

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H05500・20K20428

研究課題名（和文）核ガンマ線イメージング観測が開く新しい太陽系及び外縁天体の描像

研究課題名（英文）New picture of solar system and outer rim objects opened by nuclear gamma imaging observation

研究代表者

谷森 達（Tanimori, Toru）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：10179856

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 17,400,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙線と天体の衝突で発生する 線を画像計測して太陽系内小天体群を観測する手法や月等岩石惑星表面の元素分布測定の可能性を探る。我々は核 線の方向を完全決定する電子飛跡検出コンプトンカメラ（ETCC）を開発、核 線画像分光に世界で初めて成功をした。ETCCの実測性能を踏まえ上記観測の可能性を検証する。2018年の気球による銀河観測の精密な解析調査を実施。観測された銀河面ガンマ線を基に、ガンマ線の集光度を表すPSFを、AIの導入で大きく改善した。その結果、雑音 線の理解が進み、宇宙線大気 線モデルと雑音 線計算から独立に実験結果が再現でき、雑音を上回る宇宙 線の直接検出が、世界で初めて実証できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

今まで核 線の天体観測は50年以上前から注目されながら、ガンマ線方向測定が不可能だったため進展が非常に遅れていた。今回の成果は初めて完全な核 線可視化を実現、これにより、2桁近く雑音低減に成功し宇宙からの核 線の直接観測に成功、初めて銀河からの 線画像を得ることで実証した。

これにより核 線宇宙観測も他の天文学同様、幾何光学に基づく画像解析が可能となり、大きな発展が世界で初めて担保された。これより本申請の月面での元素の画像による資源探査も可能となる。さらに核ガンマ線を利用する全分野にイメージング分光技術の導入が可能となり、飛躍的進展が期待される。

研究成果の概要（英文）：We have studied the possibility of the both observations of asteroid groups in the solar system and the chemical elements on the surfaces of rocky planets such as Moon by measuring spectroscopic images of γ -rays generated by collisions between cosmic rays and astronomical objects.

We developed the electron track detecting Compton camera (ETCC), which can determine the direction of nuclear gamma rays completely, and succeeded MeV gamma ray imaging spectroscopy for the first time in the world. Based on the observed galactic plane gamma rays in 2018 balloon observation, we improved PSF, which represents the gamma-ray collectivity, by using Deep Learning approach. Then the understanding of background gamma rays has been improved, and hence the experimental results could be reproduced independently from the cosmic-ray atmospheric gamma ray model and background gamma ray simulations, which verify the first direct detection of cosmic nuclear gamma rays exceeding over the background.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：ガンマ線イメージング分光 元素合成 月面資源探査 電子飛跡検出型コンプトンカメラ コンプトン散乱 機械学習

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

核 γ 線は宇宙線衝突により天体地表から放射され、そのスペクトルから元素の同定・存在量が判明する。月では JAXA の月探査衛星「かぐや」でスペクトル観測が行われた。一方太陽系外天文学では核 γ 線観測は超新星爆発の元素合成を直接観測できる手法として注目されながら、従来のコンプトンカメラのような不完全なイメージング法しかなく、そのため Point Spread Function (PSF) が大変悪く、90年代に COMPTEL の 30 天体の観測以後は観測手法の改良が進まず停滞している。我々は γ 線コンプトン散乱を完全に捉える電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC: 図 1[1]) を開発、世界で初めて 2 次元 PSF が定義でき、数度の PSF に到達可能なカメラを開発した (従来型コンプトンカメラ (CC) は 50 度以上 [2])。これを用いた衛星実験によって、COMPTEL の 100 倍またはサブ mCrab の感度達成の可能である [2]。2018 年春には豪州で銀河中心 γ 線と宇宙背景 γ 線 (CBG) の気球観測を JAXA と行い成功した [1]。特に CBG は全天から来るため OFF 領域が無く、従来法では信号の 100 倍の雑音に埋もれていたため、9 年の衛星観測でも 2σ の有意度であった。しかし ETCC は雑音をほぼ除去でき 1 日観測で 10 万近い CBG が観測できた。また銀河中心拡散ガンマ線も 4 時間の観測で 10σ 以上の信号を得た (図 2)。これは INTEGRAL や COMPTEL の 10 年の観測でも間接的にしか得られていない。このように ETCC はイメージング分光を宇宙観測で初めて実現した。

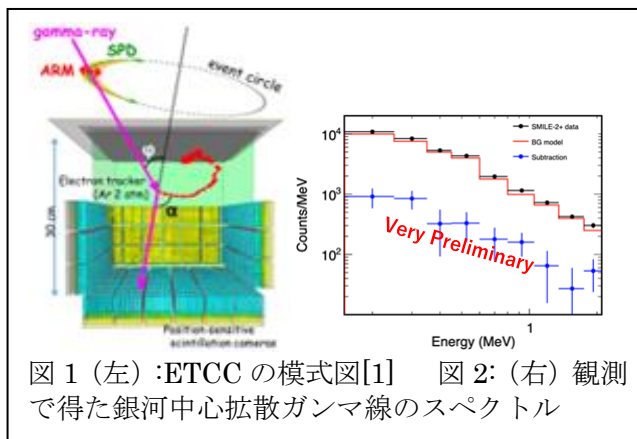


図 1 (左) :ETCC の模式図[1] 図 2: (右) 観測で得た銀河中心拡散ガンマ線のスペクトル

一方「かぐや」が Ge で測定を行い月表面の物質分布を測定した。当然火星や小惑星のような岩石惑星と宇宙線の衝突で核 γ 線を発生、表層の元素分析が可能となる。ETCC のようなイメージング分光可能な衛星で測定すれば、惑星全体の元素分布マップが得られる。「かぐや」は画像能力を有せず約 100km 四方の分解能だが、ETCC は「かぐや」の装置と同重量で 2 桁高い感度で月面を 3km 四方の精度で測定、クレーターに残留の水も検出できる。このように簡単な推測で惑星の探査にも大きな進展が十分期待できる。

2. 研究の目的

太陽系外縁部に行くにつれ増加する銀河宇宙線を用い、月で「かぐや」が宇宙線と惑星との衝突で発生する核 γ 線の観測に成功した。一方我々が開発した ETCC は、核ガンマ線観測の最大の課題であった全単射による望遠鏡を実現し、従来より 2 桁以上もの低雑音化に成功している。このように、他波長同様な単純な画像解析を初めて核ガンマ線 (MeV ガンマ線) でも可能にすることを SMILE2+実験 [1] によって実現した。この成果を月や火星等の岩石惑星観測へ応用する。核ガンマ線は宇宙線と天体表面との衝突で出来る放射性同位体から放射、スペクトルから元素の同定と存在量が算出できる。ETCC により核 γ 線画像分光を可能にすることで「かぐや」より約 2 桁高感度を実現する。この ETCC を搭載した周回衛星を用いることで、月や火星表面の元素分布を数キロ四方毎に実現できる。

さらに、宇宙遠方を探る全天観測型核 γ 線観測衛星が実現できれば、宇宙遠方の天体ばかりでなく、カイパーベルト (KBO) やオールト雲の直接観測できる可能性がある。これらは太陽系外縁部で宇宙線との衝突によって微かにガンマ線を放出すると予想されている。光赤外観測ではこの小天体群の全体像の観測は不可能に近い。しかし、小天体群は総重量が同じであっても、その径に反比例して表面積が増大し、小さい集団ほど宇宙線との衝突確率が増大して強い核 γ 線放射源となる。1 cm 径までの小石までもが γ 線源となり、仮に 1 個の惑星を 1 cm 径小天体に分割すれば、同質量の天体より 10^8 倍もの γ 線放射量が多くなる。太陽系のダスト・小惑星群は火星の向こうの小惑星帯、KBO とオールト雲である。小惑星帯、KBO から核 γ 線は黄道面に沿った分布とある。特に小惑星帯は地球に近いため地球との近日点で強度最大となる。小惑星帯と KBO γ 線は黄道面に限定され、その強度分布から 2 つの寄与の分離が出来る。今年の気球観測では全天から雑音の無い CGB が観測された。黄道面に増加があればこの成分かもしれない。

オールト雲は天球に広がるため宇宙背景 γ 線 (CBG) との分離が不可能に見えるが、近傍であるため陽電子 511keV γ 線、2.2MeV 水素 γ 線が全天から観測されればその源はオールト雲しかない。このように、大型全天 γ 線衛星 (COMPTEL の 100 倍の感度) であれば、小惑星帯、KBO、オールト雲の直接検出の可能性がある。我々はすでに Fermi が行った KBO から GeV γ 線予想を基に 511keV γ 線を「かぐや」の結果を取りいれ予想、KBO が 5σ 以上の精度で観測可能と

なる (図 3)。この計算では m 径までしか考慮していない。核 γ 線は cm 径の小石まで放射可能でさらに 1 桁以上予想が上がる。

この申請ではさらに今年の ETCC 気球実験の成果を反映させ太陽系惑星、小惑星群の核 γ 線発生量を正確に計算する手法を開発し、以下の 2 つの観測手法で定量的な観測予想を行う。(A) 地球周囲軌道上の全天観測型 γ 線衛星による KBO、オールト雲など小惑星群の観測予想と期待できる科学。(B) 約 100kg の γ 線観測装置による月、火星等の周回軌道による精密資源探査の概念設計。またこの申請の要である高感度な分光に不可欠な γ 線用シンチレーターの開発を実施する。

3. 研究の方法

この研究目的を、広視野の汎用型 MeV ガンマ線衛星で達成するための課題は、宇宙遠方観測と同じく、①いかに MeV 領域特有の雑音である宇宙線が観測装置等と衝突で作る大量の雑音ガンマ線 (宇宙ガンマ線の 2-3 桁上) が排除できるか、②それを具体的に実現するために不可欠な全単射イメージングを実現できるか、③望遠鏡の性能を決める PSF を必要なレベルの性能まで達成できるか、である。しかし、従来使用されているコンプトンカメラ (CC) はコンプトン散乱の反跳電子の方向が測定できないため、コンプトン散乱の運動方程式が解けず方向が円環となり全単射画像にならない。そのため普通の光学系のように方向で雑音分離が出来ず、定量性もない。それを解決するのが ETCC である。全ガンマ線の反跳電子の方向測定を行い、コンプトン方程式を完全に解き、方向決定を可能にする。これによって PSF も定義でき、他の望遠鏡同様に全単射撮像が可能で PSF から性能評価、信頼度の高い性能予測が可能となる。天文学にとって、最も基本的な全単射イメージングが唯一 MeV ガンマ線では実現できていなかった。本申請では惑星全面、KBO など数 sr の超広域観測が必要となる。CC 法では全単射が不可能なため非線形画像となり広域撮像では定量性はほとんど無い。本申請では 2018 年の南天全域の広視野観測データでいかに PSF が改善されたか議論し、将来、本申請の目的が ETCC で得られるか可能性を検討する。また ETCC 装置で特に PSF 改善に重要な電子飛跡方向の改善の可能性の検証、および仰角の角度分解能改善のための新しいシンチレーター GAGG の性能評価を実施した。

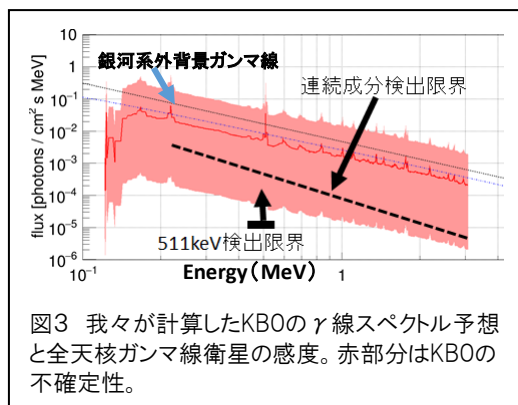


図3 我々が計算したKBOの γ 線スペクトル予想と全天核ガンマ線衛星の感度。赤部分はKBOの不確定性。

4. 研究成果

(1) 2018 年に JAXA 豪州気球に搭載した SMILE2+によって銀河中心を含む南天全域 MeV ガンマ線観測が行われた。本申請は SMILE2+で取得された銀河外領域での背景ガンマ線を調べ、太陽や黄道面からの拡散ガンマ線探査の可能性を探ることが主目的である。そのためには雑音の低減を実現し、今までの観測では不可能だった系外背景 MeV ガンマ線を高い S/N で直接検出することが必要である。ETCC は反跳電子をガス 3 次元粒子飛跡検出器 (TPC) で検出、そのエネルギー損失率 dE/dx および飛跡のトポロジーから反跳電子のみを大量の宇宙線粒子から弁別し、2 桁以上の雑音を一気に低減できる [3]。コンプトン散乱方程式が完全に解けるため、その検証も解析に加えている。このように実際のコンプトン散乱ガンマ線をほとんど損失することなく 2 桁以上多い宇宙線起因の雑音を分離できる。残った事象はガンマ線の方向が正しく決まった事象である。宇宙の方向、天頂角 60 度以内のガンマ線検出数の時間変化 (ライトカーブ) を図 4 に示す。銀河中心が通過した時間帯に明確な (10σ) の増加が観測された。比較のために、宇宙線による装置由来ガンマ線をシミュレーションによって見積もった。また、標準的な大気ガンマ線と宇宙拡散ガンマ線の半実験公式に地磁気と残存大気厚の効果を考慮し、ETCC 上部から来るガンマ線を見積ったところ、測定されたライトカーブは銀河通過時間を除いて大変良い一致を示した。この 2 つの成分を求める際には規格化するなどの調整は一切行っておらず、実験とは独立に得られた結果である。これは SMILE2+が完全に実験データの詳細を把握していることを明確に示している。今まで MeV 領域で広視野観測を実施した COMPTEL [4]、COSI の実験では宇宙背景ガンマ線の数 10 倍以上の雑音ガンマ線があり、雑音ガンマ線の理解や、宇宙背景ガンマ線、銀河拡散ガンマ線の直接観測は全く不可能であった。しかし、我々は装置由来ガンマ線をそれら実験より数 10 分の 1 に削減、宇宙ガンマ線同等以下に低減することに成功した。ライトカーブにあるように世界で初めて銀河拡散ガンマ線の直接観測にも成功

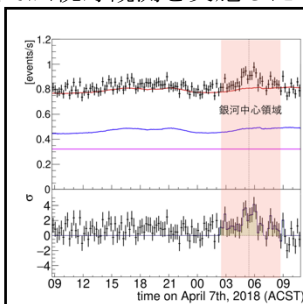


図 4: 観測ライトカーブ(上)とシミュレーションとの差分(下)[1]

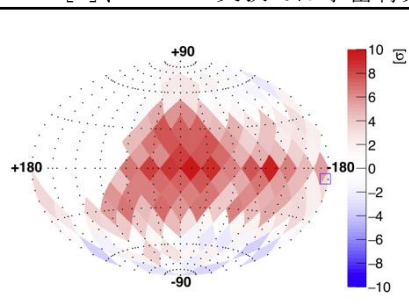
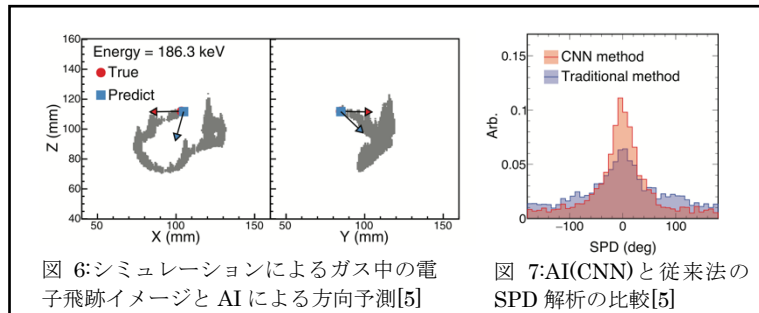


図 5: 観測された銀河座標系での有意度のマップ[1]

している。また銀河中心を含む全天の約 70%の直接検出したガンマ線での宇宙地図測定を達成し、銀河中心、銀河面からのガンマ線地図が得られた (図 5)。今まで COMPTEL、INTEGRAL の巨大衛星が 10 年観測してもできなかったことが 1 日の気球実験で達成されたのである。

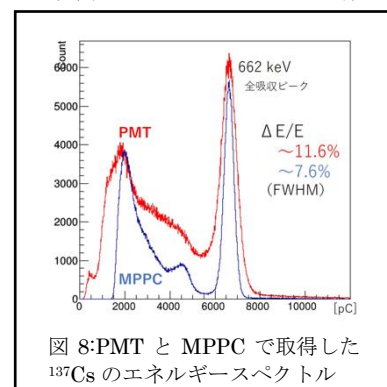
(2) 2018年のデータ解析には本申請で雇用した池田氏が大きな貢献をした。次に述べるように、ガンマ線入射方向の方位角の決定精度に依存する電子飛跡方向と、コンプトン散乱点の位置決定に機械学習を導入することで、これらを大きく改善した。また、解析全般にも大きく貢献した。1の成果は既存の電子飛跡解析法で行われ PSF が 30~40 度と悪い。それでも全単射画像であるため上記のような画期的な成果が得られた。しかし、図 5 に示す銀河の広がりほどの程度なのかは全く不明であり、太陽や KBO からのガンマ線を探すため対象天体の領域を切り取るにも PSF が悪すぎて不可能である。既存のデータの PSF を改善するためには電子飛跡からガンマ線方向を得るための、飛跡の方向と散乱点の精度改善を行うことで可能となる。数 10~数 100keV の電子はガス中といえども図 6 のように複雑な散乱パターンとなり、解析的にこれらを向上するのは不可能に近い。ゆえに AI によるシミュレーションの学習とそれに基づく判断手法を開発した[5]。図 7 にあるように反跳電子方向不確定性 (SPD) は半分に改善、PSF は 2/3 に改善している。



SMILE+の解析に導入すると銀河中心拡散ガンマ線検出有意度が 10σ から 13σ に大きく改善した。また次期気球観測計画の SMILE3 ではさらに SPD を半分に低減させ、PSF が 5 度 (1 MeV) に達成可能であることがわかった。これによって、今まで MeV 領域の最高感度の COMPTEL より 5 分の 1 程度感度が下がることが予想され、太陽のマイクロフレアの観測が期待できる。

(3) 上記の PSF 改善を利用して SMILE2+で太陽からのガンマ線検出の有無を調べてみた。今までの太陽ガンマ線観測衛星は大型 Ge 検出器を搭載し、高エネルギー分解能であったが雑音が多く 6 段階の太陽フレア等級 (X10, X, M, C, B, A) では、X 以上しか検出できなかった。SMILE2+は有効面積 $0.2 \text{ cm}^2 @ 1.0 \text{ MeV}$ でありながら、その強力な雑音除去能力によって、 $0.049 \text{ counts/cm}^2/\text{s/MeV}@1 \text{ MeV}$ の上限値を与えることができた。観測期間中に巨大なソーラーフレアが発生しなかったため、上限値を与えるだけにとどまったが、この上限値は RHESSI で観測された等級 X4.8 のソーラーフレアイベント SOL2002-07-23T00:35[6]であれば 20s の観測時間でも 3σ 以上の有意度でガンマ線を検出できたことを意味する。SMILE3 では有効面積は SMILE2+の約 10 倍、PSF は 30 度から 5 度へと改良されるためノイズは 35 倍も軽減される。これを考慮すれば、SMILE3 では C 等級の太陽フレアでさえも 20s の観測時間で有意な検出が期待できる。

(4) ハードウェア面での開発は、従来の GSO シンチレーターではエネルギー分解能が $10\% @ 662 \text{ keV}$ と悪い。可能な価格帯でエネルギー分解能改善が期待でき、さらに宇宙での使用が可能な無機シンチレーターとして、東北大で開発・市販されている GAGG シンチレーターがある。 $4\% @ 662 \text{ keV}$ (FWHM) でパルス幅も 90n 秒と高速であり、さらに放射波長が 500nm 付近と MPPC に最適な仕様である。他の目的で開発した MPPC 読み出し回路と $6 \times 6 \times 13 \text{ mm}^3$ GAGG ピクセルアレイ (8 x 8 ピクセル) があり、そのエネルギー分解能を調査した。また、従来使用している安価で高速応答な GSO シンチレーターも MPPC 読み出しの場合、エネルギー分解能の改善が期待できる。こちらも同じ 8x8 アレイを用いて同じ MPPC 回路で測定を行った。図 8 のように GSO では従来の高電子増倍管では 11%が MPPC では 7.8%、GAGG の場合、4.5%と大きな改善が得られた。



<引用文献>

- [1] A. Takada, et al., Apj, 930:6 (2022)
- [2] T. Tanimori, et al., Apj, 810:28 (2015)
- [3] T. Tanimori, et al., Scientific Reports 7, 41511 (2017)
- [4] G. Weidenspointner, et al., A&A 368, 1 (2001)
- [5] T. Ikeda, et al., PTEP, 083F01 (2021)
- [6] R.P. Lin, et al., Apj, 595:L69-L76, (2013)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 T.Tanimori	4. 巻 1468
2. 論文標題 MeV Gamma-ray imaging spectroscopic observation for Galactic Centre and Cosmic Background MeV gammas by SMILE-2+ Balloon Experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12046
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1468/1/012046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 A.Takada et al.	4. 巻 930:6
2. 論文標題 First Observation of the MeV Gamma-Ray Universe with Bijective Imaging Spectroscopy Using the Electron-tracking Compton Telescope on Board SMILE-2+	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 13pp
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ac6103	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 池田 智法
2. 発表標題 SMILE56: MeVガンマ線観測実験 SMILE-2+の解析の現状報告
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池田 智法
2. 発表標題 SMILE55:機械学習によるETCC検出器の点源分解能の改善
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷森達
2. 発表標題 MeV Gamma-ray imaging spectroscopic observation for Galactic Center and Cosmic Background MeV gammas by SMILE-2+ Balloon Experiment
3. 学会等名 Topics in Astroparticle and Underground Physics 2019 (TAUP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷森達
2. 発表標題 Imaging Observation for Cosmic MeV g Background and Galactic Diffuse MeV g by SMILE2+ balloon-borne experiment
3. 学会等名 The 2019 TeV Particle Astrophysics conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷森達
2. 発表標題 New observation for MeV gamma spectra and distributions of both Galactic Center and Cosmic Background MeV gammas by SMILE2+ balloon-borne experiment
3. 学会等名 30th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

SMILE Project
<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/MeV-gamma/wiki/wiki.cgi>
 SMILEプロジェクト
<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/MeV-gamma/wiki/wiki.cgi>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------