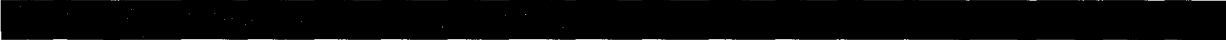


# 特 別 講 演







特別講演 1

永 嶺 謙 忠

特別講演 2  
(PLENARY LECTURE 2)

G. R. CHOPPIN

(東大・理、理研) 永嶺謙忠

## 1. はじめに

数多く発見された素粒子の中で、電子や陽子などの安定なものを除くと、中性子(寿命:約1000秒)の次に寿命の長いものがミュオン(寿命:2.2マイクロ秒)であり、パイオン(パイ中間子、26ナノ秒)がこれに続く。加速器技術の進歩によって、15年程前から、このミュオンを大量に作り出して、様々な研究が行われるようになってきている。このミュオンは正と負の $\mu^+$ 、 $\mu^-$ と呼ばれる2種類があり、それぞれ軽い陽子(質量1/9倍)、重い電子(質量207倍)と考えて基本的な性質の大半を理解することが出来て、ここでは $\mu^-$ を対象とする。ミュオンは、パイオンが死ぬことによって生まれる。ミュオンは次のようにして発生する。まず良質にして高強度の陽子や重イオンを300MeV以上のエネルギーでBeやLiの原子核にあてる。その結果、パイオンを生じ、それが崩壊してミュオンが生まれる。原理的には1 GeV (109電子ボルト)の重陽子から0.20~0.25個の $\mu^-$ が生まれ、それを利用することが出来る。即ち1個の $\mu^-$ を生むのに4~5 GeVのエネルギーが必要となる。

## 2. ミュオン触媒核融合 (Muon Catalyzed Fusion, $\mu$ CF) 現象とは何か

平成元年春から大きな話題を呼んでいる電解などによる物質内核融合(別名、常温核融合)は、高温を必要としないで核融合反応を起こす現象の一つとしてとらえることが出来る。そもそも核融合反応とは、二つの水素同位体核を $10^{-13}$  cmの距離まで近づけると核力(引力)が働き起こる現象である。この際に、二つの水素同位体核が同じ正の電荷をもっているために、電気的な反発力を及ぼし合いクーロン障壁が生じ、なかなか近づくことが出来ない。いわゆる高温(熱)核融合では、二つの水素同位体核(重水素Dや三重水素T)を1億度を越える高い温度に熱することによって、熱エネルギーの助けでこの障壁を乗り越え、核力の到達距離まで二つの核を近づけることを狙う。 $\mu$ CFなどの低温核融合(広義の意)では、クーロン障壁に対して上とは異なったアプローチをする。いま電子よりも質量の大きい負の電荷を持つ粒子を導入して、二つの水素同位体核の一つにまきついたとしよう。このときできる大きさ $R_0$ の中性の状態では、電気的反発力が中和され、二つの核が近づくことが出来る。この際に、粒子の質量が重いほど $R_0$ は小さく、融合反応が起こり易い。この目的にかなった負の電荷を持った粒子(素粒子)が、ミュオンである。

ながみねかねただ

ミュオンを液体水素の密度 ( $4.25 \times 10^{22}$  原子核/cm<sup>3</sup>) に近い高密度のDと三重水素Tの混合加圧気体または液体中に入れた場合のミュオン核融合を考えよう。打ち込まれた $\mu$ は減速され熱エネルギーとなり、電子と入れ代わり水素原子の1/207のサイズを持つミュオン原子 ( $t\mu$ )、( $d\mu$ ) をつくり、その基底状態に至る。この間の時間は約 $10^{-10}$  sである。生成した ( $t\mu$ )、( $d\mu$ ) 原子は、小さな固い原子と云うことが出来る。 ( $t\mu$ ) は ( $d\mu$ ) に比べ基底状態のエネルギーが48 eVだけ深いので、( $d\mu$ ) は周囲のDT、T<sub>2</sub>中のtと衝突して、( $d\mu$ ) + t → ( $t\mu$ ) + dの様な ( $d\mu$ ) から ( $t\mu$ ) へのミュオン移行反応が $10^{-6}$  sで起こることが知られている。

電氣的に中性な ( $t\mu$ ) は周囲のD<sub>2</sub>あるいはDTと衝突する際に電子雲をくぐり抜け、d核に近付き、 $\mu$ がtとdの周りをまわる ( $dt\mu$ ) というかたちの分子状態をつくるのが期待される。幸い ( $dt\mu$ ) の分子状態に0.6 eVもの浅い準位があり、その準位からのミュオン分子生成とD<sub>2</sub>、DT分子の電子状態の励起とが共鳴するかたちで、 $10^{-10}$  sの速さで複合分子 [( $dt\mu$ ) d 2 e] などの形でミュオン分子 ( $dt\mu$ ) が生成される。

ミュオン分子 ( $dt\mu$ ) の大きさは $5 \times 10^{-11}$  cmであり、分子の振動運動の助けをかりて分子内で核融合が急速に起こる。その結果、中性子と $\alpha$ 粒子 ( ${}^4\text{He}$ の原子核) とが発生する。分子内核融合の速さは $10^{-12}$  sのオーダーであることが知られている。このとき自由になったミュオンはまた次の反応へと向かう。かくして、ミュオンは次々と連鎖的に核融合を起こしてゆく (図1)。ミュオンの寿命 $2.2\mu$  sの間に、何回核融合が起こるかについては、融合反応後に生まれる $\alpha$ 粒子にミュオンが付着する割合、即ちアルファ付着率 ( $\omega_s$ ) で決る。 $\alpha$ 粒子にミュオンがとらえられると、核融合の連鎖反応はとまる。したがってミュオン核融合では、アルファ付着率をいかに低く抑えるかがカギとなる。エネルギー生産の原理的な限界は $\omega_s^{-1} \times 17.6\text{MeV}$ となる。

このアルファ付着現象を直接とらえて、 $\omega_s$ を求める実験が東大—理研—原研のグループにより、高エネルギー物理学研究所 (KEK) 内東京大学中間子科学研究センター (UT-MSL/KEK) において成功をみた。この実験では、極低温 (20 K) で1 ccの液体D-T (トリチウム混合比: 30%) に対し、パルス状ミュオンビームを打ち込む。融合中性子 $\mu$  1個当り100個程度をとらえたうえで、アルファ付着現象の結果生ずる ( $\mu\alpha$ ) 原子からのX線をとらえた (図2)。このX線について、エネルギーの中心値、ドップラー幅、強度の時間変化等を慎重に調べ、アルファ付着現象からの信号であることが確認された。このX線の強度から $\omega_s$ が0.3%程度と結論された。

$\omega_s$ が決まるとミュオン核融合によるエネルギー生産の上限が決まる。 $\omega_s$ が0.3%程度では、上限は $5.8\text{GeV}/\mu$ となりブレイクイーブン条件 (ミュオン1個がミュオン核融合で作出すエネルギーがミュオン1個を作り出すのに必要なエネルギーと同じになる) までゆける。我々のX線測定の結果は、その条件に達する可能性がある事を示している。但し、この議論には加速器やエネルギー変換機器でのエネルギー消費が考えられておらず、更に2~3倍の効率向上が必要となる。

### 3. $\mu$ CF現象で何が判っていないか

図1の高密度高トリチウム濃度D-T混合系に対する $\mu$ CFサイクルにおいて次のような点が明らかになっていない。

#### a) $\mu$ CFにおける原子・分子反応過程は熱エネルギー反応か

( $d\mu$ ) や ( $t\mu$ ) の生成や移行反応、さらには ( $dt\mu$ ) 分子の生成反応は、0.1 eV以上もの高エネルギー反応である可能性がある。

#### b) 原子・分子反応は ( $d\mu$ ) や ( $t\mu$ ) のどの原子状態は何か

( $d\mu$ ) や ( $t\mu$ ) がミュオン原子の基底状態に達する以前に移行反応などが起こっている可能性がある ( $q_{1s}$ の問題)。

#### c) 残留 $^3\text{He}$ の効果は何か

Tの崩壊による宿命的な $^3\text{He}$ の累積に対して、( $d\mu$ ) や ( $t\mu$ ) からの移行反応が急速に進む。この効果をとりに除かないと $\mu$ CF現象の真の姿は判らない。

#### d) ( $dt\mu$ ) 分子生成率、アルファ付着率は理論的にはどう理解するか

( $dt\mu$ ) 生成のゆるやかな温度依存性や、多体効果を思わせる密度依存性は理解されていない。また、0.3%という低いアルファ付着率もごく最近の発展を除くと全ての理論予測と異なっている。

### 4. $\mu$ CF現象の発展性

$\mu$ CF現象は、エネルギー生産の目的だけでなく、色々な応用性・発展性を秘めている。まず $\mu$ CFは、強力な単色の14MeV中性子の発生源と考えることが出来る。適切な実験ファシリティをつくることによって材料照射による放射損傷、核融合炉におけるブランケット、原子炉からの長寿命RIの消滅処理、等々の研究に利用されることが期待される。

最近、筆者等は、ミュオン核融合現象が10keV領域の低エネルギーミュオン源として利用できる事に気が付いた。図1における分子内核融合反応の後、ミュオンは10keV程のエネルギーで自由になる。更に、この自由化がミュオン当り100回以上も繰り返される。従って、図3のような状況を考えると、数MeVから10keVへの効率のよい速度変換器が作れる。この方式は、昔から知られている、Tを含む液体 $\text{H}_2$ 中に高エネルギーミュオンを止めると( $t\mu$ )原子が長い飛程を持つ事実と組み合わせると、100%近い効率で数MeVのミュオン10keV程に変換出来る。この強力低速ミュオン源を使うことにより、コンパクトで密度の高い核融合炉が実現される可能性がある。

### 5. 常温核融合と $\mu$ CF現象

昨年末から研究されてきた、物質内低温核融合の研究の現状に関する私見を述べると、次のようになる。

1. 中性子放出を伴う物質内核融合はある条件下では起こる。
2. 条件がなんであるかについて理解に近づいているグループは存在する。
3. 然し、いかなるグループも物質内核融合が起こる瞬間を予測することは出来ない。  
すなわち、核融合反応のトリガーが判らない。

これらの物質内低温核融合に関して、これまでに提案されてきた説明として、次のようなものがある。

- (イ) 低温核融合による中性子発生はPd、Ti金属の伝導電子の性質による
  - (ロ) 低温核融合による中性子発生は宇宙線のミュオンによる核融合反応である
  - (ハ) 低温核融合による中性子発生は物質内結晶の不整合によって生じた電場による核融合反応である
- (ニ) 低温核融合による熱発生は新しい化学反応である

どれも決定的なものとされていないが、筆者としては次の現象をとらえることをkey pointとして考えている。

1. Dがクラスターの金属中に高密度で存在することがあるか。
2. Dが金属中で加速されることがあるか。

特に、2. があり得ないとすれば、1. の可能性が重要であり、筆者等は、中性子発生に成功したグループと協力し、その試料について負ミュオンによる検証を進めている。すなわち、Dクラスターが金属内に存在すれば、(dd $\mu$ )系の $\mu$ CFが大きな確率で起こるはずである。

## 6. 周辺のミュオン科学の話題

ミュオンの作る“小さく固い”原子は、通常の電子原子に比べると207倍高いエネルギーの透過力の強いX線を出す。しかも、“水素原子状”の軌道をとるので、X線のエネルギーから原子の固定が容易である。

このようなミュオン原子からの信号を使って、次のような手順で、ミュオンによる非破壊元素分析が可能である(図4)。

- (1) ミュオンビームのエネルギーを出来るだけそろえ、外側におかれた減速材(飛程調節器)の厚さを換え、ミュオンの止まる深さを予め知っておく。
- (2) ミュオンビームが物質にあたる際に、ビーム方向と垂直な面上の位置をビームを細分化(コリメーション)することによって知っておく。
- (3) ミュオンが止まる深さと位置を色々と換え、各々の場所についてミュオン原子X線を測り、元素分析を行う。

負ミュオンの止まる場所はミュオンビームのコリメーションと試料の直前に置かれた飛程調節器によって5ミリメートル以上の精度で決めることが出来る。さらに、ミュオンがX線を出した後に、ミュオン原子の基底状態から死滅する際に出す電子の方向を逆に辿ることにより、もっと精度よく決定できる。かくして非常に貴重な物質試料、さらには生体内の各器官の非破壊的元素分析が可能となる。医学診断において重要な応用例として次のようなものがある。

(a) 生体内の脳や臓器などの局所的な場所での、水の分布と脂肪の分布とを分ける。  
 (b) 骨ソシヨウ症（背骨中のCa）や老人性痴呆症（脳中のAl）等、生体各器官での元素の定量化によって診断を行うことが出来る。(b)の点について筆者らは、坂本澄彦教授（東北大）との共同研究を行っている。

一般に、非破壊元素分析には、他にいくつかの方法が実用化されている。中性子放射化法は古くから行われてきたが、ミュオン法に比べ位置分解の能力が劣る他、物質を放射化して残すという欠点がある。また、PIXEという、陽子ビームなどの照射に伴うX線を測る方法は、ミュオンに比べて物質の表皮部分のみの分析に限られてしまう欠点がある。

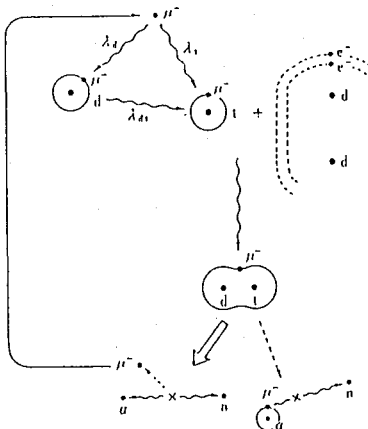


図1 D-T系 $\mu$ CFの原理図

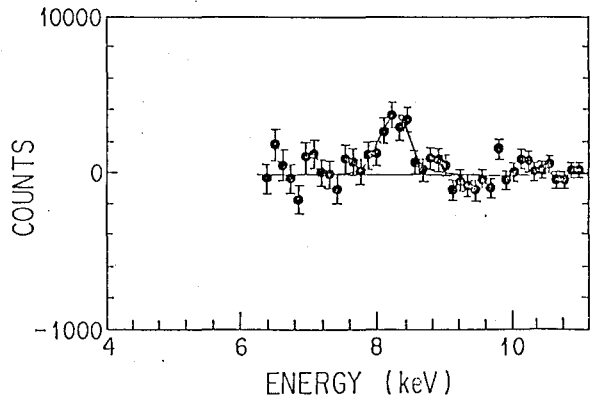


図2 アルファ付着現象による $(\mu\alpha)$ 原子からのX線

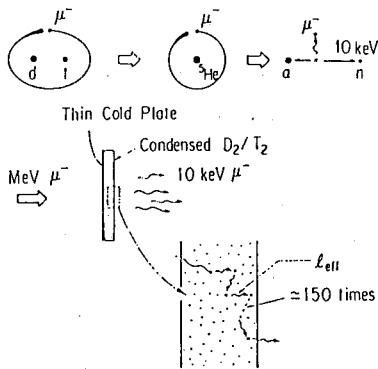


図3  $\mu$ CFより低速 $\mu$ を得る原理図

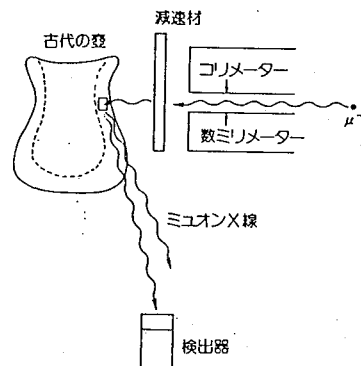


図4 ミュオン原子X線による非破壊元素分析

PRESENT STATUS OF MUON CATALYZED FUSION AND RELATED MUON SCIENCES

Kanetada NAGAMINE, Faculty of Science, University of Tokyo (UT-MSL) and Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)





## FUTURE TRENDS IN RESEARCH IN TRANSACTINIUM ELEMENTS

G. R. Choppin, Department of Chemistry, The Florida State University, Tallahassee, Florida 32306, USA

Fifty years ago this irradiation of  $U_3O_8$  by deuterons in a cyclotron produced the first atoms of a new synthetic element - plutonium. Within a few months, further irradiations led to isolation of plutonium and within 2 years, enough of this new element had been made that it could be isolated as a pure compound - the first synthetic element to be made in sufficient quantity to be seen. Since that first observation, plutonium has been produced in kiloton amounts.

The production of new transuranium synthetic elements has continued and there are now 17 known - from  $Z=93$  to  $Z=109$ . The isotopes of the transactinide ( $Z>103$ ) elements are characterized by very short lifetimes and small formation cross sections. As a result, only a few atoms are produced in an experiment and chemical investigations must be designed on a "one-atom-at-a-time" basis.

These chemical studies represent frontier achievements. For example, with fast liquid extraction chromatography, 104 has been shown to have behavior similar to Hf in forming strong anionic chloro complexes. Studies with 105 (26 atoms made in nearly 1000 bombardments) confirmed its similarity to Nb and Ta. Large international collaborations continue to seek to make new elements and to study the nuclear and chemical properties of those already known.

While the extension of the Periodic Table continues to be a fascinating and fruitful research area, much greater attention is

being given to the chemical behavior of the lighter actinides of importance in nuclear power. Plutonium, in particular, is not only, of great importance for its value as a power source but also because of its potential as a long term hazard in nuclear waste disposal. There are opportunities for valuable and interesting research in many areas - solid state, metallurgy, spectroscopy - but in this lecture, only chemical research is discussed.

In June, 1990, a workshop on research on transactinium elements was held in Berkeley, California, by the University of California and the Lawrence Livermore National Laboratory. The Chemistry Panel developed the following list to indicate some of the more exciting areas for future research:

1. Study of the thermodynamics and kinetics of actinide reactions in aqueous and nonaqueous solution at elevated temperatures and pressures.
2. Development of improved preparation techniques with a special emphasis on high purity and miniaturization.
3. Redox, complex and structural speciation in widely varying aqueous media (i.e., I, pH, Eh, temperature).
4. Development of chemical and physical studies of organometallic compounds as a function of oxidation state and position in the periodic table to make clear the connection between 5-f and the d transition metals.
5. Elucidation of actinide bonding and chemical transformation in bioinorganic systems.
6. Development of selective sequestering agents for actinides.
7. Use of actinide ions as probes of chemical and physical systems.

These topics are briefly reviewed in the lecture to reflect the nature of research within each area.

