

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14257

研究課題名（和文）極度に強い輝線を示す銀河を用いた宇宙初期の銀河進化と宇宙再電離の観測的研究

研究課題名（英文）Observational study of extremely emission line galaxies: implication for early galaxy formation and the cosmic reionization

研究代表者

小野寺 仁人 (Onodera, Masato)

国立天文台・ハワイ観測所・助教

研究者番号：40778396

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、赤方偏移 $3 < z < 3.7$ にある極めて強い[OIII] 5007輝線を示す星形成銀河の系統的な探査をおこなった。探査は強い輝線によるKバンド等級の超過に注目しておこない、240天体をサンプルとして抽出した。これらのうち19天体についてすばる望遠鏡のMOIRCSをもちいた近赤外線分光観測によって、実際に強い輝線を示す赤方偏移3を越える天体であることを確認した。得られたデータから求めた銀河の物理量の比較をしたところ、これらの天体は若く、低金属量で、激しい星形成活動をおこなっていることが示唆された。また、ライマン連続光の生成効率が広く用いられている値よりも2倍程度以上高いことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究において、極めて強い輝線を示す赤方偏移3を越える銀河を広帯域フィルターのデータのみによって選択できることを示した。狭帯域フィルターによるサーベイはその利点はあるものの、広帯域フィルターを用いた場合は一度に観測できる宇宙の体積がはるかに大きいため、相補的な手法を確立させた点で意義がある。また、これらの天体のライマン連続光の高い生成効率を再現するには、広く用いられている恒星種族合成モデルに対して修正が必要なが示唆され、極端な天体を用いたことで理論についての制限を与えた点でも学術的意義がある。

研究成果の概要（英文）：We carried out a systematic search of star-forming galaxies at $3 < z < 3.7$ with intense [OIII] 5007 emission line. Sample is selected based on excesses in the K-band flux due to the emission lines, and we selected 240 objects. We spectroscopically identified 19 objects by Subaru/MOIRCS observation and found that they are indeed at $z > 3$ with intense [OIII] emission lines. By comparing physical properties for them, it is suggested that they are young and low metallicity galaxies with bursty star formation. We also find that their hydrogen ionizing photon production efficiencies are higher than the widely used canonical values by a factor of two or more.

研究分野：銀河天文学

キーワード：銀河進化 銀河形成 宇宙再電離

1. 研究開始当初の背景

ビッグバンからおよそ 40 万年後である赤方偏移 1100 頃の時代には、宇宙は中性水素で満たされていたが、赤方偏移 6 程度では「宇宙再電離」によって水素原子はほぼ完全に電離していたことが知られている。中性水素の電離に必要な、900 Å より短い波長をもつライマン連続光の供給源としては星形成銀河が有力であると考えられており、再電離過程および電離に寄与した銀河の性質を明らかにすることが、現代天文学の最重要問題のひとつである。これらの星形成銀河は若く、低質量で金属量も低いと考えられていることから、静止系可視光で極度に強い輝線を放出していると予想され、実際に撮像観測によってこのような性質が明らかにされてきている。したがって、さらに一步踏み込んだ理解には、静止系可視光領域での分光観測によって、電離メカニズムや電離ガスの金属量、電子密度を調査することが不可欠である。しかしながら、赤方偏移 6 を越えた銀河の静止系可視光を十分な感度をもって観測できる望遠鏡は現在のところ存在していない。また、赤方偏移 6 を越えた再電離期に近い時代では、中性水素の割合の増加に伴い、宇宙空間におけるライマン連続光の透過率が 0 に近くなるため、宇宙再電離期の銀河を詳細に調べることは本質的な限界が伴っている。

このような限界があるため、より低赤方偏移において、再電離期の星形成銀河に類似した性質を示す天体を探し出す試みがなされてきた。ここでは、特に、静止系の等価幅が数百 Å を越えるような極度に強い[OIII]輝線を示し、かつ低質量の天体がターゲットになる。このような研究は赤方偏移 2.5 程度まで広くおこなわれていたが、赤方偏移 3 を越えた系統的な探査はおこなわれてこなかった。ところが、赤方偏移 3 を越えると、宇宙の構造形成に伴うガスの流入の時間スケールと星形成活動によるガスの消費の時間スケールが同程度になるなど、低赤方偏移宇宙とは銀河進化に関わる環境が大きく変わってくる。また、赤方偏移 3 ではライマン連続光の透過率も 50% 前後である。したがって、赤方偏移 3 の時代は、ライマン連続光から静止系可視光までの包括的な調査が可能な最も再電離期に近い時代であると言え、再電離期により近い宇宙環境において、電離を引き起こした銀河に類似した天体の性質を調べることができるフロンティアである。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえ、本研究では、赤方偏移 3 を越えた宇宙において、極度に強い輝線を示す星形成銀河 (Extreme Emission-Line Galaxy; EELG) の系統的な探査をおこない、静止系可視光輝線の分光観測をおこなう。これにより、探査によって検出された星形成銀河の星質量、星形成率、ダストによる減光量、電離ガスの金属量、電離パラメータ、水素電離光子生成効率などの性質を明らかにする。また得られた結果から宇宙再電離期の銀河の性質について示唆されることを議論し、赤方偏移 3 における銀河の性質のみならず、宇宙再電離を引き起こした銀河の性質について理解することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、まず、非常に精度のよい測光学的赤方偏移が既に得られている COSMOS 領域において、赤方偏移 3 を越える EELG の探査を、広帯域フィルターによる撮像データのみをもちいておこなう。赤方偏移 3 から 3.7 の天体では、電離ガスから放射される[OIII] λ 5007 輝線が近赤外線 K バンド帯 (中心波長 2.2 μ m) で観測される。EELG の場合、非常に強い[OIII]輝線の影響を受け、恒星からの放射のみを仮定したモデルと比較すると、 K バンド帯で大きなフラックスの超過が見られることが予想されることを利用する。次に、選択された EELG 候補天体の一部について近赤外線分光観測をおこない、静止系可視光の輝線を実際に確認する。得られたスペクトルから測定された輝線フラックスや既存の撮像データをもちいて、上述したような銀河の物理量を推定し、先行研究との比較や、理論モデルとの比較を通して、EELG の性質を明らかにし、遠方宇宙での EELG の物理状態や宇宙再電離期の銀河の性質についての知見を得る。

4. 研究成果

電離ガスによる放射がないモデルをもちいて推定した恒星の放射のみの場合の K バンド等級 (K^{model}) と観測された K バンド等級 (K^{obs}) の差を K^{obs} の関数として示したものが図 1 (左) である。図 1 で一点破線と実線の両方より上側にあるオレンジでハイライトしてある天体が EELG

候補である。ここでは、フラックスの超過が 0.3 等以上を基準にしているが、これは観測系での等価幅が 1000 Å 以上の天体に対応する。本研究では、COSMOS 領域の中で特に深い K バンド撮像データがある 0.46 平方度において、240 天体の候補を検出した。

選択された 240 天体の EELG 候補のうち、23 天体について、すばる望遠鏡の多天体近赤外線撮像分光装置 MOIRCS をもちいて HK バンドでの分光観測をおこなった。分光天体の選択は、測光学的赤方偏移やスペクトルエネルギー分布 (SED) の形状を考慮し、さらに MOIRCS の多天体分光機能を活かすために、視野内の EELG 候補天体数が最大となるように最適化した。その結果、23 天体のうち 19 天体から強い [OIII] 輝線が検出され、実際に赤方偏移が $3 < z < 3.6$ に分布していることが明らかになった。これらの赤方偏移の中間値は 3.3 であった。なお、2 天体からは $H\alpha$ 輝線が検出され、赤方偏移がおよそ 2.2 の銀河であった。残りの 2 天体からは輝線が検出されなかった。

得られたスペクトルから検出されている天体については正確な赤方偏移とフラックス値を、未検出のものについては上限値を求めた。また、分光学的な赤方偏移を考慮に入れた上で、恒星質量、星形成率、ダスト減光量などを改めて求め直し、さらに R_{23} ($([OII]+[OIII])/H\beta$) や O_{32} ($[OIII]/[OII]$) といった輝線比を求めた。また、紫外線光度と $H\beta$ 輝線から、水素電離光子生成効率 (ξ_{ion}) を求めた。

得られた結果のうち主要なものを以下に列挙する。

- (1) 赤方偏移 3.3 の EELG のような極めて強い輝線を示す天体においても、公開されている最新の COSMOS 領域のカタログ (COSMOS2015 カタログ) の測光学的赤方偏移が分光学的赤方偏移と非常によい一致を示した (図 1 中央)。一方で、恒星質量は輝線の影響から COSMOS2015 では過大評価する傾向があった (図 1 右)。
- (2) 赤方偏移 3.3 の EELG の撮像及び分光データからは、活動銀河核が卓越していることは示唆されなかった。つまり、EELG は星形成銀河として扱って差し支えないことを示した。
- (3) 赤方偏移 3.3 の EELG のうち、恒星質量が $10^{9.5}$ 太陽質量を越えるものについては、同赤方偏移帯の EELG ではない星形成銀河と同様の恒星質量・星形成率関係 (MS とよばれる) に載っていた一方、 10^9 太陽質量より低質量の EELG は MS よりも高い星形成率を示していた (図 2 左)。これは、低質量 EELG が爆発的星形成過程にあることを示唆している。
- (4) 電離ガスの金属量の指標である R_{23} の値からは、赤方偏移 3.3 の EELG の金属量が $12 + \log_{10}(O/H) = 7.5 - 8.5$ であることが示唆された。これは、赤方偏移 0 の典型的な銀河の金属量に比べ、同等の恒星質量において、一桁程度低い金属量である。電離パラメータの指標である O_{32} の値からは、赤方偏移 3.3 の EELG の電離パラメータが赤方偏移 0 に比べて 30 倍程度も高くなっていることがわかった (図 2 中央)。
- (5) 赤方偏移 3.3 の EELG の ξ_{ion} の中間値は $10^{25.54} \text{ erg}^{-1} \text{ Hz}$ であった。 ξ_{ion} は [OIII] 輝線の等価幅とよく相関しており、[OIII] が強い天体では、水素電離光子がより効率よく生成されていることを明らかにした。
- (6) ライマン連続光が検出されているさまざまな赤方偏移にある星形成銀河について、 O_{32} と [OIII] 輝線の等価幅を比較してみたところ、 O_{32} が 10 を超え、さらに [OIII] 輝線の等価幅が 1000 Å を越えるような天体では、ライマン連続光が検出される可能性が非常に高いと考えられると結論づけた (図 2 右)。我々が同定した赤方偏移 3.3 の EELG にもこのような性質を満たすと思われる天体があり、今後のフォローアップ観測の有力なターゲットである。
- (7) 項目(5)で述べた ξ_{ion} の値は、宇宙再電離期の銀河の標準的な値として先行研究で想定されてきた値よりも 2 倍以上大きいものであることがわかった。これは、宇宙再電離期の銀河で仮定すべき ξ_{ion} の値に修正を迫るものである。このような高い ξ_{ion} を実現するには、これまでもちいられてきた恒星種族合成モデルにおいて、より大質量星に重みのある初期質量関数やバースト状の星形成史、より若い年齢の恒星種族、そして大質量連星系などの異なる仮定の導入が必要であると考えられる。

以上の研究成果を査読論文としてまとめ、The Astrophysical Journal 誌に投稿した。本報告書作成時現在、査読を受けている。

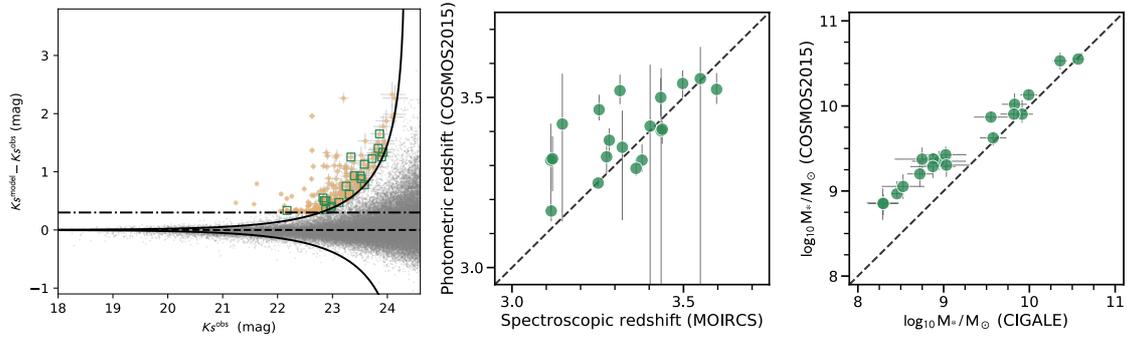


図1: (左) 輝線の寄与がない場合の K バンド等級と観測された K バンド等級の差を観測された K バンド等級の関数として示したもの。オレンジの点が EELG 候補天体。緑でハイライトしてある天体はすばる望遠鏡の MOIRCS をもちいて分光学的に同定されたもの。(中央) COSMOS2015 カタログの測光学的赤方偏移と本研究で得られた分光学的な赤方偏移を比較したもの。(右) COSMOS2015 カタログの恒星質量と本研究で輝線の効果をより精度よく評価して得られた恒星質量を比較したもの。

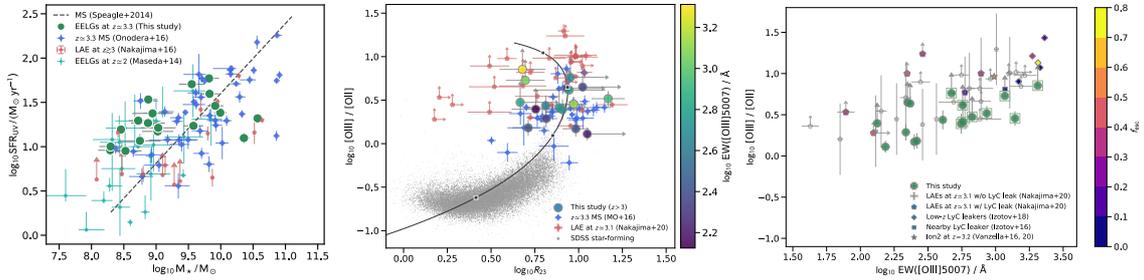


図2: (左) 星形成率と恒星質量の比較。本研究で同定した赤方偏移 3.3 の EELG が緑丸、赤方偏移 3.3 の EELG ではない銀河 (Onodera et al. 2016, ApJ, 822, 42) が青点、赤方偏移 3.1 のライマン α 輝線銀河 (Nakajima et al. 2016, ApJL, 831, L9) が赤点、赤方偏移 2 の EELG (Masada et al. 2014, ApJ, 791, 17) がシアンで示してある。破線は赤方偏移 3.3 の典型的な関係 (Speagle et al. 2014, ApJS, 214, 15) を示している。(中央) O_{32} と R_{23} の比較。大きな丸点が赤方偏移 3.3 の EELG で、 $[\text{OIII}]\lambda 5007$ 輝線の等価幅に応じて着色してある。青点と赤点は左図と同じだが、ライマン α 輝線銀河は Nakajima et al. (2020, ApJ, 889, 161) による。灰色の点はスローンデジタルスカイサーベイによって得られた赤方偏移 0 の星形成銀河を示している (Oh et al. 2011, ApJS, 195, 13)。(右) O_{32} と $[\text{OIII}]\lambda 5007$ 輝線の等価幅を比較。緑丸が赤方偏移 3.3 の EELG を示している。小さな点で色つきのものは様々な赤方偏移にある、ライマン連続光が検出されている銀河で、色がライマン連続光の脱出率に対応している。中抜きの点は赤方偏移 3.1 のライマン α 輝線銀河 (Nakajima et al. 2020) である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計21件（うち査読付論文 21件/うち国際共著 21件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 den Brok M., Carollo C. M., Erroz-Ferrer S., Fagioli M., Brinchmann J., Emsellem E., Krajnovic D., Marino R. A., Onodera M., Tacchella S., Weilbacher P. M., Woo J.	4. 巻 491
2. 論文標題 The MUSE Atlas of Disks (MAD): Ionized gas kinematic maps and an application to diffuse ionized gas	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 4089-4107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz3184	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Zanella A., Le Flocc'h E., Harrison C. M., Daddi E., Bernhard E., Gobat R., Strazzullo V., Valentino F., Cibinel A., Sanchez Almeida J., Kohandel M., Fensch J., Behrendt M., Burkert A., Onodera M., Bournaud F., Scholtz J.	4. 巻 489
2. 論文標題 A contribution of star-forming clumps and accreting satellites to the mass assembly of z~2 galaxies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2792-2818
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz2099	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Harikane Y. et al.	4. 巻 883
2. 論文標題 SILVERRUSH. VIII. Spectroscopic Identifications of Early Large-scale Structures with Protoclusters over 200 Mpc at z~6-7: Strong Associations of Dusty Star-forming Galaxies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 142 (16pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab2cd5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Erroz-Ferrer S., Carollo C. M., den Brok M., Onodera M., Brinchmann J., Marino R. A., Monreal-Ibero A., Schaye J., Woo J., Cibinel A., Debattista V. P., Inami H., Maseda M., Richard J., Tacchella S., Wisotzki L.	4. 巻 484
2. 論文標題 The MUSE Atlas of Disks (MAD): resolving star formation rates and gas metallicities on <100pc scales	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5009-5027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz194	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tacchella S., Carollo C. M., Forster Schreiber N. M., Renzini A., Dekel A., Genzel R., Lang P., Lilly S. J., Mancini C., Onodera M., Tacconi L. J., Wuyts S., Zamorani G.	4. 巻 859
2. 論文標題 Dust Attenuation, Bulge Formation, and Inside-out Quenching of Star Formation in Star-forming Main Sequence Galaxies at $z \sim 2$	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 56 (26pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aabf8b	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Harikane Yuichi, Ouchi Masami, Shibuya Takatoshi, Kojima Takashi, Zhang Haibin, Itoh Ryohei, Ono Yoshiaki, Higuchi Ryo, Inoue Akio K., Chevallard Jacopo, Capak Peter L., Nagao Tohru, Onodera Masato, 他13名	4. 巻 859
2. 論文標題 SILVERRUSH. V. Census of Ly α [O iii] 5007, H α , and [C ii] 158 μ m Line Emission with ~ 1000 LAEs at $z = 4.9-7.0$ Revealed with Subaru/HSC	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 84 (21pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aabd80	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Calabro A., Daddi E., Cassata P., Onodera M., Gobat R., Puglisi A., Jin S., Liu D., Amarin R., Arimoto N., Boquien M., Carraro R., Elbaz D., Ibar E., Juneau S., Mannucci F., Mendez Hernandez H., Oliva E., Rodighiero G., Valentino F., Zanella A.	4. 巻 862
2. 論文標題 Near-infrared Emission Lines in Starburst Galaxies at $0.5 < z < 0.9$: Discovery of a Merger Sequence of Extreme Obscurations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L22 (7pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aad33e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Calabro A., Daddi E., Puglisi A., Oliva E., Gobat R., Cassata P., Amarin R., Arimoto N., Boquien M., Carraro R., Delvecchio I., Ibar E., Jin S., Juneau S., Liu D., Onodera M., Mannucci F., Mendez-Hernandez H., Rodighiero G., Valentino F., Zanella A.	4. 巻 623
2. 論文標題 Deciphering an evolutionary sequence of merger stages in infrared-luminous starburst galaxies at $z \sim 0.7$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A64 (31pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201834522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Suzuki Tomoko L., Kodama Tadayuki, Onodera Masato, Shimakawa Rhythm, Hayashi Masao, Tadaki Ken-ichi, Koyama Yusei, Tanaka Ichi, Sobral David, Smail Ian, Best Philip N., Khostovan Ali A., Minowa Yosuke, Yamamoto Moegi	4. 巻 849
2. 論文標題 The Interstellar Medium in [O iii]-selected Star-forming Galaxies at z~3.2	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 39 (15pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8df3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Masato Onodera
2. 発表標題 Extreme emission line galaxies (EELGs) at z>3
3. 学会等名 COSMOS Team Meeting Copenhagen 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masato Onodera
2. 発表標題 Near-infrared spectroscopy of extreme emission line galaxies (EELGs) at z>3
3. 学会等名 EAO Subaru Science Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masato Onodera
2. 発表標題 Near-IR spectroscopy of extreme emission line galaxies at z>3
3. 学会等名 Subaru-EAO High-z Galaxy Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masato Onodera
2. 発表標題 Metallicity And Ionization Condition Of Ism In Star-Forming Galaxies At High Redshift
3. 学会等名 Galaxy Evolution Across Time (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masato Onodera
2. 発表標題 ISM properties of star-forming galaxies at z~3.3 from MOSFIRE spectroscopy
3. 学会等名 Keck Science Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	Carollo Marcella (Carollo Marcella)		
研究協力者	Daddi Emanuele (Daddi Emanuele)		