# 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



# 宇宙線研究のフロンティア は何処に?



#### 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

<b>宇宙線の起源・組成と加速機構に関する研究計画</b> 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 ( <u>New generation W</u> IMP search with an <u>a</u> dvanced <u>gaseous tracker experiment</u> )
<b>重力波に関する研究計画</b> LCGT (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope) DECIGO (DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory)
<b>ガンマ線バーストなどに関する研究計画</b> 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)

○次世代超高エネルキー于由カンマ禄観側施設入規模ナエレシュノ窒退現ノレイ 手鳴政廣(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)



# 宇宙における加速現象の謎を解く:日本の寄与の現状



**WILEY-VCH** 

G. Rüdiger and R. Hollerbach

# The Magnetic Universe

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

Geophysical and Astrophysical Dynamo Theory



←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)

Copyrighted Material

#### 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

 $r_{\rm C}$ (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 $k/=2\pi/l$ により  $\omega = k//V/l$  +  $\Omega c$  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(∝ピッチ角拡散係数)



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(∝ピッチ角拡散係数)



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)



⑧ /

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)









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

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)



# 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



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

Emax: the maximum energy attainable through the acceleration process
Z: Charge number
β: plasma velocity (v/c)
B: magnetic field strength
L : system size

βB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 いともいえる。

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<sub>acc</sub> < t<sub>esc</sub> (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<sub>loss</sub>を考慮する必要あり t<sub>acc</sub> < t<sub>esc</sub> < t<sub>loss</sub> 粒子は加速後、系から脱出し宇宙線となる $t_{acc} < t_{loss} < t_{esc}$ 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 $t_{loss} < t_{acc} < t_{esc}$ 粒子はそもそも加速されない **E**大

Also see Ptitsyna & Troitsky (astroph:0808.0367)



#### 系からの脱出時間:下限と上限

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

$$\tau_{\rm Bohm} = \tau_{\rm gyro} (L/\rho_{\rm g})^2 = \frac{eB}{mc^3\gamma} L^2$$

現実の粒子の脱出時間はこれらの中間

加速領域:空間スケールL





最短脱出時間について



### Hillas' argument on the maximum attainable energy



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

Emax: the maximum energy attainable through the acceleration process Z: Charge number *β*: plasma velocity (v/c) *B*: magnetic field strength *L*: system size 10<sup>20</sup>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<sup>15</sup>eV止まり

# 宇宙線加速候補天体(その2) パルサー



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<sup>15</sup>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<sup>15</sup>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<sup>20</sup>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



・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<sup>20</sup>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<sup>18</sup>eV程度まで。鉄なら~10<sup>20</sup>eVも可能?







#### Convergence is now being achieved. ( $\sim 2010$ )

Reanalysis of previous HiRes observation  $Flux * E^{3} + E^{3} + e^{2} + e^{2}$  HiRes-I Monocular
 HiRes-II Monocular
 HiRes Stereo 10 1019.75 1018 1 10 17.5 18.5 20.5 19.5 20 log<sub>10</sub>(E) (eV) lg(E/eV) Pier Auger Observatory 18.5 19.5 20 1038 (E)=22% Flux\*E<sup>3</sup> J(E) [km<sup>-2</sup> ] Ъ. Auger combined 103 Proton,  $\beta=2.6$ , m=0 Proton,  $\beta=2.3$ , m=5  $\beta = 2.4, m = 0$ Iron. 1020 Energy [eV] Telescope Array project 10<sup>1975</sup>eV Flux\*E<sup>3</sup> **□**-2.72±0.06 **F**-4.7±1.0 ž, J(E)×E<sup>3</sup>/10<sup>24</sup> 10<sup>18.75</sup>eV PRELIMINARY 19.5 20 log\_(E/eV)

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

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

→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







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)





宇宙線の到達限界75Mpc→*Z*~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)







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

### Direct Lepton Pair Production by DM Annihilation



•  $\chi\chi \to e^+e^-: m_{\chi} = 650 \text{GeV}, \langle \sigma v \rangle = 5 \times 10^{-24} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$ •  $\chi\chi \to \mu^+\mu^-: m_{\chi} = 900 \text{GeV}, \langle \sigma v \rangle = 15 \times 10^{-24} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$  **'Top-down scenario': example (2)** 

### Decaying DM (Hidden Gauge Boson) with Lifetime of O(10<sup>26</sup>) Seconds

Chen, Nojiri, Takahashi, Yanagida arXiv:0811.3357

Large boost factor is not necessary !!

**Positron Faction** 

Electron + Positron Spectrum



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



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	$5.64 \times 10^{5}$	$4.5  imes 10^{34}$	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)



# **'Bottom-up scenarios'**

#### pulsar models (magnetosphere PWN)

Shen 70; Aharonian+ 95; Atoyan et al. 95; Chi+ 96; Zhang & Cheng 01; Grimani 07; Yuksel+ 08; Buesching+ 08; Hooper+ 08; Profumo 08; Malyshev +09; Grasso+ 09; NK, Ioka & Nojiri 10, ...

#### • supernova remnants

Shen & Berkey 68; Pohl & Esposito 98; Kobayashi+ 04; Shaviv+ 09; Hu+ 09; Fujita, Kohri, Yamazaki & Ioka 09; Blasi 09; Blasi & Serpico 09; Mertsch&Sarkar 09; Biermann+ 09; Ahlers, Mertsch & Sarkar 09, …

- micro-quasors (galactic black holes) Heinz & Sunyaev 02, ...
- local gamma ray bursts loka 08,...
- propagation effects

Delahaye+ 08; Cowsik & Burch 09; Stawarz+09; Schlickeiser & Ruppel 09, ...

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



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



### 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







more difficult during the solar maximum period.

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



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

# ion-induced nucleation Dickinson (1975)



#### http://public.web.cern.ch/public/en/research/CLOUD-en.html



European Organization for Nuclear Research

About us Science Research The LHC People



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 ATRA: CAST <u>.....</u>

#### 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.

Home | Sitemap | Contact us

💿 this site 🔘 all CERN

Search

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 🖉

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 (<u>Ne</u>w generation <u>W</u>IMP search with an <u>a</u>dvanced gaseous tracker <u>e</u>xperiment)

#### 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)



#### Bilde courtery of D. Frail



- →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



#### 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

