

ガンマ線バーストはどこから？

村上 敏 夫

〈宇宙科学研究所 〒229 神奈川県相模原市由野台 3-1〉
e-mail: murakami@astro.isas.ac.jp

吉田 篤 正

〈理化学研究所 〒351 埼玉県和光市広沢 2-1〉
e-mail: ayoshida@postman.riken.go.jp

ガンマ線バーストの起源がいまだにわからない。2年に一度の、第3回コンプトン・ガンマ線観測衛星(CGRO)シンポジウムでも激論が交わされたが結論は得られない。ワシントンの自然史博物館では、75年前のアンドロメダ星雲の起源をめぐる大公開討論を模して、ガンマ線バーストでの大公開討論が行われた。天文学に興味を持っている人のフラストレーションは溜る一方である。最近の状況と我々の活動を紹介しよう。

1. 天文学者たちの「いらだち」？

コンプトン・ガンマ線観測天文台(CGRO)が打ち上げられて以来、世界のガンマ線バースト研究者が一堂に集まる研究会があります。2年に一度開かれるこの会議は、昨年は10月25日から27日にかけて、アラバマ州ハンツビルのマーシャル宇宙飛行センターに近いホテルで開催されました。この地はドイツから運んできたV2ロケットを、第2次大戦後初めてテスト飛行させた場所だそうです。映画「アラバマ物語」に描かれたアメリカ深南部に忽然と出現した研究都市。フォン・ブラウンのアメリカでの研究拠点となったところで、今でもドイツ系移民が多いと聞きました。ちなみに、北に州境を超たテネシー州南端には有名なジャック・ダニエルの醸造所があり、ナッシュビルはカントリーミュージックの聖地です。

CGROの打ち上げから5年、この会議も今回で3回目となりますが、ガンマ線バースト研究のもう一つの柱であった旧ソ連の研究者の出席が減ってきています。それでも参加者はアメリカ人を中心に全部で200人を越える大研究会でした。

天文月報の編集者から、この研究会での最新情報を紹介してほしいと依頼されました。しかし同時に彼は、『いったい全体ガンマ線バーストは本当にどこから来るの?』と言い残してゆきました。彼の言葉にこめられたニュアンスは微妙です。『どこか変だぞ』『いったい全体どうなってるの?』といった、ある種の疑いの響きがあるのでしょうか。たしかに「ガンマ線バースト」という言葉を聞くと、何かしっくりしないものを感じる人が多いのではないのでしょうか? 何か違和感があり、何かいら立ちに近い気持ちがわいてくる…。その起源がいつまでもわからない。わからないのにも程度があって、我々の太陽系に近い話なのか、銀河系のハローに関わる話なのか、我がローカルグループ銀河の話か、はたまた宇宙の果てに起源する話なのかすら解っていません。しかも、「ガンマ線バースト」と一言でくくられていた現象が、いつのまにか2種類に分類されて(硬いスペクトルの古典的なバーストと、柔らかくてバーストを繰り返すリピーター)理解を複雑にしています。信用するに足る事実は何なのでしょう? そして『ガンマ線バーストは一体どこからくるのでしょ

うか?」

答えはしかし、「やっぱり、わからない」というものです。

1920年にアンドロメダ大星雲が我々の銀河の中の星雲か、外の島宇宙かを巡って、シャープレーとカーチスの公開大討論会が行われたことがあります。ガンマ線バーストの起源を巡って、これに擬した公開討論会が今年の4月に75年前と同じワシントンDCの自然史博物館で行われました。論者は日本にもしばしば訪問しているプリンストン大学のボーダン・パチンスキー博士とシカゴ大学のドン・ラム博士です¹⁾。この会がこの問題に対する世間の態度を象徴的に表しているといつてよいのではないのでしょうか。

2. ガンマ線バーストとは何?

ガンマ線バーストは電磁波に限ると(もちろん太陽を除いて)もっとも明るく、もっともエネルギーの高い天体現象です。18ギガ電子ボルト(18 GeV)にも及ぶ高エネルギー光子が観測され、明るさでは最大強度が 10^{-8} から 10^{-2} erg/cm²/secにも達するものがあります。明るいことで知られるX線星よりも1000倍も明るく、0等級の星のフラックスよりもやはり1000倍は明るいわけです。もし人間の眼がガンマ線に感度があれば、その瞬間、明るく輝く天体を見ることができるとは思いますが、バーストの継続時間は1/10秒から数10秒と短く、あらかじめ空のどこで発生するかを予言することはできません。そのため、バースト検出器は視野が広く設計されており、ガンマ線では十分な精度で位置を決定できないでいます。結果として、年間では約800回も起きる「ありふれた」現象であるにもかかわらず、視野の狭い光やX線の望遠鏡での観測に必要な位置精度にまで追い込めないのが現状です。

それでもたまたま精度良く決まったバースト源についてのいままでの観測から、次のようなことがいえます。バーストの瞬間にはガンマ線光子は

出ても、10等級以上の光は出ていません。少し遅れてかけつけて見ても23等より明るい天体は何も見つかってはいません。ガンマ線バーストは未知のままなのです。

それほどに解らないガンマ線バーストの起源ですが、軟ガンマ線バースト・リピーター(SGR)と呼ばれる一種が、超新星の残骸の方向からやってくると、私たちは2年前のネイチャー²⁾と月報のASTRO-NEWSに書きました(1994年4月号)。3例知られているSGRの1例の発生方向が超新星残骸に一致したからです。そのことから、SGRは我々の近くの中性子星が起源であると結論されました。ガンマ線バースト学における歴史に残る一歩でした。

しかし、これは解明どころか混乱の材料ともなっています。SGRを別の種族と考えてしまえば、それは単純で良いのですが、そう簡単に割り切れない理由もあるからです。SGRは膨大なエネルギーのガンマ線・X線を放出し、速い時間変動を示します。これはSGR以外のガンマ線バーストにも共通する特徴です。加えて、SGRから古典的なバーストが出ていたとする報告すらあり、安易に別種の現象であると片付けてしまうのは危険です。しかし、ここではこれ以上SGRのバーストには触れないことにします。詳しくは古い天文月報を参考にして下さい。

3. 古典的な(classical)ガンマ線バースト

ここからは古典的なガンマ線バーストのことを単にガンマ線バーストと呼びます。ガンマ線バーストのフラックスの時間変化を見た太陽の研究者は、それが太陽フレアのものか、ガンマ線バーストのものかを区別出来ないと言います。低いエネルギーほど単純で継続時間が長く、高いエネルギーほど複雑な構造を示します。またガンマ線バーストの強さ:Sと頻度:Nとの関係を見ると $N \propto S^{-3/2}$ になることも共通しています。また、太陽

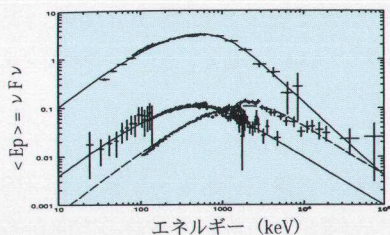


図1 ガンマ線バーストのスペクトルを νF_ν という単位で表したものを、ガンマ線バーストの硬さを理解できる。他の天体現象のスペクトルと比べて見られると良い、いかに異常に硬いエネルギースペクトルかを理解できるだろう。

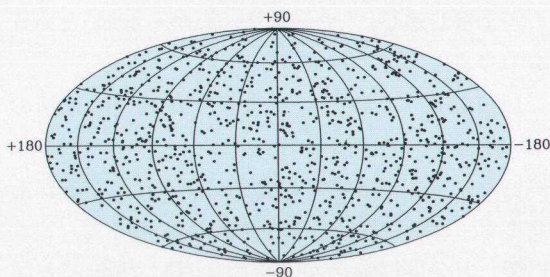


図2 CGRO 衛星が発表した1122個のガンマ線バーストの銀河座標分布、誤差は正しく付けられていない。全てが同じ大きさの黒点表現で、2B カタログを持っている人は比較されたい。銀河中心や銀河面への集中は見られない。

フレアからも GeV 光子が出ていることが知られています。

では太陽フレアとそっくりかと言うと、決定的な違いがそのスペクトルにあります。ガンマ線バーストの代表的なスペクトルを図1に示しました。ここでは縦軸に νF_ν を描いています。これはエネルギー領域（横軸）内で放射されるエネルギー量を表します。注目されるのはそのピークが数100 keV という高い領域にあり、つまり太陽フレアのように光や紫外線や軟X線を放出していないということです。これがこの現象をわざわざ『 γ 線』バーストと呼ぶ決定的な理由です。

CGRO 衛星によるガンマ線バーストの到来方向分布を図2に示します。これは今回の会議で公にされたもので、1122個のガンマ線バーストの発生方向を銀河座標系にプロットしたものです。銀河面にも、銀河中心にも、そしてアンドロメダ星雲 (M 31) の方向(121,-22)にも集中が見られません。でたらめに乱数を引いて書いた図とほとんど区別が付きません。つまり、統計的に等方的な分布を示しているということです。これが、1992年の衝撃的な発表以来、数を増したCGRO衛星の1995年での最新結果です。

ところで、この図を見ると、いかにもガンマ線バーストの発生源（黒点）は重なっていない。つまり繰り返していないように見えます。しかし、

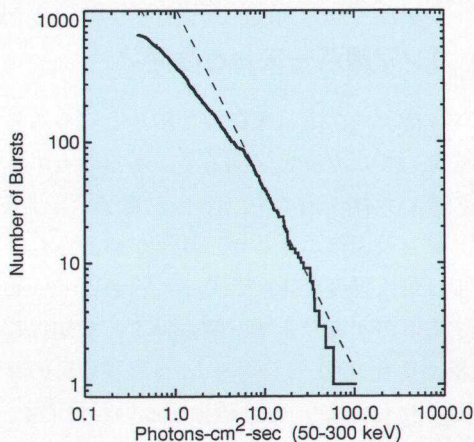


図3 いわゆる $\log N$ - $\log S$ カーブ。遠方のガンマ線バーストの発生頻度が少ないと解釈が出来る。

これは誤差を無視して図が描かれているからで、実際には方向の決定誤差として数度から10度程度があり、一部のガンマ線バースト(20%程度)が繰り返して起こっていたとしてもデータと矛盾はありません。

もう一つ重要な結果は、ガンマ線バーストの強さと頻度を調べた図3で、無限ユークリッド空間に一樣な密度で分布した時に期待される $S^{-3/2}$ の分布に比べて、なぜか弱いガンマ線バーストの数が少ないということです。

また図4のように全てのガンマ線バーストの継

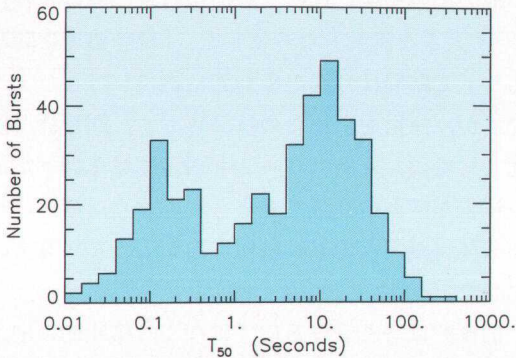


図4 ガンマ線バーストの継続時間の分布。ここでは継続時間として、全バースト光子の50%をカバーできる時間として定義(90%の図も公開されている)。これをもとに、古典的なガンマ線バーストも二つに分類しないとイケないと主張される。

継続時間を分類すると、2つのグループに分かれてしまうということも報告されています。0.4秒と約20秒に2つのピークが現れるのです(えー!、バーストを更に2分類するの? 悲鳴が聞こえてきそうです)。

疑問の余地が無い基本的な観測事実はここまででしょう。これらをどのように解釈するかが大きな問題となります。

4. 議論の分かれ目

上の結果はガンマ線バーストを遠い宇宙の果てで起きていると考えると都合が良いと考えられます。今回の集会では前回の集会に比べても、より多くの方が宇宙の果てに起源を持つてくる解釈に賛成のようでした(1993年は1/3が宇宙、1/3がハローで残り1/3は解らない)。しかし、いまだに太陽系に起源を求める理論も提案されています(それが有力な理論屋さんですからややこしい)。我が銀河の構造に関係しない等方的な分布は宇宙の果てに起源を求める強い証拠です。そして、遠方で数が減るのは宇宙の進化を考えれば極めて当たり前のように思われます。このアイデアから二つの重要な要求が出てきます。一つ目は、より遠

方の(すなわち暗い)ガンマ線バーストでは、相対論的効果によって時間軸が延びる(time dilation)だろうというものです。これが観測データに本当に存在するかどうかをめぐって、既に前回の会議以来論争が続いています。アメリカ天文学会誌やアメリカ物理学会誌(日本ではパリティ)に、そのような傾向があるという解説記事が出ました³⁾。ただ、同じデータを別のグループが解析するとtime dilationはない、という反対の結果が得るなど、解析方法をめぐってこの論争はまだ継続中で、今回の会議でも結論はでませんでした。

もう一つは、遠い(暗い)バーストでは、赤方偏移の結果スペクトルが柔らかくなるというものです。今回の基調講演でもCGRO衛星の責任者は図5を見せて、この傾向があると指摘しました。この結果は複数の解析者(グループ)によって確認されており、会議でも反対の声はあがりませんでした。ただ、この結果をどう解釈するかは、議論の分かれるところでは。時間軸とスペクトル軸の両者の効果が矛盾なく存在するかどうかについては大いに疑問です。もし、ガンマ線バーストが遠方宇宙で発生している現象であるとする、 $z \sim 1$ 程度の距離を考えることとなります。

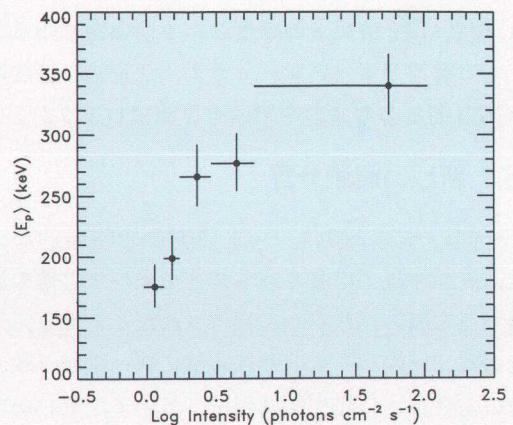


図5 ガンマ線バーストの強さと図1で示した硬さを統計的に処理したもの、強い(近い)ものはエネルギースペクトルが硬いと主張されるが、図1ではそうはなっていない。統計処理と例外の難しい問題を含んでいる。

と、バースト源の方向にバーストサイトとなる銀河・AGNがあることが期待されます。ところが今までのところ、このような銀河やAGNとの関連性はみつかっていません。これは‘no host-galaxy problem’として指摘されている重大な問題で、ガンマ線バーストの遠方宇宙起源説を無批判に受け入れられない大きな理由となっています。

一方で、ガンマ線バーストが銀河内の現象であるとする説にも大きな困難があることがわかります。1122個にも達しながら、全く等方的なこの分布を説明しようとする、太陽系が我々の銀河の端に位置していることから、実に100 kpc以上もある「広がった銀河ハロー」(または「銀河コロナ」)があって、そこでバーストが発生していると考えなくてはならなくなります。かたや670 kpcの距離にはアンドロメダ星雲が控えていて、当然アンドロメダにも同様の「銀河コロナ」があるでしょうから、そこで発生しているバーストをCGROが見てしまうことになります。しかし見ていないことから、大きさの上限は約300 kpcということになります。CGROの観測データは、いまのところこの巨大な「銀河コロナ」モデルと矛盾するものではありません。もしこの説が正しいとしても、アンドロメダからのバーストを有意に見るためには、現在の10倍以上の感度のある検出器を作らなくては駄目です。いずれにせよ、決定的な結論はCGRO衛星の寿命の中では不可能でしょう。

5. 新しい観測分野

今回のガンマ線バースト研究会で特徴的なのは、ガンマ線ではなくバーストを光やその他の波長で見る試みがたくさん報告されたことです。一部のガンマ線バーストでは非常に狭い領域(数分角の大きさ)に発生領域が決っていて、それが電波や光望遠鏡での観測対象となっています。会議の中で質問の集中砲火を浴びた報告がありました。矢面に立たされたのは小さな誤差領域を6個、23等級まで観測したグループで、誤差領域の近辺

が他の参照領域に比べて銀河が有意に多いと報告し⁴⁾、大きな議論となりました。「統計処理に問題あり」で結局は会議の参加者は納得(?)したようですが、注目を引いたのは事実です。同じ様な研究としては、26例のバースト誤差領域を調べた別の報告が前回の会議で発表されており、結果は対応天体(銀河・AGN)は何もなかったというものでした(no-host-galaxy problem)⁵⁾。

消極的に待ち受けるのではなく、積極的に地上からガンマ線バーストをその瞬間に見てやろうとする様々な実験(計画)が出てきたのも特徴です。代表的なものはCGRO衛星の位置情報から、瞬時(数秒以内)に望遠鏡をその方向に向けて観測するシステムで、アメリカのローレンス・リバモア研究所を中心に開発・運用されているものです。もとはといえばSDI用に開発されたシステムを転用したものだそうです。いまのところ限界等級は7-8等ですが、近々15等まで見える新システムが稼働するとのこと。

また空気シャワーを使って、100 GeV-TeVのガンマ線バーストを捉える研究も始まっています。ネイチャー1994年12月号に出た衝撃的な記事があり⁶⁾、超高エネルギーガンマ線の研究者たちを奮いおこしました。ガンマ線バーストで18 GeVのガンマ線光子までが出る、そしてそれが5000秒も継続しているらしいというものです。この継続時間は発生を知ってから駆けつけても十分な時間で、世界中の空気チェレンコフ望遠鏡で観測が始まっています。もう誰が一番乗りかを競う勢いです。日本でも宇宙線研究所を中心としたグループが、実験を開始しています。明野(山梨県)では、今までには発生後25分で観測器を立ち上げたと聞いています。数秒以内で望遠鏡を向けることができるようになるかもしれません。

光では理研が中心となって、TOMBO計画(TOMBO: Transient Observatory for Microlensing and Bursting Objects)が進行しています。そのユニークなグループ名もさること、ほ

ぼ1ステラジアン以上の空を20等級以上の深さまで、速い時間分解能で観測するもので期待されています。

6. 日本の活躍

さて、この研究会で我々はどうのような貢献をしたのでしょうか？ GRB 920501 と呼ばれるガンマ線バースト源の観測です。このバーストは1992年5月に発生し、ほぼ2.7平方分角の大きさに発生領域が決っています。ASCA衛星はこの誤差領域を観測しました。ガンマ線バーストの誤差領域には23等級の深さまで見ても特別の天体が発見されないと述べてきました (No-host-galaxy problem)。この程度の大きさの誤差領域内には普通、星が大量に検出されます。しかし、一般にどれかを特別と考える理由はありません。だが、もしここに明るいX線源が紛れ込んでいるとなるとそれは普通ではないこととなります。明るいX線源は普通の光学的な天体に比べても極端に密度が

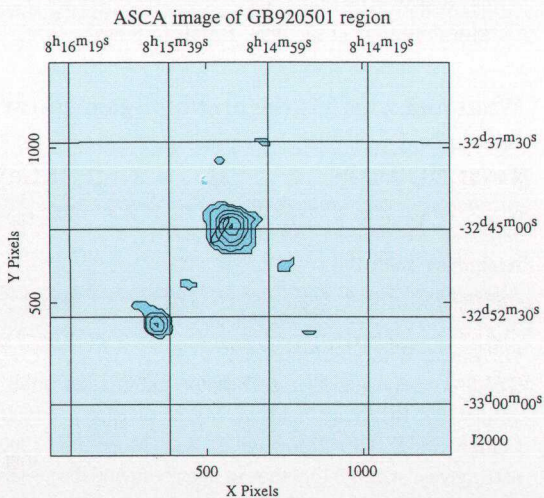


図6 ASCA衛星によるGB920501領域のX線源探査。誤差領域に一致するようにX線源が受かっている。ASCAは誤差が大きくて、外れているように見えるがROSATで6秒の精度で決まった。ASCAではスペクトルが観測され、そのスペクトルは普通の星(太陽のような)では無く、銀河や銀河団に近いと結論でき、KECKのJKHの観測では、銀河と思われる広がった天体が見つげられた。

低いからです。図6にバーストの発生領域とASCA衛星が観測したX線源の位置を示しました。ASCAの位置決定精度は限られていますが、ROSAT衛星の観測でもこのX線源は確認されて、位置は6秒角の精度で決まりました。このようにガンマ線バースト源の誤差領域の中にX線源が受かる例が2例もASCAでは出てきたのです。光では何も特別な天体が出てこないことと何か矛盾するようでもあり、裏を返せばX線こそが決定的なことを担っているとも言えます。

さて、この天体はどうのような天体であるのか？残念ながらこの天体は銀河面に近く(銀緯+1.2度)、光で何かを言うのは困難でした。そこで電波(VLA)や赤外(KECK)の観測が行われました。電波は出していないようです(3.6cmでは77μJy以下)。赤外では4つの候補が検出されました。ASCAのX線スペクトルは硬く、またこの方向にはX線スペクトルをみかけ硬くする分子雲などが確認されないことから、温度の低い星のコロナX線は否定されると考えてよいでしょう。4つの赤外線候補の3つまでは星で、残りの一つは赤外で広がっていて遠方の銀河のようです⁷⁾。もう発生場所は遠方の暗い銀河しかありえません。ガンマ線バーストの発生領域に具体的に何かが見れたのが初めてなので、この銀河を発生源とする論文を書こうと色めきたちました。ASCAのX線スペクトルの低いエネルギーでの吸収が大きいことも我が銀河の外であることを支持します。

しかし、現在我々はこれを主張することを思い止まっています。まず見つかったX線源がガンマ線バーストの発生源そのものとは、バースト自体を精度良く観測しない限り永久に断定できませんし、銀河らしきものが見えているのは(確率は確かに低い)偶然で、X線源は光で見えていない遠い中性子星(低輝度X線連星やゲミング型X線星)であることを完全には除外できません。完全であることを証明するのはかくも難しいのです。灰色であると考えられますが、例数が不足と冷静

に考えるべきです。ともかくガンマ線バーストの発生方向に奇妙な天体が現れたのはこれが初めてと言ってよく、注目されます。

詳細は紙面の都合で述べられませんが、ASCAはもう一つのガンマ線バースト源にもX線源を見だしています。そこで2匹目のドジョウをねらってKECKでのIR観測に近いうちに挑戦します。我々の発表は研究会ではどこまで真面目に受けとられたでしょうか？その後、我が業界がこの話で持ちきりにはなっていないところを見ると、冷静に受けとられているのでしょうか（無視か？）。ともかくPASJに投稿しました⁸⁾。もちろん、ガンマ線バーストを検出可能なHETE衛星や将来のASTRO-E衛星、TOMBO計画の宣伝を十分にしてくることは言うまでもありません。

7. インターネット時代の国際会議

今回の国際会議ではWWWが活用されました。会議に先立って、全員のアブストラクトを読むことが出来ましたし、あらかじめ未発表の重要なデータがWWWで公開されていて、それが議論を盛り上げる格好の材料になったのです。あらかじめ知っていて議論に参加するのと、その場で初めて聞いて参加するのでは迫力が違います。投稿論文を受取られるよりも前に電子ネットワークに公表してしまうのはもう当たり前で、プレプリントだけを集めたサーバーすら存在します。この月報で使われる図も会議に先立ってあらかじめWWWで公表されていたもので、論文からの引用ではありません。会議の1日前から翌日までしか旅費を出して貰えない我々にとって、時差でほとんどボーとした頭で英語を子守歌がわりに聞くよりは、このインターネットの情報はよほど充実したものだといえるかもしれません。会議よりも、会議のアブストラクトとWWWで公開された電子メール住所を頼りに議論が始まるのです。しかし、メールでしか知らない議論の相手に会って、女性であることに驚いたり、2年振りに会って、

「やあやあ元気！」とやるには会うにしかず、というのも事実でしょう。最後に、公開されているURLを記しておきます。図は以下です。

<http://cossac.gsfc.nasa.gov/cossac/BATSE.html>
プログラムとアブストラクトは以下です。

http://xanth.msfc.nasa.gov/astro/batse/events/hgrbs_third.shtml

なお衛星運用ではASCAチームの支援があり、ASCAデータの解析では宇宙研の柴田 亮くんの全面的な努力があったことに感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Sage, L., 1995, Nature 375, 282
- 2) Murakami, T. et al. 1994, Nature 368, 127
- 3) Schwarzschild, B. 1994, Physics Today, April, Schwarzschild, B. 1994, パリティ 8月号, 17
- 4) Larson, S. 1995, WWW Abstract C-6
- 5) Schaefer, B. 1993, AIP Proc. 307, 382
- 6) Hurley, K. et al. 1994, Nature 372, 652
- 7) Blaes, O. et al. 1995, WWW Abstract C-P4
- 8) Murakami, T. et al. 1996, PASJ, in press

What and where is the origin of gamma-ray bursts ?

Toshio MURAKAMI

Institute of Space and Astronautical Science, 3-1, Yoshinodai, Sagamihara, Kanagawa 229

Atumasa YOSHIDA

Institute of Physical and Chemical Research, 2-1, ページ 37

Hirosawa, Wako, Saitama 351

The 3rd symposium of the Compton gamma-ray observatory (CGRO) was held at Marshall Space Flight Center (MSFC) in Huntsville, AL. More than 200 astrophysicist came together in one room and discussed the possible origin of GRBs. The 1122 positions of GRBs strongly favor the cosmological origin of them. However the model does not match to the no-host-galaxy problem in the optical band. The KECK IR observation of GB920501 has found an extended IR source (galaxy?) in the error which is consistent with the ASCA X-ray position and the distance scale. This is the first peculiar object in the GRB error box, ever found.