素粒子を応用したラジオグラフィー

カリフォルニア大学物理研究員 東京大学名誉教授

永嶺 謙忠



本日は大変名誉ある講演会にお招きいただきましてありがとうございました。私は長らく東大とKEKで実験室を持ちながら研究をして、その途中に理化学研究所と兼任になりましたが、3年ほど前に退官して、現在はカリフォルニア大学リバーサイド校で研究を続けております。

本日は、素粒子を応用したラジオグラフィーという比較的新しい話題の話をさせていただきます。ラジオグラフィーという言葉は耳慣れない言葉と思いますが、この話の中ではかなり拡張してラジオグラフィーという言葉を使います。それと申しますのも、私の私見では科学には二つ立場があって、一つは観察で、いま一つは観察して得た色々な知識や法

則をベースにして自然に挑んで創造していくことで、観察と創造という立場があると考えています。そのうちの観察、別の言葉で分光とか分析とも言いますが、その科学的な観察を、空間分解性を加えて測ることをラジオグラフィーと名づけたいと思います。イメージングとかトモグラフィーと言われる観察手法も含めます。

初めにお断りしておきますが、この分野は世界的にそれほどたくさんの人がやっているわけではなくて、主として私どもが始めたことが中心になります。客観性を持った話を準備することを心がけますが、あまり

うまくいかないかもしれません。

ラジオグラフィーの代表例はレントゲン写真撮影の 真です。皆さんは毎年レントゲン写真撮影の 機械の前にお立ちになると思いますが、レン トゲンはエックス線を人体にあてることから 始まり、そのエックス線は、電子を加速して 重金属の標的にあてて出します。

レントゲン写真のエックス線はどのような 性質を持っているのでしょうか。横軸にエネ ルギーを取って縦軸に強度を取り、エネルギ ースペクトルとして示しますと、図1の形を していますが、これが人体を通るときに適切 な減り方をします。エネルギーによって減り 具合が変わる性質を使って、骨とか、筋肉を 区別できます。これがレントゲンの原理です。

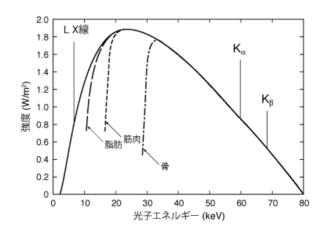


図1 人体のレントゲン写真に使われるタングステン金属 にエネルギー80keVの電子を照射して得られるエック ス線のエネルギースペクトル。脂肪、筋肉、骨に止 まることで低いエネルギー成分が消失する。

「素粒子ビームによるラジオグラフィー。 革新的なレントゲン写真の実現」と表題にい たしましたが、エックス線ではない素粒子ビ ームを使って実現する新しいレントゲン写真 の話を中心にいたします。素粒子としてはミ

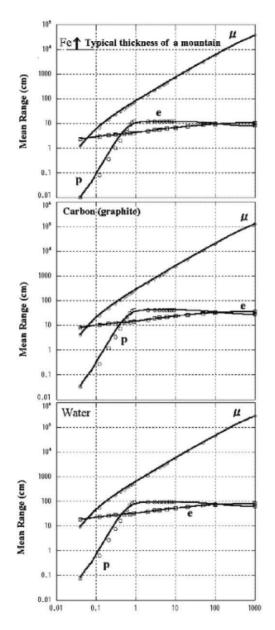


図 2 10MeV (0.01GeV) から1000GeVまでのエネル ギーを持つ電子 (e)、陽子 (p)、ミュオン (μ) が鉄、炭素、水中でエネルギーを失い止まるま での距離; 飛程。各エネルギーで粒子が止まり だし透過強度が 1/eとなる厚さを示す。

ユオンという素粒子を主として扱います。ミュオンという名前はたぶん半分ぐらいの人は 初めて聞くのではないかと思いますが、この 講演で親しみを増して頂ければ幸いです。後 で詳しく申し上げますが、ラジオグラフィーには透過型と反射型があります。ミュオンという素粒子を使うと、「巨大物質の透過像が宇宙線ミュオンで見える。マクロからミクロまでの反射像が加速器ミュオンで見える」ということで、これまで見えてこなかったものが見えるようになります。

すでに永宮先生からお話がありましたが、物質はクォークとレプトンでできていて、レプトンの中で最も知られているのが電子で、加速器や宇宙線でミュオンというレプトンが得られます。そのミュオンをこれからもっぱら対象にします。

ミュオンとは、1937年に宇宙線の中で発見された素粒子で、現在では加速器を用いて大量に生成されます。プラスとマイナスの電荷のものがあり、質量は陽子の9分の1、あるいは電子の207倍で、寿命は2.2マイクロ秒です。

安定な陽子、電子、ニュートリノを除き、中性子の次に寿命が長い粒子がミュオンです。 私どもは「20世紀は中性子の世紀で21世紀は ミュオンの世紀である」と思っていますが、 それは主として寿命が長くて使いやすい粒子 であるためです。

ミュオンは構造がないまさに素粒子で、電子と同じようにどこまで小さくしても点です。 周囲の原子分子との相互作用は、電磁気的な相互作用が主体です。物質中のミュオンの持つ性質は非常に分かり易く、電気的な性質だけが利くので、正ミュオンを軽い陽子、負ミュオンを重い電子と考えて、理解することができます。

加速器でミュオンを得るには、まず加速器からの高エネルギー粒子を原子核に衝突させ、 湯川中間子とも呼ばれているパイオンを生みます。そのパイオンが26ナノ秒で崩壊してミュオンになります。ミュオンは2.2マイクロ 秒たつと死んで電子とニュートリ ノになります。

さて、ラジオグラフィーをやる のに何がミュオンを特徴づけるか ということですが、ミュオンのエ ネルギーを高くさえすれば大きな 物質を透過することができます。 図2は水、炭素、鉄などの代表的 な物質の陽子・電子・ミュオンの 通りやすさを示しています。横軸 はエネルギーで、1 GeVは10の9 乗電子ボルトという、電池を7億 個(長さで地球の半径程度)並べ たような非常に高いエネルギーで す。縦軸は飛程と呼ばれる量で、 粒子のエネルギーが失われて先に 進めなくなり、粒子の強度が1/e (e:自然対数=2.71) に減少する量 を示します。陽子、電子、とミュ

オンを比べています。この図から一目瞭然なように、水なら1 mぐらい、炭素なら30cmぐらい、鉄なら10cmぐらいのところでエネルギーを上げても陽子や電子は止まってしまいます。電子は軽い質量のため光に変わり、陽子はエネルギーが高くなると核反応して陽子ではなくなってしまうためです。ところがミュオンは、質量が電子の200倍重く、核反応を起こさないので、エネルギーさえ上げればどんどん透過します。たとえば岩山では100mでも1kmでも行けるし、鉄なら数10メートルを抜けられるという優れた性質があります。

図3でミュオンがどのようにどれ位のエネルギーと強度で得られるかまとめています。 横軸にエネルギーを取り、縦軸にミュオンの 強度を取って「このへんが使える強度だ」と いう領域を青い線で示しています。ミュオン のエネルギーが決まると、たとえば炭素の中 でどのくらい先に透過するかということが計 算で求められ、keVではマイクロmぐらい、 MeVではmmぐらい、百GeVでは100mぐら いになります。

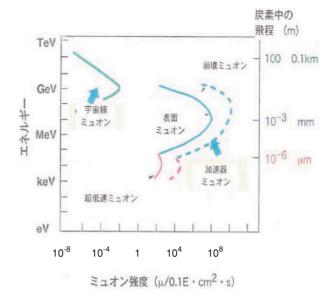


図3 ラジオグラフィーに利用できる宇宙線ミュオンと加速器 ミュオンの持つエネルギーと強度の目安。エネルギーに 対応する炭素の飛程を示す。

J-PARCをはじめとして加速器で得られるミュオンはMeVから100MeVの領域で、強度は非常に強いけれども、抜ける距離は数10cm程度までになります。それを超えて長い距離を抜けるレントゲン写真を撮ろうとすると、いまのところは宇宙線ミュオンということになりますが、強度が弱く、時間がかかります。

先ほどご紹介がありましたように、J-PARCはうまく使うと強い強度でもっと厚い物体を対象にすることができるので、新しいラジオグラフィーができると期待されます。そのことは後で申し上げます。

お手元の資料(図4)にもありますように、 波源であるミュオンを色々なエネルギーにす ることによって、火山、溶鉱炉、建造物、人 体・脳、さらにナノ材料にも使えるというこ とを、これからお話しします。

まず火山から始めます。火山は文字どおり 分厚くて、山頂近辺では厚さが数百メートル、 数キロメートルありますので、図3から明ら かなように宇宙線ミュオンを使うことになり ます。溶鉱炉もだいたい宇宙線を使いますが、

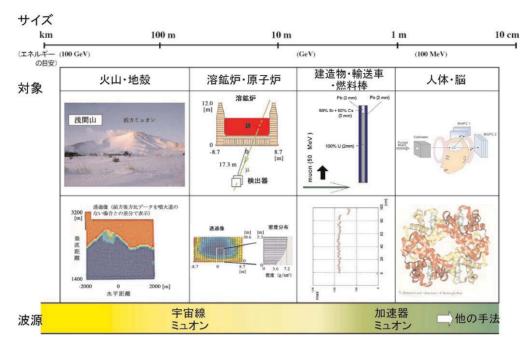


図4 ミュオンラジオグラフィーのまとめ。ミュオンのエネルギーに対応して対象物の 大きさが決まりそれに応じて、宇宙線と加速器とを使い分ける。

これより小型の物は加速器を使うことになります。

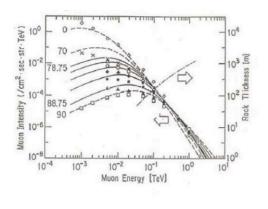
宇宙線ミュオンのエネルギーが高い理由は、 星と星の間に電波があって、その電波に波乗 りをするかのごとく陽子が加速され高いエネ ルギーとなり、その陽子が大気にぶつかりま す。すぐに核反応を起こして、パイオンが生 まれて、一部がミュオンに変わります。ミュ オンには電気的な力とは弱い力しか働かず、 核力が働かないのでそのまま地表に降ってき ます。大気圏の上部で生まれたミュオンは、 エネルギーが高く高速のため相対性理論によ り寿命が延び地表に届くまで殆ど死滅しませ ん。

この宇宙線ミュオンは、地上で手の平を広げると、真上から1秒に1個、横にしても1,000秒に1個程飛来します。これは環境放射線として、われわれが常に浴びている粒子で、時間はかかりますが、ラジオグラフィーには、何処でも、何時でも、使えます。

宇宙線のミュオンの性質を、少し詳しくお

話しします。図5は、宇宙線ミュオンの強度がミュオンのエネルギーとともにどのように変わるかを示すエネルギースペクトルです。真上から来るものを天頂角0度と言い、真横から来るものは90度ですが、天頂角によってスペクトルが変化します。このスペクトラムはパーセントの精度では地表のどこでも同じです。また空から降ってくるので、大気の湿度によりますが、パーセントの精度では変化は無視できます。

このエネルギースペクトルを持つ宇宙線があって、たとえば岩石を通過させると、その岩石が250mあるか、500mあるか、750mあるか、1,000mあるかで、図5のように、減り具合が変わります。まさに図1に示した人体のレントゲン写真の時と同じように変わります。この減り具合を、後に示す図7のように、位置を分割させながら見ることによって、岩石で出来た火山の数百メートルからキロメートルのラジオグラフィー、レントゲン写真が撮れます。



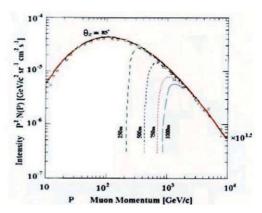
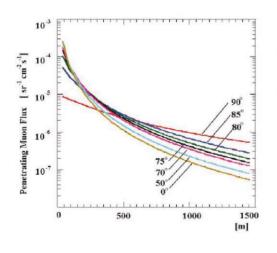


図 5 宇宙線ミュオンのエネルギースペクトルの天頂角依存性(左)と天頂角85度のスペクトルが岩石の厚さの増加に応じて低いエネルギー成分が消失する(右)。

より正確に描いたのが図6です。天頂角を変えると炭素、岩石、みな同じ2g/cm³位の密度を持ちますが、透過する宇宙線ミュオンの強度の変わり方と、鉄(密度7.9g/cm³)の場合を示します。鉄なのか炭素なのかということの不定性が残りますが、鉄とわかっているところで見る限りは何割減ったかということで鉄がどれぐらいあるか、火山だとわかったら火山の岩石がどれぐらい詰まっているかがわかります。

宇宙線ミュオンを使って、巨大物質の中を 見るということは、最初に米国のアルヴァレ という物理学者が、エジプトのピラミッドの中に隠された墓室を探すために、ピラミッドの中にある地下道のど真ん中にカウンターをおき、上から降ってくる宇宙線ミュオンを使った1970年の実験が有名です。

私どもはそれに対して、水平すれすれに横から来る宇宙線ミュオンを使うことに挑戦して、実験手法を完成させることができました。水平宇宙線ミュオンのラジオグラフィーには幾つかの利点があります。まず第1に水平宇宙線ミュオンは、図5と6から判るように、透過性が強いという利点があります。それか



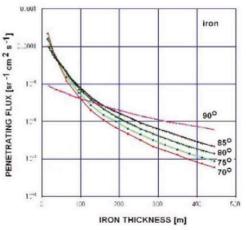


図 6 色々な天頂角から飛来する宇宙線ミュオンが、炭素(左)と鉄(右)を透過する 際の強度の変化量の厚さ依存性。

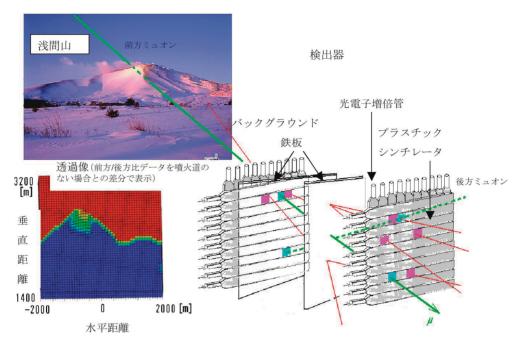


図7 浅間山の宇宙線ミュオンラジオグラフィーの測定の様子と測定結果(左下)。観測には上下左右に10分割された1m四方のプラスチックカウンター2面を使用し、真ん中に鉄板をおきバックグラウンドを除去している。

ら何よりも優れていることは、対象物の下にトンネルを掘る必要が無く、活動している火山などの対象物をそのままにして観測できることです。さらにカウンターを対象物の周囲にいかようにも配置できるので、トモグラフィック3次元観測が可能になります。

一方、垂直宇宙線ミュオンに比べ水平宇宙線ミュオンは強度が弱く、バックグラウンドが大きいという困難があります。時間がないので省略しますが、私どもはこれらの困難を乗り越える実験技術を開発しました。

活火山である浅間山を例をとって、火山のレントゲン写真をご紹介します。浅間山の北に浅間園という群馬県の施設があり、そこの駐車場に測定器を置き、図7のように、縦横に10分割された1m四方の測定器を置き浅間山を透過する宇宙線ミュオンを捕えました。

測定器が細分化された2枚のプラスチック カウンターで、それぞれのカウンターの通過 位置をたどって山の何処を通過したかわかり ます。山の通過位置で座標を決めながら、通 った宇宙線がどう減少していくかということ でレントゲン写真を撮りました。

図7は、4ヶ月間の観測実験データを処理してコントラストを上げ、ミュオンの透過強度を山の座標で示しています。強度の高い部分で浅間山の外形の輪郭が見えています。その中にハッキリと噴火道が透けて見えています。2002年の段階では、噴火道中のマグマの占有率はゼロです。即ち航空写真で見えている噴火道と同じです。噴火中では見えない噴火道中にマグマが上がってきていないという結論を出しました。これが2002年の測定結果です。

2004年に爆発がありました。この火山研究の最大の協力者であった田中宏幸氏は、現在東大地震研で研究を発展させていて、図7のデータに比べて、噴火が終わってみたらマグマが上がっていて、さらに下部に密度の薄い部分があり、噴火道の中が空洞になっていることを発見しました。田中宏幸氏は、名古屋大学で開発された荷電粒子の原子核写真乾板

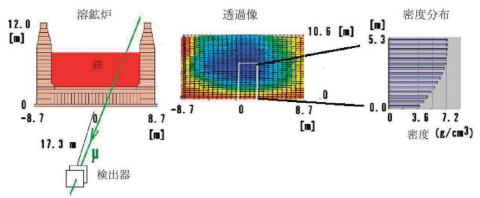


図8 溶鉱炉の宇宙線ミュオンラジオグラフィーの測定の様子(左)、ミュオン透過強度の溶鉱炉断面 についての強度分布(中)及び中央部分の上下密度分布(右)。

を使うことを提案され、安価でコンパクトな 測定器系を実現し、良い結果を得ています。 田中宏幸氏をはじめとして東大地震研、名古 屋大学、北海道大学からなる研究グループが 作られ、北海道にある有珠山、薩摩硫黄島へ と進展していると聞いています。

すぐに火山噴火予知に繋がるかどうかはと もかくとして、いままで無かった新しい知識 が宇宙線ミュオンを使って得られつつあると いうことは確実です。宇宙線ミュオンの透過 像のデータを蓄積させることにより、火山噴 火予知のための貴重なデータベースとなる可 能性があります。

次は溶鉱炉のような大型産業機器のラジオ グラフィーです。特に宇宙線ミュオンで、稼 働中の高炉のレントゲン写真を撮るというテ ーマです。実験は図8のように、新日鉄大分 第2高炉という世界最大の生産量を誇る稼動 中の溶鉱炉で行いました。この溶鉱炉が何年 経ったら使用できなくなるのかの目安となる、 耐熱炭素レンガ炉壁の磨耗状況を見ることを 狙いました。2004年に初めて挑戦し、図8の 結果が得られました。透過する宇宙線ミュオ ンの強度が大きく減った鉄に対応する部分と あまり減らない炭素炉壁の部分とが区別でき ます。炭素炉壁部は密度にして0~5.3ぐら いのところに分布しています。炉壁がどれぐ らい減ってくるかを溶鉱炉を運転させながら 測ることが可能であること示すことができま

した。高炉を完全に円筒対称と仮定すると、だいたい一月半ぐらい測れば、この壁の厚さの決定精度が±5cmぐらいになります。十分に実用になります。

鉄の中がどうなっているかということも調べることもできます。薄い部分と濃い部分。密度分布が測れます。さらに時系列的に実験データを整理しなおすことにより、運転状況に応じた密度分布の変化を捕えることができます。溶鉱炉で一月に1.5日熱風を送るのを止める休風の期間に煮立った鉄が下に移動する様子が見えました。

これまで宇宙線の話をしてきましたが、加速器でミュオンをつくり、利用する話に移ります。エネルギーは低いが、強度は宇宙線の1億倍ぐらいになるので、デリケートなことがやれます。後に述べるように、放射線遮蔽体の中に置かれた核燃料棒の中のウランの残量が瞬時に判ります。

加速器ミュオンでミュオンをつくってどう やって使うのか例を図9に示します。これは 英国にあるラザフォード・アップルトン研究 所の中にあって、J-PARCができるまでは世 界最強の陽子シンクロトロンを利用していま す。ここに理化学研究所から実験施設をつく っていただいて実験研究をいたしました。左 から陽子ビームがやってきて、宇宙線と同じ ように、大気の代わりに炭素標的で核反応を 起こし、パイオンを生んで、それを6mの長

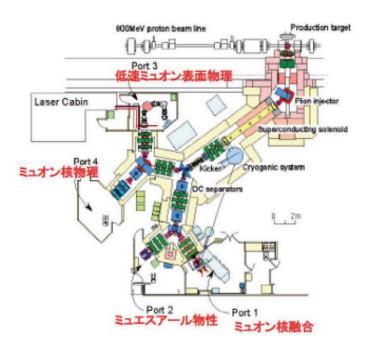


図9 加速器ミュオンを生み利用する実験施設の例。理研RALミュオン施設の場合。加速器は図面のずっと左にあり、運ばれた陽子ビームが図面右上のパイオン生成標的に当たりパイオンを生み、そのパイオンからミュオンを生む超伝導ミュオンチャネルと4つの利用実験ポートがある。

さの超伝導磁石の中を通し閉じ込めながら飛行させていくうちにミュオンに変わって、生れたミュオンを振り分けて色々な実験に使用します。この施設は、私どもがこの施設の10年ぐらい前にKEKでつくったものをモデルにしています。今度はこれをモデルにして、J-PARCでさらに大きな施設を建設中です。もうすぐビームが出ます(注;本年9月26日にファーストビームを発生)。

加速器からの大強度のミュオンビームを用いて色々なラジオグラフィーが可能になります。まず、透過する強度に加えて、透過するときの曲がり具合を測ることにより、元素線別レントゲン写真の瞬時撮影が実現します。レントゲン写真は密度の大小のみの白黒写真でしたが、元素線別のカラー写真を撮るにはどうしたら良いでしょうか。ミュオンが対象物を透過する際のエネルギー損失と、曲がり具合(散乱)を同時に測ると元素選別ができ

ます。図10に示しますように、対象物の厚さを表に出さずに、ミュオンがどう曲がり角度と エネルギーの失われ方との 2次元表示をすると、ウラン、鉛、鉄、みんな違識 したがって元素を識別しながら透過像が撮れます。

専用加速器をつくる必要があるのかもしれませんが、J-PARCに核燃料棒を持ってきますと、い同じようなように、同じようなように、同じよう鉛数10cmものギロスをきます。数10cmもの部厚い遮蔽体の中にどれるのできますが残った燃料棒の中にどれるがあいウランから関いで表発生した残りをすることができます(図

4の左から3番目を参照)。

これから加速器のミュオンを使って、図11の上右に示す反射型ラジオグラフィーという話をします。反射型というのは色々な意味がありますが、本当にミュオンが跳ね返ってくるのではなくて、ミュオンが止まって、止まったところから出す色々な信号を検知しながら中の様子を眺めるというスタイルの話に変わります。

これまではミュオンが物質を通り抜けるラジオグラフィーをお話しましたが、止まると一体何が起こるかを図11の下にまとめます。正のミュオンの場合は、金属中では水素原子核/陽子のように格子間の位置にそのまま止まり、半導体とか絶縁体になると電子を1個捕まえた水素原子と同じ状態になって止まる場合があります。この原子はミュオニウムという名前がついています。一方負のミュオンはすぐに原子核の近くに捕まって、そこで電

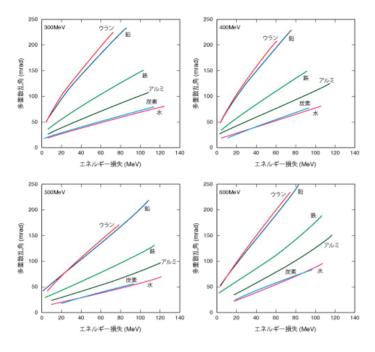


図10 色々なエネルギーのミュオンが色々な物質を通る際に、物質の厚さに応じて起こすエネルギー損失と、同時に起こす多重散乱の大きさとの関係。物質の厚さは表に出ていない。

子の場合と比べ200分の1の原子軌道を取りながら、ミュオン原子という原子をつくることが知られています。

図11のミュオンの止まった状態が出す色々な信号を使って反射型ラジオグラフィーを行うことですが、まず正ミュオンの磁気的プローブ性を議論したいと思います。

ミュオンはパイ中間子から生まれる時に、図12に示すように、素粒子反応の性質から、スピンという磁気的なコマの向きをそろえて生まれます。そろえて生まれたミュオンスピンは、物質に止まってもそろい具合が変わりません。そのうえで寿命がきて陽電子を出しますが、陽電子は必ずスピンの方向に非対称に出ます。陽電子のエネルギーが50MeVと大きいので、1cmから10cmの物質を抜けて出てきます。かくしてミュオンを物質に止めると、そこから反射的に出てくる陽電子がミュオンのスピンの向きを教えてくれます。

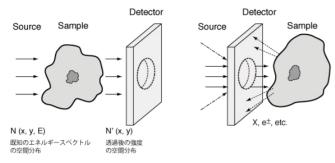
ミュオンが止まった原子レベルの場所に 色々な磁場がかかると、ミュオンスピンが運 動を始めます。磁場の性質 に応じて回転したり揺らい だりします。そのミュオン スピンの運動を物質の外に 置かれた陽電子のカウンタ ーで観測することができま す。このようにしてミュオ ンを物質に止め、そこから 反射的に発生する陽電子の 強度の時間変化から、ミュ オンの止まった場所の原子 レベルの磁場の様子を見る ことができます。この観測 法はμSR法と言われていま すが、特に山崎敏光東大名 誉教授が中心となって始め られたゼロ磁場 u SR法では、 ミュオンスピンが感じる原 子レベルの磁場と陽電子強 度の時間変化の間には図13 のようなガイドマップがで

きています。物質中にミュオンを止め、外に 出てくる陽電子の時間的な動きを見るだけで、 ミクロな磁気コンパスとしてミュオンを使う ことができます。

μSR法はミュオンが死んで生まれる陽電子とニュートリノが外に出てくるので、完全に非破壊的で、放射線効果は無視できます。 さらに磁場をかけなくても、いかなる温度でも使えるという利点があります。

μSR法を他の方法と比べてみましょう。 先ほどお話しがあった中性子散乱とかシンク ロトロン放射光を使って物質を探求する方法 では物質での散乱を見ますが、μSR法では 磁気コンパスを物質中に置いて周囲の原子からの磁場を観測しているところが違います。 そういう意味では、NMRとかメスバウワー 効果とか物質中の原子核を観測手段とする方 法とよく似ています。ただし置かれる場所が 違う他、感度その他に相当違いがあります。

色々な実験手法は常に相補的であって、 色々な知見を互いに共有しながらの物質の本



加速器によりパイオンを生成、
few MeV・パイオンが崩壊してミュオンができる
ミュオンが減速され
物質中に止る

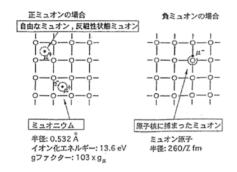


図11 ラジオグラフィーの二つの方法;透過法と反射法(上)。 ミュオンから反射型信号を得るためにミュオンを物質中 にとめた時にミュオンがとる状態;反磁性正ミュオン、 ミュオニウム及び負ミュオン原子(下)。

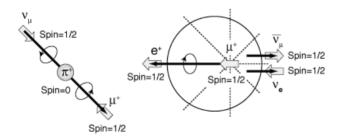


図12 正パイオン崩壊で正ミュオンが生まれる際にミュオンがスピンをそろえて生まれる様子(左)。止まった正ミュオンが崩壊する際に陽電子が空間的に非対称に放出される(右)。

質を探っていくことが大切です。ラジオグラフィー以外でも、 μ SR法による研究は色々なことに使われています。私がラジオグラフィーで μ SR法を取り上げたのは、物質の原子レベルの磁性を足場にして新しいラジオグ

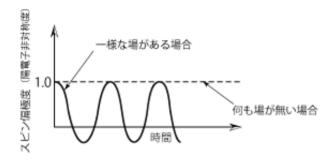
ラフィーができるという点にあ ります。

最初の例として、図14を使っ て鉄筋コンクリートの内部を調 べることをお話します。大型建 造物、特に鉄筋コンクリートの 腐食が問題になっていますが、 実際に鉄が腐食して、あるいは 膨らんでいるか、反射型ミュオ ンラジオグラフィーで測れます。 加速器で得られるミュオンのエ ネルギー/速度を変えながらミ ュオンビームを導いていくと、 ミュオンの深さ方向の止まる位 置を変えることができます。ビ ームや対象物を上下左右に動か すことにより、上下左右方向に ミュオンの止まる位置を変える ことができます。コンクリート にミュオンが止まると、ミュオ ンスピンはじっとしたままです。 ところが鉄に止まると、鉄の磁 性を感じてクルクル回り始めま す。腐食の度合に応じて鉄の磁 性が変わり、ミュオンスピンの 回転の様子が変わります。かく して、コンクリートのかぶり厚 という10~20cmぐらいの中に ある鉄棒の腐食具合を見ること ができます。

加速器施設に持ってくる試料をベースに基礎データを積み上げ、あとは小型加速器でミュオンをつくって建造物現場に持っていくことになります。

対象がだんだん小さくなって きましたが、次は人体です。 μ

SR法ラジオグラフィーで人体の、特に脳のイメージングを実現し、最終的には脳機能について、他の方法ではできないことを、素粒子ミュオンでやろうというのが最終目標です。 μ SR法では、放射線効果は極めて少なく、



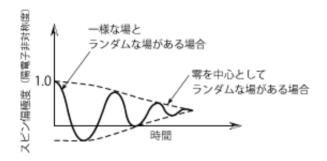


図13 物質中でミュオンが感じる原子レベルの磁場の状態でミュオンスピンが運動する様子の例。静的な一様な場がある場合 (上)、静的な一様な場に乱れた場が加わった場合(下)。

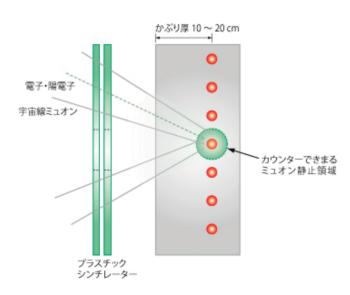


図14 鉄筋コンクリート中にミュオンを止め、ミュエスアール信号 で反射型ラジオグラフィーを観測する概念図。

普通のレントゲン写真の10分の1以下です。 まず最近私どもの行ったμSR法の結果か ら入ります。血液の中にはヘモグロビンがあ

ります。図15のようにヘモグ ロビンには4個のヘム鉄があ って、そのヘム鉄の周りに 色々な分子の鎖がつながって いますが、血液中のヘモグロ ビンは肺で酸素を受け取り、 オキシという状態になり、筋 肉や脳の活動に応じて酸素を 吐き出しデオキシという状態 になります。そのときに酸素 のつながっている状態、酸素 がない状態の二つで磁気的な 性質が違います。デオキシは 磁性を持っていますが、オキ シは磁性がなくなります。 MRIで脳の機能を測っている のは、この磁性の違いをベー スにしています。

ミュオンをヘモグロビンの 中で止めたらどうなるでしょ うか。先ず正ミュオンの止ま る場所ですが、ヘモグロビン は鉄だけが正の電荷を持って いて、その周りにちょっと負 になった部分があって、そこ に向かってミュオンが止まり ます。 μSR法の結果は図15に 示すように、縦軸にミュオン のスピンのそろい具合/偏極を とり、横軸に時間をとり、時 間とともにどのぐらいそろい 具合が乱れるかということが 測定されています。デオキシ では非常に早くそろい具合が 乱れる部分があり、その後変 化しません。オキシのほうは 始めにちょっと減って、その 後ゆっくりと変化します。こ こに外から磁場をかけるとス

ピンのそろい具合/偏極が回復してきますが、 その回復の仕方もデオキシとオキシでは違い ます。

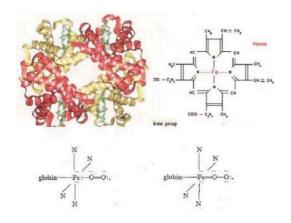
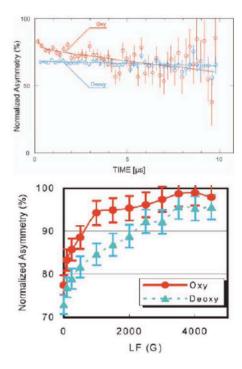


図15 ヘモグロビンの分子構造とデオキシとオキシのヘム鉄イオンの状態(左)。オキシとデオキシヘモグロビンのミュエスアール測定結果;常温ゼロ磁場でのスピン緩和時間スペクトル(左上)外部磁場によるスピン偏極の回復(左下)。



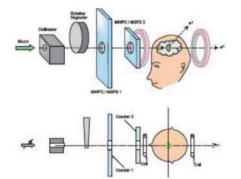
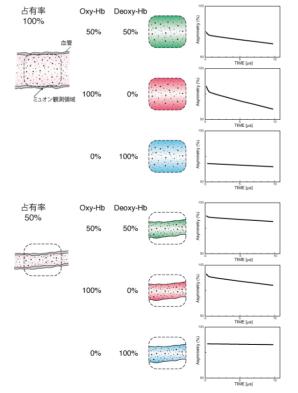


図16 ミュオンを人体の頭脳に止め、ミュエスアール信号から、脳内の血流の磁化を観測している概念図(左)。ミュオンの止まる位置での血管の大きさと血液中のヘモグロビンのオキシ度に応じてミュエスアール信号が変化する様子(右)。



すぐにスピンが乱れ、磁場をかけて回復しにくいという性質は、デオキシが磁性を持っていてオキシは磁性を持っていないということに対応しています。一方、磁性がないオキシで何故ミュオンスピンのそろい具合がゆっくり乱れるのでしょうか。ミュオンのエネルギーがエネルギーを失ってへム鉄の近くに止まりますが、止まる際にオキシヘモグロビンの磁性を持つ分子状態を励起するためであると理解されます。

図16では、人体の脳に向かってミュオン を止めることを考えています。ミュオンビー ムのエネルギーと方向をコントロールしなが ら、mmの精度で脳の中にミュオンを止め u SR法を適用します。J-PARCなら脳の10cm 以上の深さの1mm以内のオキシ、デオキシ を数秒で測れます。磁場は一切不要で、オキ シヘモグロビンの励起状態もモニターします。 「ミュオン観測領域」は、3次元的に決めた ミュオンの止まる場所で、その大きさが血管 の太さと同じぐらいなのか、それとも血管が 収縮しているのかという収縮具合と、オキシ の成分度をより分けて測ることができます。 この性質はたぶんMRIにはないので、いつの 日か、素粒子が人間の脳のわからない機能を 見るという時代が来ると思われます。

さらに進んで、ナノ材料のイメージングを 考えたいと思います。スピントロニクスに使

われる材料を考えます。普通 の携帯電話は電気量のオン・ オフで情報を伝達しますが、 スピンのそろった電子があるピ ンがどのちを向いて、情報 いう信号を導入し、なり、だろり になかが信号を導入とになかが情報 をという言葉が生まれ、その たという言葉が生まれ、その ための物質開発、関発が盛んに 研究されています。 通常の半導体であるシリコン、ゲルマニウム、グラファイトでは注入された伝導電子のスピンの状態は観測しにくく、研究はガリウムヒ素をもっぱら対象にしています。ガリウムヒ素の場合は、どちらに向いているかということが格子のひずみに影響を与えることがわかっていますので、格子のひずみを測ることによってどちらを向いているかがわかるからです。もしミュオンをスピントロニクス物質中に止めると、ミュオニウムができて、その電子と注入されたスピンがそろった電子との間でスピンを交換する反応が起こります。伝導電子がどう偏極しているかということは、シリコン、ゲルマニウム、グラファイトなどと、何でもできます。

このミュオンによる電子スピン偏極観測法を、伝導電子のスピンのそろい具合のわかっているガリウムヒ素についてやらなければいけないということで、方法の検証実験をいたしました。縦軸にミュオンスピンのそろい具合/偏極度を取り横軸に時間を取り、図17に結果を表現します。絶対温度15度にガリウムヒ素を冷やして、レーザーでガリウムヒ素の中によくわかっているスピンのそろった伝導電子をつくります。そこにスピンのそろう方向を平行にした場合と反平行にした場合との違いをみます。素粒子ミュオンが半導体中の伝導電子スピンのそろい具合を定量的にきち

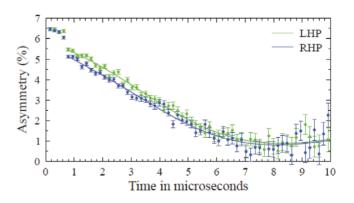
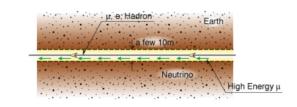


図17 ガリウム砒素中にレーザーによって注入されたスピンがそろった伝導電子によりミュオンスピンの偏極が変化する様子、 外場零の場合;平行の場合(緑)と反平行の場合(青)。レ ーザーは0.7マイクロ秒に印加されている。

Neutrino Passage and Reaction Products through Earth



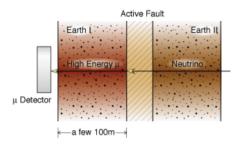


図18 地中を通るニュートリノによってミュオンが生まれる様子 (上)。活断層があった場合にニュートリノ反応で発生する 高エネルギーミュオンで感知している概念図(下)。

んととらえることに成功しました。実験には、 提案者である鳥養映子山梨大学教授の他、カルフォルニア大学-KEK-理研-RALの研究者が参加しました。ミュオンの止まる場所をナノmのスケールでコントロールすることで、伝導電子スピン偏極のラジオグラフィーが実現します。

ここまで素粒子ミュオンによるラジオグラフィーで、火山、溶鉱炉、核燃料棒、人体、ナノ材料の中を調べることをお話ししてまいりましたが、私には常に「お前はこれでいいのか」という天の声が聞こえてきます。それは何かというと、「素粒子や加速器やすごいことをやっているのだから、地震予知までなぜやらないのか」ということです。加速器や素粒子で地震予知に何かをすることは、避けては通れない問題です。

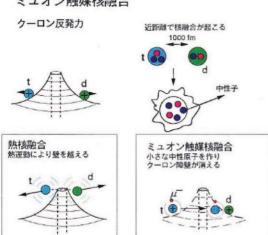
地震予知の新しいデータベースとして、地 殻の時間変動、特に地下活断層の動きを捕え ることが重要であると思われます。そのため に素粒子や加速器で何ができるでしょうか。 数kmから数10kmの距離のスケールで地下の 様子を探るには、宇宙線ミュオンでは駄目で す。唯一の可能性は、高エネルギーニュートリノを使うことです。ニュートリノはエネルギーの増加とともに地中で止まるようになり、1,000GeV(1 Tev)では10°m、その100倍で地球の直径位になります。従って何処かに超高エネルギー加速器があって、地下にねらいをつけてニュートリノを発すれば、地層のラジオグラフィーが出来るはずです。

関連する理論研究の論文 (DeRujula-Glashow-Wilson-Charpack, Physics Reports, 99 (1983) 341) があります。10-20TeVという大きなエネルギーの陽子の大強度加速器をつくって、ニュートリノをつくり利用

することが論じられています。透過性の良いニュートリノを地球の中を通して、この論文では地殻構造ではなくて、地殻の中にある鉱石とかオイルを探すということを考察しています。観測方法として色々なことが提案されていますが、高いエネルギーニュートリノを送って、地中で反応させミュオンに変えて測りやすくして、ニュートリノで地球の中の様子を測ることが示されています。

図18のように、高エネルギーニュートリノが地中にやってくると、二通りの反応をします。一つは、原子核と反応してミュオンが出るもので、出るミュオンのエネルギーが低くニュートリノが来て反応が起こったということは土の厚さで数mから数10m程度です。一方、ニュートリノ電子反応というものがあり、ニュートリノが土の中の電子にぶつかって高エネルギーのミュオンになり、数100m通過します。これらの反応はニュートリノが通っている間しょっちゅう起こっているので、どこを通っても、頻度は非常にわずかですが、ハドロンシャワーができている部分と、真っ直ぐミュオンが出る部分ができています。

ミュオン触媒核融合



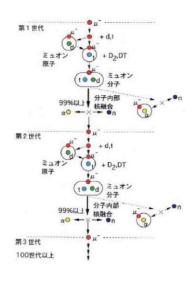


図19 ミュオン触媒核融合の原理;負ミュオンが二つの原子核を引き寄せ小さな分子を作り核融合反 応を起こす原理図と熱核融合との比較(左)と一つのミュオンが連鎖的に100回以上の核融合 反応を起こす様子。

もし高エネルギーニュートリノの通り道に 活断層があって、数100m先の位置に高エネ ルギーミュオンの検出器があったとすると、 活断層は普通の土壌に比べると密度が数割低 いと言われているので、ニュートリノの反応 が減り、高エネルギーのミュオンの強度の減 衰が起こります。数100m先の地下の活断層 が見えるわけです。見えたらそれの時間的な 変動を追うことによって、地震予知に繋がる 地下活断層の活動状況を知ることができるの ではないでしょうか。

この考えの真偽をテストすることができま す。先ほどお話のあったJ-PARCのニュート リノ振動実験には、東海からのニュートリノ ビームの内、やや低いエネルギー成分がスー パーカミオカンデと将来のハイパーカミオカ ンデに行き、ニュートリノビームの強い部分 が、両方の中間点を通るように計画されてい ます。その中間点に跡津川断層があります。 跡津川断層の地下観測所の何処かにミュオン 検出器を置き、東海からのニュートリノビー ムを眺めてますと、エネルギーが低く時間が かかりますが、1年ぐらいかけると活断層が

あるのが判るはずです。それが始まりで、将 来さらに高エネルギー・大強度の加速器をつ くる計画に進む手始めになるのではないかと 思います。

21世紀の間に何とか地震を天気予報のよう に予知できることを可能にするためには、 色々な人が色々なことを考えて、色々なもの を登場させなければいけません。この方法は その一つになるかもしれません。

最期に、ラジオグラフィー以外の素粒子の 利用ということも考えて見ましょう。最初に 述べたように、科学には観察と創造という立 場があって、観察の一つがラジオグラフィー で、素粒子が実現する新しいことをこれまで お話ししました。

一方自然現象に参画し、暮らしに役立てる 創造ということも、サイエンスの重要な立場 の一つです。その代表的なものは原子力エネ ルギーの生産です。素粒子ミュオンはまずは こちらの方向で注目されて、私自身もいまま での研究生活の半分ぐらいはこれにかけてき ました。21世紀のエネルギー問題を解決する 原子力エネルギーとして核融合に期待がかか っています。素粒子ミュオンが核融合を起こ し、エネルギーを生むことができることをご く簡単に紹介しましょう。

ミュオン核融合はすでに実現していて、ブレークイーブンにあと一息です。図19に示すように、原理は非常に簡単です。重い電子である負ミュオンを、核融合を起こさせる重水素や3重水素の原子核に近づけますとクーロン反発力がなくなって、二つの原子核を引き寄せ小さい分子をつくり、すぐに核融合を起こします。それに対して熱核融合は、正の電荷がある二つの原子核の反発力を越えて近づけるために、1億度もの高温にして熱エネルギーで近づける確率を増やします。

核融合を起こした後、ミュオンはまた自由になって、自由になった後にまた核融合を起こし、繰り返しエネルギーを生みます。ミュオンの2.2マイクロの寿命の間にたくさん核融合を起こさせる必要があります。一つのミュオンが150回以上の触媒反応を起こすことが実験でわかっています。300回ぐらいを超すとミュオンを創るに必要なエネルギーより、ミュオンが核融合で生むエネルギーが大きくなり、ブレークイーブンとなります。

私どものグループを中心として研究が進展していて、重水素の分子状態をコントロールして、常温近くで高圧の3重水素との混合系をつくれば、ミュオン1個あたり1,000回ぐらいの核融合を起こすことが期待できます。

一方、今知られている実験事実を足場にするだけでも、ミュオン核融合を強力な中性子源と考えて、加速器を使って軽水炉核燃料を増殖させるADSと呼ばれる計画の中に複合する形で組み込むことにより、ADSの生産効率を飛躍的に向上させることも可能です。

ミュオンをはじめとして、加速器や宇宙線で得られる素粒子ビームが地球規模からナノスケールまで、物質の内部探索に有用であることは間違いありません。ここにお話したこれまでの成果はほんの一端で、素粒子ラジオグラフィーはますます発展すべきです。私は常に「一寸先は闇」だと思っています。特に

地震予知に関連する地下の地殻・地層のことはそうで、数メートルから先は何もわからないと考えるべきでしょう。とにかく素粒子を使った新しい探索方法をどんどん進めるべきではないかと思います。

一つ進むと二つぐらい先が見えてくるということがありますので、日本の地で世界をリードするJ-PARC加速器が稼動することは、喜ばしい限りです。素粒子を主体にするラジオグラフィーという例で示しますように、われわれの生活をさらに豊かにしてくれるような研究の発展が今後期待できます。

ご清聴を感謝いたします。