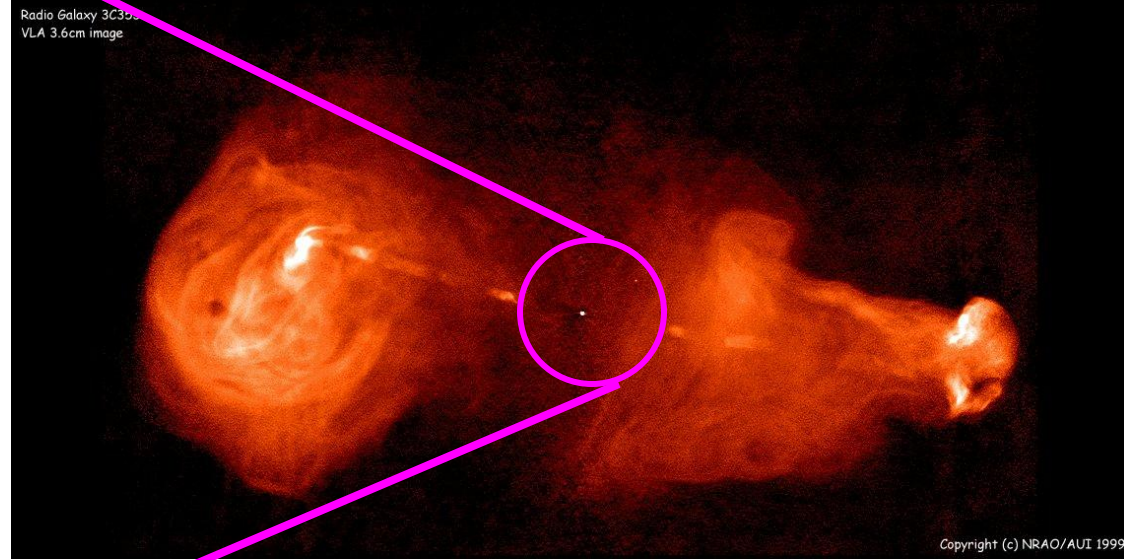
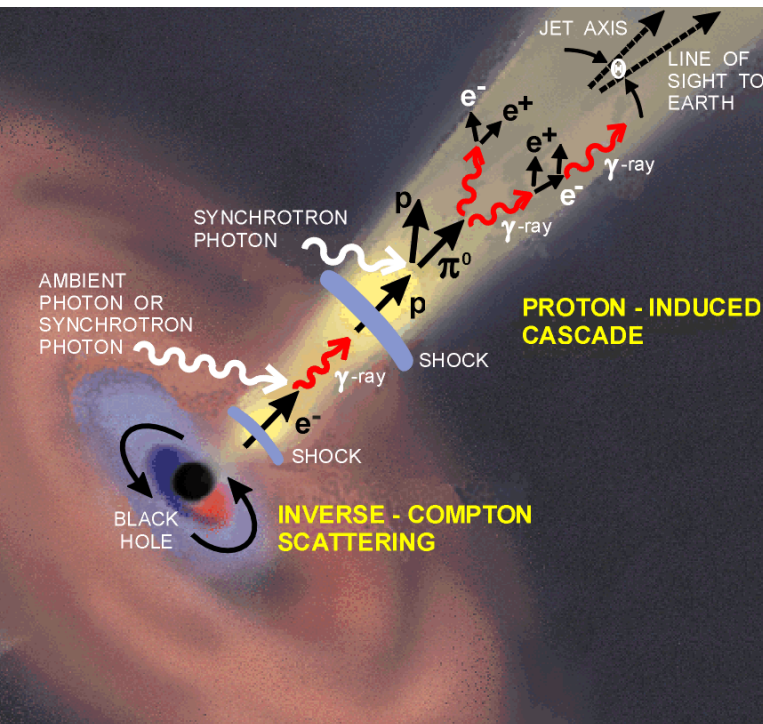
- 超大質量星の崩壊→ブラックホール生成  
それに伴う宇宙最大の爆発現象
- ジェット形成の物理メカニズムは未解明

~ $10^{20}$ eVの宇宙線加速候補天体の1つ



# 宇宙線加速候補天体(その5) 活動銀河核ジェットAGN

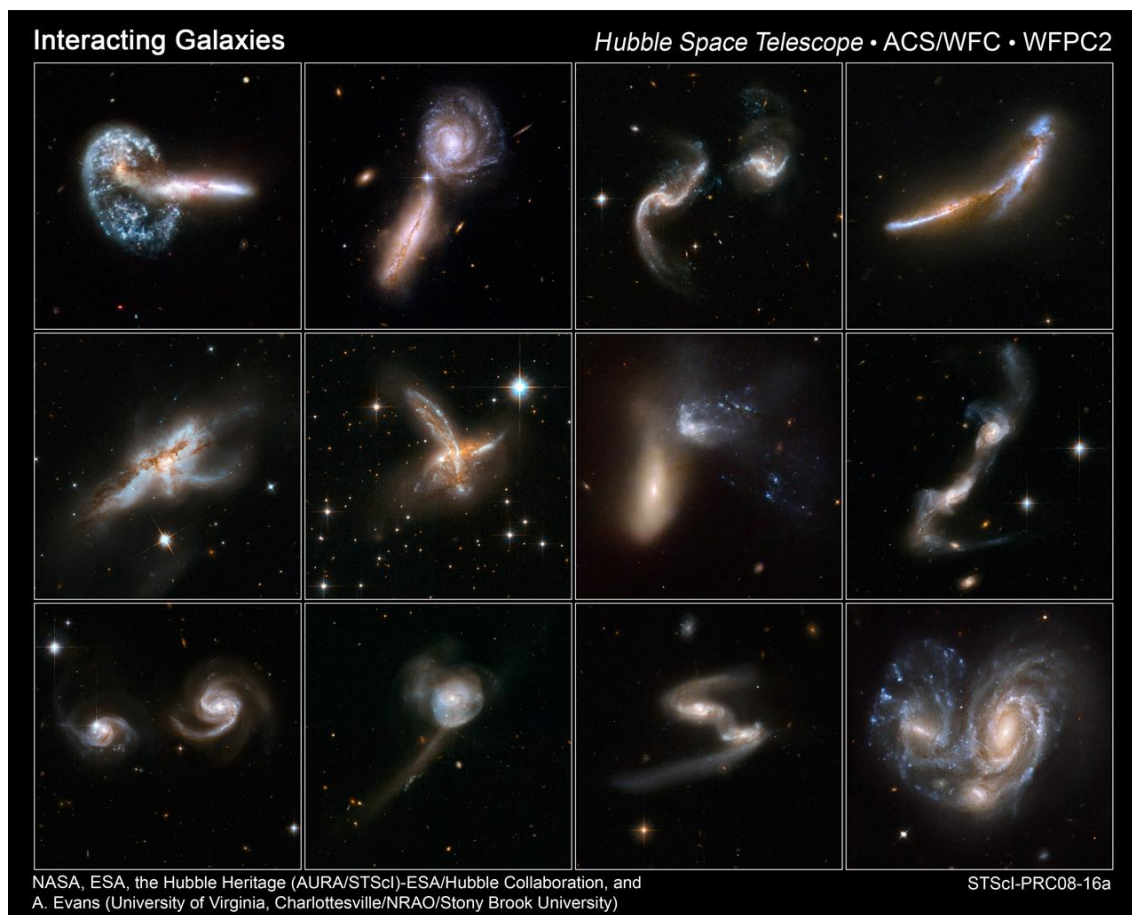
## 電波銀河3C353



- 銀河中心の巨大ブラックホールから噴出するガス
- 速度は光速の99%以上
- ジェットの生成メカニズムは、GRB同様、未解明
- 電波、X線、ガンマ線による観測

~ $10^{20}$ eVの宇宙線加速候補天体の1つ

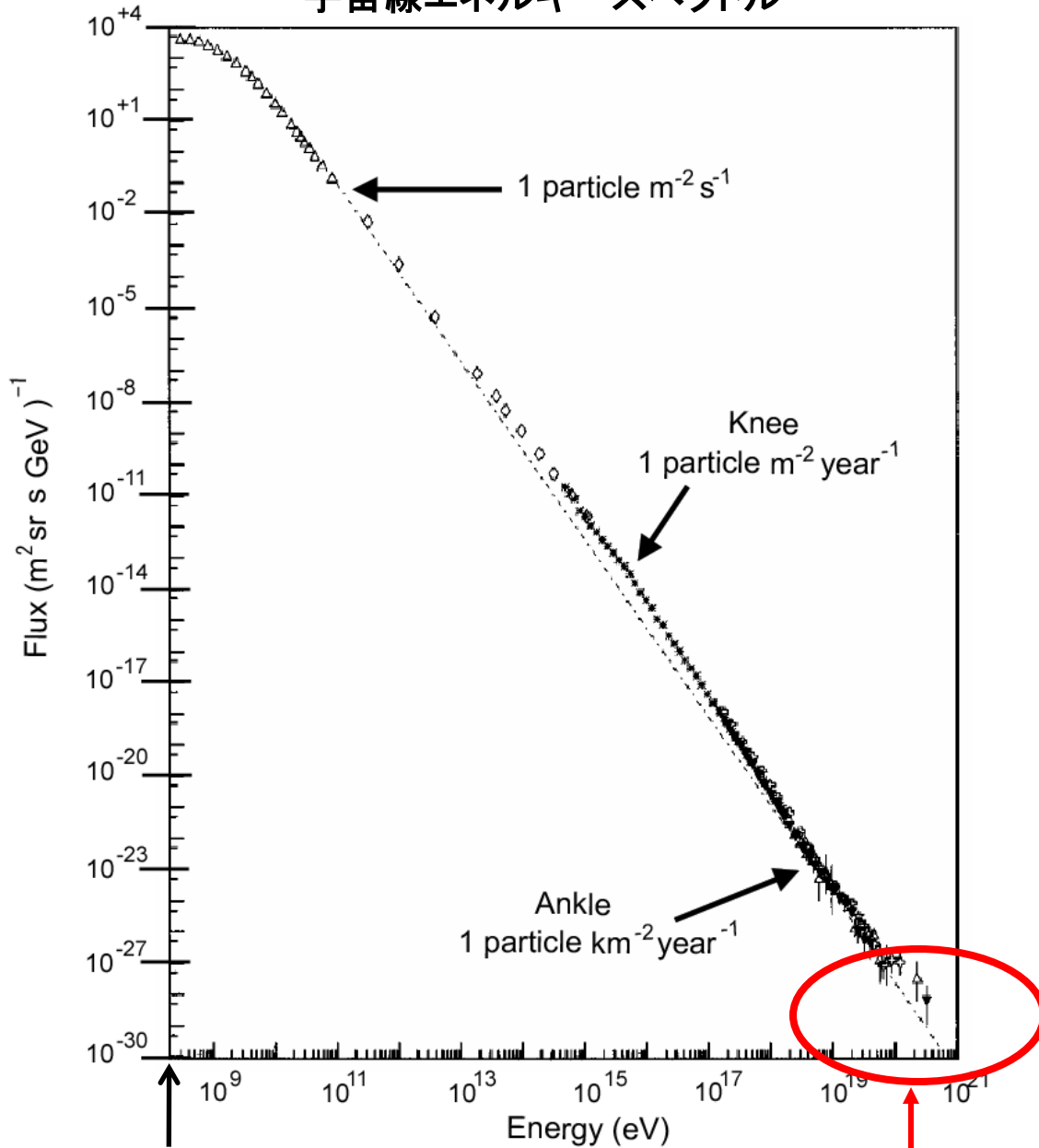
# 宇宙線加速候補天体(その6) 衝突銀河



・運動は非相対論的(～数百km/s)だが、空間スケールが巨大なので、超高エネルギー宇宙線の加速源候補になりうる

陽子だと～ $10^{18}$ eV程度まで。鉄なら～ $10^{20}$ eVも可能？

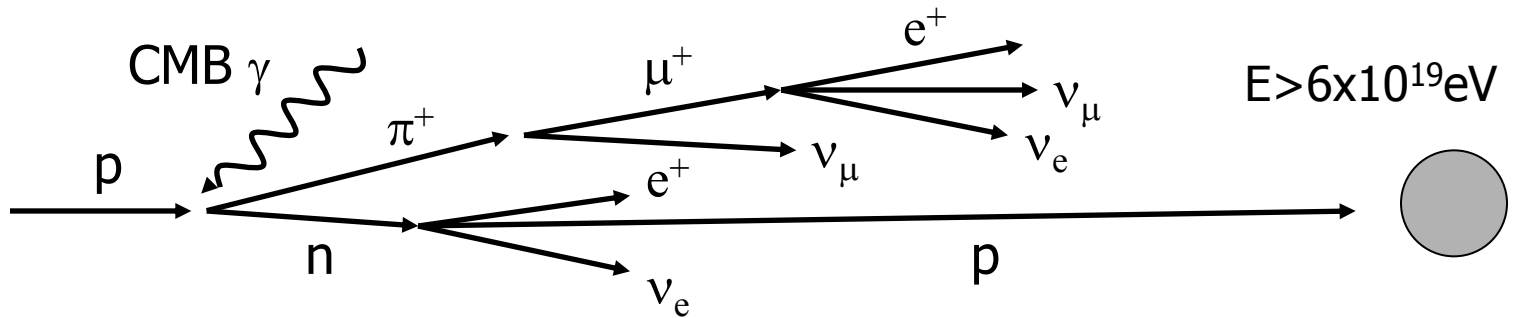
# 宇宙線エネルギースペクトル



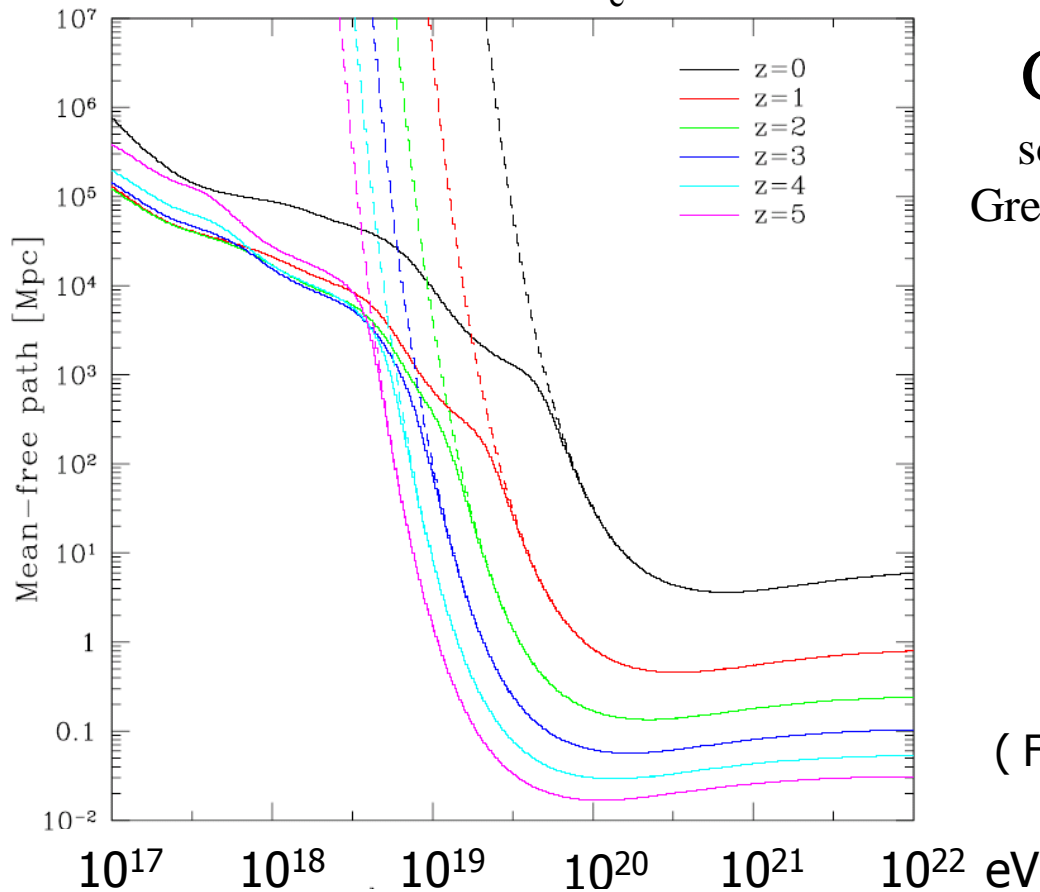
100MeV

$10^{19.7} \text{eV}$ 以上でGZK cutoffの効果を期待

**UHECR cannot propagate longer than  $\sim 75\text{Mpc}$ .**



↑  
Mean  
free  
path

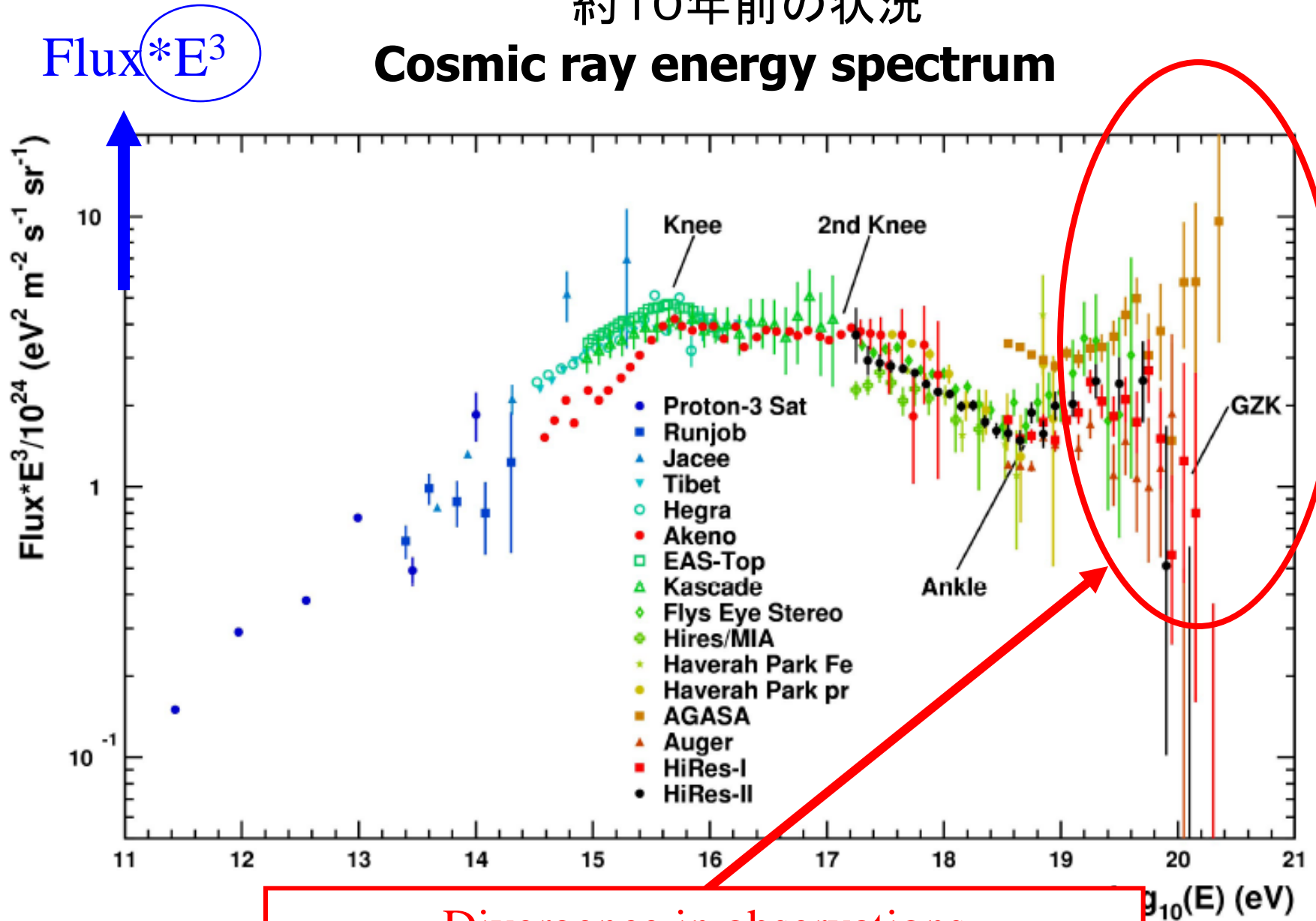


**GZK Mechanism**  
so called after the works by  
Greisen, Zatsepin, and Khuzmin

( Figure from Takami et al. 2007 )

約10年前の状況

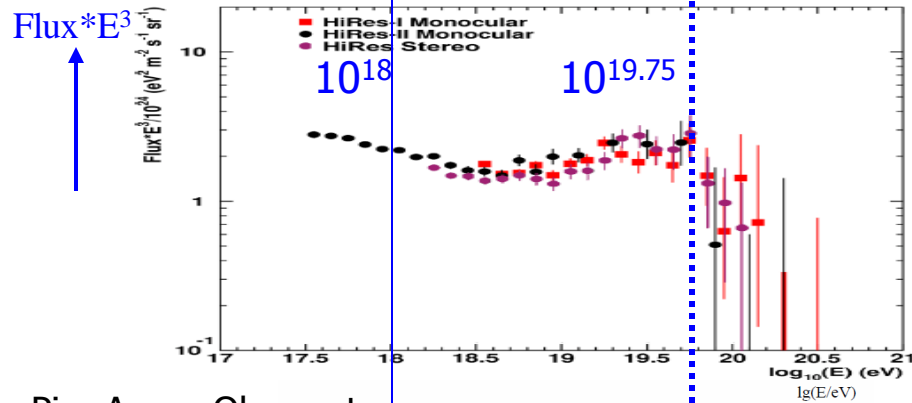
# Cosmic ray energy spectrum



Divergence in observations  
(mainly due to the energy scale uncertainty)

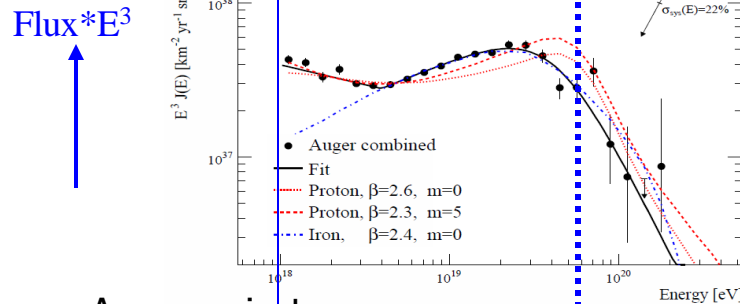
# Convergence is now being achieved. (~2010)

Reanalysis of previous HiRes observation



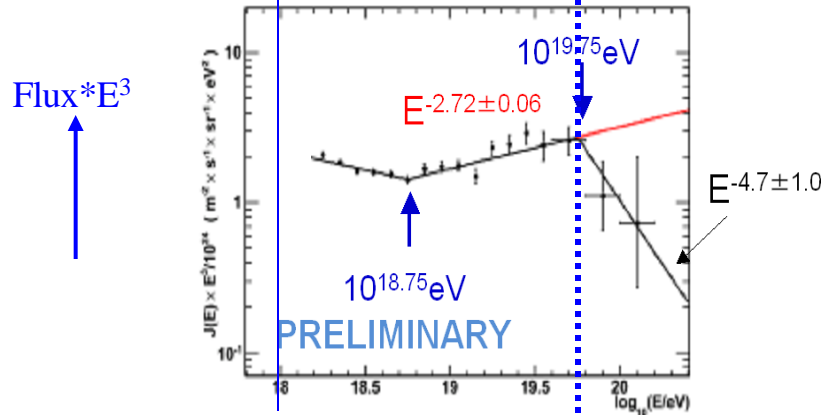
The existence of the spectral cutoff above  $10^{19.75}$  eV is confirmed.

Pier Auger Observatory



今や、GZK Mechanismの存在は観測的に検証されたと言える？  
組成についての論争あり：  
陽子説 vs. 鉄説  
陽子ならGZK  
鉄ならphoto dissociation

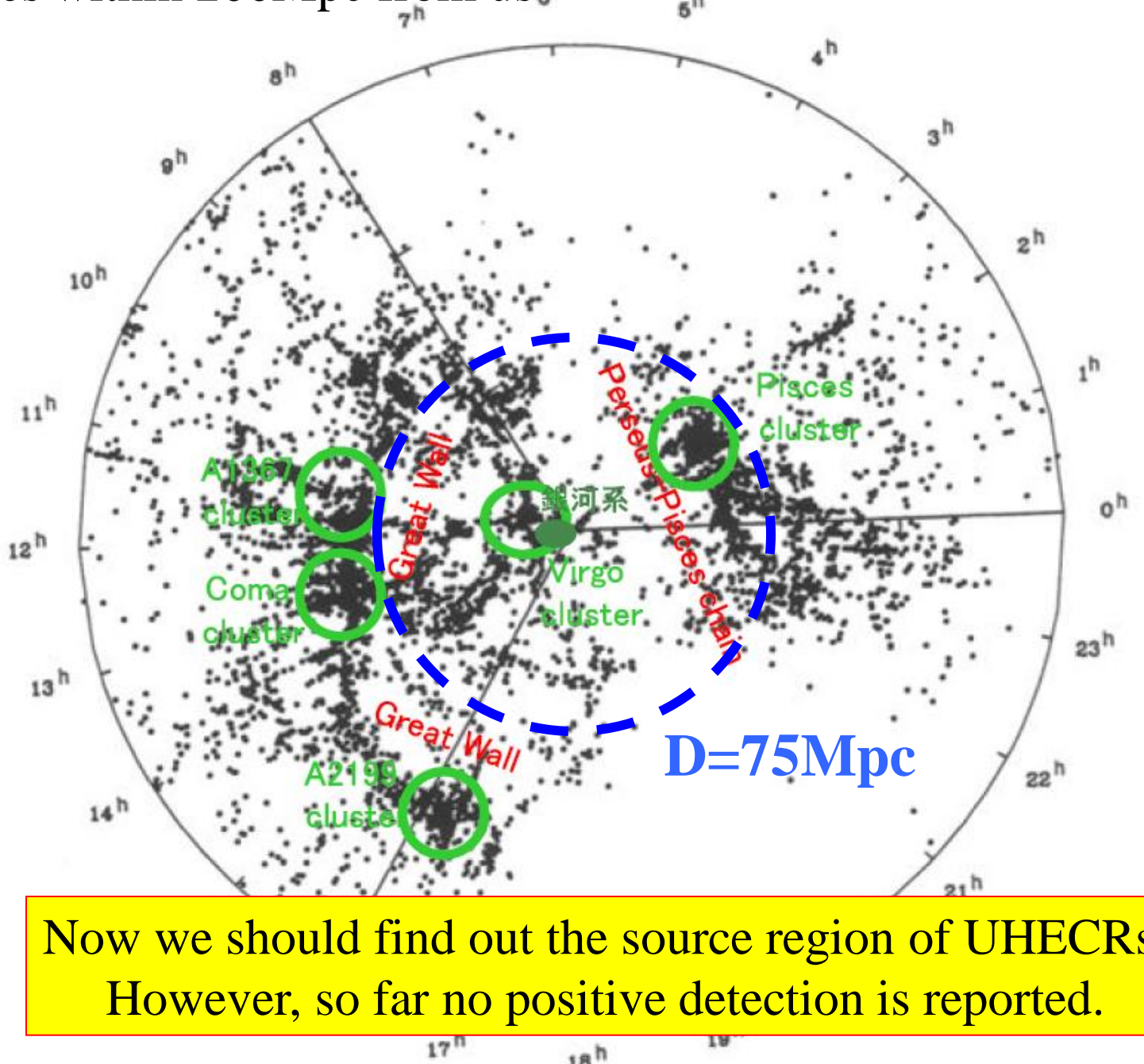
Telescope Array project



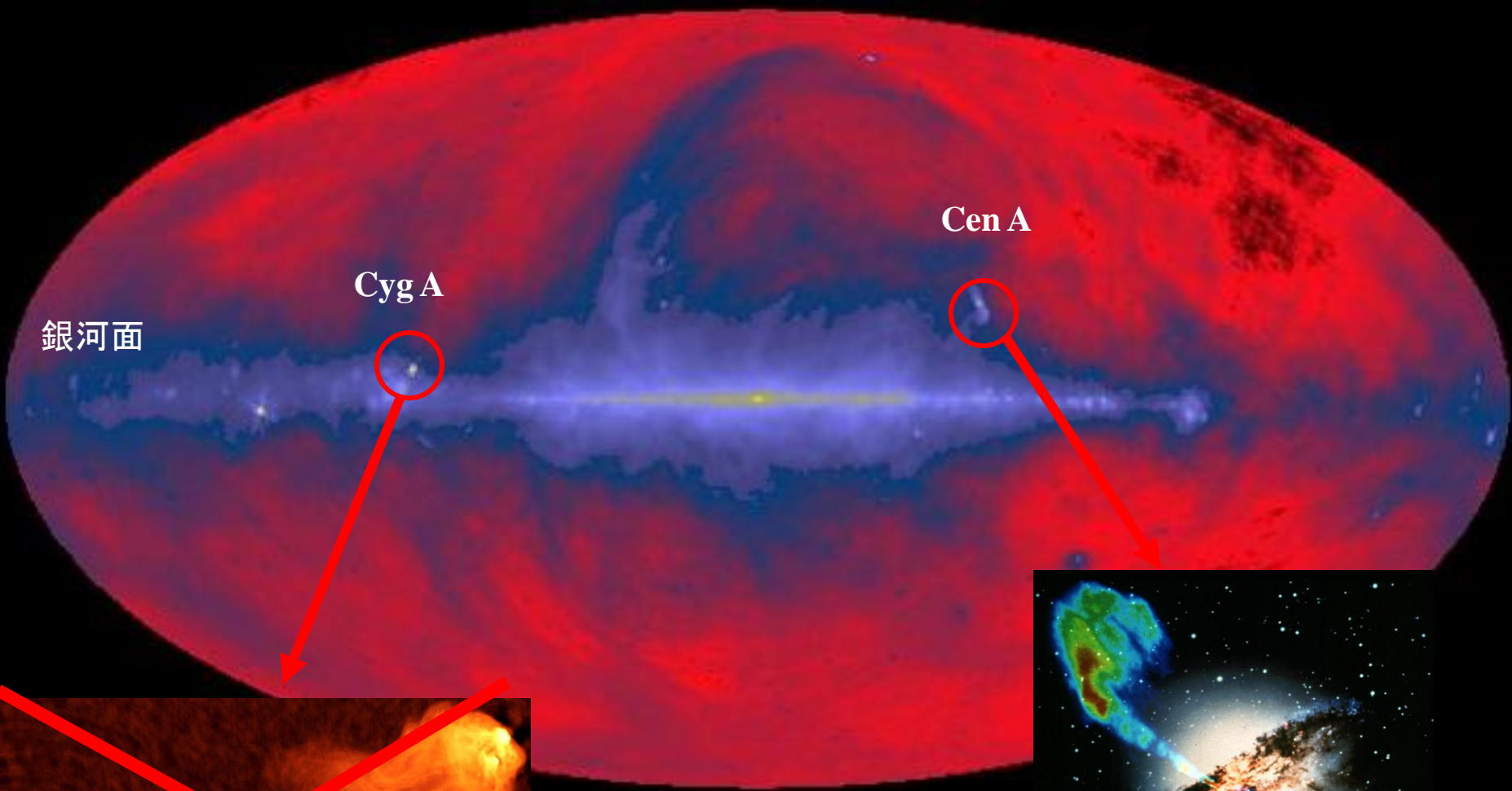
→GZK過程に伴って発生するニュートリノの検出：  
IceCube計画の目標の1つ

# Galaxies within 200Mpc from us

Geller & Huchra, 1989, Science 246, 897-



Now we should find out the source region of UHECRs.  
However, so far no positive detection is reported.



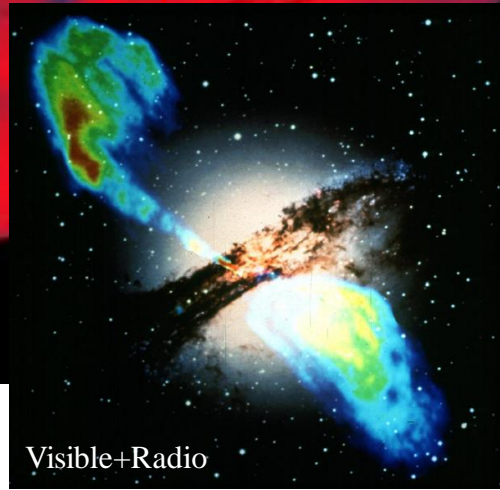
銀河面

Cyg A

Cen A



**Too far!**



Visible+Radio

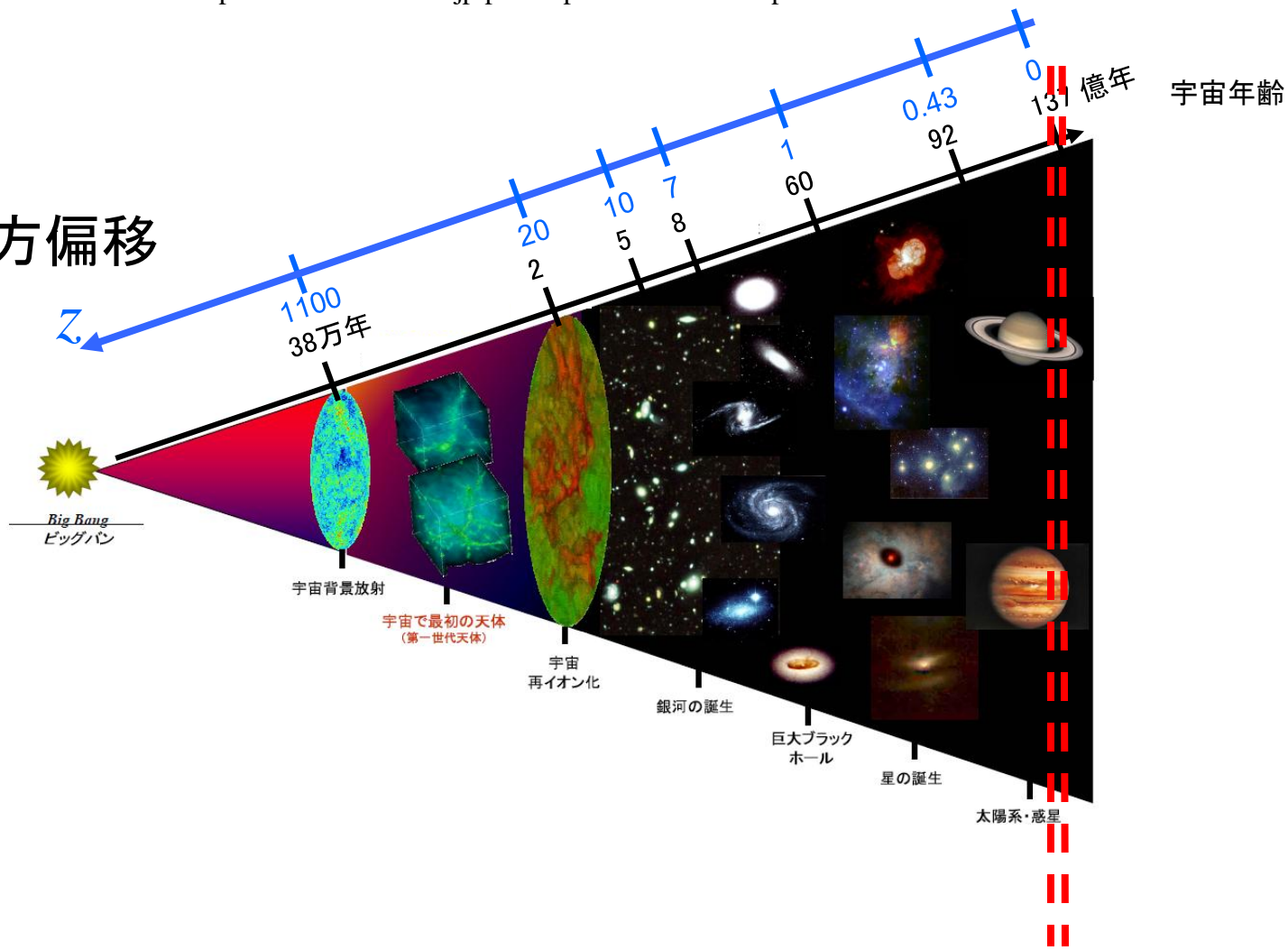
有名な電波銀河の例

Distance~230Mpc

Distance~3.7Mpc



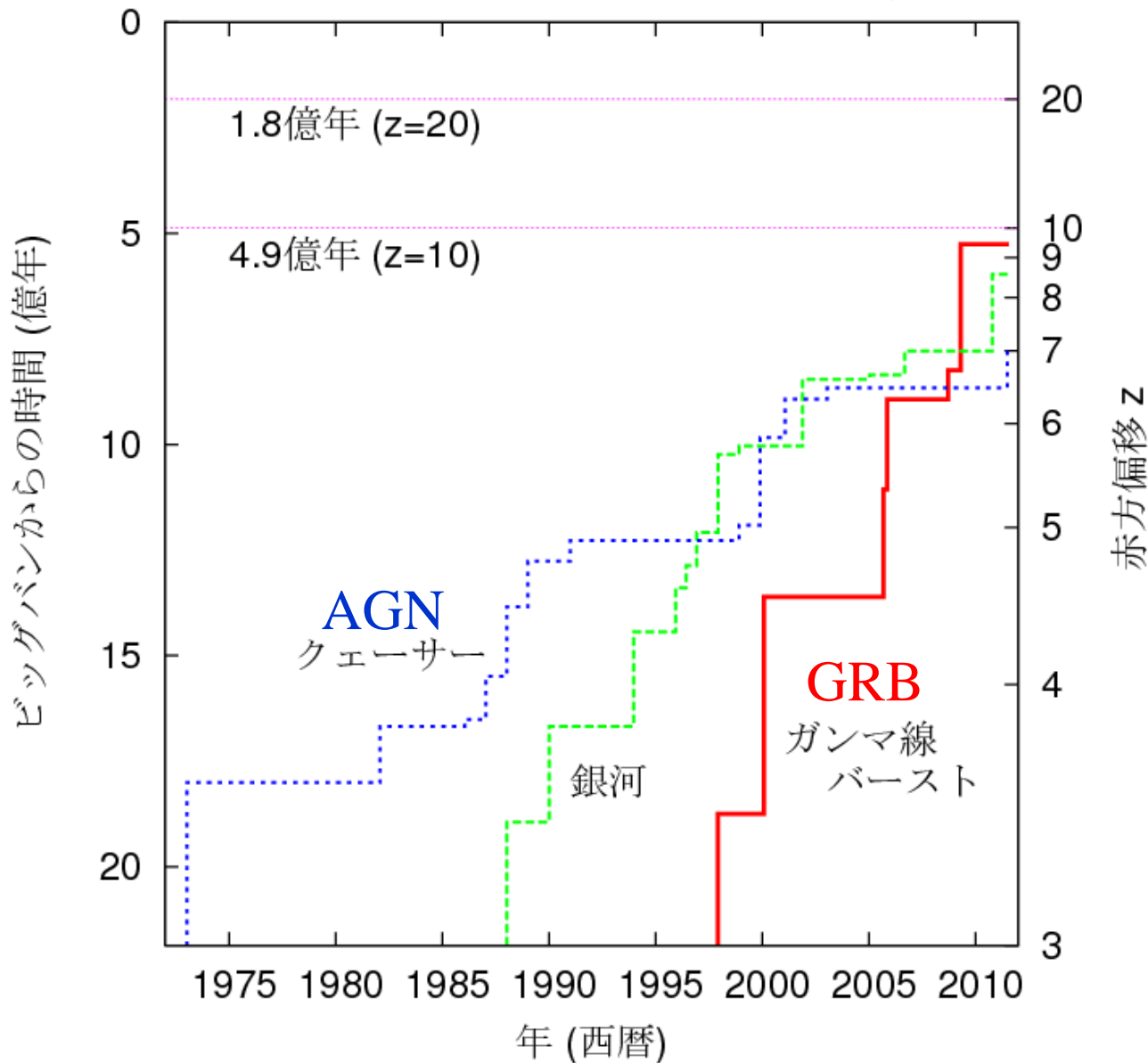
# 赤方偏移

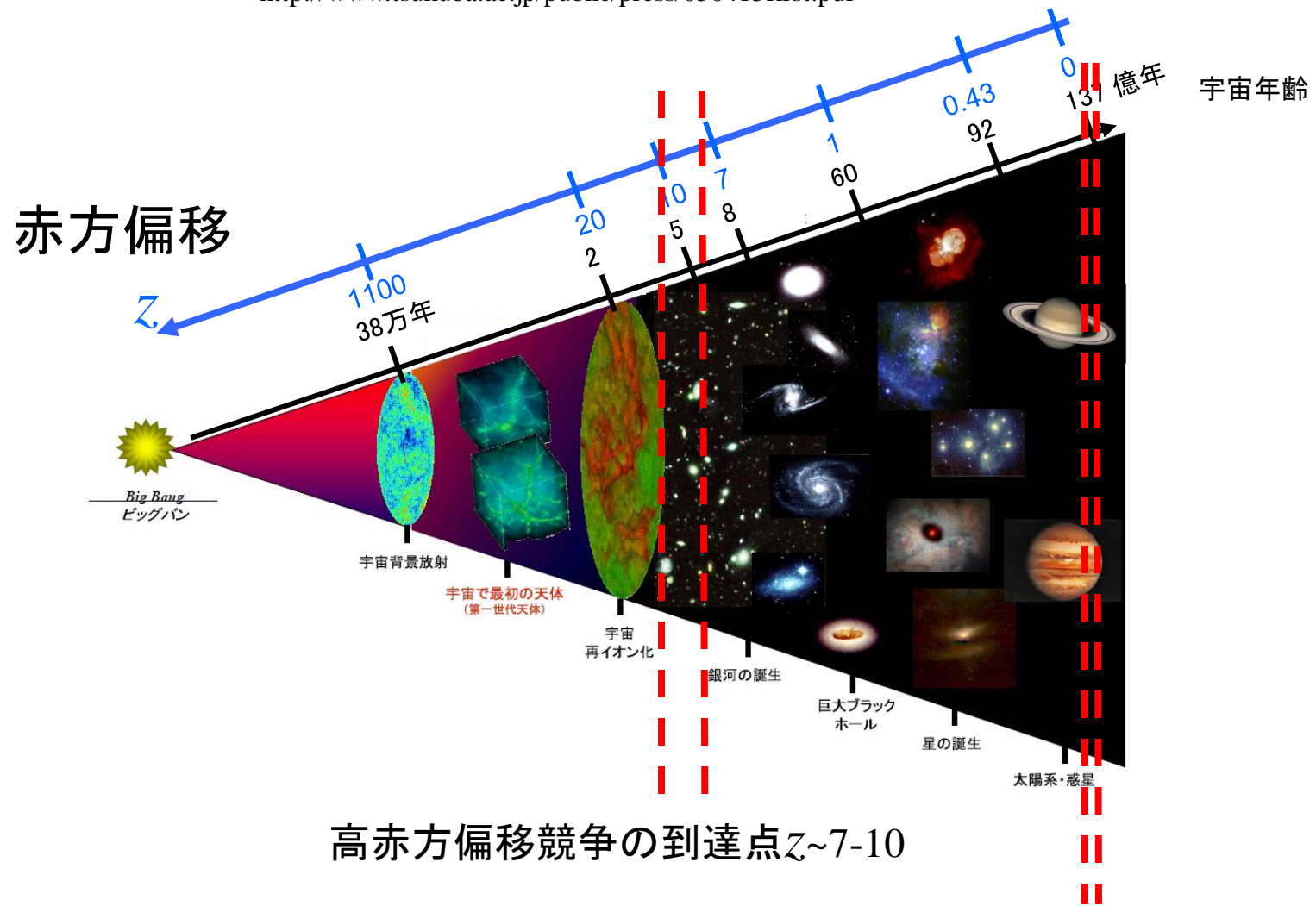


宇宙線の到達限界75Mpc→z~0.02

# 初期宇宙探索競争 (高赤方偏移 $z \rightarrow 10$ or more)

(2011.7の現況 Courtesy of R. Yamazaki)





高赤方偏移競争の到達点 $z \sim 7-10$

宇宙線の到達限界75Mpc $\rightarrow z \sim 0.02$

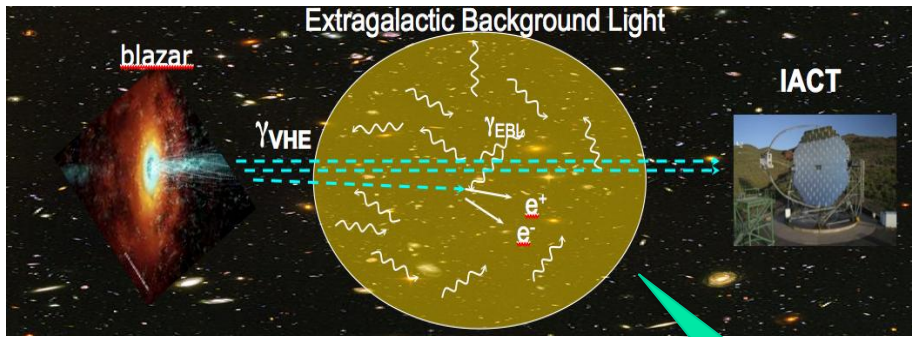
宇宙線研究は役に立つか? ....Yes!

AGN, GRBの非熱的物理過程解明に寄与している

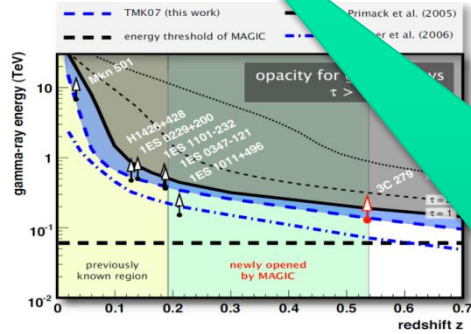
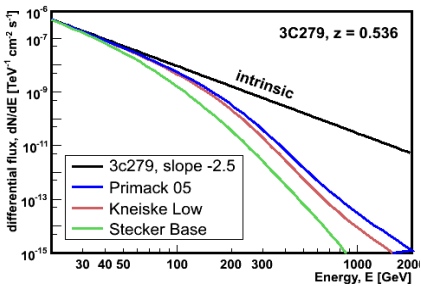
(Courtesy of M. Teshima)

# 宇宙はどこまで透明か？ → 宇宙の星形成史 宇宙論的な距離を飛来する高エネルギーガンマ線

Observations of High redshift AGNs and GRBs will allow us to study the star formation history. EBL represents integrated redshifted star light.



$z \sim 1000$ , WMAP

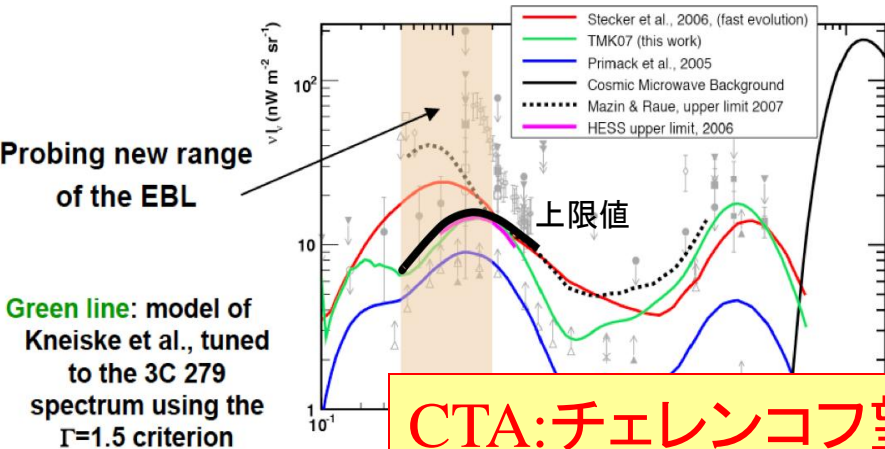


$z = 15 \sim 30$ ,  
First star Pop-III

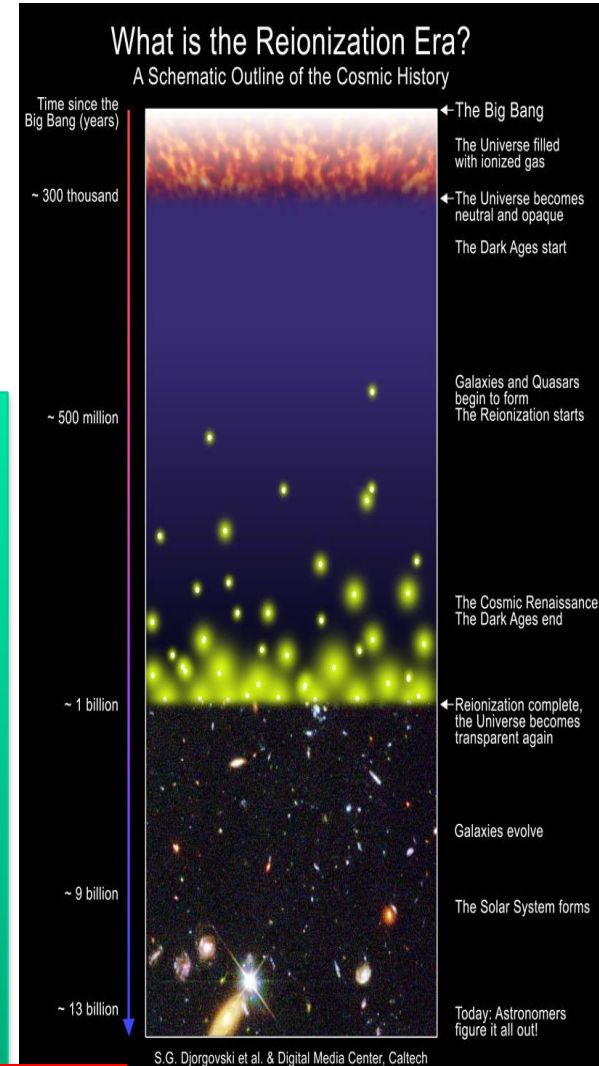
$z = 6 \sim 15$ ,  
Reionization

$z = 3$ , Galaxies

$z = 0$ , Present



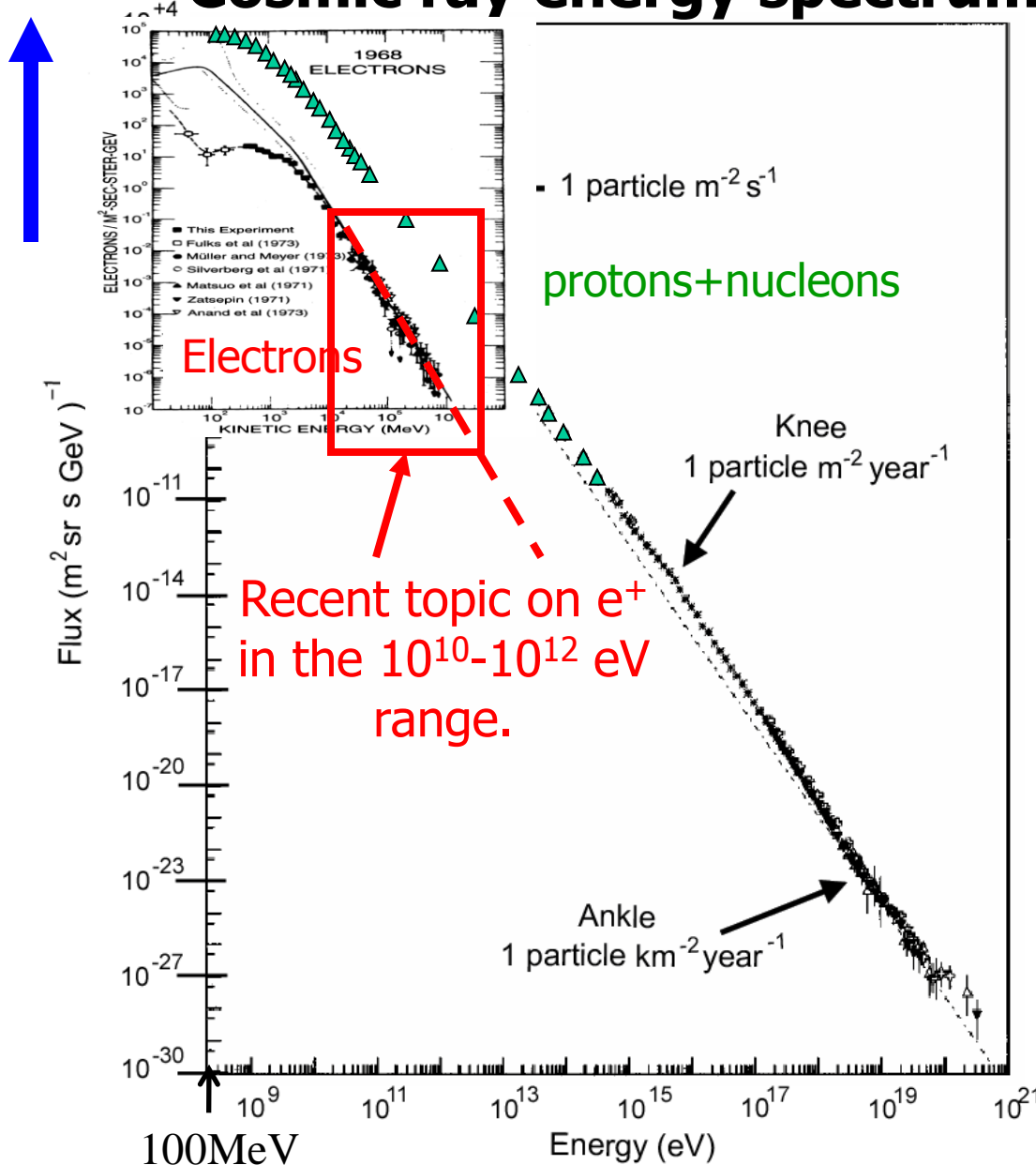
CTA: チェレンコフ望遠鏡アレー計画



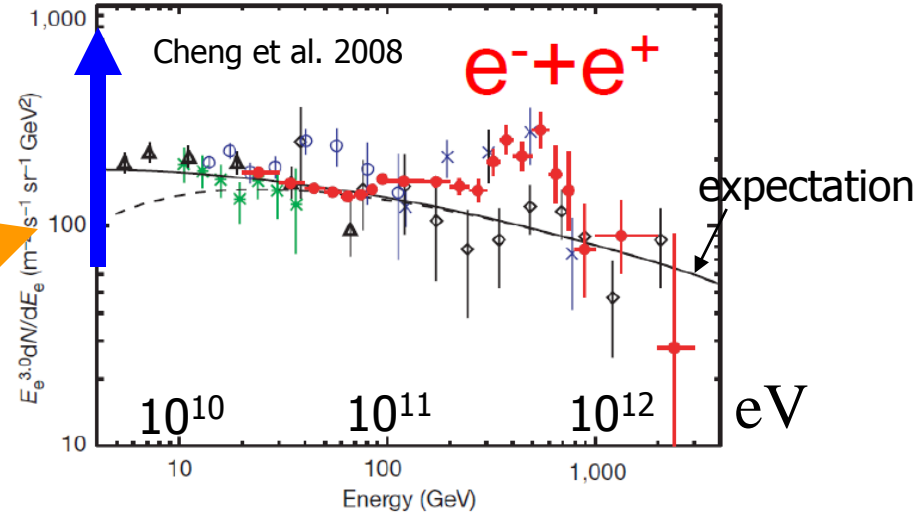
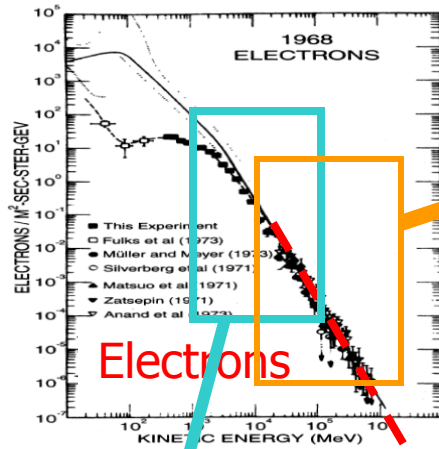
研究のフロンティアは最高エネルギーだけに限られてはいない。

CR Flux

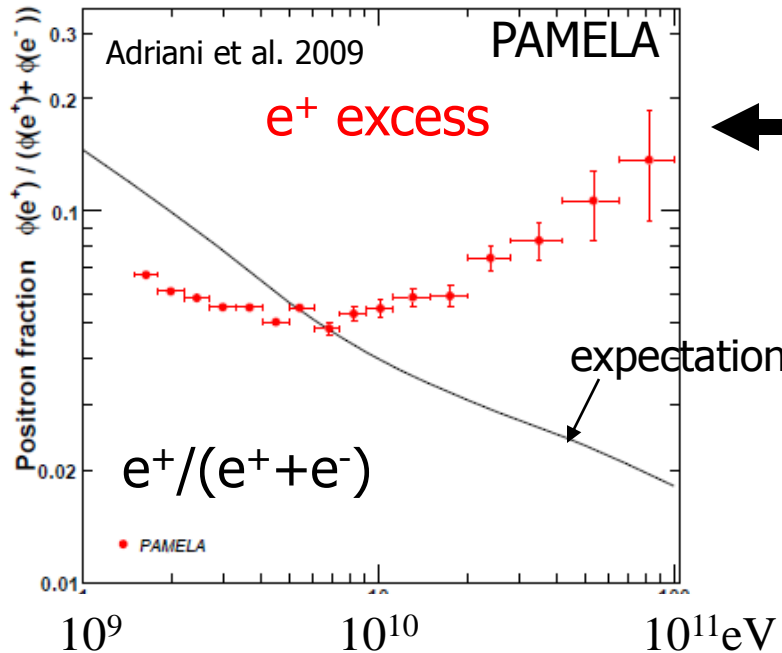
# Cosmic ray energy spectrum



$[dN/dE]*E^3$  ATIC/PPB-BETS



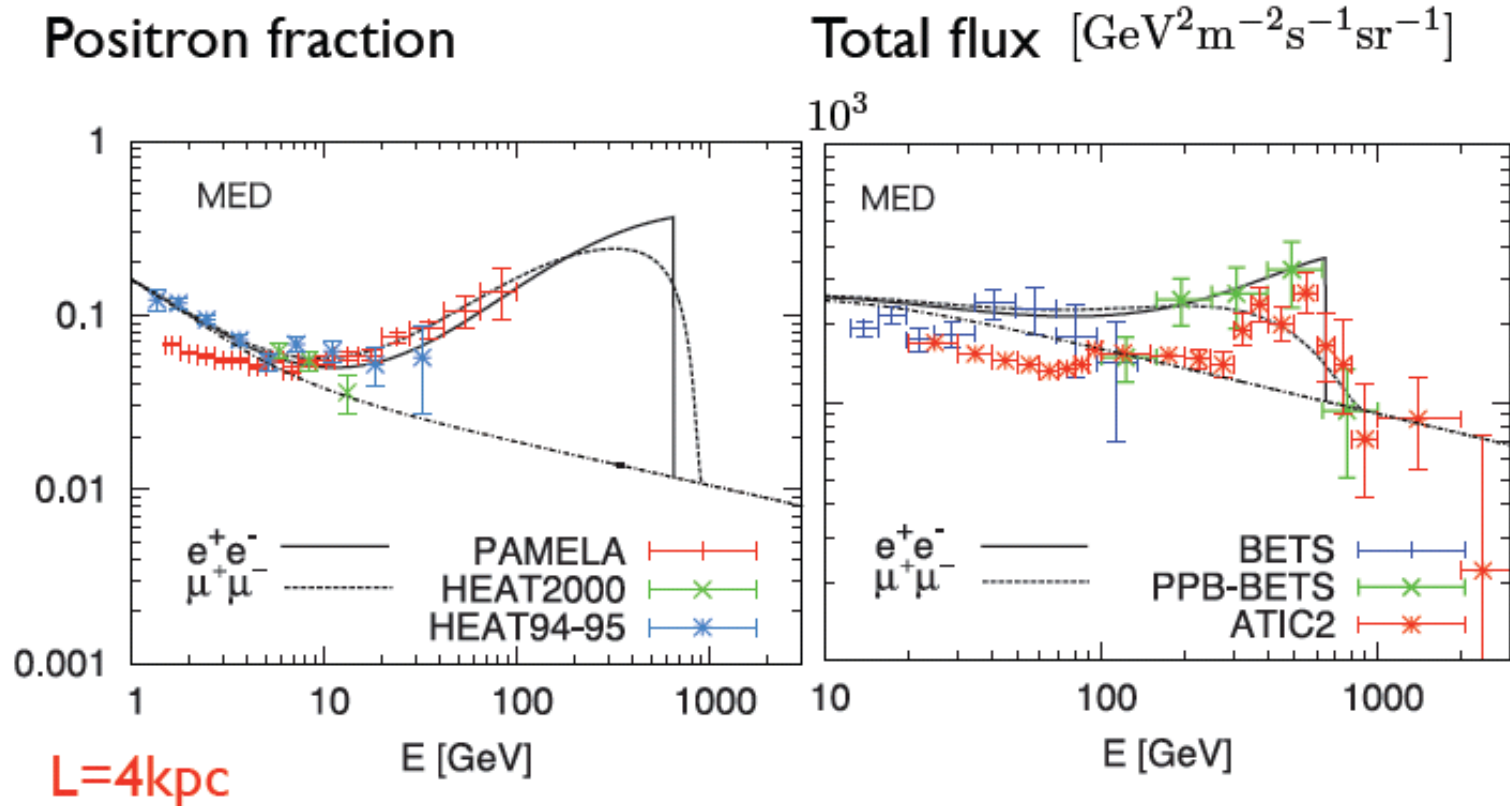
Hump in  $e^+ + e^-$  energy spectrum  
( $e^+$  and  $e^-$  are not distinguished)



# 'Top-down scenario': example (1)

## Direct Lepton Pair Production by DM Annihilation

J.Hisano et al. arXiv:0901.3852



- $\chi\chi \rightarrow e^+e^-$  :  $m_\chi = 650\text{GeV}$ ,  $\langle\sigma v\rangle = 5 \times 10^{-24}\text{cm}^3\text{s}^{-1}$
- $\chi\chi \rightarrow \mu^+\mu^-$  :  $m_\chi = 900\text{GeV}$ ,  $\langle\sigma v\rangle = 15 \times 10^{-24}\text{cm}^3\text{s}^{-1}$

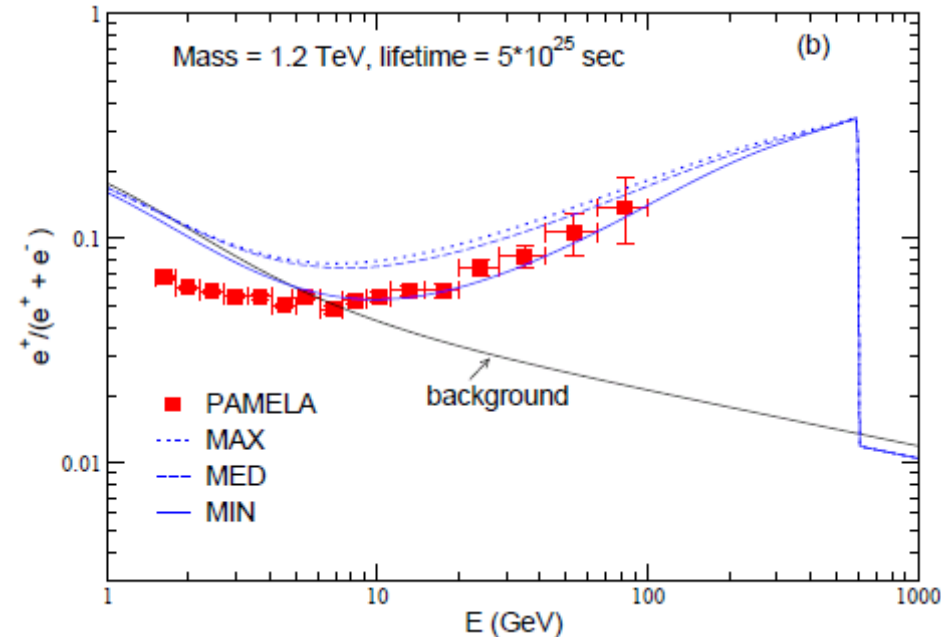
# 'Top-down scenario': example (2)

## Decaying DM (Hidden Gauge Boson) with Lifetime of $O(10^{26})$ Seconds

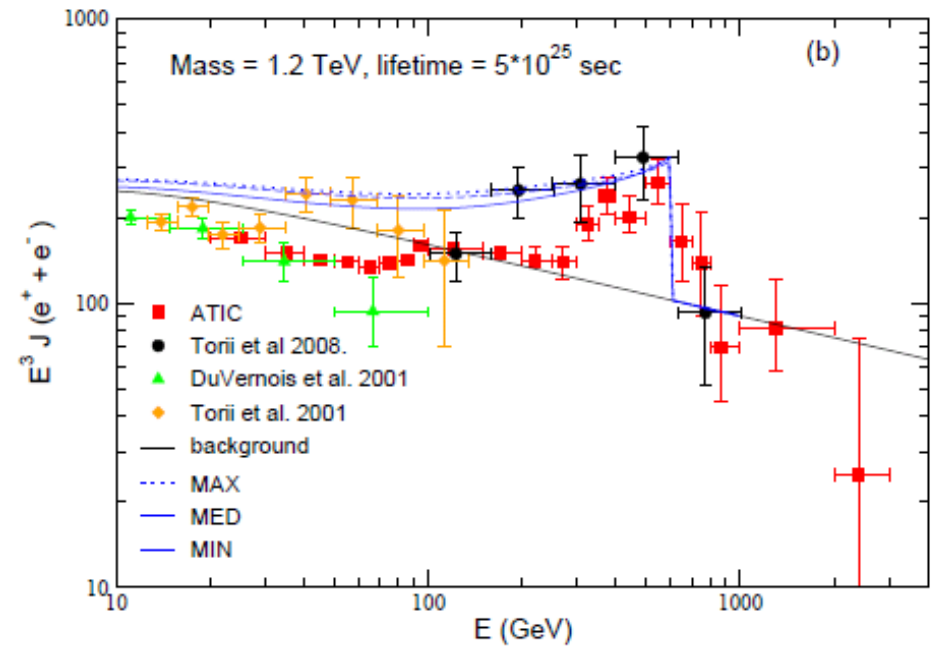
Chen, Nojiri, Takahashi, Yanagida [arXiv:0811.3357](https://arxiv.org/abs/0811.3357)

Large boost factor is not necessary !!

Positron Fraction



Electron + Positron Spectrum

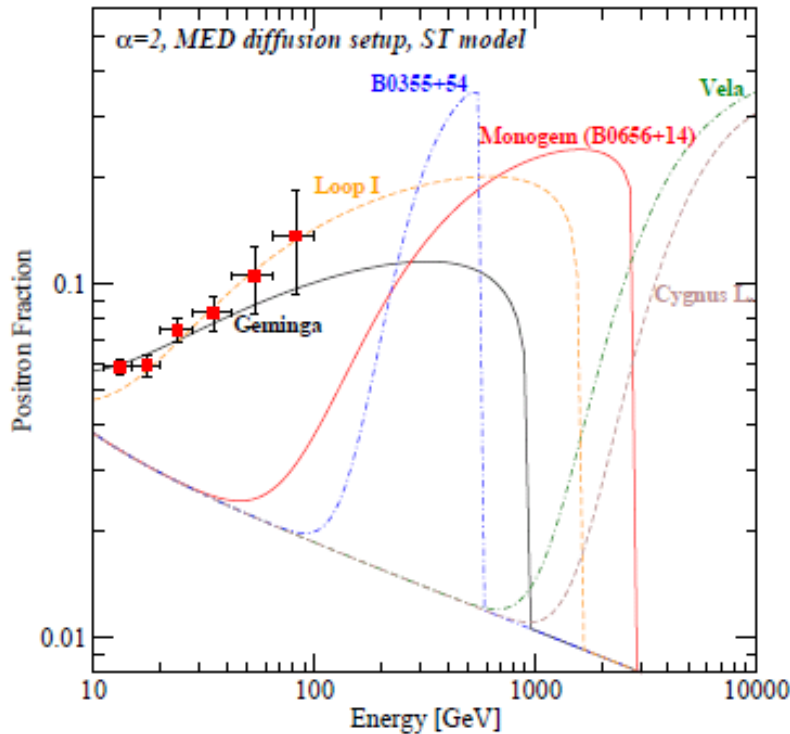




# 'Bottom-up scenario': example (1)

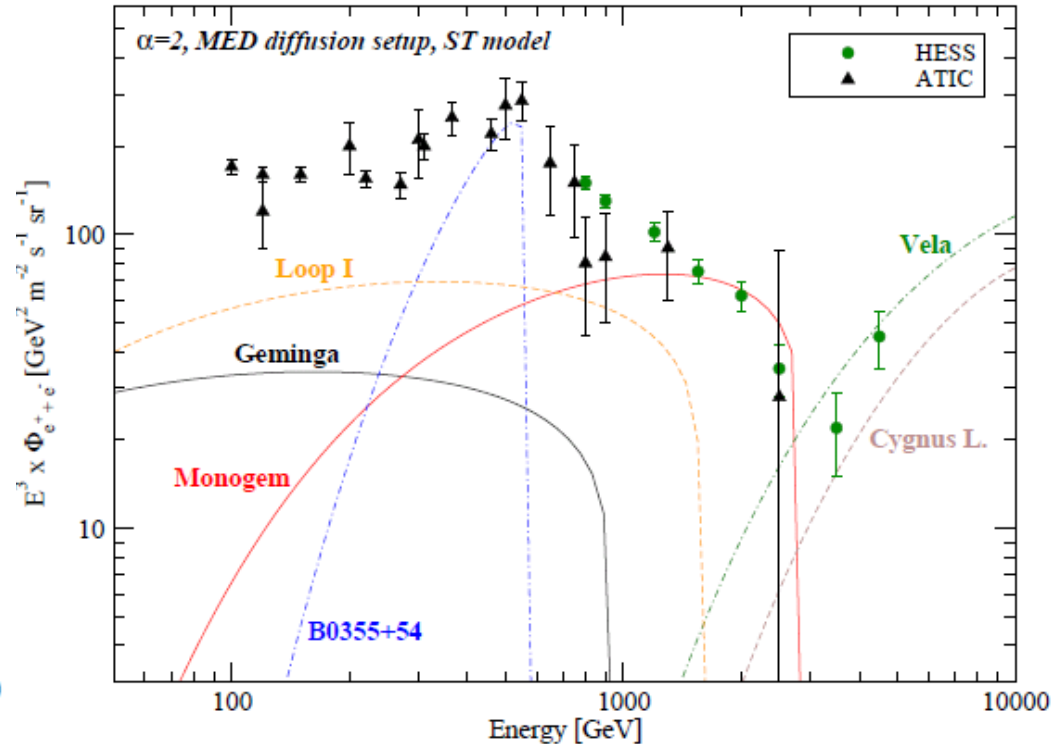
## Nearby Pulsars

Positron Fraction



S.Profumo arXiv:0812.4457

Electron + Positron Spectrum



Nearby pulsars

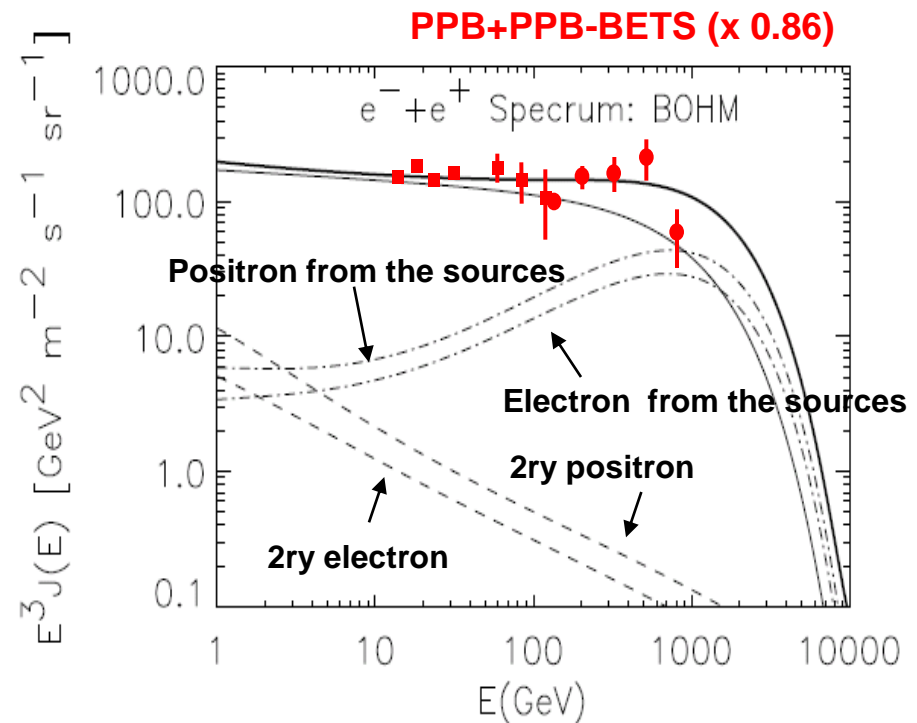
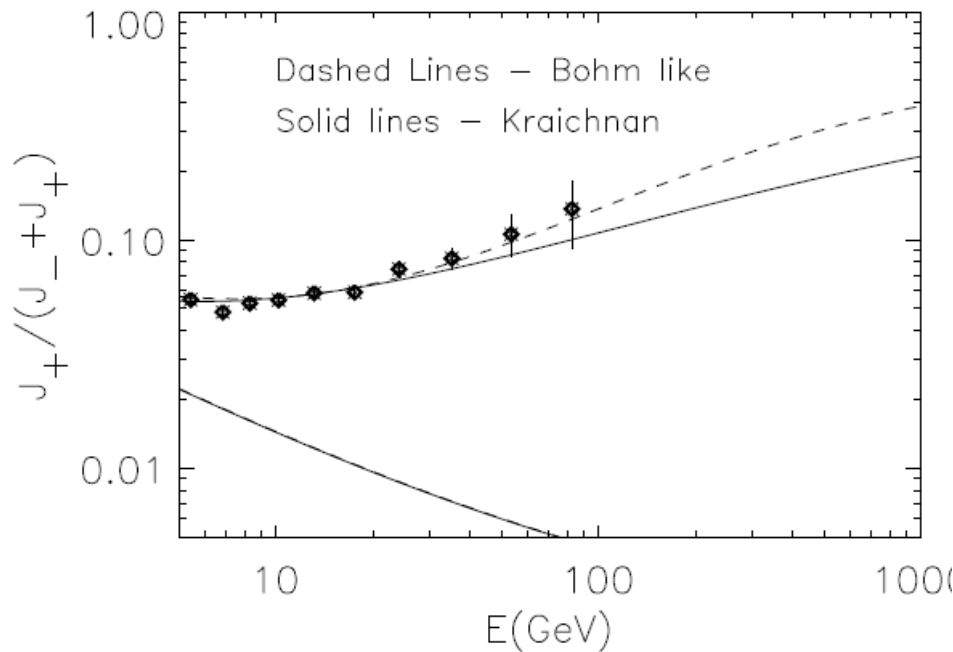
Name	Distance [kpc]	Age [yr]	$\dot{E}$ [ergs/s]	$E_{out}$ [ST]	$E_{out}$ [CCY]	$E_{out}$ [HR]	$E_{out}$ [ZC]	$f_{e\pm}$	$g$
Geminga [J0633+1746]	0.16	$3.42 \times 10^5$	$3.2 \times 10^{34}$	0.360	0.344	0.013	0.053	0.005	0.70
Monogem [B0656+14]	0.29	$1.11 \times 10^5$	$3.8 \times 10^{34}$	0.084	0.456	0.004	0.372	0.015	0.14
Vela [B0833-45]	0.29	$1.13 \times 10^4$	$6.9 \times 10^{36}$	0.044	0.133	0.133	0.005	0.020	0.70
B0355+54	1.10	$5.64 \times 10^5$	$4.5 \times 10^{34}$	1.366	0.677	0.022	0.121	0.2	0.61
Loop I [SNR]	0.17	$2 \times 10^5$		0.3				0.006	
Cygnus Loop [SNR]	0.44	$2 \times 10^4$		0.03				0.01	

# 'Bottom-up scenario': example (2)

## Natural Consequence of the Standard Scenario: Secondary Products of Hadronic Interactions inside the Sources

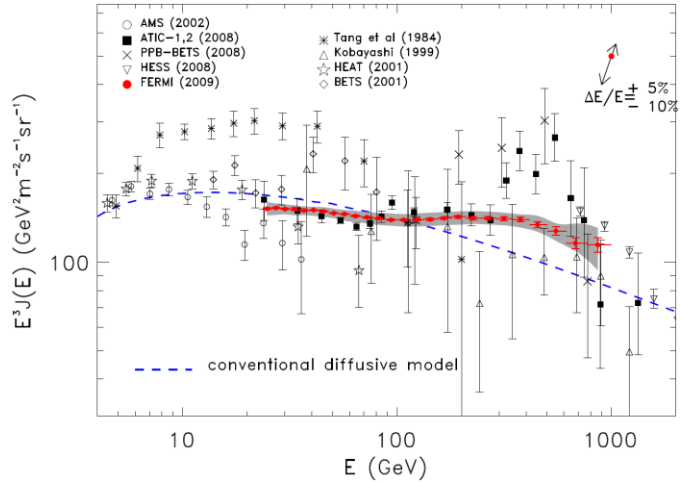
P.Blasi arXiv:0903.2794 (16 March 2009)

$$J_e = (1.82 \pm 0.13) \times 10^{-4} \left( \frac{E}{100 \text{ GeV}} \right)^{-3.05 \pm 0.05} (\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}).$$

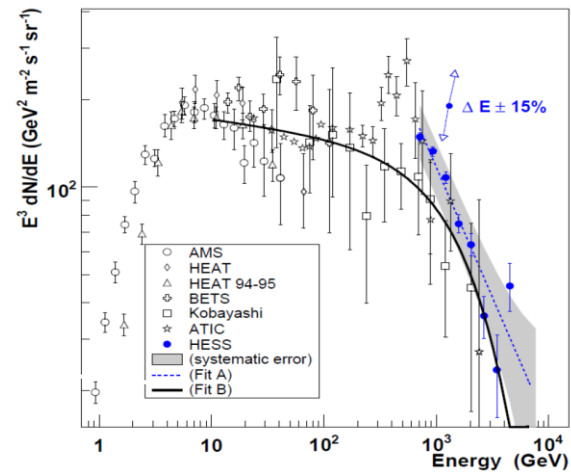


However, PAMELA/ATIC+PPB-BETS results are not confirmed by Fermi and HESS observations.

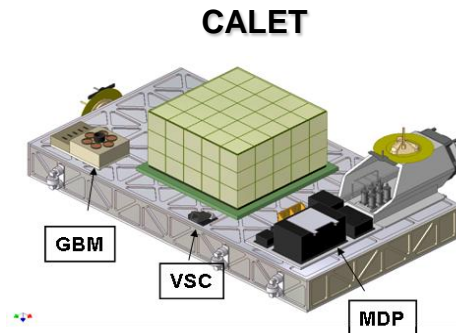
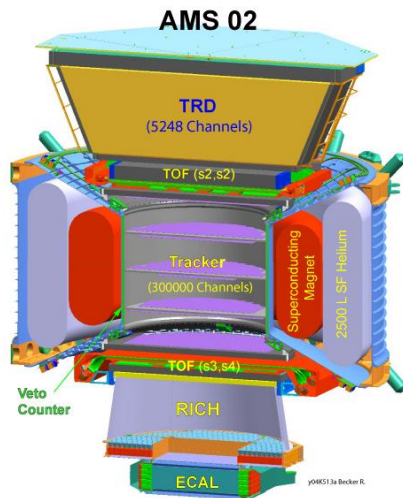
Fermi gamma ray astronomy satellite



HESS ground air-Cherenkov telescope



We should wait for the future observations, AMS-2 and CALET.



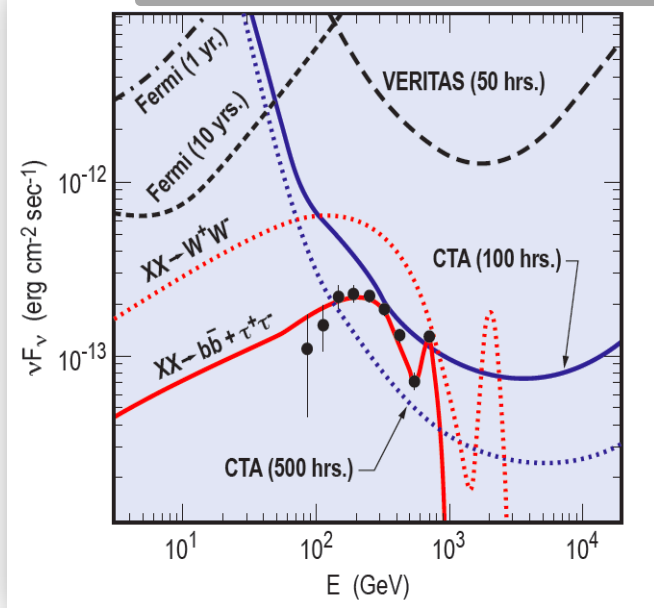
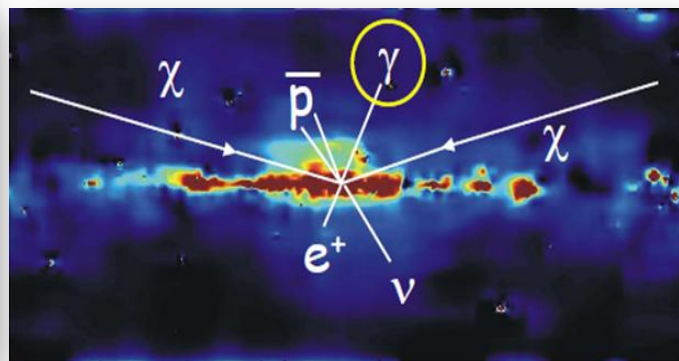
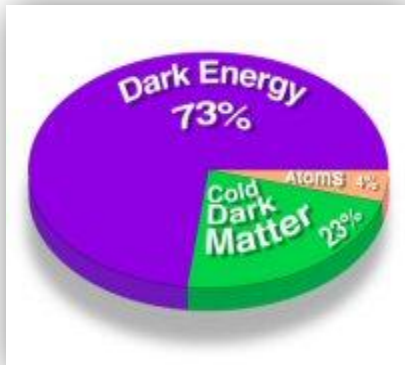
Both on ISS



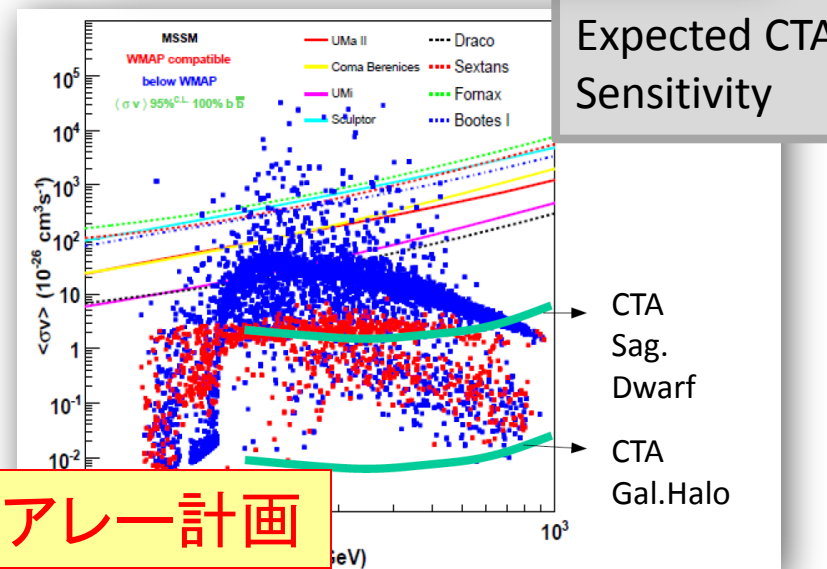
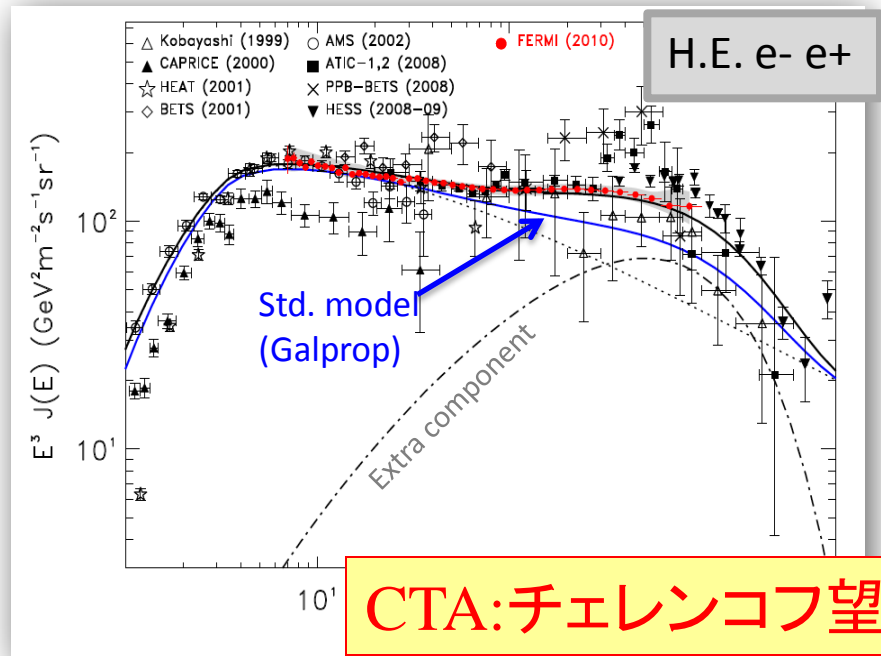
# 暗黒物質の探索 対消滅からのガンマ線を探る

(Courtesy of M. Teshima)

Expected gamma ray spectra from Sagittarius Dwarf galaxy



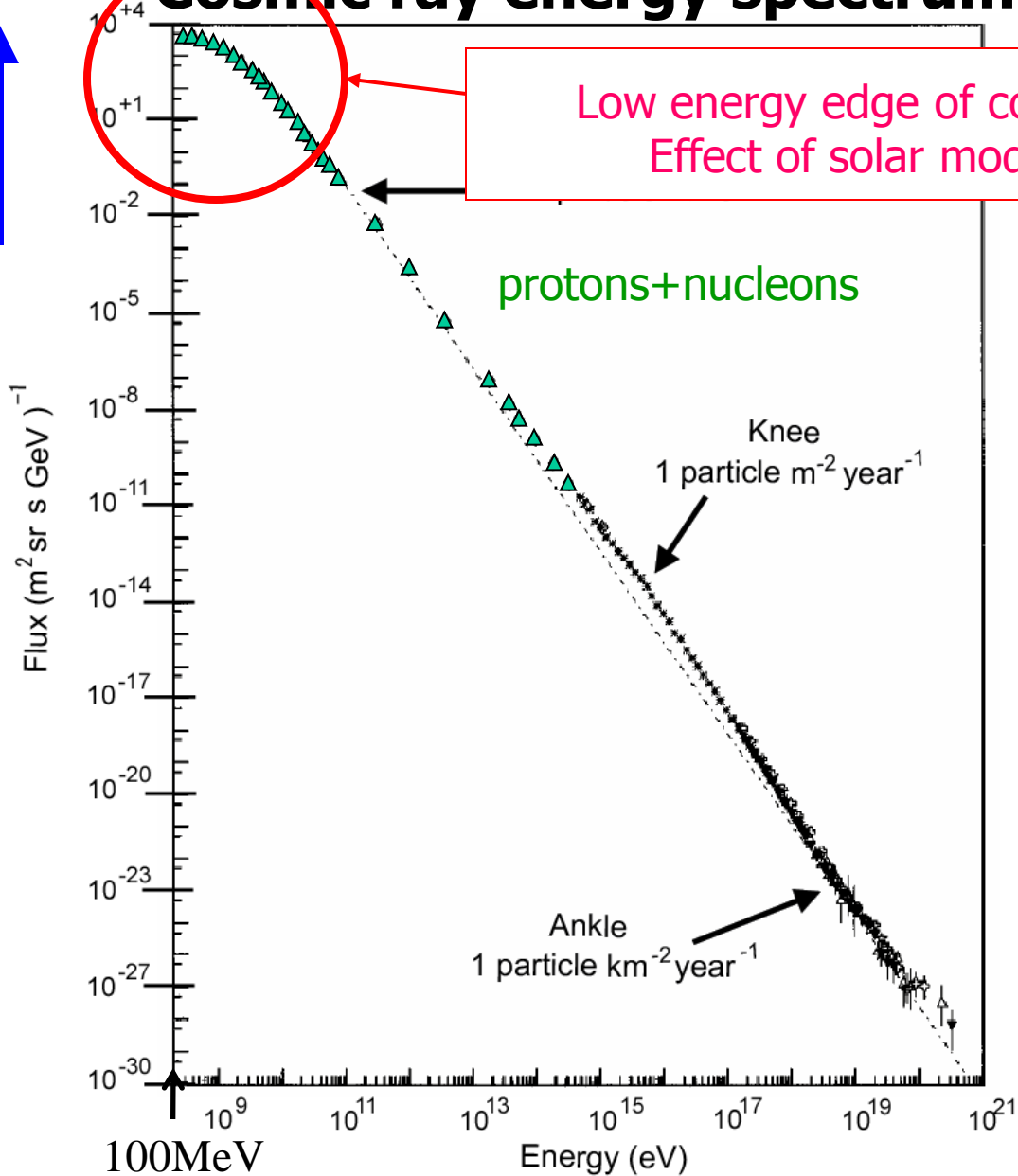
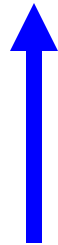
There is an extra bump in electron energy spectrum  
Nearby Pulsars/SNRs, or DM?



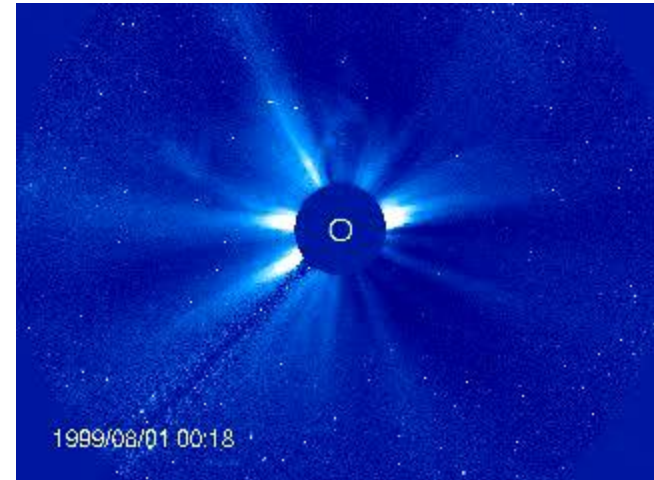
CTA: チェレンコフ望遠鏡アレー計画

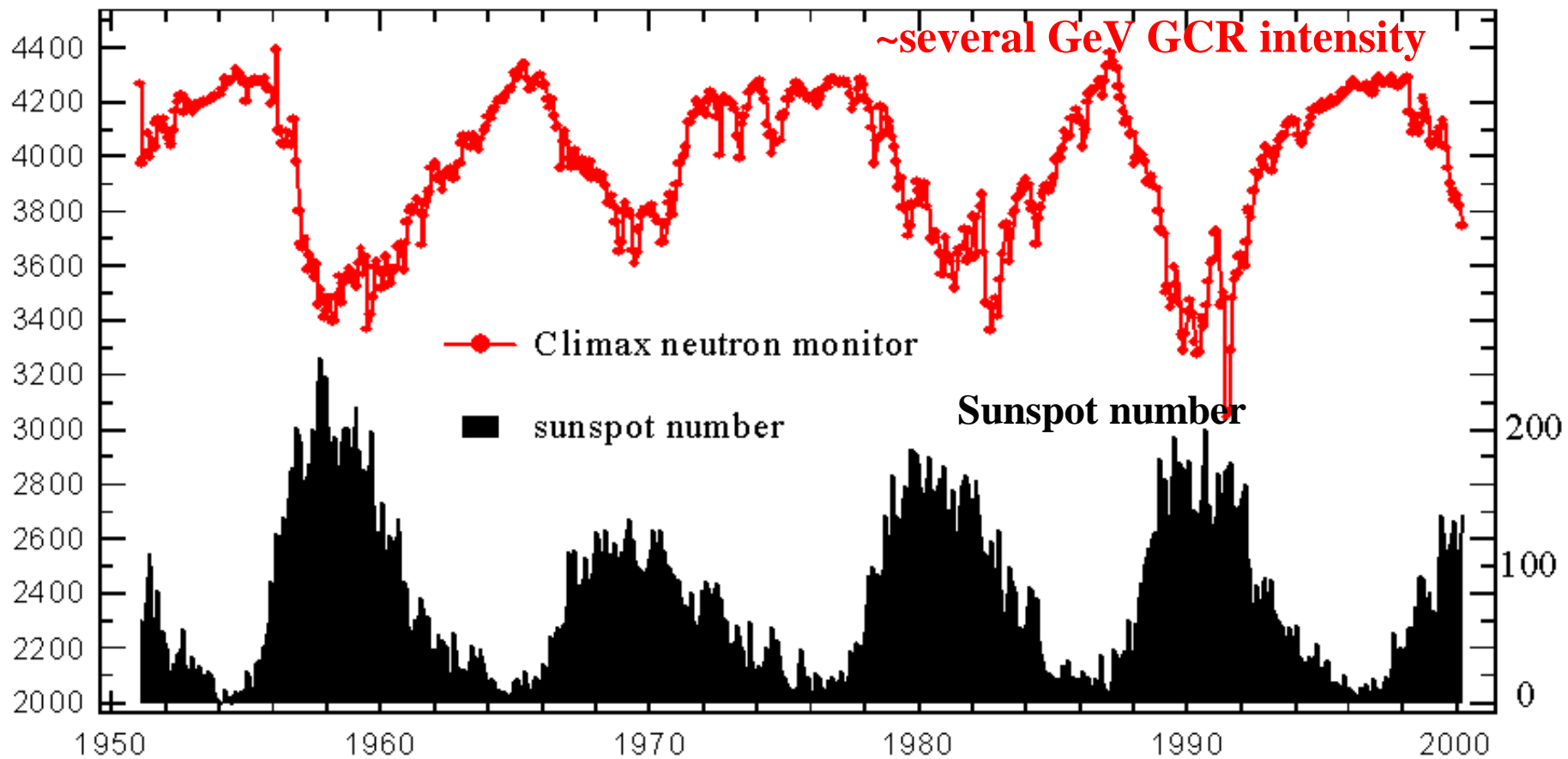
CR Flux

# Cosmic ray energy spectrum



衛星搭載コロナグラフで可視化された太陽風  
SOHO 1998.8 1ヶ月間





**Galactic cosmic rays (GCR) penetrating into the heliosphere are scattered by Alfvén waves in the solar wind.**

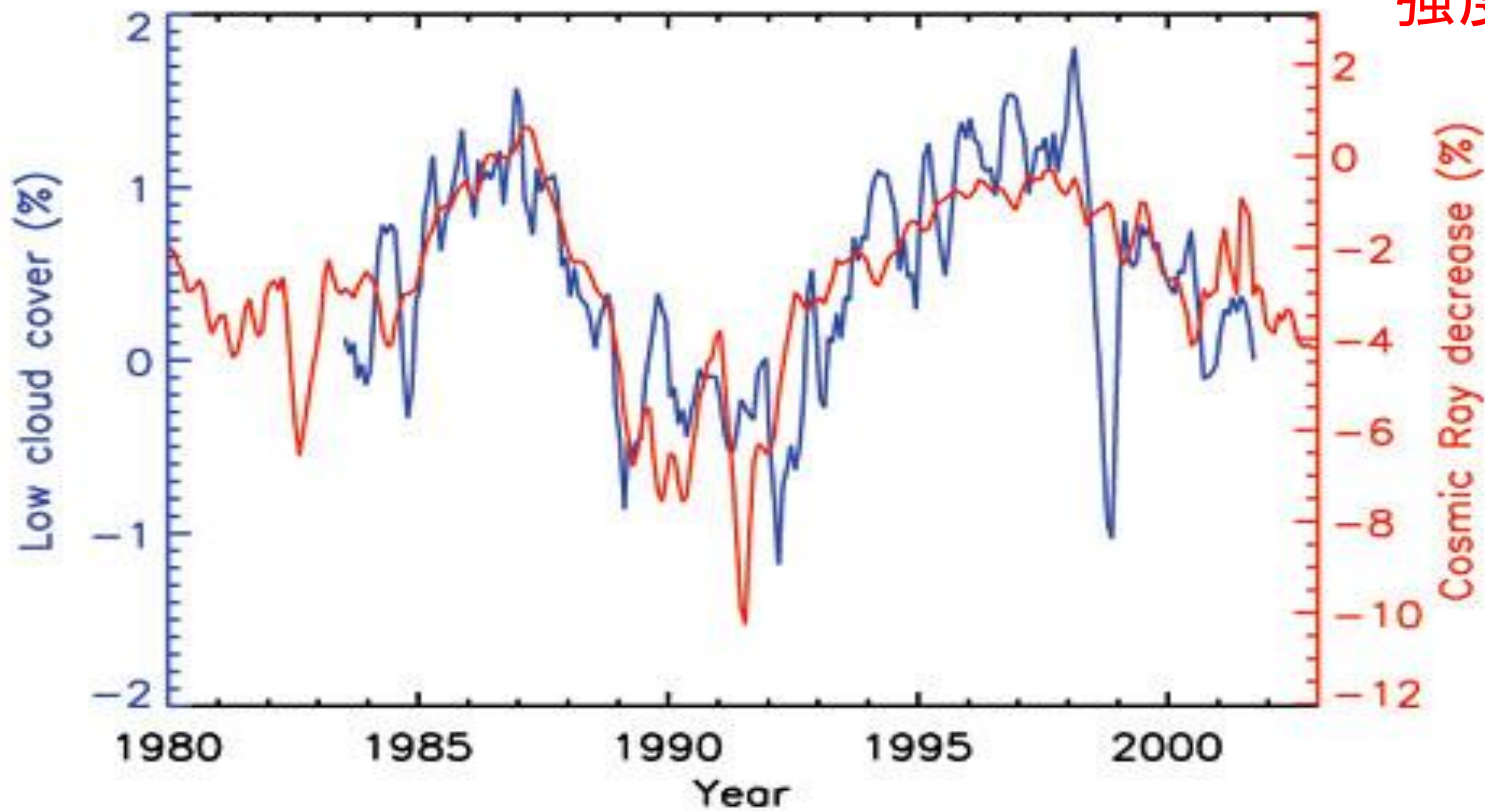
**When the solar activity raises, the Alfvén wave amplitude increases.**

Penetration of GCRs into the heliosphere becomes more difficult during the solar maximum period.

- Tropospheric variations with the 11-year solar cycle
  - Marsh and Svensmark (2003)

低層雲量

宇宙線  
強度變動

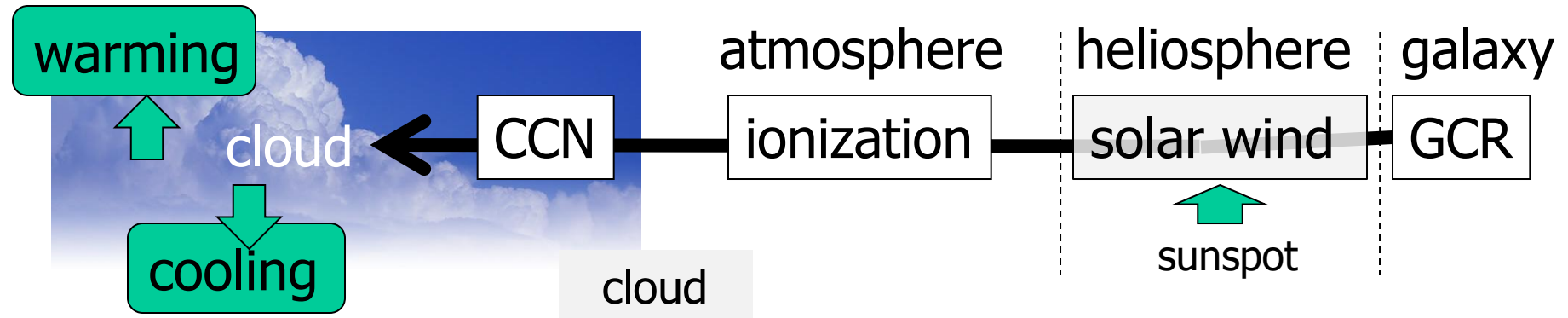


—— low altitude cloud cover (ISCCP data) corrected

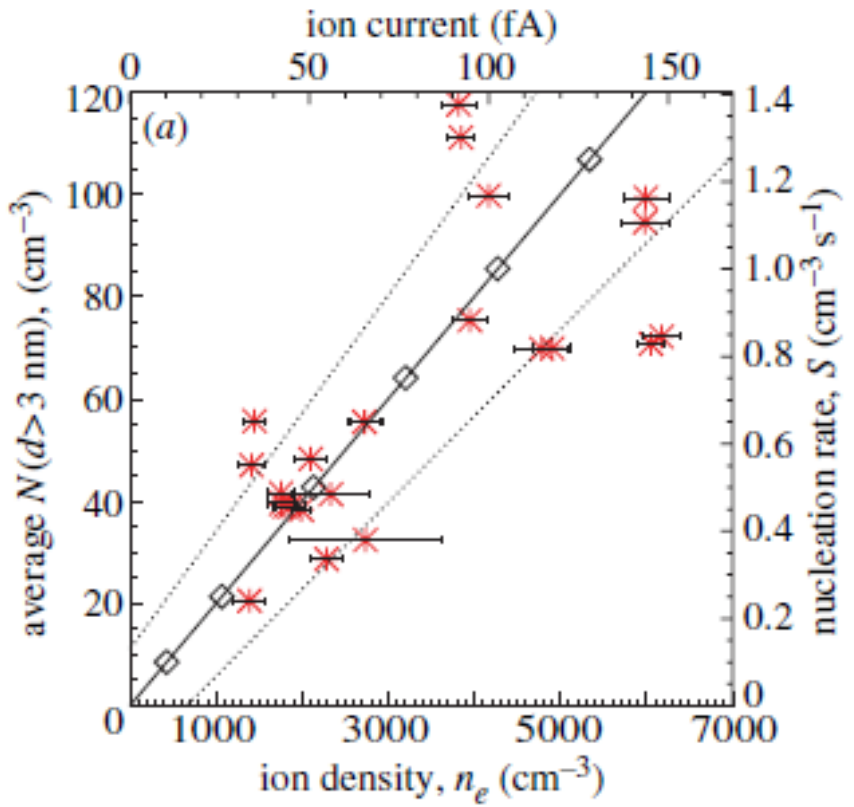
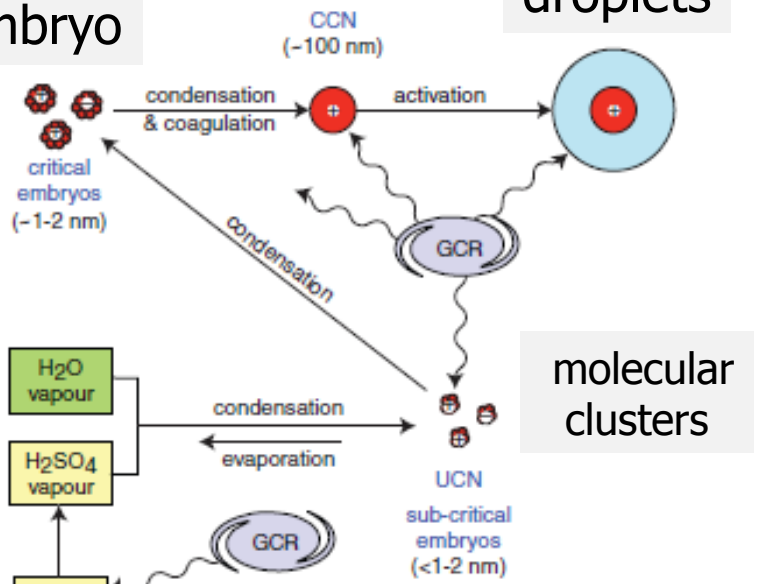
—— GCR flux (Neutron count monitors in low magnetic latitudes)

# ion-induced nucleation

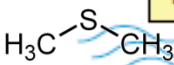
Dickinson (1975)



embryo



Svensmark et al. 2007







Search

this site  all CERN



The minuscule challenge

How an accelerator works

How a detector works

Data analysis

Accelerators

The LHC — CERN's flagship

The accelerator complex

AD

CLIC

CNGS

ISOLDE

nTOF

PS

SPS

Experiments

LHC experiments

Non-LHC experiments

ACE

ALPH

ASAC

ATRAI

CAST

# CLOUD – Cosmics Leaving Outdoor Droplets

## Cosmic rays and cloud formation

CLOUD is an experiment that uses a cloud chamber to study the possible link between galactic cosmic rays and cloud formation. Based at the Proton Synchrotron at CERN, this is the first time a high-energy physics accelerator has been used to study atmospheric and climate science; the results could greatly modify our understanding of clouds and climate.

Cosmic rays are charged particles that bombard the Earth's atmosphere from outer space. Studies suggest they may have an influence on the amount of cloud cover through the formation of new aerosols (tiny particles suspended in the air that seed cloud droplets). This is supported by satellite measurements, which show a possible correlation between cosmic-ray intensity and the amount of low cloud cover. Clouds

**日本でも名大グループが独自の実験を開始**

are underlying microphysics in controlled laboratory conditions is a key to unravelling the connection between cosmic rays and clouds.

# 2010.9宇宙線将来計画シンポジウムの取りまとめ文書より

## 宇宙線の起源・組成と加速機構に関する研究計画

CALET (CALorimetric Electron Telescope)

CTA (Cherenkov Telescope Array)

Tibet AS+MD+YAC

Telescope Array

JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module)

## ニュートリノに関する研究計画

GADZOOKS!

HyperKamiokande

KamLAND-Zen

IceCube/ARA (Askaryan Radio Array)

## ダークマターに関する研究計画

XMASS (Xenon detector for weakly interacting MASSive particle他)

NEWAGE (New generation WIMP search with an advanced gaseous tracker experiment)

## 重力波に関する研究計画

LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory)

## ガンマ線バーストなどに関する研究計画

GUNDAM (Gamma-ray burst for UNravelling Dark Ages Mission)

極域での宇宙および地球のガンマ線バースト現象の国際共同観測

SciCR (SciBar detector for Cosmic Ray)

LHCf (LHC forward experiment)

「宇宙線と雲」実験

## 宇宙線物理学は、伝統的に

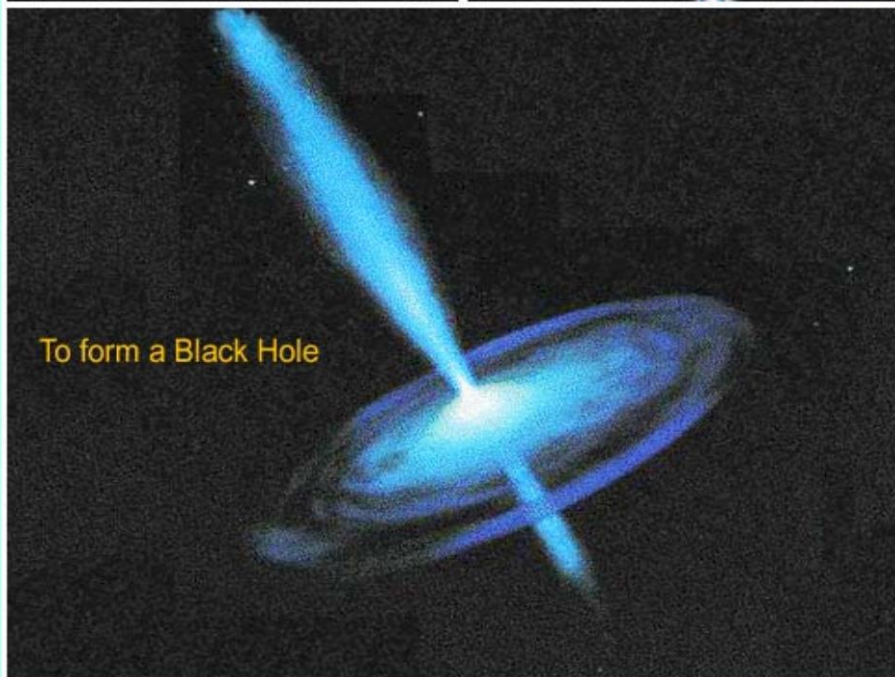
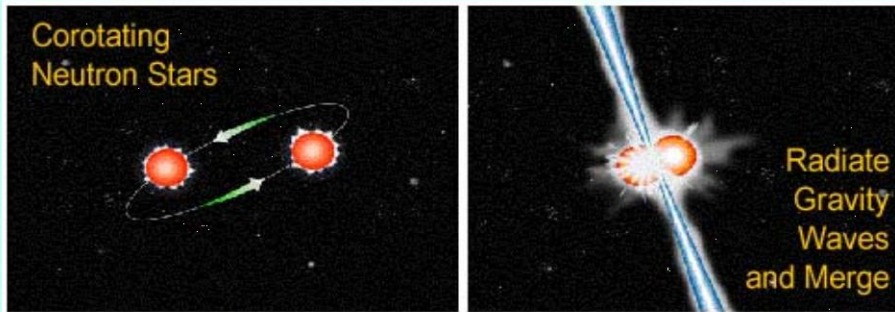
宇宙線を用いた宇宙の研究

宇宙線を用いた素粒子の研究

の二大潮流からなり、現在もそれは続いている。

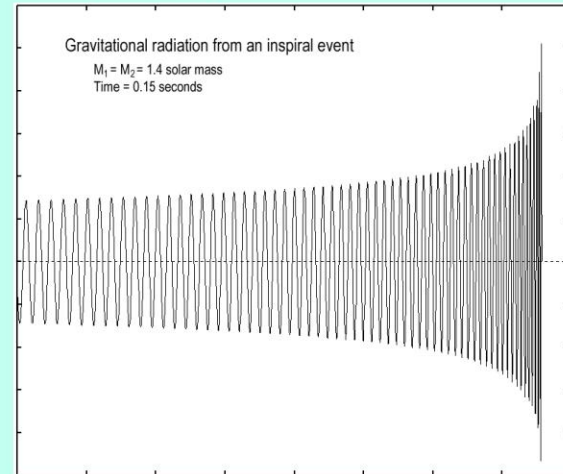
# 重力波観測 (LCGT) と普通の宇宙線研究

## 201\*年近傍の中性子星合体イベント発生(?)



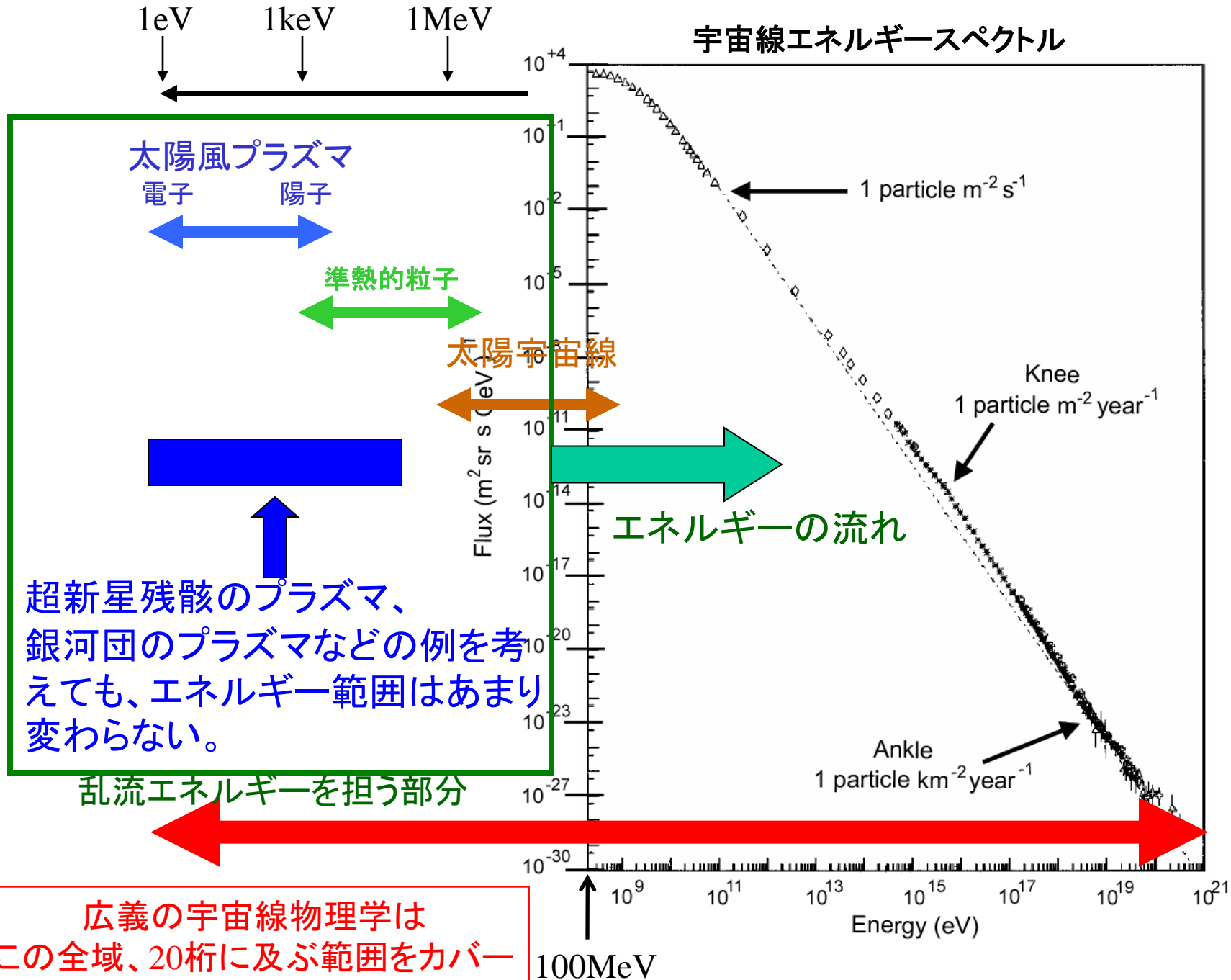
Slide courtesy of D. Frail

## 重力波発生



- 同時にガンマ線バーストが生ずると期待
- 宇宙線・ニュートリノ発生
- 重力波発生源の解明は宇宙物理学分野全体の共同作業となるだろう

# 宇宙線エネルギースペクトル



1eV      1keV      1MeV

太陽風プラズマ  
電子      陽子

準熱的粒子

太陽宇宙線

エネルギーの流れ

Knee  
 $1 \text{ particle m}^{-2} \text{ year}^{-1}$

Ankle  
 $1 \text{ particle km}^{-2} \text{ year}^{-1}$

超新星残骸のプラズマ、  
銀河団のプラズマなどの例を考  
えても、エネルギー範囲はあまり  
変わらない。

乱流エネルギーを担う部分

広義の宇宙線物理学は  
この全域、20桁に及ぶ範囲をカバー  
(すべきしたい)

100MeV

2010.9宇宙線将来計画シンポジウムの取りまとめ文書より

