

スーパーコンピューターで観た超新星爆発

鈴木英之* 長沢幹夫**

星はその一生を終えるとき、星全体や星の外層が粉々に吹き飛ぶほどの大爆発を起こす。これが超新星爆発であり、この爆発の後に残るものは、中性子星やブラックホールである。超新星爆発の明るさは太陽の一億倍にも達する。1987年2月我々は歴史的な事件を目撃した。南半球の空に浮かぶ大マゼラン星雲で超新星爆発が観測されたのである。これは超新星 1987A と名付けられ、天文学者のみならず、世界はこの超新星に沸き立った。そして、超新星 1987A はまさにスーパーコンピューターの活躍の舞台となったのである。超新星爆発の際には大量のエネルギーがニュートリノによって運ばれる。ニュートリノによるエネルギー輸送の問題は、超新星爆発の機構を明らかにする際には是非とも解明しなければならない問題である。今やスーパーコンピューターを用いれば、ニュートリノによるエネルギー損失によって中性子が誕生するまでの進化を数時間で計算することができる。また、超新星爆発の際外層が吹き飛び周りの物質をかき集めて大衝撃波が形成される。この衝撃波の3次元数値シミュレーションもスーパーコンピューターによって可能になっている。

I. 超新星爆発とニュートリノ

1. はじめに

超新星は、水素線の観測の有無によってII型とI型に分類されているが、爆発の機構で分類すると、核燃焼暴走型(Ia)と重力崩壊型(Ib?, II)の2種類となる。白色矮星に物質が降り積もって引き起こされる核燃焼の暴走によって白色矮星全体が粉々に飛び散ってしまう前者に対して、後者は、大質量星の中心にできたコアが重力崩壊するとき解放される重力エネルギーによって星の外層が吹き飛ぶものである。核燃焼暴走型では、解放される核エネルギーが星の結合エネルギーより大きく、熱及び運動エネルギーとしてほとんど全てが物質に与えられるため、核燃焼反応と Hydrodynamics を組み合わせたシミュレーションによっても爆発は確認されている。ところが重力崩壊型では、解放される重力エネルギー ($3 \cdot 10^{53}$ erg) のほとんどがニュートリノとして逃げだしてしまい、実際の爆発に使われるのは全体の1パーセントに過ぎない (10^{51} erg) でしかないため、コア内部でのニュートリノの流れと物質の Hydrodynamics を精度よく調べなければならない。解析的な方法で定性的な議論や Order Estimate はできるが、99パーセントをニュートリノが持ち出して1パーセントだけ外層の物質に与えるという微調整が、どの様な過程を経て実現されているのかを明らかにするために、可能な範囲で現実的なモデルを

使った数値シミュレーションが行われている。計算機能力不足と背景となる物理的不定性から、いまだに重力崩壊型超新星爆発の機構は明らかになっていないが、この数値シミュレーションについて簡単に紹介させて頂こう。

2. 重力崩壊型超新星爆発の数値シミュレーション

コアの重力崩壊・爆発に対する外層の影響は無視でき、またコアの表面さえ爆発すればそれを覆う外層は吹き飛んでしまうため、ここではコア内部に話を限定させて頂く。外層の爆発に関しては、長沢氏の解説をご覧下さい。また1985年までの研究に関しては高原氏の詳しい解説(天文月報78巻10号)があるので参照されたい。

まず具体的に、何を数値シミュレーションするかというと、星の進化の計算でえられた現実的なコアの構造を初期モデルとして、その後の重力崩壊・衝撃波の発生・伝播といった Hydrodynamics を一般相対論的に計算するのである(物質に働く力—重力、圧力差、ニュートリノによる運動量輸送—を求めて物質の運動を追う)。これと同時にエネルギーの流れとしてニュートリノの流れも追う(放出されたニュートリノが別の場所で吸収されたり低エネルギーに散乱されたりすれば、エネルギーを輸送したことになるが、電子や光子は物質間を相対的に移動することができない)。これまで球対称のシミュレーションが主であったが、ニュートリノと物質の相互作用(輸送係数)がニュートリノエネルギーに大きく依存するため、ニュートリノのエネルギー毎に輸送を追わなければならない(multigroup方式)、空間一次元+エネルギー次元の二次元計算となっていた。また不透明なコア中

* 東大理 Hideyuki Suzuki, ** 高エネルギー物理学研究所 Mikio Nagasawa: Supernova Explosions Simulated by Supercomputers

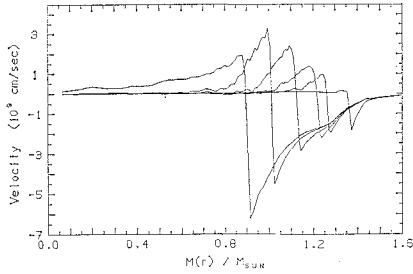


図 1 prompt mechanism が失敗に終わった計算例. 各時刻の速度分布を重ね合わせたもので, 衝撃波が物質を外向きに押し出せなくなっていく.

W. Hillebrandt, in Proc. NATO-ASI on High Energy Phenomena around Collapsed Star NATO-ASI Series C, 195 (Kluwer, 1987) より転載.

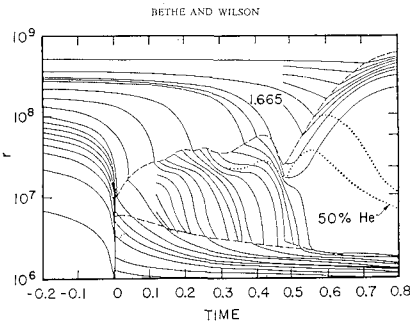


図 2 delayed mechanism による爆発の計算例. 0.5 秒ほどたってから衝撃波がよみがえって爆発した.

H. A. Bethe and J. R. Wilson, Ap. J. 295 (1985) 14. より転載.

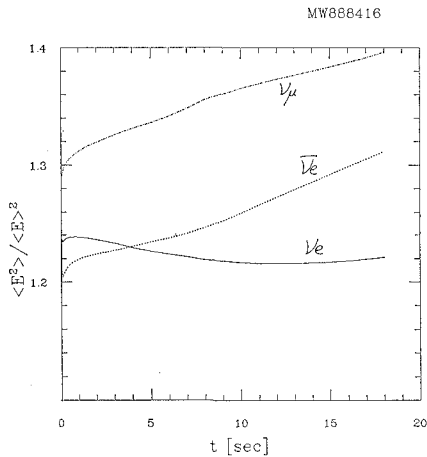


図 3 ニュートリノバーストのスペクトル幅の時間変化. 銀河系内の超新星が現れれば, 観測とシミュレーションの比較から詳しい解析ができるだろう.

H. Suzuki in preparation.

心部と透明なコア表面を同時に計算するため, 通常 Flux Limited Diffusion 近似が使われている. 補助的ではあるが, 物質の運動を決める圧力・ニュートリノとの相互作用の強さを決める温度などの状態量を決める状態方程式も, 広い範囲 (密度 $<10^{15} \text{ g/cm}^3$, 温度 $<10^{12} \text{ K}$, 一核子当りの電子数 $=0 \sim 0.5$) にわたる現実的な状態方程式を用いなければならないことが, 計算を大がかりなものにしている. 現在のスーパーコンピュータでは, 空間 $50 \sim 130$, エネルギー $10 \sim 30$ メッシュのシミュレーションが行われている. まだ質的には十分とはいえないが, 空間的に 2 次元のシミュレーションもいくつか行われている.

現在, コアの中で内部コアの収縮が止まったときに発生する衝撃波がそのまま外層に伝わるとする prompt mechanism と, ニュートリノによって衝撃波の背後の物質が温められて衝撃波を後押しするという delayed mechanism の二通りの爆発機構が考えられているが, それぞれシミュレーションによって詳しく調べられている. 特に delayed mechanism は, たまたま週末も走らせっぱなしにしておいた計算によって発見されたそうである. delayed mechanism は Wilson のグループのシミュレーションでしか確認されておらず, prompt mechanism については, 非常に柔軟な状態方程式や, 軽いコアの場合しか爆発しないということで, まだ決着はついていない. 原子核物理の不定性からくる状態方程式やニュートリノの放出率などの入力物理の不定性も, さらに問題を複雑にしている. グループによって計算法も入力物理も違い, 結果も違うという状況なので, 計算機的能力を限界まで使いきるシミュレーションを行うと同時に, 系統的なシミュレーションによる解析も必要であろう. 超新星からのニュートリノも実際に観測されるようになり, 系統的なシミュレーション結果と観測の比較から, 入力物理に関する貴重な情報が取り出せるはずであるから. (鈴木英之)

II. 超新星爆発による衝撃波

星は核燃焼が進み中心に半径約 1000 km の鉄のコアができるが, 全質量が $8 M_{\odot}$ より重い星ではコアの重量が電子の縮退圧で支えきれなくなり重力崩壊を始める. この時, 原子核の電子捕獲反応で縮退圧を担う電子の数は減り, 収縮による温度上昇も鉄の光分解で吸熱されてしまうため, この重力崩壊は自由落下に近い速度で進む. 収縮が進んで密度が上昇しニュートリノがコアに閉じ込められて中性子過剰核の平衡状態となるまでわずか 0.1 秒以下の短時間の出来事である. 中心の密度が核物質密度に達すると, 核子間に働く強い斥力によってコアの落下にブレーキがかかる. そして核子ガスの音速内

部コアの上に超音速で収縮してきたガスが衝突し、衝撃波が発生する。この半径 100 km の内部コアの結合エネルギーの約 10^{51} erg が、衝撃波のエネルギーとなって開放される。これが II 型超新星であり、水素などの残る外層を含む星表面までのサイズは 10^{10} cm 以上であるから、衝撃波の発生領域は星の半径の一万分の一以下の小さい領域からの点源爆発とみなせる。この重力崩壊の過程から星全体が吹き飛ぶところまでを全て数値実験で扱うことは、まだ不可能であるため、超新星の爆発を調べるには、進化した星のモデルの中心部に 10^{51} erg のエネルギーを持つ衝撃波を発生させて、衝撃波の伝播と星の膨張運動を計算することになる。ここでは現在注目されているこの超新星爆発の問題を取りあげて、大型数値実験の必要性和有効性について考察する。

1. 丸くない超新星

最近、超新星爆発の最中あるいは超新星残骸内で何が起きているのかを直接見る絶好の機会が我々に与えられた。大マゼラン星雲の超新星 SN 1987A がそれである。15万光年という近距離に出現したこの超新星は全波長域にわたる観測がなされ、得られた情報の多くは星の進化と爆発の理論の予言にしたがっていた。しかし、その一方で従来の理論の常識を覆す事実もあきらかになった。

SN 1987A で詳細に観測された可視光や X 線は、衝撃波加熱でつくられた放射性元素 ^{56}Ni , ^{56}Co が崩壊する時の γ 線が、膨張が進むにつれてコンプトン散乱を受けて表面から出てくるもので、十分に薄くなれば直接、核 γ 線も見えてくる。この時の外層の厚みが X 線を最も多く出すようになるのは、爆発から約 300 日後と予想されたが、実際には 150 日後から観測されたのだった。その原因は、中心部の ^{56}Co が表面近くまで混ぜられたか、超新星表面に密度の濃淡があつて、丁度、穴から内部をのぞき込めるようになっていたと解釈せざるをえない。また、散乱の影響をあまり受けていない ^{56}Co 崩壊の γ 輝線が検出されたことや、硬 X 線の強度変化から、一様な混合ではなく超新星物質がいくつかの塊に分かれていることも示唆された。さらにミステリースポットの発見、あるいは 1% 近い大きな光学偏光が測定されたことは、超新星が球形からずれていた証拠であり、平坦な光度曲線を説明するための水素の分布、それに赤外分光観測で得られた各重元素の 5000 km/s という広い速度幅、あるいは 2000 km/s という水素の吸収線の遅い速度は、重元素層から水素層にいたるの星の全領域での物質混合を示唆していたのである。

従来、星の構造や超新星爆発のダイナミクスは球対称を仮定して解かれてきた。しかし、SN 1987A における観測から、爆発するガス中で大規模な物質混合が起きていることが示唆され、爆発の過程において非球対称性を

生み出す要因が存在しているのではないかと考えられた。超新星爆発の非球対称性と一言で言っても、非等方な膨張速度、膨張殻の分裂、その内部での物質混合などいくつか考えられる。詳細な観測や実験によって理論の正当性を検証するのが、近代科学の方法論である。しかし人間が起爆スイッチをつくって星を爆破実験するわけにはいかないから、パラメーターの異なる超新星の時間発展の一部始終を調べる実験はできない。また SN 1987A のような詳細な観測は数十年あるいは数百年待たなければできない。それゆえ計算機上での数値実験が、現実の観測に負けず劣らず重要となる。シミュレーションは観測結果を再現するためのものではなく、対象の性質を引き出す数値実験であり、実験であるからこそ、そこに発見もある。

我々はラグランジ的に流体素片の運動を追う SPH 法を用いて超新星の三次元計算に世界ではじめて成功した。系の対称性を仮定しない超新星の三次元断熱点源爆発は、大局的に見れば一次元計算で仮定されている球対称の膨張運動としての近似が十分よいが、中心の高温領域に押され加速度運動する殻上では、対流不安定による密度ゆらぎが成長する。このとき、ガスは混合され、密度の高い部分は塊状になって放出されていくことが 4000 体の計算により示された(表紙図)。この分裂がいかに進行するのか、何個くらいの分裂片になるのかは、三次元計算をしてはじめて答のわかる問題である。その後、相次いでアメリカ、西ドイツのスーパーコンピュータ先進国で二次元あるいは三次元のシミュレーションが行われた。大型数値計算のためには、スーパーコンピュータが不可欠であり、計算コードの開発も、計算機ハードの進歩を軸に進められている。その点において日本の計算機環境は、現在最も恵まれているのである。

2. 対流不安定と Rayleigh-Taylor 不安定

一様媒質中の場合と異なり、星のように温度勾配を持つ星の外層中では、衝撃波が通過した後外向きのエントロピー勾配ができ、接触不連続面に対応する膨張殻の内壁部分是对流不安定の条件を満足する。典型的な対流塊の大きさは、この膨張殻の厚み程度となり、その高温低密度の断熱塊が殻を沸き出るようにして表面に達する。SPH を用いて調べた各流体素片の運動を詳しくみると、地球のマグマ噴火あるいは地球大気の循環と同様、エントロピー勾配をならすように働く内部物質の三次元乱流混合運動が見える。この対流運動は系統的に星内部の元素分布を混合反転させ、重元素が超新星膨張殻の外層表面にまで達する可能性を引き起こしているのである。

しかし問題となるのは、数値実験で出た分裂不安定が本当に、上述のような物理的な対流不安定に対応してい

るのかという疑問である。我々は標準問題として、巨星の外層を良く近似する $n=3$ のポリトロップの点源爆発を考えた。ところが、この問題をメッシュ法で解くと、密度ゆらぎはあまり成長しないという結果が Müller らにより報告されたのである。SPH 法とメッシュ法の結果の違いは、粒子数や格子数の差による精度の問題なのか、それともコードの欠陥なのだろうか。数値実験の信用度が疑われるゆゆしき事態である。これは数値実験に付きまとう解の一意性や整合性の問題であり、計算結果から答を引き出すには、線形理論や解析解との比較、そして結果の物理的な解釈が絶えず重要になるゆえんでもある。我々も Müller 達も共に線形解析との比較チェックをしているのに、不安定の成長率が 10 倍も違ったのである。

実は、この不一致の原因はどちらも初期条件の曖昧さにあるらしいことが、後になってわかってきた。初期値問題を解く以上、どのような衝撃波が、どのような外層を伝搬するのかを指定してはじめて問題が正確に定義される。同じポリトロップの外層でも、我々の計算では、内側に真空領域と接触不連続面を持つ bubble 解 (図 1) を、Müller 達は衝撃波面のみ存在する blast wave 解を求めていたのである。

もしも外層の密度分布がある一定のべき乗則であれば球面衝撃波の条件から、どちらの解が走り出すのか決まっているのだが、ポリトロップでは勾配が変わるため、それがエネルギーをデルタ関数として与える原点付近の境界条件に微妙に依存していたのである。一様メッシュのオイラー差分による三次元計算では、対流のような内部運動を追ったり、あるいは真空領域を計算することが

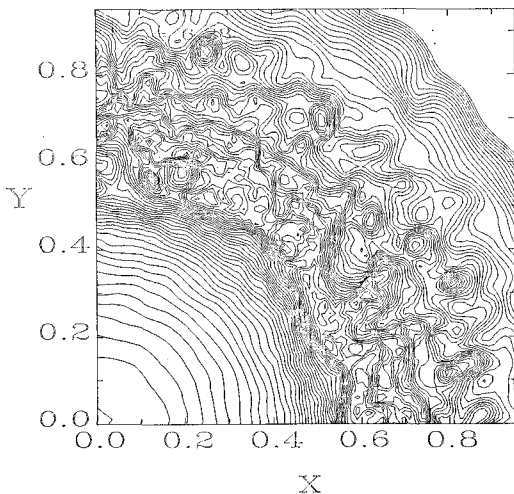


図 1 超新星爆発の bubble 解。100 万体の SPH 計算例について x-y 断面での密度等高線を表示してある。初期条件の密度ゆらぎは 1% 以下である。

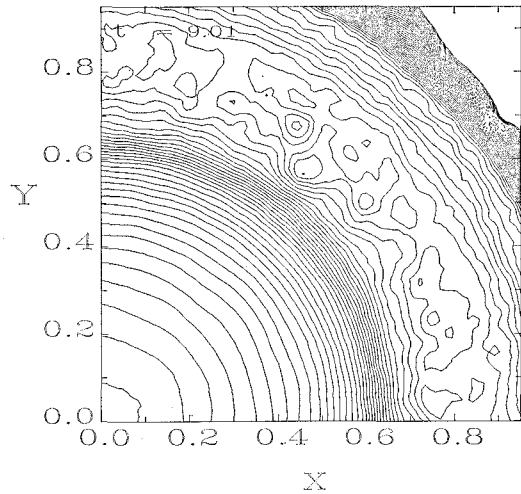


図 2 準安定な blast wave 型超新星爆発。100 万体の SPH 計算例について x-y 断面での密度等高線を最大値の 10% 間隔で表示してある。

難しいことも、違いの一因と考えられる。我々は 100 万体の SPH で blast wave 解も求め、両者の識別をした (図 2)。

ところで、SN 1987A の観測とさらに正確な比較を行うためには、理想的なポリトロップでなく、現実的な巨星の構造を初期条件にとり、非球対称爆発の発展を調べることが重要になる。星の外層構造はその全体的な密度勾配の他に、エントロピーや元素組成の大きくかわる不連続境界で特徴付けられる。分子量のギャップがある不連続面では逆行衝撃波が発生し、その減速領域で Rayleigh-Taylor 不安定が発生しやすい。本来、Rayleigh-Taylor 不安定は非圧縮流体の対流不安定と等価なもので、あえて区別する必要はないのだが、ここでは不連続境界での不安定性を Rayleigh-Taylor 不安定、構造の全体にわたる不安定性を対流不安定と呼ぶことにする。Arnett 達の二次元メッシュ計算によると、Rayleigh-Taylor 不安定が非線形まで成長すると、境界が変形してマッシュルームの傘のような構造が伸びていく (図 3)。ただし、外層に初期、数%程度の密度ゆらぎがどうしても必要であり、その起源を理論的に説明することはまだできていない。また Rayleigh-Taylor 不安定によって励起される乱れた速度場は、観測値の三分の一程度にしかない。

対流不安定になる bubble 解は、特定の等密度面で見ると膨張殻の上に穴があいたように見えることになる。この柱密度の薄いところを通して超新星を見ることにより、SN 1987A で早くからの X 線の増光が観測されたことも、一時期観測されたパルサーがその後見えなくなったことも解釈できる。対流不安定による膨張殻の分裂も、Rayleigh-Taylor 不安定による柱密度の濃淡も、SN

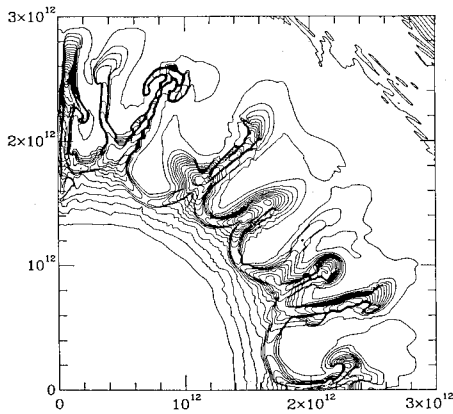


図3 超新星爆発の密度等高線。現実的な星のモデルによる軸対称二次元計算例。380×380の円筒座標計算例について密度を最大値の5%間隔で表示してある。初期条件の密度ゆらぎは10%である。H-He境界面のRayleigh-Taylor不安定の成長が見える。Arnett他 *Astrophysical Journal*, 341, L63 (1989) より。

1987Aの観測を定性的には説明することができるのである。ところが、物質混合の問題となると、膨張殻全体が対流不安定になる bubble 解に比べて、境界面近傍でのみ混合が期待できる Rayleigh-Taylor 不安定では明らかに定量的な違いがある。SN 1987A で起きた物質混合がどちらの解に起因するものだったのかは、今後、現実的な星のモデルでの三次元計算が積み重ねられていくにつれて、はっきりしてくるだろう。ただし、非球対称ゆらぎの起源を考えると、Rayleigh-Taylor 不安定では星

の外層にゆらぎを用意しなければならない困難がある一方、bubble 解なら最初の発生現場つまり、重力崩壊していくコアにゆらぎの原因を求めることができ、高速回転するパルサーなど中心の非球対称性を示唆する有利な状況証拠は多いと思われる。

3. 超新星実験室

太陽以外の天体で初めて観測された歴史的なニュートリノは、SN 1987A 中心の重力崩壊の現場を我々に伝えてくれた。そして世界で初めてなされた超新星の三次元シミュレーションも、複雑な対流運動をして分裂していく超新星の描像を与えてくれた。また bubble 解と blast wave 解の存在は超新星全体の構造が、中心の特異点つまり重力崩壊の現場から切り離しては考えられないことを我々に教えてくれたのだった。

我々が知る天体の観測量の中でも、空間構造の情報は、今後色々な波長域で精密化されることが期待される。超新星の理論の正しさの多くは SN 1987A で証明されたが、我々は新たに、超新星の「形」は単純なる球ではないということを知った。球対称の世界に住んでいた理論家の思考は三次元空間に解放され、「形」、つまり分裂や境界面の変形が定量的に結論を変えてしまうことを思い知らされたのである。計算機実験では無次元の数字しか扱えないから、そこから新たな自然現象を造り出すことはできない。しかし、我々の眼は今、大きく広がった超新星の中から、重力崩壊していく星の中心部や衝撃波発生現場の情報を、スーパーコンピュータを通して確実に見出し始めている。(長沢幹夫)

お知らせ

国際会議

「宇宙初期における元素合成と初期宇宙の進化」

主催：国際純粋・応用物理学連合（開催責任者 佐藤勝彦）

後援：日本天文学会、日本物理学会

期日：1990年9月4日（火）～8日（土）

場所：東京大学山の上会館（〒113 東京都文京区本郷7-3-1 電話 03-812-2111）

科学組織委員会：J. Audouze, J. R. Bond, E. Kolb, P. J. E. Peebles, M. Rees, H. Sato, K. Sato, J. Silk, D. N. Schramm, A. A. Starobinski, G. Steigman, R. A. Sunyaev, A. Szalay

国内組織委員会：荒船次郎、福来正孝、早川幸男、池内了、小平桂一、前田恵一、森田正人、岡村定矩、佐藤勝彦、佐藤文隆、田中靖郎、内田豊、山崎敏光、吉村太彦

内容：元素合成のみにとらわれず、宇宙論全般にわたって広く議論する。

I. 宇宙初期（宇宙の創生、ワームホールと宇宙項、インフレーション、バリオン非対称・密度揺らぎの生成、相転移と位相的欠陥、等）

II. 元素合成とその周辺（核反応率、中性子寿命、軽元素の観測、QCD 相転移と非一様宇宙での元素合成、元素合成による素粒子モデルへの制限、等）

III. 観測的宇宙論と銀河の進化（宇宙論的パラメータの決定、銀河形成、宇宙背景輻射、銀河の化学進化、AGN、QSO の進化、等）

招待講演者（予定）：A. D. Dolgov, E. Kolb, A. A. Starobinski, M. S. Turner, J. Audouze, W. A. Fowler, G. Steigman, C. Hogan, J. Madsen, D. N. Schramm, J. R. Bond, M. Rees, A. Szalay, J. Silk, E. Turner, ...

参加予定者：150名

参加登録料：2万円

収録：刊行する。招待講演、一般発表ともに掲載。

参加・発表申込締切：1990年3月31日

申込先：A4版の用紙に、1. 氏名、所属機関、連絡先、2. 発表（口頭、ポスター）希望の有無（希望の場合は題名も）、3. 電話番号、電子メールアドレスをご記入の上、下記事務局宛お申込下さい。

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

東京大学理学部物理学教室

横山順一 (IUPAP Conference)

電話 03-812-2111 内線 4191