

CALETによる宇宙線の起源、加速、伝播機構の解明と暗黒物質の探索

○吉田健二、上岡英史（芝浦工大）、赤池陽水、笠原克昌、鳥居祥二、小澤俊介、清水雄輝（早大理工研）、田村忠久（神奈川大）、片寄祐作（横国大）、森正樹（立命館大）、寺澤敏夫（東大宇宙線研）、市村雅一（弘前大）、他 CALET チーム

概要

CALETによる高エネルギー宇宙線電子観測、陽子・ヘリウムやB/C比観測を始めとする陽子・原子核観測、および拡散ガンマ線、ガンマ線点源の観測により、宇宙線発見以来の謎である宇宙線の起源、加速、伝播機構の解明、現代物理学の最大の謎の一つである暗黒物質の正体の解明を目指している。本ポスターでは、その期待される成果について発表する。

宇宙線電子の観測

高エネルギー宇宙線電子の源として最も有力な候補は、超新星残骸中での衝撃波による電子加速である。超新星残骸で加速された宇宙線は、銀河系内を伝播して地球に到達するが、宇宙線拡散モデルによって計算された宇宙線電子スペクトルを観測データと共に図1に示す[1]。図1に示されているように、TeV領域の電子では近傍（<1 kpc）の若い（< 10⁵ yr）超新星残骸（例えばVela）によりスペクトル構造が生じることが示唆されている。このような近傍の超新星残骸は、電子到来方向に非等方性（約10%）も引き起こすことから、TeV領域の電子スペクトル構造と非等方性の観測から、宇宙線電子加速源の同定を行うことが可能である。

しかしながら、これまでのTeV領域の電子観測では、地上チェレンコフ望遠鏡H.E.S.S.により宇宙線電子エネルギースペクトルが報告されているが[2]、系統誤差が極めて大きく、十分な精度で電子エネルギースペクトルを求めることができない。また、Fermi-LATの電子観測ではカリメータの約10¹⁰ eVという薄さから、TeV領域での観測は困難であり[3]、ECC（エマルジョンチェンバー）等による気球実験では統計的な精度が不足している。CALETはこのTeV領域の電子観測を十分な精度で行うことができる現状で唯一の観測装置である[4]。

CALETによる観測では、図1に示すように近傍のSNRによるスペクトル構造の検出が可能である。表1にはCALETによる5年間の観測で期待される電子観測量を示す。

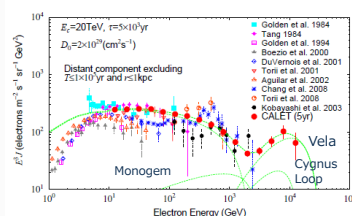


図1：超新星残骸起源の理論的な電子エネルギースペクトル、これまでの電子+陽電子観測データ、およびCALETにより期待される電子+陽電子エネルギースペクトル（5yr）。

表1：期待される電子観測量(5yr)

Energy	>10GeV	>100GeV	>1TeV
No. of electrons	~2.5x10 ⁷	~2.0x10 ⁵	~1.0x10 ³

また、CALETによる電子到来方向の観測では、図2、3に示すように電子の非等方性 Δ の検出が可能である。

$$\Delta \equiv \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{\sum_i I_i(r_i/r_1) \cdot n_{\max} \delta_i}{\sum_i I_i}, \quad (\delta_i = \frac{3r_i}{2ct_i})$$

（電子の最大強度： $I_{\max}$ 、電子の最小強度： $I_{\min}$ 、個々の宇宙線加速源までの距離： r_i 、個々の宇宙線加速源の年齢： t_i ）

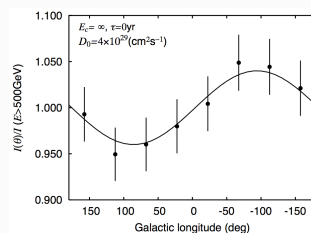


図2：CALETによる5年間の観測で期待される、銀径に対する電子強度分布（>500GeV）。

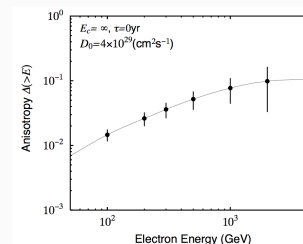


図3：非等方性のエネルギー依存性とCALETによる5年間の観測で期待される精度。

一方、最近のPAMELA衛星による電子・陽電子比の観測から、従来の超新星残骸起源と標準的な宇宙線伝播モデルからは説明できない陽電子過剰が見つかっている[5]。PAMELAの観測結果を説明するには、大きく分けて二つの可能性がある。一つは宇宙線伝播の銀河系内拡散モデルの変更、もう一つは新たな電子・陽電子の源の存在である。

新たな電子・陽電子の源が存在すれば、宇宙線電子+陽電子スペクトルにも過剰成分が見られるはずである。ATIC やFermi-LAT の電子（+陽電子）エネルギースペクトルを「超新星残骸起源」+「暗黒物質」もしくは「近傍パルサー」で説明できるという報告が多数なされているが[4, 6]、ATIC とFermi-LAT の結果は必ずしも一致しておらず、より正確な観測が必要になっている（図4）。

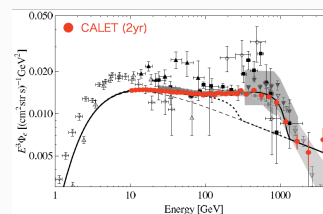


図4：質量2.5TeVの暗黒物質が、2.1x10²⁶sの崩壊時間で、D.M.->l+nu という崩壊チャンネルにより、e⁻+e⁺ を生成する場合に期待されるCALET電子+陽電子スペクトル [10]。

暗黒物質起源以外に、パルサー等の近傍の天体で発生した電子・陽電子が電子スペクトルに同様の過剰成分を残す可能性があることが指摘されている[e.g. 11-15]。図5はGRB/パルサーから電子過剰成分が放出されているとするモデルのスペクトルであり、CALETによる観測により、暗黒物質起源のスペクトル(図4)と識別可能であることが分かる。

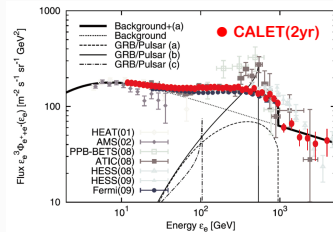


図5: GRB/パルサー・モデルによる電子+陽電子スペクトル [14] と CALETで期待される電子+陽電子スペクトル

また、過剰成分が少ない場合にも、CALETでは図6のように過剰成分を検出することが可能である。

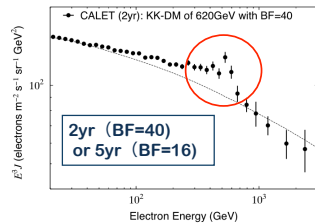


図6: 質量620GeVのKaluza-Klein暗黒物質の対消滅で発生する電子+陽電子をCALETで観測した場合のシミュレーション結果。

宇宙ガンマ線の観測

CALETは10GeV以上のガンマ線観測により全天スカイサーベイを行うことができる。図7には、CALETによるガンマ線全天マップのシミュレーション結果を示す。また、図4に示されているような電子・陽電子が暗黒物質によって生成されるなら、宇宙背景放射との逆コンプトン散乱によって銀河系外拡散ガンマ線にその徴候が現れるはずである。図8に、図4と同じ崩壊パラメータで暗黒物質が崩壊した場合に期待される銀河系外ガンマ線背景放射のスペクトルを示す。CALETは、TeV領域拡散ガンマ線の観測を電子観測と同時にを行うことにより、電子・陽電子の源の可能性について強い制限を加えることができる。

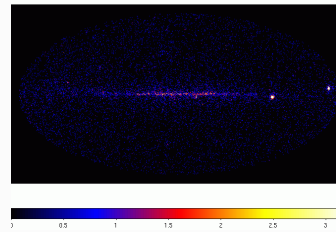


図7: シミュレーションによるCALETのガンマ線全天マップ(>10GeV, 3yr)。

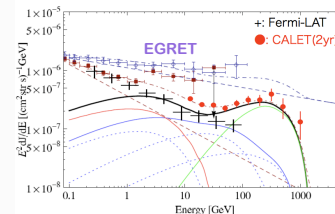


図8: 図4と同じ崩壊パラメータで暗黒物質が崩壊した場合に期待される銀河系外ガンマ線背景放射のスペクトル[10]。

また、CALETは数10GeVから数TeVの領域で2%という優れたエネルギー分解能を有しており、図9に示すように暗黒物質起源のラインガンマ線を検出できる可能性がある。

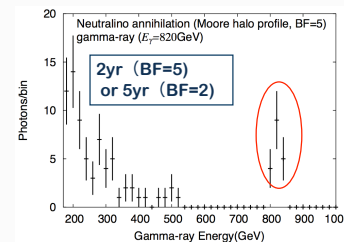


図9: CALETによる銀河系中心方向の観測で、820GeVのニュートラリーノの対消滅により期待されるガンマ線スペクトル。

宇宙線陽子・原子核成分の観測

これまでの宇宙線原子核の観測から、陽子とは異なりHeや重原子核成分のスペクトルは200GeV付近で折れ曲がりハードなスペクトルを示すという結果と、陽子と同様に折れ曲がりが存在しないという結果が報告されている[15,16]。陽子とHeとのスペクトルの違いは、宇宙線源や加速場所の違いから生じている可能性が指摘されており、CALETによる精度の高い観測が必要になる(図10)。

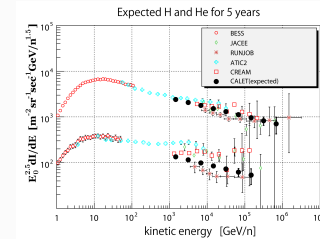


図10: 宇宙線陽子、ヘリウムスペクトル。これまでの観測結果とCALETによる期待値(黒丸)を示す。

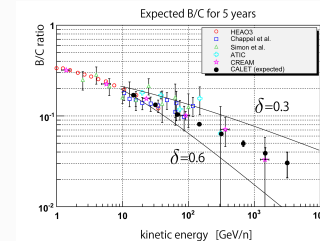


図11: 宇宙線B/C比スペクトルのこれまでの観測結果とCALETによる期待値(黒丸)、拡散係数 $\delta=0.3, 0.6$ の場合の理論曲線。

また、B/C比スペクトルの観測からエネルギー毎の通過物質質量を決定でき、宇宙線伝播の銀河系内拡散モデルにおける拡散係数のエネルギー依存性、もしくは伝播モデルの変更の必要性について調べることが出来る。現在、数100GeV程度までしか十分な観測データがないが、CALETによるB/C比の観測を数TeV領域まで行うことにより、拡散係数のエネルギー依存性を数TeV領域まで決定することが出来る(図11)。

参考文献

- 1) T.Kobayashi et al. Ap. J. 601, 340-351, 2004
- 2) F. Aharonian et al., *Astron. Astrophys.* 508, 561-564, 2009
- 3) Fermi LAT team, *Phys. Rev. Lett.* 102, 181101, 2009
- 4) S.Torii, 本宇宙科学シンポジウム, 2011
- 5) O.Adriani et al. *Nature* 458, 607, 2009
- 6) J.Chang et al. *Nature* 456, 362, 2008
- 7) S.Torii et al. arXiv:0809.0760 [astro-ph]
- 8) C.R.Chen et al. arXiv:0811.3357v3 [astro-ph]
- 9) A.Ibarra et al. *JCAP*, 01, 009, 2010
- 10) J.Hisano et al. *Phys.Rev.D* 79, 043516, 2009
- 11) D.Hooper et al. arXiv:0810.1527v1 [astro-ph]
- 12) J.Zhang et al. arXiv:0812.0522v2 [astro-ph]
- 13) K.Ioka, *Prog. Theo. Phys.* 123, 743, 2010
- 14) N.Kawanaka, K.Ioka, M.Nojiri, *Ap. J.* 710, 958, 2010
- 15) H.S.Ahn et al. *Astrophys. J.* 714, L89-L91, 2010
- 16) RUNJOB Collaboration, *Astrophys. J.* 628, L41-44, 2005